

インダストリー用軸受およびユニット商品の カーボンニュートラルへの取り組みについて

Activities Relating to Bearing and Unit Products for Achieving a Carbon-neutral Society

安達丈博 T. ADACHI

The automobile industry has entered a "once-in-a-century revolutionary era", and since the 2050 Carbon Neutral Declaration, the entire industry has been required to make major changes with no further delay.

This report introduces technologies and products contributing to a carbon-neutral society.

Key Words: industrial bearing, trend, carbon neutral, offshore wind turbine, hydrogen, superconductivity, magnetic bearing, precision, high precision, FCEV, geothermal power generation, semiconductor, low temperature rise, ceramics, PFOA

1. はじめに

自動車業界では「100年に一度の大変革の時代」に入っている。少子高齢化による労働人口減少、IoT、SDGsなどにより自動車業界のみならず、産業界全体が大変革の時代に入ったと言える。さらに2020年10月の2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すという宣言により、脱炭素への取り組みは世界中で待たなしの状況である。そのような中、転がり軸受（以下、軸受）の使用環境や使用条件は過酷化するとともに、軸受に対するニーズも多様化してきている。そのため従来の軸受ではお客様の要求に対応できなくなっている分野も多く出てきている。本報では、産業機械用機器に対応する長寿命化、IoTやAIおよびEVなどに欠かせない半導体製造設備、少子高齢化による労働人口減少に伴う生産ラインの効率化に貢献するロボット、省エネルギー、再生エネルギー、脱炭素の次世代エネルギーの有力候補の一つである水素など、当社のカーボンニュートラルへの貢献についての取り組み事例を紹介する。

2. インダストリー用軸受、ユニット品の動向と カーボンニュートラルへの貢献

インダストリー分野はすそ野が広く、使用環境、使用条件も多種多様である。過酷化、多様化してきたとはいえ、インダストリー分野におけるほとんどの領域ではコ

モディティ化による価格競争に陥っており、生産拠点も需要地や生産コストの安価なアジア圏への移行が加速している。その一方でインダストリー用軸受の小型・軽量化を含めた長寿命化技術はカーボンニュートラルに直接的、間接的に貢献できる技術である。したがって、長寿命材料技術や熱処理技術、各種アプリケーション対応技術、実験・解析技術などを高度化していくことは、コモディティ領域から付加価値領域へと移行する大きなチャンスでもある。以下の項目では、これらの市場ニーズに対応するための技術、商品について紹介する。

3. 長寿命化技術

3.1 次世代長寿命軸受「NK軸受」¹⁾

農業機械、建設機械などの産業機械業界では機器の使用環境や使用条件が年々過酷化しており、その機器の長寿命化を目的に使用する軸受の寿命延長要求が高まっている。それに応えるため、当社では従来技術では達成困難であった長寿命領域を実現した「NK軸受」を量産化した。

軸受損傷の一つである剥離の種類と対策を図1に、長寿命軸受用材料の開発コンセプトを図2に示す。従来、異物起因の剥離に対しては、「軌道表面の高硬化化」と「残留オーステナイト（残留 γ ）の適正量確保」が有効であることを確認している。これらを実現するため、最適熱処理技術を開発しSH軸受（軸受鋼に特殊熱処理を適用。

