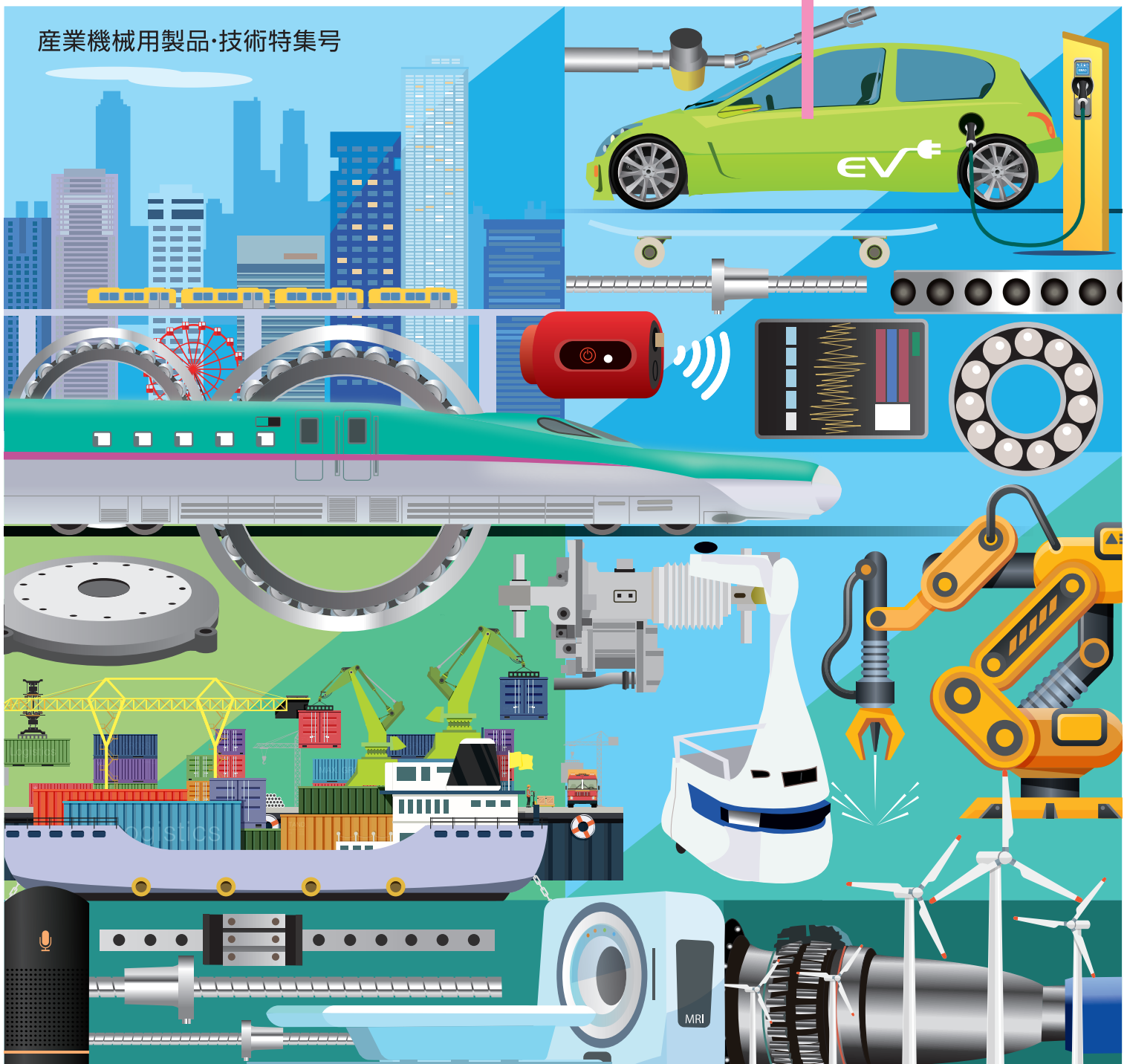


NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY · 2019

No. 691

産業機械用製品・技術特集号



NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY・2019

No. 691

巻頭言

産業機械用製品・技術特集号によせて

..... 産業機械技術総合センター所長 執行役 伊集院 誠司 1

解説・論文

産業機械における状態監視の取り組み 坂野 彰秀, 田口 恵一郎, 溝口 大木 2

産業機械用軸受の技術動向 石黒 博 13

風力発電機用軸受の技術動向 リー キム リョン 19

工作機械用製品の技術動向 青木 満穂, 齊藤 秀徳 28

鉄道車両用製品の技術動向 亀子 峰雄, 城崎 喜彦, 遠藤 茂 39

ガイドンスロボット LIGHBOT の安全認証 ISO13482 取得と実用化

..... 嵯峨山 功幸, 盛 真唯子, 田淵 絢子, 福島 庸介 46

全方向移動型電動車輪の開発 藤岡 紘, 大石 保徳 59

風力発電機用円筒ころ軸受のはく離拡大予測手法 千布 剛敏, 周 康, 溝口 大木 65

EHD 接触における膜厚と破断率の同時測定 - インピーダンス法の検証

..... 前田 成志, 丸山 泰右, 中野 健 74

商品紹介

ワイヤレス振動診断器ベアリングドクター BD-2 型 78

高効率モータ用低トルク軸受 80

鉄鋼・連続鋳造機ガイドロール用 長寿命・高機能円筒ころ軸受(自由側用) 82

製紙機械用内輪割れ防止大形自動調心ころ軸受 84

鉄道車両向け動揺防止アクチュエータ 86

NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY·2019 **No. 691**

Preface

NSK's Latest Technologies and Products for Industrial Machinery S. Ijuin 1

Technical Papers

Approach of Condition Monitoring in Industrial Machinery A. Sakano, K. Taguchi, H. Mizokuchi 2

Technical Trend of Industrial Machinery Bearings H. Ishiguro 13

Technical Trend of Wind Turbine Bearings K. L. Lee 19

The Technical Trend of Machine Tool Components M. Aoki, H. Saito 28

Technical Trends of Railway Products M. Kameko, Y. Shirosaki, S. Endo 39

ISO13482 certificated and practical application of Guidance Robot LIGHBOT
..... K. Sagayama, M. Mori, A. Tabuchi, Y. Fukushima 46

Development of Omnidirectional Mobile Electric Wheels K. Fujioka, Y. Ooishi 59

Analysis Prediction Technique of Flaking Expansion in Roller Bearings for Wind turbines
..... T. Chifu, K. Zhou, H. Mizokuchi 65

Simultaneous Measurement of Oil Film Thickness and Breakdown Ratio in EHD Contacts
— Verification of Electrical Impedance Method M. Maeda, T. Maruyama, K. Nakano 74

New Products

Wireless Vibration Diagnostic Device Bearing Doctor Model BD-2 78

Low-Torque Ball Bearings for High-Efficiency Motors 80

Optimized Long-Life Cylindrical Roller Bearings for Continuous Casting Machines 82

Large Size Anti Inner Ring Fracture Spherical Roller Bearings For Paper Machines 84

Vibration Control Actuator for Train Cars 86

産業機械用製品・技術特集号によせて

産業機械技術総合センター所長
執行役
伊集院 誠司



2015年に国連は「持続可能な開発目標（SDGs）」を採択しました。経済発展、豊かさの追求と同時に、地球環境の保全、貧困・格差の解消、人々の安全な暮らしを保障することを求めています。こういった社会の要請に対し、ICT、IoT、AIの急速な発達も加わり、産業界も大きく変化をしてきております。広く産業機械に携わるNSKは新しい製品、技術を通して地球、社会、そして産業に貢献してまいります。今回、「産業機械用製品・技術特集号」として、これらの技術を紹介させていただきます。

「モノからコト」といわれる中で、NSKは軸受の**状態監視**のビジネスを開始します。NSKには、長年のお客様へのサービスのなかでつちかった独自の軸受異常診断技術があります。今回は、この商品化の取組み、簡易診断装置**BD-2**の商品、そして新たに開発した診断技術も紹介いたします。

今回の特集の中では、需要増が続く**ロボット**、世界のビジネス界の脱炭素社会への急激な変化を追い風に日本でも脚光を浴びるようになった**風力発電装置**、近年IoTやロボットのトレンドを取り込みながらますます高性能化していく**工作機械**、発展途上国を中心に拡大する**鉄道車両**、これらに使用される軸受、直動製品の技術動向を紹介いたします。また、社会の基礎を支える、**モータ**、**鋳山**、**鉄鋼設備**などさまざまな産業に使用されるNSKの技術と製品を紹介いたします。更に新しい製品領域の取組みとなる**ガイドンスロボット**、**全方向移動車輪ユニット**、**鉄道車両用動揺防止アクチュエータ**の紹介をいたします。

弊社は、四つのコアテクノロジー（材料、トライボロジー、解析、メカトロニクス）を基盤に、新しいテクノロジー（有機機能材料、センシング技術）を加えながら、これからも、社会と産業の発展、地球環境の保全に貢献してまいります。

産業機械における状態監視の取り組み

坂野 彰秀*, 田口 恵一郎*, 溝口 大木*



坂野 彰秀



田口 恵一郎

Approach of Condition Monitoring in Industrial Machinery

A. Sakano, K. Taguchi, H. Mizokuchi



溝口 大木

In industrial machinery fields, IoT (Internet of Things) based solutions are expected to improve O&M (Operation and Maintenance) efficiency. Condition Monitoring, one of applications leading the realization of IoT concept, enables a predictive maintenance to optimize O&M. In this article, we will introduce NSK's latest approaches for condition monitoring by taking an example in wind turbine application.

1. まえがき
2. 産業機械における状態監視
3. 風力発電機における状態監視
 - 3.1 状態監視の目的
 - 3.2 状態監視の課題
4. 風力発電機用主軸軸受の損傷検知
 - 4.1 損傷模擬試験
 - 4.2 実機測定
 - 4.3 実機における損傷検知
5. あとがき
6. 謝辞

1. まえがき

IoT (Internet of Things) といったキーワードが既に一般にも浸透し、あらゆるモノがインターネットに接続される社会へのシフトが急速に進んでいる。各国で提唱される Industrie4.0, Industrial Internet, 中国製造 2025, Connected Industries においてもIoTの応用は重要視され、「状態監視」はその具現化をリードする分野として様々な取り組みが進められている。

IoTの前段であるIT, ICTの社会において、NSKでは軸受を始めとする回転機械の診断装置ベアリングモニターの提供を通じ、機械から発せられる振動データを独自の解析システム“ACOUS NAVITM”¹⁾で分析し、機械の健全性を診断する技術サービスを行ってきた。グローバルの現場からNSK技術担当者の間をインターネットで介したシステムである。

ベアリングモニターは後継機 Bearing Doctor2 (商品紹介記事にて後述)として刷新される一方で、状態監視の分野に関しても、“ACOUS NAVITM”の分析・診断技術をベースに、各種製品に対して取り組みを進めている。本稿では、風力発電機の状態監視への取り組みの一環として、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の研究開発プロジェクトを通じて実施した技術研究内容について紹介する。

2. 産業機械における状態監視

産業機械において、設備に取り付けられたセンサデバイスから得られた状態量を、インターネットを通じてデータサーバもしくはクラウドへと集積し、大規模

* 産業機械技術総合センター, CMS 開発部

データ解析によって創生される価値は、設計支援、生産最適化、運用最適化、予防保全など多様である。

「状態監視」では、発電設備・鉄道車両といったインフラを始め工作機械に至るまで、設備・システムの稼働状況や異常の発生をリアルタイムで捉え予防保全を促進することで、O&M (Operation & Maintenance) を最適化することが期待される。

状態監視以前のO&Mは、定期点検により健全性を担保するTBM (Time Based Maintenance : 時間基準保全) により実施されてきた。定められた期間毎に点検を実施し、同様に定められた期間毎に機械部品の交換を実施することで、設備の異常を予防することを目的とした保全手法である。計画は立て易いものの、大なり小なりオーバーメンテナンスであることは避けられない。突発的な事故に対しても後手に回ることとなる。また、定期点検向けの測定装置は持ち運びや取り付けの簡便さが優先され、機能が制限されるほか、取り付けや使い勝手による個人差も少なからず生じる。異常の有無の判断についても保全員の五感ならびに勘と経験に頼るところが大きい。

これに対し、状態監視による設備保全は、IoT を活用した状態監視装置を用い、設備の状態を常時評価することで故障を未然に予測し、より合理的に設備を保守するCBM (Condition Based Maintenance :

状態基準保全) である。測定装置は設備に据え付けられ時々刻々と状態量をネットワークを經由しサーバへ送信し、サーバでは種々様々な評価値を解析し時系列的に変化を捉えその結果を保全員に伝達する。保全員はその結果に基づいた適時・適切なメンテナンスの計画が立てられる。定期点検の期間延伸、補修部品の適切な手配といった面でコスト削減が得られる。

3. 風力発電機における状態監視

近年、再生可能エネルギー導入の機運が高まる中、中長期に風力発電導入の拡大が期待されている。さらなる発電コスト低減のため、設備利用率(利用可能率)向上が課題となる。図1の風力発電機の部位別の故障頻度およびそれにともなうダウンタイム(故障等に伴う運転停止期間≒メンテナンス期間)に示される様に、下段項目のドライブトレイン周辺の回転部位のダウンタイムは平均で20日を超える。ナセル内で補修作業可能なものも含まれるが、ナセルから故障部位を搬出する必要がある場合は大型クレーン等の重機の手配を要する。国土面積の約70%が山岳地帯である日本では、陸上における立地が限られ、アクセスがより困難な洋上への設置が進むことが予想され、状態監視による運用最適化の効果は大きいと考えられている。

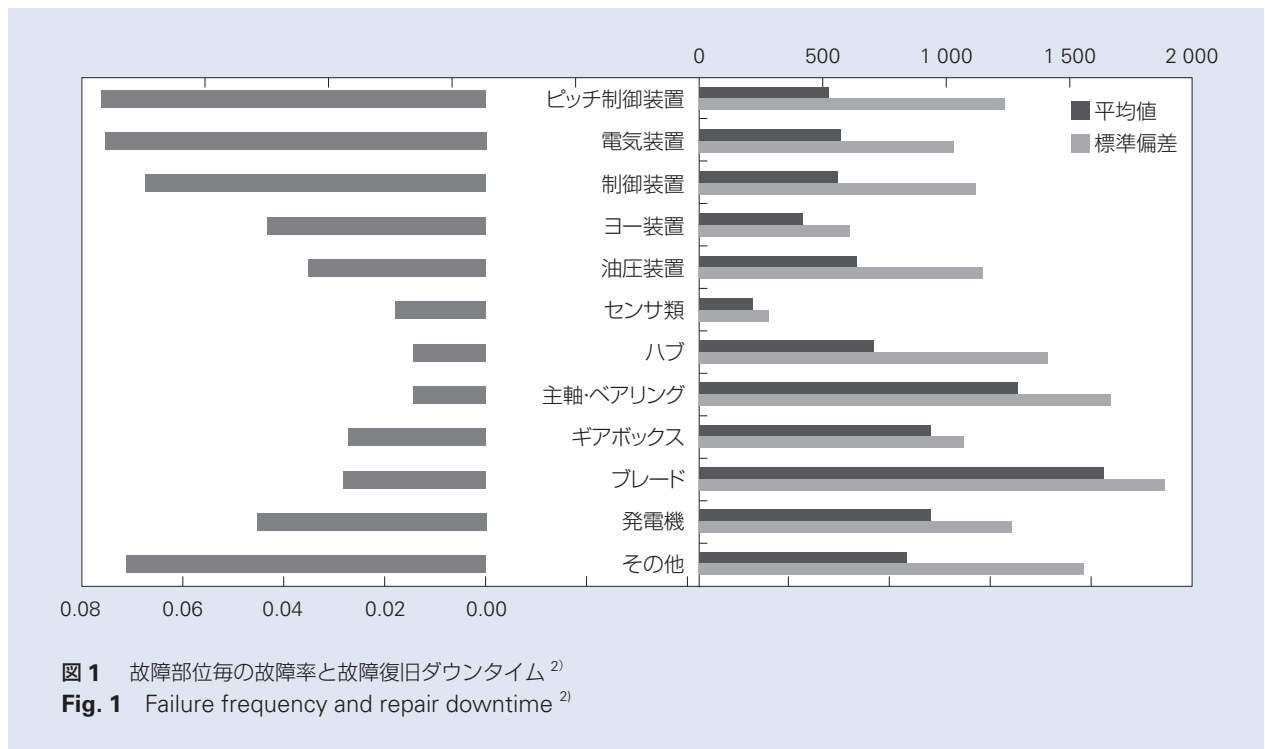


図1 故障部位毎の故障率と故障復旧ダウンタイム²⁾
 Fig. 1 Failure frequency and repair downtime²⁾

3.1 状態監視の目的

風力発電機ではギヤボックスなど大型部品の交換が発生した場合、部品の手配に加えてナセルへ交換部品を揚げ降ろするためのクレーン等重機の手配が必要となる。さらには、発電の面および作業性の面から、風況の弱い期間、日本であれば夏場での作業が望まれる。これに対する要求としては、異常の早期発見と設備全体が重大支障を来すまでの寿命予測である。風力発電は一般的に複数機の風力発電機を有するウィンドファームとして運営されており、異常の早期発見と寿命予測次第で、一回の重機手配で複数機のメンテナンスを行えるといった効率的な計画を立てることも可能となる。

3.2 状態監視の課題

図2に、一般的な風力発電機の構造を示す。状態監視の主な対象となるドライブトレインは、発電機、ギヤボックスおよびブレードに締結された主軸を支持する主軸軸受で構成される。MW級の風力発電機であれば、風力により主軸を $10 \sim 30 \text{ min}^{-1}$ 程度で回転させ、ギヤボックスで約80～100倍に増速し発電機を運転させる。低速回転する主軸軸受に損傷した際に生じる振動のエネルギーは小さい。加えて、周辺にギヤボックスとそれに繋がる発電機を始め、ナセルを回転するヨー制御システムやブレード角を調整するピッチ制御システムなど、多様な振動源が混在する。そのため、主軸軸受の損傷検知はSN比が著しく低い。

NEDO 研究開発プロジェクトでは、主軸軸受の損傷検知を状態監視における課題に据え、実際の風力発電機の長期測定を行い、課題の明示からその解決方法の提案まで取り組んだ。次章で、その内容について紹介する。

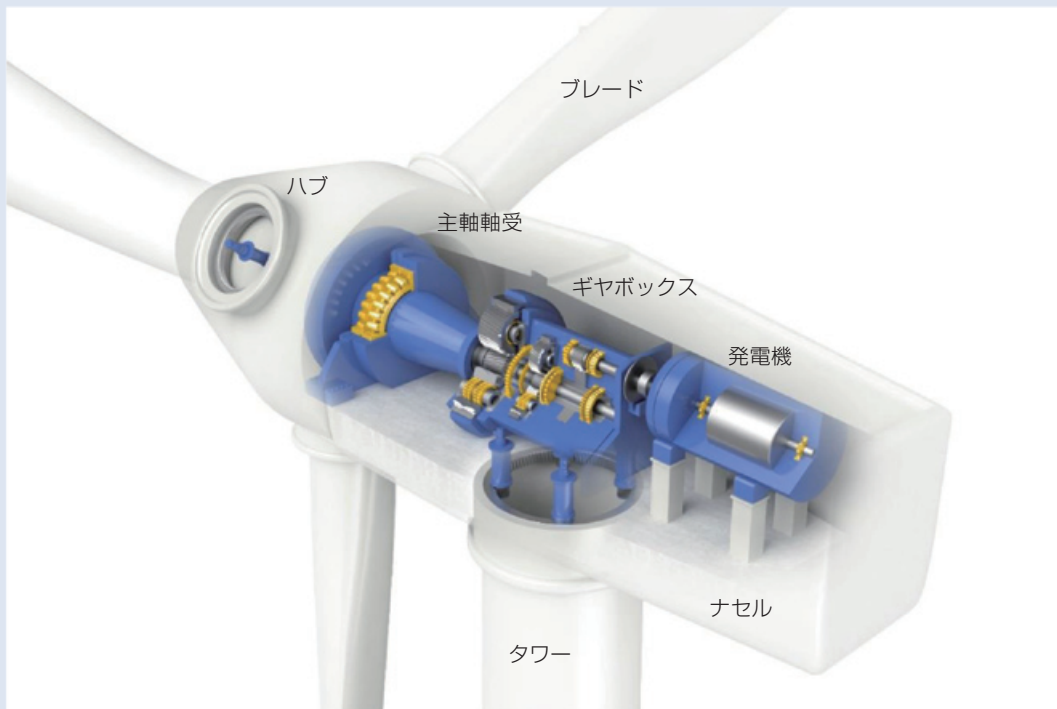


図2 風力発電機の構造
Fig. 2 Schematic image of wind turbine

4. 風力発電機用主軸軸受の損傷検知

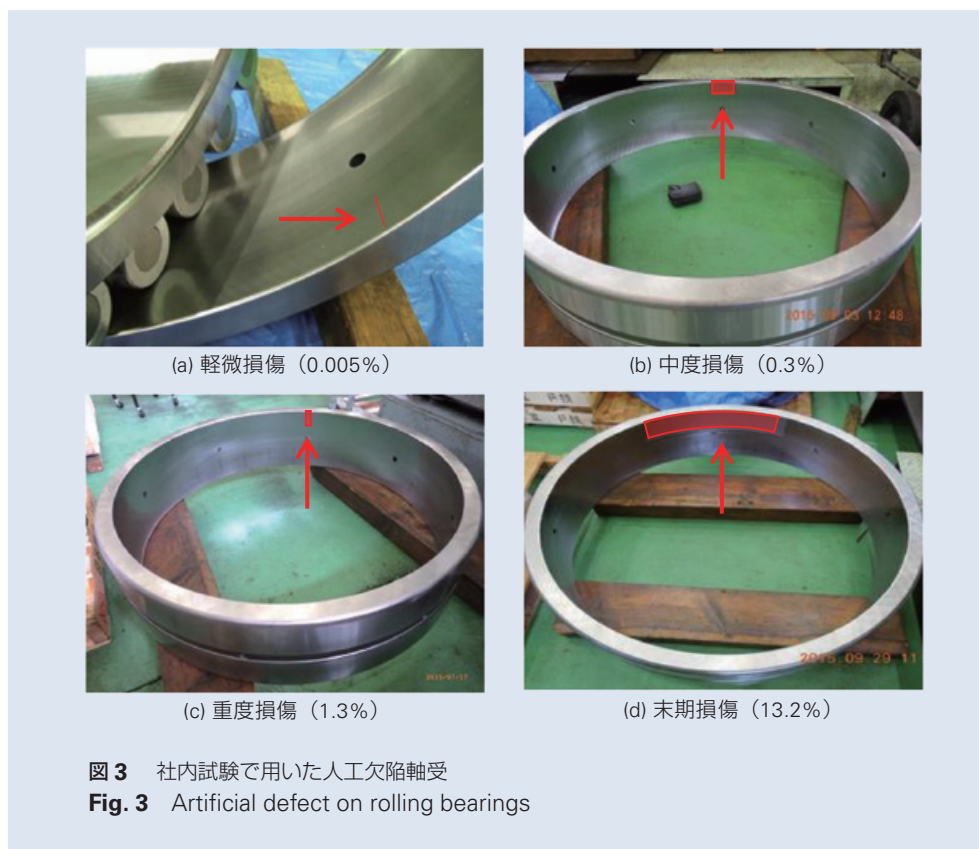
主軸軸受の損傷検知に当たり、軸受の損傷程度と振動の関係を明らかにすることを目的に損傷模擬試験を実施した。次いで実機測定を行い、損傷交換に至るまでの振動データを取得した。両者の比較分析を元に課題を述べ、これに対する解決案を示す。

4.1 損傷模擬試験

2 MW 級の風力発電機用主軸軸受を用いて、損傷模擬試験を実施した。損傷の程度として、**図 3** に示すように、初期の極軽微損傷から継続運転が不可能な末期損傷を想定した 4 サイズの人工欠陥品を用意し

た。括弧内の数字は損傷面積比であり、損傷程度を表す指標として、軸受軌道面積に対する損傷部の面積の割合を示した。試験条件は実機相当の荷重および 3 条件の回転速度を設定した。

図 4 は試験結果であり、横軸に $d_m \cdot n$ (軸受の転動体ピッチ円径×回転速度 n) を取り、縦軸に振動加速度の実効値を示したもの(絶対値評価)と、正常に対する比を示したもの(相対値評価)である。周囲に他の振動源が無い試験においては、回転速度の増加に加え、損傷程度の増加に対して、振動レベルが一様に増加する結果となった。



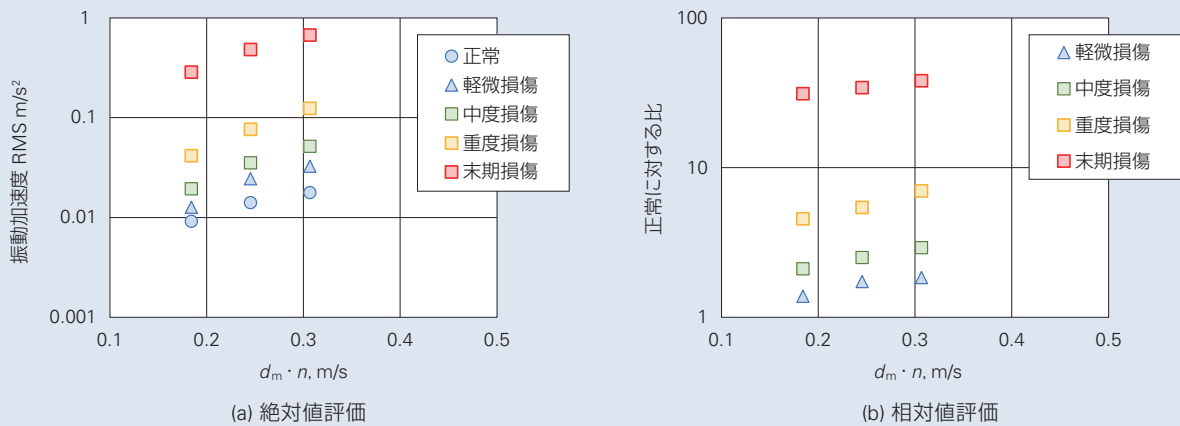


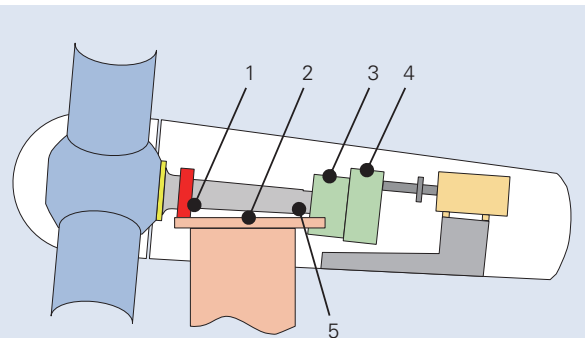
図4 社内試験結果
 Fig. 4 Experimental result using artificial defected rolling bearings

4.2 実機測定

同一ウィンドファーム内の定格出力 1 MW の風力発電機 4 機にて測定を実施した。図 5 に、測定概要を示す。各測定データはナセル内に設置したデータ収録機を用いて 25 kHz で同期サンプリングした。

2015 年 11 月から 2017 年 10 月の期間において長期連続的に測定を行った結果、内 1 機の主軸軸受で損傷が発見され 2017 年 5 月に交換が行われた。図 6 に示す様に、外輪軌道面の 1 ヶ所に損傷面積比約 3% 程度のはく離損傷が発生していた。

図 7 に、はく離損傷が発生した主軸軸受の振動加速度測定結果を示す。代表として、損傷交換（2017 年 5 月）の半年前（2016 年 12 月）、同直前（2017 年 4 月）、同直後（2017 年 9 月）の 1 ヶ月間の平均値と標準偏差を示している。なお、損傷模擬試験で示された様に、振動値は回転速度に依存するため、本機種種の定格回転速度近傍の $21.4 \sim 21.6 \text{ min}^{-1}$ の運転時のデータのみを抽出した。平均値自体は、損傷交換前後で上下に推移しているが、その推移よりも標準偏差が示すバラツキの方が大きい。また、図 4 の試験結果と比較（実機条件 $d_m \cdot n = 0.24 \text{ m/s}$ ）すると、絶対値評価ではいずれの測定結果も重度以上の損傷程度となっているのに対し、相対値評価（交換前 ÷ 交換後）では軽微損傷以下と乖離が生じている。



番号	対象	項目
1	主軸軸受	振動加速度
2	ナセル床	振動加速度
3	ギヤボックス：遊星部	振動加速度
4	ギヤボックス：高速部	振動加速度
5	主軸	回転速度

図5 実機測定概要
 Fig. 5 Measurement points on wind turbine drive-train



図6 主軸軸受のはく離損傷写真
Fig. 6 Flaking damage on outer-ring of main-bearing

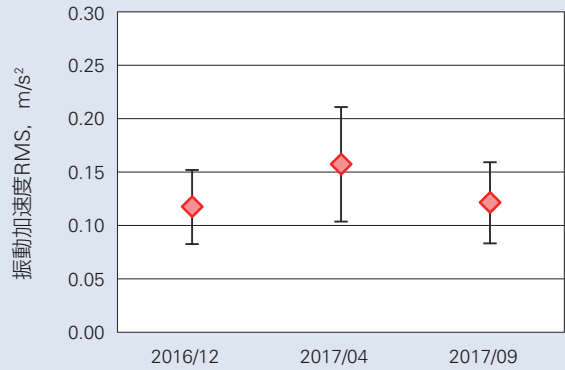


図7 主軸軸受の実機測定結果
Fig. 7 Measurement result of main-bearing

図8に、損傷模擬試験(中度損傷)と実機測定(損傷交換直後)の主軸軸受振動の時間波形を示す。試験結果に見える約0.24秒間隔の衝撃振動は、模擬損傷に起因した振動である。これに対し、損傷交換直後の正常状態の実機測定結果は、試験の衝撃振動と同等であり、さらにはそれを大きく上回る衝撃振動も生じている。

図9は、風力発電機の主軸軸受への振動伝達経路の模式図である。風を受け動作するブレード・ハブの振動や、主軸の回転に対するギヤや軸受の反力により生じるギヤボックスの振動が、主軸を介して主軸軸受へ伝達する。一方で、ドライブトレインを含めナセルを支持するタワーの構造振動も伝達される。時間波形で示される様に、振動測定箇所である主軸軸受箱では、主軸軸受の損傷に起因する振動は、周辺からの振動に対し非常に小さいことが分かった。すなわち、主軸軸受の損傷検知に対して十分なSN比の確保を講じることが課題となる。

4.3 実機における損傷検知

主軸軸受の損傷検知に十分なSN比を得るため、周辺振動を外乱として適切に処理する必要がある。そこで、図9で示した周辺構造からの振動それぞれについて分析を行った。なお、いずれの分析も、主軸軸受に損傷が確認されていない機体の定格回転速度で運転されているデータを用いた。

(1) ギヤボックス

図10に、同期測定したギヤボックス遊星部振動と主軸軸受振動の周波数解析結果を示す。対象機種種のギヤボックスは遊星1段+平行2段構造であり、表1で示す振動成分がスペクトル上で確認出来る。ギヤボックス遊星部では、中速-高速の噛み合い4次成分(3.2 kHz)までが確認出来る。一方で、主軸軸受では中速-高速の噛み合い3次成分(2.4 kHz)までが確認出来ることから、ギヤボックス振動の影響範囲はおおよそ3 kHz以下である。ただし、2次以降の高次成分は大きく減衰している点も特徴である。

表1 ギヤボックスのピーク周波数

Table 1 Gearbox spectrum frequency

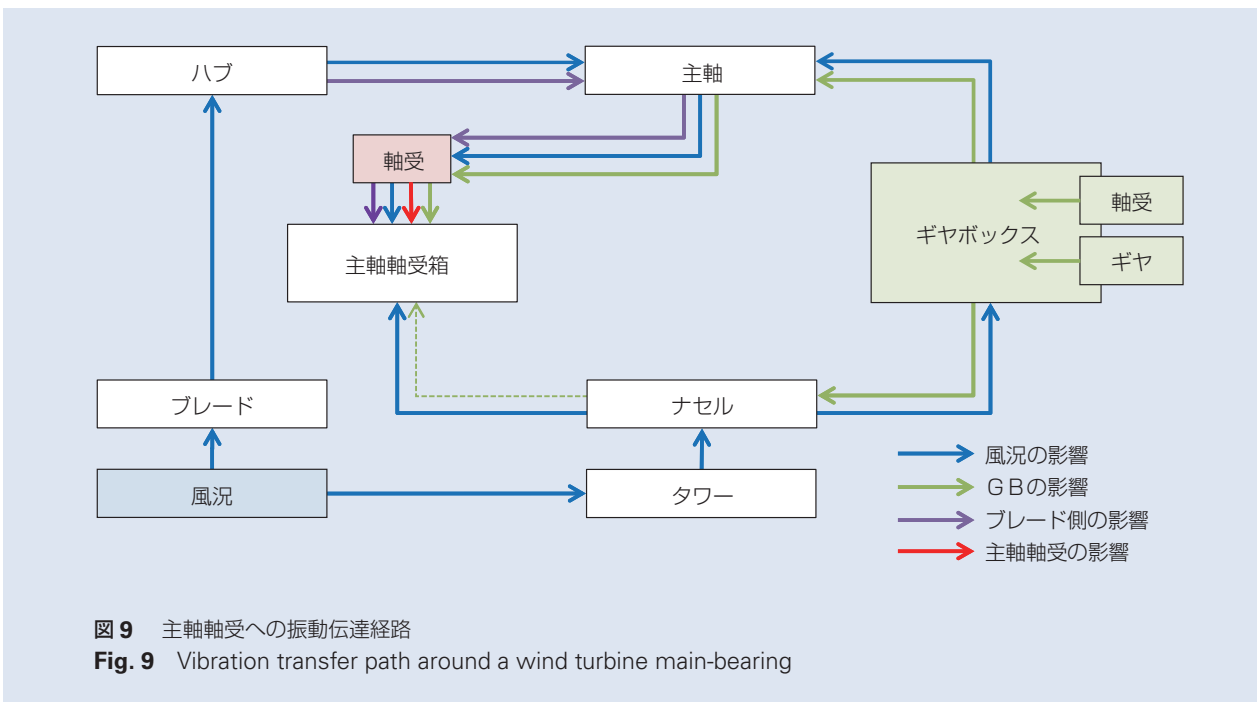
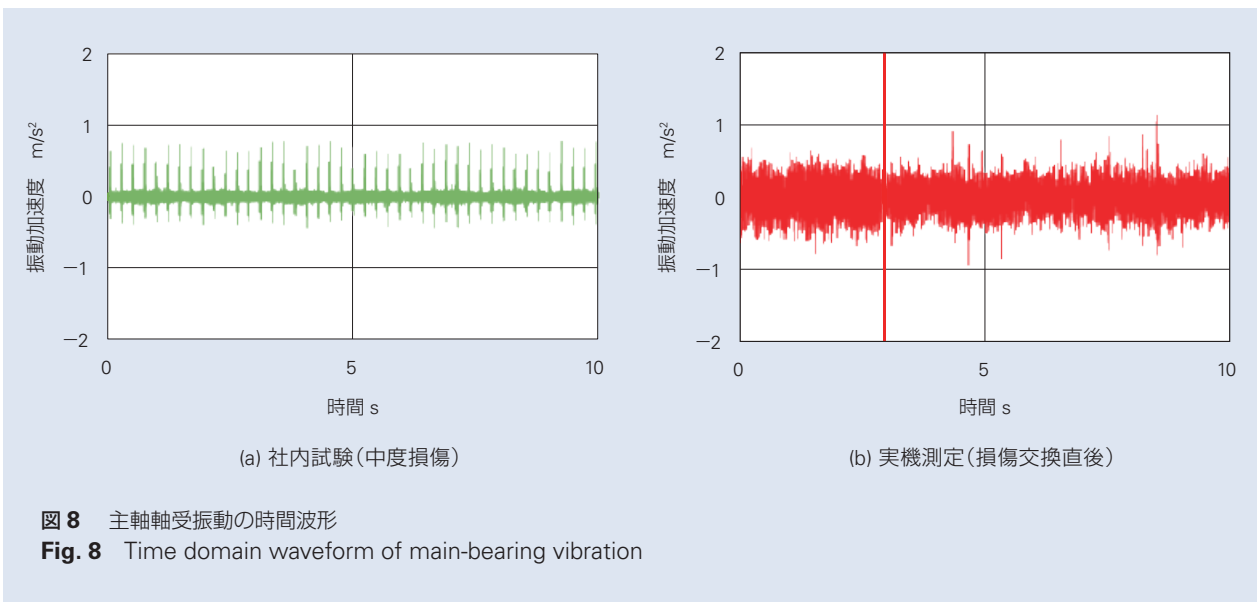
項目	1次の周波数 (Hz)
低速軸 回転	2.39
中速軸 回転	11.94
高速軸 回転	25.00
遊星部 噛み合い	36.55
低速 - 中速 噛み合い	215.00
中速 - 高速 噛み合い	800.28

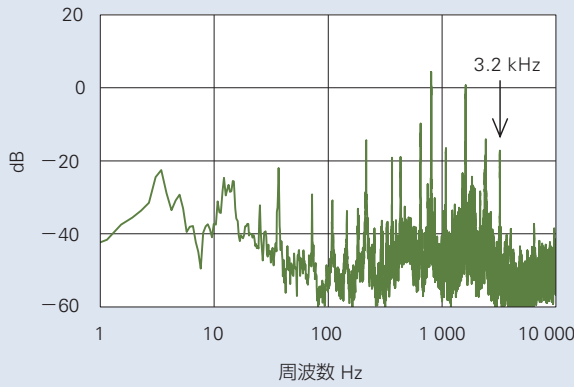
(2) ブレード・ハブ

図8で示した高レベルの衝撃振動は、ナセル内外で聴感でも捉えられる。その発生源はハブ内部に確認され、風力発電機毎に発生の有無・頻度・大きさが異なる。図11に、特に顕著に発生している状態の主軸軸受の振動波形と、その衝撃振動発生時の周波数分析結果を示す。衝撃振動は、主軸回転周期の約3秒で発生しており、1 k ~ 6 kHzの周波数帯域に影響を及ぼすことが確認された。

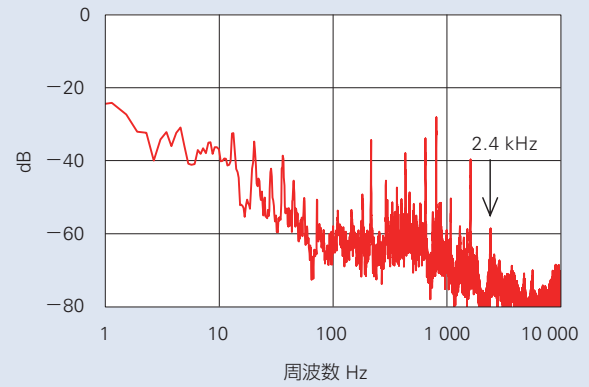
(3) タワー・ナセル

図12に、同期測定したナセル床振動と主軸軸受振動の周波数解析結果を示す。主として構造系の振動が現れる10 Hzまでの帯域において、両者はほぼ同等の結果となっている。0.5 Hzのピークはタワーの1次固有振動である。この帯域には主軸回転約0.33 Hzと、3枚のブレードの位置関係で生じる約1 Hzの振動成分も含まれるが、高調波成分を含むタワーの固有振動に比較し低レベルとなっている。



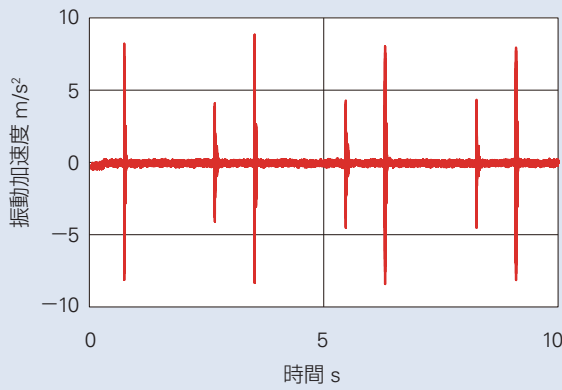


(a) ギヤボックス遊星部

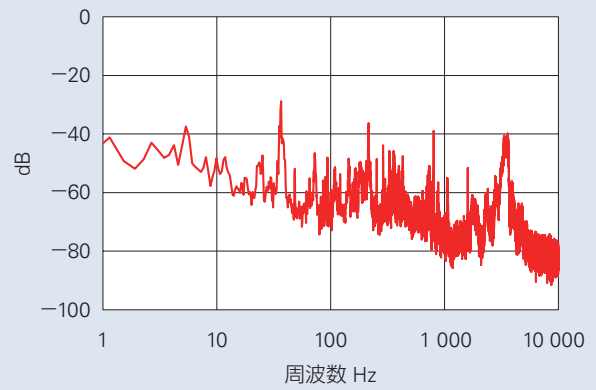


(b) 主軸軸受

図 10 ギヤボックス振動の主軸軸受振動への影響
Fig. 10 Effect of gear mesh vibration from a gearbox

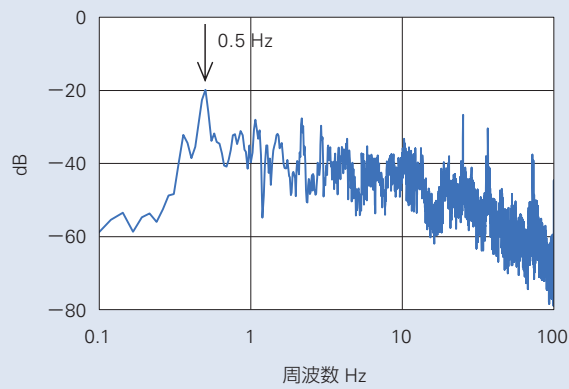


(a) 時間波形

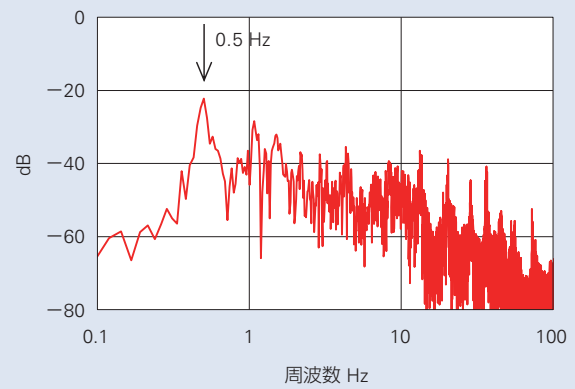


(b) 周波数分析結果

図 11 ブレード・ハブ側振動の主軸軸受への影響
Fig. 11 Effect of impulse vibration from a blade and hub system

