

NO.

89

NTN  
TECHNICAL  
REVIEW

2022 - 2023

特集

サービス・ソリューション事業の強化と  
自動車のEV化・電動化対応

NTN®

## 「転がり軸受 理論・実践ガイドブック」を発行

～軸受の基礎理論から実践的な技術計算まで、より良い機械設計に役立つ情報を掲載～

NTN は、転がり軸受に関する基礎理論とそれに基づく実践的な技術計算などをまとめた「転がり軸受 理論・実践ガイドブック」を発行しました。

NTN では、これまで転がり軸受を使用するお客さまをサポートするツールとして、転がり軸受の基礎を学ぶために最適な「転がり軸受入門ハンドブック」や、NTN の商品ラインアップと技術解説を掲載した「転がり軸受総合カタログ」などを発行してきました。

このたび、機械設計に携わるお客さまや学生の方々から、最適な機械設計を行うために、軸受をより理論的に理解し、活用するためのツールのご要望をいただいたため、新たに軸受の基礎理論と、それをを用いた実践的な計算方法などをまとめた「転がり軸受 理論・実践ガイドブック」を発行いたしました。

転がり軸受の基礎理論は、材料強度学やトライボロジーに関連するものが多く、難解な内容も少なくありませんが、本ガイドブックでは、軸受の運動、内部すきま・予圧、荷重分布、寿命、摩擦、振動等についての各種理論や計算方法を、わかりやすく解説しています。また、読者の方が簡易的な計算を行えるよう、計算に必要な係数値も多く掲載するとともに、基礎理論だけでは解決が困難な技術課題に対する CAE を用いた計算事例も紹介しています。これらは、NTN が長年お客さまへのご提案の中で培った経験を生かした“NTN の知”であり、軸受の基礎理論や、それを生かした活用事例を学びたいの方々にとって大いに役立つ情報となっております。ぜひご活用ください。

本ガイドブックは、当社ホームページより PDF でダウンロードが可能です。



転がり軸受 理論・実践ガイドブック

# NTN TECHNICAL REVIEW No.89

## サービス・ソリューション事業の強化と自動車のEV化・電動化対応 特集号 目次

巻頭言	「サービス・ソリューション事業の強化と自動車のEV化・電動化対応」特集号に寄せて	執行役CTO(最高技術責任者) 江上正樹	1
寄稿文	機械システムの状態監視と診断の動向	名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授 井上剛志	2

### サービス・ソリューション関連技術

展 望	NTNのサービス・ソリューション事業の取り組み	産業機械事業本部 副本部長 紅林博行	23
解 説	剥離進展下の転がり軸受を対象とした余寿命予測技術の開発	先端技術研究所 北井正嗣	29
解 説	センサ内蔵軸受『しゃべる軸受®』の開発	商品開発研究所 福島靖之/後藤知美/豊口陽亮/一毛大吾/松林晃平	35
解 説	複列磁気エンコーダ付転がり軸受の開発	産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部 奥村寛/伊藤浩義/浜北康之	41
解 説	工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発	産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部 橋爪翔平/中野勇大 商品開発研究所 近藤大地/大口耀示 産業機械事業本部 製品設計部 山本庸平	47
商品紹介	産業用IoTプラットフォーム向け軸受診断エッジアプリケーション	産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部 中野勇大/長谷場隆	53

### EV・電動化対応技術

展 望	自動車のEV化・電動化への当社の取り組み	自動車事業本部 副本部長 橋岡生也	58
解 説	自動車の電動駆動装置用転がり軸受の紹介	自動車事業本部 自動車軸受製品ユニット 自動車軸受技術部 川井崇 NTN BEARINGS (UK) LTD. 魚住朋久	65
解 説	環境保護に貢献する固定式等速ジョイントの進化	自動車事業本部 CVJ製品ユニット CVJ開発部 船橋雅司/藤尾輝明/崎原立己	73
商品紹介	自動車電装補機向けの複合材料商品の紹介	複合材料商品事業部 精密樹脂技術部 安田健 複合材料商品事業部 動圧軸受技術部 小松原慎治	79

### 評価・解析技術

論 文	混合潤滑条件での転がり軸受のピーリングの寿命推定方法	先端技術研究所 長谷川直哉 商品化戦略部 藤田工 岩手大学 理工学部 内銘道正 兵庫県立大学 工学部 阿保政義	85
解 説	転がり軸受用技術計算システムの開発	CAE開発研究所 石河智海/蛭川博康/和泉麻理子 NTN-SNR ROULEMENTS Cedric BURNET	91

### 新商品紹介

ピッキングロボット用フィーダTRINITTE(トリニッテ)の開発	NTNテクニカルサービス(株) 精機商品事業部 松井周平	96
小型トルクダイオード(TDL8)の製品紹介	産業機械事業本部 製品設計部 小原正行	99
手首関節モジュール『i-WRIST®』の適用事例	産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部 田中弓弦	102

### 受賞案件の紹介

2020年“超”モノづくり部品大賞 モビリティ関連部品賞受賞 低フリクションハブベアリングⅢ	自動車事業本部 アクスル製品ユニット アクスルユニット製品開発部 関誠	106
2021年“超”モノづくり部品大賞 日本力(にっぽんぶらんど)賞受賞 EV/HEV用高速深溝玉軸受	自動車事業本部 自動車軸受製品ユニット 自動車軸受技術部 中尾吾朗/佐々木克明/石田幸大/村主和憲	107
2020年度 日本トライボロジー学会 技術賞受賞 超長寿命自動車用円すいころ軸受の開発	CAE開発研究所 藤原宏樹 自動車事業本部 自動車軸受製品ユニット 自動車軸受技術部 川井崇 先端技術研究所 大木力	108
2021年度 日本トライボロジー学会 技術賞受賞 トランスミッション用シール付転がり軸受の低フリクション化技術	自動車事業本部 自動車軸受製品ユニット 自動車軸受技術部 佐々木克明/和久田貴裕	109
2021年度 日本トライボロジー学会 論文賞受賞 残留応力測定と接触応力解析で得られたS-N曲線を用いた ピーリング寿命の推定方法	先端技術研究所 長谷川直哉 商品化戦略部 藤田工 岩手大学 理工学部 内銘道正 兵庫県立大学 工学部 阿保政義/木之下博	110
令和3年度 新エネ大賞 新エネルギー財団会長賞(商品・サービス部門)受賞 風力発電装置主軸用DLCコーティング自動調心ころ軸受	産業機械事業本部 適用技術部 瀬古一将 産業機械事業本部 製品設計部 山本貴志 先端技術研究所 中西雅樹	111

# NTN TECHNICAL REVIEW No.89

## CONTENTS

<b>Preface</b>	<b>On the Special Feature “Strengthening Service and Solution Businesses and Responding to EVs and Electrification”</b> Masaki EGAMI	1
<b>Contribution</b>	<b>Recent Situation of Condition Monitoring and Diagnosis of Machine Systems</b> Tsuyoshi INOUE, Ph.D. Professor, Department of Mechanical Systems Engineering, School of Engineering, Nagoya University	2
<b>Service and Solution Related Technologies</b>		
	Efforts for Service & Solution Business in NTN Hiroyuki KUREBAYASHI	23
	Development of Remaining Useful Life Prediction Technology for Rolling Bearings under Flaking Propagation Masashi KITAI	29
	Development of Sensor Integrated Bearing “Talking Bearings™” Yasuyuki FUKUSHIMA, Tomomi GOTO, Yosuke TOYOGUCHI, Daigo IKKE, Kohei MATSUBAYASHI	35
	Development of Multi Track Magnetic Encoder Integrated Rolling Bearing Hiroshi OKUMURA, Hiroyoshi ITO, Yasuyuki HAMAKITA	41
	Development of Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles Shohei HASHIZUME, Yudai NAKANO, Daichi KONDO, Yoji OHGUCHI, Yohei YAMAMOTO	47
	Bearing Diagnostic Edge Application for Industrial IoT Platforms Yudai NAKANO, Takashi HASEBA	53
<b>EV and Electrification-Ready Technologies</b>		
	NTN’s Activities for Electric Vehicle and Electrification of Automobile Ikuya TATEOKA	58
	Introduction of Rolling Bearings for Electric Drives Corresponding of Automobiles Takashi KAWAI, Tomohisa UOZUMI	65
	Evolution of Fixed Constant Velocity Joint that Contributes to Environmental Protection Masashi FUNAHASHI, Teruaki FUJIO, Ritsuki SAKIHARA	73
	Introduction of Composite Material Products Used in Electrical Auxiliaries for Automobile Ken YASUDA, Shinji KOMATSUBARA	79
<b>Evaluation and Analysis Techniques</b>		
	A Life Estimation Method of Peeling in Rolling Bearings Under Mixed Lubrication Conditions Naoya HASEGAWA, Takumi FUJITA, Michimasa UCHIDATE, Masayoshi ABO	85
	Development of Technical Calculation Systems for Rolling Bearings Tomomi ISHIKAWA, Hiroyasu HIRUKAWA, Mariko IZUMI, Cedric BURNET	91
<b>New Product Introduction</b>		
	Development of Feeder “TRINITTE” for Picking Robots Shuhei MATSUI	96
	Product Introduction of Compact Torque Diode (TDL8) Masayuki OHARA	99
	Application Examples of the Wrist Joint Module “i-WRIST™” Yuzuru TANAKA	102
<b>Award Winning Products</b>		
	Low Friction HUB Bearing III Makoto SEKI	106
	High Speed Deep Groove Ball Bearing for EV/HEV Goro NAKAO, Katsuaki SASAKI, Yukihiro ISHIDA, Kazunori MURANUSHI	107
	Development of Super Long-Life Tapered Roller Bearings for Automobile Hiroki FUJIWARA, Takashi KAWAI, Chikara OHKI	108
	Low Friction Technology of Sealed Ball Bearings for Transmission Tomohiro SUGAI, Katsuaki SASAKI, Takahiro WAKUDA	109
	Estimation Method of Micropitting Life from $S-N$ Curve Established by Residual Stress Measurements and Numerical Contact Analysis Naoya HASEGAWA, Takumi FUJITA, Michimasa UCHIDATE, Masayoshi ABO, Hiroshi KINOSHITA	110
	DLC Coating Spherical Roller Bearing for Wind Turbine Main Shaft Kazumasa SEKO, Takashi YAMAMOTO, Masaki NAKANISHI	111



## 「サービス・ソリューション事業の強化と自動車のEV化・電動化対応」 特集号に寄せて



執行役 CTO（最高技術責任者）

江上 正樹

地球温暖化、気象変動問題を背景に、温室効果ガス排出をネットゼロとする、いわゆるカーボンニュートラルへの取り組みがグローバルで加速しています。当社では、カーボンニュートラル社会の実現への貢献を課題に掲げ、自然エネルギーを利用した持続可能な社会の実現やエネルギーロス低減などをマテリアリティとして、研究開発を推進しています。また、当社製品の設計や技術検討に資する CAE 技術の高度化を進め、当社製品の信頼性向上とお客様への提案力向上を図ってまいりました。本誌では、これらの取組みを①サービス・ソリューション関連技術、②EV・電動化対応技術、③評価・解析技術として特集するとともに、当社の新商品3件と外部表彰を受けた商品・技術6件について紹介させていただきます。

特集①では、風力発電の普及や稼働設備の生産性向上等に貢献する技術・商品を紹介します。グローバルで導入が拡大している風力発電設備では、安定稼働と発電コストの低減が課題となっています。また、当社では、風力発電装置の振動等のデータをリモートで収集・監視し、異常や変化点をお客様にお知らせするモニタリングサービス「Wind Doctor®」を提供し、運用管理・保守の軽減から風力発電装置の安定稼働と運用コストの低減に貢献してきました。一方、一般産業機械でも設備の安定稼働や予知保全に対するニーズが高まっており、「しゃべる軸受®」を代表とするセンサ内蔵転がり軸受、ポータブル異常検知装置、IoTプラットフォーム「Edgecross®」に対応した軸受診断アプリなど、設備の安定稼働や生産性向上に貢献する技術・商品を開発してきましたので、これらの技術・商品について紹介します。

特集②では、自動車の電動化に対応する当社の軸受、ハブベアリング、等速ジョイントの技術・商品について紹介します。自動車では、カーボンニュートラルに向けた施策として、電動化が急速に進んでおり、主要課題であるEVの航続距離延伸のために、e-Axleなどで使用される基幹部品をはじめ、車載部品の小型化・高効率化が課題となっています。当社は、軸受、ハブベアリング、等速ジョイントの小型化・高効率化を追求した新商品を市場投入し、自動車のエネルギーロス低減に貢献してきました。また、電動ボールねじユニット、電動オイルポンプ、ハブベアリングに転舵機構を付与したRa-sHUB®など、当社のトライボロジー、メカ設計、メカトロニクスなどのコア技術を活かした高機能・高効率なモジュール製品の開発を進めてきましたので、これらの技術・商品について紹介します。

特集③では、転がり軸受設計と軸受寿命推定のためのCAEを活用した評価・解析技術について紹介します。市場動向や顧客ニーズを考慮した競争力のある製品をタイムリーに提案するためには、製品設計の業務や製品の性能評価の高度化と高効率化が必須です。本誌では、新たに開発した転がり軸受統合技術計算システム、並びにハブベアリングの設計プロセスを半自動化したCAE計算システムを紹介します。また、各種機械の効率化要求により潤滑剤の低粘度化が進む中、油膜形成が不十分な条件下での軸受の信頼性設計を可能にする解析技術を紹介します。

本誌で紹介する当社の技術・商品が、カーボンニュートラル社会の実現につながれば幸甚です。今後も、企業理念「新しい技術の創造と新商品の開発を通じて国際社会に貢献する（For New Technology Network: 新しい技術で世界を結ぶ）」のもと、カーボンニュートラルを中心に据えた研究開発活動により、自然との共生を図りながら産業界全体のさらなる発展に貢献します。

以上

## 機械システムの状態監視と診断の動向

## Recent Situation of Condition Monitoring and Diagnosis of Machine Systems



井上 剛志 Tsuyoshi INOUE

名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授

最近、機械システムの状態監視と診断技術が急速に注目を集め、発展している。本稿ではまず、著者が長年関わってきた ISO/TC 108/SC 5 の規格化活動に触れつつ、機械システムの状態監視と診断技術の最近の動向を概観する。つぎに、近年の話題として、アセットマネジメントと状態監視、風力発電の状態監視と診断、予知保全の IoT 化、1DCAE を活用した状態監視と診断について、最近の動向を紹介する。そして最後に、ここ数年の国内の学会講演会の発表から本稿（機械システムと軸受の状態監視と診断）に沿ったものを紹介する。

Recently, condition monitoring and diagnosis technologies for machine systems have been rapidly attracting attention and developing. This paper first reviews the recent trends in condition monitoring and diagnosis of mechanical systems, referring to the standardization activities of ISO/TC 108/SC 5, in which the author has been involved for many years. Subsequently, this paper introduces the recent trends in asset management and condition monitoring, condition monitoring and diagnosis of wind power generation, IoT for predictive maintenance, and condition monitoring and diagnosis using 1DCAE as the latest topics. Finally, some topics regarding condition monitoring and diagnosis of machine systems and bearings at domestic conferences in the past few years are introduced.

## 1. はじめに

私は 2004 年以来、ISO/TC 108/SC 5 機械システムの状態監視と診断で ISO 規格化活動に携わっている。本寄稿文では、まず最初に ISO/TC 108/SC 5 の規格化活動に簡単に触れつつ、機械システムの状態監視と診断技術の最近の動向を概観する。なお、この前半部分（第 2 章、第 3 章）は主に 2020 年に雑誌「非破壊検査」に執筆し掲載された解説記事<sup>1)</sup>から引用しつつ、ここ 2 年分の情報を更新したものである。

後半（第 4 章から第 7 章）では、アセットマネジメントと状態監視、風力発電の状態監視と診断、予知保全の IoT 化、1DCAE を活用した状態監視と診断について、最近の動向を紹介する。そして最後に、ここ数年の国内の学会講演会の発表内容で、軸受の状態監視と診断に関連する内容について紹介する。

2. 機械システムの状態監視と診断の国際動向<sup>1)</sup>

## 2.1 ISO TC 108/SC 5 のスコープ

改めて、ISO/TC 108/SC 5 機械システムの状態監視と診断を紹介すると、正式な英語名称は Condition monitoring and diagnostics of machine systems である。まず、本 SC 5 の目的・適用範囲 (Scope) を Web サイト<sup>2)</sup>から次に示す。

Standardization of the procedures, processes and equipment requirements uniquely related to the technical activity of condition monitoring

and diagnostics of machines systems in which selected physical parameters associated with an operating machine system are periodically or continuously sensed, measured and recorded for the interim purpose of reducing, analyzing, comparing and displaying the data and information so obtained and for the ultimate purpose of using this interim result to support decisions related to the operation and maintenance of the machine system.

この目的 (Scope) を和訳して示すと次のようになる<sup>1)</sup>。機械システムの状態監視と診断技術に関する手法と手順、装置要件の標準化を目的とする。すなわち、まず稼働中の機械システムに関連する選択された物理的パラメータを定期的又は継続的に感知・測定及び記録すること、次に中間目的として、得られたデータ及び情報を変換（縮減）、分析、比較及び表示すること、さらに最終目的として、中間結果から機械システムの運転及び保守に関する決定（判断）を支援することのそれぞれの標準化を目的とする。

## 2.2 ISO TC 108/SC 5 の作業 WG

2022 年 9 月時点で、ISO/TC 108/SC 5 に設置されている作業グループ（ワーキンググループ、WG）を表 1 に示し、以下で個別に紹介する。

AG E : SC 5 全体の戦略的計画が検討される WG である。ここでは、SC 5 全体の国際標準化の方向性や各 WG

での作業の進め方、WG の設置・解散等が精査・検討されている。また、将来的に新規 WG を設置しての作業に移行することを前提とした予備業務項目（PWI）の初期段階のドラフトもここで考察されている。

表1 ISO/TC 108/SC 5 の作業グループ<sup>2)</sup> (2022 年 9 月時点)

WG	技術分野	
AG E	Strategic planning	戦略的計画
WG 7	Training and accreditation in the field of condition monitoring and diagnostics	状態監視と診断分野での訓練及び認証
WG 11	Thermal imaging	熱画像
WG 16	Condition monitoring and diagnostics of wind turbines	風車の状態監視と診断
WG 17	Condition monitoring and diagnostics applications	状態監視と診断のアプリケーション
WG 18	Condition monitoring management	状態監視マネジメント

WG 7：状態監視技術者の訓練及び認証にかかる WG であり、訓練及び認証に係わる一連の規格が整備されている。全体を覆う ISO 18436-1:2021 に加え、個別技術の状態監視技術者を対象とする規格として、ISO 18436-2:2014 振動の状態監視と診断、ISO 18436-4:2014 現場での潤滑油分析、ISO 18436-5:2012 分析室での潤滑油分析、ISO 18436-6:2021 アコースティック・エミッション、ISO 18436-7:2014 サーモグラフィ、ISO 18436-8:2013 超音波が発行されている。日本では早期からこの 18436 シリーズに基づく機械の状態監視技術者認証を実施しており、その詳細は第 3 章で述べる。

WG 11 熱画像：熱画像を用いた状態監視と診断技術に係る WG である。ISO 18434-1:2008 の一般手順と ISO 18434-2:2019 の画像の解釈について ISO 規格を発行しており、ここでは軸受の異常検出の画像も示されている。現在は Optical Gas Imaging に関する規格化が検討されている。以前はこの熱画像の WG11 以外にも多数の状態監視と診断技術に係る WG（WG3 性能診断、WG4 トライボロジー、WG10 電流兆候診断、WG14 アコースティック・エミッション、WG15 超音波診断など）が設置されていたが、それぞれ現状で必要とされる ISO 規格の発行を終え、現在は解散している。これらの解散し

た WG の情報を表 2 に示す。もし同分野の新規 ISO 規格化の必要性が生じたり、現行の ISO の大幅な修正が必要となった場合には再度活動を開始する予定である。

WG 16 風車、WG 17 アプリケーション（応用技術）：これらは個別機械における状態監視と診断に係る WG である。WG 16 は ISO 16079-1:2017 一般指針と ISO 16079-2:2020 ドライブトレインの状態監視の規格化を終えている。この後者では風車の軸受やギヤに関する監視と診断について述べられている。WG 17 はアプリケーションと名のつく通り広く対象をカバーしている。これまでに ISO 19283:2020 水力発電装置の ISO 規格を発行しており、現在はレシプロ圧縮機（Reciprocating compressors）の規格化が開始された。

WG 18 アセットマネジメント（資産管理）：2019 年から実働に入った新しい WG であり、2022 年 9 月時点で最も活発に活動をしている WG である。機械システムの状態監視と診断は、従来、機械を直接扱う技術者に対するものがメインであったが、SC 5 国際会議（2.3 節参照）においては約 10 年前からアセットマネジメントシステムの観点も取り入れた規格化の必要性が示されてきた。そして、現在は、現 SC 5 チェアマンの強いリーダーシップの下で、対象を機械システムに特化したアセットマネジメントの規格化の検討が開始され、精力的に進められている。具体的に検討を始めた規格は、(1) 状態監視管理者の認証、(2) 状態監視監査者の認証、そして (3) 物理的（physical）アセットマネジメントの 3 規格である。

### 2.3 ISO TC 108/SC 5 の国際会議の動向

ISO の規格化では、規格化文案の投票コメントの検討と反映、次の規格の検討などを行う場として国際会議が重要な役割を果たす。SC 5 では 1994 年に第 1 回国際会議が開催され、それ以降 2019 年までで第 23 回を数える。開催年度と開催地を表 3 に示す。第 24 回の国際会議は当初は 2020 年 9 月にニューヨークで開催予定であったが、同年 3 月以降の全世界的な新型コロナウイルスの影響で相互の海外渡航が禁止されたため初めて延期（その後中止）となり、約 1.5 年後の 2022 年 5 月に初のオンライン会議として開催された。そして、2023 年度は、新型コロナウイルス感染症が収束しつつあることから 4 年ぶりに対面開催で、日本が開催国となり京都で開催予定である。

表2 SC 5 に設置されていた作業グループ<sup>1)2)</sup>

WG	技術分野	
AG A	Vibration condition monitoring procedures and instrumentation used for the purposes of diagnostics	診断のための振動状態監視手順と装置
WG 1	Terminology	用語
WG 2	Data interpretation and diagnostics techniques	データの解釈と診断技術
WG 3	Performance monitoring and diagnostics	パフォーマンス(性能)の監視と診断
WG 4	Tribology-based monitoring and diagnostics	トライボロジーに基づく監視と診断
WG 5	Prognostics	予測
JWG 6	Formats and methods for communicating, presenting and displaying relevant information and data	関連する情報及びデータの通信, 提示, 表示のためのフォーマットと方法
WG 8	Condition monitoring and diagnostics of machines	機械の状態監視と診断
WG 10	Condition monitoring and diagnostics of electrical equipment	電気機器の状態監視・診断
WG 14	Acoustic techniques	音響技術 (アコースティック・エミッション)
WG 15	Ultrasound	超音波
これらのWG に関しては, 将来のプロジェクトや新しい作業分野の検討を意図した討議を行うための項目は各年の会議に含まれ, 活動の再開も含めて継続的に検討される。		

表3 SC 5 国際会議の一覧表<sup>1)</sup>

第1回	1994年	Swansea	UK
第2回	1995年	London	UK
第3回	1996年	Sydney	AU
第4回	1997年	Berlin	DE
第5回	1998年	Tasmania	AU
第6回	1999年	Copenhagen	DK
第7回	2000年	Nanjing	CN
第8回	2001年	Vienna	AS
第9回	2002年	Minden,NV	USA
第10回	2003年	Paris	FR
第11回	2004年	London	UK
第12回	2005年	Dania Beach,FL	USA
第13回	2007年	Prague	CZ
第14回	2008年	Kyoto	JP
第15回	2009年	Copenhagen	DK
第16回	2010年	London	UK
第17回	2011年	Sydney	AU
第18回	2013年	Berlin	DE
第19回	2014年	Paris	FR
第20回	2016年	Sydney	AU
第21回	2017年	London	UK
第22回	2018年	Helsinki	FI
第23回	2019年	Copenhagen	DK
第24回	2022年	オンライン	
第25回	2023年	Kyoto(開催予定)	JP

## 2.4 ISO TC 108/SC 5 の活動状況と展望

最新の SC 5 活動は ISO Web サイト<sup>2)</sup> で見ることができ。現議長は第 4 代目で L. Hitchcock 氏 (SA) であり, 幹事は A. Rashid 氏 (SA) である。また, 2022 年 9 月時点では P メンバー (Participation member) は 23 개국・地域で, O メンバー (Observer member) は 12 개국・地域である。

2022 年 9 月時点の SC 5 規格の検討状況を図 1 に示す。SC 5 では現時点で 28 件の国際規格を発行しており, 制定・改定中のものは 5 件である。



発行規格: 37		うちSC5: 28制定		・開発, 改定中: 5		ISO/TC108/SC5国内委員会 2022-9-26	
<b>概観</b> ISO 17359:2018 船舶 ISO 13371:2012 用器		<b>診断技術</b> ISO 13371-1:2002 船舶診断(一般手法) ISO 13372:2018 船舶診断(舷外表示) ISO 13373-1:2013 船舶診断(診断技術) ISO 13373-2:2018 船舶診断(診断技術) ISO 13373-3:2013 船舶診断(診断技術) ISO 13373-4:2021 船舶診断(診断技術) ISO 13373-5:2020 船舶診断(診断技術) ISO 13373-7:2017 船舶診断(診断技術) ISO 13373-9:2017 船舶診断(診断技術)		<b>適用詳細</b> ISO 16887:2004 構造物の診断 ISO 19960:2005 ガラス・透明樹脂の検査 ISO 10094:2017 潤滑油の診断(船舶用) ISO 16096-2:2020 潤滑油診断(船舶用) ISO 19283:2020 水素添加剤の診断(船舶用)		<b>データ管理</b> ISO 13374-1:2003 処理表示(一般指針) ISO 13374-2:2007 処理表示(一般指針) ISO 13374-3:2012 処理表示(一般指針) ISO 13374-4:2015 処理表示(一般指針)	
<b>状態監視技術者(CME)の訓練および認証</b> ISO 18436-1:2021 状態監視技術者の要求事項 ISO 18436-2:2014 CME認証(船舶) ISO 18436-3:2012 CME認証(船舶) ISO 18436-4:2014 CME認証(船舶) ISO 18436-5:2012 CME認証(船舶) ISO 18436-6:2021 CME認証(AE)		<b>診断および予測</b> ISO 13379-1:2012 診断技術(一般指針) ISO 13379-2:2015 診断技術(一般指針) ISO 13381-1:2015 予測技術(一般指針)		<b>状態監視マニファシメント</b> PW118255 状態監視マニファシメント			
<b>脚注</b> ① CME: Condition Monitoring and diagnostic Engineer (Requirements for qualification and assessment of personnel)		<b>脚注</b> ② 国際標準化機構のISOファミリーの略称 ISO: International Standard WD: Working Draft DIS: Draft International Standard FDIS: Final Draft International Standard		<b>脚注</b> CD: Committee Draft			

図1 2022年9月現在の規格化活動状況

SC 5 は「状態監視と診断」というキーワードで始まり、1994 年から 2011 年ころまではその背景・ニーズ・目的として認識するものを欧米各国と日本とでほぼ共有しながら規格化作業が進められてきた。しかし、2012 年ころから欧米各国の SC 5 委員が認識し主張する「状態監視と診断」の背景・ニーズ・目的は、従来のものを残しつつ少しずつ広がりを見せていた。彼らはかなり以前から、技術者と経営者の中間において資産管理的な観点から活用されるべき「状態監視と診断」規格の必要性和価値を見出していたようである。そして、SC 5 の基礎技術に関する規格化が一巡したのを受け、それらの新しい「状態監視と診断」規格への動きが SC 5 の活動に現れ始めたということである。

2022 年 9 月時点の SC 5 では、表 1 に示したように訓練及び認証 WG 7、熱画像 WG 11、風車 WG 16 と応用技術 WG 17、そして資産管理 WG 18 が活動中である。前節でも述べたが基礎技術に関する WG (現状では WG11) は基本的に規格化を終えて解散していく方向であり、今後の SC 5 の活動は大きく 2 つの方向、すなわち応用技術 (WG 16,17) と資産管理 (WG 18) に向いている。特に現 SC 5 議長は前述の背景から後者への方向性を強く示しており、現在、SC 5 は IEC TC 56 Dependability, ISO/TC 251 Asset management と相方向でリエンズを持つなど、その傾向が過去 3 回の国際会議でははっきりと現れている。今後 WG18 が当面の SC 5 活動の中心となるであろう。しかし、アセットマネジメントの大元 ISO 規格である 55000 シリーズに対しては、TC 108/SC 5 の提案している機械システムのアセットマネジメントはまだまだ相互理解・認識まで至っておらず、TC 108/SC 5 としても機械システムの状態監視マネジメントのあり方をまだ定めきれていない感も否めない状況である。

国内においても機械システムのアセットマネジメントへのニーズ、期待はすでに高まりつつあり、この SC 5/WG 18 の活動への興味が急速に増していることを実感している。しかし一方で、ISO/TC 108/SC 5 国内委員会ではそ

のような資産管理的な観点の「状態監視と診断」の背景・ニーズ・目的の広がりについての認識はまだ十分に共有できていない。資産管理 (WG 18) における複数の ISO 規格の検討開始が第 23 回国際会議 (コペンハーゲン) で承認され、第 25 回の京都会議でも検討がなされるであろう。しかし、上記の理由から現在の ISO/TC 108/SC 5 国内委員会ではこれらの規格化に対して十分に対応できないことが想定される。その対応として ISO/TC 108/SC 5 国内委員会は最近、日本アセットマネジメント協会と交流を開始しつつあり、まずは委員会活動の相互参加を始めようとしている。また、必要であれば資産管理の専門家をメンバーに加えるか、あるいは ISO/TC 108/SC 5 国内委員会の体制の再構築を行うことを検討している。国内の関連企業の専門家で機械システムの状態監視アセットマネジメントに興味を持たれる方々が ISO/TC 108/SC 5 国内委員会あるいは国際会議に参加し、ぜひ意見をを出していただくことを期待したい。

### 3. 技術者認証事業と講習会<sup>1)</sup>

#### 3.1 機械状態監視資格認証事業

世界的に共通でかつ客観的な個人の技術力評価のために、ISO/TC 108/SC 5/WG 7 で作成した ISO 18436 シリーズ (機械の状態監視と診断技術者の認証) に基づいて機械の状態監視診断技術者の認証が行われている<sup>1)</sup>。日本では現在までに、振動、トライボロジーとサーモグラフィの認証が実施されている。

まず最初に ISO 18436-2 (振動) が 2003 年に発行された。その後、ISO 18436 規格シリーズは順調に、ISO 18436-4 (現場での潤滑油分析), ISO 18436-6 (アコースティック・エミッション) と ISO 18436-7 (サーモグラフィ) が発行され、2012 年に ISO 18436-5 (分析室での潤滑油分析), 2013 年に ISO 18436-8 (超音波) が発行されている。特筆すべき点としては、ISO 18436-2 (振動) は全体をカテゴリ I から IV (カテゴリ IV は技術士、工学博士相当レベルと認識されている) に分けたのに対し、その他の全分野では全体をカテゴリ I から III に分けたことである。なお、全体のカテゴリの見やすさ、わかりやすさの点から振動をカテゴリ I から III に再定義することが SC 5 国際会議にて時折提案され検討されているが、すでに 20 年近く実施している実績を持つ国が反対し、当初のカテゴリ制が維持されている。

機械状態監視診断技術者 (振動) 資格認証制度は日本機械学会 (JSME<sup>3)</sup>) により 2004 年 6 月から実施されており、2022 年 8 月の第 37 回試験までに合計 5 472 人もの資格認証者を輩出している。カテゴリ I~III はそれぞれ、819 人、4 557 人と 434 人であり、平均して毎回ほぼ 10 人、100 人、20-30 人が認証を受けている。また、

工学博士・技術士レベルと同等の実力を示すものと位置づけられているカテゴリⅣに対してもこれまで41人が認証を受けており、日本の振動技術に携わっている技術者のレベルの高さが示されている。グローバルに活躍する技術者を目指す方はぜひカテゴリⅢ、Ⅳにチャレンジされたい。

機械状態監視診断技術者（トライボロジー）資格認証制度は2009年度からJSME<sup>3)</sup>と日本トライボロジー学会（JAST）の両学会による共同認証でカテゴリⅠ～Ⅲについて実施され、2022年9月時点で合計1421名（カテゴリⅠ～Ⅲはそれぞれ1176人、234人と11人）が認証を受けている。

機械状態監視診断技術者（サーモグラフィ）資格試験は、2016年度から日本非破壊検査協会（JSNDI）によりカテゴリⅠが、2018年度よりカテゴリⅢについて実施され、2022年9月時点で合計206名（カテゴリ別ではⅠ、Ⅱで173名と33名）が合格している。

なお、JSNDI（CM技術者認証事業本部）とJSME（機械状態監視資格認証事業委員会）は状態監視の認証事業において協力関係を構築している<sup>4)</sup>。例えば、JSMEは「状態監視振動診断技術者コミュニティ」のミーティングを主催し、状態監視に関する情報発信及び資格者の交流の場をJSNDIのCM技術者資格者・関係者も含めて設けるなど、相互の連携が図られている<sup>4)</sup>。

### 3.2 状態監視と診断技術に関する講習会

ISO/TC 108/SC 5 国内委員会として、機械システムの状態監視と診断の啓蒙と活動の紹介のために、「講習会：グローバル技術者必須!!機械の状態監視と診断技術、基礎・実践ノウハウと応用例・規格」を企画し、開催している（JSME主催）。内容としては、SC5規格の紹介と状態監視に関する技術者認証の紹介、振動を用いた診断、潤滑油分析、熱画像解析、アコースティック・エミッション（AE）の基礎技術に関する紹介、大型回転機械の診断、風車の診断（主に軸受）、電流兆候診断（2019年から追加）、総合診断（2021年から追加）である。第1回が2007年10月東京開催（30名参加）、第2回が2007年10月大阪開催（15名参加）であった。上記の2回から少し期間をおき、第3回を2016年9月（29名参加）、第4回を2018年9月（44名参加）、第5回を2019年9月（53名参加）にそれぞれ東京で開催した。

この第5回の際の内容を基に図書「機械システムの状態監視と診断技術」（井上・兵藤編著、日本機械学会編、コロナ社）<sup>5)</sup>を執筆し、2021年6月に出版している。そして、同図書をテキストとして第6回講習会を2021年11月（150名参加）オンラインで開催した。2022年度は同講習会を拡張し、11月に初心者向けと初中級者向けに分けて2週にかけて実施している。同講習会は直近の

3回は満席・満員であり、IoT時代の到来とともに同分野技術へのニーズ・関心の高まりが確認された。今後も継続的に講習会や図書の執筆を通して、同分野の啓蒙とISO/TC 108/SC 5 国内委員会の活動紹介を行っていくので、講習会や書籍・出版物を通して同分野の技術の基礎を習得いただければ幸いである。

## 4. 状態監視とアセットマネジメント<sup>6)-14)</sup>

### 4.1 欧州：IoTとアセットマネジメントの動向

2010年代にIoTやIndustry 4.0が提唱されて10年が経過し、これらの言葉や概念は広く普及した。そして、欧米では同技術は設備診断、アセットマネジメントと深く融合し、進化を遂げている。川合は今年、欧州における設備診断とIoTについて下記のように日本と対比しつつまとめている<sup>6)</sup>。すなわち、日本では設備から得られるデータを1工場、1企業内で利用することに主眼を置いた議論が先行しがちであるが、欧州では、欧州統合データ基盤プロジェクト「GAIA-X（ガイア・エックス）」を代表として、データの戦略的有用性を認識して企業のさまざまなクラウドサービスを単一のシステム上で統合し、業界をまたぐデータ交換を容易に行える標準的な認証の仕組みを通じてインターオペラビリティ（相互運用性）を実現すること（データ経済圏）に主眼があると説明している。

今後のメーカーは顧客へのサービス提供（サービタイゼーション）モデルへと進化していき、顧客の利用環境は自社製品だけではなく他社製品を交えた複雑なシステム環境となることがグローバルに進んでいくと予想される<sup>8)</sup>。このような流れは日本も例外ではないであろう。その結果としては、メーカーがユーザーの利用環境のライフサイクル全体をマネジメントしてサービスを提供することが要求されていき、そのために競合他社を含むユーザーの利用環境全体から発生するデータを収集する必要性が生じると予想している。特にこれまで可視化されていなかった運用・保守フェーズのデータを共有し活用することは、新たなそして重要な研究開発分野となり、ユーザーを巻き込んだデータ連携が今後重要となることは明らかであると述べている<sup>8)</sup>。

シーメンスが産業現場から大量の機械データを収集して一元化するインダストリアルIoT（IIoT）についてまとめたレポート「製造業へのIoT（モノのインターネット）導入」<sup>6)9)</sup>にも少し触れてみる。図2に、メーカーが事業への付加価値とROI（投資利益率）を最大限に高めるために実装できる主要なユースケースを示す。IIoTの成熟度について6つに分けてモデル化しており、比較的手をつけやすい基本的な部分から導入し、その後少しずつ拡張を重ねながらより大きな価値を実現していくことを推奨している。その最初のアセットマネジメントとアセットメンテナンスとして、具体的に、状態監視、資産パフォーマンス管理、そして予知保全が挙げら



れていることが興味深い。ここでは、それらについて概観する。

アセットマネジメントの状態監視では集中型のIoTシステムで特定パラメータ（温度、振動、圧力など）と重要業績評価指標（KPI）を監視し、接続されたすべてのアセットの運転状態を追跡し、問題発生時にそのアセットに障害が発生する前に是正措置を講じて、重要なアセットのアップタイムを最大化する。このように、状態監視により世界各地の拠点のアセットの健全性とパフォーマンスの透明性を確保する。

資産パフォーマンス管理では、KPIを使って機械の状態やステータスを監視・追跡し、効率性と生産性を十分に発揮していない機械を特定する。またIoTを利用した資産パフォーマンス管理アプリケーションが、最適な運転状態から逸脱した生産ラインに変更を加えてパフォーマンスを向上させる。このようにして生産を加速し、リソース割当て、市場投入期間、顧客満足度の面でもプラスの波及効果が現れる。また、KPIを都度微調整して機械のパフォーマンスをより正確に見きわめ、リアルタイム・データに基づいて機械を継続的に調整し、パフォーマンスの改善を図る。このようにして資産パフォーマンス管理により総合設備効率や企業収益の改善を図る。

アセットメンテナンスの予知保全では、機械の健全性データとパフォーマンス・データを動的に収集して分析する。そして、主要なしきい値に達したパーツを見極め、保守や交換が必要な時期を判断し、必要なタイミングでのみ保守作業を行うことで定期保全を不要とし、予定外の保守を従来から大幅に削減でき、保守コストの低下、品質および生産性、資産のアップタイム、稼働率、生産量の向上、機械の長寿命化を達成できる。その他の項目を含め、興味がある方、詳しく知りたい方は同レポートを参照されたい。

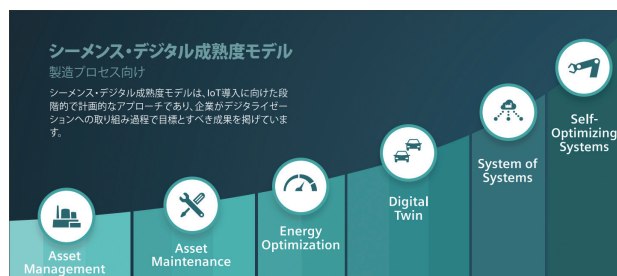


図2 シエメンズ・デジタル成熟度モデル<sup>6)9)</sup>

川合は、状態監視と診断分野の伝統的な国際会議COMADEM（Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management）<sup>10)</sup>に参加した際の印象として、アジア系の研究者は個別の診断技術に関する発表が多いのに対し、欧米系の研究者はアセットマネジメントに関する発表が多かったと述べている<sup>6)</sup>。これは、欧米では、異常を診断しての設備管理と併せて、そのために必要とな

る診断機器の導入や診断実施のコストを考慮し、それらのデータに基づいて経営的にいかにコストダウンを実現するかについて研究対象がすでに広がっていることを示している。この指摘は著者自身がISO/TC 108/SC 5の規格化活動で経験し実感している欧米エキスパートの思考の傾向と一致している。このグローバルな流れを日本の技術者・研究者も早期に意識し、適切に対応していく必要がある。

#### 4.2 日本における動向：経営に資する戦略的保全マネジメントシステム MOSMS<sup>11)-14)</sup>

日本においては、日本プラントメンテナンス協会が設備管理に継続的・積極的に取り組んできている。図3に同協会紹介資料<sup>11)</sup>から日本における設備管理の歴史を示す。設備管理技術は拡大する一途であり、それらを統合してアセットマネジメントも組み込んだMOSMSが始まった背景・経緯が窺える。

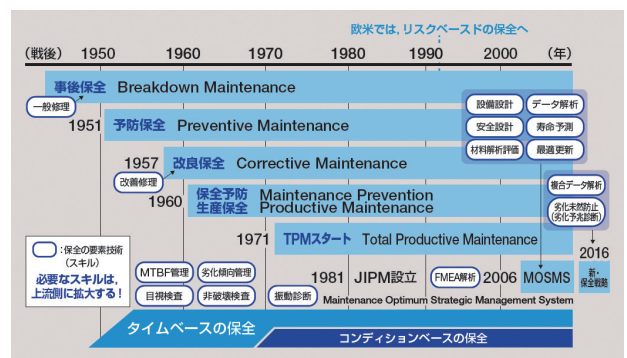


図3 日本における設備管理の歴史<sup>11)</sup>

#### ■ 推計従業員数の推移（製造部門・保全部門、千人）

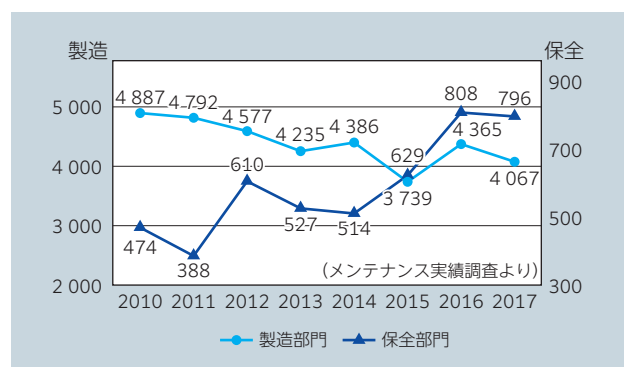


図4 製造部門と保全部門の従業員数の推移<sup>11)</sup>

図4に製造部門と保全部門の従業員数の推移<sup>11)</sup>を示す。最近では新規設備の導入が減少し、代わりに既存設備をいかに保全して運用するかという方向性が強まっていることがこの結果からも窺え、保全の時代と言える。

そのような傾向の中、同協会が2006年に、ロス（発生している現象）とリスク（今後発生するかもしれない可



能性) への対処を一貫した概念としてとらえ、経営論と技術論をマッチングさせた保全体制を構築するために提唱され開始したものが「経営に資する戦略的保全マネジメントシステム」(Maintenance Optimum Strategic Management System, MOSMS) である<sup>12)13)</sup>。本システムは望ましい経営のPDCA サイクルと保全のPDCA サイクルの関係を明らかにしており(図5)、とくに保全が経営と一体化するためには経営的に合理性のある計画が作られ、その計画主導で保全が実行されること(保全マネジメント)が重要であることが強調されている<sup>13)</sup>。そのためには、経営と保全が同じ土俵に立ち、保全ブランドデザイン(経営的視点での全体最適のメリットがある保全計画を作る仕組み)が必要である。MOSMS はまさにこの仕組みとして“日本発”で構築されたものである。

MOSMS ではロス・リスク分類としてP(生産性)、Q(品質)、C(コスト)、D(納期)、S(安全)、M(モチベーション)、E(環境)を挙げており、設備管理の結果としてこれらのロス・リスクの最小化を目指している。ターゲットはミドルクラス(マネージャー層)であり、前節で述べたISO/TC 108/SC 5/WG 18のアセットマネジメントのターゲット層と同一である。そして、経営と保全の連動を図るために、図5に示すように経営PDCA サイクルのP(プラン)にロス・リスクマネジメントと設備保全戦略を組み込み、経営PDCA サイクルのD(実行)とMOSMSのPDCA サイクルのP(プラン)を相互に連携させ、さらに両者のPDCA サイクルのC(チェック)とA(改善)を相互評価で連携させている<sup>14)</sup>。そのようにして、リスクとコストのバランスを目指す「保全経営」と継続的に向上する技術を用いた「計画保全」の連携を目指している。

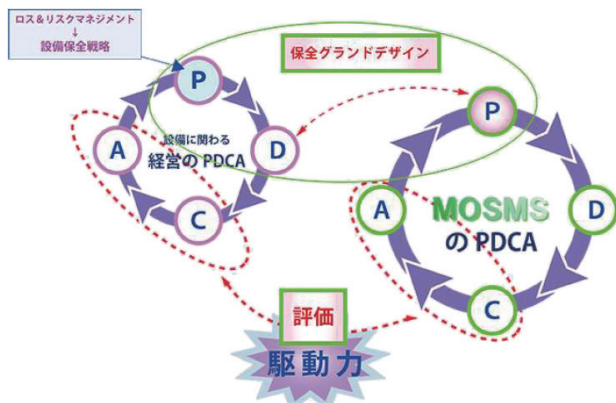


図5 MOSMSによる経営と保全の連動<sup>14)</sup>

## 5. 風力発電の現状と状態監視と診断の動向<sup>15)-21)</sup>

状態監視と診断の対象として主要なシステムの1つである風力発電システムを取り上げ、その動向を概観する。

### 5.1 風力発電事業の動向<sup>15)16)</sup>

アクセンチュアが今年度まとめて報告している資料<sup>15)16)</sup>から紹介する。この10年間で、陸上および洋上風力発電の均等化発電原価(Levelised Cost of Electricity, LCOE)を低減するための取り組みが拡大、活発化し、風力発電業界にデジタル革命をもたらした。世界全体の陸上風力発電の発電容量は2010年の178GWが2019年には594GWとなり、この10年間で大幅に増加した。洋上風力発電も急速に成長しており、2019年には世界全体の発電容量が29GWに達した。世界の洋上風力発電容量と短期成長率予測を図6に示す。電力市場では洋上風力発電への投資が活発化しており、現在はまだ世界の風力発電容量の5%程度だが、プロジェクト規模も成長率も大きい洋上風力発電の発電容量は今後5年間で3倍近く増加するとの予測もある。

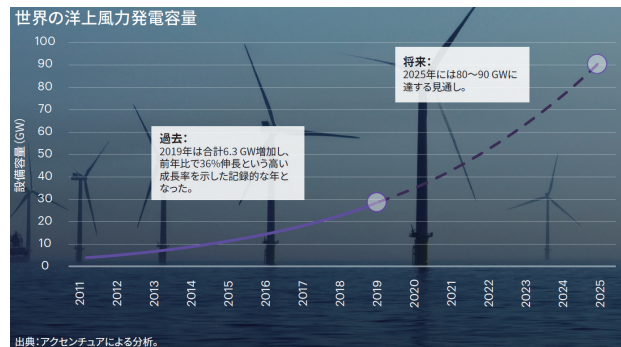


図6 世界の洋上風力発電容量と短期成長率予測<sup>15)</sup>

### 5.2 風力発電の状態監視と診断<sup>15)16)</sup>

風力発電事業では、これまではタービンの大型化(英国では10年で2MWから12MWへ<sup>16)</sup>), MW当たりの設備投資の削減、そして設備利用率の向上(英国では30%から40%超へ<sup>16)</sup>)によってLCOE改善がなされてきた。それに伴い、風力発電所のLCOEに占める運転保守(Operation & Maintenance, O&M)費用の割合が相対的に徐々に増加し、現在はライフサイクルコストの3分の1を超えている。そのため、最近ではO&Mプロセスに対する生産性の向上とコスト削減を実現することへの関心が高まっており、その成功を左右する主要な決定要因のひとつがデジタル技術であると認識されている。アクセンチュアは、陸上および洋上風力発電の主要企業11社を対象とした調査を実施し、6つの主要なO&Mユースケースを特定している。これらの6つの主要なO&Mユースケースのプロセス改善に、高度なデジタルツールがどれくらい影響を与えるかの調査結果を図7に示す。

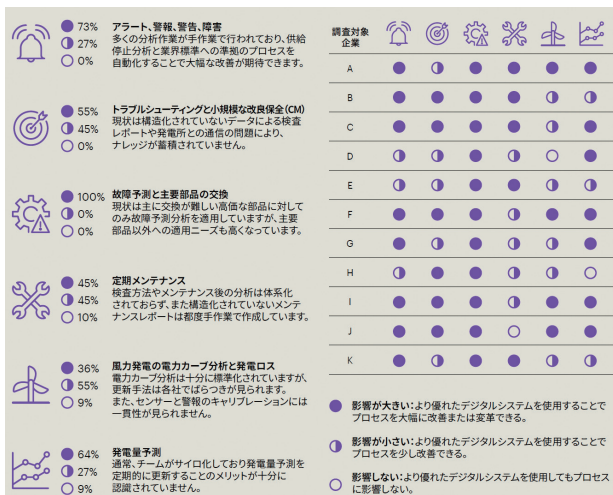


図 7 高度なデジタル技術が主要な O&M ユースケースに与える影響度合いと調査対象企業の評価の内訳<sup>15)</sup>

この 6 つの主要な O&M ユースケースのうち 3 つが状態監視と関係している。そして、これらの 3 つに対する高度なデジタルツール適用による改善への期待は非常に高いとしている。以下では、これらのうちの 3 つについて個別に概要を述べてみる。

- ・アラート、警報、警告、障害：警報や障害のタイプを分析して、機器の状態分析、作業の優先順位付けなどのトレンドとパターンを把握し、応答時間に関するガイドラインに反映して発電量とコストの損失を最小限に抑える。制御室は警報や警告を監視し対応を決定、性能技術チームは警報と障害の原因と関連性を掌握、そしてアセット管理チームと O&M チームはフォローアップアクションを特定して対応の優先順位を決定する。
- ・トラブルシューティングと小規模な改良保全 (CM)：ダウンタイム低減と発電量の増加のため、インシデントをリモートまたはオンサイトで調査し、修理を行うプロセス。運用チームが、発電所の性能を監視して通知されたインシデントをリモートで調査し、作業指示に基づきフィールド検査の調整とその後のアクティビティを処理。
- ・故障予測と主要部品の交換：状態監視ツールとアルゴリズムを使用し、事前に指定した期間内の主要部品の故障リスクを把握。最適なタイミングの主要部品交換プロセスを確立し、ダウンタイムとメンテナンス活動を減らし、結果としてコスト削減と発電量増加を達成。

さらに本調査では上記を改めて総合的に分析し、O&M におけるデジタル技術の現在の役割、可能性、課題に関連する下記の重要な所見を明らかにしている<sup>15)16)</sup>。

- ・ほとんどの調査対象企業は、故障予測、アラートや警報、トラブルシューティングにおいてデジタル技術が重要な役割を果たすと考えている。すべての企業が適切な力

スタムビルドソリューションを導入しており、その多くがさらなる機能を開発したいと考えている。その点で、サードパーティ企業には、発電事業者が現在の環境でも実践可能な O&M のインサイトのサービス提供というビジネスチャンスが生まれている。

- ・O&M プロセス全体において、あらゆるデータを統合することで分析に豊富なコンテキストが加わって付加価値を生み出すことができる。しかし現状は、データの品質が低く、データエンジニアリングスキルも不足しているため、実現している企業はほとんどない。
- ・多くの企業が O&M プロセス改善のために、警報応答やサービス記録などの過去の活動と情報を活用した学習に意欲はある。しかし、現実にはそのための時間と簡単に扱えるデジタルツールの両方の不足により実践が難しい。
- ・データについては、オーナー、発電事業者、OEM (あるいは O&M サービス事業者) などのデータ所有者は、データとそこから導き出されるインサイトの共有に消極的である。そのため、サードパーティ企業はデータの所有権を明確に定義してソフトウェアやツールを共同で開発するためのパートナーシップモデルを検討し提供する必要がある。

今後は、上記の認識を元に高度なデジタル技術を活用し、データをうまく共有する仕組みが工夫して構築され、風力発電の O&M プロセスに対する生産性の向上とコスト削減の実現が急速かつグローバルに進められていく。その点において、状態監視と診断は重要な役割をもつ。

### 5.3 日本における風力発電の状態監視と診断の動向 (NEDO 報告書より)<sup>17)</sup>

日本においては、NEDO が数年前に風車の状態監視と診断について「風力等自然エネルギー技術研究開発、風力発電高度実用化研究開発、スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予測等)」<sup>17)</sup> として研究成果をまとめて報告している。ここでは、その概要を簡単に紹介する。

図 8 に基本的な風車の機器構成例を示す。本報告書では、高効率な回転系 (ドライブトレイン、制御機器) と非回転系 (タワー等) に係るメンテナンス手法の開発に資するために、既設風車の故障事故データの収集、発生状況・要因等の分析及びメンテナンス手法の分析を行うとともに、国内外の既設風車のメンテナンス手法及び故障事故の対応策等を整理し、まとめている。

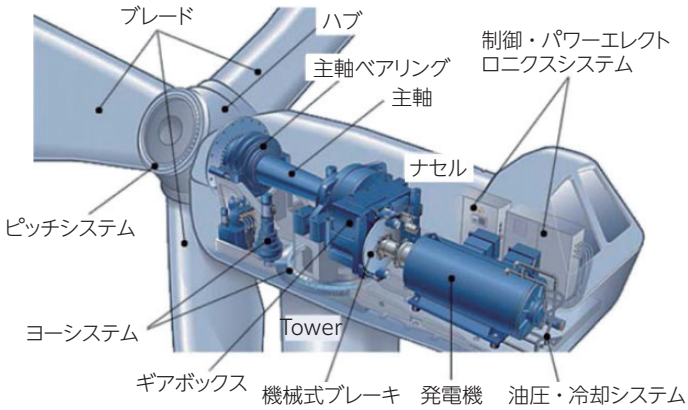


図8 風車の機器構成例<sup>17)</sup>

図9に調査協力風車に関する故障・事故発生率の推移(平成24年頃から調査方法が落ち着き、ほぼ一定値で推移)を示す<sup>17)</sup>。この結果のうちの平成28年度における故障・事故発生要因内訳を表4に示す。状態監視と診断関係の要因としては、「人的要因」の「メンテ不備」(6.1%)が比較的多い。同表を過去の調査と比べると、状態監視と診断関係「原因不明・その他」の「その他」の増加が著しい。この「その他」は主に経年劣化と報告されたものが多く、近年は同様の傾向が続いており、一定年数を経た風車の劣化による故障・事故の増加を示している。

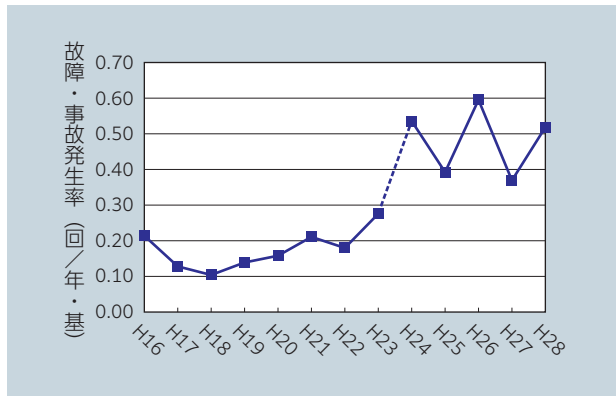


図9 風車の故障・事故発生率の推移<sup>17)</sup>

表4 故障・事故発生要因内訳(平成28年度)<sup>17)</sup>

故障事故要因	要因内訳	発生回数	構成率
自然現象	暴風	0	0.0%
	落雷	34	9.1%
	乱流	19	5.1%
	低温・凍結	0	0.0%
	浸水	7	1.9%
	その他	12	3.2%
風車内故障	設計不良	3	0.8%
	製造不良	17	4.5%
	施工不良	13	3.5%
人的要因	メンテ不備	23	6.1%
系統故障	系統故障	17	4.5%
原因不明 その他	調査中	6	1.6%
	特定できず	108	28.9%
	その他*	115	30.7%
計		374	100%

\*「原因不明・その他」の「その他」はおもに「経年劣化」と報告されたもの

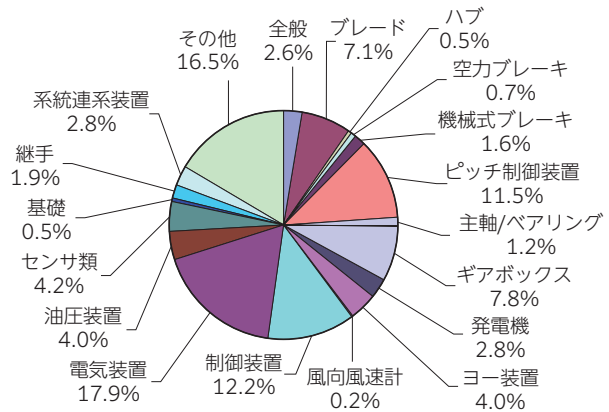


図10 風車の故障・事故発生部位別集計(平成28年度)<sup>17)</sup>

図10に風車の故障・事故発生部位別集計(平成28年度)を示す。「電気装置」(17.9%)、「その他」(16.5%)、「制御装置」(12.2%)、「ピッチ制御装置」(11.5%)が多い。運転期間別の評価では、「10年以上」の風車では「ブレード」「ピッチ制御装置」「ギアボックス」「制御装置」「電気装置」の故障件数の比率が相対的に高い。そして、運転期間が長いほど故障が多くなる傾向を示す部位がほとんどであった。なお、過去の調査結果では、「ピッチ制御装置」「ギアボックス」「ヨー装置」等の機械的な駆動機構を有する部位は運転期間が長いと発生件数が多くなる傾向があるのに対して、「ブレード」「発電機」「電気装置」「制御装置」では運転期間によらず故障・事故が発生する傾向があった。この理由として、前者は機械的な疲労(乱流による影響含む)



が主要因、後者は落雷に起因するものが多いことが一因と考察している。なお、この NEDO 報告書においてもデータ所有者がデータの共有に積極的ではないことについて記載されており、このような傾向は前節で述べた欧州における状況と同じである。また、世界的に風車の O&M に従事可能な技術者の深刻な不足が報告されている。

## 5.4 風車の状態監視技術<sup>17)</sup>

### 5.4.1 SCADA と風車 CMS

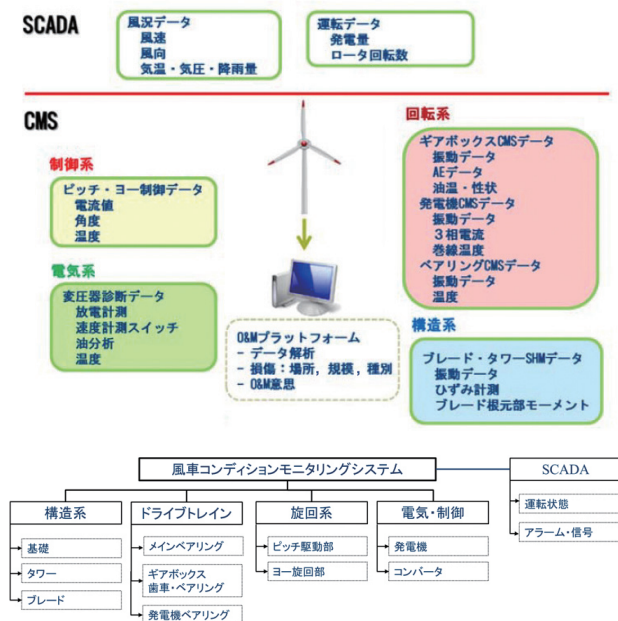


図 11 風車の SCADA と状態監視 (CMS) システム<sup>17)</sup>

図 11 に風車の運転・制御に関する根幹システムである SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) と状態監視 (CMS) システムを示す。実際の CMS と SCADA の関係は統合化したイメージで整理され、SCADA で得られる運転諸データは CMS で収集する各装置の動作状況のデータとともに風車コンポーネント・装置の状態の評価には欠かせない。風車の CMS の必要性として、風車の主要コンポーネントであるギアボックス、発電機及びコンバータの故障率は他産業で使用される同種・同容量のものと比較して明らかに高いと報告されている。風車では風況により出力が変動するとともに、乱流やブレードの位置・変形等の影響から荷重が常に変動する。高出力化・大型化傾向にある風車では、これら荷重変動に加え、設備コンポーネントの軽量化によって故障の発生確率の上昇や疲労を加速しうる環境にある。そのため、設備の状態 (負荷及び応答値) を常時監視して異常を早期に見出し、対応すること (状態基準保全: Condition Based Maintenance の適用)、またデジタル技術を併用して負荷変動による設備への影響を評価・予測し、運転・保守に事前の対策を講じる (余寿命評価) ことが重要である。

### 5.4.2 風車の CMS 技術

風車の故障モードと診断技術の対応を図 12 に示す。このように風車の CMS に適用される監視技術は既存の状態監視技術を踏襲し、展開したものであるのがほとんどである。風車 CMS の特徴は、遠方でかつ多数の風車の運転・保守管理をしなければならない点から、オンラインモニタリングの必要性が高い点である。オンラインモニタリングと診断有効性の観点から現状の風車 CMS における検知技術の対応を調査した結果を表 5 に示す。このように風車用として特殊に新たな CMS 技術の開発・適用は必要ではないが、事例が少ない中、オンラインモニタリングで適格な故障診断をすることに風車 CMS のハードルの高さがある。