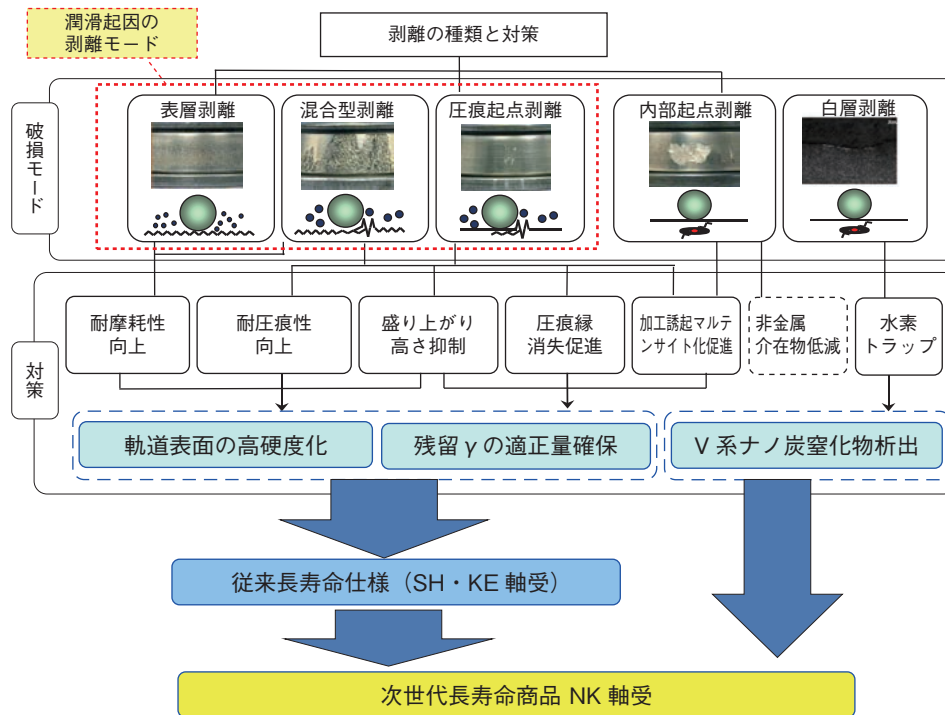


図1 剥離の種類と対策
Flaking types and countermeasures

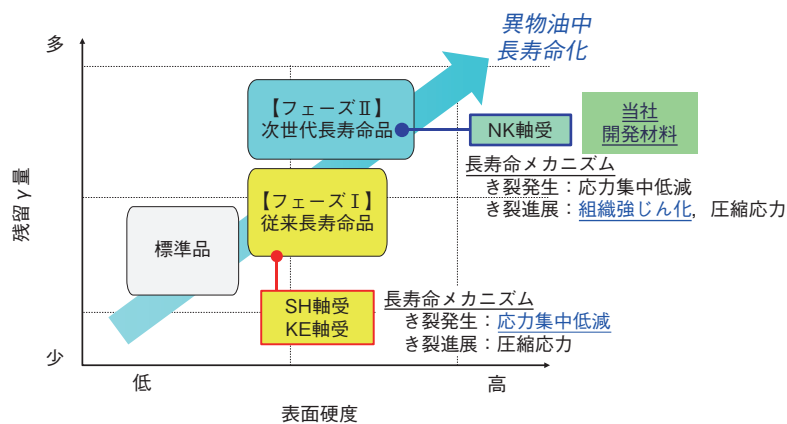


図2 長寿命軸受材料の開発コンセプト
Development concept of long life bearing material

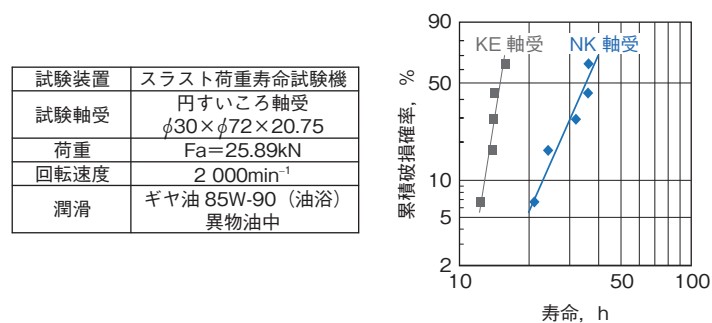


図3 NK軸受の異物油中での寿命評価結果
Life test result of NK bearing in contaminated oil

主に玉軸受に適用)とKE軸受(はだ焼鋼に特殊熱処理を適用、主に、円すいころ軸受に適用)を商品化している。今回新たに開発したNK軸受は、さらに“V系ナノ炭窒化物析出”効果を追加しさらなる長寿命化を実現した商品である。NK軸受は従来規格鋼をベースとした開発であった「フェーズⅠ」に対して、材料成分と熱処理条件の最適化を実施した次世代長寿命品「フェーズⅡ」である。従来の長寿命軸受であるKE軸受に対して、1.5倍以上の寿命を達成した。NK軸受とKE軸受の異物油中の寿命評価結果を図3に示す。また、近年の研究では、自動車の電装補機用軸受などにおいて、軌道面断面に柳状の白色組織変化を伴う早期剥離²⁾に対しても、有効であることがわかってきており、さらなる採用拡大が期待できる。この長寿命化技術により、産業機械用機器の長期安定稼働に貢献していきたい。

4. 半導体製造装置用軸受

4.1 環境規制対応真空・クリーン用ベアリング (EXSEV[®]-EX)

REACH*規則の制限対象物質リストが修正され、2020年7月4日よりパーフルオロオクタン酸(PFOA)およびその関連物質が規制の対象となった。従来、酸化、エッチング工程などの真空環境では、低発じんのKDLグリースを使用したDLベアリングを製造・販売していたが、このグリースの製造過程でPFOAが発生することが明らかとなった。そこで今回、製造過程で規制対象物質を含有しないグリースを使用した真空・クリーン用ベアリング「EXSEV[®]-EX」を開発した。本製品は、環境規制に対応するだけでなく、他社品および従来のDLベアリングと比較して、低発じん、アウトガス、起

