

転がり軸受技術の進展と将来展望<sup>\*1</sup>

## Progress and Prospect of Technologies for Rolling Bearings

林田一徳 K. HAYASHIDA 松山博樹 H. MATSUYAMA

Rolling bearings are mechanical elements that guide the rotation while supporting the load by rolling motion of rolling elements. They are used for supporting the rotating shaft of various industrial machines and contribute to reduction of energy consumption and heat generation by reducing friction, suppression of wear and prevention of seizure. Rolling bearings have been improved in reliability and high performance by the evolution of materials and tribology technology. In this report, the progress and future prospect of rolling bearing technology is described, focusing on the birth and evolution of tapered roller bearings which has played a major role in the development of the automobile industry, taking examples of life improvement technology by material and heat treatment and friction reduction technology.

**Key Words:** rolling bearings, tribology, material, heat treatment, friction torque, tapered roller bearings

## 1. はじめに

転がり軸受<sup>1)</sup>は転動体と呼ばれる部品の転がり運動によって荷重を支えながら回転を案内する機械要素である。転がり軸受はさまざまな産業機械の回転軸の支持に用いられ、摩擦の低減によるエネルギー消費や発熱の低減、摩耗の抑制、焼付き防止などに貢献する。「産業の米」とも呼ばれ、今日の産業社会を支える転がり軸受は、材料やトライボロジー技術の進化によって信頼性の向上と高性能化が図られてきた<sup>2~4)</sup>。特に、現代の生活に欠かすことのできない自動車と転がり軸受の結びつきは強く、転がり軸受技術の歴史は自動車に使われる軸受の歴史に相当すると言っても過言ではない<sup>5~7)</sup>。

本稿では、転がり軸受の中でも特に自動車産業の発展に大きな役割を果たしてきた円すいころ軸受<sup>1, 8, 9)</sup>の誕生と進化に注目し、材料・熱処理による寿命向上技術および摩擦低減技術を例に挙げて、転がり軸受技術の進展と将来展望について述べる<sup>10)</sup>。

