

For New Technology Network

NTN®

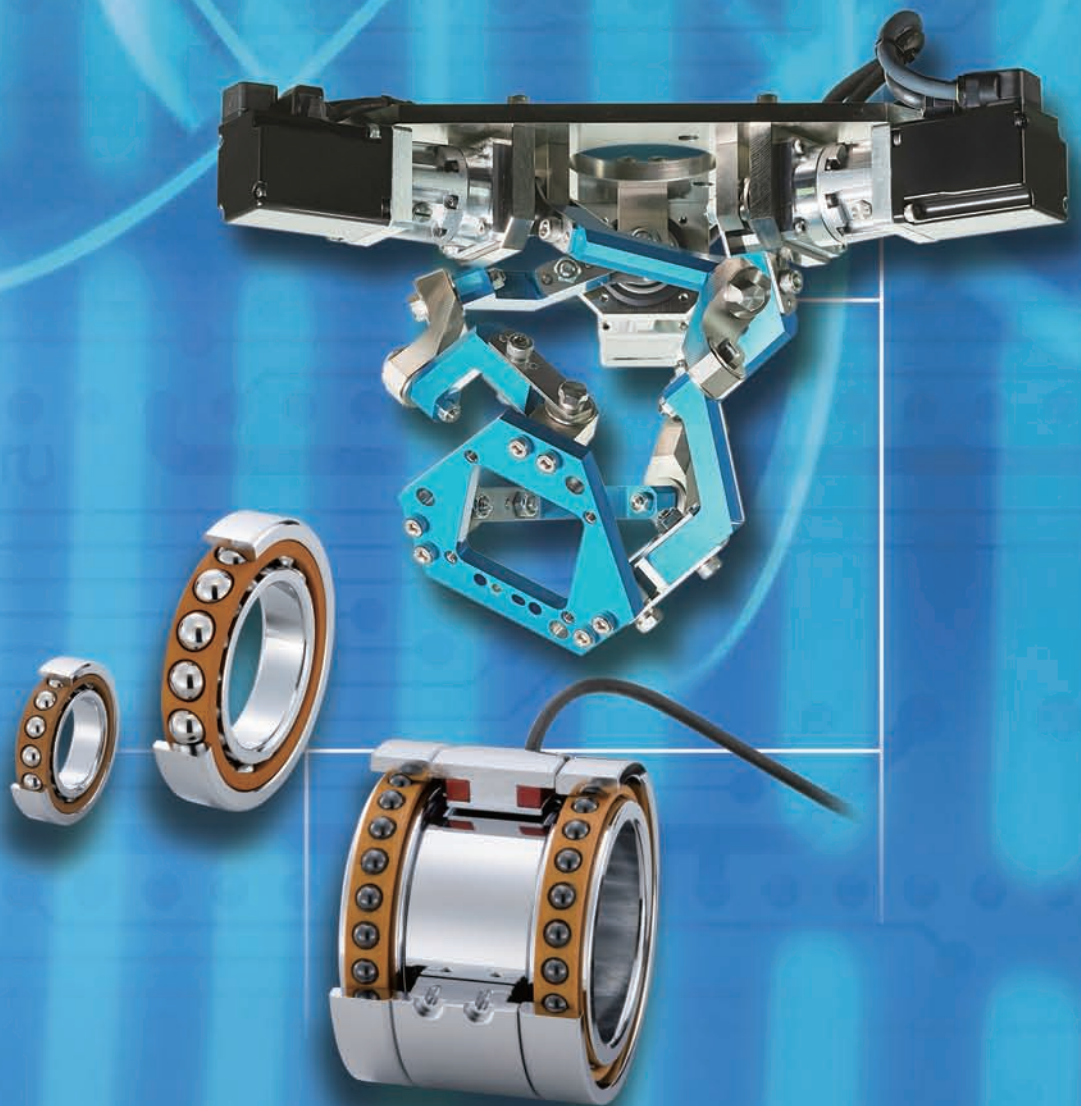
TECHNICAL REVIEW

No.

86

特集 ロボット・センシング商品, 工作機械

October 2018



NTNは、2018年3月に創業100周年を迎え、2018年4月からは新中期経営計画「DRIVE NTN100」をスタートさせました。次の100年の持続的成長に向けた諸施策を推進する中で、これまで培った研究開発と生産技術、販売の総合力を活かし、新たな領域における事業展開を進めています。自然エネルギー分野においては、高効率で静粛性の高い翼を活用した小形風力発電装置や小水力発電装置の製造・販売を開始しています。

風力と太陽光で発電する小形風力発電装置「NTNハイブリッド街路灯」は、独立電源として、災害時や無電化地域など、電気が使えない時、電気が無い場所で、電力を供給できます。NTNは、再生可能エネルギーの普及と防災・防犯に役立てていただくことを目的に、これまでに「NTNハイブリッド街路灯」を国内5地域に寄贈しました。

また、新たな取組みとして国立大学法人大阪大学(以下、大阪大学)および関連組織とともに、「ITを用いた防災・見守り・観光に関する仕組みづくりの共同研究」を開始しました。本共同研究は、大阪大学が開発した災害救援・防災マップと、みまもりカメラ機能を持つWi-Fiステーション「みまもりロボくんⅢ」を連携させるもので、実験機の駆体および独立電源として「NTNハイブリッド街路灯」を採用いただきました。防災・災害時支援に関する情報網として、また、高齢者や子供の見守り、観光等の情報インフラ構築を目的に、各種の実験に取り組んでいます。

小水力発電装置である「NTNマイクロ水車」は、独自の翼形状により、用水路に設置するだけで流水のエネルギーを高効率で電力に変換できます。水位の落差を利用する従来の小水力発電装置とは異なり、導入時の落差工事が不要であり、工事費用を大幅に削減できるほか、同一水路への直列・並列配置が可能のため、台数に応じた発電量を見込める点も大きなメリットです。さらに、発電した電力を系統に送電し、売電が可能な「系統連系用NTNマイクロ水車」の販売を本年より開始しました。



▲ 同一水路に直列配置されたNTNマイクロ水車

NTNは、これらの自然エネルギー商品を用いた新たな施策により、地産地消型エネルギーの提案を進め、低炭素化社会の実現や、安心・安全なまちづくりを通して地域社会に貢献してまいります。



▲ NTNハイブリッド街路灯を用いた実験機

NTN TECHNICAL REVIEW No.86

ロボット・センシング商品, 工作機械 特集号 ● 目次

巻頭言	「ロボット・センシング商品, 工作機械」特集号に寄せて	常務取締役 寺阪至徳	1
【寄稿文】	予測型生産システムとスマート加工・計測機械の展望	大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授 高谷裕浩	2
【展望】	転がり軸受とIoT –NTNのIoTへの取組み–	常務執行役員 研究部門担当 江上正樹	16
● ロボット・センシング商品 小特集			
【商品紹介】	手首関節モジュール『i-WRIST™』の開発	産業機械事業本部 数野恵介/磯部 浩/御堂前 純/志村祐紀/小原正行	22
【論文】	i-WRIST™のロボット手首関節への応用	商品開発研究所 野瀬賢蔵/坂田清悟/丸井直樹/佐藤直彦	28
【解説】	ロボット用軸受の技術動向と特長	産業機械事業本部 適用技術部 大胡 誠/國米広道/林 康由/辻橋将人	34
【商品紹介】	風力発電装置用状態監視システム (CMS) の開発と適用例	産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部 宮崎 誠/畠山 航	40
【商品紹介】	高精度絶対角検出用複列磁気リングの開発	商品開発研究所 小池孝誌/福島靖之/澁谷勇介 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	45
● 工作機械 小特集			
【商品紹介】	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 適用技術部 橋爪翔平 商品開発研究所 福島靖之/澁谷勇介 産業機械事業本部 製品設計部 山本庸平	50
【商品紹介】	高速・重切削工作機械主軸用アンギュラ玉軸受	産業機械事業本部 適用技術部 竹ヶ鼻 仁/古山峰夫 産業機械事業本部 製品設計部 神野晃治/田中雄也	56
【商品紹介】	工作機械主軸用空冷間座付グリース潤滑軸受	産業機械事業本部 適用技術部 那須恵介 産業機械事業本部 製品設計部 岡本直也/田中雄也 先端技術研究所 小畑智彦	62
【商品紹介】	ULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受72Uシリーズ	産業機械事業本部 製品設計部 北野誉幸/山本庸平	68
【商品紹介】	工作機械案内面用樹脂すべりシート	複合材料商品事業部 精密樹脂技術部 石井卓哉/福澤 覚/宗田法和	74
● 論文・商品紹介			
【論文】	トランスミッション向け玉軸受用低フリクションシールの潤滑メカニズム	先端技術研究所 水貝智洋 自動車事業本部 自動車軸受技術部 佐々木克明/和久田貴裕	78
【論文】	車両運動性能を向上させるステアリング補助機能付ハブベアリング	商品開発研究所 石原教雄/大場浩量/伊東貴志 神奈川工科大学 自動車システム開発工学科 石橋満憲/山門 誠/狩野芳郎/安部正人	84
【商品紹介】	早期異常検知機能付円すいころ軸受	産業機械事業本部 適用技術部 山本直太 産業機械事業本部 製品設計部 内村宙史/東穂翔太	91
【商品紹介】	風力発電装置主軸用「左右列非対称自動調心ころ軸受」	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	96
【商品紹介】	系統連系用NTNマイクロ水車	自然エネルギー商品事業部 技術部 伊藤隆志/木村寛太/金村泰成	102
● 受賞案件の紹介			
	《2017年「超」モノづくり部品大賞 自動車部品賞受賞》 自動車用ULTAGE(アルテージ)円すいころ軸受	自動車事業本部 自動車軸受技術部 川井 崇/藤掛泰人/石川貴則/宮入 進	108
	《日本材料学会「第51回X線材料強度に関するシンポジウム 最優秀発表賞」受賞》 転がり軸受のピーリング損傷におよぼす残留応力の影響	先端技術研究所 嘉村直哉/藤田 工 金沢大学 人間科学系 佐々木 敏彦	109
	《2017年度「日本トライボロジー学会 論文賞」受賞》 低入条件でのスラスト玉軸受の転動疲労寿命	先端技術研究所 藤田 工/長谷川直哉/嘉村直哉 金沢大学 人間科学系 佐々木 敏彦	110
新商品紹介			111

NTN TECHNICAL REVIEW No.86

CONTENTS

Preface	For Robotics and Sensing Products and Machine Tool Yoshinori TERASAKA	1
Contribution	Strategic Vision for Smart Machining Tool and Measuring Instrument Yasuhiro TAKAYA Professor, Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University	2
Perspective	Rolling Bearing and IoT – NTN's Approach to IoT - Masaki EGAMI	16
● Special Issue for Robotics and Sensing Products		
	Development of 『i-WRIST™』 wrist joint module Keisuke KAZUNO, Hiroshi ISOBE, Jun MIDOUMAE, Yuuki SHIMURA and Masayuki OHARA	22
	Application of i-WRIST™ to the Robot Wrist Joint Kenzou NOSE, Seigo SAKATA, Naoki MARUI and Naohiko SATOU	28
	Technical Trend and Features of the Bearing for Robot Makoto OEBISU, Hiromichi KOKUMAI, Yasuyoshi HAYASHI and Masato TSUJIHASHI	34
	Application of Condition Monitoring System for wind turbines Makoto MIYAZAKI and Wataru HATAKEYAMA	40
	Development of Multi Track Magnetic Ring for High Accuracy Absolute Angle Detection Takashi KOIKE, Yasuyuki FUKUSHIMA, Yusuke SHIBUYA and Hiroyoshi ITOUI	45
● Special Issue for Machine Tool		
	Development of Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles Shohei HASHIZUME, Yasuyuki FUKUSHIMA, Yusuke SHIBUYA and Yohei YAMAMOTO	50
	Angular Contact Ball Bearings for High-Speed and Heavy-Cutting Machine Tools Jin TAKEGAHANA, Mineo KOYAMA, Kouji JINNO and Yuya TANAKA	56
	Machine Tool Main Spindle Bearings with Air Cooling Spacer for Grease Lubrication Keisuke NASU, Naoya OKAMOTO, Yuya TANAKA and Tomohiko OBATA	62
	ULTAGE Precision Standard Angular Contact Ball Bearing, 72U Series Takayuki KITANO and Youhei YAMAMOTO	68
	Plastics Sliding Sheet Used Slide Guide of Machine Tools Takuya ISHII, Satoru FUKUZAWA and Norikazu MUNEDA	74
● Technical Papers and New Products		
	Lubrication Mechanism of Low Friction Seal of Ball Bearing for Transmission Tomohiro SUGAI, Katsuaki SASAKI and Takahiro WAKUDA	78
	Hub Bearing with Steering Function that Improves Vehicle Dynamic Performance Norio ISHIHARA, Hirokazu Ooba, Atsushi ITOU, Mitsunori ISHIBASHI, Makoto YAMAKADO, Yoshio KANO and T Masato ABE	84
	"Tapered Roller Bearings" with Early Failure Detection Sensor Naota YAMAMOTO, Hiroshi UCHIMURA and Shota TOHO	91
	Asymmetrical Spherical Roller Bearings for Wind Turbine Main Shafts Kazumasa SEKO and Takashi YAMAMOTO	96
	Grid Connectable NTN Micro Hydro Turbine Takashi ITOU, kanta KIMURA and Yasunari KANAMURA	102
● Award Winning Products		
	“Cho” MONODZUKURI Innovative Parts and Components Award 2017, Automotive Components Award ULTAGE Tapered Roller Bearing for Automotive Application Takashi KAWAI, Yasuhiro FUJIKAKE, Takanori ISHIKAWA and Susumu MIYAIRI	108
	The Society of Materials Science, Japan “The 51 st symposium on X-ray material strength” Best Presentation Award Effect of Residual Stress on Peeling of Rolling Bearings Naoya KAMURA, Takumi FUJITA and Toshihiko SASAKI	109
	“The Japanese Society of Tribologists 2017 ” Outstanding Paper Award Rolling Contact Fatigue of Thrust Ball Bearing under Low Lambda Condition Takumi FUJITA, Naoya HASEGAWA, Naoya KAMURA and Toshihiko SASAKI	110
Our Line of New Product		111

「ロボット・センシング商品, 工作機械」特集号に寄せて

常務取締役
寺 阪 至 徳

日本の生産年齢人口の減少が業種を問わず大きな社会問題として取り上げられる中、今後の少子高齢化の進行による人手不足への対応が強く求められています。協働ロボットは多種多様な製造現場で人の代わりにハンドリングや組立、検査などの作業を行うことができ、今後の市場拡大が期待される分野のひとつです。一方、人手不足を背景として産業機械への状態監視機能の付与を求める声が一段と高まり、IoTの普及も相まって、センシング技術の活用によるさらなる無人化や省人化を目指す取組みが活発に議論されています。

NTNは製造現場での人手不足や品質向上の課題に対し、当社独自のリンク機構を採用した手首関節型モジュール“i-WRIST”とカメラを組み合わせた、コンパクトで高速動作が可能な外観検査装置を開発し、新事業の創出に向けた取組みのひとつとして推進しています。

また、NTNの基盤商品である軸受は、身の回りのあらゆる機器の回転部分に使用されており、各種センサを内蔵しセンシング機能を持たせることで、データ収集の起点となる機械要素として、一層の高機能化が要求されています。NTNは大阪大学と共同で、軸受に多機能センサを内蔵し、軸受運転時の傾向管理や破損の未然防止を可能にする研究技術開発に取り組んでいます。

今般「未来へつなぐ、技術の大樹」をテーマとした、第29回日本国際工作機械見本市(JIMTOF2018)が11月1日から11月6日に開催されるのを機に、テクニカルレビューNo.86「ロボット・センシング商品、工作機械」特集号を発行する運びとなりました。当社の基盤技術である材料、熱処理、トライボロジー技術などを活用した基盤商品のひとつとして、産業ロボット用軸受があり、これらの技術動向と特長を解説するほか、新たに開発した工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットや高速化に対応する空冷間座付グリース潤滑軸受、高速・重切削に対応する工作機械主軸用新アンギュラ玉軸受などを紹介いたします。

NTNは2018年3月に創業100周年を迎えました。2018年4月からは新たな3年間で中期経営計画「DRIVE NTN100」に取り組み、次の100年に向けて、事業構造の変革を加速します。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)」の下、経済社会の持続的成長を目指すため、他にない優位性を持った基盤事業の強化とコアコンピタンスを活用した新事業の創出を両輪として、新たな100年を支える研究技術開発を進めてまいります。

予測型生産システムとスマート加工・計測機械の展望

Strategic Vision for Smart Machining Tool and Measuring Instrument



高谷 裕浩 Yasuhiro TAKAYA

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

『非平衡／戦略の時代』において、カスタマイズ製造、革新的な製品や付帯するサービスの創出など、新たな価値を創造することを戦略とする、イノベーション駆動型ものづくりへの変革が求められている。イノベーション駆動型ものづくりの基盤となる予測型生産システムでは、プロダクション・クオリティ管理を実現するためのスマートインプロセス／機内・機上計測と、異なる計測原理の統合とマルチスケールのデータ融合に基づいたホリスティック計測が重要な役割を担う。生産システムに自己認識能力をもたらすスマートインプロセス／機内・機上計測ネットワークは、イノベーション駆動型ものづくりを具現化する第4次産業革命のキーテクノロジーでもある。

Establishment of the innovation driven manufacturing, which enables new value creation such as customized products and innovative products with services, is expected in the age of non-equilibrium and strategy. The holistic measurement based on integrating different measurement principles and multi-scale data fusion as well as smart in-process and on-machine measurement technologies will play an important role in the predictive control type manufacturing system. The connected smart in-process and on-machine measurement systems that give self-recognition ability to the manufacturing system is also the key technology in Industry 4.0 to establish the innovation driven manufacturing.

1. はじめに

『平衡の社会』から『非平衡の社会』へ、グローバルな規模で拡散・浸透する社会・経済の構造や課題そのものの根本的変化（パラダイムシフト）は、図1に示すような“戦術の時代”から“戦略の時代”への遷移として捉えられる。持続可能社会、環境対応、グローバルスタンダードなどの新しい価値観と社会・経済環境の変化とともに、ものづくりも変化している。その様相は、“線形の社会・鉄道の時代”から“非線形の社会・大航海の時代”に例えられている¹⁾。予見や予測が可能な目的地（Product）から、それが困難な到着地（Market）や行き方（Process）に関心が移るとともに、改良や改善（戦術）によるより高い付加価値の追求よりも、根本的に考えること（戦略）による価値の創造が重視されるようになってきた。これらの動向に伴って、従来の考え方の延長では解決できない課題が急速に増えている。科学から社会・経済に至る包括的変革の動きは着実に急速であり、近年では加速さえしている。そのひとつである大きなものづくり変革、すなわち第4次産業革命を駆動する戦略的計測の潜在的なパワーを明らかにし、予測型生産システムとスマート加工・計測における今後の展開について探る。

2. イノベーション駆動型ものづくり

『平衡／戦術の時代』における、これまでの効率駆動型ものづくりでは、生産システムの高精度、高効率化などによって、製品の高付加価値化を達成することを戦略とし、それを実現するための戦術が重視されてきた。その戦術とは、生産システムの高度化を迅速に推進することである。そのため、加工技術、計測技術およびCAD/CAE/CAM/CATなどの製造技術を、生産システムを構成する要素技術（生産ツール）として切り分け、それぞれ個別の課題解決を図ることが主たる関心事であり、またそれによって大きな成果が得られた。従って、図2に示すように、計測技術は生産ツール（計測＝検査）のひとつとして、その役割が重視され、「もの」（プロダクト）に与えられる高品質、低価格、短納期といった目標を達成するための戦術として利活用されてきた。ものづくりのプロセスが長期にわたって“平衡状態”にあるときは、生産ツールとしての“「もの」づくりの計測”が十分な役割を果たしてきた。

一方、『非平衡／戦略の時代』における、イノベーション駆動型ものづくりでは、新たな高付加価値化の考え方に加え、カスタマイズ製造、革新的な製品や付



図1 鉄道の時代から大航海の時代へ
Railway era to the age of discovery

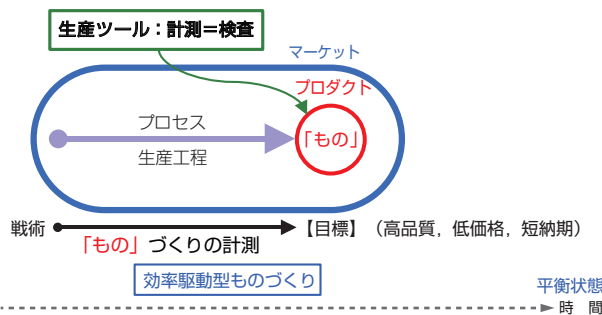


図2 平衡の時代：(戦術) 生産ツールとしての計測
Equilibrium era: Measurement technology as production tools

帯するサービスの創出など、新たな価値を創造することを戦略とし、戦術よりも戦略が重視される。時間変化する戦略に対応するための戦術として、予測型生産システムの実現が必要となる。従って、図3に示すように、計測技術の役割は、予測型生産システムへの適用性に加え、これまでと大きく異なってくる。計測技術には、情報と強く結びついた「もの」(プロダクト)とそのライフサイクルを通して、マーケット、プロダクト、プロセスなどの「こと」づくり全体と深く関わ

り、多様化する目標を達成するための戦略そのものを担うことが求められる。このように、ものづくりのプロセスが“非平衡状態”に変遷する現在では、情報の源泉(リソース)である計測は、戦略ツールとしての“「こと」づくりの計測”として、その革新的進展が不可欠となる。

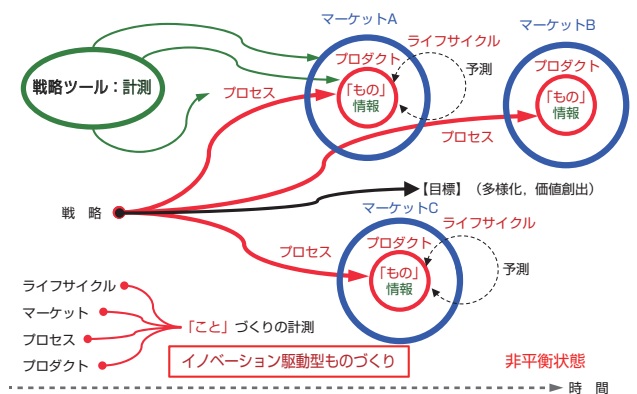


図3 非平衡の時代：戦略ツールとしての計測
The age of non-equilibrium: Measurement technology as strategic tools

3. 新たなプロダクション・クオリティ (生産品質) の考え方

3.1 加工精度と工程能力評価

谷口は1983年の論文によって、精密加工技術の精密加工限界²⁾は、2000年には0.1 μmに達すると予測した。機械加工技術はめざましい発展を遂げ、現在では普通加工限界の領域に到達しようとしている。加工プロセスは、工作機械、工具、工作物、加工条件、作業環境および製品などの多数の要素による総合技術である。加工誤差は、工作機械の位置決め精度や熱変位、工具の幾何精度や摩耗特性、工作物の材質や硬度、高速加工、ドライ加工や作業スキルなどの加工条件、温度や振動などの作業環境、製品の高精度化や複雑化など、それぞれの要素がもつ様々な要因が複雑に重畳されて生ずる。誤差の伝播則に従って、最も安定した要因が、不安定な要因を補完することによって、加工プロセス全体としての精度が向上することは期待できない。すなわち、加工プロセス中に不安定な要因がひとつでもあれば、最終的な精度はその要因に左右され、低下してしまう。

機械加工の精度は、精密さと正確さに分離して考えることができる。さらに、機械加工には、基準寸法と許容公差を満足する加工能力が求められる。図4は加工精度と工程能力の考え方を示している。加工仕様値の下限値と上限値を LSL と USL 、許容公差を T とし、簡単のために加工値（加工寸法など）の平均が T の中心の値をとり、標準偏差が σ である場合、限界加工精度 p および加工能力指数 C_{pk} または C_p は、それぞれ図4中に示した評価式によって算出される。例えば $C_p \geq 1.33$ のとき、加工品の99.1%が許容公差の $1/1.33=0.75$ 以内に入る。

加工精度（誤差）は、直接“見る”ことができない。そこで、“計測の窓”をとおした“見える化”について理解する必要がある。図5³⁾は、測定「不確かさ」⁴⁾の大きさの違いによって、加工能力指数がどのように評価されるのかを示している。許容公差が T のとき、 LSL と USL はそれぞれ加工仕様値の下限値と上限値を示す。簡単のために加工値（加工寸法など）の平均が T の中心の値をとり、加工のバラツキを示す標準偏差が σ であるとする。例えば、真の加工能力指数が C_p （または C_{pk} ） $=1.33$ であるとき、 C_p は“計測の不確かさの窓”を通して見ていることになり、加工能力評価を不確かさ $U = 0.1T$ の計測によって行った場合（図5(a)）は C_p （ C_{pk} ） $=1.24$ と評価される。これに対し、不確かさ $U = 0.2T$ の場合（図5(b)）は、 C_p （ C_{pk} ） $=1.04$ となり、より低い加工能力として評価される。また、計測の不確かさを含んだ全体の不確かさ U' は、 σ よりも大きくなっていることがわかる。従って、計測の信頼性を表す指標である不確かさの大きさが、加工精度の保証に対する信頼性を大きく左右する。計測の不確かさは、加工能力評価に基づいた高効率な加工プロセス管理を行う上で重要な指標であり、“価値を生み出す”戦略的な計測によって、高精密・高精度加工を保証するためには、信頼性の高い（不確かさの小さい）計測を用いることが必要である。

以上のように、加工精度の向上には、加工工程において発生する加工誤差、すなわち絶対値のかたより誤差とばらつき誤差を低減し、工程能力の向上を図ることが求められる。そのためには、加工プロセス中の全ての要因を計測対象と考え、加工プロセスの要素全体を精査し、最も不安定な要因に適用することによって高い効果が得られる。

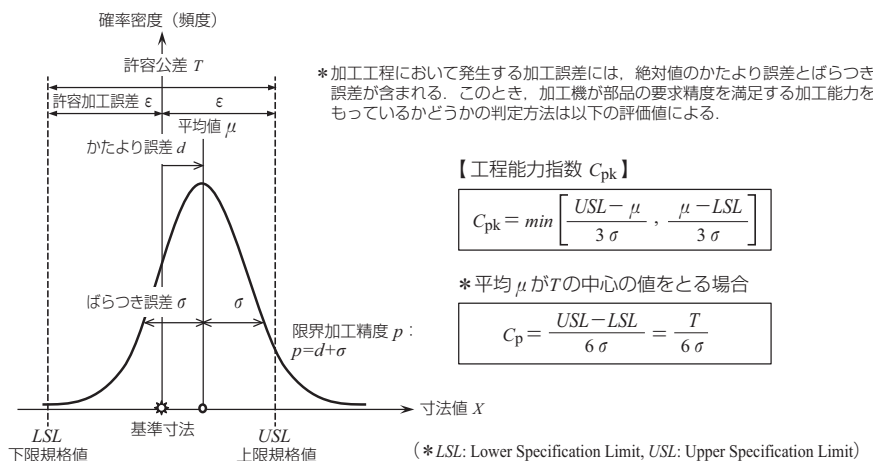


図4 加工精度と工程能力指数 (C_{pk} または C_p)
Process capability index (C_{pk} , C_p) for evaluating the machining accuracy

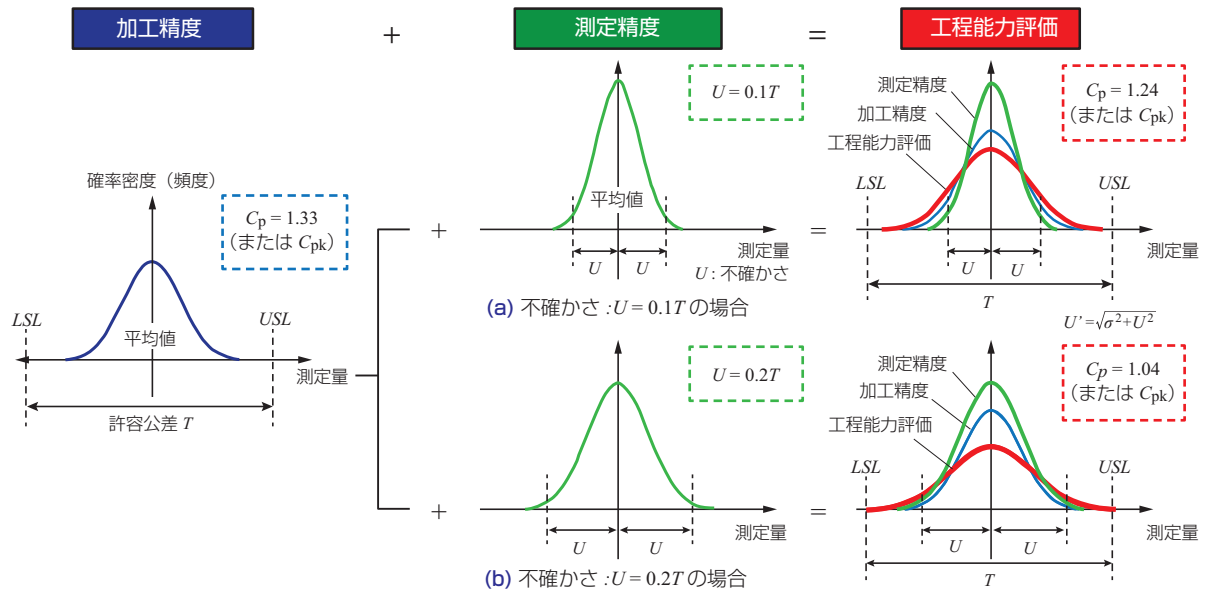


図5 工程能力評価による加工精度の評価方法；
 (参考文献³⁾ Weckenmann et al., Precision Engineering (2000)の概要を再構成)
 Importance of measurement uncertainty to evaluate process capability index

3.2 プロダクト（品質）からプロダクション・クオリティ（生産品質）へ

加工精度には、工作機械や加工物の特性、加工環境、加工手順などの様々な予期できない要因によって変化する加工誤差が複雑に重畳される。加工誤差に含まれる偶然誤差 (accidental error) は、その原因が特定できないため、補正できないが、繰返し測定によって推定することができる。そのため、同じ部品加工が繰返し行われる (確率的試行回数が多い) 大量生産においては有効性を発揮する。従って、加工精度はゆらいている統計的な量、すなわち確率的に変動する量とみなすことができるため、従来の効率駆動型ものづくりにおける、大量生産で活用されてきた品質管理手法は、統計的な考え方に基づいた加工精度評価に基づいている。

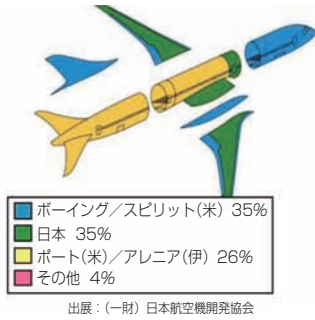
一方、発電用タービンなどのエネルギー関連設備、カスタマイズ製品などの需要の高まりとともに、近年では、図6⁵⁾に示すように、航空機部品の世界的な需要が急速に増加しており、我が国における品質管理の厳しい大型精密部品の生産も増加している。新たな品質管理の考え方や生産システムの基盤となる戦略的加工計測が求められる、これらの少量生産や一品生産あるいはカスタマイズ生産では、製品毎のライフサイクルによる経年変化や戦略の変化とともにプロダクトだけでなくプロセスも大きく変化する。このような場合、温度変動や機械精度の経年変化などが精度変動の要因

となる環境において、加工誤差における系統誤差の要因が変化することに加え、従来の統計的な考え方に基づいた品質管理を適用するためには慎重な検討が必要となる。さらに加工数が極めて少なく、プロセスが変化する場合は、図4に示した統計的仮定の妥当性を検証することが困難となる。

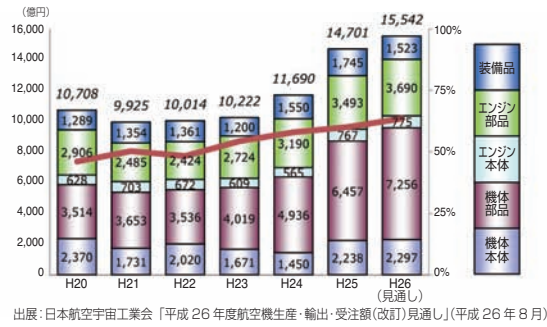
そこで、従来の統計的工程管理手法の課題を解決し、少量生産やカスタマイズあるいは一品生産にも適用できる新たな生産管理および品質管理手法として、図7に示すプロダクション・クオリティ⁶⁾ (生産品質) の考え方が提案されている。この手法は、品質を計る指標として、工作物の幾何学量だけではなく“製造に関わるあらゆるプロセスを情報化する”ことによって、プロセスを重視した品質・機能保証を基本的な考え方としている。すなわち、膨大な情報 (インダストリアル・ビッグデータ) を活用した革新的で統合されたプロダクション・クオリティの定義、それに基づいた生産物流から保守にいたる製品のライフサイクル全体のデザイン、ビッグデータの新たなマネジメント/コントロール手法の導入、およびそれらを具現化するための先進技術によってプロダクション・クオリティ管理を確立するものである。そのために求められる技術革新として、製品検査技術、加工監視技術、マルチセンサデータ融合技術など、図7(a)~(h)が提示されている。これらの技術は、言い換えると、加工物の幾何特性 (加工精度) だけでなく、工具、工作機械、加工環

境、および加工・計測作業など、測定対象が加工精度を直接支配する広範な要素（加工特性）におよぶ、インプロセス／機内・機上測定技術が不可欠であることを示唆している。さらに、革新的な製品の創出によって新たな価値を創造することを戦略とする、『非平衡／戦略の時代』におけるイノベーション駆動型ものづくりで

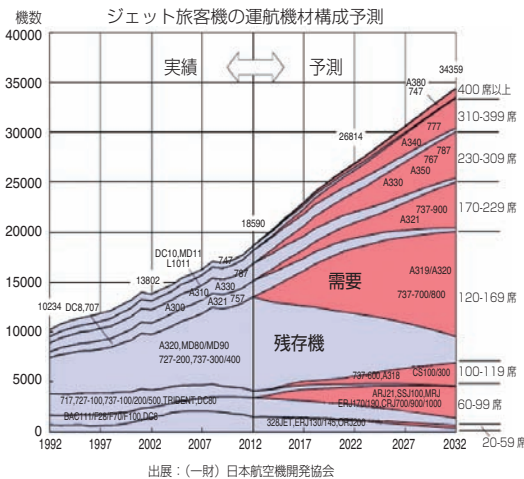
は、少量生産やカスタマイズあるいは一品生産などが増えてくると予想される。従って、インプロセス／機内・機上計測を基盤とするプロダクション・クオリティ管理が必須であり、また、それは予測型生産システムを実現するキー・テクノロジーでもある。



(a) ボーイング 787 の期待分担

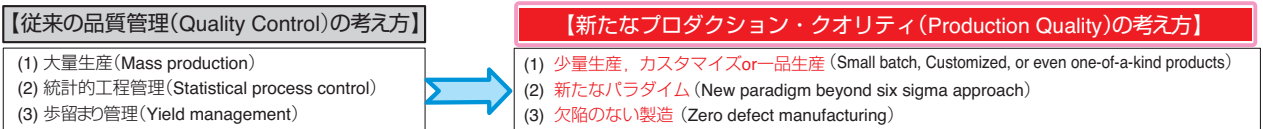


(b) 航空機生産額の推移



(c) ジェット旅客機の運航機材構成予想

図6 航空機産業における世界的な需要増加⁵⁾
Increasing demand for high-precision parts in aerospace industry



【プロダクション・クオリティの確立に求められる技術革新】	
(a) 製品検査技術 (Product inspection technology)	(e) 自動保守管理技術 (E-maintenance technology)
(b) 加工監視技術 (Process monitoring technology)	(f) 製品のトレーサビリティ管理技術 (Product traceability technology)
(c) マルチセンサデータ融合技術 (Multi-sensor data fusion technology)	(g) 生産工程監視技術 (Production monitoring technology)
(d) 学習および認知情報処理技術 (Learning techniques and cognitive computing methods)	(h) ICT対応のデジタルマニュファクチャリング技術 (ICT and digital manufacturing technology)

図7 プロダクション・クオリティ(生産品質)とは；(参考文献⁷⁾ Colledani et al., CIRP annals (2014)の概要を再構成
Fundamental scheme of production quality control and the required innovative technologies to establish it

4. ホリステック計測による プロダクション・クオリティ管理

4.1 インプロセス／機内・機上計測の現状

生産管理を目的とした加工計測の役割は、ものづくりの「情報化」である。多様で膨大な生産情報を駆使した高度な生産システムにおいては、加工計測は製品や加工状態に関する主要な情報源として重要な役割を果たしている。加工計測の最も基本的な目的は、生産管理、生産の自動化および検査の自動化の3つである。インプロセス／機内・機上計測は、加工の直接的なモニタリングと制御を担い、最も効率的で効果的な加工計測技術である。高再現性を有する工作機械では、温度変化による機械の変形や変位、工具熱膨張、工具たわみ、工具摩耗など、実加工時における加工要因によって時間的に変化する加工誤差の評価と、それに基づいた再加工による誤差補償が可能な場合もある。

近年、インプロセス／機内・機上計測機を搭載した工作機械が次々と実用化されており、その役割はますます重要性を増している。このような動向の背景には、計測目的の多様化がある。さらに、プロダクション・クオリティの管理においても、インプロセス／機内・機上計測は中心的な役割を果たす。図8は、インプロセス／機内・機上計測技術に求められる基本計測特性と特有の特性、および工作機械、工具、工作物から作

業環境や加工／計測作業に及ぶ加工要因とインプロセス／機内・機上計測の関係を示している。まず、基本計測特性として特に重要なのは、正確さと精密さである。例えば、工程能力の基準となる公差範囲を十分な精度で評価できる正確さや精密さを満足しているか、あるいは加工のかたより誤差が評価可能な絶対測定を行う必要があるか、などの基礎的検討が重要である。なお、加工中（インプロセス）の測定評価を行う場合は、過渡応答や周波数応答などの動特性も影響する。さらに、インプロセス／機内・機上計測特有の特性も求められる。特に、測定機を工作機械に実装する際に求められる環境要因や、ハードウェアおよびソフトウェア要因などが挙げられる。例えば、光学式コンパレータを利用した機上3次元形状計測の場合、振動特性やコンパクト性、スティッチング処理などが要求される。インプロセス／機内・機上計測のメリットは、加工精度の向上や安定化に留まらず、加工／計測段取りの高効率化などにも波及する。以上のように、計測対象は空間-時間的に工作物から加工状態へと拡がり、加工要因の数値化によって、「加工工程の見える化」を実現する。

繰返し加工の間その値を定値に保っている加工誤差は、同じように影響を与え、偶然誤差には反映されない。そのため、加工精度に一定のかたより (bias) を与える誤差となる。一般に、このような繰返し測定で