動トルク、回転トルク、音響および寿命などにおいて同等以上の性能を有する。図4に他社品および従来グリースとの発じん量比較、図5にアウトガス比較を示す。

* REACHとは「Registration (登録), Evaluation (評価), Authorisation (認可) and Restriction (制限) of Chemicals (化学品)」の略です。

4.2 高耐食セラミックス

セラミックスは、金属材料と比較してじん性が低く、加工性に乏しいが、その反面、軽量、耐熱性、耐食性などに優れた特性を有している。表1に各種セラミックスの機械的特性を示す³⁾。窒化けい素や炭化けい素は、軸受鋼に比べ、密度が1/2以下で線膨張係数が1/4~1/3、軽量、熱による変形も小さい特性を持っている。一方、ジルコニアのように軸受鋼の特性に近いセラミックスもある。

さらに今回、材料にSiを含有していないアルミナ-ジルコニアの特性を生かした高耐食用セラミック軸受コロガードプロベアリング[®]-AZ(図6)を開発した。この軸受を用いた一部の半導体製造装置はSiの反応生成物による悪影響を回避でき、半導体の生産性向上への貢献が期待できる。

図7にセラミックスと適応する腐食環境の関係を示す。CMP (Chemical Mechanical Polishing)、洗浄工程などでは、さまざまな腐食環境が存在するため、それぞれの環境に適したセラミックスを選定して軸受に用いることが重要である。半導体製造装置の使用環境や使用条件に適したセラミック軸受を提供することにより、半導体製造装置の安定操業に貢献していきたい。

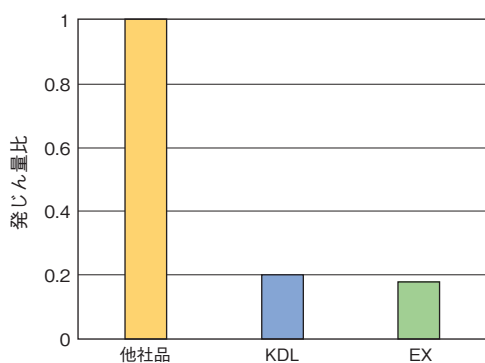


図4 発じん量比較 (軸受)
Comparison of dust amount (Bearing)

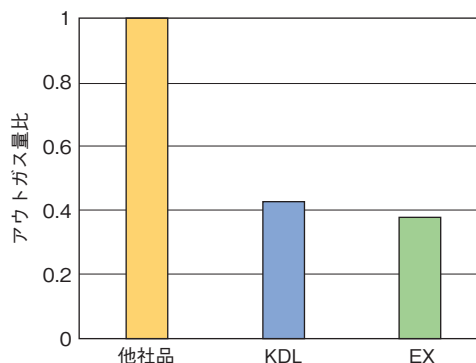


図5 アウトガス比較 (グリース)
Comparison of outgas (Grease)

表1 各種セラミックスの機械的性質
Mechanical properties of various ceramic materials

セラミックス	窒化けい素 Si ₃ N ₄	炭化けい素 SiC	ジルコニア ZrO ₂
項目 単位			
密度, g/cm ³	3.2	3.1	6.0
線膨張係数, K ⁻¹	3.2 × 10 ⁻⁶	3.9 × 10 ⁻⁶	10.5 × 10 ⁻⁶
ビッカース硬さ, HV	1 500	2 200	1 200
縦弾性係数, GPa	320	380	220
ポアソン比	0.29	0.16	0.31
3点曲げ強さ, MPa	1 100	500	1 400
破壊じん性, MPa・m ^{1/2}	6	4	5
耐熱性 (大気中), °C	800	1 000 以上	200
耐熱衝撃性, °C	750 以上	350	350
熱伝導率, W/(m・K)	20	70	3
比熱, J/(kg・K)	680	670	460



図6 コロガードプロベアリング®-AZ
(アルミナ-ジルコニア)

Corrosion guard bearing®-AZ (Alumina-zirconia)