## 2. 転がり軸受の誕生と進化

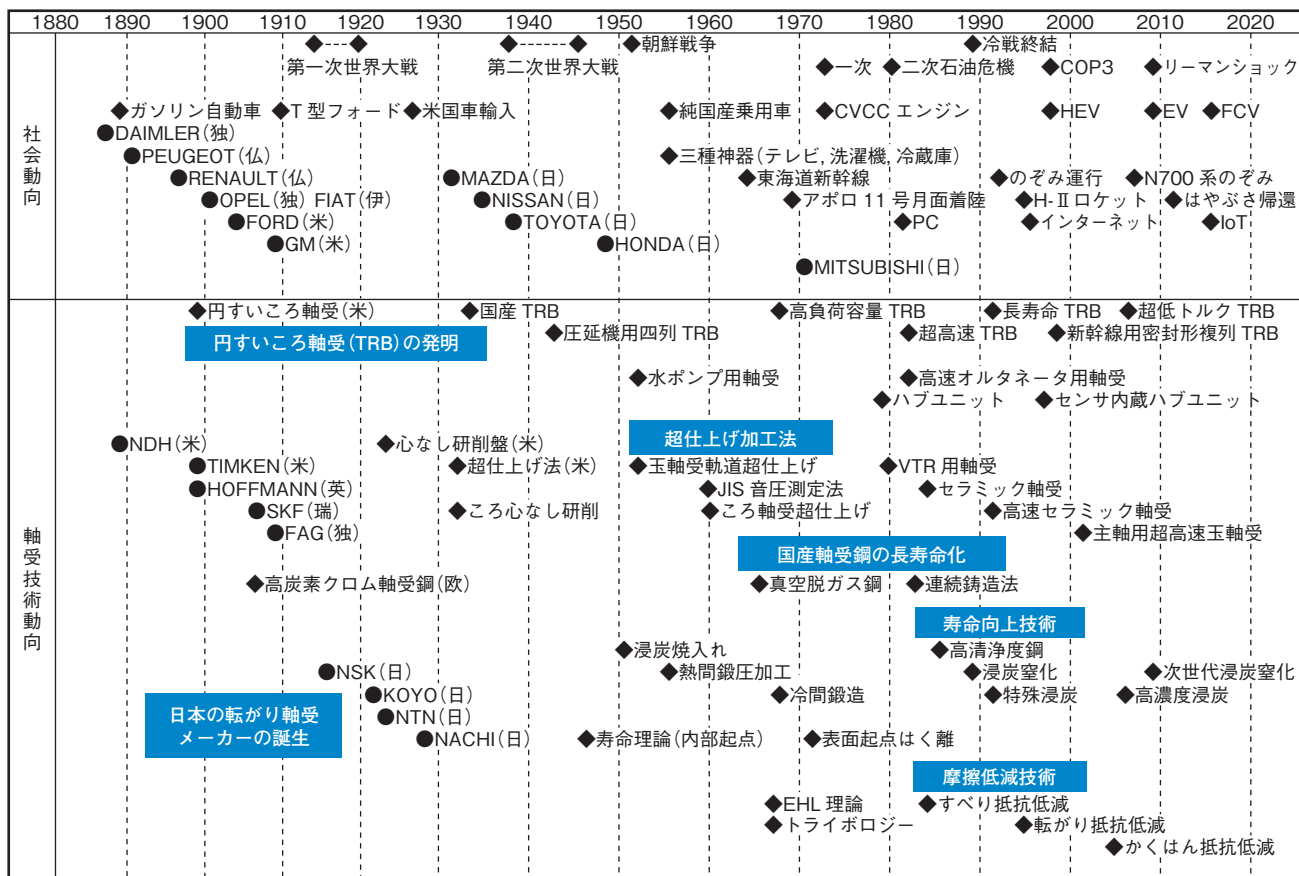
## 2.1 転がり軸受の誕生

古来より人間は重量物を運搬する必要があった。紀元前3000年代には車輪付き運搬具が用いられ、紀元前700年頃までには丸太をそりに使用する「転がりそり」が考案されるなど、摩擦を減らすために転がり運動が利用された<sup>11)</sup>。15世紀後半から16世紀にかけてLeonardo da VINCIによって転がり摩擦の研究が初めて行われ、現代の転がり軸受の原形<sup>5)</sup>が考案された。転がり軸受は産業革命期（およそ1750～1850年）に著しく発達し、1772年にはVALRO<sup>11)</sup>によって馬車の車軸用玉軸受が提案され、1787年にはGARNETT<sup>11)</sup>が車軸用ころ軸受の特許を取得した。

転がり軸受産業の歴史は角田の解説<sup>12)</sup>が詳しい。同解説を参考にした転がり軸受産業の誕生と発展の歴史を表1に示す。転がり軸受が実際に多く使われ始めるようになったのは19世紀後半で、欧米を中心に転がり軸受メーカーが創立された。これは欧米の自動車メーカーの創立時期と重なる。産業革命による工作機械の発展や研削技術の向上によって高精度化と大量生産が可能となり、軸受が飛躍的に使われるようになった。

\*1 本報は、トライボロジスト 第61巻 第11号 (2016) 734-741 を転載した。

表1 転がり軸受産業の誕生と発展の歴史<sup>12)</sup>  
History of birth and development of rolling bearing industry



## 2.2 玉軸受

玉軸受を大幅に発達させたのは自転車である。初期の自転車にはすべり軸受が使用されていたが、1862年に玉軸受を装着した自転車が発明されると、自転車の摩擦が1/5～1/10に下がり、最高速度が上がったと言われている<sup>11)</sup>。玉軸受の普及はより高精度で高強度な鋼球を製造してほしいという要望につながり、1898年にHOFFMANNによって鋼球製造会社が設立されて精度のよい玉が製造できるようになった。同社は20世紀初頭には高精度の玉軸受メーカーに成長した。

## 2.3 円すいころ軸受

玉軸受の発達を促進したのが自転車ならば、円すいころ軸受の発達を促進したのは馬車であり、自動車であった。円すいころ軸受は19世紀末のアメリカで馬車の車軸用として発明された。当時の車軸に使われていた玉軸受は壊れやすかった。既に馬車事業を成功させていたTIMKEN<sup>13)</sup>は1898年に軸と円すいころ軸受を一体化した組立品の米国特許<sup>5)</sup>を取得した。それらは、馬車

の回転時やでこぼこ道を走行する際の荷重を無理なく支えらるとともに、軸端のナットの締め付けで軸受摩耗を調整可能とし、車両の静摩擦と動摩擦の両方を25～50%低減した<sup>11)</sup>。

20世紀初頭、円すいころ軸受は自動車の車軸に適用された。1908年に発売されたT型フォードは大量生産されて人気を博したが、その足回りには円すいころ軸受が採用された。大きなラジアル荷重と回転時に作用するアキシアル荷重の両方を支えるための改良が幾度も重ねられた結果、1924年には現在とほとんど変わらない円すいころ軸受の形・構造<sup>13)</sup>となり自動車の発展に貢献した。

## 2.4 日本の転がり軸受技術の進化<sup>14)</sup>

日本の主要な転がり軸受メーカーは1910年代半ばから相次いで創業した。この時期は第一次世界大戦後の富国強兵策に従った軍備拡張の時期にあたるが、輸入自動車が増え始めるなど、民需の影響も大きかった<sup>15)</sup>。当時の国産軸受の品質は輸入品には及ばず、その状況は第二次世界大戦後まで続いた。

1952年、通産省機械試験所の指導の下、国内メーカー大手4社は共同で取り組んだ超仕上げ加工法の開発に成功し、これを機に日本の転がり軸受の加工精度は飛躍的に向上した。世界的に見て1950年代という早い時期に日本の転がり軸受の表面粗さは $\mu\text{m}$ 以下になった。1960年には、転がり軸受の騒音測定法に関するJIS規格が制定された<sup>6)</sup>。こうして日本の転がり軸受の低振動、低騒音化が進んだ。