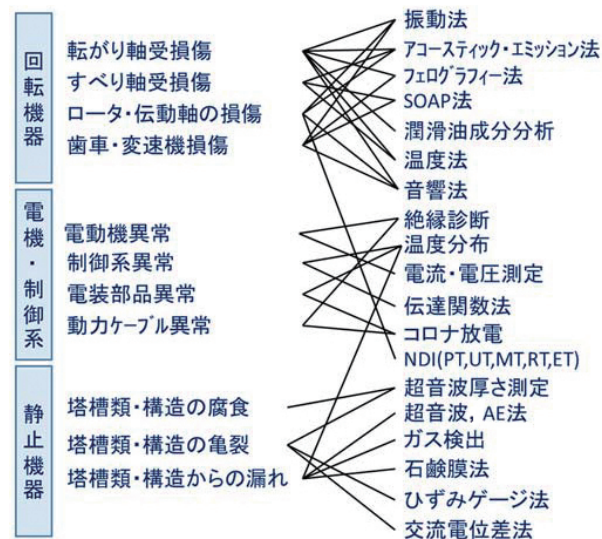


図 12 風車の CMS に用いられた一般プラントにおける故障モードと適用される状態監視技術<sup>17)</sup>

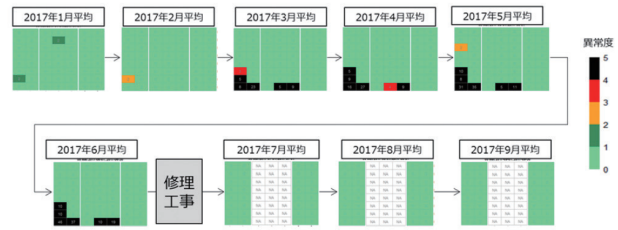
### 5.4.3 風車用主軸受の状態監視と予測

風車の主軸受は低速条件下で使用され、損傷に起因する振動自体が小さい。室内試験であれば極初期の損傷であっても振動レベルの変化を捉えることは可能であるが、実機風車では主軸受の重度損傷に相当するレベルの振動が周辺機器で生じており、周辺から伝達されるこの振動が主軸受の損傷検知を困難にさせている。この外乱振動を抑えることによる SN 比の向上が、主軸受の損傷検知における課題である。この課題に対して、本報告書<sup>17)</sup>では物理的手法である周波数帯域分割と統計的手法である機械学習アルゴリズムを高度に融合させた検出法を開発している。そして、図 13 に示すように、同手法を用いて主軸受の初期損傷を適正に検出・診断できることを実証している。

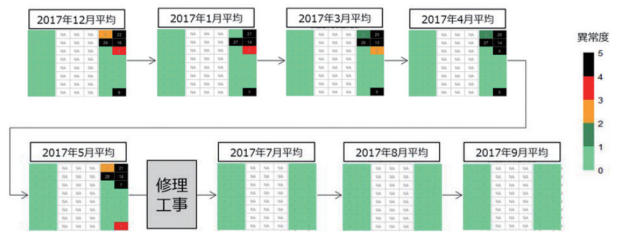
表 5 風車の異常検知技術と対象部位、特徴<sup>17)</sup>

No	CM技術	コスト	オンラインCM	故障診断	実績	風車コンポーネント
1	熱電対	低	○	×	使用中	ベアリング 発電機 コンバータ ナセル 変圧器
2	パーティクルカウンタ法	低	○	×	使用中	ギアボックス ベアリング
3	振動解析	低	○	○	使用中	主軸 主軸ベアリング ギアボックス 発電機 ナセル タワー 基礎
4	超音波探査	低 to 中	○	×	試験中	タワー ブレード
5	電氣的信号 (例:放電測定)	低	○	×	使用中	発電機
6	振動音響解析	中	○	×	×	ブレード 主軸ベアリング ギアボックス 発電機
7	潤滑油成分分析法	中～高	×	○	×	ギアボックス ベアリング
8	アコースティックエミッション	高	○	×	×	ブレード 主軸ベアリング ギアボックス 発電機 タワー
9	捻り振動 (エンコーダベース)	低	○	×	試験中	主軸 ギアボックス
10	光ファイバーひずみゲージ	極高	○	×	使用中	ブレード
11	サーモグラフィー	極高	○	×	×	ブレード 主軸 主軸ベアリング ギアボックス 発電機 コンバータ ナセル 変圧器
12	軸トルク計測	極高	○	×	試験中	ブレード 主軸 主軸ベアリング
13	ショックパルス手法	低	○	×	×	ベアリング ギアボックス

同報告書<sup>17)</sup>ではさらに風車主軸受の余寿命予測方法の構築も試みている。そして、ウェイク（流れの中におかれた物体の下流に生じる主流よりも速度の小さな領域）の影響を反映する等価風車間距離と荷重係数との関係式を提案することにより、表 6 に示すように定格寿命を評価することが可能であることを示している。



(a) 20号機のモデルで5号機を診断した結果



(b) 5号機のモデルで4号機を診断した結果

図 13 風車の主軸受の損傷検知<sup>17)</sup>

表 6 定格寿命の予測と実績比較<sup>17)</sup>

風車	定格寿命実績(年)	等価風車間距離(km)	荷重係数	定格寿命予測値(年)
4号機	16	0.3	1.55	14
5号機	17	0.3	1.51	16
19号機	10	0.2	1.72	9
20号機	8	0.2	1.75	8

#### 5.4.4 風車タワーの異常検知

2013年3月12日、太鼓山風力発電所3号機の風車支持物タワー頂上において、フランジ直下のタワー筒身の疲労破壊による風車ナセル落下事故が発生した。事故調査により、疲労破壊の原因は、タワー頂上フランジに設置されているタワートップボルトの損傷によるタワー筒身への応力集中であることが明らかになった。類似の事故として、2009年のスウェーデン Falkenberg で発生したブレード脱落事故、2015年12月に発生したスウェーデンの Vetlanda 市南の Lemnhult 風力発電所の事故、そして2016年10月の米国ハワイ州マウイ島南岸 Ulupalakua Ranch にある Auwahi 風力発電所における倒壊事故が挙げられており、風車における特徴的な異常発生である。なお、太鼓山風力発電所における落下事故において、事故前の定期点検では異常が検出されておらず、短期で疲労破壊に至った。この事故を受けて、早期のタワートップボルトの異常検出及び軸力評価方法が開発された<sup>17)</sup>。異常ボルト検出手法には多変量解析手法の一種である MT システム (Maharonobis-Taguchi) T 法 (3) が用いられた。ひずみの変化量の 2 階微分量を用いた解析結果を図 14

に示す。トルクが 680 N・m の時は閾値以上となりボルトの異常・正常を判断することができたこと、またロータ方位変化（-45°から 45°）に対しても判断の精度が確保できることが示された。

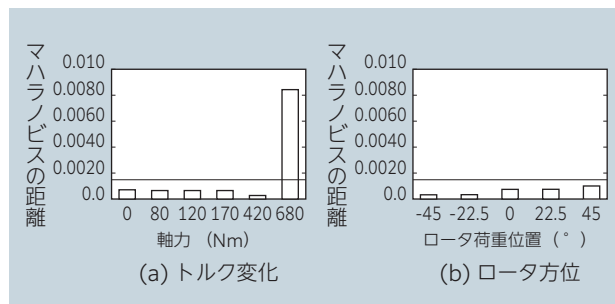


図 14 マハラノビス距離による風車タワートップボルトの早期異常検出法<sup>17)</sup>

#### 5.4.5 風車 CMS の規格例<sup>17)18)</sup>

風車 CMS の規格を、GL (Germanischer Lloyd) が発行した Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines Edition 2013<sup>18)</sup> を例として紹介する。風車 CMS の適用範囲・対象として、まずは主にドライブトレイン、主軸受、ギアボックス、発電機を挙げており、これに加えて、タワー、ブレード、主軸受、ギアボックスの潤滑油、基礎部等も対象としている。風力発電設備の監視データとしては、荷重（発電量またはトルク）、軸の回転数、ナセル内温度、軸受温度、発電機の巻線温度、油温および油圧等を挙げている。他に環境データとして、風速、風向、外気温等を入手可能な場合には計測することも要求している。

文献<sup>18)</sup> の Table4.1 では、風車 CMS のための必要センサ数が示されている。ギアボックスを備える風力発電設備のドライブトレインの振動状態監視には最低 6 つのセンサを搭載する必要があるとしている。また、要求される周波数帯域はかなり低速から広範囲であることが示されている。文献<sup>18)</sup> の Table4.2 には、風車 CMS で各センサより取得された信号を利用する手法一覧が示されている。周波数や振動様式、対応する異常モードに対応するために、部位ごとに様々な分析手法の適用を要求している。

## 6. 予知保全と IoT<sup>19)</sup>

ISO/TC 108/SC 5 国内委員会の委員を長年努められた迫氏が 2020 年にまとめた解説記事「予知保全の IoT 化について」から引用しつつ述べる<sup>19)</sup>。

### 6.1 予知保全 IoT システム構築のポイント

予知保全 (Predictive Maintenance) は、状態基準保全 (Condition Based Maintenance) あるいは状態監視保全 (Condition Monitoring Maintenance) とも呼ばれるものであり、診断技術を活用して設備・機器の状態を計測・監視し、その劣化程度を把握または予知し、適切なメンテナンス対応を取る保全方法である。この IoT 化のポイントとしては、

- ・異常検出を行うセンサの選定
- ・最適な信号処理方法、解析手法の選定
- ・情報収集方法の決定
- ・モニタリング方法の決定
- ・解析・診断の自動化

がある。

予知保全の IoT 化の推進のためには必要となるいくつかの開発項目がある。ここでは、その中で「設備状態の（定量値としての）見える化」を例にとって説明する。設備状態の（定量値としての）見える化を図る技術開発には、異常検出の対象設備の拡大、検出精度の向上、検出の効率化や容易化などがある。このためにはまず、監視対象の設備と異常モード、要求される予知レベル（リードタイム）、設備停止の困難さ、停止可能時期の明確化が重要となる。同時に、計測に関しても、計測位置や利用可能なセンサタイプを明確化する必要がある。

手順として、ラボテストによる異常検出が可能なセンシング方法の見極めと、同方法を用いたフィールドテストによる評価指標や良否判定のためのしきい値決定が示されている。迫らがこれまで開発した診断技術の回転機器への適用状況を表 7 に示す<sup>19)</sup>。広範な対象に対して網羅的に診断技術が示されている。

迫は文献<sup>19)</sup> でさらに、予知保全の IoT 化に向けての転がり軸受の診断技術、すべり軸受の診断技術、そして電動機電流兆候解析 (MCSA) について詳細に解説している。ここではそのうち、「転がり軸受の診断技術」を取り上げて触れてみる。



6.2 予知保全のための転がり軸受の診断技術

転がり軸受の異常からは、図 15 に示すように様々な周波数領域の振動と音響が発生する<sup>19)</sup>。それは、振動や AE のような構造伝搬するものと音響として空中伝搬するものに大別され、音響はさらに、可聴音と 20 kHz を超える非可聴域音に分けられる。

6.2.1 振動法による診断<sup>19)</sup>

転がり軸受の異常診断に用いられる信号の 1 つは振動加速度である。これはさらに、10 k ~ 30 kHz の高周波数域と 1 k ~ 10 kHz の低周波数域の加速度に大別される。

現場における軸受の診断結果例を図 16 に示す。これは、深溝玉軸受 6310 の内輪部に隣接設備からの伝搬振動でフォールスプリネリングが発生した時の加速度スペクトルである。図 15 で高周波域加速度と示したゾーンの 14 KHz の周波数が発生しており、小さな傷でも高周波域の加速度で検出できた例である。

図 17 は軸受異常に至った 6 事例について高周波数域加速度値のトレンドを比較した結果である。正常状態の平均値を 1.0 とし、縦軸に正常値に対する倍率、横軸に状態が変化し始めた時期からの経過時間を示している。各軸受とも指数的な上昇カーブを示している。相対基準の注意 (4.0 倍) に至るまでに 3 ~ 6 カ月かかっており、異常 (8.0 倍) に至るまでには約 6 カ月を要している。各軸受ともほぼ 6 カ月以降で軸受交換を実施したところ小さなきずの発生を確認している。なお、各軸受の劣化スピードがばらついているのは、潤滑条件や軸受荷重の差異が関係していると説明されている。

この状態から劣化が進行すると、高周波域加速度の他に 2 k ~ 3 kHz の低周波域加速度スペクトルも発生するようになる。これは軸受外輪の固有振動数であり、進行した劣化に起因して起振力も大きくなり、軸受全体が加振されて固有振動数が発生すると説明されている。この低周波数域の加速度値トレンドも 4 事例について調べられており<sup>19)</sup>、図 17 の高周波数域と同様に指数的な上昇カーブを描き、変化を示してから約 1 ~ 3 カ月で軸受交換に至った。

さらに軸受の劣化が進むと、振動速度にまで変化が現れる。この速度値上昇が発生し軸受異常に至った 7 事例における速度値トレンドの比較も調べられており、高周波数域と同様に指数的な上昇カーブを示すがその変化は急激であると示されている。振動速度域が上昇し始めたらその約 1, 2 週間後には軸受交換を要するほどの末期的な劣化状態と言える<sup>19)</sup>。

このように軸受の余寿命予測は複数の周波数領域で行えるが、連続運転の停止が許されないような重要な設備では高周波数領域の加速度を用いたモニタリングが必須であろうとまとめられている。

表 7 回転機器への診断技術適用状況<sup>19)</sup>

機械要素	異常の種類 (例)	振動		潤滑油分析	温度	AE	音響		電流 (MCSA)	該当設備
		振動速度	振動加速度				可聴域	超音波		
中高速回転	疲労剥離	×	○	○	△	○	○	○	○	送風機、ポンプ、コンプレッサー、モーター etc.
	潤滑不良	×	○	○	○	○	○	○	○	
	摩耗	×	○	○	○	○	○	○	○	
	ゆるみ・ガタ	×	○	○	×	○	○	○	○	
	焼付き	×	○	○	○	○	○	○	○	
低速回転 (数100 rpm 以下)	疲労はく離	×	×	○	×	○	×	○		攪拌機、押出機、ロール、抄紙機 etc.
	潤滑不良	×	×	○	△	○	×	○		
	摩耗	×	×	○	×	○	×	○		
	ゆるみ・ガタ	×	×	×	×	○	×	○		
すべり軸受	焼付き	×	○:ケプストラム	○	○	△				タービン、コンプレッサー、ディーゼル機関 etc.
	ラビング	×	○:ケプストラム	○	○	△				
	疲労	×	○:ケプストラム	○	×	△				
	異物混入	×	○:ケプストラム	○	×	△				
	オイルホウール	○	×	×	×	×	×	×	×	
	オイルウィップ	○	×	×	×	×	×	×	×	
歯車	ピッチング	△	○	○	○	○	○	○	○	減速機、増速機 etc.
	スポーリング	△	○	○	○	○	○	○	○	
	スクラッチング	△	○	○	○	○	○	○	○	
	噛み合い異常	△	○	×	×	○	○	○	○	
カップリング	ミスアライメント	○	×	×	×	×	×	×	○	
ベルト	弛み	○	×	×	×	×	×	×	×	○
	張り過ぎ	×	×	×	△	×	×	×	○	
羽根	アンバランス	○	×	×	×	×	×	×	○	送風機、ポンプ etc.
	旋回失速	○	×	×	×	×	×	×		送風機
	サージング	○	×	×	×	×	×	×		送風機
	キャビテーション	×	○	×	×	○	○		○	ポンプ
	接触	×	○:ケプストラム	×	×	○	○	○	×	スクリーコンプレッサー
軸	曲がり	○	×	×	×	×	×	×		
	偏心	○	×	×	×	×	×	×		
備考		・AMD 速度判定基準	・AMD 転がり軸受判定基準	・インパクターモータのノイズ除去方法	・SOAP 法、フェログラフィ法	・サーモグラフィ	・非接触計測・動点装置 (LM ガイド etc.) への適用	・振動が計測しづらい機器 (キャンピングファン etc.) への適用・電源騒音での計測		

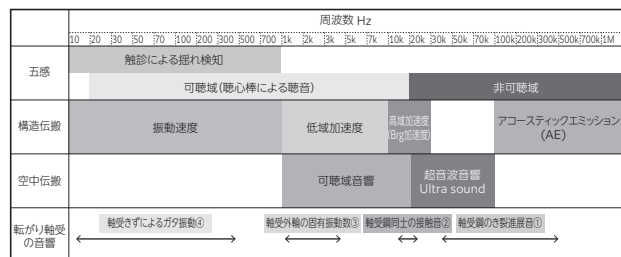


図 15 転がり軸受から発生する振動と音響<sup>19)</sup>



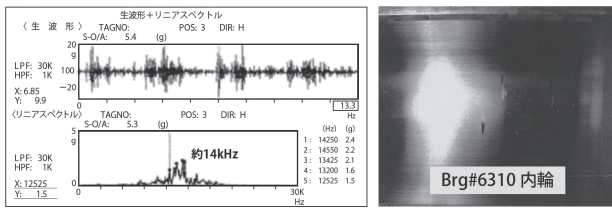


図 16 フォールスプリネリング時の加速度スペクトル<sup>19)</sup>

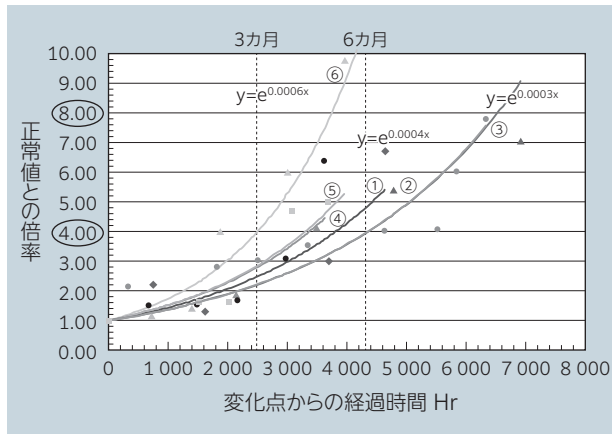


図 17 高周波数域加速度における軸受劣化カーブ<sup>19)</sup>

### 6.2.2 AE 法による診断<sup>19)</sup>

転がり軸受の異常早期検出としては AE 法が最も早い時期から異常を捉えることができる。回転数 750 rpm にて加速寿命試験を行ったときの結果を図 18 に示す。横軸は試験時間、縦軸は AE、振動加速度 (ACC) とともに事象率を示す。AE の方が図 17 で示した高周波数域の加速度よりも早期に転がり軸受の異常を捉えている。これは、疲労により軸受鋼の内部起点剥離から進展して軌道面の表面に剥離として現れていく中で、AE はき裂発生時期で発生するのに対し、加速度は軌道面に発生した剥離と転動体の衝突が始まってから発生しているためと説明している<sup>19)</sup>。油膜破断や圧痕による表面起点剥離の場合は、両者はほぼ同時に発生する。

図 19 に、剥離進展時とスリットきず時の AE スペクトルの比較を示す。剥離進展時の AE は 100 k ~ 500 kHz の周波数成分が顕著に現れているが、スリットきずでは 100 kHz 以上の成分はほとんど現れない。このように AE では早期の転がり軸受の異常モードの違いも捉えることができる。

また、AE 法は低速回転数領域でも優位性をもつ。軸受内径  $d$  (mm) と回転数  $N$  (rpm) の積 (dN 値) が  $2.0 \times 10^4$  以下のような低速回転数領域では振動加速度の衝撃信号レベルは低下しノイズレベルに埋もれてしまうため、正常と異常の判別が一般的には困難となる。それに対し、AE 法は回転数には無関係であるため有効な計測手法である。

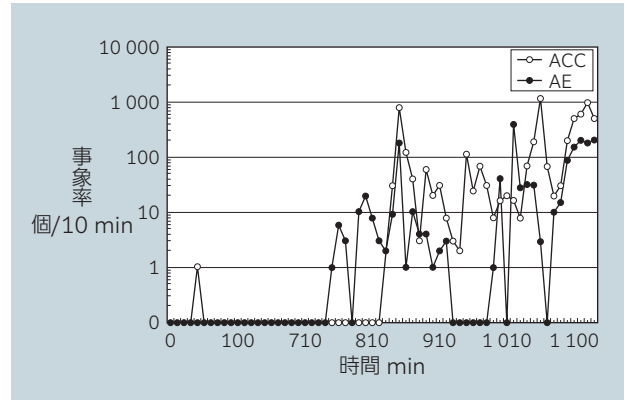


図 18 加速寿命試験結果と AE による診断<sup>19)</sup>

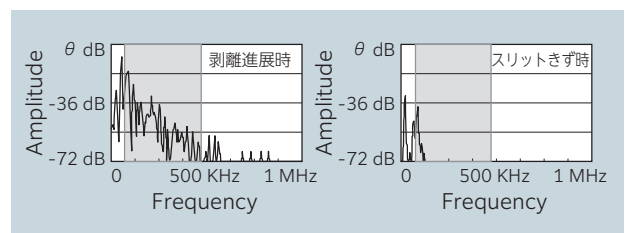


図 19 剥離進展時とスリットきず時の AE スペクトル<sup>19)</sup>

### 6.2.3 その他<sup>19)</sup>

AE 法では設備面とセンサ面の間には接触媒質を塗布する必要があり、設置面の凹凸や曲率の影響が大きいと安定した信号が得られにくいという難点があることを指摘している。迫らは、そのような難点から従来は診断が困難であった設備への適用を目的として、超音波マイクロフォンによる非接触検出方法を開発している。そして、20 k ~ 100 kHz 超音波音響を用いることにより、回転数 65 rpm の低速回転状態においても AE 法と同様に、軸受の剥離異常を検出できることを示した。この超音波音響法の適用状況として、溶剤ガス環境であることから接触媒質が流出するため AE が使用できない状況にあるロール支持軸受の転がり疲労剥離を検出している。また、その他にも、押出機本体の接触や減速機歯車のピッチング、攪拌機の軸受ガタなど低速回転機器の異常診断にも活用されていると述べている<sup>19)</sup>。

## 7. 1DCAE を活用した状態監視と診断の動向

日本国内で長年機械の状態監視と診断に取り組んできた国内第一人者である川合が、2022 年の日本機械学会機械力学・計測制御部門ニューズレターの巻頭記事で「物理モデルを用いた設備の診断手法について—デジタルツインへの展開」<sup>21)</sup>を紹介している。ここでは同氏がこれまでに長年取り組んできた設備診断に最近 1DCAE ソフトウェアを組み込んで取り組んできた経過をまとめている。ここで、1DCAE は近年急速に普及・発展している CAE 手法・ツールおよびその設計支援の考え方の総称である<sup>22)</sup>。対象の

本質を的確に捉え、見通しの良い形式でシンプルに表現でき、その評価・解析ができるため、製品開発の上流段階から適用が可能である。同資料では 1DCAE ソフトウェア（同資料では Modelica を用いている）で対象のシステムをモデル化することが設備診断にどのように役立つかを中心に説明されており、例として同氏がこれまで取り組んできたシステムおよび異常のモデル化事例（表 8）が示されている。

また、具体例として電磁ブレーキのモデルを示し、動力学、磁気回路、電気回路からなる複合的な物理現象が組み合わさった電磁ブレーキのような系でも 1DCAE ソフトウェアでは容易にモデル化できることが紹介されている（図 20）。ここでは、アーマチャの摩耗でプレートとのすきまが増加すること、その結果として現れる他の物理量への影響を多様かつ簡単にシミュレーションできることを解説している。図 21 は、同例においてすきま量が通電開始時の電流値の時間変化に与える影響を示したものであり、シミュレーションと実験結果は非常に良く一致していると述べている。このように、同氏は 1DCAE ソフトウェアでシステムおよび異常をモデル化することにより、システムに異常が起きた場合のシステムの挙動を容易に解析できると述べている。同資料は部門 Web サイトからフリーで入手可能であるので、興味がある方は見ていただきたい。

1DCAE ソフトウェアを用いた機械システムのモデリング例をいくつか示す。柏瀬ら<sup>23)</sup>はコンデンサモータを対象に磁気回路法でモデル化して 1DCAE ソフトウェア (Modelica) による解析を実施している。電動機モデルと回転軸モデルを接続した連成系（図 22）によって回転軸の振動や電源の電流を関係づけた連成シミュレーションを実施し（図 23）、より詳細な電動機の診断が可能となる見込みを得ている。

さらに柏瀬らは、プラント内で多く利用されている三相誘導電動機を対象に、磁気回路法を基に固定子や回転子、エアギャップなどを構成する基本モデルを構築し、さらに回転軸との連成可能なモデルを構築している<sup>24)</sup>。そして、電磁氣的挙動を FEM 解析と比較した検証により 1DCAE ソフトウェアを用いたモデルの妥当性を確認し、電動機診断へのシミュレーション適用に対する見込みを得たとしている。図 24 は各相の巻線電流であり、1DCAE モデル (Modelica) の脈動が大きくなっているが、全体の挙動が再現できていることが確認できたと報告している。

表 8 システムおよび異常のモデル化事例<sup>21)</sup>

対象システム	異常例
コントロールバルブ	かじり, センサーのオフセット
コンプレッサー	漏れ
コジェネシステム	効率低下, 目詰まり, デブリによる熱伝達率の低下
クランクシャフト	軸受のガタ
回転軸系	ロータの不釣り合い, 軸受さず, 軸受のガタ
カップリング	ミスアライメント, ミスカップリング
ジャーナル軸受	摩耗およびその進展(余寿命推定)
スクリーコンプレッサー	軸受のガタ, 漏れ
電磁ブレーキ	摩耗
歯車機構	歯車摩耗
3Dプリンター	冷却用のファンの故障(異常時の制御)

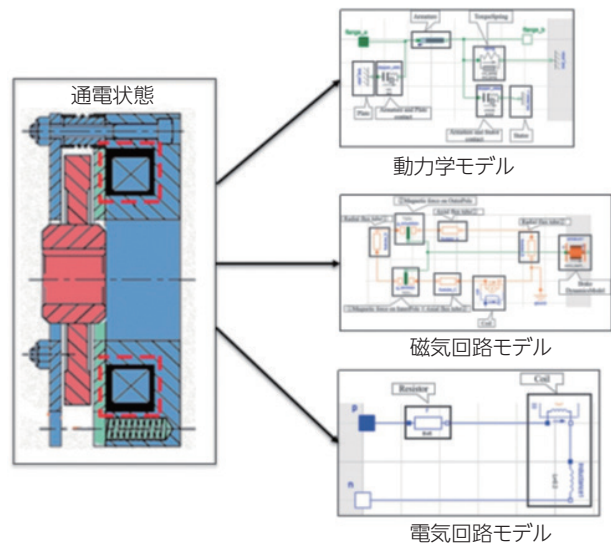


図 20 電磁ブレーキのモデル<sup>21)</sup>

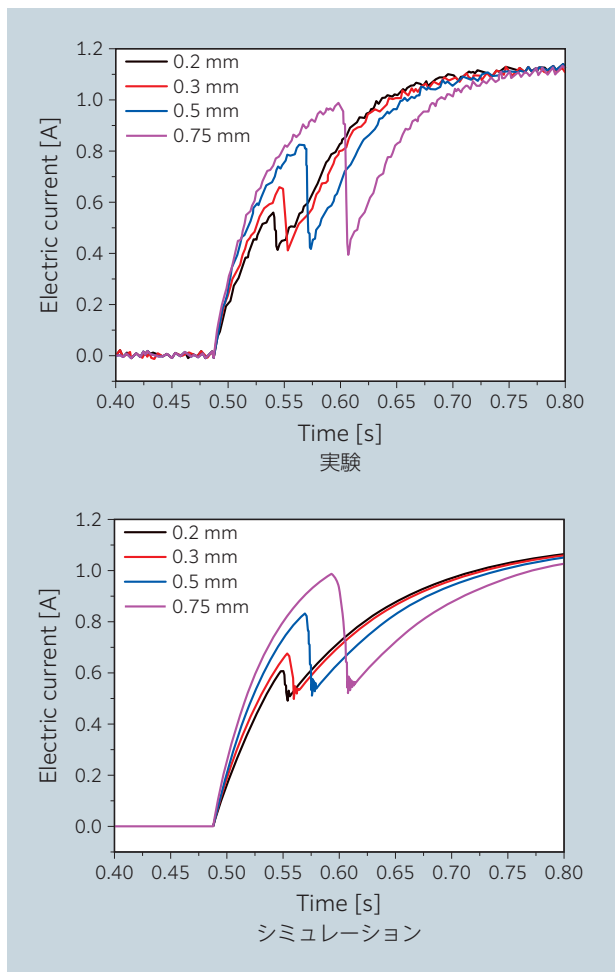


図 21 通電開始時の電流変化 (すきまの影響)<sup>21)</sup>

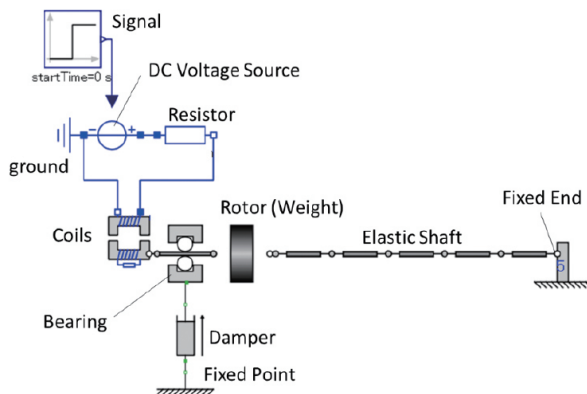


図 22 モータ・軸系の Modelica モデル<sup>23)</sup>

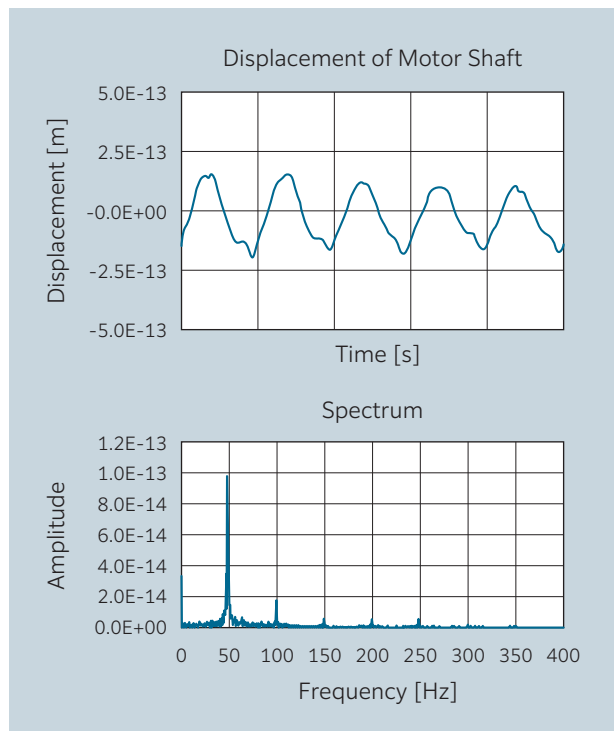


図 23 モータ・軸系の振動解析結果<sup>23)</sup>

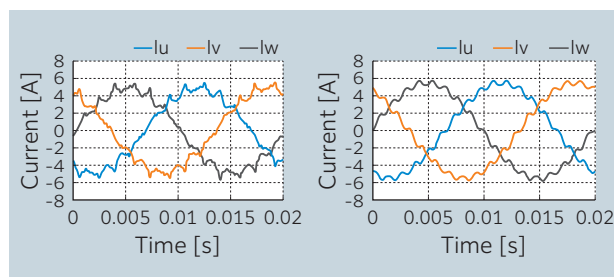


図 24 ステータ電流 (非正常) (1DCAE と FEM)<sup>24)</sup>

他にも、代表的な動力伝達機構である歯車対および歯車の歯面摩擦を 1DCAE ソフトウェア (Modelica) でモデル化し、歯面の摩擦によって歯車対の振動特性がどのように変化するかモデルを用いて推測するとともに実機による検証を行ったもの<sup>25)</sup>もある。

このような観点も含め、1DCAE ソフトウェアを用いた機械システムのモデリングは昨今非常に盛んに実施されている。2022 年度機械学会年次大会においても部門横断 OS が生まれ、様々な機械システムの 1DCAE モデリング成果が発表されるなど、近年盛んに活用されている。ここで挙げたように機械システムの状態監視と診断におけるモデリング手法として 1DCAE ソフトウェアの活用はさらに一層進むことが予想される。

8. 国内の軸受の状態監視と診断に関する研究動向

8.1 状態監視と診断に関する国内学術講演会

最後に、日本における同分野の研究動向を概観したい。日本においては、日本機械学会、日本非破壊検査協会、日本設備管理学会、日本トライボロジー学会などがこの分野が関係する代表的な学協会である。そして、これらの学協会が中心となって開催している学術講演会には、日本機械学会 機械力学・計測制御部門<sup>20)</sup>の部門講演会 Dynamics and Design Conference と、日本機械学会 機械力学・計測制御部門、日本設備管理学会・日本トライボロジー学会が共催で実施している評価・診断に関するシンポジウムなどがあり、毎年多数の状態監視と診断に関する研究成果が発表されている。

以下では、これらの学会における過去 1-2 年の記事・発表論文のうち、軸受に関するものを中心に紹介する。

8.2 AI を用いた診断技術の例

軸受の異常診断に関しては、最近 AI 技術を用いた知的・自動診断技術の研究が行われ、特に高い特徴抽出能力を備えたディープラーニング（深層学習）は設備診断分野でも注目されている。日本では前田らが AI を用いた軸受診断に取り組んでおり、最近、軸受診断のために測定した振動信号から統計情報フィルタによりノイズを除去した後、振動信号のスペクトルを 2 次配列（画像情報に相当）に変換して、深層学習の 1 種である畳み込みニューラルネットワーク（CNN）により特徴抽出と状態分類を自動的に行う方法を提案している<sup>26)</sup>。そして、様々な検証の結果、提案手法はノイズの多い環境下でも高い精度で軸受の自動診断が実現できると示している。

8.3 潤滑油膜の評価技術の例

竹田らは、潤滑油構成成分の違いが軸受寿命に与える影響について、スラスト玉軸受寿命試験機を用い、実際に試験片となるスラスト玉軸受が破損するまでの寿命時間を観測することで検証してきた。また、潤滑油膜可視化装置を用いた油膜観察では、新油と寿命試験において軸受損傷を起こした後の潤滑油の膜厚を観測することで、潤滑油の劣化が軸受の寿命に与える影響についても検証を進めてきた。そして最近、新たな油膜の評価方法の一つとして、ECR 観測回路を潤滑油膜可視化装置に取付け（図 25）、油膜状態の電氣的評価・観測を行い、その観測原理と結果を報告している<sup>27)</sup>。

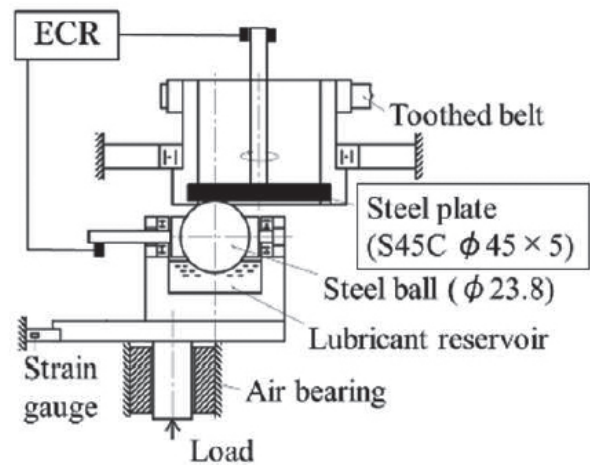


図 25 軸受の油膜状態の電氣的評価・観測装置<sup>27)</sup>

8.4 超音波・音響を用いた診断技術の例

軸受の状態監視に対する超音波エコー法について、若林らは油潤滑軸受を対象にして、超音波反射強度（Ultrasonic Reflection Intensity, URI）の時間変化に自己相関性による解析を適用した早期異常検出の検討を行い、その有用性を報告している。ここで、URI の波形が高い周期性をもつほど、軸受の転がり挙動は良好との判断になる。そして最近、グリース潤滑軸受（深溝玉軸受 6210）に対する超音波エコー法の適用性も調べ、URI の時間変化に対して自己相関性による解析を 2 回行うことで、運転中の軸受内部での転がり挙動や、実働状態における軌道面上でのグリースの排除や再補給といった挙動も検知できる可能性を示した。また、超音波エコー法によるグリース潤滑軸受の異常診断の場合にしばしば得られる信号とノイズの比（S/N 比）の低い URI における転がり挙動の周期性の抽出手法を検討し、自己相関性による複数回解析の改善手法として包括法と簡便法を考案し、それらが有効であることを明らかにしている（図 26）<sup>28)</sup>。

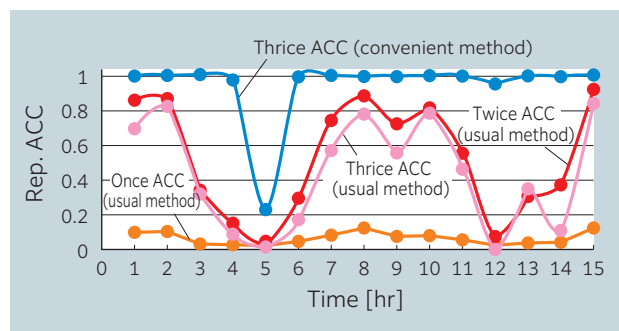


図 26 簡便法を用いた低 S/N 比の URI の解析による転がり挙動の周期性抽出の改善<sup>28)</sup>



軸受の高精度な音響診断法のために、高田は、新しい S/N 比向上手法を提案している。そして最近、本手法を転がり軸受の損傷検知に適用してその有効性を確認した<sup>29)</sup>。とくに一般的に診断困難とされている dN 値が低い運転条件に本手法を適用してその有効性を示している (図 27)。さらに、比較対象として適応信号処理法の一つである適応線スペクトル強調器 (Adaptive Line Enhancer) を用いた S/N 比向上手法を挙げ、比較して提案手法の有効性を示している。

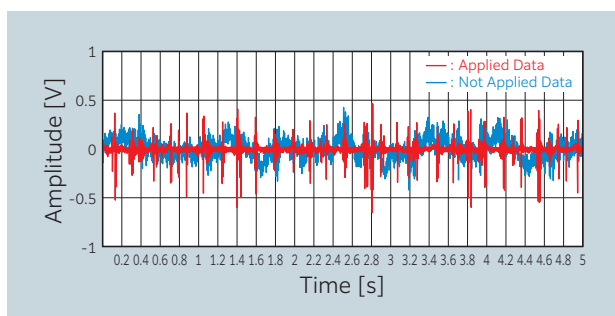


図 27 外輪損傷軸受の回転音測定値に提案手法とアンチエリアジングフィルタ (カットオフ周波数 40[kHz] のローパスフィルタ) を適用した時系列データ<sup>29)</sup>

### 8.5 初期損傷過程のデータ収集技術の例

従来の軸受の診断に関する研究では予め内輪や外輪に傷をつけて行われる場合が多い。一方で実際の軸受の状態診断では、やがては故障につながるごく初期の予兆段階で異常を発見することが求められる。井上らは、この点に着目し、正常状態から損傷が発生するまでの軸受データを時間効率よく集めることを目的とし、任意の周波数の変位を回転軸に与えることができる加振機構を加えた回転装置を作成し、深溝玉軸受を故障促進の対象として加振実験を行った<sup>30)</sup>。そして正常状態から初期欠陥が発生するまでの加速度データにより故障進展の評価を行い (図 28)、その後、切断分解検査により実際の軸受の損傷度合いを確認している。

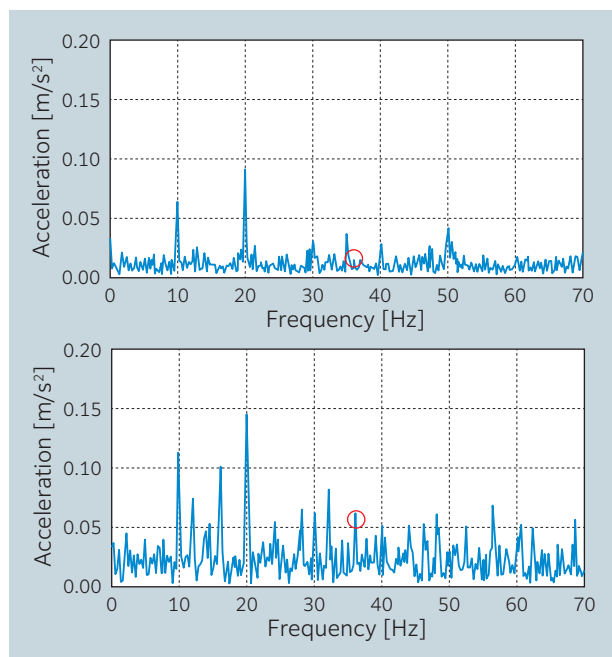


図 28 加速度信号のエンベロップスペクトル (上) 加振前、(下) 加振後<sup>30)</sup>

## 9. おわりに

今回、機械システムの状態監視と診断の動向と題して、まず著者が関係している ISO/TC 108/SC 5 機械システムの状態監視と診断の最近の活動状況と動向について述べた<sup>1)</sup>。もしこの内容について歴史的にさらに詳しく知りたい場合は、その時々々の TC 108/SC 5 国内委員会委員長がまとめてきた一連の文献<sup>31)-34)</sup>も参照されたい。軸受の状態監視と診断に関する国際標準化は、今後も個別機械における標準化に関連して、状態監視アセットマネジメントの標準化とともに継続的・発展的に進むと予想される。今後も関係者各位のご協力をお願いしたい。

つぎに、状態監視とアセットマネジメントについて IoT とも絡めつつ国内外の状況について述べた。この分野は状態監視と診断分野で今後最もグローバルな発展が予想される分野である。そして、風力発電事業における状態監視と診断と、予知保全の IoT 化について述べた。風力発電事業は国内でも大型の浮体式洋上風車の設置が開始されるなどいよいよ本格的に発展が始まっており、その状態監視技術はデジタルツインと絡んで進められつつある。これらの分野の国内における発展を期待したい。

さらに、著者が注目する点として、上記デジタルツインを用いた状態監視技術に絡み、1DCAE による対象機械のモデル化を用いた状態監視と診断の動向を述べた。この分野も国内で盛んに研究が進められており、今後の動向に注目したい。

最後に、国内同分野の軸受の状態監視と診断に関する研究発表動向を述べた。最近の学会講演会の予稿集は極

端に短くなる傾向にあり、実際に学会に足を運んで生の発表を聞く必要がでてきている。新型コロナウイルス感染症の対策・対応により学会のオンライン化・対面とのハイブリッド化が進んでいるので、ぜひ皆様にも学会に足を運び、最新の動向調査や様々な分野の研究者・技術者との活発な交流が再開されることを願っている。

以上、著者の興味・関心がある方向で機械システムの状態監視と診断の動向を紹介したが、参考になれば幸いである。なお、本稿作成に際し、前半部分<sup>1)</sup>について転載許可を頂いた日本非破壊検査協会、後半部分について情報を提供頂いた ISO/TC 108/SC 5 委員会メンバーで元(株)東芝の榎田均氏、(株)JERAの石光桂太氏、元旭化成(株)の迫孝司氏、(公社)日本プラントメンテナンス協会、そして大阪公立大の川合忠雄教授に謝意を表する。

### 参考文献

- 1) 井上剛志, 兵藤行志, 機械状態監視診断の ISO 規格に関する ISO/TC 108/SC 5 の経緯と現状 (状態監視診断技術の動向 特集号), 非破壊検査, Vol.69, No.9 Sep, (2020) 442-448.
- 2) ISO/TC 108/SC 5 Condition monitoring and diagnostics of machine systems Web サイト, <https://www.iso.org/committee/51538.html>
- 3) 一般社団法人日本機械学会 機械状態監視資格認証事業 (振動, トライボロジー) <https://www.jsme.or.jp/jotaiweb/>
- 4) 一般社団法人日本非破壊検査協会 機械状態監視診断技術者 (サーモグラフィ) 認証制度 <http://www.jsndi.jp/qualification/index12n.html>
- 5) 井上剛志・兵藤行志編著, 日本機械学会編, 機械システムの状態監視と診断技術, コロナ社, 2021
- 6) 川合忠雄, 続々 IoT 時代における設備診断, 潤滑経済, 685号, (2022) 26-29.
- 7) GAIA-X とは何か, GAFAM も巻き込む欧州のクラウド・データインフラ構想, Fintech Journal, SB Creative, 2021/04 <https://www.sbbt.jp/article/cont1/56622>
- 8) 「GAIA-X(ガイア-エックス)とカテナ-Xの衝撃 データ連携による巨大なエコシステムの台頭」～製造業の DX: サービタイゼーション推進のために～, 野村総合研究所 コラム, 2022/07 [https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727\\_1](https://www.nri.com/jp/knowledge/blog/1st/2022/iis/fujino/0727_1)
- 9) Applying the Internet of Things to manufacturing 8 IoT use cases to boost ROI (製造業への IoT (モノのインターネット) 導入, ROI を向上させる 8 つの IoT ユースケース), シーメンス Web サイト <https://resources.sw.siemens.com/ja-JP/e-book-8-industrial-iiot-use-cases-for-manufacturing-2>
- 10) COMADEM (Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management) <http://www.comadem.com/>
- 11) 日本プラントメンテナンス協会 協会案内資料
- 12) 戦略的保全マネジメントシステム (MOSMS), 日本プラントメンテナンス協会 <https://www.jipm.or.jp/report/?ca=1>
- 13) 経営のための保全学, 日本プラントメンテナンス協会
- 14) 「現場力」と「保全経営力」のハイブリッド, MOSMS [MOSMS] の活用, 日本プラントメンテナンス協会, 2008
- 15) 風力発電事業におけるデジタル技術活用調査, 英国 The Offshore Renewable Energy(ORE) との共同調査, アクセンチュア and ORE カタパルト [https://www.accenture.com/\\_acnmedia/PDF-151/Accenture-210164-ORE-WindCatapult-POV-LCS-JP.pdf](https://www.accenture.com/_acnmedia/PDF-151/Accenture-210164-ORE-WindCatapult-POV-LCS-JP.pdf)
- 16) 海外事例に学ぶ風力発電でのデジタル技術活用, 風力発電/地域産業育成とデジタル技術の活用 (オンラインセミナー), アクセンチュア, 2022年5月13日
- 17) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 25 年度～平成 29 年度成果報告書, 風力等自然エネルギー技術研究開発, 風力発電高度実用化研究開発, スマートメンテナンス技術研究開発 (分析) (疲労予測等), 平成 30 年 2 月
- 18) Serice Specification DNVGL-SE-0439, Certification of Condition Monitoring, DNV・GL (2016), GL (Germanischer Lloyd)
- 19) 迫孝司, 予知保全の IoT 化について, プラントエンジニア = Plant engineer : 新世代エンジニアのための技術 & 情報マガジン, 日本プラントメンテナンス協会, 52-4, (2020) 32-45.
- 20) 日本機械学会機械力学・計測制御部門 Web ページ <https://www.jsme.or.jp/dmc/>
- 21) 川合忠雄, 物理モデルを用いた設備の診断手法について—デジタルツインへの展開, 一般社団法人日本機械学会機械力学・計測制御部門ニュースレター No.70 (2022年7月) (部門 Web サイトから入手可能)
- 22) 大富浩一, 羽藤武宏, 1DCAE によるものづくりの革新, 東芝レビュー Vol67. No.7, (2012)
- 23) 柏瀬翔一, 尾崎健司, 「電動機のモデルベース診断手法の開発」, Dynamics and Design Conference 2021, 2021年9月, 442

- 
- 24) 柏瀬翔一, 尾崎健司, 牧野宏明, 電動機のモデルベース診断手法の開発, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 208, 2021
  - 25) 川合忠雄, 山本佳弘, 石橋達朗, 物理モデルを用いた歯車の状態推定, Dynamics and Design Conference 2022, 2022 年 9 月, 239
  - 26) 前田凌河, 唐海紅, 陳山鵬, 森圭史, 米倉雄治, 統計情報フィルタおよびディープラーニングによる軸受の知的状態診断法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 106, 2021
  - 27) 竹田雄祐, 里永憲昭, 狩野将矢, 渡邊孝司, 園田智之, 電氣的接触抵抗法を用いた油膜状態の評価観測手法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 210, 2021
  - 28) 若林利明, 中津貴裕, 山崎英樹, グリース潤滑軸受の異常診断に対する超音波エコー法の適用—転がり拳動の周期性の検出手法—, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 211, 2021
  - 29) 高田寛大, 太田博光, 宮崎修治, 松尾大輔, 大森未来, 清水慧, 低速回転転がり軸受の高精度音響診断法, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 202, 2021
  - 30) 井上祐人, 井上剛志, 転がり軸受の故障促進制御, 第 19 回評価・診断に関するシンポジウム, 203, 2021
  - 31) 榊田均, 岩壺卓三, 機械の状態監視と診断に関する国際規格の動向, 第 1 回 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, (2002) 32-36.
  - 32) 榊田均, 機械の状態監視と診断に関する国際規格の現状と動向, 第 5 回 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, (2006) 7-11.
  - 33) 榊田均, 機械の状態監視と診断に関する ISO 国際規格の現状と動向, 日本機械学会機械力学部門ニューズレター, (2007) 1.
  - 34) 井上剛志, 機械の状態監視と診断に関する ISO/TC 108/SC 5 国際規格の現状と動向, ターボ機械 39(5), (2011) 304-312.



< 著者紹介 >

**井上 剛志** (いのうえ つよし)

名古屋大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 教授

学歴, 職歴

1993 年	名古屋大学大学院工学研究科電子機械工学専攻 修士課程 修了
1993 年～ 1995 年	オークマ株式会社
1995 年～ 2001 年	名古屋大学工学部 助手
2000 年	博士 (工学) (名古屋大学)
2001 年～ 2005 年	名古屋大学大学院工学研究科 講師
2004 年～ 2012 年	ISO / TC108 / SC5 国内委員会 幹事
2005 年～ 2012 年	名古屋大学大学院工学研究科 助教授 (2007 年より 准教授に呼称換え)
2012 年～現在	名古屋大学大学院工学研究科 教授
2012 年～現在	ISO / TC108 / SC5 国内委員会 委員長
2013 年～現在	マルチボディダイナミクス協議会 会長
2017 年～現在	ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics Associate Editor
2018 年～現在	名古屋大学工学部・工学研究科 創造工学センター長
2018 年～現在	ターボ機械協会 代議員
2021 年～現在	日本機械学会 標準事業委員会 副委員長
2022 年	日本機械学会 機械力学・計測制御部門 部門長

**【専門分野】**

- ・機械力学, 振動工学, 非線形力学, 制振
- ・特に非線形性に起因する振動現象の説明とその利用

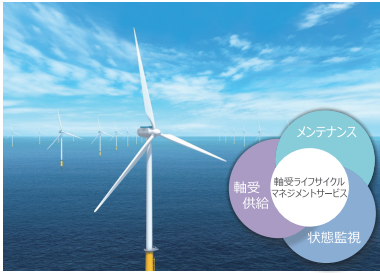
**【所属学会】**

日本機械学会, ターボ機械協会, 日本設計工学会,  
日本トライボロジー学会, ASME

**【主な受賞・表彰】**

2000 年度	日本機械学会 日本機械学会賞 研究奨励賞
2006 年度	日本機械学会 機械力学・計測制御部門 部門貢献賞
平成 25 (2013) 年度	ターボ機械協会賞 (技術賞)
平成 28 (2016) 年度	ターボ機械協会賞 (論文賞)
平成 30 (2018) 年度	日本機械学会東海支部 プロジェクト賞
令和元 (2019) 年度	ターボ機械協会賞 (論文賞)
令和 2 (2020) 年度	日本機械学会東海支部功労賞
令和 2 (2020) 年度	日本工学教育協会 第 25 回工学教育賞
令和 3 (2021) 年度	ターボ機械協会賞 (論文賞)
令和 4 (2022) 年度	日本機械学会賞 (論文) 2 件
令和 4 (2022) 年度	日本機械学会標準事業表彰貢献賞

## NTN のサービス・ソリューション事業の取り組み Efforts for Service & Solution Business in NTN



紅林 博行\* Hiroyuki KUREBAYASHI

転がり軸受は人間の活動を支える様々な設備に組み込まれる機械要素部品である。機械部品の不具合による設備の停止は利益の逸失となり、不具合の未然防止のために軸受周辺の温度や振動のモニタリングが重要である。NTN では軸受とセンシング機能を融合させたセンサ付軸受を開発するとともに、軸受の状態監視サービスの提供にも取り組んでいる。センシングした情報から、お客様の困りごとと解決に有益なサービスとソリューションを提供していく。

Rolling bearings are fundamental mechanical parts working in various equipment that support our life activities. The failures on mechanical parts in the industrial equipment cause a stop of the equipment and induce a considerable amount of profit loss. It is important to monitor the condition of temperature or vibration around the bearings, in order to prevent the unexpected stop of the equipment. NTN develops bearings with sensing functions and provides condition monitoring service of the bearings. We are willing to provide the service & solution, which is valuable to solve the customer's problems by using the sensing data.