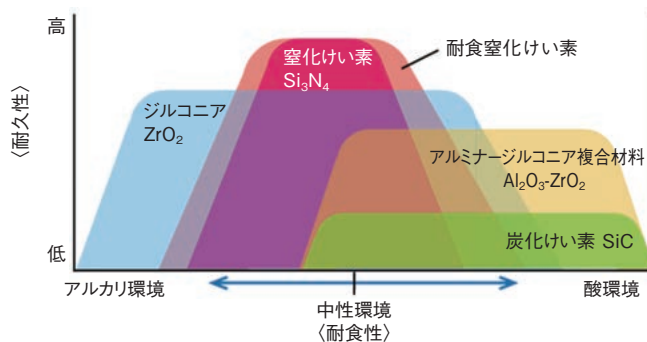


図7 セラミックスの各種腐食環境への適用

Application of ceramics under various corrosion environments

5. ロボット減速機用軸受

ロボット用減速機の代表的な形式に波動歯車減速機がある。その減速機構を図8に示す。軸受の内輪はだ円形状をしたカム軸（入力軸）に圧入され、ウェーブジェネレーター（超薄肉玉軸受+だ円カム軸）がだ円に変形する。入力軸1回転に対して、出力軸であるフレックススプラインは歯数枚数差の分だけ入力軸と逆方向に回転することになる。これが出力回転速度である。また、この減速機に使用される軸受は、容易にカム軸に倣って変形する必要があることから、超薄肉玉軸受（図9）が使用されている。その薄肉度は一般軸受の68系列よりもさらに薄肉となっている（表2）。

減速機の要求性能と軸受の必要特性を図10に示す。軸受の材料・熱処理や設計、生産技術の最適化で軸受の性能および品質向上を実現し、ロボットおよびそれを用いた製造ラインの安定稼働に貢献していきたい。

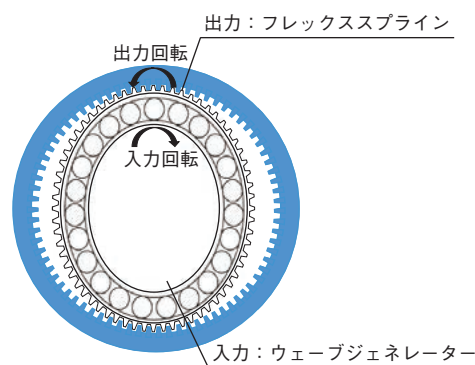


図8 波動歯車減速機の減速機構

Deceleration mechanism of strain wave gearing



図9 波動歯車減速機用超薄肉玉軸受

Super thin ball bearing for strain wave gearing

表2 超薄肉玉軸受の設計仕様
Design spec. for ultra thin ball bearing

	超薄肉玉軸受（開発品）	68 系列（一般品）
軸受断面		
断面比（玉径／軸受高さ）	1.2	1
軌道輪肉厚比	0.6	1
玉数比	1.3	1
負荷容量比	1.5	1

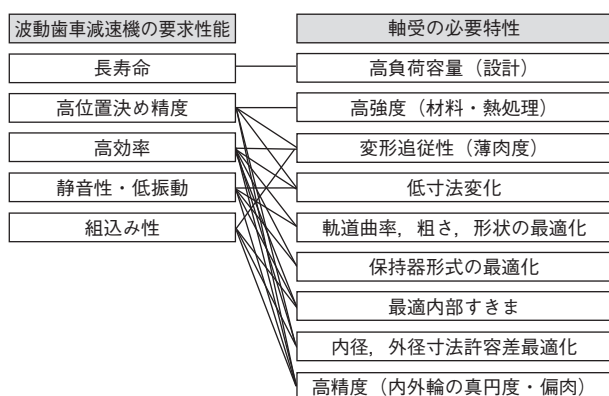


図10 波動歯車減速機の要求性能と軸受の必要特性
Performance requirements of strain wave gearing and characteristic requirements of bearings

6. 超高精度軸受 PRECILENCE (プレシレンス)

超高精度軸受 PRECILENCE は、産業機械設備のより高い加工精度、加工効率達成の要求に応えるために開発された。PRECILENCE の達成精度、軸受構造を図11、12に示す。今までの転がり軸受では達成することのできなかった回転精度により、超精密加工や微細加工を実現するとともに、その高速性により加工効率向上、さらには潤滑形式変更（例：オイルエア潤滑→グリース潤滑）によるイニシャルコストとライフサイクルコスト低減によりカーボンニュートラルに対しても貢献していきたい。図13に PRECILENCE のターゲット領域を示す。