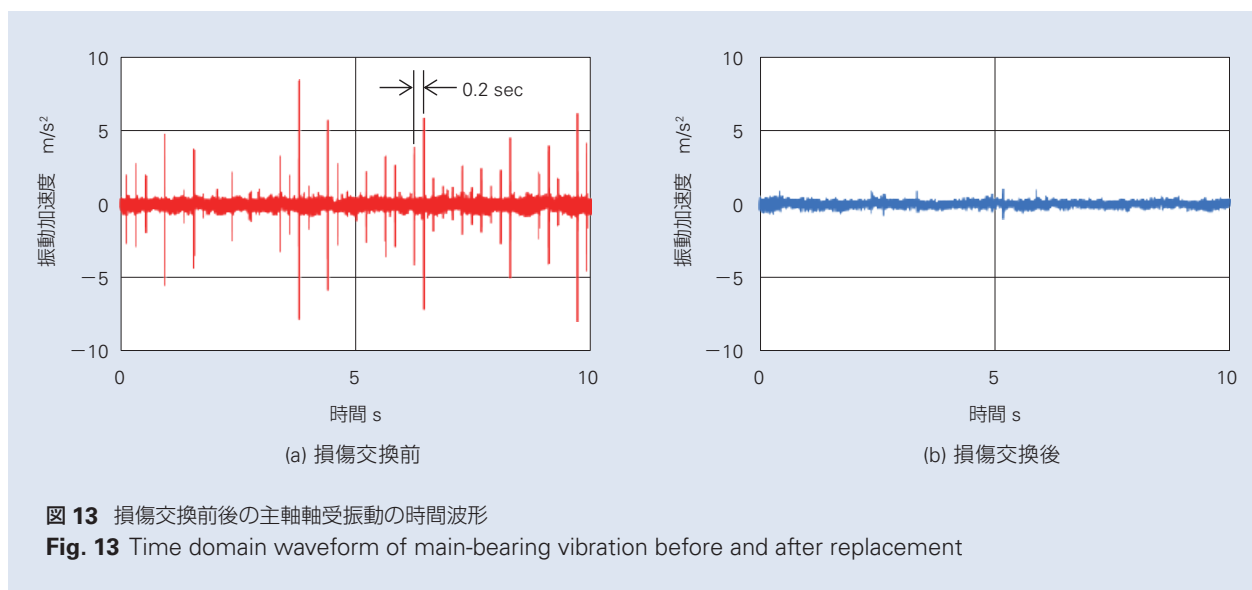


(a) ナセル床



(b) 主軸軸受

図 12 タワー・ナセル振動の主軸軸受への影響
Fig. 12 Effect of structural vibration from a nacelle (tower)



これらの外乱振動と主軸軸受自身が発する振動が重畳され主軸軸受部の振動として現れる。これを踏まえて損傷交換前後のデータを分析し、適切な損傷検知方法を示す。図 13 に、損傷交換前後の主軸軸受の時間波形を示す。交換前に生じている衝撃振動は約 0.2 秒間隔であり、前述のブレード・ハブからの衝撃振動とは異なっている。これに対し、損傷交換後は、この衝撃振動は無くなっている。

図 13 で示した時間波形の周波数解析結果を図 14 に示す。損傷交換前は、2 k ~ 6 kHz の周波数帯域が大きく励振されている一方で、100 Hz 付近の周波数帯域のレベルも高くなっている。図 15 は、上昇が確認されたそれぞれの周波数帯域に対し、軸受損傷検知のためのエンベロープ解析を行った結果である。2 k ~ 6 kHz の方が鮮明であるが、いずれも対象機種の主軸軸受の外輪損傷時に発生する周波数成分の 4.9 Hz 間隔のピークが捉えられており、損傷に起因した振動レベルの上昇であると分かる。先の時間波形で確認された衝撃振動の間隔 0.2 秒とも一致する。

ここで、2 k ~ 6 kHz はブレード・ハブの衝撃振動発生時は SN 比が低下する。50 ~ 200 Hz はギヤボックス振動の影響範囲である。ただし、2 次以上のギヤ振動成分の影響は小さい。これらより、対象機種の主軸損傷検知においては、50 ~ 150 Hz の周波数帯域がおおよそ適切であると見なせる。

図 7 で示したデータに対して、50 ~ 150 Hz の周波数帯域でフィルタリングした結果を図 16 に示す。損傷の有無に対する振動レベルの差、すなわち感度が向上するとともに、バラツキも大きく低減される結果となった。

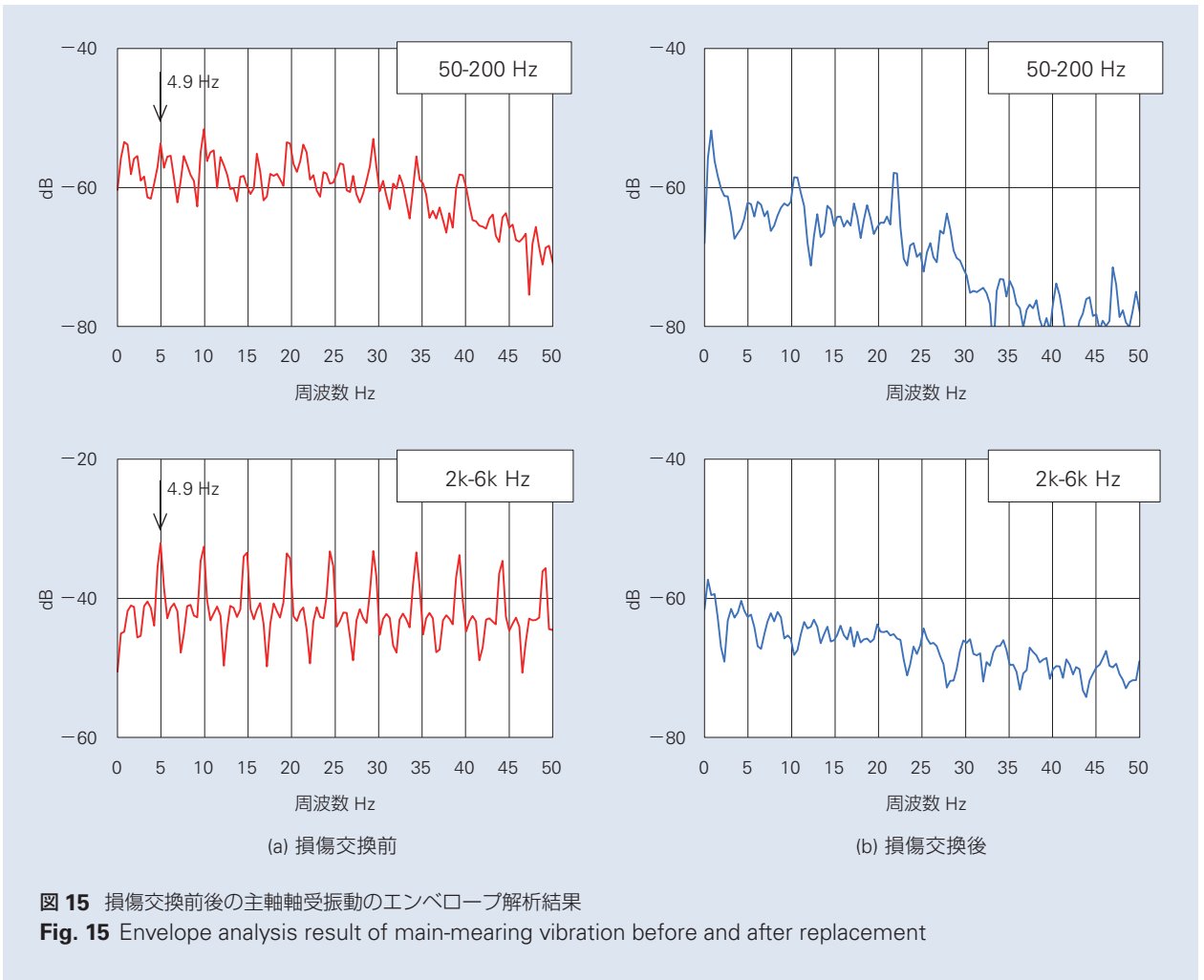
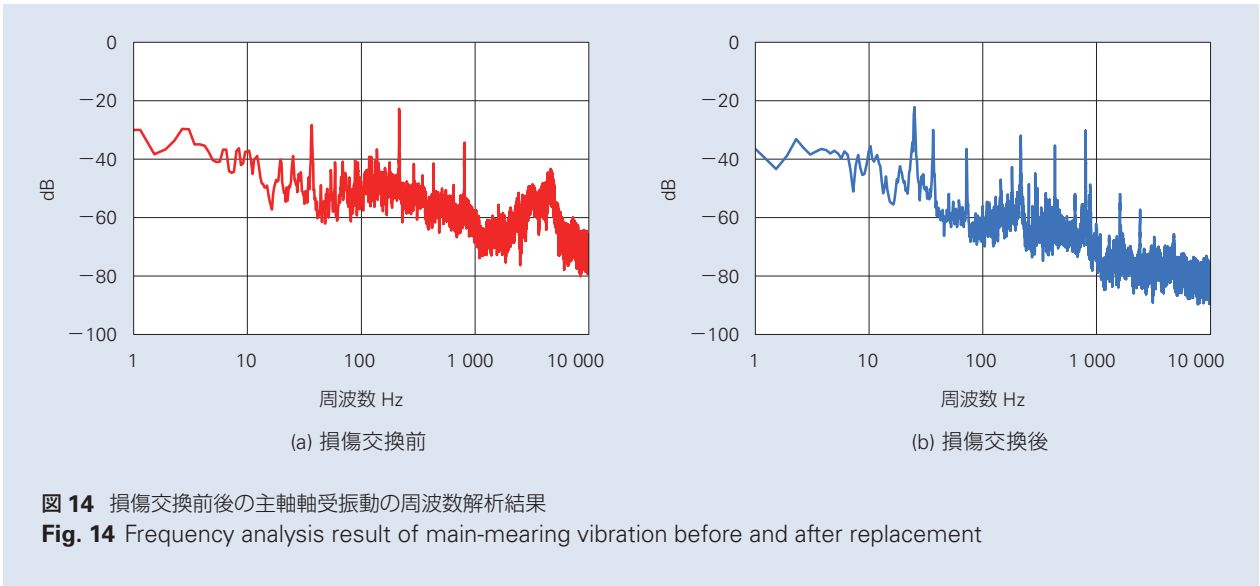
次に、同様のフィルタリングを損傷模擬試験データに適用した結果との比較を図 17 に示す。(a) 絶対値評価では、損傷の程度が正しく評価されていない。振動源とセンサ設置点との間の伝達系が実機と試験機で異なるため絶対値での評価は難しいことを意味する。これに対し、(b) 相対値評価では重度損傷（損傷面積比 = 1.3 %）と同程度であり、概ね正しい評価が得られている。伝達系には、軸受の隙間や温度変化等の非線形が含まれるが、比を取ることで伝達系の差が概ねキャンセルされた結果と考える。

上述の評価手法では、風力発電機の機種毎にフィルタリングの設定が必要のため、風力発電機の理解が必要とされる。一方で、IoT の潮流である機械学習、ビッグデータ解析がこれに対する一助となることが期待される。

5. あとがき

本報では、産業機械における状態監視に対する NSK の取り組みの一つとして、風力発電機の状態監視に関する技術研究内容について紹介した。

NSK では、風力発電機に限らず、NSK 製品の関わる多くの分野で「状態監視」に関して継続的に取り組んでいる。測定データに限らず状態監視を通して得られた市場ニーズを基に、新しい技術提案ならびに商品開発を進めていきたい。



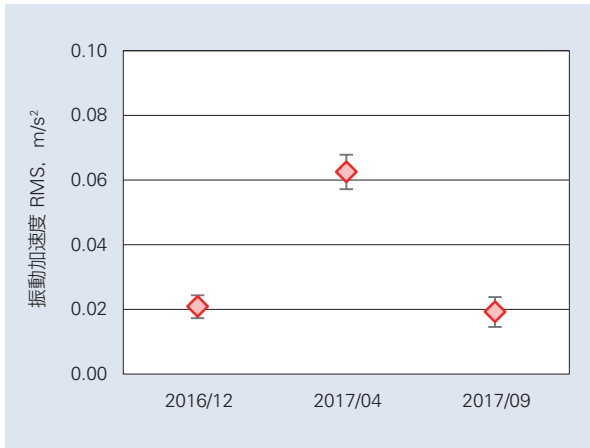


図 16 フィルタリング後の主軸軸受の実機測定結果
 Fig. 16 Measurement result of main-bearing applying noise reduction filter

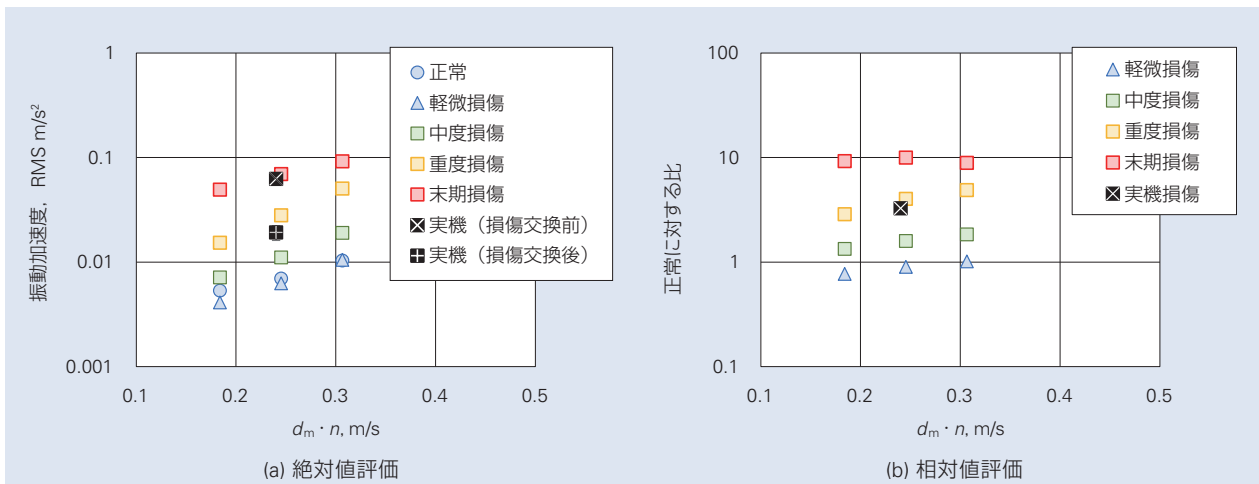


図 17 フィルタリング後の主軸軸受振動の損傷模擬試験と実機測定の比較
 Fig. 17 Comparison between experimental and measured main-bearing vibration applying noise reduction filter

6. 謝辞

本報で紹介した風力発電機の状態監視の研究開発は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務で得られた成果である。NEDO ならびに共同研究各機関、測定等へのご協力いただいた風力発電事業者に謝意を表します。

参考文献

- 1) 武藤 泰之, 宮坂 孝範, “軸受異常音デジタル解析システム” ACOUS NAVI™, NSK Technical Journal, No.674 (2002) 27-30.
- 2) 菊地 由佳, 斎藤 亮太, 石原 孟, “故障復旧費とダウンタイムの不確かさを考慮した維持管理費の評価”, 風力エネルギー利用シンポジウム, No.38 (2016) 55-58.

産業機械用軸受の技術動向



石黒 博*

石黒 博

Technical Trend of Industrial Machinery Bearings

H. Ishiguro

In recent years, industrial machineries demand remained steady and it will continue to good result in the future. In the globally, efforts to solve universal problems are expanding such as sustainable consumption, production, and climate change countermeasures for all countries. The industrial machinery industry has greatly contributed to a sustainable society by daily technological innovation. This paper introduces the latest technology of bearings used in these industrial machines such as Robot reducer, Servomotor, Mining machinery and Shale gas related machines.

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. ロボット減速機，サーボモータ用軸受の技術 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 サーボモータ用軸受の技術 2.2 ロボット減速機用軸受の技術 | <ol style="list-style-type: none"> 3. 鉱山機械，シェールガス産業機器向け軸受の技術 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 鉱山機械用軸受の技術 3.2 液化ガスポンプ用軸受の技術 3.3 シェールガス掘削ドリルヘッド用軸受の技術 4. あとがき |
|---|---|

1. まえがき

近年、労働人口の減少や人件費の上昇を背景に産業用ロボットの需要が急拡大している。また、グローバルな人口増加や新興国の経済発展に伴い、鉄鉱石や銅などの各種鉱山資源や天然ガスの採掘が増加している。

一方、国連は、持続可能な消費や生産、気候変動対策など全ての国に適用される普遍的な開発目標

(SDGs)を制定し、この問題解決に向け取り組むことを採択した。

各種産業機械分野は、これら SDGs の開発目標と深くかかわっており、日々の技術革新により持続可能な社会に大きく貢献している。本稿では、これら産業機械に使用される軸受の最新技術を紹介する。

* 産業機械軸受技術センター ロボット・モータ機器技術部

2. ロボット減速機，サーボモータ用軸受の技術

ロボットの主な駆動源には、制御性が良く取り扱いが容易な電動サーボモータが使用されている。しかし、その出力は高速回転・低トルクなため、ロボットに必要な低速回転・高トルクに変換する機構が減速機となる。このサーボモータ、減速機に使用される軸受の技術を紹介する。

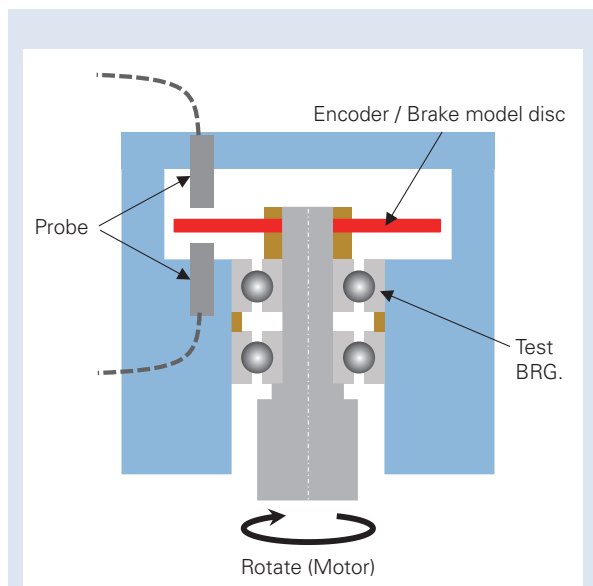


図1 エンコーダ模擬試験機の概略構造
Fig. 1 Simulation test outline of encoder

2.1 サーボモータ用軸受の技術


ロボットに搭載されるサーボモータは、著しい正逆回転、起動・停止と共に、アームの高速移動による外力・振動やアーム内の高温など過酷環境下で運転されている。要求される機能は、精密な回転・静止、位置決め制御で、この機能をモータ軸に取り付けられたブレーキとエンコーダが担う。共にブレーキ板やエンコーダ板表面の油汚染によるブレーキ滑りや読み取りエラーなどが技術的な課題とされている。

NSKは、軸受内部のグリース飛散とエンコーダ汚染の関係を確認するため、模擬実験を実施しており、**図1**、**図2**、**図3**、**図4**にその概要と汚染の結果を示す。この結果から、NSKが開発した低発塵LGUグリースや軽接触DWシールなどの対策が有効であることが確認され、市場にて高い信頼性を得ている。

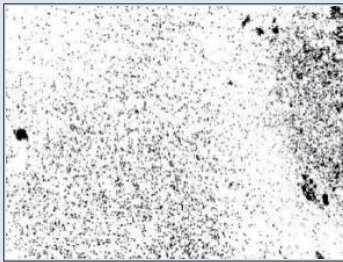
2.2 ロボット減速機用軸受の技術

ロボット減速機は、アームの関節部で使用されるため小型軽量、低バックラッシュ、高剛性、長寿命などが要求されている。特に、出力軸には大きな外部荷重やモーメント荷重が負荷されるため、NSKは、解析技術を活用し限られたスペースの中で高剛性と長寿命を両立できる専用軸受を提供している。**図5**にその具体例を示す。ここでは、玉径×玉数×接触角などを最適設計し、更に最適な運転予圧を設定することで高剛性と長寿命の両立を実現している。

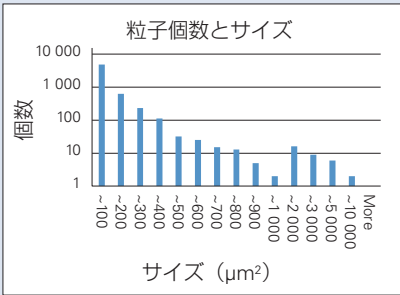
また、入力軸や中間軸にも大きな荷重が負荷されることから、省スペースで高負荷容量な小形ニードル軸受や円錐ころ軸受などが採用されている。



試験後エンコーダ
Encoder after test



二値化処理の例
Banalization



粒子径別個数の例
Particle size by number

図2 エンコーダ表面付着物量の例(非接触シール品)
Fig. 2 Out gas adherence on the encoder surface (None contact seal)

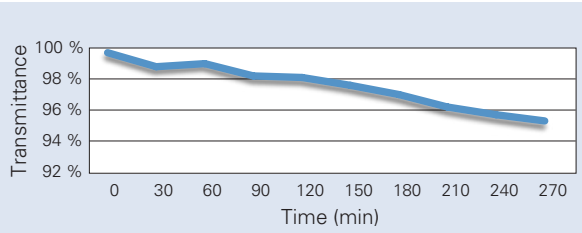


図3 アウトガスの付着によるエンコーダ板の透過率変化(非接触シール品)
Fig. 3 Change in transmittance of encoder disc by out gas adherence (None contact seal)

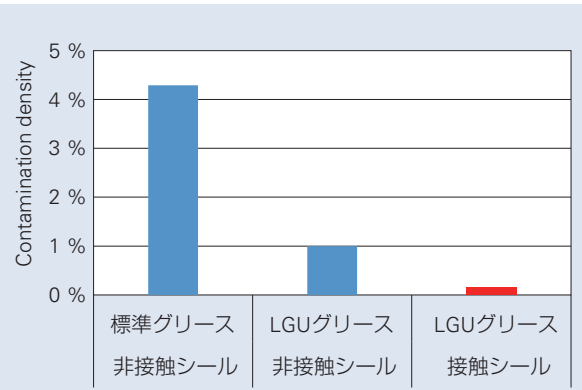


図4 エンコーダ模擬試験結果(グリース・シール種類)
Fig. 4 Encoder simulation test result (grease/seal type)

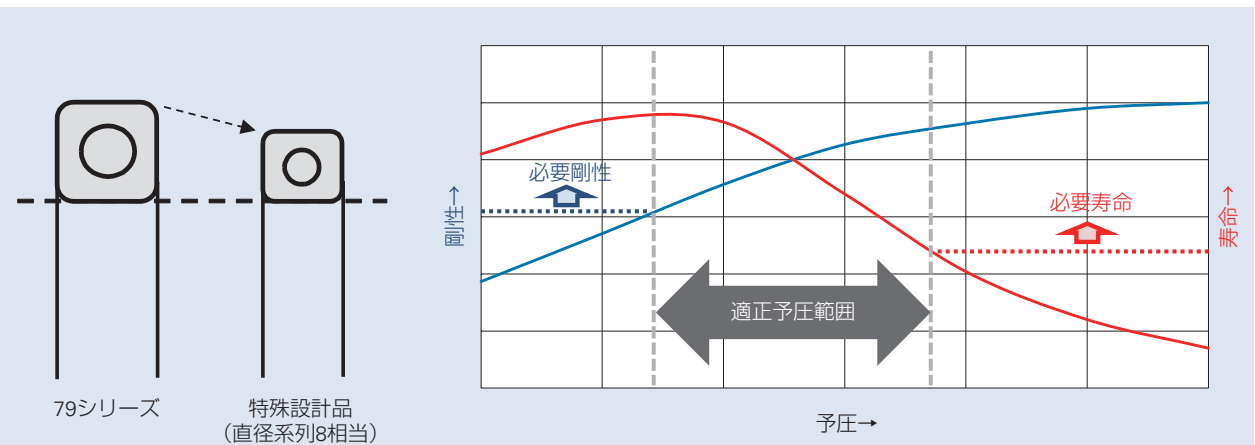


図5 ロボット減速機用軸受の設計例
Fig. 5 Design examples of robot reducer bearings

3. 鉱山機械、シェールガス産業機器向け軸受の技術

ここでは、鉱山機械に採用されている軸受の長寿命化技術及び、化石燃料の中で最も CO₂ 排出量が少ない天然ガス火力発電に関する軸受技術を紹介する。

3.1 鉱山機械用軸受の技術

全長が数キロ以上に及び鉱山コンベア用のプーリー

には、高負荷容量で軸のたわみを吸収できる自動調心ころ軸受が使用されている。特に、軸受の交換作業には、内部すきまを正しく管理する必要があり、シール無しタイプが採用されている。NSKは、独自のボルト締結型シールを採用して軸受の組込み時の正確なすきま管理を可能にしながら高い密封性を実現した「高密封シール付自動調心ころ軸受」(写真1, 図6)を開発し、市場で好評を得ている。この開発軸受は、高密封

封シールを装着しても従来軸受と同一の幅寸法になるように最適設計されており、更に軸受の負荷容量は長寿命な Hi-TF 技術¹⁾を採用することで従来品と同等以上としている。この結果、高荷重で粉塵などの厳しい環境下でも長寿命を実現している。

図7に従来品と開発軸受の鉱山現場での運転試験結果を示す。約1年間運転後の従来品には、既にはく離が発生していたが、開発軸受にはく離等の異常は無く、グリース内異物量も従来品の約1/10と高い密封性を保持していることがわかる。

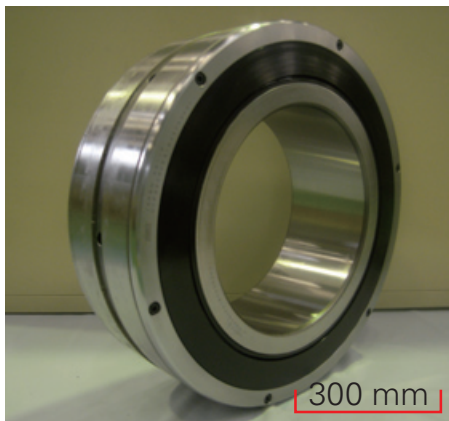
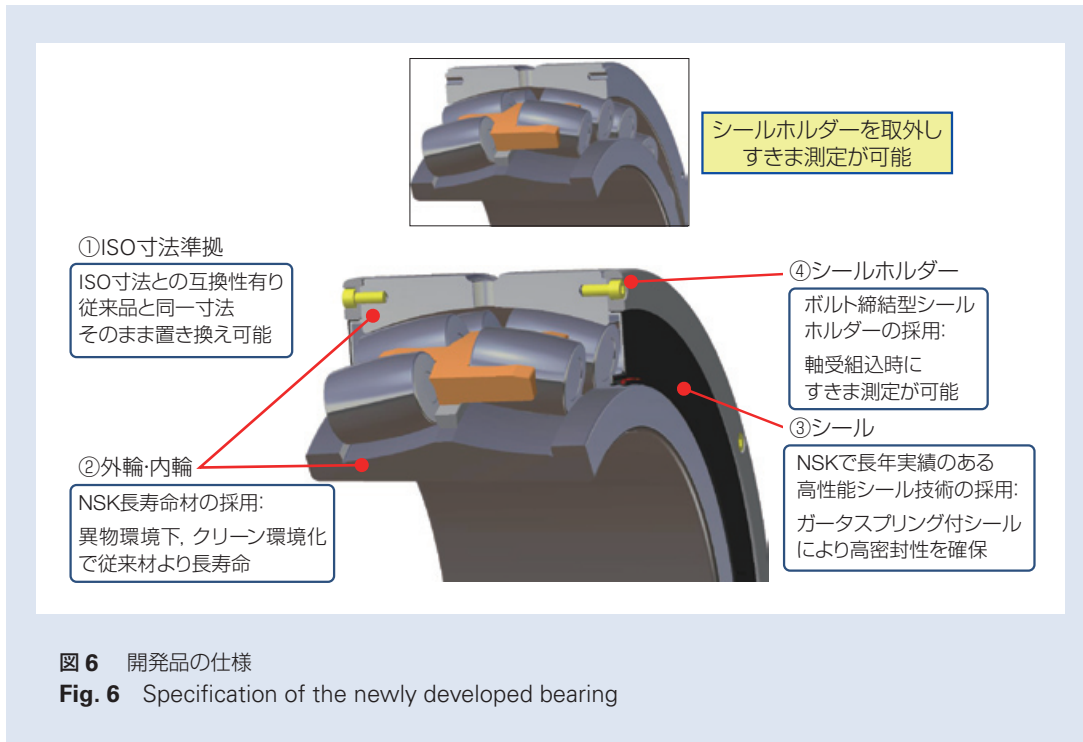
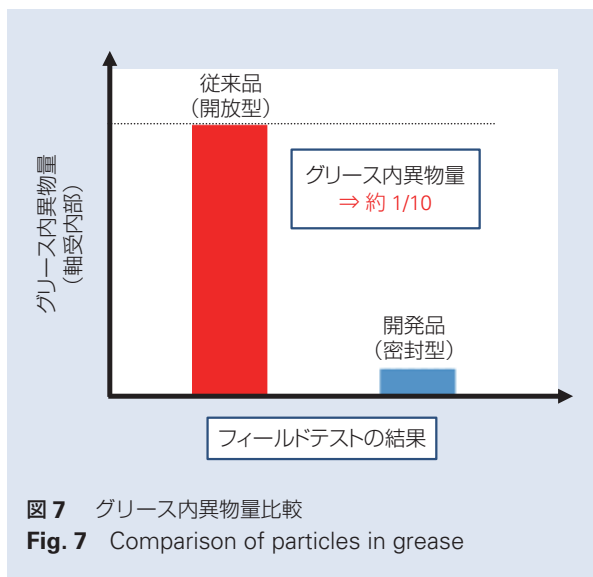


写真1 高密封シール付高信頼性自動調心ころ軸受
Photo 1 Spherical roller bearings featuring high reliability and excellent sealing performance for conveyors



3.2 液化ガスポンプ用軸受の技術

液化ガスポンプは、各種液化ガスをタンカーや陸上基地で受入れ・移送・払出しするのに使用される専用ポンプ(図8)で、代表的な液化ガスには、液化天然ガス(LNG, -162℃)、液化石油ガス(LPG, 約-40℃)、液体窒素(LN2, -196℃)などがある。このポンプの羽車は軸受で支持されており、軸受は液化ガスで潤滑される。液化ガス中では極低温のため防錆剤が使用出来なく、軸受の内外輪・玉には腐食に強いマルテサイト系ステンレス鋼が採用されている。保持器材質は、低温でも潤滑性のあるフッ素樹脂を採用しており、特殊リベットで締結した構造をしている(図9)。

近年は、ポンプモータのインバータ化による電食防止策として窒化珪素セラミック玉の採用が徐々に増えている。このセラミック玉は、耐摩耗性にも優れている²⁾ため、長寿命・信頼性向上が期待できる。しかし、線膨張係数がマルテサイト系ステンレス鋼に比べて極端に小さいことから、室温から極低温(-196℃)の範囲ではラジアル内部すきまが大きく変化してしまう問題が確認されている。この対策として、線膨張係数がマルテンサイト系ステンレス鋼に近い新セラミックを用いた高性能新セラミック玉軸受 spaceaCRYO™(写真2)の商品化を進めている³⁾。

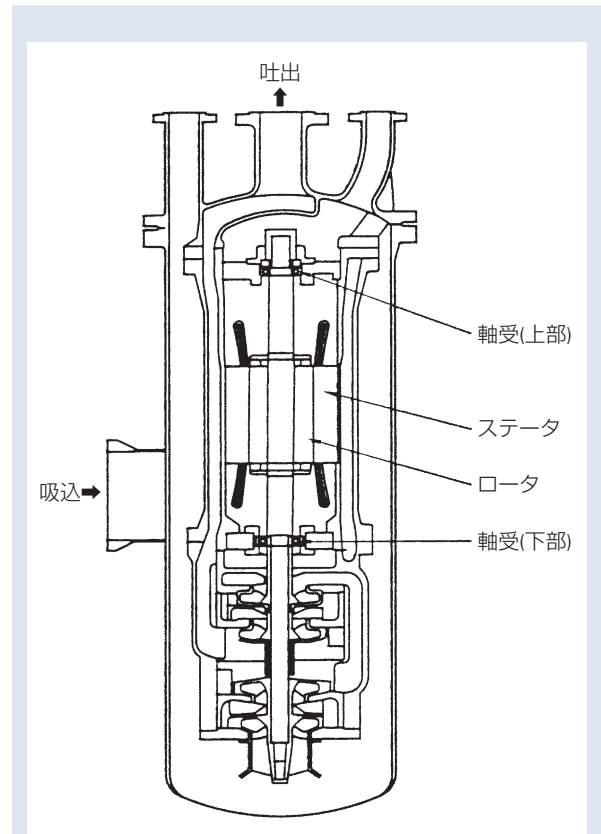


図8 液化ガスポンプの概略構造
Fig. 8 Outline structure of liquefied gas pump

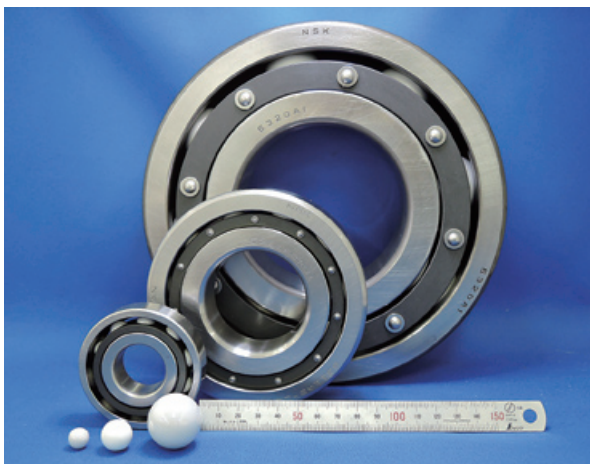


写真2 高性能新セラミック玉軸受 spaceaCRYO™と新セラミック玉

Photo 2 New high-performance ceramic ball bearing; spaceaCRYO™ and new ceramic balls.

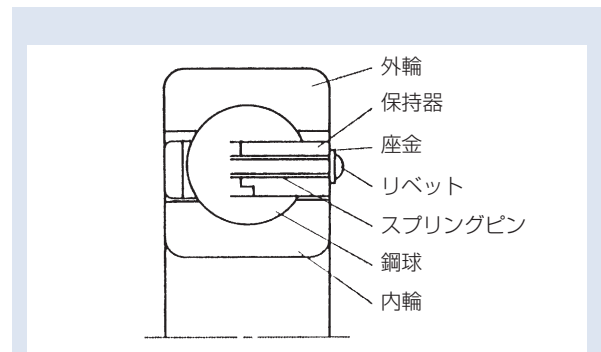


図9 液化ガスポンプ用軸受の概略構造
Fig. 9 Outline structure of bearings for liquefied gas pump.

3.3 シェールガス掘削ドリルヘッド用軸受の技術

近年、北米を中心に地下 2 000 m 付近のシェール層からオイルや天然ガスを取り出すことが可能となり、採掘量が急拡大している。このシェール層に到達する穴を掘削するためのドリルモーターには、大きな負荷が掛かる上、内部の軸受は泥水によって潤滑される構造となっている(ドリルモーターの構造を図 10 に示す)。この軸受への主な要求機能は、泥水潤滑下でも摩耗が出来るだけ少なく、運転中に軌道輪や転動体が割損しないこと。これを満たす現在の軸受仕様は、4 点接触玉軸受(多段総ボール)、内外輪材質は浸炭鋼、玉材質は S2 工具鋼(ASTM A681)とされている。

NSK は、独自の内外輪材質を採用した開発軸受のフィールド評価を完了しており、割れ等の不具合は無く摩耗特性も現行浸炭材と同等以下であることを確認した(写真 3)。引き続き、ドリルメーカーと協力して最適軸受仕様の確立を目指す。



図 10 ドリルモーターの構造
Fig. 10 Structure of drill motor

4. あとがき

以上、産業機械に使用される軸受技術を紹介した。近年では、AI 技術を活用したコンピュータ制御による多機能化、省力化、最適化などを示す「スマート化」があらゆる分野で増えている。産業機械も同様に、高効率な生産やメンテナンスの省人化などを目的とした「スマート化」開発が進められている。軸受にも従来の小形・軽量、高負荷容量、長寿命に應えるだけでなく、軸受の劣化診断、予寿命予測など新たな要求に應える必要があり、引き続き軸受の開発を進めて行く。



写真 3 フィールド評価後の軸受内部状態
Photo 3 Internal bearing condition after field test

参考文献

- 1) NSK Technical Journal No. 652(1992) 9-16
- 2) S.Niizeki, K.Nonaka, S.Matsunaga, "Rolling Life of Ceramic bearings under oil lubrication and water lubrication", Proceedings of the International Tribology Conference, Yokohama (1995) 1399-1404.
- 3) NSK Technical Journal No. 689 (2017), 78-79

風力発電機用軸受の技術動向



リー キム リョン*

リー キム リョン

Technical Trend of Wind Turbine Bearings

K. L. Lee

In recent years, wind turbines are growing in size and shifting their installation location from on-shore to off-shore to improve power generation efficiency and reduce power generation cost. As higher torque applies to the bearings used in large wind turbines than conventional wind turbine, larger size and higher capacity bearings are required. Technical trend, typical failures and its countermeasure details for bearings used in main rotor shafts, gearboxes and generators are explained. Due to the repair cost for large off-shore wind turbines is higher than on-shore wind turbines, higher bearing quality control is required to improve reliability of wind turbine.