### 1. はじめに

現代社会の豊かな生活は回転機構を持つ機械設備に支えられている。自動車や鉄道などの輸送機械、空調設備や家電機器、それらを製造する機械設備の多くは回転機構を備えている。これら回転機構における主要な部品の一つとして転がり軸受（以下、軸受）があり、回転軸を支持してなめらかに回転し、長期間安定動作することが求められる。軸受の性能向上が継続して進められているが、それでも機械設備の故障の30%が軸受に起因すると言われている<sup>1)</sup>。

生産現場においては、機械部品の不具合による設備の停止は利益の逸失となるため、不具合の未然防止を目的とした軸受周辺の温度や振動のセンシングによる状態監視が重要である。また、自動車分野においても、自動運転の普及により所有から共有へとインフラ化が進むため、軸受の状態監視が必須になっていくと考えられる。

以上のように、軸受自体の技術開発（モノの提供）だけでなく、軸受をできるだけ長期間安定して使用方法の開発（コトの提供）も求められている。これに対し NTN では軸受技術を中心にモノとコトを合わせたソリューションを提案し、以下のような商品とサービスを提供している。

- ・センシング機能と軸受をユニット化した高機能商品（モノ）
- ・軸受の状態診断、適切な使用方法、交換時期等の情報をユーザに提供するサービス（コト）

ここでは、NTN が取り組むサービス・ソリューション事業について、その概要を紹介するとともに、今後の展望を

述べる。技術内容の詳細や対象商品については、個別の記事でも紹介されており、一部内容が重複することをご了承いただきたい。

### 2. 軸受周辺でのセンシング

NTN では、以下に示すニーズへの対応を目的に、軸受とセンシング機能を融合させたセンサ付軸受を開発している。

①軸受の多機能ユニット化

②機械設備・部品の信頼性向上と保全への対応

①は、モータやポンプなどの比較的小型の装置におけるニーズである。軸受にセンシング機能を組み込むことにより、省スペース化、組立て工数の削減、等の効果を提供するものである。軸受周辺のセンシング対象は回転速度、回転角度、荷重などであり、機器の運転制御などに使用される。

②は、長期連続稼働や安定運転が要求される大型設備などにおけるニーズである。軸受に組み込まれたセンサにより軸受の動作状態をセンシングし、損傷の有無など軸受の状態診断に関する情報を提供する。予期せぬトラブルを防止し、故障による停止時間を最小化することが目的である。軸受の状態を診断するには、温度、振動（音）、潤滑状態（油膜形成状態、グリース劣化状態、コンタミ混入状況）などのセンシングが必要となる。

生産設備やインフラ関連設備の突発停止は、事業者や社会に大きな影響を与える。そのため、「究極は壊れない軸受が欲しいのだが、せめて適切な交換時期を知りたい」といっ

\* 産業機械事業本部 副本部長

た要望が強い。NTN では故障の予知・検知を高い精度で実現する技術サービスを提供し、お客様の設備のトラブル防止や運用保全作業に役立ててもらおうことを目指している。

### 3. センサ付き軸受の実現例

#### 3.1 回転センサ付軸受

回転センサ付軸受は、**図 1** に示したように磁気センサと磁気エンコーダを軸受に組み込んだ構造で、標準の深溝玉軸受の型番でラインナップ化している。磁気センサを使用しているため、一般的な光学式センサに比べて汚れに強く、かつ高温下でも使用できることが特長である。フォークリフトの駆動モータの制御や車輪のスリップ防止制御などに利用されている。

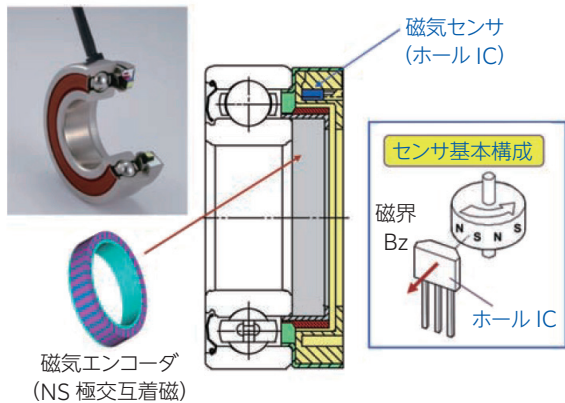


図 1 回転センサ付軸受<sup>2)</sup>

#### 3.2 自動車用 車輪速センサ

自動車のホイール用軸受（ハブベアリング）には車輪速検知用の磁気センサが搭載され、ABS（アンチロックブレーキシステム）制御などに利用されている。ハブベアリングのシール部分にはゴム製の着磁リングが内蔵されており、車輪まわりの劣悪な環境でも長期間劣化しない高い耐久性を備えている。NTN では、通倍機能を備えた磁気センサを用いた高分解能回転センサ内蔵ハブベアリング<sup>2)</sup>も開発している（**図 2**）。

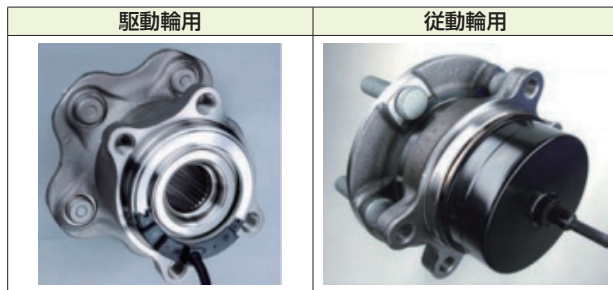


図 2 高分解能回転センサ内蔵ハブベアリング<sup>2)</sup>

車輪の回転信号には、タイヤの状態（空気圧など）や路面状況の影響が含まれる。高分解能な回転信号を分析すると、タイヤの状態や路面状況の違いをより高い精度で検知できる可能性もある。例えば、**図 3** に示したように、アスファルト路面に砂利が撒かれた部分を通過した時には、回転速度変動スペクトルが変化<sup>2)</sup>。こうした高分解能信号を利用することで、車両制御のさらなる高度化が可能と考えられる。

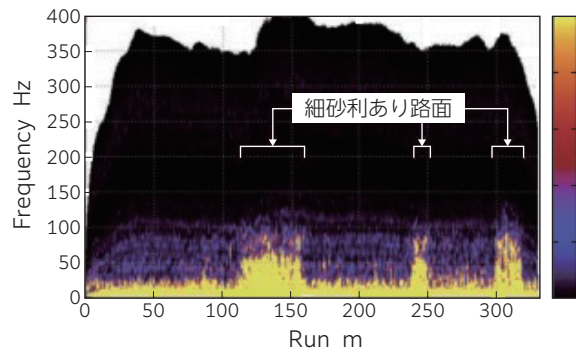


図 3 走行中の速度変動スペクトル変化<sup>2)</sup>

#### 3.3 絶対角度センシング用の複列磁気リング

NTN では、**図 4** に示す複列磁気リング<sup>3)</sup>を開発し、絶対角度検出用の磁気センサと組み合わせて使用する検出ターゲットとして販売している。磁気センサの高度な通倍機能と複列磁気リングの高い磁気パターン精度により、1回転（360度）を10万分割以上の角度分解能で検出することが可能となる。磁気式のため光学式センサに比べ耐環境性能に優れ、コンパクトな構成で省スペース化に適するという特長があり、ロボット関節部や各種モータの制御用センサとして利用されている。



図 4 複列磁気リング：ラジアル着磁タイプ<sup>3)</sup>



### 3.4 工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニット

工作機械の主軸ユニットでは、高速、高剛性、高精度などの基本性能に加えて、状態監視やIoTへの対応が求められている。NTNでは、軸受に隣接する外輪間座に各種センサを内蔵し、軸受内部の状態監視を実現するとともに、荷重検出機能、ワイヤレス通信機能を加えた工作機械主軸用「センサ内蔵軸受ユニット」(図5)を開発した<sup>4)</sup>。振動や温度のセンシング情報から潤滑状態の悪化や損傷の兆候を検知して不具合の発生を防止する、あるいは加工力や軸受の予圧量などをモニタリングして加工条件の調整に利用することを提案している。

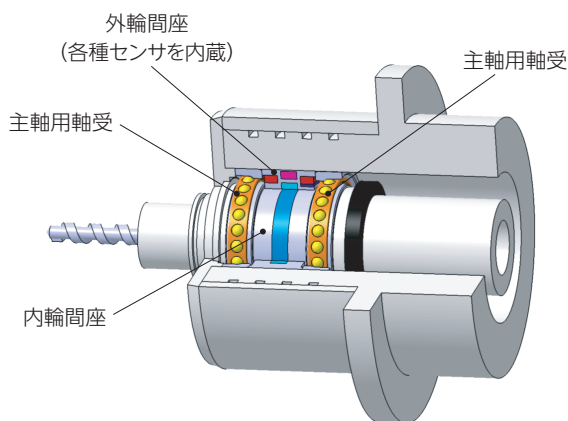


図5 工作機械主軸用「センサ内蔵軸受ユニット」<sup>4)</sup>

### 3.5 シャベる軸受®

NTNではセンシング機能を内蔵する軸受の究極の姿として「シャベる軸受®」(図6)を開発した<sup>5)</sup>。標準型番の軸受と同じ外形寸法でありながら、その内部には振動、温度、回転センサと発電機、信号処理回路、無線通信ユニットが組み込まれている。軸受の回転によって発電し、センシングした結果を無線で送信するため、軸受は自ら「しゃべって」情報を伝えることができる。

現状では、電子回路や発電機を組み込むスペースが必要なため、実現可能な軸受のサイズが限定されるが、センサデバイスの小型化や省電力化を進め、より小径の軸受でも本コンセプトを今後実現していく。

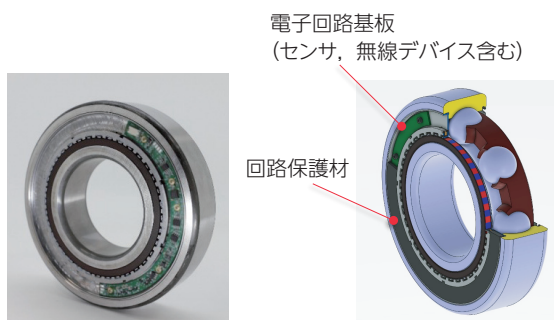


図6 シャベる軸受®

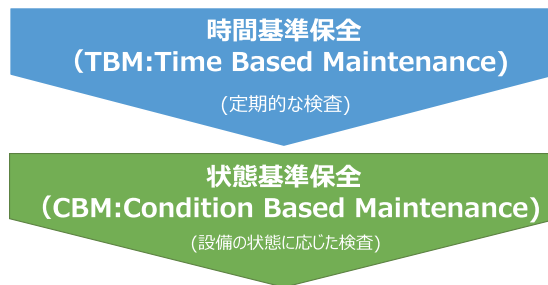
## 4. 状態監視サービスへの取り組み

### 4.1 状態監視の動向

近年、道路や建物などインフラ設備の維持管理や保守運用を対象としたアセットマネジメントの考え方が機械設備分野にも拡大し、機械の状態監視から部品の調達管理まで幅広く適用されてきている。設備のメンテナンス手法については、従来のTBM(時間基準保全、予防保全)からCBM(状態基準保全、予知保全)へのシフトが進んでいる(図7)。

このような状況下、運転中の軸受状態をモニタリングして不具合の兆候を検知し、トラブルが発生する前に対策する取り組みが注目されている。

省人化や生産性の向上、効率的な設備保全のニーズが高まる



IoTを活用して設備や稼働状況を監視  
設備の不具合や故障をいち早く知り、計画的なメンテナンスを実施

図7 時間基準保全から状態基準保全へ

### 4.2 工場設備への状態監視システムの導入

大型の機械設備、連続運転するポンプや発電機などを長期間安定稼働させるためには、軸受の状態監視と診断技術、および状態に応じた適切な保守作業が欠かせない。特に、大規模設備や重要な生産ラインにおいては、包括的な状態監視システムが導入されるとともに、定期点検や日常の保守作業が継続実施され運用保守の記録も紐づけられている。このように、大型設備に関するトラブルを未然防止するため、工場全体での状態監視・運用管理体制が各社で構築されている。

それに対して、小規模な設備では、装置ごとに個別の運用管理が実施されていることが多い。工場内には部分最適化されたシステムが混在しているため、状態監視機器を導入しても、統一したシステムに接続して運用するのが難しいという問題がある。

このような問題を解消するためにIoTプラットフォームが提案されている。各設備にIoTプラットフォームを導入して、その上で計測ソフトなどのアプリケーションを動かすと、設備間でのデータのやり取りや、蓄積されたデータの一元管理・相互利用が容易になる。

NTNではIoTプラットフォームであるEdgecross<sup>6)</sup>上で動作する軸受診断アプリケーション(図8)を開発し、

インターネット接続が不要で、細かな設定も不要な状態監視ツールとして提供している<sup>7)</sup>。詳細については解説記事を参照されたい。

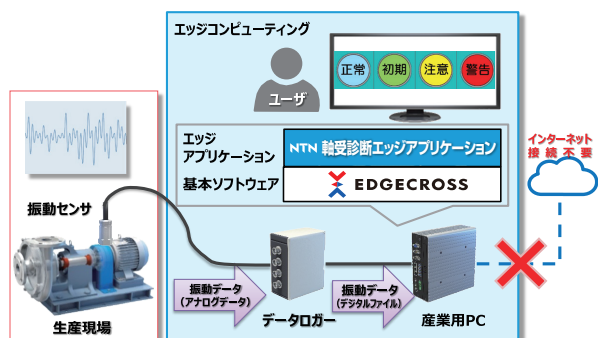


図 8 軸受診断アプリケーション

### 4.3 ポータブル異常検知装置

TBM が実施されている現場などで、作業員が巡回監視で設備を定期的に定点観測する場合には、持ち運びやすい計測器で、簡単にデータを記録できることが求められる。この用途には、図 9 に示す NTN ポータブル異常検知装置<sup>8)</sup> が有用である。

作業員の携帯端末と接続して設備の振動を計測して記録し、あらかじめ設定した判定基準により状態を判定、あるいは状態トレンドの分析ができる。観測データの精密分析が必要な場合には、周波数分析機能を利用して、カップリングの損傷や軸受の損傷などの診断を実施できる。



図 9 NTN ポータブル異常検知装置

### 4.4 大型風力発電装置での状態監視動向

図 10 に示すような大型風力発電装置は、機械設備が地上 60 メートル以上の高さであり、その多くが沿岸部や山岳地帯などアクセスが悪い場所で稼働している。天候による作業制限もあるため、設備の状態把握や保守作業は容易ではない。そのため、状態監視システム (CMS: Condition Monitoring System) による遠隔モニタリングが必要とされ、日本国内でも普及が進んでいる。

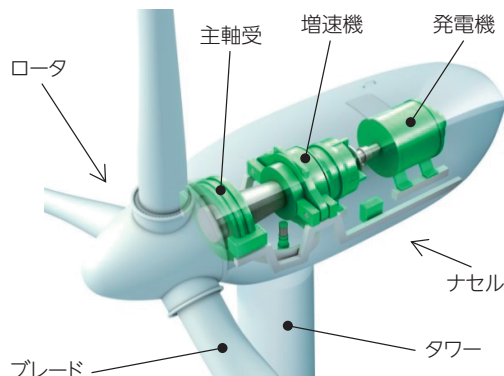


図 10 大型風力発電装置の構造

さらに、日本国内では、2030 年までに 10 GW、2040 年には 30 ~ 45 GW の洋上風力発電規模の案件形成を目標として、大型風力発電装置の大規模な導入計画が進められている。発電コストの低減も技術課題として挙げられており、着床式洋上風力発電で 8 ~ 9 円/kWh の達成目標が示されている。これを実現するために、風車の生涯コストの 36 % を占める O&M (運用管理と保守) コストの低減が重要視されている (図 11)。

#### 洋上風力発電の低コスト化プロジェクト (全体像)

- 今後急拡大が見込まれるアジアの市場を獲得するためには、これまでの浮体の開発・実証成果も踏まえながら、風車の大型化に対応して設備利用率を向上し、コストを低減させることが不可欠。
- そのため、
  - ① 台風、落雷等の気象条件やうねり等の海象条件等のアジア市場に適合し、また日本の強みを活かせる要素技術の開発を進めつつ (フェーズ 1)、
  - ② こうした要素技術も活用しつつシステム全体として関連技術を統合した実証を行う (フェーズ 2)。

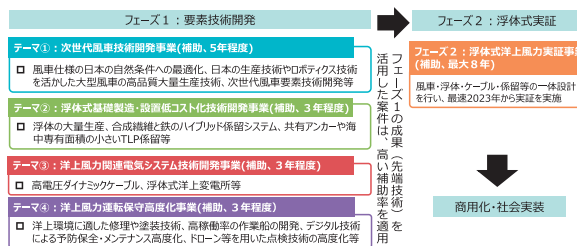


図 11 洋上風力発電の低コスト化 (出典：経済産業省資料<sup>9)</sup> より引用)

### 4.5 風力発電装置用状態監視システム Wind Doctor<sup>®</sup>

NTN は、2012 年から風力発電装置用 CMS (Wind Doctor<sup>®</sup>) を販売し、現在、国内風車の約 300 基で運用中である<sup>10) 11)</sup>。Wind Doctor<sup>®</sup>では、図 12 に示すモニタリングサービスを提供している。風力発電装置に設置したセンサで、振動などのデータを定期的にリモートで収集・蓄積して監視し、異常や変化点を検出した場合には、お客様へ直ちに情報を発信する。モニタリングサービスを利用しているお客様は、得られた情報を風力発電設備の運用管理と保守作業に活用されている。

前述のように、アクセスが陸上よりも困難な洋上風力発電装置においては、軸受などの基幹部品をリモートで状態監視する重要性が高くなる。さらに、世界最強レベルと言

われる日本海側の冬季雷や、台風など日本特有の気象条件にも対応できるよう、状態監視システムの進化・対応が必要と考えられる。

NTNでは、NEDOグリーンイノベーション基金事業<sup>12)</sup>において、「次世代風車技術開発事業」と「洋上風力運転保守高度化」の二分野で採択され、2022年度より活動を開始している<sup>13)</sup>。この事業では軸受の改良開発とCMSの高度化という、モノとコトの両側面から技術研究開発を推進する。

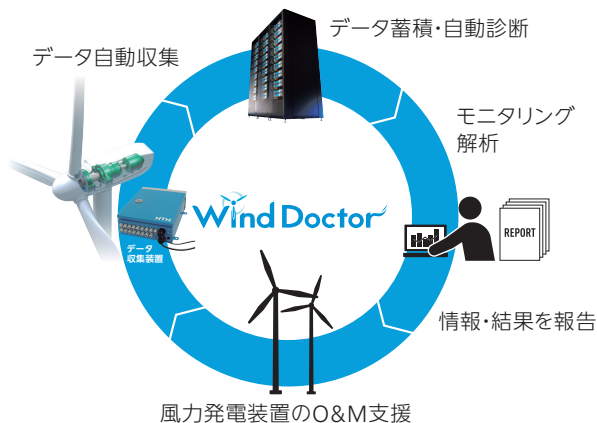


図 12 Wind Doctor® のモニタリングサービス

## 5. ソリューション事業への取り組み

### 5.1 センシングデータの活用

状態監視システムでは、一般に、軸受周辺で観測した振動データ等から抽出した診断パラメータと呼ばれる特徴量を用いて設備の状態を診断する。多数の診断パラメータを算出することが可能だが、診断に有効なパラメータは設備によって異なり選択が難しい。

これまでは経験的に診断パラメータが選択されてきたが、計測データと損傷との関係を示す大量のデータが蓄積されていけば、それらをAIシステムに学習させ、有効な診断パラメータを自動的に選択することが可能になる。また、観測された損傷事例や不具合事例を分析して、機器・設備の設計や運用方法の改善にも活用できる。蓄積されていく実機データが多くなるほど、その設備に関する状況判断の精度を向上させることができる。

NTNでは、実機の観測データを蓄積して活用する仕組みを構築し、継続運用していくことに取り組んでいる。同時に、軸受を中心としたセンシング情報を収集するためのセンサデバイスや計測ツールの提供も重要と考え、開発に注力している。

### 5.2 NTNが提供するソリューション

軸受周辺のセンシングと状態監視に対し、設備の運用現場から求められるのは次のような情報である。

①運転状態の良否判断

②損傷が発生した場合の進展予測

これらを提供するには以下に示す技術が要求され、専門技術者の教育、経験の蓄積などに多くの時間と労力が必要となる。

- ・軸受の基礎知識と状態診断技術
- ・センシング技術と信号処理技術
- ・AI診断など状態判断を自動化する技術
- ・軸受特有の課題に関する知見

設備を運用している事業者にとっては、軸受の状態だけでなく機器全体の状態診断情報が必要であるため、機器周辺の情報と組み合わせた総合的な判断技術が求められる。また、稼働させる設備の特性によっては、さらに幅広い分野の情報と組み合わせた運用も考えられる。例えば気象データ、あるいは金融データや社会イベント、為替情報など、様々なデータを活用し、調達コストと補修タイミングを検討するなど、設備運用管理でのデータ分析にも利用されると考えられる。

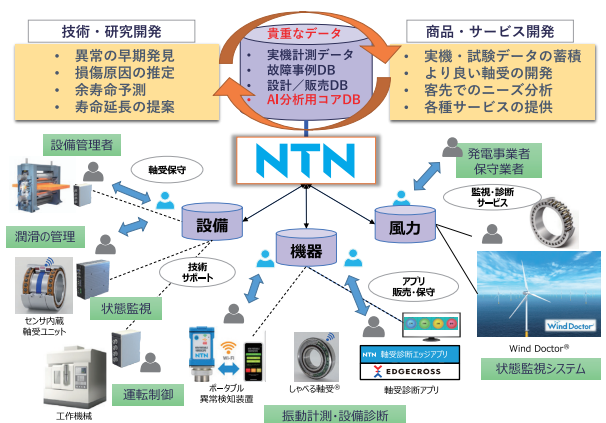


図 13 NTNのサービス・ソリューション事業

多くの事業者では、監視システムの構築や維持に労力を費やすよりも、収集したデータを活用した運用管理に注力することが重要である。NTNでは、図13に示すように、設備に組み込まれた軸受の状態監視などの活動により、お客様にとって有益な情報、困りごと解決に必要な情報を抽出し、設備の保守計画など事業運用に活用できるソリューションとして提供するサービスの展開を進めていく。

### 5.3 風力発電装置メンテナンス事業への展開

NTNでは風力発電装置用CMSによる状態診断にとどまらず、運用保守の効率化および運転制御への活用に取り組む。長期的には、CMSのデータや軸受の損傷事例分析を通じてより長寿命な軸受の開発に取り組むとともに、補修軸受および点検保守に関するトータルサービスの提供を推進し、洋上風力発電のO&Mコスト低減につなげる。

風力発電分野では、株式会社北拓との提携によるメンテ



ランス事業への取り組みを開始した<sup>14)</sup>。CMS の情報に基づく風力発電設備の運用保守効率化（スマートメンテナンス）と、軸受の開発・調達、運用保守サービスでの連携により、図 14 に示す軸受ライフサイクルマネジメントを実現して社会に貢献していく。

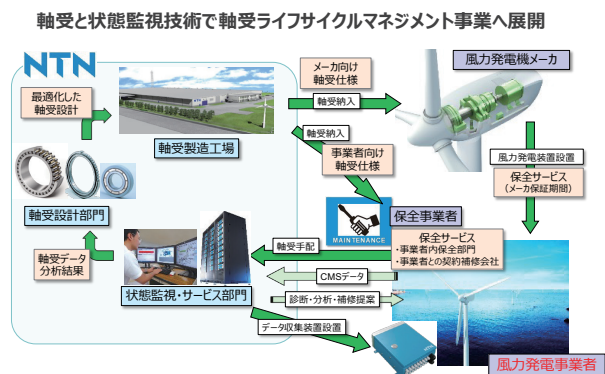


図 14 軸受ライフサイクルマネジメント

## 6. おわりに

NTN では、商品（モノ）の販売にとどまらず、お客様の困りごとを解決するサービス（コト）を提供していく。これらの取り組みでは、センサ信号を分析するソフトウェアや、機器を制御するソフトウェアの開発にも注力し、新たな価値を創造していく。さらには、収集した情報に基づいて、補修用ベアリングの提供や新たな軸受の改良開発も実施し、軸受とそのモニタリング情報を中心とした軸受のライフサイクルマネジメントを築いていく。

将来に向けて、これらのビッグデータを活用したビジネスモデルを構築し、NTN のブランド価値向上につながるようなサービス・ソリューション事業を推進していく。

## 参考文献

- 1) 潤滑油協会，潤滑管理効率化促進調査報告書，1995.
- 2) 西川健太郎，高橋亨，C. Duret，高分解能回転センサ内蔵ハブベアリング，NTN TECHNICAL REVIEW, No.81, (2013)52.
- 3) 小池孝誌，福島靖之，澁谷勇介，伊藤浩義，高精度絶対角検出用複列磁気リングの開発，NTN TECHNICAL REVIEW, No.86, (2018)45.
- 4) 橋爪翔平，澁谷勇介，近藤大地，山本庸平，岩永博之，工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発，NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2020)33.
- 5) NTN，プレスリリース，センサ内蔵軸受「しゃべる軸受®」を開発，[https://www.ntn.co.jp/japan/news/new\\_products/news202200041.html](https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news202200041.html)

- 6) Edgexcross Consortium，<https://www.edgexcross.org/>
- 7) NTN，プレスリリース，軸受診断アプリの無料体験版の提供期間を延長，[https://www.ntn.co.jp/japan/news/new\\_products/news202200022.html](https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news202200022.html)
- 8) NTN，ポータブル異常検知装置，NTN TECHNICAL REVIEW, No.87, (2019)106.
- 9) 経済産業省，「洋上風力発電の低コスト化」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画，[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green\\_innovation/green\\_power/pdf/001\\_04\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/green_power/pdf/001_04_00.pdf)
- 10) 宮崎誠，畠山航，風力発電装置用状態監視システム (CMS) の開発と適用例，NTN TECHNICAL REVIEW, No.86, (2018)40.
- 11) 鈴木克義，風力発電機用 CMS の展開と信頼性向上の取り組み，NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2020)111.
- 12) NEDO，グリーンイノベーション基金事業「洋上風力発電の低コスト化」に着手，[https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_101505.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101505.html)
- 13) NEDO，「グリーンイノベーション基金／洋上風力発電の低コスト化」プロジェクト事業概要資料，<https://www.nedo.go.jp/content/100941539.pdf>
- 14) NTN，プレスリリース，風力発電装置向けメンテナンスを開始，<https://www.ntn.co.jp/japan/news/press/news202200031.html>

執筆者近影



紅林 博行

産業機械事業本部  
副本部長



# 剥離進展下の転がり軸受を対象とした余寿命予測技術の開発

## Development of Remaining Useful Life Prediction Technology for Rolling Bearings under Flaking Propagation

北井 正嗣\* Masashi KITAI

近年、設備の経年劣化や保守人材の不足の背景から、予知保全の高度化への関心が高まっており、転がり軸受はその対象として注目されている。一般に転がり軸受は何らかの損傷が発生した時点で交換されるが、メンテナンスが容易でない環境においては、周辺設備に影響を与えない範囲において、損傷発生後も継続して使用される場合がある。本稿では損傷発生後の転がり軸受を対象として、AIを用いた余寿命予測手法について紹介する。

In recent years, due to the equipment aging and the lack of maintenance personnel, interests in advanced predictive maintenance is increasing, and rolling bearings are attracting attention as a target. In general, rolling bearings are replaced when some kind of damage occurs. However, in some cases where maintenance is not easy, they may continue to be used even after the damage has occurred as long as it does not affect peripheral equipment. This paper introduces a development AI method for predicting the remaining useful life of rolling bearings under flaking propagation.

### 1. はじめに

製造やインフラ等の設備において、経年劣化に伴うメンテナンスコストの増加や保守人材の不足による作業員への負担増大などの背景から、メンテナンス技術の高度化・自動化への関心が高まっている。その中でも近年、故障してから保全する「事後保全」、設備の状態に依らず定期的に保全する「予防保全」よりも効率的にメンテナンスを行う方法として、異常の予兆を検知して保全する「予知保全」に関する技術が注目されており、IoT、AIを活用してこれらの技術をメンテナンスに導入するための取り組みが活発化している<sup>1)</sup>。

転がり軸受は設備に欠かせない機械要素の一つであり、機械の回転を支える重要な要素である。設備の故障事例において、そのおよそ30%が転がり軸受に起因するとも言われている<sup>2)</sup>ことから、転がり軸受の状態を推定し、適切なタイミングで補修・交換することが、設備全体のメンテナンスコスト軽減の点から望まれている。

転がり軸受の診断には、機械の運転を中断せずに測定できる、損傷への感度が高いなどの理由から、振動加速度が用いられることが多い<sup>3)</sup>。振動加速度を利用した診断方法としては、周波数分析を利用した損傷部位の特定や、実効値や尖度などの統計量を利用した損傷状態の予測などが慣習的に適用されている。加えて近年では、ディープラーニングをはじめとしたAI技術の発展に伴い、AI技術を利用して転がり軸受の損傷状態や余寿命を予測するための研究・技術開発が盛んに行われている<sup>4), 5), 6)</sup>。

本稿では損傷が発生した後の転がり軸受を対象として、軸受の交換が必要となるタイミングまでの余寿命を予測するために開発したAI技術<sup>7)</sup>について紹介する。

### 2. 開発背景

一般に転がり軸受の寿命は、剥離や圧痕など、軸受軌道面に何らかの損傷が発生した時点とすることが多い。しかしながら、使用される環境や条件によっては、転がり軸受の交換が容易ではない、メンテナンスコストが多くなるなどの理由から、転がり軸受に軽微な損傷が発生した後も継続して使用される場合がある。

転がり軸受の損傷が進展すると、振動の急激な上昇などにより、対象装置の他の要素の損傷を誘発し、ダウンタイムの増加につながる可能性がある。そのため、転がり軸受の損傷の程度（以下、損傷状態）を推定し、交換すべきタイミングまでの余寿命を予測できることが望ましい。しかしながら、先に挙げた転がり軸受の余寿命予測に関する研究の多くは、転がり軸受の損傷状態について述べられていない。

そこで、本稿では損傷進展下の転がり軸受に対し、損傷状態と余寿命の関係を回帰モデルで表現することで、高精度に余寿命を予測することを狙いとした開発技術について紹介する。

\* 先端技術研究所

### 3. 転がり軸受の剥離進展と振動加速度

円筒ころ軸受を用いて、内輪軌道面に発生した剥離の周方向長さが転動体ピッチ長さを超えるまで運転を継続した場合の、運転時間と振動の関係を図1に示す<sup>8)</sup>。横軸は負荷回数を、縦軸は振動加速度の実効値 (Root-Mean-Square Value, RMS) 初期値に対する相対的な変化 (RMS 相対値) を示している。また、特定時刻における内輪軌道面の剥離形状の外観図を同図に示す。剥離は負荷回数約 90 万回で発生している。軌道面の剥離はまず軸方向に主に進展 (図1の範囲 A) し、軸方向剥離長さが転動面の接触長さまで達すると、その後は主に周方向 (転動体移動方向) に進展する (図1の範囲 B)。RMS は剥離が軸方向に進展している間は急激に増加するが、周方向の進展が主となると RMS の増加は緩やかとなり、トレンドに変動が生じるようになる。さらに剥離が進展し、周方向剥離長さが転動体ピッチ長さに達する (図1の範囲 C) と、RMS は再度急激に増加し、変動の幅も大きくなる。

このように振動が大きくなると、転がり軸受の内外輪間の変位は周辺部品の許容可能なクリアランスの範囲を超える危険性が高まり、周辺部品の損傷を誘発する要因となる。したがって剥離の周方向長さが転動体ピッチ長さに至る前に運転を停止することが望ましく、本研究では周方向剥離長さが転動体ピッチ長さの半分に至る点を軸受交換のタイミングとした。

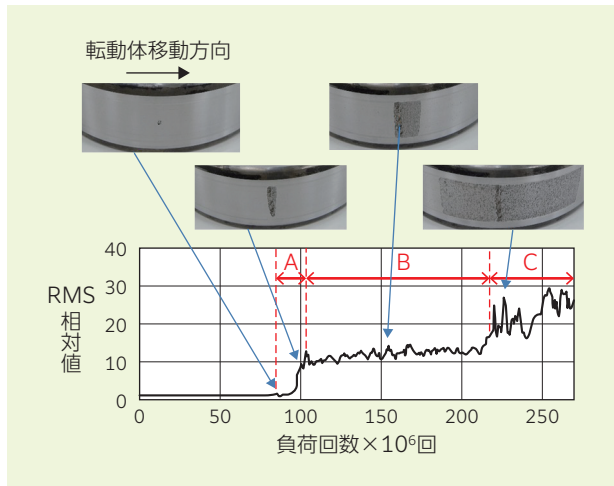


図1 剥離進展状況と振動加速度の関係<sup>8)</sup>

### 4. 開発技術の特徴

本章では開発技術の概要について説明する。

#### 4.1 開発技術

開発技術の概要を図2に示す。開発技術は4.2節に示す Feature Fusion Network (FFN)<sup>7)</sup> と4.3節に示す階層ベイズ回帰 (Hierarchical Bayesian Regression, HBR)<sup>9)</sup> の組み合わせで構成される。振動加速度時系列データを短時間フーリエ変換 (Short Time Fourier Transform, STFT, 図3参照)<sup>10)</sup> したスペクトログラムを入力とし、FFNにより、周方向剥離最大長さ (以下、剥離サイズ) と余寿命 (以下、SS 余寿命) をそれぞれスナップショット (1つの入力データセットに対し1つの出力) で予測する。次に、FFN で予測した剥離サイズと SS 余寿命から、HBRにより、余寿命回帰式、余寿命およびその分布を出力する。

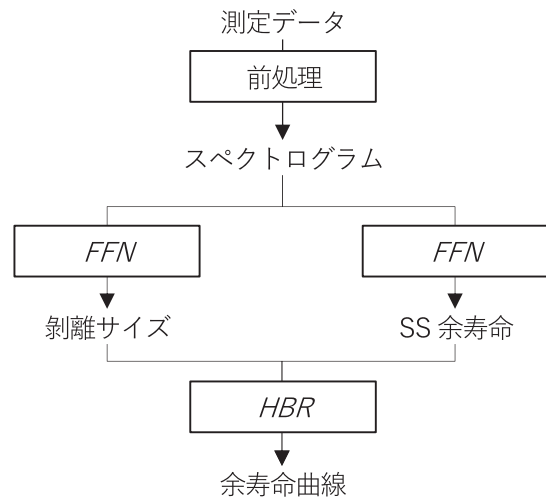


図2 開発モデル概要

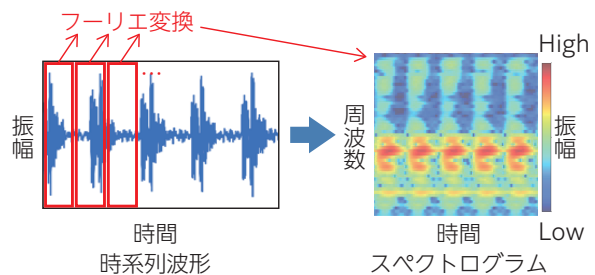


図3 短時間フーリエ変換のイメージ

## 4.2 Feature Fusion Network

FFN は、画像認識に良く用いられるディープラーニング手法の畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network, CNN) <sup>11)</sup> をベースとして開発した回帰手法である。FFN のイメージ図を **図 4** に示す。通常の CNN では計測時点の入力データのみから対応する目的変数を直接予測する。FFN は、過去の複数回分の入力データから、各時点における劣化指標 (劣化の状況を 0 ~ 1 の範囲で正規化した指標) を算出し、劣化指標を計測順列でベクトル化した劣化指標ベクトルを中間変数として利用することにより、目的変数 (剥離サイズおよび SS 余寿命) の予測精度を向上させることを狙いとしている。

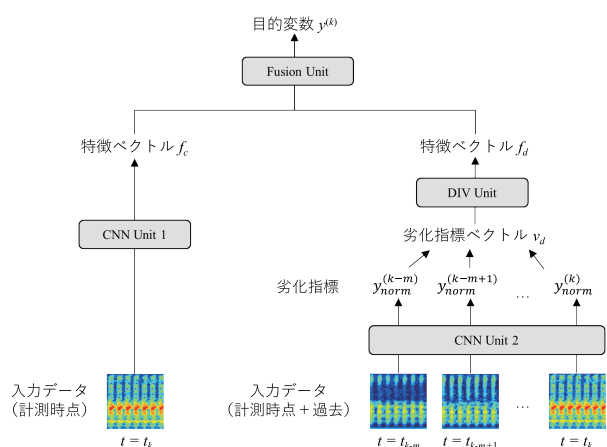


図 4 Feature fusion network 概要

## 4.3 階層ベイズ回帰

前述の SS 余寿命はスナップショットで予測したものであるため、計測時刻ごとに予測値が変動する。実用上、余寿命予測値は運転時間経過に対して単調減少することが望ましいため、余寿命の回帰曲線を単調減少関数で定義した。本開発では、上記に加え軸受個体間のばらつきも考慮するための手法として、HBR を用いた <sup>7)</sup>。HBR では計測時点よりも過去のすべてのデータを利用して余寿命およびその回帰曲線を求める。具体的には、軸受の個体差が確率分布に基づいてばらつくとした上で、軸受ごとに個別の余寿命回帰曲線を扱えるようにした。これにより SS 余寿命が全学習データの平均から大きく外れた個体に対しても、最終的に出力される余寿命を比較的精度よく予測できる。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験装置および測定データ

開発技術の評価に使用した実験装置概略を **図 5** に、実験条件を表 1 に示す <sup>7)</sup>。試験軸受として円筒ころ軸受 (型番 NU224, 内径  $\phi$  120 mm, 外径  $\phi$  215 mm) を使用した。軸受軌道面に初期の剥離が発生してから使用可能な限界に至るまで運転を継続し、定期的に振動加速度および剥離サイズを測定した。測定は 33 個の軸受サンプルに対して実施した。各軸受サンプルについて初期の剥離が発生してから使用可能な限界に至るまでの運転時間と RMS の関係を **図 6** に、運転時間と剥離サイズの関係を図 7 に示す。剥離進展末期における RMS は変動が大きく、剥離の状態を正確に把握することは困難である。また、33 個の軸受サンプルはすべて同じ運転条件下で試験を行っているにもかかわらず、使用可能な限界に至るまでの余寿命は軸受サンプルによって大きく異なる。そのため、余寿命の予測精度を向上させるためには、振動加速度特徴量の変動および余寿命の個体差を考慮する必要がある。

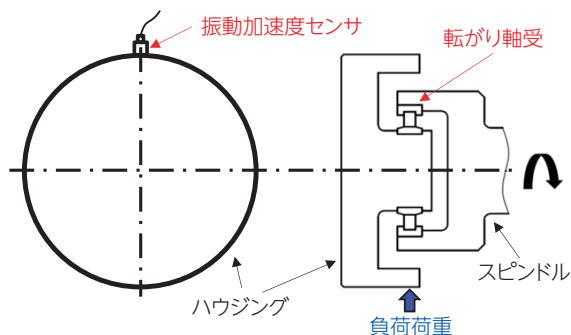


図 5 実験装置 <sup>7)</sup>

表 1 実験条件 <sup>7)</sup>

転がり軸受	円筒ころ軸受 (型番: NU224)
主軸回転速度	500 min <sup>-1</sup>
ラジアル荷重	90 kN
測定データ	振動加速度 (鉛直方向)
軸受サンプル数	33 個

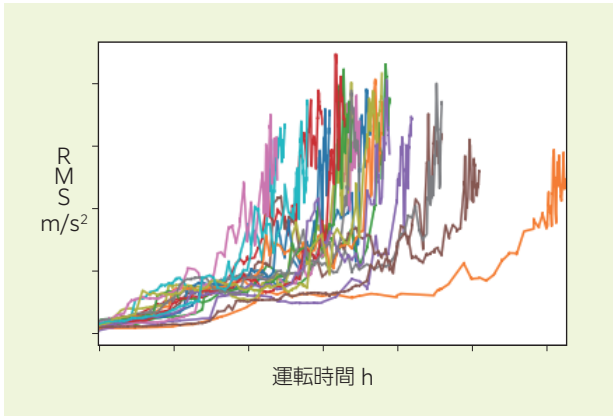


図 6 運転時間と RMS の関係

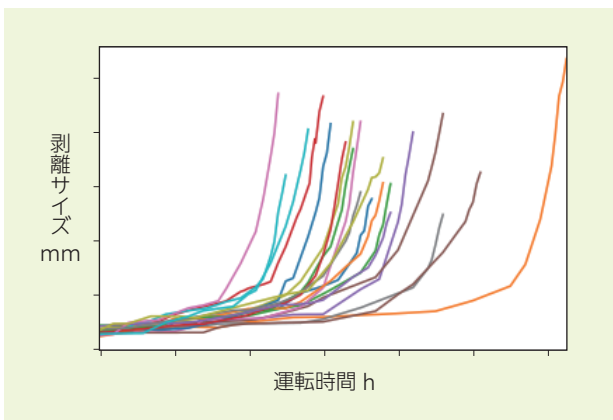


図 7 運転時間と剥離サイズの関係

### 5.2 評価指標

開発手法の評価指標には決定係数  $R^2$  を用いた。  $R^2$  は目的変数（ここでは剥離サイズまたは余寿命）の予測値が実際の値（以下、真値）とどの程度一致しているのかを示す指標で、式 (1) で示される。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2}{\sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2} \quad (1)$$

ここで、  $y_k$  および  $\hat{y}_k$  はそれぞれ測定時刻  $k$  における目的変数の真値および予測値を示す。また  $\bar{y}$  は目的変数の真値の平均、  $n$  はデータ数を示す。  $R^2$  は 1 以下の値をとり、値が大きい（1 に近い）ほど予測精度が高い。  $R^2$  は各軸受サンプルに対して算出し、Leave-One-Out Cross-Validation<sup>12)</sup> により算出される予測値の平均およびばらつきを評価した。また、剥離が発生してから軸受交換が必要なタイミングに至るまでの全範囲を、初期、末期の 2 つの範囲に分け、それぞれで評価した。ここで、剥離が主に軸方向に進展する範囲を初期、剥離が周方向に主に進展する範囲を末期とした。

### 5.3 FFN による剥離サイズおよび SS 余寿命予測結果

本節では、FFN を各種回帰手法と比較し、剥離サイズおよび SS 余寿命の予測精度を評価した。比較手法として Kernel Ridge (KR)<sup>13)</sup>、Random Forest (RF)<sup>14)</sup>、Support Vector Regression (SVR)<sup>15)</sup>、中間層 4 層の Neural Network (DNN)<sup>16)</sup>、CNN を用いた。CNN は開発手法と同様に振動加速度のスペクトログラムを入力としており、過去のデータについては考慮していない。一方、KR、RF、SVR、DNN では振動加速度に各種バンドパスフィルタ処理を行った後の時間領域、周波数領域、ケプレンシ領域の統計量（RMS、最大値、波高率、尖度、歪度、エンベロープ処理後の RMS）<sup>17)</sup> を入力として使用した。開発手法および比較手法のハイパーパラメータは 5-fold Cross-Validation<sup>12)</sup> により最適値を選定した。

図 8 に剥離サイズ予測精度の比較結果を、図 9 に SS 余寿命予測精度の比較結果をそれぞれボックスプロットで示す。

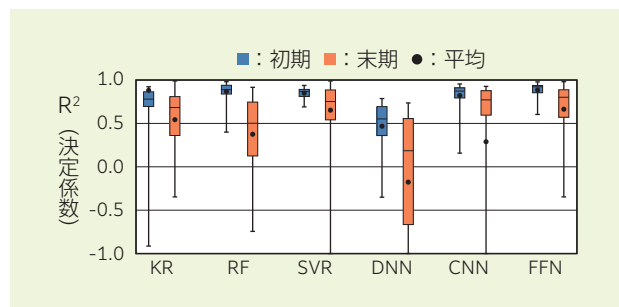


図 8 剥離サイズ予測精度 (w/o HBR) <sup>7), 17)</sup>

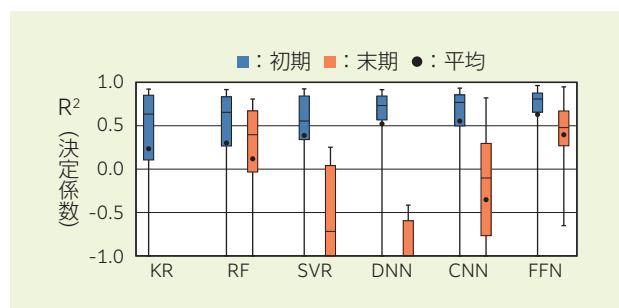


図 9 SS 余寿命予測精度 (w/o HBR) <sup>7), 17)</sup>

剥離サイズ予測において、剥離進展初期においては KR、DNN を除く4手法はいずれも評価指標の  $R^2$  平均が 0.7 以上となり、特に FFN の予測精度が最も高くなった。また剥離進展末期においては CNN および FFN の  $R^2$  の平均が高いが、CNN は特定のサンプルに対して予測精度が悪くなるため、平均値は FFN に比べて大幅に下がった。したがって剥離サイズ予測においては FFN が最も予測精度が高い。



SS 余寿命予測においては、剥離進展初期は DNN, CNN, および FFN の 3 手法が KR, RF, SVR に比べて  $R^2$  が高く、中でも FFN が最も予測精度が高くなった。剥離進展末期においては、剥離進展初期に比べいずれの手法も予測精度が低下するが、その中でも RF および開発手法が比較的高い精度を維持した。

これらの結果より、FFN は他の一般的な回帰手法に比べ、剥離サイズ、SS 余寿命のいずれの予測においても高い予測精度を維持していることがわかる。

#### 5.4 開発手法による余寿命曲線

図 10 に HBR による損傷進展状況と余寿命曲線の中央値および予測分布の関係を示す。図中の赤破線よりも左側は HBR の学習に使用した範囲の測定データ、赤破線よりも右側は予測範囲における測定データ、黒線は HBR による予測曲線を示す。また、濃灰色のエリアは信用度 50%、薄灰色のエリアは信用度 95% の範囲を示す。図中 3 つのグラフは左からそれぞれ対象軸受の全測定データのうち、10%、20%、50% のデータを測定した時点における余寿命の予測結果を示している。また、図中に 3 章で定義した使用限界（寿命の基準）を破線で示した。損傷の進展に伴う測定データの増加に伴い、予測曲線は真値に近づき、信用度の範囲の幅は狭くなった。よって、HBR により損傷の進展と余寿命の関係は予測分布（予測値の信頼性）を伴う曲線として表現することができる。さらに、測定データの増加に伴って余寿命の予測精度が向上し、予測値の信頼性も向上した。

図 11 に開発手法（FFN と HBR の組合せ）による余寿命の予測精度をボックスプロットで示す。比較として、RF と HBR、CNN と HBR の組合せおよび FFN 単体での予測結果を示す。損傷初期において、開発手法は他の手法に比べて予測精度が向上しており、特に四分位範囲が小さくなることから、軸受サンプルに対するばらつきが小さくなっていることを確認した。また損傷末期においても他の手法に比べ予測精度は高く、唯一  $R^2$  の平均が 0.5 を超えた。よって開発手法を用いることにより、従来の方法よりも高い精度で余寿命を予測することが可能になる。

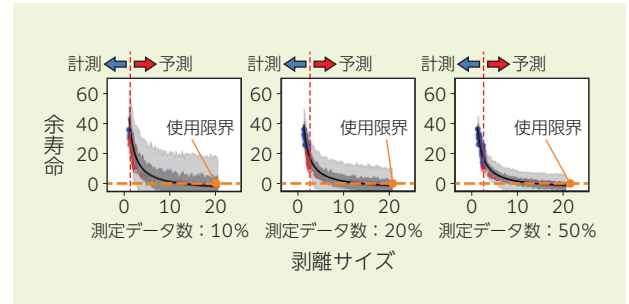


図 10 剥離進展と余寿命予測分布の関係<sup>7)</sup>

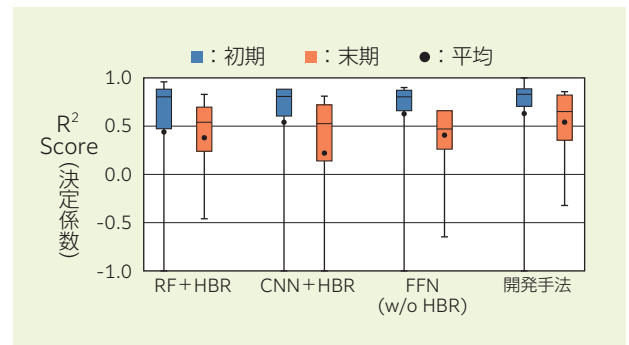


図 11 余寿命予測精度<sup>7)</sup>

## 6. おわりに

損傷発生後の転がり軸受を対象として開発した余寿命予測手法について、一般的な機械学習手法との性能を比較検証した。開発手法を用いることにより損傷後の転がり軸受の交換が必要なタイミングまでの余寿命を高精度に予測できることを確認した。したがって、本開発手法を用いることで、転がり軸受に剥離が発生した後も運転を継続するような場合に、内外輪間の変位が周辺部品の許容可能なクリアランスを超えない範囲で転がり軸受の使用の目安を得ることができるようになる。転がり軸受に損傷が発生した後も継続して使用される設備として例えば、特殊環境下で使用されるポンプやファンなどがある。今後、本開発技術の汎用性を高めつつ、様々な設備のメンテナンスコスト低減に貢献できるよう取り組みを続ける。



### 参考文献

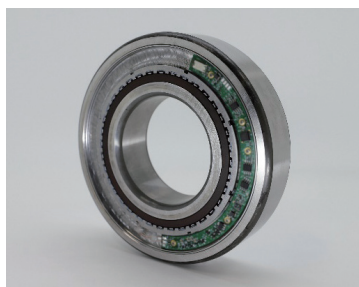
- 1) 経済産業省, “スマート保安先進事例集”, 2022.4, [https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/smart\\_industrial\\_safety/jireisyu\\_r3.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/smart_industrial_safety/jireisyu_r3.pdf), (参照 2022-8-10).
- 2) 潤滑油協会, “潤滑管理効率化促進調査報告書”, 1995.
- 3) ISO10816-3:2009/Amd1:2017, “Mechanical vibration -Evaluation of machine vibration by measurements on no-rotating parts -Part3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15000 r/min when measured in situ -Amendment 1”, (2017).
- 4) Y. Lei, N. Li, L. Guo, N. Li, T. Yan and J. Lin, “Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction”, Mechanical Systems and Signal Processing, vol.104, (2018) 799-834.
- 5) S. Ramezani, A. Moini, M. Riahi, “Prognostics and health management in machinery: A review of methodologies for RUL prediction and roadmap”, International journal of industrial engineering & management science, vol.6, issue 1, (2019) 38-61.
- 6) Z. Xia, Q. Guan, Y. Gao, X. Chen and X. Zhai, “Review on remaining useful life prediction methods of bearing”, 2020 11th international conference on prognostics and system health management (PHM-2020 Jinan), (2020) 429-433.
- 7) M. Kitai, T. Kobayashi, H. Fujiwara, R. Tani, M. Numao and K. Fukui, “A framework for predicting remaining useful life curve of rolling bearings under defect progression based on neural network and Bayesian method”, IEEE Access, vol.9, (2021) 62642-62652.
- 8) 北井正嗣, 筒井英之, 谷良二, 坂口智也, “軸受の損傷進展状況と振動特徴量の関係調査”, トライボロジー会議 2019 春 東京, (2019) 1-2.
- 9) M. S. Hamada, A. G. Wilson and C. S. Reese, “Bayesian Reliability”, Springer (2018).
- 10) J. Allen, “Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete Fourier transform”, IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing, vol.25, no.3, (1977) 235-238.
- 11) Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio and P. Haffner, “Gradient-based learning applied to document recognition”, Proc. of the IEEE, (1998) 1-46.
- 12) C. M. Bishop, “Pattern recognition and machine learning”, Springer, (2006) 32-33.
- 13) C. Saunders, A. Gammerman and V. Vovk, “Ridge regression learning algorithm in dual variables”, Proceedings of the 15th international conference on machine learning, (1998) 515-521.
- 14) L. Breiman “Random forests”, Machine learning, vol.45, (2001), 5-32.
- 15) V. N. Vapnik, “Statistical learning theory”, Wiley, (1998).
- 16) D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, “Learning representations by back-propagating errors”, Nature, vol.323, (1986) 533-536.
- 17) M. Kitai, Y. Akamatsu, R. Tani, H. Fujiwara, M. Numao and K. Fukui, “Remaining useful life curve prediction of rolling bearings under defect progression based on hierarchical Bayesian regression”, Proc. European conference on artificial intelligence 2020, (2020) 2986-2992.

### 執筆者近影



北井 正嗣  
先端技術研究所

# センサ内蔵軸受『しゃべる軸受®』の開発 Development of Sensor Integrated Bearing “Talking Bearings™”



福島 靖之 \* Yasuyuki FUKUSHIMA 後藤 知美 \* Tomomi GOTO  
 豊口 陽亮 \* Yosuke TOYOGUCHI 一毛 大吾 \* Daigo IKKE  
 松林 晃平 \* Kohei MATSUBAYASHI

設備のダウンタイムを抑えて生産効率を最大化させるために、IoT 技術を利用した設備の状態監視への要求が高まっている。NTN はこの要求に応えるべく、標準軸受に、センサ、発電機ユニットおよび無線デバイスを内蔵したセンサ内蔵軸受『しゃべる軸受®』を開発した。本稿では、開発品の特長、構造、性能試験結果を紹介する。

There has been a growing demand for equipment condition monitoring using IoT technology to reduce equipment downtime and improve production efficiency. NTN has developed a Talking Bearings™ that integrated sensors, power generation unit and wireless device to standard bearings, in order to meet this demand. This paper introduces the features, structure and performance test results of the developed bearing.

## 1. はじめに

製造現場では、生産効率を向上させるために、設備のダウンタイムをできるだけ抑えたいとの要求が高まっている<sup>1)</sup>。発電施設やインフラ設備においても、稼働率を上げるため、同様の要求は強い。この要求に応えるには、設備の状態を監視することで、突発的な設備停止を回避し、計画的にメンテナンスや部品交換することが有効である<sup>2) 3)</sup>。

NTN では、こうした設備の状態監視のニーズに対し、**図 1** に示す「風力発電装置用の状態監視システム (Wind Doctor®)」<sup>4)</sup>をはじめ、工作機械主軸用「センサ内蔵軸受ユニット」<sup>5)</sup>、「産業用 IoT プラットフォーム向け軸受診断アプリ」<sup>6)</sup>、「ポータブル異常検知装置」<sup>7)</sup>などを開発し、軸受の状態監視のためのデバイスや解析ソフトの市場投入を進めている。

ユーザーにとって満足度の高い状態監視サービスを実現するためには、利便性に優れ、かつ軸受の状態を高感度に検知できるデバイスを提供することが重要である。転がり軸受は輸送機器、家電製品、産業機械など、あらゆる機械に組み込まれ回転運動を支えている。転がり軸受にセンサを組み込めれば、機械を状態監視するための最適なデータ収集要素として機能すると考えられる。

そこで NTN は、寸法および負荷容量を変更することなく、標準軸受\*にセンサ、発電機ユニットおよび無線デバイスを内蔵したセンサ内蔵軸受『しゃべる軸受®』を開発した。本稿では、本開発品の構造や特長、性能試験結果を紹介する。

なお、「しゃべる軸受®」とは、センサで軸受の状態を検出し、無線でセンサ情報を送信するため、軸受がしゃべるように状態を把握できることに由来する。

※主要寸法および形式が国際的に標準化された転がり軸受



(a) 風力発電装置用状態監視システム  
「Wind Doctor®」



(b) 工作機械主軸用  
「センサ内蔵軸受ユニット」



(c) ポータブル  
異常検知装置

**図 1** 状態監視の関連商品

\* 商品開発研究所

## 2. 特長および構造

### 2.1 特長

開発品の主な特長を示す。

#### ①高度な状態監視・異常診断

センサを軸受に内蔵しているため、センサを設備に外付けする場合よりも感度良く軸受の状態を検知し、早期に異常を診断することができる。

#### ②互換性

寸法および負荷容量を変えることなく、標準軸受にセンサ、発電機ユニットおよび無線デバイスを搭載したため、既存設備に使用されている軸受からの置き換えが容易である。

#### ③高い利便性

回転に伴って発電する電力でセンサや無線デバイスを動作させ、センサ情報を自動で無線送信するため、電源供給やデータ送信のためのケーブルが不要である。

### 2.2 構造

#### 2.2.1 全体構造

開発品の構造を図2に示す。内輪回転で用いられる軸受の一方端に発電機および電子回路基板を配置した。軸受外輪にはステータが固定され、ステータにはコイルが保持される。また軸受内輪にはロータ（N極S極が交互に着磁された磁気リング）が固定される。軸受内外輪の相対回転に伴い、電磁誘導作用によりコイルに交流電圧が生成される。回路やセンサ、無線デバイスを搭載する電子回路基板は、ステータを介して軸受外輪に固定され、さらに電子回路保護材で封止される。

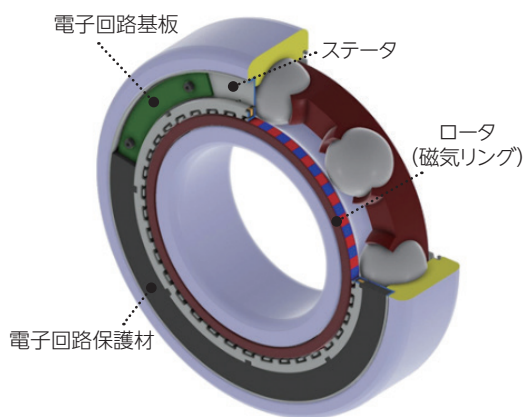


図2 センサ内蔵軸受「しゃべる軸受®」の構造

#### 2.2.2 電子回路

開発品の機能ブロック図および電源回路のブロック図をそれぞれ図3、図4に示す。発電機で生成した交流電圧は電源回路へ入力される。電源回路によって、交流電圧を直流電圧へ整流し、さらに必要以上に得られる電圧を所定の電圧まで降圧させる。その後、昇降圧DCDCコンバータでセンサや無線モジュールの動作に必要な一定電圧を得る。一定電圧下でセンサを駆動させ、得られたセンサ信号を無線デバイスによって、電波で送信する。

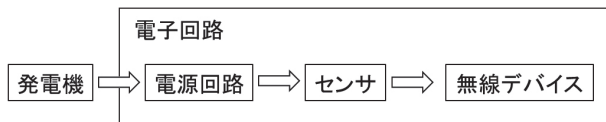


図3 開発品の機能ブロック図

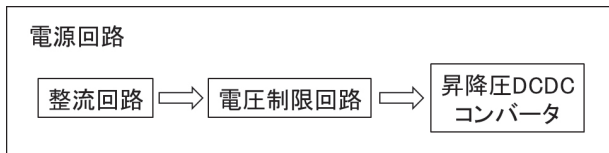


図4 電源回路のブロック図

## 3. 仕様

開発品の仕様を表1に示す。軸受の状態検出項目は、加速度、温度、回転速度などである。このうち回転速度は、専用のセンサを使用せず、発電機で生成した交流電圧波形を処理することで得ている。また、搭載している電子部品の耐熱温度を考慮して、使用温度範囲は-40～85℃とした。

通信規格はBluetooth Low Energy (2.4 GHz) を採用している。用途に応じてモード（監視モード、解析モード）を選択してセンシングすることが可能である。監視モードでは、長期かつ連続的な監視を想定し、0.1秒間隔で温度、加速度、回転速度を取得しデータを送信する。このとき、本モードで送信する加速度は実効値である。解析モードでは、受信側で周波数解析を実施できるように、所定のサンプリング数の加速度データを取得かつ送信する。なお、監視モードと解析モードの切り替えは、パソコンなどにインストールされた専用ソフトで操作する。

表 1 センサ内蔵軸受「しゃべる軸受®」の仕様

軸受	種類	深溝玉軸受
	型番	63系列 内径番号14以上
センシング	加速度	検出方向 ラジアル方向 検出範囲 ±50 G 周波数帯域 ~11 kHz (3 dB) 感度 40 mV/G
	温度	検出範囲 -50~150℃
	回転速度	分解能 16.7 min <sup>-1</sup>
通信	規格	Bluetooth Low Energy (2.4 GHz)
	送信データ	【監視モード】 温度, 加速度(実効値), 回転速度(通信間隔:0.1秒) 【解析モード】 加速度
使用条件	許容回転速度	軸受型番に準拠
	定格荷重	軸受型番に準拠
	通信可能回転速度	500 min <sup>-1</sup> 以上
	使用温度範囲	-40~85℃

#### 4. 利用例

開発品の通信構成例を図5に示す。設備の状態を長期にわたり連続監視する場合は、受信データが大容量になるため、データ保存容量の大きいデバイス（データロガー）と通信し、そのデータをパソコン等で読み取るような構成が望ましい。一方、現場にタブレットやパソコン等を持ち込んで、設備の状態を都度確認するような場合には、そのタブレット等と直接通信する構成が有効である。本開発品は実装する通信プログラムを変更することなく、通信規格に準ずる機器との通信が可能であり、必要に応じて適切な利用方法を選択できる。

専用ソフトを使用することで、開発品とパソコン等を通信させ、センサデータを表示させることができる。監視モードと解析モードのデータ表示例をそれぞれ図6および図7に示す。監視モードでは、加速度、温度および回転速度の時間変化を表示する。また、取得データがあらかじめ設定した閾値を超えた際に、警告を表示する。解析モードでは、加速度の時間波形と周波数解析結果を表示する。

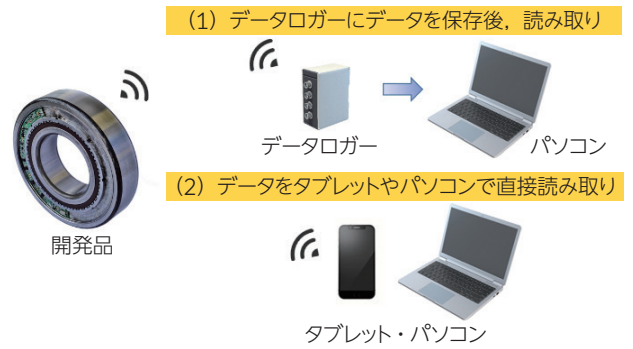


図 5 通信構成例



図 6 監視モードのデータ表示例

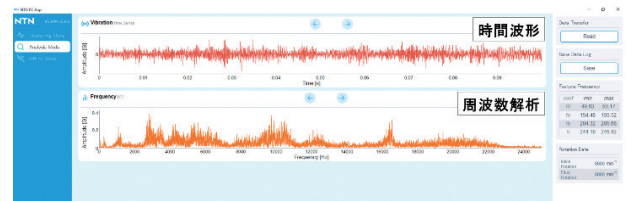


図 7 解析モードのデータ表示例

#### 5. 性能試験

##### 5.1 振動検出性能

開発品の振動検出性能を確認するため、剥離を模した欠陥（模擬剥離）を軌道面に付与した異常軸受を用い、内蔵センサで検出される振動を、欠陥のない正常軸受の場合と比較した。また、軸受の外部に設けた加速度センサ（外付けセンサと称する）と内蔵センサによる振動検出性能を比較した。

##### 5.1.1 試験機および試験条件

試験装置の概略図を図8に示す。供試軸受は内輪に嵌合する回転軸によって回転駆動される。また、ピボットを支点に揺動する架台を介して供試軸受にはラジアル荷重が作用する。外付けセンサは架台に設置しており、その仕様を表2に示す。内蔵センサ（表1参照）と比較し、検出範囲は同程度であるが、周波数帯域は外付けセンサの方が広い特性を有している。作用させるラジアル荷重は784 Nとした。この荷重は深溝玉軸受6314の基本動定格荷重115 kNに比べ、かなり小さな値である。



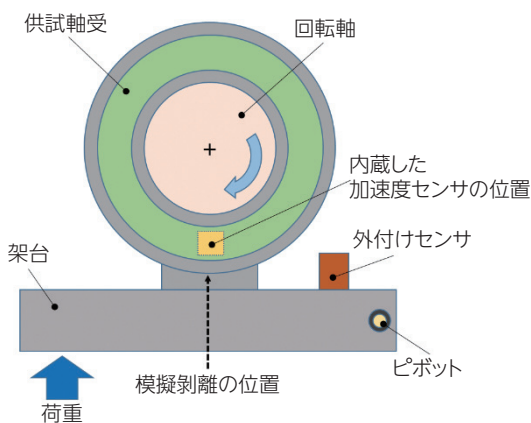


図 8 試験装置の概略図

### 5.1.2 供試軸受

供試軸受の仕様および軸受外輪に形成した模擬剥離の模式図をそれぞれ表 3 と図 9 に示す。円筒形状の模擬剥離を外輪軌道面の溝底 1 箇所に形成し、その大きさは、軸受部品の弾性変形による接触楕円の大きさに基づき設定した。具体的には、模擬剥離の直径を試験ラジアル荷重 784 N を作用させた時の接触楕円短軸直径の 2 倍の 0.87 mm にした。軸受に生じる剥離の例として、実際の損傷末期のスプーリングの外観写真を図 10 に示す。損傷初期の振動検出性能を評価することを狙い、模擬剥離の大きさは、末期のスプーリングと比較して十分に小さくした。

表 2 外付けセンサの仕様

外付け センサ	検出範囲	±60 G
	周波数帯域	3 Hz～25 kHz (3 dB)
	感度	100 mV/G

表 3 供試軸受の仕様

	正常軸受	異常軸受
軸受	深溝玉軸受 6314	
シール	非接触形 (片側)	
グリース	増ちょう剤:ウレア系 基油:ポリアルファオレフィン	
模擬剥離	なし	外輪軌道面溝底 1 箇所 φ0.87×深さ0.1 mm

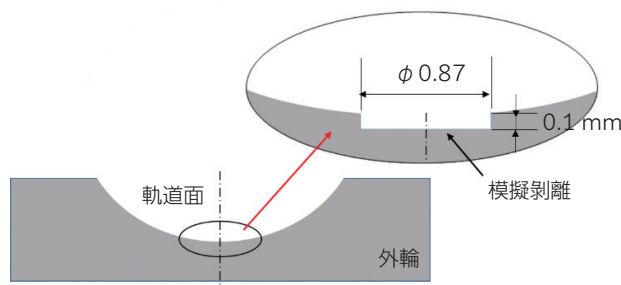


図 9 模擬剥離の模式図

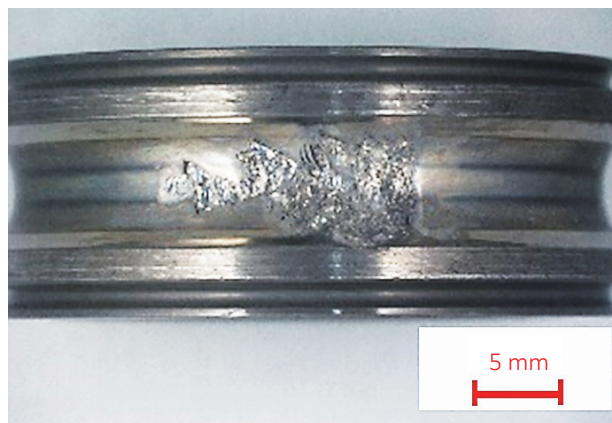


図 10 スプーリング損傷事例

### 5.1.3 試験結果

正常軸受と異常軸受を 2 000 min<sup>-1</sup> で回転させた時の内蔵センサ出力を図 11 に示す。異常軸受では転動体が模擬剥離を通過する度に、明確なスパイク状の加速度が検出されている。今回付与した模擬剥離の大きさ程度の欠陥が軌道輪に生じれば、本開発品により明確な異常検知が可能である。

次に異常軸受で測定される加速度を、内蔵センサと外付けセンサの場合を比較して図 12 に示す。また、図 12 の出力データにエンベロープ処理および周波数解析 (高速フーリエ解析) を施した結果を図 13 に示す。なお図 13 には、外輪に対する転動体の相対回転速度 103 Hz およびその高次の回転速度を記している。転動体が模擬剥離を通過する際のセンサ出力は、内蔵センサの方が外付けセンサよりも大きい。また、周波数解析においても、内蔵センサの方が高周波の振動を高感度に検出できている。

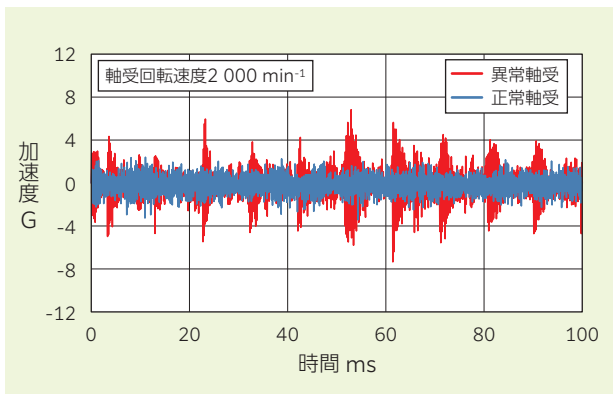


図 11 正常軸受と異常軸受の内蔵センサ出力の比較

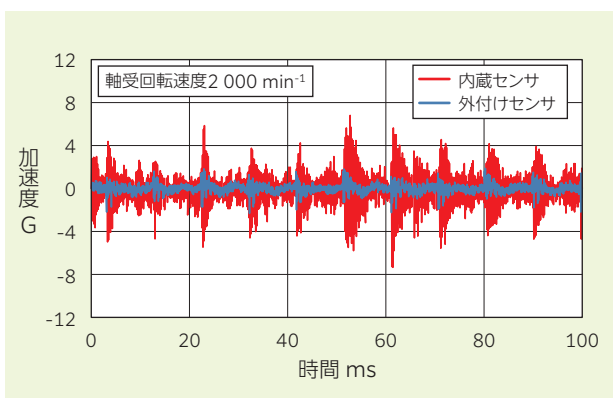


図 12 異常軸受における内蔵センサと外付けセンサの加速度の比較

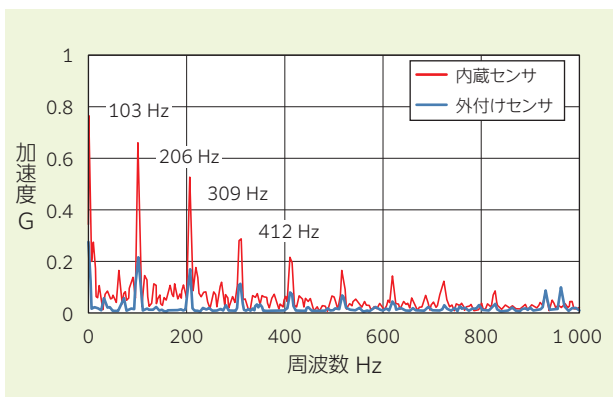


図 13 内蔵センサと外付けセンサの周波数解析の比較

## 5.2 温度検出性能

軸受外輪の外周面に貼り付けた熱電対による計測値と、内蔵した温度センサによる計測値を比較した。供試軸受は表 3 に示す正常軸受とし、図 8 に示す試験装置で計測した。回転速度は深溝玉軸受 6314 (グリース潤滑、非接触シール) の許容回転速度  $4\,600\text{ min}^{-1}$  (NTN カタログ記載値) までとし、約  $1\,000\text{ min}^{-1}$  刻みで回転上昇と 2 時間の保持を繰り返して測定した。測定結果を図 14 に示す。回転上昇後の過渡領域と回転保持時の定常領域のどちらも、両センサの計測値に大きな差はなく、本開発品は軸受外輪に熱電対を貼り付ける場合と同等の温度検出性能を有している。

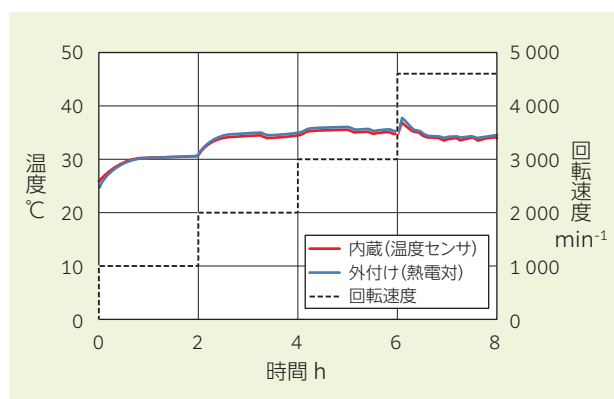


図 14 内蔵したセンサと外付けの熱電対との温度の比較

## 5.3 温度上昇特性

回転速度に対する開発品の発電電力と回転トルクを図 15 に示す。ここで、発電電力は回路で消費される電力と発電機に生じる電力損失の和である。また回転トルクは、軸受の回転に伴う摩擦損失と上記の発電電力を合わせたセンサ内蔵軸受全体の回転トルクに相当する。なお図 15 には、各回転速度で 2 時間保持後に測定した値を示している。回転トルクと回転速度から算出される軸受全体の動力損失に対し、発電電力は 1 ~ 2 % と小さく、発電機と回路を軸受に内蔵することによる軸受温度への影響は小さいと予測される。

実際に軸受の温度を測定した結果を図 16 に示す。軸受の温度は、外輪外周面に貼り付けた熱電対と内蔵センサで測定し、図 16 には各回転速度で 2 時間保持した後の周囲温度からの上昇値を示している。標準軸受と開発品との間に大きな差はなく、開発品の温度上昇特性は標準軸受と同等である。

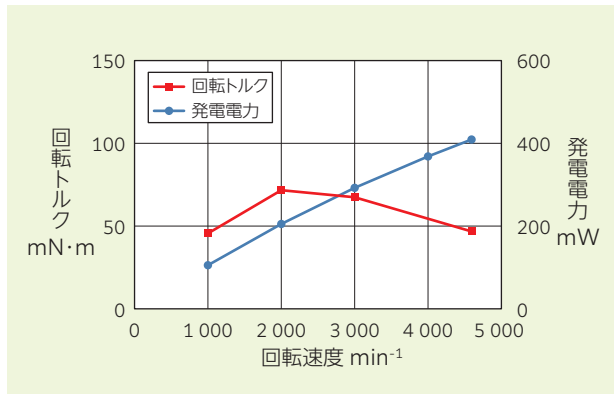


図 15 開発品の発電電力と回転トルク

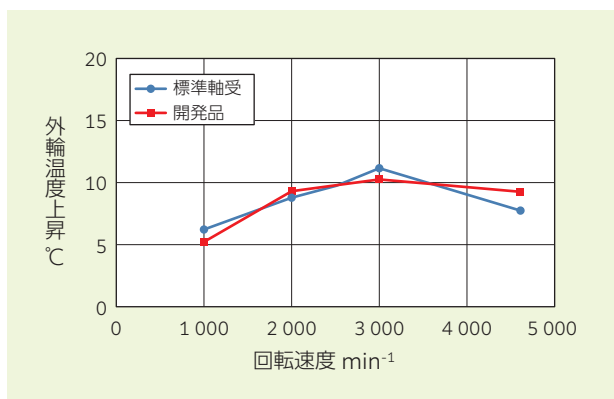


図 16 開発品と標準軸受の温度上昇特性

## 6.まとめ

製造現場におけるダウンタイム低減に向けた取り組みに応えるため、標準軸受にセンサ、発電機ユニットおよび無線デバイスを内蔵したセンサ内蔵軸受「しゃべる軸受®」を開発し、その性能を検証した。今後、設備の状態監視への要求は増えると予測され、さらなる機能向上が求められる。NTN は、「しゃべる軸受®」の機能改善と市場投入を通じ、設備の状態監視の進展ならびに生産効率向上に貢献する。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人 日本プラントメンテナンス協会, 2021 年度メンテナンス実態調査報告書概要, (2022 年 6 月)
- 2) 山田宗平, 則竹茂年, センシング技術を活用した製造・物流現場の効率化検討, 日本機械学会誌, Vol.123, No.1223(2020)19-21.
- 3) 陳山鵬, IoT/AI 時代におけるスマート設備状態監視・診断技術, システム / 制御 / 情報, Vol.65, No.4 (2021) 113-118.
- 4) 宮崎誠, 畠山航, 風力発電装置用状態監視システム (CMS) の開発と適用例, NTN TECHNICAL REVIEW, No.86 (2018) 40-44.
- 5) 橋爪翔平, 澁谷勇介, 近藤大地, 山本庸平, 岩永博之, 工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88 (2020) 33-37.
- 6) 岩永博之, 軸受診断エッジアプリケーションの開発, 検査技術, 2022 年 3 月号, 32-34.
- 7) 新商品紹介 ポータブル異常検知装置, NTN TECHNICAL REVIEW, No.87 (2019) 106.

