

インダストリー用転がり軸受の技術動向と取り組み

Technical Trends and R&D Efforts Regarding Industrial Rolling Bearings

鈴木 宣哉 N. SUZUKI

Rolling bearings used throughout the industry are required to be adaptable to many applications. At JTEKT, we promote the development of such bearings, further increasing their added value in order to ensure the satisfaction of our customers.

This report introduces our activities for improving product competitiveness of bearings used in wind power generation, machine tools, steel production equipment, agricultural and construction machinery, and special environments, and indicates the future trend of development within our company.

Key Words: industrial bearing, trend, bearing technology

1. はじめに

機械の回転軸を支える転がり軸受（以下、軸受）は重要な機械要素であり、あらゆる産業で広く使用されているが、近年の各種機械の使用環境と使用条件の過酷化とともに軸受に対するニーズも多様化してきている。

当社では、これらのニーズに対応するため材料・熱処理、潤滑、評価・解析などの基盤技術の強化充実と高度化をはかり、「長寿命化によるメンテナンスフリー技術」「システム化による軽量化技術」「低トルク化による超高速技術」「ロバスト化による高信頼性技術」などを既存の軸受に織り込んだ商品の開発改良を推進している。

本報では、自動車関係以外の産業分野、すなわち、風力発電・工作機械・鉄鋼設備・農建機や特殊環境用途などの分野（インダストリー）で使用される軸受（インダストリー用軸受）についての技術動向と、当社の取り組み事例を紹介する。

2. インダストリー用軸受の動向

軸受はISOにて標準化されているが、インダストリー全般において、その独特の使用環境・使用条件により標準品が適用できず、使用条件に適合した性能が要求される。中でも下記に示した用途では独特の対応が必要である。

- ・ 風力発電：20年以上の設計寿命への対応
- ・ 工作機械：超高速化、超高精度への対応
- ・ 鉄鋼設備：冷却水と熱による過酷な使用環境への対応

・ 建設機械：ロバスト性とタフネス性への対応

また、特殊環境ではクリーン・真空・高温性や高耐食性への対応が必要な場合がある。

これらのニーズに対応するために、軸受設計・材料熱処理・潤滑・精密加工などの技術のみでなく、CAE技術の活用やベンチ評価、実機評価も充実させ、軸受の商品力向上に取り組んでいる。以下に、各用途ごとの取り組み事例を紹介するとともに、**図1**に今後の開発動向を示す。**図1**のように、長寿命・ロバスト性向上・超高速・低昇温・高精度が今後も開発のキーワードといえる。

3. 風力発電装置（風車）主軸用軸受の信頼性向上

全世界で再生可能エネルギーへの注目が増す中、風力発電は2000年以降、欧州を中心に米国、中国などで導入が加速している。近年のマルチメガワット風車は、陸上ではブレードの大径化による有効利用率の向上、洋上では高発電容量化（大型風車）へ推移している^{1) 2)}。

これに合わせて風力発電装置の主軸の大型化に対応した、より大きな負荷容量と高剛性を兼ね備えた大形軸受が必要となってきた。

当社ではFEM解析（**図2**）を用いて、マルチメガワット風車の主軸に最適な軸受を選定できる手法を開発した。これは周辺部品の剛性の考慮に加えて回転トルクを考慮して解析することにより、実際の運転条件に近い転動体荷重分布を算出できる。