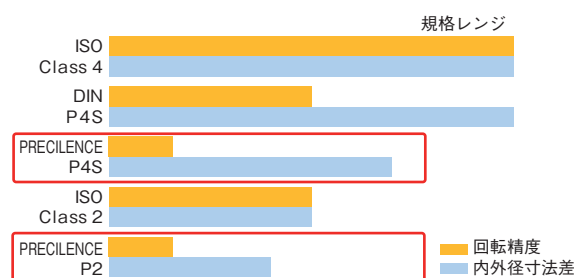


図11 PRECILENCE の達成精度
Accuracy achieved by PRECILENCE

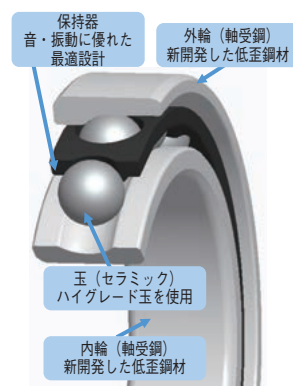


図12 PRECILENCE の軸受構造
Bearing structure of PRECILENCE

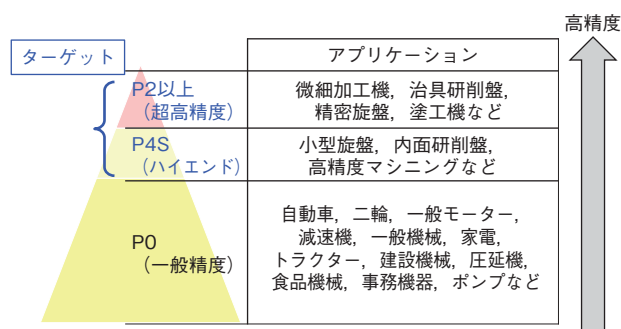


図13 PRECILENCE のターゲット領域
Target area of PRECILENCE

7. 省エネルギー技術

カーボンニュートラル達成のためには、エネルギー損失を少なくすることも重要な取り組みの一つである。ここでは新幹線車軸用油浴潤滑式円すいころ軸受の低昇温化すなわち低トルク化技術を紹介する。これは潤滑油挙動の見える化と解析手法の確立により、潤滑油の挙動制御での低昇温化を実現する技術である。油浴潤滑式円すいころ軸受(図14)において、実際の潤滑油挙動とCAE流体解析(図15)の合わせ込みを実施し、CAEにて潤滑挙動解析を可能とした。その結果、軸受側面に潤滑油挙動制御用ラビンスカラーと遮へい板を設置(図16)することにより、現行品と比較して外輪昇温を約6℃(10%)低下させることに成功した(実機へは未投入)。今後も流体解析技術と制御技術をより高度化して、軸受を用いた回転体のエネルギー損失低減に貢献していきたい。

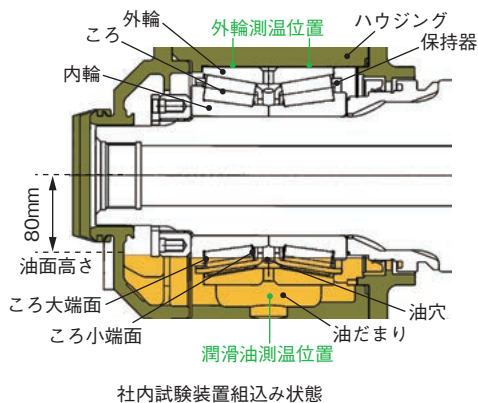
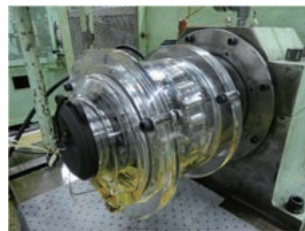


図14 油浴潤滑式円すいころ軸受
Oil bath lubrication for tapered roller bearings



潤滑油挙動の見える化



CAE流体解析

図15 潤滑油の挙動の見える化とCAE流体解析
Visualization of lubricating oil behavior and CAE fluid analysis

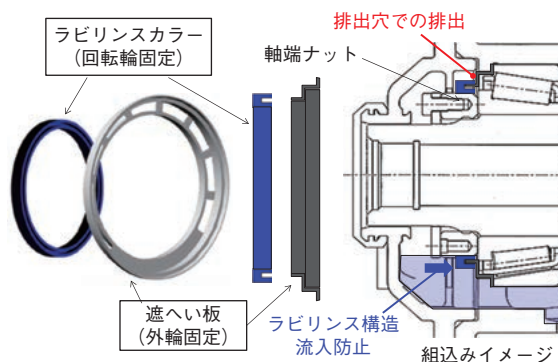


図16 開発品の構造、組み込みイメージ図
Structure of developed product, assembled view

8. 再生可能エネルギーおよび新エネルギーへの貢献

表3にカーボンニュートラルに向けたCO₂排出量削減と新エネルギー導入目標値を示す。各新エネルギー導入目標はどの値も挑戦的な値が並んでいる。これらの数値を達成するためには官民一体となった取り組みが必要であるとともに、今までの技術だけでは達成できない大きな目標値である。このような状況の中、カーボンニュートラルに貢献できる今までの軸受にはない特徴を持った商品および実験技術、解析技術、センシング技術について紹介する。