また、戦前から国産軸受の寿命がスウェーデン鋼製軸受に比べて短いことが問題視されていたが、真空脱ガス処理技術の適用により鋼中酸素量の低減に成功、1980年代に連続鑄造技術が導入され、酸素量5ppm程度までの高纯净度を実現した<sup>16)</sup>。酸化物系介在物の減少により、日本の軸受鋼の寿命は従来の大気溶解鋼の30倍ほど長くなり<sup>16)</sup>、スウェーデン鋼よりも長寿命となった。

### 2.5 円すいころ軸受の国産化と技術の進展<sup>15)</sup>

日本で円すいころ軸受の生産が本格化したのは1933年頃である。この頃、輸入自動車が増し、補修用軸受の需要が大量に発生していた。当時の円すいころ軸受のパフレットを図1に示す。この量産化の成功には、心なし研削盤のころ研削加工への適用<sup>17)</sup>をはじめとする生産技術の開発が大きく寄与した。当時はTIMKEN以外に円すいころ軸受の生産は不可能と言われていたので、需要家はもちろん、一般産業界にも驚異の眼をもって迎えられた。なお、円すいころ軸受の国産化と前後して日本の主要な自動車メーカーが相次いで創業した。1943年には国内鉄鋼設備の圧延機ロールネック用大型四列円すいころ軸受の国産化<sup>18)</sup>にも成功した。

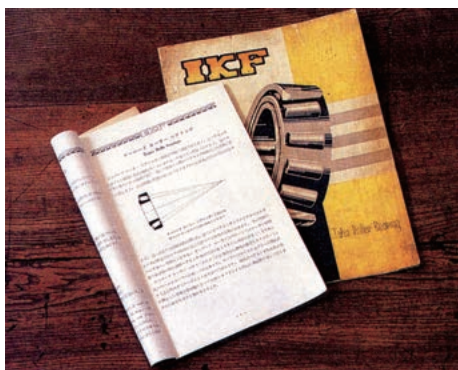


図1 円すいころ軸受のパフレット<sup>15)</sup>  
Pamphlet of tapered roller bearings

第二次世界大戦後、1950年に浸炭焼入れ技術が確立され、肌焼鋼<sup>19)</sup>を用いた薄肉タイプの円すいころ軸受の生産が可能となった。1968年には冷間鍛造技術の導入によって、小型薄肉でも大きな荷重に耐えられる高負荷容量タイプの円すいころ軸受<sup>20)</sup>の生産が開始された。従来の熱間鍛造に比べて鋼の鍛錬比が飛躍的に向上し、強度、特に靱性が非常に優れ、軽量化に十分に対応できる薄肉化が可能となった。さらに、非常に精度の高い鍛造品を得ることができるため、旋削工程の省略が可能となった。本技術による品質と生産性の向上により、自動車用軸受の需要増大や長寿命化の課題への対応が可能となった。

### 3. 材料・熱処理による寿命向上技術

転がり軸受の軌道輪および転動体は局部的に数GPaに及び高い接触応力に耐える必要があるため、十分な強度と転がり疲れ寿命を有すること、高い耐摩耗性、良好な寸法安定性などの機能が求められる。これらの要求に応えるには適切な材料の選定と最適な熱処理を行うことが重要であり、一般的な高炭素クロム軸受鋼SUJ2の品質向上や熱処理方法、条件の改良、肌焼鋼の適用などが行われてきた。転がり疲れによる損傷ははく離と称され、その損傷形態は使用環境や条件によって異なる。はく離の種類とメカニズム<sup>8)</sup>を図2に、清浄あるいは摩耗粉等の異物が混入した潤滑剤中での寿命向上の考え方と対応策<sup>21)</sup>を図3に示す。以下では、主としてディファレンシャルやトランスミッションなどの自動車用途で要求が厳しい表面起点はく離に対する寿命向上技術を紹介する。

種類	汚れ油中のはく離		清浄油中のはく離	
	表面起点はく離	混合はく離	圧痕起点はく離	内部起点はく離
外観				
メカニズム	小さな硬い粒子による摩耗の一種	小さな硬い粒子による摩耗と大きな硬い粒子による塑性変形から進展	外力または大きな硬い粒子による塑性変形から進展	最大せん断応力深さにある材料欠陥が進展