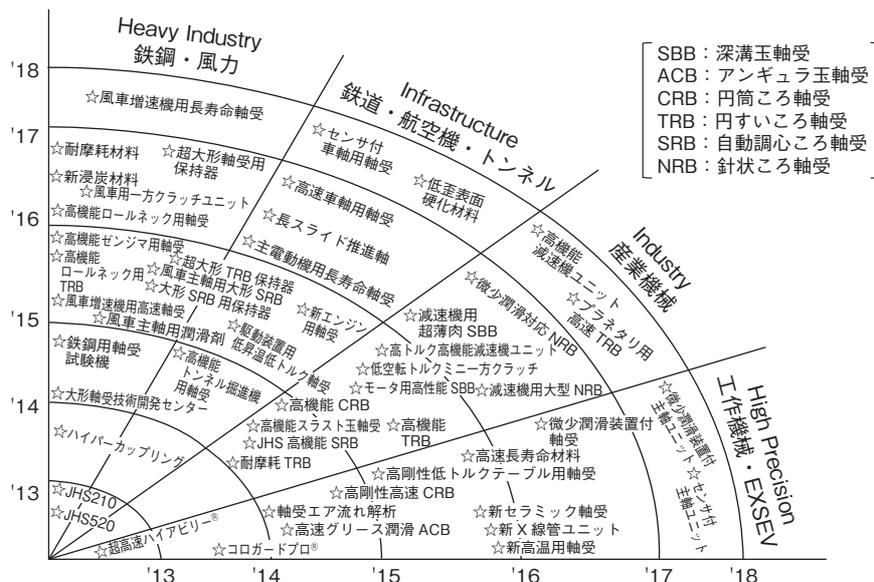


図1 インダストリ軸受商品の開発動向
Trends of industrial bearing development

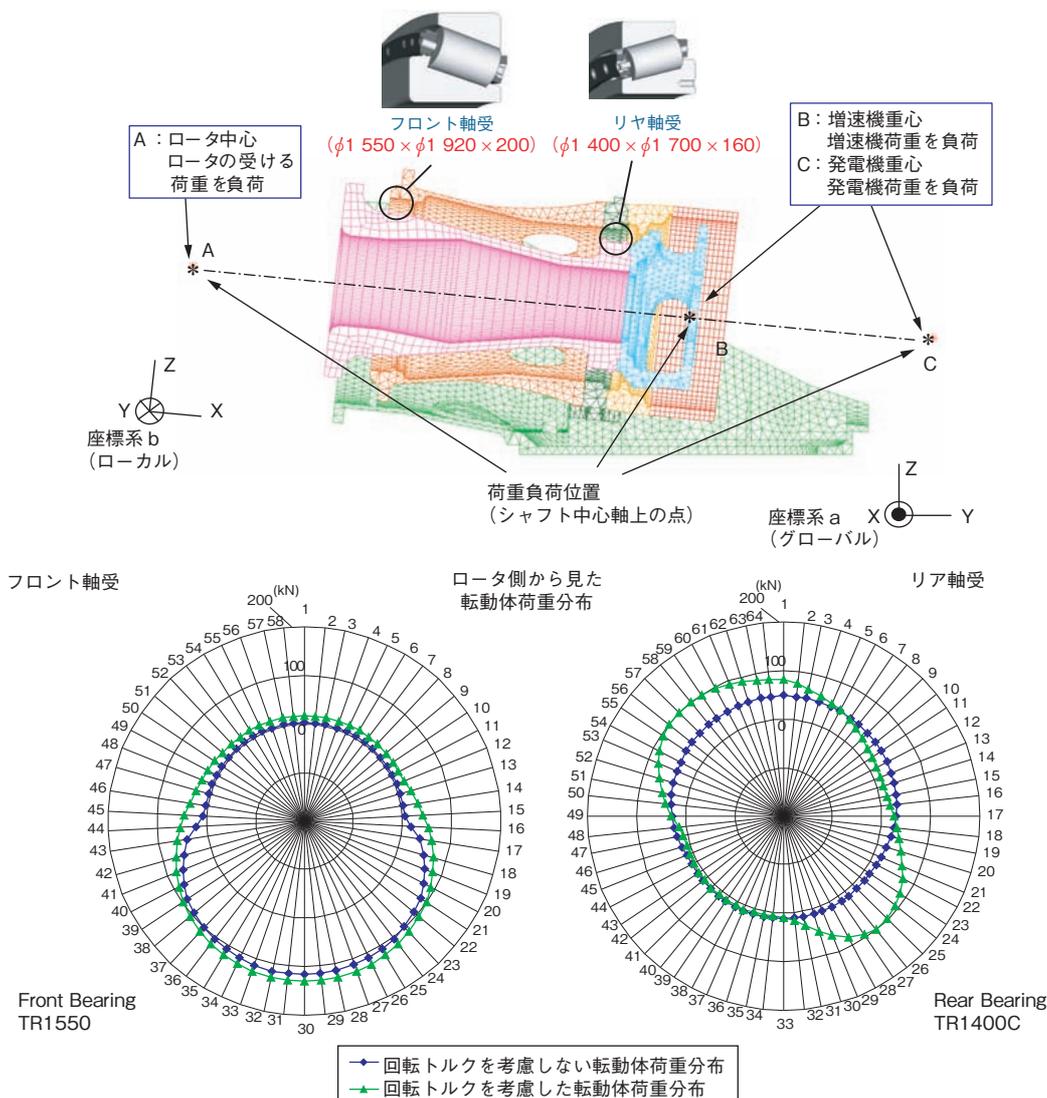


図2 FEM 解析モデルと解析結果
Structure and results of FEM analysis

FEM 解析手法の信頼性を確認するために、スケールサイズモデルの試験機を用いて、転動体荷重分布の測定を実施した(図3)。その結果、FEM 解析結果と測定結果がよく一致しており、FEM 解析の信頼性が高いことを確認できた。また、実機風車の軸箱の変形量を測定し、FEM 解析結果と良く合致することも確認した。

さらに、近年では実機サイズ試験機による各種軸受評価の要望が高まっていることから、当社ではマルチメガワット風車の実機サイズ軸受を評価することが可能な試験機を導入した。

FEM 手法と実機サイズ軸受評価試験機(図4)を用い、今後開発されるマルチメガワット風車の信頼性向上と開発期間短縮に貢献していく。

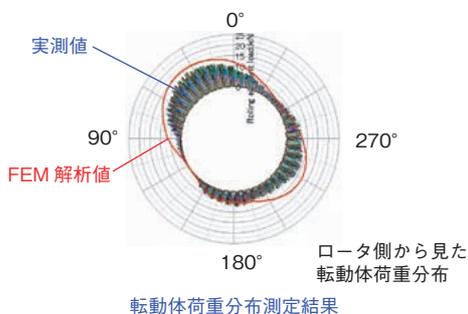


図3 転動体荷重の測定結果と計算結果の比較
Comparison of measurement results and calculation results of rolling element load



図4 実機サイズ軸受評価試験機
Actual size bearing evaluation testing machine

4. 工作機械用軸受の取り組み

高付加価値製品の創出と製造コストの低減などから、工作機械に対する要求性能は、年々厳しくなっている。

工作機械を構成する数多くのユニットの中で、主軸は工作機械の性能を左右する最重要ユニットであるため、工作機械の主軸の高性能化が重要となる。