## 執筆者近影



福島 靖之  
商品開発研究所



後藤 知美  
商品開発研究所



豊口 陽亮  
商品開発研究所



一毛 大吾  
商品開発研究所



松林 晃平  
商品開発研究所

# 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の開発

## Development of Multi Track Magnetic Encoder Integrated Rolling Bearing



奥村 寛\* Hiroshi OKUMURA  
 伊藤 浩義\* Hiroyoshi ITO  
 浜北 康之\* Yasuyuki HAMAKITA

少子高齢化や労働人口の減少による人手不足などを背景に、ロボット市場が拡大している。産業用ロボットとともに、人と作業する協働ロボットやサービスロボットも需要が増えており、市場要求はますます高度化・多様化している。NTN は、ロボットの関節機構向けに、ロータリーエンコーダに用いられる複列磁気リングの技術を応用し、「複列磁気エンコーダ付転がり軸受」を開発した。本稿では、軸の回転支持とともに、高精度な角度検出も可能な開発品の特長と評価試験結果を紹介する。

Robot industry has been expanding on the back of market demand for improved productivity and labor saving as the countermeasures of diminishing working population. Especially, the demand of small robots such as collaborative robots that work with human labors and service robots has been increasing. Through the recent trend, market requirements to the robots have been getting higher and more diversified. NTN has developed the "Multi Track Magnetic Encoder Integrated Rolling Bearing" based on the technology of the "Multi Track Magnetic Ring" for rotary encoders. The bearing is suitable for the robot joints and performs high-precision angle detection at the same time as the shaft support. This report introduces the features, structure, and performance of the bearing.

### 1. はじめに

自動車をはじめ、各種産業のもの造りでは、人の代わりに作業を行うロボットが世界中で普及している<sup>1)2)</sup>。特に近年は、少子高齢化に伴う生産年齢人口比率の低下や、新型コロナウイルス（COVID-19）の感染拡大による生産活動の鈍化などが大きな社会問題となっており、ロボットの導入が加速している。製造ラインに設置される産業用ロボットなど、人から離れた場所で作業するロボットに加え、人と作業する協働ロボットやサービスロボットなどの小型ロボットでも増えており、ロボットの構造や作業は、ますます多様化している。

ロボットは、人間の肩から手首までと同じ動きをする垂直多関節ロボットが代表的で（図1）、ワークを高速で決められた位置に精度良く搬送することが求められる。そのため、関節機構は、モータの回転軸を支持しながら、その回転速度や回転方向、絶対角を高精度に検出して位置決めすることが必須であり、一般的には、サーボモータや減速機に加えて、回転を支持する軸受と、回転状態を検知するロータリーエンコーダが適用される<sup>3)</sup>。

また、近年の関節機構は、上述の多様化の動向に対応すべく、小型・軽量であることや、できる限り部品点数を減らして組立の工数を抑えること、様々な作業環境で使用できるよう耐環境性が高いことが求められている。

これまで NTN は、ロボットの関節機構向けに、高精度かつ小型で、絶対角や回転速度の検出に用いられる複列

磁気リングを商品化している<sup>4)</sup>。複列磁気リングは、磁気センサ IC との組み合わせで「磁気式」ロータリーエンコーダを構成し、高い耐環境性を発揮する。

この技術を応用し、ロボットの関節機構のさらなる性能向上に寄与するため、軸受、複列磁気リング、および磁気センサ IC を一体化した「複列磁気エンコーダ付転がり軸受」（以下、開発品）を新たに開発した。開発品は、軸の回転支持を行うとともに、ロータリーエンコーダとして、回転速度や回転方向、絶対角を検出する。軸受と「磁気式」ロータリーエンコーダの一体化により、ロボットの関節機構の小型化や、ロボットの製造工程における組立やセットアップの工数削減が可能となる。開発品の特長や構造、試験結果を以下に紹介する。

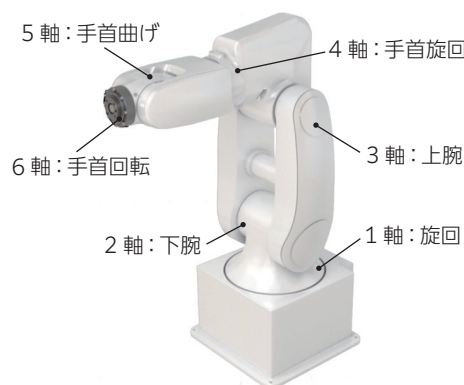


図1 6軸垂直多関節ロボット

\* 産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部



2. 開発品の構造と特長

開発品は、深溝玉軸受、複列磁気リング、および、磁気センサ IC を一体化したユニットである (図 2)。

複列磁気リングは深溝玉軸受の内輪に取り付けられ、磁気センサ IC はセンサハウジングを介して深溝玉軸受の外輪に取り付けられる。図 3 に示すロボットの関節機構などに適用できる。軸の回転に伴って複列磁気リングが回転し、それと対向する磁気センサ IC が磁極の変化を読み取る。これにより、開発品は回転速度や回転方向、絶対角を検出する。磁気センサ IC が検出したデータは、ユーザで用意頂くモータドライバへ伝送された後、ロボットの関節機構の位置決めに用いられる (図 4)。



図 2 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の主要部品構成

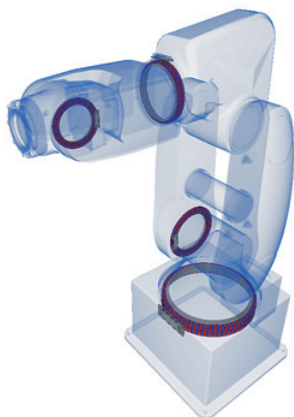


図 3 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の適用可能部位

開発品は、運搬機械などで実績がある当社従来品の回転センサ付軸受 (図 5) で培った回転検出部と軸受の一体化技術を活かし、コンパクトなユニットを実現している<sup>5)</sup>。軸受の内径寸法、外径寸法、幅寸法、負荷容量は回転検

出部を持たない通常の軸受と同じとし、互換性を持たせている。本ユニットの特長を以下の①から④に示す。また、深溝玉軸受 6907 を用いた開発品の仕様を表 1 に示す。

①高精度な角度検出とともに、軸の回転支持も可能

開発品は、軸を回転支持しながら、回転速度、回転方向、絶対角を検出する。磁気センサ IC 内部のパラメータの設定により、最大 20 bit (分解能 約 0.00034°) の高精度な出力が可能である。

②ロボットの関節機構の小型化や軽量化に貢献

深溝玉軸受、複列磁気リング、磁気センサ IC の一体化により、関節機構とロータリーエンコーダを接続するカップリングが不要となり、関節機構の軸長さの短縮や、部品点数の削減、および、それによる関節機構の小型化や軽量化が可能となる (図 6)。

③ロボットの組立やセットアップの工数削減が可能

前項②に記載の部品一体化により、ロボットの部品点数が減り、組立の工数を削減できる。また、ユーザが磁気リングと磁気センサを組み付ける場合に必要な出力信号の調整作業などのセットアップが不要となるため、工数を削減できる。

④周辺環境の影響を受けにくく、耐環境性が高い

開発品は、磁気を利用して、回転速度や回転方向、絶対角を検出する「磁気式」ロータリーエンコーダであり、光を用いて検出を行う「光学式」ロータリーエンコーダに比べ、温度変化や埃、油などの周辺環境の影響を受けにくく、耐環境性が高い<sup>6)</sup>。

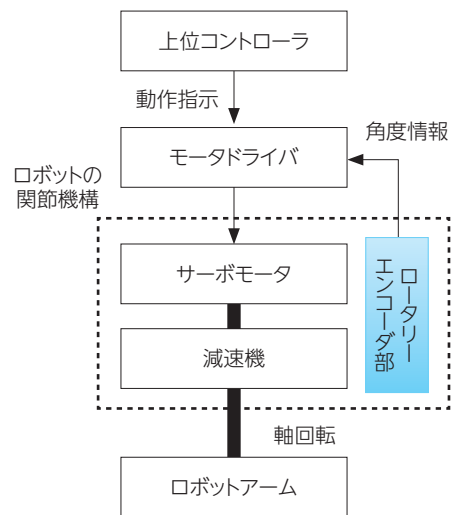


図 4 複列磁気エンコーダ付転がり軸受を用いたロボット関節機構の位置決め概念図



図5 回転センサ付軸受 (当社従来品)

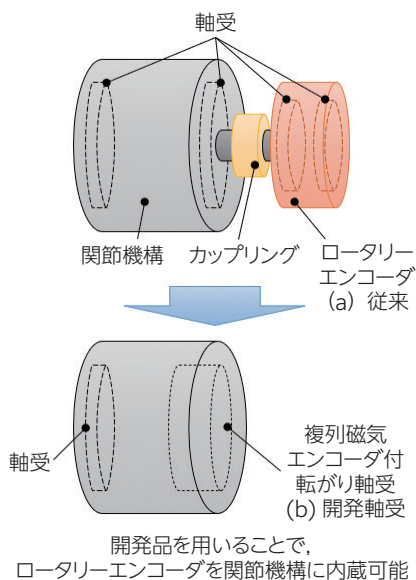


図6 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の採用によるロボットの関節機構の部品点数削減と小型化

表1 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の仕様 (深溝玉軸受 6907)

項目	仕様
深溝玉軸受	6907 (φ35×φ55×10)
配線接続部高さ	6 mm (軸受外径面からの飛び出し量)
エンコーダ部幅寸法	10.5 mm
複列磁気リング	64/63 極対, 1.28 mmピッチ
磁気センサIC	iC-MU
許容回転速度	6 000 min <sup>-1</sup>
角度分解能	最大20 bit
検出情報	回転速度, 回転方向, 絶対角
角度誤差	± 0.1°
電源電圧	DC 5 V
消費電流	60 mA (typ. 値)
信号フォーマット	ABZ, SPI, BiSS, SSI
動作温度範囲	-25~+110 °C

### 3. 絶対角検出原理と分解能

#### 3.1 複列磁気リングと磁気センサ IC

複列磁気リング (図7, 図8) は、薄板鋼板をプレス成形した芯金と、磁性材料を練り込んだゴム材料 (以下、ゴム磁性体) で構成される。ゴム磁性体は、芯金に加硫接着している。ラジアル着磁タイプはゴム磁性体の外径円周面上に、また、アキシャル着磁タイプは幅面に N 極 S 極の極対数の異なる 2 列の磁気トラックを形成する。64/63 極対の複列磁気リングの場合、主トラックに N 極 S 極 64 極対、副トラックに 63 極対を着磁している。

複列磁気リングに対向配置する磁気センサ IC は、主トラックと副トラックに対向する 2 つの検出部と絶対角演算部を内蔵しており、例えば、iC-Haus 社の IC (iC-MU) (図9) を用いることができる<sup>7)</sup>。

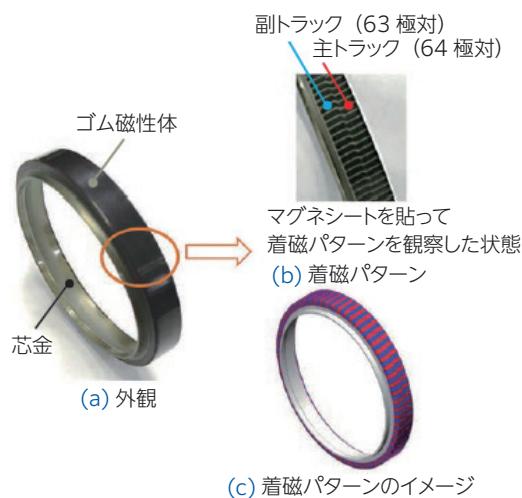


図7 複列磁気リング：ラジアル着磁タイプ

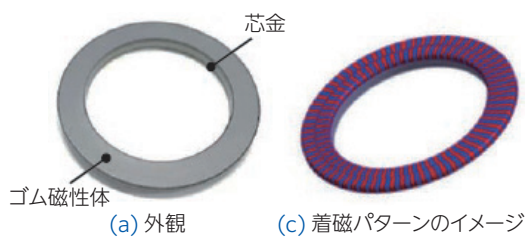


図8 複列磁気リング：アキシャル着磁タイプ

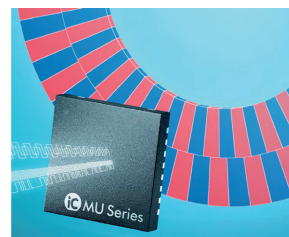


図9 複列磁気リングと iC-MU シリーズの組合せイメージ (イメージ図ご提供：iC-Haus GmbH 様)

### 3.2 絶対角検出原理と分解能

ここでは、64/63 極対の複列磁気リングを例に挙げ、絶対角の検出原理 (図 10) と分解能について説明する。

64/63 極対の複列磁気リングの場合、その 1 回転に対して、磁気センサ IC の検出部 1 からは 64 極対、検出部 2 からは 63 極対の着磁極対に相当する周期の出力信号が得られ、これらの出力信号は 1 回転で 1 極対分の位相差が生じるため、その位相差を計算することで絶対角を検出する。つまり、64 極対の磁気トラックにおいて、何極対目に位置しているのかを検出できる。

磁気センサ IC が極対間の磁気強度を正確に読み取ること、12 bit の逡倍が可能である。このため、1 極対分の角度情報を  $2^{12}$  分割することが可能であり、64 極対数 ( $2^6$ ) とあわせ、18 bit (分解能 約  $0.0014^\circ$ ) の角度情報を出力することができる<sup>8)</sup>。磁気センサ IC のパラメータ設定によっては、最大 20 bit (分解能 約  $0.00034^\circ$ ) の出力も可能である。

センサから出力する角度情報は着磁ピッチの精度に依存する。このように絶対角が検出可能で高い角度精度を実現するためには、着磁極対数の異なる 2 列の磁気トラックを精度よく着磁する必要がある。NTN は独自の着磁技術を開発し、複列磁気リングの各磁極の着磁ピッチを非常に高精度にコントロールしている<sup>9)</sup>。

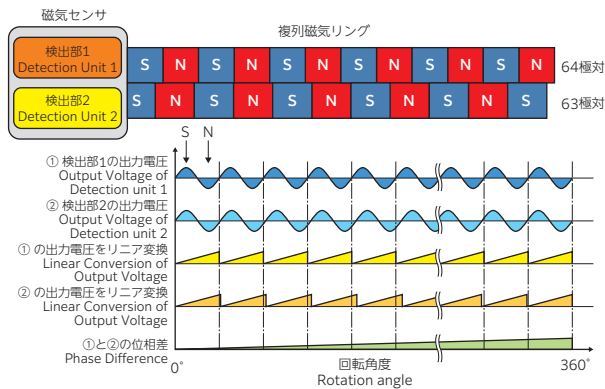


図 10 絶対角検出原理

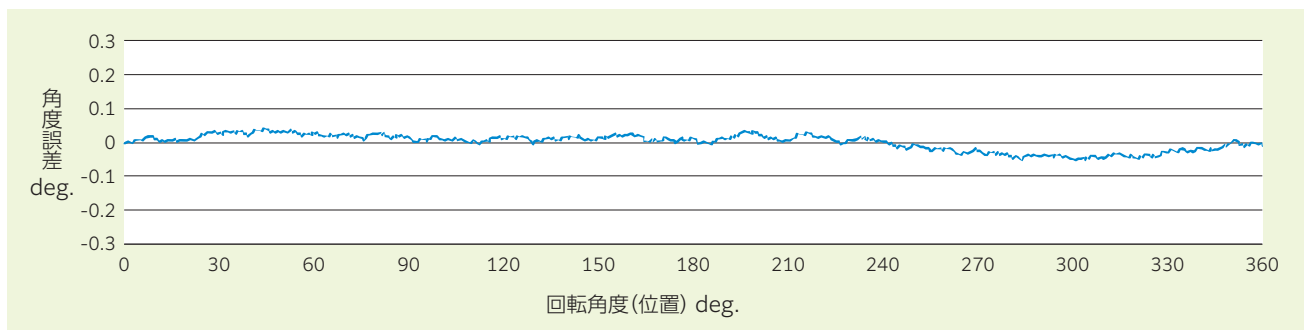


図 11 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の絶対角検出誤差の測定結果

## 4. 評価試験

### 4.1 絶対角検出誤差

深溝玉軸受 6907 を用いた開発品における絶対角検出誤差を測定した。測定条件を表 2、測定結果を図 11 に示す。開発品は、複列磁気リングと磁気センサ IC を採用するとともに、それらを深溝玉軸受に精度良く取り付けられることで、高精度な絶対角検出を実現しており、表 2 の測定条件で絶対角の検出誤差  $\pm 0.1^\circ$  以下を得た。

### 4.2 電磁ノイズに対する耐性

開発品は、ロボットの関節機構の小型化や軽量化に貢献すべく、深溝玉軸受、複列磁気リング、磁気センサ IC、回路基板など、できる限り少ない要素で構成されており、コンパクトなユニットを実現している。ロボットの関節機構で想定される各種ノイズに対する耐性を調査するため、電磁ノイズ試験を実施し、工業環境の EMC 規格 (IEC 61000-6-2) に準拠可能な耐性を有することを確認した<sup>10)</sup> (表 3、図 12)。

表 2 複列磁気エンコーダ付転がり軸受の絶対角検出誤差の測定条件 (深溝玉軸受 6907)

項目	条件
電源電圧	DC 5 V
回転速度	$5 \text{ min}^{-1}$
測定角度	$360^\circ$
測定温度	室温
極対数	64/63 極対

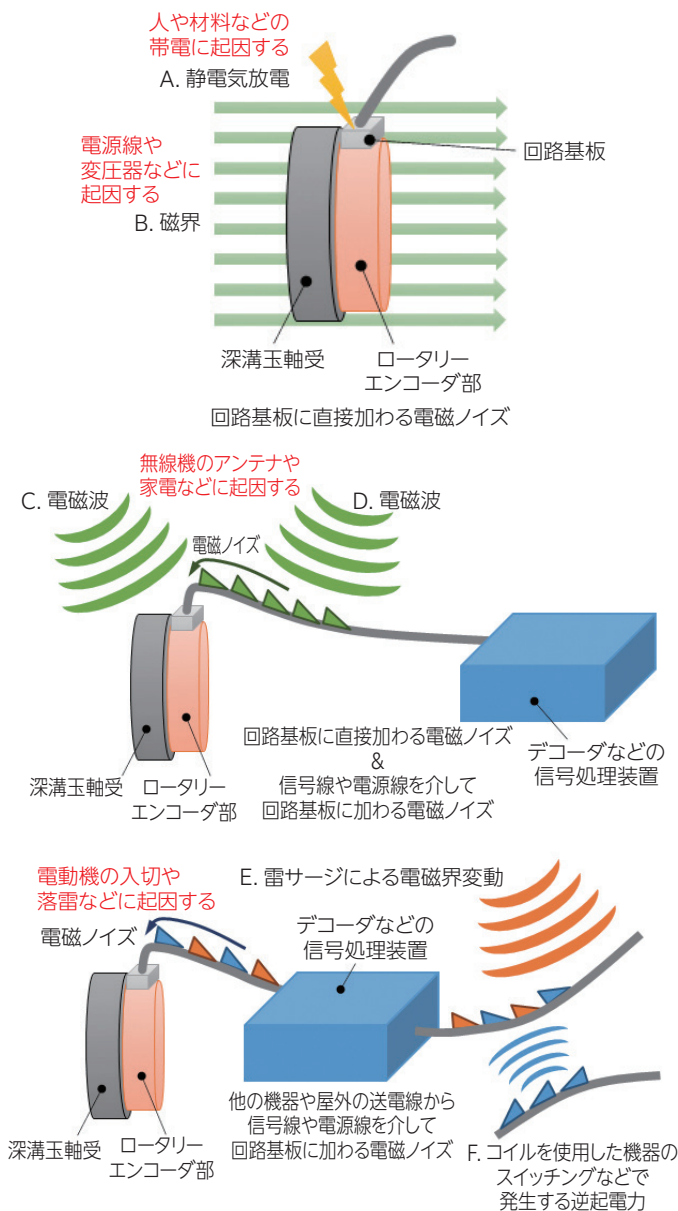


図 12 電磁ノイズの種類

## 5. 開発品の適用例

開発品は、本稿で紹介した特長を活かして、協働ロボットやサービスロボットなど、小型ロボットの関節機構に適用できる。また、光学式ロータリーエンコーダや、レゾルバなどのアナログ式ロータリーエンコーダからの置き換えとして、一般的なサーボモータにも適用できる (図 13)。

例えば、光学式ロータリーエンコーダは、発光素子や受光素子、および、内部への埃や油の侵入を防ぐ隔壁などが必要であり、小型化しにくい。また、レゾルバは、分解能を高めるために基幹部品のコイルユニットに多数のコイルを高精度に配置する必要があり、形状が複雑で小型化しにくい。さらに、レゾルバは、出力信号をデジタル変換する R/D コンバータを要する。

これに対し、開発品は複列磁気リングと磁気センサ IC だけで「磁気式」ロータリーエンコーダを構成できるので、光学式ロータリーエンコーダや、レゾルバに比べ構造がシンプルであり、ロボットの関節機構やサーボモータの小型化や軽量化に寄与できる。また、開発品は、デジタル信号を出力するので、R/D コンバータなどが不要となり、システムを小型化、軽量化しやすい。

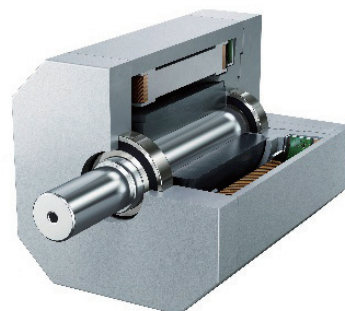


図 13 サーボモータ

表 3 電磁ノイズに対する耐性評価試験

試験 No.	試験規格と名称	想定される電磁ノイズ	試験条件	結果
1	IEC 61000-4-2 : 2008 静電気放電イミュニティ試験	図 12 の A	4 kV	いずれも 損傷なし EMC規格 (IEC 61000-6-2) に準拠可能
2	IEC 61000-4-4 : 2012 バーストイミュニティ試験	図 12 の F	1 kV	
3	IEC 61000-4-5 : 2014 サージイミュニティ試験	図 12 の E	1 kV	
4	IEC 61000-4-8 : 2009 電源周波数磁界イミュニティ試験	図 12 の B	30 A/m (50 Hz/60 Hz)	
5	IEC 61000-4-6 : 2013 無線周波伝導妨害イミュニティ試験	図 12 の D	10 V 0.15~80 MHz	
6	IEC 61000-4-3 : 2006 放射無線周波電磁界イミュニティ試験	図 12 の C, D	10 V/m (80~1 000 MHz) 3 V/m (1.4~6.0 GHz)	



### 6. 開発品のシリーズ展開

開発品は、協働ロボットやサービスロボットなど、小型ロボットの関節機構に適用可能とするため、本稿で紹介した深溝玉軸受 6907 を用いたものを含め、軸受内径 15 mm から 45 mm までのシリーズ展開を予定している。

### 7. まとめ

協働ロボットやサービスロボットをはじめ、ロボットの需要が拡大し、市場要求は高度化・多様化している。

上記のニーズに応えるため、NTN は複列磁気リングの技術を応用し、深溝玉軸受と「磁気式」ロータリーエンコーダとを一体化した「複列磁気エンコーダ付転がり軸受」を開発した。ロボットの小型化や軽量化とともに、組立やセットアップの工数削減が可能となる。

今後も、ロボットをはじめとする産業機械のさらなる性能向上に貢献する商品の開発に取り組み、人々の暮らしをより豊かにする技術や、地球環境を守る技術の進歩を支えていく。

### 参考文献

- 1) 植田敬一, 工作機械用精密軸受の技術動向, ツールエンジニア, 第 60 巻 第 16 号, (2019) 41-43.
- 2) 大胡誠, 國米広道, 林康由, 辻橋将人, ロボット用軸受の技術動向と特長, NTN TECHNICAL REVIEW, No.86, (2018) 34-39.
- 3) 國米広道, 田中秀明, 鈴木康介, 川上雄一郎, ロボット関節部関連商品の開発への取り組み, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2020) 27-32.
- 4) 小池孝誌, 福島靖之, 澁谷勇介, 伊藤浩義, 高精度絶対角検出用複列磁気リングの開発, NTN TECHNICAL REVIEW, No.86, (2018) 45-49.
- 5) 伊藤浩義, 小池孝誌, 回転センサ付軸受について, NTN TECHNICAL REVIEW, No.69, (2001) 108-116.
- 6) 林康由, ロボット関節部関連商品の開発, ベアリング & モーション・テック, No.035, (2022) 25-27.
- 7) iC-Haus GmbH, iC-MU off-axis nonius encoder with integrated hall sensors
- 8) 糸見正二, 伊藤浩義, 建設機械向けセンサユニットの紹介, NTN TECHNICAL REVIEW, No.76, (2008) 118-125.
- 9) 小池孝誌, 福島靖之, 澁谷勇介, ロボット関節の絶対角検出に適用可能な高精度絶対角センサ, 機械設計, 第 62 巻 第 3 号, (2018) 55.
- 10) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-2, Generic standards - Immunity standard for industrial environments IEC 61000-6-2, (2016).

### 執筆者近影



奥村 寛

産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部



伊藤 浩義

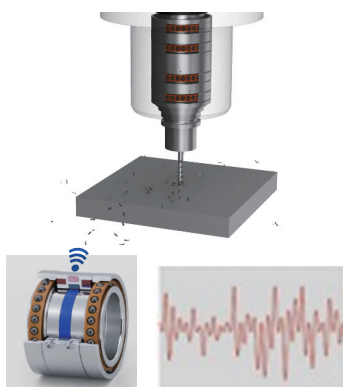
産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部



浜北 康之

産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部

# 工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発 Development of Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles



橋爪 翔平 \* Shohei HASHIZUME      中野 勇大 \* Yudai NAKANO  
 近藤 大地 \*\* Daichi KONDO          大口 耀示 \*\* Yoji OGUCHI  
 山本 庸平 \*\*\* Yohei YAMAMOTO

工作機械は、「マザーマシン」(母なる機械)の別名を持ち、世界中のもの造りを支え続けている。基本性能の「高速、高剛性、高精度」に加え、近年は状態監視やIoTへの対応が求められている。NTNは、軸受に隣接する外輪間座にセンサを内蔵し、高度な状態監視を実現する工作機械主軸用「センサ内蔵軸受ユニット」を開発し、2018年に発表した。さらに2020年には、荷重検出機能を追加するとともに、ワイヤレス化を実現した。今回、センサが検出したデータを取得するデータ受信ユニットや、データを送受信するための通信用ソフトウェアを追加した。本稿では、ユニットの特徴や構造、性能試験結果、工作機械への接続方法について紹介する。

Machine tools are called “Mother Machine” or “Mother of Industry” and have been supporting the manufacturing over the world. They are required for not only fundamental features like high speed, high rigidity, and super precision, but also condition monitoring and “Connected Industries” related technology. NTN has developed the “Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles” in 2018 and additionally applied the load detection function and wireless system to the unit in 2020. NTN has recently added the data receiver unit which collects the data from the “Sensor Integrated Bearing Unit” in machine tool spindles and the software for data communication. This report introduces the features, structure, performance of the unit, and communication examples between the unit and machine tools.

## 1. はじめに

地球環境や社会構造が大きく変化する中、産業界は、長年培った基盤技術に第4次産業革命(Industry 4.0)で生まれた新技術を融合させ、地球温暖化抑止のためのカーボンニュートラルや、持続可能な開発目標(SDGs)の実現、人々の暮らしをより豊かにするための生産性向上など、様々な社会的課題に取り組んでいる。

このうち、自動車、航空機、医療、ITをはじめとする各種産業のもの造りを支える工作機械<sup>1)2)</sup>については、エネルギーロス削減や、労働人口減少への対応として、基本性能である「高速、高剛性、高精度」のさらなる向上とともに、IoT技術を用いた生産性向上や省人化が進められている。

NTNは、こうした取り組みを支援すべく、軸受ユニットの構成部品である間座にセンサを内蔵した工作機械主軸用「センサ内蔵軸受ユニット(以下、本軸受ユニット)」<sup>3)</sup>を開発した。これにより、軸受軌道面周辺の温度や振動のセンシングとそれに基づく工作機械の高度な状態監視を可能とし、2018年開催の第29回日本国際工作機械見本市(JIMTOF2018)に参考出展した。また、2020年には、本軸受ユニットに荷重検出機能を追加するとともに、ワイヤレス化を実現した<sup>4)</sup>。

今回、本軸受ユニットの実用性をさらに高めるべく、本軸受ユニットのセンサが検出したデータを主軸外部で取得するデータ受信ユニットや、データを送受信するための通

信用ソフトウェアを追加した。本軸受ユニットの特徴や構造、荷重センサなどの性能試験結果、工作機械への接続方法について、以下に紹介する。

## 2. センサ内蔵軸受ユニットの機能と目的

本軸受ユニットの機能と目的を表1に示す。工作機械の基幹部品である主軸の回転を支える軸受(以下、主軸用軸受)が損傷すると、工作機械の稼働を停止し主軸を交換する必要があるため、生産性が著しく低下する。そのため、この損傷を早期に検出するニーズが高まっている。また、熟練技術者の高齢化や、生産年齢人口比率の減少に対して、工作機械の生産性を高めることや、加工監視の属人的要素をできる限り抑えることが今後さらに必要となる。本軸受ユニットは、上述のニーズへの貢献が期待できるとともに、持続可能な開発目標(SDGs)の実現にも寄与する。

例えば、主軸に加わる加工荷重を検出し、加工監視に用いれば、切込みや送り、回転速度などの加工条件を最適化でき、加工品質や生産性を高めることが期待できる。また、工具と加工物の衝突を検出し、主軸用軸受の損傷の低減、および損傷の原因究明に活かすことや、図1のように、製品ごとに加工データを紐づけることによって、加工品質の向上や、不良品発生時の早期原因究明などに活用することを目指している。

\* 産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部

\*\* 商品開発研究所

\*\*\* 産業機械事業本部 製品設計部

表 1 センサ内蔵軸受ユニットの機能と目的

	機能		目的	SDGsとの繋がり
		実現手段		
①	主軸用軸受の <b>予圧荷重</b> を検出する (主軸回転中、および主軸組み込み後)	荷重 センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸受の焼付き前に生じる予圧荷重の急激な上昇を捉え、軸受の焼付きの兆候を早期に検出する</li> <li>主軸組み込み後の軸受の予圧荷重の管理が容易となり、主軸の組立工数を削減する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>生産性の向上, 生産の効率化によるエネルギーロスの低減</li> <li>不良ワーク(廃棄物)の低減</li> <li>無人化, 省人化への貢献</li> </ul> 
②	主軸に加わる <b>外部荷重</b> を検出する		<ul style="list-style-type: none"> <li>主軸に加わる加工荷重を検出し、加工監視に用いることで、加工品質や生産性の向上に貢献する</li> <li>工具と加工物の衝突を検出し、主軸用軸受の損傷低減や、損傷の原因究明に活用する</li> </ul>	
③	主軸用軸受の温度変化を監視する	温度 センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸受軌道面や潤滑の状態を監視する</li> </ul>	
④	主軸用軸受の振動変化を監視する	振動 センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>軸受軌道面の状態を監視する</li> <li>工具と加工物の衝突を検出し、主軸用軸受の損傷低減や、損傷の原因究明に活用する</li> </ul>	
⑤	電力供給のための外部接続ケーブルや配線スペース不要	自立 電源	<ul style="list-style-type: none"> <li>主軸の組立工数を削減する</li> <li>主軸の構造変更を不要とする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>自立電源, 生産性の向上によるエネルギーロスの低減</li> </ul>
⑥	データ伝送のための外部接続ケーブルや配線スペース不要	無線 モジュール		<ul style="list-style-type: none"> <li>7 エネルギーを効率的に利用する</li> </ul> 

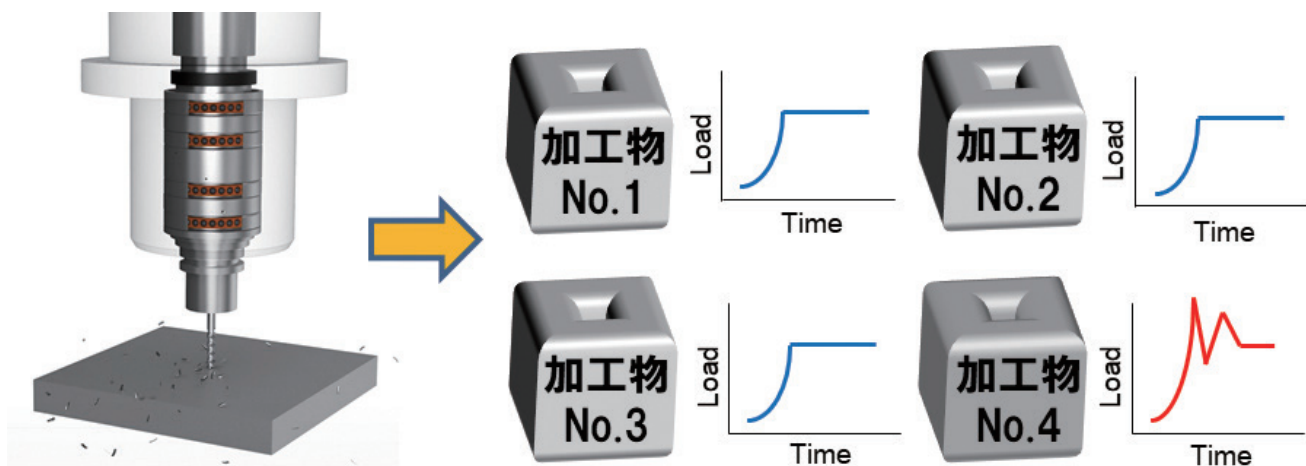


図 1 センサ内蔵軸受ユニットの活用イメージ  
工作機械の製品ごとの加工データ紐づけによる加工品質向上の例

### 3. センサ内蔵軸受ユニットの構造と仕様

#### 3.1 構造

本軸受ユニットの構成イメージを図2に示す。本軸受ユニットは、背面組合せで配置される一組のアンギュラ玉軸受、およびそのアンギュラ玉軸受の間に設けられる外輪間座と内輪間座で構成される。外輪間座と内輪間座には、センサ、センサが検出したデータの処理回路、無線モジュール、および自立電源が搭載されている。

自立電源は電磁誘導式発電機を採用している。コイルとヨークで構成されるステータが外輪間座に内蔵され、N極とS極が交互に着磁されたロータが内輪間座に取り付けられている。外輪間座と内輪間座の相対回転によって電磁誘導が生じ、センサや回路などの駆動に必要な電力が生成される。

本軸受ユニットの工作機械主軸への適用例を図3に示す。軸受には内部すきまや、外輪間座の幅寸法と内輪間座の幅寸法の差などを調整し、予圧荷重を負荷している。これにより、軸受の剛性が高く保たれ、加工品質を高めやすくなる。この構造では、軸受予圧荷重や加工時に工具に加わる荷重は外輪間座に作用するため、本軸受ユニットは荷重センサを外輪間座に設けている。

本軸受ユニットは、センサ、回路、自立電源をコンパクトに収めている。これにより、従来のセンサを内蔵していない外輪間座と同じ寸法を実現している。

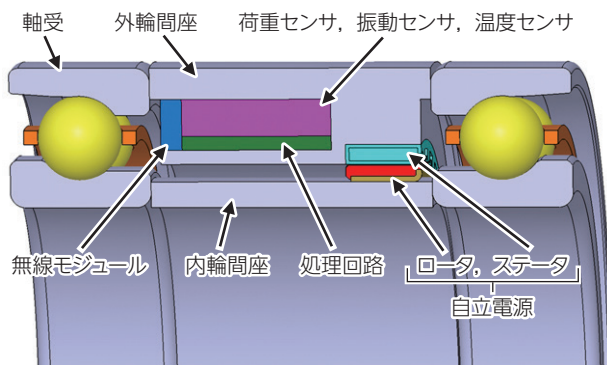


図2 センサ内蔵軸受ユニットの構成イメージ

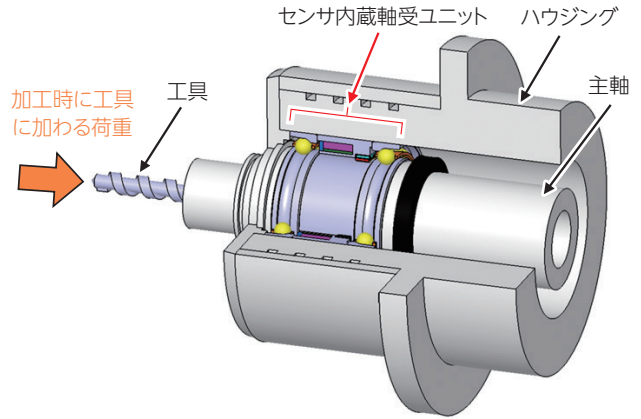


図3 センサ内蔵軸受ユニットの工作機械主軸への適用例

#### 3.2 仕様

本軸受ユニットの仕様を表2に示す。センシング項目は、荷重、温度、振動加速度である。通信規格は、無線モジュールの低消費電力化や小型化を考慮し、Bluetooth Low Energy (2.4 GHz) を採用している。使用温度範囲は、搭載している電子部品の許容温度を考慮し、-20 ~ 70 °C とした。

表2 センサ内蔵軸受ユニットの仕様

軸受	種類	セラミックボール入り 超高速アンギュラ玉軸受 (5S-2LA-HSE014相当) 2列背面組合せ
	内径×外径×幅	φ70×φ110×20(1列分) mm
間座	内輪間座内径×外輪間座外径×幅	φ70×φ110×40 mm
センシング	荷重	最大検出荷重: 45 kN
	温度	検出範囲:- 40 ~ 125 °C
	振動加速度	検出範囲:± 50 G 応答周波数帯域:~ 11 kHz
自立電源		電磁誘導式発電機
通信規格		Bluetooth Low Energy (2.4 GHz)
使用温度範囲		- 20 ~ 70 °C



4. 装置への接続

本軸受ユニットの使用例を図4に示す。センサが検出したデータは、外輪間座に内蔵された無線モジュールからデータ受信用のUSB型アンテナを備えたデータ受信ユニットに無線伝送される。データ受信ユニットとお客様の装置である工作機械本体やサーバをLANケーブルで接続し、データを確認することができる。

無線モジュールから伝送されるデータは、各センサが検出した荷重、温度、振動の3つのデータからなる。いずれのデータも接続した装置に連続的に伝送されるため、高い

応答性が求められる工作機械の制御や、主軸用軸受の状態監視や予知保全への活用が期待できる。

データ受信ユニットを専用の装置に接続するには、個別の接続プログラムが必要であるが、IoTプラットフォームを利用したシステムであれば、汎用的で接続しやすいという利点がある。NTNは、こうした取り組みを支援すべく、産業用IoTプラットフォーム向けの「軸受診断エッジアプリケーション」<sup>5)</sup>を提供している。

本軸受ユニットは、自立電源による電源供給や無線によるデータ伝送ができるため、IoT化が容易である。

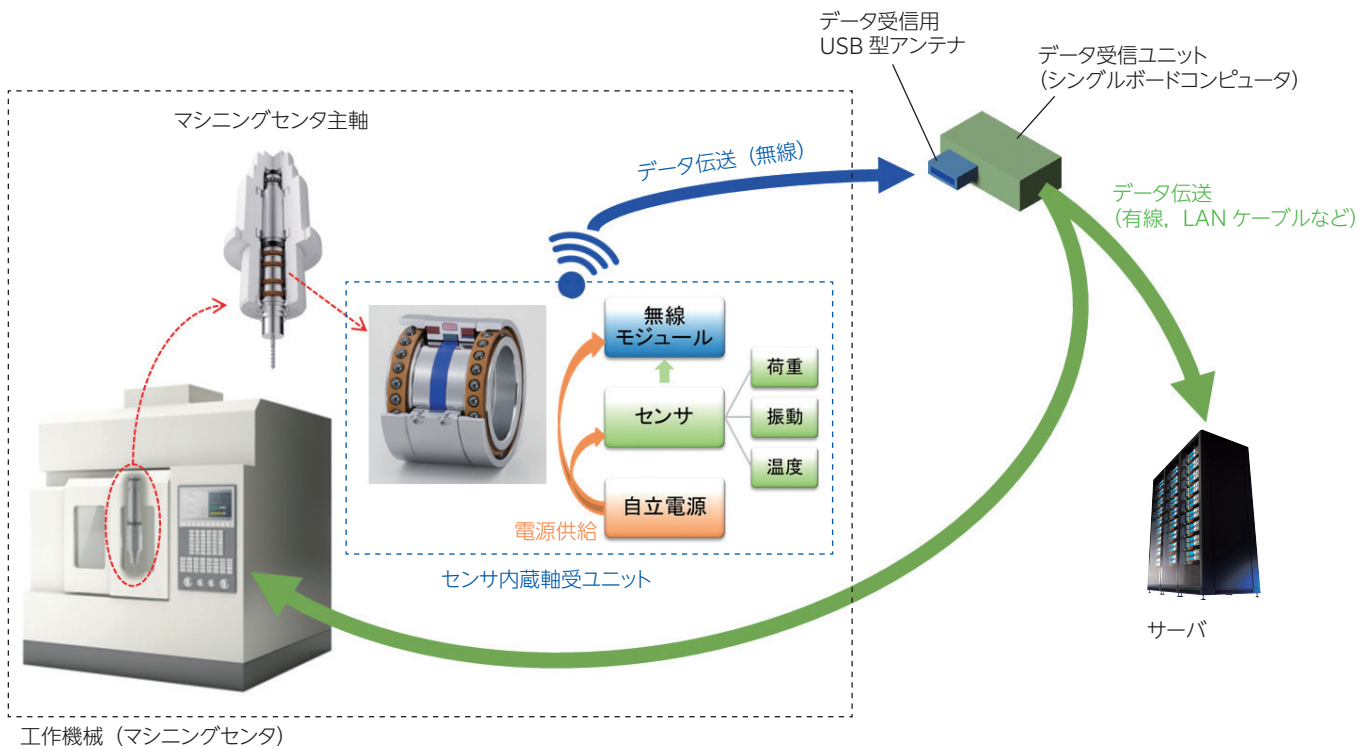


図4 センサ内蔵軸受ユニットの使用例

## 5. 評価試験

本軸受ユニットに内蔵した荷重、温度、振動センサの試験結果を紹介する。

工作機械主軸を模した評価主軸を図5に示す。本軸受ユニットをこの評価主軸に組み込み、評価試験を実施した。本軸受ユニットは、無線モジュールを用いてセンサが検出したデータを主軸外部に設けた受信機へ無線伝送する。

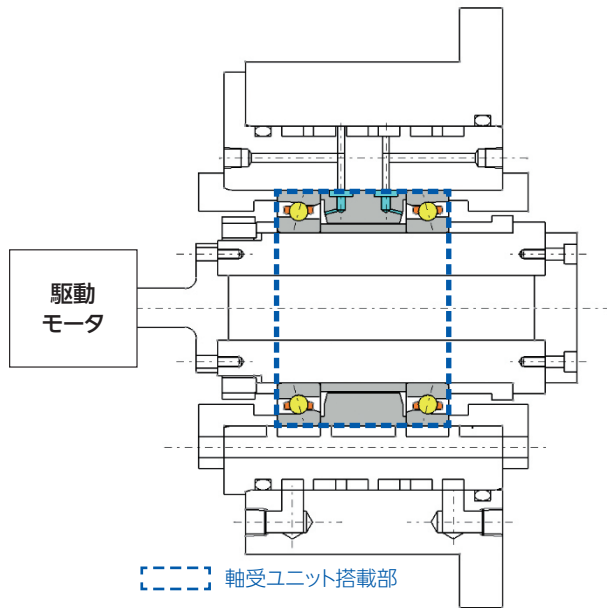


図5 評価主軸の構造

### 5.1 加減速試験における荷重および温度の応答性検証

工作機械の実際の稼働状態を想定し、回転速度を変動させる加減速試験を実施した。試験条件を表3に、荷重、温度の試験結果を図6に示す。本軸受ユニットが回転速度の変動に伴う軸受の予圧荷重、温度の変化を捉えていることを確認した。また、温度は、外付けのセンサよりも高感度であることも確認した。

表3 加減速試験条件

試験軸受	φ70×φ110×20 5S-2LA-HSE014相当品 (セラミックボール入り超高速アンギュラ玉軸受)
予圧方式	定位置予圧(主軸組み込み後予圧750 N)
回転速度	6 000→10 000→6 000→8 000 min <sup>-1</sup>
潤滑方式	エアオイル潤滑
給油量	0.03 mL/10 min
潤滑油	ISO VG32
潤滑エア流量	30 NL/min
外筒冷却	あり, 室温同調
軸姿勢	横軸

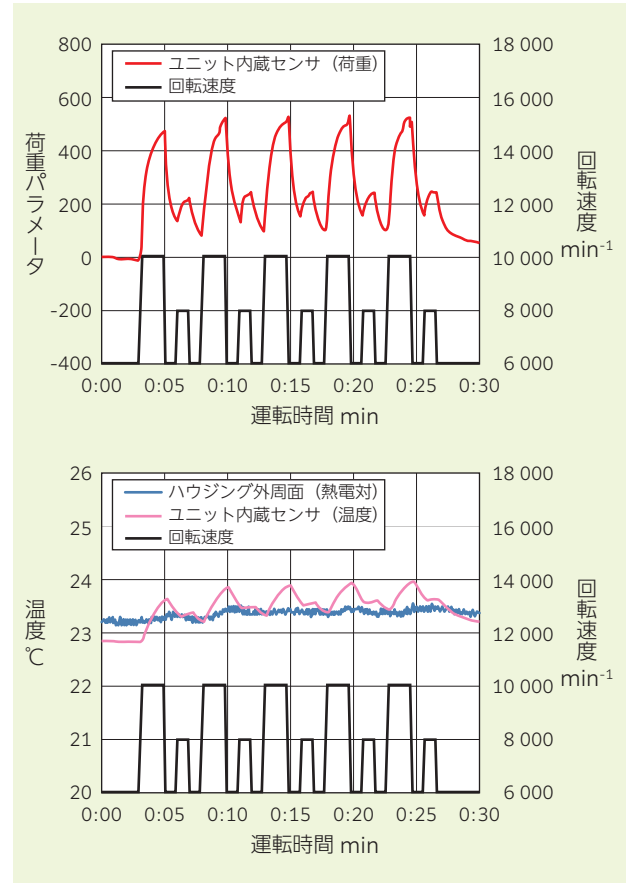


図6 加減速試験結果

### 5.2 圧こん軸受の振動検証試験

振動センサを用いた軸受の異常検知の取り組みとして、軸受軌道面に擬似損傷（圧こん）を形成し、加減速試験と同様、図5の評価主軸にて振動検証試験を実施した。試験条件を表4、軸受軌道面に形成した擬似損傷（圧こん）の3Dイメージを図7に示す。今回、外輪間座内蔵の振動センサに加えて、評価主軸のハウジング外周面の振動も同時計測し、両者を比較した。試験軸受の5 000 min<sup>-1</sup>の振動について、内輪損傷と一致する周波数成分を確認したところ、ハウジング外周面に比べ、外輪間座に内蔵したセンサの特徴量の方が大きく、S/N比の向上も認められた(図8)。外輪間座内蔵の振動センサの方が、軸受の損傷をより精度よく捉えていると考える。

表4 振動検証試験条件

試験軸受	φ70×φ110×20 5S-2LA-HSE014相当品 (セラミックボール入り超高速アンギュラ玉軸受)
予圧方式	定位置予圧(主軸組み込み後予圧750 N)
回転速度	5 000 min <sup>-1</sup>
潤滑方式	エアオイル潤滑
擬似損傷 (圧こん)	内輪軌道面1カ所 深さ6 μm

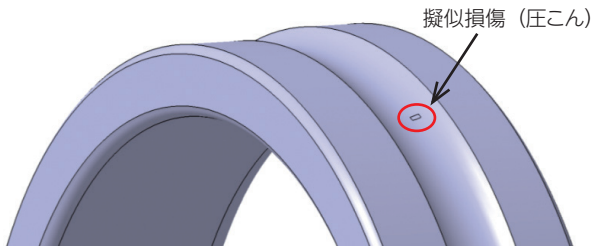


図7 軸受軌道面に形成した擬似損傷(圧こん)の3Dイメージ

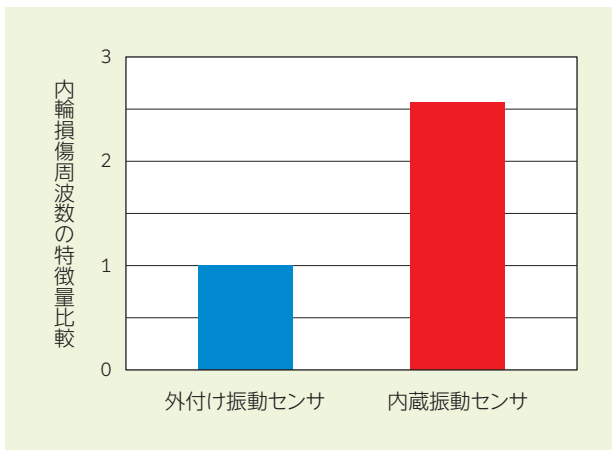


図8 圧こん軸受の振動検証試験結果

## 6. まとめ

状態監視や加工監視のニーズの高まりを背景に、工作機械へのセンシング技術の活用や導入に向けた試みが進められている。

NTNは、これに対応するため、荷重、温度、振動の検出機能と、ワイヤレス機能を内蔵した工作機械主軸用「センサ内蔵軸受ユニット」の開発を進めるとともに、開発品と工作機械の接続方法を今回新たに提案した。

引き続き、本軸受ユニットの運用テストなど実用化に向けた評価を重ね、更なる性能向上と改良を進める。また、本軸受ユニットにAI技術も組み合わせ、より高度な状態監視や予知保全の技術確立にも取り組む。これにより、工作機械の効率的運用を支援する。

今後も、持続可能な開発目標(SDGs)の実現に向けて、地球に優しく、人々の暮らしをより豊かにするための技術開発に取り組む所存である。

## 参考文献

- 1) 松森直樹, 植田敬一, 工作機械用精密軸受の技術動向 NTN TECHNICAL REVIEW, No.84, (2016) 40.
- 2) 植田敬一, 工作機械用精密軸受の技術動向 ベアリング&モーション・テック 2016年9月号 No.002, 33.
- 3) 橋爪翔平, 福島靖之, 澁谷勇介, 山本庸平, 工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発 NTN TECHNICAL REVIEW, No.86, (2018) 50.
- 4) 橋爪翔平, 澁谷勇介, 近藤大地, 山本庸平, 岩永博之, 工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発 NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2020) 33.
- 5) 岩永博之, 軸受診断エッジアプリケーションの開発 検査技術 2022年3月号 Vol.27 No.3, 32.

## 執筆者近影



橋爪 翔平  
産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部

中野 勇大  
産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部

近藤 大地  
商品開発研究所

大口 耀示  
商品開発研究所

山本 庸平  
産業機械事業本部  
製品設計部



中野 勇大 \* Yudai NAKANO  
長谷場 隆 \* Takashi HASEBA

スマート工場実現に向けた取り組みの例として、IoTを活用した状態監視がある。転がり軸受は生産設備の回転を支持する目的で使用されている。転がり軸受の状態監視は軸受の損傷による計画外の設備停止を防ぐために重要である。NTNでは、振動データを利用した、生産設備用の「軸受診断エッジアプリケーション」を産業用IoTプラットフォーム向けに開発した。本稿では、開発した「軸受診断エッジアプリケーション」の特長と生産現場へ適用した例を紹介する。

In efforts to realize a smart factory, IoT-based condition monitoring systems are attracting attention in recent years. Rolling bearings are used to support the rotation of production equipment. We need to monitor bearing conditions to prevent unplanned downtime due to bearing damage. NTN has developed a bearing diagnostic edge application for industrial IoT platforms to monitor bearing conditions using vibration data. In this article, we introduce the features and application examples of the bearing diagnostic edge application.