表3 CO₂排出量と新エネルギー導入目標値
Target value of CO₂ emissions and introduction of new energy

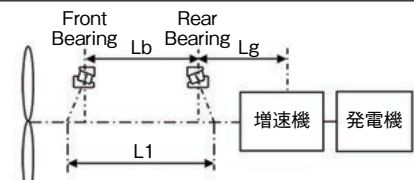
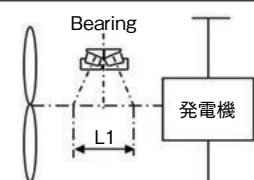


	現在	中間目標 (2030年)	将来
エネルギー起源CO ₂ 排出量, t	10.6億 (2018年)	9.3億⇒6.7億 (21年4月政府表明)	実質ゼロ [排出+吸収] (2050年)
洋上風力発電, kW	ほぼゼロ	1000万	3000~4000万 (2040年)
地熱発電, kW	59.3万 (2020年3月)	120万 (21年4月政府表明)	—
水素(導入量), t	0.02万 (2017年)	最大300万	2000万

8.1 洋上風力発電機用主軸軸受

2050年カーボンニュートラルにおいて、洋上風力発電機（以下、洋上風車）導入量はその達成の重要な役割を担っている。日本に導入が計画されている1基当たりの風車容量は10～15MW、主軸用軸受外径は $\phi 3 \sim 5m$ 程度になると想定されている（表4、図17）。また、洋上風車は初期投資の回収およびメンテナンスの困難さなどから、設計寿命は信頼度99%で30年以上の高い

信頼性が求められる。当社ではころに取り付けたひずみゲージの出力を、小型データロガーに蓄積し解析することによって、実際の軸受の転動体荷重分布を測定する技術を開発した（図18）。この実際の転動体荷重分布測定結果とFEM解析モデル（図19）との合わせ込みにより、より精度の高いFEM解析を可能（図20）とした。また、実機サイズ軸受評価試験機（図21）も導入して、洋上風車用主軸軸受の信頼性向上と開発期間短縮に貢献していきたい^{4)~6)}。

表4 日本に導入される洋上風力概要
Summary of offshore wind turbines introduced in Japan

	Type 1	Type 2
風車容量	10～15MW	
ドライブトレイン構造		
主軸用軸受タイプ	 単列円すいころ軸受×2	 複列円すいころ軸受
軸受外径	$\phi 3m$	$\phi 5m$