1. まえがき
2. 風力発電機の技術動向
3. 風力発電機用軸受
 - 3.1 主軸用軸受
 - 3.2 増速機用軸受
 - 3.3 発電機用軸受
4. 高信頼性品質
5. 解析による設計支援
6. あとがき

1. まえがき

風力発電機の建設は、その拡大する市場の中、2005年を境に急速に成長してきた。2009年以降は、風力発電機の新規導入の伸びは緩やかになったが、地球環境保全が重要視され、CO₂を排出しない再生エネルギーとして風力発電は安定的に増加しており、今後もこの傾向が続くと考えられる(図1)。

2. 風力発電機の技術動向

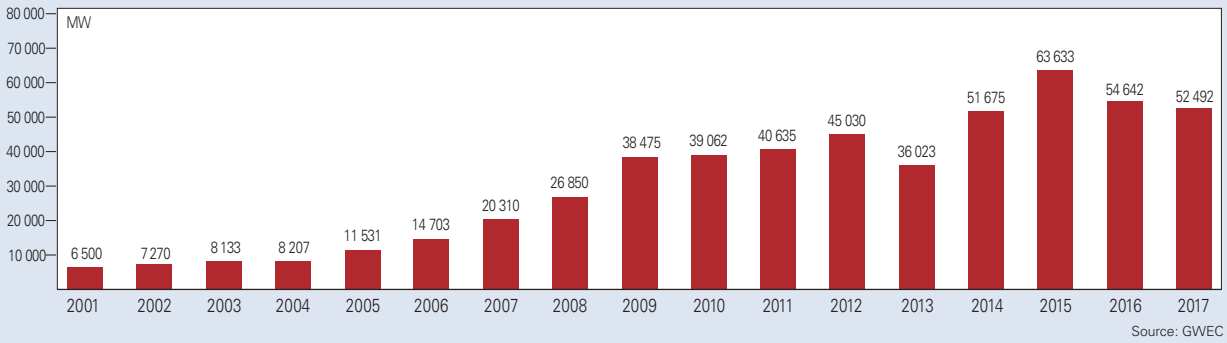
近年、発電効率向上と発電コストを下げるために、風力発電機は大型化と洋上設置へシフトしている。現在量産されている最大発電容量の洋上風力発電機はMHI Vestas社の8.0 MWだが、後継機として9.5 MWを開発したと発表されている。さらに、GE社は2018

年3月に、12 MWの洋上風力発電機を開発すると発表し、風力発電機の大型化と洋上設置へのシフトが加速している。

風力発電機には、増速機付きと増速機なしの2タイプがある(図2)。現状の大型風力発電機の容量TOP10(表1)においては、増速機付きタイプと増速機なしタイプが並立している。増速機を無くすことにより、損傷する機械要素が少なくなるので、信頼性が高まることになるが、発電機が大型／複雑になるため、高価で重くなるという課題がある。前述のMHI Vestas社の8.0 MW量産機と9.5 MW開発機は増速機付きタイプであり、洋上大型風力発電機においても、今後も増速機付きタイプが採用されると考えられる。

* 産業機械軸受技術センター、風力・大型機械技術部

GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017

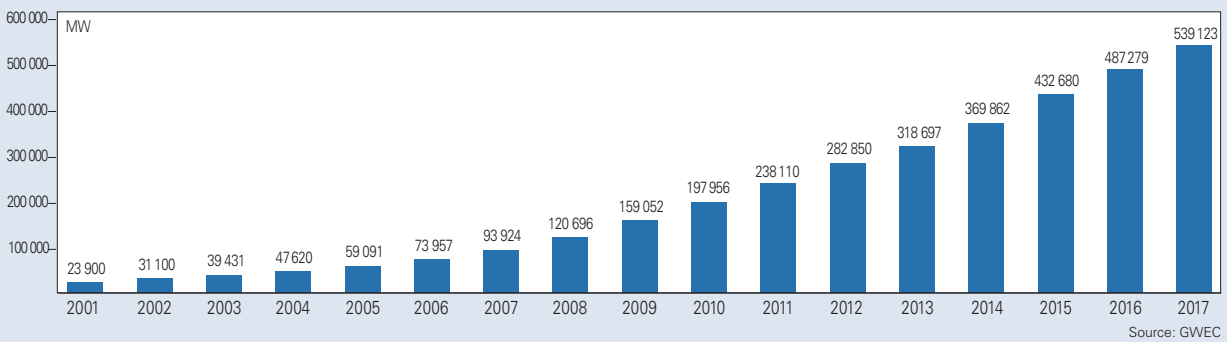


図 1 世界の風力発電機建設状況
Fig. 1 Global installation of wind turbine

表 1 風力発電機 TOP10
Table 1 Ten of the biggest wind turbine

Order	10 of the biggest Wind Turbine	Type
1	MHI Vestas V164 / 8.0MW	Gear
2	Adwen AD-180 / 8.0MW	Gear
3	Siemens-Gamesa Renewable Energy SWT-8.0-154	Gearless
4	Enercon E-126 7.5MW	Gearless
5	Siemens 6.0 154 / 7.0 154	Gearless
5	Ming Yang SCD 6.0MW	Gear
6	Senvion 6.2M152	Gear
7	GE Haliade 6MW	Gearless
7	Sinovel SL6000	Gear
8	Dongfang/Hyundai Heavy Industries 5.5MW	Gear
9	Hitachi HTW 5.2MW-127	Gear
10	Adwen AD5-135	Gear

3. 風力発電機用軸受

図3に一般的な増速機付き風力発電機のドライブトレインを構成する機器とそれらに使われる代表的な軸受を示す。風力発電機のドライブトレインである主軸、増速機、発電機の中に、形式やサイズが異なる軸受が使われている。主軸には外径1～2 mの軸受が支持形式によって1個または2個、増速機には数本のギヤ軸を支えるために外径0.2～2 mの軸受が多く使われている。発電機にはロータ軸を支持するために外径0.4～0.6 mの軸受が使われている。

風力発電機の大型化に伴い、市場からサイズが大きい軸受や高負荷容量軸受の要求が増えている。これらの要求に基づいて開発したNSKの風力発電軸受について、次に述べる。

3.1 主軸用軸受

主軸を支持する軸受は、風を受けるブレードから主軸へ伝わって来る大きなラジアル荷重やアキシアル荷重を受けるため、高い剛性が要求される。

典型的な風力発電機の主軸構造の一つとして、軸受一つで支持する3点支持タイプがある(図2)。この場合、主軸軸受として自動調心ころ軸受が使われる。

風力発電機の大型化に伴い、軸受の負荷荷重が大きくなっている。大型の風力発電機では、主軸を軸受2つで支持する(図2)。この場合、単列あるいは複列円すいころ軸受、単列円筒ころ軸受、自動調心ころ軸受が使われる。

主軸は8～15 min⁻¹で非常に低速で回転するため、グリースで潤滑される軸受内部の潤滑条件が悪い。さ

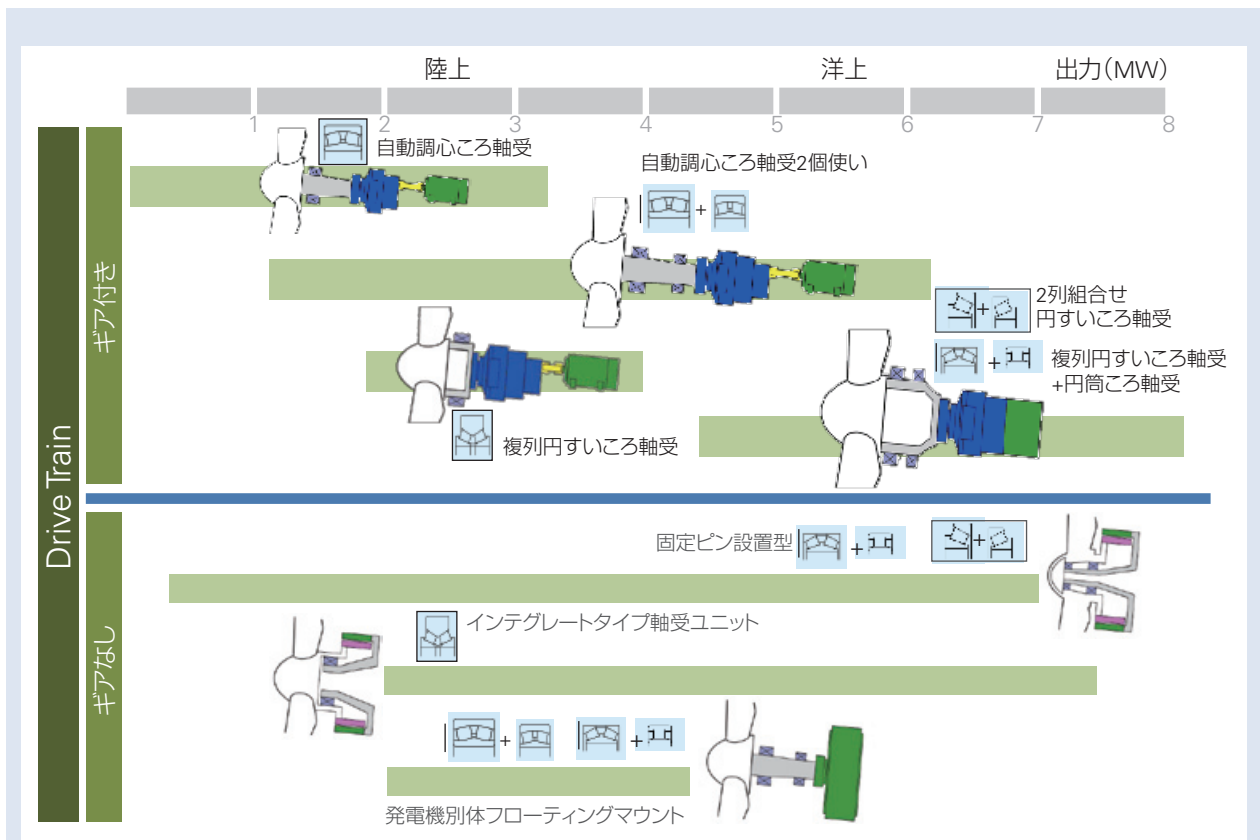


図2 風力発電機のタイプ
Fig. 2 Type of wind turbine

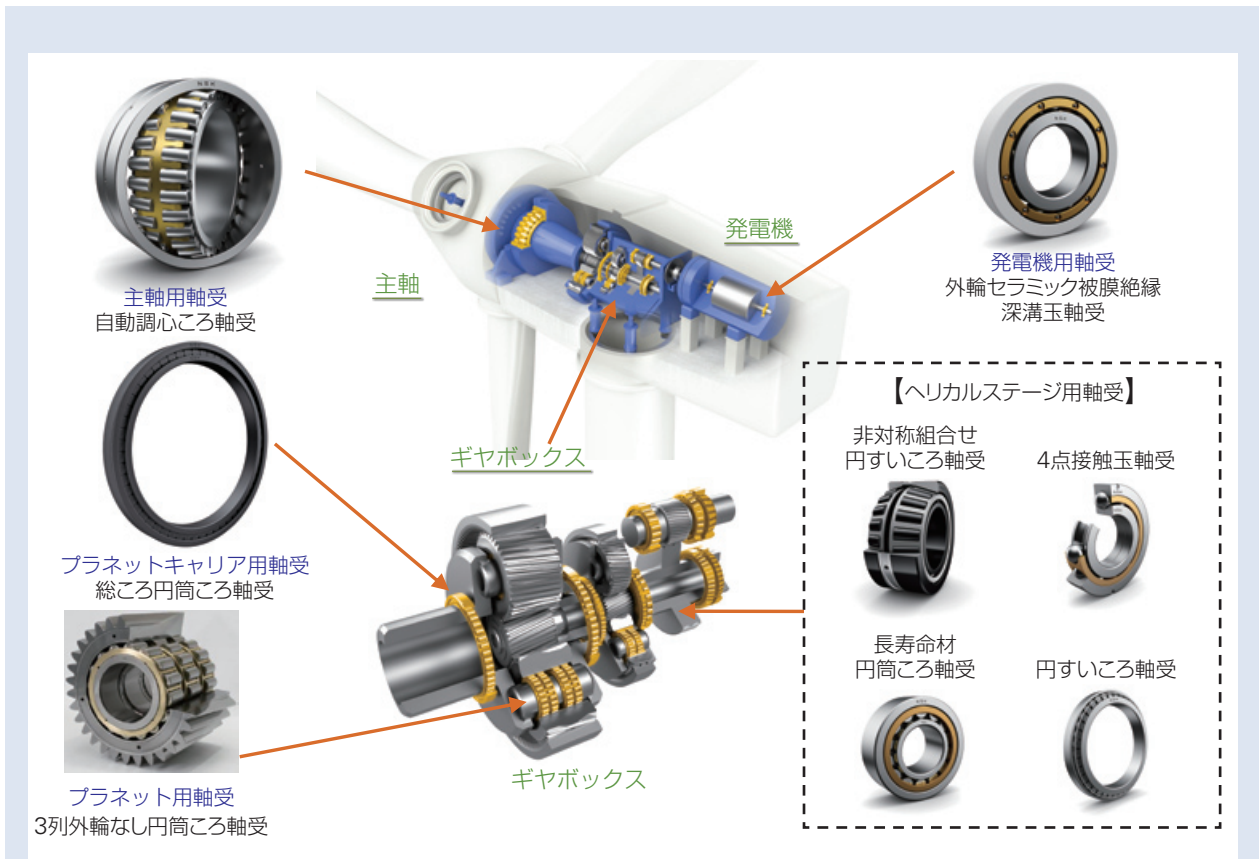


図3 風力発電機の構成機器
Fig. 3 Components of wind turbine

らに、自動調心ころ軸受の場合は、特有の差動すべりが発生するため、軸受が磨耗して損傷することが多い(図4)。NSKはこの磨耗の対策として、自動調心ころ軸受にDLC被膜(Diamond-Like Carbon)を施すことが有効と考えており、評価を実施している。

3.2 増速機用軸受

増速機は、非常に低速で回転する主軸の回転数を高速で回転する発電機の回転数まで上げるために使われる。大きな増速比を得るために、多くのギヤが使われている。このギヤ軸を支えるために、10～20個の軸受が使われている。

4 MWクラスの主軸は11 min⁻¹前後で回転し、4極の発電機の回転数は1 500～1 800 min⁻¹であるので、130倍以上の増速比が必要となる。一方、ブレード先端のスピードは風切り音の問題から制限があるため、風力発電機の大型化(ブレードの長寸化)に合わせて、主軸の回転数を下げなければならない。低い主軸回転数を4極の発電機の回転数へ増速する場合、150倍を超える増速比が必要となるため、4極よりも極数

を増やした発電機を使用し低増速(50倍程度)の増速機を採用する方式(Medium Speed Type)もある。¹⁾

図5に示すように、2.5 MW程度までは遊星1段+平行2段増速の増速機が使われているが、増速比が大きくなるに伴い、遊星2段+平行1段の方式が採用される。また、主軸の回転数が低いMedium Speed Typeでは遊星2段または3段が採用されている例もある。¹⁾

大型化に伴い風による入力トルクが増大し、軸受にかかる荷重も大きくなっている。遊星ギヤにはキャリア軸を支える軸受と遊星ギヤ軸を支える軸受が使われている。トルクの増大に対応するために、駆動軸も太くなることから、キャリア用軸受は大型化し軸受の負荷容量も大きくなる。一方、遊星ギヤはコンパクト、軽量にしたいため、遊星ギヤに使用される軸受の高負荷容量の要求が特に高い。そのために軸受の外輪を省き、遊星ギヤの内径面を外輪の軌道面とし、ころの径を大きくし負荷容量を大きくしている例が増えている(図6)。¹⁾

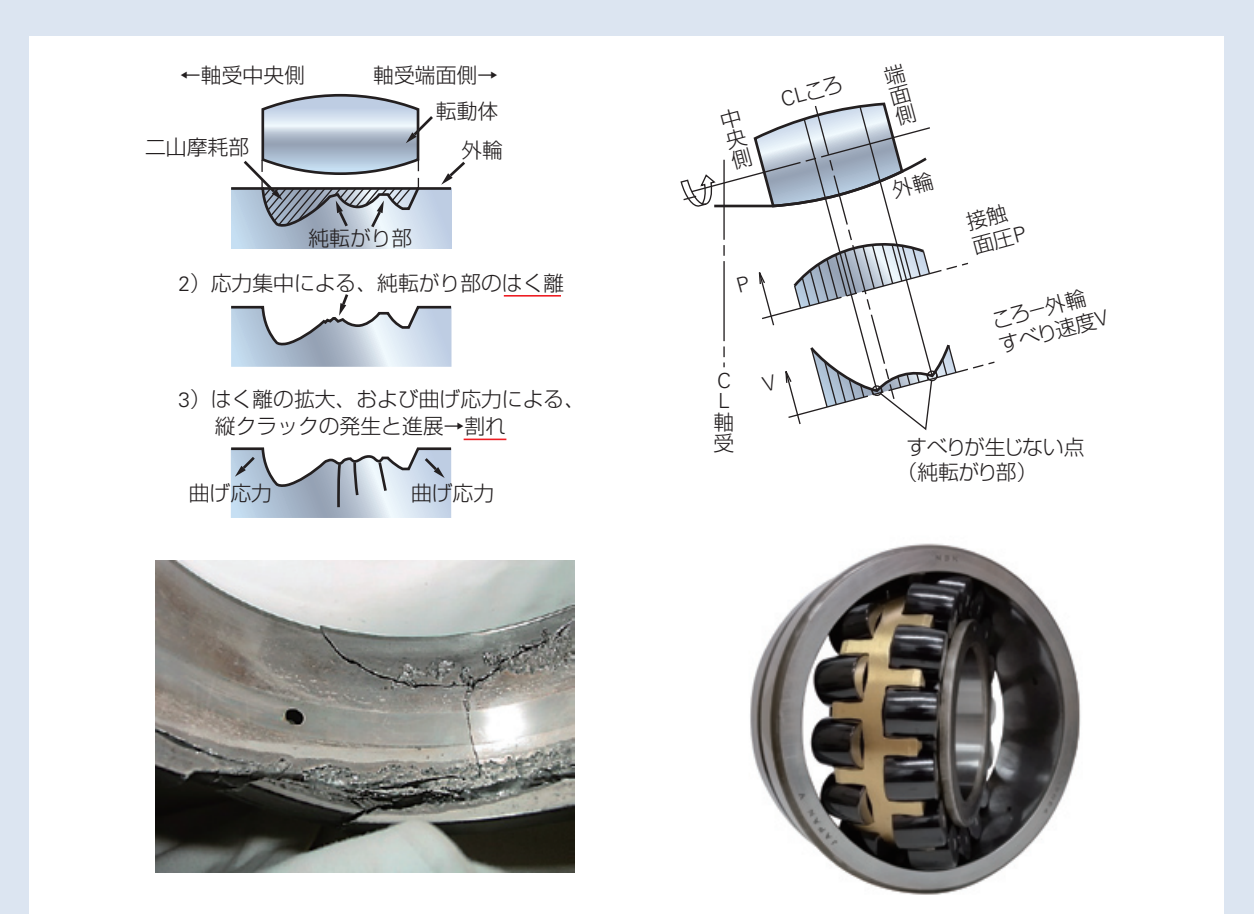


図4 自動調心ころ軸受の作動すべりと磨耗及び DLC 被膜軸受
 Fig. 4 Differential Sliding and wear in Spherical Roller Bearing. And DLC coated Spherical Roller Bearing

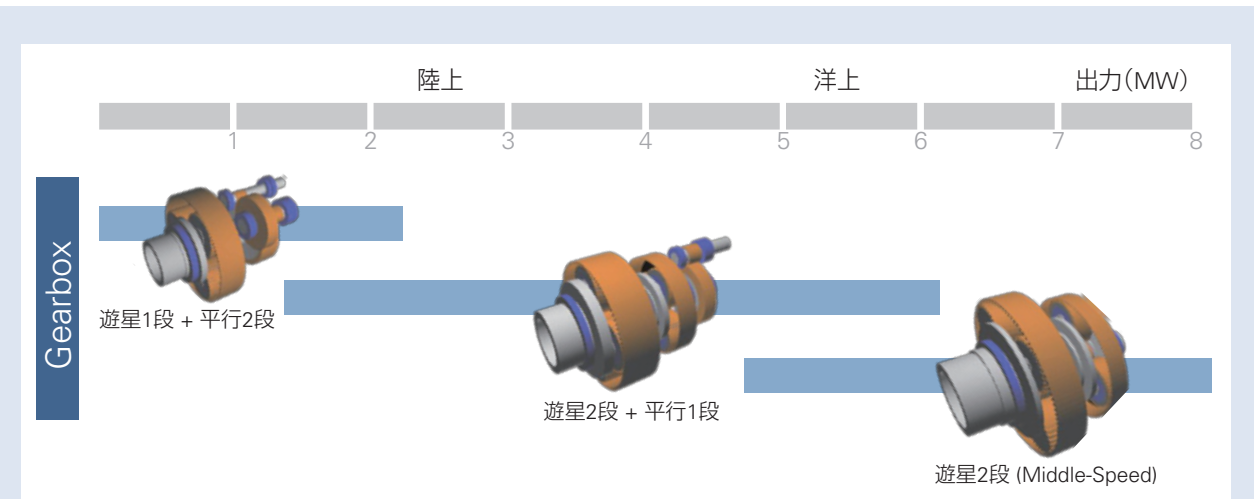


図5 ギヤボックスタイプ
 Fig. 5 Type of gearbox

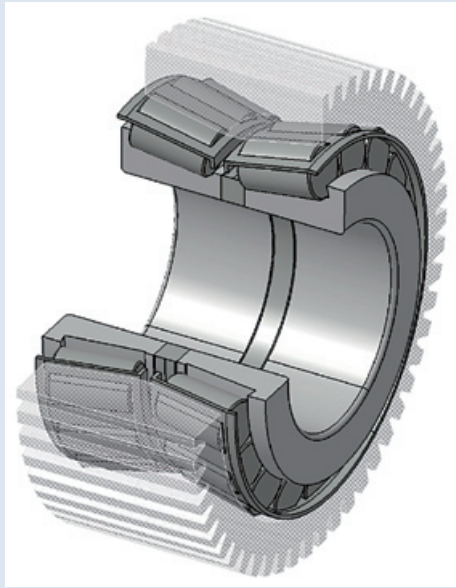
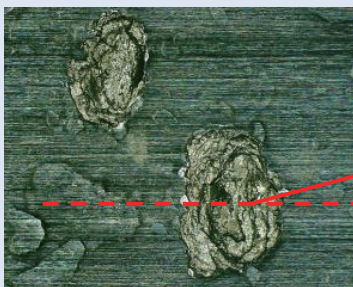


図6 外輪なし円すいころ軸受
Fig. 6 Integrated Tapered Roller Bearing

風力発電機の増速機軸受は、組織変化を伴う特異なはく離により、早期に損傷してしまう場合がある。この組織変化を伴うはく離は、はく離部断面の組織変化部がエッチング後に白く見えることから、白色組織はく離やWhite etching crackと呼ばれている²⁾(図7)。白色組織はく離は、水素チャージした試験片を用いた転動疲労寿命試験で再現することができる。そのため、風車の増速機用軸受の白色組織はく離も、水素が原因であると推測される。²⁾白色組織はく離は、図8に示す4つのステップを経て発生すると考えられる。ステップ1：潤滑剤中の添加剤や、すべり、振動、電気などの影響によって、潤滑剤が分解して水素の発生を引き起こす。発生した水素は軸受鋼中に侵入する。ステップ2：繰り返し応力により、鋼中に白色組織が形成される。ステップ3：白色組織の界面に沿ってクラックが発生する。ステップ4：クラックが進展し、はく離が発生する。

軸受表面に黒染め（Black Oxide Coating）被膜を施す対策がある。水素は、金属接触によって形成された金属新生面との化学反応によって潤滑剤が分解して



はく離

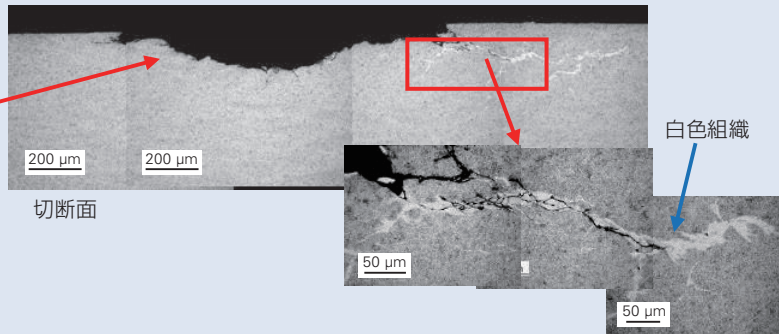
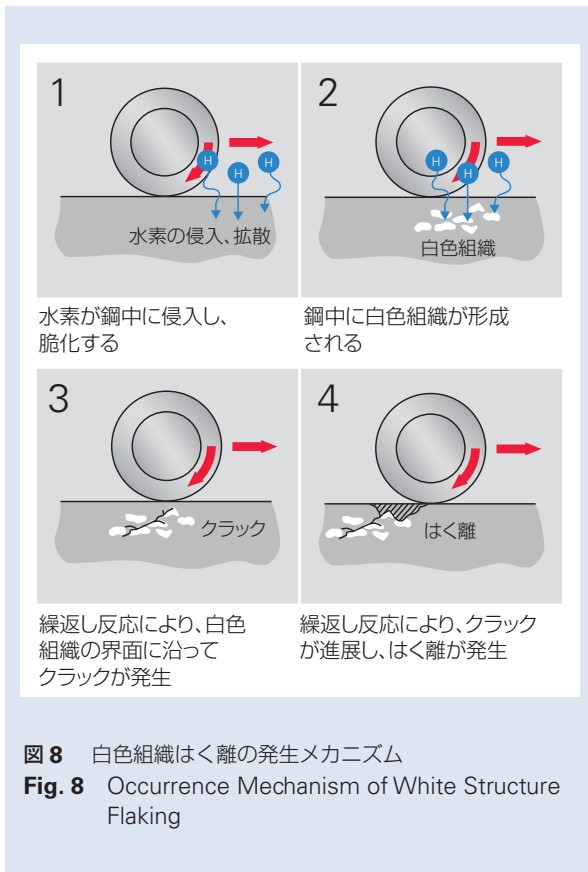
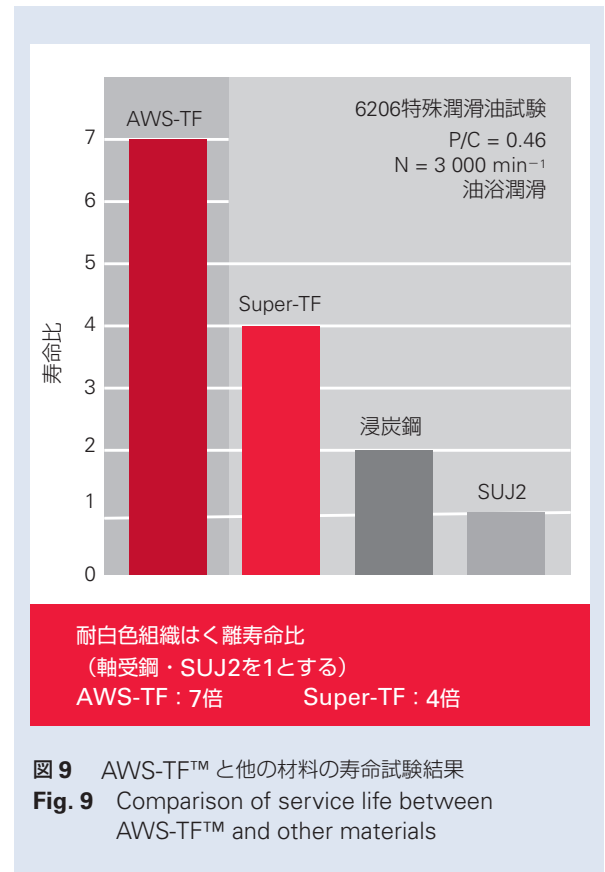


図7 白色組織はく離と切断面で観察された白色組織
Fig. 7 White Structure Flaking and observed White Structure in material cross section



発生する。黒染め被膜は、この金属新生面の生成を抑制するため、水素を発生させない効果がある。しかしながら、黒染め被膜が磨耗してしまうと長寿命効果がなくなってしまうため、油膜が十分な環境下で使用することが望ましい。

これまでの研究から、鋼の合金成分を改良することによって、白色組織はく離寿命を向上させることができることがわかった。適切な合金元素の添加が、組織変化の進行を遅らせるためだと推測される。また、浸炭窒化処理も白色組織はく離寿命の向上に効果がある。表面付近の圧縮残留応力がき裂の進展を遅らせて、残留オーステナイト量の増加がせん断応力の高い位置での水素の濃化を遅らせるためだと推測される。²⁾



そこで、NSKでは、合金成分の最適化と特殊熱処理によって、耐白色組織はく離鋼 AWS-TF™ を開発した。AWS-TF™ の白色組織はく離寿命は、標準鋼 (SUJ2) 比で 7 倍以上を達成した (図 9)。表面起点型はく離対策用の独自鋼 Super-TF™ も白色組織はく離にも効果があり、標準鋼 (SUJ2) に対して 4 倍の長寿命である。

3.3 発電機用軸受

発電機には、一般的に深溝玉軸受と円筒ころ軸受が使われる。発電機で使われる軸受は、内外輪の電位差が生じることにより、軸受の軌道面に電食磨耗 (電流通過スパークによる微小溶融) が発生する場合がある (図 10)。

この電食対策として、発電機周辺を絶縁する方法があるが、標準軸受と同一寸法の絶縁軸受へ交換することが対策として考えられる。絶縁軸受には、セラミック玉を採用する絶縁深溝玉軸受や外輪または内輪にセラミック溶射を施した絶縁軸受(図 11)がある。

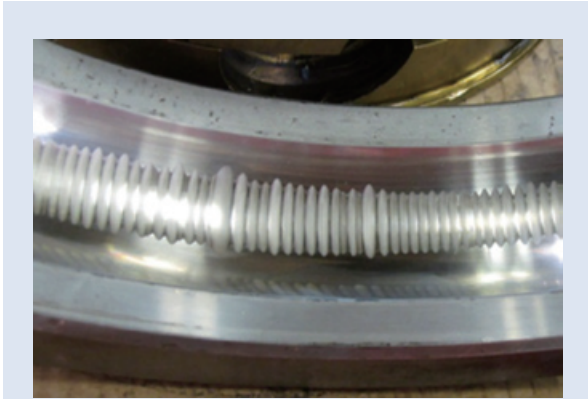


図 10 深溝玉軸受の外輪軌道面電食
Fig. 10 Electrical Corrosion on outer raceway of deep groove ball bearing

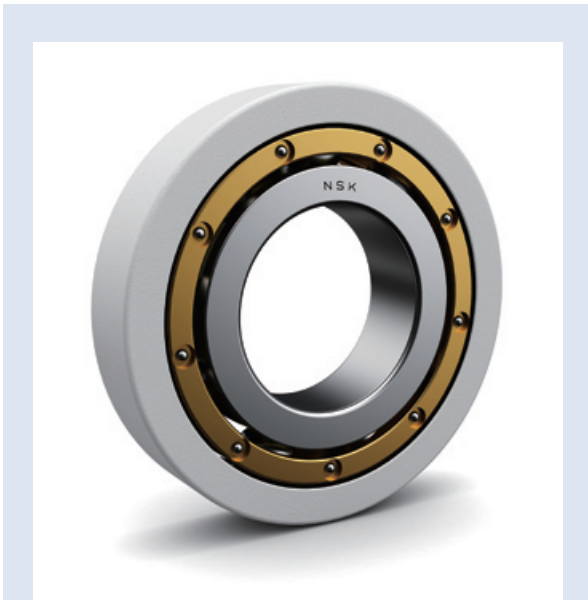


図 11 外輪セラミック絶縁被膜つき深溝玉軸受
Fig. 11 Ceramic-Coated Insulated Bearings

4. 高信頼性品質

風力発電機は、陸上および洋上において、風況が絶えず変化する過酷な条件のもとで電力を生み出す。十分な発電量を得るために、ドライブトレイン、発電機などに使われるすべての部品には高い性能が要求される。

特に、近年大型化が加速している洋上風力発電機においては、主軸、増速機、発電機の修理時の費用が高くなるため、陸上風力発電機よりも更に高い信頼性が要求される。これらの要求に応えるために、NSKは軸受の品質履歴管理を行い、品質安定性を向上させるとともに、保証度を上げた特別品質管理を実施した軸受を生産し納入している。

5. 解析による設計支援

風力発電機の大型化に伴い、高負荷容量の軸受が求められており、また、建設費も含めコストアップとなることから増速機の重量が低く抑えられて、剛性も低くなっている。そのため、増速機全体の変形を考慮した軸受設計が必要となっている。軸受の高負荷容量化に対してはFEM解析を用い保持器形状の最適化を実施している(図 12)。増速機の変形の影響についてはハウジング、プラネタリキャリアなどを含んだ増速機全体のFEM解析を実施し、軸受内部の個々の転動体荷重を求め、寿命予測、軸受仕様検討を行っている(図 13)。

今後、さらに解析技術の重要性は増していくと考えられ、解析技術の高度化、効率化に取り組んでいる。

6. あとがき

風力発電機は、より良い風況を求めて陸上から洋上設置へシフトしている。また、陸上では中低風速地域での大型化が進んでいる。これに伴い、市場から大きな荷重を受けられるサイズが大きい軸受や高負荷容量軸受の要求、高信頼性の要求が増えている。NSKはこれらの要求に応えるために、信頼性の高い高負荷容量の軸受を開発し続け、風力発電産業の発展と地球環境の保全に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 伊集院誠司, “風力発電機の大型化と軸受の動向”, 風力エネルギー学会誌, 37 (通巻 108 号) - 4 (2013) 462-464.
- 2) 山田紘樹, 宇山英幸, “風車ギヤボックス用軸受の白色組織はく離”, NSK Technical Journal, 689 (2017) 6-16.

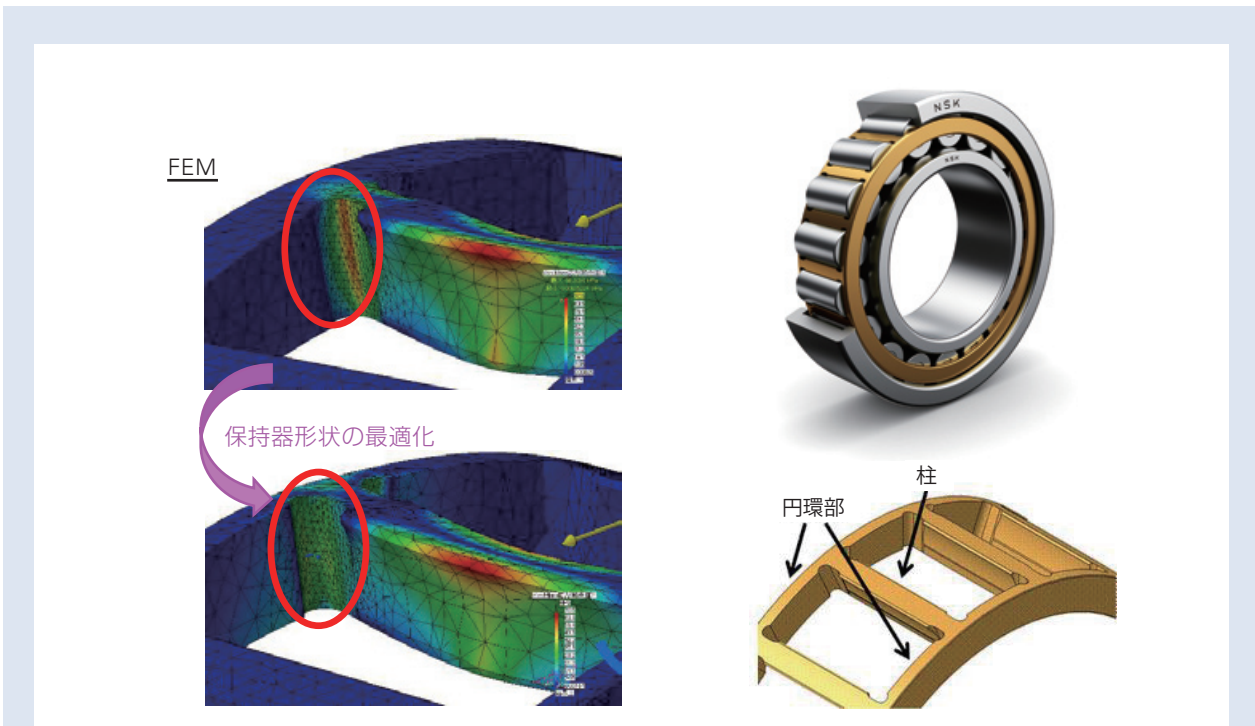


図 12 FEM 解析を活用した高負荷容量円筒ころ軸受の保持器開発
 Fig. 12 Development of cage for High Load Capacity Cylindrical Roller Bearings utilizing FEM analysis

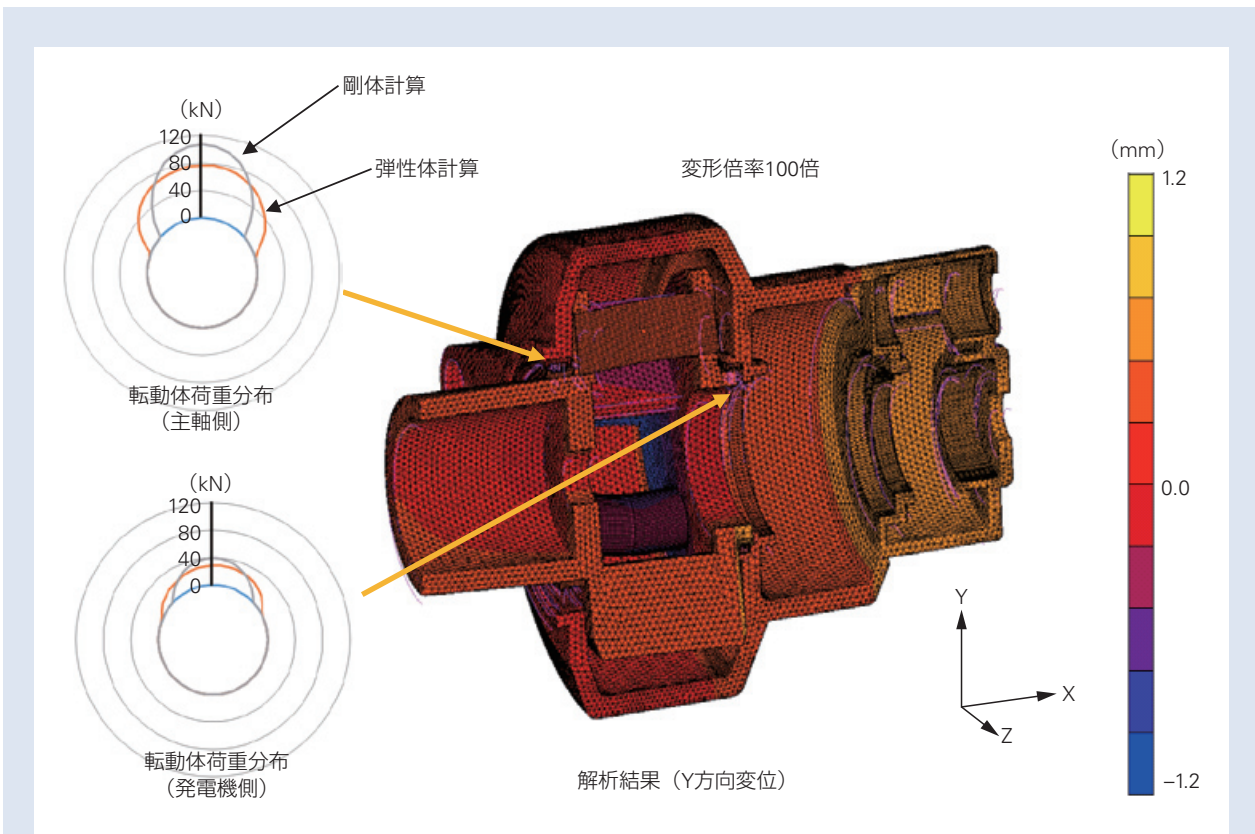


図 13 増速機全体の FEM 解析
 Fig. 13 FEM analysis for entire gearbox

工作機械用製品の技術動向

青木 満穂*, 齊藤 秀徳**



青木 満穂

The Technical Trend of Machine Tool Components

M. Aoki, H. Saito



齊藤 秀徳

In recent years, machine tool has been under the condition of rapid environment change such as increase of electric vehicle, expansion of IoT / Industry 4.0 and rising labor cost due to decrease of engineering workforce. Under the circumstances, machine tool manufacturers promote technological developments to achieve higher productivity and accuracy. Machine elements that contribute to performance increase of machine tool have to be adaptable to the needs and technologies of machine tool for greater sophistication.

In this article, we will explain trends of machine tool technologies in recent years and latest technologies of machine elements such as spindle, ball screw and linear guide based on the trends of IoT / Industry 4.0 for machine tool and machine tool exhibition.