また、主軸用軸受は主軸性能に大きな影響を及ぼすた

め、主軸用軸受の高性能化が非常に重要になり、中でも加工精度の向上に寄与する低昇温化は主軸用軸受にとって最も重要な技術の一つになる。

このような背景のもと、当社では、図5に示す超高速アンギュラ玉軸受(dmn 値:400万)と超高速円筒ころ軸受(dmn 値:300万)を開発した。



図5 超高速アンギュラ玉軸受(dmn 値:400万)と超高速円筒ころ軸受(dmn 値:300万)
Ultra-high-speed angular contact ball bearing and cylindrical roller bearing

主軸のさらなる高速化による生産リードタイムの短縮、主軸の熱変位抑制による加工精度の向上、および主軸の高剛性化による加工効率の向上などへの貢献においては、さらなるロバスト性の向上や実機による評価が必要になるため、高感度サーモグラフィを利用した軸受内部温度の測定システムの構築(図6)や、高精度流体シミュレーション技術を駆使した軸受内部のエア流れの挙動解析システムの開発、および実機を模擬した高速チルト試験機(図7)による評価を推進している。

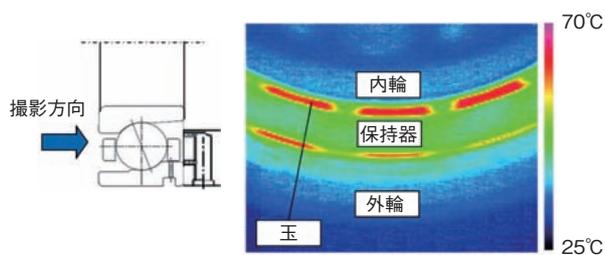


図6 軸受内部温度の測定例
Example of bearing inner temperature



図7 高速チルト試験機の外観
High-speed tilt testing machine

5. 鉄鋼設備用高機能商品技術

鉄鋼設備は高い信頼性が求められ、さらに効率性向上と安定稼働が重要な課題となっている。当社では鉄鋼設備の信頼性向上に貢献する軸受および関連商品を提供している。特に、これまでは鉄鋼設備のさまざまな使用環境、使用条件に適用することに着眼した商品技術の開発に取り組んできた。表1および図8に開発商品例とそのコンセプトを示す。