図2 はく離の種類とメカニズム<sup>8)</sup>  
Types of flaking and mechanism



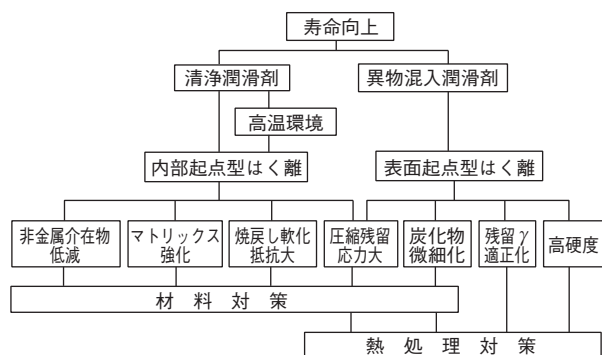
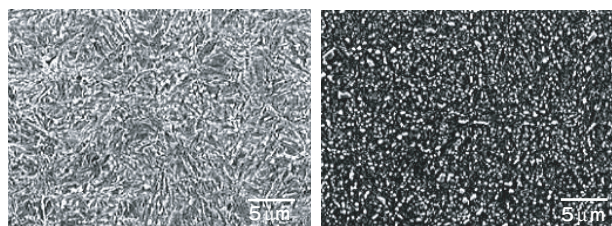


図3 寿命向上の考え方と対応策<sup>21)</sup>

Life improvement and countermeasure by material and heat treatment

図2に示すように、表層はく離は小さな硬い異物が潤滑油に混入した場合に発生しやすく、アブレイブ摩耗に近いものと考えられる。このような摩耗に対しては表面を硬くすることと材料基地中の炭素量増加が有効である。圧痕起点はく離は大きな硬い異物が転動面にかみ込まれて形成される圧痕縁の盛り上り部を転動体が通過する際の応力集中を原因として発生する。この対策としては、表面を硬くすることや残留オーステナイト（以下、残留 $\gamma$ ）の増量が有効である。

材料・熱処理技術の改善による転がり軸受の寿命向上技術<sup>21~26)</sup>を表2に示す。先に述べた表面起点はく離に対して、浸炭窒化<sup>23)</sup>や特殊浸炭熱処理<sup>24)</sup>による長寿命化が可能である。さらなる長寿命化技術として、微細炭化物の析出強化（図4）によって高い表面硬度と残留 $\gamma$ 増量の両立を可能とする高濃度浸炭技術<sup>25)</sup>や、合金元素の適正化によって硬さを低下させずに残留 $\gamma$ を増量させる新たな浸炭窒化技術<sup>26)</sup>が提案されている。図5



(a) 従来浸炭品 (b) 開発高濃度浸炭品

図4 熱処理後の材料組織比較

Comparison of microstructure after heat treatment

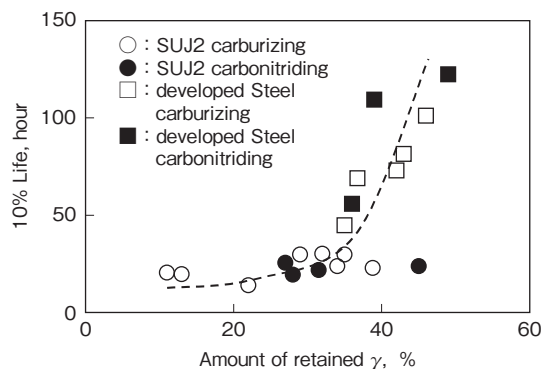


図5 残留 $\gamma$ 量と圧痕起点はく離寿命の関係<sup>3)</sup>

Relationship between amount of retained  $\gamma$  and  $L_{10}$  life

に示すように、硬さを維持したまま残留 $\gamma$ 量を大幅に増加させることによって寿命が著しく向上することがわかる。これらの技術は自動車や産業機械を構成する機械要素部品の小型軽量化と信頼性向上に貢献できる。

#### 4. 摩擦低減技術

円すいころ軸受は同じ空間容積を有する玉軸受に比べて2~2.5倍程度の大きな負荷容量を有し、衝撃荷重に

表2 材料・熱処理の改善による転がり軸受の寿命向上技術

Improvement technologies of rolling bearing life by improving material and heat treatment

開発・提案技術	特長 (材料組織的特徴)	開発対象		寿命比(標準軸受比)	
		材料	熱処理	清浄油中	異物油中
高纯净度鋼 <sup>22)</sup> (1985)	特殊溶解鋼に匹敵する長寿命 介在物形態制御	軸受鋼	普通焼入れ	3倍以上	同等
浸炭窒化 <sup>23)</sup> (1989)	高硬度、圧縮応力付与 残留 $\gamma$ 増量	軸受鋼	浸炭窒化	3倍以上	6倍以上
特殊浸炭 <sup>24)</sup> (1992)	高硬度 残留 $\gamma$ 量適正化	肌焼鋼	特殊浸炭	2倍以上	10倍以上
高濃度浸炭 <sup>25)</sup> (2004)	高硬度、残留 $\gamma$ 増量 微細析出物増量	肌焼鋼	高濃度浸炭	4倍以上	15倍以上
次世代浸炭窒化 <sup>26)</sup> (2009)	高硬度、圧縮応力付与 残留 $\gamma$ 超増量 微細合金析出物増量	軸受鋼	浸炭窒化	4倍以上	8倍以上