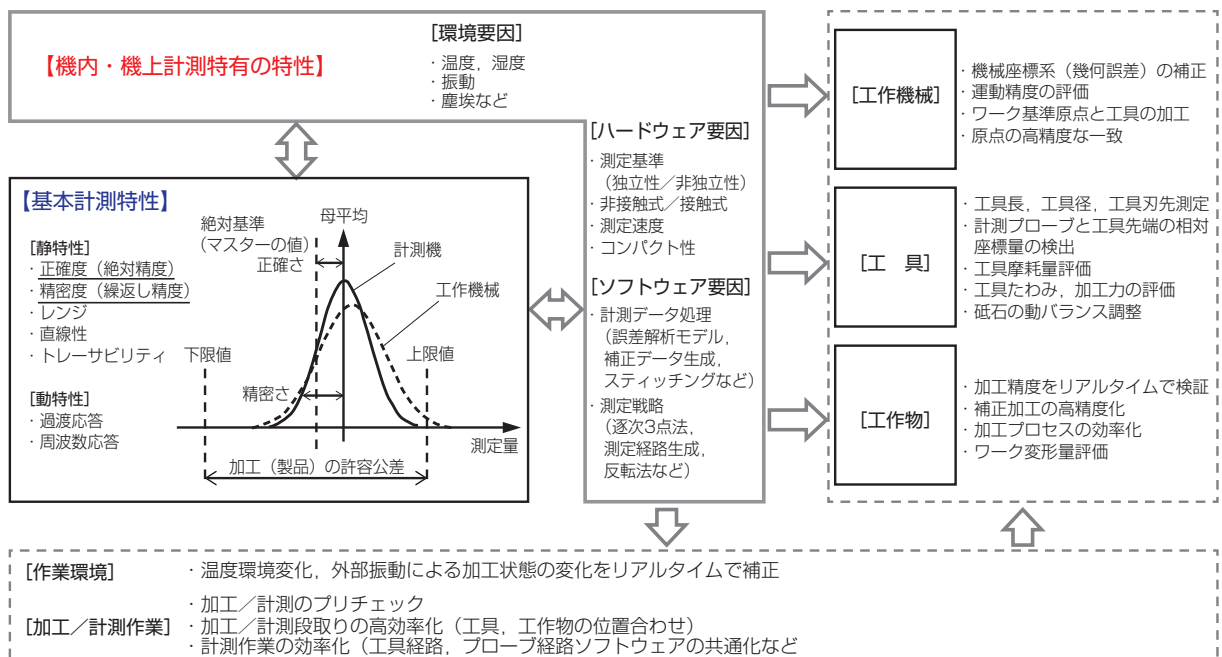


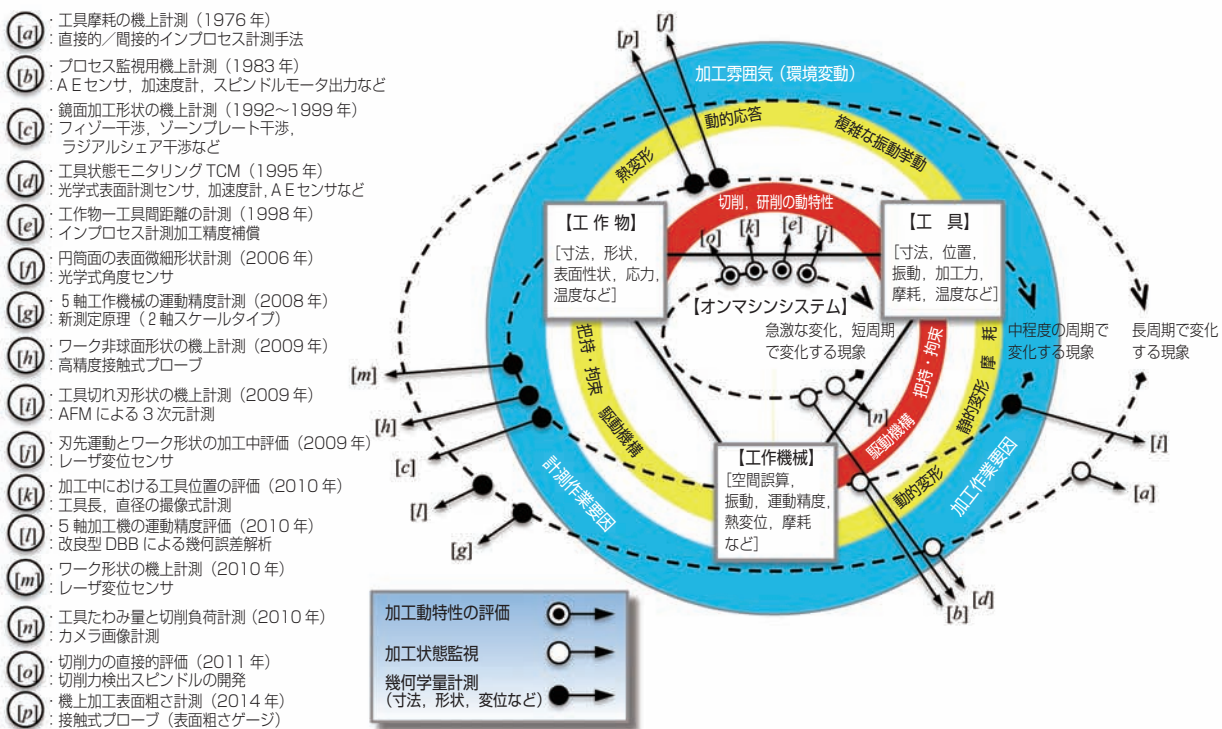
図8 加工計測の基本特性と機内・機上計測の役割

Fundamental properties of measuring technology in machining process and roles of on-machine measurement

は知ることができない、系統誤差 (systematic error) の評価は難しく、またその存在を見つけることさえ困難な場合が多い。しかし系統誤差の要因をあらかじめ特定し、その大きさが明らかである場合は補正によって除去可能である。従って、複数のインプロセス/機内・機上測定によって、加工誤差の要因を実時間で特定することを可能とする知能化工作機械は、従来の効率駆動型ものづくりにおける生産システムの要素技術として重要な概念であるといえる。包括的なマルチセンサを利用した加工プロセス監視、認識や予測を可能とする、知能化工作機械の基礎的概念は、森脇⁷⁾によって1993年頃に提示されている。それ以来、実用的なシステム化をめざすインプロセス/機内・機上計測—加工制御に関する研究開発が活発になり、Tool Condition Monitoring (TCM) におけるセンサの高度化、信号処理法、意思決定戦略など、応用分野への展開・拡張事例が増えている。インプロセス/機内・機上計測の技術課題におけるこのような研究動向は、加工プロセスの主要な要素である工具・工作物・工作機械の各要素を対象とした個別の課題解決に加え、これらの要素間の相互作用によって生ずる境界領域の課題が着目されていることを示すものである。すなわち、インプロセス/機内・機上計測の実用性の観点から、

加工プロセスの高精度化のみならず、高速化、多機能化、知能化などの複雑で高度な要求に対する適応性が求められている。加工プロセスの複雑化とともに、工具・工作物・工作機械の相互作用もプロセス中において複雑に変化するようになり、それらの境界領域におけるインプロセス/機内・機上計測の課題も多様化・高度化している。

高度機能部品の実用化に必要な不可欠な3次元自由曲面形状、マイクロ複雑形状、ナノ微細表面パターンなど新たな次元の超精密加工に対する精度向上の要求に加え、工作機械の多軸化・複合化、加工プロセス全体の知能化などを背景として、インプロセス/機内・機上計測の測定対象は幾何学量から状態量の多岐にわたり、さらにその課題は多様化とともに拡大している。**図9**に、工具・工作物・工作機械を主要要素とするオンマシンシステムにおける、インプロセス/機内・機上計測技術の位置づけと拡がりを総括した。各要素の境界領域と計測技術の関係性を示すとともに、加工プロセス中において時間変化する現象を短周期、中程度の周期および長周期に分け、それぞれの時間スケールにおける位置づけを示した。インプロセス/機内・機上計測の関係性は、2つの要素を結び輪帯と3つの要素に及ぶ輪帯を示してあるが、前者は要素間の相互作用



用を、後者は3つの要素が関与する複雑な相互作用の領域を表す。また、全体を取り囲む輪帯は加工雰囲気や人手による作業を表す。さらに、計測目的を加工動特性の評価、加工状態監視および寸法、形状、変位などの幾何学量計測に分類し、研究開発事例の動向を年代順に[a]から[p]で表している。例えば、[a]工具摩耗の機上計測（1976年）の場合、工具と工作機械の境界領域において、長期間で変化する加工状態監視を目的とする機内・機上計測技術として位置づけられる。なお、要素間の相互作用以外の課題解決に相当するインプロセス／機内・機上計測技術については、今後の課題として要因のみを示してある。

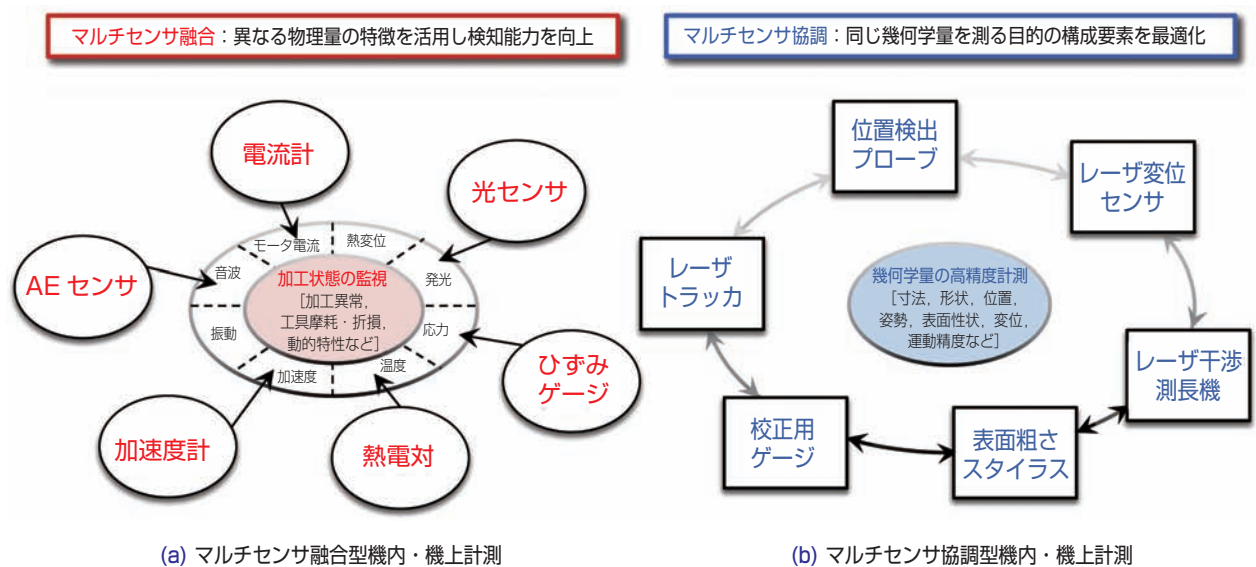
4.2 新たなインプロセス／機内・機上計測戦略

マルチセンサによる新たなインプロセス／機内・機上計測の基本的な考え方として、「マルチセンサ融合」と「マルチセンサ協調」による計測情報の高度化の例を図10に示す。大型精密部品の製造工程では、製造現場の工作機械に対してインプロセス／機内・機上計測システムを適正に実装・配置する戦略が求められるため、「マルチセンサ融合」および「マルチセンサ協調」の考えに基づいて、それぞれ加工監視システム⁸⁾ 9)、およびオンマシン寸法計測システムが構築され、工作機械に実装されている。

図10(a)は、加工状態監視を目的としたマルチセンサ融合型機内・機上計測の考え方を示している。複数のセンサの特徴量を組み合わせて状態推定を行うこと

によって、異なる物理量の特徴を活用し加工監視における検知能力を向上することができる。長時間を要する加工プロセスにおいて、それぞれのセンサによって得られる計測情報（時間変化する物理量）を実時間で統合する。時間周波数解析に基づいて、異常と関連する特徴量を高い感度で検知する高度な信号処理法を駆使し、加工監視における適応的な閾値管理が可能となる。その高い環境適応性と異常兆候検知能力によって、びびりや工具損傷などのプロダクション・クオリティに関わる危険性を低減し、欠陥のないプロセスを実現するための最重要な計測戦略である。また、将来的には、切削現象、工具経路、工具・工作物形状などの多岐にわたる解析技術や不確かさを考慮した推定手法と加工監視情報を統合し、プロセスモデルに基づいた加工条件の最適化を図ることにより、プロダクション・クオリティの維持と工程能力向上の両立も可能となることが期待される。

図10(b)は、幾何学量の高精度計測を目的としたマルチセンサ協調型機内・機上計測の考え方を示している。同じ幾何学量（寸法、形状、姿勢、位置など）を測る目的の複数の構成要素を最適化し、それぞれの計測要素に応じた役割分担によって測定の高精度化を図る。大型精密部品加工用の大型CNC旋盤に統合されたオンマシン寸法計測システムの例では、レーザ干渉計、レーザトラッカ、タッチトリガプローブおよびブロックゲージから構成され、絶対長さ校正が可能な高精度なマルチセンサ協調型機内・機上計測が実現されている。



(a) マルチセンサ融合型機内・機上計測

(b) マルチセンサ協調型機内・機上計測

図10 マルチセンサによるスマート機内・機上計測
The smart on-machine measurement system using multi-sensor fusion and cooperation

蒸気タービンロータの加工工程では、ワークを工作機械から測定機へ移動する作業そのものが困難であるため、従来、大型のマイクロメータなどによる手動の機上計測が行われてきた。そのため、計測工程数が多く、不確かさが増大するという問題があった。そこで、製造工程の効率化と加工品質保証を実現するため、高精度な機上計測システムが開発された。図11に大型CNC旋盤上における蒸気タービンロータ（最長10m以上、直径1m以上、寸法公差0.1mm以下）を対象とした、「マルチセンサ協調」による大型構造部品の機内・機上計測システムの一例を示す。フローリング測定方式によって、蒸気タービンロータのホイール位置、および軸の直径を大型CNC旋盤上で絶対測定するシステムの構成¹⁰⁾を示している。レーザトラッカを用いたインライン測長計が外部座標系として導入され、工具移動台に無線式タッチトリガプローブが実装されている。また、部品・機械要素ともに収縮・膨張の影響を受ける(ロータが20℃ から10℃変化すれば1mあたり約0.1mmの影響)ため、ブロックゲージを用いた絶対長さの校正方法を備え、かたより誤差の補正を行っている。

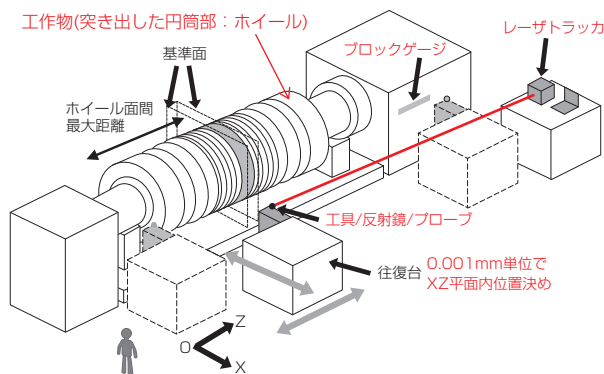


図11 蒸気タービンロータの大型CNC旋盤機上計測システム
The developed on-machine measuring system
for a steam turbine rotor on CNC turning machine

4.3 ホリスティック計測の考え方

イノベーション駆動型ものづくりの基盤となる予測型生産システムでは、プロダクション・クオリティ管理を実現するための加工計測技術革新、すなわち戦略ツールとしてのスマートインプロセス/機内・機上計測への展開が求められる。その基盤となる計測戦略は、「マルチセンサ融合」や「マルチセン

サ協調」をより高度に発展させ、異なった計測原理の統合とマルチスケールのデータ融合に基づいたホリスティック計測 (Holistic measurements)¹¹⁾によって、“ものづくりに関わるあらゆるプロセスの情報化”を実現することである。ホリスティック計測を実現するためには、新しい不確かさ評価の理論や校正技術から従来の計測原理を包括する新しい計測原理とそれらの間の互換性に関する幅広い研究が求められる。

具体例として、知能化されたマルチセンサCoordinate Measuring Machine (CMM) の基本概念が示されている¹²⁾。ホリスティック計測は、メトロロジーX線CT (ポリウム計測) を搭載するマルチセンサCMMなどの新たな計測技術を駆使し、CAD/CAE/CAM/CATとの高度な連携による計測データ融合技術の高度化を進めることによって、相互にインターネットにつながった測定システムが高度なプロダクション・クオリティ管理の基盤を構成する。この計測融合技術の概念をインプロセス/機内・機上計測に展開した新たな戦略的加工計測が、実時間性、広域性、多点同時性などの環境適応型計測を担うスマートインプロセス/機内・機上計測である。図12に示すように、X線を含む広義の光学式非接触式測定技術は急速に発展しており、表面微細形状、3次元形状、3次元内部構造までを包括できる測定技術が開発されている。特にメトロロジーX線CTの技術は急速に進んでおり、インラインでの活用や組立工程チェックへの適用も提案されている¹³⁾。これらの計測技術を駆使したマルチセンサCMMを構築する場合、マイクロから大型に至る複雑な3次元形状からポリウム計測データを融合する3次元測定データ融合技術が必要となる。すでに、計測データ融合技術開発¹⁴⁾の取り組みも進んでいるが、一方で、より複雑で膨大な情報量へと拡張された3次元測定データを構築するためには、不確かさや標準、校正法などの計測データのクオリティや、計測の基本量である1次元の長さや変位、角度からスケールが異なる2次元の表面微細形状などのマルチスケールのデータ融合に関連する技術課題などが残されている。

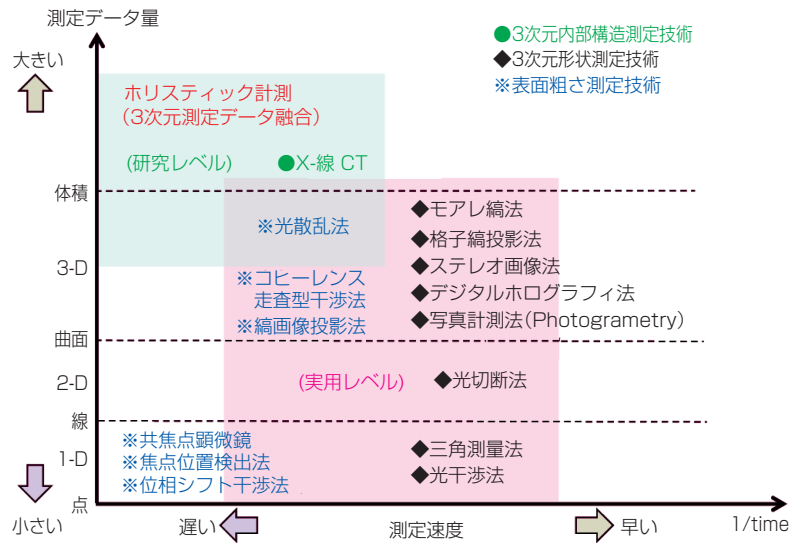


図12 3次元計測技術の展開
Rapid progress in three dimensional measurement technologies for industrial measurement

5. スマート加工・計測機械の将来展望と課題

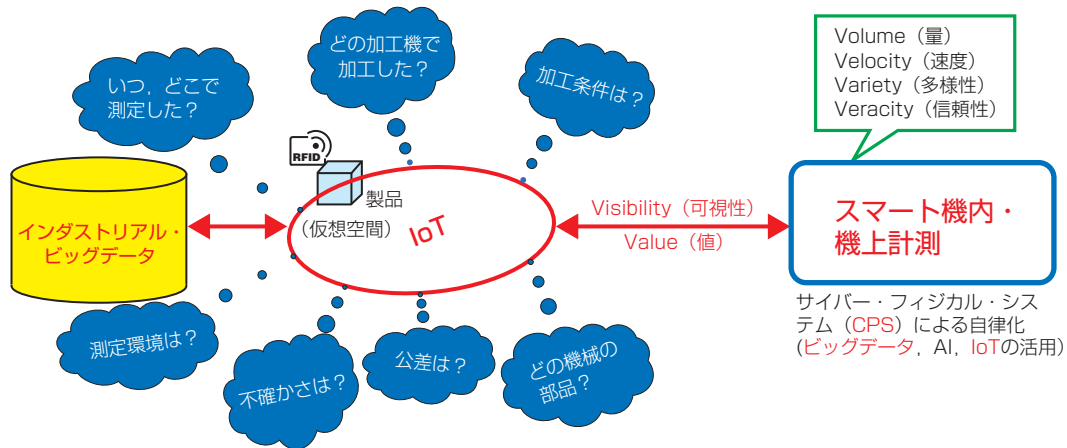
5.1 第4次産業革命と予測型生産システム

ドイツではIndustry4.0、アメリカではインダストリアル・インターネットが推進されており、情報処理技術の急速な技術革新によって、製造プロセスだけではなく、製品ライフサイクル全般に及ぶ大きな革新が期待される点で、これまでの産業革命とは一線を画する破壊的変革性を有している。第4次産業革命の最終目標は、製造プロセスの全体最適化や効率化、予知保全などの発展に基づく、新たな予測型生産システムの実現である。すなわち「目に見えない価値」のギャップを満たす革新的な製品による新たな価値創出や、大量生産から完全なカスタマイズ生産（一品生産）への展開である。このような従来とは全く異なったしくみの製造プロセスにおいては、大量生産で活用されてきた品質管理手法よりプロダクション・クオリティの適合性が高い。さらに、第4次産業革命の基本概念では、まず、製造システムのメンバーである製品及び個々の製造設備などに、自己認識、自己保全、自己予測などの自律性を本質とするスマート化が求められ、自己認識能力による予測型生産システムの構築が鍵となる。スマート化のメカニズムとして、センサ技術、プロセスの小型化・高速化、およびクラウドの普及などにより、すべてのモノをデータ化してインターネットにつなぐ、モノのインターネット（IoT: Internet of Things）とIoTによって集積されるインダストリア

ル・ビッグデータ、およびそれ利用したサイバー・フィジカル・システム（CPS: Cyber-Physical System）が中心的役割を果たす¹⁵⁾。また、情報のリソースとしての役割を果たす計測技術に戦略ツールとしての変革が要求される。特にスマートインプロセス/機内・機上計測技術は、コントローラやネットワークシステムと共に生産情報の重要で高品質な情報源であり、測定機にも自己認識、自己予測など、戦略ツールとしての技術革新が求められる。

5.2 スマートインプロセス/機内・機上計測ネットワーク

マルチセンサを利用した機内・機上計測による工作機械の知能化というアプローチは、スタンドアローンの工作機械を対象とする概念である。知識ベース化や機械への組み込みによる個別の加工・計測システムの効率化を目的とするものであり、あくまでも効率駆動型ものづくりの範疇にある。これに対し、イノベーション駆動型のものづくりでは、環境適応型のインプロセス/機内・機上計測の知能化、すなわちスマートインプロセス/機内・機上計測との融合によるオープンな知能化工作機械が求められている。ホリスティック計測を基盤とするマルチセンサ融合やマルチセンサ協調の構成が、計測コンテンツ（測定環境、測定条件、測定量、測定対象、加工条件、要求精度、公差、不確かさなどの情報）に応じて実時間で変化することによって高度な予測を実現する。その仕組みは、図13に



*RFID(Radio Frequency Identifier): IC タグ

図13 仮想空間でつながるスマートインプロセス/機内・機上計測
Connecting data of smart in-process/on-machine measurement in cyber physical space

示すような、仮想空間でつながるスマートインプロセス/機内・機上計測のネットワークに基づいている。すなわち、IoTに繋がった知能化工作機械を通して計測コンテンツや計測情報を共有し、プロダクション・クオリティを管理する予測型生産システムを稼働する。スマートインプロセス/機内・機上計測には、そのもたらす計測情報が、量、速度、多様性、信頼性の条件を十分に満足できる能力が要求され、予測型生産システムにおける自己認識、自己保全、自己予測などの機能はCPSによって獲得される。

6. まとめ

最新の「2017ものづくり白書」¹⁶⁾では、第4次産業革命へ向けた我が国製造業の取り組みや対応について報告されている。その中で、ネット空間での活動から生ずるバーチャルデータの利活用は、データの「量」での勝負となっており、すでに米国IT系企業の独壇場となっているのに対し、工場設備の稼働データなど、実世界での活動についてセンサなどを通じて取得されるリアルデータの利活用については、データの「質」での勝負となる可能性があり、今後の対応次第では製造業企業が主導権を握ることができる可能性がある、と述べられている。実際、図14に示した、生産プロセスのデータ収集に関する調査結果においても、個別工程の機械から、ライン、生産工程全般の稼働状態の「見える化」、トレーサビリティ管理、海外工場における生産プロセスデータ等の収集に関する取り組みの推移が全て活発化する傾向となっていることから、今後、

高品質な情報源としてのスマートインプロセス/機内・機上計測の重要性がますます高くなっていくと考えられる。さらに、最新のデジタル技術を使うことによるソリューションは、図15に示す「エンジニアリングチェーン」と「サプライチェーン」であるとされており、スマートインプロセス/機内・機上計測データを迅速にフィードバックすることによって、それらのチェーンを効率化するしくみも示されている。一方、融合化・複雑化・大規模化する計測データの信頼性向上や高品質化など、スマートインプロセス/機内・機上計測への要求もますます高度になってきており、ビッグデータ、AI、IoTなどを駆使した予測型生産システムへの適用性の向上が急務の課題であるといえる。

図16は第4次産業革命に至るまでの加工計測技術の発展と、プロダクション・クオリティ管理の基盤となる戦略的加工計測への変革を示している。加工計測技術はこれまで、検査の自動化、生産管理、生産の自動化などの要求を満足する生産システムの要素技術としての役割を担ってきた。その過程で測定精度・速度の向上、1次元から3次元計測への高度化など、測定能力の革命的向上が進められてきた。しかし、第4次産業革命に求められる測定技術は、従来技術の延長ではなく、根本的な変革が必要とされている。すなわち、知能化されたインプロセス/機内・機上計測による、実時間ホリスティック計測を基盤として、IoT、インダストリアル・ビッグデータ、CPSなどを駆使した予測型生産システムは、スマート化による生産要素の自己認識という究極のプロダクション・クオリティ管理を実現すると考えられる。

【国内工場では何らかのデータ収集を行っているか】

【データ収集の「見える化」やトレーサビリティ管理等の生産プロセス改善・向上などへの活用】

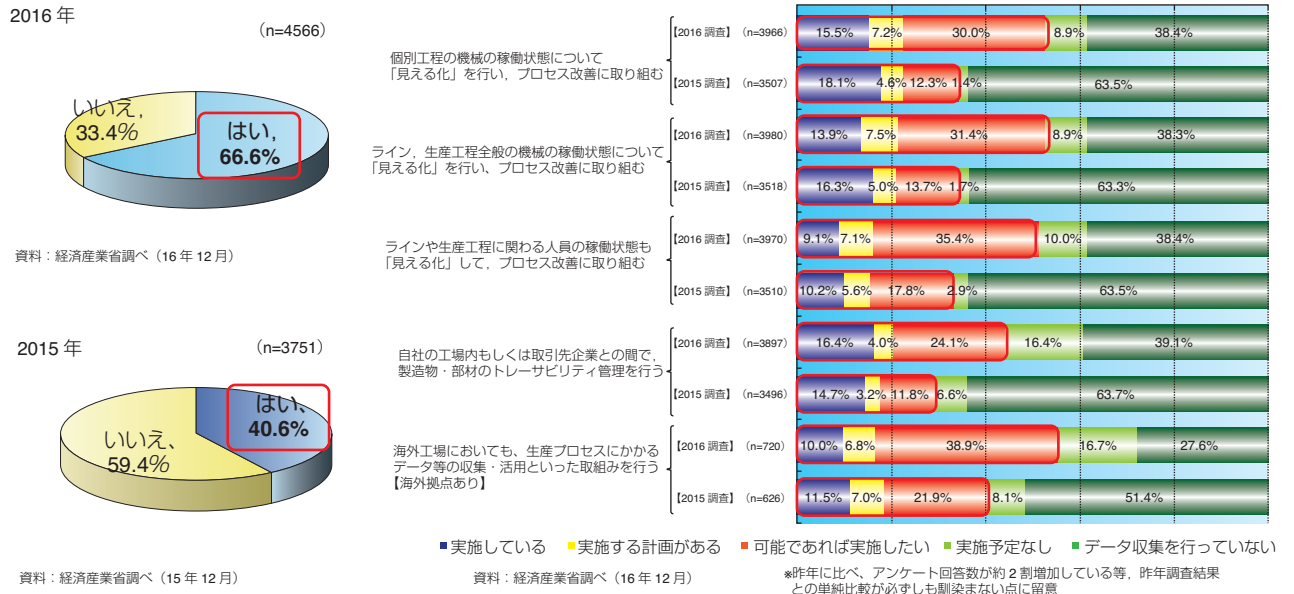


図14 生産プロセスのデータ収集に関する調査結果¹⁶⁾
 Research results on data collection of production process

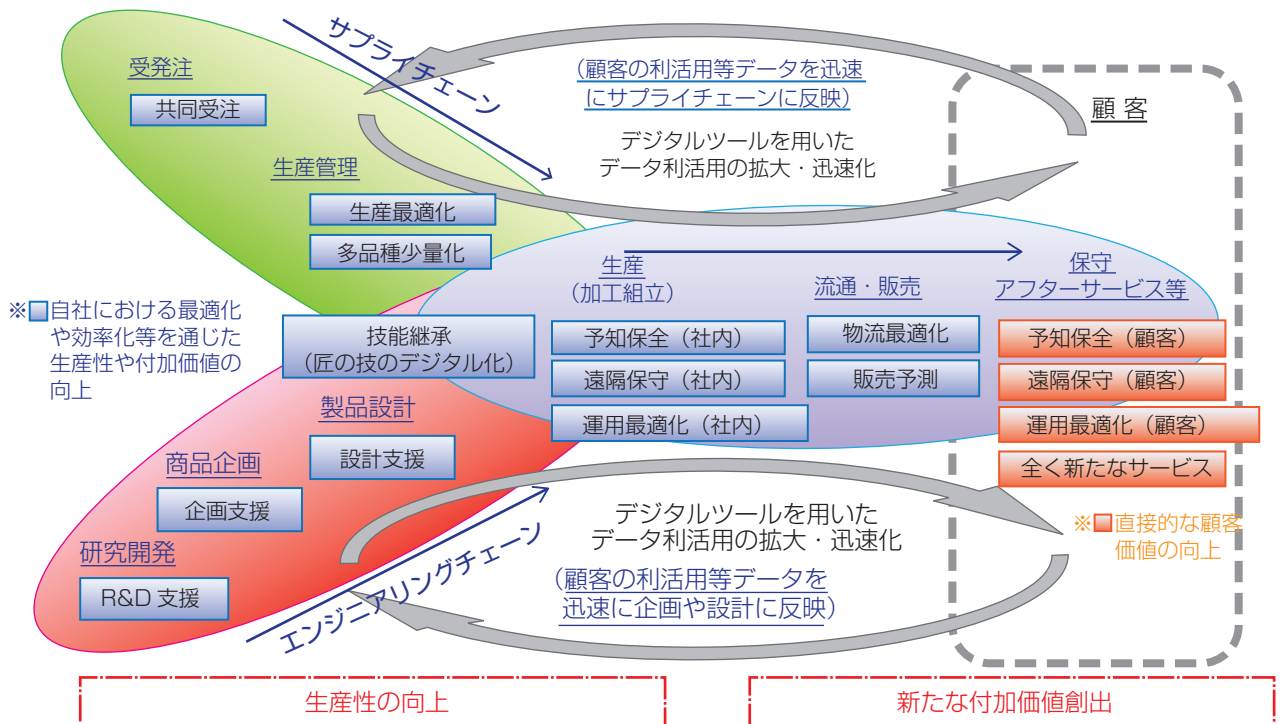


図15 第4次産業革命への対応状況¹⁶⁾
 Effective utilization of IOT in Industry 4.0

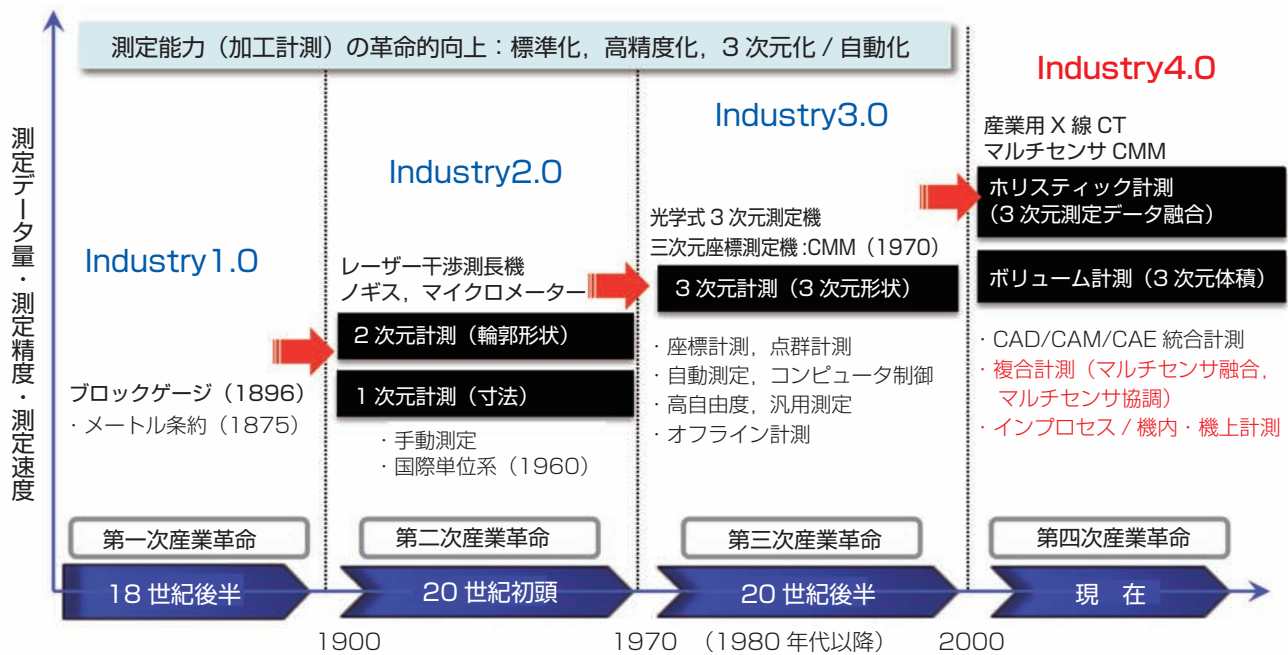


図16 第4次産業革命と戦略的加工計測への変革
 Revolution of strategic measurement technology in production inspired by Industry 4.0

参考文献

- 1) 福田収一, 「価値創造学」, 丸善, 2005.
- 2) Taniguchi, N., Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing, Annals of CIRP, Vol. 32/2, 1983), 2.
- 3) A. Weckenmann, M. Rinnagl, "Acceptance of processes: do we need decision rules?", Precision Engineering, Vol.24, (2000), 264-269.
- 4) International Organization for Standardization, "Guide to Expression of Uncertainty of Measurement", JCGM 100, (2008).
- 5) 経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省, 2015年版ものづくり白書概要; 平成26年度ものづくり基盤技術の振興施策 (概要), (2015)
- 6) Marcello Colledani, Tullio Tolio, Anath Fischer, Benoit lung, Gisela, Lanza, Robert Schmitt, Józef Váncza, Design and management of manufacturing systems for production quality, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.63/2, (2014), 773-796.
- 7) Byrne G, Dornfeld D, Inasaki I, Ketteler G, König W, Teti R, Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application, Annals of CIRP, Vol. 44/2, (1995), 541-567.
- 8) Masahiro Uekita, Yasuhiro Takaya, Tool condition monitoring for from milling of large parts by combining spindle motor current and acoustic emission signals, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.89, Combined 1-4, (2017), 65-75.
- 9) Masahiro Uekita, Yasuhiro Takaya, Tool condition monitoring technique for deep-hole drilling of large components based on chatter identification in time-frequency domain, Measurement, Vol.103, (2017), 199-207.
- 10) Masahiro Uekita, Yasuhiro Takaya, On-machine dimensional measurement of large parts by compensating for volumetric errors of machine tools, Precision Engineering, 43, (2016), 200-210.
- 11) A. Weckenmann, THE ROLE OF METROLOGY IN THE EXCHANGE OF GOODS AND IN THE DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGIES, Proceedings of the 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, (2010), 1-4.
- 12) A. Weckenmann, X. Jiang, K. -D. Sommer, U. Neuschaefer-Rube, J. Seewig, L. Shaw, T. Estler, Multisensor Data Fusion in Dimensional Metrology, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.58/2, (2009), 701-721.

- 13)L. De Chiffre, S. Carmignato, J.-P. Kruth, R. Schmitt, A. Weckenmann, Industrial applications of computed tomography, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.63/2, (2014), 655-677.
- 14)A. Weckenmann, X. Jiang, K. -D. Sommer, U. Neuschaefer-Rube, J. Seewig, L. Shaw, T. Estler, Multisensor Data Fusion in Dimensional Metrology, Annals of the CIRP, Vol.58/2, to be published, 2009.
- 15)ジェイ・リー, 「インダストリアル・ビッグデータ 第4次産業革命に向けた製造業の挑戦」, 日刊工業新聞社, 2016.
- 16)経済産業省, 厚生労働省, 文部科学省, 2017年版ものづくり白書概要; 平成28年度ものづくり基盤技術の振興施策 (概要), (2017)

〈著者紹介〉

高谷 裕浩 (たかや やすひろ)

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授 博士 (工学)

1992年3月	北海道大学 大学院工学研究科 精密工学専攻 博士後期課程 修了 工学博士
1992年4月～1995年6月	大阪大学 工学部 産業機械工学科 助手
1995年7月～1997年6月	大阪大学 工学部 産業機械工学科 講師
1997年7月～2006年3月	大阪大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻 助教授
2006年4月～現在	大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

【専門分野】

精密加工計測, 光応用ナノ計測, 光応用ナノ・マイクロ加工

【主な学会・団体等の活動】

公益社団法人 精密工学会: 知的ナノ計測専門委員会委員長
 一般社団法人 日本機械学会: フェロー, 生産加工・工作機械部門 第1企画委員会委員長
 公益社団法人 砥粒加工学会
 国際生産工学アカデミー (CIRP): Fellow
 国際計測連合会議 (IMEKO): TC14 Chair
 一般社団法人 型技術協会: 理事 (副会長)
 公益財団法人 三豊科学技術振興協会: 顧問 (ほか多数)

転がり軸受とIoT – NTNのIoTへの取組み – Rolling Bearing and IoT – NTN's Approach to IoT -

江上 正樹* Masaki EGAMI



IoTの普及に伴い、さまざまな機器からデータが収集・解析され、サービスや生産性の向上、適切なメンテナンスによる機会損失の低減などに活用されている。転がり軸受は輸送機器、家庭電化製品、産業機械など、身の回りのあらゆる機器に使用されており、データ収集の要素として最適なもののひとつとしてとらえることができる。本稿では転がり軸受を起点としたセンシングに焦点を当て、NTNのIoTへの取組みについて展望する。

With advancement of IoT, big data collected from various types of equipment are utilized to improve service and productivity, to reduce opportunity loss by providing appropriate maintenance and so on. Rolling bearings are integrated and used in many familiar applications such as transportation vehicles, electrical products, and industrial machinery. Therefore, rolling bearings are considered as one of the most suitable data collecting elements. This report introduces NTN's approaches to IoT and future prospects, focusing on sensing technologies related to rolling bearings.