表1 開発商品例

Examples of developed products

開発商品	圧延機ロールネック軸受<JHS520>	多段圧延機 BUR 軸受<JHS210>	連続鋳造設備用オイルエア潤滑装置
コンセプト	腐食環境下での軸受の長寿命化	貧潤滑下での軸受の長寿命化	潤滑改善による設備突発損傷防止

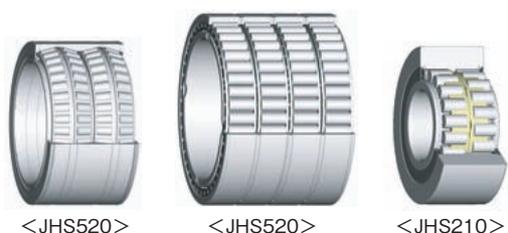


図8 圧延機ロールネック軸受<JHS520>と多段圧延機 BUR 軸受<JHS210>

Roll neck bearing in rolling mill <JHS520> and back-up roll bearing in multi-roll mill <JHS210>

現在、設備の安定稼働に貢献できる技術として、低昇温、低トルク技術に取り組む、商品に展開している。

たとえば、高速圧延に使用されるロールネック用円すいころ軸受について、焼損の原因となる温度上昇を抑える技術の開発を進めており、高速試験において約4倍の向上が認められている(図9)。

試験条件

- 1) 試料軸受主寸法： $\phi 110 \times \phi 180 \times 69$
- 2) 回転輪：内輪
- 3) 回転速度： 72 min^{-1}
- 4) ラジアル荷重：37kN 一定
- 5) 潤滑：グリース潤滑

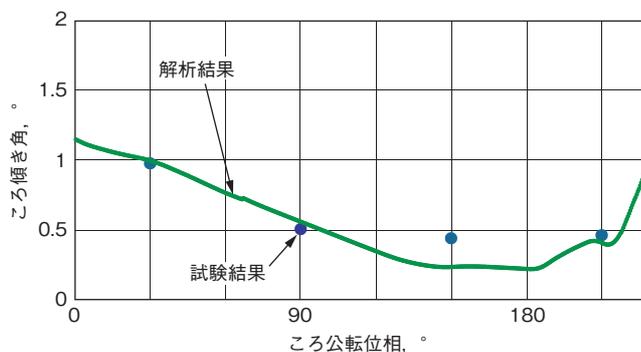
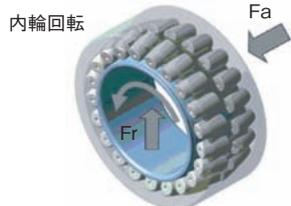


図10 試験結果と解析結果の比較

Results of comparison of practical test and theoretical analysis

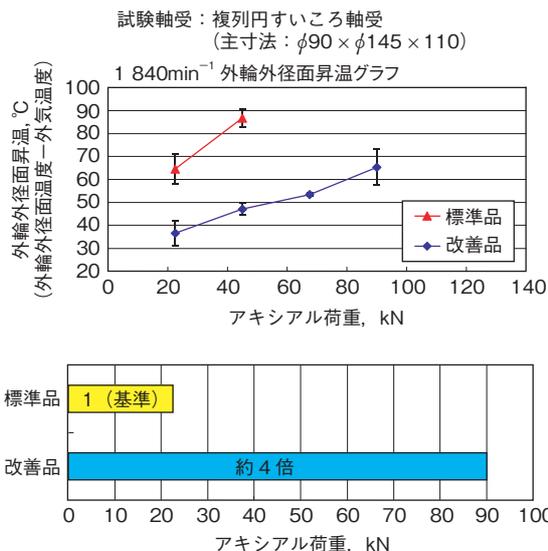


図9 高速アキシャル性能比較 (1 840 min^{-1})
Axial loading performance at a high speed (1 840 min^{-1})