強く、剛性が高いことから、玉軸受よりもコンパクトに回転軸を支持することができる。このため、円すいころ軸受は自動車のディファレンシャルやトランスミッションなどの駆動装置をはじめ、鉄鋼圧延設備や建設機械、鉄道車両などのあらゆる産業機械で使われている。しかし、円すいころ軸受は玉軸受に比べて一般的に摩擦トルクが高く、発熱が大きい。円すいころ軸受の摩擦トルク発生要因<sup>27)</sup>を図6に示す。潤滑油膜の形成が不十分な低速域では内輪大つば（以下、つば）ところ大端面（以下、ころ端面）の間のすべり摩擦抵抗が支配的であり、油膜が形成されて流体潤滑に移行する高速域ではころと軌道との転がり粘性抵抗と潤滑剤のかくはん抵抗が支配的となる。

軸受の摩擦トルク低減、すなわち低トルク化は機械や装置の高効率化とエネルギー損失低減につながるため、環境負荷低減に大きく貢献する。したがって、円すいころ軸受の低トルク化は長寿命化と並ぶ重要課題として位置づけられ、古くから多くの技術者がこの課題解決に取り組み<sup>28~39)</sup>、30年以上前から低トルク円すいころ軸受（Low friction torque tapered roller bearing, LFT）が市場に提供されている。低トルク円すいころ軸受の変遷とその構成技術を図7に示す。

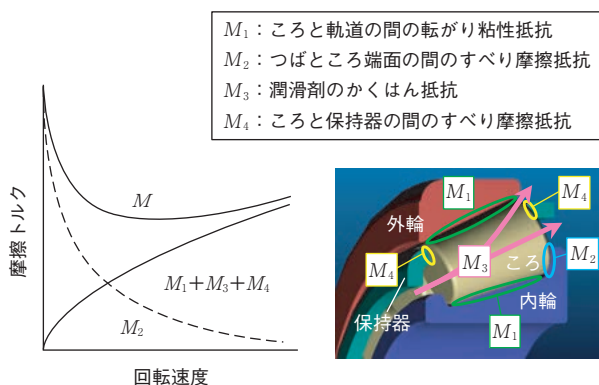


図6 円すいころ軸受の摩擦トルク<sup>27)</sup>  
Friction torque of tapered roller bearing

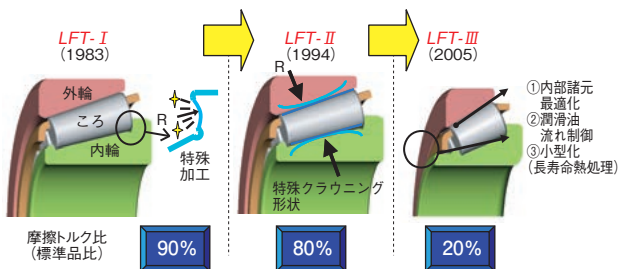


図7 低トルク円すいころ軸受の変遷と構成技術<sup>10)</sup>  
Transition of low friction torque tapered roller bearing

第一世代（LFT-I）<sup>33)</sup>では、つばに特殊加工が施され、図8に示すような十分に表面がなじんだ後の形状と粗さが最初から与えられることによって、接触面圧を低減するとともに油膜形成性を高めてつばところ端面の間のすべり摩擦抵抗  $M_2$  の低減が図られた。

第二世代（LFT-II）<sup>34)</sup>では、さらに内輪および外輪軌道に特殊クラウニング形状が施され、ころと軌道との転がり接触面積が減ることで、EHL（Elastohydrodynamic lubrication, 弾性流体潤滑）に起因する転がり粘性抵抗<sup>35, 36)</sup>  $M_1$  の低減が図られた。

第三世代（LFT-III）<sup>37~39)</sup>では、第二世代に対して、ころの数や長さ、直径、接触角などの内部諸元が最適化されて寿命や剛性とのバランスを図りながら  $M_1$  がさらに低減されるとともに、潤滑油が軸受構成部品の一つとみなされ、図9および図10に示すような油の流れ制御によってかくはん抵抗  $M_3$  が低減された。さらに、前述の寿命向上技術<sup>24)</sup>の適用によって寿命を維持したまま軸受を小型化することで  $M_1$  と  $M_3$  の低減が図られた。第三世代低トルク円すいころ軸受は標準的な軸受に対して同一サイズで50%、小型化効果を含めると80%の低トルク化が可能であり<sup>39)</sup>、自動車の省エネルギー化による環境負荷低減に大きく貢献している。