- | | |
|--|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. まえがき 2. 工作機械の技術動向 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 工作機械における IoT/ インダストリー 4.0 の動向 2.2 スピンドルの技術動向 2.3 送り系の技術動向 | <ol style="list-style-type: none"> 3. 工作機械要素部品の最新技術 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 スピンドルの最新技術 3.2 送り系要素部品の最新技術 4. あとがき |
|--|---|

1. まえがき

近年、工作機械によるものづくりは、自動車のEV化、IoTの広がり、世界的な労働人口の減少にともなう人件費の高騰など、急激な環境変化にさらされている。このような環境変化に対応するため、世界の工作機械メーカーは、さらなる生産性向上と高精度化を目指し、これを実現すべく工作機械の技術開発を続けている。それらの性能向上に寄与する機械要素部品もまた、高度化する工作機械メーカーやエンドユーザのニーズに

応えていく必要がある。

NSKは、工作機械の性能を決定付ける、スピンドルおよびスピンドル用軸受、ボールねじおよびその支持軸受、リニアガイドといった、多くの重要な機械要素部品をラインナップしており、工作機械のニーズの変化を的確にとらえた製品開発を行ってきた。

ここでは、近年の工作機械の技術動向と、それに対応するNSKの最新技術について紹介する。

* 産業機械技術総合センター，産業機械軸受技術センター，工作機械技術部
 ** 産業機械技術総合センター，直動技術センター，BS技術部

2. 工作機械の技術動向

2.1 工作機械におけるIoT/インダストリー4.0の動向

近年の生産現場におけるトレンドのひとつに、IoTの普及を背景としたインダストリー4.0が挙げられる。インダストリー4.0は、ドイツ政府が推進する第4次産業革命とも呼ばれる産学官が連携したもののづくり改革であり、同一仕様品の大量生産と同等のコストで、一品一様のカスタム製品を大量生産すること（マスカスタマイゼーション）を目指している。アジア諸国に比べ、賃金の高いドイツの製造業が勝ち抜いていくための戦略である。こうした背景から、工作機械には、これまで以上の高効率化が求められるようになってきている。

図1は、2016年に開催された、第28回日本国際工作機械見本市（以下JIMTOF）におけるIoT/インダストリー4.0関連の出展を調査した結果である。

150社の出展を調査した結果、約36%の企業からIoT関連の出展があった。出展内容を分析すると、半数以上は稼働状況監視や工場全体の「見える化」といった稼働率の向上を意図したものであり、故障予測や診断などを目的とした状態監視システム（Condition monitoring system, 以下CMS）の割合は17%程度に留まった。

今後は、CMSの実用化に向け、各社ともさらなる開発が進み、出展割合も多くなってくると予想される。

2.2 スピンドルの技術動向

図2は、1982年に開催された第11回JIMTOFから30年以上に渡り、NSKが、JIMTOFにおける

10 000 min⁻¹以上の高速スピンドルの出展台数を独自に調査した結果である。これを見ると、2000年の第20回以降、10 000 min⁻¹以上の高速スピンドルの出展台数は高止まりしていることが分かる。

それまでは、高速運転時のボールの遠心力を低減できる、軽く強靱なセラミックボールの実用化や、発熱変動に鈍感で、安定した高速運転を可能にしたロバストシリーズの普及などにより、スピンドルを高速化することで加工効率を向上してきた。

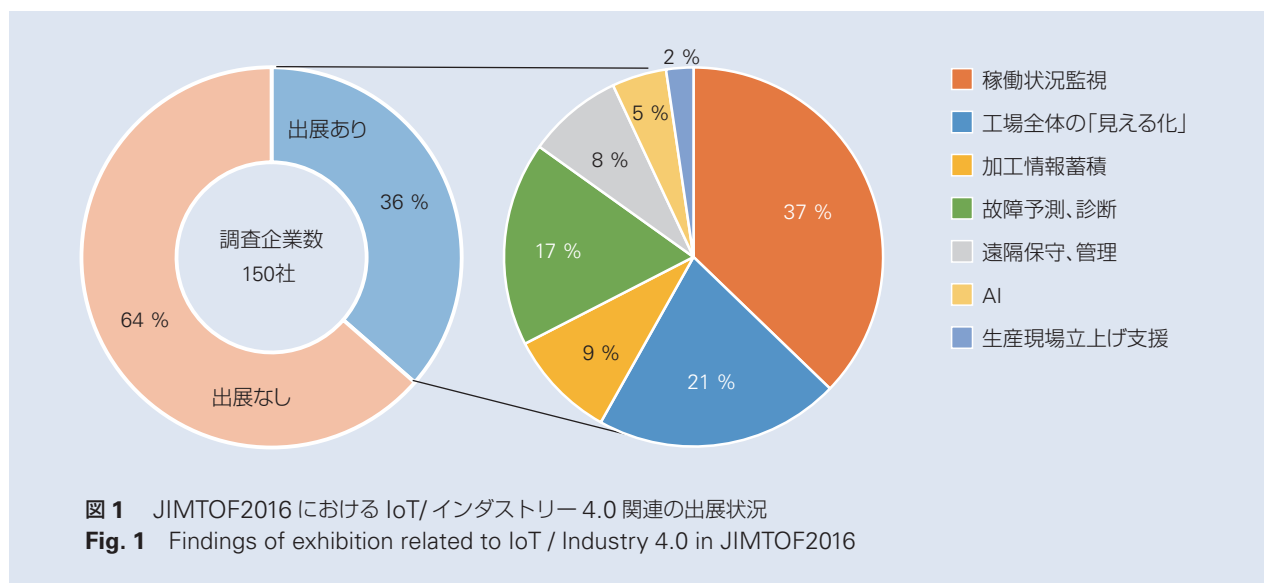
近年においては、工作機械の剛性特性から再生びりり振動を避ける安定限界線図を求めることにより、切り込み量を増やして高効率化を図る技術が実用化されている。

また、多品種少量生産の進展により、金型の生産効率向上も課題となっている。時間のかかる金型表面の最終磨き工程を削減するため、スピンドルの回転精度を高めて加工品位を向上させることが求められる。

こうした、さらなる高効率化の流れは、前節で述べたインダストリー4.0の要求とも合致している。

さらには、ただ生産効率を上げるだけでなく、環境への配慮もまた、生産現場には強く求められている。したがって、スピンドルの潤滑方式は、エネルギー消費の大きい圧縮空気を大量に使うオイルエア潤滑から、グリース潤滑へと、そのニーズが変化してきている。

NSKでは、こうしたスピンドルの技術動向を踏まえ、新開発保持器「サーセイブ™」採用アンギュラ玉軸受と、超高速グリース高周波スピンドルを開発したので、次章に解説する。



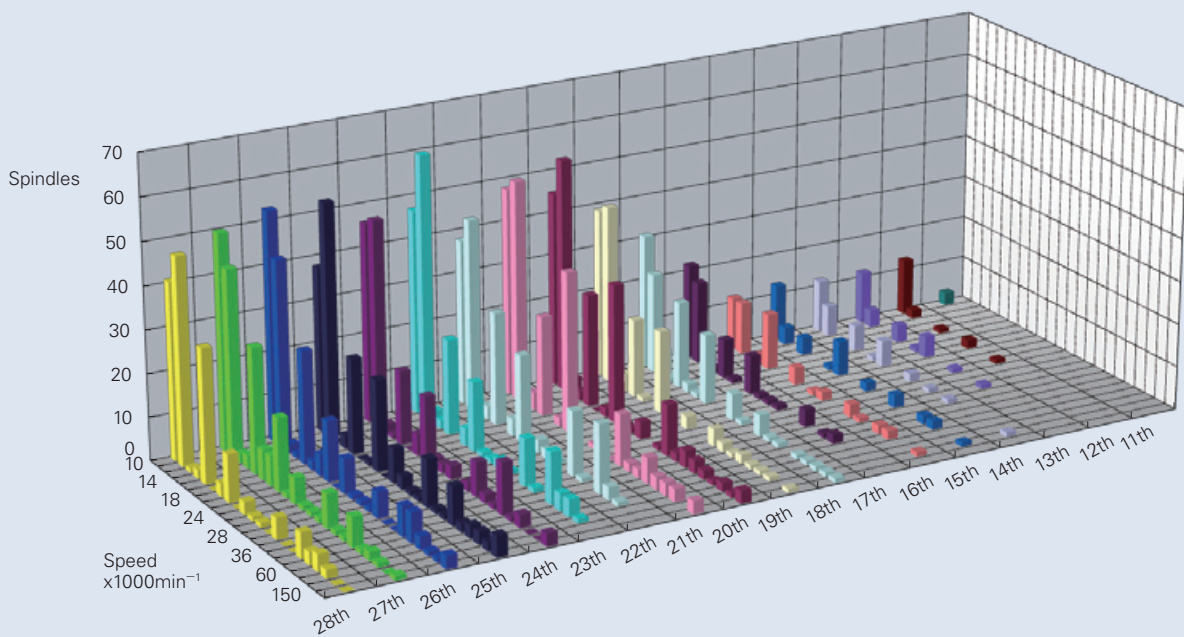


図2 JIMTOFにおける10 000 min⁻¹以上の高速スピンドルの出展台数
 Fig. 2 Findings of the number of machine tools with a spindle speed of 10 000 min⁻¹ or more in JIMTOF

2.3 送り系の技術動向

2.3.1 マシニングセンタの早送り速度

図3は、1996年から20年に渡り、JIMTOFに出展されたボールねじ駆動方式のマシニングセンタにおいて、早送り速度と出展台数の割合をNSKが独自に調査した結果である。これを見ると、50～60 m/minの割合が年度ごとに増加しているものの、60 m/minで頭打ちとなっていることが分かる。

これに対して図4は、欧州工作機械見本市（以下EMO）に出展されたボールねじ駆動方式のマシニングセンタを対象に、NSKが独自に早送り速度の調査を行った結果である。EMOはIMTS(米国)、CIMT(中国)、JIMTOF(日本)と並び世界4大工作機械見本市と呼ばれている。調査は欧州メーカーを中心に行った。60 m/minを超える高速機の割合に着目すると、EMO2017では14%となっており、JIMTOF2016の5%を大きく上回っている。

このように、特に欧州において高速化が進んでいる背景の一つとして、2.1で述べたインダストリー-4.0の要求による工作機械の高効率化が挙げられる。

日本メーカーは、ボールねじのリードを20 mm以下にとどめ、回転速度を3 000 min⁻¹とすることで、

送り速度を60 m/minを実現し、高精度と高効率の両立を図る傾向にある。

一方で、欧州メーカーはリード30 mmといった大リードボールねじを回転速度3 000 min⁻¹で使用することで、60 m/minを超える高速化を実現しているものと思われる。ボールねじリードを大きくすることによる位置決め精度の低下に対しては、リニアスケールで機械位置を直接検出するフルクローズドループ制御を採用することで、対策をとっている。

NSKでは、このような高速化が進んでいる欧州市場向けにドイツ工業規格「DIN」に対応した高速静音こま式ボールねじを開発し、2017年にプレスリリースを行った。その詳細を次章に解説する。

2.3.2 マシニングセンタの案内方式

図5は、JIMTOFに出展されたマシニングセンタの案内方式をNSKが独自に調査した結果である。ローラガイドの採用率は増加傾向にあり、2016年には50%に達している。この背景には、ローラガイドの特徴である高い負荷容量や剛性が、マシニングセンタの信頼性に関する訴求ポイントとして位置づけられていることが挙げられる。このローラ化の傾向は欧州

で始まったものである。図6は、EMOに出展されたマシニングセンタの案内方式の調査結果である。欧州ではローラガイドが一般的な仕様に定着しており、その採用率は2017年には87%に達している。今後、日本におけるローラガイドの採用率も欧州並みまで増

加していくのか、動向に注目したい。

NSKではこのような案内のローラ化に対応するためにローラガイドの高機能化に取り組んでおり、次章で紹介する。

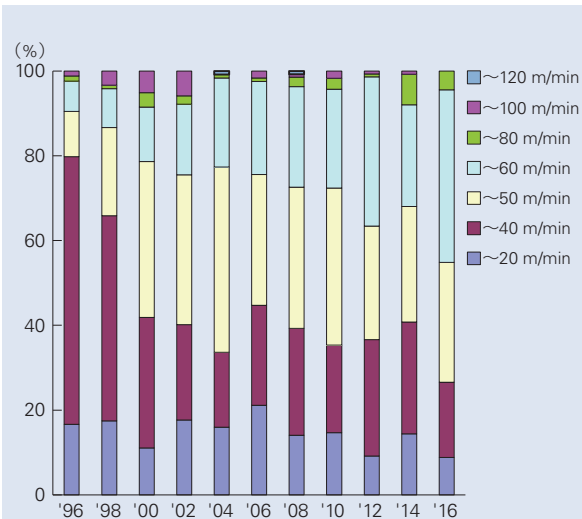


図3 JIMTOFにおけるマシニングセンタ出展機 早送り速度の変遷

Fig. 3 JIMTOF Trend of Rapid traverse speed on Machining Center

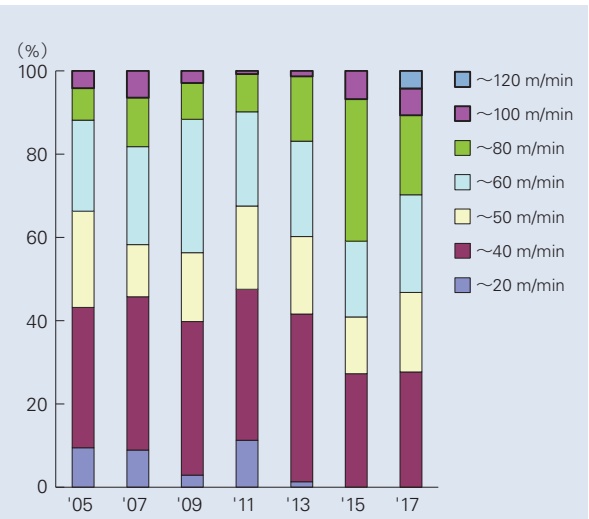


図4 EMOにおけるマシニングセンタ出展機 早送り速度の変遷

Fig. 4 EMO Trend of Rapid traverse speed on Machining Center

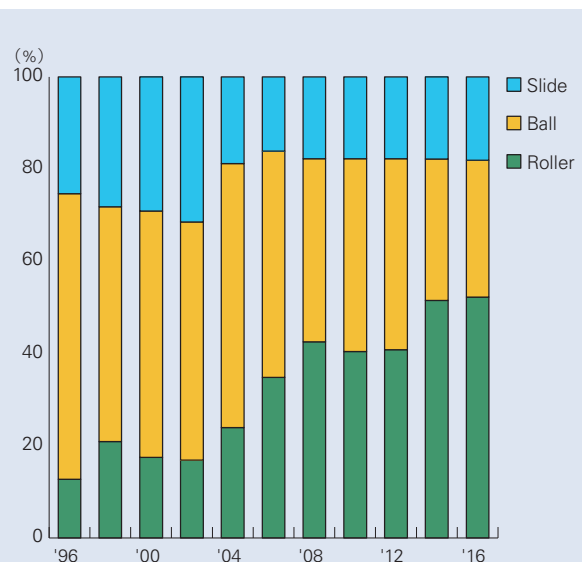


図5 JIMTOFにおけるマシニングセンタ出展機 案内方式の変遷

Fig. 5 JIMTOF Trend of Guide-way type on Machining Center

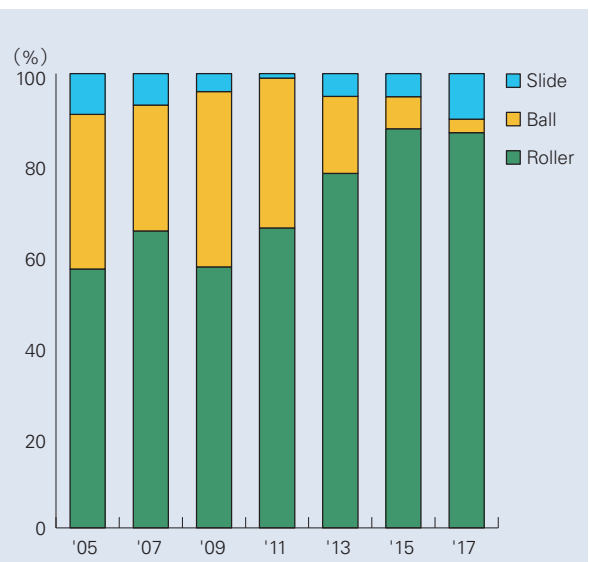


図6 EMOにおけるマシニングセンタ出展機 案内方式の変遷

Fig. 6 EMO Trend of Guide-way type on Machining Center

3. 工作機械要素部品の最新技術

NSKでは、これまで述べてきたような工作機械を取り巻く環境の変化をとらえ、製品開発を行ってきた。以下に、スピンドル系と送り系の最新技術について紹介する。

3.1 スピンドルの最新技術

3.1.1 新開発保持器「サーセイブ™」採用アンギュラ玉軸受

プラスチック製品の射出成形に使用する金型は、高い外観品質が求められる。このため、従来は、金型のキャビティ面を機械加工で所定の形状に加工した後、最終の磨き工程により表面を仕上げるのが一般的であった。近年では、NC装置の制御技術の発達や、スピンドルの高速化にともない、金型製作の効率向上を目的として、できる限り機械加工で最終仕上げ工程に

近いところまで行うようになってきている。

ここで問題となるのが、スピンドルの回転精度、とりわけ回転非同期振れ（Non repetitive run out, 以下NRRO）の低減である。図7に示すように、エンドミルに代表される切削加工は、砥石による研削加工と異なり、軸が1回転するごとに複数の切れ刃をワークに断続的に切り込みながらスピンドルを送って加工する。断続加工である。このとき、一度切り込んだ切れ刃が1回転して再びワークを切り込む深さは、できるだけ前の切り込み深さと同じにする必要がある。スピンドルの回転精度、特にNRROが悪い場合、軸が1回転した後、切れ刃が同じ位置に来ないため、切り込みごとにわずかな切り込み深さのずれが生じることになる。

これを繰り返しながらワーク全体を加工すると、ワーク表面に引き目のランダムなばらつきが発生し、

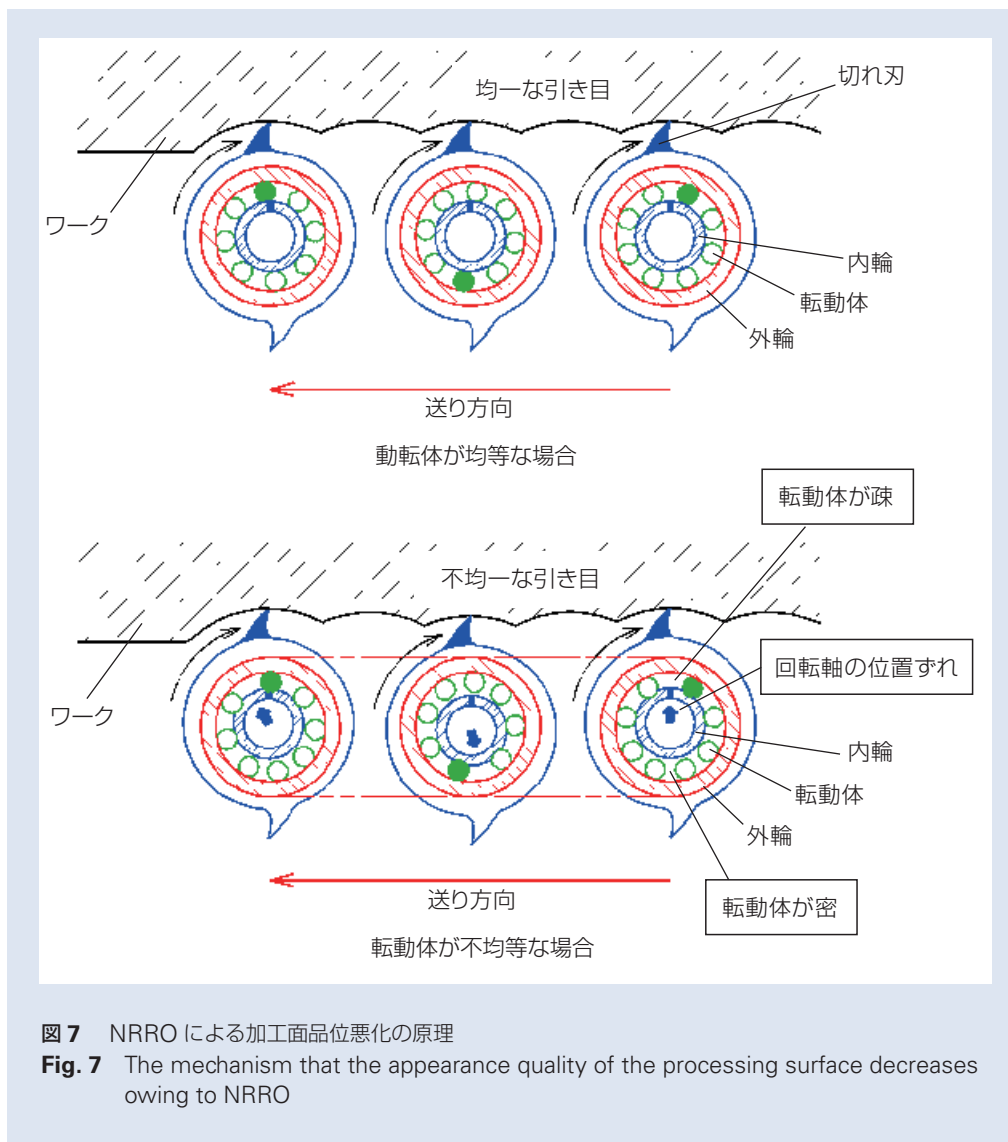


図7 NRROによる加工面品位悪化の原理

Fig. 7 The mechanism that the appearance quality of the processing surface decreases owing to NRRO

外観品質が悪化するため、磨き工程に時間がかかってしまう。

スピンドルの回転精度は、回転バランスや部品精度が影響する回転同期振れ (Repetitive run out, 以下 RRO) と、先ほど述べた回転非同期振れ (NRRO) とに大別される。RRO は、スピンドル装置の作り込みで決定される割合が大きいですが、加工面品位に影響を及ぼす NRRO は、ほぼ軸受の回転精度で決まってしまう。

NSK は、このような問題に対応するため、金型加工機などの高精度加工機を主な対象用途とした、新保持器「サーセイブ™」搭載超高速アンギュラ玉軸受を開発した(写真 1)。

軸受の NRRO を決定づける要因はいくつかあるが、NSK は、その中でも影響の大きな保持器の振れ回り量に着目した。

保持器の機能は、転動体をできるだけ均等に配置することである。転動体が均等に配置されないと、ラジアル剛性に偏りが生じる。転動体の密な部分は剛性が高く、疎な部分は剛性が低くなる。このわずかな剛性の偏りにより、回転軸は剛性の低い転動体が疎な方向に、わずかにずれて位置することになる。軸の回転に伴い転動体は公転するが、その公転速度は軸の回転速度よりも遅いため、軸が 1 回転するごとに転動体の粗密位相が変わって行ってしまう。これが、NRRO が発生する要因の一つである。

新開発保持器「サーセイブ™」には、NSK が開発したスーパーエンジニアリングプラスチックを材料とし

て選定した。この材料は、従来の材料よりも強度、弾性率、寸法安定性などの特性が優れているため、設計の自由度が増し、内部設計を最適化することができた。これにより、保持器の振れ回り量を最小限に抑えることができ、NRRO を従来よりも約 50 % 低減することに成功した(図 8)。

また、スピンドルの回転精度を高めるだけでなく、保持器の無駄な動きがなくなることにより、高速運転時の動摩擦トルクが約 20 % 低減した(図 9)¹⁾。

本軸受を採用することにより、金型の磨き工程の削減が可能となり、生産効率の向上に寄与するものと考えられる。



写真 1 新保持器「サーセイブ™」搭載超高速アンギュラ玉軸受
Photo 1 Angular contact ball bearing with SURSAVE™

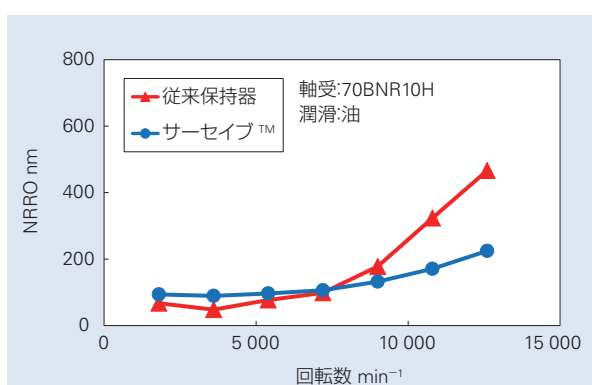


図 8 サーセイブ™ の NRRO 測定結果
Fig. 8 Test result of NRRO of SURSAVE™

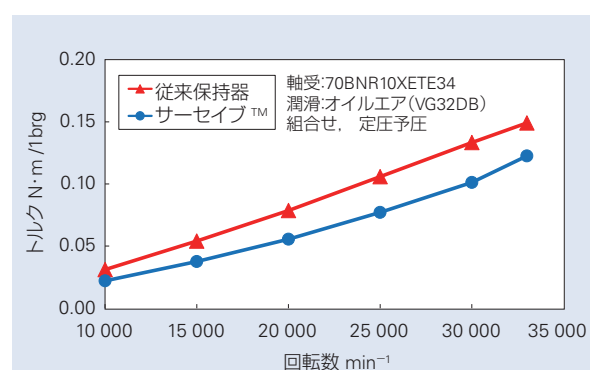


図 9 サーセイブ™ のトルク測定結果
Fig. 9 Test result of torque of SURSAVE™

3.1.2 超高速グリース高周波スピンドル

工作機械のスピンドル用軸受の潤滑方式は、主にオイルエア潤滑とグリース潤滑に分けられる。表 1 に、それぞれの特徴を示す。

研削加工用のスピンドルは、切削加工用と比べ、軸受に働く荷重は小さいが、より高い回転数が必要とされる。したがって、小径の軸受をオイルエア潤滑で高速に回転させる方式が一般的である。

オイルエア潤滑は、軸受内部に向けたノズルから、潤滑油を混合した圧縮空気を高速で軸受内部に吹き付ける潤滑方式である。微量の油で潤滑できるため、動摩擦トルクを小さくすることができる。また、大量の圧縮空気により潤滑油を確実に軸受内部へ供給することができるため、信頼性が高い。これらのメリットから、オイルエア潤滑は、古くから工作機械の高速スピンドルや信頼性の必要な自動車部品加工機などに用いられてきた。

しかしながら、オイルエア潤滑は軸受一列当たり 20～30 NI/min の圧縮空気を消費する。スピンドル全体で 4～5 列の軸受があるとすると、スピンドル一台当たりの圧縮空気消費量は、100 NI/min にもなる。

自動車部品加工ラインなど、機械を数多く並べている製造現場では、この圧縮空気の削減が課題となっている。

また、潤滑油を定期的に補充したり、フィルタを交換したりするなどのメンテナンスも必要である。

NSK は、これらの課題に対応するため、グリース潤滑を用いた研削加工用の「超高速グリース高周波スピンドル」を開発した(写真 2)²⁾。

グリース潤滑は、初期に軸受に封入したグリースだけで潤滑状態を維持する必要がある。グリースは軸受内部での攪拌による物理劣化や、熱による基油の化学劣化が避けられないため、オイルエア潤滑と異なり有限寿命となる。また、加工に用いる研削水がスピンドル内部に浸入してしまうと、グリースへの水分混入により潤滑性が著しく低下したり、場合によってはグリースが流出してしまったりするため、信頼性の向上が課題であった。これらを防ぐためには、スピンドルの工具側に、圧縮空気によるエアパージを設ける必要があった。

「超高速グリース高周波スピンドル」は、最適なグリースの選定、グリース封入方法の工夫、内部設計の



写真 2 超高速グリース高周波スピンドル
Photo 2 Ultra high speed high frequency spindle with grease lubrication

表 1 オイルエア潤滑とグリース潤滑の比較

Table 1 Comparison between oil-air lubrication and grease lubrication

		オイルエア潤滑	グリース潤滑
コスト	スピンドル設計	潤滑穴、排油穴など煩雑	簡単
	周辺機器	潤滑装置が必要	不要
	スピンドルの組立性	配管工数などが発生	簡単
機能	高速性	高速	中低速
	騒音	風切り音大	風切り音なし
	圧縮空気の消費	大量に消費	なし
	作業環境	オイル飛散あり	クリーンである
	メンテナンス	油補充やフィルタ交換など	メンテナンスフリー
信頼性	寿命	潤滑起因の寿命はなし	有限寿命である
	耐水性	研削水浸入に強い	研削水浸入に弱い

最適化により、従来のグリース潤滑スピンドルに比べ30%の高速化が達成できた。これまでオイルエア潤滑の適用範囲であった $70\,000\text{ min}^{-1}$ ($d_m \cdot n\ 200 \times 10^4$) をグリース潤滑で実現している ($d_m \cdot n$ は転動体のピッチ円直径 d_m と回転数 n の積で表される、軸受回転速度の尺度)。

さらに、圧縮空気の削減ニーズに対応するため、スピンドルの工具側に大型のフリンガーを搭載した(図10)。これにより、エアパージを使うことなく、研削水浸入のリスクを軽減することができた。

本スピンドルを採用することにより、研削加工における圧縮空気の消費が抑えられ、環境負荷の低減に貢献できるものとする。

3.2 送り系要素部品の最新技術

3.2.1 高速静音こま式ボールねじ

前章で述べたとおり、工作機械の送り系においては、生産性の向上を目的とした高速化が進んできている。この要求を受け、NSKでは、ボールねじの高速化に取り組んできた。特に、ボールを循環させる部品を改良することで、ボールの公転速度に対応するパラメータであるねじ軸外径 d と回転数 n を掛け合わせた $d \cdot n$ 値を向上させ、高速化を実現してきた。それらは高速静音ボールねじシリーズとして、2000年台初頭からさまざまなアプリケーション向けにリリースされてきた。代表的なものには、エンドデフレクタと呼ばれる新たな循環部品を採用したBSSシリーズ(2003年)やHMDシリーズ(2008年)、従来の循環方式であるチューブを改良したHMSシリーズ(2010年)が挙げられる。

一方、生産性の向上を目指すインダストリー4.0が一因となり日本に比べて高速化が進んでいる欧州においては、ドイツ工業規格「DIN」が一般的になっている。DINの規格サイズはコンパクトなものとなっているため、欧州市場におけるボールねじの循環方式としては、循環こまにより鋼球を循環させるタイプで、ナット外径の最小化が可能な「こま式」が主流となっている。

今回、こま式ボールねじの「循環こま」を改良することで、DINに適合する業界最高速の「高速静音こま式ボールねじ」を開発した。

高速性、静音性、作動性といったボールねじの特性には、ボールの循環が大きな影響を及ぼし、それら特性を向上させるには、循環部品によって、いかにボールを滑らかに循環させられるかが重要となる。これまでに開発してきた高速静音シリーズも、「滑らかなボー

ル循環」を実現することで性能を向上させてきた。

高速静音こま式ボールねじにおいても、このボール循環に着目して開発を行った。循環こま経路内のボール運動を3次的に解析する技術を確立し、ボールが最も滑らかに循環するような、最適な循環こま経路を求めた。加えて、循環こまのボールねじナットへの固定方法や循環こまの材質を変更することで、以下のような特長を実現した。

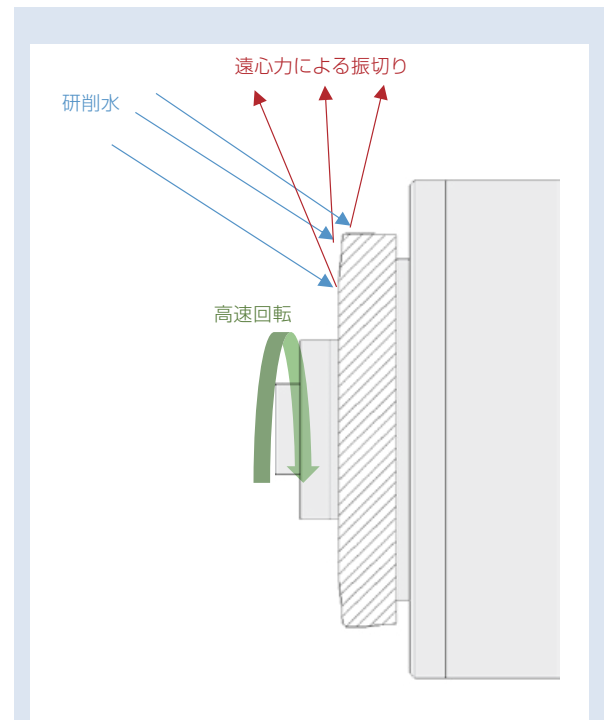


図10 大型フリンガー
Fig. 10 Large size flinger



写真3 高速静音こま式ボールねじ
Photo 3 High speed, Low-noise deflector type ball screw

(1) 高速性能

NSKの従来こま式ボールねじと比較し、1.3倍の $d \cdot n$ 値16万を実現。ねじ軸径32 mm、リード20 mmボールねじで送り速度100 m/minを達成。

(2) 静音性

NSKの従来こま式ボールねじと比較し、-4 dB(A)を実現。(図11)

(3) 作動性

ボールの挙動を解析する独自のシミュレーション技術の確立によって、安定した作動性を実現。(図12)

3.2.2 高防塵ローラガイド

前章で述べたとおり、高い負荷容量や剛性が得られるローラガイドは、工作機械の信頼性に関する訴求ポイントとなっており、マシニングセンタにおける採用率は、日本では50%、欧州では87%まで達している。その中で、特に近年においては、加工物の多様化や、難削材の高速高能率加工を実現する高圧クーラントの普及に伴い、各機械要素部品は切屑やクーラントの侵入を完全に防止することのできない環境下で使用されるケースが増えている。ローラガイドのベアリング内に異物が侵入すると、潤滑剤の劣化やころの循環

不良などが発生し、短期間で損傷するリスクがある。

このような背景から、NSKはローラガイドの防塵性能の向上を狙った高防塵V1シール、V1アンダーシールを開発し、異物環境下でのローラガイドの長寿命化を実現した。

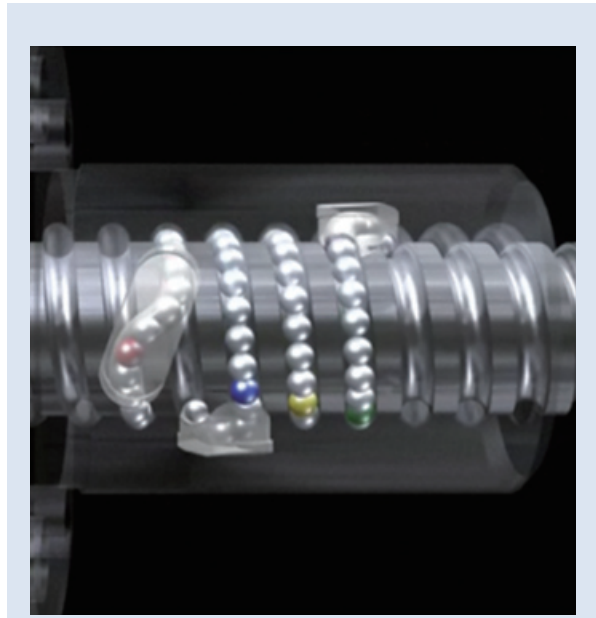


図12 ポール挙動のシミュレーション
Fig. 12 Proprietary simulation technology to analyze ball behavior in nut

試験ボールねじ：ねじ軸径40 mm、リード10 mm
試験条件
回転速度：2 500 min⁻¹
潤滑：ISO VG #68
マイクロホン位置：ねじ軸中心から400 mm

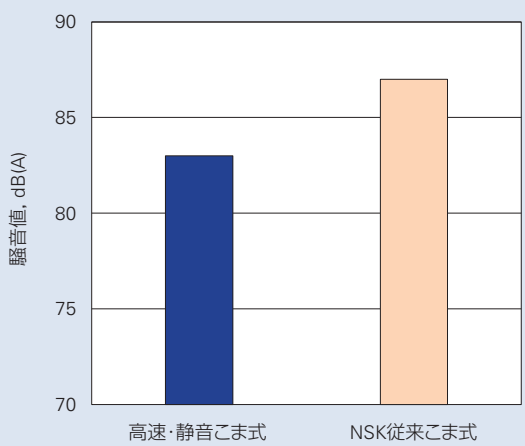


図11 こま式ボールねじの騒音レベル
Fig. 11 Noise level of deflector type ball screw

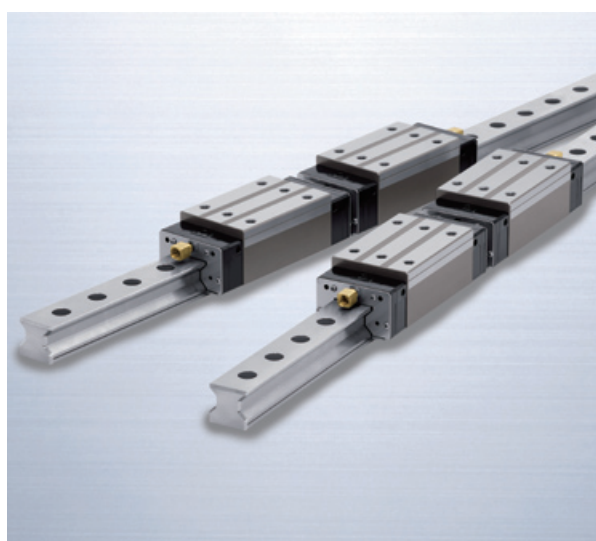


写真4 高防塵ローラガイド
Photo 4 Roller Guide with highly dustproof seals

(1) 高防塵 V1 シール(サイドシール)

サイドシールはベアリング端部の防塵用に取り付けられる。過酷な環境での長期走行においては、異物との接触によるリップの損傷や、異物が潤滑剤を奪うこ

とによる潤滑不足により、シールリップのむしれや摩耗が発生していた。高防塵 V1 シールは、シールリップ形状の最適化と耐摩耗性の高い材料の採用により、従来の標準シールに比べ、異物侵入量が約 1/2 に低減した。更に、潤滑状態が悪い場合でもむしれなどの損傷も発生し難くなっており、長期間にわたり高い防塵性能を維持することが可能となった(図 13, 図 14)。

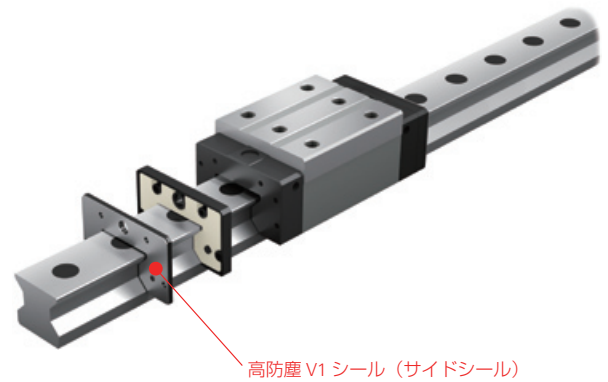
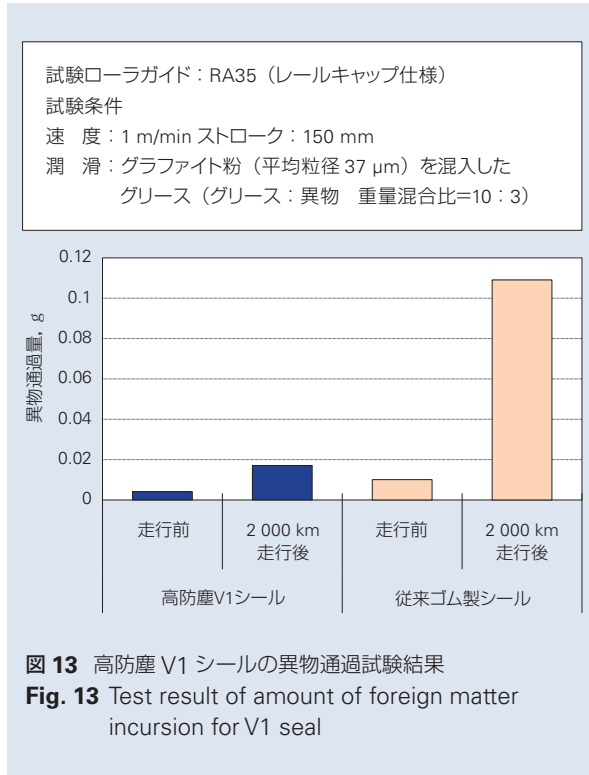
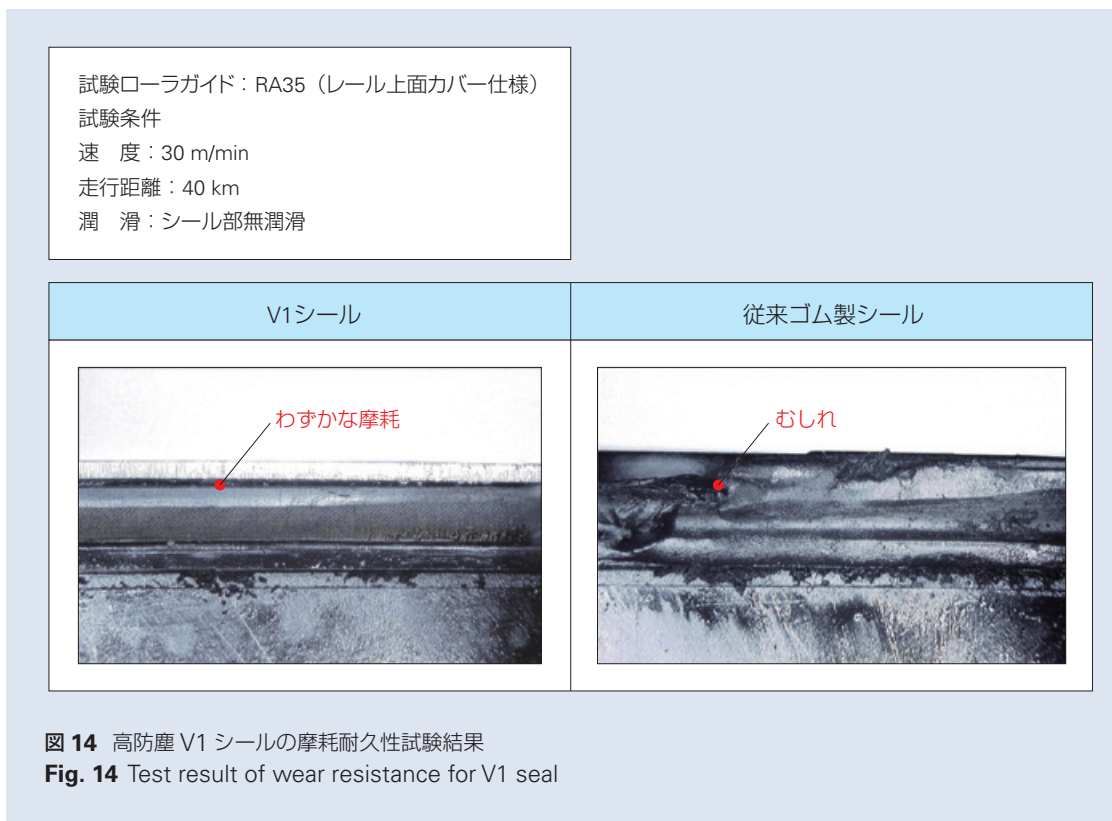


写真 5 高防塵 V1 シール(サイドシール)
Photo 5 Highly dustproof V1 seal



(2) 高防塵 V1 アンダーシール

自動車部品加工機では、**図 15** に示すように、レールを逆さに取り付け、ベアリング固定、レール移動で主軸を移動させる構造がみられる。これにより、X・Y・Z 軸が機械後方に配置され、様々な生産形態に適用できるシステムの構築が容易となる。しかしながら、レールが加工室内で露出されるため、これまで以上にベアリング下部からのクーラントや切削粉に対する防塵性能が求められる。こうしたニーズに応えるため、高防塵 V1 シール(サイドシール)と同様のリップ形状と材料の採用により、ベアリング下部から侵入す

る異物に対する防塵性能を飛躍的に高める高防塵 V1 アンダーシールを開発した。従来のアンダーシールの外側に配置し、2重のシールとすることで、従来の標準シールと比較して、クーラント侵入量を 1/10 以下に低減した。シールの耐摩耗性も高防塵 V1 シール(サイドシール)と同様に向上しており、長期間にわたり防塵性を維持できる。

4. あとがき

本稿では、工作機械見本市の出展動向を踏まえながら、工作機械の技術動向やその要素部品であるスピンドル、ボールねじ、リニアガイドの最新技術について紹介した。

今後の IoT やインダストリー 4.0 をはじめとする次世代ものづくりの実現に向けて、すべてのものづくりを支えている工作機械における技術のさらなる発展が鍵となることは間違いない。

NSK では、このような工作機械の発展に貢献できる高機能で高品質な製品の開発を今後共、行っていく所存である。



写真 6 高防塵 V1 アンダーシール
Photo 6 Highly dustproof V1 bottom seal

参考文献

- 1) “新保持器 SURSAVE™ 採用工作機械用 超高速アンギュラ玉軸受”, 機械の研究, 69-12 (2017).
- 2) “研削加工用 超高速グリース潤滑スピンドル”, 機械の研究, 70-7 (2018).