さらに、鉄鋼設備で広く使用されている^{3), 4)}自動調心ころ軸受についても低昇温、低トルク技術に取り組んでいる。

自動調心ころ軸受は非対称ころタイプと対称ころタイプがある⁵⁾。従来では非対称ころタイプに比べ、対称ころタイプは負荷容量が大きいがこの姿勢が不安定なため昇温値が高い問題があった。そこで、この姿勢に影響を及ぼす力のつりあいを解明し、実際の評価およびCAEを用いた解析手法で検証した(図10)。

この結果、この姿勢を安定させることが可能となり、低昇温と高負荷容量を両立させた対称ころタイプの自動調心ころ軸受を開発した。

また、設備の安定稼働に貢献する技術として、操業異常が発生した際、設備損傷を最小限に抑える安全装置も重要である。特に、圧延設備の主要駆動系はモータや減速機などで構成され、損傷すると生産面を含め多大な損

失が発生する。当社では圧延機用駆動軸のトップメーカーとして培ってきた技術を用いて、駆動系で発生した過大トルクを開放する安全装置を開発し商品化している< JHS ハイパーカップリング>。(図11)



図11 ハイパーカップリング
Hyper coupling

6. 農建機車両用軸受・ドライブシャフトの信頼性向上への取り組み

経済成長に伴うインフラ整備と資源開発のニーズにより、農建機などの産業車両は大型化や高性能化の成長を今日まで続けてきた。そして、これら車両に用いられる転がり軸受とドライブシャフトは、駆動系の機能部品として高い信頼性を求められており、当社も信頼性向上の取り組みを続けている。

6.1 高機能円すいころ軸受

農建機車両では、ラジアル荷重とアキシアル荷重を同時に負荷できる円すいころ軸受のニーズが特に高いが、これらの軸受は、非常に過酷な条件で使用されるため、市場での早期破損が問題となることがある。当社では、過酷な条件下でのロバスト性を向上した高機能円すいころ軸受を開発し、市場への導入を推進している。

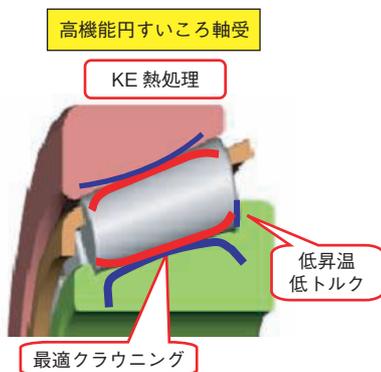


図12 高機能円すいころ軸受
High Performance Tapered Roller Bearings

以下に、代表的な市場での軸受の破損モードと、高機能円すいころ軸受での対策内容を示す。

①エッジロードに起因する破損

ミスアライメント条件で使用される軸受は、軌道面の接触端部に過大なエッジロードが発生し短寿命となる。

高機能円すいころ軸受では、自社開発の軸系解析ソフトを用いた内部設計とクラウニングの最適化⁶⁾を行い、エッジロードの抑制による軸受の長寿命化を図っている。

図13、図14に接触応力の解析例と傾き耐久寿命評価結果を示す。

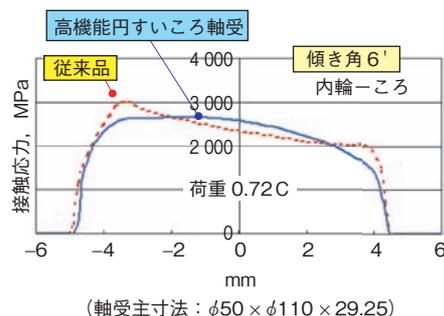


図13 接触応力分布の解析例
Contact stress calculation results

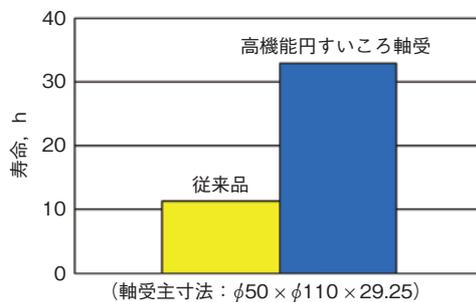


図14 傾き耐久寿命評価結果
Life test results in misalignment condition

②異物により起因する破損

潤滑油中の異物は、圧痕を起点とした表層起点剥離により、軸受寿命を著しく低下させる。このような異物油中の軸受寿命向上には、材料の表面硬さと残留オーステナイトの適正化が有効であり、高機能円すいころ軸受には、これらの技術を応用したKE熱処理^{7), 8)}を適用し、異物油中寿命の向上を図っている。