軸受	従来	LFT
つば		
形状	円すい面	特殊曲面
粗さ	普通	良好

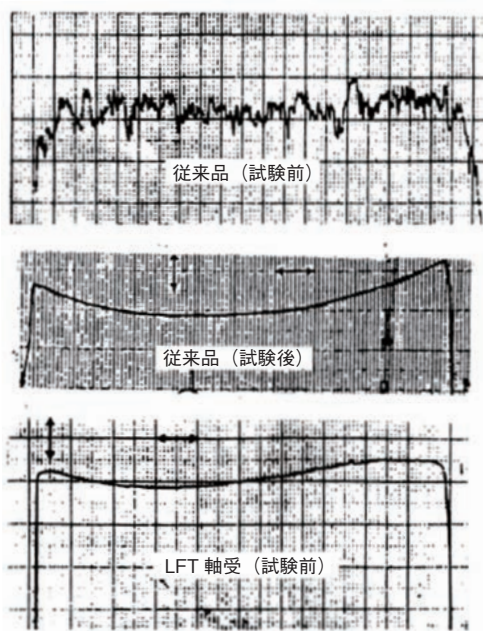


図8 円すいころ軸受のつばの形状と粗さ<sup>33)</sup>  
Profile and roughness of inner rib face of tapered roller bearing

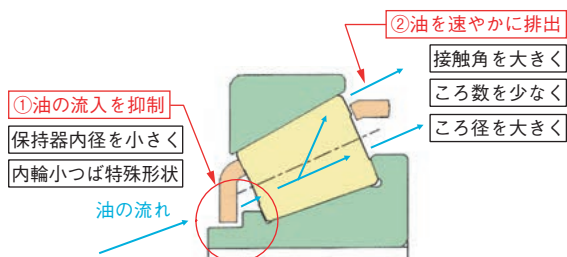


図9 かくはん抵抗低減のための潤滑油流れ制御<sup>9)</sup>  
Lubricating oil flow control for reduction of agitating resistance

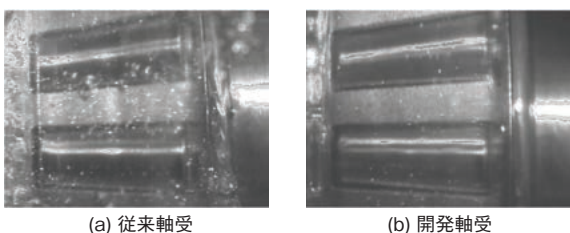


図10 軸受内部のかくはん状態の比較<sup>39)</sup>  
Observation of oil flow in tapered roller bearing

以上のような円すいころ軸受の摩擦低減技術は深溝玉軸受<sup>40)</sup>や針状ころ軸受<sup>41)</sup>、ハブユニット<sup>42)</sup>などの摩擦低減にも応用されている。さらに、玉軸受はグリースを密封して使われることが多いため、グリースのかくはん抵抗やシールのしゅう動抵抗の低減による低トルク化<sup>43, 44)</sup>が図られている。

## 5. 今後の展望

転がり軸受には今後も省エネルギーに貢献する小型軽量化および低トルク化の対応が求められる。小型軽量化を実現する寿命向上技術は「材料+熱処理」を組み合わせた開発から「熱処理」中心の開発に移行することが望まれている。その実現には、各種合金元素が寿命に及ぼす影響やメカニズムをさらに研究し、寿命向上に必要な不可欠な合金元素と熱処理で代替可能な合金元素の見極めが重要である<sup>3)</sup>。

低トルク化では、潤滑剤の粘性に起因する摩擦の低減、摩擦のコントロールがキーテクノロジーとなる。これを実現するためには、潤滑剤のさらなる削減、低粘度化とそれを可能とする設計技術、低摩擦、耐摩耗、耐焼付き性向上に有効な材料、表面改質、テクスチャリング技術が不可欠である。近年、潤滑油量のさらなる削減のために保持器形状の変更が検討<sup>45)</sup>されているが、実現するためには保持器の樹脂化が必要であり、さらに耐焼付き

性との両立が課題である。これらを解決する手段として、たとえば図11<sup>46)</sup>に示すように、遠心力で外輪側に誘導された油を焼付きが発生しやすいつば部に導く技術が考案されている。この技術を用いると給油量を1/50に減らすことが可能であり<sup>47)</sup>、潤滑油の低粘度化にも有効と考えられる。

さらに、一般的な転がり軸受においても、今後は転がり軸受の自律化によるメンテナンスフリー、IoT (Internet of Things), IoE (Internet of Everything) への対応が加速すると予想される。一例として、工作機械主軸での実用化に向けて開発中である微量潤滑軸受<sup>48, 49)</sup>を図12に示す。軸受に潤滑装置を内蔵し、極微量の潤滑剤を必要な時、必要な箇所に供給することができるため、高速主軸の潤滑方法の主流であるオイルエア潤滑と比較して、主軸構造の簡素化や機械装置の小型

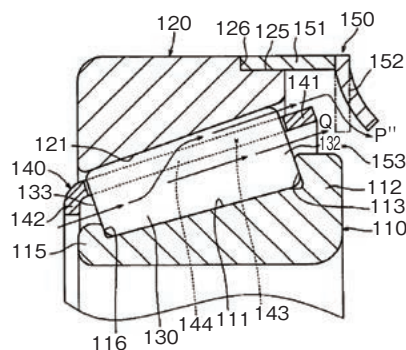


図11 微量潤滑対応円すいころ軸受<sup>46)</sup>  
Tapered roller bearing compatible with extremely small amount lubrication