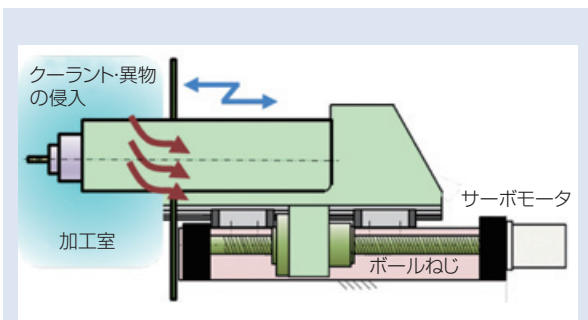


図 15 ローラガイド逆さ姿勢での使用例
Fig. 15 Example of use in an upside down arrangement for roller guide

鉄道車両用製品の技術動向

亀子 峰雄*, 城崎 喜彦**, 遠藤 茂***



亀子 峰雄



城崎 喜彦

Technical Trends of Railway Products

M. Kameko, Y. Shirosaki, S. Endo



遠藤 茂

Trains have been and will be one of the most important transportations in the world especially from the point of mass-transit and economical way. Safety always comes first in its operation and we have kept proposing the way to achieve that requirement through its history.

This article focuses on the technical trend of railway bearings for axle box, gear unit and traction motor for how they can realize reliability and contribute to safety operation. This article also includes technical information of relevant products of sensor, condition monitoring system and actuator for active suspension which are gaining their positions especially in the higher speed trains for more safety and comfortability. We are responsible for contributing to railway operations, from various points of view, with our technical solutions, now and the future.

1. まえがき

2. 技術動向

2.1 鉄道車両

2.2 鉄道車両軸受

3. 関連技術への取組み

3.1 軸受のセンシングと状態監視

3.2 車両の快適性向上

4. 今後の開発課題

5. あとがき

1. まえがき

鉄道は経済性の高い大量輸送機関として人々の生活を支えている。その歴史は古く、馬車道上の切石を用いた軌道を牽引される車両は、少なくとも2000年前のローマ帝国に登場している。蒸気機関車による鉄道は18世紀初頭に英国で始めて実用化され、欧州、欧米に広がっていった。日本では英国に約50年遅れて明治5年に新橋－横浜間で鉄道が開業し、現在の新幹線に発展し、リニア新幹線の開業も近づいてい

る。海外では、特に発展途上国において人口の都市集中による慢性的な交通渋滞や喫緊の課題として取り上げられている環境問題への効果的な対応策として、地下鉄や高速鉄道等の鉄道によるインフラ整備が進んでいる。ここでは、これら鉄道車両の運行を支える軸受の技術動向と、関連するNSK技術への取組みについて述べる。

* 産業機械軸受技術センター，鉄道・航空技術部，鉄道車両 G
 ** 産業機械軸受技術センター，鉄道・航空技術部，開発 G
 *** 技術開発本部 新領域商品開発センター 技術開発第二部 1 G

2. 技術動向

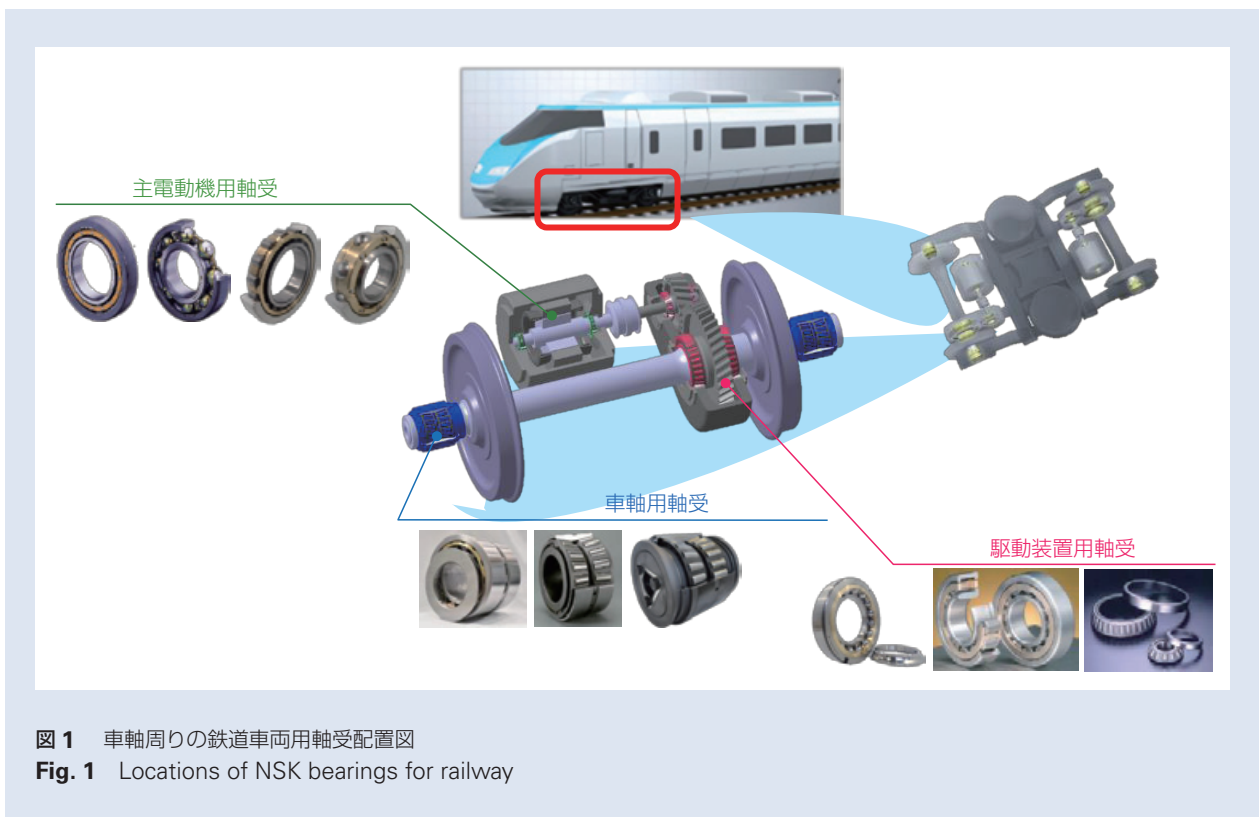
2.1 鉄道車両

ゼロ系新幹線の登場以来、鉄道車両は高速化の一途を辿っている。近年、高速鉄道網を急速に発展させた中国では、最高速度 380 km/h での営業運転を既に実現しており、更に英国では 400 km/h の車両投入が計画されている。その一方で欧州大陸や韓国では、山間部が多い事やインフラの保守整備を含む経済的なメリットから、近年の InnoTrans（国際鉄道技術見本市）での出展状況からも最高速度を 250 km/h 程度に抑えた車両が主流になりつつある。市場としても

LCC（Life Cycle Cost）の改善に向け、日本では生産年齢人口減少への対策としても省メンテナンス化やメンテナンス性向上が期待されている。さらに、海外では規格化が進んでおり、特に EU 圏では相互乗り入れや、世界各地への欧州仕様展開を見据えた規格化の動きもみられている。

2.2 鉄道車両用軸受

車両の車軸周りに使用される軸受を図 1 に示す。軸受は車軸用、駆動装置用、主電動機用の 3 つに大別される。



2.2.1 車軸用軸受

車軸用軸受は車軸を直接支持する重要な部品であり、軸受の損傷は車両の安全運行に重大な影響を与え兼ねない。従って、軸受に対する信頼性の要求はますます厳しくなっている。NSKでは、内部仕様最適化、高纯净度鋼の採用、および材料の非破壊検査等により、この要求に応えている。

ほとんどの車軸用軸受は内部に封入したグリースにより潤滑される(写真1)。グリース潤滑においては、高速運転時の軸受内グリース挙動把握が重要となってくる。すなわち高速回転においては、軸受内部に封入したグリースは遠心力により容易にシールケース側へ振り飛ばされるため、グリース封入量の他に軸受内部でのグリース分配率および封入方法まで細心の管理が一層重要となる。

また、グリース封入軸受ではグリース漏れ防止、外部からの異物侵入防止の観点から、シールが必須である。シールは、軸受外輪に固定され回転側の部品と接触する接触シールと、接触しないラビリンスシールに大別される。シール形式や材質は摺動面の速度と環境条件を考慮して選定される。

一方、新幹線で採用されている油潤滑の場合は、軸箱からの油漏れ対策が重要となる一方で、油面レベルや色相の確認、磁気栓による潤滑油中の摩耗粉状態の確認など軸受状態も監視しやすく、また、潤滑面でも安定しているという利点がある。

軸受のメンテナンス周期延伸も、LCCの観点から市場の強い要求となっている。特に高速車両の長期非分解要求に対しては、グリース劣化抑制が鍵となる。従来の鉄製プレス保持器に替わる樹脂保持器の採用は対応策のひとつである。また、後述するセンサを用い

た軸受のモニタリングも、InnoTrans2018での展示でもみられる様に更なるメンテナンス周期延伸の手段として期待されている。

一方欧州では“欧州高速鉄道ネットワークの相互運用性に関する指令”に基づき、鉄道車両用車軸軸受に関する規格がEN12080、EN12081、EN12082(表1)として制定されている。これらの規格により欧州各国間で運行される国際列車の軸受の仕様、封入グリース、性能・耐久性評価方法などが欧州で共通化され、一定の性能レベルを確保できるようになった。また、RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety)、すなわち、信頼性、可用性、保全性、安全性に対する規格も制定されている。グローバル化の中で、NSKは上記規格に準拠した製品開発も行っている。



写真1 車軸用軸受(樹脂保持器付)

Photo 1 Axle bearing with plastic cage

表1 軸受に関するEN規格概要

Table 1 EN standards for railway bearing

規格	内容
EN12080 転がり軸受	軸受基本スペック： 材料清浄度、硬さ、マーキング、検査水準等を規定。また内部や表面の欠陥検査として超音波探傷法、磁粉探傷検査法、過流探傷検査法、樹脂保持器の強度試験法も規定。
EN12081 潤滑グリース	グリース品質要求： 車両最高速度 200 km/h で、グリースタイプを速度区分。グリースそのものに対する各種試験、EN12082 による台上試験、及び実車試験により評価される。
EN12082 耐久試験	グリースを含んだ軸受としての耐久試験方法を規定： 台上試験、実車試験の両方を含む。台上試験では軸受を2個同時に試験評価する事等の試験条件が、実車試験では試験走行距離が規定されている。判定は試験中の軸受温度、試験後の軸受およびグリースの異常有無で評価される。

2.2.2 駆動装置用軸受

主電動機からの出力を車軸側へ伝える駆動装置にはピニオン軸と大歯車軸を支える軸受があり、これらを支持する軸受として国内では円すいころ軸受が主に使用されている。駆動装置用軸受については、歯車噛合い振動等の影響で保持器の疲労破損や摩耗が発生する懸念がある事から、NSKでは強化型保持器を採用している。特に入力軸であるピニオン軸は高速回転かつ主電動機と接続するカップリングの影響で厳しい条件下にあり、必要に応じて保持器への軟窒化処理を適用している。

一方で海外(特に欧州)の高速車両向けでは、ピニオン軸に円筒ころと玉軸受を用いた形式が主流である。円すいころ軸受の場合、軸受組込みの際にアキシアルすきま調整が必要であるが、本形式では玉軸受ですきまが定まる為、このすきま調整が不要となる¹⁾。ただし、使用する軸受数が増える事から、重量や取付け幅は増加するといったデメリットがある。なお近年、国内では新幹線向けにヤマバ歯車を使用した駆動装置の開発も進められている。本形式では軸受に対するアキシアル荷重負荷が低減される為、円筒ころ軸受の採用が可能であるが、すべり接触面となるころ端面とつば部の仕様最適化が求められる。

2.2.3 主電動機用軸受

小型化／高効率化を目的に主電動機が交流化され、現在ではVVVF(可変電圧可変周波数)制御による誘導電動機が主流となっている。本形式の普及によるブラシレス化に伴い、摺動部品は軸受のみとなったことから、主電動機のメンテナンス周期は軸受の寿命に大きく依存される事になった。その為、軸受における潤滑性能の長期維持が重要な鍵であり、グリースの基油変更(鉱油→合成油)やグリースポケットの工夫²⁾、保持器ブラケージ化やセラミック転動体を採用した軸受

等が提案されている。また、主電動機においては軸受に負荷される荷重は機関車用を除き比較的小さい。その為、更なる高速条件下においては、内輪からの転動体駆動力の不足とそれによるスキッピング損傷の懸念が生じる事から、潤滑性能に加え軸受内部仕様の最適化も重要である。

主電動機用軸受では、主電動機内を流れる電流(直流あるいは交流)の一部が軸受内を貫通し、軌道面と転動体の油膜を介した接触部でスパークすることで表面の一部が損傷する、いわゆる電食が発生する場合がある。電食防止の対策としては、軸受の外輪に絶縁被膜を施した絶縁軸受が主流となっている(写真2)。絶縁特性はインピーダンスが大きいほど優れており、絶縁材料としてはセラミック、或いは樹脂が一般的である。一方で、セラミック転動体を採用する事でより大きなインピーダンス特性を実現した、ハイブリッドタイプも登場している。



写真2 主電動機用円筒ころ及び玉軸受(外輪絶縁被膜付き)

Photo 2 Cylindrical and ball bearing with electrically insulated outer ring for railway traction motors

3. 関連技術への取組み

3.1 軸受のセンシングと軸受状態監視

鉄道車両の一層の安全・信頼性向上、並びにメンテナンス周期の時間基準から状態基準への移行に寄与する為、各種センサの開発や軸受の損傷を早期に検出する軸受損傷予兆診断システムの開発に取り組んでいる。

2004年に開発した車軸センサ(写真3, 4)は、日本貨物鉄道株式会社殿が2004年3月13日から営業運転を開始したM250系特急コンテナ電車「スーパーレールカーゴ」(最高時速130 km/h)に適用され、約13年以上使用されている。本センサは1つのセンサ内に複数のセンシング機能を内蔵させたマルチセンサとした構造であり、1つのセンサ内に温度と振動用、あるいは温度と回転速度用などの内蔵センサの組合せにより複数のタイプがある。また、2012年には、回転速度センサを内蔵した車軸軸受(写真5)を開発し、西日本旅客鉄道の321系、521系列車に採用されている。

近年では、上述した各種センサの開発のみではなく、センサから得られた情報を活用し、軸受の損傷を早期に検出する軸受損傷予兆診断システムの開発にも取り組んでいる。本診断システムの特徴は軸受損傷の予兆を捉えることであり、診断ロジックの構築には軸受メーカーとして長年培ってきた軸受損傷に関する知識が必要不可欠である。

今後、鉄道業界でIoTを活用した様々な取組みが進む中でセンシング技術と診断技術を複合させた製品開発を継続し、車両運行の安全性・信頼性向上に貢献していく。

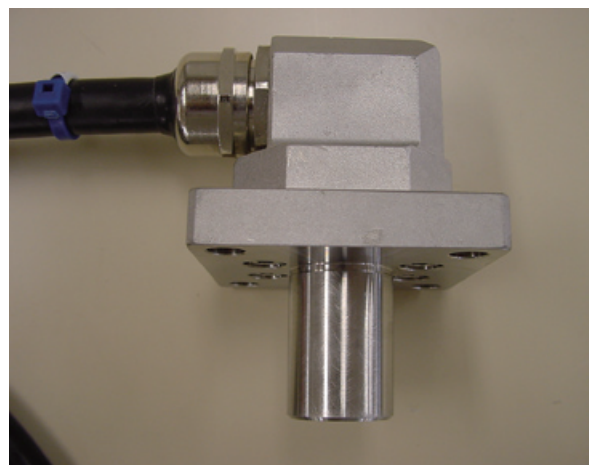


写真3 車軸軸受用マルチセンサ

Photo 3 Multi-sensor for axle bearing

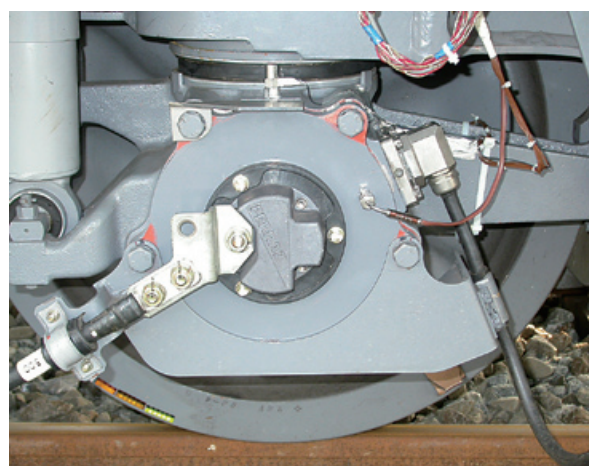


写真4 センサの車両取り付け状態

Photo 4 Multi-sensor mounted to axle box



写真5 センサ付き車軸軸受

Photo 5 Axle bearing equipped with sensor on seal

3.2 車両の快適性向上

3.2.1 アクティブサスペンションの搭載

鉄道車両においては高速化に伴う安全・安心に対する技術要求の高まりに加え、周遊型の豪華列車などにおける快適性への期待が増している。特に、車体の揺れの抑制が快適性確保の課題としてクローズアップされている。車体の揺れは線路の軌道ゆらぎや勾配切り替え部、縦曲線などが走行時に台車を通じて間接的に車体へ伝わることに加え、車体周囲の空気圧が直接的に車体を左右方向へ揺らすなど、様々な要因により生ずる。このような車体の揺れを抑制するため、鉄道車両には図2に示すような軸ばねや枕ばね、左右動ダンパーといった受動的なサスペンションが設けられているが、更なる快適性向上のために、車体の揺れを能動的に制御するアクティブサスペンションの搭載が進んでいる。

アクティブサスペンションはダンパーの減衰力を制御するセミアクティブサスペンションと、空気圧や油圧、電動モータなどのアクチュエータを使用して加振力と逆方向に推力を発生させて車体の振動を積極的に打ち消すフルアクティブサスペンションの2種類が大別される。

3.2.2 フルアクティブサスペンション向けアクチュエータの開発

NSKは鉄道車両の左右方向の揺れを抑えるためのフルアクティブサスペンション向けに、ボールねじを用いた電動式のアクチュエータ「動揺防止アクチュエータ」を開発した。(写真6、図3)

このアクチュエータは図2の左右動ダンパーと平行して台車と車体との間に配置され、上位制御装置からの指令を受けて左右方向に推力を発生する。電動モータの回転運動を出力ロッドの直線運動に変換する機構として、高効率、低慣性かつ逆作動性が良い、精密ボールねじを適用した。高効率に動力を伝達することで電動モータへの要求トルクを抑え、小型化と省電力化を図っている。またボールねじの逆作動性に加え電動モータも小型で低慣性であることから、応答性や制振性にも優れている。

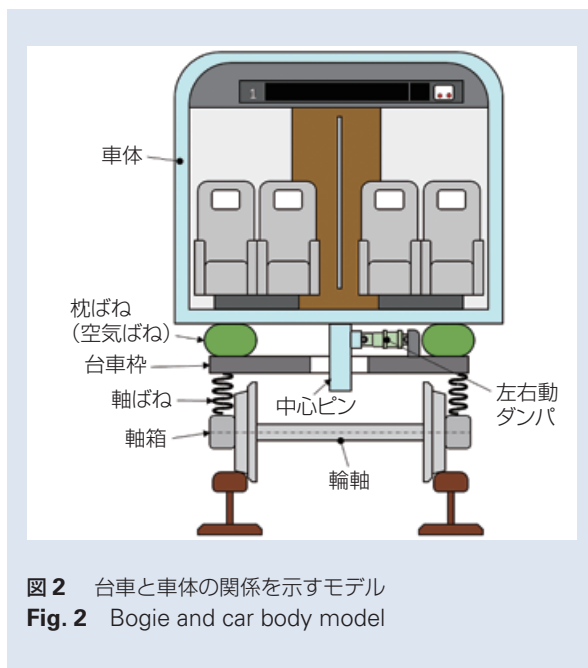
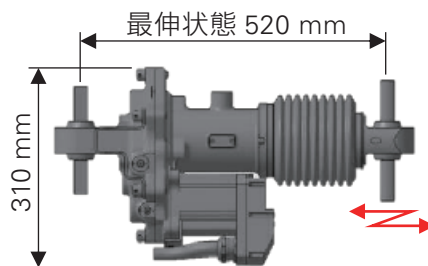


写真6 NSK 動揺防止アクチュエータ
Photo 6 NSK Vibration Control Actuator



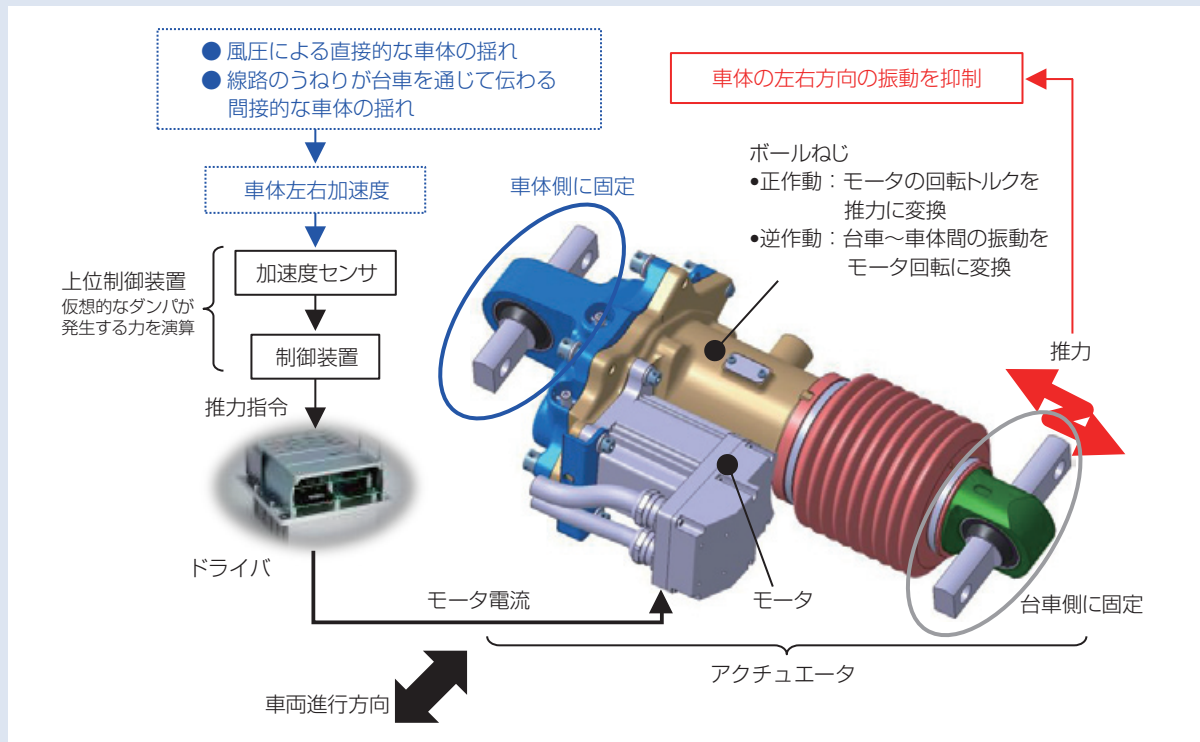


図3 NSK 動揺防止アクチュエータ

Fig. 3 NSK Vibration Control Actuator

このアクチュエータを用いたフルアクティブサスペンションの制御を利かせることで、東日本旅客鉄道株式会社様のクルーズトレイン「TRAIN SUITE 四季島」の現車走行試験（中央本線のトンネル区間を約100 km/hで走行）においては、車体左右方向加速度を大幅に低減できることが確認された。また乗客が感じやすい振動周波数で補正した車体加速度の実効値から求められる乗り心地レベルを11.1 dB改善できることが確認された。³⁾

4. 今後の技術課題

ここで紹介した製品は鉄道車両の安全／安心／快適を支える為の重要部品であり、その性能と信頼性の更なる向上は我々の永遠の課題である。一方で、経済的な観点からはメンテナンス性の向上や、省メンテナンス(究極にはメンテナンスフリー)に対する要求も強まっている。その為には、熱処理を含めた各部品の材料技術や余寿命診断技術⁴⁾、本稿でも取組みを紹介した状態監視の新技术開発がますます重要となっている。ただし、ハイエンドの技術要求を満たすだけでは、今後更に厳しくなる市場要求を満足する事は出来な

い。長年の実績に支えられた今の技術を十二分に踏まえつつも、解析/シミュレーション技術をより高精度/高精度に進化させ、性能と経済性をバランスした高コストパフォーマンスな製品を提供し続ける事が、サプライヤとしての永遠の使命となるであろう。

5. あとがき

普段、何気なく生活の足として多くの方々にご利用されている鉄道車両には、ここで紹介したNSKの製品が搭載され、日々活躍している。ひとつのトラブルが、多くの一般市民の生活に影響を与えかねない事から、その責任の重大さに身を改めて引き締めると共に、今後の鉄道の発展に貢献し続けたい。

参考文献

- 1) 鈴木 寿雄：“電車駆動装置用軸受”，NSK Technical Journal, No. 666
- 2) 日比野 澄子，鈴木 政治：“グリース基油の移動を考慮したグリースポケット構造の提案”，トライボロジスト，50-1 (2005) 39-46
- 3) レールアンドテック出版 2017年8月発刊 鉄道車両と技術 251号「TRAIN SUITE 四季島のテクノロジー VI 左右動揺抑制技術」の章より引用
- 4) 古村 恭一郎，城田 真一，藤井 章雄：“転がり軸受の疲労解析(3) - 内部疲労損傷の解析 -”，NSK Technical Journal, No. 646 (1986)

ガイダンスロボット LIGHBOT の 安全認証 ISO13482 取得と実用化

嵯峨山 功幸*, 盛 真唯子*, 田淵 絢子*, 福島 庸介**



嵯峨山 功幸



盛 真唯子

ISO13482 certificated and practical application of Guidance Robot LIGHBOT

K. Sagayama, M. Mori, A. Tabuchi, Y. Fukushima



田淵 絢子



福島 庸介

We have developed a robot that guides visually impaired and elderly people to their destination at hospital. In this report, we introduce practical application and the approach of social implementation of this robot. Practical application is our ultimate goal. In order for robots to be accepted by society, we acquired the safety standard ISO 13482 for personal care robots. We also implemented a mechanism to disseminate sales forms, insurance, maintenance, subsidies, etc. The robot was introduced to Kanagawa Rehabilitation Center.

1. はじめに
2. 実用化, 社会実装への対応
 - 2.1 安全規格
 - 2.2 費用対効果
3. ISO13482 の取得
 - 3.1 リスクアセスメント
 - 3.2 設計
 - 3.3 検証
 - 3.4 マニュアル, ラベル
 - 3.5 設計管理体制, 製造管理体制
 - 3.6 認証取得

4. 仕組みづくり
 - 4.1 レンタル, リース, 保険体制
 - 4.2 メンテナンス保守
 - 4.3 導入補助金
5. まとめ

1. はじめに

少子高齢化, 労働力減少の背景のもと, 様々なロボットによる生活支援の取り組みが行われている。ことに視覚障がい者に至っては盲導犬やヘルパーの支援を必要としており, 国内に 31.6 万人¹⁾, 世界では 2.53 億人²⁾と推計されている。

視覚障がい者が外出する際に最も困ることは, 「人の混雑や車に危険を感じる」, 「乗り物の利用が不便である」があげられており, それに継いで, 「公共の場所

を利用しにくい」, 「建物の設備に不備」という施設内の利便性に関する困りごとが顕在化している³⁾。また, ロビーのような広いスペースは, 道標となる特徴物がないことから目的の場所にたどり着くことは特に難しいとされている⁴⁾。当事者の方に独自にヒヤリングを行った結果でも同様の意見を頂いており, 視覚障がい者の大型施設(病院, 公共の場, 役所等)内の移動には高い要望があり, 我々は主に屋内での案内機能を備え

* 新領域商品開発センター, 技術開発第一部

** 新領域商品開発センター, 技術開発第二部

る移動支援ロボットの実用化をターゲットとした。

視覚障がい者の移動支援ロボットは、国内では、館らの MELDOG⁵⁾や、森らの歩行ガイドロボット⁶⁾など、障害物回避、地点間の誘導まで含めた研究が展開されている。また海外では Ulrich らの杖先端に車輪を有する移動ロボット技術を応用した支援装置 The GuideCane⁷⁾、Kulkarni らの屋内ナビゲーション装置⁸⁾などがあるが、いずれも研究段階であり、実際に実用化され施設に導入された例はない。

一方、自律移動ロボットは、近年、Amazon Robotics やバトラーなどの倉庫内配送ロボット、屋外配達ロボット、警備ロボットなど、実用化、導入されているものも多いが、人とのインターフェースを有し、人と共に目的地まで移動する機能を備えたロボットは実用化されていない。

我々はこれまで、視覚障がい者の方が初めて訪問する病院や、広い大病院、公共施設、役所などの施設内で、目的地まで迷わないように先導的に案内することで、利用者が円滑に施設内を移動できるガイダンスロボットの開発に取り組んできた。まず、直感的な操作を重視し、人間からの力入力に応じてスムーズに動作し、進路上にある障害物を回避するロボットを開発した⁹⁾。次に、ロボットに地図情報、自己位置推定、経路生成機能を組み込み、利用者を案内するロボットを開発し、実証実験、長期モニター試験を行い、助言に基づき改良を繰り返した^{10)~12)}。さらに病院経営者の要望等に基づき、想定ユーザーを晴眼者、特に高齢者に広げたロボットを開発し、視覚障がい者の使用感を損なわないことを実証実験により示し、当事者から早期の実用化に対する熱い要望を頂いた^{13)~14)}。

本稿では、これまでの開発、実証実験で培った経験を基に、実用化、社会実装の条件と、安全認証 ISO13482 の取得、社会実装の仕組み作りについて取り組んだ成果について述べる。

2. 実用化、社会実装への対応

生活支援ロボットを実用化、社会実装するためには、ユーザーと管理者の双方に受益があり、かつ第三者への安全が担保される必要がある。そのために、以下の3条件を満たす必要があると考えた。

- (1) 社会に受け入れられるための安全の担保
- (2) 費用対効果の高さ
- (3) 販売形態、保険、メンテナンス、補助金等含めた普及のための仕組み

本節では(1)と(2)の概要について述べ、3節では安全認証 ISO13482 取得について、4節では仕組みづくりについて詳細を述べる。

2.1 安全規格

病院経営者からの第三者機関による安全の妥当性証明が必要とのコメントに基づき、2014年2月に発行された生活支援ロボットの安全性に関する唯一の国際規格である ISO13482 の取得を行った。パナソニックのリショーン、サイバーダインの HAL に続き、国内で11例目の取得となる¹⁵⁾。また、直感的なインターフェースを備え、人と共に移動する形態のロボットとしては世界初の取得である。

2.2 費用対効果

費用対効果はすなわち稼働率の高さである。病院の経営層へのヒヤリングからは、大病院で視覚障がい者専用の誘導ロボットが必要とされる機会は1~2回/月程度と見込まれ、ユーザーを視覚障がい者に限定すると費用対効果が低いとの指摘があった。一方、晴眼者であっても大規模な病院では迷うことが多く、特に高齢者の誘導案内に使用できれば患者満足度の向上が期待できるとのコメントもあり、病院内の配置に詳しくない晴眼者、特に高齢者にもユーザーの範囲を拡大した。

各病院がインターネット上に公開している情報を基に一日当たりの新来患者数を算出すると、東京都立多摩総合医療センター約152人(H28)¹⁶⁾、順天堂大学医学部附属浦安病院約202人(H24)¹⁷⁾、自治医科大学付属病院約120人(H26)¹⁸⁾、産業医科大学病院約182人(H26)¹⁹⁾、横浜市立市民病院約111人(H28)²⁰⁾となっており、平均して100~200人程度である。患者ひとりに対する案内時間を平均3分と想定すると、全員を案内するのに5時間~10時間かかるため、案内機能を持つ移動支援ロボットによって、受付スタッフの作業負担軽減など、病院にとってうれしさがあることがわかった。

3. ISO13482 の取得

3.1 リスクアセスメント

ISO13482 は生活支援ロボットの安全性に関する唯一の国際規格として 2014 年 2 月に発行された。リスクアセスメント（以後、RA）をベースとした安全規格である（図 1）²¹⁾。RA によって危険源、危険事象を抽出、リスク評価して、リスクを受容可能なレベルまで低減するプロセスを評価される。既存の工業製品の規格のように、明確に決められた試験方法や規格値は存在せず、RA に加えてメーカーの設計思想と開発機器のコンセプトをベースに最適な評価基準を独自に定めた。

ISO13482 取得にあたっては、設計段階からの認証機関との連携が推奨されており、日本品質保証機構（以下、JQA）認証制度開発普及室の確認を得ながら認証プロセスを進めた。

認証プロセスを図 2 に示す。Phase1 では、仕様決定、設計の開発フローと同時に、設計管理体制の監査、Phase2 では、評価、検証、製造、製造管理体制の監査となっている。

実証実験用にすでに開発した機体¹¹⁾に対して RA を実施、必要な部分については、設計の変更を行った。RA 用のシートは独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO）プロジェクトにおける（独）労働安全衛生総合研究所の作成シート²²⁾を採用した。事前設定は、使用者を自立歩行に問題がない視覚障がい者、高齢者に、使用環境をバリアフリー環境の病院と想定した。

ISO13482 付属書 A に従い網羅的に危険源を抽出し、さらに我々が過去の実証実験で抽出した危険事象に基づき、合計 102 項目の危険源を抽出し、リスク評価を行った。RA シートの抜粋を表 1 に示す。

初期リスク評価の結果、リスク点数が高いものに対してそれぞれ低減策を実施した。最もリスク点数が高い危険事象は、下りの段差での転落によるものであり、運用上の配慮と、安全装置の増強により、リスクを低減した。

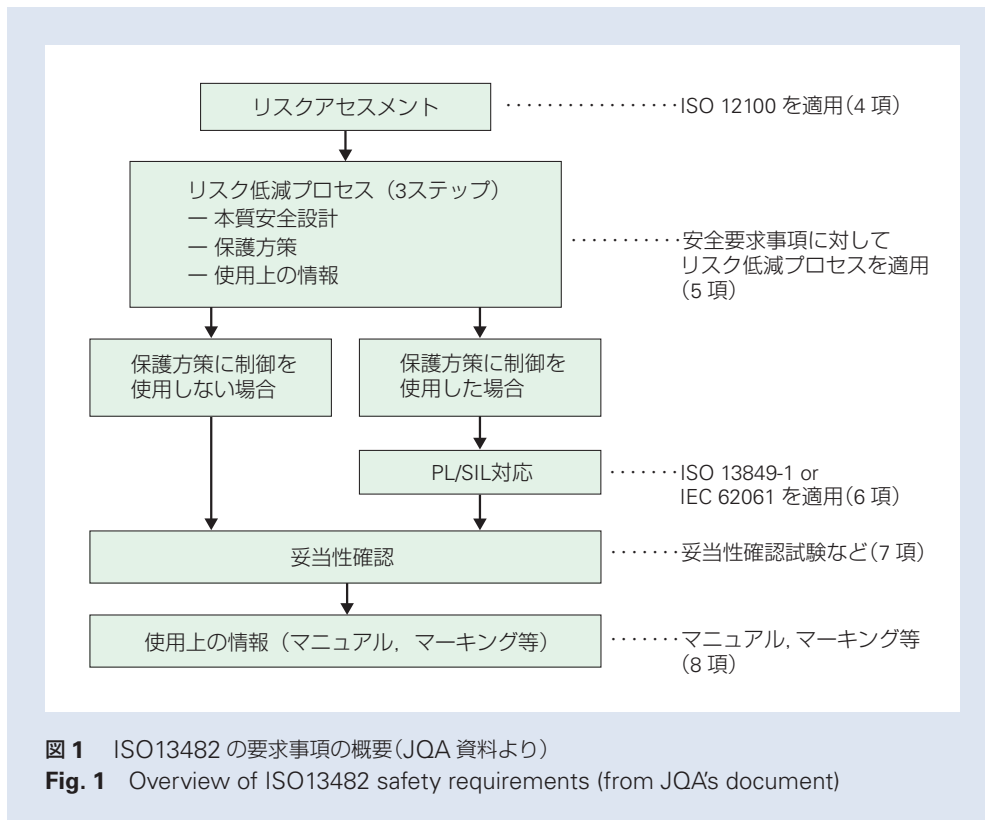


図 1 ISO13482 の要求事項の概要(JQA 資料より)

Fig. 1 Overview of ISO13482 safety requirements (from JQA's document)

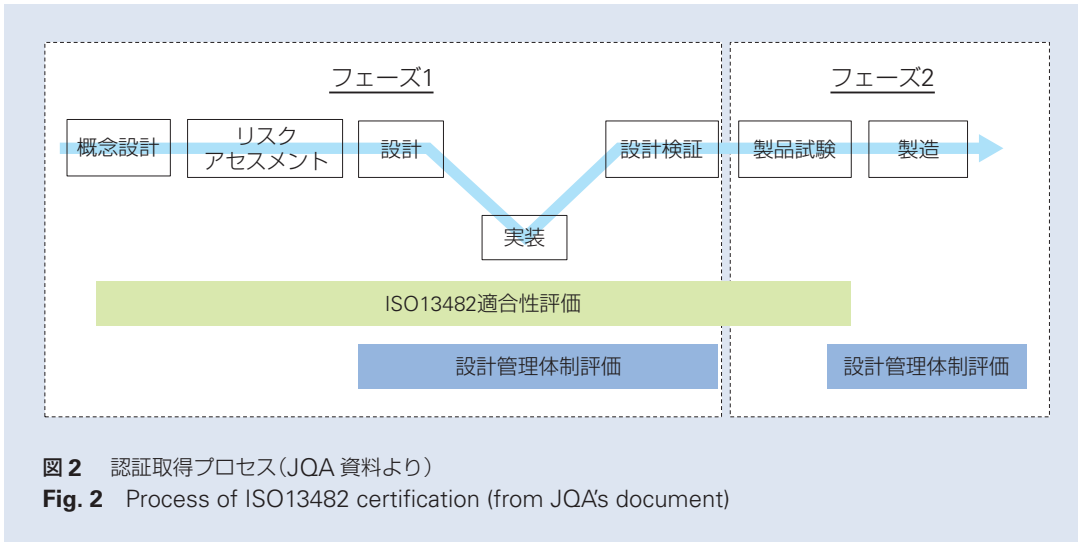


図2 認証取得プロセス(JQA 資料より)
 Fig. 2 Process of ISO13482 certification (from JQA's document)

表1 RAシート抜粋
 Table 1 Extracts from RA

(a) 危害の程度指標決定
 (a) Risk matrix

危害のひどさ : S	危害の発生確率										曝される頻度 / 時間 : F	危険事象の発生確率 : P		危険回避 / 制限できる可能性 : A		
	3	4	5	6	7	8	9	10	11							
重大傷害 (長期間治療)	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44	連続的 / 常時	4	ほぼ確実に起こる	4		
医療措置 (短期間治療)	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	頻繁 / 長時間	3	可能性が高い	3	不可能	3
応急手当て回復	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22	時々 / 短時間	2	可能性がある	2	可能	2
無傷 / 一時的痛み	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	まれ / 瞬間的	1	まれである	1	容易	1