## 1. はじめに

生産設備における省人化や生産性の向上を背景に、生産設備の予知保全へのニーズが高まっており、従来から実施されている時間基準保全（Time Based Maintenance）から状態基準保全（Condition Based Maintenance）への移行が望まれている<sup>1)</sup>。

生産現場では、生産性の向上を図るために、設備停止によって発生するダウンタイムを最小化することが求められている。そのためには、設備の劣化、故障といった状態を定量的に把握して、発生した異常を早期に検知し、メンテナンスに繋げる監視技術の適用が必要である。

これを実現するための方法のひとつとして、産業用IoT（Internet of Things）プラットフォームを活用した生産設備の状態監視がある。

NTNでは、振動データを利用した、生産設備用の軸受診断エッジアプリケーションを産業用IoTプラットフォーム向けに開発した。本稿では、そのエッジアプリケーションの特長と生産現場へ適用した例を紹介する。

## 2. 生産現場における状態監視

### 2.1 産業用IoTプラットフォーム

産業用IoTプラットフォームとは、産業分野におけるIoTのシステム基盤のことを指す。製造業では、生産現場の様々な設備をネットワークで繋ぎ、生産プロセスを監視、制御することで、各工程の生産性を向上させることができる。

図1に産業用IoTプラットフォームの概念図を示す。この概念図は生産現場に対して、産業用IoTプラットフォーム、エッジアプリケーション、ITシステムが連携する様子を示している。

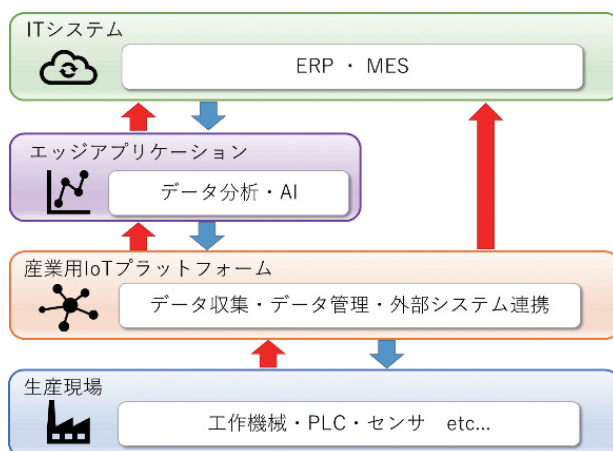


図1 産業用IoTプラットフォーム概念図

\* 産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部



産業用IoTプラットフォームは、生産現場の設備と接続して、設備稼働データを収集する。エッジアプリケーションは、産業用IoTプラットフォームから収集データを受け取って分析する。ここで処理された分析結果は、生産現場の設備や上位のITシステムに送信される。ITシステムは、生産現場における各種情報を総合的に管理する役割を担うもので、統合基幹業務システムERP(Enterprise Resources Planning)や製造実行システムMES(Manufacturing Execution System)などを指す。

この産業用IoTプラットフォームを活用することで、生産設備の稼働監視や状態監視など生産現場の見える化や管理業務が効率化される。

## 2.2 軸受の状態監視

軸受は、高精度・高品質な精密機械部品であり、機械の回転を支持する目的で様々な設備に組み込まれて使用されている。

軸受到損傷が生じると、点検・修理等のために設備を停止しなければならず、生産性が下がる。そのため、軸受の状態を監視し、適切なタイミングで保全作業を行うことが重要である。

軸受の状態監視には、振動データを利用して、軸受を診断する振動法が用いられることが多い<sup>2)</sup>。振動法による軸受診断の種類は、表1に示すように、簡易診断と精密診断の2種類に分けることができる。

表1 軸受診断の種類

種類	診断方法
簡易診断	<ul style="list-style-type: none"> <li>絶対値判定 (基準・規格値に沿って評価)</li> <li>同種比較 (同じ設備・装置を同条件で比較して評価)</li> <li>傾向管理 (継続的な傾向観察により、異常を判断)</li> </ul>
精密診断	<ul style="list-style-type: none"> <li>周波数分析(FFT等)にて、軸受の損傷部位・損傷程度を推定</li> <li>※軸受諸元情報が必要</li> </ul>

簡易診断では、経時的な状態変化や健全な状態からの逸脱度を監視する。あらかじめ決められた基準・規格に沿った絶対値判定や、同じ設備・装置を比較する同種比較、継続的な観察を行う傾向管理などの方法がある。簡易診断によって軸受の状態を適切に把握し、診断結果に基づいて設備の保全計画を立てることで、軸受の損傷による計画外の設備停止等を防ぐことができる。

一方、精密診断は簡易診断の結果を踏まえて、さらなる分析が必要とされた場合に行われる。FFT (Fast Fourier

Transform) などを用いた振動スペクトルの分析により、軸受の損傷部位や損傷の程度を推定する。ただし、スペクトルと損傷部位との関係を分析するには、転動体軌道の直径、転動体直径、転動体個数、接触角などの軸受諸元や、軸回転速度の情報が必要になる。

## 3. 軸受診断エッジアプリケーション

当社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見やセンシング技術、診断技術を活用して、風力発電装置用状態監視システム(CMS)を開発し、「Wind Doctor®」<sup>3)</sup>として販売している。現在、国内250基以上の風力発電装置で同システムによる状態監視サービスを提供している。この技術を応用して、産業用IoTプラットフォームのひとつであるEdgecross<sup>4)</sup>のリアルタイム処理機能を活用した軸受診断エッジアプリケーション(以降、軸受診断アプリ)を開発した。

### 3.1 特長

軸受診断アプリの主な特長を以下に示す。

#### ① リアルタイム診断

当社独自の診断アルゴリズムが組み込まれており、振動データの収集から分析、診断までを自動で行う。軸受診断アプリ1ライセンスにつき、最短約3秒で、最大16か所まで同時に診断する。これにより、わずかな時間に現れる軸受の状態変化を捉え、異常を早期に検知できる。

#### ② しきい値の自動生成

学習したデータを基準として、軸受の状態を判別するためのしきい値を自動で生成する。これにより、作業者の経験が必要とされるしきい値設定作業を不要とした。

#### ③ 軸受型番に限定されない診断

軸受諸元や回転速度等を設定する必要がない。このため、設備に組み込まれた軸受型番が分からない場合や回転速度が分からない場合でも使用できる。

#### ④ 軸受健康状態の段階評価

診断結果は、軸受診断アプリの表示画面上に色と文字により4段階(正常・初期・注意・警告)で表示される。このため、作業者が詳細な分析を行わずとも、軸受の状態を容易に把握することができる。

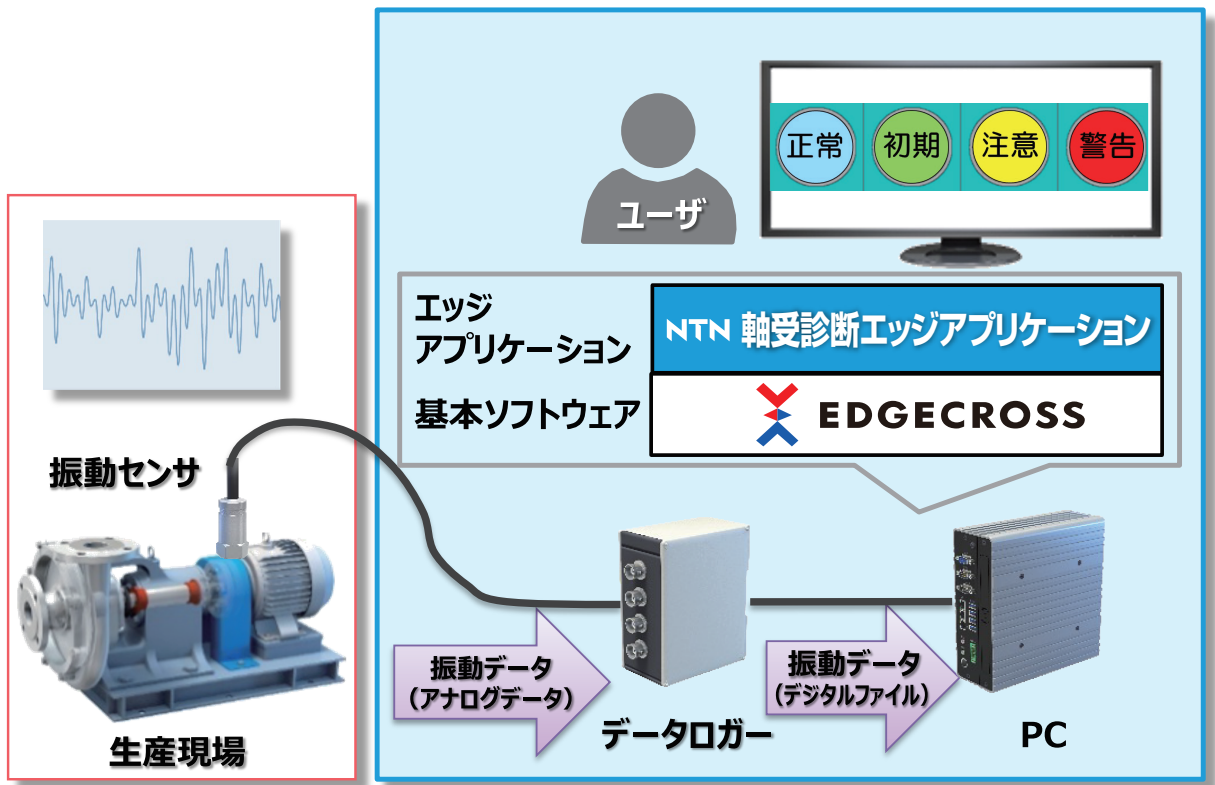


図 2 軸受診断アプリの機器構成

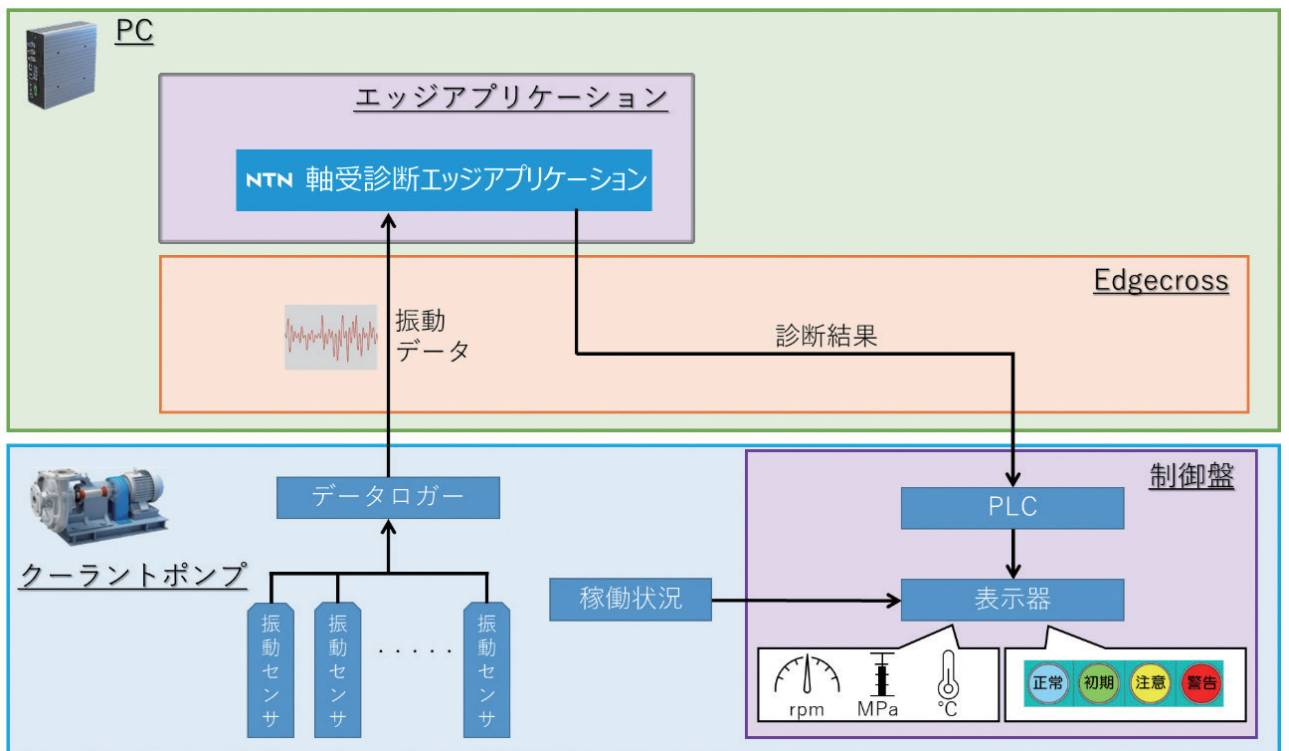


図 3 クーラントポンプの診断プロセス

### 3.2 使用構成

軸受診断アプリの使用時に必要となる機器は、振動センサとデータロガー、WindowsOSを搭載したPCである。Edgecross 基本ソフトウェアおよび軸受診断アプリはPCにインストールすることで使用できる (図 2)。

なお、軸受診断アプリは、生産現場での利便性を考慮して、スタンドアロン形式でも動作可能としている。

## 4. クーラントポンプへの適用事例

生産現場におけるクーラントポンプの状態監視に軸受診断アプリを適用した例を紹介する。

### 4.1 点検作業における課題

設備にクーラントを供給しているクーラントポンプが故障すると、生産ラインの停止に繋がる可能性がある。このような可能性を低減するため、作業員による設備の点検作業が定期的または状況に応じて実施される。しかし、この点検作業は作業員の経験に左右されるため、クーラントポンプの異常を見逃す場合がある。この見逃しを防ぐためには、数値化したクーラントポンプの稼働状況を基に、軸受の状態(損傷の有無やその程度等)を定量的かつ自動で評価する必要がある。

### 4.2 軸受診断アプリの導入

本例における機器構成と計測・診断の流れを図 3 に示す。軸受診断アプリが Edgecross を介して、クーラントポンプ制御用の PLC、表示器と連携する構成とした。クーラントポンプ制御盤の表示器には、回転速度、圧力、温度などの運転情報に加えて、軸受診断アプリの診断結果を表示している。

この例では、クーラントポンプの稼働状況の把握と軸受状態の確認が同時に行えるため、作業員による点検作業の負担が軽減する。また、軸受状態を軸受診断アプリで常時監視することで軸受の異常や損傷の進展を定量的に評価できると考えられる。軸受到損傷の兆候が見られた場合には、診断結果に応じてクーラントポンプの負荷が下がるように制御を切り替えることで、軸受損傷の進展を遅らせることも期待できる。

## 5. PoC 構築支援サービス

生産現場にシステムを導入する際には、導入効果を事前に検証する PoC (Proof of Concept: 概念実証) が行われる。

PoC で使用するセンサ・装置類はユーザが用意するのが一般的である。しかし、軸受診断アプリの導入において、振動センサ、データロガー等が用意できず、PoC の実施が難航することがあった。そこで、用意が必要となる機器類一式をユーザに一定期間無償で貸し出す「PoC 構築支援サービス」<sup>5)</sup>を Edgecross コンソーシアム<sup>4)</sup>と共同で実施している。

図 4 に、PoC 構築支援サービスにおける運用開始までのフローを示す。本サービスは、診断対象の設備や課題に関するヒアリングを行い、PoC 実施内容と、当社の作業支援内容を決定する。機器類のセットアップに不安を抱えるユーザに対しては、周辺機器の設置、軸受診断アプリの設定支援も行っている。

本サービスを利用いただいたユーザからは、すぐに PoC を開始でき、実際の運用イメージを掴むことができた等の評価を頂いた。PoC 構築支援サービスの利用終了後も、多くのユーザに軸受診断アプリを継続利用頂いている。

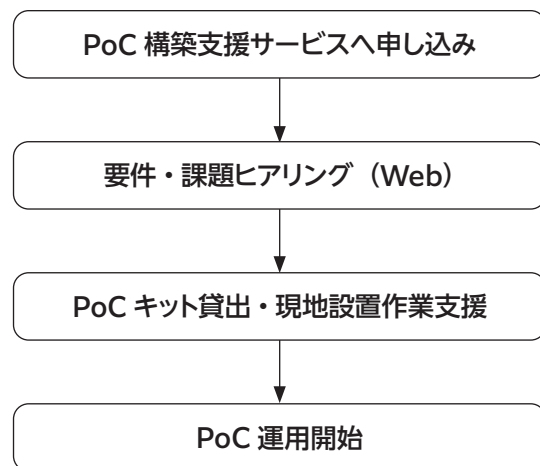


図 4 PoC 構築支援サービスフロー

## 6. おわりに

本稿では、産業用 IoT プラットフォームを活用した軸受診断エッジアプリケーションを紹介した。また、クーラントポンプへの適用を例に軸受診断エッジアプリケーションの生産現場への導入について触れた。

軸受診断エッジアプリケーションは、本稿の事例に限らず、様々なユーザに利用されている。今後も利便性を高めた商品を開発して、ユーザのニーズに寄り添ったサービスソリューションを提供し、各産業の生産性向上に貢献していく。

### 参 考 文 献

- 1) 経済産業省, スマート保安の推進に向けた官の取組状況について, (2020年12月)  
[https://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/smart\\_industrial\\_safety\\_symposium/images/meti\\_goto.pdf](https://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/smart_industrial_safety_symposium/images/meti_goto.pdf)
- 2) ISO 20816-1:2016, 機械的振動—機械振動の測定と評価—パート 1.
- 3) 宮崎誠, 畠山航, 風力発電装置用状態監視システム (CMS) の開発と適用例, NTN TECHNICAL REVIEW, No.86, (2018) 40-44.
- 4) Edgexcross コンソーシアム, Edgexcross コンソーシアム公式ホームページ,  
<https://www.edgexcross.org/ja/>
- 5) Edgexcross コンソーシアム, PoC 構築支援サービス, Edgexcross コンソーシアム公式ホームページ,  
[https://www.edgexcross.org/ja/dounyu\\_kentou/poc.html](https://www.edgexcross.org/ja/dounyu_kentou/poc.html)

執筆者近影



中野 勇大

産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部



長谷場 隆

産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部



# 自動車のEV化・電動化への当社の取り組み

## NTN's Activities for Electric Vehicle and Electrification of Automobile

楯岡 生也\* Ikuya TATEOKA

地球規模の気候変動問題に対応するために、2015年のパリ協定を起点として、世界各国で温室効果ガスの排出量削減への取り組みが活発化している。日本・米国・EUなどの主要国は概ね2050年までのカーボンニュートラル実現を目標に、国家施策として、グリーンエネルギーの導入拡大や産業構造の変革を進めている。この流れを受けて、産業界やそれに属する各企業を見ると、自動車産業では走行中の排気ガス発生を抑制できる電動車の開発・販売拡大が加速している。本稿では、カーボンニュートラルに貢献する当社の省エネルギー商品・電動化対応商品を紹介する。

With the Paris Agreement of 2015, countries around the world are stepping up efforts to become carbon neutral. Major countries such as Japan, the U.S., and the EU are aiming to achieve carbon neutrality before 2050 by expanding the introduction of clean energy and reforming their industrial structures. The automotive industries are accelerating the development and expansion of sales of electric vehicles that can reduce the generation of exhaust gas. This paper introduces NTN's products for energy-saving and electrification of automobile. The products contribute to carbon neutrality.

### 1. はじめに

地球温暖化を背景に脱炭素社会、いわゆるカーボンニュートラルへの取り組みが活発化している。2015年12月の第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定では、世界的な平均気温上昇を産業革命以前に比べ、長期目標として2℃より低く抑えることとし、さらに努力目標として1.5℃以下に抑制することを設定した。その実現のため、早期の温室効果ガス排出量のピークアウトと今世紀後半のカーボンニュートラルの実現を目標として掲げている。さらに2021年に開催されたCOP26においては1.5℃目標が努力目標ではなく世界共通目標として明記された。

我が国でもパリ協定に基づき、経済産業省を中心に「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。その中で今後の成長が期待される14分野のうち、自動車産業分野におけるグリーン成長戦略の一つとして2035年の新車販売について電動車の割合を100%とすることが目標として掲げられており、カーボンニュートラル対応の一環として今後EVを含む電動車の開発・販売が一層加速していくものと考えられる。図1に自動車生産台数推移と電動車の生産予測を示す。

一方、最近の自動車分野における代表的な開発トレンドとしてConnected(つながる), Autonomous(自動運転), Shared(シェアリング), Electric(電動化)を総称するいわゆるCASE(図2)が注目されている。例えば、自動運転分野においては、自動車の基本機能である「走る」・「曲

がる」・「止まる」の駆動・制御をサポートする様々なシステムの普及拡大に伴い、ワイヤ化を中心に電動化が進められている。このような世の中の流れを背景に、当社においてもカーボンニュートラル、CASEに貢献すべく省エネルギー商品・電動化対応商品の開発に注力している。

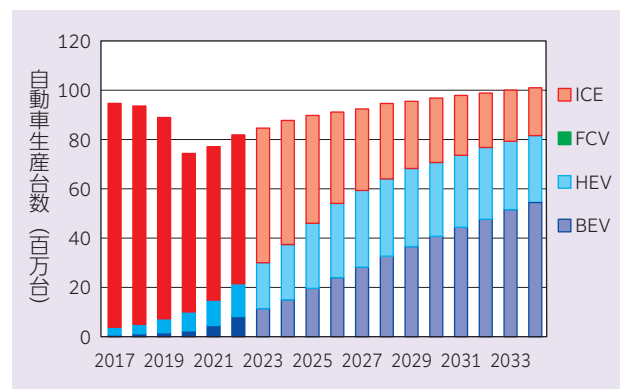


図1 自動車生産台数推移の予測<sup>1)</sup>

\* 自動車事業本部 副本部長

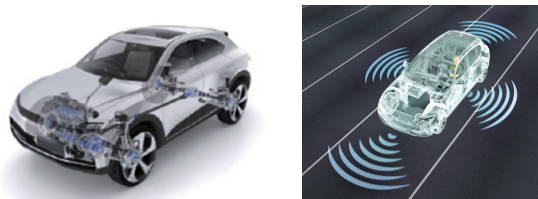
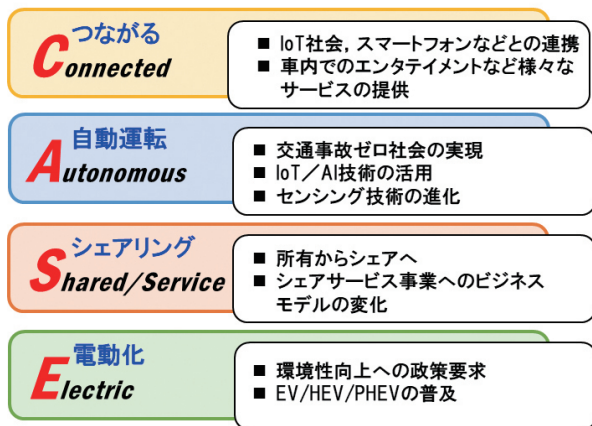


図2 自動車 CASE の概略

## 2. 市場動向および当社の研究開発による対応

表1に自動車産業における市場動向、技術トレンドと市場ニーズに合致した当社の開発商品を示す。EV化における主要課題は、航続距離の延長であり、消費電力を抑制するため、各部品に対して小型・軽量化、低トルク化、高効率化の要求が高まっている。これに加え駆動モータには、同じサイズでより高いモータ出力を得るために、高速回転化の要求が高まっている。さらに、駆動装置全体の軽量化

に伴い、ハウジングが薄肉化するため、転がり軸受には、クリープ現象（負荷による外輪変形を起点に、ハウジングと軸受のはめあい面が少しずつずれる現象）の抑制が要求されている。また、電動補機類の高効率化を図るため、潤滑油の低粘度化や供給量を削減する傾向があり、転がり軸受が希薄潤滑条件で使用されるケースが増えている。転がり軸受が希薄潤滑条件で使用されると、水素脆化による軸受の早期破損リスクを高める可能性があり、当社では新規鋼材と特殊熱処理技術の適用により、水素脆性による軸受の早期破損を抑制する長寿命化技術を開発した<sup>2)</sup>。

一方、自動運転レベルの進歩に伴い、人が運転から解放され、居住空間として広く静かな車内空間への要求が高まると予想している自動車メーカーも多く、バッテリーや電動駆動ユニットのレイアウトの自由度の向上、スペース有効活用に資するコンポーネント設計の要求がある。グローバル市場のSUV車の需要増やバッテリー積載量拡大のためのロングホイールベース化によって、車両最小回転半径が大きくなる傾向にあり、その対応として、当社ではCVJの高角化や後輪転舵機構の開発に取り組んでいる。さらに、安心安全や快適性を追求するため、駆動モータ、ブレーキ、サスペンション、ステアリングおよびこれらを組み合わせたシステム制御に取り組む必要がある。当社では、トライボロジー、軸受設計技術、メカトロニクス等のコア技術を活かした電動化に対応するモジュール商品の開発にも取り組んでいる。以下では、代表的な開発商品を紹介する。

表1 自動車電動化の市場動向／技術トレンド／市場ニーズに合致した当社の開発商品

市場動向	技術トレンド	市場ニーズに合致した開発商品
EV化の加速 省エネルギー化	小型・軽量化	・遊星減速機用ニードル軸受 ・クリープレス軸受
	低トルク化	・超低フリクションシール付深溝玉軸受 ・低フリクションハブベアリングIV
	高効率化	・高効率固定式等速ジョイントCFJ
	高速化	・EV・HEV用高速深溝玉軸受
	潤滑油の低粘度化	・耐水素脆性軸受
快適性の追求	走行安定性	・後輪ステアリング機能付ハブベアリングRa-sHUB®
安全性の追求	電子制御技術向上	・電動油圧ブレーキ用ボールねじ駆動モジュール ・電動オイルポンプ

### 3. 自動車のEV化・電動化に対する開発商品

#### 3.1 高速回転対応の深溝玉軸受

自動車の電動化の推進により e-Axle の市場規模が拡大している。e-Axle のモータ軸や減速機のモータ直結部を支持する深溝玉軸受には、高速回転対応が求められる。深溝玉軸受は回転速度が上がると、遠心力により樹脂保持器の保持器ポケットと転動体（玉）が接触し焼付きが起る恐れがある。

そこで、高速回転時の保持器変形を考慮した新形状の樹脂保持器を採用した「EV・HEV 用高速深溝玉軸受」を開発し、油潤滑で  $d_m n = 180 \times 10^4$  運転が可能な条件を見出した<sup>3)</sup>。ここで、 $d_m n$  は軸受転動体ピッチ円径と回転速度の積で、単位は  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$  である。

新形状の樹脂保持器は下記の特長がある。新形状の樹脂保持器外観を図3に示す。

- (1) 高強度材料を採用  
⇒ 保持器の剛性・高温強度の向上
- (2) 変形抑制のためポケット底の肉厚化  
⇒ 保持器円環部の剛性向上
- (3) 保持器ポケット間の肉抜き（軽量化）  
⇒ 遠心力変形の低減
- (4) 保持器ポケット内面に通油溝設置  
⇒ 保持器と転動体の潤滑性向上

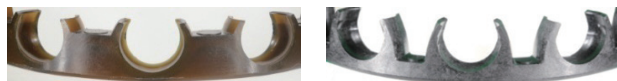


図3 樹脂保持器の外観写真

#### 3.2 超低フリクションシール付深溝玉軸受

独自形状の低フリクションシールを採用することで、従来の接触タイプシールより回転トルクを 80 % 低減した「超低フリクションシール付深溝玉軸受」を開発した。

e-Axle などの電動駆動装置に用いられる転がり軸受には、長寿命に加え、さらなる低トルク化が求められている。また、減速機内に発生するギヤの摩耗粉など、硬質異物の軸受侵入による軸受寿命の低下を抑制するため、従来は接触タイプシールの適用が標準的であったが、シール部が軸受内輪に接触することで、回転時に引き摺りトルクが発生する課題があった。さらに、近年の EV や HEV といった高速回転が必要とされる用途においては、シール部の周速限界の制約により、接触タイプシールの適用は困難であった。

「超低フリクションシール付深溝玉軸受」は、シールリップのすべり接触部に円弧状（半円筒状）の微小突起を等

間隔に設けた新開発の接触タイプシールを採用することで、回転トルクを従来品比で 80 % 低減し、非接触タイプシールの玉軸受に匹敵する低トルク効果を実現した。回転時には、微小突起によるくさび膜効果によって、シールと内輪の摺動面の間に油膜が形成され、接触タイプシールでありながら、シールの引き摺りトルクを大幅に低減している。さらに、シールリップの突起は微小なため、潤滑油を通して軸受に有害な硬質異物の侵入は防ぐことができ、軸受寿命を低下させない。

#### 3.3 遊星減速機用ニードル軸受

同軸タイプの e-Axle の遊星減速機（図4）は、軸方向の小型化が図られている。また、サンギヤとリングギヤが同一軸線上に並列する遊星減速機には、小径、長軸のプラネタリシャフトを適用する傾向があり、且つ軸受は高速回転、希薄潤滑、モーメント荷重環境下での耐久性が要求される。これらのニーズに対応する当社の遊星減速機用ニードル軸受を紹介する。

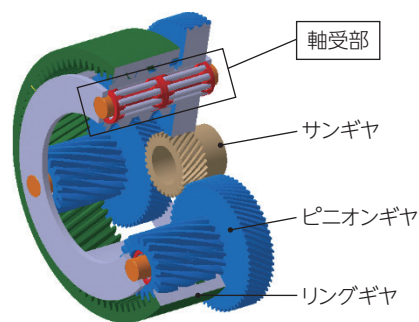


図4 同軸タイプの e-Axle 遊星減速機の構造

遊星減速機用ニードル軸受（図4内の軸受部）は、ころ、保持器、シャフトで構成されており、各構成部品の特長は以下の通りである。

- (1) ころ（高炭素クロム鋼，特殊熱処理）  
機能上必要なクラウニング形状を確保し、モーメント荷重環境下の最大接触応力を低減した。
- (2) 保持器（低炭素鋼，浸炭処理）  
材料変更，溶接部形状の最適化，及び適切な熱処理の選定により，保持器疲労強度の向上を図った（従来品比：1.2倍）。
- (3) シャフト（低炭素鋼，特殊熱処理）  
焼入性に関わる合金成分が少ない材料の選定と最適な熱処理により，耐塑性曲がり性を改善した（従来品比：70%改善）。また，表層残留オーステナイト量と表面硬さを最適化し，耐久性向上を図った。

### 3.4 低フリクションハブベアリング

当社は、これまで長年にわたり、タイヤの回転を支えるハブベアリングの軽量化や長寿命化、高効率化などを追求し、研究開発を重ねてきた。ベアリングと周辺部品とのユニット化を進め、小型・軽量化による低燃費化や組付性の向上に貢献してきたほか、材料・熱処理・グリース・シール構造などの改良を重ねることで、長寿命化と低トルク化を実現した商品を市場展開してきた。表2に低フリクションハブベアリング<sup>4)</sup>の改良の変遷を示す。

今般、グローバルで自動車の燃費向上やCO<sub>2</sub>排出規制の強化に対応するため、さらなる低トルク化に取り組み「低フリクションハブベアリングⅣ」を開発している(図5)。「低フリクションハブベアリングⅣ」では、特殊増ちょう剤を適用したシール塗布グリースを開発し、耐泥水性や耐低温性などの機能を確保しながらシールの回転トルクを従来グリース比38%の低減が確認できた。現在、シールの限界性能を評価しており早期市場投入する。さらに、軸受の内部予圧を最適化し、2019年に開発した低フリクションハブベアリングⅢ<sup>5)</sup>(表2)までの要素技術を組み合わせて、低フリクションハブベアリングⅠに対して軸受の回転トルクを67%低減した。

表2 低フリクションハブベアリングの改良の変遷

低トルク化技術 適用因子		低フリクション ハブベアリング			
		I	II	III	IV
軸受	軸受諸元、予圧			○	◎
	軸受内部グリース		○	◎	←
シール	シール塗布グリース		○	←	◎
	リップ設計	○	←	←	←
	リップ接触状態		○	←	←
	リップ接触枚数		○	←	←

○：初回改良、◎：追加改良

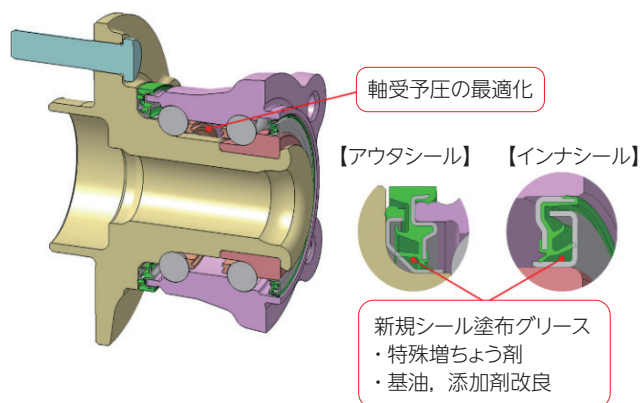


図5 低フリクションハブベアリングⅣ

### 3.5 高効率固定式等速ジョイント「CFJ<sup>6)</sup>」

エンジンやモータからの動力は、変速減機、デファレンシャルを介し、駆動軸(ドライブシャフト)を経てタイヤに伝達される。自動車の燃費・電費の改善には、これら動力伝達経路のトルクロスを如何に削減するかが課題となる。

ドライブシャフトは固定式としゅう動式の2つの等速ジョイント(CVJ)をシャフトで連結した構成で、一般的なトルク損失率は約1%である。ここでは、独自構造のスフェリカル・クロスグループを採用し、トルク損失率を従来品比約50%以上低減した「CFJ」を紹介する。

図6は「CFJ」の構造を示し、軌道溝(トラック)を備えた内輪・外輪、回転トルクを伝達する8個のボール、及びボールを保持するケージで構成される。CVJのトルク損失は部品間の摩擦によるエネルギーロスに起因し、「CFJ」はこれら内部摩擦を低減すべく内輪と外輪の円弧状トラックを軸方向に傾斜させ、且つ隣り合うトラックを鏡像対称に配置した。従来品では、ボールがケージを押す荷重(図中F1・F2)は全てのトラックで一方向に向いていたが、「CFJ」では上述した構造により、互い違いにケージを押すため、隣同士のトラックで内部力が相殺され、従来品に比べ内部部品間の摩擦を大幅に低減できた。

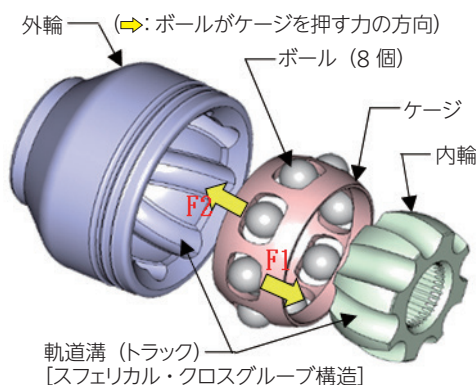


図6 CFJの構造と内部力



「CFJ」は、作動角9度でトルク損失率0.4%以下（従来品比削減率50%以上）を達成し、世界トップクラスの伝達効率を得た。従来品との効率の差がそのまま燃費・電費の改善率に相当することが知られており、2022年度から量産を開始した「CFJ」は、今後の脱炭素社会に大いに貢献できる新商品として期待される。

### 3.6 ボールねじ及び電動油圧ブレーキ用ボールねじ駆動モジュール

当社のコア技術の1つであるボールねじは、2004年より自動車用途での量産を開始し、現在までに多数の量産実績を有する。当社ボールねじの特長としては①直動変換効率90%以上、②高負荷容量（図7）③循環部品の高い信頼性による位置決め性・位置保持性の向上等が挙げられる。表3に当社ボールねじの採用例を示す。

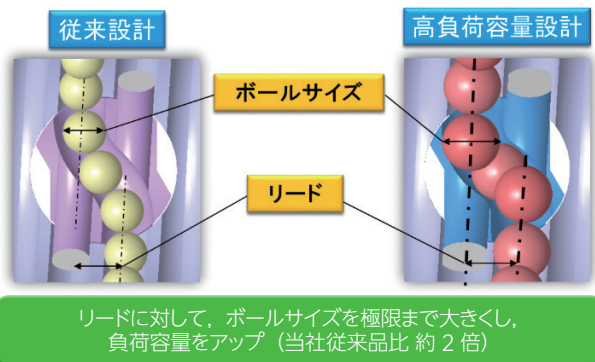


図7 当社ボールねじの特長

表3 当社ボールねじの採用例

採用箇所	ボールねじ
AMTシフト部	
可変バルブ リフト機構	
電動油圧ブレーキ	図8

AMT: Automated Manual Transmission

ボールねじを適用したモジュール商品として、図8に示す電動油圧ブレーキ用ボールねじ駆動モジュールを紹介する。EVやHEVなどの電動車のブレーキには、車両制動時の運動エネルギーを電気エネルギーとして回収する回生機構が採用されている。効率よくエネルギー回収を行うた

めには、変化する制動力に瞬時に対応できるよう、回生ブレーキと油圧ブレーキの配分を最適化する協調制御が重要となる。これに対応するため、当社はボールねじの製品技術を活用し、モータ駆動により精密な油圧ブレーキの制御が可能な電動油圧ブレーキ用ボールねじ駆動モジュールを開発し、2012年より量産を開始している。

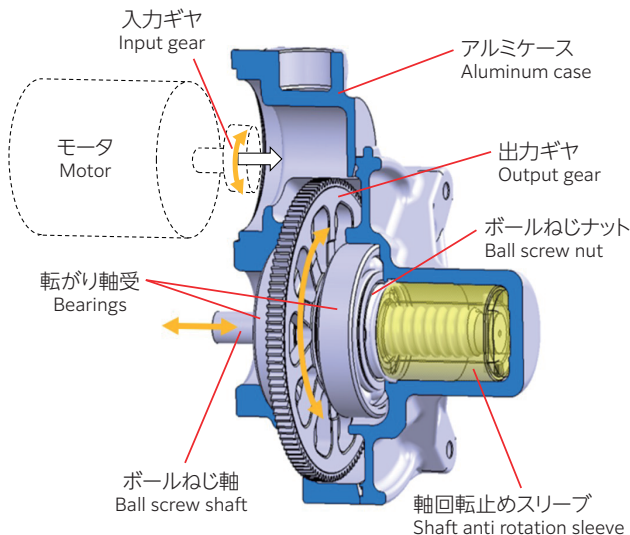


図8 電動油圧ブレーキ用ボールねじ駆動モジュール構造図

今後の自動ブレーキの義務化や高機能化に伴い、ブレーキにはさらなる応答性向上が求められる。また、燃費・電費向上のため電動油圧ブレーキシステムの採用拡大が進んでいる。自動ブレーキの高応答化等に貢献できる当社ボールねじ及び電動油圧ブレーキ用ボールねじ駆動モジュールのニーズはさらに高まるものと考えられる。

### 3.7 電動オイルポンプ

ATやCVTでは、発進時や変速時のクラッチ操作を油圧で行う。通常、この油圧供給にはエンジンにより駆動される機械式オイルポンプが使用される。オイルポンプの駆動損失低減による燃費向上やアイドルストップ車のエンジン停止時の油圧確保や潤滑を目的に、電動オイルポンプの採用が進んでいる。また、近年EVの駆動用モータとしてモータ・インバータ・減速機が一体となったe-Axleの適用が広がっている。モータ部の冷却には水冷よりも冷却効果が高く、モータの高効率化・小型化に寄与する油冷方式の採用が拡大しており、電動車においても今後電動オイルポンプの採用が進んでいくと予測される。当社では、このような技術動向に対応するため、自動車の環境性能向上に貢献できる電動オイルポンプの開発（図9、表4）を進めている。

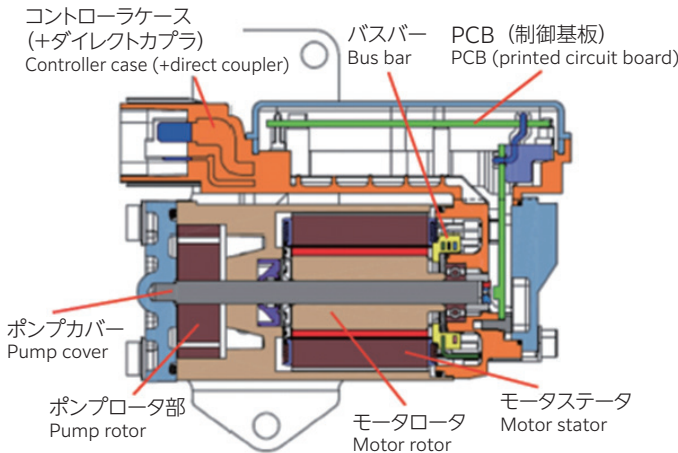


図9 電動オイルポンプの構造例

表4 電動オイルポンプの諸元

項目	詳細
ポンプ出力	① 30 W以下(アイドルストップ用を想定) ② 30~300 W (e-Axle用等を想定)
電圧	12 V (~48 V)
ポンプ形式	トロコイドポンプ(ベーンポンプ)
制御	PWM (CAN対応)
特長	<ul style="list-style-type: none"> <li>・BLDCモータの採用により軽量・コンパクトを実現</li> <li>・アルミボディにより放熱性向上</li> <li>・回転センサの搭載で様々な運転条件(低温・低回転数など)に対応</li> </ul>

### 3.8 後輪用ステアリング機能付ハブベアリング [Ra-sHUB®]

自動車の走行条件に合わせ、車輪の転舵角を制御し、低速走行時の旋回性能や、中・高速走行時の車両安定性を向上させる転舵システムとして、当社はハブベアリングの基盤技術の強みを活かし、後輪用ステアリング機能付ハブベアリング「Ra-sHUB®」(図10)を開発した。

後輪転舵システムは、1980年代に初めて量産車両に適用されたが、ドライバーのハンドル操作に対して車両の挙動に違和感があるという意見が多く、当時は広く普及しなかった。しかし、近年では制御技術の高度化によって、違和感を抑えることが可能になったため、高級車やスポーツカーを中心に採用例が増えている。また、EVはバッテリー搭載スペース確保のためホイールベースが長くなり、車両回転半径が大きくなる傾向にある。前輪の転舵角拡大による車両回転半径の低減には限界があり、後輪転舵システムはこれを補助することが可能である。

従来の後輪転舵システムは、マルチリンク方式などの足回り構造に限定されており、機構上大きな作動角をとることは難しかった。「Ra-sHUB®」は、ハブベアリングに転舵軸を設けて転舵機構と一体化することで、コンパクトな設計としながら、従来のハブベアリングと同様の取り付けを可能とした。また、足回り構造を選ばず、トーションビームなどのリジッドアクスル構造にも搭載可能であり、左右独立で作動角を大きく取る後輪転舵システムとして適用できる。さらに、ホイールハウス内に転舵機能を収めることができるので、車内スペースの有効活用が可能である。

「Ra-sHUB®」を採用した後輪転舵システムの利点としては以下が挙げられる。

- (1) 車両回転半径の削減
- (2) 左右輪に搭載し、転舵角度を左右独立制御
- (3) 走行安全性の向上(車両姿勢制御)
- (4) 燃費の改善(走行抵抗の低減)

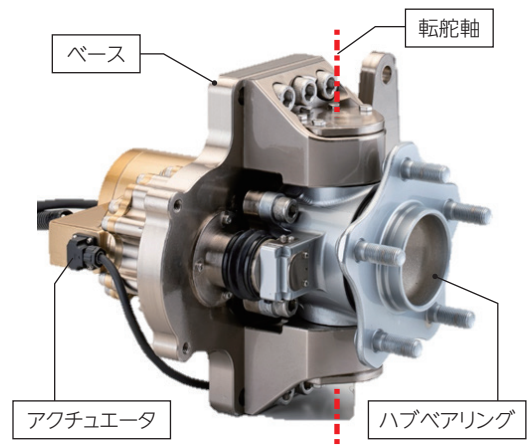


図10 Ra-sHUB® (試作品)

### 4. おわりに

自動車では、カーボンニュートラルやCASEへ対応するための技術開発が進んでいる。その中で、当社の軸受・ハブベアリング・CVJ・電動モジュール商品に対するニーズは変化している。当社は、これら市場ニーズをいち早くとらえ、お客様の嬉しさにつながる高付加価値商品を独自技術で開発してきた。本稿では、自動車のEV化・電動化に対応する、最近の当社開発商品・技術の一部を紹介した。今後も、当社は、新技術・新商品の開発を通じて、カーボンニュートラルの推進と自動車産業のさらなる発展に貢献していく。

### 参 考 文 献

- 1) S&P Global Mobility データ (2023年1月) + NTN 予測
- 2) NTN ホームページ, 「耐水素脆性軸受」を開発,  
[https://www.ntn.co.jp/japan/news/new\\_products/news202100038.html](https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news202100038.html)
- 3) NTN ホームページ, 2021年 "超" モノづくり部品大賞「日本力 (にっぽんぶらんど) 賞」を受賞,  
<https://www.ntn.co.jp/japan/news/press/news202100067.html>
- 4) 関誠, 低フリクションハブベアリング, NTN TECHNICAL REVIEW 85, (2017) 67-71.
- 5) 関誠, 低フリクションハブベアリングⅢ, NTN TECHNICAL REVIEW 87, (2019) 63-67.
- 6) 藤尾輝明, 次世代高効率固定式等速ジョイント「CFJ」, NTN TECHNICAL REVIEW 81, (2013) 64-67.

執筆者近影

---



楯岡 生也

自動車事業本部  
副本部長

# 自動車の電動駆動装置用転がり軸受の紹介

## Introduction of Rolling Bearings for Electric Drives Corresponding of Automobiles

川井 崇\* Takashi KAWAI  
 魚住 朋久\*\* Tomohisa UOZUMI

自動車の電動化に伴い、電動駆動装置の基幹部品である転がり軸受にも様々な性能が新たに求められている。それらの要求に対応する NTN の高性能転がり軸受を紹介する。

Along with electrification of automobiles, bearing as a core part of electric drives is required to have various new performance. This article introduces NTN's highly functional rolling bearings to meet those requirements.

### 1. はじめに

自動車業界は 100 年に 1 度の大きな転換期を迎え、カーボンニュートラルの実現に向けた環境問題への解決策の一つとして、自動車の EV（電動車両）化を世界的に加速している<sup>1)</sup>。電動駆動装置において動力伝達を支持する転がり軸受は、基幹部品として位置づけられ、小型・軽量化と低トルク化に加え、高速化への対応が求められている。本稿では、これらの要求に対応する電動駆動装置用転がり軸受を紹介する。

### 2. 電動駆動装置用転がり軸受の要求性能

自動車用転がり軸受には、主に深溝玉軸受と円すいころ軸受の 2 種類がある。これらの転がり軸受は、図 1 に示す 4 部品（内輪、外輪、転動体 [ 玉、円すいころ ], 保持器）と、場合によりシールで構成される。昨今の自動車の電動化に伴い、軸受には使用条件に応じて新たな性能が必要となる。

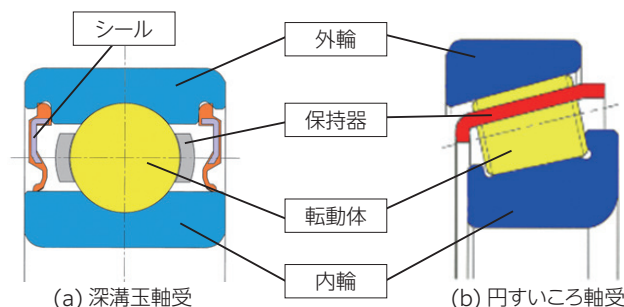


図 1 転がり軸受断面図と部品名称<sup>2)</sup>

図 2 に EV（電動車両）向けに『モータ・インバータ・減速機（ギヤ）』が一体化した駆動ユニット「e-Axle」の

例を示す。平行 3 軸構造の e-Axle はモータ部に 2 個の軸受が、減速機に 6 個の軸受がそれぞれ使用される。図 3 に平行 3 軸構造の e-Axle の代表例としてモータと減速機を支持する転がり軸受配置事例を示す。モータトルクの大小と減速比の組合せが減速機各軸の軸受荷重に影響するため、2 軸目と 3 軸目では荷重の大きさにより深溝玉軸受と円すいころ軸受を使い分ける。

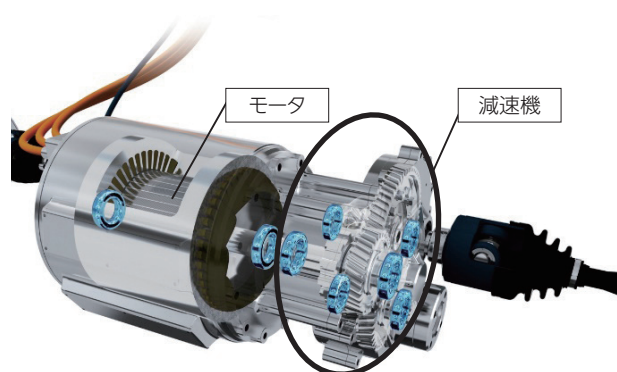


図 2 e-Axle 構造例と転がり軸受の配置<sup>3)</sup>

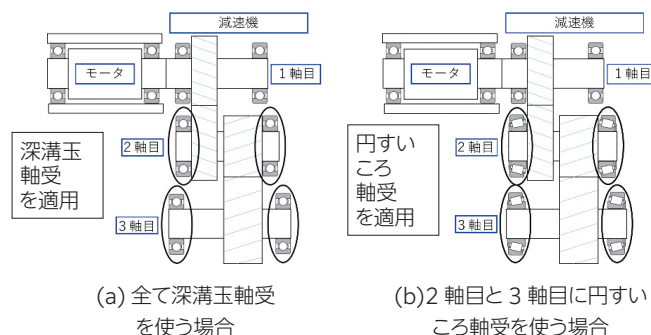


図 3 e-Axle（モータと減速機）簡易断面図での転がり軸受配置事例<sup>4)</sup>

\* 自動車事業本部 自動車軸受製品ユニット 自動車軸受技術部

\*\* NTN BEARINGS (UK) LTD.



e-Axle の各軸それぞれに用いられる転がり軸受では、次に示す性能が求められている。

- ① e-Axle の高出力化や小型化の要求に応えるため、駆動モータの高速化が進んでおり、モータ軸や減速機 1 軸目のモータ直結軸を支持する深溝玉軸受に高速対応性能が求められる。
- ② e-Axle の小型化に合わせて軸受軌道輪が薄肉化すると、外輪外径でクリープ（外輪がハウジングに対して相対回転する滑り現象）が発生し易くなるため、減速機各軸ではクリープ対策が求められる。
- ③ e-Axle 用モータの小型高出力化を目的としたバッテリーの高電圧化に伴い、モータ軸や減速機 1 軸目では軸受の電食（軸受内で放電が起こり、軌道面が微視的に溶融する現象）対策が求められる。
- ④ e-Axle の高効率化のため、潤滑油の低粘度化や少量化が進むと、減速機の 2 軸目を支持する円すいころ軸受ではつば部の滑り接触部で発熱対策が求められる。
- ⑤ e-Axle の高出力化に伴う軸受荷重の増加により、減速機 2 軸目や 3 軸目を支持する円すいころ軸受には従来よりも高い荷重負荷能力が求められる。

e-Axle 用転がり軸受に要求される性能を**表 1**にまとめた。

**表 1** e-Axle 用転がり軸受に要求される性能

市場動向	技術トレンド	転がり軸受に要求される性能
環境対応技術	高効率化	低トルク化 3.1 項:超低フリクションシール付深溝玉軸受 4.1 項:低昇温・低トルク円すいころ軸受
	高速化	高速対応 3.2 項:高速対応の深溝玉軸受
モータ駆動による電動化	小型・軽量化	耐クリープ性能向上 3.3 項:クリープレス軸受
カーシェアリング	高電圧化 高周波化	電食防止 3.4 項:セラミック転動体深溝玉軸受
	潤滑油の低粘度化・少量化	低昇温化 4.1 項:低昇温・低トルク円すいころ軸受
	高信頼性	長寿命化 4.2 項:長寿命円すいころ軸受

### 3. 高性能深溝玉軸受の紹介

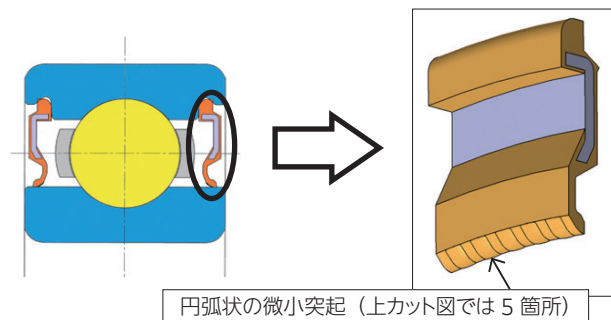
以下では**表 1** の要求性能を追求した e-Axle 用の深溝玉軸受を紹介する。

#### 3.1 超低フリクションシール付深溝玉軸受

e-Axle の高効率化や小型化要求に伴い、深溝玉軸受には軸受寿命の確保と低トルクの両立が求められる。e-Axle 内の潤滑油はギヤの噛み合いで発生する硬質異物を含むため、軸受寿命の確保には、軸受内部への硬質異物の侵入を防ぐ必要がある。接触シールの適用は硬質異物の侵入を防止できるが、シールリップと内輪の接触部で摺動トルク（接触シール付深溝玉軸受の回転トルクの大部分を占める）が発生するため、軸受寿命の確保と低トルク化を両立することは難しかった。

開発した「超低フリクションシール付深溝玉軸受<sup>5)</sup>」は、**図 4** に示すように、内輪と接触するシールリップ部に円弧状（半円筒状）の微小突起を等間隔に設け、突起部での「くさび膜効果」により内輪との間に潤滑油の油膜を形成（**図 5**）させることで、シールの摺動トルクを低減した。なお、本シールは、シールと内輪摺動面の間の隙間が微小なため、軸受寿命に影響する大きさの硬質異物の侵入を防ぐことができる。

「超低フリクションシール付深溝玉軸受」、「接触シール付玉軸受」、「非接触シール付玉軸受」の 3 種類の軸受回転トルクの評価を、**表 2** の条件で行った。試験結果を**図 6** に示す。「超低フリクションシール付深溝玉軸受」の回転トルクは、シールリップ部の微小突起による「くさび膜効果」により、接触シール付玉軸受と比べて 80 % 低減しており、非接触シール付玉軸受と同等である。



**図 4** 超低フリクションシール付深溝玉軸受の構造図<sup>5)</sup>

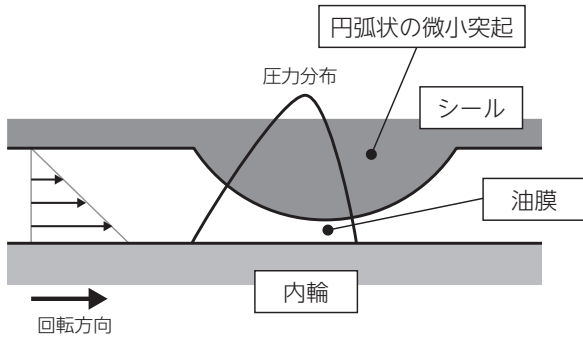


図5 くさび膜効果の概略図<sup>5)</sup>

表2 試験条件<sup>5)</sup>

試験軸受	6010相当
ラジアル荷重	基本動定格荷重の5% (JIS B 1518:2013)
回転速度	1 500 min <sup>-1</sup>
軸受温度	35~120℃
潤滑油	CVTF

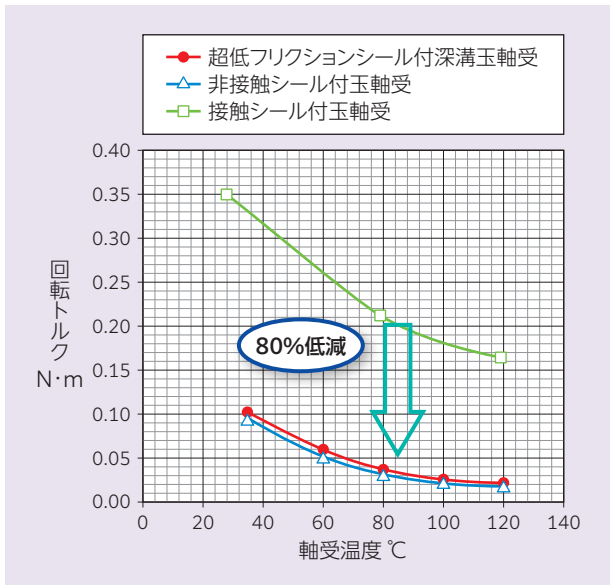


図6 回転トルクと軸受温度との関係<sup>5)</sup>

### 3.2 高速対応の深溝玉軸受

高速回転時の保持器変形を考慮した新形状の樹脂保持器の採用により、油潤滑で  $d_m n^{*1}$  値 =  $180 \times 10^4$  運転が可能な条件を見出した。ここでは、高速回転技術を適用した「EV・HEV 用高速深溝玉軸受<sup>6)7)</sup>」を紹介する。

\*1: 軸受転動体ピッチ円径と回転速度の積 mm・min<sup>-1</sup>

e-Axle のモータ軸や減速機 1 軸目のモータ直結部を支持する深溝玉軸受には、高速対応性能が求められる。深溝玉軸受は回転速度が上がると、遠心力により樹脂保持器の保持器ポケットと転動体（玉）が接触し焼付きが生じる恐れがある。

そこで、樹脂保持器に下記①～④の改良を加えた「EV・HEV 用高速深溝玉軸受」を開発した。

改良樹脂保持器の外観を図7に示す。

- ① 高強度材料を採用  
⇒ 保持器の剛性・高温強度の向上
- ② 変形抑制のためポケット底を肉厚化  
⇒ 保持器円環部の剛性向上
- ③ 保持器ポケット間の肉抜き（軽量化）  
⇒ 遠心力変形の低減
- ④ 保持器ポケット内面に通油溝設置  
⇒ 保持器と転動体の潤滑性向上

表3に示す条件で「EV・HEV 用高速深溝玉軸受」の温度上昇確認試験（油潤滑）を行った。試験結果を図8に示す。「EV・HEV 用高速深溝玉軸受」の外輪温度は、 $d_m n$  値  $180 \times 10^4$  まで判定上限温度以下で安定した運転が可能であった。

表3 試験条件<sup>2)</sup>

評価軸受仕様	基本動定格荷重=16 800 N (JIS B 1518:2013)
ラジアル荷重	264.5 N
アキシアル荷重	147 N
回転速度	$d_m n$ 160~180×10 <sup>4</sup>

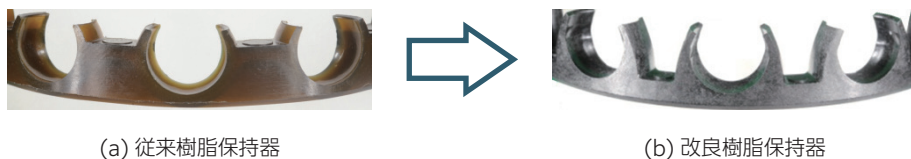


図7 「EV・HEV 用高速深溝玉軸受」用樹脂保持器の外観<sup>4)</sup>

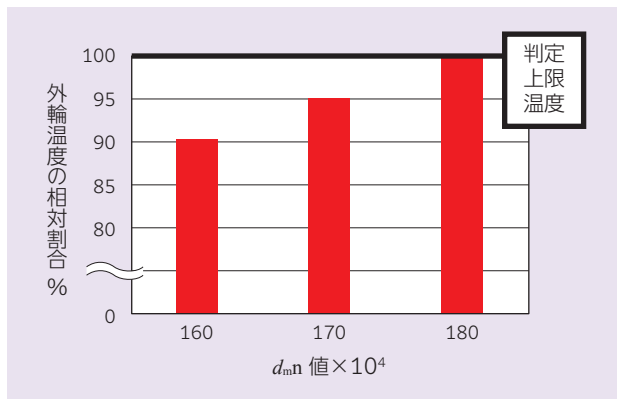


図8 d<sub>m</sub>n と外輪温度との関係<sup>2)</sup>

最近では、潤滑条件と軸受の内部諸元を最適化することにより、深溝玉軸受で d<sub>m</sub>n 値 220 × 10<sup>4</sup> の高速回転に対応できることも確認している<sup>8)</sup>。

### 3.3 クリープレス軸受<sup>9)</sup>

e-Axle の小型・軽量化要求による軸受軌道輪の薄肉化に伴い外輪の剛性は低下し、転動体の通過時に外輪外径面に波打ち変形が生じ易くなる。その結果、この繰り返しが進行波となり、ハウジングに対し外輪が相対回転するクリープ（進行波型クリープ）が発生する場合がある<sup>10)</sup>。

開発した「クリープレス軸受」の構造を図9に示す。外輪外径面の一部に全幅円弧状の逃げ部を設けることで、図10に示すように、外輪の逃げ部が荷重負荷域に位置する時にハウジング内径面と外輪外径面が非接触となり、進行波の伝達が遮断される。これにより、クリープを抑止する。なお、荷重非負荷域に外輪の逃げ部が位置する際には、クリープが発生するが、外輪逃げ部が荷重負荷域に移動すると、その位置でクリープは止まる。そのため、軸受をハウジングへ組込む時には、逃げ部と荷重負荷域の位置合わせは不要である。また、設計変更点は外輪外径の逃げ部のみのため、既存軸受からの置き換えも容易である。

「クリープレス軸受」と「標準深溝玉軸受<sup>11)</sup>」について、クリープが発生しやすい試験機で、表4条件のクリープ速度評価試験を行った。試験結果を図11に示す。標準深溝玉軸受は、荷重の増加に伴いクリープ速度が増加する傾向が見られた。これに対し、「クリープレス軸受」は、外輪逃げ部の効果により、いずれの荷重条件でもクリープが発生しないことを確認した。

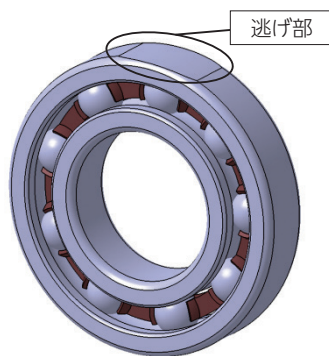


図9 「クリープレス軸受」の構造図<sup>9)</sup>

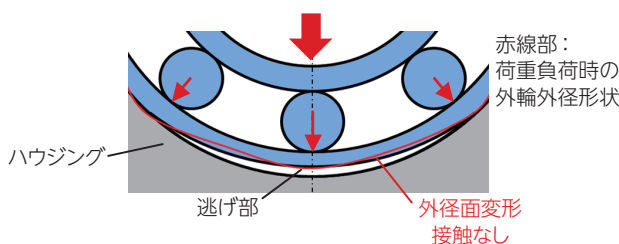


図10 クリープレス軸受外輪形状とハウジングとの関係<sup>9)</sup>

表4 試験条件<sup>9)</sup>

軸受型番	6208
ラジアル荷重	基本動定格荷重 (JIS B 1518:2013) の10~40%
内輪回転速度	6 000 min <sup>-1</sup>
潤滑油	CVTF
軸受外輪温度	50℃