1. はじめに

近年、ドイツではIndustrie 4.0を、アメリカではIndustrial Internetを起点に、Internet of Things (IoT) が急速に普及している。日本でも、「超スマート社会」を未来の姿として描き、政府主導でSociety 5.0が提唱・推進されている¹⁻²⁾。IoTでは、あらゆる機器からデータを収集し、ビッグデータとして解析することにより、当初は製造業の生産性の向上やメンテナンスの適正化による機会損失の低減などに主眼が置かれていたが、人々の生活の質の向上をはじめ、さまざまな分野で活用しようとする動きが進められている。

転がり軸受は機械要素として、自動車、鉄道車両、航空機などの輸送機器、建設機械、工作機械、ロボットなどの産業機械、コンピュータ、プリンタなどの情報・事務機器、冷蔵庫、エアコン、洗濯機などの民生用電気製品など、ありとあらゆる機械に組み込まれ、さまざまな回転運動を支えている。

NTNでは、1990年代の初めに回転センサを組み込んだ転がり軸受ユニットを開発し、産業機械に使用いただき、最近では、回転センサの分解能を従来比40倍に高めたものや、絶対角度の検出が可能なセンシングシステムを開発し、ロボット分野を中心に応用展開している。

振動による機械の異常検出に関しては、振動加速度の実効値の評価から始まり、最近では機械学習などの人工知能 (AI: Artificial Intelligence) の活用による異常検知の高度化を図っている。

また、機器の異常診断システムとしては、2012年に風力発電装置用のCondition Monitoring System (CMS) として“Wind Doctor®”を開発し、日本国内の発電設備に取り付け、ダウンタイム削減などを目的に活用いただいている。

本稿では、NTNにおけるIoT関連の取組みとして、これらの技術について紹介すると共に、今後の展望を述べる。ここで取り上げる技術や商品の一部については別稿で詳細解説されており、重複する点、ご了承いただきたい。

2. NTNの回転検出技術と応用商品

2.1 回転センサ付軸受

回転検出には、光学式と磁気式のセンサが多く用いられ、用途によって使い分けられている。光学式は検出感度に優れる半面、価格が高く、汚れなど、耐環境性が弱いため、NTNでは転がり軸受の使用環境を考慮し、磁気式のセンシングシステムの応用を進めてきた。転がり軸受に、N極、S極を多極着磁した磁気リングと、磁気センサICを対向させて取付けることで、回転速度と回転方向が検出可能な、インクリメンタル方式の「回転センサ付軸受」を量産している³⁻⁴⁾。図1は産業機械用の回転センサ付軸受の例で、フォークリフトの駆動モータの速度や回転方向の検出などに実用されている。他に、油圧ショベルのブームの回転角度検出用にユニット化した製品もある⁵⁾。

図2は自動車のハブベアリングにアンチロックブレーキシステム（ABS）の回転検出用着磁リングを組み込んだもので、着磁リングを軸受シールと一体化している。材質はゴムで、磁性粉末が練り込まれている。この着磁リングに磁気センサICを対向させて回転を検出するが、本システムはNTN-SNRが“Active

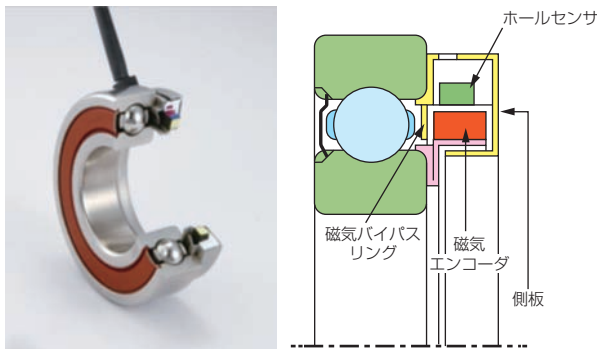


図1 回転センサ付軸受
Rolling bearing with rotational sensor

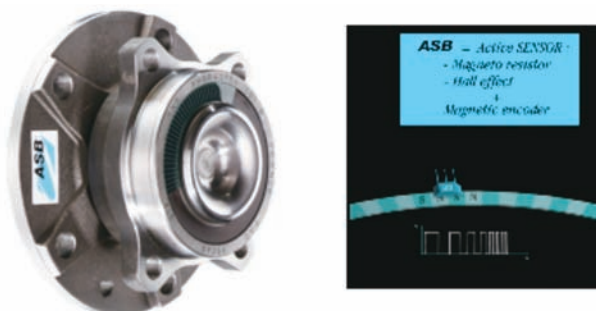


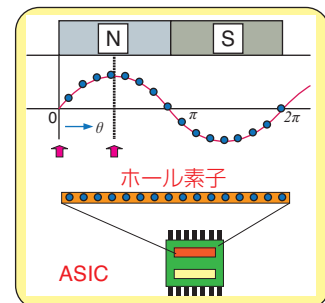
図2 磁気エンコーダ内蔵ハブベアリング
Hub bearing with magnetic encoder

Sensor Bearing (ASB®)”の商品名で製品化したもので、現在も自動車用ABSのデファクトスタンダードとしてグローバルで幅広く採用されている。

2.2 高分解能回転センサ

NTN-SNRでは、2.1項の着磁リングを用いながら回転検出分解能を従来比40倍に高めた高分解能回転センサを開発した⁶⁾。センサの構造と測定原理を図3に示す。本センサは、複数の磁気センサ素子と信号処理回路を集積した専用ICにより、磁極間隔以下の細かな角度を最大40倍まで逓倍して検出することが可能である。本センサを転がり軸受と組み合わせた例を図4に示す。

本センシングシステムは、実用化されつつある自動車の運転支援システムにおいて、車両の周辺の障害物の検知に用いられるLight Detection and Ranging (Lidar) に採用された。本システムではレーザー光をミラーでスキャンさせて、障害物に反射したレーザー光を検出することにより障害物を検知する。本センシングシステムはミラーの回転機構に組み込まれ、正確な角度制御の実現に貢献している。



エンコーダ (48 極対)	N S	48 極対
従来出力 (48 パルス)	[Low Resolution Pulse Train]	分解能 7.5°
開発品出力 (1920 パルス)	[High Resolution Pulse Train]	分解能 0.18°

図3 高分解能回転センサ素子
Sensing element for high resolution rotational sensor

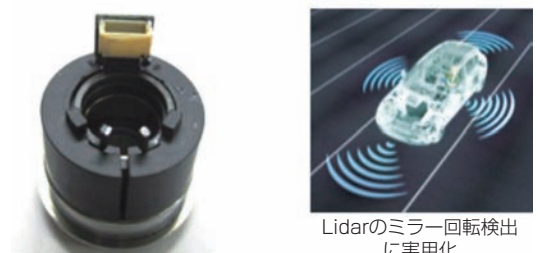


図4 高分解能回転センサ付軸受
Ball bearing with high resolution rotational sensor

本システムを自動車のABSのセンシング部に組み込み、実車試験によりタイヤの回転を検出した例を図5に示す⁷⁾。図には従来のABSセンサの信号も併記した。図左端の時間帯において、本システムでは発進時のタイヤの回転がより詳細に検出されていることがわかる。今後普及が予想される自動運転においては、路面状態やタイヤの回転状態を精緻に測定する必要があり、本センシングシステムの適用が期待される。

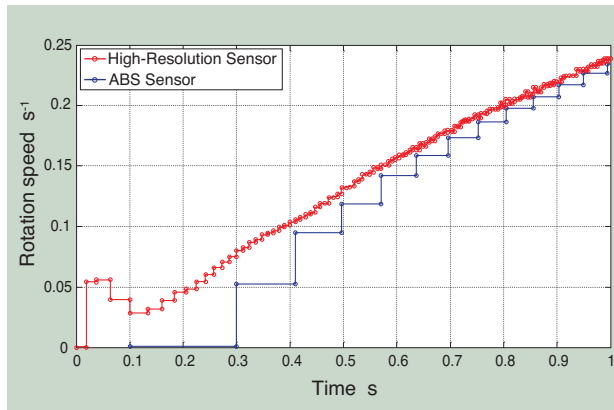


図5 実車試験での発進時の回転信号
Rotational signal when starting a vehicle

2.3 複列磁気リングによる絶対角度センシング

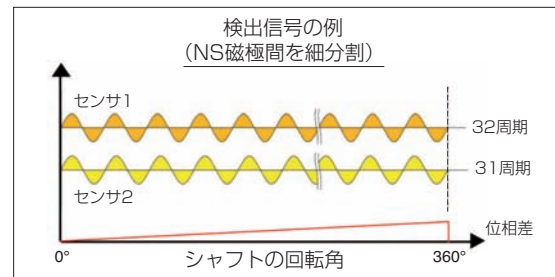
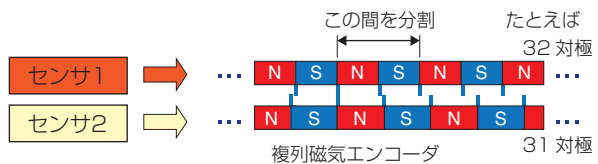
NTNでは、これまで培った磁気式回転センサ技術をもとに、専用の磁気センサICと組み合わせることにより、新たに回転軸の絶対角を高分解能かつ高精度に検出できる「複列磁気リング」を開発した⁸⁾。これは円環状芯金に、磁性材料を混練した未加硫ゴム材料を加硫接着したもので、ゴム磁性体部に2つの磁気トラックを形成している。

図6はラジアル着磁タイプの例である。図6(b)に示すように、二列にそれぞれ異なる数の磁極を等間隔に位相差を設けて着磁する。二つの磁気パターンの位相差から角度位置を正確に演算（バーニヤ原理）し、360度範囲の絶対位置を検出する。これについては別稿で詳細に解説している。

複列磁気リングは、薄型省スペース設計が可能で、かつ中空構造により内部に配線ケーブルなどを通すことが可能である。今後、実用化が急速に進むことが予想される協働ロボットの関節部の角度やトルク検出への応用が期待されている（図7）。



(a) 外観 (b) 着磁パターン



(c) 絶対角度の検出原理 (例：32-31 極対)

図6 複列磁気リング：ラジアル着磁タイプ
Multi track magnetic ring – Radial type

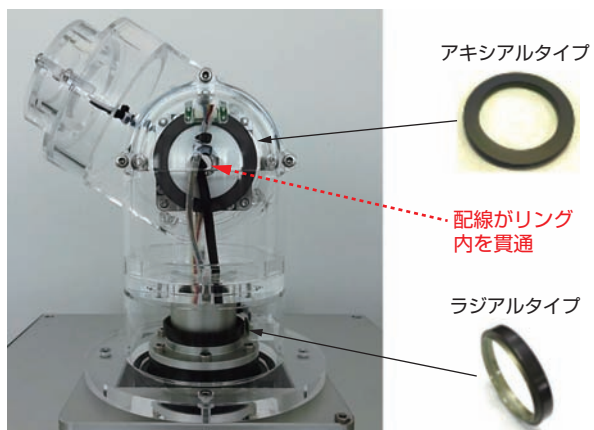


図7 ロボットアームモデルの関節に組み込んだ複列磁気リング
Multi track magnetic ring installed in joint of robot

3. 転がり軸受の異常検知技術

発電設備、プラント設備や鉄道車両など、大型で高い信頼性や安全性が求められる分野では、周辺の機械部品を含めた運転状態のモニタリングが必要とされる。回転軸の振動状態、回転速度、温度などをセンシングするために、軸受もしくは軸箱にセンサが組み込まれる。検出した回転速度と振動周波数から振動源を推定、振動増加の兆候を検知し、故障の可能性を早期に警告する予防安全機能が実現されている。

現在行われている転がり軸受の異常検知は、振動加速度の実効値の評価やAcoustic Emission (AE) を利用したものなどが代表的である⁹⁾。転がり軸受の正常状態から破損に至る振動加速度の推移を図8に示す¹⁰⁾。軸受が正常な状態（ステージⅠ）では軸受周辺の振動加速度は低いレベルで推移し、損傷が発生すると上昇する（ステージⅡ）。その後、損傷が一定のサイズに達すると、しばらくは振動加速度レベルが停滞する（ステージⅢ）。損傷がさらに進展すると振動加速度が増加し（ステージⅣ）、やがて急激に上昇して機能停止に至る。

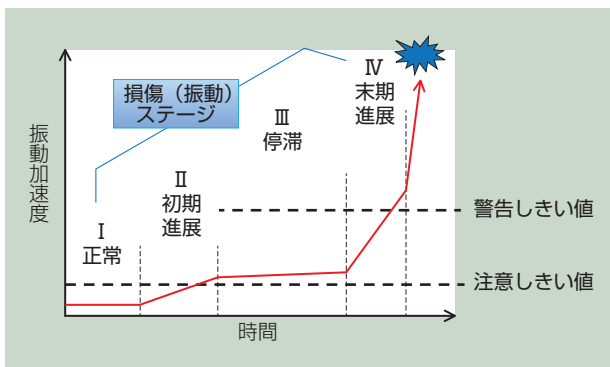


図8 転がり軸受の損傷による振動の推移
Vibration transition of rolling bearing with damage growth

図8の例では、振動加速度の実効値にしきい値を設けて、注意および警告信号を出す単純なモデルを示しているが、従来手法では、一時的な振動上昇やノイズの影響をキャンセルするために、初期の暗振動より十分大きい値をしきい値とする必要がある。信号の実効値が大きくなった時点ですでに相応のサイズの損傷が生じており、損傷の進展速度によっては、使用停止までの期間が短く、メンテナンス計画に支障をきたす恐れもある。

そこで、NTNでは、異常診断の高度化を目的として、東京大学、産業技術総合研究所（産総研）などとともにNEDOのプロジェクトに参画して、大型風力発電装置用軸受の損傷検出に取り組んでいる。本プロジェクトでは、東京大学の指導の下、国内各所の風車にNTN製コンディションモニタリングシステム“Wind Doctor®”を設置して長期間にわたり振動を計測、収集した。通常のモニタリングで検出した事例について、さらに早期の兆候をつかむため、産総研が独自開発したAIによって信号を分析している。図9は、産総研の助言を受けてNTNが開発したAIを援用することにより、従来手法に比べ、異常検知のタイミングを早期化できた事例である。

また、風車に限らず、軸受の損傷が社会的損失をもたらすアプリケーションは多々あり、初期の損傷あるいはその予兆の検出と同時に、使用不可となるまでの期間が予測できれば、計画的なメンテナンスが可能となり、稼働率の低下を最小限に抑えることができる。現在、NTNでは、2017年9月に大阪大学に開設したNTN次世代協働研究所を通じて、損傷の進展状況を予測するAIを開発中である。

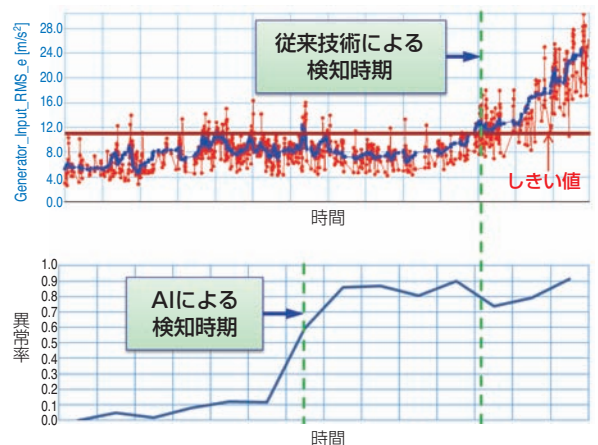


図9 AIによる異常検知の早期化事例
Example of early detection of failure by utilizing AI

4. NTNのIoTへの取組みの紹介

4.1 風力発電機向け状態監視システムCMS

NTNでは、2012年に風力発電装置の稼働率向上をバックアップするための状態監視装置として“Wind Doctor®”を開発し¹¹⁾、日本国内で展開を進めている。風力発電装置のナセル内に各種の計測センサとデータ収集装置を設置する（図10）。

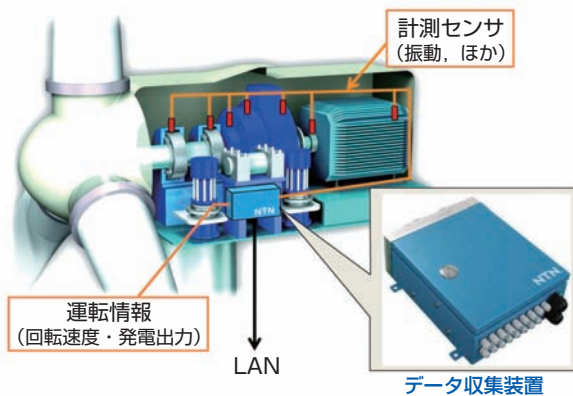


図10 “Wind Doctor®” におけるナセル内の設置機器
Installation equipment of “Wind Doctor®”
in wind turbine nacelle

“Wind Doctor®” のシステム構成を図11に示す。収集したデータはインターネット上の専用サーバに記録され、各種の信号処理やトレンド分析により、装置の異常や部品の損傷検出結果が通知される。3項でも述べたとおり、今後はAIを活用した異常検知アルゴリズムを適用して診断能力を向上させ、より綿密な計画的保全が実現できるようにシステム全体を進化させていく(図12)。



①風力発電装置内センサ+②データ収集装置+③専用サーバ+④解析・診断

- ①主軸受, 増速機, 発電機に約10個のセンサを取り付ける
- ②各センサ信号をデータ収集装置で2時間おきに計測する
- ③インターネット回線で専用サーバにデータを送信, 蓄積する
- ④データ群を解析して正常/異常を診断する

図11 “Wind Doctor®” のシステム構成
Components of “Wind Doctor®” system



図12 NTNにおけるCMSの将来像
Future image of NTN's CMS

4.2 自然エネルギーとIoT

NTNでは、2016年に自然エネルギー商品事業部を設立し小型発電装置の事業展開に取り組んでいる。風力と太陽光の二つの自然エネルギーを利用したNTNハイブリッド街路灯およびNTNマイクロ水車(小水力発電装置)の販売を開始した。三重県桑名市の先端技術研究所敷地内の「グリーンパワーパーク」はその取組みの一環として設立した(図13)¹²⁾。NTNが開発したNTN垂直軸風車を3基、NTNマイクロ水車を1基、NTNハイブリッド街路灯を3基設置しており、パーク内で、これらを活用して発電したエネルギーを電気自動車(EV)や野菜工場(グリーンパワーファーム)などへ循環させるエネルギー循環型モデルを紹介している。

敷地内にはIoTルーム(モニタリング&コントロールセンタ)があり、「発電・蓄電・消費」それぞれの情報をモニタリングする。本施設のIoTを利用し、高効率を追求したエネルギーマネジメントシステムの開発にも取り組んでいる。

また、大阪大学との「ITを用いた防災・見守り・観光に関する仕組みづくりの共同研究」において、「独立電源通信網みまもりロボくんⅢ」の実験機(図14)を大阪大学に設置させていただき、実証試験を行って

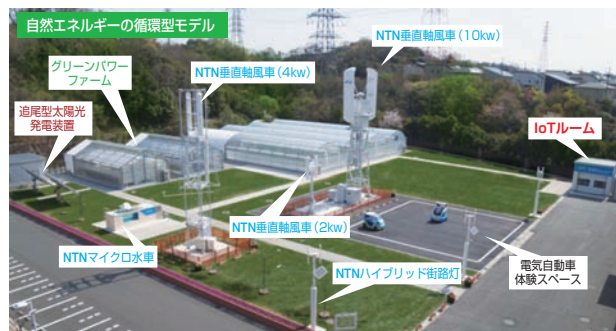


図13 グリーンパワーパーク
Green power park



図14 みまもりロボくんⅢの実験機
Mimamori Robokun III experimental device

いる。本装置は、風力と太陽光をエネルギー源とする「NTNハイブリッド街路灯」に、防犯カメラ、Wi-Fi通信機器、非常電源を搭載したもので、地域の子供たちなどの見守り機能に加え、災害時の通信設備として活用できる(図15)。本実験機と「未来共生災害救援マップ(災救マップ)」との接続実験、発電・蓄電量の確認、Wi-Fi通信機器の稼働実験、通信遮断時の自動接続実験などを行っている。これらの実験で得た通信や信号処理のノウハウは、今後の軸受異常診断の要素技術として活用していく計画である。

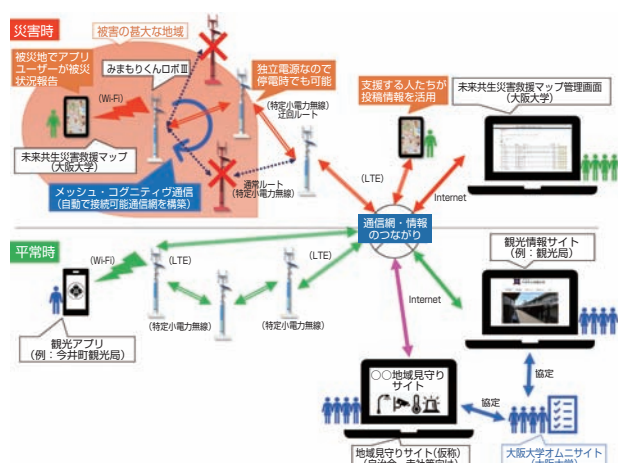


図15 ITを用いた防災・見守り・観光に関する仕組みづくり:全体イメージ¹³⁾

Creation of mechanisms regarding disaster prevention, monitoring, and tourism through use of IT

5. おわりに

転がり軸受は、もの造りの現場はもちろんのこと、衣食住や移動など、人々の生活に関わる様々な機器に組み込まれて、膨大な数が使用されている。これらの軸受にセンサを組み込めばIoTのデータ収集の要素として最適なものになると考えられる。それにはセンサの小型化や電源の確保、通信の手段などの課題を解決しなければならない。IoTを通して自然環境の保全、人々の生活の水準や安全の向上に貢献するため、最大限努力して課題解決に取り組んでいく。

参考文献

- 1) P. C. Evans and M. Annunziata: インダストリアル・インターネットー人と機械の境界が融合するー, GE Reports Japan (2012)
- 2) 木村好次: トライボロジーにおける計測と寿命評価, トライボロジー研究会 第29回講演会 前刷 (2018) 1.
- 3) 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.
- 4) 小池孝誌, 石河智海, 伊藤浩義, 水谷憲義: 回転センサ付軸受の耐漏洩磁束性向上, NTN TECHNICAL REVIEW No.71 (2003) 74.
- 5) 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.
- 6) 伊藤浩義, 高橋亨, P. Desbiolles, C. Peterschmitt, 上野新太郎: 原点信号出力タイプ高分解能回転センサ付軸受, NTN TECHNICAL REVIEW No.78 (2010) 70.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 間野大樹: 転がり軸受におけるIoT展開, 機械設計第62巻第2号 (2018) 46.
- 10) 高橋亨, 堀徑生: 風力発電装置用軸受の技術動向と状態監視システム, トライボロジスト 第62巻第11号 (2017) 691.
- 11) 竹内彰利, 長谷場隆, 池田博志: 風力発電装置へのコンディショニングモニタリングの適用, NTN TECHNICAL REVIEW No.80 (2012) 15.
- 12) 森夏比古: 自然エネルギー事業とグリーンパワーパークの紹介, NTN TECHNICAL REVIEW No.84 (2016) 14.
- 13) <https://www.ntn.co.jp/japan/news/press/news201700086.html>

執筆者近影



江上 正樹
常務執行役員
研究部門担当

[商品紹介]

手首関節モジュール『i-WRIST™』の開発 Development of 『i-WRIST™』 wrist joint module

数野 恵介* Keisuke KAZUNO 磯部 浩* Hiroshi ISOBE
御堂前 純* Jun MIDOUMAE 志村 祐紀* Yuuki SHIMURA
小原 正行* Masayuki OHARA



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てきた^{1)~7)}。このたび、本装置を外観検査用途に展開するため、可動角度範囲を折れ角45°から90°に拡大し、半球面全方向の任意の姿勢に対して高速に位置決めできる手首関節モジュールを開発した。従来の『パラレルリンク型高速角度制御装置』から『i-WRIST™』に名称を変更し、量産を開始した。

NTN has developed the angle control equipment applying a parallel link mechanism which is a type of constant velocity joint. In order to expand this equipment for appearance inspection application, we expanded the movable bending angle range from 45° to 90° and developed a wrist joint module which can be positioned toward any posture in all hemispherical directions at high speed. We changed the name from the conventional “Parallel Link High Speed Angle Control Equipment” to “i-WRIST™” and started mass production.

1. はじめに

製造現場の生産性向上を目的とした自動化・省力化のニーズにより、産業用ロボットがグローバルで急速に普及している。例えば、垂直多関節ロボットは、重量物のハンドリングや溶接・塗装ラインのような過酷環境下などでの現場を中心に広く使用されている。また、水平多関節ロボットやパラレルリンクロボットも、高速ハンドリングが要求される工業製品や食品などの搬送作業などで活用されている。

一方、日本では、少子高齢化による労働力不足が課題になっている⁸⁾。特に、技能を必要とされる作業工程の人手不足は深刻であり、各企業はこれまで人手で行っていた繊細な作業についてロボット化に取り組み始めている。

NTNは2012年に独自のパラレルリンク機構を応用した角度制御装置を発表して以来、従来のロボットが苦手としてきた細かい姿勢変更を高速に行うことが要求されるグリース塗布や洗浄用途への展開を図ってきた。近年、新たなニーズとして、これまで人手作業に頼ってきた自動車部品や電子電気部品の外観検査用途への展開も進めている。

本稿では、NTNが外観検査の用途に適応するために開発した折れ角90°仕様の『i-WRIST™』の構成と特長、システム構成例、動作パターンの設定方法、外観検査の用途への展開などについて紹介する。

2. i-WRIST™の構成と特長

図1にi-WRIST™の概略図を示す。i-WRIST™は、独自のパラレルリンク機構とその姿勢を制御する駆動機構から構成され、3つのモータを同期制御して2自由度の先端姿勢（折れ角 θ 、旋回角 ϕ ）を位置決めできる手首関節モジュールである。その主な特長を以下に示す。

① 高速動作

細かい姿勢変更時に0.1 s/point以下*の高速動作を実現。

② 広い可動角度範囲

最大折れ角 90°，旋回角360°× n （無限大）

③ 全方向にスムーズな動き

球面リンク構造を採用し、可動角度範囲内に特異点を持たない。

*産業機械事業本部

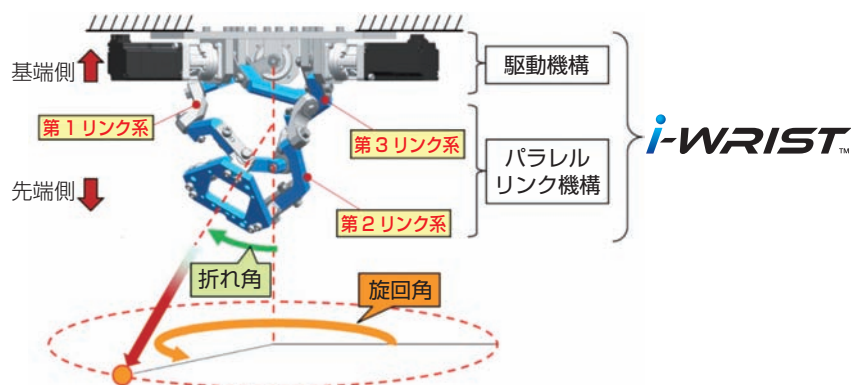


図1 i-WRIST™の概略図
Schematic of i-WRIST™

- ④ リンク機構の内部空間にエンドエフェクタを配置
 エンドエフェクタ取付時の慣性モーメントを低減し、高速動作を実現。また、内部空間にエンドエフェクタへの配線を通すことができ、旋回動作を繰り返してもケーブルが捻じれない。

※ 10mm間隔の7×7のマトリクス上のポイントに対する位置決め動作時の速度である。

3. システム構成例

i-WRIST™は、図2に示すように直動アクチュエータやRzステージと組み合わせた構成で使用できる。その制御システム構成を図3に示す。赤枠で示した① i-WRIST™、②専用コントローラ、③専用コンソールを標準仕様としてNTNが提供する。青枠（赤枠除く）で示したサーボドライバや直動アクチュエータなどは、NTNが型番やシリーズ（仕様）を指定させていただく部品である。一方、黒枠内は、お客様にて自由に選定いただける部品である。

① i-WRIST™

3つの減速機付モータを含む手首関節モジュール。

② 専用コントローラ

i-WRIST™ 単体だけでなく、i-WRIST™ と直動アクチュエータ（XYZ軸）やRzステージとを組み合わせたシステム構成（図3）でも使用することを想定したソフトウェアが実装されている。

③ 専用コンソール

i-WRIST™ や直動アクチュエータの動作をティーチングするために使用する。

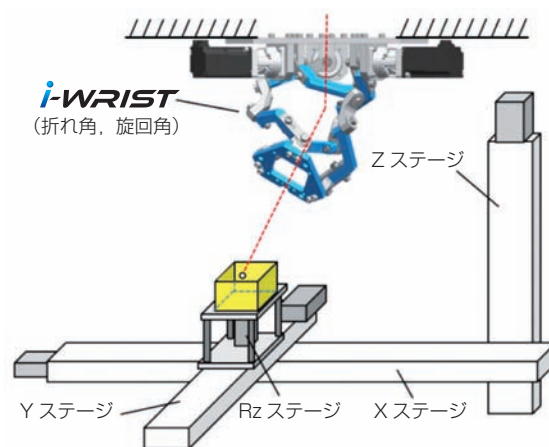


図2 i-WRIST™ を用いた構成
Configuration example

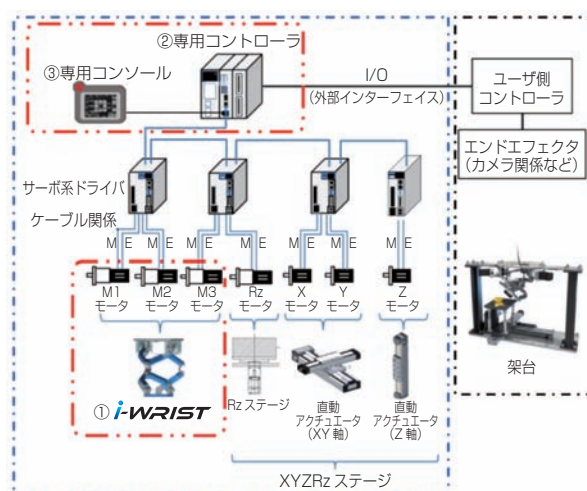
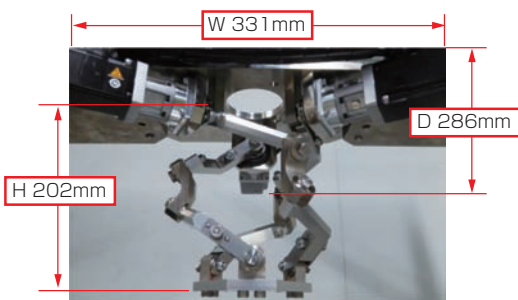


図3 制御システム構成
Control system configuration

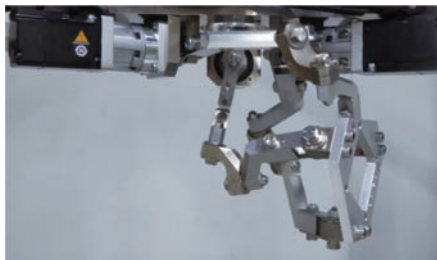
4. 主な仕様

4.1 i-WRIST™

図4に今回開発した折れ角90°仕様のi-WRIST™の外観写真を、表1にはその主な仕様を示す。高速動作を可能にするため、各回転対偶部にアンギュラ玉軸受を採用し、適正な予圧を付与することで、i-WRIST™の剛性を確保した。また、平行リンク機構の内部空間にエンドエフェクタを配置することにより、エンドエフェクタ取付時の慣性モーメントの増加を抑制できる構成とした。



(a) 折れ角 0°の姿勢



(b) 折れ角 90°の姿勢

図4 i-WRIST™の外観写真
External view of i-WRIST™

表1 i-WRIST™の主な仕様
Specification of i-WRIST™

項目	諸元
サイズ	W331×D286×H202 mm
質量	5.4 kg
自由度	2
可動角度範囲	折れ角：90° 旋回角：360°×n (無限大)
繰り返し位置決め精度	±0.05° 以下
可搬質量 (許容慣性モーメント)	1.0 kg (0.025 kgm ²)
モータ出力	50 W

4.2 専用コントローラ

表2に専用コントローラの主な仕様を示す。市販のハードウェアに、NTNが独自に開発したソフトウェアを実装している。専用コントローラが座標変換などの複雑な計算を行うため、専門知識を必要とせず、直感的な操作を可能とした。

表2 専用コントローラの主な仕様
Specification of proprietary controller

項目	諸元
サイズ	W65×D110×H130 mm
付属ユニット	I/Oユニット (入力：32点, 出力：32点)
定格電圧	DC24V±20%
制御対象	i-WRIST™, Xステージ, Yステージ, Zステージ, Rzステージ

4.3 専用コンソール

表3に専用コンソールの主な仕様を示す。市販のハードウェアに、NTNが制作した操作画面を表示させており、手で持って操作できるハンディタイプである。

専用コンソールは、i-WRIST™だけではなく、図3 (システム構成例) に示す直動アクチュエータや回転機構 (Rz軸) の動作条件や動作パターンを設定できる。また、複数の動作パターンを登録できるため、段取り替えを容易に行うことができる。

表3 専用コンソールの主な仕様
Specification of proprietary console

項目	諸元
外形寸法	W224×L174×H107 mm
表示デバイス	カラー
表示サイズ	W115.2×L86.4 mm
質量	0.96 kg以下
定格電圧	DC24V±20%
登録可能な動作パターン数	50パターン(1つの動作パターンに対して最大100ポイント登録可能)

5. 動作パターンの設定

一般的なロボットの動作設定には、ロボット言語のような専門知識が必要だが、i-WRIST™に使用する専用コントローラは、各動作パターンとして登録したポイントを順番に実行させるだけであり、専門知識がなくても容易に動作パターンを設定できる。

5.1 ティーチング

ティーチング方法は、参照する座標系により異なり、システム全体を基準とする“ベース座標系”とワークを基準とする“ワーク座標系”に大別できる。以下、座標系別にティーチング方法を記載する。

5.1.1 ベース座標系

図5(a)にベース座標系の概念図を示す。図6に示す専用コンソール画面のジョグボタンを操作し、Xステージ、Yステージ、Zステージ、i-WRIST™、Rzステージのそれぞれを所望の位置や角度に移動させ、そ

の位置や姿勢 ($S_x, S_y, S_z, \theta, \phi, R_z$) を登録する方法である。座標系を意識することなく、直感的に操作して動作パターンを設定できる。

5.1.2 ワーク座標系

図5(b) にベース座標系の概念図を示す。作業を行いたいワーク上の実際の作業位置 (XYZ座標) と作業方向 (θ', ϕ') を指定する方法である。

i-WRIST™ 先端からエンドエフェクタの作業位置までの距離Lと、ベース座標系とワーク座標系の位置関係を事前に専用コンソール上で設定すれば、専用コントローラが作業データからi-WRIST™ の姿勢や直動アクチュエータの位置を自動計算する。そのため、

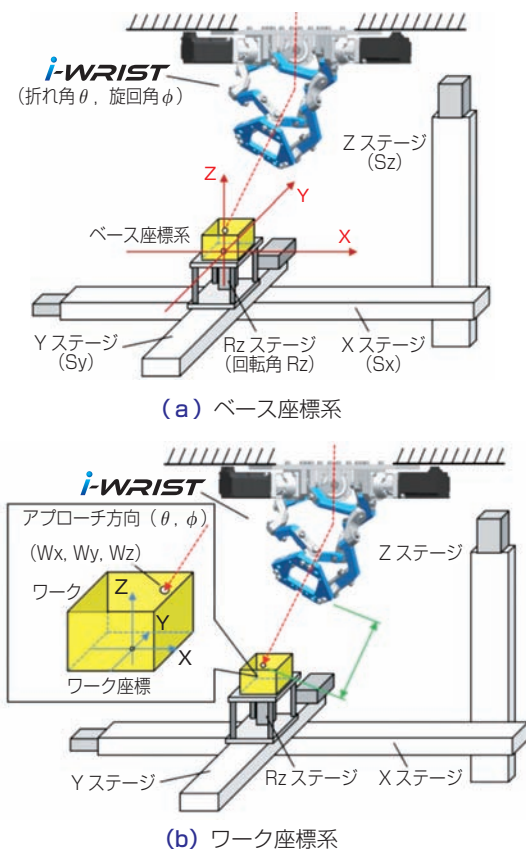


図5 座標系の概念図
Conceptual diagram of the coordinate system



図6 専用コンソールの操作画面
Operation screen of proprietary console

ティーチング作業を効率よく実施できる。

図7に示すような開発したポイントデータ編集ソフトにより、パソコン画面上でワークの3Dモデル上の座標 (ワーク座標) を確認しながら作業点の位置座標と作業方向を編集でき、その編集データを専用コンソールに一括して書き込むことができる。また、専用コンソールの動作パターンデータを、パソコンにバックアップデータとして保管することもできる。

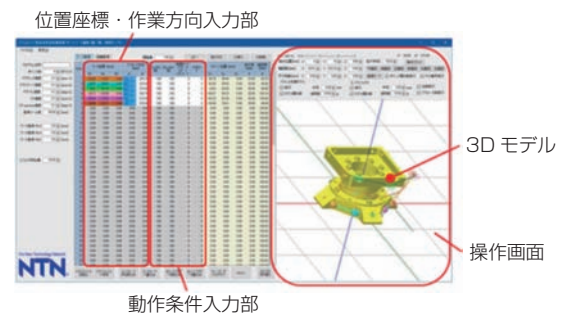


図7 ポイントデータ編集ソフト
Point data edit software

5.2 その他の機能

表4に示すように、ポイントごとに、各アクチュエータの位置や角度の指令値を入力するだけでなく、以下のような条件も設定できる。

①動作モード

登録したポイントで停止するPTP(Point To Point) 動作と、i-WRIST™ と他の構成部品 (直動アクチュエータなど) が同期して連続的に移動するCP (Continuous Path) 動作を設定できる。

②JOBコード

JOBコードとは、ユーザ側コントローラへ出力する番号 (0~63) である。ポジションごとにJOBコードを設定すると、ユーザ側コントローラでポイントごとの作業内容などを判断できる。例えば、ユーザが「JOBコードが“1”のときはカメラで撮影し、“2”のときは何もしない」などと定義できる。

表4 その他の機能
Other function

No.	位置・角度						① 動作モード	② JOBコード	③ 速度レシオ
	ステージ座標			i-WRIST™ Rzステージ					
	Sx	Sy	Sz	θ	ϕ	Rz			
1	50	10	30	90	45	0	0	1	
2	200	150	100	45	150	90	0	1	
3	100	140	80	90	90	-90	0	1	
4	150	150	100	90	180	0	0	1	
5	50	100	90	45	45	180	0	1	

③速度レシオ

設定したポイントへの移動速度を減速させる機能である。例えば、複数ポイントの中で数ポイントだけ整定時の振動を抑制し、作業を確実に実施させたい場合に設定すると、タクトタイムを大幅に遅らせることなく、所望の安定動作を実現できる。

6. 評価試験

ここでは、i-WRIST™の基本性能試験方法とその結果について紹介する。

6.1 繰り返し位置決め精度

図8に繰り返し位置決め精度の測定装置を示す。

i-WRIST™の先端に2軸周りの傾斜角を計測する高精度の傾斜角センサを搭載し、そのセンサ出力信号より一方向の繰り返し位置決め精度を算出する。

図9に示すように、i-WRIST™の代表的な9姿勢を測定ポイントに定め、各測定姿勢に対して30サイクル計測し、その平均値に対するばらつき±3σを一方向の繰り返し位置決め精度とした。その結果の一例を表5に示す。繰り返し位置決め精度は仕様値の±0.05°以下となった。

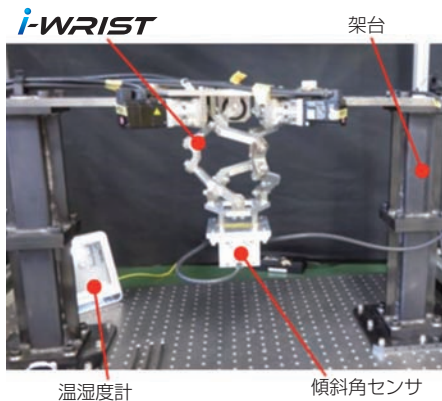


図8 繰り返し位置決め精度の測定装置
Measuring device of repeated positioning accuracy

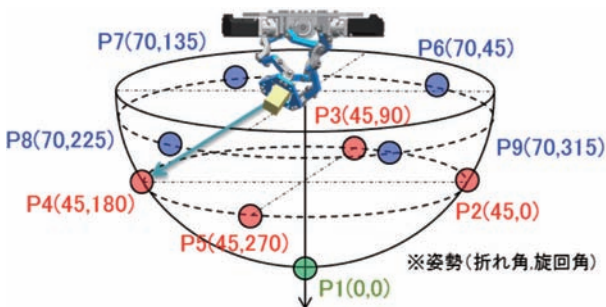


図9 繰り返し位置決め精度の測定ポイント
Measuring posture of repeated positioning accuracy

表5 繰り返し位置決め精度

Measurement results of repeated positioning accuracy

ポイント	繰り返し位置決め精度 [°]
P1	±0.008
P2	±0.007
P3	±0.006
P4	±0.010
P5	±0.005
P6	±0.009
P7	±0.003
P8	±0.009
P9	±0.006

なお、測定方法や測定条件は、JIS B 8432（産業用マニピュレーションロボット—性能項目及び試験方法）に基づいて決定した。

6.2 信頼性試験

自動車部品の生産ラインで使用されることを想定して算出したi-WRIST™の2年間のトータル稼働時間(5,000h)を目標時間に設定して連続運転を実施した。その結果、連続運転後も繰り返し位置決め精度±0.05°以下であり、外観上も異常がないことを確認した。なお、連続運転はグリースアップ等のメンテナンスを行わずに実施した。

7. 外観検査用途への展開

図10に、これまで展開を図ってきたi-WRIST™の特長を生かせる用途例を示す。その中で、自動化の要求が急速に高まっている外観検査にターゲットを絞って開発を行った。

現在の外観検査の多くは、作業者がワークを手を持ち、ワークの姿勢を様々な方向に変えながら目視検査を行っている。図11には、NTNがこの作業工程を自動化するために試作した外観検査装置の構成例を示す。

本構成では、下部のXYZ+Rz（回転軸）ステージを用いてワークを移動させると同時に、i-WRIST™に搭載したカメラと照明の姿勢を変更する。最大折れ角を90°に拡大したことで、ワークに対して真横からの検査が可能となる。また、ワークを回転させるRzステージを追加したことで、XYステージのストロークを短縮させ、装置全体のコンパクト化を図った。

表6に試作機的主要仕様を示す。対象ワークの形状やサイズ、画像処理システムの処理速度にもよるが、φ100×高さ100mm程度のワークに対して、60カ所を8秒程度で検査することが可能である。

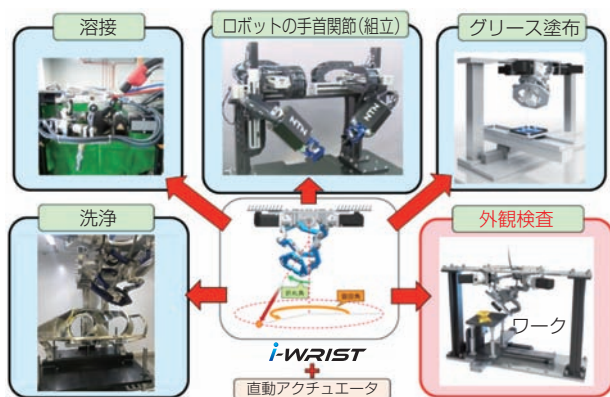


図10 i-WRIST™の用途例
Application examples of i-WRIST™

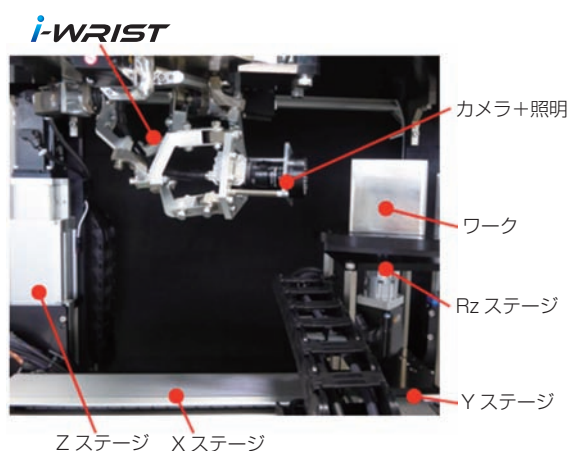


図11 外観検査装置の構成例
Configuration example of appearance inspection equipment

表6 試作機的主要仕様
Specification of prototype model

項目	諸元
サイズ	W800×D850×H2000 mm
搭載可能なワークサイズ	φ100×H100mm程度
タクトタイム(参考)	約8秒/60箇所

8. まとめ

2012年に独自の平行リンク機構を応用した角度制御装置を開発して以来、グリース塗布や洗浄用途へ展開し、製品技術の改良を重ねてきた。今回、その特長を最大限に生かすべく、外観検査向けのi-WRIST™を開発した。

今後、労働人口の減少に伴い、これまで人手に頼ってきた外観検査などの自動化への需要が急速に拡大することが予想される。外観検査の用途に限らず、生産現場の自動化や省人化、生産性や品質のさらなる向上に寄与するロボティクス製品の開発を継続し、社会に貢献していく所存である。

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, 平行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, 平行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, 平行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, 平行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, 平行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, 平行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) 日本ロボット工業会, ここが知りたい! ロボット活用の基礎知識

執筆者近影



数野 恵介
産業機械事業本部



磯部 浩
産業機械事業本部



御堂前 純
産業機械事業本部



志村 祐紀
産業機械事業本部



小原 正行
産業機械事業本部

i-WRIST™のロボット手首関節への応用

Application of i-WRIST™ to the Robot Wrist Joint



野瀬 賢蔵* Kenzou NOSE 坂田 清悟* Seigo SAKATA
 丸井 直樹* Naoki MARUI 佐藤 直彦* Naohiko SATOU

近年、労働人口が減少している中で、産業分野では人による手作業の領域にロボットが用いられ、人とロボットが協働で作業する状況が進展しつつある。その中で、限られた空間において、組立作業のような人の手作業に相当する細かい動作を、安全かつ高速で実現できるロボットが求められている。

グリース塗布や外観検査などで実績のある『i-WRIST™』（旧名称：パラレルリンク型高速角度制御装置）のロボットの手首関節への応用について紹介する

While the working population is decreasing, in the industrial field, robots come into use for operation of hand work by human, and to work in cooperation with human there. In such case, the robots are required to perform delicate hand work in a safe manner and at a sufficient speed.