(b)危険事象抽出, リスク評価抜粋
 (b) Initial risk assessment

危険源同定						リスク見積							対応, 対策 [10] ・備考	
危険源の種類	危険源	潜在的結果	フェーズ	被害対象者 (誰が)	危険区域 (部位) / 頻度の考え方	危険事象 (危害がおこるシチュエーション)	危害のひどさ S	危害の発生確率 Ph	頻度 F	危険事象の発生確率 P	回避 A	リスク点数		リスクシナリオを出すため参考にした物 [6]
バッテリー充電の危険源	バッテリーの過負荷	火災, 危険な煙又は物質の放出	起動 (電源 OFF)	管理者	バッテリー	危険部位が発火し, 熱傷 (深度 I) を負う	2	7	3	1	3	14	ISO13482 FTA (A34)	リスク低減 (条件付き受容) シート参照
	深放電したバッテリーの充電	火災, 危険な煙又は物質の放出	起動 (電源 OFF)	管理者	バッテリー	危険部位が発火し, 熱傷 (深度 I) を負う	2	7	3	1	3	14	ISO13482 FTA (A35)	
	バッテリー活端子との接触	感電	起動 (電源 OFF)	管理者	バッテリー	バッテリーの活端子に触れ, 感電 (しびれ) が生じる	2	7	3	1	3	14	ISO13482 FTA (A31)	
	バッテリーの短絡	火災, 危険な煙又は物質の放出	起動 (電源 OFF)	管理者	バッテリー	危険部位が発火し, 熱傷 (深度 I) を負う	2	7	3	1	3	14	ISO13482 FTA (A36, A37)	
エネルギーの貯蔵及び供給の危険源	高い電気エネルギー源との危険な接触	感電, 火傷	バッテリーと充電器がセットになっている 同様のリスクシナリオ No.3 参照				-	-	-	-	-	-	-	要求まとめシート該当番号
	故障条件下で電気構成部品 / 部品が帯電部となること	感電	起動, ナビゲーション	使用者	ロボット表面金属部	故障により漏電が発生, 気づかずにロボット危険部位に触れ, 感電 (しびれ) が生じる	2	7	2	2	3	14	ISO13482 FTA (A31, A32)	リスク低減 (条件付き受容) シート参照

(c)リスク低減シート抜粋
 (c) Risk reduction

初期リスク分析結果					再リスク見積もり							対応, 対策 [3] ・備考
危険源の種類	危険源	危険事象 (危害がおこるシチュエーション)	リスク点数 R	メーカーによる工学的手段	S	Ph	F	P	A	リスク点数	保護方策組み合わせ時の R	
位置確認及びナビゲーションの誤差による危険源	禁止区域への侵入の原因となる位置確認誤差	ナビゲーションの誤差が大きくなることによって曲がる場所を間違えて危険区域 (下り階段) へ進入し, ロボットと使用者が転落する	24	下り階段がある道をあまり通らないようなルート生成を行う 下り階段周辺の天井にマーカーを貼ることによってナビゲーションの誤差を小さくし, 階段の方へ行かないようにする	4	5	1	2	2	20	16 ⁽⁴⁾	要求まとめシート該当番号
				転落停止センサとブレーキを備える [1], 転落箇所を検知して停止する	4	5	2	1	2	20		
位置確認及びナビゲーションの誤差による危険源	転落してきたロボット	下り階段でロボットが転落してくる, 階段の下にいる周囲の人に衝突する	18	81-1 の対策を行う	3	4	1	1	2	12	12 ⁽⁴⁾	要求まとめシート該当番号
本ロボット固有の危険源種別	間違った (左手で) 操作	ロボット本体から使用者の身体が大きくはみ出し, ロボットと使用者の経路が異なる。ロボットは避けるが使用者が障害物と衝突する	18	左手では握りにくいグリップ形状に変更する	2	6	2	1	3	12	12	要求まとめシート該当番号

3.2 設計

要求機能から定義した仕様および、RA からのフィードバック、設計検証を受けて詳細仕様を決定した。代表的な仕様を表 2 に示す。

視覚障がい者と高齢者を対象としているため、高齢者に対しては、日本人の高齢者の平均身長²³⁾、見やすい文字サイズ²⁴⁾、歩行速度²⁵⁾を考慮し、視覚

表 2 主要仕様一覧

Table 2 Main specification

外寸	D 500 × W 390 × H 960 mm
質量	25 kg
最高速度	3 km/h (制限範囲内 1 km/h)
登坂可能スロープ	5°
積載能力	5 kg
駆動源	Li-ion バッテリ (22.2 V, 450 Wh)
インターフェース	目的地設定: タッチパネル, リモコン 移動: グリップ (力覚センサ)
EMC(エミッション)	CISPR11 Class B
使用温/湿度	8 ~ 30 °C / 40 ~ 70 %

障がい者に対してはリモコンにより触って操作可能とした。また、病院内で稼働する装置であることから、EMC に関しては一般産業機械よりも厳しい CISPR11 の ClassB のエミッションを満たす設定とした。

決定した詳細仕様を実現するため、各設計を行なった。システムブロック図、組図、外観写真をそれぞれ図 3、4、5 に示す。

本ロボットの主要な安全装置に関して示す。以下の安全装置にはソフトは介在させない方針とした。

・転落停止関連

転落を防ぐため、ロボット前方左右の床の有無（床までの距離）を検出することとした。センサは測距センサを選定し、左右に一つずつ搭載した。アナログ信号として検出される床までの距離データが、コンパレータ回路にて、ある閾値を境にデジタル出力される。その閾値は可変抵抗で調整可能とし、ロボットの使用環境に応じて調整する。センサからのデジタル出力をモータドライバへ入力し、床面がないと判断すると、モータドライバを停止させ、同時に駆動軸にブレーキをかける構成とした。

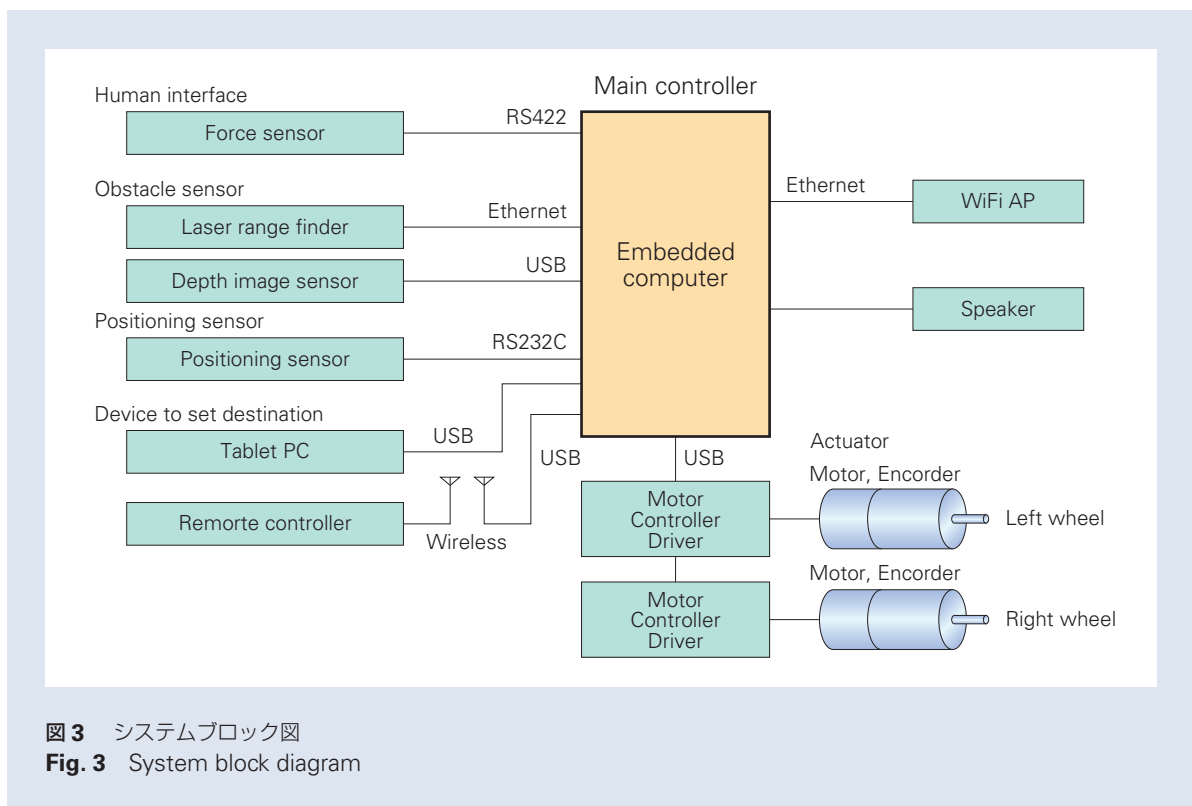


図 3 システムブロック図
Fig. 3 System block diagram

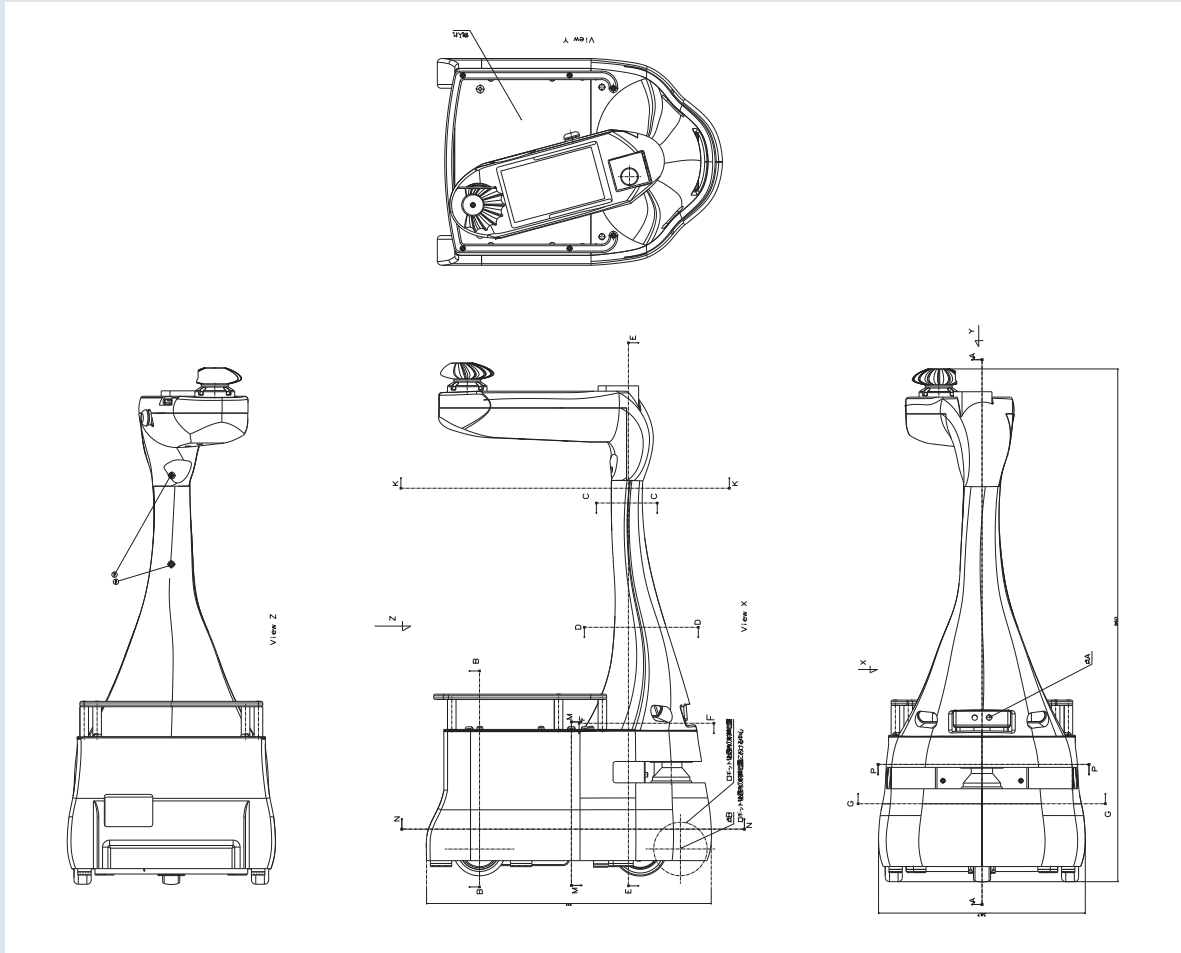


図4 ロボット組図
 Fig. 4 Assembly drawing of robot



- グリップ (内製力覚センサ)**
 押す力に応じて速度を決定
- タッチパネル / スピーカー**
 目的地を容易に設定
- 障害物検知センサ**
 障害物、段差を検出して回避、停止

ロボット外観

図5 ロボット外観と各部
 Fig. 5 Overview of robot

・ 障害物検知関連

ISO13482 の規格要求で人を検出する必要がある場合、IEC61496 の該当する指令に従った電氣的検知保護機器 (ESPE) を使用しなければならない。図 6 に障害物検知領域を示す。障害物が領域⑤に侵入すると速度上限を 1 km/h に制限し、領域④ではソフトウェア的に回避動作を行う。ソフトウェアによる回避が正常に機能しない、あるいは突発的に領域②③に障害物が侵入した場合は、②③それぞれの領域と反対側の車輪を駆動するモータを停止させ、回避動作を行う。さらにロボット近傍の領域①を防護領域に設定しており、その領域内に障害物を検知したらモータドライバを停止させ、かつブレーキを作動させて強制的に瞬時に停止させる。障害物がなくなった場合、手動、または、自動によるリセットが選択できるが、安全関連系にソフトを介在させない方針から、手動による再起動の手順を採用した。選定したセンサは単体で $PL = d$ を満たす。

3.3 検証

設計仕様を満たしていることを確認するため、検証を行った。代表的な評価試験について、その内容と検証結果を示す。

3.3.1 EMC

NVLAP 認定テストサイトにてエミッション、イミュニティそれぞれの試験項目について試験を行い、表 3 のとおり適用規格を満たすことが示された。

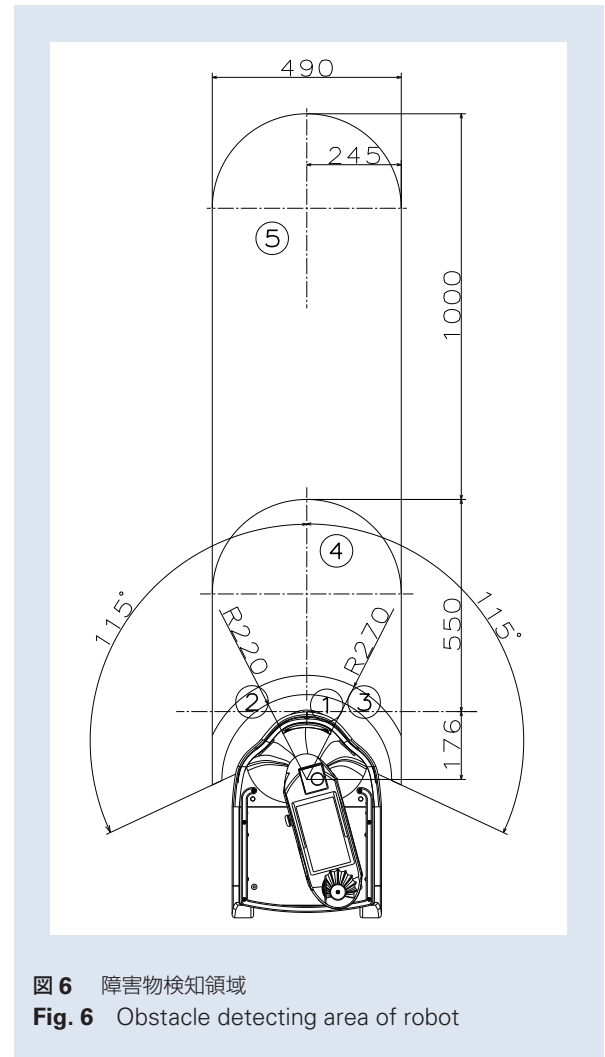


図 6 障害物検知領域
Fig. 6 Obstacle detecting area of robot

表 3 EMC 試験結果

Table 3 EMC results

エミッション試験	適用規格	規格値	周波数	測定値	マージン	結果
電源ポート伝導妨害波試験	CISPR Pub.11 Gr.1 : 2015	50.0 dB μ V	10.034 MHz	37.2 dB μ V	12.8 dB	適合
通信ポート伝導妨害波試験	CISPR Pub.11 Gr.1 : 2015	適用外	適用外	適用外	適用外	適用外
妨害波電界強度試験	CISPR Pub.11 Gr.1 : 2015	37.0 dB μ V/m	450.000 MHz	35.4 dB μ V/m	1.6 dB	適合

イミュニティ試験	適用規格	結果
静電気放電イミュニティ試験	IEC61000-4-2 : 2008	適合
放射無線周波電磁界イミュニティ試験	IEC61000-4-3 : 2006 + A1 : 2007 + A2 : 2010	適合
電氣的ファーストランジェント/バースト イミュニティ試験	IEC61000-4-4 : 2012	適合
サージイミュニティ試験	IEC61000-4-5 : 2014	適合
無線周波電磁界によって誘導された伝導妨害に対するイミュニティ	IEC61000-4-6 : 2013	適合
電圧ディップ、短時間停電及び電圧変動 イミュニティ試験	IEC61000-4-11 : 2004	適合

3.3.2 走行安定性試験

NEDO のロボット安全性検証手法²⁷⁾ や、電動車いすの規格²⁶⁾等を参照し、走行安定性試験の条件を表4のように設定した。傾斜角度は負を下り勾配、正を上り坂とした。試験1は下り坂で障害物を急に回避することを想定した、片輪を停止させる試験で、左右輪の両方に対して実施した。試験2は下り坂で急停止させる試験、試験3は上り坂を急発進させる試験、試験4は平地でのナビゲーション時の最小旋回半径(約1.4 m)で旋回させる試験で左右両輪に対して実施した。障害物回避に関連する実験は、実運用時速度が1 km/hに制限されるため初期の車輪角速度をロボットの速度1 km/hに対応した値(5.6 rad/s)に設定した。それぞれ、積載物が落下せず、ロボット自身も転倒しないこと、また試験3については上り坂を問題なく走行できることを判定基準とし、茨城県つくば市にある生活支援ロボット安全検証センターにて実施し(図7)、問題ないことを確認した。

なお、全ての試験において、走行路面は想定環境の病院の床に近いPタイル、走行方向は前進、積載物は5 kgとした。

また、参考確認として、試験1,2の走行速度3 km/hつまり車輪角速度16.7 rad/sとし、傾斜を8°として、1,2,3に相当する試行を実施し、いずれの場合にもロボットが転倒せず、搭載物が落下しないこと、傾斜路を登れることを確認した。

3.3.3 駆動ユニット走行耐久試験

ロボット全体の耐久性については、別途振動試験を実施して検証しており、走行耐久性については、モータ、減速機、車輪、までの駆動部について対象とした。NEDO のロボット安全性検証手法²⁷⁾を参照し、図8のような試験機を製作し、試験を計画、実施した。



図7 走行安定性試験環境
Fig. 7 Running stability test

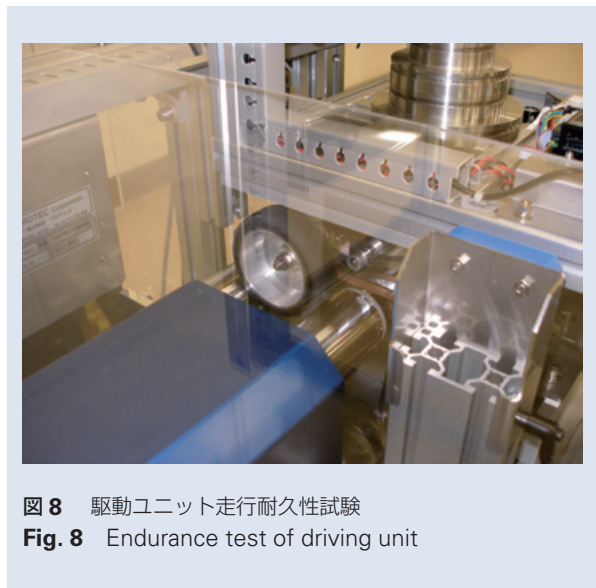


図8 駆動ユニット走行耐久性試験
Fig. 8 Endurance test of driving unit

表4 走行安定性試験条件

Table 4 Parameter of running stability test

試験 No.	傾斜	車輪初期角速度 rad/s		試験角速度 rad/s	
		ω_L	ω_R	ω_L	ω_R
1a	-5°	5.6	5.6	0	5.6
1b	-5°	5.6	5.6	5.6	0
2	-5°	5.6	5.6	0	0
3	5°	0	0	16.7	16.7
4a	0°	16.7	16.7	16.7	13.2
4b	0°	16.7	16.7	13.2	16.7

試験路面は、無限長の平坦な路面をドラムで模擬し、ドラムにパウダーブレーキを組み込み、負荷を与えられる構成としている。

ロボットの運用状況を想定し、速度指令値、車輪にかかる負荷を表5に示す試験サイクルにて繰り返した。負荷トルクは、ロボットが地面で走行するために必要なトルクと、ドラム上で回転するために必要なトルクとの差を与える。レンタル期間3年（想定使用頻度を基に1014時間と算出）のうち1回の保守部品交換で済む、つまり507時間以上走行可能であることを判定条件とした。

結果は、約588時間の連続動作となり、判定基準を満たした。なお、停止の原因は、駆動車輪のゴムが削れ、その粉が駆動ユニットの各部に溜り、ベアリングにも多数付着したため走行抵抗が増大したためである。これまでの病院での実証実験において、長時間稼働時にも、粉が発生、付着するような状況は発生しておらず、本試験では閉ざされた空間で、移動せず連続稼働する耐久試験特有の、つまり想定より過酷な条件に起因する問題と考えられる。結果より、保守は少なくとも1.5年に1回となり、受容可能な頻度であることが示された。

表5 走行耐久試験パターン

Table 5 Cycle of running endurance test

	速度指令値	負荷トルク	時間
加速	3 [km/h]	0.49 [N・m]	1 秒
定速	3 [km/h]	0.049 [N・m]	5 分 58 秒
減速	0 [km/h]	0.49 [N・m]	1 秒
停止	0 [km/h]	0.49 [N・m]	2 秒

表6 障害物検知実験条件

Table 6 Parameter of detecting obstacle test

試験 No.	初速	判定基準
1	3 ± 0.15 km/h	⑤で減速し、④で回避
2	1 ± 0.15 km/h	③で回避（④を無効化）
3	1 ± 0.15 km/h	②で回避（④を無効化）
4	1 ± 0.15 km/h	①で停止（②③④を無効化）

3.3.4 障害物検知実験

NEDOのロボット安全性検証手法²⁷⁾、マニピュレータを備えない静的安定移動作業型ロボットの規格²⁸⁾を参照し、図6に示した障害物検知領域のそれぞれの領域に対して、減速、回避を確認する試験を実施した。走行路面はコンクリート、静止障害物として直径60 mmの白い円柱を使用した。試験条件を表6に示す。障害物検知試験の状況の一例を図9に示す。静止障害物に対して、ロボットを正面から接近させその挙動を観測し、問題ないことを確認した。

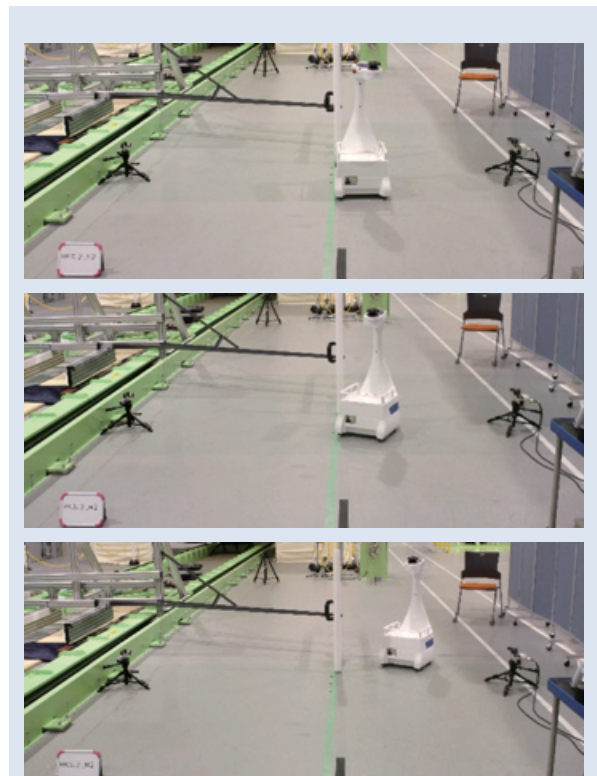


図9 障害物検知実験の一例

Fig. 9 Example of obstacle detecting test

3.3.5 複合環境試験

産業用機械の環境試験の規格²⁹⁾を参照し、生活支援ロボット安全検証センターにて試験を行った。ロボットの使用温度、使用湿度に基づき、ロボットを停止状態で表7の試験条件に曝露し、完了後に安全機能(転落検知等)、基本機能(グリップによるロボット操作等)の動作確認を行い、問題ないことを確認した。複合環境試験の様子を図10に示す。

3.4 マニュアル, ラベル

ISO13482はマニュアル類も審査の対象になる。本ロボットの導入主体は病院等の施設を想定していることから施設向けのロボット管理マニュアル、ロボット製造のための組立マニュアル、今後のメンテナンスを踏まえたメンテナンスマニュアル等を作成し、認証の審査を受けた。また、ラベルも対象になっており、RAでリスク低減後、ALARP領域の項目に関して、ロボットにラベルを貼付した。視覚障がい者の場合は病院のスタッフからの注意喚起を行う。

3.5 設計管理体制, 製造管理体制

ISO13482は、安全に関する規格であり、その認証にあたっては、設計管理体制、製造管理体制に対しても評価がある。

社内のISO9001取得部署の体制を基盤に管理体制を整備した。

設計管理体制に関しては、記録の管理、購買プロセス、力量等の要求事項に関して、通則、手順等を文書化した。

製造管理体制に関しては、記録の管理、不具合製品の管理等に関して、同様に通則、手順および受入検査、組立検査、出荷検査の各検査に関する検査書の文書化を行なった。

3.6 認証取得

2017年3月13日にJQA(日本品質保証機構)より認証書の授与を受けた(図11)。11例目のISO13482認証であり、ヒューマンインタフェースを有する誘導型のロボットとしては世界初の認証となった。

表7 複合環境試験条件

Table 7 Parameter of compound environmental test

	温度	湿度	試験時間
高温高湿(定常)試験	33℃±2℃	70%±3%	16h
低温(耐寒性)試験	5℃±2℃	設定なし	16h



図10 複合環境試験

Fig. 10 Compound environmental test



図11 認証書授与式

Fig. 11 ISO 13482 Certified

4. 仕組みづくり

4.1 レンタル，リース，保険体制

安全が担保されても，導入実績のない，あるいは少ないロボットを導入することは抵抗感が強い。販売体制を模索する中で，病院の場合にはリース，レンタルという形態であれば設備費用ではなく経費で処理できることもあり馴染みやすい。また，リースは設定した貸借期間中は，原則的には中途解約ができずハードルが高いが，レンタルであれば原則いつでも解約可能であることから導入のハードルが低いことが実感としてわかってきた。

リース品の初期導入期には，レンタルという形態で，保守メンテ等の実態を把握しながら，その後にリースとするケースが多いため，本ロボットに適した形態であると考え，リース会社と協議し，**図 12**のような体制を構築した。

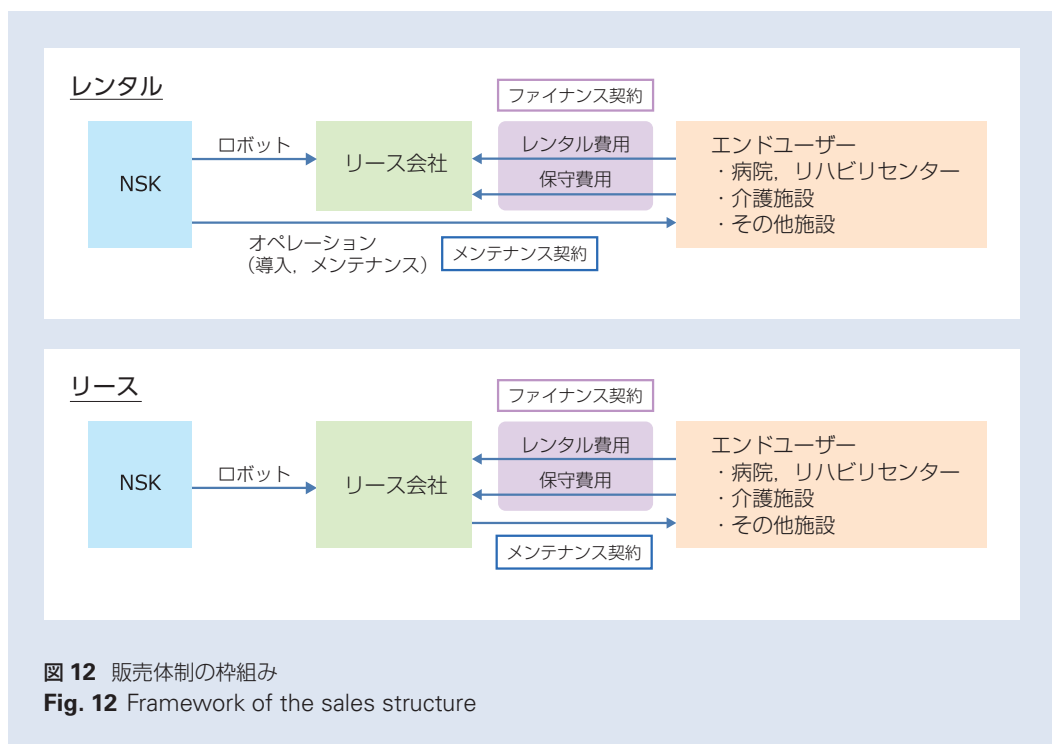
ロボットの保険については，これまでに旧ロボットビジネス推進協議会のワーキンググループ等でも保険会社やメーカーとの議論がなされており，我々も保険会社との協議により，生産物賠償責任保険，動産保険についてはメーカーとリース会社が加入し，施設所有者賠償責任保険，個人賠償責任保険については施設管理者が既存の施設への保険の追加として加入可能であることとなった。

4.2 メンテナンス保守

耐久試験などで，事前に交換タイミングを把握できている部品もあるが，実環境で想定外の症状が発生する可能性もある。したがって，当面は導入施設数を制限して，直接保守対応することとし，メンテナンスの経験を社内に蓄積した後に，メンテナンス会社へ委託する方針としている。

4.3 導入補助金

安全規格要求を満たすために，安全認証を取得したセンサや，故障率の低い部品を使う必要があるため，ロボット自体の製造コストを下げることは限界がある。しかし，価格が高ければロボットの有用性を認めながらも病院側では導入ができない。したがって，施設側が受けることのできる補助金について調査，検討した。介護ロボットについては，導入補助金制度は整備されつつあり，国立研究開発法人日本医療研究開発機構（以下，AMED）が実施しているものがあるが，定められた種類のロボットのみが対象であり，介護，福祉分野へのロボット技術の広い普及には効力が及んでいない。官公庁，財団法人等での条件に合致し，適用できる補助金制度は存在せず，申請したが全国的に適用できるものはまだ実現していない。唯一，神奈川県内限定で，導入補助金が適用になった。ロボットのような新しい物，文化を普及させるためには，公的な後押しは重要であると考え，この流れが全国に広がれば幸いである。



5. まとめ

施設内で視覚障がい者や高齢者を案内、誘導するロボットを実用化し、社会実装するため、ISO13482安全認証を取得、仕組みづくりを行った取り組みについて報告した。現時点で販売実績はないが、ISO13482 認証に基づき社内の開発品出荷プロセスを実施し出荷したロボットを、開発パートナーである神奈川県総合リハビリテーションセンターに2017年3月導入した。導入後、障害物接近時にロボットを強制停止させる機能が、停止の度に再起動を必要とするため使いづらい、受付から診療科まで案内した後、自走で受付まで戻る機能が欲しいなどのコメントが挙がっている。自走機能については、安全認証の対象外となっているが、導入施設にとって、自走機能の実現は投資対効果を高めることになるので、今後の検討課題としたい。

謝辞

本開発は、厚生労働省の平成27年度、28年度「障害者自立支援機器等開発促進事業」の支援を頂いた。また、神奈川県産業振興課の「さがみロボット産業特区」の重点プロジェクトとして支援頂いた。そして、一連の実証実験、助言等、神奈川県総合リハビリテーションセンターの開発協力により実用化に至ることができたことを併せて付記し深く謝意を表す。

最後に、14年にわたりガイダンスロボットをともに開発した現静岡理科大学 飛田和輝准教授に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 厚生労働省, “平成23年生活のしづらさなどに関する調査(全国在宅障害児・者等実態調査)”, (2013).
- 2) World Health Organization, “Visual impairment and blindness”, October, (2017).
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs282/en/>
- 3) “平成18年身体障害児・者実態調査結果”, 厚生労働省, (2006).
- 4) 国立身体障害者リハビリテーションセンター, リハビリテーションマニュアル13, 「視覚障害者誘導用ブロック」, (2003).
- 5) S.Tachi, and K.Komoriya: “Guide Dog Robot” Robotics Research: The Second International Symposium 1984, The MIT Press, pp.333-340, (1985).
- 6) 森, 松本, 小林, 基常: “歩行ガイドロボット実用化のための研究開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.8, pp.26-29, (2001).
- 7) Iwan Ulrich and Johann Borenstein, “The GuideCane – Applying Mobile Robot Technologies to Assist the Visually Impaired”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, Vol. 31, No. 2, (2001).
- 8) Aditi Kulkarni, Allan Wang, Lynn Urbina, Aaron Steinfeld, Bernardine Dias, “Robotic Assistance in Indoor Navigation for People Who are Blind”, 11th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), (2016).
- 9) 飛田, 小川, 嵯峨山: “盲導犬の代用を目指すロボット開発”, NSK Technical Journal, No.686, (2013).
- 10) 飛田, 嵯峨山: “視覚障がい者向けガイダンスロボットの取り組み”, 日本ロボット工業会機関誌, No.217, (2014).
- 11) 飛田, 嵯峨山: “視覚障がい者向けガイダンスロボットの検証実験”, 日本ロボット学会誌, Vol.33, No.8, (2015).
- 12) Kazuteru Tobita, Katsuyuki Sagayama and Hironori Ogawa, “Examination of a guidance robot for visually impaired people”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 29, No.4, pp. (2017).
- 13) 村田, 加藤, 飛田 et al: “視覚障害者向けガイダンスロボットの実用化に向けた取り組み～神奈川県さがみロボット産業特区での取り組み～”, 第31回リハ工学カンファレンス in 高知, (2016)
- 14) Kazuteru Tobita, Katsuyuki Sagayama, Mayuko Mori, and Ayako Tabuchi, “Structure and Examination of the Guidance Robot LIGHBOT for Visually Impaired and Elderly People”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 30, No.1, (2018).
- 15) JQA 認証取得者リスト
https://www.jqa.jp/service_list/fs/action/clientele/
- 16) 多摩総合医療センター 患者統計
http://www.fuchuhp.fuchu.tokyo.jp/about/data/stats_patient/
- 17) 順天堂大学医学部附属浦安病院 臨床指標と実績
http://www.hospurayasu.juntendo.ac.jp/about_hospital/qi.html
- 18) 自治医科大学附属病院 アニュアルレポート
<http://www.jichi.ac.jp/hospital/top/outline/report.html>
- 19) 産業医科大学病院 診療実績
<http://www.uoeh-.ac.jp/hospital/hpgaiyo/sinryojiseki.html>
- 20) 横浜市立市民病院 診療実績
<http://yokohama-shiminhosp.jp/introduction/data/jisseki.html>
- 21) ISO 13482:2014 Robots and robotic devices – Safety requirements for personal care robots, <https://www.iso.org/standard/53820.html>
- 22) 生活支援ロボット安全情報センター リスクアセスメント, <http://www.rtnet-biz.jp/rtsic/info/sdesign/riskass.html>
- 23) 独立行政法人統計センター 政府の統計窓口 文部科学省, “平成26年度 体力・運動能力調査”, (2014)
- 24) JIS S 0032:2003 「高齢者・障害者配慮設計指針 - 視覚表示物 - 日本語文字の最小可読文字サイズ推定方法」
- 25) 人間生活工学研究センター, 高齢者身体機能データベース 自由歩行時の歩幅, 歩数, 速度, (1998)
URL: <http://www.hql.jp/project/funcdb1993/>
- 26) 電動車いすの規格
JIS T 9203:2010 電動車いす
- 27) 平成21年度～平成25年度成果報告書 生活支援ロボット実用化プロジェクト 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発 4.4.2 動的安定性試験, (2014).
- 28) JIS B 8446-1 第1部: マニピュレータを備えない静的安定移動作業型ロボット
- 29) IEC60950-1: 情報技術機器 - 安全性 2.9.2項 電気絶縁の保障, IEC60068-2-78: 高温高湿(定常)試験方法, IEC60068-2-1: 低温(耐寒性)試験方法

全方向移動型電動車輪の開発

藤岡 紘*, 大石 保徳*



藤岡 紘

Development of Omnidirectional Mobile Electric Wheels

K. Fujioka, Y. Ooishi



大石 保徳

In recent years, many automatic guided vehicles used in factories and logistics sites move and turn by the difference in rotation between two driving wheels. However, considering effective utilization of space, it is desirable to be able to move in all directions. In addition, it is common for such an unmanned conveyance vehicle to automatically travel to a destination while traveling on a previously programmed route. However, in some situations, such as fine-tuning the position or moving to a different location from the programmed route, it may be more efficient to move the dolly manually.

From these demands, we have created and evaluated omnidirectional mobile electric wheels that can be operated electrically and manually.