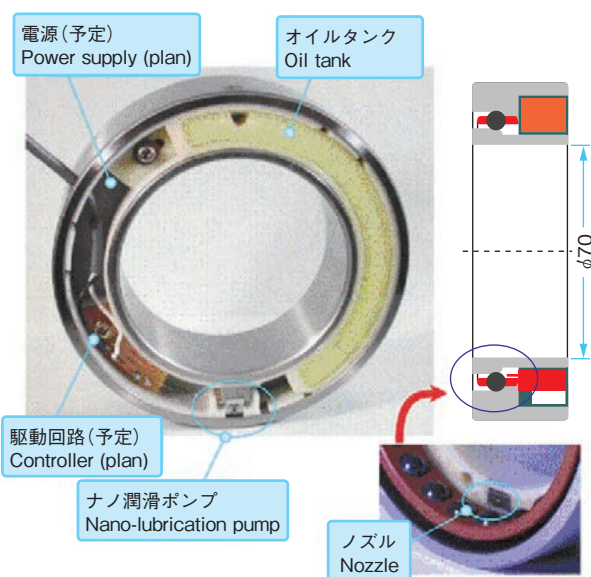


図12 微量潤滑軸受<sup>49)</sup>  
Nano lubrication bearing with lubrication device



化、オイルミストの抑制、低騒音などの効果が期待される。また、風車の主軸軸受のように、交換すると多額のコストが必要になる大型軸受を対象として、センサと無線機を搭載して軸受の運転状態をリアルタイムで監視できる技術<sup>50)</sup>が開発され、実用化に向けての取り組みが進められている。

## 6. おわりに

転がり軸受の誕生と技術の進展、特に戦後から現代に至るまでの日本の転がり軸受技術の進化について、自動車産業の発展に大きな役割を果たした円すいころ軸受の長寿命化と低摩擦化の技術を例に挙げて紹介した。本稿を通じて、先人の多大な努力と苦勞のおかげで今日の転がり軸受があり、それによって今日の産業社会が支えられていることを実感いただけたとすれば幸いである。普段はその存在を感じさせない転がり軸受は、今後も縁の下の力持ち的な存在としてさらなる進化を続けていく。

## 参考文献

- 1) ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会：図解入門よくわかる 最新ベアリングの基本と仕組み、秀和システム(2011)。
- 2) 野口昭治：転がり軸受の最新技術、トライボロジスト、Vol. 56, No. 5(2011)277。
- 3) 木澤克彦：材料・熱処理による転がり軸受の寿命向上技術、トライボロジスト、Vol. 56, No. 5(2011)283。
- 4) 戸田一寿：転がり軸受の省エネルギーとトライボロジー、トライボロジスト、Vol. 51, No. 5(2006)341。
- 5) 坪井珍彦：トライボロジーの技術史余話、社団法人日本ベアリング工業会(2000)42 & 96。
- 6) ベアリング編集小委員会：軸受技術の歴史、社団法人日本ベアリング工業会(2003)7 & 76。
- 7) 林田一徳：ジェイテクトグループの環境配慮型製品の開発・設計に関する取り組み、JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1007(2009)8。
- 8) 戸田一寿：円すいころ軸受の市場・技術動向、月刊トライボロジー、No. 212(2005)22。
- 9) 松山博樹：円すいころ軸受の摩擦トルクの予測ならびに低減技術、トライボロジスト、Vol. 60, No. 9(2015)574。
- 10) 林田一徳、松山博樹：転がり軸受技術の進展と将来展望、トライボロジー会議予稿集(2015春・姫路)A31。
- 11) D. ダウソン著、「トライボロジーの歴史」編集委員会訳：トライボロジーの歴史、工業調査会(1997)。
- 12) 角田和雄：転がり軸受、トライボロジスト、Vol. 45, No. 12(2000)894。
- 13) B. H. PRUITT : TIMKEN from Missouri to Mars - A Century of Leadership in Manufacturing, Harvard Business School Press(1998)。
- 14) 角田和雄：日本の転がり軸受技術 50 年の歩み、トライボロジスト、Vol. 50, No. 12(2005)850。
- 15) 光洋精工株式会社：光洋精工 70 年史(1993)。
- 16) 上杉年一：わが国の軸受鋼の進歩発展について、鉄と鋼、Vol. 74, No. 10(1988)1889。
- 17) 吉田岑男：円錐ころ軸受用ころの超仕上について、Koyo Engineering Journal, No. 102(1955)43。
- 18) 株式会社ジェイテクト：圧延機ロールネック用軸受カタログ、No. B2013-2(2013)。
- 19) 六山亮英、畑中秀夫：軸受用肌焼鋼の特性、Koyo Engineering Journal, No. 103(1956)26。
- 20) 上野三郎：最近の円すいころ軸受の動向について、Koyo Engineering Journal, No. 117(1970)29。
- 21) 星野照男：材料・熱処理による軸受の長寿命化について、Koyo Engineering Journal, No. 159(2001)107。
- 22) 森原源治、藤田良樹、藤本芳樹：高纯净度軸受鋼による軸受寿命の向上、Koyo Engineering Journal, No. 128(1985)20。
- 23) T. HOSHINO, M. GOTO : Life Improvement of Ball Bearings for Motorcycles, SAE Technical Paper, No. 891771(1989)。
- 24) K. TODA, T. MIKAMI, T. M. JOHNS : Development of Long Life Bearing in Contaminated Lubrication, SAE Technical Paper, No. 921721(1992)。
- 25) 後藤将夫：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)32。
- 26) K. KIZAWA, T. MIKAMI : Effect of Retained Austenite on Microstructural Change in Surface-Initiated Flaking Process of Rolling Bearings, Synopses of World Tribology Congress, Kyoto 2009(2009)351。
- 27) 松山博樹：転がり軸受の高効率化とトライボロジー、JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1009(2011)108。
- 28) D. C. WITTE : Operating Torque of Tapered Roller Bearings, ASLE Trans., Vol. 16, No. 1(1973)61。
- 29) 三木敏雄、藤田良樹、山田 健：高速円すいころ軸受の性能(第1報)：潤滑方法の検討、精密機械、Vol. 46, No. 5(1980)621。
- 30) 三木敏雄、藤田良樹、山田 健：高速円すいころ軸受の性能(第2報)：軸受サイズ、荷重、回転数、給油量の影響、精密機械、Vol. 46, No. 8(1980)953。