This report introduces the application of i-WRIST™ (Parallel Link High Speed Angle Control Equipment) that has proven in a grease dispensing and external inspection to a wrist actuator of robot arm.

1. はじめに

これまで産業用ロボットは、製造業における工場自動化に貢献し、生産性の向上および生産量の拡大に大きく寄与してきた。また、生産工場において、ロボット、専用機、人をそれぞれ適材適所に配置することで、生産ラインの高効率化が図られてきた。しかし、労働人口の減少に伴い、従来のロボットでは困難だった、細かい手作業の自動化が求められている。

NTNは、独自のパラレルリンク機構を採用し、小形で広い可動範囲を備え、高速・高精度で2自由度の角度位置決めができる『i-WRIST™』（旧名称：パラレルリンク型高速角度制御装置¹⁾⁻⁵⁾を開発し、直動アクチュエータと組み合わせた構成で用途展開を図っている。本稿では、i-WRIST™のロボットの手首関節用アクチュエータへの適用について紹介する。

2. パラレルリンク機構の概要

2.1 基本構成

図1に、i-WRIST™のパラレルリンク機構（以下、リンク機構）の概念図を示す。リンク機構は、ベースとなる基端部材とエンドエフェクタを取付ける先端部材

材の間に、基端側アーム、中央リンク、先端側アームからなる3列（図1の第1～第3）のリンク系を並列に配置し、リンク系の各部材の連結部を回転対偶とする構成である。回転対偶部には予圧を与えたアンギュラ玉軸受を用いており、摩擦を軽減すると共に連結部の遊びを無くす構成としている。

先端部材の姿勢は、基端部材の中心軸に対する先端部材の中心軸の傾斜角である折れ角 θ と、基端部材の中心軸方向から見た先端部材の中心軸の旋回角 ϕ で定義される。

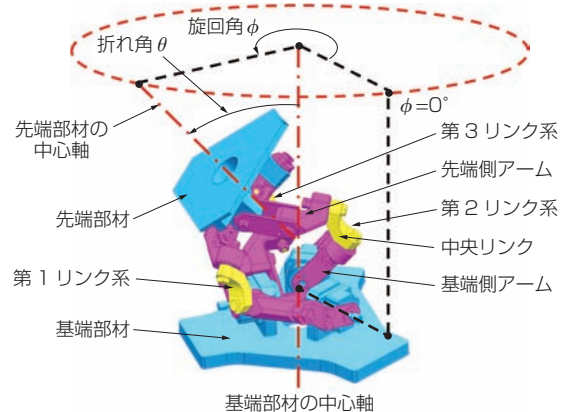


図1 リンク機構の概念図
 Conceptual diagram of i-WRIST™ mechanism

*商品開発研究所

各リンク系の内2つの基端側アームの姿勢を決定することで、先端部材の姿勢 (θ , ϕ) が決定される。i-WRIST™ では3台のモータを用いて同期制御することで、繰り返し位置決め精度と剛性を向上させている。

2.2 特長

リンク機構をロボットの関節用アクチュエータに適用した場合の主な特長を以下に示す。

①広い可動範囲

最大折れ角 θ は 90° 、旋回角 ϕ は $360^\circ \times n$ (無限大) と非常に広い可動範囲をとることができ、対象物に対して様々な角度からのアプローチが可能である。

②高速・高精度な動作

多関節ロボットとの比較において、特に微小な姿勢変更時に高速・高精度な動作が可能である。

③可動部が軽量・コンパクト

駆動部を基端側に集中させることで、可動部の軽量化と慣性モーメント低減を実現し、高速動作時の位置決め精度の向上を図った。また、リンク機構がコンパクトになり、広い可動範囲でも装置の干渉を避けることができる。

④可動範囲内に特異点がない

特異点を意識する必要がないため、ティーチング作業を比較的簡易に行うことができる。

⑤ケーブルやチューブなどの取り回しが容易

先端部材に搭載するハンドやグリップ等のエンドエフェクタの配線・配管をリンク機構の内部空間に通することができるため、ケーブルやチューブの取り回しを容易に行うことができる。また、その状態で一方に旋回動作を繰り返してもケーブル等が捩れることがないという特長を持つ。

2.3 他形式ロボットとの比較

表1に、i-WRIST™ と直動アクチュエータを組み合わせたロボットと、一般的な垂直多関節ロボットおよびパラレルリンクロボットとの比較を示す。

図2に一般的な垂直多関節ロボットの手首関節 (先端3軸) を示す。

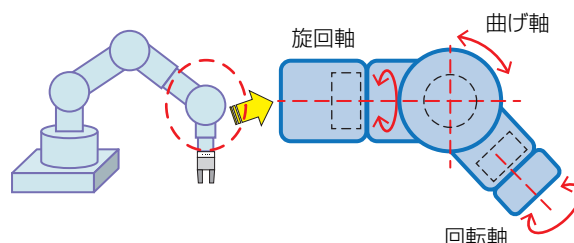
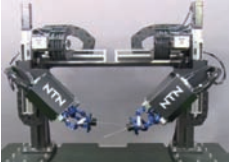
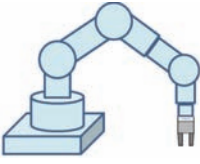
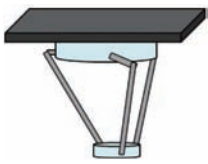


図2 垂直多関節ロボットの手首関節
Wrist joint of ordinary vertical articulated robot

表1 他形式ロボットとの比較
Comparison of other type robot

構成	A	B	C
	i-WRIST™ + 直動アクチュエータ	垂直多関節ロボット	パラレルリンクロボット
機能			
得意分野	非接触作業, 小物の組立 など	溶接, 搬送	搬送 (ピック & プレース)
利点	<ul style="list-style-type: none"> 微小な姿勢変更時の位置決め動作が速い。 可動範囲内に特異点がない。 ケーブルをリンク内部空間に配置できる。(旋回動作を繰り返してもケーブルが捩れない) 	<ul style="list-style-type: none"> 可動範囲が広い。 可搬質量が大きい。 不使用時の占有面積が小さい。(ロボットアームを折りたたむため) 	<ul style="list-style-type: none"> 並進動作が速い
課題	<ul style="list-style-type: none"> 不使用時でも一定の占有面積が必要。 可搬質量が小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> 微小な姿勢変更時の位置決め動作が遅い (姿勢による)。 特異点がある (ティーチング作業時に専門知識や経験が必要)。 	<ul style="list-style-type: none"> 可動範囲に対し装置サイズが大きい。 不使用時でも一定の占有面積が必要。

垂直多関節ロボット（表1B）は、可動範囲が広く、可搬質量が大きいというメリットがあるが、微小な姿勢変更であっても複数の関節が大きく動作するため、微小な動作のタクトタイム短縮が難しい。垂直多関節ロボットの手首関節は回転軸、曲げ軸、回転軸の3つの回転関節で構成されており、先端の微小な姿勢変更に対して、姿勢によっては回転軸を大きく動かす必要があるため、なめらかで素早い動作は不得意である。そのため、細かい組立作業を高速で行うような用途には適さない。

また、可動範囲内に特異点が存在するため、ティーチング作業時に専門知識や経験を有する作業者が必要となる。さらに、協働型ロボット以外の速度や力が大きいロボットは、安全性を確保するために可動範囲全体を柵で囲う必要があり、占有面積が大きくなる。

一般的なパラレルリンクロボット（表1C）は、並進動作を高速に行うことができるため、主にピック&ブレース用途で用いられているが、可動範囲に対して駆動機構部を含めた装置全体のサイズが大きくなり、占有面積が大きい。

上記の理由から、これらのロボットで組立作業等の人手作業を代替する場合、既存スペースに収めることができないケースが多い。

NTNが提案するi-WRIST™と直動アクチュエータを組み合わせたロボット（表1A）は、微小な姿勢変更の位置決め速度が速く、全体の動作量が小さい。i-WRIST™は、先端側のパラレルリンク機構が小型軽量で2自由度を持つため、どの方向にもなめらかに素早く動作できることが特長である。垂直多関節ロボットの手首関節は、より根元の回転軸を大きく動かさないと位置決めできないが、i-WRIST™は全方向に高速で動作させることが可能であり、垂直多関節ロボットの手首関節と比較してタクトタイムを短縮することができる。これは垂直多関節ロボットでは可動軸を直列配置しているため、根本の関節（手首関節の回転軸）を大きく動作させる場合、慣性モーメントが大きくなり高速で動作させることができないが、i-WRIST™ではコンパクトなパラレルリンク機構で慣性モーメントを低減したため、高速でなめらかな動作を実現できる。また、設置スペースを比較的小さくすることができるため、これまで人手で行っていた工程の自動化に適していると考えられる。

3. ロボットの手首関節への展開

3.1 手首関節用アクチュエータ

ロボットの手首関節用として、図3に示すアクチュエータ（以下、本アクチュエータ）を試作した⁶⁾。表2に試作機の諸元を示す。

図3に示す本アクチュエータは、i-WRIST™の径方向寸法をコンパクト化して軽量化を図りつつ、i-WRIST™全体を回転させる1自由度を追加した構成である。i-WRIST™全体を回転させる回転機構部には同心軸型の減速機構を用いているため、ギヤドライブ型（以下、GD型）と呼称する。

また、リンク機構の最大折れ角は90°であり、i-WRIST™の旋回角 ϕ と回転機構部の回転角 θ_z の協調動作により、回転機構部の回転を、任意の折れ角における先端部材の回転軸まわりの回転に等角度で変換できる。

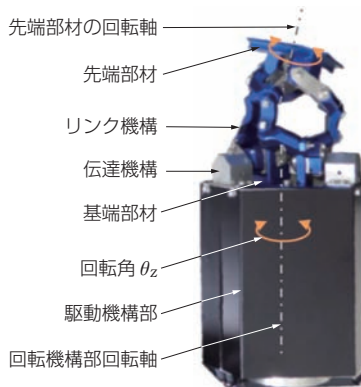


図3 i-WRIST™を用いた手首関節用アクチュエータ（ギヤドライブ型）
Wrist joint actuator featuring i-WRIST™ (with gear drive)

表2 手首関節用アクチュエータ試作機諸元
Specification of wrist joint actuator with GD

項目	諸元
サイズ (外径×高さ)	φ145 × 278 mm (全体) φ102 × 115 mm (リンク)
質量	3 kg
自由度	3
可動角度範囲	折れ角：90° 旋回角：360° × n (無限大) 回転角：350° (-175° ~ 175°)
繰り返し位置決め精度	±0.05° 以下
可搬質量	0.5 kg
モータ出力	30 W × 3 (リンク部) 50 W × 1 (回転機構部)

図4に、基端部材と基端側アームの回転対偶部周りの構造を示す。基端側アームは、出力側回転連結体を介して、基端部材に固定された減速機ユニットの出力軸に固定される。歯車やベルト等の伝達機構を通して減速機ユニットの入力軸に伝達される姿勢制御用モータの回転は、減速機ユニットで減速され、出力側の回転連結体を介して基端側アームに伝達される。基端側アームに固定された入力側回転連結体は、減速機ユニットの入力軸に軸受を介して回転自在に連結されている。このように、基端側アームの構成内に減速機ユニットを収め、基端側アームの回転軸の両端を支持する構成とし、基端側アームの支持剛性を向上させながら、コンパクトな構成を実現した。また、伝達機構を減速機ユニットの入力側に配置することで、伝達機構に存在するバックラッシュ等の影響を低減させることができる。

GD型の回転機構部は高減速の減速機構をコンパクトに配置できるという利点がある。しかし、回転機構部回転軸が基端部材の中心軸と一致するように回転角制御用モータを配置したため、駆動機構部は中空ではない。そのため、ケーブルやチューブをリンク機構の内部空間に通すことができるという特長が生かされていない。

ベルト駆動を採用したタイプ（BD型）は、回転機構部のモータを、ベルトを用いて回転機構部中心からオフセットして配置できるため、大きな中空径を取ることができるようになる。BD型の構成を図5に示す。BD型はリンク機構にもベルトを用いることで姿勢制御用のモータを減速機ユニットの入力軸と平行にオフセット配置できるため、リンク機構の高さを低減させることができる。さらに、リンク機構の姿勢制御用モータのケーブルも駆動機構部の中空部を通すことで、回転角の可動範囲をより広くとることができ、かつ非常に容易に配線作業を行うことができる。

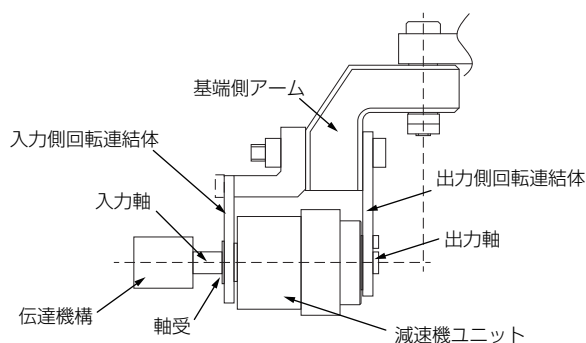


図4 基端部材と基端側アームの回転対偶部
Revolute pairs serving as connections between proximal end side link hubs and proximal end link member

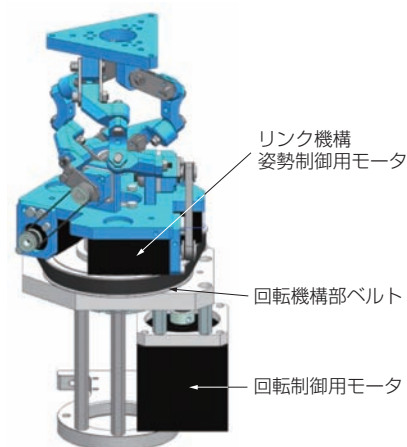


図5 ベルト駆動型手首関節用アクチュエータ
Wrist joint actuator with belt drive

3.2 直動型双腕ロボット

図6に、本アクチュエータと直交3軸の直動アクチュエータ（XYZステージ）を組み合わせ、それらを2組配置した直動型双腕ロボットを示す。人手作業の自動化を想定しているため、本アクチュエータを鉛直軸（Z軸）に対して内側に45°ずつ傾けて配置し、両腕の協調作業を行いやすくしている。この直動型双腕ロボットは、本アクチュエータでエンドエフェクタの姿勢を、XYZステージでエンドエフェクタの位置をそれぞれ制御する。姿勢を保持したままでXYZの移動を行う動作（非同期動作）と、本アクチュエータとXYZステージを同期させて行う動作（同期動作）を作業内容に応じて使い分けることで様々な作業を行うことができる。

非同期動作は、把持したワークの姿勢を本アクチュエータで制御してアプローチ姿勢を決め、XYZステ

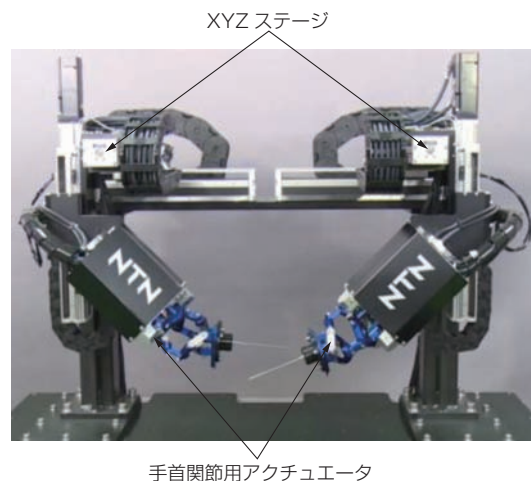


図6 i-WRIST™を用いた直動型双腕ロボット
Liner motion type dual arm robot featuring i-WRIST™

ージで大きく水平方向に移動させることができるため、ティーチング作業時に作業者がロボットアームの動作を予測しやすく、組立作業に適している。図7にシャフトの挿抜動作例を示す。この動作は、ワークに開けられたさまざまな角度の穴に対してシャフトを挿抜させるもので、穴に対するシャフトの姿勢を本アクチュエータで決定し、挿抜の直線方向の動作をXYZステージで行う。

同期動作は、エンドエフェクタ先端の細かな動きが可能で、その適用例として、曲面へのシール貼りを図8に、Oリングの取り付け、取り外し作業を図9に示す。これらの例では、これまで自動化が困難であった、曲面・平面上の三次元のならい動作を、本アクチュエータおよびXYZステージを協調させた軌跡制御で行っており、平行リンク機構と直動アクチュエータの組み合わせによって曲線的な動作を実現している。

このように、現在NTNは、i-WRIST™をロボット手首関節へ応用し、組立作業への適用を検討している。

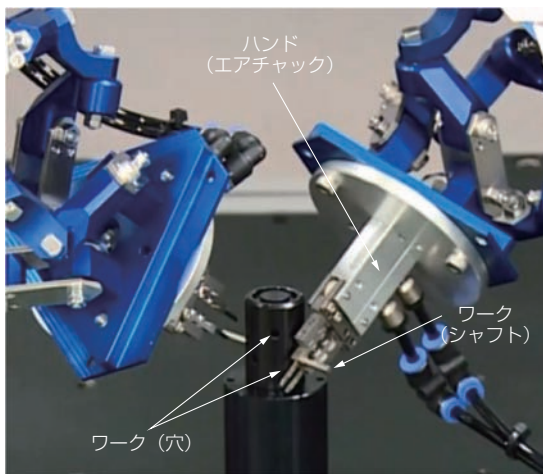


図7 シャフト挿抜動作
Operation for inserting and removing shaft

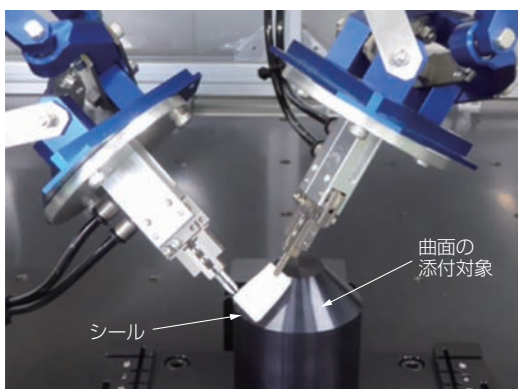


図8 シール貼り動作
Operation for put a seal on a curved surface

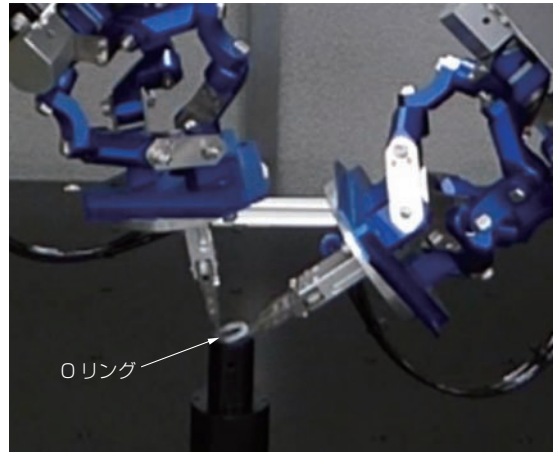


図9 Oリング取り付け・取り外し作業
Operation for installing and removing O-ring

4. おわりに

回転2自由度の独自の平行リンク機構を採用したi-WRIST™に回転1自由度を追加したロボット手首関節用アクチュエータを試作し、人の手首関節に近い形状および動作を実現した。一方、このアクチュエータと3軸の直動アクチュエータを組み合わせた直動型双腕ロボットを試作し、垂直多関節ロボット、平行リンクロボットとの違いを検証しながら、i-WRIST™独自のなめらかで素早い動きを活かした細かい手作業を実現するロボットを目指して開発を進めている。

今後は、本アクチュエータ単体およびシステム全体の更なるコンパクト化を図ると共に、衝突検知機能などを追加し、人とロボットの協働作業の実現を試みる。そして、小物部品の組立など、従来のロボットでは困難だった人手作業の代替等、もの造り分野における自動化・ロボット化の進化に貢献していく。

参考文献

- 1) 磯部浩, 西尾幸弘, パラレルリンク型高速角度制御装置, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80, (1988) 42-47.
- 2) 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) 809-81.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 野瀬賢蔵, 磯部浩, 坂田清悟, 丸井直樹, 志村祐紀, パラレルリンク型高速角度制御装置-ロボット用手首関節アクチュエータへの応用-, 2017年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2017) 761-762.

執筆者近影



野瀬 賢蔵
商品開発研究所



坂田 清悟
商品開発研究所



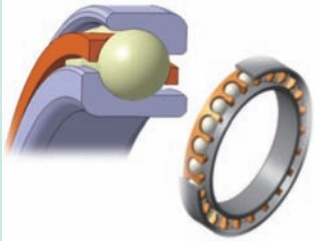
丸井 直樹
商品開発研究所



佐藤 直彦
商品開発研究所

ロボット用軸受の技術動向と特長

Technical Trend and Features of the Bearing for Robot



大胡 誠* Makoto OEBISU 國米 広道* Hiromichi KOKUMAI
 林 康由* Yasuyoshi HAYASHI 辻橋 将人* Masato TSUJIHASHI

近年、ロボット市場は活発化し、需要は日増しに拡大している。ロボットには減速機をはじめ、さまざまな機器が装着されており、多数の軸受が使用されている。NTNでは、多くのロボット用軸受を製造しており、その特長をロボットの技術動向と合わせて解説する。

Recently, the robotics market has become very active, and demand is expanding each and every day. Various types of mechanical equipment, such as reduction gears, are incorporated into robotics, and many bearings are used. NTN manufactures a wide variety of bearings for robotics applications, and in this section, the features of bearings used for robotics will be explained based on the technical trends in the industry.

1. はじめに

ロボットは産業用ロボットとフィールドロボット、サービスロボットに大きく分類される(図1)。

産業用ロボットは自動車や電気・電子機器をはじめとした多くの生産工場で使用され、これまでは比較的簡単な繰返し作業が求められていたが、より高度な生産とその自動化を目指す取組みが望まれるようになってきている。産業用ロボットは日本企業の競争力が高く、この強みを活かした今後の展開が期待される。また、フィールドロボットは農地、海上、災害現場など屋外で活動するため、現場に投入し十分に活躍できるロボット開発が期待される。サービスロボットは福祉、医療、介護をはじめ、家庭や職場で人と交流する環境で使用される。近年、サービス産業の生産性向上、医療介護サービス現場における働き手の確保など、ユーザーニーズを的確に捉えることで急激な導入が予測され、次世代ロボットとして活躍の場が広がることが期待されている。

このように、ロボットは人間の代わりに作業を行う機械として世界中に普及し、今後の発展が大きく期待される分野である。NTNでは、多くのロボット用軸受を製造しており、本稿では、特に産業用ロボットにおける軸受の技術動向、適用部位とその特長について解説する。

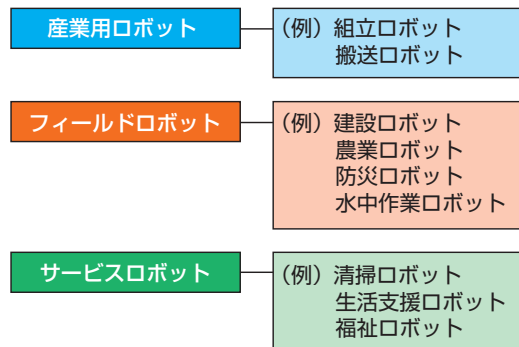


図1 ロボットの分類
Classification of robot

2. 産業用ロボットの市場ニーズ

産業用ロボットには、決められた位置の対象物をつかみ正確に作業する基本機能に加え、産業分野に広く浸透するために、①コストパフォーマンスに優れる、②対象作業に適合した精度や動きが得られ、ティーチングや補正操作が容易(精度と操作性)、③小型・軽量で設置スペースが小さい(省スペース化)、④ライン稼働率の維持(信頼性・保守性)などが求められる。

近年、産業分野では製造現場での人手不足の補填や製品品質を安定化させるため、ロボットを活用した自

*産業機械事業本部 適用技術部

動化のニーズが高まっている。例えば、スマートフォン、自動車関連産業やIoT（Internet of Things）関連の需要増加による電子部品関連産業への設備投資を中心に、組立や搬送工程におけるロボット需要が増加している。さらに、人とともに作業する協働ロボットの需要も増加傾向にあり、産業用ロボットの市場規模は拡大している。これらを背景に、産業用ロボットには今まで以上に、①タクトタイム短縮による生産性の向上、②ロボットの剛性を高め、ワーク搬送時の位置決めや繰返し精度を向上させた緻密な作業性、③ロボットをコンパクト化し、設置面積を縮小することによる作業領域の確保、④メンテナンス間隔の延長による安全性の向上などが市場ニーズとして高まっている。

表1に近年、産業用ロボットで要求される性能の市場トレンドを示す。

産業用ロボットには、減速機やガスバランスなどの機器が装着され、可動部には軸受が使用される。これらの市場トレンドを背景に、軸受には今まで以上にコンパクト化、高剛性化、高負荷容量化、長寿命化が強く要求されるようになってきている。

表1 産業用ロボットの市場トレンド
Market trend of industrial robot

要求性能	近年の市場ニーズ
コストパフォーマンス (ロボット生産性)	・タクトタイム短縮
高精度と操作性 (緻密な作業)	・位置決めの高精度化 ・繰返し精度の向上
省スペース化 (作業領域の確保)	・コンパクト化
高信頼性と保守性	・メンテナンス間隔の延長

3. 産業用ロボットの構造と軸受適用部位

3.1 産業用ロボットの構造

産業用ロボットは多くの種類があるが、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ある(図2)。

重量物を持った状態でロボットを運転するとき、各関節駆動部には大きなトルクが必要となるため、サーボモータの出力トルクを増幅させる機器として減速機が組み込まれる。特に大型ロボットではサーボモータの動力を補助し、省電力に寄与する機器として、重力負荷に対して逆方向にバランス力を発生させるバランスが組み込まれる。

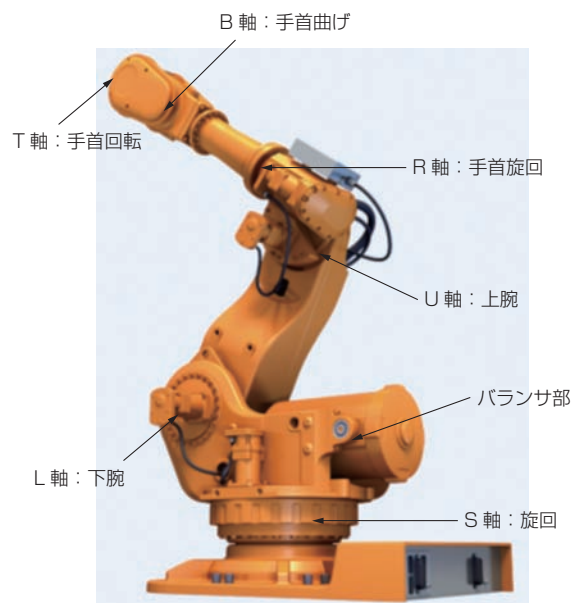


図2 垂直多関節6軸ロボット
6 axis articulated robot

3.2 産業用ロボット減速機と軸受適用部位

近年、ロボットサイズは多様化し、精密減速機は大型と小型で使い分けられることがある。本稿では大型用として①偏心差動方式減速機、小型用として②波動歯車式減速機を例とし、軸受適用部位を説明する。

①偏心差動方式減速機

偏心差動方式減速機の一例として、ナブテスコ(株)殿製の精密減速機RVが挙げられる。図3に精密減速機RVの構造を示す。この減速機は平歯車の1段減速部とピン歯車機構を有した偏心揺動型の2段減速部から構成される。クランク軸が1回転した場合、RVギヤは偏心運動し、内歯車との歯数差分だけ入力方向とは逆方向に回転し、これを出力として取り出す機構である。本機構は、同時噛合い歯数が多いため、軽量で剛性も高く過負荷に強い特長があり、低バックラッシュで振動が小さく、滑らかで正確なトルク伝達を得ることができる。

本減速機には、クランク軸の偏心部に針状ころ軸受、ジャーナル部には円すいころ軸受が使用されており、各軸受には高い剛性と大きな負荷容量が必要とされる。また、主軸受には薄肉アンギュラ玉軸受が対向して使用されており、ロボットの重要特性である位置決め精度を確保するために高い剛性（モーメント剛性）が必要となる。

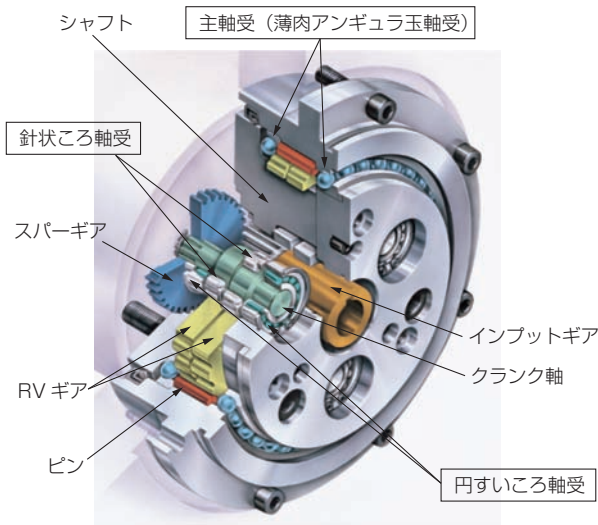


図3 精密減速機RVの構造 1)
Structure of precision reduction gears RV

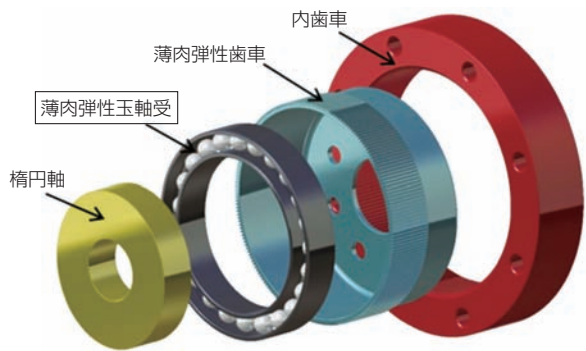


図4 波動歯車式減速機の構造模式図
Structure of strain wave gearing

②波動歯車式減速機

波動歯車式減速機は小型の減速機構（外径100mm以下）として主に使用される。図4に構造模式図を示す。薄肉かつ柔軟な金属円環を歯切りした薄肉弾性歯車に、薄肉弾性玉軸受が挿入された楕円軸を組み込み、厚肉かつ剛性のある内歯車と長軸側で接触させており、弾性変形を巧みに利用した独特な減速機構である。動作原理は図5に示すように、内歯車を固定した場合、楕円軸が時計回りに1回転すると、薄肉弾性歯車と内歯車の歯数差（例えば、薄肉弾性歯車が2枚少ない）分だけ、薄肉弾性歯車が反時計回りに回転し、これを出力として取り出す機構である。なお、図5は、楕円軸が半回転し、薄肉弾性歯車が1枚分反時計回りに移動した状態である。本減速機は同軸で構造がシンプル、かつコンパクトである特長に加え、1/30～1/320の大きな減速比を得ることができる。さらに、くさびのように入り込む両歯面が同時に噛み合い、バックラッシュがなく、噛合い率も大きいことから、歯車誤差が平均化され、角度伝達精度が高く、トルク容量も大きい特長がある。

薄肉弾性玉軸受には、外輪外径面に引張圧縮の応力振幅が繰り返し作用するとともに、内部では楕円状の変形に伴う予圧荷重に加え、トルク伝達による噛合い反力が作用する。薄肉弾性玉軸受の設計においては、外輪の割れ疲労強度と転動疲労寿命を両立させることが重要である。また、軌道輪は高い応力振幅に耐え得る最適な肉厚や熱処理仕様を選定の上、角部の形状、表面粗さ、表面の残留応力などに配慮が必要である。

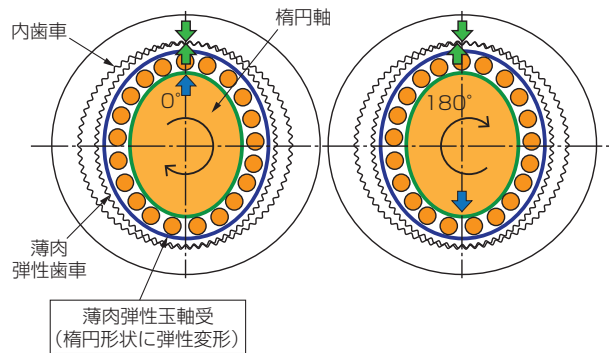


図5 動作原理
Operating principle

3.3 産業用ロボットバランスと軸受適用部位

図6にロボット用バランス構造の一例を示す。ロボットのアーム伸縮時に、サーボモータの動力を補助し、省電力化を図るため、本機器が適用される。近年、コンパクト化の要求によりバランスはコイル式からガス式へ移行し、コンパクトでかつ高負荷容量の性能が要求される。さらに、高稼働率の要求によりメンテナンス間隔の延長が要求される。

このバランスのロッドシリンダ支持部には組込性能を考慮して自動調心ころ軸受が使用されることがある。本用途では荷重が大きく、揺動角度が小さいため、油膜形成が困難であり、大きな負荷容量に加え、異常摩擦やフレッチング損傷に配慮した軸受選定が必要となる。

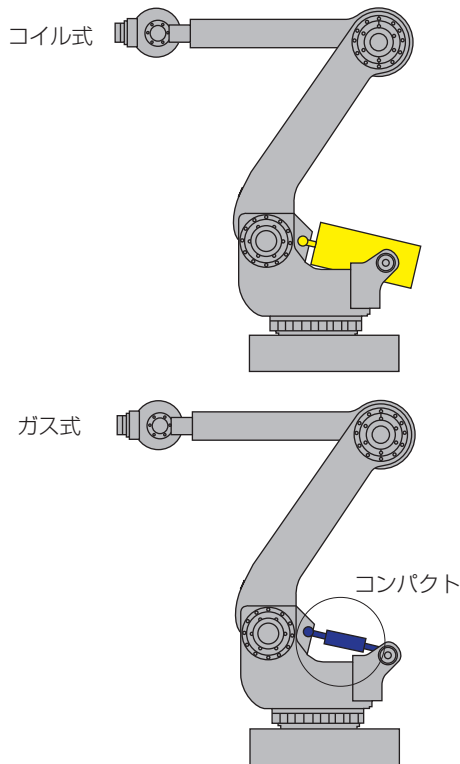


図6 バランサの構造模式図
Structure of balancer

4. 産業用ロボット軸受の技術動向と特長

4.1 産業用ロボット軸受の技術動向

前述のように、産業用ロボット軸受の適用部位は主に、減速機とバランサである。これらの軸受には、「コンパクト化」、「高剛性化」、「高負荷容量化」、「長寿命化」が要求される。特に、軸受のコンパクト化は重要であるが、それは同時に断面積の低減に伴う転動体のサイズダウンを意味するため、剛性、負荷容量および寿命の低下を招くことになる。つまり、コンパクト化と高剛性化、高負荷容量化、長寿命化はトレードオフの関係にあり、剛性、負荷容量、寿命を低下させずにコンパクト化を図ることが軸受として重要である。ここで、表2に産業用ロボット軸受の要求性能を示す。

ロボット用減速機では、高い剛性や高い出力トルクの確保、高効率などが要求される反面、コンパクト化が要求される傾向があり、主軸用アンギュラ玉軸受には剛性、寿命を確保した上での薄肉化、クランク軸用針状ころ軸受には、その軸受形式による省スペース化を図るとともに、高剛性化、高負荷容量化が求められる。また、ロボット用バランサでは、コンパクト化に加え、高い信頼性が求められ、ロッドシリンダ用支持

部の自動調心ころ軸受には長寿命化が要求される。NTNでは、近年の技術動向に対して、さまざまな軸受の設計開発を行い、市場ニーズに対応している。

表2 産業用ロボット軸受の要求性能
Required performance of bearing for industrial robot

軸受適用部位		要求性能
ロボット用減速機	主軸	・コンパクト（薄肉） ・高剛性 ・長寿命
	クランク軸	・コンパクト（省スペース） ・高剛性 ・高負荷容量 ・長寿命
ロボット用バランサ（ロッドシリンダ支持部）		・高負荷容量 ・長寿命

4.2 アンギュラ玉軸受のコンパクト化

NTNでは、精密減速機主軸用として、コンパクト化した薄肉アンギュラ玉軸受を設計、製造し、市場展開している。

図7に79シリーズ標準品との断面比較を示す（各軸受は外径寸法は統一した設計である）。薄肉アンギュラ玉軸受は、断面比として径方向に約30%、軸方向に約25%の省スペース化、質量比として約55%の軽量化を達成し、大幅なコンパクト化を達成した。

このコンパクト化には軌道輪の薄肉化が必要不可欠であるが、製造時の軌道輪の変形（歪み、反り）が大きな課題となる。NTNでは、変形を抑制する熱処理条件の最適化を含めた加工技術を確立することで、薄肉アンギュラ玉軸受の量産化に成功した（図8）。

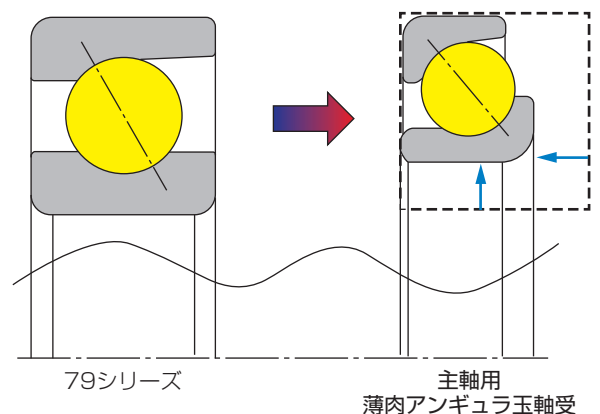


図7 薄肉アンギュラ玉軸受の断面比較
Cross-view comparison of Ultra thin angular contact ball bearing



図8 薄肉アンギュラ玉軸受
Ultra thin angular contact ball bearing

また、トレードオフとなる剛性（モーメント剛性）と寿命（転動疲労寿命）については、モーメント剛性を高めるため軸受の作用点距離を大きくするとともに、軸受内部の接触応力を抑制し寿命が低下しない最適設計技術を確認した。図9に予圧比に対するモーメント剛性比と寿命比の関係を示す。薄肉アンギュラ玉軸受は79シリーズ標準品に比べ、コンパクトであるにもかかわらず、転動疲労寿命は同等で、モーメント剛性が約40%向上していることがわかる。

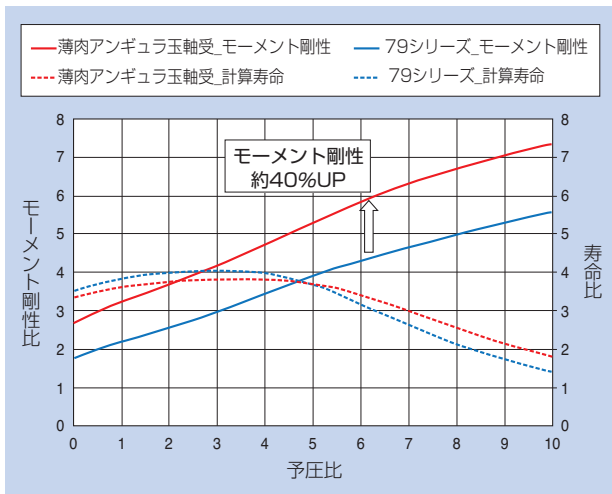


図9 予圧比に対するモーメント剛性比と寿命比
Moment stiffness and lifetime ratio at loading preload

4.3 針状ころ軸受の高剛性化と高負荷容量化

NTNでは、精密減速機クランク軸用として、高剛性化、高負荷容量化した針状ころ軸受（HWT (J) タイプ）を市場展開している。

HWT (J) タイプと標準仕様（PKタイプ）比較を表3に示す。HWT(J)の大きな特長は、保持器内径側の柱をなくすことで、PKタイプに比べころ本数を増やすことが可能であり、これにより高剛性化と高負荷容量化、長寿命化を達成した（表4）。

さらに、ころ表面に浸炭窒化処理を行うことで、潤滑油中に混入した異物噛込みや転走面の油膜切れに伴う表面損傷への耐性を強化し、信頼性や軸受寿命の向上にも寄与する。

表3 高負荷容量仕様の針状ころ軸受
High load capacity needle roller bearing

標準仕様	高負荷容量仕様	
PKタイプ (削り保持器)	HWTタイプ (削り保持器)	HWTJタイプ (プレス保持器)
内径側に柱があり、ころ本数の増加は限定的である	内径側に柱がなく、ころ本数を多く配置できる	

表4 標準仕様（PKタイプ）との性能比較²⁾
Comparison of performance for PK type

項目	比較
ころ本数	20~30%UP
基本静定格荷重	20~35%UP
基本動定格荷重	15~25%UP
転動疲労寿命	1.5~2倍
剛性	15~25%UP

4.4 自動調心ころ軸受の長寿命化

NTNでは、ロボット用バランスのロッドシリンダ支持部用自動調心ころ軸受として「アルテージ」シリーズ「EAタイプ」を市場展開している。

「EAタイプ」は当社従来品に比べ、最大で65%の負荷容量（基本動定格荷重）を向上させ（図10）、世界トップレベルを達成した（図11）。

さらに、「アルテージ」シリーズには、両側にシールを配置した密封形（WAタイプ）もラインナップしており（図12）、耐摩耗性や耐フレッチング性に優れた特殊グリースを封入して出荷することが可能で、メンテナンス性や軸受寿命の向上にも寄与する。

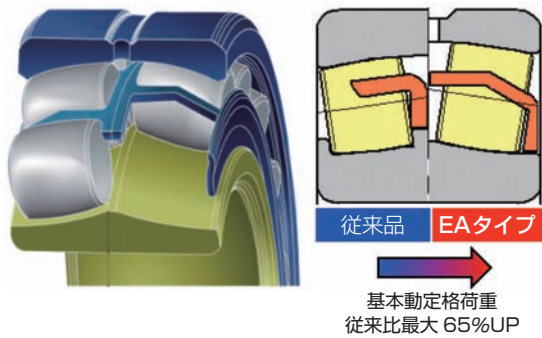


図10 アルテージ自動調心ころ軸受 (EAタイプ)³⁾
ULTAGE Spherical roller bearing (Type EA)

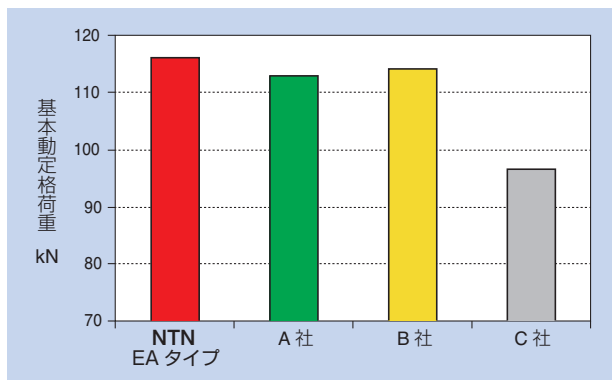


図11 負荷容量比較
Comparison of load capacity

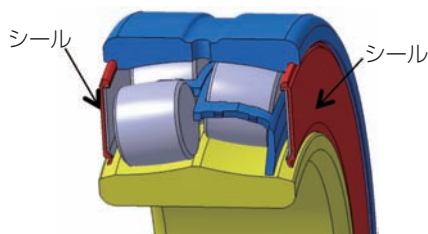


図12 密封形アルテージ自動調心ころ軸受⁴⁾
ULTAGE Spherical roller bearing

5. まとめ

NTNでは、多くのロボット用軸受を製造しており、本稿では、産業用ロボットに適用される軸受の技術動向と特長について解説した。

今後、ロボットはサービス分野の大きな発展に伴う、需要の拡大が予測されており、我々の身近な存在としてますますの活躍が期待されている。

NTNは引き続き、ロボット業界の発展に貢献できるようにロボット用軸受の商品開発および改良に努めていく所存である。

参考文献

- 1) ナブテスコ株式会社, ナブテスコカタログ, 精密減速機RV CAT.180420, (2018年) 表紙.
- 2) 阿部克史, 新高負荷容量プレス保持器付き針状ころ, NTN TECHNICAL REVIEW, No.71, (2003年) 52-55.
- 3) 津森幸久, 新型自動調心ころ軸受 "ULTAGE(アルテージ)"シリーズEA・EMタイプ, NTN TECHNICAL REVIEW, No.77, (2009年) 78-82.
- 4) NTN株式会社, シール付自動調心ころ軸受 (ULTAGE WAタイプ), NTN TECHNICAL REVIEW, No.79, (2011年) 138.