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 緒言 2. アクティブキャストの構造と運動学 <ol style="list-style-type: none"> 2.1 双輪アクティブキャストの構造 2.2 双輪アクティブキャストの運動学 | <ol style="list-style-type: none"> 3. アクティブキャストの台車への応用 <ol style="list-style-type: none"> 3.1 アクティブキャスト台車の構造 3.2 手動時からの直進性の評価実験 3.3 手動時操作時の軽快性の評価試験 4. 結言 |
|---|---|

1. 緒言

近年、工場や物流現場で用いられている多くの無人搬送台車は、左右に2つの駆動輪が平行に配置され、これらの駆動輪の回転数差で移動、旋回を行うものが多い。また、そのような無人搬送台車は予めプログラムされた経路を走行し、目的地までの搬送を自動で行うのが一般的である。しかし空間の有効活用を考えると、小回りの効く全方向移動が可能な事が望ましい。また位置の微調整や、プログラムされた経路とは別な場所へ移動するといった場面では、手動で台車を移動させたほうが効率的な場合もある。現在一般に市販されている全方向移動台車はオムニホイール、メカナムホイールといった車輪が使用されている。これらの車

輪にはフリーローラがあるため、走行時に振動が起きやすく、段差走破能力も低い。また、これらの車輪は減速機を介してモータと接続されているため、逆作動トルクが大きく台車を手動で動かすのは困難と言われている。

そこでこれらの課題を解消する電動駆動かつ手動操作可能な全方向移動型電動車輪の開発を行っている。全方向移動に関して今回はアクティブキャスト¹⁾を用い実現した。アクティブキャストとは、旋回キャストの車輪駆動軸と操舵軸を電動モータにより能動的に回転させ全方向移動を可能とした車輪である。アクティブキャストの車輪の構造は一般的な旋回キャストと同

* 新領域商品開発センター、技術開発第一部

様であるため、振動は少なく段差走破能力も確保できる。手動操作に関しては駆動源にダイレクトドライブモータ(以下:DDモータ)を採用する事を検討している。DDモータを使用することで、減速機が不要となり逆作動トルクが小さく、手動による軽快な台車の操作が可能となる。

本稿ではアクティブキャストによる全方向移動の有効性を確認することに主眼を置き、DDモータの代わりに減速機付サーボモータを使用した。減速機付サーボモータと、車輪と操舵軸の間に電磁クラッチを設け、動力伝達を切断することで受動旋回キャストとして機能させ、手動による操作を可能とした。全方向移動型電動車輪の試作と評価を行った。

2. アクティブキャストの構造と運動学

2.1 双輪アクティブキャストの構造

本稿では手動操作時の軽快性を考慮し、据え切り力低減のために図1のような双輪タイプのアクティブキャストを製作した。駆動源には2つのサーボモータを準備し、1つは車輪駆動用、もう1つは操舵軸駆動用とした。操舵軸駆動用のモータは操舵軸を回転させる。一方、車輪駆動用のモータの動力は、差動歯車(以

下:デファレンシャルギア)と、ベルトを介して、各々の車輪へ伝達される。デファレンシャルギアは双輪間の回転数の差を吸収するために準備した。また、デファレンシャルギアは双輪共に地面に接していなければ推進力を発揮できないため、各々の車輪にサスペンションを設け、地面との接地を確保する構造とした。そして、各モータ車輪、操舵軸の間には電磁クラッチを配置し、動力伝達の接続/切断を行う。モータが車輪及び操舵軸と接続されている場合、アクティブキャストは能動的に移動する事ができ、切断されている場合は受動的に動かす事ができる。車輪直径は125mm、双輪間距離は56mm、操舵軸と車輪軸間の距離は40mmである。

2.2 双輪アクティブキャストの運動学

図2にアクティブキャストの運動学モデルを示す²⁾。ここで、 V_x, V_y はそれぞれキャストのX, Y軸方向への移動速度、 ω_L, ω_R は車輪角速度、 ω_s は操舵角速度、 r は車輪半径、 s は操舵軸と車輪軸間の距離、 W は双輪間距離、 ϕ は操舵角を表す。また、車輪機構の車輪平均角速度と操舵角速度をそれぞれ ω_w, ω_s とすると、双輪をなす2輪はデファレンシャルギアで接続しているので式(1)の関係となる。

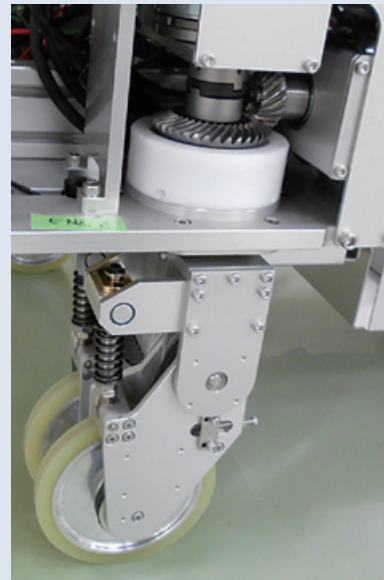
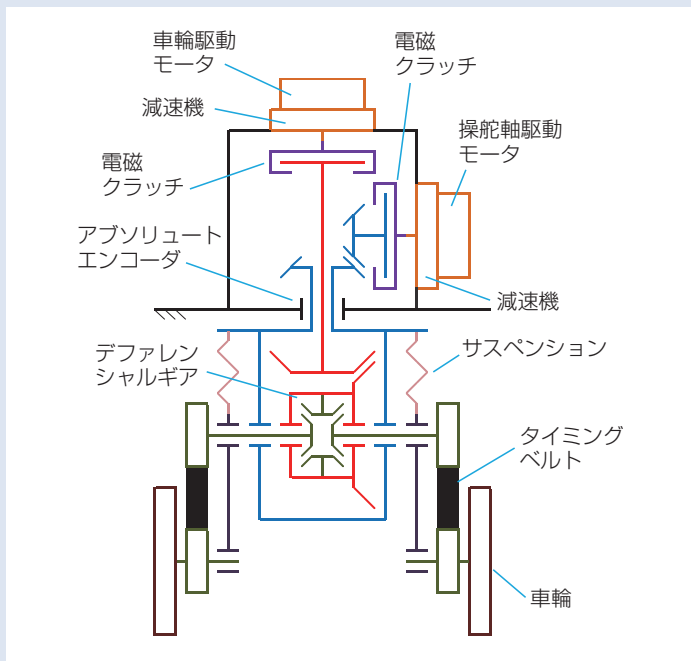


図1 双輪アクティブキャスト
Fig. 1 Double wheel active-caster

$$\omega_w = \frac{\omega_R + \omega_L}{2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\omega_s = \frac{\omega_R - \omega_L}{W}$$

ここでキャストの移動速度と、車輪駆動軸と操舵軸の角速度との関係は式(2)のように得られる。

$$\begin{bmatrix} \omega_w \\ \omega_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \phi}{r} & \frac{\sin \phi}{r} \\ -\frac{\sin \phi}{s} & \frac{\cos \phi}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

制御装置はアブソリュートエンコーダの値を読み込むことで操舵角φを計測し、式(2)に従って各モータへ速度指令値を計算する。

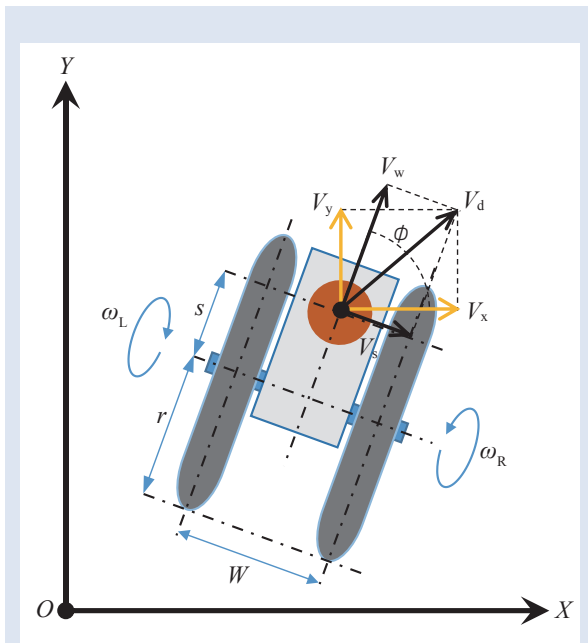


図2 アクティブキャストの運動学
Fig. 2 Active-caster control

図3にアクティブキャストを2台搭載した台車の運動学モデルを示す。台車の後輪の2台がアクティブキャストであり、前輪の2台が受動キャストとなっている。ここで、 W_c はアクティブキャスト間の距離、 L_c はアクティブキャストと台車中心の前後方向の距離、 V_x 、 V_y はそれぞれ台車中心点のX、Y軸方向への移動速度、 ω は台車の旋回角速度、 V_{xR} 、 V_{yR} 、 V_{xL} 、 V_{yL} は左右のアクティブキャストのX、Y軸方向への移動速度をそれぞれ表す。この場合、台車の移動速度および旋回角速度と左右のアクティブキャストの移動速度との関係は式(3)のように表される。

$$\begin{bmatrix} V_{xR} \\ V_{xL} \\ V_{yR} \\ V_{yL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{W_c}{2} \\ 0 & 1 & -L_c \\ 1 & 0 & -\frac{W_c}{2} \\ 0 & 1 & -L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

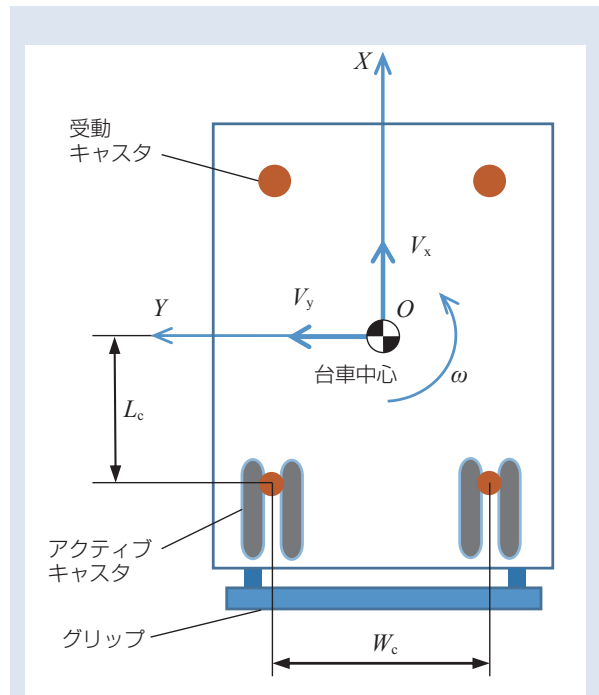


図3 アクティブキャスト台車の運動学
Fig. 3 A cart with two active-casters

3. アクティブキャスタの台車への応用

3.1 アクティブキャスタ台車の構造

今回製作したアクティブキャスタ台車の図を図 4, 5 に示し、諸元を表 1 に示す。

台車の前輪には、双輪タイプの旋回キャスタを使用した。また、台車前方のバッテリーボックスにリチウムイオン電池を搭載し、モータドライバ、制御 PC 等の制御機器は台車後方の制御ラックに搭載した。

図 6 にアクティブキャスタを 2 台搭載した台車の制御システムの構成を示す。制御装置としてタブレット式 PC を用いている。リモートコントローラで外部からの操作が行え、また軌道計画に基づいた自動走行も可能である。PC からは AIO インタフェースを介して、それぞれのモータの速度をアナログ電圧により指令する。指令値の算出には式(2)、(3)が用いられる。その際に各車輪の台車本体に対する相対角度（操舵角 ϕ ）は、アクティブキャスタに備えられたアブソリュートエンコーダの出力を DIO インタフェースを介して計測している。また、クラッチの ON/OFF は PC より行うことができ、自動走行モードと手動操作モードの切り替えも PC を用い行う。さらに、自動走行モードには、全ての方向に移動できる全方向移動モードと、平行 2 輪モードが設定可能なように設計を行った。この平行 2 輪モードは、台車を直進させ、左右のアクティブキャスタの車輪が直進方向に対して平行な角度で操舵軸を電磁ブレーキで固定し、その後は左右の車輪の回転差で台車の操舵を行うモードである。

3.2 手動時からの直進性の評価実験

手動操作モード終了時に不揃いになっている左右のアクティブキャスタの操舵角を、平行 2 輪モード時に前進と共に進行方向に揃える動作において台車の挙動を把握するため、台車の直進性の実験を行った。図 7 のように初期状態で左右のアクティブキャスタの操舵角 ϕ_L 、 ϕ_R を設定し、その状態から台車に前進命令を与え X 軸方向へ約 500 mm 前進させ、その軌道を記録し、Y 軸方向の最大ずれ量 W_D を測定する。

例として 3 条件の結果を表 2 に示す。実施した実験の全条件での Y 軸方向のずれ量 W_D の最大値は③の 17 mm であり、直進距離 500 mm に対し 3.4 % のずれ量であった。今回の実験では内界センサや外界センサを用いての台車の位置制御を行っていないため、位置制御を盛り込むことで、より走行精度の向上が期待できる。よって現在の一般的な AGV の走行精度が ± 50 mm 程度であることから、実用可能であると考えられる。

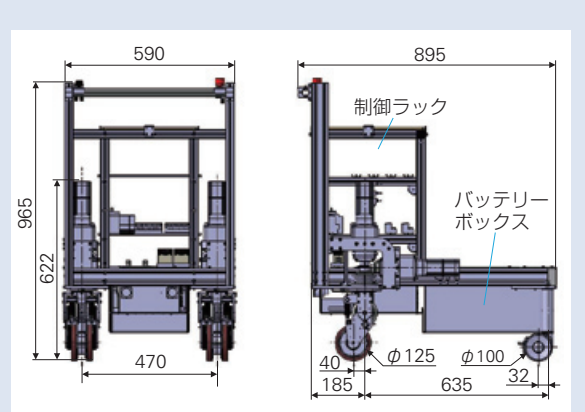


図 4 アクティブキャスタ台車 (CAD 図)
Fig. 4 Active-casters truck (CAD)

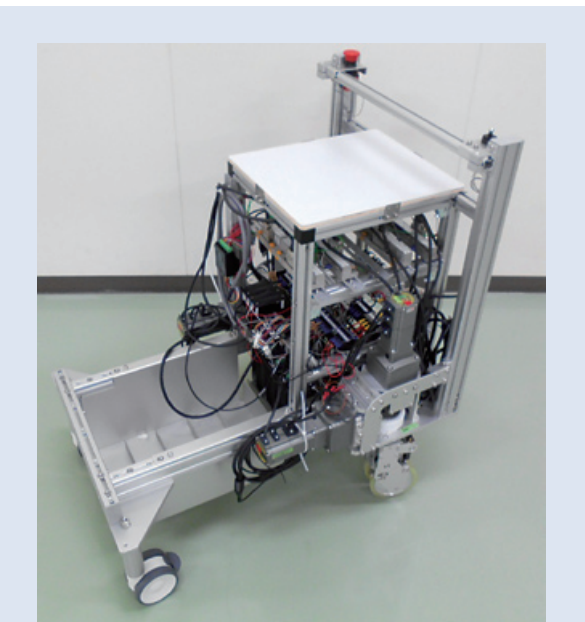


図 5 作製したアクティブキャスタ台車
Fig. 5 Active-casters truck manufactured

表 1 諸元
Table 1 Specification

全長	895 mm
全幅	590 mm
全高	965 mm
重量	82 kg
制御装置	WindowsPC
モータ	AC サーボ（電磁ブレーキ付）
モータ制御方法	速度
モータ制御指令	アナログ電圧

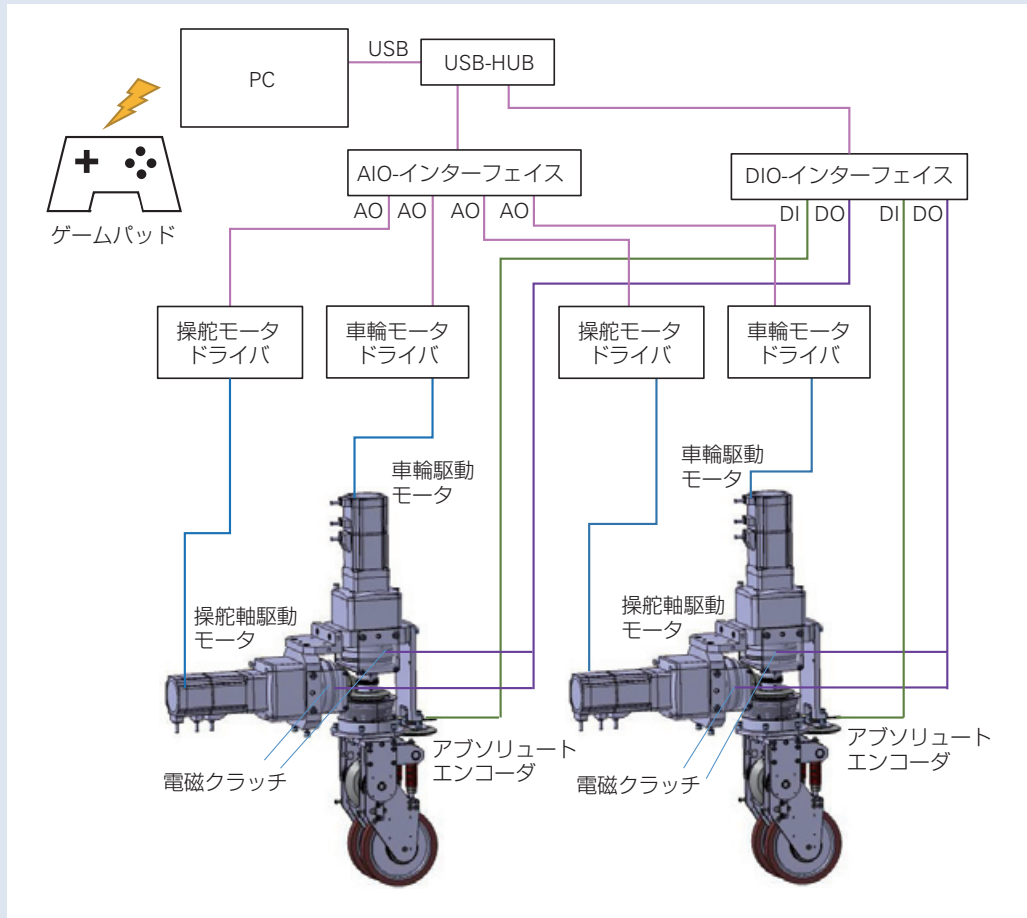


図6 制御システム図
Fig. 6 Control System

表2 実験条件および結果
Table 2 Experimental parameters and results

	初期角度 [°]	車輪配置 (上面より)	記録波形	最大ずれ量 W_D [mm]
①	$\phi_L : 0$ $\phi_R : 90$			0.8
②	$\phi_L : 0$ $\phi_R : 175$			2.1
③	$\phi_L : 0$ $\phi_R : 185$			17.0

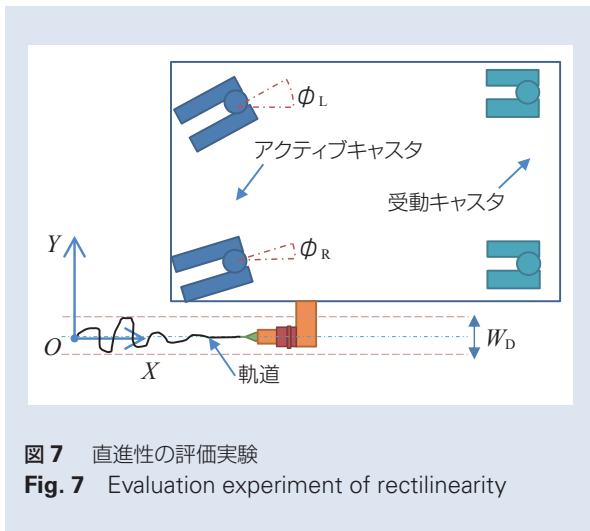


図7 直進性の評価実験
Fig. 7 Evaluation experiment of rectilinearity

3.3 手動操作時の軽快性の評価実験

開発したアクティブキャスタは、図1のように電磁クラッチの配置が減速機の直後となっている。このため手動操作モードでは一般的な受動キャスタと異なり、タイミングベルトやデファレンシャルギア、傘歯車等が負荷となり、台車の軽快性が損なわれる懸念があった。そこでアクティブキャスタ台車の手動操作モードの軽快性を確認するため、台車の牽引試験を行った。また、比較として全て受動キャスタの手動搬送台車を準備し、同様の試験を行った。比較した手動搬送台車の重量、キャスタの諸元およびキャスタの配置はアクティブキャスタ台車と同一とした。実験は前方向、後方向、右方向から等速で牽引し、そのときに必要な最大牽引力を測定した。結果を表3に示す。

表3より、アクティブキャスタ台車と手動搬送台車に必要な牽引力は殆ど相違無いことを確認した。アクティブキャスタ台車の手動操作モードは手動搬送台車と同等の軽快性であると言える。

表3 引っ張り試験結果

Table 3 Tensile experiment result

	手動操作モード	手動搬送台車
前方向	14.6	13.5
後方向	12.9	15.6
右方向	31.1	28.3

単位：N

4. 結言

本稿ではアクティブキャスタを採用し、電動駆動かつ手動操作可能な全方向移動型電動車輪の実現性の確認を行い良好な結果が得られた。能動的な全方向移動に加え、受動的な手動操作が可能になり無人搬送台車としての運用の幅も広がると考えられる。

本稿では電磁クラッチを使用することで手動操作モード時の軽快性を確保したが、今後は図8に示すようなDDモータを使用した試作機により、軽快性の実現及び構造の簡略化を狙う。

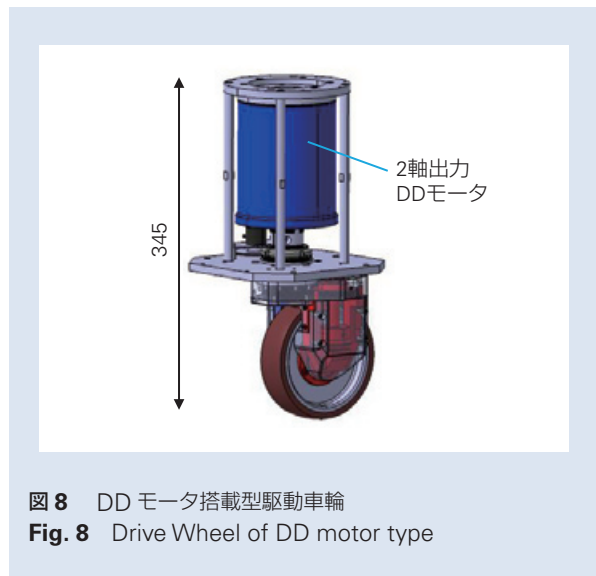


図8 DDモータ搭載型駆動車輪
Fig. 8 Drive Wheel of DD motor type

謝辞

本開発は東京農工大学大学院 工学研究院 先端機械システム部門 和田正義准教授と共同研究により行った。アクティブキャスタの筐体設計や駆動制御の開発に多大なご協力を頂いた和田准教授に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 和田正義, “アクティブキャスターを用いた全方向移動ロボットのモデル化と制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.7, pp1100-1107, 2007
- 2) 和田正義, “双輪アクティブキャスターを用いた全方向移動カートの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018, 2A1-H04, 2018

風力発電機用円筒ころ軸受のはく離 拡大予測手法

千布 剛敏*, 周 康*, 溝口 大木**



千布 剛敏



周 康

Analysis Prediction Technique of Flaking Expansion in Roller Bearings for Wind turbines

T. Chifu, K. Zhou, H. Mizokuchi



溝口 大木

Wind power have been rapidly spread as clean energy. In recent years however, profitability has been emphasized. Therefore, bearings for wind turbines are required to have a lifetime longer than a general flaking lifetime. In order to realize it, NSK is conducting research on prediction analysis technology of flaking expansion. This report describes the prediction analysis method well in agreement with the reproduction test.

1. まえがき
2. 風車増速機用軸受
3. 軸受の破損例
4. 再現試験
5. 劣化状態予測解析手法の開発
 - 5.1 劣化状態予測計算の全体フロー
 - 5.2 ころ荷重計算
 - 5.3 FEM によるき裂進展解析
6. 予測結果
7. あとがき

1. まえがき

風力発電は、太陽光発電と同様に発電時に地球温暖化の原因となる温室効果ガスを排出しない。そのため風力発電は、環境にやさしい再生可能エネルギーの象徴として世界的に導入が進み、今後も拡大が見込まれている(図 1)。風力発電機(以下、風車と略す。)の導入が拡大するとともに、効率的な O&M (Operation and Maintenance) が求められ、CMS (Condition Monitoring System) を用いた状態基準保全 (Condition Based Maintenance, CBM) が一

般的となっている。現状、これは突発事故の抑制などに効果を上げているが、さらに市場ニーズとして残存耐用期間 (Remaining Useful Life, RUL) の予測がある。

RUL 予測には、下記三つの効果が期待されている。

- (1) 部品の限界使用によるコスト削減
- (2) 部品調達期間の確保によるダウンタイム低減
- (3) 複数風車の大型部品を同時交換することによるクレーン費用削減

* コア技術研究開発センター
** 産業機械技術総合センター, CMS 開発部

しかし、経験則ではない技術的な知見、または理論を基にした RUL の予測方法は実用化されていない。

そこで、NSK は風車用軸受を安全に使用できる RUL の提供を目指し、そのために必要不可欠な劣化状態を予測する解析技術の開発を進めている。その開発状況について、以下に述べる。

2. 風車増速機用軸受

風車のドライブトレインは、主軸、増速機および発電機から構成されている(図 2)。中でも増速機は最も多くの軸受が使用されている機器であり、一般に 10 個以上の軸受が使用されている。これは、大きな増速比を持つために多数のギヤを有し、このギヤ軸を支えるために軸受が使用されるためである¹⁾。軸受の種類としては、高ラジアル荷重を負荷できる円筒ころ軸受が最も多く使用されている。そのため本報告では円筒ころ軸受を対象に、劣化状態を予測する解析技術の開発状況を説明する。



図 1 風車の写真
Fig. 1 Wind turbines

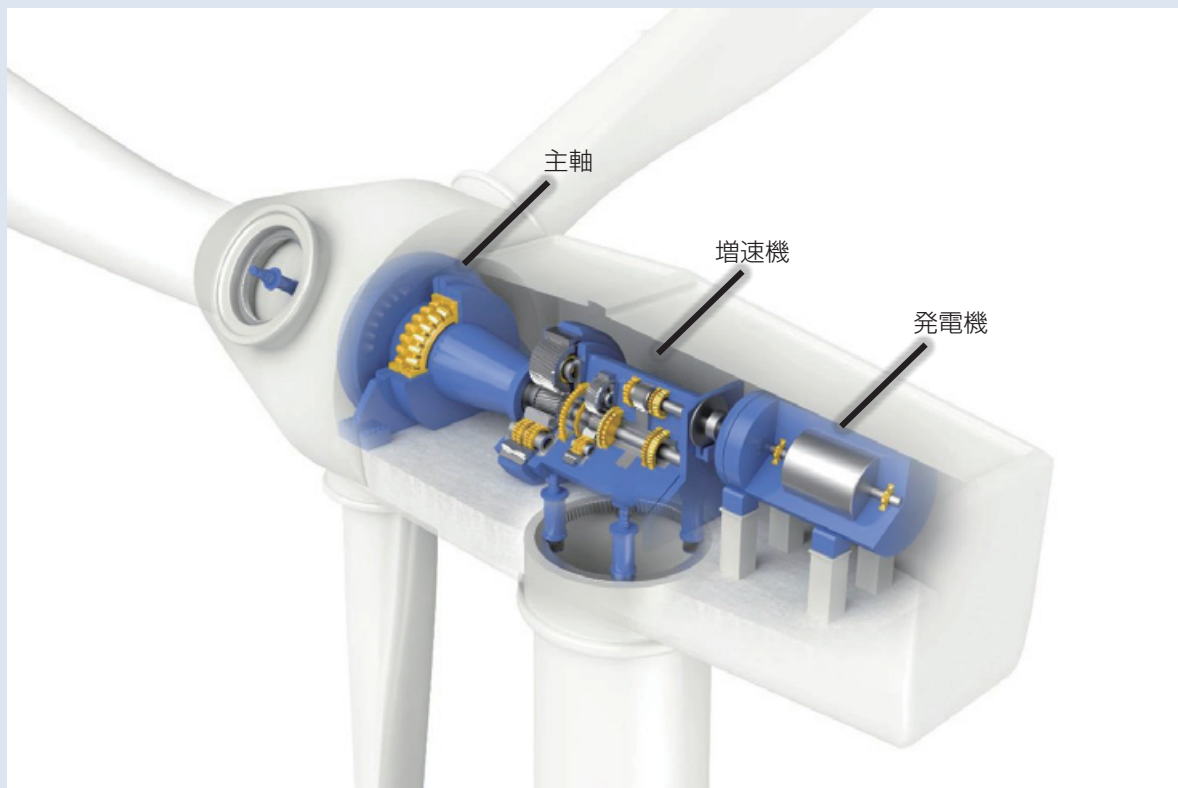


図 2 風車のドライブトレイン
Fig. 2 Drive-train of wind turbines

3. 軸受の破損例

風車増速機用円筒ころ軸受の破損例を図3に示す。いずれの内輪にも軌道面にはく離が発生しており、そのはく離が大きく拡大し、交換されたものである。一般的な機械で 사용되는軸受は使用者が異音、または大きな振動などの異常を感じて、交換している場合が多く、そのはく離の大きさは、図3よりも遥かに小さい。

風車は大形設備であり、工事準備や部品調達に期間を要する。そのため、異常が確認された後も発電量を制限するなどの対策を取って、交換部品が調達できるまでの期間、運転が続けられることもある。そのため、図3のように大きなはく離に至った状態で発見されることがある。もし、交換時期が遅れ、はく離の拡大がさらに進んだ場合、大量のはく離片がギヤに噛み込んだり、内輪が割れたり、最悪、機械が止まるような致命的な損傷を与える危険性がある。

このような事態を避けるために、NSKは、この風車用軸受に対し、微小はく離発生後にあともう少し安心して使えるように、劣化状態を予測する解析技術の開発を進めている。

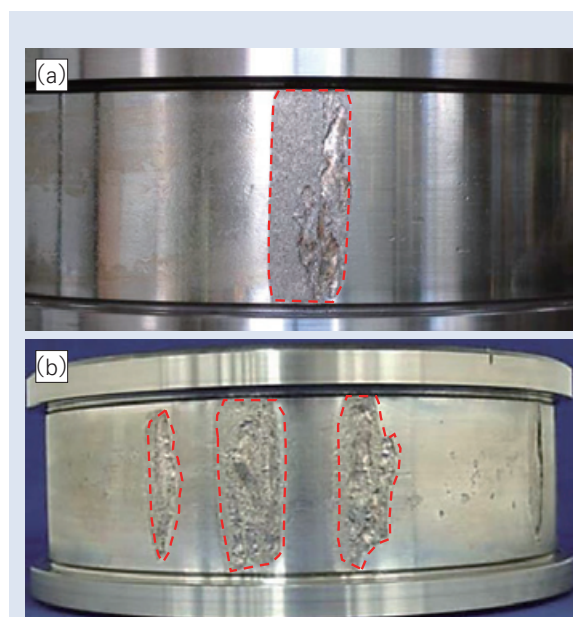


図3 風車増速機用円筒ころ軸受の破損例
(a) 内輪に単独で発生した大きなはく離
(b) 内輪に複数で発生した大きなはく離

Fig. 3 Examples of flaking in roller bearings for wind turbines
(a) Big flaking on bearing inner ring raceway
(b) Big flakings on bearing inner ring raceway

4. 再現試験

劣化状態を予測できるようにするために、劣化進行のメカニズム解明を行うべく、再現試験を実施した。試験期間を短縮するため、予め図4に示したように、内輪に人工欠陥を設けた。次に社内耐久試験機により、予備試験を行い、初期はく離を発生させた(図5 (b))。この初期はく離状態を開始点として、耐久試験を開始した。図5 (c) に到達したところで、図3の交換品と酷似した大きさや形状となり、再現することができた。その後も耐久試験を継続したところ、図5 (d)までは時間に比例してはく離が拡大した。しかし、そこからわずかな時間で、急激にはく離が拡大したため(図5 (e))、試験を終了させた。

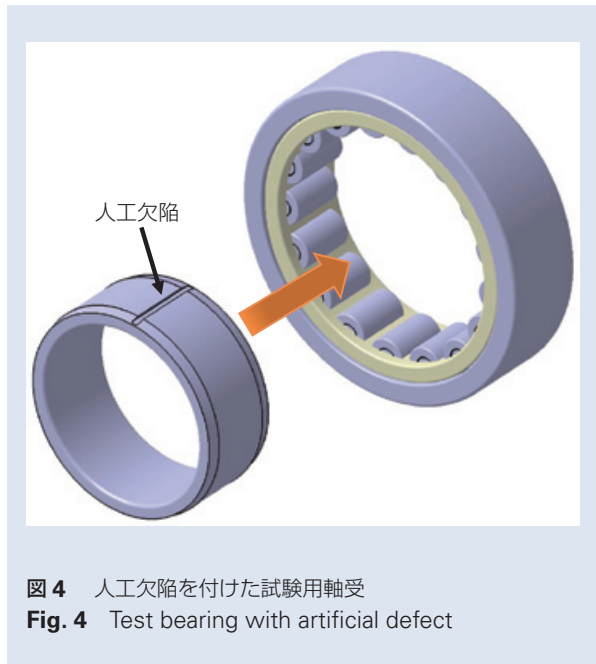


図4 人工欠陥を付けた試験用軸受
Fig. 4 Test bearing with artificial defect



(a)人工欠陥 (a) Artificial defect
(b)初期はく離 (b) Initial flaking
(c)(d)拡大途中 (c)(d) On the way of expansion
(e)急激に拡大 (e) Abrupt expansion

図5 はく離拡大再現試験結果
Fig. 5 Reproduction test result for flaking expansion

5. 劣化状態予測解析手法の開発

5.1 劣化状態予測計算の全体フロー

図6に劣化状態予測のための計算フローを示す。はく離発生後、そのはく離形状を入力として、ころ荷重を計算する。次にFEMによるき裂進展解析により次の形状を予測する。この計算工程を安全に使用できるクライテリアまで繰り返す。クライテリア到達までの時間が、メンテナンス時期までの時間として出力される。

以下に各計算の詳細について述べる。

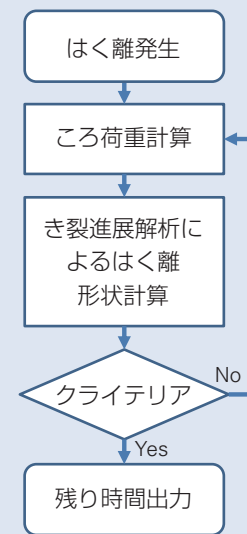


図6 劣化状態予測計算フロー

Fig. 6 Calculation flow of roller bearing deteriorated state

5.2 ころ荷重計算

一般的に軸受寿命は微小はく離発生までを想定している。そのため、図7 (a)に示したように軸荷重から、各ころが受ける荷重を計算している。

しかし、はく離発生後は、この考え方では不十分である。その理由は、はく離発生箇所をころが通過するとき、はく離によりころと内外輪との間にすきまが生じ、荷重を受けることが出来ないからである。図7 (b)にはく離発生後の、ころ荷重計算結果を示す。はく離発生箇所を通過するころが荷重を受けていな

いことが確認できる。また、軸荷重を受けるころ数が減るため、図7 (a)のはく離が発生していない状態よりも、最大荷重が大きくなるのがわかる。さらには、回転に伴い、はく離ところとの位置関係も変化する。その結果、ころ荷重は、はく離の拡大に伴って時々刻々と変化しているのがわかる。

以上のことから、これらの現象を考慮し、各ころの荷重を計算することが、劣化状態の予測には重要である。

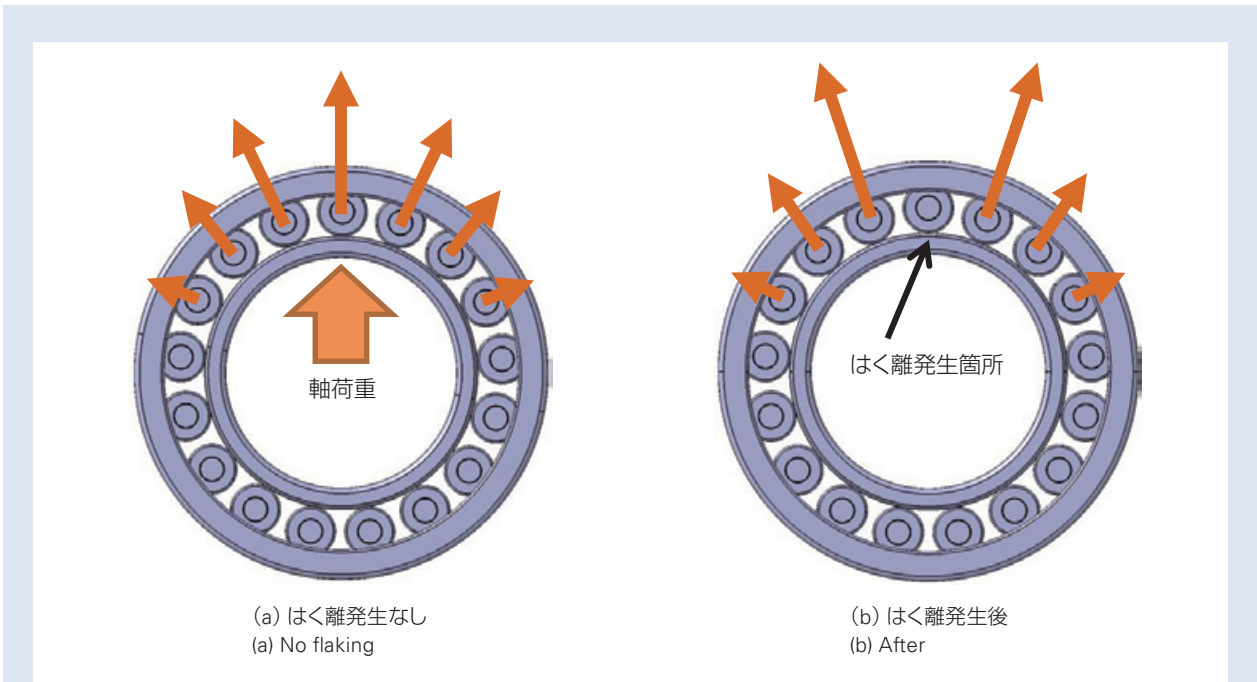


図7 ころ荷重計算例
Fig. 7 Examples of bearing roller load calculation

5.3 FEM によるき裂進展解析

初期の微小はく離からのはく離拡大は、繰返し疲労によるき裂進展によって起こっている。そこで、**図 8**のように FEM による破壊力学に基づいたき裂進展解析を行い、徐々に拡大するはく離サイズを予測するこ

とにした。はく離の深さは一定とし、可能な限りシンプルな形状モデルとした。また、この解析で使用したころの入力荷重は、節 5.2 で詳細に計算した時々刻々と変化する結果を使用している。

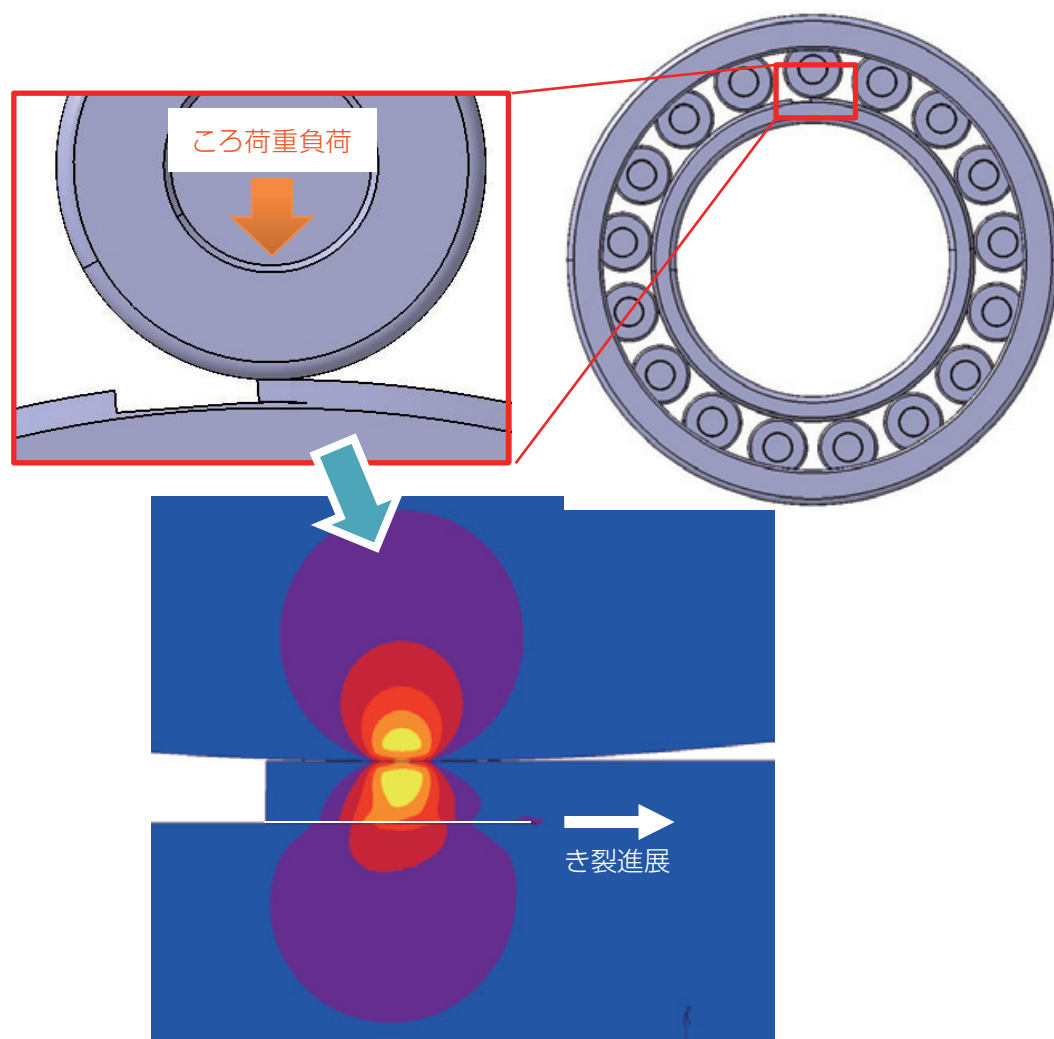


図 8 FEM によるき裂進展解析例

Fig. 8 Example of crack propagation in finite element analysis

6. 予測結果

図9に試験結果と計算によるはく離の予測結果を示す。縦軸にはく離サイズ(周方向のはく離長さ)を、横軸に経過時間を示す。計算での予測結果の方が若干速いものの、精度よく予測することができた。また、再現試験で発生した急激にはく離が拡大する現象を再現できた事がわかる。

この急激なはく離拡大のメカニズムを調査するため、急激にはく離が拡大したときのころ荷重を確認した(図10)。図10から見てわかるように、はく離が拡大し、ころが二つ同時に荷重を受けられない状態であることが確認できる。その結果、図7(b)のときよりも、さらに荷重を受けられるころ数が減少し、1つ当たりが受け持つ荷重が非常に大きく増加していることがわかる。この荷重の大きな変化が、急激なはく離拡大を起こした主要因と考えられる。

また、現時点ではこの急激なはく離拡大の開始点である、ころ二つ分のはく離サイズが、安全に運転できるクライテリアの一つと考えている。一方で、はく離片の量、振動、音なども風車を安全かつ事前に停止させる有効なパラメータである。そのため、今後は実績を積みながら、複数の要因からクライテリアを決めて行く必要があると考えている。

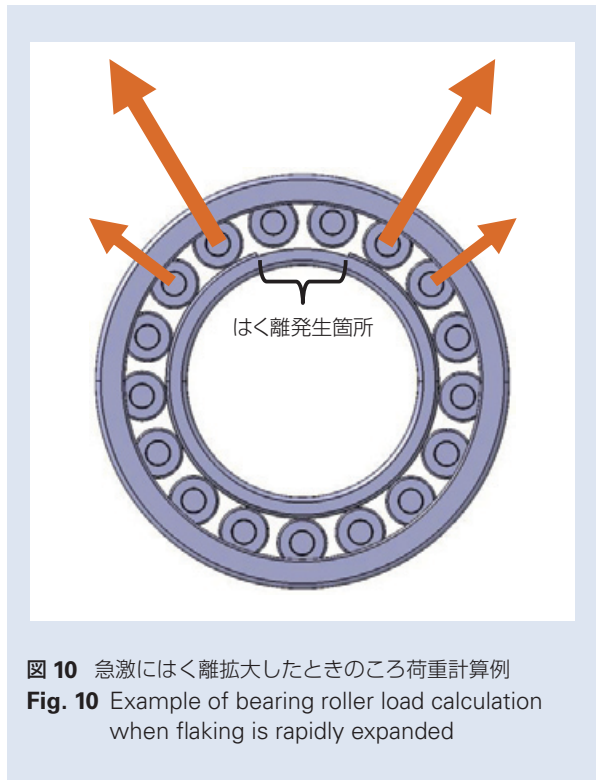


図10 急激にはく離拡大したときのころ荷重計算例
 Fig. 10 Example of bearing roller load calculation when flaking is rapidly expanded

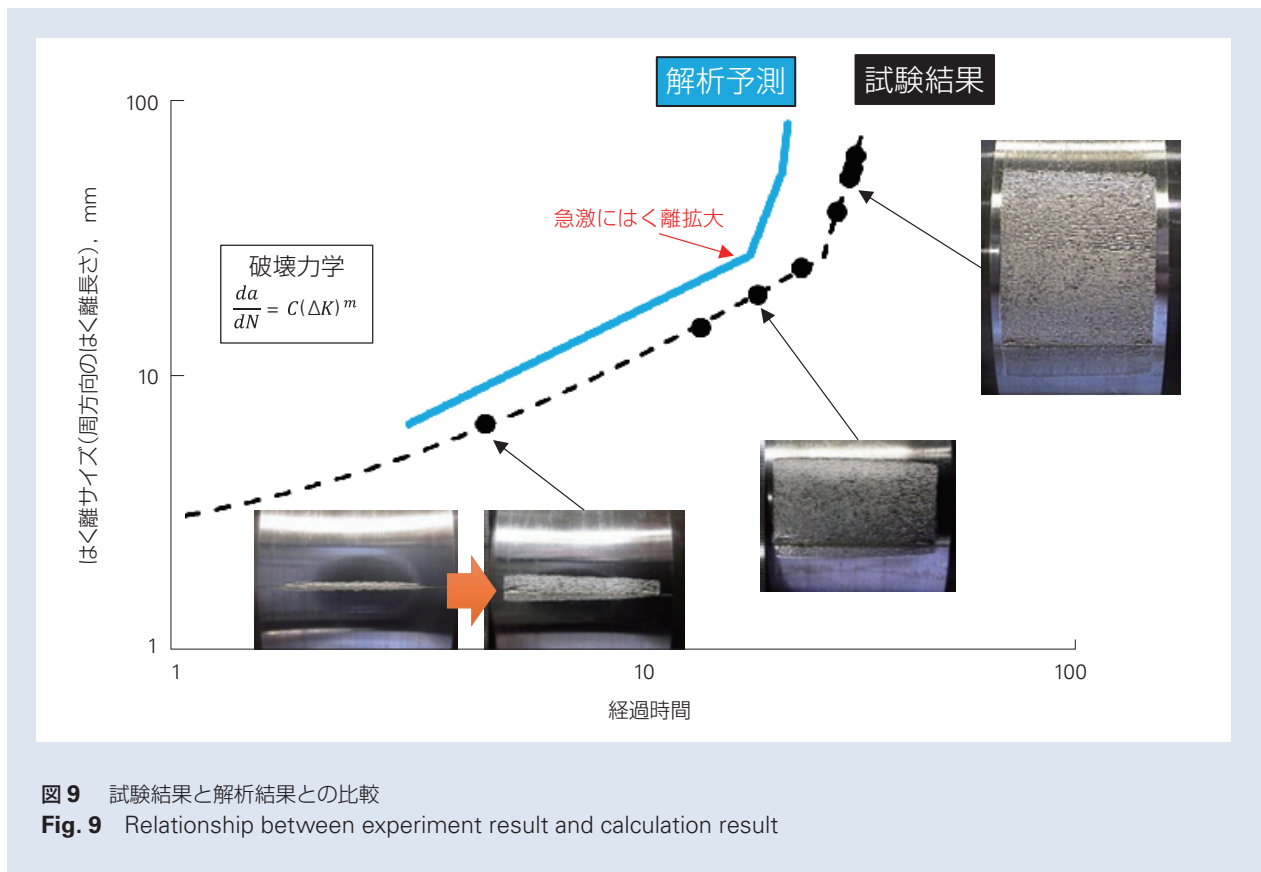


図9 試験結果と解析結果との比較
 Fig. 9 Relationship between experiment result and calculation result

7. あとがき

NSKは風車の普及・発展に向けて、軸受を長く、かつ、安全に使える期間を提供することで貢献したい。そのためには、今回紹介した劣化状態の予測解析に対し、多くの実績を積みながら継続的に開発・発展させていくことが肝要である。

参考文献

- 1) 鈴木 拓, 福永正史, “風力発電機の大型化と軸受の動向”, NSK Technical Journal, No687, (2015年) 23 - 27.