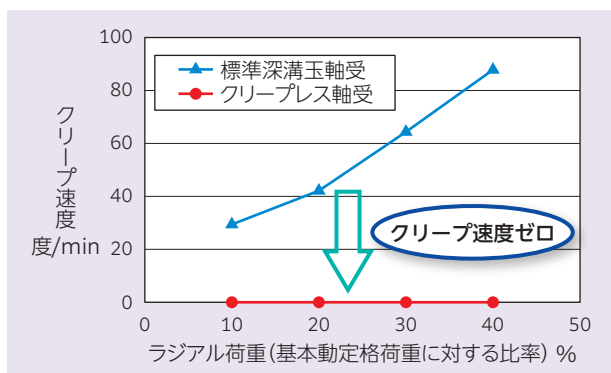


図11 クリープ速度評価試験結果<sup>9)</sup>

### 3.4 セラミック転動体深溝玉軸受



図 12 セラミック転動体深溝玉軸受

インバータ駆動モータは高出力化、小型化の流れがあり、駆動電源の高電圧化が進んでいる。インバータ駆動の場合、軸とハウジング間で電位差が発生するため、軸受の軌道面と転動体の間に形成された油膜が絶縁破壊することで、放電による損傷が発生することが知られている<sup>12) 13)</sup>。高電圧になると発生する電位差も大きくなるため、絶縁破壊による軸受損傷のリスクが高まり、音響悪化や短寿命化につながる。この対策として、転動体に窒化ケイ素製セラミック球を用いた「セラミック転動体深溝玉軸受」(図 12)を適用することで、内輪及び外輪軌道面間を絶縁して電食の発生を防止することができる。

図 13 に示す試験機で表 5 に示す条件の転動試験を行い通電環境下で軸受剥離寿命を調査した。その結果を表 6 に示す。「セラミック転動体深溝玉軸受」は、鋼球を使用した標準玉軸受に比べて電食による転動体表面の剥離発生を抑えることが可能である。

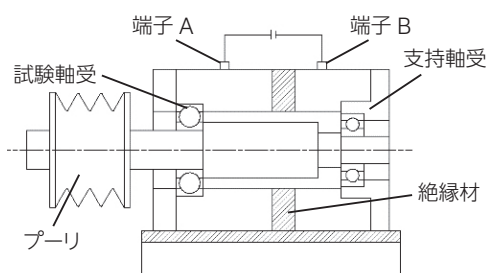


図 13 転動寿命試験機

表 5 試験条件<sup>14)</sup>

供試軸受	深溝玉軸受 (6203)	
転動体	鋼球	セラミック球
グリース	非導電性グリース	
グリース封入量 (g)	0.86	
回転速度 (min <sup>-1</sup> )	0~20 000(急加減速)	
雰囲気	室温	
プーリ荷重 (N)	1 617	
軸受荷重 (N)	2 332	
電流 (A)	0.5	-
停止条件	振動が初期の10倍	

表 6 通電状態での転動寿命試験結果<sup>14)</sup>

	寿命 (h)	剥離部位
深溝玉軸受(鋼球)	19.6	球
深溝玉軸受(セラミック球)	>200	無し

### 4. 高機能円すいころ軸受の紹介

図 14 に円すいころ軸受の構造を示す。円すいころ軸受は、玉軸受と比較して、大きなラジアル荷重とアキシャル荷重を受けることができる反面、トルクが大きくなる。以下では、円すいころ軸受の転動面と内輪大つば面の形状を最適化することにより、低トルク化（低昇温）と長寿命を両立した事例を紹介する<sup>16)</sup>。

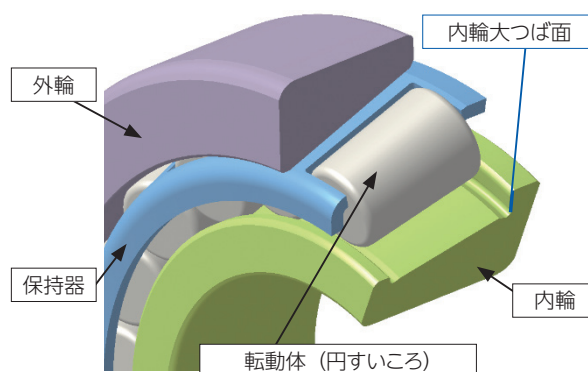


図 14 円すいころ軸受の構造<sup>15)</sup>



4.1 低昇温・低トルク円すいころ軸受

自動車の高効率化のため、e-Axle 内の潤滑油は低粘度化と油量削減が進んでいる。標準的な円すいころ軸受をこのような条件で使用すると、軸受つば部の滑り接触部での油膜形成が困難になり、急昇温のリスクが高まる。開発した「低昇温・低トルク円すいころ軸受」は、下記の①～④の設計変更を行い（図 15, 16）、耐焼付き性向上とトルク低減を実現した。



図 15 低昇温・低トルク円すいころ軸受の外観<sup>16)</sup>

- ① 円すいころのピッチ円径縮小により小型化と、低トルクを実現
- ② 保持器内径と内輪小つば外径間の隙間縮小により、潤滑油の攪拌トルクを低減
- ③ 保持器ポケット大径側端部に凹み形状を付加し、潤滑性を向上
- ④ 円すいころ端面と内輪大つば面の最適形状で、潤滑性を向上

表 7 に示す「標準円すいころ軸受<sup>11)</sup>」と「低昇温・低トルク円すいころ軸受」について、表 8 の条件で回転トルク試験を行った。試験結果を図 17 に示す。「低昇温・低トルク円すいころ軸受」は、標準円すいころ軸受に比べ 66 % の大幅なトルク低減を達成した。

表 7 の 2 種類の軸受について、表 9 の条件で軸受の昇温特性を評価した。本試験では、e-Axle 内の潤滑油量が削減された過酷な条件を想定し、試験前の軸受表面に極微量の潤滑油を一定量付着させた後、無給油で運転し、軸受外輪が 100 °C に到達するときの時間を評価した。試験結果を図 18 に示す。「低昇温・低トルク円すいころ軸受」の 100 °C の到達時間は、標準円すいころ軸受に比べて約 10 倍となる 710 秒に延伸した。

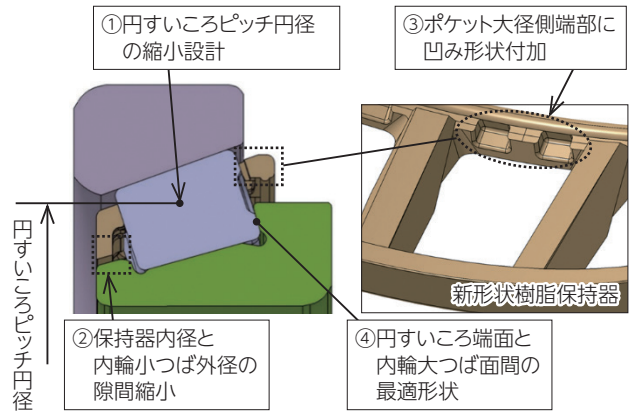


図 16 「低昇温・低トルク円すいころ軸受」の構造図<sup>16)</sup>

表 7 試験軸受<sup>16)</sup>

	標準円すいころ軸受 32007X	低昇温・低トルク 円すいころ軸受
軸受断面 比例尺図		
サイズ	φ35×φ62×18	φ34×φ58.5×13.5
動定格 荷重	46 000 N	28 500 N
保持器	標準鉄板保持器	新形状樹脂保持器

表 8 試験条件<sup>16)</sup>

アキシャル荷重	3 000 N
回転速度	5 000 min <sup>-1</sup>
潤滑条件	油浴 ATF (50 °C)

表 9 試験条件<sup>16)</sup>

潤滑油条件	ATF (25 °C)
内輪大つば面接触応力	約 200 MPa
内輪大つば面滑り速度	約 2.5 m/s

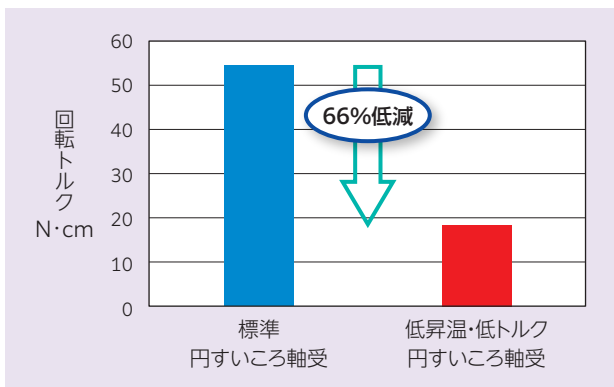


図 17 円すいころ軸受の回転トルク試験結果<sup>16)</sup>

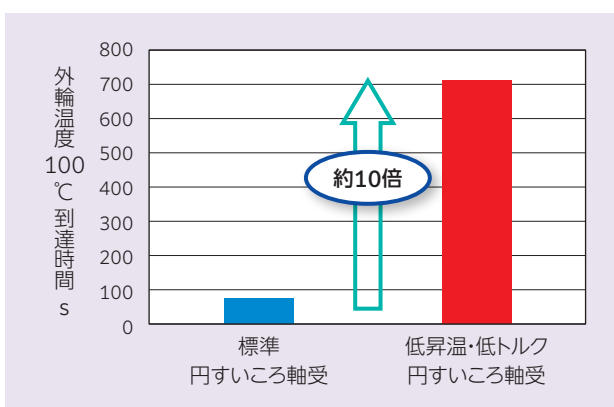


図 18 円すいころ軸受の昇温性評価試験結果<sup>16)</sup>

#### 4.2 長寿命円すいころ軸受

軸受の内部設計の最適化により、高負荷容量と高速回転性能を実現した「自動車用 ULTAGE (アルテージ) 円すいころ軸受<sup>15)</sup>」を紹介する。外観を図 19 に示す。



図 19 「自動車用 ULTAGE (アルテージ) 円すいころ軸受」の外観<sup>15)</sup>

「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」は、軸受寿命を最大化する円すいころ形状の最適設計技術 (円すいころの径をマイクロメートル単位で端部に向かって小さくする「クラウニング」と呼称する形状の最適化) を適用しており、偏荷重の負荷時の転動体と軌道輪の接触応力を均一に

きる。この設計技術により、「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」の動定格荷重と定格寿命は、標準品と比べ、それぞれ 1.3 倍と 2.5 倍を達成した<sup>※2)</sup>。また、内輪大つば面の接触部形状も最適化することで、許容回転速度を約 10 % 向上した<sup>※3)</sup>。

※ 2 : JIS B 1518:2013 による基本動定格荷重を適用した円すいころ軸受との比較

※ 3 : NTN 株式会社 転がり軸受総合カタログ (CAT.No.2203/J 20.08.199 NI/NI) の円すいころ軸受との比較

「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」と「標準円すいころ軸受<sup>11)</sup>」の軌道面軸方向断面での接触応力分布を図 20 に示す。「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」はクラウニング形状の最適化により、接触領域端部の過大な応力 (エッジ応力) が発生しない。

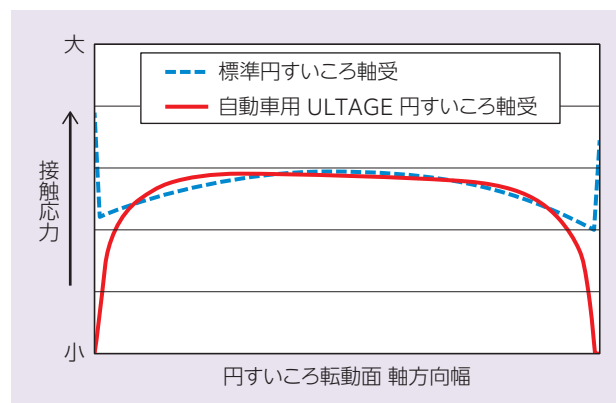


図 20 円すいころ軸受の軌道面に生じる接触応力分布<sup>15)</sup>

e-Axle で想定される高ミスアライメント (0.002 rad) 条件 (表 10) で寿命試験を行った。試験結果を図 21 に示す。「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」の寿命は、接触応力分布の均一化効果により、標準円すいころ軸受の寿命と比べて、約 16 倍の長寿命を示した。

表 10 試験条件<sup>15)</sup>

試験軸受サイズ	φ23×φ55×20
軸受材料熱処理	軸受鋼標準熱処理
試験荷重	基本動定格荷重の 26 % (JIS B 1518:2013)
ミスアライメント	0.002 rad
回転速度	4 000 min <sup>-1</sup>
潤滑油	ISO VG100 ギヤ油相当
JIS 基本定格寿命	73 時間

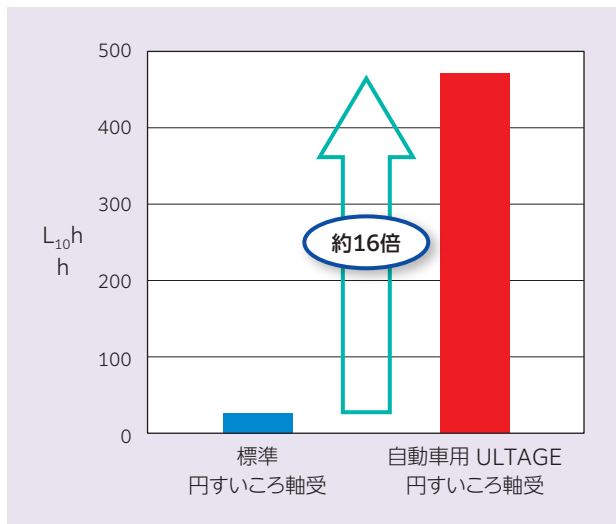


図 21 高ミスアライメント条件での円すいころ軸受の清浄油寿命試験結果<sup>15)</sup>

## 5. おわりに

カーボンニュートラルの実現に向けて自動車のEV化が進んでおり、軸受に求められる機能は多様化している。本報では、e-Axleでの技術要求に対応できる電動駆動装置用転がり軸受を紹介した。今後も、自動車の市場ニーズを先取りした軸受をタイムリーに提案できるように、技術開発を進めていく。

## 参考文献

- 1) 環境省 HP, 脱炭素ポータル, [https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon\\_neutral/](https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/)
- 2) 川井崇, 最近の自動車用転がり軸受の紹介, 車載テクノロジー, Vol.9, No.10, (2022)43-50.
- 3) NTN 株式会社, EV・HEV用高速深溝玉軸受の量産納入を拡大, 2020年, [https://www.ntn.co.jp/japan/news/new\\_products/news202000044.html](https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news202000044.html)
- 4) 川井崇, EV(電動車両)用転がり軸受の紹介, 潤滑経済, No.692, (2022)37-44.
- 5) 佐々木克明, 和久田貴裕, 水貝智洋, トランスミッション用超低フリクションシール付玉軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017)62-66.
- 6) 佐々木克明, モーター用高速深溝玉軸受の技術動向, 月刊トライボロジー, No.404, (2021)12-15.
- 7) NTN 株式会社, 2021年“超”モノづくり部品大賞「日本力(にっぽんぶらんど)賞」を受賞, 2021年, <https://www.ntn.co.jp/japan/news/press/news202100067.html>
- 8) NTN 株式会社, EV・HEV用深溝玉軸受の高速回転値220万を達成, 2022年 [https://www.ntn.co.jp/japan/news/new\\_products/news202200027.html](https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news202200027.html)
- 9) 川口隼人, 増田俊樹, 永田真梨奈, 河合俊貴, クリープレス軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2021)66-70.
- 10) 丹羽健, 転がり軸受のクリープメカニズム, NTN TECHNICAL REVIEW, No.81, (2013)100-103.
- 11) NTN 株式会社, 転がり軸受総合カタログ, CAT. No.2203/J 20.08.199 NI/NI, 2020年
- 12) 野口昭次, 転がり軸受の電食防止技術, 月刊トライボロジー, No.320, (2012)18-20.
- 13) 磯村宣典, 前谷達男, 渡辺彰彦, 中野圭策ら, PWMインバータ駆動による小型玉軸受の電食に関する研究(第2報), トライボロジスト, 第58巻第1号, (2013)46-51.
- 14) 川村隆之, 藤原宏樹, 大平晃也, 自動車の低燃費化に寄与する転がり軸受の新しい技術, NTN TECHNICAL REVIEW, No.87, (2019)85-91.
- 15) 藤掛泰人, 石川貴則, 宮入進, 自動車用アルテージ円すいころ軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017)51-55.
- 16) 藤掛泰人, 石川貴則, 低昇温・低トルク円すいころ軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2021)71-76.

執筆者近影



川井 崇

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部



魚住 朋久

NTN BEARINGS (UK)  
LTD.

# 環境保護に貢献する固定式等速ジョイントの進化 Evolution of Fixed Constant Velocity Joint that Contributes to Environmental Protection



船橋 雅司\* Masashi FUNAHASHI  
藤尾 輝明\* Teruaki FUJIO  
崎原 立己\* Ritsuki SAKIHARA

NTN では 1963 年に日本で初めて等速ジョイントを商品化し、その後、時代と共に大きく変化する環境施策に適応するよう、商品開発に取り組んできた。本稿では、当社の固定式等速ジョイントの進化を振り返りながら、今後普及拡大する EV のニーズに応える 2 種類の高効率固定式等速ジョイントについて解説する。

In 1963 NTN commercialized the constant velocity joint for the first time in Japan. Since then, NTN has continued to develop the new products to adapt to the environmental policy which changes with the times. This article looks back on the evolution of NTN's fixed constant velocity joints and explain about two types of high efficiency fixed constant velocity joint applied for the needs of EV spread in future.

## 1. はじめに

自動車の動力伝達に用いられるドライブシャフトには、タイヤ側に取り付けられ、タイヤの転舵とともに大きな角度が取れる固定式等速ジョイント（以下、固定式 CVJ）とパワートレインユニット側に取り付けられ、車体の上下動とともに角度がとれスライドできる摺動式等速ジョイント（以下、摺動式 CVJ）がある（図 1）。これまで、ドライブシャフトには小型・軽量・高角度・低振動といった機能が求められ、NTN ではトライボロジー、材料、機械設計などの技術を駆使して弛まぬ改良開発を進めてきた。一方、CO<sub>2</sub> 排出量増加に伴う地球温暖化による異常気象の発生等、人類の様々な活動による環境に及ぼす影響が社会問題として取り上げられる中、1997 年の京都議定書制定以降、国際社会全体で温暖化対策が進められてきた。2015 年のパリ協定で定められた世界の平均気温上昇目標を達成するため、2050 年の脱炭素社会実現に向けた取り組みが世界中で加速していることを背景に、近年ドライブシャフトの高効率（低発熱）化も注目されている。

本稿では、市場からの改善ニーズのより高い固定式 CVJ に焦点を当て、環境保護に伴う自動車の変化に対応するため、これまで NTN が取り組んできた CVJ の進化について紹介する。

## 2. 市場トレンド／ニーズ

脱炭素社会実現に向け、各国において自動車の CO<sub>2</sub> 排出量や燃費の基準が年々厳しくなる中、自動車に使用されるすべての部品の軽量化及び高効率化が継続して求められる。

ている。また、自動車は従来の内燃機関車両から電動車両（以下、EV）へ急速な方向転換が進められている。EV では、航続距離の延伸が課題となり、各 부품の軽量化及び高効率化に加え、大容量バッテリーを搭載するスペースを確保するため、パワートレインユニット位置変更やホイールベース延長などの車両レイアウトの変化が予測される（図 2）。

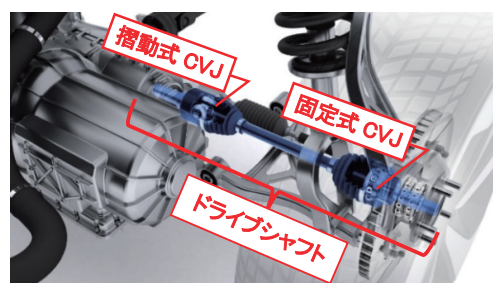


図 1 ドライブシャフトにおける固定式 CVJ の配置

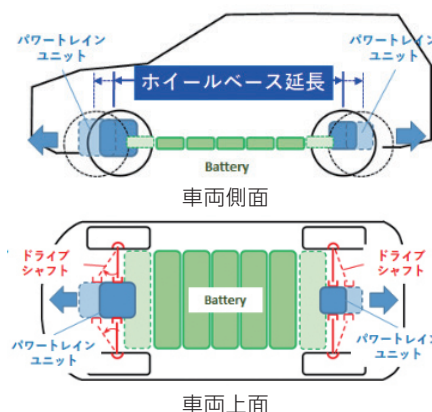


図 2 EV のドライブシャフト配置イメージ

\* 自動車事業本部 CVJ 製品ユニット CVJ 開発部



この中で、ドライブシャフトに求められる機能は、①低燃費や低電費に貢献できる高効率化、小型・軽量化、②バッテリースペース確保に伴う高常用角化やホイールベース延長に伴う旋回半径拡大を抑制するための高作動角化（高舵角化）と考えた。特に、固定式 CVJ は必要機能及び構造上、摺動式 CVJ に対し効率が悪いという課題があり、NTN ではこれら市場トレンド及びニーズに対応した固定式 CVJ の開発を進めている。

### 3. 当社固定式 CVJ の進化<sup>1) 2) 4) 5)</sup>

#### 3.1 CVJ の国産化

1960 年代以前の自動車は後輪駆動（FR）車を中心に発展した一方で、居住性能や走行性能などの向上のため前輪駆動（FF）車や 4 輪駆動（4WD）車の開発も行われてきた。FF 車や 4WD 車では、エンジンからの動力が前輪に伝達されるため、タイヤが転舵しても等速で動力を伝達できる駆動部品が必要であったが、当時適用されていたカルダンジョイント（十字軸継手、図 3）は作動角が大きくなると入力軸と出力軸の間で回転変動が大きくなる不等速ジョイントであったため、走行時に不安定なハンドル操作を余儀なくされた。

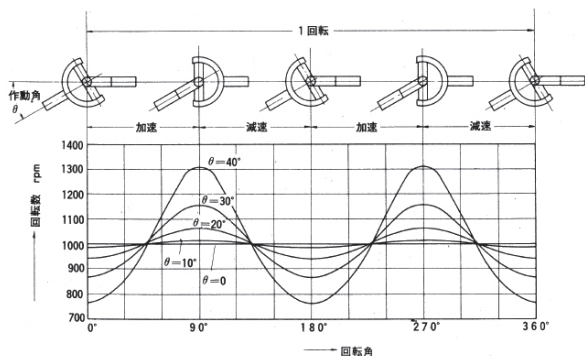


図 3 カルダンジョイント（十字軸継手）

1956 年に作動角を取っても等速で動力を伝達できる固定式 CVJ がハーディスパイサー社（イギリス）で開発されたことで、自動車の前輪に転舵と駆動の機能を持たせることができるようになった。NTN は 1962 年にハーディスパイサー社と技術提携し、スズライトバン FE（スズキ、図 4）向けに BJ（最大作動角 42.5 度）を開発し、1964 年に国内で初めて量産化に成功した固定式 CVJ（図 5）を搭載した車両が市場投入された。これにより FF 車や 4WD 車の課題であった操縦安定性が飛躍的に向上し、日本の自動車普及に大きく貢献した。

その後、固定式 CVJ 需要の急速な拡大と共に車両の高舵角化のニーズの高まりに応えるため、固定式 CVJ の外輪材料を浸炭鋼から中炭素鋼の高周波焼入れに変更して強度を向上させ、かつ最適な高角化設計をすることで外径

を維持したまま最大作動角を 42.5 度から 46.5 度まで拡大した BJ-L（図 6）を開発し、1982 年に量産を開始した。現在の固定式 CVJ は、この BJ-L を基本設計とし、小型・軽量、高効率、高角化のニーズを捉え、進化し続けている。



図 4 スズライトバン FE（スズキ）



図 5 スズライトバン FE に搭載された CVJ の外観



図 6 BJ-L の外観

#### 3.2 CVJ の小型・軽量・高効率化

固定式 CVJ の変遷を図 7 に示す。

最初の進化は、内部に封入する潤滑剤をリチウム系グリースからウレア系グリースに変更することにより長寿命化を達成したことで、最大作動角 46.5 度を維持したまま BJ-L より 4 % 小型化、8 % 軽量化した固定式 CVJ（BJ-L 小型）を 1992 年より量産開始した。

次の進化は、更なる小型・軽量化を実現し 1998 年より量産開始した E シリーズ固定式 CVJ（以下、EBJ、図 8）である。EBJ は BJ-L と同等の負荷容量を維持したまま小型化を図るため、ボールサイズを小さくし、数を 6 個から 8 個に増やすことで、BJ-L と比較すると 13 % の小型化、20 % の軽量化、30 % のトルク損失率改善（高効率化）を達成した。また、EBJ に対して内部すきまの適正化と低

摩擦グリースの適用により、更に 20 % のトルク損失率を改善した EBJ-S を 2020 年より量産開始した。

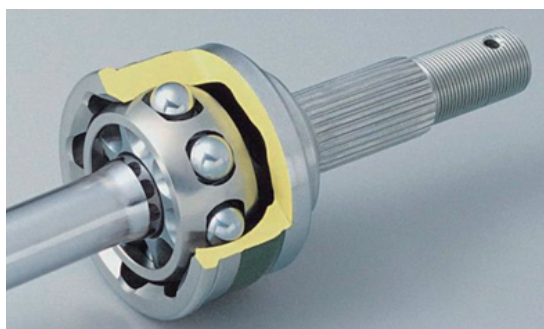


図 8 EBJ, EBJ-S の外観

そして、2022 年には更なる進化として NTN 独自技術のスフェリカル・クロスグループ構造（以下、独自構造）を初採用し、EBJ に対して外径、質量は同等を維持したまま、50 % 以上のトルク損失率を改善した高効率固定式 CVJ 「CFJ」<sup>3)</sup> を量産開始した。CFJ については、4 章で詳細に紹介する。

### 3.3 CVJ の高作動角化

1980 年代の FF 車の大型化、4WD 車の増加に伴い、最小旋回半径縮小を目的に固定式 CVJ の高作動角化要求が増え、1988 年に最大作動角を 50 度とした UJ の量産を開始した。UJ は、高角時の機能を確保するため、量産開始当初は BJ-L に対し 4 % の拡径及び 8 % の質量増加となったが、1992 年にウレア系長寿命グリースの適用により BJ-L と同等の外径、質量を実現した UJ（小型）を開発した（図 7）。

2007 年からボール数は UJ と同じ 6 個のまま各部品強度の適正化・長寿命グリースの適用により小型・軽量化を実現した VUJ の量産を開始した後、2022 年には CFJ の技術を応用した 52 度高角固定式 CVJ 【開発品】の基礎開発を完了した。両者を 1990 年代以降の UJ（小型）と比較すると、VUJ は 4 % の小型化、8 % の軽量化、52 度高角固定式 CVJ 【開発品】は 10 % の小型化、16 % の軽量化に加えて 50 % 以上のトルク損失率改善を達成している（図 7）。

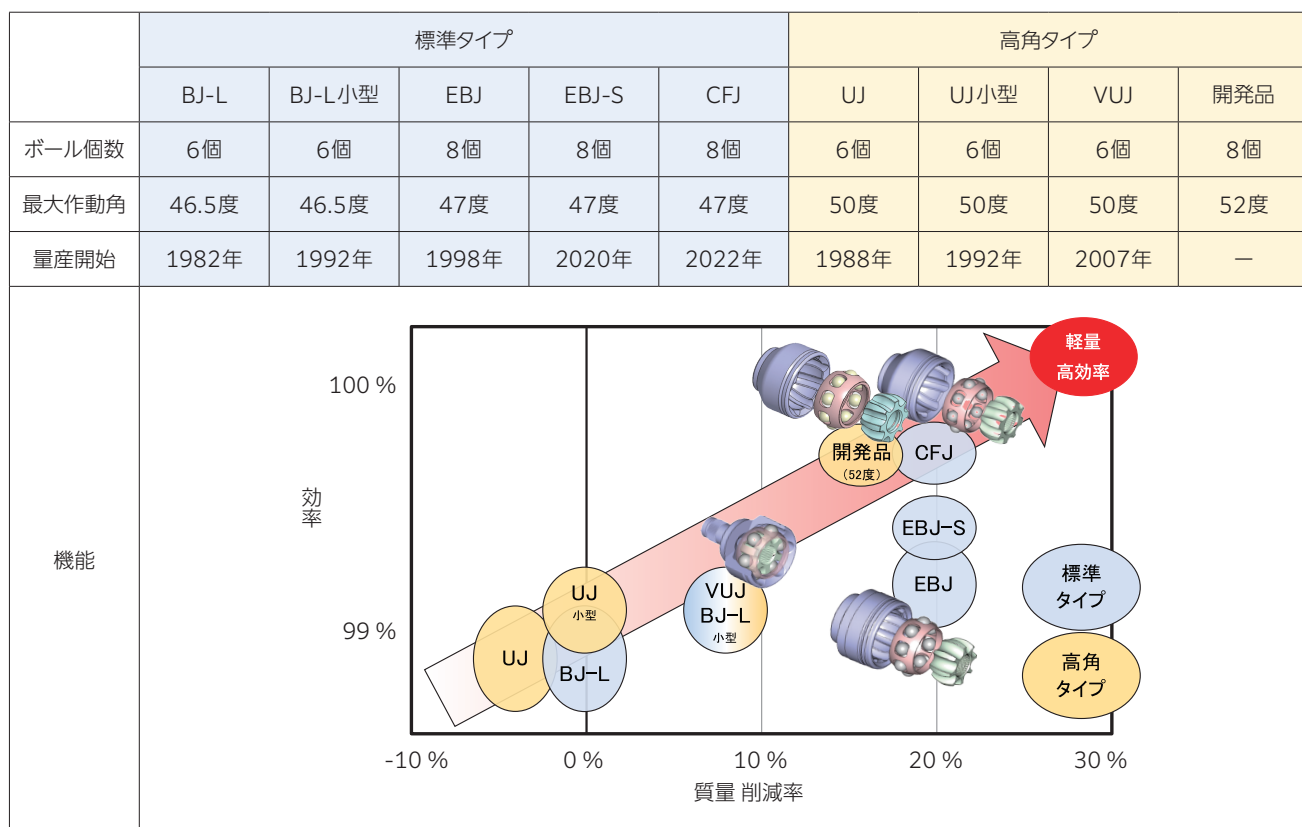


図 7 固定式 CVJ の変遷

#### 4. 環境負荷低減に貢献する高効率固定式 CVJ

固定式 CVJ は車両要求に適用するため、**図 7** に示したように最大作動角度の異なる標準タイプと高角タイプの 2 タイプを取り揃えている。

本章では、固定式 CVJ の効率改善が環境負荷低減にいかに関与できるか、標準タイプの高効率固定式 CVJ 「CFJ」、及び高角タイプの 52 度高角固定式 CVJ 【開発品】について紹介する。

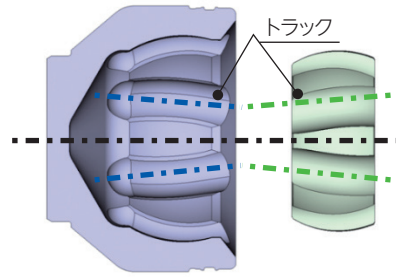


図 10 トラック形状図

##### 4.1 高効率固定式 CVJ 「CFJ」<sup>3)</sup> (標準タイプ)

CFJ は自動車の CO<sub>2</sub> 排出量削減および燃費向上を目的とし、独自構造の採用により世界最高水準の高効率を実現した最大作動角 47 度の固定式 CVJ であり (**図 9**)、世界最高水準の小型・軽量を実現した EBJ (従来品) と同等の外径、質量を維持しながら、トルク損失率は 50 % 以上低減している。

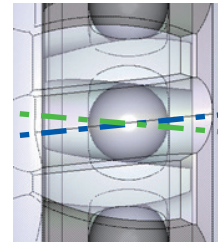


図 11 トラックとボールの配置

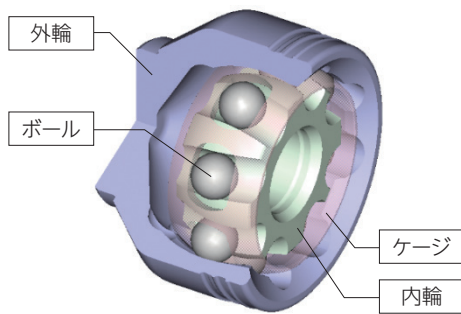
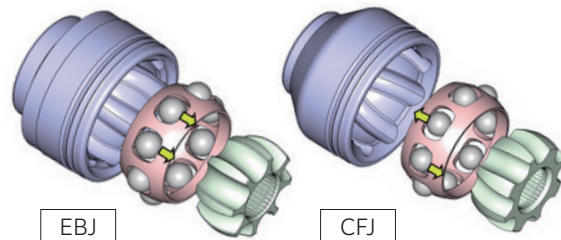


図 9 CFJ の構成図



⇒ ボールがケージを押し出す力

図 12 内部力比較

##### 4.1.1 特長

- ① 内輪と外輪の円弧状トラックを軸方向に傾斜させ、隣り合うトラックを鏡像対称に配置 (**図 10**)
- ② 内輪トラックと外輪トラックの傾斜を互いに交差させ、交点にボールを配置 (**図 11**)

CVJ のトルク損失は、トルク伝達時に各部品間に発生する摩擦力で失われるエネルギーに相当する。EBJ は、トルク伝達時に発生する CVJ の内部力のうち、ボールがケージを押し出す力の方向が全てのボールで同じであり、ケージが一方方向に押し出され、ケージが外輪及び内輪と接触する。一方、CFJ は、独自構造によりボールがケージを押し出す力が隣り合うボールで反対方向となり、ケージに掛かる力が相殺され外輪及び内輪との接触力を大幅に低減できる (**図 12**)。そのため、CFJ はケージと外輪及び内輪間の摩擦力を低減することができるため、世界最高水準の高効率を実現している。

#### 4.1.2 機能

図 13 にトルク損失率の測定結果を示す。通常走行時だけでなく、EV などで発生する回生走行時においても、従来品に対しトルク損失率が 50 % 以上低減している。

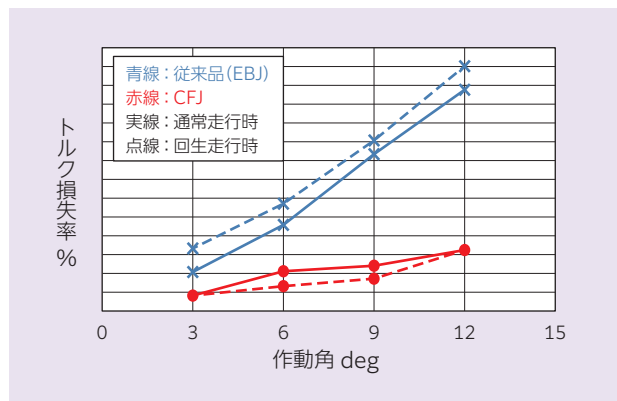


図 13 トルク損失率比較

#### 4.1.3 固定式 CVJ の効率と自動車への効果試算

エンジンからの動力をタイヤに伝える部品であるドライブシャフトの効率は、自動車の燃費及び電費に直結する。加えて、減速時にエネルギーを回収する回生ブレーキを有するハイブリッド車両や EV などには、より大きな影響を与える。

CFJ で具体的に試算すると、車重約 1.5 ton、ドライブシャフトの取付け角度 9 度の車両にて WLTP 条件で走行した場合、EBJ に対してガソリン車両（燃費 17.6 km/L）では 0.62 % 燃費が改善し、CO<sub>2</sub> 排出量は 0.96 g/km 減少する。BEV（電費 155 Wh/km）では、電費が 0.90 % 改善する（表 1）。

表 1 自動車への効果 (EBJ 比)

	燃・電費改善率	CO <sub>2</sub> 排出削減量
ガソリン車	0.62 % UP	▲0.96 g/km
HEV	0.76 % UP	▲1.12 g/km
BEV	0.90 % UP	—

<試算条件>

取付け角度：9 度

車両：燃費 17.6 km/L・電費 155 Wh/km

車重：約 1.5 ton，走行条件：WLTP

#### 4.2 52 度高角固定式 CVJ (高角タイプ)【開発品】

本品は、VUJ（最大作動角 50 度）に対して最大作動角を拡大すると共に小型・軽量，高常用角，高効率の高機能を付与した高角高効率固定式 CVJ である。

#### 4.2.1 特長

CFJ と同様の独自構造を採用することで、トルク負荷時に CVJ 内部で発生する力（内部力）を低減することができる。加えて、高作動角時の負荷容量向上を図ることができる。加えて、高作動角時にボールが外輪開口側に移動する領域のトラック形状を変化させ、ボールの転動軌跡長さを確保することで 50 度を超える作動角のボールとトラックの接触点を確保した。また、固定式 CVJ の高作動角時の最弱部品であるケージは、形状の最適化や材料の変更を行い、小型化と高角化の両立を実現した。これらにより、VUJ に対して最大作動角を 2 度拡大しながら、6 % の小型化と 8 % の軽量化を達成した（図 14）。

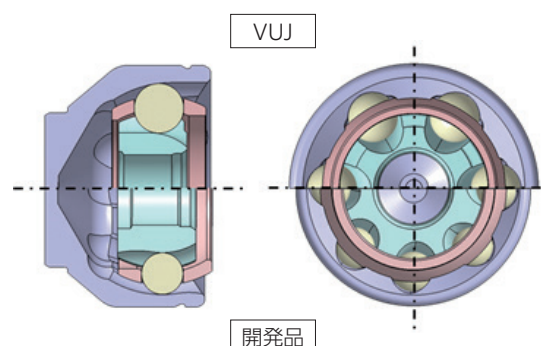


図 14 設計比較

#### 4.2.2 機能

・効率（トルク損失率）

独自構造を採用することで、VUJ に対してすべての角度領域で 50 % 以上のトルク損失率改善を達成した（図 15）。

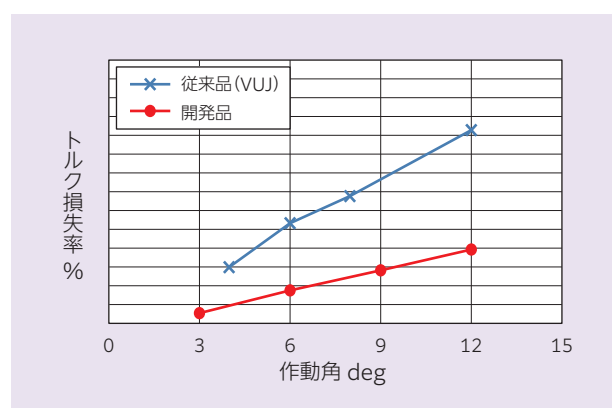


図 15 トルク損失率比較



### ・高角強度

独自構造・トラック形状の工夫・ケージ形状の最適化及び材料変更を行うことで、VUJに対し、6%の小型化、9%の軽量化を実現しながら高作動角時に同等強度を達成した(図16)。

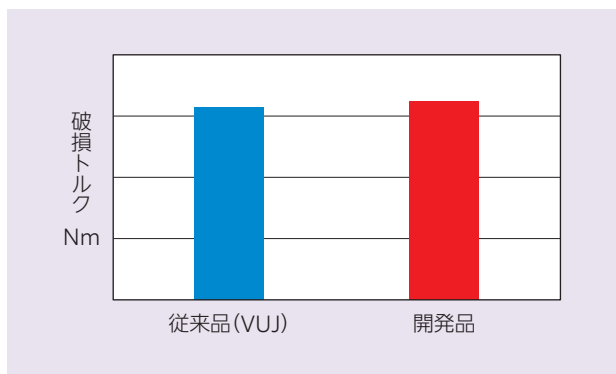


図16 高角静振り強度比較

### 参考文献

- 1) 池田武, 自動車用等速ジョイントの変遷と最近の技術, NTN TECHNICAL REVIEW No.70, (2002) 8-17.
- 2) 友上真, 等速ジョイントの技術動向と開発商品, NTN TECHNICAL REVIEW No.75, (2007) 10-15.
- 3) 藤尾輝明, 次世代高効率固定式等速ジョイント (CFJ), NTN TECHNICAL REVIEW No.81, (2013) 64-67.
- 4) 高部真一, 等速ジョイントの歴史, NTN TECHNICAL REVIEW No.85, (2017) 40-45.
- 5) 杉山達郎, 低燃費化を目指した等速ジョイントの開発の歴史, NTN TECHNICAL REVIEW No.87, (2019) 59-62.

## 5. まとめ

本稿では環境負荷低減に貢献する固定式 CVJ の進化に触れ、NTNが時代の変化に対応してきた開発商品とその効果について紹介した。世界的な脱炭素社会実現に向け、自動車は100年に一度の変革期を迎えており、CVJにおいても、この変革に柔軟に対応できる機能向上が必要不可欠である。NTNは等速ジョイントメーカーとして、脱炭素社会実現に向け環境負荷低減に貢献するために、今後普及拡大するEVに対するニーズを捉え、適用箇所、車両特性に合わせた最適な強度、耐久性を備え小型・軽量で高効率、静粛性に優れたCVJを継続して開発していく。

### 執筆者近影



船橋 雅司

自動車事業本部  
CVJ製品ユニット  
CVJ開発部

藤尾 輝明

自動車事業本部  
CVJ製品ユニット  
CVJ開発部

崎原 立己

自動車事業本部  
CVJ製品ユニット  
CVJ開発部

## 自動車電装補機向けの複合材料商品の紹介

### Introduction of Composite Material Products Used in Electrical Auxiliaries for Automobile



安田 健\* Ken YASUDA  
小松原 慎治\*\* Shinji KOMATSUBARA

当社の複合材料商品事業部は、トライボロジーを基盤技術として、樹脂、焼結金属、磁性材など幅広い素材からなる軸受、機械部品、モジュール商品を開発している。ここでは、主にサーマルマネジメントを目的とする自動車電装補機向け商品を紹介する。

Composite Material Products Division in NTN has developed bearings, mechanical parts, and module products made of multi materials such as resins, sintered metals, magnetic materials, which make full use of tribology. In this article, we mainly introduce products for thermal management of automobiles.

#### 1. はじめに

近年の自動車業界は、CASE をキーワードに様々な技術開発が進められている。電動化対応では、モータなどの動力源、インバータ、DC-DC コンバータ等、自動運転では、カメラ、センサ、それらを統合・制御する ECU など、電装補機あるいはその部品に対する開発が活発である。これら電装補機は、自動車の燃費・電費向上のために小型化・軽量化が進んでおり、表面積の減少、発熱密度の増加から、放熱の難易度が上がっている。さらに、5G など高速大容量通信で大きな発熱を伴う電気・電子デバイスが加わることから、自動車全体でのサーマルマネジメントが信頼性確保の重要なテーマになっている。また電動化により、大きな騒音源であるエンジン音から解放された静かな車内を、娯楽環境として捉える、新たな市場ニーズが生まれている。

本稿では、自動車のサーマルマネジメントに関わる電装補機の高効率化や車内居住性の向上に貢献する、複合材料商品の適用事例を紹介する。

#### 2. 電動コンプレッサ用 エラストマ製主軸シール

サーマルマネジメント関連の電装補機は、電動車の航続距離やバッテリー寿命を左右することから、省電力化・高効率化の市場ニーズがある。このような電装補機には高分子材料（エラストマ、樹脂）からなる様々な摺動部品が使用されており、そのトライボロジー特性が重要となる。

従来の内燃機関車では、エンジンの動力を利用したベルト駆動のコンプレッサが使用されているが、HEV、

PHEV、EV などの電動車では、電動コンプレッサが使用される。電動コンプレッサは、HEV、PHEV では車内冷房に、EV では冷暖房に加えバッテリーなどの温度調整に使用される。コンプレッサにはスクロール式と斜板式があるが、電動コンプレッサでは静粛性に優れたスクロール式が採用されている。

この電動スクロールコンプレッサには冷媒および冷凍機油を密封する主軸シールが使用されており、NTN は、省電力化、高効率化に貢献する、低トルク、低リークのベアリー TP5300 主軸シールを開発した。

##### 2.1 電動スクロールコンプレッサの構造

電動スクロールコンプレッサの構造を図 1 に示す。固定スクロールに対向した可動スクロールが旋回運動することで冷媒を圧縮する。可動スクロールは主軸の回転によって駆動し、主軸は転がり軸受によって支持されている。主軸シールは内径 20 mm 程度で、内外周両方にリップを備えており、ロータ側への冷媒および冷凍機油のリークを低減する目的で使用される。

EV では、電動コンプレッサは冷暖房だけでなく、バッテリーなどの温度調整に使用されるため、内燃機関車の場合より稼働時間が長い。そのため、電動コンプレッサには、耐久性の向上の要求がある。

\* 複合材料商品事業部 精密樹脂技術部

\*\* 複合材料商品事業部 動圧軸受技術部

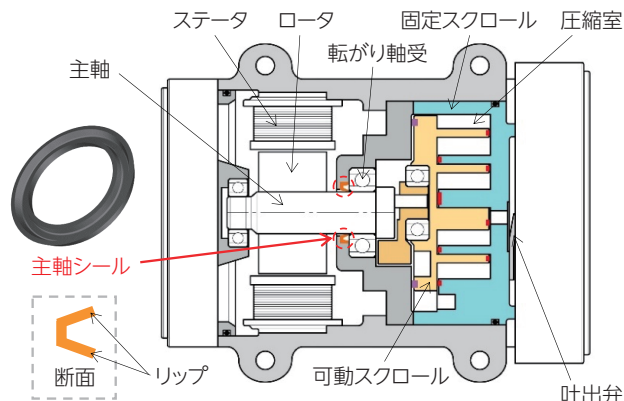


図1 電動スクロールコンプレッサの構造

### 2.2 ベアリー TP5300 主軸シールの特長

NTNのベアリー TP5300 主軸シールは、熱可塑性エラストマに充填材を配合した摩擦摩耗特性に優れた複合材料からなる。柔軟（低弾性）な熱可塑性エラストマ製であるため、主軸とのしめしろによるリップの反力が小さく、リップ先端部（内周側、外周側）が主軸およびハウジングに追従しやすいことから、低トルクかつ低リークなどの利点がある。また、リップ設計（厚さ、角度、長さなど）の最適化で更なる低トルク化を図っている。

従来の四ふっ化エチレン樹脂（PTFE）主軸シールとの性能比較を表1に示す。PTFE 主軸シールは、素材材からの機械加工品であったが、ベアリー TP5300 主軸シールは射出成形可能としたことから、形状の自由度に優れ、機械加工せず所望の形状を得ることができるので、低コストである。

表1 ベアリー TP5300 と PTFE 主軸シールの性能比較

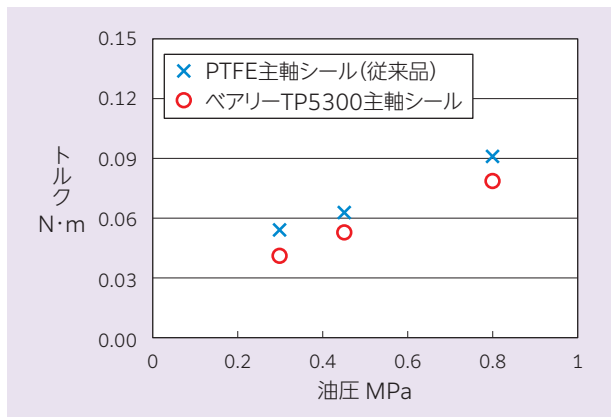
項目	ベアリー TP5300 主軸シール	PTFE 主軸シール (従来品)
ベース樹脂	熱可塑性エラストマ	PTFE
加工方法	射出成形	圧縮成形+機械加工
形状自由度	◎	△
トルク	◎	○
リーク	○	○
耐久性	◎	△
コスト	◎	△

◎:優 ○:良 △:可

### 2.3 摩擦摩耗特性

冷凍機油中の主軸シールのトルク測定結果を図2に示す。ベアリー TP5300 主軸シールは PTFE 主軸シールより、トルクが 15 ~ 25 % 低く、オイルリーク量は同等の 1 mL/min 未満で低リークである。

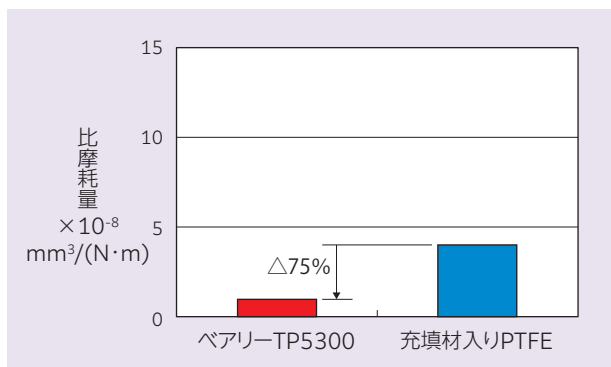
ベアリー TP5300 と、充填材入り PTFE について、リングオンディスク型試験機で摩耗試験した結果を図3に示す。ベアリー TP5300 の比摩耗量は、充填材入り PTFE の約 1/4 であり、耐久性も優れている。



<試験条件>

PAG 油 油温度 100 °C  
油圧 0.3 ~ 0.8 MPa  
回転速度 7 500 min<sup>-1</sup> 鉄製主軸

図2 トルク測定結果



<試験条件>

リングオンディスク型試験機 PAG 油 室温  
面圧 0.3 MPa 速度 1 m/s  
相手材 SUJ2 50 h

図3 摩耗試験結果

## 3. 電動ウォーターポンプ用 低トルク樹脂滑り軸受

電動車には、サーマルマネジメント関連の電装補機として、電動コンプレッサと共に、冷却水を循環する電動ウォーターポンプが搭載されている。これに使用される滑り軸受には、低燃費・省電力化のために、さらなる低摩擦化が求められている。

NTNは、ポリフェニレンサルファイド (PPS) に四ふつ化エチレン樹脂 (PTFE)、炭素繊維 (CF)などを配合した独自の複合材料<sup>1)2)</sup>からなる PPS 滑り軸受のスラスト面に特殊潤滑溝を形成することで、冷却水中での摩擦係数を大幅に低減した「低トルク樹脂軸受」を開発した。

### 3.1 電動ウォーターポンプの役割と構造

電動ウォーターポンプは、流量により大流量、中流量、小流量タイプに分類され、車両に複数台搭載される。大流量タイプはエンジン冷却、中流量タイプはバッテリー、モータ、インバータの冷却、小流量タイプはインタークーラ、排ガス再循環装置の冷却、暖房に用いられている。

代表的な電動ウォーターポンプの構造を図4に示す。インペラ、マグネット、滑り軸受を一体化したロータがポンプ室に収納されており、マグネットに対向してステータが配置されている。ロータは滑り軸受を介して、軸によって回転自在に支持されている。ステータへの通電によって発生する磁界により、ロータが軸を中心に回転する。インペラはロータと一体となっているため、ロータの回転に伴いインペラも回転し、ポンプ室に吸入された冷却水が移送される。

滑り軸受の内径は4～10 mm程度で、ロータ回転時にはラジアル荷重およびアキシャル荷重が発生するため、冷却水中にて滑り軸受の内径面と軸、スラスト面とスラスト受が摺動する。滑り軸受はインペラ側のスラスト受に押し付けられ、そのアキシャル荷重はラジアル荷重より大きいため、スラスト面は内径面より摩擦抵抗が大きくなる。したがって、滑り軸受の摩擦抵抗を低減するにはスラスト面の低摩擦化が有効である。

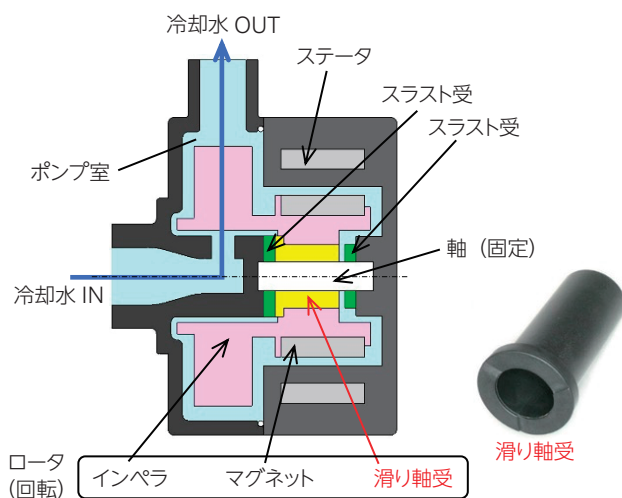


図4 電動ウォーターポンプの構造

### 3.2 軸受スラスト面の潤滑溝形状

電動ウォーターポンプの滑り軸受は、潤滑状態が良好な条件 (高速、且つ低荷重) では安定して低摩擦を維持でき、

摩擦も少ない。しかし、起動・停止時や運転中の局所的な水膜切れの発生時に、滑り軸受とスラスト受が接触することで摩擦係数が高くなり、摩擦が生じやすくなる。そのため、対策として滑り軸受のスラスト面に潤滑溝を設けている。

一般的に、電動ウォーターポンプの滑り軸受には、スラスト面の潤滑溝として表2 (b) に示す矩形潤滑溝が使用されている。この矩形潤滑溝は、軸受の内径側から外径側に放射状に貫通しており、断面が矩形の単純形状であることから、従来からウォーターポンプに使用されるカーボン滑り軸受のような成形素材からの機械加工品にも適用されている。

一方、NTNの低トルク樹脂軸受では、PPS滑り軸受のスラスト面に表2 (a) に示す特殊潤滑溝を形成している。この特殊潤滑溝は、射出成形時に金型転写が可能な形状で、図5に示すように軸受の反回転方向に溝が徐々に浅くなる勾配を設けて、軸受回転時に冷却水が潤滑溝の浅い方向に押し込まれ、動圧効果によって圧力が発生する設計としている。これにより、軸受のスラスト摺動面に冷却水が入り込みやすくなる。

スラスト面に特殊潤滑溝、潤滑溝なし、矩形潤滑溝をそれぞれ3本形成した3種類のPPS滑り軸受について、冷却水中での動摩擦係数を図6に示す。特殊潤滑溝を形成したPPS滑り軸受の動摩擦係数は潤滑溝なし比で65%、矩形潤滑溝比で30%低減しており、特殊潤滑溝の効果が発現している。

表2 各スラスト軸受のスラスト面の潤滑溝形状

項目	(a)特殊潤滑溝	(b)矩形潤滑溝	(c)潤滑溝なし
スラスト面の潤滑溝形状			
摺動面積比	0.88	0.95	1 (基準)
面圧, MPa	1.06	1.00	0.93

注) 面圧は後述の試験 (荷重128 N) における値

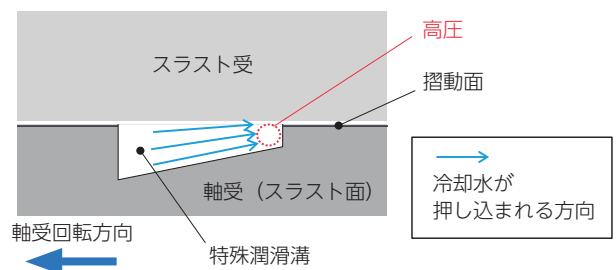
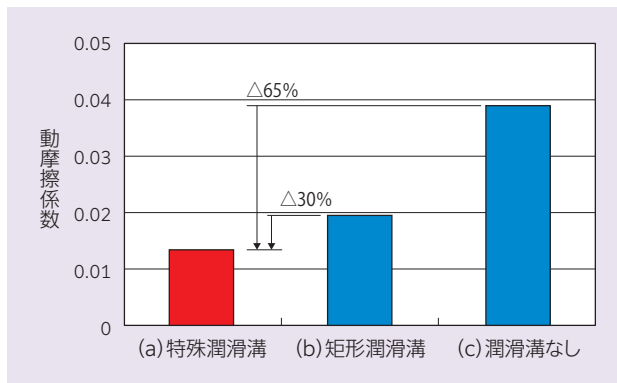


図5 特殊潤滑溝による動圧効果





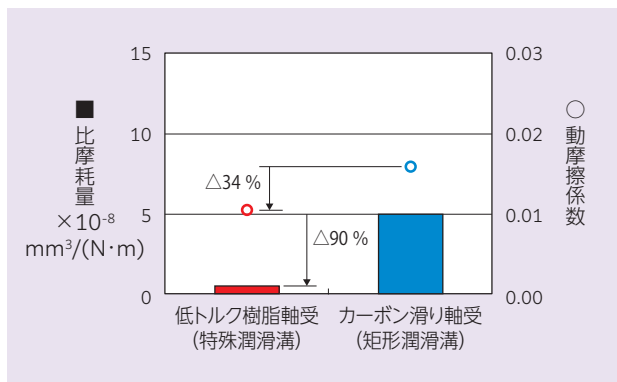
<試験条件>  
 リングオンディスク型試験機 冷却水（エチレングリコール濃度 50 %）  
 室温 荷重 128 N（面圧約 1 MPa）速度 125 m/min  
 相手材 SUS304

図6 スラスト面の潤滑溝形状と動摩擦係数の関係

### 3.3 摩擦摩耗特性

PPS 滑り軸受のスラスト面に特殊潤滑溝 3 本を形成した低トルク樹脂軸受と、表 2 (b) の矩形潤滑溝 3 本を形成した従来のカーボン滑り軸受について、冷却水中での摩擦摩耗試験結果を図 7 に示す。低トルク樹脂軸受（特殊潤滑溝）は、カーボン滑り軸受（矩形潤滑溝）と比較して、動摩擦係数は 34 % 低く、比摩耗量は 1/10 であった。この摩擦係数の差は、図 6 の矩形潤滑溝と特殊潤滑溝の結果と同様である。

低トルク樹脂軸受は、冷却水中での摺動に適した充填材を配合した PPS 複合材料からなり、スラスト面に特殊潤滑溝を形成しているため、カーボン滑り軸受（矩形潤滑溝）より低摩擦低摩耗特性で、表 3 に示すようにその他の各種特性も優れている。



<試験条件>  
 リングオンディスク型試験機 冷却水（エチレングリコール濃度 50 %）  
 室温 荷重 128 N（面圧約 1 MPa）速度 125 m/min  
 相手材 SUS304 50 h

図7 各滑り軸受の摩擦摩耗特性

表3 各滑り軸受の特性比較

項目	低トルク樹脂軸受 (特殊潤滑溝)	カーボン滑り軸受 (矩形潤滑溝)
加工方法	射出成形	機械加工
耐薬品性	◎	○
耐衝撃性	○	△
形状自由度	◎	△
摩擦特性 (冷却水中)	◎	○
耐摩耗性 (冷却水中)	◎	○
コスト	◎	△

◎:優 ○:良 △:可

### 4. ヘッドライト冷却ファン用焼結流体動圧軸受 動圧ベアファイト

自動車の電動化によって車内の静粛性が向上したことに伴い、従来の内燃機関車ではエンジン音などに埋もれていた電装補機の作動音に対する静音化の要求が高まっている。また、自動車の電装補機は幅広い温度範囲での高い信頼性が要求される。

近年、省エネルギーかつ長寿命である LED ライトが主流となってきているヘッドライトは、視認性の確保に必要な光度を得るために大電流が必要なため、LED 回路基板の発熱量が大きくなる。そのため、サーマルマネジメントの必要性が高まっており、放熱のために用いられる冷却ファンモータ (図 8) には、低温 (-40 °C) から高温 (100 °C) までの幅広い温度領域において、安定した性能が要求される。

NTN はこれらの要求に対応する、幅広い温度域において静粛性に優れた流体動圧軸受「動圧ベアファイト」(図 9) を開発した。

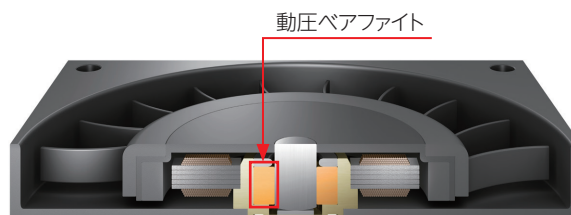


図8 冷却ファンモータ



図 9 動圧ベアファイト

#### 4.1 優れた静粛性

動圧ベアファイトは粉末冶金法によって製造され、軸受内径面にヘリングボーン型の動圧溝を有する焼結含油軸受の一種である (図 10)。軸の回転によって発生する動圧効果により、軸受すきま内に油膜を形成し、軸と軸受を非接触で支持する。

動圧溝の有無による油膜形成性の差異を確認するため、電気抵抗法により軸と動圧ベアファイトの接触有無を判断した結果を図 11 に示す。検出された電圧を基に、接触状態を油膜形成率 0 %、非接触状態を 100 %と設定した。動圧溝を有することで安定して軸を非接触で支持していることが分かる。

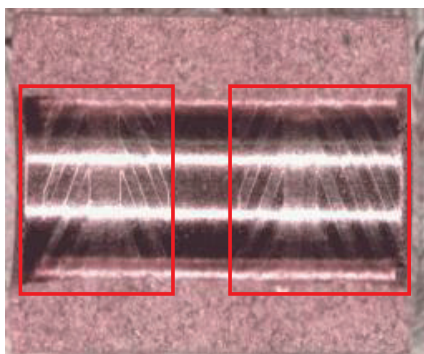


図 10 動圧ベアファイトの内径面  
(赤枠部：動圧溝)

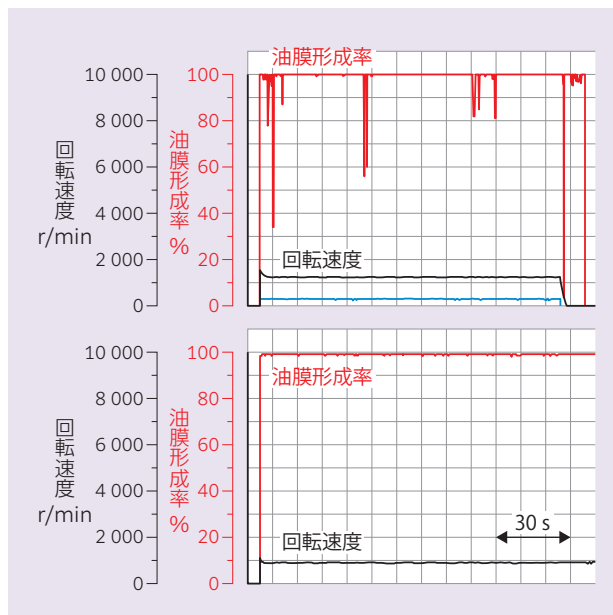


図 11 動圧溝の有無による油膜形成性の違い  
(上：動圧溝なし，下：動圧溝あり)

一般的に、油膜圧力の低下が懸念される低速時の回転速度においても非接触で支持が可能<sup>3)</sup>で、静粛性に優れることから、動圧ベアファイトは薄型ノートパソコンやモバイル端末など情報機器の冷却ファンモータで多く採用されている。ヘッドライト用冷却ファンモータにおいても、低速から高速までの幅広い回転速度領域における高い静粛性が評価され、採用が進んでいる。

#### 4.2 幅広い温度領域における高い信頼性

ヘッドライトに要求される幅広い温度領域において、潤滑油粘度の変化量を小さくすることが、安定した軸受性能の確保につながる。特に高温環境での潤滑油の著しい粘度低下は、軸の回転によって発生する動圧効果を下げる要因となる。そこで、従来品に対し、高温での粘度低下が少ない潤滑油を適用し、温度特性に優れた動圧ベアファイトを開発した。(図 12)

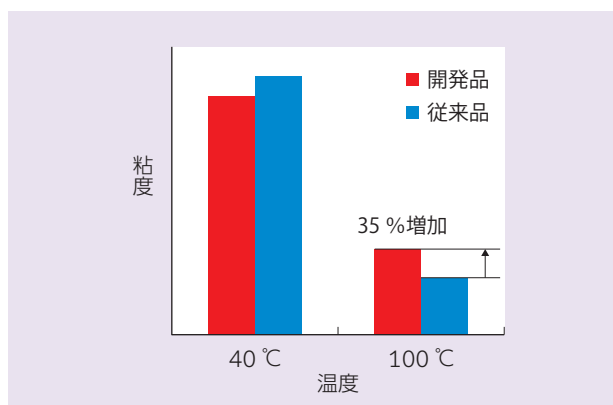


図 12 潤滑油の温度と粘度の関係

高温時（100℃）の軸の偏心率の計算結果を図13に示す。偏心率は、半径すきまに対する軸芯の変位量の比率であり、偏心率が小さいほど最小油膜厚さは大きくなることを意味する。開発品は従来品に対し、偏心率を大幅に低減できることから、幅広い温度領域において軸受の信頼性の確保が可能である。

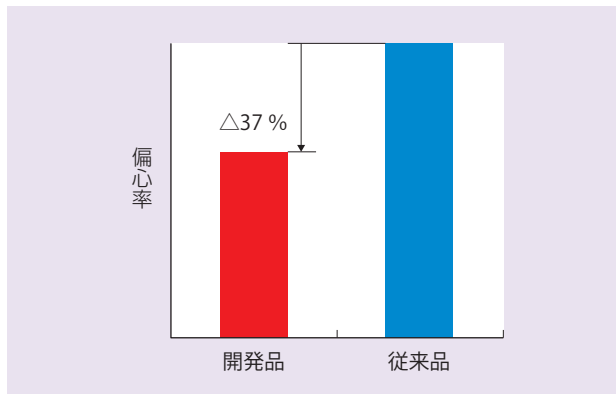


図13 偏心率の計算結果

さらに、動圧ベアファイトは、粉末冶金法の特長として、軸受表層および内部に有する気孔（図14）に潤滑な潤滑油を保持可能なことから、想定する使用温度範囲を超えた場合でも、軸と動圧ベアファイトの接触による焼付き寿命の低下を抑制する効果がある。

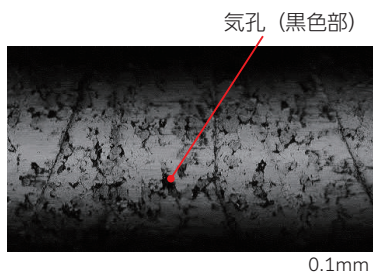


図14 動圧ベアファイト表面状態

## 5. おわりに

本稿では、NTNの樹脂、焼結金属などの材料からなる軸受・要素部品が、自動車の省エネルギーと、快適な車内居住環境の提供のために採用された事例を紹介した。

自動車の電動化・自動運転・コネクテッドに向けた開発において、サーマルマネジメントは必須となっている。また、四輪車の騒音に関する国際規格UN-R51はフェーズ3の段階を迎え、厳格化が進んでいる。フェーズ3では、新たにタイヤノイズの騒音値も加味され、走行時の騒音は、フェーズ2での掃除機程度のレベルから、洗濯機と同程度まで低減することが求められるようになる。さらに、自動運転の実現で運転操作から解放され、走行中に仕事や読書、映画鑑賞などの時間に充てることのできる未来が訪れた場合、これまで以上に静粛性の高い車内空間が求められるようになると予想される。

今後も、サーマルマネジメントと車内居住性の向上をキーワードとする商品・技術開発を行い、車両を中心とするモビリティ社会の発展に寄与する所存である。

## 参考文献

- 1) 石井卓哉, 安田健, 自動車・航空機用樹脂の最新技術, 技術情報協会 (2016) 167.
- 2) 安田健, 電動ウォーターポンプ用樹脂製すべり軸受の技術, 月刊トライボロジー, 2021年5月号, No.405 (2021) 32.
- 3) 小松原慎治, 薄型冷却ファンモータ用動圧ベアファイト軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88 (2021) 44-45.