執筆者近影



大胡 誠
産業機械事業本部
適用技術部



國米 広道
産業機械事業本部
適用技術部



林 康由
産業機械事業本部
適用技術部



辻橋 将人
産業機械事業本部
適用技術部

風力発電装置用状態監視システム (CMS) の開発と適用例

Application of Condition Monitoring System for wind turbines



宮崎 誠* Makoto MIYAZAKI
 畠山 航* Wataru HATAKEYAMA

NTNでは、センシング技術と振動診断技術を応用した状態監視システム (CMS) を開発し、風力発電装置を中心に状態監視および診断のサービスを展開している。本稿では、風力発電装置用CMSの診断方法と実証試験での適用例、ならびに今後の展開について解説する。

NTN has developed Condition Monitoring System using sensing technology and vibration diagnosis technology, and provides information services dedicated to the maintenance of wind turbines. This article introduces some of the diagnostic methods used in the CMS and results obtained in validation tests, and gives a perspective of CMS for wind turbines.

1. はじめに

1.1 背景

世界風力会議 (GWEC2017) の報告¹⁾によると、2017年の風力発電設備容量は前年比10.6%増の529.1GWであり、今後も増加が予想されている。陸上には、風力発電に適した場所が少なくなり、低風速地域に適用させるための風力発電装置の高効率化や洋上風車への取組みが加速している。また、風力発電事業の拡大とともに売電価格の低下が進んでおり、メンテナンスコストの削減や風力発電装置の設備利用率の向上が一層求められている。そのため、設備の状態を常時的確に把握して高度なメンテナンスを実施し、故障による長期停止を未然に防ぐ運用方法が必要とされている。

1.2 CMSの概要

風力発電装置の状態監視の手法として、定期的な振動測定や異音の確認、グリースや潤滑油の分析がなされてきた。しかし、安全上の問題から稼働状態にある設備に対して作業を行うことができないため、運転中の振動や異音を確認するのは難しい。その結果、停止状態での点検が中心となり、故障の兆候を見逃す恐れがある。計画外の補修作業が必要となった場合には、交換部品が故障停止に間に合わず、停止期間が長期化し、利益が失われてしまうことになる。

稼働状態にある設備に設置したセンサの計測データを監視することができれば、故障の兆候を見つけやすくなる。そのため、センサの計測データを送信し、オンラインでの状態監視や診断を目的とする状態監視システム (Condition Monitoring System : CMS) が求められている。CMSを用いることで、遠隔地から状態監視が可能になるため、メンテナンスの工数が削減される。さらに、損傷箇所を早期に検出することで、処置のための準備期間を確保し、設備利用率の向上につなげることができる。加えて、設備状態の変化を把握することにより、最適なタイミングで計画的な補修作業を実施して、逸失電力を抑えた効率的な設備運用が可能になる。

NTNでは、これまで培ったセンシング技術と振動診断技術を応用したCMSを開発し、Wind Doctor[®] (図1) として販売している^{2) 3)}。



図1 Wind Doctor[®]データ収集装置^{2) 3)}
 Data acquisition module

本稿では、Wind Doctor®によるデータ分析の手法やその適用例を解説する。

2. CMSの構成と分析方法

2.1 システムの構成

Wind Doctor®のシステム構成を図2に示す⁴⁾。データ収集装置は監視対象に設置したセンサを用いて定期的に計測し、インターネット上のサーバに計測データを保存する。計測用センサには、振動、変位、温度などのさまざまなセンサを使用することができる。データ管理ソフトは計測データをサーバ上のデータベースで管理し、異常を検出したときにはアラーム情報を発信する。状態監視ソフトはサーバとの通信機能を兼ね備えたグラフィカルユーザーインターフェース (GUI) である。監視対象の状態を視覚的に確認できるだけでなく、計測データに対してフィルタ処理やエンベロープ処理、周波数解析などの分析を実施することができる。

2.2 監視・分析手法

機械設備の変化や傾向を監視するためには、一定の運転状態下でデータを計測するのが望ましい。しかし、自然を相手にする風力発電装置では、風速や風向などの運転環境が刻々と変化する。Wind Doctor®では、運転環境の変化による影響を低減するために、センサ信号とともに運転状態を記録し、類似した条件の計測データを抽出して設備状態の診断に用いている⁴⁾。

診断によって異常が認められた際には、異常の発生原因を推定するために、振動データの周波数解析が行われる。しかし、風速や風向の変化により軸回転速度が大きく変化する場合には周波数解析の精度が低下して、原因推定が困難になることがある。その対策として、Wind Doctor®の状態監視ソフトの分析ツールには、軸回転速度の変動分を補正する機能があり、分析精度の低下を抑制することが可能である。補正の前後における周波数スペクトルを図3に示す。補正後(b)の周波数スペクトルは補正前(a)よりピークが明瞭であり、精度の高い分析が可能である。

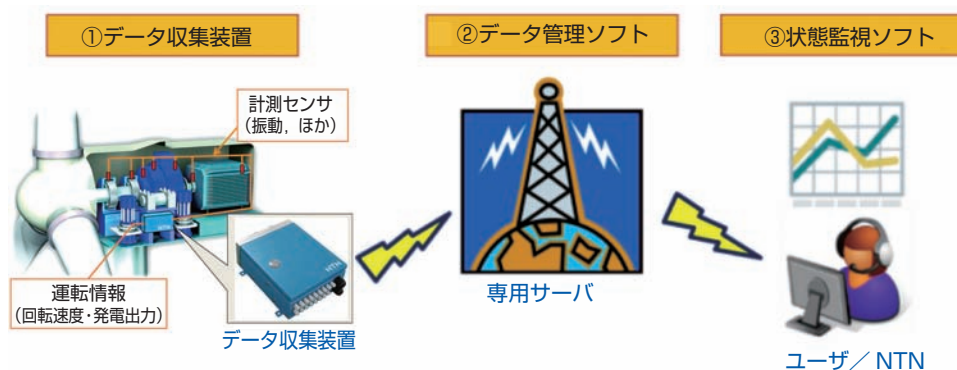


図2 Wind Doctor®の構成⁴⁾
System configuration of Wind Doctor®

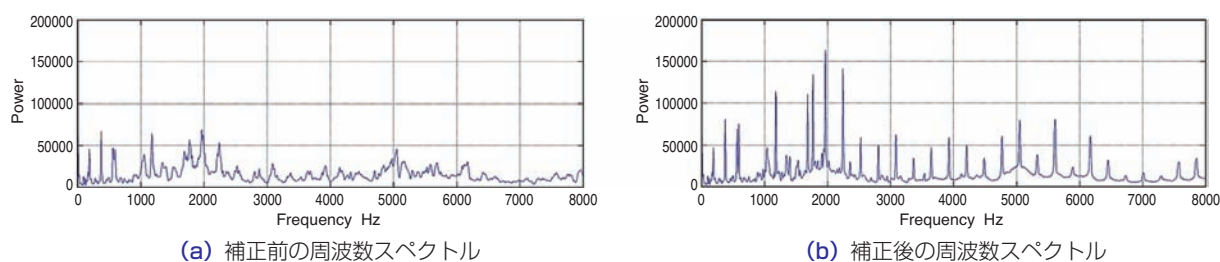


図3 補正前後での周波数スペクトル
Frequency spectrum. (a) Raw data, (b) Corrected data

3. 最新の適用例

NTNは、2013年度よりNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）が実施する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）に東京大学ほかと参画し、国内の風力発電装置の設備利用率向上を目的として、日本各地の風力発電装置にWind Doctor®を設置してメンテナンスにおけるCMSの活用に関する実証試験を行った。以下に、観測データの例を示す。

3.1 発電機軸受の損傷事例

図4に発電機駆動側に設置した振動センサから得られたデータを示す。グラフの横軸は日付、縦軸は振動のレベルである振動実効値を示す。グラフには風力発電装置が定格回転速度の85%以上で稼働している運転状態の計測データを抽出して表示した。

計測点Aの1ヶ月前より、振動実効値が上昇をはじめ、計測点Aで注意しきい値を超える値となった。計測点Aにおける計測データのエンベロープスペクトルを図5に示す。エンベロープスペクトルはフィルタ処

理を施した振動波形に包絡線処理を施し、周波数解析したもので、損傷による振動成分を分析する際に用いられる。計測点Aでのエンベロープスペクトルには、転動体の1点が内輪および外輪に接触する周波数である転動体損傷周波数（ $2fb$ ）のピークおよびその両側に転動体公転周波数の変調成分（ $2fb \pm fc$ ）の側帯波が観測された。この特徴から、軸受の転動体に損傷があり、その損傷により発電機振動が増加したことが推定された。

計測点Aからさらに振動が増加した点である計測点Bのエンベロープスペクトル（図6）には、転動体損傷周波数（ $2fb$ ）に加えて、内輪損傷周波数（ fi ）および外輪損傷周波数（ fo ）のピークが観測されることから、損傷が進展し、転動体に加えて内輪および外輪の軌道面に損傷が発生したことが推定された。

計測点Bの時点で事業者によって設備状態が確認され、異音の発生が認められた。その後、事業者により軸受が交換され、取り外された軸受の分解調査を行った。軸受の内輪および外輪の軌道面には、電食による損傷が認められた（図7）⁵⁾。

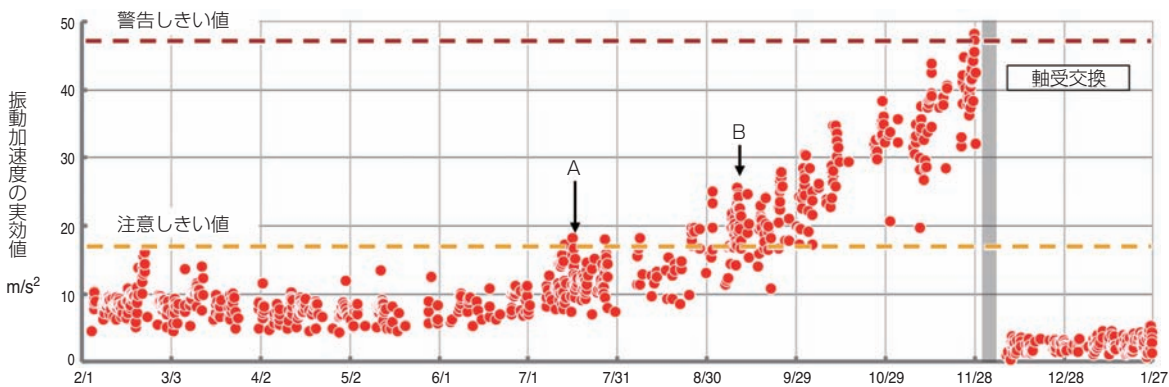


図4 発電機駆動側軸受付近に設置した振動センサの振動実効値のトレンドグラフ
Trend graph of RMS value at generator drive end

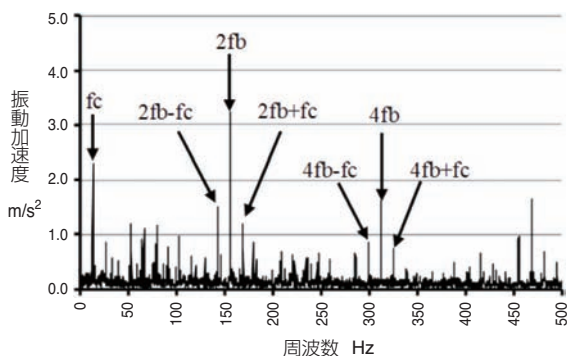


図5 計測点Aでのエンベロープスペクトル
Envelope spectrum at A

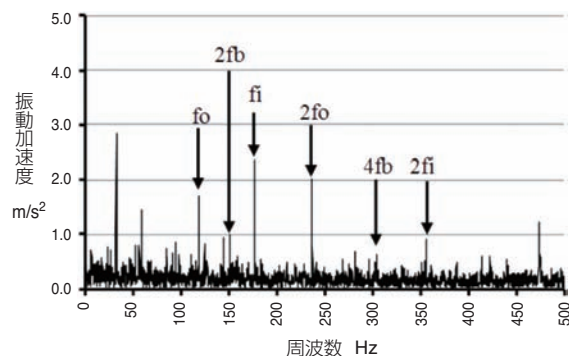


図6 計測点Bでのエンベロープスペクトル
Envelope spectrum at B

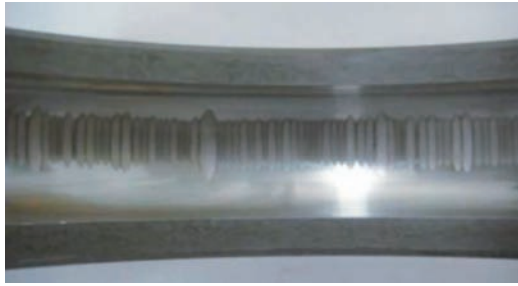


図7 電食による外輪軌道面の損傷⁵⁾
Outer raceway failure of electrical pitting

本事例においては、CMSの利用によって現地の事業者が異常を感じるよりも2ヵ月早く、故障の兆候を検知した。そのため、報告を受けた事業者は余裕を持って準備を進め、風が強くなる冬期に入る前のタイミングで軸受を交換し、発電に適した時期の運転停止を防止することができた。

3.2 増速機軸受の損傷事例

図8に増速機遊星部に設置した振動センサから得られた振動実効値のトレンドグラフを示す。グラフには風力発電装置が定格回転速度の85%以上で稼働して

いる運転状態の計測データを抽出して表示した。

CMS設置直後である計測点Cのエンベロープスペクトル(図9)には、中速軸軸受の内輪損傷周波数(f_i)のピークおよびその両側に中速軸回転周波数の変調成分($f_i \pm f_r$, $2f_i \pm f_r$)の側帯波が観測されたため、CMS設置直後より軸受の内輪に損傷があることが推定された。しかし、振動実効値は比較的低い水準であったため、経過観察することにして、最初の1ヵ月のデータを基に仮の注意しきい値を定めた。

CMS設置以降、振動実効値は一定のレベルで推移していたが、設置から半年後の計測点Dで振動実効値が上昇をはじめ、計測点Eで注意しきい値を超えた。計測点Eでのエンベロープスペクトル(図10)には内輪欠陥周波数(f_i)およびその変調成分($f_i \pm f_r$)の側帯波が計測点Cと比較して強く観測されることから、軸受の内輪に発生した損傷の進展が推定された。

計測点Eで事業者に軸受内輪の損傷が進展していることを報告した。その後、事業者によって内部点検と軸受交換が実施された。取り外された軸受内輪の軌道面には、軸方向のき裂が複数認められ、き裂から進展したと考えられるはく離も確認された(図11)⁵⁾。

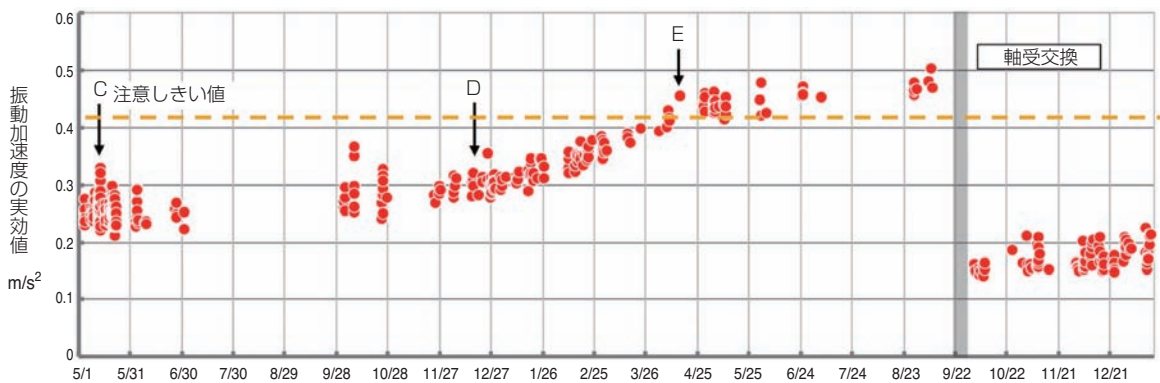


図8 増速機遊星部に設置した振動センサの振動実効値のトレンドグラフ
Trend graph of RMS value at gearbox planetary

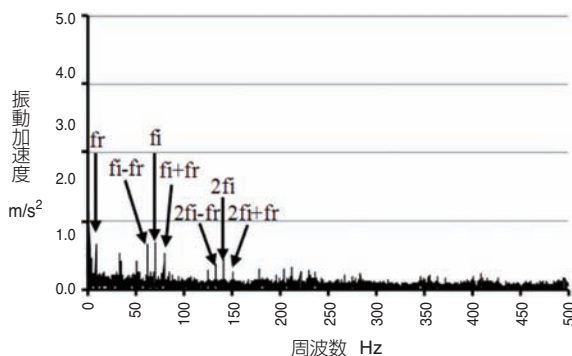


図9 計測点Cでのエンベロープスペクトル
Envelope spectrum at C

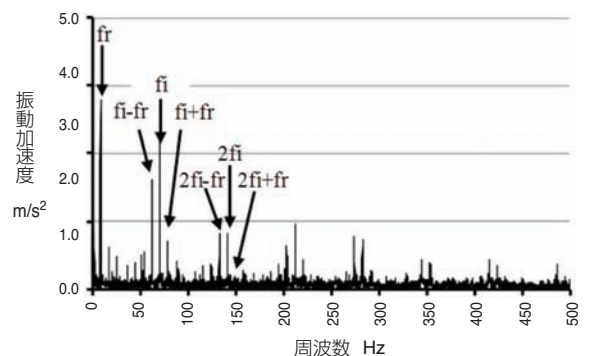


図10 計測点Eでのエンベロープスペクトル
Envelope spectrum at E

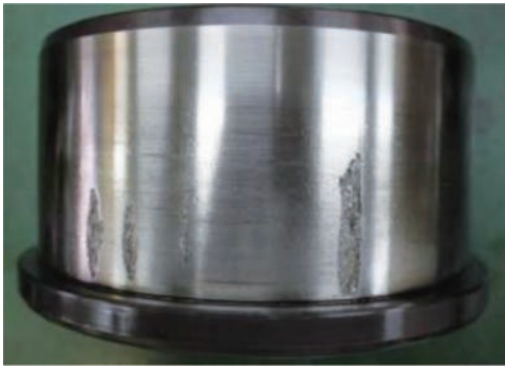


図11 中速軸軸受の内輪損傷⁵⁾
Inner raceway failure

本事例においては、設置当初の診断で損傷の兆候を発見し、その後の継続監視によって、損傷の進展も正確に検知した。事業者はCMSによる分析結果の報告を受け、計画的に準備を行い、適切なタイミングで軸受を交換することができた。

4. 今後の課題

補修作業にともなう停止時間を最小限に抑え、逸失電力およびメンテナンスコストを低減するためには、構成部品の運用限界を的確に把握し、適切な時期に補修作業を計画する予測技術が重要となってくる。しかし、風力発電装置においては、風況などの運転環境の違いによって故障に至る経過が大きく異なるため、余寿命を正確に予測することが難しいという課題がある。また、主軸受をはじめとする低速回転軸部では、損傷の進展が遅く、故障に至るまでのデータを十分に収集するには長期間の観測が必要である。

今後も精度の高い余寿命予測の実現に向けて、データの収集と実機データの分析を継続するとともに、低速回転軸部の異常検知技術を向上させることが重要である。

執筆者近影



宮崎 誠

産業機械事業本部
ロボティクス・センシング技術部



畠山 航

産業機械事業本部
ロボティクス・センシング技術部

5. おわりに

本稿では、CMSによるデータ分析の手法、およびNEDO事業でのスマートメンテナンス技術研究開発の中で得られたWind Doctor[®]の適用例を紹介した。

今後も風力発電事業のメンテナンスコスト削減および設備利用率の向上に貢献するため、CMS技術の高度化を推進していく。

参考文献

- 1) GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL, GLOBAL WIND Report 2017, (2018).
- 2) 竹内, 長谷場, 池田, 風力発電装置へのコンディションモニタリングの適用, NTN TECHNICAL REVIEW No. 80, (2012) 15-18.
- 3) 橋爪, 竹内, 田中, 状態監視システム (CMS) の取り組み, NTN TECHNICAL REVIEW No. 82, (2014) 74-77.
- 4) 畠山航, 風力発電機向け状態監視システムの最新適用状況, 月刊トライボロジー, 356, (2017) 38-41.
- 5) NEDO, 平成29年度最終成果報告書「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)(リスク解析等)」, (2018).

高精度絶対角検出用複列磁気リングの開発

Development of Multi Track Magnetic Ring for High Accuracy Absolute Angle Detection

小池 孝誌* Takashi KOIKE 福島 靖之* Yasuyuki FUKUSHIMA
 澁谷 勇介* Yusuke SHIBUYA 伊藤 浩義** Hiroyoshi ITOU



産業用ロボットの導入拡大とともに、ロボットはますます緻密な作業が求められている。そのためロボットアームの各関節の角度を高精度に検出するニーズがある。当社が保有する精密着磁技術を応用して、高精度な絶対角検出を低コストで実現できる「複列磁気リング」を開発した。

As the introduction of industrial robots progresses, more accurate work is required. Therefore, it is necessary to detect the angle of each joint of the robot arm with high accuracy. NTN has developed a "Multi-track magnetic ring" that can realize absolute angle detection with high accuracy at low cost by applying our precise magnetization technology.

1. はじめに

近年、モノがインターネットとつながる IoT (Internet of Things) をロボットに適用する動きが進んでいる。また、中国をはじめとする新興国では、人件費の高騰、世界規模での価格競争力強化や、品質向上を目的とした産業用ロボットの導入が拡大している。日本では、少子高齢化に伴う生産年齢人口の減少と人手不足が深刻化し、生産現場だけでなく、医療、介護・福祉、物流、警備などの分野でサービスロボット市場の成長が見込まれている¹⁾。

日本はこれまで数多くの産業用ロボットを世界に供給しており、減速機、サーボモータ、各種センサなどの構成部品も同様に数多く生産されている。近年、産業用ロボットは、人工知能 (AI : Artificial Intelligence) を活用して、より複雑かつ高度な作業ができるよう開発が進められており、構成部品に対する要求もますます高度化している。特に緻密な作業では、ロボットアーム先端部の位置決め精度が重要であり、各関節の角度を高精度に検出する必要がある。

NTNは上記のような産業界の背景、ニーズに鑑み、当社が保有する精密着磁技術を応用して、高精度な角度検出を実現できる「複列磁気リング」を開発した²⁾。

2. 角度の検出方式

一般に角度検出機器（以下、角度センサと呼ぶ）は、検出方式や出力方式の違いにより図1のように大別される。検出方式として、発光素子からの光をスリット板に透過させたり、反射板に反射させたりして受光素子で検出する光学式や、角度変化に対し磁界の向きや強さの変化を検出する磁気式などがある。また、出力方式として、角度変化に対して繰り返しの信号が出力され、相対的な角度が検出できるインクリメンタル方式と、現在の角度情報が出力され、絶対的な角度が検出できるアブソリュート方式がある。ロボットの用途には、初期化が不要なアブソリュート方式の角度センサが適している。特に、近年発展が目覚ましい多

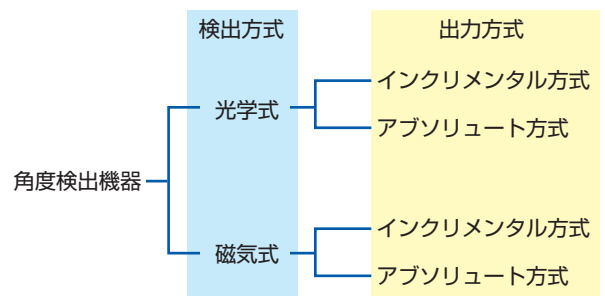


図1 角度検出機器の分類
 Classification of angle sensor

*商品開発研究所

**産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部

関節ロボットでは、高分解能かつ高精度の角度センサが望まれており、現在は、これらの点で優れる光学式の角度センサ（ロータリエンコーダ）とモータが一体となった、サーボモータが多く利用されている。

3. 磁気式角度センサ

アブソリュート方式の磁気式角度センサの構成は、**図2**に示すようなN極、S極の1極対からなる永久磁石を回転軸端に配置し、同軸線上で対向するように磁気センサを固定側に配置することが知られている。磁気センサとしては、ホール素子やMR（Magneto resistance 磁気抵抗）素子が利用されている。

一般に、永久磁石と磁気センサを用いる構成は、光学式の角度センサ（ロータリエンコーダ）に比べて分解能や精度で劣るが、安価で、油、塵、埃等の使用環境の影響を受けにくい利点がある。よって、分解能や精度を向上することにより、ロボットなどへの適用が大きく広がる。

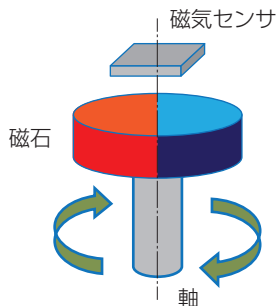


図2 磁気式アブソリュート方式の角度検出
Angle detection of magnetic absolute method

4. 回転／角度センサの開発経緯

NTNでは、深溝玉軸受に、N極、S極を多極着磁した磁気リングと、磁気センサICを取付けることで、回転速度と回転方向が検出可能な、インクリメンタル方式の「回転センサ付軸受」を産業機械向けに生産している³⁻⁴。

また、深溝玉軸受に、N極、S極を多極着磁した磁気リングと、複数のホール素子を内蔵した磁気センサICを取り付けることで、「回転センサ付軸受」よりも高分解能な「高分解能回転センサ付軸受」を開発した。これは、磁気センサ内部でN極、S極の1極対を最大40通倍することにより、着磁極対数に対して最

大40倍のインクリメンタル出力が可能である。更に、N極、S極を特殊なパターンで多極着磁した磁気リングを用いる事により、原点位置信号も出力できる「原点信号出力タイプ高分解能回転センサ付軸受」も開発した⁵。

一方、鉄製鋳物やアルミダイキャスト製のハウジング内に、永久磁石と磁気センサICをアキシャル対向させて検出する、アブソリュート方式の「角度センサユニット」を開発し、建設機械向けに生産している⁶。

自動車用ハブベアリングの回転速度検出⁷⁻⁸で培われたセンサ技術は、サーボモータの回転速度制御、ステアリングの角度検出などに適用が広がっている。しかしながら、高精度な角度検出が要求されるロボットの関節部などの用途への適用には至っていない。

そこで、NTNがこれまでに開発した磁気センサ技術を基盤として、専用の磁気センサIC（5.2項参照）と組み合わせることで、回転軸の絶対角を高分解能かつ高精度に検出できる「複列磁気リング」を新たに開発した。

5. 複列磁気リングについて

5.1 概要

今回開発した「複列磁気リング」の外観を**図3 (a)**に示す。

複列磁気リングは、薄板鋼板をプレス成形した芯金と、磁性材料を混練したゴム材料を、芯金の円環外周



図3 複列磁気リング：ラジアル着磁タイプ
Multi Track Magnetic Ring-radial type

部に加硫接着したゴム磁性体で構成されている。ゴム磁性体部の外径面円周上には2つの磁気トラックが形成されており、図3 (b) 及び (c) に示すように、主トラックではN極S極64極対が、副トラックでは63極対が着磁されている。

図3に示した「ラジアル着磁タイプ」の複列磁気リングの他に、図4に示すように「アキシャル着磁タイプ」の複列磁気リングも開発した。それらの主な仕様を表1に示す。

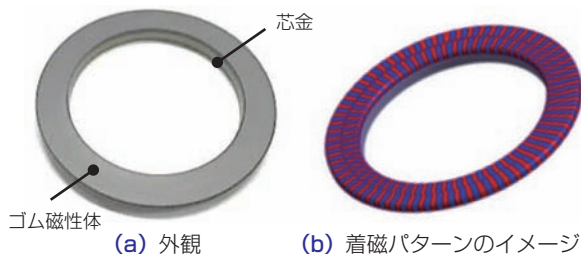


図4 複列磁気リング：アキシャル着磁タイプ
Multi Track Magnetic Ring-axial type

表1 複列磁気リングの主な仕様
Main specification for Multi Track Magnetic Ring

項目	品番	MTR64	MTA64
着磁タイプ		ラジアル	アキシャル
外径 (mm)		Φ51.5	Φ56
内径 (mm)		Φ44	Φ41
幅 (mm)		8.2	4.0
質量 (g)		10.7	9.8
着磁極対数		64/63極対 (主トラック128極, 副トラック126極)	
磁石		ゴム磁石	
芯金		SPCC (圧延鋼板) 厚さ 0.6mm	
使用温度範囲 (°C)		-40~+110	

5.2 絶対角検出原理と分解能

図5に複列磁気リングによる絶対角検出原理を示す。複列磁気リングに対向配置する磁気センサICは、各磁気トラックに対向する2つの検出部（検出部1、検出部2）と絶対角演算部を内蔵しており、iC-Haus社のIC (iC-MU)⁹⁾を使用することもできる。

表1に示す複列磁気リングでは、その1回転に対して、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、それらの位相差が1回転で0°から360°となることを利用して絶対角を検出する。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。さらに、この磁気センサは、磁極間の磁気強度を正確に読み取ることで、12bitの通倍が可能である。このため、1極対分の角度情報を2¹²分割することが可能であり、64極対数 (2⁶) を考慮すると、18bit (分解能 約0.0014°) の角度情報を出力することができる⁶⁾。なお、磁気センサICのパラメータ設定によっては、最大20bit (分解能 約0.00034°) の出力も可能である。

このように高い分解能を実現するため、NTNでは独自の着磁技術を開発し、複列磁気リングの各磁極の幅を非常に高精度にコントロールしている。

5.3 特長

1) 高分解能・高精度

前述のように、最大20bit (分解能 約0.00034°) の角度情報を出力することができる。

図6は、複列磁気リングと5.2項に記載の磁気センサICを組み合わせた角度センサの角度誤差を測定した

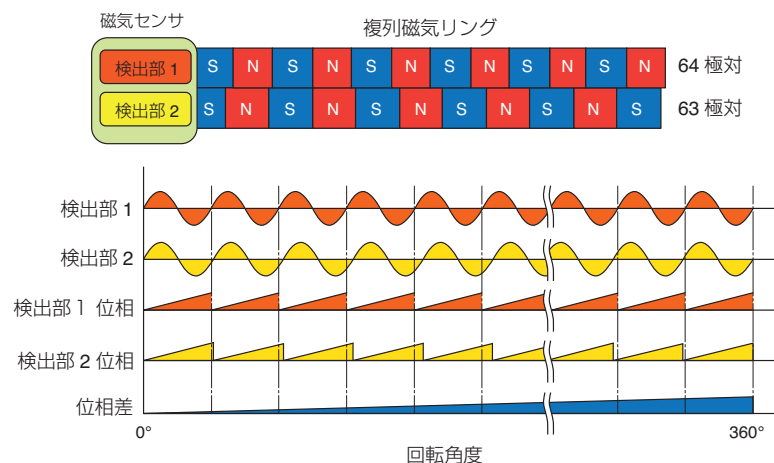


図5 絶対角検出原理
Absolute angle detection principle

例である。本例は、取付け誤差を極力小さくした理想的なアライメントではあるが、角度誤差 $\pm 0.025^\circ$ を実現している。

2) 中空形状=軽量・コンパクト

中空かつ大口径であるため、ロボットの関節部などに適用した場合、内径側に配線ケーブル等を通すことができる。よって、ロボットなどのコンパクト化や軽量化などに貢献する。

図7に、複列磁気リングと磁気センサICをロボットの関節部に適用した場合のイメージを示す。

減速機の出力段に複列磁気リングを固定し、磁気トラックに対向する位置に磁気センサICを実装したプリント基板を配置する。

複列磁気リングは、回転軸に圧入等で固定するため、省スペースで搭載可能であり、関節部の小型化に貢献する。また、複列磁気リングの採用により、従来のロータリエンコーダより取付けスペースを小さくすることができる。コンパクトであるため、回転軸の数が多いロボットなどでは、設計自由度の向上に貢献する。

3) 耐環境性

複列磁気リングは磁気式であるため、振動、高温、塵埃、油ミスト等に対する耐環境性に優れており、光学式エンコーダでは対応できない環境でも使用することができる。

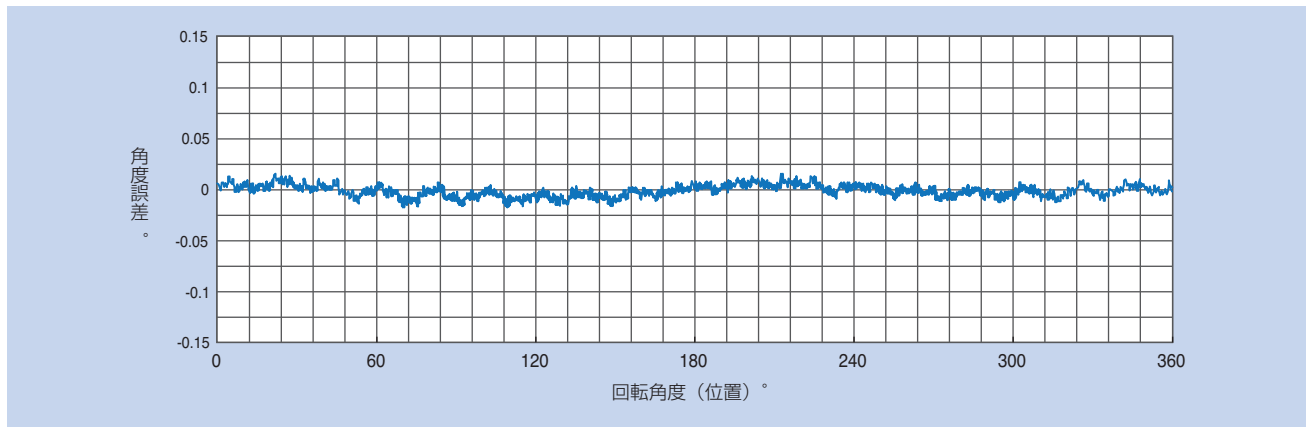


図6 複列磁気リングと専用磁気センサICを組み合わせた場合の角度精度測定結果
Angular accuracy measurement result when combining the Multi Track Magnetic Ring and dedicated magnetic sensor IC

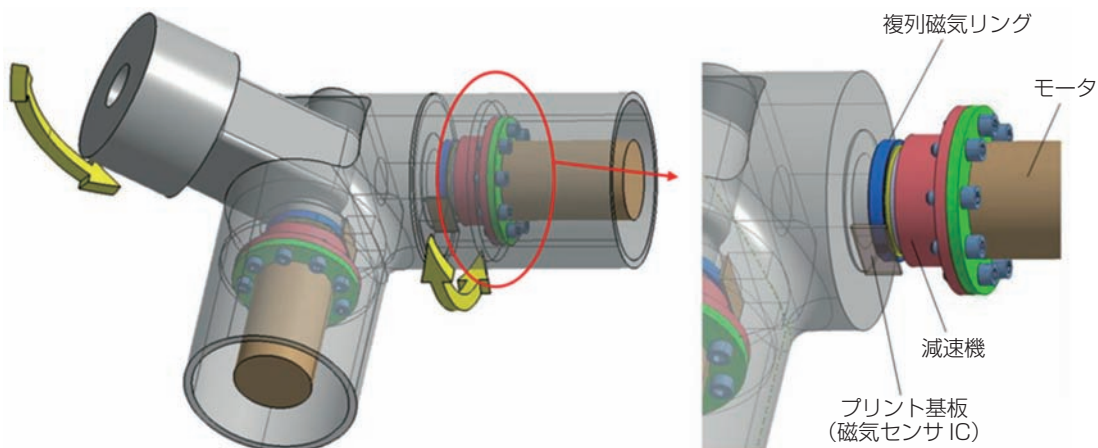


図7 複列磁気リングのロボット関節への適用例
Application example of the Multi Track Magnetic Ring to robot joint

6. トルクセンサへの適用事例

開発した複列磁気リングは、前述のようなロボット関節部の絶対角検出用途の他に、トルクセンサへの応用も想定している。

複列磁気リングを用いることで、18~20bitの高分解能で角度の検出ができるため、トーションバーの両端にそれぞれ複列磁気リングと磁気センサICを配置し、各磁気センサICの出力角度差からトーションバーの捩じれ量を算出することで、トルク検出が可能である。

図8に、複列磁気リングを実際のロボットに搭載した例を紹介する。東京ロボティクス(株)様が開発した7軸のロボットアーム (TOROBO ARM) の各関節に64/63極対着磁の複列磁気リングが搭載され、絶対角度とトルクの検出に利用されている。複列磁気リングの中口径が大きく設計自由度が高いことや角度精度がこの用途に適合していると考えられる。



図8 複列磁気リングの適用事例
Application example of the Multi Track Magnetic Ring
ロボットアーム (TOROBO ARM)
(写真ご提供：東京ロボティクス (株) 様)

7. 今後の展望

今回開発した複列磁気リングは、64/63極対のラジアル着磁タイプと、アキシアル着磁タイプの2種類である。今後は、極対数が小さい32/31極対着磁の小口径タイプの開発を進めている。

設計自由度の向上や、様々なロボットでの適用を視野に、更なる高分解能化、高精度化、軽量化、薄型化など、市場の要求に応えることができるよう、引き続き商品開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, NEDOロボット白書(2014).
- 2) 小池, 福島, 澁谷, 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.
- 3) 伊藤, 小池: 回転センサ付軸受について, NTN TECHNICAL REVIEW No. 69, (2001) 108~116.
- 4) 小池, 石川, 伊藤, 水谷, 回転センサ付軸受の耐漏洩磁束性向上, NTN TECHNICAL REVIEW No. 71, (2003) 74~79.
- 5) 伊藤, 高橋, Pascal DEBIOLLES, Cyril PETERSCHMITT, 上野新太郎, 原点信号出力タイプ高分解能回転センサ付軸受, NTN TECHNICAL REVIEW No. 78, (2010) 70~76.
- 6) 糸見, 伊藤, 建設機械向けセンサユニットの紹介, NTN TECHNICAL REVIEW No. 76, (2008) 118~125.
- 7) Pascal DESBIOLLES, Achim FRIZ, 回転速度及び位置測定用高分解能センサ素子MPS40Sと複列磁気リングの開発, NTN TECHNICAL REVIEW No. 75, (2007) 36~41.
- 8) 西川, 高橋, Christophe 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) 52~57.
- 9) iC-Haus GmbH, iC-MU off-axis nonius encoder with integrated hall sensors

執筆者近影



小池 孝誌
商品開発研究所



福島 靖之
商品開発研究所



澁谷 勇介
商品開発研究所



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

[商品紹介]

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 福島 靖之** Yasuyuki FUKUSHIMA
 澁谷 勇介** Yusuke SHIBUYA 山本 庸平*** Yohei YAMAMOTO



近年の工作機械は、「高速、高剛性、高精度」に加え、信頼性向上のための状態監視機能やIoTへの対応が強く求められている。NTNは、外輪間座に温度、熱流、振動の各種センサを内蔵し、軸受軌道面の近傍での状態検出を可能とした「工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニット」を開発した。本稿では、開発したユニットの特長や構造、性能試験結果を紹介する。

Recently, machine tools are required not only high speed, high rigidity and super precision, but also condition monitoring function and the "Connected Industries" related technology strongly for higher reliability. To realize the above mentioned machine tools, NTN has developed the "Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles" to detect the various conditions like temperature, heat flux and vibration from the bearings. The unit has the various sensors inside the outer spacer beside the bearings. This report introduces the features, mechanism and performance of the unit.