③油膜切れに起因する破損

車両の高性能化にともなう潤滑油の高温化と低粘度化は、軸受の油膜状態を著しく悪化させる。

高機能円すいころ軸受には、油温の昇温抑制による油膜厚さの改善と低トルク化による動力損失の削減が期待できるLFT[®]軸受^{9), 10)}の技術を適用し、軌道面の油膜切れ抑制を図っている。

6.2 建設機械用ドライブシャフト

国内トップシェアをもつ建設機械用ドライブシャフト(図15)についても、過酷な使用環境に対応するため、シール性能や寿命向上によりメンテナンス性を高めた長間隔給脂クロスベアリング(図16)や耐泥水性を向上したカバーチューブタイプスプラインシール(図17)などの信頼性向上に取り組んでいる。



図15 建設機械用ドライブシャフト
Drive shaft for construction machines

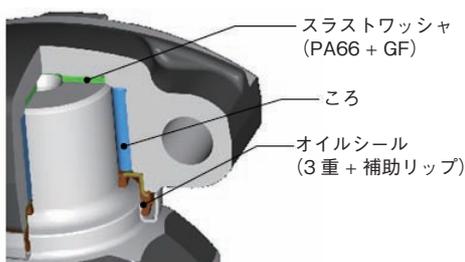


図16 長間隔給脂クロスベアリング
Cross bearing with long greasing interval

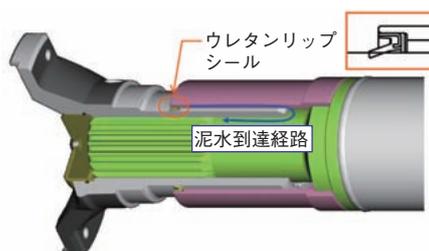


図17 カバーチューブタイプスプラインシール
Cover tube type spline seal

当社ではこのように、農建機車両用としての要求に応じるための製品開発を推進し、農建機車両の信頼性向上に貢献している。

7. 特殊環境用軸受の取り組み

近年の技術進歩に伴い、転がり軸受が使用される環境や条件は年々高度化、かつ多様化している。さまざまな産業の製造工程には腐食、真空、クリーン、高温など多

種多様な特殊環境が多く存在する。当社では各種の特殊環境用軸受をEXSEV® (Extreme Special Environment) 軸受シリーズとして商品化している。特殊環境の中でも薬液処理や洗浄などの工程では、軸受は水、洗浄液、薬液などの厳しい腐食環境で使用される。このような環境で使用される軸受には、特に耐食性が要求される。図18に、腐食環境と産業の関わりを示す。

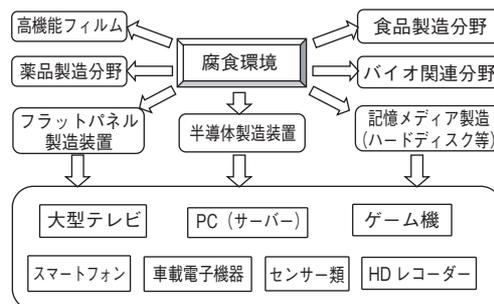


図18 腐食環境と産業の関わり
Relationship between corrosive environments and industries

このような腐食環境においては、一般の潤滑油やグリースが使用できず、軸受鋼では耐食性が不足するケースが多い。そのため、腐食に耐えるとともに、潤滑が不十分な状態でも使用に耐えるための材料選定が重要となる。図19に、主な耐食用軸受の材質と適用部品を示す。

	材質	適用軸受部品
樹脂	ふっ素樹脂	保持器
	PEEK 樹脂	
金属	マルテンサイト系ステンレス鋼	軌道輪, 転動体
	析出硬化系ステンレス鋼	軌道輪
セラミックス	窒化けい素	軌道輪, 転動体