- 31) S. AIHARA : A New Running Torque Formula for Tapered Roller Bearings under Axial Load, Trans. ASME, J. Tribol., Vol. 109, No. 3(1987)471.
- 32) R. S. ZHOU, M. R. HOEPRICH : Torque of Tapered Roller Bearings, Trans. ASME, J. Tribol., Vol. 113, No. 3(1991)590.
- 33) 竹内正道 : LFT 軸受について, Koyo Engineering Journal, No. 127(1985)52.
- 34) 浅井康夫, 大島宏之 : 円すいころ軸受の低トルク化について, Koyo Engineering Journal, No. 143(1993)23.
- 35) H. MATSUYAMA, S. KAMAMOTO, K. ASANO : The Analysis of Frictional Torque for Tapered Roller Bearings Using EHD Theory, SAE Technical Paper, No. 982029(1998).
- 36) 松山博樹, 鎌本繁夫 : 円すいころ軸受における軌道接触部の摩擦トルク解析, Koyo Engineering Journal, No. 159(2001)52.
- 37) H. MATSUYAMA, H. DODORO, K. OGINO, H. OHSHIMA, K. TODA : Development of Super-Low Friction Torque Tapered Roller Bearing for Improved Fuel Efficiency, SAE Technical Paper, No. 2004-01-2674(2004).
- 38) 松山博樹 : 高効率デフ用超低トルク円すいころ軸受の開発, 自動車技術会シンポジウムテキスト, No. 20074875(2007).
- 39) 松山博樹, 川口幸志, 上村篤司, 益田直樹 : 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)48.
- 40) 村上正之, 高橋 譲, 岡本大輔 : 玉軸受の樹脂保持器高性能化の取組み, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1011(2013)39.
- 41) 高見澤 渉, 外山正基, 佐藤 寛, 中島義仁 : 低トルクスラスト針状ころ軸受の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1003(2007)58.
- 42) 古川圭一 : 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)49.
- 43) 香田 毅, 和久田貴裕, 魚住朋久 : EV・HEV用低トルク深溝玉軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 81(2013)40.
- 44) 滝本将生, 石川鉄也, 原田勝之 : 自動車ホイール軸受用シールの技術開発 (泥水性能, 低温環境, 超低トルク), JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1008(2010)63.
- 45) 齋藤智治, 前島大紀, 平本隆之 : 次世代低トルク円すいころ軸受の開発, NSK TECHNICAL JOURNAL, No. 685(2012)8.
- 46) T. SADA, H. MATSUYAMA, T. HATTORI : Tapered Roller Bearing, U.S. Patent No. 7950856(2011).
- 47) 佐田 隆 : 自動車用転がり軸受の損失低減, トライボロジスト, Vol. 61, No. 2(2016)98.
- 48) 東本 修 : 工作機械の動向と工作機械主軸用軸受の取組み, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1001(2006)97.
- 49) 北村昌之 : 転がり軸受技術の動向と展望, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1003(2007)9.
- 50) D. HOWIESON : The Future of Condition Monitoring, EVOLUTION, No. 2(2014)22.

\* 2 LFT は, 株式会社ジェイテクトの登録商標です.

**筆 者**



林田一徳\*

K. HAYASHIDA



松山博樹\*\*

H. MATSUYAMA

\* 執行役員

\*\* 研究開発本部 材料研究部