1. はじめに

工作機械は、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、市場要求はますます多様化している。近年、NC装置の多機能化や状態監視機能の付与など、新たな機能やコンセプトを持つ工作機械が次々と開発されている。^{1) 2)}

特に近年の工作機械は、少子高齢化による人手不足を背景として、より高度な状態監視技術と制御技術、IoTを活用した、さらなる無人化や省人化、生産性向上が求められている。このため、工作機械の主軸やそれを支える主軸用軸受の異常を早期に検知し、突然の予期せぬ損傷やそれに伴う生産停止、主軸交換などの損害を防ぐことが強く望まれている。

上記の課題を解決する機能商品として、「工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニット」を新たに開発した。本ユニットは、外輪間座に各種センサを内蔵し、軸受軌道面の近傍での状態検出を可能とし、**図1**に示す旋盤やマシニングセンタに適用することができる。本軸受ユニットの特長や構成、評価結果を以下に紹介する。

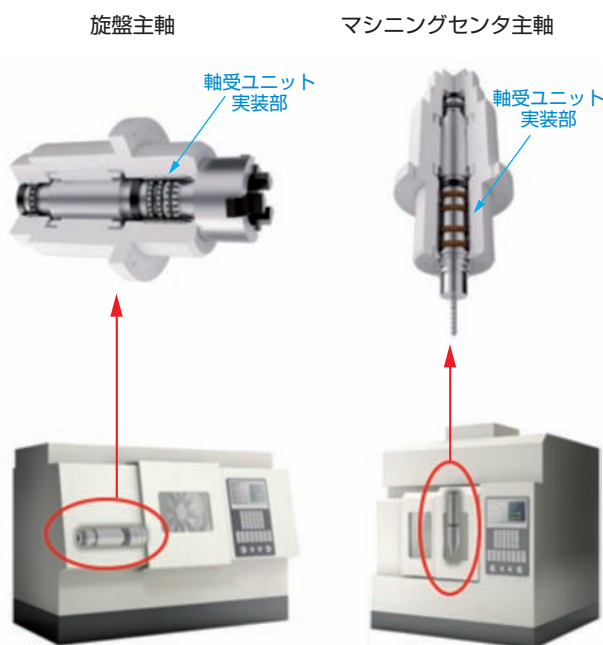


図1 工作機械と主軸 (左: 旋盤、右: マシニングセンタ)
 Machine tools and spindles
 (Left : Lathe, Right : Machining center)

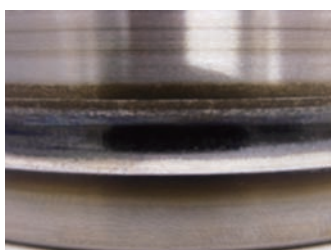
*産業機械事業本部 適用技術部

**商品開発研究所

***産業機械事業本部 製品設計部

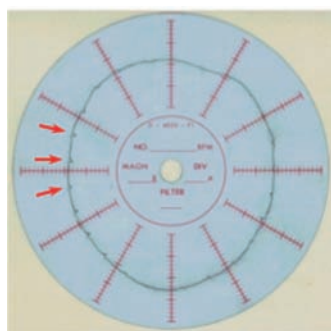
2. 工作機械主軸用軸受の損傷形態と開発品の特長

工作機械主軸用軸受は、他の産業機械用軸受に比べ、軽荷重で使用される。このため、材料の疲れによるフレーキング³⁾が生じることはほとんどなく、主に、「(a)潤滑不良による面荒れ、ピーリング、焼損」や「(b)主軸と加工物の衝突による圧こん」が発生する(図2)。



(a) 潤滑不良による面荒れ、ピーリング、焼損

写真は、アンギュラ玉軸受の焼損(内輪軌道面)
エアオイルの供給不足で焼損発生



(b) 主軸と加工物の衝突による圧こん

写真はアンギュラ玉軸受の内輪軌道面に発生したボールピッチで生じた圧こん(真円度測定結果、矢印で図示した部分)

図2 工作機械主軸用軸受の損傷事例
Damage example of machine tool spindle bearing

今回開発した軸受ユニットは、軸受に隣接する外輪間座に各種センサを内蔵している。これにより、一般的な主軸の外周面での計測に比べ早期の検出を可能とした。また、さらに応答性を向上させるため、新たに熱流センサを採用した。「(a)面荒れ、ピーリング、焼損」は、温度センサ、熱流センサ、および振動センサによって検出可能であり、「(b)圧こん」は、振動センサで検出できるようにした(表1)。

表1 工作機械主軸軸受の主要な損傷形態と測定項目
Major damage mode of machine tool spindle bearings and measurement items

	温度	熱流	振動
(a) 潤滑不良による面荒れ、 ピーリング、焼損の検知	○	○	○
(b) 主軸と加工物の衝突による 圧こんの検知	—	—	○

3. センサ内蔵軸受ユニットの構造

本軸受ユニットの構造を図3に示す。アンギュラ玉軸受背面組合せ(DB)の間に組み込んだ外輪間座に3種類のセンサを内蔵している。以下に各センサについて説明する。

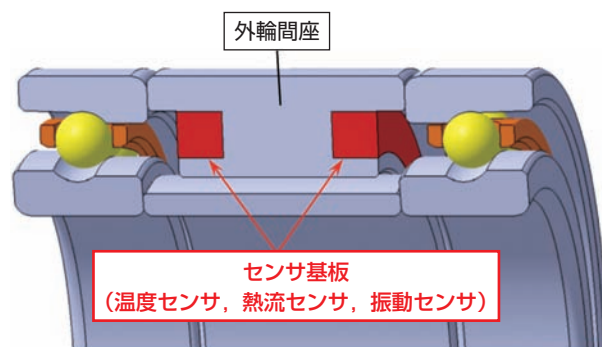


図3 センサ内蔵軸受ユニットの構造
The sensor integrated bearing unit

【温度センサ】

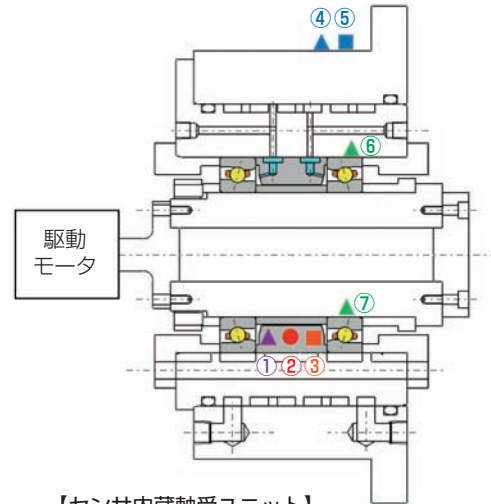
主軸の回転や切削負荷により生じる軸受の発熱を検出する。運転中の軸受温度を測定する場合、センサの取付け易さから、ハウジング外周面の温度を測定するのが一般的だが、軸受とハウジング外周面の間には、冷却流路が存在するため、軸受温度を直接測定した場合と比べ温度が低くなる。また、熱容量が大きいハウジングの温度を測定するため、軸受到急激な発熱が発生しても、温度上昇を検出するまでに時間を要する。そのため、軸受の急激な発熱を即時に把握することが困難であった。本軸受ユニットは、軸受到隣接する外輪間座の温度を測定するため、ハウジング外周面での測定に比べ、軸受の温度をより正確に測定できる。

【熱流センサ】

主軸用軸受は、主軸の回転に伴い、内輪と外輪の間に温度差(以下、内外輪温度差)が発生する。これは、内輪と外輪の放熱性の違いが主な要因であり、放熱し難い内輪が外輪より高い温度を示す。内外輪温度差は軸受が高速回転するほど大きくなり、それに伴い、軸受内部の予圧荷重や転がり面の接触面圧が増加する。また、内外輪温度差は、潤滑不良やそれによる軸受内部の損傷、焼損が生じる際にも増加する。今回採用した熱流センサは、通常温度センサより微小な変化を捉え、相対的に温度の高い内輪から外輪に向かう熱流束を測定し、内外輪温度差に起因する異常検知に使用している。

【振動センサ】

「(a) 面荒れ, ピーリング, 損傷」と「(b) 圧こ
ん」の両方の異常検知に用いる。一般的に運転中の軸
受振動を測定する場合, 前述の温度センサと同様, 設
置のし易さから, ハウジングの外周面に振動計を取り
付けて測定することが多い。しかし, 運転中の軸受振
動をハウジングを介して測定するため, 軸受到起因す
る振動は減衰する。そのため, 軸受異常が進行して,
振動レベルが大きい状態でなければ検出は難しい。こ
れに対して, 本軸受ユニットは, 軸受到隣接する外輪
間座に振動センサを内蔵しており, 異常の初期段階,
振動レベルの小さな状態でも, 感度良く測定するこ
とが可能である。



【センサ内蔵軸受ユニット】

- ① 温度センサ ▲
- ② 熱流センサ ●
- ③ 振動センサ ■

【一般的な測定方法】

- ④ ハウジング外周面の温度 (熱電対) ▲
- ⑤ ハウジング外周面の振動 ■
- ⑥ 軸受外輪外径面の温度 (熱電対) ▲
- ⑦ 軸受内輪内径面の温度 (熱電対) ▲

図4 試験機の構造, 測定項目, 測定位置
Test spindles, measurement items and points

4. 性能評価試験

4.1 試験条件、試験機構造

工作機械主軸スピンドルを模した試験機を図4に示
す。開発した軸受ユニットを組み込み, 状態検出性能
を評価した。試験条件を表2に示す。試験軸受はセラ
ミックボール入り超高速アンギュラ玉軸受 (HSEタ
イプ) を用いた。工作機械の主軸を想定し, 軸受配列
は2列背面組合せ (DB) とした。また, 本軸受ユニ
ットに内蔵したセンサに加え, 比較検証用として, 一
般的な測定位置であるハウジング外周面にもセンサを
設置した。合わせて, 軸受外輪外径面の温度も測定し
た (図4)。

表2 性能評価試験条件
Conditions of functional tests

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 (組込み後予圧750N)
回転速度	0~16,000min ⁻¹
潤滑方式	エアオイル潤滑
給油量	0.03mL/10min
潤滑油	ISO VG32
潤滑エア流量	30NL/min
外筒冷却	あり, 室温同調
軸姿勢	横軸

4.2 試験結果

性能評価試験 (表2, 図4) での軸受ユニットの各
種センサ出力を図5に示す。低速域から超高速域
(d_{mn} 値144万) まで, いずれのセンサも正常に動作
することを確認した。

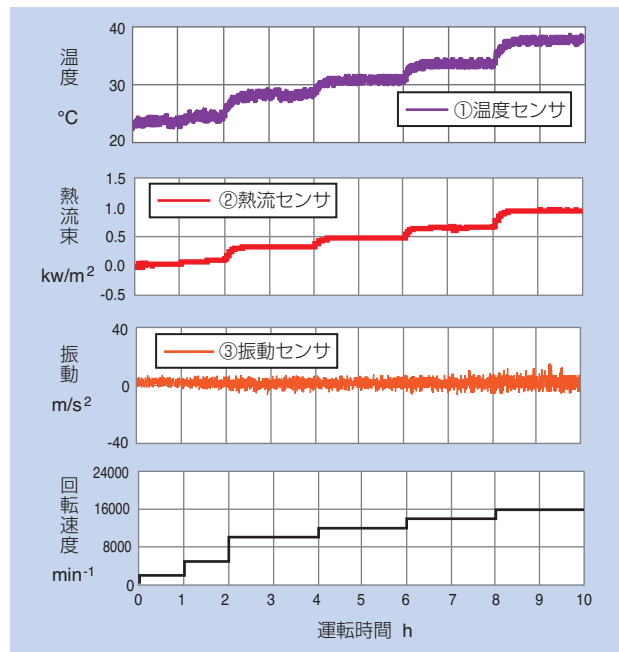


図5 基本性能確認試験結果※1
Fundamental test result

また, 本軸受ユニットと4.1項に記載の一般的な測
定方法を比較した。温度, 振動の測定結果を図6, 図
7に示す。軸受到隣接する外輪間座に内蔵した開発ユ
ニットの温度センサは, 主軸のハウジング外周面での
計測よりも軸受外輪外径面の温度に近いことを確認し

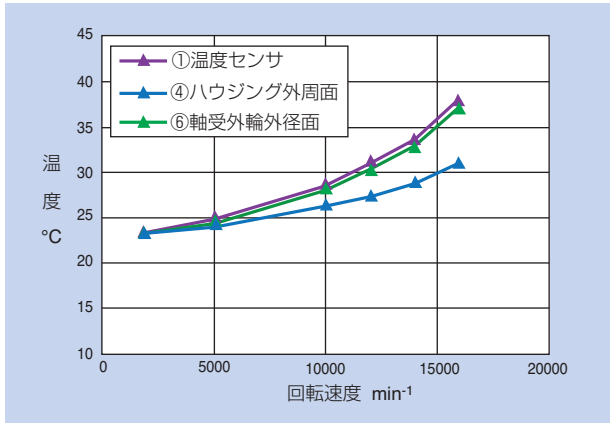


図6 温度測定結果（測定位置と温度の関係）※1
Temperature measurement result (measurement point comparison)

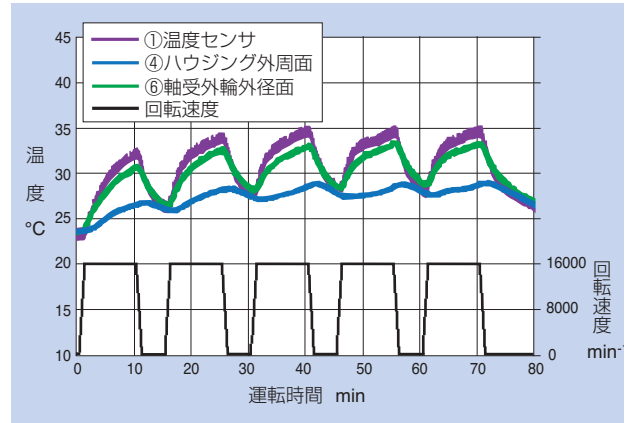


図8 加減速試験での温度測定結果（測定位置と温度の関係）※1
Temperature measurement result in the frequent cycle test (measurement point comparison)

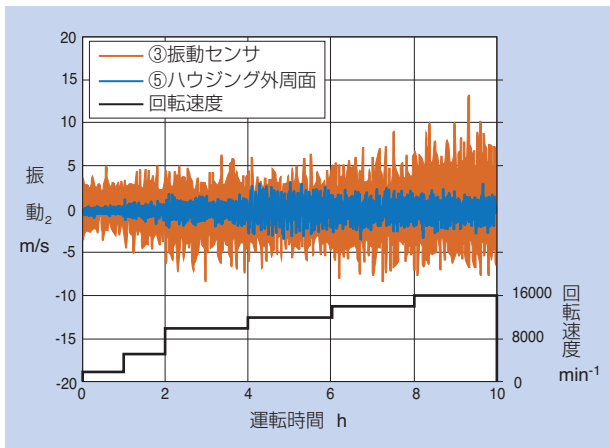


図7 振動測定結果（測定位置と振動の関係）※1
Vibration measurement result (measurement point comparison)

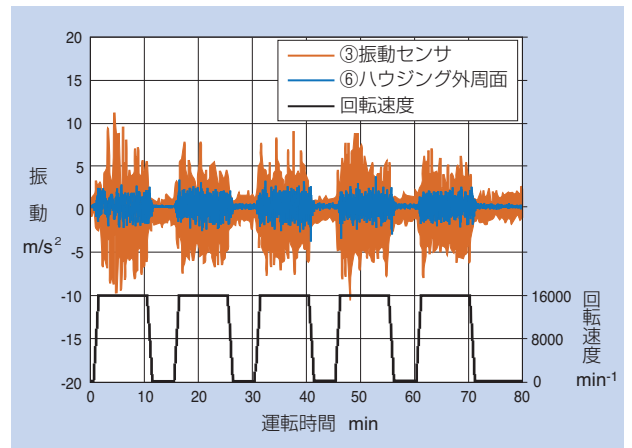


図9 加減速試験での振動測定結果（測定位置と振動の関係）※1
Vibration measurement result in the frequent cycle test (measurement point comparison)

た。また、振動についても、ハウジング外周面での計測より高い値を示すことを確認した。

さらに、回転速度を一定周期で変動させる加減速試験でも同様に比較した。温度、振動の測定結果を図8、図9に示す。加減速試験でも、外輪間座に内蔵した開発ユニットの温度センサは、主軸のハウジング外周面での計測よりも軸受外輪外径面の温度に近く、また、振動センサもハウジング外周面での計測より高い値を示すことを確認した。

加減速試験での熱流センサの出力を図10に示す。熱流センサは回転速度の加減速や、それに伴って生じる内外輪温度差の増減に対する応答性が良く、異常検知の精度を高めることができる。ここで内外輪温度差は、軸受内輪内径面の温度と軸受外輪外径面の温度の差である。

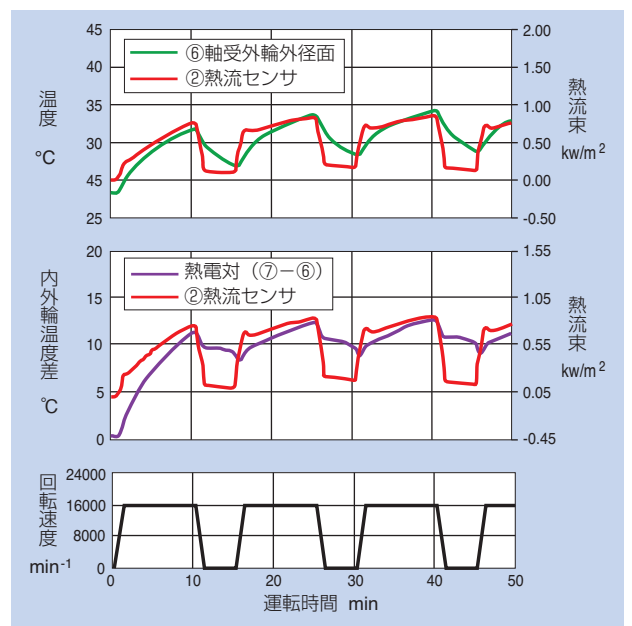


図10 加減速試験での測定結果（熱流束と回転速度、内外輪温度差、温度の関係）※1
Measurement result in the frequent cycle test (heat flux, temperature and temperature difference between IR and OR)

※1 各項目の測定位置は図4を参照のこと。

4.3 軸受焼損再現試験

軸受が焼損する際の兆候検知を試みるため、軸受焼損の再現試験を実施した。試験条件を表3に示す。基本性能評価試験、加減速試験と同様、図4の試験機を使用した。本試験では、主軸組立時にごく少量の潤滑油を軸受に注入することで、試験軸受が焼損しやすい状況にした。また、試験軸受の焼損に伴ってモータが

表3 軸受焼損再現試験条件
Conditions of the bearing seizure test

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 (組込み後予圧750N)
回転速度	18,000min ⁻¹ 一定
潤滑方式	主軸組立時に潤滑油を数滴注入 (主軸運転中には給油しない)
外筒冷却	あり、室温同調
軸姿勢	横軸

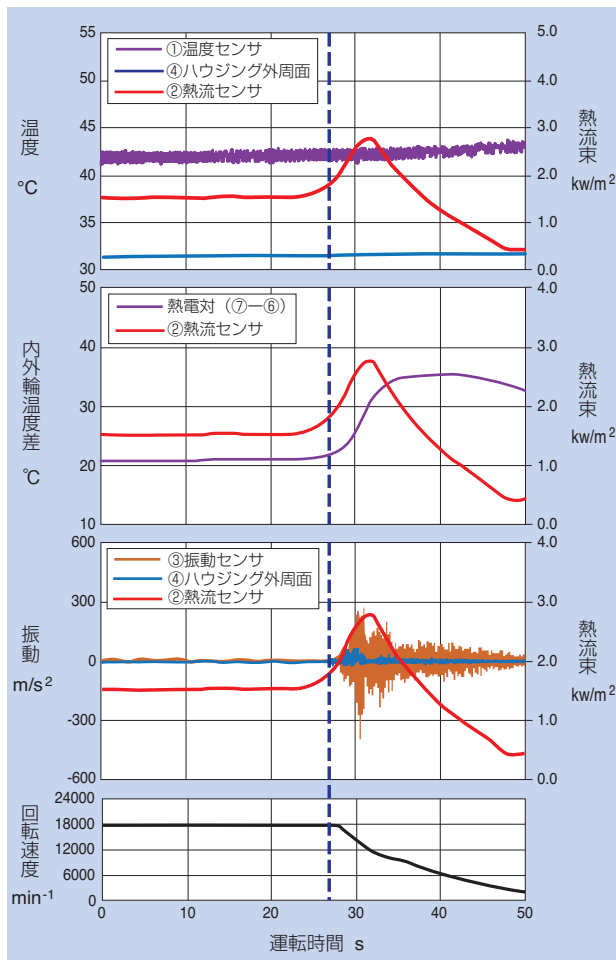


図11 軸受焼損再現試験での測定結果 (熱流束と回転速度、温度、内外輪温度差、振動の関係) ※1
Measurement result in the seizure test (heat flux, temperature and temperature difference between IR and OR, vibration)

過負荷になると、リミッターが作動し、試験機を自動停止するよう設定した。

熱流束と温度、内外輪温度差、振動の関係を図11に示す。モータ過負荷検出時の運転時間を図11に青破線で示す。試験結果より、熱流束は、温度や内外輪温度差、振動よりも早い段階で出力値の上昇が認められており、焼損の兆候の早期検出に有効と考えられる。

なお、図11では、過負荷検出後に試験機が自動停止したにもかかわらず、振動値が増大したのは、軸受焼損の状態で、モータおよび主軸が惰性回転したためである。

4.4 圧こん軸受試験

主軸と加工物の衝突によって生じる軌道面の圧こんに対し、振動センサを使用した異常検知を試みるため、軸受軌道面に擬似圧こんを形成し、運転試験を実施した。試験条件を表4に示す。基本性能評価試験、加減速試験と同様、図4の試験機を使用した。また、今回回転受軌道面に形成した擬似圧こんを図12に示す。

試験軸受の1,800min⁻¹時の軸受強制振動数の計算結果を表5に示す。本軸受ユニットと4.1項記載の一般的な測定方法での振動出力の周波数解析結果⁴⁾を図13に示す。試験結果より、圧こん深さ60μmでは、軸受に隣接する外輪間座に内蔵した開発ユニットの振動センサと主軸のハウジング外周面での計測は、いずれも外輪の損傷に起因する周波数を検出した。

表4 圧こん軸受試験条件
Conditions of the running test of dent bearing

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 (組込み後予圧750N)
回転速度	1,800min ⁻¹
擬似圧こん	外輪軌道面1箇所
	深さ 60μm (1.5mm×3.8mm)

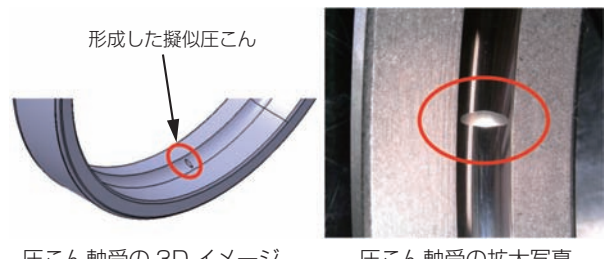


図12 軸受軌道面に形成した擬似圧こん
Dent on the bearing raceways

一方、市場で主軸と加工物の衝突によって軸受軌道面に発生する圧こみは、数 μm から数十 μm 程度であることが多いため、引き続き、圧こみの深さや大きさを変えて評価試験を実施する。

表5 1,800 min^{-1} 時の軸受強制振動数計算結果
Calculation result of bearing frequency in 1800 min^{-1}

	1次	2次	3次	4次	5次
外輪に対する 転動体通過数 (Hz)	341	682	1023	1364	1705

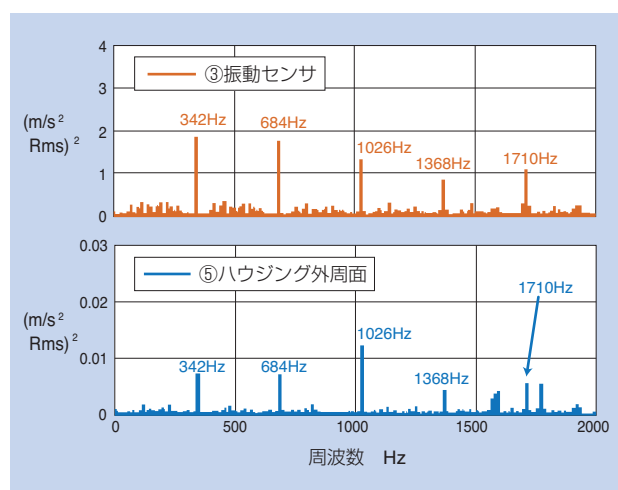


図13 圧こみ軸受の周波数解析結果 ※1
Vibration frequency analysis of dent bearing

5. まとめ

工作機械は、市場ニーズの多様化や社会構造の変化に伴い、状態監視機能のさらなる強化やIoTへの対応が強く求められている。このニーズに応えるため、今回新たに「工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニット」を開発した。

一般的な主軸の外径面での計測に対し、高感度な特性検出を実現した。また、新たに熱流センサを採用し、状態監視の応答性を高めた。

引き続き、さらなる性能向上と実用化に向けた改良を進める。加えて、荷重などその他の状態検出や、AI技術を活用した状態監視機能の強化に取り組む予定である。

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) NTN カタログ 転がり軸受 総合カタログA-17.
- 4) 橋爪啓介・竹内彰利・田中弓弦：状態監視システム (CMS) の取組みNTN TECHNICAL REVIEW, No.82 (2014) 74.

執筆者近影



橋爪 翔平
産業機械事業本部
適用技術部



福島 靖之
商品開発研究所



澁谷 勇介
商品開発研究所



山本 庸平
産業機械事業本部
製品設計部

[商品紹介]

高速・重切削工作機械主軸用アンギュラ玉軸受

Angular Contact Ball Bearings for High-Speed and Heavy-Cutting Machine Tools

ULTAGE



竹ヶ鼻 仁* Jin TAKEGAHANA 古山 峰夫* Mineo KOYAMA
 神野 晃治** Kouji JINNO 田中 雄也** Yuya TANAKA

工作機械の加工工程のさらなる集約や複合化など、新たなトレンドに応えるため、「高速・重切削工作機械主軸用アンギュラ玉軸受」を開発した。開発品は、従来品の高速度アンギュラ玉軸受「HSEタイプ」をベースに内部設計を最適化し、高速性を維持しつつ、負荷容量と許容アキシャル荷重を約30%高めた。本稿は、開発品の特長と評価結果を紹介する。

NTN has developed new angular contact ball bearings, well suitable for machine tool spindles especially taking advanced multi-tasking which is the latest trend of the manufacturing field. The bearings perform 30% higher basic load rating and higher allowable axial load through internal design optimization. Thus the bearings support the well balanced machine tools show high-speed and heavy-cutting capability. In this document, we introduce the design points and test data.

1. はじめに

近年、工作機械は各種産業の多様なニーズに応えるため、さらなる性能向上が要求されている。

①「チタンなどの難削材加工や超硬切削の増加とそれに対応するための主軸のさらなる高剛性化」、②「加工物を高効率に加工するための加工工程の集約、複合化」、③「複雑な形状を高精度に加工するための5軸化」、④「加工物のサイズに合わせた工作機械の小型化」が代表的なトレンドであり、これに応えるため、主軸の中低速回転域での重切削から高速回転域での仕上げ切削までを、1台の工作機械が担うワンチャック全加工が求められている。その結果、工作機械主軸用軸受は、トレードオフの関係にある高速性と高剛性をより高いレベルで両立する必要がある(図1)¹⁾。

また、工作機械の重要課題である「生産性のさらなる向上」に向け、非切削時間をより短縮する取組みが進められており、主軸やテーブルの送り速度は高速化の傾向にある。加えて、加工物形状もより複雑化している。以上を背景に、近年は主軸先端に取り付けた工具と加工物が予期せぬ衝突をする事象が増えている。

主軸用軸受には、この衝突による衝撃荷重が負荷されるが、その荷重の大きさによっては、軸受の内輪や外輪の軌道面に圧こんが生じ、主軸の円滑、かつ高精度な回転が阻害される。圧こんの発生を防止・軽減すべく、主軸用軸受には高い耐荷重性も求められている。

これらのトレンドや要求に応えるため、NTNは高速アンギュラ玉軸受「HSEタイプ」をベースに高速回転や重切削に対応可能な主軸用軸受を開発した。

本稿では、開発品の特長と評価試験結果を紹介する。

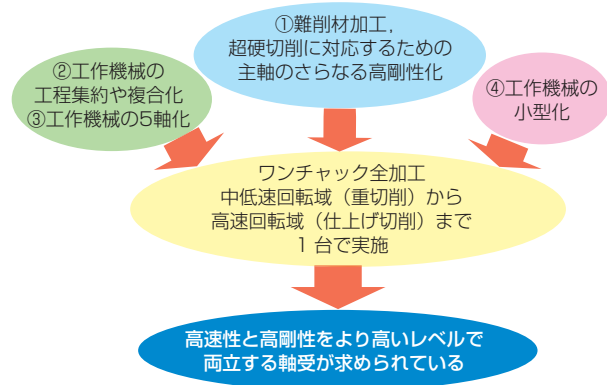


図1 工作機械、および主軸用軸受の技術動向¹⁾
 Technical trend of machine tools and spindle bearings

*産業機械事業本部 適用技術部

**産業機械事業本部 製品設計部

2. 開発背景

NTNの工作機械主軸用高速アンギュラ玉軸受HSEタイプは高速から超高速領域まで幅広く使用することができ、長年、工作機械主軸用として数多く採用されている。工作機械は、今後もさらに生産性を高めるため、主軸回転速度の一層の高速化が進むことが予想される。このような中、HSEタイプは今後も採用が拡大すると考えられる。

生産性向上に向けたもう一つのアプローチとして、加工工程の集約や複合化、重切削を積極的に取り入れる工作機械が近年増加傾向にある。この場合の主軸回転速度は d_{mn} 値^{*1}120万前後であり、主軸用軸受には、高速性はもちろんのこと、高速性とトレードオフの関係にある剛性も求められる。したが、図2に示すように、主軸用軸受は高速性と高剛性をより高いレベルで両立する必要がある。

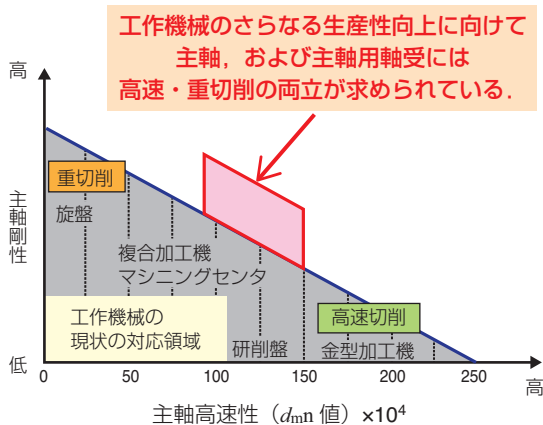


図2 工作機械の主軸と主軸用軸受に対する新たなニーズ
New needs for main spindles and spindle bearings of machine tools

また、工作機械の主軸、および主軸用軸受は、停止中の工具交換時のアンクランプ荷重や主軸先端に取り付けた工具と加工物との予期せぬ衝突により、衝撃荷重（大きなアキシャル荷重）が加わる場合がある（図3）。

衝撃荷重がその軸受の許容限度を超えると、軌道面に圧こんが生じ、主軸の円滑、かつ高精度な回転が阻害されるなどの不具合が発生する。この限界のアキシャル荷重を許容アキシャル荷重（静止時）といい、

NTNでは、以下の項目のいずれかに至る荷重で定義している²⁾。

- 転動体と軌道面との間に形成される接触楕円の端部が内輪、外輪いずれかの軌道面からはみ出し、肩に達する（図4）
- 軌道面の接触面圧が内輪、外輪いずれかで3,650 MPa^{*2}に達する

圧こんの発生を防止・軽減するためには、許容アキシャル荷重（静止時）を高め、衝突に対する耐性を強化する必要がある。

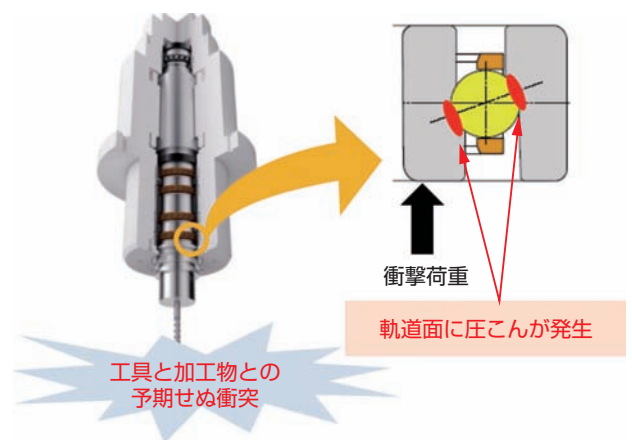


図3 主軸先端に取り付けた工具と加工物との予期せぬ衝突、およびそれに伴う軸受軌道面の圧こん発生のイメージ
Image of the unexpected collision between tool and work piece, and the resulted dent on the bearing raceways caused by the collision

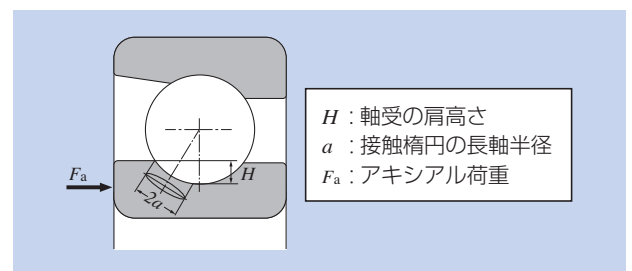


図4 転動体の肩乗上げ
Overflow of the contact ellipse from the raceway

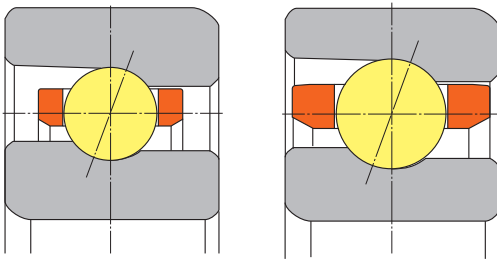
*1 d_{mn} 値は、軸受の回転性能を表す値である。 d_m (転動体中心径 mm) \times n (回転速度 min^{-1})

*2 接触面圧3,650MPaは、転動体径の0.00002~0.00005倍の永久変形量を生ずる値である。

3. 開発品の特長

3.1 【重切削への対応①】 負荷容量の向上

開発品は、前項記載のHSEタイプ（以下、従来品）の持つ高速性を維持しつつ、重切削にも対応するため、転動体径を大きくするなど、内部設計の最適化を図った。これにより、開発品は従来品と比べ、定格荷重を約30%高め、負荷容量を向上させた（図6）。



従来品 (HSEタイプ)

開発品

図5 従来品 (HSEタイプ) と開発品
Conventional design and developed design

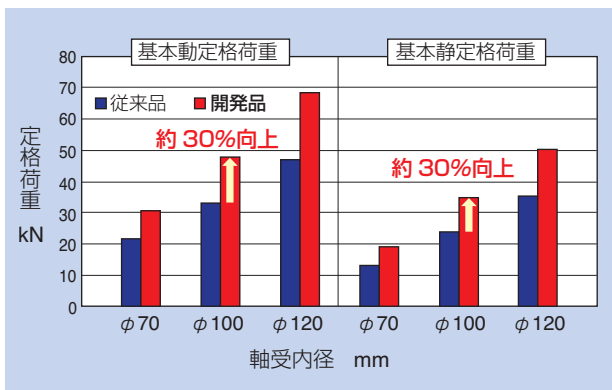


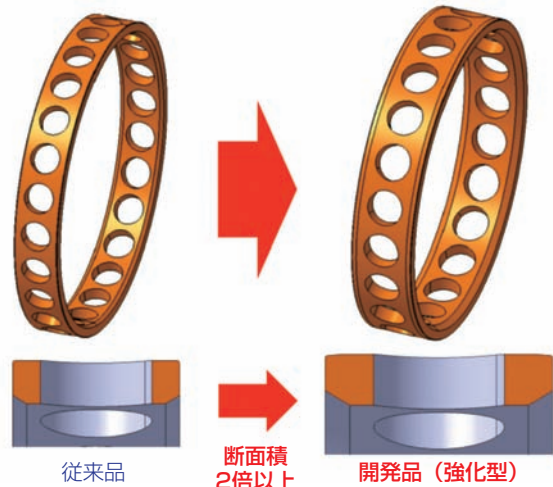
図6 従来品と開発品の定格荷重
(セラミックボール, 接触角20°)

Basic load rating of conventional design and developed design
(ceramic balls, contact angle 20°)

3.2 【重切削への対応②】 保持器強度の向上

転がり軸受の転動体は、その軸受の持つ形状精度、軸やハウジングへの取付精度、外部荷重などにより、微小な速度相互差、いわゆる「進み遅れ」を生じながら公転する。このうち、公転速度が相対的に速い転動体は、保持器ポケットの前方面（進行方向側）に寄る。また、公転速度が相対的に遅い転動体は、保持器ポケットの後方面（進行方向と逆側）に寄る。その結果、転動体は保持器ポケットと接触し、保持器に荷重が作用する。

この荷重は、転動体の「進み遅れ」の大きさや転動体に作用する荷重（以下、転動体荷重）の大きさによって変化する。今回の開発品は、前述のとおり、従来品より大径の転動体を使用しており、転動体荷重が大きくなりやすい。また、重切削の際は、比較的大きな加工荷重が作用するため、保持器にも大きな荷重が作用する可能性がある。そこで、保持器の強度面の信頼性を高めるため、従来品よりも断面積が大きい強化型保持器とした（図7）。



従来品

断面積
2倍以上

開発品 (強化型)

図7 保持器の断面の比較
Cross section of cage

(Comparison of conventional design and developed design)

3.3 許容アキシャル荷重（静止時）の向上

開発品は内部設計の最適化により、従来品と比べ、許容アキシャル荷重（静止時）を約30%高めている（図8）。これにより、衝撃荷重が作用した際、軸受軌道面の圧こんの発生を防止、軽減することができる。

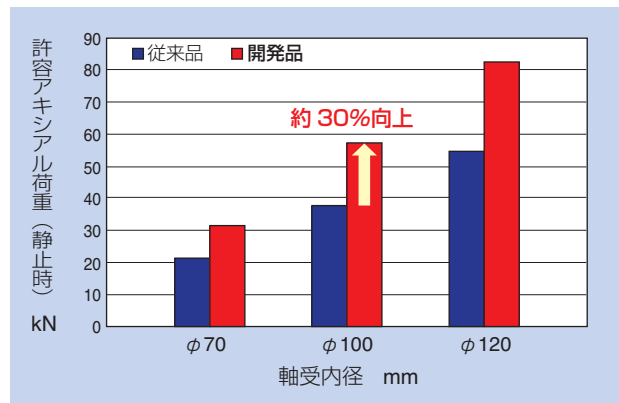


図8 静止時の許容アキシャル荷重
(セラミックボール, 接触角20°)

Static allowable axial load (ceramic balls, contact angle 20°)

4. 開発品の評価試験

4.1 試験条件

開発品の高速運転試験を実施した。試験機の構造を図9、試験条件を表1に示す。

本試験は、マシニングセンタの主軸で多く採用される内輪内径70mmの軸受を用いた。重切削など、高剛性が求められる主軸を想定し、4列背面組合せ(DTBT)の定位置予圧とし、軸受の主軸組み込み後の予圧は、従来品の中予圧を上回る1,400Nに設定した。また、開発品の保持器は図7の強化型とし、材質はフェノール樹脂を用いた。

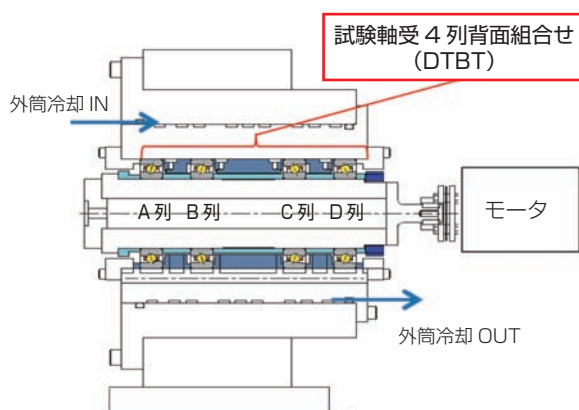


図9 高速運転試験機
High-speed running test spindle

表1 試験条件
Test conditions

試験軸受	φ70×φ110×20×4列 (DTBT) 5S-2LA-HSE014相当品 (セラミックボール, 接触角20°)	
保持器仕様	従来品	開発品
	フェノール樹脂保持器	
予圧方式	定位置予圧	
組み込み後予圧	1,400N	
回転速度	0~18,000min ⁻¹	
潤滑方式	エアオイル潤滑	
給油量	0.03mL/8min	
エア量	35NL/min	
潤滑油	ISO VG32	
外筒冷却	あり	
軸姿勢	横軸	