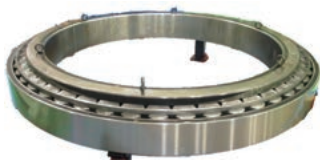


図17 超大形単列円すいころ軸受
Large size single-row tapered roller bearing

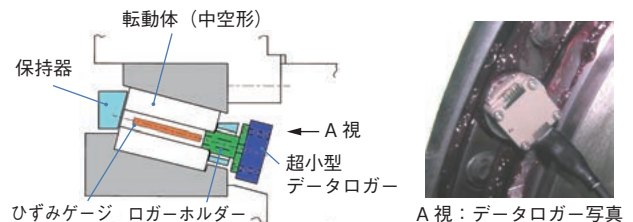


図18 転動体荷重計測方法
Measurement method of rolling element load

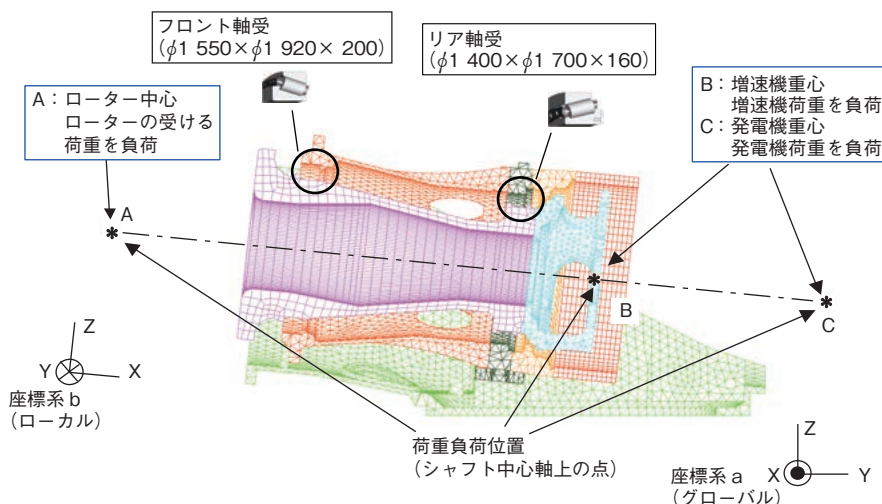


図19 FEM 解析モデル
FEM analysis model

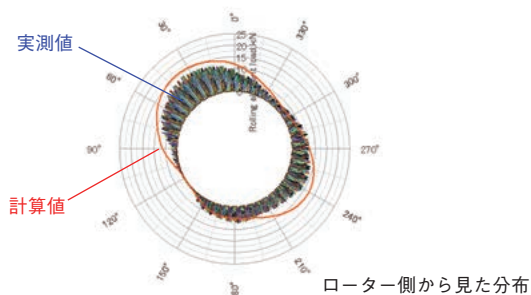


図20 転動体荷重分布実測値と FEM 解析の比較
Comparison of results obtained through actual measurement versus FEM analysis of rolling element load



図21 実機サイズ軸受評価試験機
Actual size bearing evaluation testing machine

8.2 制御型磁気軸受

株式会社光洋マグネティックベアリング*で製造・販売している制御型磁気軸受(以下、磁気軸受)(図22)は、新エネルギー拡大に大きく貢献できる商品として注目を集めている。磁気軸受は電磁力により回転軸を完全非接触で支持するため、超高速回転や省エネルギー、オイルフリー、メンテナンスフリー、低振動、低騒音などの優れた特長がある。これらの特長を生かし、水素関連機器および超電導分野、再生エネルギー分野などへの採用を目指し、カーボンニュートラルに貢献していきたい。図23に磁気軸受のターゲット領域を示す。

* 株式会社ジェイテクトと株式会社 MUTECS が共同で設立した会社です。

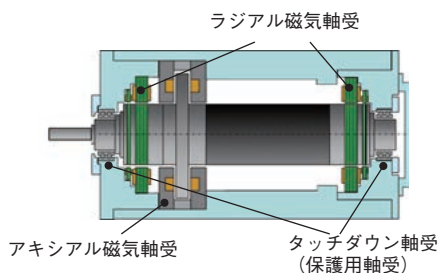


図22 制御型磁気軸受の構造
Structure of active magnetic bearing

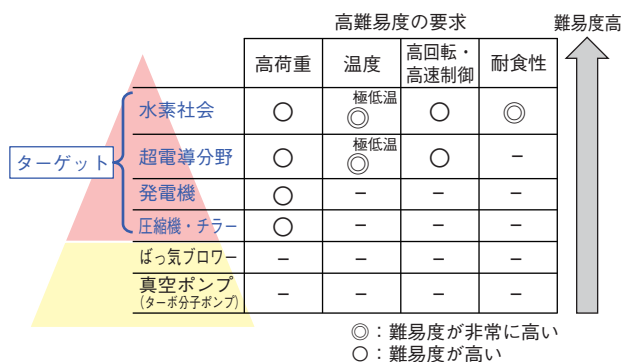


図23 磁気軸受のターゲット領域
Target area of active magnetic bearing

8.3 耐水素環境用軸受 EXSEV®-H2

自動車業界でのカーボンニュートラルの取り組みの一つである水素と酸素で発電し、動力を発生させる水素燃料電池車(以下、FCEV)は、CO₂を排出しない環境にやさしい自動車として注目が集まっている。FCEVでは水素を有効活用するために、燃料電池内で未反応の水素を再利用するための水素循環ポンプが使用されることがある。その水素循環ポンプ用軸受は、水素および水蒸気中で使用されるため、水素ぜい化*しにくく、水蒸気中でも腐食しにくい軸受が必要である。そこで、新たな素材の適応と熱処理により、従来製品の10倍以上(図24)となる耐久性を持つ耐水素環境用軸受 EXSEV®-H2(図25)を開発した。本製品にてFCEVの安全性と信頼性の向上に貢献していきたい。