## 執筆者近影



安田 健

複合材料商品事業部  
精密樹脂技術部



小松原 慎治

複合材料商品事業部  
動圧軸受技術部

# 混合潤滑条件での転がり軸受のピーリングの寿命推定方法

## A Life Estimation Method of Peeling in Rolling Bearings Under Mixed Lubrication Conditions

長谷川 直哉 \* Naoya HASEGAWA 内舘 道正 \*\*\* Michimasa UCHIDATE  
藤田 工 \*\* Takumi FUJITA 阿保 政義 \*\*\*\* Masayoshi ABO

ピーリングは境界潤滑および混合潤滑条件で発生する転がり軸受の損傷の一つであり、 $10\ \mu\text{m}$  程度の大きさの剥離やき裂が集合したものを指す。筆者らは過去に境界潤滑かつすべりのない転がり条件に適用できるピーリングの寿命推定法を紹介した。本報では、当該寿命推定法を混合潤滑条件に適用できるように改良した方法を紹介する。改良法では、Johnsonらの荷重分担理論に基づく接触応力解析法を用いることで、混合潤滑下で荷重支持に及ぼす油膜の影響を考慮した寿命推定が可能となった。本推定法の寿命推定の精度は従来法よりも改善した。

Peeling which consists of spalls and cracks with the size of about  $10\ \mu\text{m}$  is one of the failures of rolling bearings under boundary and mixed lubrication conditions. In the past, we introduced a life estimation method of peeling which is applicable to boundary lubrication and rolling conditions without slip. In this report, we introduce an updated life estimation method which is applicable to mixed lubrication conditions. The updated method applies a contact analysis based on the load-sharing theory of Johnson et al. This enables us to estimate peeling lives with consideration of the effect of oil film on supporting the load under mixed lubrication conditions. We evaluated the accuracy of updated method by a rolling contact testing. The accuracy of life estimation by the updated method was improved as compared with that of the previous method.

### 1. はじめに

世界各国でカーボンニュートラルの実現に向けた取組みが進む中、摩擦低減を目的とする機械や自動車の潤滑油の低粘度化は、今後さらに加速していくと想定される。潤滑油の低粘度化は転がり軸受（以下、軸受）の境界潤滑や混合潤滑条件（以下、希薄潤滑条件）での使用機会を増加させるため、当該条件での軸受の信頼性向上が今後の重要な技術課題になると考えられる。

ピーリングは希薄潤滑条件で発生する軸受損傷の代表例であり、 $10\ \mu\text{m}$  程度の大きさの剥離やき裂が密集した部分のことを指す<sup>1)</sup>。ピーリングは希薄潤滑条件のように転がり面の油膜パラメータ  $A$ （EHL理論で求められる転動部の最小油膜厚さと2面の二乗平均平方根粗さの二乗和の平方根との比）が小さい条件で発生しやすいため、表面粗さの直接接点部（以下、真実接点部）に作用する繰返し応力がその発生原因と考えられている。また、筆者らの研究<sup>2,3)</sup>により、上記繰返し応力の作用による塑性変形で形成された切欠きからピーリングの初期き裂が発生することがわかっている。

希薄潤滑条件での軸受の信頼性を検討するには、ピーリングによる寿命（以下、ピーリング寿命）を推定する方法が必要である。ピーリング寿命が推定できれば、軸受の

表面粗さや潤滑剤を適正に選定できる。また、信頼性と低トルクを両立するために必要な軸受の表面粗さや潤滑油粘度の設計にも応用でき、これにより軸受ユーザの摩擦低減にも貢献できる。筆者らは前報<sup>4)</sup>において、独自に開発したピーリングの寿命推定法<sup>5)</sup>を紹介したが、その適用条件は境界潤滑条件に限定されていた。本稿では、混合潤滑条件に適用可能なピーリング寿命の推定方法とその推定精度の検証結果<sup>6)</sup>を紹介する。

なお、「ピーリング」は国内軸受メーカーが慣習的に使用してきた用語であり、国外では「Micropitting: マイクロピッチング」という用語が一般に用いられる。

### 2. 従来のピーリング寿命推定法<sup>5)</sup>

#### 2.1 寿命推定の手順

図1にピーリング寿命推定の手順を示す。Step 1では様々な運転条件で転動疲労試験を行い、ピーリング寿命と転がり面に作用する応力（真実接点部直下の深さ $0.5\ \mu\text{m}$ に作用したミーゼス応力、以下では表層応力）の履歴（以下、応力履歴）を取得する。表層応力は運転中に転がり面の表面粗さの低下と圧縮残留応力の生成（以下、なじみ）によって低下する。そのため、一定の負荷回数ごとに実測した表面形状を用いた接触応力解析と残留応力測定の結果

\* 先端技術研究所

\*\* 商品化戦略部

\*\*\* 岩手大学 理工学部

\*\*\*\* 兵庫県立大学 工学部



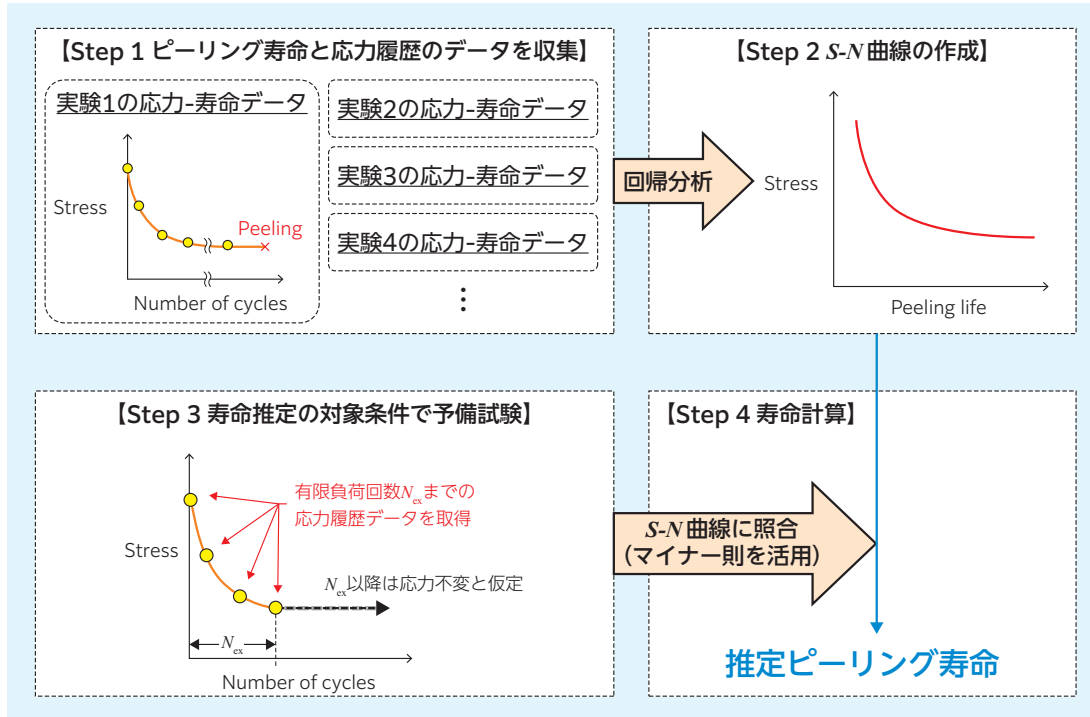


図1 ピーリング寿命推定法の手順<sup>4)</sup>

果を用いて表層応力を推定する。なお、深さ  $0.5 \mu\text{m}$  でのミーゼス応力を寿命推定に用いるのは、試験条件によらず深さ  $0.5 \mu\text{m}$  でミーゼス応力が最大になる傾向があった<sup>5)</sup>ためである。Step 2 では、Step 1 で得たピーリング寿命と応力履歴のデータから、ピーリングの  $S-N$  曲線 (Stress - Number of cycles to failure) を回帰分析で求める。Step 3 では、任意の条件のピーリング寿命を推定するために推定対象の運転条件を模擬した転動疲労試験 (以下、予備試験) を行い、その条件での応力履歴を求める。予備試験はなじみが停滞する負荷回数  $N_{ex}$  ( $10^4$  回程度) まで実施し、それ以後の表層応力は変化しないと仮定する。最後に Step 4 では、Step 3 で得られた応力履歴と  $S-N$  曲線を使ってピーリング寿命を推定する。

本手順の Step 2 と Step 4 では、応力履歴からマイナー則を使って疲労度 (総負荷回数と寿命の比) を計算し、疲労度が 100 % になる時点でピーリングが発生するという考え方を採用する。

表層応力には、個々の真実接触部の直下の深さ  $0.5 \mu\text{m}$  地点に作用したミーゼス応力の平均値を用いる。これを求めるときは、まず真実接触部の深さ  $0.5 \mu\text{m}$  地点に実質的に作用した三軸応力の垂直応力成分  $\hat{\sigma}_j$  およびせん断応力成分  $\hat{\tau}_{jk}$  を以下の式 (1) と (2) で求める。

$$\hat{\sigma}_j = \sigma_{j, \text{con}} + \sigma_{j, \text{res}} \quad (1)$$

$$\hat{\tau}_{jk} = \tau_{jk, \text{con}} + \tau_{jk, \text{res}} \quad (2)$$

$$(j = x, y, z, k = x, y, z, j \neq k, \tau_{jk} = \tau_{kj})$$

ここで、添え字の con は接触応力解析で求めた接触応力、res は残留応力測定で得た残留応力であることを示す。また、x, y, z はそれぞれ転がり面における周方向、軸方向、深さ方向を表す。その後、式 (1), (2) で得た三軸応力成分を以下の式 (3) に代入して真実接触部の深さ  $0.5 \mu\text{m}$  でのミーゼス応力を求め、それらの平均値として表層応力を求める。

$$\sigma_{\text{vm}} = \sqrt{\frac{1}{2} \{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)\}} \quad (3)$$

本推定法は予備試験を必要とするが、予備試験を含めても数時間程度で寿命を推定できる。また、予備試験のデータを援用することにより、シミュレートすることが難しい多種多様な条件下でのなじみ挙動を正確に反映した寿命推定が可能である。この他、残留応力が寿命に及ぼす影響を考慮した点も本方法の特徴の 1 つである。なお、 $S-N$  曲線は転動部品の鋼種や熱処理ごとに作成することが好ましい。

### 3. 混合潤滑条件への適用に向けた接触応力解析法の改良

#### 3.1 接触応力解析の概要

混合潤滑条件では、油膜の荷重支持の影響が無視できない。本報では、前記のピーリング寿命推定法を混合潤滑条件に適用するため、表層応力の推定時の接触応力解析を油膜の荷重支持の影響を考慮できる方法<sup>7)</sup>に改良した。本解析では Johnson らの荷重分担理論<sup>8)</sup>を適用しており、

図2のように、転動部への荷重をある比率で油膜と真実接触部が分担すると考える。したがって、転がり面の圧力分布は、油膜と真実接触部の圧力分布の和として求められる。油膜と真実接触部の圧力分布は、油膜の荷重分担率を未知数とした収束計算で個別に求める。このときの収束条件は、真実接触部のすきまに存在する油膜の質量と、滑らかな2面に油膜の分担荷重を负荷したときの2面間の油膜の質量が等しくなることとした。

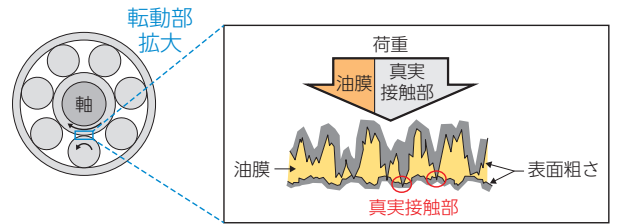


図2 荷重分担理論の概念

以下、図3を参照して本解析の手順を説明する。Step 1では、転動部への負荷荷重  $W$  に対する油膜の荷重分担率を  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) とし、滑らかな2面が油膜の分担荷重  $\alpha W$  を受けて転動するときの中央油膜厚さ  $h_c$ 、油膜圧力  $P_f(x, y)$  の分布、および2面の弾性変形を計算する。このとき  $\alpha$  には任意の初期値を設定する。中央油膜厚さ  $h_c$  は Chittendenらの中央油膜厚さの計算式<sup>9)</sup>に Ghoshらのせん断発熱による油膜厚さの補正係数<sup>10)</sup>を乗じて求める。また、油膜圧力  $P_f(x, y)$  と弾性変形は、2面が負荷荷重  $\alpha W$  で接触するときの圧力分布と弾性変形に等しいと仮定して、境界要素法を用いた接触計算プログラム<sup>11)</sup>で求める。ここでは、弾性流体潤滑特有の接触部出口側に発生する油膜圧力のスパイクは無視する。これは、接触部の圧力が高い(数 GPa)条件での油膜圧力はスパイクが小さく、接触圧力の分布と同等と考えてよい<sup>12)</sup>ことに基づいている。なお、 $\alpha$  が0に近い条件では、潤滑領域が軸受で一般的な高圧粘度 - 弾性体領域(圧力増加に伴う潤滑油の粘度増加と油圧による転がり面の変形がともに無視できない程度になる領域)ではないと想定され、その場合は Chittendenらの式は適用できないが、 $\alpha$  が0に近い領域では荷重支持に及ぼす油膜の影響が小さいので、Chittendenらの式を適用することによる解析の誤差への影響は無視できると仮定する。Step 2では、Step1で得た弾性変形後の2面の形状に予め実測した転がり面の三次元粗さデータを足し合わせ、油圧の作用で変形した状態の粗面形状(以下、油圧作用後粗面形状)

を作成する。Step 3では、油圧作用後粗面形状に残りの荷重  $(1 - \alpha)W$  を负荷し、真実接触部の圧力  $P_a(x, y)$  の分布と2面の平均すきま  $h_{m, rough}$  を Step 1と同じ接触計算プログラムを用いて計算する。ここでの平均すきま  $h_{m, rough}$  は以下の式で求められる。

$$h_{m, rough} = \int_A h_{rough}(x, y) dx dy / A \quad (4)$$

式(4)での  $A$  は、Step 1で油膜圧力  $P_f(x, y)$  が0より大きかった領域の面積である。また、真実接触部でのすきまは0とする。Step 4では、Step 1で求めた中央油膜厚さ  $h_c$  が Step 3で求めた平均すきま  $h_{m, rough}$  と等しいかを検討し、等しくない場合は Step 1に戻って  $\alpha$  を修正する。これは接触応力解析の収束条件であり、2面間に引き込まれる潤滑油の質量が2面の表面粗さの有無によらず変化しない(質力保存則)という考えに基づいている。Step 5では、総荷重  $W$  负荷時の転がり面の圧力  $P(x, y)$  の分布を  $P_f(x, y)$  と  $P_a(x, y)$  の和として求め、これに Boussinesqの弾性解<sup>13)</sup>を適用することで、転がり面下の内部応力(三軸応力成分)の分布を計算する。

### 3.2 接触応力解析の妥当性

本解析法で求めた油膜の荷重分担率  $\alpha$  や表層応力の値が、転動疲労試験で得た油膜形成性の指標や試験片の残留応力変化と整合するかを検証した<sup>7)</sup>。本稿では詳細を割愛するが、 $\alpha$  や表層応力の解析値が試験データと概ね整合することを確認した。図4に、検討結果の一例として、転

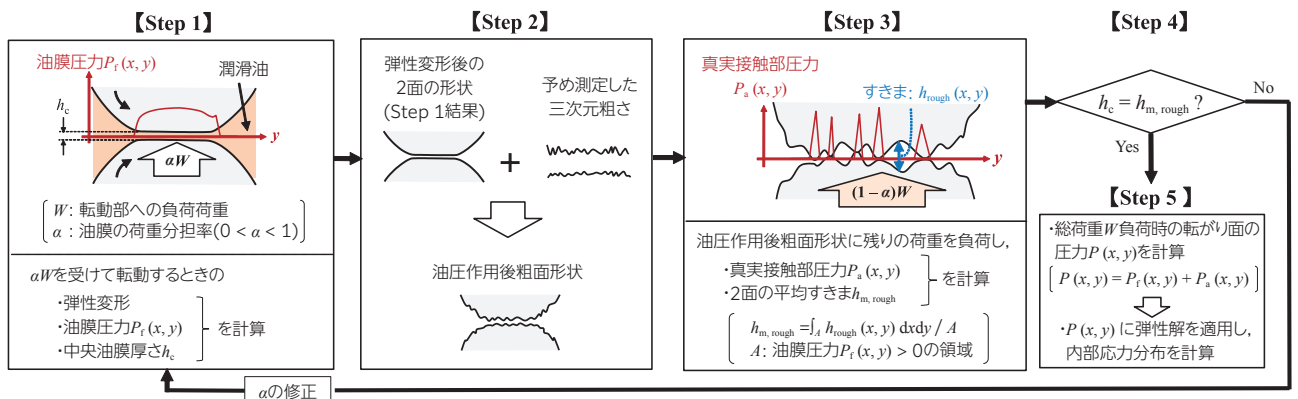


図3 接触応力解析の手順<sup>7)</sup>

動疲労試験における転がり面の表層応力の推定値と残留応力の測定値の関係を示す。このときの転動疲労試験には後述の二円筒試験機を用い、回転速度を  $900 \text{ min}^{-1}$  から徐々に低下させる条件で試験した。試験は回転速度変更時に都度中断し、中断時に転がり面の三次元粗さと残留応力を測定した。これらから各回転速度の試験時の表層応力を推定した。図4より、表層応力（推定値）は回転速度  $125 \text{ min}^{-1}$  の運転時に試験片の降伏応力を上回っていた。そして、残留応力（測定値）は回転速度  $125 \text{ min}^{-1}$  での運転時に増加した。これらの結果は、 $125 \text{ min}^{-1}$  で転がり面が塑性変形するという接触解析の予測と残留応力測定での検証結果が整合していることを示している。

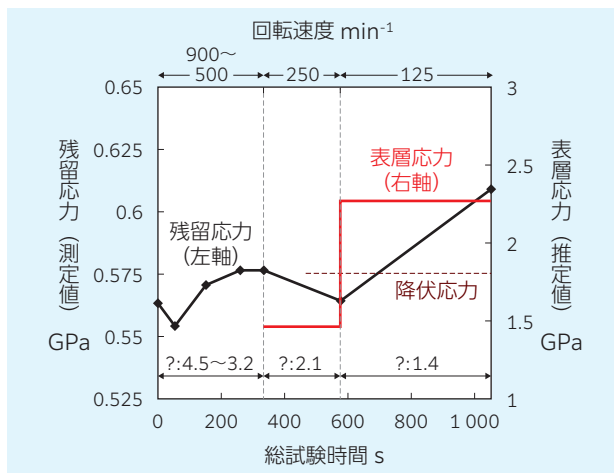


図4 接触応力解析で推定した表層応力と残留応力の測定値の関係<sup>7)</sup>

#### 4. 寿命推定の精度検証

##### 4.1 転動疲労試験

新しい寿命推定法の精度検証のため、図5の二円筒試験機で転動疲労試験を行った。駆動円筒と従動円筒は、外径 $\phi 40 \text{ mm}$ 、厚さ  $12 \text{ mm}$  の円筒形状で、駆動円筒のみ軸方向に半径  $60 \text{ mm}$  の曲率をつけた。潤滑油を含浸させたフェルトパッドを試験中の円筒試験片に下方から接触させることで給油した。円筒試験片の材質はSUJ2で、表面硬さが約  $63 \text{ HRC}$  となるように一般的な焼入れ、焼戻しを行った。表1に試験条件を示す。転がり面の表面粗さ、回転速度、最大ヘルツ接触面圧、潤滑油種を変えた条件で試験した。No. 6, 7の試験の $A$ は0.5以上であり、混合潤滑条件に該当する。ピーリングは表面粗さが小さい従動円筒で発生しやすいため、寿命は従動円筒のピーリングの発生状況から決定した。各試験は原則として  $10^2$  回、 $10^3$  回、 $5 \times 10^3$  回、 $10^4$  回、 $10^5$  回負荷時に中断した。これらの中断時と試験前に、駆動円筒と従動円筒の三次元粗さ測定および従動円筒の残留応力測定を行い、得られたデータから従動円筒の応力履歴を求めた。また、中断時に従動円筒のピーリングの発生状態を光学顕微鏡で観察した。そして、転がり面内の異なる6箇所を観察視野面積に対する微小剥離やき裂の発生部の面積の比率（以下、ピーリング面積率）が0.5%以上になったときの総負荷回数をピーリングの実寿命  $L_{act}$  とした。 $10^5$  回負荷時にピーリング面積率が0.5%未満の場合は、0.5%に達するまで試験を継続した。

表1 二円筒試験の条件<sup>6)</sup>

試験 No.	表面粗さ ( $R_a$ ) $\mu\text{m}$		回転速度 $\text{min}^{-1}$	最大ヘルツ接触面圧 GPa	潤滑剤	動粘度 (40°C) $\text{mm}^2/\text{s}$	油膜パラメータ $A$
	駆動円筒	従動円筒					
1	0.75	0.02	2 000	2.3	合成油 (PAO)	6.2	0.11
2							
3				2.3			
4							
5	0.50	2 000	2 000	2.3	鉱油	32.6	0.17
6	0.75	2 000	2 000	2.3		47.7	0.52
7	0.40	0.02	500	2.3	鉱油	6.8	0.15
8							
9							
10	0.35	0.02	1 000	2.3	合成油 (PAO)	6.2	0.17
11							2 000

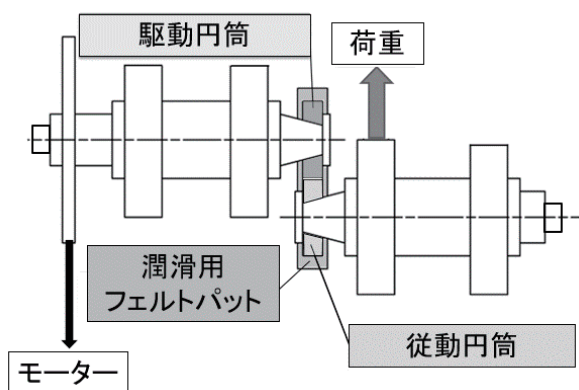


図5 二円筒試験機<sup>2)</sup>

#### 4.2 推定精度の検証方法

表1に示すNo. 1～11の二円筒試験について、図1の手順でピーリング寿命を推定した。このとき、接触応力解析で荷重分担理論を考慮した場合と、しない場合のそれぞれについて寿命を推定し、両者の寿命推定精度を比較した。各試験の推定ピーリング寿命  $L_{est}$  は  $10^4$  回までの応力履歴から計算した。荷重分担理論を考慮した場合の寿命推定では、No. 7 および 8 以外の試験データを用いて  $S-N$  曲線を作成し、これを  $L_{est}$  の計算に用いた。一方、荷重分担理論を考慮しない場合の寿命推定では、既報<sup>5)</sup>で作成済みの  $S-N$  曲線を用いて  $L_{est}$  を計算した。寿命推定の精度は、 $L_{est}$  と試験で最終的に得られたピーリングの実寿命  $L_{act}$  の寿命比 ( $L_{act}/L_{est}$ ) を用いて検討した。

## 5. 結果

図6に推定寿命  $L_{est}$  と実寿命  $L_{act}$  の関係を示す。図中には、寿命比 ( $L_{act}/L_{est}$ ) の中央値、最小値、最大値を併記した。図6(a)の荷重分担理論の考慮なしの場合は、混合潤滑条件であったNo. 6および7の試験の寿命推定精度が他の試験と比較して低く、実寿命に対する推定寿命の誤差(誤差は、 $L_{act}/L_{est}$ の最大値または最小値の逆数のうち大きい方の値として求める)は20倍であった。一方、図6(b)の荷重分担理論の考慮ありの場合、No. 6および7の試験の推定精度の誤差は5倍以下であり、混合潤滑条件での寿命推定精度は改善した。ここで、一般的に軸受の剥離寿命が同一条件下で10倍以上のばらつきを持つ<sup>14)</sup>ことを考えると、荷重分担理論の考慮ありの場合の寿命推定精度は十分に実用に値するレベルと考えられる。

## 6. まとめ

混合潤滑条件に適用できるように改良したピーリング寿命推定法と、その寿命推定精度の検証結果を紹介した。

- 1) 本推定法では荷重分担理論を適用した接触応力解析法を採用し、潤滑条件がピーリング寿命に及ぼす影響を考慮した。
- 2) 本推定法で求めたピーリング寿命の実寿命に対する誤差は最大で5倍以下であり、混合潤滑条件でのピーリング寿命の推定精度が従来法より改善した。上記の精度は、軸受のピーリング寿命推定法として十分に実用に値するレベルである。

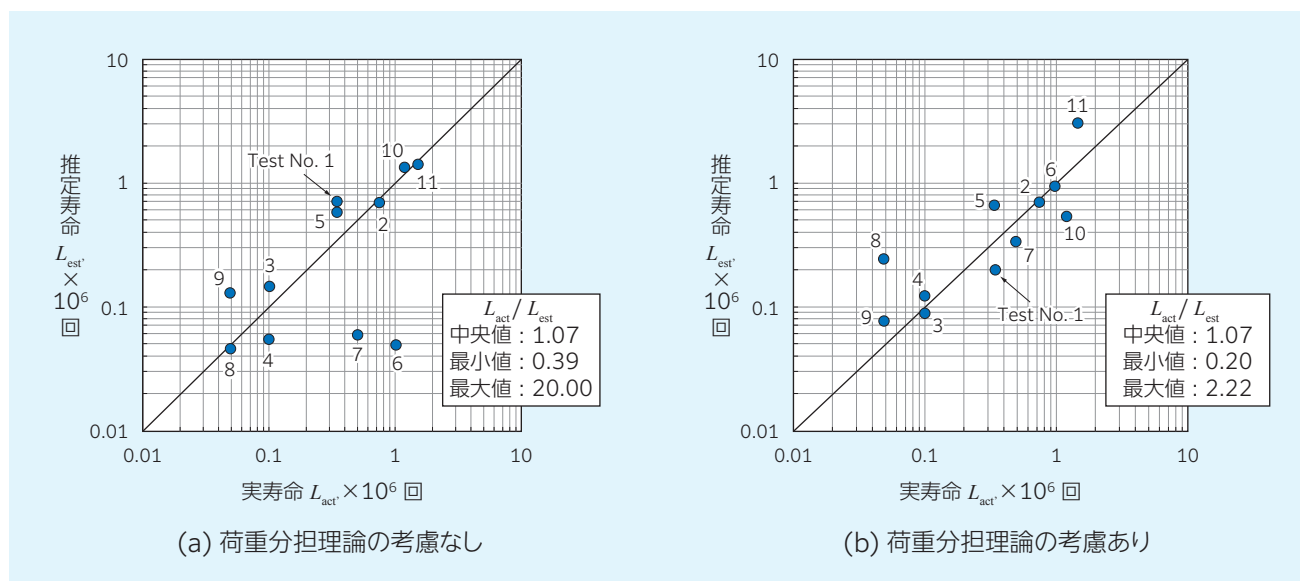


図6 ピーリングの推定寿命と実寿命の関係<sup>6)</sup>



なお、本推定法の適用範囲は、現状で純転がり条件に限定されることに注意する必要がある。今後は、推定精度のさらなる向上と転がり面にすべりがある条件への拡張に取り組む。そして、本推定技術を軸受の信頼性向上や機械の高効率化という顧客価値の提供に活用していく。

本稿は日本トライボロジー学会主催の「トライボロジー会議 2021 春 東京」の予稿集に掲載された発表予稿「残留応力測定と接触解析で得られた SN 曲線を用いたマイクロピッチング寿命の推定方法 第 2 報」と「トライボロジー会議 2022 春 東京」の予稿集に掲載された発表予稿「混合潤滑下の転がり面の接触応力解析の妥当性検証」の内容をまとめた（図表の一部は和訳、改編した）ものである。掲載を許可下さった日本トライボロジー学会のご厚意に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 対馬全之, 中島碩一, 柏村博: 軸受の代表的な破損形態, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 57, (1990) 59.
- 2) 長谷川直哉, 藤田工, 内館道正, 阿保政義: 転がり接触によるピーリングの発生メカニズムとピーリング抑制に及ぼす黒染処理の影響 第 1 報, トライボロジスト, 63, 8, (2018) 551.
- 3) 長谷川直哉, 藤田工, 内館道正, 阿保政義: 転がり接触によるピーリングの発生メカニズムとピーリング抑制に及ぼす黒染処理の影響 第 2 報, トライボロジスト, 63, 9, (2018) 618.
- 4) 長谷川直哉, 藤田工, 内館道正, 阿保政義, 木下博: 転がり軸受のピーリング発生メカニズムとその寿命推定方法, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 88, (2021) 77.
- 5) N. Hasegawa, T. Fujita, M. Uchidate, M. Abo & H. Kinoshita, Estimation Method of Micropitting Life from  $S-N$  Curve Established by Residual Stress Measurements and Numerical Contact Analysis, Tribology Online, 14, 3, (2019) 131.
- 6) 長谷川直哉, 藤田工, 内館道正, 阿保政義: 残留応力測定と接触解析で得られた SN 曲線を用いたマイクロピッチング寿命の推定方法 第 2 報, トライボロジー会議 2021 春 東京 予稿集, (2021) B22.
- 7) 長谷川直哉, 藤田工, 内館道正: 混合潤滑下の転がり面の接触応力解析の妥当性検証, トライボロジー会議 2022 春 東京 予稿集, (2022) F11.
- 8) K. L. Johnson, J. A. Greenwood & S. Y. Poon, A Simple Theory of Asperity Contact in Elastohydrodynamic Lubrication, Wear, 19, (1972) 91-108.
- 9) R. J. Chittenden, D. Dowson, J. F. Dunn & C. M. Taylor, A Theoretical Analysis of the Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Concentrated Contacts, II. General Case, With Lubricant Entrainment Along Either Principal Axis of the Hertzian Contact Ellipse or at some Intermediate Angle, Proc. Roy. Soc. Lond., A, 397, (1985) 271-294.
- 10) M. K. Ghosh and R. K. Pandey, Thermal Elastohydrodynamic Lubrication of Heavily Loaded Line Contacts-An Efficient Inlet Zone Analysis, Trans. ASME, J. Tribol., 120-1, (1998) 119-125.
- 11) M. Uchidate, Comparison of Contact Conditions Obtained by Direct Simulation with Statistical Analysis for Normally Distributed Isotropic Surfaces, Surface Topography: Metrology and Properties, 6, 3, (2018) 034003.
- 12) 高田浩年, 相原了, 転がり軸受の寿命と信頼性, 日刊工業新聞社, (2005) 161.
- 13) K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press, Cambridge, (1985) 51.
- 14) 転がり軸受寿命研究会, 転がり軸受寿命に及ぼす荷重と潤滑油の影響, トライボロジスト, 61, 9, (2016) 607.

執筆者近影



長谷川 直哉  
先端技術研究所



藤田 工  
商品化戦略部



内館 道正  
岩手大学 理工学部



阿保 政義  
兵庫県立大学 工学部

# 転がり軸受用技術計算システムの開発

## Development of Technical Calculation Systems for Rolling Bearings

石河 智海 \* Tomomi ISHIKAWA  
蛭川 博康 \* Hiroyasu HIRUKAWA  
和泉 麻理子 \* Mariko IZUMI  
Cedric BURNET \*\*

転がり軸受に求められる性能は多岐に亘っており、近年では環境対応などによりその傾向は加速している。これらの要求に迅速に対応するためには、デジタル技術の一つであるCAE（Computer-Aided Engineering）技術の活用が欠かせない。その事例として、転がり軸受の設計業務の高度化および効率化を目的に開発した2つの技術計算システムを紹介する。

The performance requirements for rolling bearings are diverse, and the trend has accelerated in recent years due to environmental concerns and other factors. In order to respond quickly to these requirements, the use of CAE (Computer-Aided Engineering) technology is indispensable. As examples, two technical calculation systems which are developed to improve the efficiency and sophistications of rolling bearing design is introduced.

### 1. はじめに

市場動向や顧客ニーズを考慮した競争力のある多種多様な軸受製品をタイムリーに市場投入するには、製品開発業務の高度化と高効率化が必要であり、その実現のためにNTNではCAE技術の活用を推進している。2018年10月には社内におけるCAE技術の研究開発を加速させるためにCAE開発研究所<sup>1)</sup>を設立した。

従来から軸受の製品開発業務にはNTN独自のCAEシステムや市販ソフトウェアを使用してきたが、開発プロセス全体を見据えた効率化においては、例えば、設計値を算出するために細分化された複数のシステムを設計要件に応じて組み合わせて使用する必要があったり、定常的なFEM（有限要素法）解析作業であってもCAE専任者が作業する必要があるなど、課題があった。

そこで、既存の計算システムを統合し、新機能を加えた転がり軸受用統合技術計算システム“SharcNT”（シャークエヌティー）と、3世代ハブベアリングの設計作業を自動化した統合計算自動化システム“ABICS”（アビックス）という2つのシステムを開発し、業務効率を改善した。本稿では、これらのシステムの概要について述べる。

### 2. 転がり軸受用統合技術計算システム

#### 2.1 背景

転がり軸受は、機械システムに使用される重要な機械要素で、その要求性能は長寿命、低トルク、高剛性、高精度など様々である。近年は、カーボンニュートラルの実現に向け、省エネルギー化および脱炭素化が進んでおり、転がり軸受の使用環境、要求仕様・性能が多様化している。例えば、自動車や各種産業機械の電動化により、軸受は小型化・軽量化および超高速仕様が求められる一方で、再生可能エネルギーとして期待される風力発電では大型化・洋上化が進み、軸受は大型で長寿命化が求められる。このような市場動向・顧客ニーズへの対応に加え、高信頼性かつ高性能な軸受設計や設計リードタイム短縮の要求は強く、これらに応えるためにはCAE技術の活用が必須である。

転がり軸受の設計初期段階では、軸受の主要性能評価として寿命や内部荷重を理論計算に基づき算出する。近年は、動力伝達機構を含むアプリケーション全体の計算や軸受周辺の弾性変形を考慮した計算など、計算モデルは大規模化、複雑化、高度化している。

そこで、設計者がCAE技術を駆使して迅速に軸受を設計できるよう、NTN独自の転がり軸受用統合技術計算システム“SharcNT”（Shaft, Housing and Roller Coupling with NTN Technology）を開発したので紹介する。

\* CAE 開発研究所

\*\* NTN-SNR ROULEMENTS Research, Innovation & Development

## 2.2 計算システムのグローバル統合

従来 NTN では、転がり軸受の設計要件に応じて、目的別の複数の計算システムを組み合わせることで設計検討を行ってきた。しかしながら複数のシステムを駆使するには、一定の経験が必要であった。そこで、社内の既存システムを精査し、NTN のグループ会社である NTN-SNR で開発、使用されてきたシステムをベースに、NTN の従来計算システムの主要計算機能を統合 (図 1) した SharcNT を開発した。

SharcNT は、軸受寿命、軸受荷重、荷重分布、接触応力、軸受剛性、軸受トルクなど性能評価に必要な計算機能に加え、直感的な GUI を用いて軸受を配した複数軸の計算モデルの構築ができる (図 2)。

統合により一つのシステム内で、多種多様な計算が可能になった。また、複数のシステムの統合により、設計者のスキル習得が容易になった。



図 1 計算システムの統合

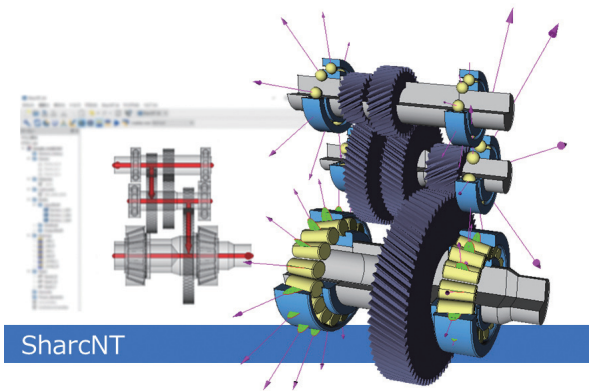


図 2 統合技術計算システム“SharcNT”

## 2.3 アプリケーション全体の計算

近年の減速機は、自動車を例にとるとガソリン車・ハイブリッド車・電気自動車のそれぞれの特徴に合わせて多様化しており、シンプルな構造から多段で複雑な構造まで様々である。後方で使用される軸受をアプリケーション全体で検討する場合、計算モデルはより複雑となり計算結果の理解や検証も難しくなる一方で、設計リードタイムの短縮も必要とされている。このため、複雑な構造であっても軸受の特性を正確かつ迅速に把握しなければならない。

SharcNT では、複雑な変速機構造に対応するために、平行軸や直交軸などを多数配置した計算モデルの作成や、それらのパワーフロー（動力伝達経路）を考慮した軸受の

詳細な解析を可能としている。また、各運転条件の頻度を設定することで軸受の総合寿命を求めることができる。さらに次節で述べる軸受周辺の弾性変形を加味した高度な計算を短時間に完了できるように開発した。

また、計算により求まる軸受の内部荷重を理解するためには、軸がギヤ荷重や軸受位置などの境界条件により、変形を伴いながらどう変位するかを確認する必要がある。構造によっては、パワーフロー毎に示される数値情報だけで計算結果を検証するのは至難と言える。その対応として各計算結果の可視化を図った。図 3 に変速機の計算例を示す。計算モデルは 3D モデルで表示され、そのモデル上で内部荷重のベクトルや軸の変位などを視覚的に確認できるようにした。また、軸受毎の詳細な結果は、数値データに加え、種々のグラフが出力される。これらの改善により計算条件による特性把握が容易になった。

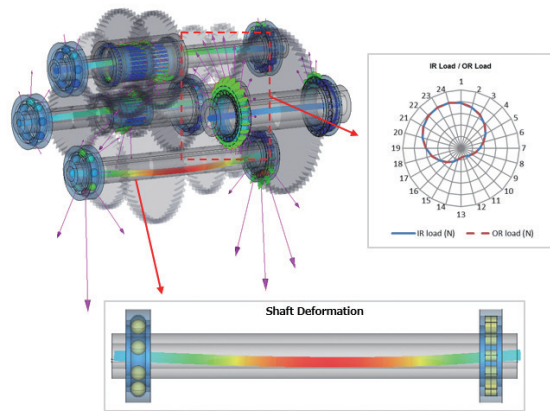


図 3 アプリケーション全体の計算例

## 2.4 軸受周辺の弾性変形を考慮した計算

通常、軸受の内部荷重は、転動体と軌道面の接触部のみが微小変形するという仮定の元に計算される。しかしながら、一部のアプリケーションでは、ハウジングの剛性が低く（肉厚が薄い、アルミ合金が用いられているなど）、外輪およびハウジングの弾性変形を考慮しなければ、精度よく軸受の内部荷重を求めることができない。この場合、FEM を用いて外輪およびハウジングの弾性変形を考慮した計算を行うことが可能であるが、高精度の計算には専門知識が必要な上、一連の計算に時間を要する。SharcNT では、転動体と軌道面の接触部に自由度を残し、外輪およびハウジング全体を“仮想ばね”（縮約剛性マトリックス）として弾性変形を考慮できる機能<sup>2)</sup>を搭載した。この機能により、外輪およびハウジングの弾性変形を考慮した計算を、FEM と比較して高速に行える。

なお、“仮想ばね”を用いて内輪および軸の弾性変形を考慮した計算も可能であるが、内輪と軸のはめあい部は外輪とハウジングのはめあい部に対して剛性が高く、軸の弾性域内でのたわみのみ考慮すれば十分な場合が多い。こ



のような場合、軸のみをはり要素でモデル化<sup>3)</sup>し計算することで、計算時間を短縮できる。

### 3. ハブベアリングの統合計算自動化システム

#### 3.1 開発の背景

ハブベアリングは自動車の足回りに使用される軸受で、車両のタイヤホイールの回転を支持する。1970年代後半より、車両への組立性、小型・軽量化、高性能化（軸受負荷容量、低トルク性能、耐泥水性能、剛性、強度など）の市場要求に応じ、周辺部品を取り込んだユニット商品へ進化してきた<sup>4)</sup>。現在は図4に示すGEN3と呼ばれる3世代ハブベアリングが主流である。

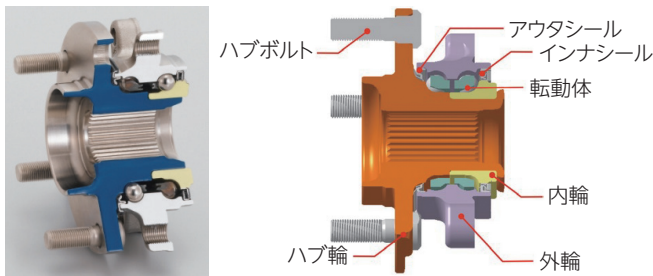


図4 3世代ハブベアリング

ユニット化した3世代ハブベアリングの設計においては、自動車メーカー各社からは長寿命・高剛性と小型・軽量化の相反する性能の両立が求められている。例えば、軸受寿命や操舵安定性に関する応力や剛性を向上させるためには、サイズの大型化が必要とされるが、同時に要求される小型・軽量化にも応えるためには、両者のバランスを考慮した設計の最適化が必須である。また設計作業においては、これらの最適化以外にもCADやFEM解析等の作業があるが、いずれも人による作業のため、ある程度の時間を要していた。

これらの課題を解決するために、各設計作業を自動化し、設計工数およびリードタイム短縮を可能とするハブベアリングの統合計算自動化システム“ABICS” (Axle Bearing Integrated Calculation System) を開発したので紹介する。

#### 3.2 システムの概要

ハブベアリングの設計検討に必要な各種作業を自動化するために、主に以下の4つの機能を持つシステム“ABICS” (図5) を開発した。

- ・ 軸受諸元の最適値探索機能
- ・ 3D形状モデルの自動作成機能
- ・ FEM解析の自動実行機能
- ・ データ管理機能

このシステム利用により、これまでは作業別に担当者を決め分業していた作業を設計者単独で行え、さらに自動化により設計工数とリードタイム削減が可能となった。各機能の詳細を次節以降に述べる。

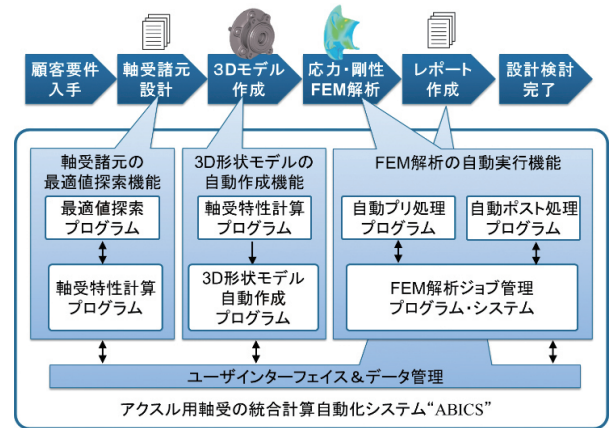


図5 ABICSのシステム概要

#### 3.3 軸受諸元の最適値探索機能

ハブベアリングの軸受諸元を決定する際、従来は顧客の要求特性（寿命、内部質量（転動体周辺の一定領域内の質量）、内部剛性、トルクなど）を満たすまで、各諸元の変更とそれに伴う特性計算を設計者が繰り返し行っていた (図6左)。また特性計算には、特種別の計算ツールを複数使用していた。そのため、人による作業では、最適値探索と計算の両方で時間を要していた。

本システムでは、この計算ツールを統一した軸受特性計算プログラムを作成し、さらにこのプログラムと最適値探索プログラムの組み合わせにより、諸元の最適値を自動的に選定する最適値探索機能 (図6右) を開発した。

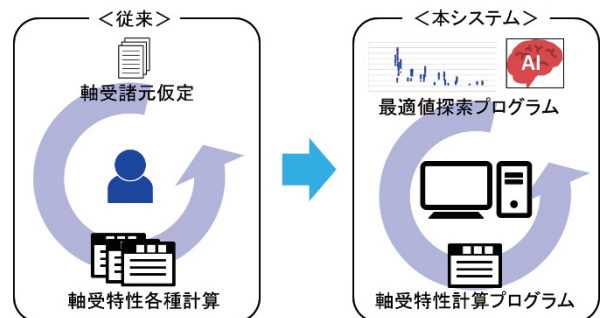


図6 軸受諸元の最適化

最適値探索プログラムには、AIに分類される遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以降GAと称す) を採用している。探索には、最適化したい軸受特性を目的関数とし、この目的関数の特性に影響がある諸元の設計パラメータを説明変数として、条件を設定する。この条件においてGAにて選定された説明変数が、最適値探索プログラ



ラムから軸受特性計算プログラムに渡され、軸受特性が計算される。この特性値が最適値探索プログラムに戻され、また新たな説明変数を GA が選定する。この繰り返しにより最適値を探索する。

最適値探索の例を示す。探索条件は、目的関数を相反する特性である寿命と内部質量とし、説明変数をこの2つの特性に関係する3つの諸元の設計パラメータとした。探索結果を図7に示すが、質量に対する寿命のパレート解(赤印)にて最適値の候補が決まる。この結果より、顧客の要求特性に見合った値を設計者が選定する。なお、この例において、総当たり計算で最適値を求めるには約3.4万回の計算が必要であるが、約300回の計算(青印)で最適値を探索完了している。また計算コストだけでなく、探索自動化により人による作業時間も削減した。

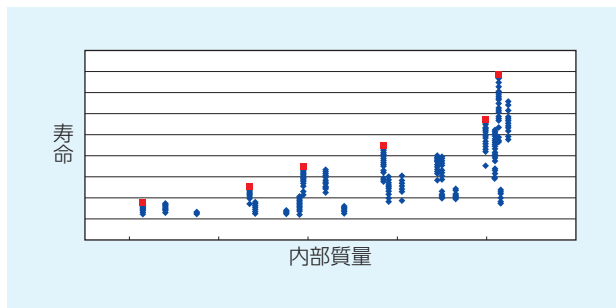


図7 最適値探索の例

### 3.4 3D形状モデルの自動作成機能

先に決めた軸受諸元を元に、従来はCAD専任者がFEM解析と図面作成に必要な3D形状モデルを作成していた(図8上)。CAD作業は専任者の手作業のため、モデル作成に時間を要していた。また、設計担当者との事前打ち合わせや着手中の作業が終わるまでの待ち時間が発生していた。

本システムでは、このモデル作成作業を自動化する3D形状モデル自動作成プログラムを開発した(図8下)。このプログラムでは、形状テンプレートが各種用意されており、前節の最適値探索機能や軸受特性計算プログラムから得た軸受諸元より、形状に係わる寸法が自動入力され、3D形状モデルが自動的に作成される。またテンプレート化が難しい形状の場合、概ね近い形状にて自動作成した上で、人手による修正を可能としている。

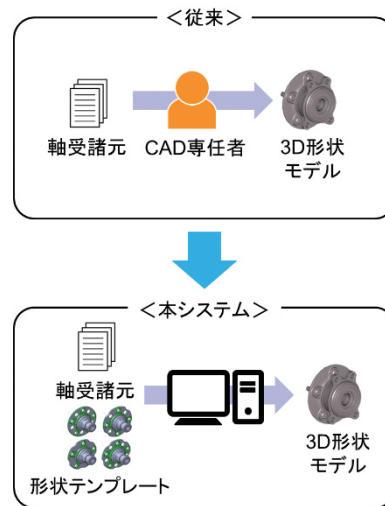


図8 3D形状モデル作成

### 3.5 FEM解析の自動実行機能

先に作成した3D形状モデルを元に、従来はCAE専任者がFEM解析(応力と剛性の特性評価用<sup>5)</sup>)に必要なプリ処理、計算実行、ポスト処理の各作業を行っていた(図9上)。前述の各作業と同じく、専任者の熟練度、設計担当者との事前打ち合わせや作業着手までの待ち時間などにより作業終了までに時間が必要であった。

これらの作業を自動化するプログラムとシステムを作成し、FEM解析自動実行機能(図9下)を開発した。各プログラムの詳細を以下に示す。

- ・自動プリ処理プログラム  
解析対象の3D形状モデルに対し、各部位に合わせたメッシュ作成、解析に必要な周辺部品の結合および境界条件の設定などを自動で行う。
- ・自動ポスト処理プログラム  
計算結果より、応力・剛性の特性値の取得、コンター図の取得、計算ログのチェック等を自動で行う。
- ・FEM解析ジョブ管理プログラム・システム  
PCの利用状況に応じて、上記の各プログラムおよびFEM計算のジョブを実行させるPCを自動で振り分ける。このジョブ管理のシステムを図10に示す。利用者PCの入力情報からABICSのシステムサーバよりジョブがジョブ管理PC(本プログラムの実行PC)に配信される。このジョブ管理PCからは、プリ処理、計算実行、ポスト処理の各用途別に複数用意されたPCの利用状況に応じ、ジョブが振り分けられる。このシステムにより、ジョブの待ち時間削減とPCおよびFEM解析に使用している各種ソフトウェアライセンスの稼働率向上が可能となった。

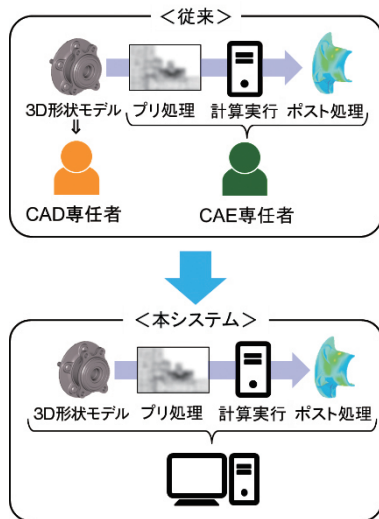


図9 FEM解析作業

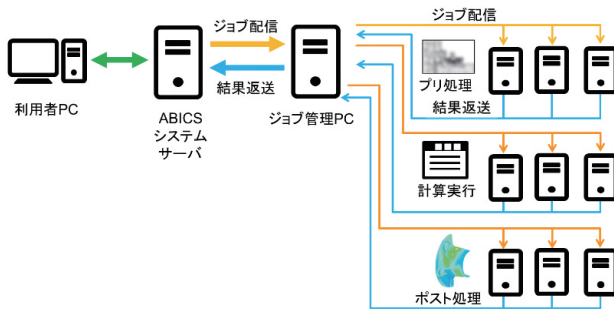


図10 FEM解析ジョブ管理システム

### 3.6 データ管理機能

ABICSの利用情報(入出力結果等)はすべてデータベースに保存・管理される。そのため、ABICSにて設計した情報を資産化し、有効活用できる。検索機能により、過去の設計結果を容易に閲覧することができ、さらに計算で使用した入力データの再利用が可能なため、製品改良時の再設計が効率的に行える。

また、保存された入出力結果を元に、設計レポートを自動で作成できるため、設計担当者の工数が削減されリードタイムが短縮できる。

執筆者近影



石河 智海  
CAE 開発研究所



蛭川 博康  
CAE 開発研究所



和泉 麻理子  
CAE 開発研究所



Cedric BURNET  
NTN-SNR ROULEMENTS  
Research, Innovation &  
Development

## 4. おわりに

転がり軸受の性能評価に使用される統合技術計算システム“SharcNT”および3世代ハブベアリングの設計作業を自動化した統合計算自動化システム“ABICS”について紹介した。

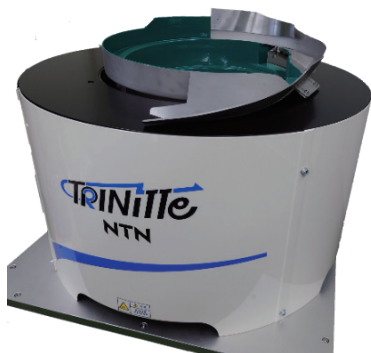
今後も引き続きCAE技術の研究開発や活用により、製品開発業務のさらなる高度化、効率化を推進し、市場が求める軸受をいち早く市場投入できる体制を構築する。

### 参考文献

- 1) CAE 開発研究所の紹介, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 87, (2019) 表紙裏.
- 2) 転がり軸受 理論・実践ガイドブック (Cat. No. 9600/J), NTN, (2022)254-255.
- 3) 転がり軸受 理論・実践ガイドブック (Cat. No. 9600/J), NTN, (2022)253.
- 4) 関誠, 低燃費化を目指したアクスル用軸受の開発の歴史, NTN TECHNICAL REVIEW, No.87, (2019) 55-58.
- 5) 芋生明俊, ハブベアリングにおけるFEM解析, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 70-73.

# ピッキングロボット用フィーダTRINITTE(トリニッテ)の開発 Development of Feeder “TRINITTE” for Picking Robots

松井 周平\* Shuhei MATSUI



NTN では従来のパーツフィーダと回転円盤を組み合わせた新たなパーツフィーダ (TRINITTE) を開発し、従来のパーツフィーダの領域を超えた分野への展開を進めている。本稿では、TRINITTE の概要、特長、仕様について解説する。

NTN has developed a new parts feeder (TRINITTE) that combines a conventional parts feeder and a rotating disk, and is developing it to a field that transcends the field of the conventional parts feeder. In this article, I will explain the outline, features and specifications of TRINITTE.