4.2 試験結果

試験結果を図10、図11に示す。開発品は負荷容量を高めつつ、従来品と同等の温度上昇を示しており、図2で示した d_{mn} 値120万前後の領域を超え、 d_{mn} 値162万(18,000min⁻¹)まで運転可能であることを確認した(図10)。また、C列以外の軸受も安定した温度上昇を示すことを確認した(図11)。

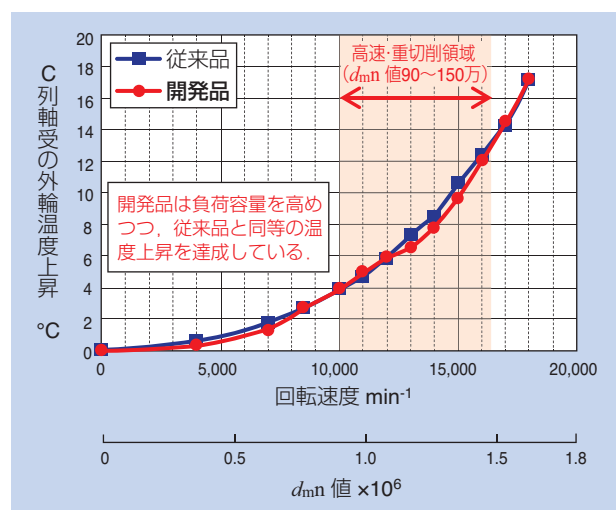


図10 高速運転試験結果 (C列軸受)
High-speed running test result (C-row bearing)

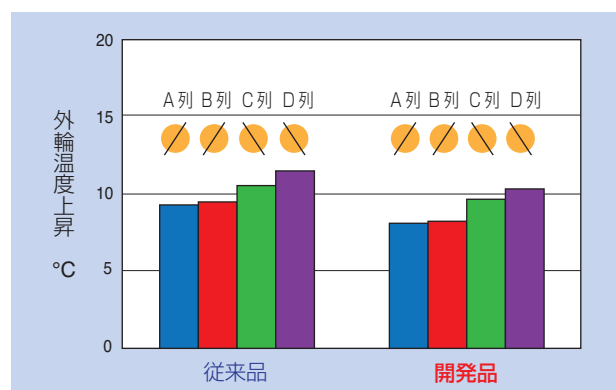


図11 15,000min⁻¹時の軸受外輪の温度上昇
Outer ring temperature rise in spindle rotation speed
15,000min⁻¹

4.3 許容アキシャル荷重 (運転時)

前述の試験で得られた温度データを基に、 d_{mn} 値120万前後の領域でそれぞれの軸受の許容アキシャル荷重(運転時)を計算した。その結果、 d_{mn} 値117万(13,000min⁻¹)では、従来品が $F_a=6.8$ kNであるのに対し、開発品は $F_a=9.8$ kNであり、主軸に負荷できる外部荷重を約30%高めることを確認した。また、 d_{mn} 値135万(15,000min⁻¹)でも同様の結果であった(図12)。

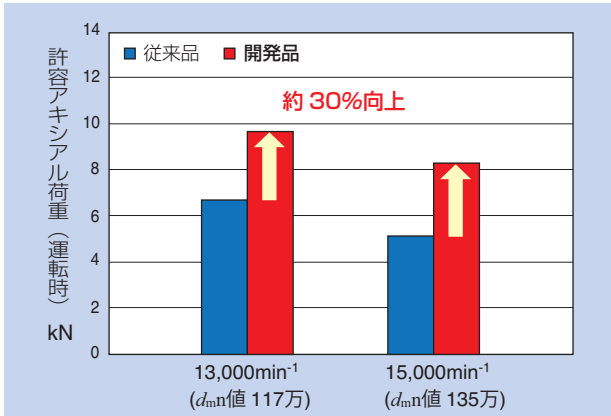


図12 運転時の許容アキシャル荷重 (セラミックボール, 接触角20°)

Dynamic allowable axial load (ceramic balls, contact angle 20°)

5. 射出成形樹脂保持器の適用

5.1 樹脂保持器の材料

前項では、開発品が内部設計の最適化により、従来品と同等の温度上昇を示すことを確認した。この試験では、保持器にフェノール樹脂（以下、PF）を用いた。フェノール樹脂は熱硬化性であることから、軸受の高速回転に伴う昇温への耐性が高いという長所を持つ。一方、切削加工で製作するため、生産性やコスト面に配慮する必要がある。本項では、生産性やコスト面で有利な射出成形保持器の採用も検討する。

射出成形保持器の高速化に関しては、表2に示す高融点ポリアミド樹脂（以下、高融点PA）を用いた研究が行われている³⁾。

表2 樹脂保持器材料の特性
Characteristics of resin cage material

材 料	フェノール (PF)	高融点ポリアミド (高融点PA)	ポリアミド (PA)
分 類	熱硬化性	熱可塑性	
ガラス転移温度	—	158°C	58°C
融 点	—	158°C	260°C
生産方法	切削加工	射出成形	

5.2 評価試験

高融点PAで図7の強化型保持器を製作し、表3の条件の下、開発品の高速運転試験を実施した。試験条件は、保持器仕様が異なる以外は表1の条件と同じである。

試験の結果、高融点PA製保持器を組み込んだ開発品も従来品と同等の温度上昇を示しており、図2で示したd_{mn}値120万前後の領域に加え、d_{mn}値162万

(18,000min⁻¹)まで運転可能であることを確認した(図13)。加えて、C列以外の軸受も安定した温度上昇を示すことを確認した(図14)。また、本試験では、一般的なポリアミド樹脂（以下、PA）の保持器を組み込んだ従来品も評価した。その結果、d_{mn}値135万(15,000min⁻¹)で温度上昇が不安定となり、高速・重切削領域(d_{mn}値90~150万)に対応することはできなかった。開発品については、高融点PA製保持器の採用も検討の上、量産化を図る。

表3 試験条件
Test conditions

試験軸受	φ70×φ110×20×4列 (DTBT) 5S-2LA-HSE014相当品 (セラミックボール, 接触角20°)	
保持器仕様	従来品	開発品
	PF保持器	高融点PA保持器
	PA保持器	

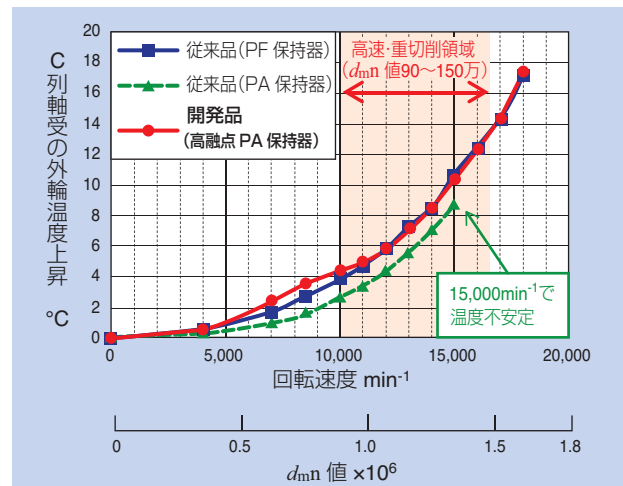


図13 高速運転試験結果 (C列軸受)
High-speed running test result (C-row bearing)

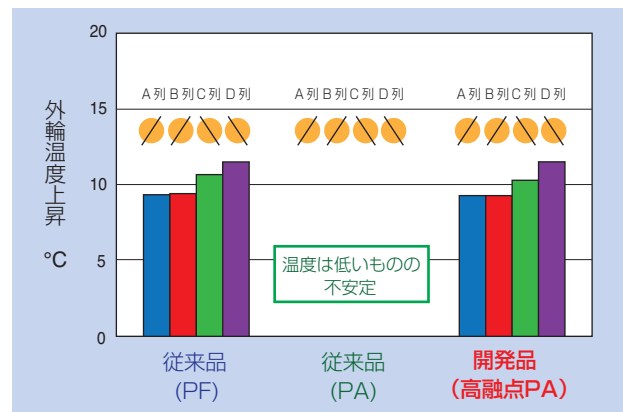


図14 15,000min⁻¹時の軸受外輪の温度上昇
Outer ring temperature rise in spindle rotation speed 15000min⁻¹

6. まとめ

工作機械の加工工程のさらなる集約や複合化など、新たなトレンドに応えるため、「高速・重切削工作機械主軸用アンギュラ玉軸受」を開発した。開発品は、従来品の高速アンギュラ玉軸受「HSEタイプ」をベースに内部設計を最適化し、高速性を維持しつつ、負荷容量と許容アキシアル荷重を約30%高めた。また、開発品には、生産性やコスト面で有利な高融点ポリアミド樹脂（高融点PA）の採用を検討し、今後はグリース潤滑での性能評価も実施する。

工作機械のさらなる高機能化を支えるため、今後も軸受の性能向上に取り組む。

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) NTNカタログ 精密転がり軸受, CAT. No. 2260-VII/J, 16.11.03 21.
- 3) 徳田篤史, 林工: アンギュラ玉軸受の高速化に対する樹脂保持器の耐熱性の影響, トライボロジー学会 トライボロジー会議2017秋 高松.

執筆者近影



竹ヶ鼻 仁
産業機械事業本部
適用技術部



古山 峰夫
産業機械事業本部
適用技術部



神野 晃治
産業機械事業本部
製品設計部



田中 雄也
産業機械事業本部
製品設計部

工作機械主軸用空冷間座付グリース潤滑軸受

Machine Tool Main Spindle Bearings with Air Cooling Spacer for Grease Lubrication

那須 恵介* Keisuke NASU 岡本 直也** Naoya OKAMOTO
田中 雄也** Yuya TANAKA 小畑 智彦*** Tomohiko OBATA



近年の工作機械は、加工内容や加工物が多様化し、これに伴い、主軸や主軸用軸受は、トレードオフの関係にある高速性と剛性をより高いレベルで実現する必要がある。また、設備の簡素化や環境負荷低減の観点から、グリース潤滑を用いた主軸用軸受も増えている。これらの市場要求に対し、NTNは独自の空冷技術を用いた「工作機械主軸用空冷間座付軸受」のグリース潤滑への適用を試みた。

Recently, machine tools are required multitasking for various processes and works. Though high speed and high rigidity of spindle bearings are trade-off relationship each others, they are demanded to achieve higher level performance coinstantaneously. And the application of grease lubricated spindle bearings has been increasing in the last years because of the strongly trend of the simplification of devices and systems and environmental concerning. NTN has been developing the application of the air cooling spacer to the grease-lubricated spindle bearings to meet the above mentioned two requirements.

1. はじめに

工作機械主軸の必要特性は、加工内容や加工物で異なり¹⁾、難削材や複雑な形状の部品加工では高剛性と高精度が要求される。一方、機械部品の金型や医療分野で使用される部品を加工する場合、高速かつ高精度の回転が求められる。このため、近年は1台で複数の加工機能を持つ5軸加工機や複合加工機の需要が増え、主軸や主軸用軸受には、より高いレベルでの高速と高剛性の両立と低発熱が要求されている²⁾。

また、設備の簡素化や環境負荷低減のため、グリース潤滑を用いた主軸用軸受の要求が増えている。グリース潤滑の場合、発熱はグリースの劣化を早め、潤滑寿命に大きな影響を及ぼす³⁾。したが、軸受の回転中の発熱を低減することが重要となる。この課題に対し、高速・耐熱性に優れたグリースの適用や軸受内部設計の最適化など、種々の取組みが図られているが⁴⁾、今回、新たなアプローチとして、「工作機械主軸用空冷間座付軸受」¹⁾をグリース潤滑に適用することを試みた。

「工作機械主軸用空冷間座付軸受」は、NTNが開発した独自の空冷技術であり、これまでエアオイル潤滑で実用化している。

本稿では、「工作機械主軸用空冷間座付軸受」をグリース潤滑に適用した場合の冷却効果を主とした機能評価と実用化に向けた取組みを紹介する。

2. エアオイル潤滑空冷間座の構造と冷却メカニズム

「工作機械主軸用空冷間座付軸受」の基本構造と冷却メカニズムについて、前述のエアオイル潤滑での実用例を基に説明する。

アンギュラ玉軸受背面組合せの間に組み込んだ外輪間座に空冷ノズルを設けている(図1)。このノズルは、軸芯よりオフセットした位置にあり、ノズルから噴射する常温の空冷エアが内輪回転方向に旋回し、内輪間座と外輪間座の間、および軸受内を通過する。その際、空冷エアは、内輪間座の表面から熱を持ち去り、内輪間座を冷却する。

*産業機械事業本部 適用技術部

**産業機械事業本部 製品設計部

***先端技術研究所

図2の流体解析結果が示すように、空冷エアを内輪間座へ垂直に噴射すると（左図）、空冷エアがすぐに軸方向へ拡散してしまい、ほとんど冷却に寄与しない。これに対し、空冷ノズルをオフセットした場合（右図）、空冷エアが内輪間座の表面付近に滞留する時間が長く、内輪間座の表面の熱を持ち去る時間が長くなる分、内輪間座の冷却効果も高まる。

内輪間座が冷却されることで、隣接する軸受の内輪も冷却される。通常、軸受が回転する際、外輪より内

輪の方が高温になるため、熱膨張差により予圧が増大する。本冷却技術では、内輪を冷却することで、軸受内輪と軸受外輪の温度差（以下、内外輪温度差）を小さくすることができる。これにより、予圧や軌道面の接触面圧の増大を抑えることができ、高速性と剛性をより高いレベルで両立することが可能となる。工作機械主軸用空冷間座付軸受の試験結果の一例¹⁾を表1、および図3に示す。

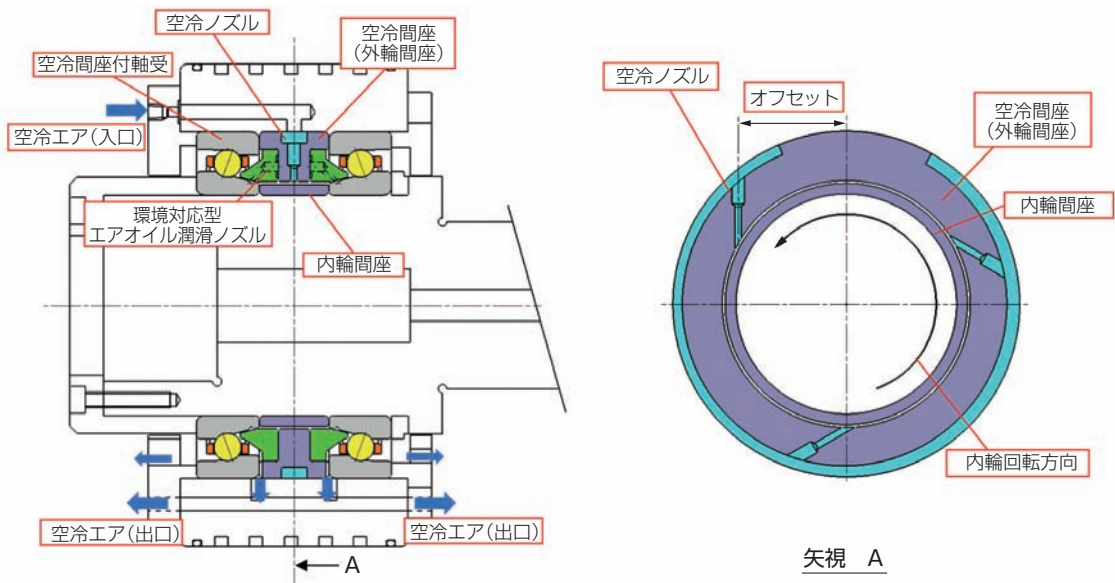


図1 工作機械主軸用空冷間座付軸受の構造（エアオイル潤滑）¹⁾
Machine tool main spindle bearings with air cooling spacer (for air oil lubrication)

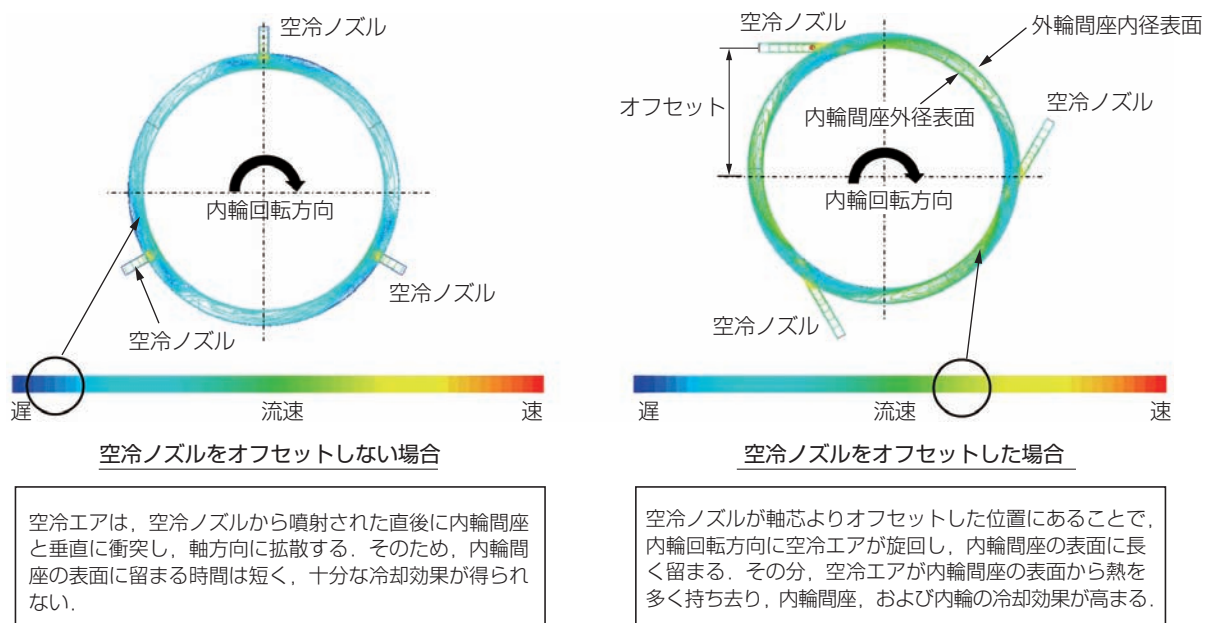


図2 内輪間座と外輪間座の間の空間における空冷エアの流れ（流体解析結果）¹⁾
Cooling air flow between inner and outer spacers (Fluid analysis results)

表1 工作機械主軸用空冷間座付軸受 高速運転試験条件 (エアオイル潤滑)¹⁾

Test conditions for high speed running test of the machine tool main spindle bearings with air cooling spacer (air oil lubrication)

試験軸受	φ70×φ110×20 5S-2LA-HSL014相当品 (セラミックボール入り環境対応型 エアオイル潤滑アンギュラ玉軸受)
予圧方式	定位置予圧 (組込み後予圧ON)
回転速度	0~23,000min ⁻¹
潤滑方式	エアオイル潤滑
給油量	0.03mL/10min
潤滑油	ISO VG32
潤滑エア流量	30NL/min
外筒冷却	あり, 室温同調 (21±1°C)
軸姿勢	横軸

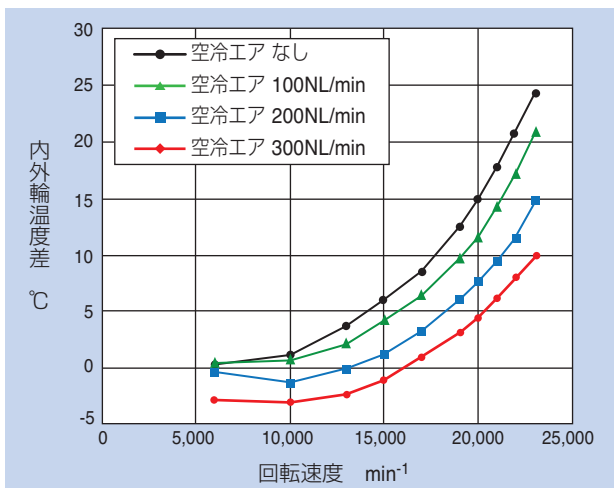


図3 工作機械主軸用空冷間座付軸受 高速運転試験結果 (エアオイル潤滑)¹⁾

Result of high speed running test of the machine tool main spindle bearings with air cooling spacer (air oil lubrication)

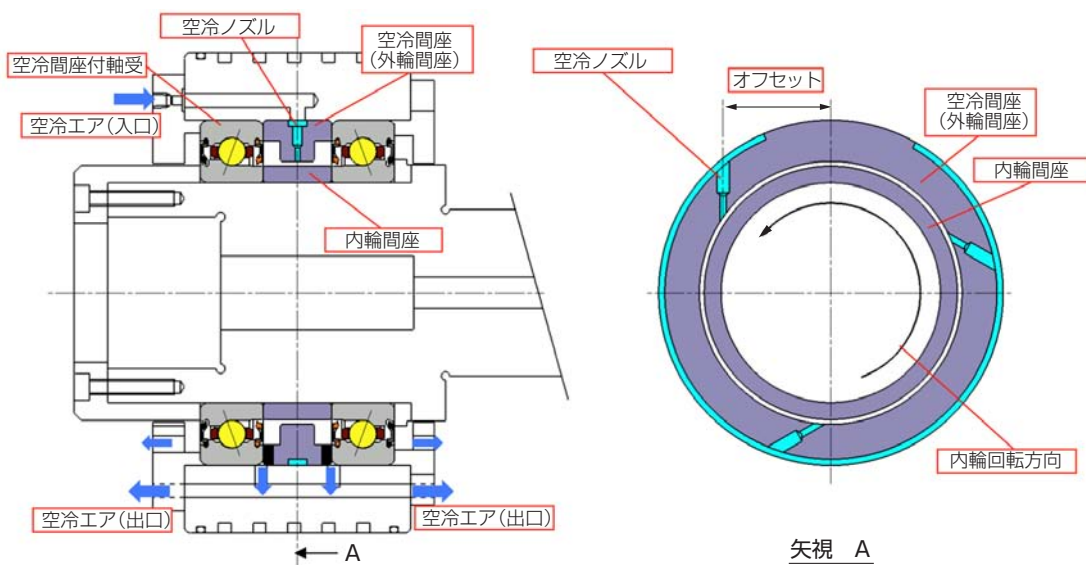


図4 工作機械主軸用空冷間座付軸受の構造 (グリース潤滑)
Machine tool main spindle bearings with air cooling spacer (for grease lubrication)

図3の試験結果より, 空冷間座付エアオイル潤滑軸受は, 低速回転から高速回転まで空冷エアによる冷却効果を確認するとともに, 空冷エアの供給量が多いほど冷却効果が高いことを確認した。

3. グリース潤滑空冷間座の構造

次に, 工作機械主軸用空冷間座付軸受をグリース潤滑に適用した場合の構造を図4に示す。グリース潤滑シール付アンギュラ玉軸受を背面組合せで用い, その間に組み込んだ外輪間座に空冷ノズルを設けている。

4. グリース潤滑空冷間座の冷却効果

工作機械主軸用空冷間座付軸受をグリース潤滑に適用した場合の冷却効果の確認のため, 高速運転試験を実施した。試験条件を表2, 試験機構造を図5に示す。

本試験では, 空冷エアの供給量は実用面を考慮し, 150NL/minを上限とした。なお, ノズルのオフセット量は, これまでの試験結果を基に内輪間座外径部半径の80%とした⁵⁾。

高速運転試験の結果を図6に示す。最高回転速度20,000min⁻¹時 (d_{mn} 値180万) の内外輪温度差は, 空冷エアを供給しない場合に比べ, 空冷エアの供給量150NL/minで約2.5°C低下することを確認した。この内外輪温度差の低下により, 20,000min⁻¹時における軸受軌道面の最大接触面圧を約10%低減

できる。これにより、以下の効果を得ることができる。①空冷エアを供給しない場合の18,000min⁻¹時の温度と、空冷エアを150NL/min 供給した場合の20,000min⁻¹時の温度が同等となり、約10%の高速化が可能となる。②軸受の主軸組込み後の予圧を高め、主軸アキシャル剛性を約10%向上させることができる(図7)。また、潤滑の耐久性の向上も期待できる。この点についても引き続き検証を進める。

表2 工作機械主軸用空冷間座付軸受 高速運転試験条件 (グリース潤滑)

Test conditions for high speed running test of the machine tool main spindle bearings with air cooling spacer (grease lubrication)

試験軸受	φ70×φ110×20 5S-2LA-BNS014LLB相当品 (セラミックボール入りグリース潤滑 シール付高速アンギュラ玉軸受)
予圧方式	定位置予圧 (組込み後予圧40N)
回転速度	0~20,000min ⁻¹
潤滑方式	グリース潤滑
グリース	SE-1
外筒冷却	あり、室温同調 (21±1°C)
軸姿勢	横軸

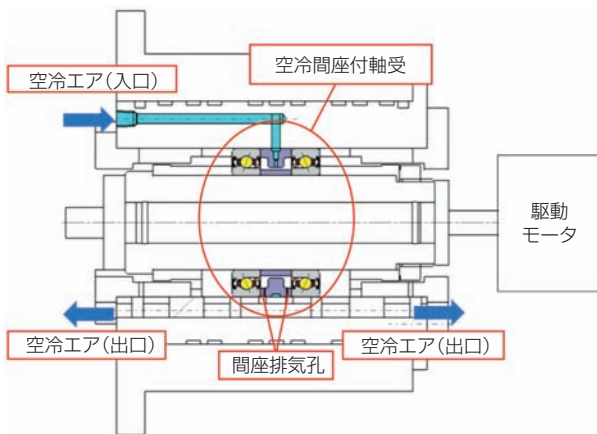


図5 試験機構造図 (グリース潤滑空冷間座)
Structure of test spindle (grease lubricated air cooling spacer)

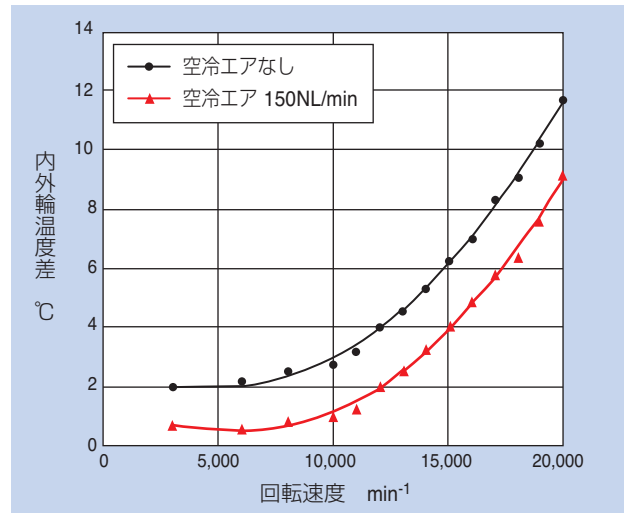


図6 工作機械主軸用空冷間座付軸受 高速運転試験結果 (グリース潤滑)

Result of high speed running test of the machine tool main spindle bearings with air cooling spacer (grease lubrication)

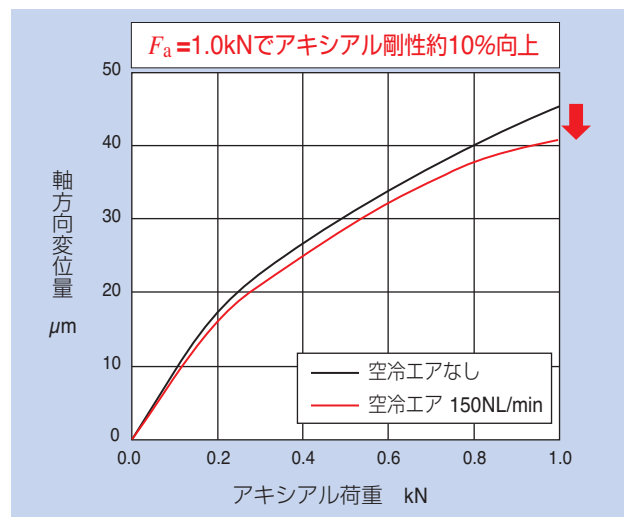


図7 空冷エアの供給量とアキシャル剛性の関係 (グリース潤滑空冷間座)

Relation between cooling air amount and axial rigidity (grease lubricated air cooling spacer)

5. グリース潤滑空冷間座の実用化への課題

前項の結果より、工作機械主軸用空冷間座付軸受は、グリース潤滑に対しても、冷却効果を示すことを確認した。一方、高速運転試験後の軸受を観察すると、図8に示すように、空冷エアを供給した軸受は、シールすきま部にグリースが付着しており、軸受幅面から若干のグリースの漏洩が認められた。

軸受の潤滑耐久性を高めるためには、軸受内部により多くのグリースを保持することが望ましく、軸受幅面からのグリースの漏洩を最小限に抑える必要があ

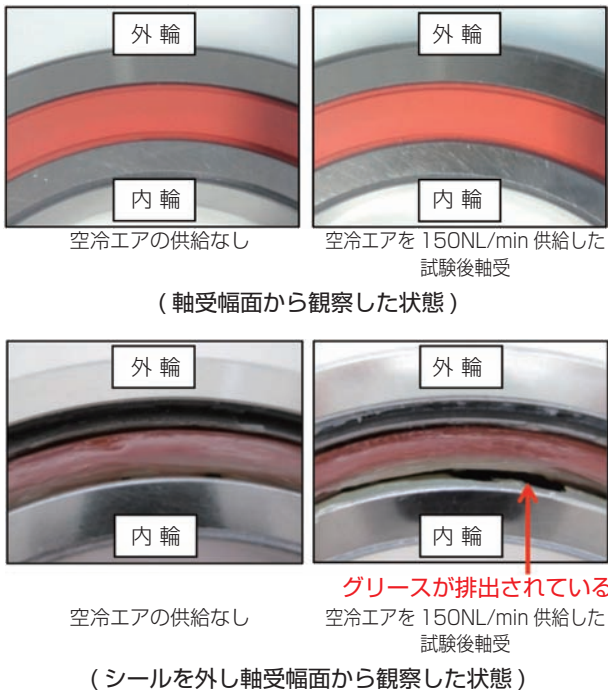


図8 高速運転試験後の軸受内部のグリース状況
Grease status inside the bearing after the high speed running test

る。グリース漏洩の原因として、空冷エアの軸受内部への流入が考えられ、できる限り軸受内部に流入しないよう、つまり、空冷間座に設けた排気孔から排出されるよう間座形状の変更を検討した。

表3に示す流体解析条件で、空冷エアの流れをシミュレーションした。

図9(a)は、図5で評価した標準間座形状の拡大図である。図9(b)に解析結果を示す。標準間座のノズルに空冷エアを供給すると、空冷エアは内輪間座に衝突したのち、周方向の流速を保ちつつ、流速が大きい状態で軸方向へも拡散する。噴射された空冷エアの一部は、外輪間座に設けた排気孔に到達するが、一部は軸受内に流入する。軸受内に流入したエアの影響により、グリースが排出されたと推察する。

空冷エアは、ノズルと内輪間座のすきまを大きくすることで軸方向への流れを抑制できる。ノズルの開口部に十分な空間を設けることで、エアは噴射された方向、すなわち内輪の接線方向の流速を維持しつつ、内輪に付着して流れることができる。

また、内輪間座の両端面部に傾斜の大きいスロープを設け、エアを軸方向に流さず、排気孔に導くことで、軸受内への流入を抑制できる。なお、スロープを設けたことにより、内輪間座を2分割にし、組立性に支障のない仕様としている。

これらの仕様変更を盛り込んだ改良間座を図10(a)に示す。改良間座は、標準間座より内輪に対するエアの付着時間と付着量が増えるため、冷却効率の向上も期待できる。図10(b)の解析結果に示すように、内輪の接線方向へ円滑な空冷エアの流れが発生しており、軸受側への流入の低減を確認した。

表4に標準間座と改良間座における軸受内部と排気孔に流れた空冷エアの割合と熱伝達量比を示す。標準間座では、供給したエアの50%以上が軸受内を通過するのに対し、改良間座では約10%まで低減している。また、熱伝達量も50%向上している。グリース潤滑では改良間座を用いることで、グリース漏洩を防止しつつ、冷却効率の向上が期待できる。

表3 流体解析条件
Fluid analysis conditions

内輪回転速度	19,100min ⁻¹
エア圧力	0.2MPa (エア供給量150NL/min相当)
温度	内輪 50°C, その他 27°C

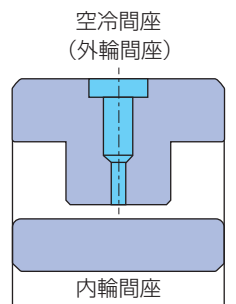


図9(a) 標準間座形状
Standard designed spacer shape



図9(b) 標準間座での空冷エアの流れ
Cooling air flow of Standard designed spacer (Fluid analysis results)

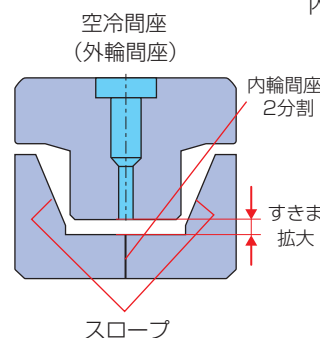


図10(a) 改良間座形状
Development designed spacer



図10(b) 改良間座での空冷エアの流れ
Cooling air flow of development designed spacer (Fluid analysis results)

工作機械主軸の構造は多様であり，駆動方式や排気により，空冷エアの流れは変化する．そのため，本改良間座を試作評価し，引き続き優位性を検証する．

表4 標準間座と改良間座の流体解析結果
Fluid analysis results of
standard spacer and development spacer

		標準間座	改良間座
空冷エアの 流量	排気孔	41%	87%
	軸受内部	59%	13%
熱伝達量比		1	1.5

6. まとめ

工作機械のさらなる高機能化や環境負荷低減に向け，今後もグリース潤滑を用いた主軸用軸受のニーズの拡大が予想される．新たなアプローチとして，NTN独自の空冷技術を用いた「工作機械主軸用空冷間座付軸受」をグリース潤滑に適用することを試み，その効果を確認した．引き続き，さらなる性能向上への取り組みを図るとともに，グリース保持性の確保など，実用化に向けた改良を進める．

参考文献

- 1) 那須恵介・岡本直也・吉野真人：工作機械主軸用空冷間座付軸受，NTN TECHNICAL REVIEW，No.84，(2016) 52.
- 2) 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.
- 3) 川村隆之：高速軸受用グリースの潤滑機構の研究，NTN TECHNICAL REVIEW，No.76，(2008) 39 機械設計，第60巻 第1号，(2016年1月号) 28.
- 4) NTNカタログ 精密転がり軸受，CAT. No. 2260-VII/J，16.11.03 82.
- 5) 恩田裕士・深田貴久夫・山本庸平・吉野真人：工作機械主軸用空冷間座付軸受，NTN TECHNICAL REVIEW，No.82，(2014) 38.

執筆者近影



那須 恵介
産業機械事業本部
適用技術部



岡本 直也
産業機械事業本部
製品設計部



田中 雄也
産業機械事業本部
製品設計部



小畑 智彦
先端技術研究所

[商品紹介]

ULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受72Uシリーズ

ULTAGE Precision Standard Angular Contact Ball Bearing, 72U Series




北野 誉幸* Takayuki KITANO
山本 庸平* Youhei YAMAMOTO

工作機械を中心とした産業機械の生産性向上や消費エネルギーの削減に応えるため、ULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受に新しく72Uシリーズを追加した。本軸受には、新形状のフェノール樹脂保持器を採用している。

本稿では、耐荷重性、高速性および潤滑性を高め、一新した「ULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受72Uシリーズ」の特長と評価試験結果について紹介する。

NTN has developed the new ULTAGE precision standard angular contact ball bearing, the 72U series for productivity improvement and energy reducing consumption of industrial machinery with a focus on machine tool. The newly developed bearing has adopted the new phenol resin cage. We introduce the design points and results of the above mentioned tests of the "NTN's ULTAGE precision standard angular contact ball bearing 72U series" that have created a new epoch in the areas of load resistance, high-speed and lubrication performance in this paper.