商 品

紹 介

高効率モータ用低トルク軸受

Low-Torque Ball Bearings for High-Efficiency Motors

地球環境保護意識の高まりに伴い、CO₂削減、消費電力の削減が世界的な動きとなっている。モータの消費電力量は、世の中の消費電力量の40%以上を占めるといわれている。モータの消費電力量を減少させることは、省エネへの効果が大きく、その取組みに注目が集まっている。これに伴い、各国では、省エネモータに対する、新たな効率規制が施行されている。各モータメーカーでは、数%の効率向上の為、様々な取組みにより、損失低減を行っている。軸受による損失（モータ機械損失）は、効率値に換算すると1%以下と少ないものの、モータとして数%の効率向上の一つとして、期待をされている。

NSKは、軸受仕様の最適化により、モータ効率向上に係わる損失の低減を実現する軸受を開発した。**(写真1)**

本製品は、省エネルギー化のため高効率モータの採用拡大に対応し、ポンプ、圧縮機などに使用される一般産業機械モータ用として、最適な性能を有している。

1. 構成、構造、および仕様

グリースの種類、量を最適化する事により、軸受グリース（潤滑剤）のせん断・攪拌抵抗を低減し、低トルクを実現すると共に、長寿命化を実現した。また、プラスチック製保持器を採用する事により、更に、低トルク、長寿命化を実現する事も可能となる。

2. 特長

- (1) モータ機械損失の低減と耐久性の向上
従来仕様軸受に対し、モータ機械損失を最大60%低減（プラスチック保持器では、最大80%低減）すると共に、寿命を約2.7倍とすることを可能にした。**(図1, 図2)**
- (2) モータサイズによる機械損失
最適化した軸受仕様は、特に大型サイズのモータで高い効果を示している。**(図3)**

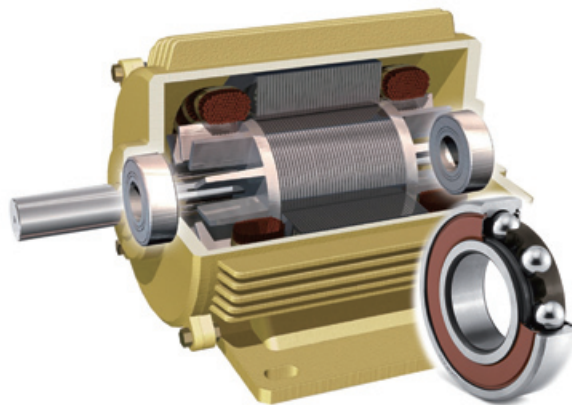


写真1 高効率モータ用低トルク軸受
Photo 1 Low-Torque Ball Bearings for High-Efficiency Motors

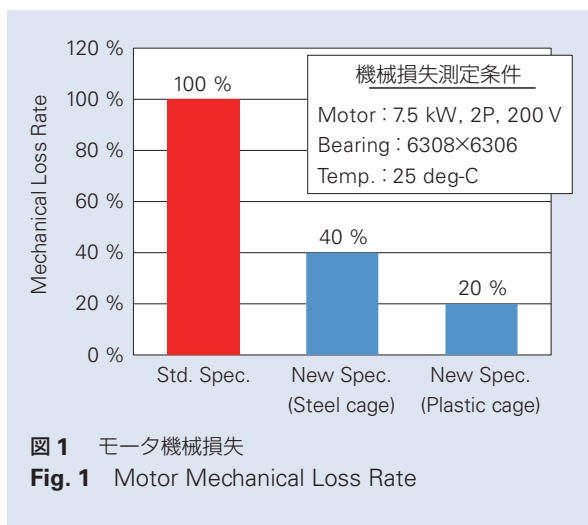


図1 モータ機械損失
Fig. 1 Motor Mechanical Loss Rate

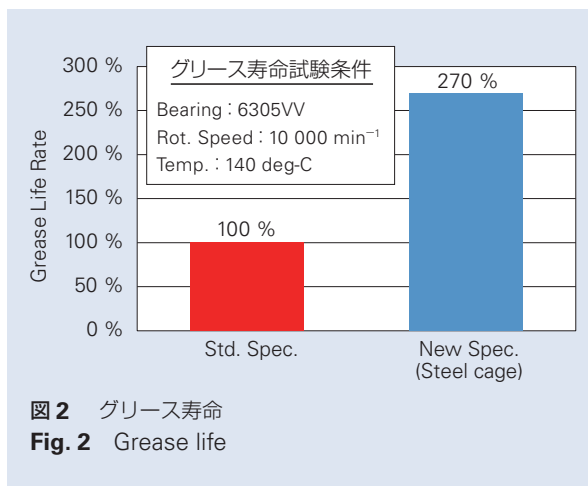


図2 グリース寿命
Fig. 2 Grease life

3. 用途

本製品は、比較的軽荷重用用途である高効率モータや一般産業用モータに適する。

4. まとめ

各種モータサイズ(5.5 kW ~ 132 kW)に対応した表1の軸受をラインナップし、モータの省エネルギー化に貢献します。

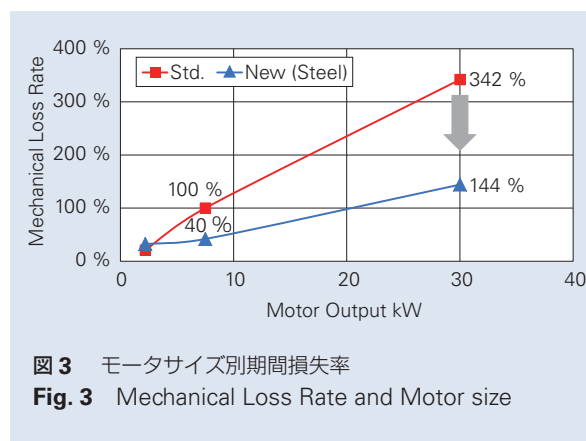


図3 モータサイズ別期間損失率
Fig. 3 Mechanical Loss Rate and Motor size

表1 高効率モータ用低トルク軸受のシリーズ展開

Table 1 Series deployment of the Low-Torque Ball Bearings

注記：モータサイズ：5.5 kW ~ 132 kW に対応

	主要寸法 (mm)				主要寸法 (mm)		
	内径	外径	幅		内径	外径	幅
6200	10	26	8	6300	10	35	11
6201	12	32	10	6301	12	37	12
6202	15	35	11	6302	15	42	13
6203	17	40	12	6303	17	47	14
6204	20	47	14	6304	20	52	15
6205	25	52	15	6305	25	62	17
6206	30	62	16	6306	30	72	19
6207	35	72	17	6307	35	80	21
6208	40	80	18	6308	40	90	23
6209	45	85	19	6309	45	100	25
6210	50	90	20	6310	50	110	27
6211	55	100	21	6311	55	120	29
6212	60	110	22	6312	60	130	31
6213	65	120	23	6313	65	140	33
6214	70	125	24	6314	70	150	35
6215	75	130	25	6315	75	160	37
6216	80	140	26	6316	80	170	39

商品

紹介

鉄鋼・連続鋳造機ガイドロール用 長寿命・高機能円筒ころ軸受(自由側用)

Optimized Long-Life Cylindrical Roller Bearings for Continuous Casting Machines

近年、製鉄所では設備の安定稼動による高生産性および保全周期延長によるメンテナンスコスト低減が課題となっている。連続鋳造設備(以下、連続機)は、溶けた鉄から連続的に一定の形の鋼片を製造する設備である。

鋼片の種類はスラブ(板用)、ブルーム(形鋼用)、ビレット(線材用)がある。そのうちスラブ連続機の構造例を図1に示す。連続機は10台～15台のセグメント(複数のロールが配置されたユニット)により、構成されている。

この連続機では、製品の高精度化が可能な高剛性の分割ロール構造が広く採用されている。このガイドロール用軸受については、固定・自由側ともロールのたわみを吸収でき、非分離で取扱い性のよい自動調心ころ軸受が広く採用されている。特に海外では自由側に関し、負荷容量が大きく、軸受の内輪と外輪間の相対移動で熱による軸伸びの吸収が可能なトroidalころ軸受も多く使用されている。軸受の使用条件は、極低速(毎分1～2回転)で基本動定格荷重の30%以上の重荷重が作用するだけでなく、冷却水、水蒸気、スケール、高温にさらされる過酷な環境下にあるため、潤滑状態が悪化して軌道面の摩耗やはくり等の早期損

傷が発生する場合がある。そのため軸受には長寿命・高信頼性が強く求められており、NSKは、この課題に対応する“長寿命・高機能円筒ころ軸受(自由側用、写真1)”を開発したので、以下に概要を紹介する。



写真1 長寿命・高機能円筒ころ軸受(連続機ガイドロール自由側用)

Photo 1 Optimized Long-Life Cylindrical Roller Bearings for Continuous Casting Machines (Free side)

1. 構造、および仕様

本製品は外輪、内輪、転動体(ころ)、止め輪の4つの部品で構成された総ころ形の円筒ころ軸受である。

本開発軸受の構造を図2、軸受名番と主要緒元を表1に示す。円筒ころ形式による内部のすべり接触を抑制するとともに、ころと軌道輪間に最適なクラウニング形状を適用して傾きに対する許容能力を大幅に向上させた。

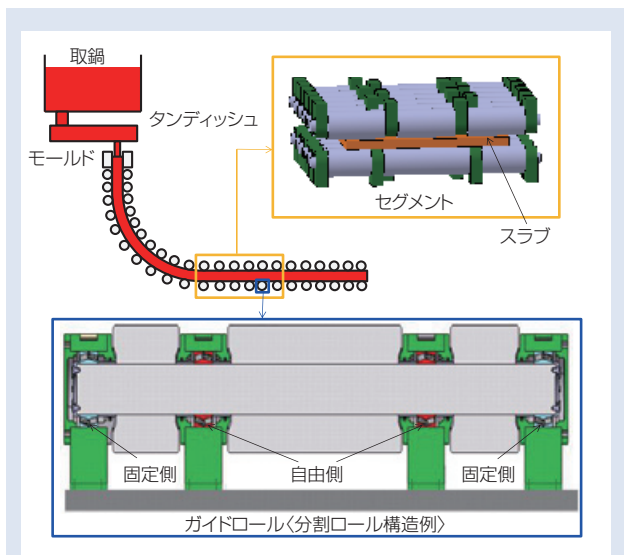


図1 連続鋳造機及びガイドロール構造
Fig. 1 Continuous Casting Machines & Guide Roll Structure

表1 主な仕様

Table 1 Specifications

主要寸法 (mm)			軸受名番	基本定格荷重 (kN)	
内径	外径	幅		動定格荷重 Cr	静定格荷重 Cor
120	180	60	120NUB40V	450	740
130	200	69	130NUB40V	570	950
140	210	69	140NUB40V	560	960
150	225	75	150NUB40V	665	1 160
160	240	80	160NUB40V	765	1 360

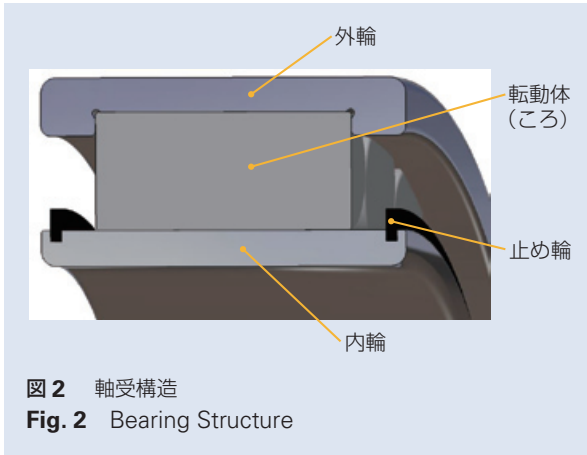


図2 軸受構造
Fig. 2 Bearing Structure

2. 特長

- ・長寿命
総ころ形円筒ころ軸受の最適プロポーショナル設計による負荷容量の最大化。耐久試験において従来軸受と比べ3倍以上の長寿命を確認(図3)。
- ・調心性
連鑄機のロールに発生するたわみを吸収する。傾きの作用に対して軸受内部の面圧分布を均一化(図4)。
- ・ロール伸びの吸収
高温によるロール伸びを内・外輪の相対移動で滑らかに逃がす。
- ・取扱い性の向上
非分離構造により専用工具を必要とせず組付作業性を大幅に向上(図5)

3. 用途

スラブ、ブルーム、ビレット連鑄機ガイドロール(自由側)に適する。

4. まとめ

本開発軸受は、実機スラブ連鑄機においても効果が確認されている。今後、連鑄機の安定稼働による生産性向上に寄与してゆくものと考えられる。

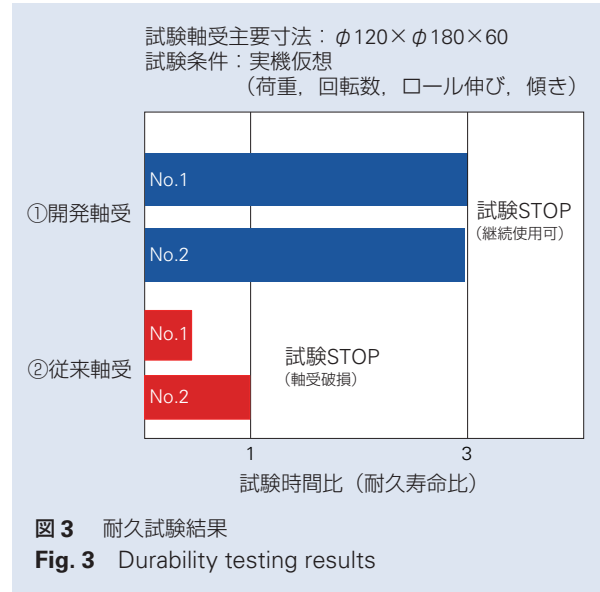


図3 耐久試験結果
Fig. 3 Durability testing results

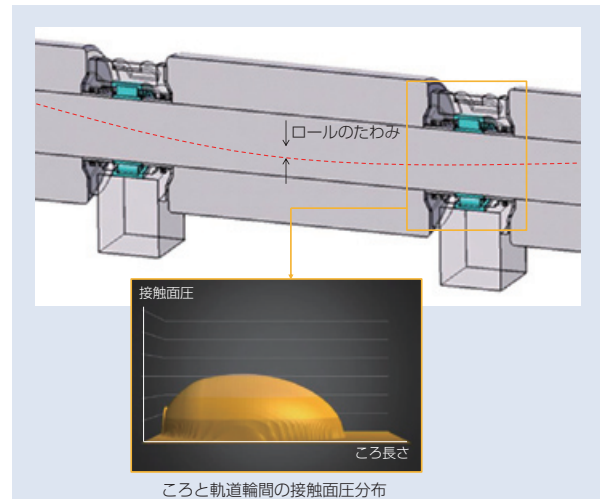


図4 ロールのたわみ及びころと軌道輪間の接触面圧分布
Fig. 4 Roll Bending & Contact Pressure Between Roller and Raceway

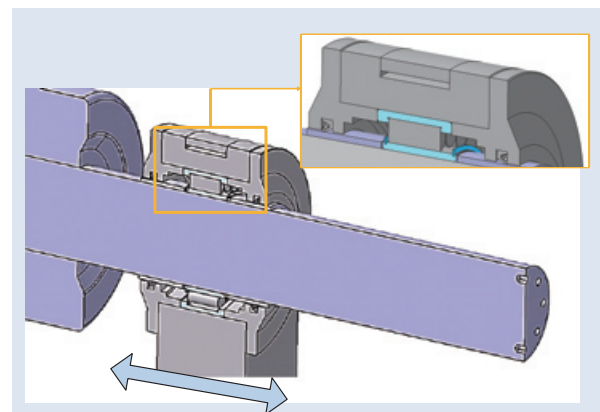


図5 取扱い
Fig. 5 Handling

商品

紹介

製紙機械用内輪割れ防止大形自動調心ころ軸受

Large Size Anti Inner Ring Fracture Spherical Roller Bearings For Paper Machines

近年、製紙メーカーにおいては、印刷用紙、新聞紙の生産が伸び悩む中、需要が見込める板紙、衛生紙の生産設備(抄紙機)の増強や高速・安定稼動による生産性の向上が進められている。衛生紙用抄紙機では大形ヤンキードライヤロール(以下、ヤンキーロール)の増加が見られる。抄紙機ヤンキーロール用軸受の取付け構造例を図1に示す。本構造は内輪内径面にテーパ穴を有する自動調心ころ軸受がスリーブを介してセットされている。軸受内部の残留すきまは、内輪の押し込み量によって調整されるため、内輪には引張り応力(フープ応力)が作用する。またドライヤロールの中空軸の中には高温の媒体(蒸気)が通るため、運転時の軸の膨張に伴い内輪のフープ応力が増大し内輪割れ(写真1)が発生する場合がある。更に高温条件下にあるため長期間の使用による軸受の経年変化から内輪と軸の間で生じるクリープ損傷事例も確認されている。特に内輪割れは、生産ラインの突発停止に繋がる場合があり、軸受での対策が求められていた。

この対策として1994年に開発されたのが、「TL (Tough & Long life) 軸受」である。このTL軸受は、自動調心ころ軸受に独自開発鋼を採用し特殊浸炭処理を施すことにより、内輪割れ強度が高く、更に高温下での寸法安定性も向上させており、対策効果が確認されている。これまでTL軸受の対応サイズを軸受外径寸法φ650mm未満(231系列の場合)としていたが、今回、ヤンキーロール用軸受に対応するため、大形サイズ(最大外径φ1360mm)のTL軸受「内輪割れ防止大形自動調心ころ軸受(写真2)」を開発したので以下に紹介する。

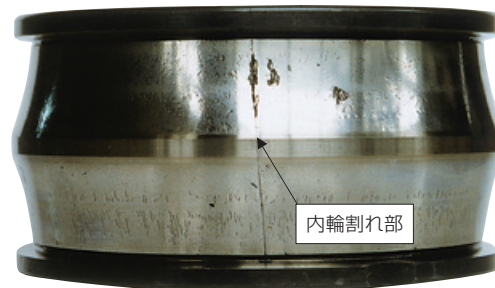


写真1 内輪割れ(自動調心ころ軸受)

Photo 1 Inner Ring Fracture (Spherical Roller Bearings)

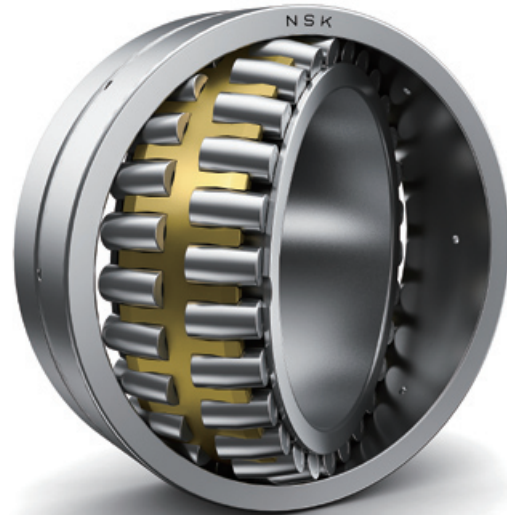


写真2 製紙機械用内輪割れ防止大形自動調心ころ軸受

Photo 2 Large Size Anti Inner Ring Fracture Spherical Roller Bearings for Paper Machines

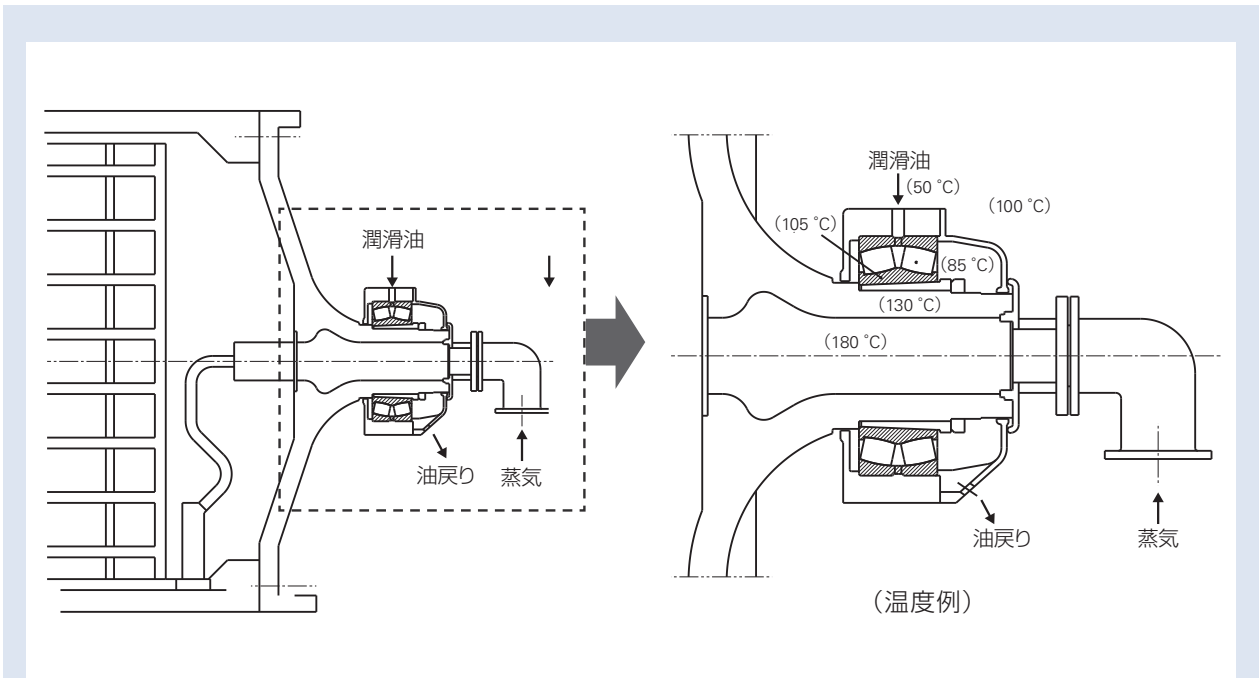


図1 ヤンキードライヤーロールの構造例
Fig. 1 Structure Example of Yankee Dryer Rolls

1. 仕様

本開発製品は自動調心ころ軸受に大形軸受用の独自開発鋼を採用し、特殊浸炭処理を施すことにより、内輪の強度を高め、高温下での寸法安定性を向上させた。

2. 特長

- ・耐内輪割れ
内輪の材料強度向上により内輪割れを防止する。
- ・耐クリープ
高温寸法安定化熱処理を施すことで内輪クリープを防止する。

3. 用途

抄紙機の主な用途と開発軸受の代表名番を表1に示す。内輪内径面にテーパ穴を有する大形自動調心ころ軸受に適用が可能である。特に中空軸に高温の媒体(蒸気、油)が通るドライヤーロールやカレンダーロールの支持用のほか、高温の媒体が軸には通らないが、内輪押し込み管理が重要となるプレスロールなどにも適する。

4. まとめ

本開発製品は抄紙機の安定稼働による生産性向上の要求に応じてゆくものとする。今後もユーザーニーズに対応した製品開発を進め、製紙業界の発展に貢献してゆきたい。

表1 主な用途と軸受名番
Table 1 Main Application and Bearing Part Number Range

軸受名番範囲	軸受外径寸法	主な用途
TL239/600 ~ TL239/1000	φ 800 ~ φ 1 320	プレスロール
TL230/560 ~ TL230/950	φ 820 ~ φ 1 360	プレスロール, ドライヤーヤンキーロール
TL23180 ~ TL231/710	φ 650 ~ φ 1 150	ドライヤーヤンキーロール
TL23280 ~ TL232/600	φ 720 ~ φ 1 090	カレンダーロール, プレスロール
TL240/530 ~ TL240/750	φ 780 ~ φ 1 090	カレンダーロール
TL24164 ~ TL241/710	φ 540 ~ φ 1 150	カレンダーロール

商 品

紹 介

鉄道車両向け動揺防止アクチュエータ

Vibration Control Actuator for Train Cars

近年、新幹線などの高速車両や在来線特急車両、周遊型豪華寝台列車には、空気圧や油圧、電動モータなどのアクチュエータを使用して車体の横揺れを能動的に制御するフルアクティブサスペンションの搭載が進んでいる。

NSKは、鉄道車両のフルアクティブサスペンションに向け、ボールねじを用いた電動式の制振アクチュエータ「動揺防止アクチュエータ」を開発したので以下に紹介する。

1. 構成および構造

写真1に動揺防止アクチュエータを示す。アクチュエータは電動モータ、減速機構、ボールねじ、スライドロッドといった主要部品で構成されている。ドライバは上位制御装置で算出された推力指令に従いアクチュエータの電動モータを回転駆動する。

図1および写真2はアクチュエータ本体が設置される状態を示している。台車と車体との間に配置され、進行方向に対し左右方向へ推力を発生する。



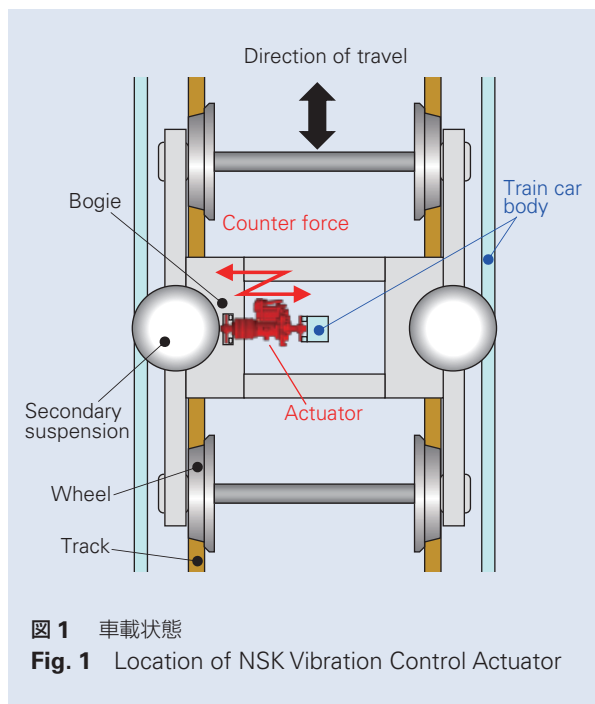
写真1 NSK 動揺防止アクチュエータ(左:アクチュエータ, 右:ドライバ)

Photo 1 NSK Vibration Control Actuator (Left: Actuator, Right: Driver)



写真2 車載状態(写真提供:川崎重工業株式会社)

Photo 2 Location of NSK Vibration Control Actuator (Photo: Kawasaki Heavy Industries Ltd.)



2. 特長

このアクチュエータにおいては、小型軽量化、高効率化、高応答性といった軽薄短小化に向けた技術課題がある一方で、耐久性や耐振動性といった相反する重厚長大化する方向の技術課題を解決する必要があった。そこで電動モータの回転運動と出力ロッドの直線運動とを変換する機構として、鉄道車両に搭載され大推力を発生するアクチュエータでありながらも、高効率、低慣性かつ逆作動性が良い精密ボールねじを採用する設計とした。

ボールねじは回転運動を直線運動に高効率に変換する正作動性に優れており、電動モータへの要求トルクを抑えられることから、電動モータの小型化および低慣性化を図ることができる。よって上位制御装置からの指令に対する応答性に優れ、小型かつ省電力なアクチュエータを構成できる。また、ボールねじは直線運動を回転運動に変換する逆作動性にも優れることから、台車と車体間の振動を効率的に回転運動に変換して受入れることができる。

耐環境性を満たすための防塵・防水設計は、水および塵埃が侵入しないようパッキンやシールを用いて対策を施し、耐振動性については構造解析を実施しながら鉄道車両の要求仕様を満たす構造設計を図っており、実車相当試験においても要求仕様を満たすことが確認できた。

ドライバにおいては、NSKのコア技術「メカトロ技術」の集大成である「メガトルクモータ™」のドライブユニットの設計思想を取り入れている。

3. 用途

本製品は、2017年12月23日から「スーパーあずさ」の新型車両として営業運転を開始した、東日本旅客鉄道株式会社様（以下 JR 東日本）の「中央線新型特急車両 E353 系」に搭載されている。（写真 3）

さらには、2017年5月1日から営業運転を開始した、JR 東日本のクルーズトレイン「TRAIN SUITE 四季島」にも搭載されている。（写真 4）

4. まとめ

回転運動と直線運動とを高効率で変換するボールねじの特長を活用し、鉄道車両の横揺れを応答性良く抑制する電動式の制振アクチュエータ「動揺防止アクチュエータ」を開発した。

NSK は、鉄道の安全性、快適性、高速化、環境性能向上に今後も貢献していく。



写真 3 東日本旅客鉄道株式会社 中央線新型特急車両 E353 系「スーパーあずさ」(写真提供：東日本旅客鉄道株式会社)

Photo 3 JR East Chuo Line "Super Azusa" service E353 series high-speed train (Photo: JR East)



写真 4 東日本旅客鉄道株式会社 クルーズトレイン「TRAIN SUITE 四季島」(写真提供：東日本旅客鉄道株式会社)

Photo 4 JR East luxury sleeper train "Train Suite Shiki-shima" (Photo: JR East)

本 社	TEL.03-3779-7111 (代)	FAX.03-3779-7431	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
産業機械事業本部	TEL.03-3779-7227 (代)	FAX.03-3779-7432	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
自動車事業本部	TEL.03-3779-7189 (代)	FAX.03-3779-7917	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
営業本部			
販売技術統括部	TEL.03-3779-7315 (代)	FAX.03-3779-8698	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
東北支社	TEL.022-261-3735 (代)	FAX.022-261-3768	宮城県仙台市青葉区一番町 4-1-25 (東二番丁スクエア 3F) 〒980-0811
北関東支社	TEL.027-321-2700 (代)	FAX.027-321-2666	群馬県高崎市栄町 16-11 (高崎イーストタワー 2F) 〒370-0841
長岡営業所	TEL.0258-36-6360 (代)	FAX.0258-36-6390	新潟県長岡市東坂之上町 2-1-1 (三井生命長岡ビル 7F) 〒940-0066
東京支社 営業部	TEL.03-3779-7302 (代)	FAX.03-3779-7437	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
東京支社 販売店営業部	TEL.03-3779-7251 (代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
東京支社 販売技術部	TEL.03-3779-7307 (代)	FAX.03-3495-8241	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
札幌営業所	TEL.011-231-1400 (代)	FAX.011-251-2917	北海道札幌市中央区北五条西 6-2-2 (札幌センタービル 16F) 〒060-0005
宇都宮営業所	TEL.028-610-8701 (代)	FAX.028-610-8717	栃木県宇都宮市東宿郷 2-2-1 (ビッグ・ピーススクエア 7F) 〒321-0953
日立営業所	TEL.029-222-5660 (代)	FAX.029-222-5661	茨城県水戸市城南 1-4-7 (第 5 プリンスビル 6F) 〒310-0803
西関東支社	TEL.046-223-9911 (代)	FAX.046-223-9910	神奈川県厚木市中町 2-6-10 (東武太朋ビル 5F) 〒243-0018
長野支社	TEL.0266-58-8800 (代)	FAX.0266-58-7817	長野県諏訪市中洲 5336-2 (諏訪貿易流通会館轟ビル 4F) 〒392-0015
上田営業所	TEL.0268-26-6811 (代)	FAX.0268-26-6813	長野県上田市大手 1-6-4 〒386-0024
静岡支社	TEL.054-253-7310 (代)	FAX.054-275-6030	静岡県静岡市葵区紺屋町 17-1 (葵タワー 22F) 〒420-0852
名古屋支社 営業部	TEL.052-249-5749 (代)	FAX.052-249-5826	愛知県名古屋市中区新栄 2-1-9 (雲電フレックスビル西館 2F) 〒460-0007
名古屋支社 販売店営業部	TEL.052-249-5750 (代)	FAX.052-249-5751	愛知県名古屋市中区新栄 2-1-9 (雲電フレックスビル西館 2F) 〒460-0007
名古屋支社 販売技術部	TEL.052-249-5720 (代)	FAX.052-249-5711	愛知県名古屋市中区新栄 2-1-9 (雲電フレックスビル西館 2F) 〒460-0007
北陸支社	TEL.076-260-1850 (代)	FAX.076-260-1851	石川県金沢市藤江南 1-40 〒920-0346
関西支社 営業部	TEL.06-6945-8236 (代)	FAX.06-6945-8174	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル 6F) 〒540-0031
関西支社 販売店営業部	TEL.06-6945-8158 (代)	FAX.06-6945-8175	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル 8F) 〒540-0031
関西支社 販売技術部	TEL.06-6945-8168 (代)	FAX.06-6945-8178	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル 7F) 〒540-0031
京滋営業所	TEL.077-526-8212 (代)	FAX.077-526-1790	滋賀県大津市京町 4-4-23 (アソルティ大津京町 2F) 〒520-0044
兵庫支社	TEL.079-289-1521 (代)	FAX.079-289-1675	兵庫県姫路市南駅前町 100 (パラシオ第 2 ビル 8F) 〒670-0962
中国支社	TEL.082-285-7760 (代)	FAX.082-283-9491	広島県広島市南区大州 3-7-19 (広島日精ビル) 〒732-0802
福山営業所	TEL.084-954-6501 (代)	FAX.084-954-6502	広島県福山市曙町 5-29-10 〒721-0952
九州支社	TEL.092-451-5671 (代)	FAX.092-474-5060	福岡県福岡市博多区博多駅東 2-6-1 (九筋筑紫通ビル 7F) 〒812-0013
熊本営業所	TEL.096-381-8500 (代)	FAX.096-381-0501	熊本県熊本市中央区水前寺 3-3-25 (増永水前寺ビル 2F) 〒862-0950
東日本自動車第一部 (厚木)	TEL.046-223-8881 (代)	FAX.046-223-8880	神奈川県厚木市中町 2-6-10 (東武太朋ビル 5F) 〒243-0018
東日本自動車第一部 (富士)	TEL.0545-57-1311 (代)	FAX.0545-57-1310	静岡県富士市永田町 1-124-2 (EPO 富士ビル 2F) 〒417-0055
東日本自動車第一部 (日立)	TEL.029-222-5660 (代)	FAX.029-222-5661	茨城県水戸市城南 1-4-7 (第 5 プリンスビル 6F) 〒310-0803
東日本自動車第一部 (東海)	TEL.0566-71-5351 (代)	FAX.0566-71-5365	愛知県安城市三河安城町 1-9-2 (第 2 東祥ビル 5F) 〒446-0056
東日本自動車第二部 (大崎)	TEL.03-3779-7892 (代)	FAX.03-3779-7439	東京都品川区大崎 1-6-3 (日精ビル) 〒141-8560
東日本自動車第三部 (宇都宮)	TEL.028-610-9805 (代)	FAX.028-610-9806	栃木県宇都宮市東宿郷 2-2-1 (ビッグ・ピーススクエア 7F) 〒321-0953
東日本自動車第三部 (東海)	TEL.0566-71-5260 (代)	FAX.0566-71-5365	愛知県安城市三河安城町 1-9-2 (第 2 東祥ビル 5F) 〒446-0056
東日本自動車第四部 (高崎)	TEL.027-321-3434 (代)	FAX.027-321-3476	群馬県高崎市栄町 16-11 (高崎イーストタワー 3F) 〒370-0841
中部日本自動車部 (豊田)	TEL.0565-31-1920 (代)	FAX.0565-31-3929	愛知県豊田市下市場町 5-10 〒471-0875
中部日本浜松自動車部	TEL.053-456-1161 (代)	FAX.053-453-6150	静岡県浜松市中区板屋町 111-2 (浜松アクタタワー 19F) 〒430-7719
西日本自動車部 (大阪)	TEL.06-6945-8169 (代)	FAX.06-6945-8179	大阪府大阪市中央区北浜東 1-26 (大阪日精ビル 3F) 〒540-0031
西日本自動車部 (広島)	TEL.082-284-6501 (代)	FAX.082-284-6533	広島県広島市南区大州 3-7-19 (広島日精ビル) 〒732-0802
西日本自動車部 (姫路)	TEL.079-289-1530 (代)	FAX.079-289-1675	兵庫県姫路市南駅前町 100 (パラシオ第 2 ビル 8F) 〒670-0962

〈2018年10月現在〉
最新情報はNSKホームページをご覧ください。

お問合せ：製品については、お近くの支社・営業所にお申し付けください。

製品の技術的な内容
についてのお問合せ

■ベアリング・精機製品関連 (ボールねじ・リニアガイド・モノキャリア) ☎ 0120-502-260
■メガトルクモータ・XYモジュール ☎ 0120-446-040

日本精工株式会社は、外国為替及び外国貿易法等により規制されている製品・技術については、法令に違反して輸出しないことを基本方針としております。規制に該当する当社製品を輸出される場合は、同法に基づく輸出許可を取得されますようお願い致します。なお、当社製品の輸出に際しては、兵器・武器関連用途に使用されることのないよう十分留意下さるよう併せてお願い致します。

NSK TECHNICAL JOURNAL

JANUARY 2019 No. 691

印刷 平成31年1月11日
発行 平成31年1月21日
編集人 後藤 伸夫
発行人 海老澤 斉
印刷所 久下印刷株式会社
発行所 **日本精工株式会社**
広報部 TEL 03-3779-7050
東京都品川区大崎 1-6-3 日精ビル

非売品

無断転載を禁ずる

このジャーナルの内容については、技術的進歩及び改良に対応するため製品の的外観、仕様などは予告なしに変更することがあります。
なお、ジャーナルの制作には正確を期するため細心の注意を払いましたが、誤記脱漏による損害については責任を負いかねます。



日本精工株式会社



円滑でくらしやすい地球のために

この印刷物は環境に配慮した印刷方法を採用しています。