図19 主な耐食用軸受の材質と適用部品
Main materials and applicable parts for corrosion-resistant bearings

耐食用軸受を構成する材料としては、主に樹脂、金属、セラミックスがある。

まず、樹脂は保持器に用いられ、自己潤滑性に優れるふっ素樹脂や、より高い耐久性を持つPEEK (ポリエーテルエーテルケトン) 樹脂が使用される。

次に、軌道輪や転動体に用いられる金属には、軸受鋼より耐食性に優れるマルテンサイト系ステンレス鋼 (SUS440C) が使用され、洗浄液、薬液などの環境ではさらに耐食性に優れた析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630) が使用される。

さらに、セラミックスについては優れた耐食性と耐摩耗性から、ほぼ全ての腐食環境をカバーできる材料として軌道輪や転動体に使用されるが、高コストという課題がある。一方、SUS630はセラミックスに比べてコスト面で有利なため、耐食軸受に使用される場合が多いが、SUS440Cに比べて硬度が低いため軌道面の摩耗進行が早くなり、軸受の耐久性が課題となる。

図20に示すフィルム製造装置においても同様の課題があり、当社では図21に示す耐食性と高硬度を両立した高硬度高耐食鋼を適用した長寿命高耐食軸受を開発した。図22に高硬度高耐食鋼とSUS630のスラスト転動寿命試験結果を示す。今後も引き続き特殊環境分野の市場要求に応えるために、より腐食環境に適した軸受の開発に取り組む。

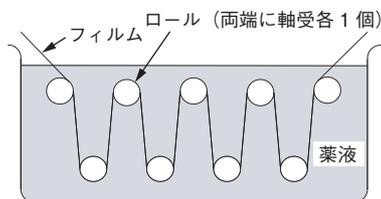


図20 フィルム製造装置の概略

Schematic illustration of film manufacturing equipment



(主寸法：φ25 × φ60 × 15)

図21 長寿命高耐食軸受の外観写真

Long life and highly corrosion-resistant bearing

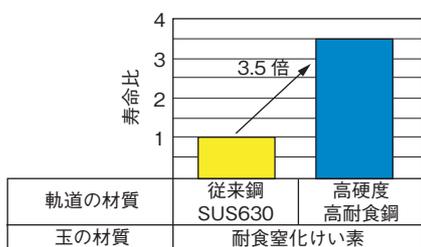


図22 スラスト転動寿命試験結果

Results of thrust rolling service life test

8. おわりに

今回紹介した以外にも、鉄道車両車軸、航空機ジェットエンジン、電気モータや減速機等のインダストリ分野

で使用される軸受の商品力向上に対して、取り組むべき技術課題はまだまだ数多く存在する。顧客のニーズに対して、どんな商品を提供すれば解決できるのか、また、そのためにはどんな技術が必要かといった技術シナリオに基づき、図1に示した開発動向に沿って、より一層顧客にとって魅力のある商品を開発し、提供していきたい。

参考文献

- 1) 藤原英樹, 小林康裕: 風力発電装置ドライブトレーン用軸受の技術動向, 日本風力エネルギー学会誌, 第108号(2014)465.
- 2) 小林康裕: 風力発電装置における軸受の最新技術と市場動向, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1010(2012)51.
- 3) ジェイテクト「ベアリング入門書」編集委員会編著: 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)17.
- 4) 保坂亮平, 安田典嗣: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, no. 1004(2007)41.
- 5) ジェイテクト: 転がり軸受総合カタログ, CAT. no. B2001-5.
- 6) 漆川賢治, 柴田正道: Koyo Engineering Journal, no. 155(1999)15.
- 7) 戸田一寿, 三上剛: Koyo Engineering Journal, no. 143(1993)15.
- 8) 戸田一寿, 柴田正道: Koyo Engineering Journal, no. 145(1994)138.
- 9) 浅井康夫, 大島宏之: Koyo Engineering Journal, no. 143(1993)23.
- 10) 松山博樹, 百々路博文, 荻野清, 大島宏之, 千葉博行, 戸田一寿: Koyo Engineering Journal, no. 167(2005) 24.

筆者



鈴木宣哉*

N. SUZUKI

* 執行役員