## 1. はじめに

製造現場の生産性向上を目的として産業用ロボットを用いた自動化・省人化がグローバルで急速に進んでいる。背景には、消費者ニーズの多様化による、大量生産から「多品種少量生産」へのシフトがあり、特にパーツフィーダにおいては、多品種対応による段取り替えの削減、あるいはワーク詰まりによるチョコ停の低減（稼働率の向上）が求められている。

従来のパーツフィーダとピッキングロボットの組み合わせは、ボウルフイーダ内で選別・整列されたワークを直進フィーダに貯め込み、切り出し機構にてワークを切り出した後でピッキングロボットがピックアップするものであった。この場合、扱えるワークが限定されること、構成機器が多いこと、フィーダ内での整列や貯め込み時のワーク詰まりが課題であった。

一方、現在では、ビジョンセンシング技術とピッキングロボットとの組み合わせを前提としたロボット用部品供給装置が販売されている。ロボット用部品供給装置は、三軸振動技術によりピッキングエリア内のワーク姿勢の変換やワーク同士の重なりを崩し、カメラでワーク位置を検出してピッキングロボットがピックアップする。この方式は、ピッキング可能な姿勢のワークがピッキングエリア上に存在しない場合、姿勢変換のために装置が稼働するので、その間ロボットが停止することが課題である。

これらの課題を解決するため、TRINITTE の開発に至った。

## 2. 概要

システム構成を図 1 に示す。TRINITTE は従来のボウルフイーダの外周部にモータで駆動する回転円盤を配置した構成で、回転円盤にはエンコーダを取り付けてある。カメラおよびピッキングロボットと連携接続し、TRINITTE から出力するパルス信号とカメラから得られる画像処理信号をピッキングロボットに取り込む構成である。

TRINITTE とロボットを組み合わせたピッキングシステムの一連の流れは次の通りである。

ボウル内に投入されたワークはボウルフイーダで一列一層に整列し回転円盤上に供給される。回転円盤上に供給されたワークを、ロボットの円弧コンベアトラッキング機能<sup>※1</sup>を使い、回転円盤を止めることなくピックアップし、次工程に供給する。また、ピックアップできなかったワークは回転円盤上に配置されたワーク回収口より、ボウルフイーダ内へ回収され、再びボウルフイーダを介して回転円盤上へ供給される仕組みとなっている。

※1：回転円盤上の任意の位置にあるワークをビジョンセンサで位置を検出し、その情報とエンコーダの情報を基にロボットが回転円盤に追従しながらワークをピックアップすることができる機能。

\* NTN テクニカルサービス (株) 精機商品事業部

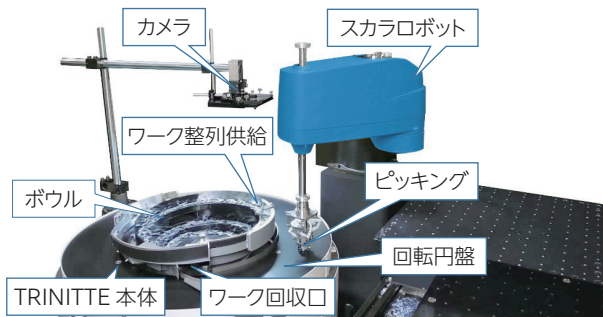


図 1 システム構成

### 3. 特長

TRINITTE の特長は次の通りである。

#### ①省スペース

TRINITTE は、ワーク供給部分を回転円盤にすることで、従来のパーツフィーダと違い直進フィーダ、シュートや切り出し機構が不要となる。そのため、図 2 に示すように構成機器を削減でき専有面積を約 30% 小さくできる。

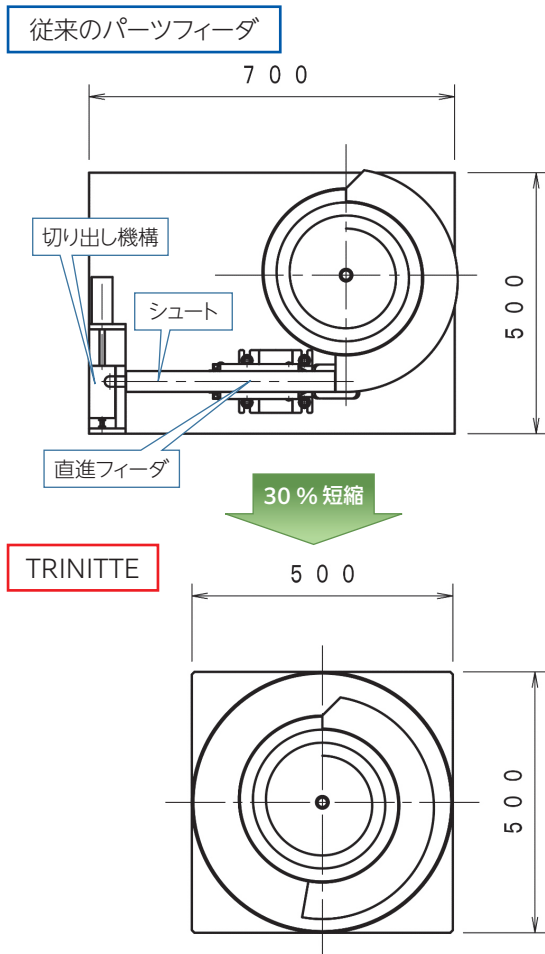
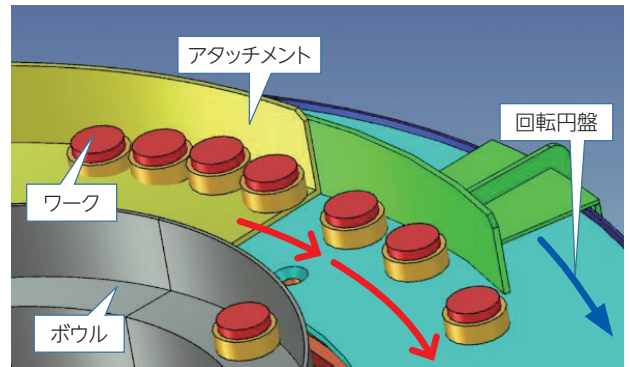


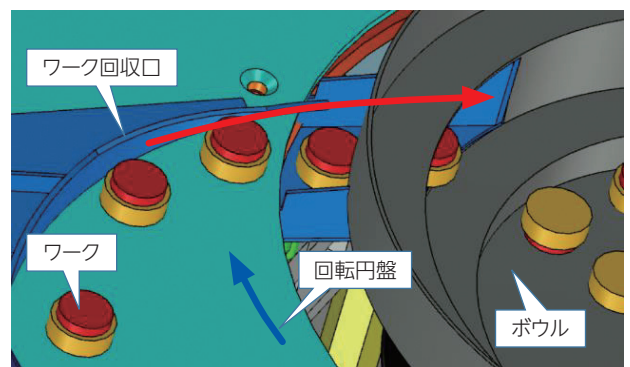
図 2 従来のパーツフィーダと TRINITTE のサイズ比較

回転円盤の「ロボットへのワーク供給」に加え、「ワークの分離」、「取り逃がしワークの回収」の 3 役を 1 台でこなすためシンプルでコンパクトな構造となる。

ボウルフィーダの供給速度より回転円盤の回転速度を速くすることで、繋がって出てきたワークを切り離すことができ、ロボットがピックアップしやすくなる。さらに、ロボットがピックアップできなかったワークはボウル内へ回収され、再び回転円盤上へ供給することができる (図 3)。



(a) ワークの分離



(b) ワークの回収

図 3 ワークの分離・回収

#### ②チョコ停の低減

従来のパーツフィーダは、ボウルフィーダ内でワークの姿勢を整えるため、ボウルフィーダに取り付けるアタッチメントの構造が複雑になり、引っ掛かり等でワーク詰まりが発生しやすかった。

TRINITTE は、ビジョンシステムとピッキングロボットの連携により、ボウルフィーダに取り付けるアタッチメントはワークの表裏を揃えるなどの簡単なもののみとなる。アタッチメントを簡略化できるため、安定した部品の連続供給を実現する。

#### ③ロボットの待ち時間を短縮

TRINITTE は、ワークを一列一層で表裏を揃えた状態にして、ピッキングロボットのピッキングエリアに連続して供給し続けることが可能である。そのため回転円盤上のワー



## ピッキングロボット用フィーダTRINITTE(トリニッテ)の開発

クは常にピックアップ可能な状態になり、ロボットは連続してピックアップすることができる。さらに、前述のように、ピッキングロボットの円弧コンベアトラッキング機能を活用し、回転円盤の回転を止めることなく連続稼働できるため、設備稼働率の大幅アップを実現する。

### ④汎用性の向上

TRINITTEは、ボウルフィーダに取り付けるアタッチメントを簡略化することができるため、ボウルフィーダを取り換えることなく簡単な調整だけでワークの多品種対応(図4)が可能となり、段取り替えの時間を大幅に短縮できる。

また従来のパーツフィーダでは対応できなかった貯め込みができないワークや不定形のワークにも対応可能となり、汎用性が高い装置といえる。

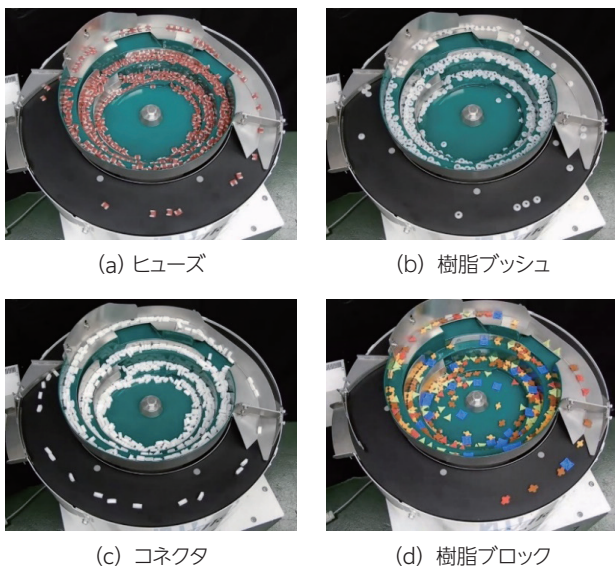


図4 同一ボウルによるワークの多品種対応

## 4.仕様

TRINITTEは、ワークサイズに応じてボウルサイズの異なる3種類をラインナップしている。主な仕様を表1に示す。

表1 仕様

品番	K-UP301	K-UP302	K-UP303	
寸法	長さ350 mm 幅350 mm 高さ320 mm	長さ500 mm 幅500 mm 高さ370 mm	長さ700 mm 幅700 mm 高さ510 mm	
ボウル径	φ190 mm	φ320 mm	φ420 mm	
電源電圧	AC200 V 50/60 Hz			
質量	38 kg	85 kg	200 kg	
回転円盤	外径	φ344 mm	φ494 mm	φ694 mm
	回転数	1.3~6.5 min <sup>-1</sup>		
	回転速度	0.05~0.20 m/s		0.05~0.30 m/s
ボウルフィーダ用コントローラ品番(NTN製)	K-ECL25		K-ECH45	
モータ用コントローラ品番(オリエンタルモーター製)	DSCD15JC			
エンコーダ品番(オムロン製)	E6B2-CWZ1X 1000P/RO.5M			

## 5.まとめ

本稿では、TRINITTEの概要や特長、仕様について解説した。

今後は新たなサイズ展開やユーザ要求に合った特殊用途向け等、新たな用途への適用を検討する。

当事業部では、今後さらにワークの小型化や複雑化などの多様化が進む状況変化に対応して、部品供給の安定した連続稼働を実現し、ロボットによる生産設備の自動化に貢献していく。

執筆者近影

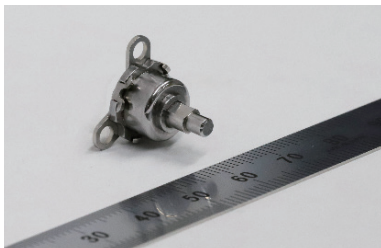


松井 周平

NTNテクニカルサービス(株)  
精機商品事業部

# 小型トルクダイオード (TDL8) の製品紹介

## Product Introduction of Compact Torque Diode (TDL8)



小原 正行\* Masayuki OHARA

NTNは、入力軸からの回転トルクは出力軸に伝達するが、逆入力である出力軸からの回転トルクは入力軸に伝達しない「トルクダイオード」を生産している。ここでは、従来品「TDL28」に対して外輪外径を1/3 (10 mm)、重量を1/14 (5 g) にした小型・軽量のトルクダイオード「TDL8」の技術について紹介する。

NTN manufactures "torque diode" that transmits rotation torque from the input shaft to the output shaft. But does not transmit the torque from the output shaft, which is the reverse input, to the input shaft. This article introduces the technology of the compact and lightweight torque diode "TDL8" which has an outer ring diameter of 1/3 (10 mm) and a weight of 1/14 (5 g) as compared with conventional product "TDL28".

### 1. はじめに

NTNは、逆入力防止機構や落下防止機構に使用されるトルクダイオードを生産している。本製品は、モータと変速機など2つの動力伝達軸の間に使用し、入力軸からの回転トルクは出力軸に伝達するが、出力軸からの回転トルクはロックされ、入力軸に伝達しない逆入力遮断クラッチである。このように、トルクの整流作用から「トルク+ダイオード」と呼称している。同様の機能を持つ電磁ブレーキと比べて電力を必要としないため、搭載機器の省エネルギー化が可能となるほか、停電時の影響を受けないため、安全性能にも優れている。以下に、トルクダイオード (以下、TDL) (図1) について紹介する。

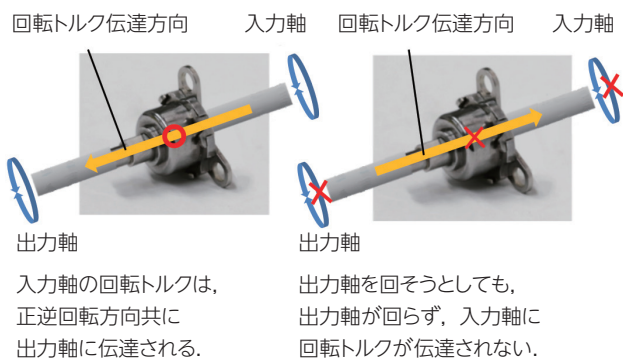


図1 TDLの機能

### 2. トルクダイオードの構造と特長

TDLは、外輪と内輪、保持器、ころ、ばね、側板で構成されており、ユーザで用意される入力軸とともに使用する (図2)。入力軸の回転トルクは、内輪と一体化した出力軸 (以下、出力軸) に伝達される一方、入力軸が回転しない場合には、ころとばねが出力軸をロックし、逆入力を遮断する。

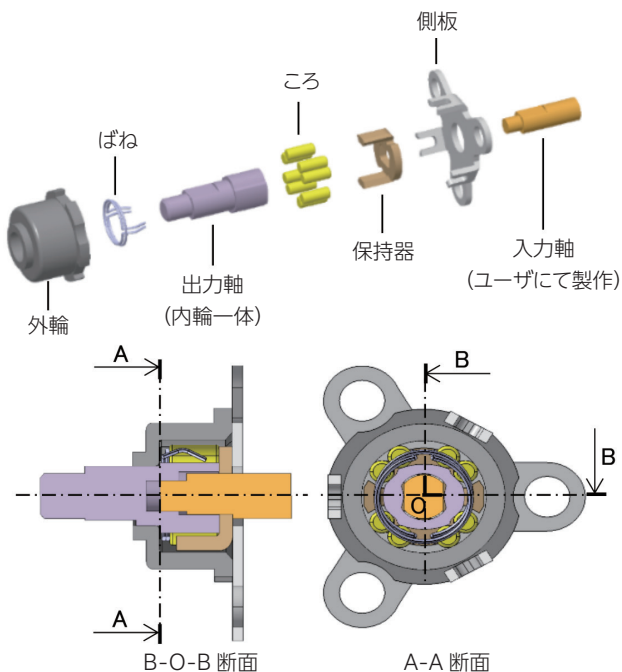


図2 TDLの構造

\* 産業機械事業本部 製品設計部

### 3. 作動原理

TDL が入力軸から出力軸へ回転トルクを伝達する作動原理及び出力軸がころによってロックされていることを従来品「TDL28」の構造図を用いて説明する (図 3)。

入力軸が回転しない静止時は、入力軸と出力軸の間にすきまがあり、ころが外輪内径と出力軸に接触しているため回転しない (図 3 (a))。

静止状態から入力軸を回転すると、1) 入力軸と連結している保持器がころを押し、ロックを解除する。その後、2) 入力軸と出力軸が接触し、3) 出力軸を回転させる (図 3 (b))。

出力軸から回転させようとする、2 本のころがばねにより、外輪内径と出力軸カム面で形成されるくさびへ押し当てられ、正逆両方向の回転に対してロックし、軸の回転を阻止する (図 3 (c))。

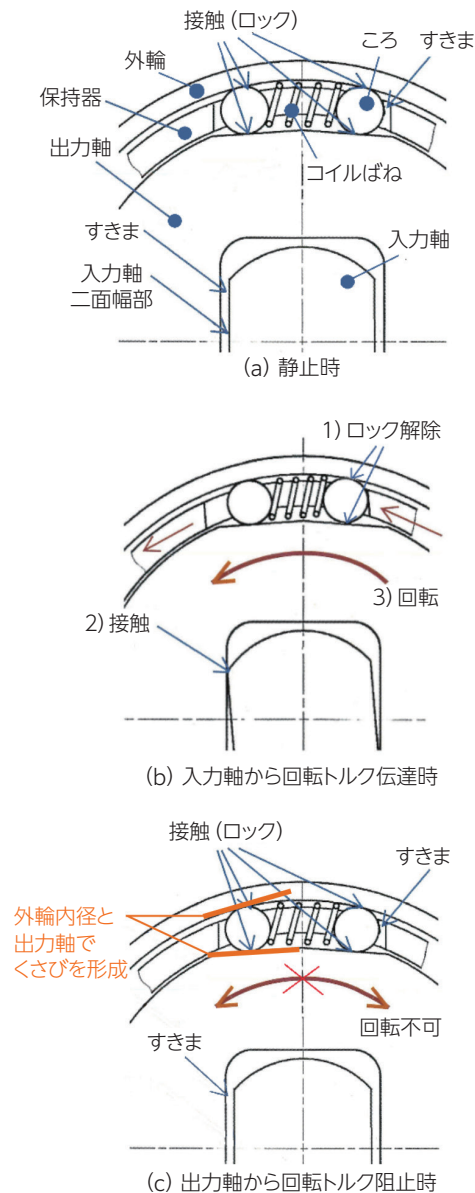


図 3 TDL の作動原理

### 4. TDL8 の構造と特長

図 4 に、小型・軽量のトルクダイオード「TDL8」の構造を示す。「TDL8」は、従来品のコイルばねを使用した「TDL28」よりも省スペースを可能とする独自形状の C 形ばねを採用した。これにより、ころを多く組み込むことができる分、ころの小径化が可能となり、許容負荷トルクを維持しながら従来品「TDL28」から 1/3 の小型化となる外輪外径 10 mm と 1/14 の軽量化となる重量 5 g を実現した。

従来品「TDL28」に対し、小型・軽量のトルクダイオード「TDL8」の構造の特長を下記に記載する。

1. コイルばねから独自形状の C 形ばねへの変更をした。
2. ころ数を多く組み込むことで、ころサイズが小さくでき TDL 全体の小型化、軽量化を行った。

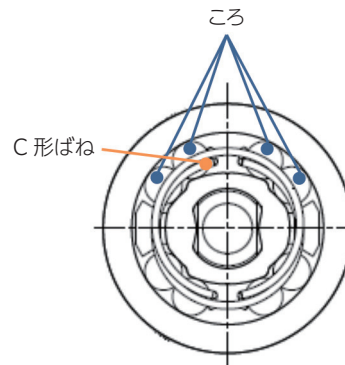


図 4 TDL8 の構造

### 5. 適用例

TDL は、意図せぬ出力軸の回転を防止するための逆入力防止機構や、停電時など入力軸の回転が停止した際の安全確保を目的とした落下防止機構 (図 5) などに使用されている。そのほか自動車においては、シート座面の高さ調節時に、レバー操作によりシートを上下させ、操作がない時はその高さを保持するシートリフタ機構 (図 6) に搭載されている。

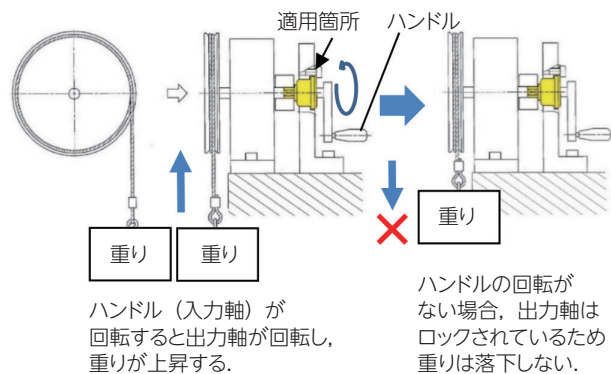
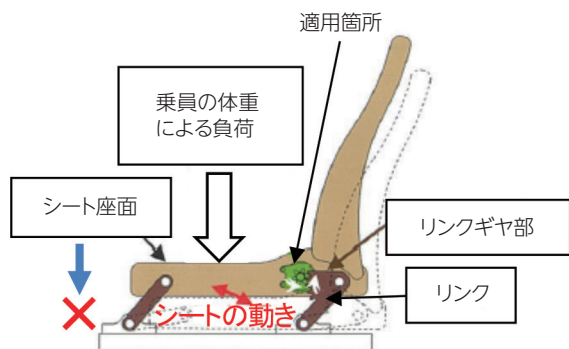


図 5 落下防止機構への適用例



リンクの倒れをトルクダイオードで防止し、座面の位置を保持する。

図6 自動車用シートへの適用例

## 6. まとめ

小型・軽量のトルクダイオード「TDL8」は、従来品「TDL28」から大幅な小型・軽量化を実現しており、搭載機器の小型・軽量・省エネルギー化に貢献する商品である。

今後も、さらに小型・軽量・高効率を目指し、省エネルギー化を通じて持続可能な「なめらかな社会」の実現を目指す。

## 参考文献

- 1) NTN カタログ クラッチ関連商品 CAT.No.6405/J.

執筆者近影



小原 正行

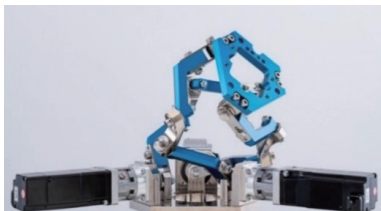
産業機械事業本部  
製品設計部



# 手首関節モジュール『i-WRIST®』の適用事例 Application Examples of the Wrist Joint Module “i-WRIST™”



田中 弓弦\* Yuzuru TANAKA



NTNでは、等速ジョイントの一種であるパラレルリンク機構を応用した角度制御装置を開発した<sup>1)~7)</sup>。2018年8月より『i-WRIST®』の商品名で量産を開始<sup>8)</sup>、顧客ニーズを取り入れた機能アップを図りながら、人手作業の自動化・省人化をターゲットに市場投入してきた<sup>9)</sup>。なかでも、複雑形状部品の外観検査などで、i-WRIST®の“高速な角度制御”が高く評価されている。本稿では、i-WRIST®の強みを活かした具体的な適用事例を紹介する。

NTN developed an angle control equipment applying a parallel link mechanism which is a type of constant velocity joint. We started mass production under the product name of the “i-WRIST™” in August 2018. We have improved its functions to meet needs of customers and have launched it to the market with the target of automating and labor saving of manual work. The features of the i-WRIST™ like “high-speed angle control” are appreciated highly in appearance inspection process of complex-shaped parts. We would like to introduce the application examples that show such advantageous features of the i-WRIST™.

## 1. はじめに

労働人口の減少、熟練工の高齢化、人件費の上昇に伴い、これまで重量物の搬送や溶接など、作業者の負担の大きい作業や危険度の高い作業が中心だったロボットの適用範囲が、細かい人手作業にも広がっている。その中でも、外観検査は、現在も人手に頼っている場合が多く、自動化需要が拡大している。しかし、従来のロボットでは、人の目視検査速度を実現できず、特に複雑形状部品の外観検査工程の自動化が遅れている。

NTNでは、手首関節モジュール『i-WRIST®』を人手作業の自動化用途に提案してきた。i-WRIST®の強みである“高速な角度制御”が評価され、目視検査の自動化案件への採用事例が増えている。

## 2. i-WRIST®の概要

i-WRIST®は、人の手首のようなめらかな動きを実現するロボティクス・モジュール商品である。図1にi-WRIST®本体の概略図を示す。i-WRIST®本体は、独自のパラレルリンク機構と駆動機構から構成される。駆動機構により、パラレルリンク機構の2自由度（折れ角、旋回角）の角度姿勢を決定し、半球状の全方向に対して高速かつ高精度に位置決めする。また、本パラレルリンク機構は、内部空間にケーブルを通すことが可能であり、同一方向に旋回動作を繰り返してもそのケーブルがねじれることがない。

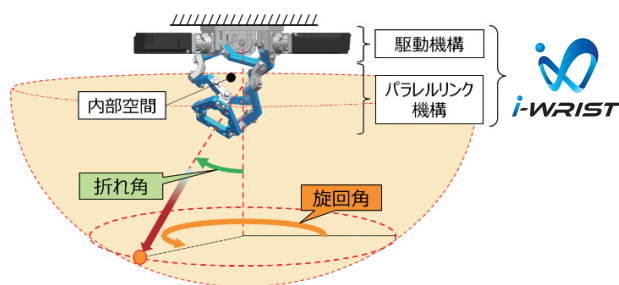


図1 i-WRIST®本体の概略図

## 3. 生産現場で生きる i-WRIST®の特長

生産現場では、「ロボットを導入したがタクトタイムを満足しない」、「ロボットの操作が難しく、使いこなせない」、「ロボットの設置スペースがない」といった課題がある。これらの課題を解決するため、i-WRIST®と直動アクチュエータや回転アクチュエータを組み合わせた構成<sup>9)</sup>を提案している。以下に、その特長を示す。

### (1) 高速動作

可動部全体の慣性モーメントが小さく、目標姿勢に対して最短経路で移動できる。そのため、従来のロボットが苦手な細かい動きを必要とする作業において、特に効果を発揮する。

\* 産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部

- (2) 簡単な操作  
ロボット言語の専門知識を持たない作業員でも、専用コンソールから簡単に操作できる。
- (3) 特異点を持たない  
多関節ロボットのように、特異点を回避する動作プログラムを作成する必要がない。
- (4) オフラインティーチング  
3Dモデル上のポイントを指定して動作パターンを設定するPC用ティーチングツールを提供している<sup>9)</sup>。
- (5) 省スペース  
直動アクチュエータや回転アクチュエータと組み合わせることにより、装置をコンパクトに構成でき、人が作業していたスペースへの設置も可能である<sup>9)</sup>。

図2には、i-WRIST®を活用した用途例を示す。その中でも、i-WRIST®にカメラや照明を搭載した外観検査装置への適用が多いため、以下に、その事例を紹介する。

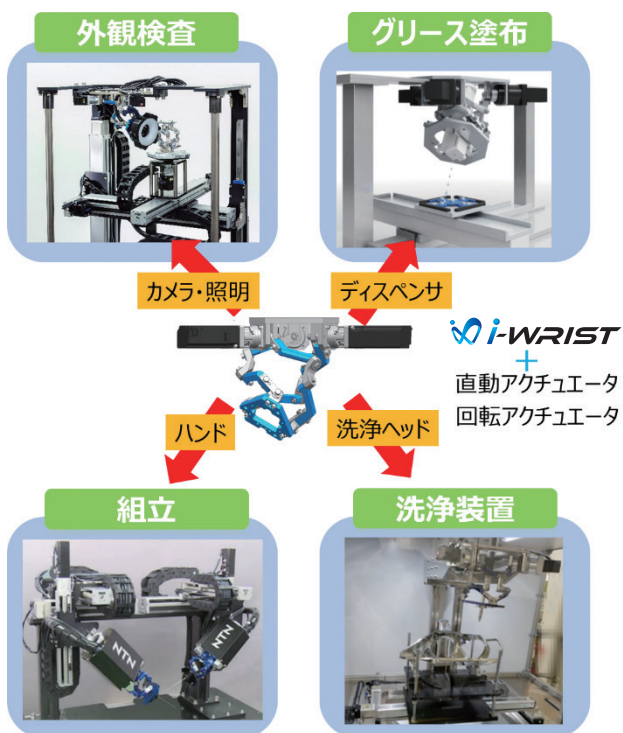


図2 i-WRIST®の用途例

#### 4. i-WRIST®の外観検査用途への適用事例

鋳造部品や樹脂成形部品などの立体形状や複雑形状を有するワークの外観検査では、人が照明の当て方やワークの角度を変えながら、複数の箇所を様々な角度から高速かつ巧みに目視検査している。このような高速検査は自動化

の難易度が高いが、i-WRIST®の特長を活かして解決できた事例も多く存在する。例えば、図3に示すように、従来、ロボットが2台必要だった検査工程をi-WRIST®1台で構成し、要求タクトタイムも達成できることが評価され、採用に至っている。以下に、具体的な外観検査用途への適用事例をいくつか紹介する。



図3 生産現場への適用事例

#### 4.1 鋳造品への適用事例

図4(a)に示す自動車用コンプレッサなどの小型鋳造品の外観検査では、1ポイントあたり0.2sと従来のロボットの約2.5倍の検査速度を実現した。図5には、その装置構成例を示す。i-WRIST®にカメラを搭載し角度制御を行い、ワークを回転アクチュエータと直動アクチュエータで位置決めする構成である。回転アクチュエータでワークを回転させながら、多方向から撮像できるため、表面の傷、打痕、穴内径の切粉残りなどの高速検査が可能となる。また、装置のコンパクト化も実現できる。

図4(b)に示すエンジンプロックやトランスミッションケースなどの大型鋳造品の外観検査では、1ポイントあたり0.3sの検査速度を実現した。図6には、その装置構成例を示す。傾斜設置したi-WRIST®にカメラを搭載し、回転アクチュエータと直動アクチュエータを用いて位置決めする構成である。i-WRIST®を傾斜させて設置させることにより、斜め下方向からワークを見上げて撮像することができるため、側面にある凹凸部の表面の傷、打痕、穴内径の切粉残りなどの高速検査が可能となる。

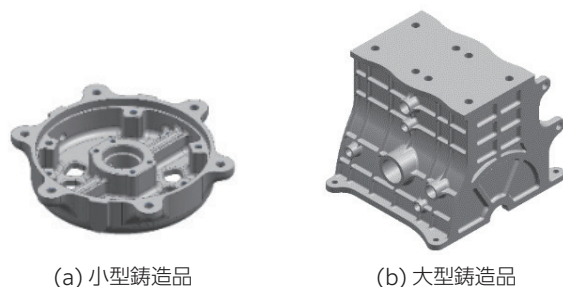


図4 鋳造品

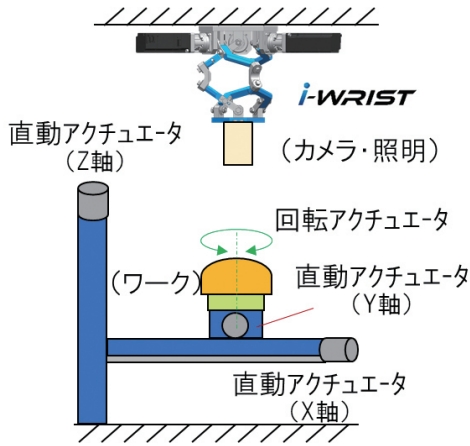


図5 装置構成例 (1)

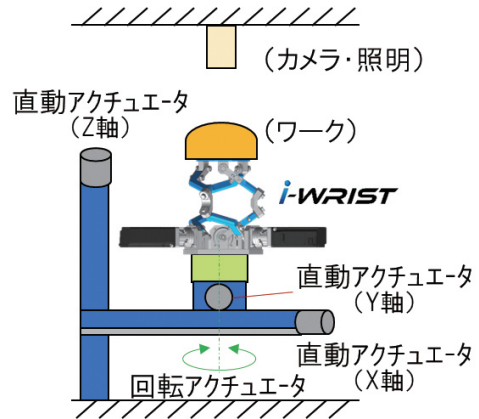


図8 装置構成例 (3)

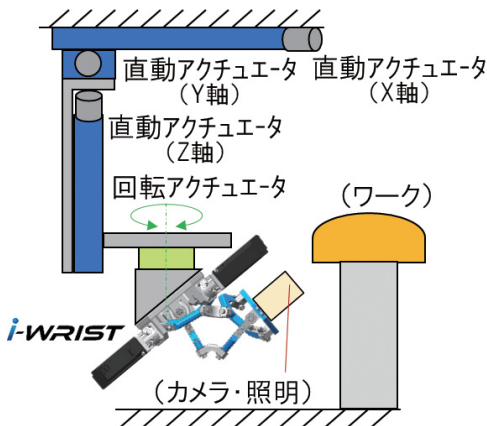


図6 装置構成例 (2)

#### 4.2 自動車用樹脂成形部品への適用事例

図7に示す各種センサを一体化した自動車用樹脂成形部品の外観検査では、1ポイントあたり0.3sの検査速度を実現した。図8には、その装置構成例を示す。ここでは、カメラと照明を固定し、i-WRIST®に搭載したチャックでワークを把持する構成とした。ワークは、i-WRIST®と直動アクチュエータ、回転アクチュエータで位置決めされる。回転アクチュエータを使用することで、同じ位置でワークを1回転させながら細かく姿勢を変更できるコンパクトな装置構成を実現した。本構成により、表面の外観（傷、気泡、バリ等）、コネクタピンやセンサの部品の有無などの検査が可能となる。



図7 樹脂成形部品

#### 4.3 自動車用電子制御ユニットへの適用事例

自動車の電動化に伴い、図9に示す電子基板が組み込まれたギアボックスなど自動車用電子制御ユニットの外観検査事例が増えている。このようなユニットでは、回路基板の背面など撮像が難しい部分があるため、人が角度を変えながら見えにくい死角部分を目視で検査している。図6に示す装置構成により、背面を含む多方向からの撮像ができるようになる。光が死角部分に照射されるように、i-WRIST®を用いて回路基板に対する照射角度を細かく調整できるため、図10に示す基板背面（半田面）の死角部分の検査が可能となる。本事例では、電子基板の部品有無や樹脂表面外観（傷、凹み、バリ等）の検査を1ポイントあたり0.3sの速度で実現した。

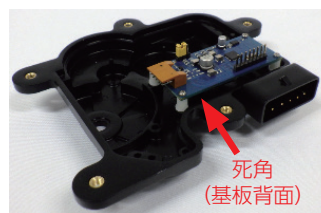


図9 電子制御ユニット

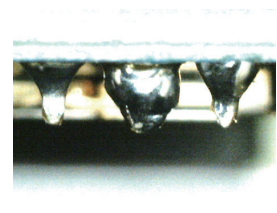


図10 撮影例（基板背面）

#### 4.4 通し穴、ねじ穴内部検査

通し穴やねじ穴内部のバリ、切粉残りの検査の自動化要求も多い。i-WRIST®のピボット動作を活用すれば、i-WRIST®と直動アクチュエータが連動し、基準点とカメラのワーキングディスタンスを維持した状態で角度変更できる。この動作を利用すると、図11に示す撮像が可能となり、穴の内径面一周の検査を簡単に行うことができる。



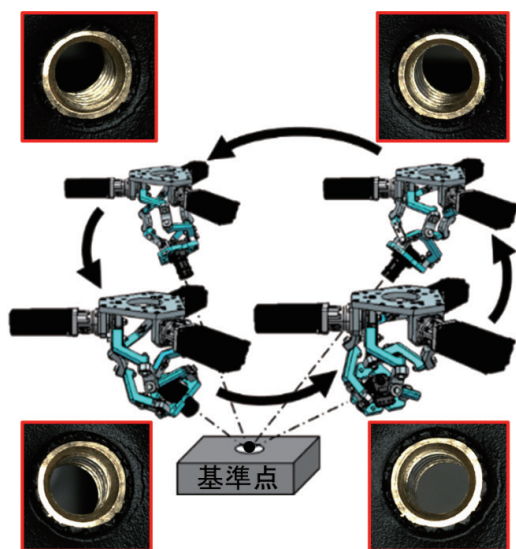


図 11 ピポット動作

## 5. i-WRIST® の適用範囲拡大への取り組み

i-WRIST® を市場展開する中で、i-WRIST® の高速動作以外にも、従来のロボットの課題である特異点に対する優位性を評価いただくようになった。同時に、従来のロボットと同様の可搬質量の要望が多数出てきたため、対処方法を検討した。

これまでは、i-WRIST® の高速動作を活かすため、最大搭載質量を 1 kg に制限していたが、搭載質量に合わせて制御方法を最適化するモードを整備し、最大可搬質量を 3 kg に拡張した新グレードを開発した。その結果、外観検査用途では、大型照明や複数の照明を i-WRIST® に搭載できるようになった。大型照明を使用すると、1 回の撮像エリアを広くとることができ、検査ポイント数の削減によるタクトタイム短縮に繋がる。また、複数照明を使用すると、検査対象への照明の当て方のバリエーションが増えるため、判別が難しい検査対象への対応が可能となる。

外観検査用途のほかにも、エンドエフェクタに加工荷重が作用するバリ取り加工や、エンドエフェクタの質量が大きい溶接加工などへの適用が可能となる。

## 6. まとめ

本稿では、i-WRIST® の強みである高速な角度制御を活用した外観検査事例を紹介した。i-WRIST® を適用することにより、自動化が難しい目視検査の置換えと従来のロボットでは達成できないタクトタイムを実現した。

今後、労働人口の減少に伴い、バリ取り加工や組立など、人手で行われている複雑な作業の自動化需要がさらに拡大する。今回紹介した i-WRIST® は、人手のなめらかな動きと作業スピードで、人手作業の自動化を実現できるロボティクス・モジュール商品である。継続した性能向上と適用事例の創出により、生産現場の自動化や効率化、品

質の安定化に貢献していく。

## 参 考 文 献

- 1) 曾根啓助, 磯部浩, 山田耕嗣, 高角アクティブリンク装置, NTN TECHNICAL REVIEW, No.71 (2003) 70-73.
- 2) 磯部浩, 西尾幸宏, パラレルリンク型高速角度制御装置, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80 (2012) 42-47.
- 3) 磯部浩, 西尾幸宏, 曾根啓助, 山田裕之, 藤川芳夫, パラレルリンク型高速角度制御装置, 2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2013) 809-810.
- 4) 磯部浩, 西尾幸宏, 坂田清悟, 小長井直哉, 山田裕之, 藤川芳夫, パラレルリンク型高速角度制御装置-グリース塗布への応用-, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2014) 1087-1088.
- 5) 小長井直哉, 磯部浩, 坂田清悟, 野瀬賢蔵, 山田裕之, 藤川芳夫, パラレルリンク型高速角度制御装置, 2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2015) 605-606.
- 6) 野瀬賢蔵, 磯部浩, 坂田清悟, 丸井直樹, 小長井直哉, パラレルリンク型高速角度制御装置-改良による性能向上-, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2016) 483-484.
- 7) 野瀬賢蔵, 磯部浩, 坂田清悟, パラレルリンク型高速角度制御装置の高速化, NTN TECHNICAL REVIEW, No.84 (2016) 96-101.
- 8) 数野恵介, 磯部浩, 御堂前純, 志村祐紀, 小原正行, 手首関節モジュール『i-WRIST®』の開発, NTN TECHNICAL REVIEW, No.86 (2018) 22-27.
- 9) 数野恵介, 磯部浩, 利見昌紀, 御堂前純, 志村祐紀, 坂田清悟, 西尾幸宏, 丸井直樹, “手首関節モジュール『i-WRIST®』の適用事例と機能向上”, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88 (2020) 105-110.

執筆者近影



田中 弓弦

産業機械事業本部  
ロボティクス・  
センシング技術部



## 低フリクションハブベアリングⅢ

### Low Friction HUB Bearing Ⅲ

関誠  
Makoto SEKI

#### 1. はじめに

走行時の回転フリクションを従来品に対して62%低減した「低フリクションハブベアリングⅢ」<sup>1)</sup>が、モノづくり日本会議・日刊工業新聞社主催の2020年“超”モノづくり部品大賞モビリティー関連部品賞を受賞した。

新たに低フリクションを追求した軸受内部封入グリースを開発し、最新の低フリクションシールと合わせることで回転フリクションを従来品<sup>2)</sup>比62%低減し、車両の左右輪へ適用することで燃費を約0.53%改善することが期待できる。

#### 2. 構造

低フリクションハブベアリングⅢの概略構造を図1に示す。

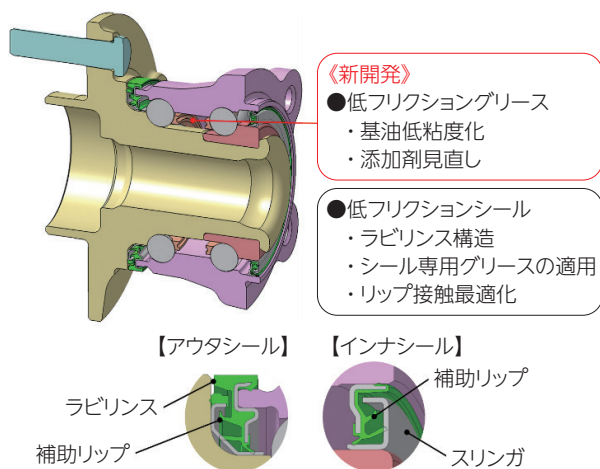


図1 低フリクションハブベアリングⅢの構造

#### 3. 特長

低フリクションハブベアリングⅢの特長を以下に示す。

- (1) 新開発低フリクショングリースの適用
- (2) ラビリンス付き新型シール構造の適用
- (3) シール専用グリースの適用
- (4) シールリップ接触面の最適化

これらにより、図2に示すように軸受部フリクションおよびアウト、インナシール部フリクションをそれぞれ低減し、ハブベアリング全体で62%の回転トルク低減効果を実現した。

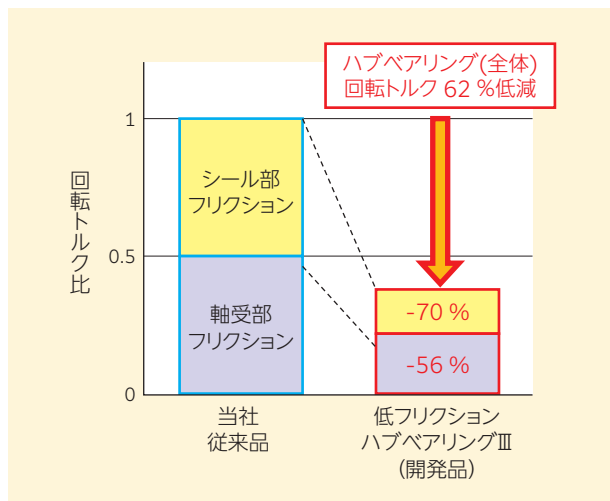


図2 ハブベアリングの回転トルク比(一例)

#### 4. まとめ

グローバルで自動車の燃費向上やCO<sub>2</sub>排出規制の強化に対応するため、寿命や強度を満たした上で従来品よりも大幅に低フリクション化したハブベアリングを開発した。自動車の燃費、電費向上が期待でき、地球環境の負荷低減に貢献できる商品として市場に展開していきたい。

#### 参考文献

- 1) 関誠, 低フリクションハブベアリングⅢ, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 87, (2019) 63-67.
- 2) 関誠, 低フリクションハブベアリング, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 85, (2017) 67-71.

執筆者近影



関誠

自動車事業本部  
アクスル製品ユニット  
アクスルユニット製品開発部

# EV/HEV 用高速深溝玉軸受

## High Speed Deep Groove Ball Bearing for EV/HEV

中尾 吾朗  
Goro NAKAO

佐々木 克明  
Katsuaki SASAKI

石田 幸大  
Yukihiro ISHIDA

村主 和憲  
Kazunori MURANUSHI

### 1. はじめに

世界最高水準の高速回転性能を実現した「EV/HEV 用高速深溝玉軸受」<sup>1)</sup> が、モノづくり日本会議・日刊工業新聞社主催の2021年“超”モノづくり部品大賞日本力（につぼんぶらんど）賞を受賞した。

本商品は、当社が長年の基礎研究で培った転がり軸受の内部仕様、保持器の形状および材質の最適化技術に加えて、摩擦抵抗によるエネルギーロスを最小化する技術を活用し、開発したものである。自動車の電動化に伴い、モータの小型化・高速化が進む中、 $d_m n$  値<sup>\*</sup> 180 万の高速回転にも対応が可能な高性能が評価された。

また、深溝玉軸受の性能向上を目指し、詳細な改良計画を立て、実証に取り組んだ開発コンセプトや設計者の創造性などが評価された。

### 2. 構造

EV/HEV 用高速深溝玉軸受の概略保持器構造を図 1 に示す。

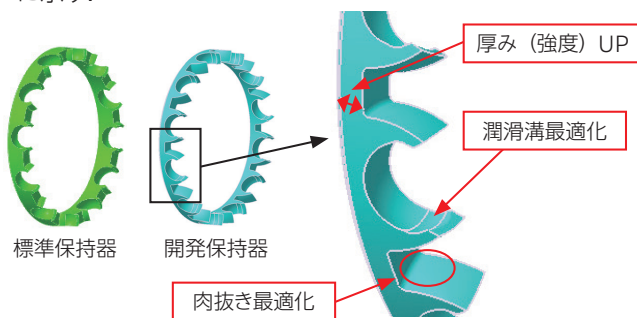


図 1 開発保持器の構造

### 3. 特長

EV/HEV 用高速深溝玉軸受の特長を以下に示す。

- (1) 世界最高水準の許容回転速度  $d_m n$  値 180 万  
：標準深溝玉軸受比 3 倍以上

### (2) 保持器強度（標準保持器比）

- ：引張強度 1.6 倍
- ：遠心力変形 1/8
- ：耐熱温度 30℃向上

軸受内輪回転条件での遠心力による保持器変形量（外径方向変位量）の解析結果を図 2 に示す。EV/HEV 用高速深溝玉軸受は、樹脂材料と保持器形状の最適化により、標準保持器の 3 倍の回転速度においてもボールとの干渉がなく、軸受のトルク増加・昇温もないので高速回転域まで使用可能である。

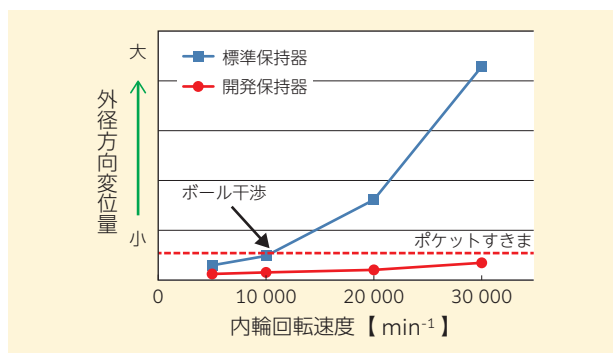


図 2 標準保持器と開発保持器の遠心力による変形の違い

### 4. まとめ

EV モータの効率改善にはモータの高速化が最も有効な手段である。本商品は顧客の軸受高速化要求に応えたものであり、脱炭素社会の実現にも貢献する。また、最近では熱収支バランス最適化等により  $d_m n$  値 220 万を達成した。<sup>2)</sup> 今後も超高速運転技術の知見を活用し、次世代の高速化ニーズに対応していく。

### 参考文献

- 1) 里田雅彦, 中尾吾朗, EV/HEV 用グリース潤滑高速深溝玉軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 83, (2015) 81-85.
- 2) 2022年4月28日付日刊工業新聞, 1面.

執筆者近影



中尾 吾朗

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部



佐々木 克明

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部



石田 幸大

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部



村主 和憲

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部

<sup>\*</sup>1  $d_m n$  値とは、軸受の回転性能を表す指標で、軸受ピッチ円径 (mm) × 回転速度 (min<sup>-1</sup>) である。

# 超長寿命自動車用円すいころ軸受の開発

## Development of Super Long-Life Tapered Roller Bearings for Automobile

藤原 宏樹  
Hiroki FUJIWARA

川井 崇  
Takashi KAWAI

大木 力  
Chikara OHKI

### 1. はじめに

自動車のトランスミッションやデファレンシャル、電動駆動装置（e-Axle 用減速機）に使用可能な超長寿命円すいころ軸受を開発し、2020 年度日本トライボロジー学会技術賞を受賞した。

本軸受は、ころ転動面と軌道面の接触応力を最小化するころ形状の設計技術、軸受鋼の結晶粒を微細化する熱処理方法、滑り接触部の形状改良により、耐ミスアライメント性、耐異物寿命、許容回転速度を向上させた。これによって自動車駆動装置の小型・軽量化が可能となり、燃費・電費改善できる点が評価された。

本受賞製品は「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」(図1)として商品化している。



図1 自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受

### 2. 構造

自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受の概略構造を図2に示す。

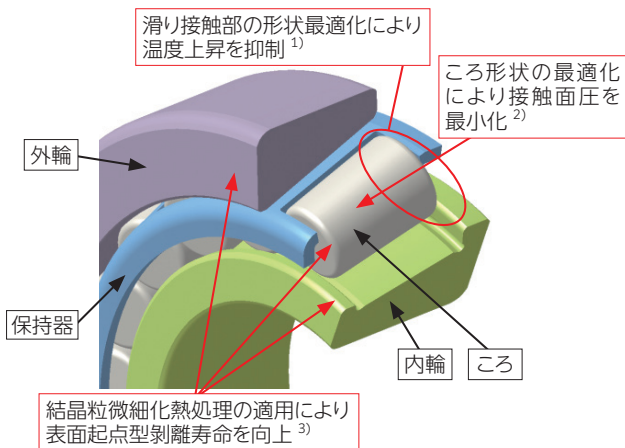


図2 自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受の構造

### 3. 特長

- (1) 世界最高水準の高負荷容量  
：基本動定格荷重<sup>4)</sup> 1.3 倍
- (2) 長寿命（基本定格寿命比<sup>4)</sup>）  
：標準熱処理タイプ 2.5 倍以上  
：結晶粒微細化熱処理タイプ 3.8 倍以上
- (3) 世界最高水準の高速回転性能  
：許容回転速度<sup>5)</sup> 約 10 % 向上
- (4) 許容傾き角<sup>5)</sup>（ミスアライメント量）  
：許容傾き角 最大 4 倍

### 4. まとめ

本製品は、円すいころ軸受の長寿命化技術を駆使して開発した。従来と同等の要求寿命であれば小型化できるので、自動車駆動装置の小型・軽量化に寄与し、省燃費・省電費化が可能である。また、本開発で培った長寿命化技術を他の用途にも展開することにより、様々な機械を高効率化し、カーボンニュートラルの実現に一層貢献したい。

### 参考文献

- 1) 藤掛泰人, 石川貴則, 宮入進, 自動車用アルテージ円すいころ軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 51-55.
- 2) H. Fujiwara et al., Optimized Logarithmic Roller Crowning Design of Cylindrical Roller Bearings and Its Experimental Demonstration, Tribol. Trans., 53 (2010) 909-916.
- 3) C. Ooki, Improving Rolling Contact Fatigue Life of Bearing Steels Through Grain Refinement, SAE Technical Paper Series, 2004-01-0634.
- 4) JIS B 1518 (2013)
- 5) NTN 転がり軸受総合カタログ, (CAT.No.2203/J)

執筆者近影



藤原 宏樹  
CAE 開発研究所

川井 崇  
自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部

大木 力  
先端技術研究所

# トランスミッション用シール付転がり軸受の低フリクション化技術 Low Friction Technology of Sealed Ball Bearings for Transmission

水貝 智洋  
Tomohiro SUGAI

佐々木 克明  
Katsuaki SASAKI

和久田 貴裕  
Takahiro WAKUDA

## 1. はじめに

カーボンニュートラルの実現に向け、自動車のトランスミッション用軸受には、長寿命に加え更なる低トルク化が求められている。トランスミッション内の潤滑油にはギヤ摩耗粉などの異物が存在し、これが転がり軸受の寿命低下を引き起こす恐れがあるため、①接触シールを用いて異物侵入を防ぐ、②異物寿命に効果的な特殊熱処理を軌道輪に施すなどの方法で対策する。しかし、①はシールによる回転トルクの増加が避けられず、かつ、シールの摺動発熱によって許容回転速度が制約を受ける。また、②は異物がない環境での軸受寿命と比べると寿命低下抑制効果が十分とは言えない。

これらの課題に応えるため、異物混入油中でも十分な寿命を確保しつつ、回転トルクを低減する技術を開発した<sup>1,2)</sup>。この度、本技術は、トライボロジーに関する優れた新技術に対して与えられる「2021年度日本トライボロジー学会技術賞」を受賞した。本報では、その技術の概要を紹介する。

## 2. 受賞技術の概要

従来の接触シールは、シール摺動面と内輪が接触し、実使用速度域では十分な油膜は形成されないことから、シールの引き摺り抵抗トルクが比較的大きい。これに対し、本技術では、接触シールの摺動面に図1に示す半円筒状の微小突起を設け、油潤滑下でシール摺動面と内輪間に“くさび膜効果”による流体膜を発生させる。これにより、実使用速度域では流体潤滑状態となり、図2に示すように回転トルクを従来接触シール比で80%低減し、接触シールでありながら非接触シールと同等の低トルク性を達成できる。また、突起高さは微小であるため、寿命を低下させるサイズの異物の侵入を遮断でき、異物がない環境と同

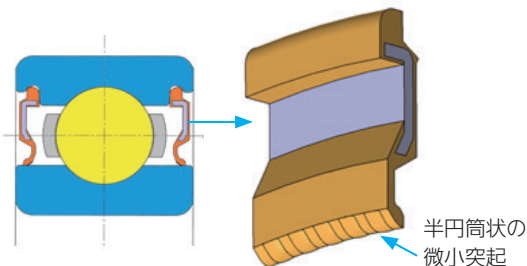


図1 開発シール概略図

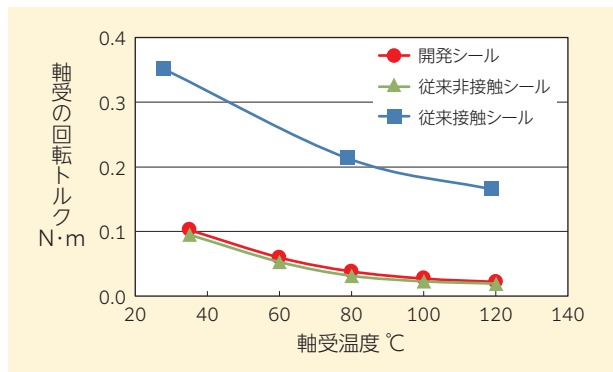


図2 軸受の回転トルクの実験結果

等の軸受寿命を確保できる。加えて、本シールはシール接触部の摺動発熱が低下するため、従来接触シールに比べ2倍以上の周速条件下でも使用できる。

## 3. まとめ

本技術は、異物混入油中でも十分な寿命を確保しつつトランスミッション用軸受の回転トルクを低減でき、自動車の省燃費化に貢献できる。また、信頼性の向上により軸受サイズの小型化、また自動車の軽量化に貢献できる。さらに、車両電動化に伴う高速化の要求にも応えることができる。

## 参考文献

- 1) 佐々木克明, 和久田貴裕, 水貝智洋, トランスミッション用超低フリクションシール付玉軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 85, (2017) 62-66.
- 2) 水貝智洋, 佐々木克明, 和久田貴裕, トランスミッション用シール付転がり軸受の低フリクション化技術, トライボロジー会議 2022 春 東京 予稿集, (2022) B6 85-86.

## 執筆者近影



水貝 智洋

先端技術研究所

佐々木 克明

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部

和久田 貴裕

自動車事業本部  
自動車軸受製品ユニット  
自動車軸受技術部



# 残留応力測定と接触応力解析で得られた $S-N$ 曲線を用いた ピーリング寿命の推定方法

## Estimation Method of Micropitting Life from $S-N$ Curve Established by Residual Stress Measurements and Numerical Contact Analysis

長谷川 直哉  
Naoya HASEGAWA

藤田 工  
Takumi FUJITA

内舘 道正  
Michimasa UCHIDATE

阿保 政義  
Masayoshi ABO

木之下 博  
Hiroshi KINOSHITA

### 1. はじめに

一般社団法人日本トライボロジー学会の学会誌「Tribology Online」に投稿した首記論文<sup>1)</sup>が2021年度の論文賞を受賞した。以下、本論文の内容について紹介する。

### 2. 概要

ピーリング（論文中では Micropitting）は希薄潤滑条件での軸受の代表的な損傷であり、表面粗さの突起の繰返し接触により起こる微小剥離の集合のことを言う。本論文では実験結果を援用した新しいピーリング寿命推定法を提案した。

この方法では以下の手順でピーリング寿命を推定する。

- 1) 様々な運転条件で転動疲労試験を行い、各試験でのピーリング寿命と突起接触部の繰返し応力の時系列データ（以下、応力履歴）を取得。応力履歴は運転中の表面粗さおよび残留応力の測定結果を用いて推定。
- 2) 得られたデータを回帰分析し、繰返し応力とピーリング寿命の関係を表す  $S-N$  線図を作成。
- 3) 寿命推定の対象の運転条件を模擬した予備試験を行い、その条件下での応力履歴を求め、得られた応力履歴から2)の  $S-N$  線図とマイナー則を用いてピーリング寿命を推定。

多様な条件でのピーリング寿命を推定するため、実測データを援用して寿命推定の精度を高めた。また、従来は難しかった寿命に対する残留応力の影響を考慮した点も本方法の特徴である。ただし、本推定法の適用範囲は純転がりかつ境界潤滑条件に限られることに留意する必要がある。

図1<sup>1)</sup>は本方法で推定したピーリング寿命  $L_{est}$  と実寿命  $L_{act}$  の関係を示している。寿命比 ( $L_{act} / L_{est}$ ) の中央値、最小値、および最大値はそれぞれ 0.89, 0.49, 1.82 で

あった。この精度は、一般的に用いられる剥離寿命の推定と比較して同等以上であり、本方法はピーリング寿命の推定法として十分適用可能であると考えられる。

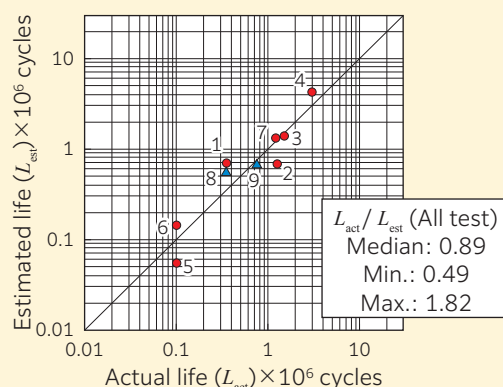


図1 推定寿命と実寿命の関係<sup>1)</sup>

### 3. まとめ

カーボンニュートラルの実現に向け、機械の高効率化のための潤滑油の低粘度化が今後ますます進展すると予想される。これにより軸受が希薄潤滑条件で使用される機会が増加するため、本研究のような当該条件下の寿命推定は、軸受の信頼性確保のために重要な技術となる。今後は本推定法の適用範囲の拡大や推定精度のさらなる向上に取り組む。

### 参考文献

- 1) N. Hasegawa, T. Fujita, M. Uchidate, M. Abo & H. Kinoshita: Estimation Method of Micropitting Life from  $S-N$  Curve Established by Residual Stress Measurements and Numerical Contact Analysis, Tribology Online, 14, 3 (2019) 131.

執筆者近影



長谷川 直哉  
先端技術研究所



藤田 工  
商品化戦略部



内舘 道正  
岩手大学 理工学部



阿保 政義  
兵庫県立大学 工学部



木之下 博  
兵庫県立大学 工学部

# 風力発電装置主軸用DLCコーティング自動調心ころ軸受 DLC Coating Spherical Roller Bearing for Wind Turbine Main Shaft

瀬古 一将  
Kazumasa SEKO

山本 貴志  
Takashi YAMAMOTO

中西 雅樹  
Masaki NAKANISHI

## 1. はじめに

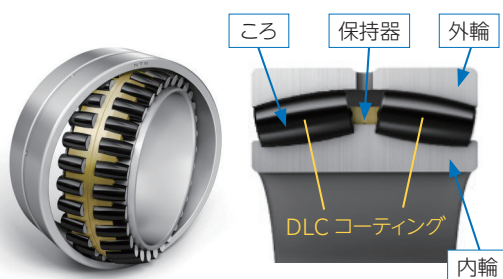
「風力発電装置主軸用 DLC コーティング自動調心ころ軸受」が、一般社団法人 新エネルギー財団が主催する令和3年度「新エネ大賞」において、「新エネルギー財団会長賞（商品・サービス部門）」を受賞した。

受賞商品は、ころの転動面にDLC（ダイヤモンドライクカーボン）コーティング\*を適用することで、転動面と軌道面の耐摩耗性を大幅に向上させた商品であり、風力発電装置の信頼性向上に大きく貢献することなどが評価された。

\*ダイヤモンド構造とグラファイト構造が混在した硬質膜

## 2. 構造

図1に風力発電装置主軸用 DLC コーティング自動調心ころ軸受の構造を示す。



ころ転動面のDLCコーティングにより摩耗を抑制

図1 風力発電装置主軸用 DLC コーティング自動調心ころ軸受

## 3. 特長

従来の自動調心ころ軸受では、運転中に潤滑不足が起これると、ころの転動面と軌道面が金属接触し、軌道面に摩耗が生じ、剥離や割れが発生することがあった。

風力発電装置主軸用 DLC コーティング自動調心ころ軸受は、ころの転動面に基材との密着力に優れる3層構造のDLCコーティングを適用することで、過酷な潤滑状態でも、軌道面の摩耗を抑制することができる。

実機用軸受よりも小型の軸受を使った摩耗試験においては、従来品に比べて外輪軌道面の摩耗が1/9以下に抑制されることを確認した（図2）。

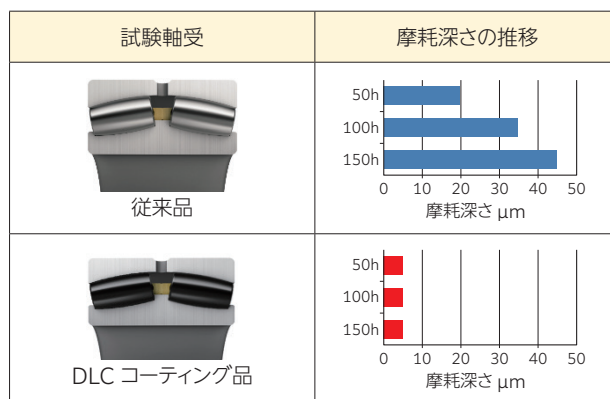


図2 摩耗試験結果

## 4. まとめ

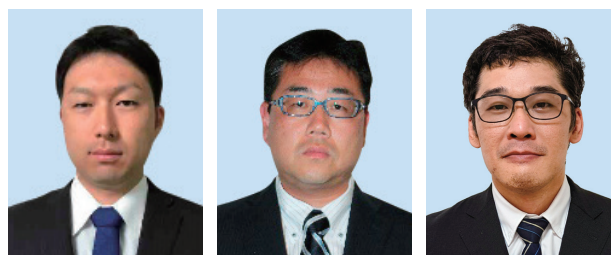
風力発電装置の主軸受では、風況により回転・停止が繰り返され、厳しい潤滑条件で使用される。一方、主軸受の交換は容易に行えないため、主軸受の摩耗に起因する剥離や割れは風力発電装置の稼働率の低下に直結することから回避しなければならない。

風力発電装置主軸用 DLC コーティング自動調心ころ軸受は、この課題に応えるものであり、市場展開により風力発電装置の信頼性の向上に貢献していきたい。

## 参考文献

- 堀径生, 山田悠介, 風力発電装置用主軸受の新商品と信頼性向上への取組み, NTN TECHNICAL REVIEW, No.88, (2021)15-20.

## 執筆者近影



瀬古 一将

産業機械事業本部  
適用技術部

山本 貴志

産業機械事業本部  
製品設計部

中西 雅樹

先端技術研究所

---

---

# NTN TECHNICAL REVIEW No.89

印刷・発行 2023年4月27日

---

---

編集人 江上 正樹

発行人 長尾 立雄

発行所 大阪市西区京町堀1丁目3番17号  
NTN株式会社

印刷所 大阪市中央区難波5-1-60  
なんばスカイオ17F  
株式会社 大伸社デイルイト

禁無断転載

お問い合わせはこちら