* 水素の侵入により、金属の強度が著しく低下する現象。

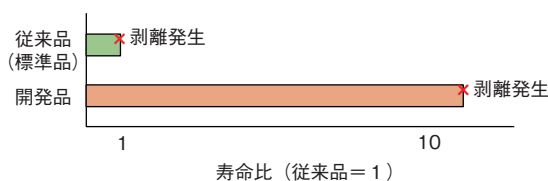


図24 水素雰囲気中での軸受寿命試験結果
Result of bearing life test under hydrogen atmosphere

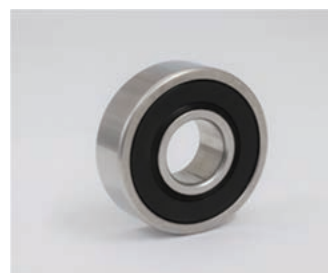


図25 耐水素環境用軸受 EXSEV®-H2
Hydrogen-resistant bearing EXSEV®-H2

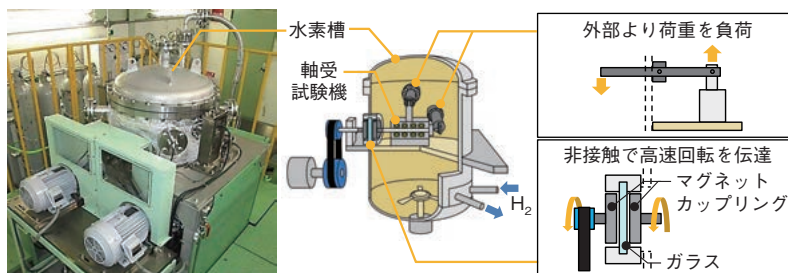


図26 試験機外観および構造
Appearance and structure of testing machine

表5 試験機仕様
Testing machine specifications

項目	仕様	備考	
水素環境	圧力	0.3MPa	高压ガス未満
	純度	99.99%以上	封入ガス濃度
	温度	-30 ~ 120℃	ガス雰囲気温度
荷重	ラジアル	2.5kN	軸受1個当たり
	アキシアル	2.5kN	
回転速度	10 000min ⁻¹	—	

8.4 水素環境用軸受評価設備

2019年、水素環境用軸受評価試験機を開発した。本評価試験機は、純水素ガス環境において軸受を実際の荷重・回転条件で評価できる、業界初の試験機である。この試験機は特殊な回転伝達機構と荷重負荷機構の採用により、水素ガス恒温槽*の密閉性を維持するとともに、外部より、ラジアル荷重とアキシアル荷重を同時にかけてながら、高速回転試験が可能である。今後、ゼロエミッションでクリーンな水素社会の実現に向け、水素環境評価技術で貢献していきたい。(8.3項、耐水素環境用軸受 EXSEV®-H2 の評価にも使用)

* 恒温槽とは内部の温度を、長時間一定に保つように制御された容器。この場合、試験機内の水素ガスの温度が-30℃から120℃の間に保たれる。

9. おわりに

2050年カーボンニュートラル達成には大きな技術変革が必要である。また昨今はコロナ禍において、“リモート”という新しいワークスタイルが急速に広まっており、リモートによるCO₂削減効果*も算出されている。つまりワークスタイル（開発スタイル）においても変革が求められている。このことから、当社はデジタルトランスフォーメーション（DX）推進により、開発期間を短縮し、絶えず新しい技術を提供し続けることにより社会に貢献していきたい。

* 世界中の自宅で仕事ができる人が週1日の在宅勤務をした場合、CO₂排出量は正味で約2400万トン/年（ロンドンの年間CO₂排出量と同等）削減される⁷⁾。

* 1 PRECILENCEは、株式会社ジェイテクトとダイベア株式会社の登録商標です。

参考文献

- 1) 廣中哲也, 山田雅康, 金谷康平, 三尾巧美: 農建機車両のライフサイクルコスト低減への貢献技術, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1016(2018)p. 38.
- 2) 小宮広志: 転がり軸受の潤滑技術, 設計工学, 35, 6(2000) p. 194.
- 3) 株式会社ジェイテクト: 特殊環境用軸受シリーズ EXSEV 軸受・セラミック軸受, CAT. No. BA004JA-1DS, 3.
- 4) 鈴木宣哉: インダストリー用転がり軸受の技術動向と取り組み, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1012(2014)p. 8.
- 5) 永山彰英, 宮地武志, 大塚和茂: 鉄鋼設備安定操業化貢献技術の開発, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1016(2018)p. 28.
- 6) 保坂亮平, 松田晋也: マルチメガワットクラス風力発電装置主軸用軸受の信頼性向上, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1012(2014)p. 32.
- 7) Daniel Crow, Ariane Millot: IEA [Working from home can save energy and reduce emissions. But how much?], Commentary, 12 June 2020.

筆者



安達丈博*
T. ADACHI

* 産機・軸受事業本部 産業機器技術部