1. はじめに

近年、工作機械をはじめとする産業分野では、少子高齢化による労働人口の減少や環境問題などの社会的課題を背景に、さらなる生産性向上や消費エネルギーの削減が求められており、これらに応えるため一層の高出力化や高効率化が要求されている。

軸受は、産業機械を構成する基幹部品の1つであり、「産業のコメ」とも言われる。機械の回転部に数多く使用されており、機械の発熱、効率、出力などに大きな影響を及ぼすことから、機械の性能向上を実現するためには軸受の性能向上が鍵となる。

アンギュラ玉軸受は、代表的な玉軸受である深溝玉軸受に比べ、負荷容量や剛性が高く、また高速回転にも適していることから、幅広い産業分野で多くの機械に用いられている。

当社は工作機械の主軸用軸受に多用される寸法系列「70」と「79」のアンギュラ玉軸受の性能を高め、高機能商品群「ULTAGE」(アルテージ)※¹の1つとして、70U/79Uシリーズをすでに市場展開してい

る²⁾。これらの実績と市場動向を踏まえ、今般新たに寸法系列「72」のアンギュラ玉軸受についても高機能仕様の72Uシリーズを開発した。

2. 開発品の特長

精密標準アンギュラ玉軸受は、小径の転動体を採用した高速仕様のアンギュラ玉軸受³⁾に比べ、負荷容量や剛性が優れる反面、その適用範囲には速度面で制約があった。

今般、適用範囲の拡大を目的に、70U/79Uシリーズよりも負荷容量が大きく剛性に優れる72系列の内部設計を見直し、相反関係にある剛性と高速性を両立しつつ、負荷容量をさらに高めた。

2.1 耐荷重性

新開発した72Uシリーズでは、内部設計の見直しにより、従来品を上回る基本動定格荷重：約1.1倍、基本静定格荷重：約1.2倍となり、基本定格寿命は従来比約1.3倍を達成した(図1、図2)。

*産業機械事業本部 製品設計部

※1 ULTAGE (アルテージ)とは、究極を意味する【ULTIMATE】とあらゆる場面での活躍を意味する【STAGE】を組み合わせた造語で、精密軸受の究極を求めるNTNの考えを表現している¹⁾。

また、工作機械の主軸および主軸用軸受には、停止中の工具交換時のアンクランプ荷重や主軸先端に取り付けた工具と加工物との予期せぬ衝突により、衝撃荷重（大きなアキシャル荷重）が加わる場合がある。

衝撃荷重がその軸受の許容限度を超えると、軌道面に圧こみが生じ、主軸の円滑、かつ高精度な回転が阻害されるなどの不具合が発生する。この限界のアキシャル荷重を許容アキシャル荷重（静止時）といい、NTNでは、以下の項目のいずれかに至る荷重で定義している⁴⁾。

- 転動体と軌道面との間に形成される接触楕円の端部が内輪、外輪いずれかの軌道面からはみ出し、肩に達する（図3）。

- 軌道面の接触面圧が内輪、外輪いずれかで3,650 MPa^{*2}に達する。

*2 接触面圧3,650MPaは、転動体径の0.00002~0.00005倍の永久変形量を生ずる値である。

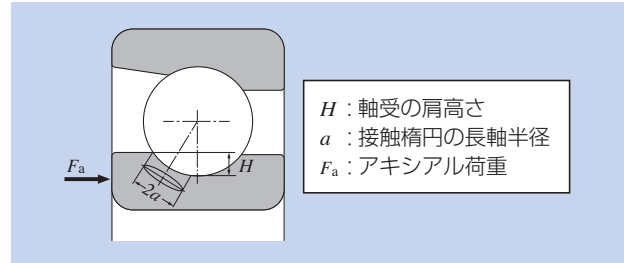


図3 転動体の肩乗上げ
Overflow of the contact ellipse from the raceway

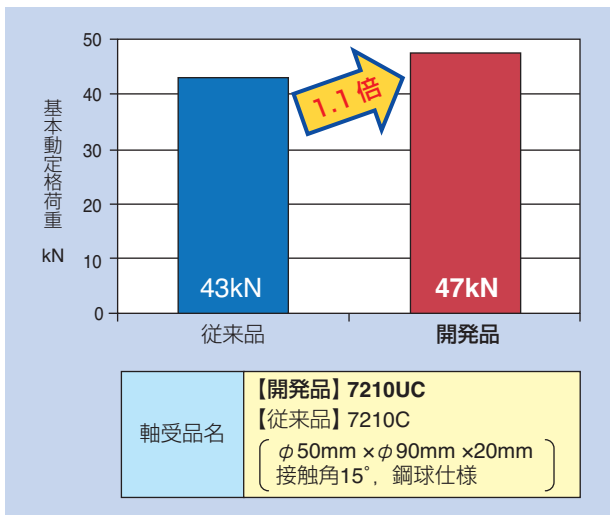


図1 (a) 基本動定格荷重比較 (7210C)
Basic dynamic load rating (7210C)

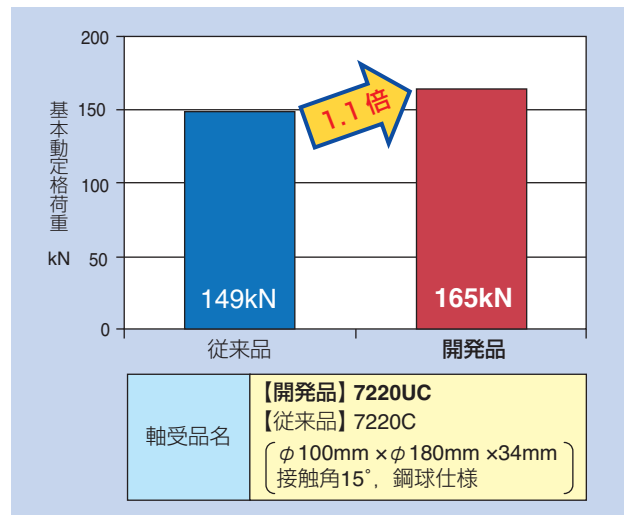


図1 (b) 基本動定格荷重比較 (7220C)
Basic dynamic load rating (7220C)

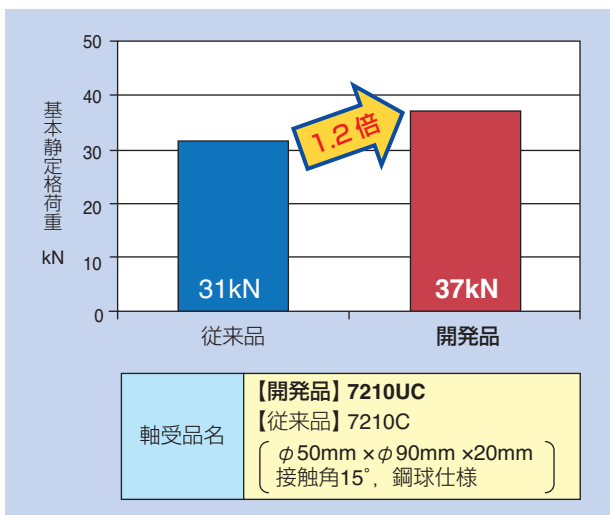


図2 (a) 基本静定格荷重比較 (7210C)
Basic static load rating (7210C)

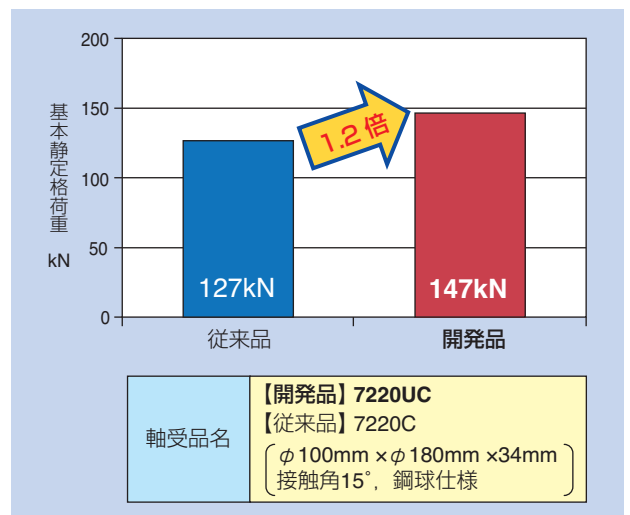


図2 (b) 基本静定格荷重比較 (7220C)
Basic static load rating (7220C)

新開発した72Uシリーズでは、肩高さ寸法をはじめとする内部設計の見直しにより、従来品を大幅に上回る約2.5倍の許容アキシャル荷重を達成した(図4, 図5)。

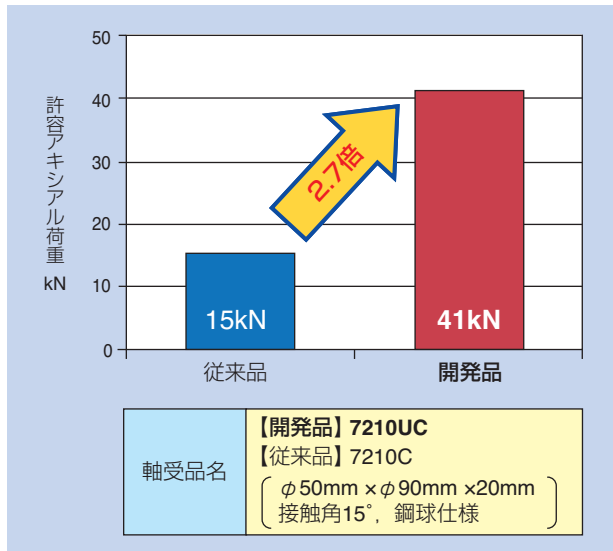


図4 許容アキシャル荷重比較 (7210C)
Allowable axial load (7210C)

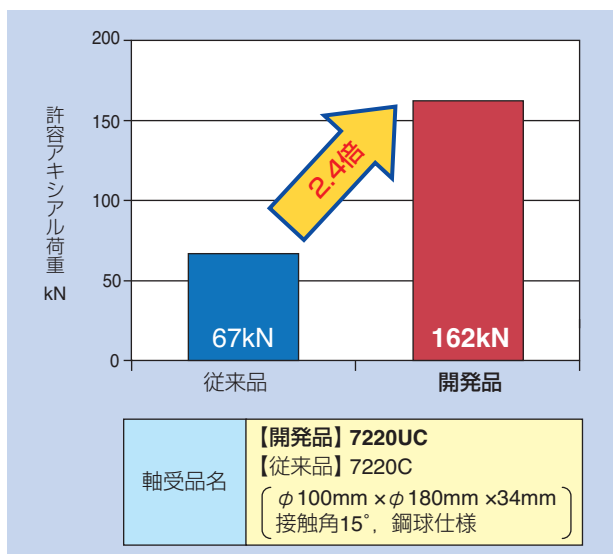


図5 許容アキシャル荷重比較 (7220C)
Allowable axial load (7220C)

2.2 高速性 (潤滑性)

エアオイル潤滑では軸受内部への潤滑油の供給はもとより、軸受外部への潤滑油の排出も重要となる。給排油が円滑に行われなければ、軸受内部で潤滑油が滞留し排熱されにくくなり、昇温大や焼付きなどが生じる恐れがある^{5), 6)}。高速条件下で安定した温度を維持するためには、転動体や軌道面形状などの内部設計

の最適化に加え、潤滑時の給排油にも配慮する必要がある。

また、グリース潤滑で使用する場合には、発熱などによるグリースの劣化、つまりグリース寿命が重要であるため、グリースの保持性能を高めた内部設計が必要である。

従来品では、ポリアミド樹脂保持器を採用しているが、新開発した72Uシリーズでは、エアオイル潤滑、グリース潤滑の両方でより高速性に優れるフェノール樹脂保持器を採用し、潤滑性を高める新設計の形状を適用した。ポイントについて次項に示す。

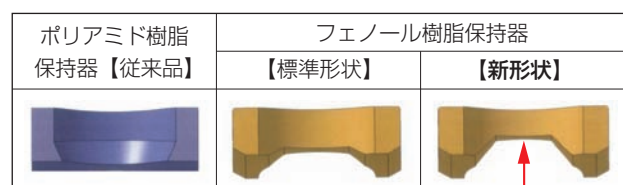
2.2.1 新形状フェノール樹脂保持器

新形状フェノール樹脂保持器(以下、新形状保持器)では、以下の2つの効果を狙って、保持器内径面に設けた溝を標準設計より深くした(図6)。

- (1) 転動体と保持器ポケットの接触位置を工夫し、保持器が外輪に積極的に案内されるように改良することで、保持器の挙動をより安定化させる。
- (2) グリースを保持する空間を拡げることで、グリースの保持性能を高め、グリース寿命を延伸させる。



図6(a) 樹脂保持器の外観
Appearance of resin cage



<内径溝の狙い>
 ・保持器挙動の安定化
 ・グリースの保持性能の向上

図6(b) 樹脂保持器の内径形状
Bore diameter shape of resin cage

図7, 図8に標準形状と新形状保持器の高速運転試験の結果を示す。エアオイル潤滑およびグリス潤滑ともに、今回新しく採用した新形状保持器の軸受外輪温度(図中○)は、標準形状保持器(図中□)と比較して、同等以下であることを確認した。

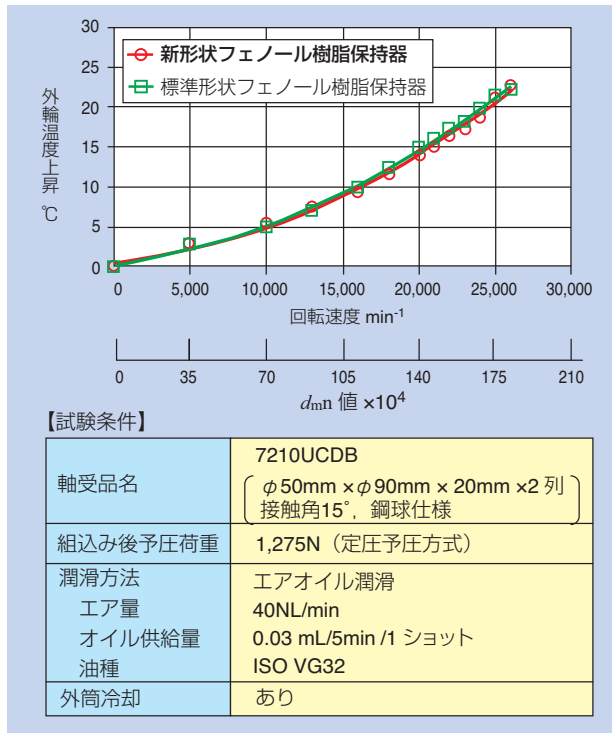


図7 標準形状と新形状保持器の温度上昇比較 (エアオイル潤滑)

High-speed test of standard and new cage (air-oil lubrication)

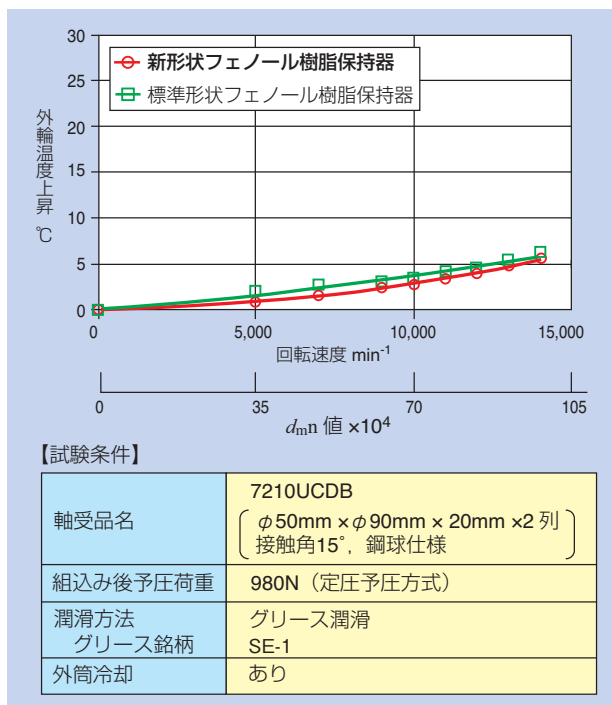


図8 標準形状と新形状保持器の温度上昇比較 (グリス潤滑)

High-speed test of standard and new cage (grease lubrication)

2.2.2 内輪形状の変更

新開発した72Uシリーズの荷重負荷側である内輪外径(正面側)は許容アキシャル荷重に関係するため、肩高さ寸法などの見直しを行った。一方で、反負荷側である内輪外径(背面側)については、従来品よりも低く設計し、前述の新形状保持器と組み合わせることにより、保持器と内輪軌道面間への潤滑油の供給およびグリスの封入を容易にした。特にエアオイル潤滑の場合、従来品では不可能であった斜め方向からの潤滑油の供給(ノズルの狙い)が可能となるため、軸受間にノズル付間座を設ける場合に寸法上の制約が緩和され、軸受周辺構造の設計自由度を向上させることができる(図9)。

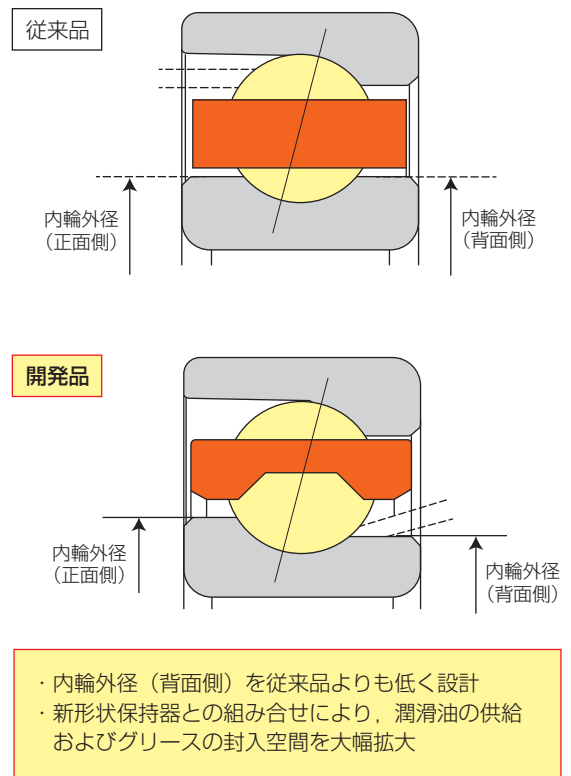


図9 ULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受72Uシリーズ断面図
Section of ULTAGE precision standard angular contact ball bearing 72U series

2.3 剛性

新開発した72Uシリーズでは、相反関係にある剛性と高速性を両立させるため、転動体や軌道面形状などの内部設計が剛性に及ぼす影響を確認し、大きく影響する項目は最小限の変更に留めることにより、剛性を維持した。

開発品と従来品の剛性比較結果を図10、図11に示す。開発品の剛性は、従来品よりもわずかに低下するものの、ほぼ同水準を維持している。

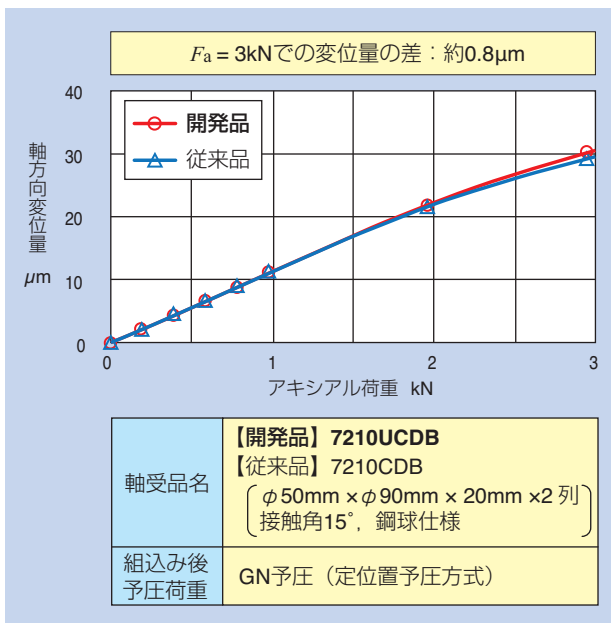


図10 アキシアル剛性比較 (7210CDB)
Axial rigidity (7210CDB)

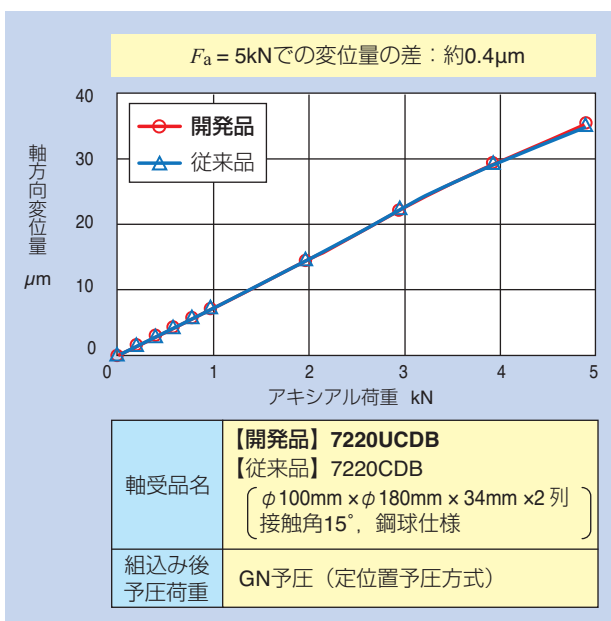


図11 アキシアル剛性比較 (7220CDB)
Axial rigidity (7220CDB)

3. 運転試験結果

新開発した72Uシリーズと従来品の定圧予圧における運転試験結果を図12、図13に示す。エアオイル潤滑およびグリース潤滑ともに、開発品の軸受外輪温度(図中○)は、従来品(図中△)と比較して同等以下であった。

本開発品は、負荷容量と許容アキシアル荷重を向上した。一方で、本開発品の剛性は従来品と同水準を維持したまま、前項の新形状保持器を組み合わせることにより、従来品と同等以下の安定した温度で高速性を維持し、エアオイル潤滑では従来比約1.6倍の $d_m n$ 値^{※3}180万、グリース潤滑では従来比約1.1倍の $d_m n$ 値100万(ともに接触角15°, 鋼球使用時)を達成した。

※3 $d_m n$ 値は、軸受の回転性能を表す値である。
 d_m (転動体中心径 mm) × n (回転速度 min^{-1})

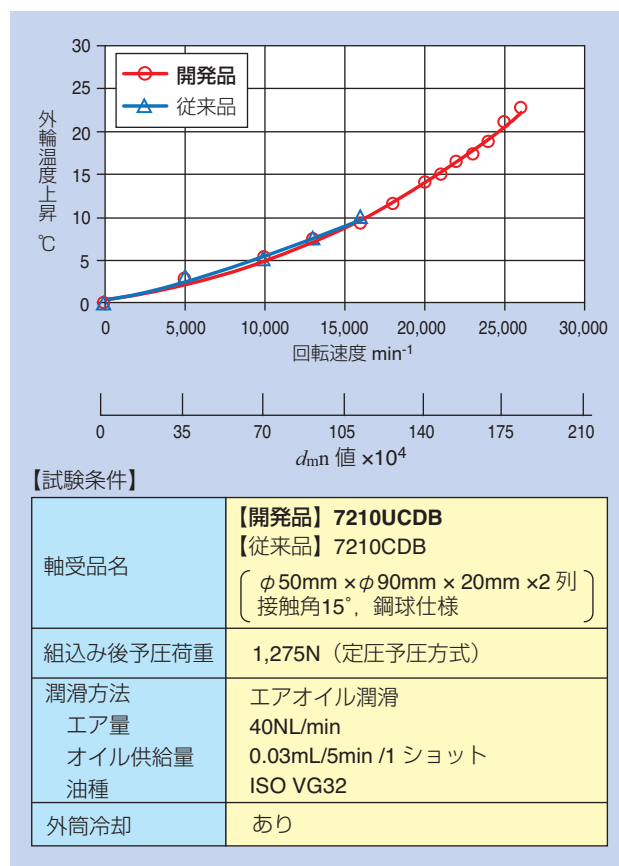


図12 運転試験結果 (エアオイル潤滑)
Running test (air-oil lubrication)

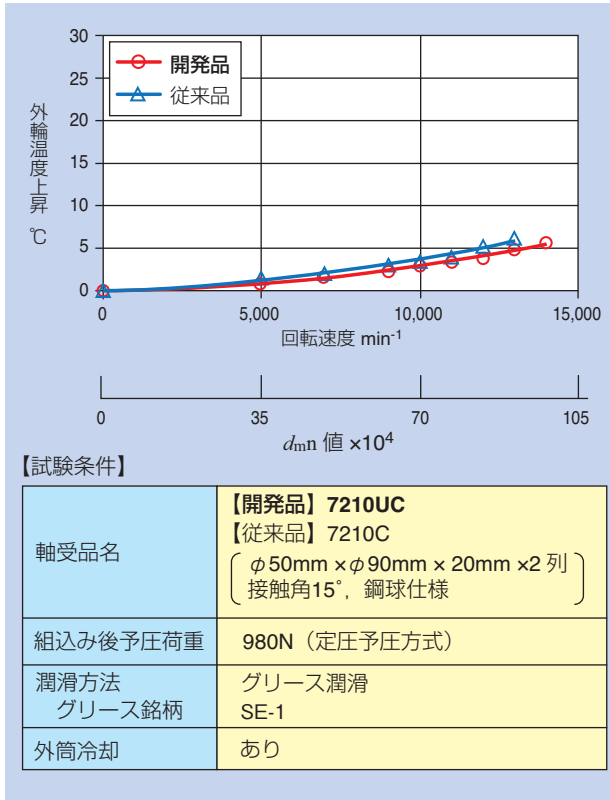


図13 運転試験結果 (グリース潤滑)
Running test (grease lubrication)

4. シリーズ構成

新開発した72Uシリーズの構成を表1に示す。軸受サイズは内径10~130mmとし、接触角は3種類(15°, 25°, 30°)を設定した。また、転動体は鋼球に加え、セラミックボールを追加した。

表1 ULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受72Uシリーズの構成
ULTAGE precision standard angular contact ball bearing
72U series

鋼球仕様	接触角15°	72XXUC
	接触角25°	72XXUAD
	接触角30°	72XXU (A)
セラミックボール仕様	接触角15°	5S-72XXUC
	接触角25°	5S-72XXUAD
	接触角30°	5S-72XXU (A)

対応軸受サイズ：内径10~130mm (両仕様共通)

5. まとめ

今回開発したULTAGE精密標準アンギュラ玉軸受72Uシリーズは、従来品よりも耐荷重性を向上させ、剛性を維持したまま従来品と同等以上の高速性を達成した。

本開発品は、今後さらなる高機能化が求められる精密軸受の1つとして、工作機械や他の産業機械の市場ニーズを満足した商品である。

今後も標準シリーズを含めた精密級のアンギュラ玉軸受に対して、既存シリーズの高機能化および新シリーズの開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 瀧内 博志, 小杉 太, 工作機械用精密軸受“ULTAGE (アルテージ)”シリーズ, NTN TECHNICAL REVIEW, No.72, (2004) 26頁.
- 2) 植田 敬一, ULTAGE 標準アンギュラ玉軸受79U/70Uタイプ, NTN TECHNICAL REVIEW, No.72, (2004) 30頁.
- 3) 多湖 浩史, 田中 康統, 工作機械用軸受の技術動向, NTN TECHNICAL REVIEW, No.78, (2010) 8頁.
- 4) NTNカタログ 精密転がり軸受, CAT. No. 2260-VII/J, 16.11.03, (2016) 21頁.
- 5) 植田 敬一, 工作機械用軸受の技術動向：環境対応技術, 月刊トライボロジ, No.188 (2003.4) 19頁.
- 6) 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頁.

執筆者近影



北野 誉幸
産業機械事業本部
製品設計部



山本 庸平
産業機械事業本部
製品設計部

工作機械案内面用樹脂すべりシート Plastics Sliding Sheet Used Slide Guide of Machine Tools



石井 卓哉* Takuya ISHII
福澤 覚* Satoru FUKUZAWA
宗田 法和* Norikazu MUNEDA

工作機械には高速化、高加工精度化が求められており、切削抵抗が大きい場合でも低振動で加工精度に優れる、案内面に樹脂すべりシートを使用した方式の機種が増えている。案内面のすべり性能は工作機械の性能に大きく影響するため、樹脂すべりシートには低摩擦特性、耐摩耗性が求められる。本稿では、四フッ化エチレン樹脂に特殊充填材を配合した工作機械案内面用のNTN樹脂すべりシートについて紹介する。

Machine tools are required to operate at high speed, high precision. The models of using plastics sliding sheet in guide are increasing. When cutting resistance is high, the models are superior in processing precision by low vibration. Low friction properties and wear resistance are required to plastics sliding sheet. In this report, characteristic of sliding sheet formed from PTFE and special filler is introduced.

1. はじめに

工作機械は工具と工作物を相対運動させることによって工作物を加工するため、工具または工作物を移動する案内面の性能は加工精度に大きく影響する。この案内面には、ころがり案内方式とすべり案内方式があり、用途によって使い分けられている。ころがり案内は、リニアガイドのように、ころを介して工具または工作物を移動させる方式である。すべり案内には案内面間に潤滑油を供給し、金属同士をすべらせる方式と、一方の金属に樹脂すべりシートを接着固定し、樹脂と金属をすべらせる方式がある。案内面のすべりシートには、低摩擦特性で耐焼付き性に優れる四フッ化エチレン樹脂（以下、PTFE）が使用されている。すべり面は混合潤滑状態であるため、樹脂すべりシートの性能が重要になる。

本稿では、PTFEに特殊充填材を配合することで、混合潤滑状態での摩擦摩耗特性を向上させたベアリーFL3307からなる工作機械案内面用すべりシートについて紹介する。

2. 各種案内方式の特長¹⁾

各種案内方式の特長を表1に示す。ころがり案内方式は摩擦抵抗が低く、工具または工作物を高速で移動することができ、スティックスリップが発生し難いので加工精度も高い。しかし、ころによる線接触で接触面積が小さいため剛性が低く、負荷が高くなると振動が発生するので、切削抵抗の大きな加工には不向きである。

すべり案内方式は面接触で接触面積が大きいので剛性が高く、切削抵抗の大きな加工に適している。案内面に樹脂すべりシートを使用することで、金属同士のすべりよりも低摩擦抵抗でスティックスリップが発生し難く、振動減衰性も高くなる。また、希薄潤滑状態になった場合にも焼付きを起こさない。

工作機械すべり案内方式の概略図を図1に示す。近年、炭素繊維強化プラスチック等の難切削材を加工する事例も増加しており、切削抵抗が大きい場合でも低振動で加工精度に優れる樹脂すべりシートを使用したすべり案内方式の機種が増えている。

表1 工作機械案内方式の特長
Characteristic of guide type in machine tools

項目	すべり案内方式		ころがり案内方式 (リニアガイド)
	樹脂すべり	金属すべり	
剛性	○	○	△
振動減衰性	◎	○	△
摩擦抵抗	○	△	◎
スティックスリップ	○	△	◎

◎：優 ○：良 △：可

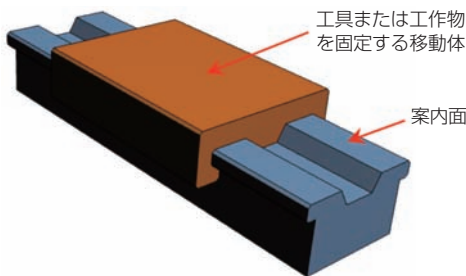


図1 工作機械すべり案内方式の概略図
Slide guide type of machining tools

3. 樹脂すべりシートへの要求性能

すべり案内方式の案内面には、潤滑膜を形成し易くするために油溝が設けられる。また、均一な接触状態にし、数十μmの微小な窪みを形成するために、きさげ加工も施される²⁾。ベアリーFL3307樹脂すべりシートのきさげ加工前後の表面状態を図2に示す。きさげ加工は選定された技能者により手作業で行われる。樹脂すべりシートは、金属と比較してきさげ加工し易い利点がある。

きさげ加工による案内面の微小窪みは、すべり面での潤滑油の保持性を高め、摩擦抵抗を低く安定させる効果がある。樹脂すべりシートが摩耗、あるいは荷重により変形すると、すべり面の窪みが小さくなり、摩

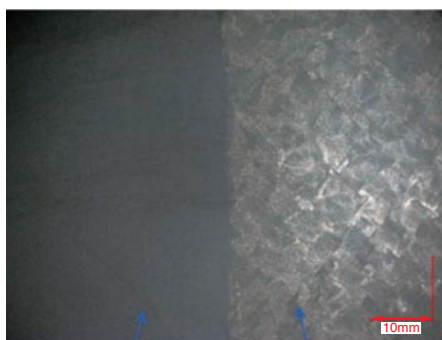


図2 きさげ加工面
Hand scraper surface of plastics sliding sheet

擦抵抗が大きくなるので、樹脂すべりシートには耐摩耗性、耐圧縮クリープ特性が必要である。

工作機械には加工サイクルタイムを短縮するために、工具または工作物の移動の高速化が要求されている。そのため、樹脂すべりシートは起動時の静摩擦係数、動摩擦係数が低く、面圧および速度依存性が低い方が好ましい³⁾。

4. PTFE樹脂すべりシートの特長と製造工程

PTFEは摩擦係数が低く、高い非粘着性を有し、連続使用温度が260℃と高耐熱性である。耐薬品性、耐候性も優れているので、潤滑油やクーラントと接触する案内面において長期間の使用が可能である。しかし、PTFE単独では耐摩耗性、耐圧縮クリープ特性に劣り、線膨張係数が大きいので、ガラス繊維、炭素繊維、青銅粉、黒鉛等の充填材を配合し使用されている。充填材の種類、配合比によって摩擦摩耗特性等が異なるため、用途に合った材料配合が重要となる。

工作機械案内面用すべりシートの製造工程を図3に示す。PTFEは熔融粘度が高く、射出成形が出来ないため、圧縮成形による成形素材をスカイブ加工して厚さ0.8~1.5mmの樹脂シートを製造する。スカイブ加工とは、成形素材を回転させ刃物でスライスしてシート状にする工法である。

PTFEは非粘着性が高く、そのままでは接着できないため、処理液にて表層を化学的にエッチングし接着可能にする。NTNでは、潤滑油やクーラントに耐性があり、鋳鉄などの案内面に樹脂シートを接着できる専用の接着剤を用意している。この接着剤による鋳鉄とベアリーFL3307樹脂すべりシートの引張せん断接

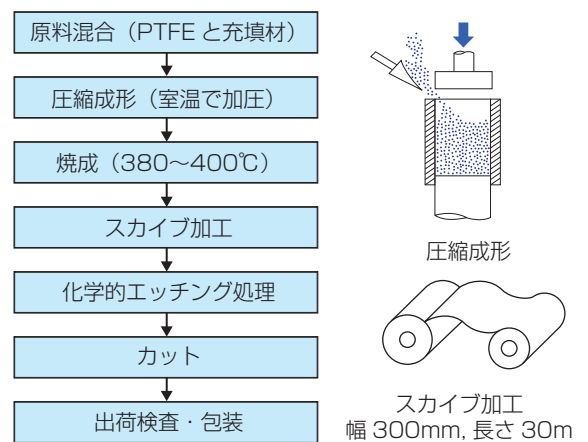


図3 樹脂すべりシートの製造工程
Manufacturing process of plastics sliding sheet

着強さは6MPaで、使用面圧と摩擦係数から算出した摩擦せん断力0.06MPa（面圧1MPa，摩擦係数0.06の場合）に対して、十分な安全率がある。

5. NTN樹脂すべりシートの性能

ベアリーFL3307（以下，NTN品），PTFEにガラス繊維（GF）配合（以下，比較品A），炭素繊維（CF）と青銅粉を配合（以下，比較品B）の3種類の樹脂すべりシートの性能比較を行った。性能比較を表2に示す。

NTN品は比較品に対して、引張強さ、伸びともに高く、摩擦摩耗特性、圧縮クリープ特性にも優れる。摩擦摩耗特性、圧縮クリープ特性の試験方法と結果の詳細を以下に示す。

表2 工作機械案内用樹脂すべりシートの性能比較
Comparison of features plastics sliding sheets

項目	NTN品	比較品A	比較品B
シート材料	ベアリーFL3307	GF配合PTFE	CF,青銅粉配合PTFE
物性			
引張強さ	20MPa	15MPa	13MPa
伸び	220%	200%	180%
摩擦特性			
静摩擦特性	○	△	△
動摩擦係数の面圧依存性	○	△	△
動摩擦係数の速度依存性	○	○	△
圧縮クリープ特性	○	△	△

○：良 △：可

5.1 摩擦摩耗試験方法

摩擦摩耗試験には、工作機械の案内面と類似運動形態の図4に示す往復動試験機を用いた。樹脂すべりシートを接着した角柱金属試験片に鉛直荷重を負荷し、金属相手材を往復運動させた。接着後の樹脂すべりシートには、きさげ加工を施さないが油溝を設けた。金属相手材は高周波焼入れし、すべり方向に研磨した表面粗さRa0.25μmのミーハナイト鋳鉄である。すべり面には工作機械用潤滑油を塗布した。

摩擦係数は、相手材に取り付けたロードセルにより測定した摩擦力を鉛直荷重で除して算出した。

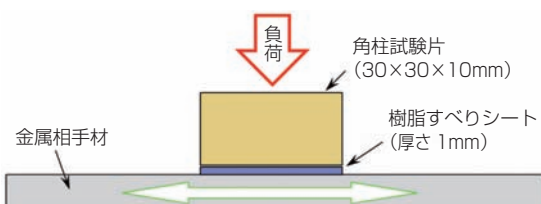


図4 往復動試験の概略図
Diagram of reciprocating motion test

5.2 動摩擦係数の面圧・速度依存性

表3に示す試験条件で面圧，速度を各々変化させて動摩擦係数を測定した。面圧と動摩擦係数の関係を図5，速度と動摩擦係数の関係を図6に示す。

面圧の増加に伴い動摩擦係数は低下する傾向にある。面圧依存性試験では，NTN品の動摩擦係数は比較品よりやや低く，0.3MPaより高い面圧では依存性が小さい。速度依存試験でも，NTN品の動摩擦係数は比較品と同等以下で，速度依存性が小さい。

NTN品，比較品Aの樹脂すべりシートの走査型電子顕微鏡による観察写真を図7，8に示す。樹脂シートのすべり面には充填材が露出している。

比較品Aでは，すべり面に対する繊維状充填材の方向はランダムで，繊維の端部のみが露出しているもの

表3 動摩擦試験条件
Test condition of dynamic friction

項目	面圧依存性試験	速度依存性試験
面圧	0.1~1.0MPa	0.5MPa
速度	30m/min	10~50m/min
ストローク	±100mm	
潤滑油	工作機械用潤滑油	
温度	室温	

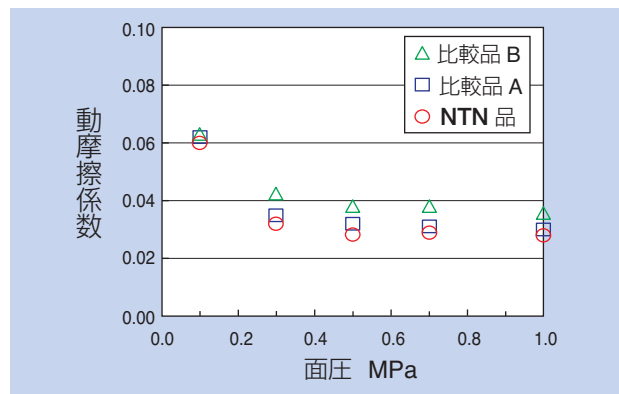


図5 面圧と動摩擦係数の関係
Coefficient of dynamic friction versus surface pressure

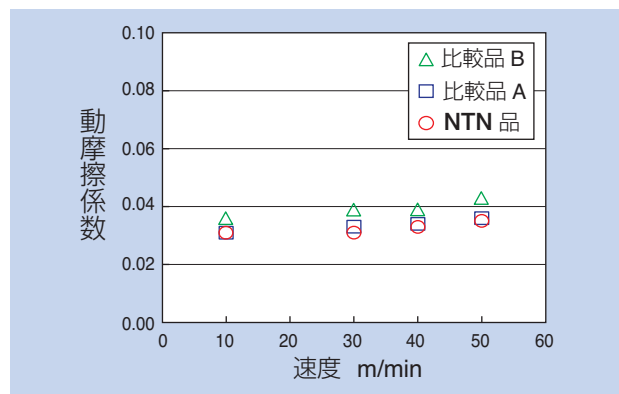


図6 速度と動摩擦係数の関係
Coefficient of dynamic friction versus velocity

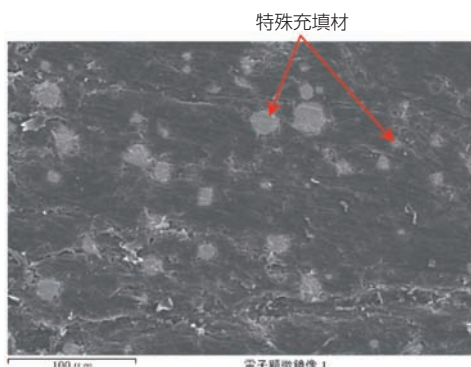


図7 NTN品の表面
Surface of NTN plastics sliding sheet

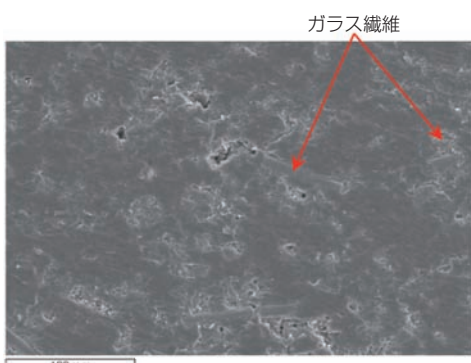


図8 比較品Aの表面
Surface of comparative-A plastics sliding sheet

もある。繊維状充填材は、摩擦せん断を受けたときその形状から脱落し難いが、端部のエッジの抵抗により摩擦係数を増加させる。比較品Bに配合している炭素繊維も同様である。NTN品ではすべり面に充填材が点在し、この充填材は繊維状でないため異方性がなく、摩擦係数を増加させ難い。

すべり面は油溝、きさげ加工の微小窪みにより油膜形成し易いが、部分的には樹脂すべりシートと相手金属が接触した混合潤滑状態にある。この接触が面接触状態になると、潤滑油が排出されるので摩擦係数は高くなる。NTN品では露出した充填材が点での接触状態となり、接触面に潤滑油が介在し潤滑状態が良くなり、摩擦係数が低いと考える。

5.3 摩擦特性

NTN品を表4に示す試験条件で摩擦試験し、そのときの比摩耗量を図9に示す。比摩耗量は試験前後の摩耗量から算出した単位すべり距離当たり、単位荷重当たりの摩耗体積であり、比摩耗量が小さいほど、耐摩耗性に優れる。

NTN品の比摩耗量は、いずれの速度においても非常に小さく、耐摩耗性に優れている。

表4 摩擦試験条件
Wear test condition

項目	内容
面圧	0.5MPa
速度	10m/min, 30m/min
ストローク	±100mm
潤滑油	工作機械用潤滑油
温度	室温
時間	100h

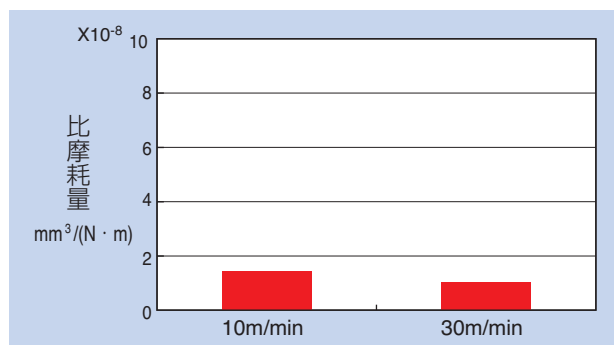


図9 NTN品の比摩耗量
Specific wear of NTN Plastics sliding sheet

6. まとめ

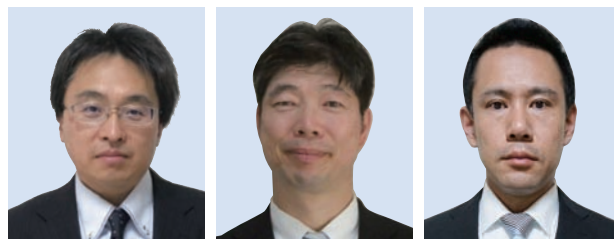
本稿では、工作機械のすべり案内面に使用されるベアラーFL3307樹脂すべりシートを紹介した。用途に適した材料配合にしているため、低摩擦、低摩擦特性で圧縮クリープ変形率も小さく、工作機械の高速化、高加工精度化に貢献している。

今後も低摩擦化、低摩擦化の材料配合技術力を高め、様々な分野で高機能化、省エネルギー化に対応した商品を開発していく所存である。

参考文献

- 1) 社団法人日本トライボロジー学会：トライボロジーハンドブック、第1版、養賢堂、(2001) 343.
- 2) 坂本治久：工作機械におけるトライボロジー技術とその動向、月刊トライボロジー、No.331、(2015) 18-20.
- 3) 木幡文雄：低摺動摩擦係数・高耐びびり性すべり直動案内の研究開発、イノベーションジャパン 2009-大学見本市、講演番号PM-08.

執筆者近影



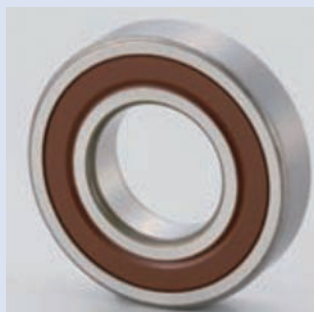
石井 卓哉
複合材料商品事業部
精密樹脂技術部

福澤 覚
複合材料商品事業部
精密樹脂技術部

宗田 法和
複合材料商品事業部
精密樹脂技術部

トランスミッション向け玉軸受用低フリクションシールの潤滑メカニズム

Lubrication Mechanism of Low Friction Seal of Ball Bearing for Transmission



水 貝 智 洋* Tomohiro SUGAI
 佐 々 木 克 明** Katsuaki SASAKI
 和 久 田 貴 裕** Takahiro WAKUDA

自動車のトランスミッション向けに開発した玉軸受用低フリクションシールは、シールリップの軸受内輪との摺動面に円弧断面形状の微小突起を複数個設け、突起部でのくさび作用により軸受内輪との間に潤滑油の油膜を形成し、低フリクション化を実現している。本稿では、油膜形成のメカニズムと摩擦抵抗をソフトEHL（弾性流体潤滑）解析により調べた結果を報告する。

A low friction seal for use in ball bearings developed for automotive transmissions has arc-shaped (half-cylindrical shaped) micro bumps on the sliding surface of the seal lip. This generates a lubrication oil film between the seal lip and inner ring by a wedge effect in the bump area, thereby achieving low friction.

This article reports the mechanism of fluid film formation and friction resistance by soft EHL (ElastoHydrodynamic Lubrication) analysis.

1. はじめに

自動車のトランスミッション用軸受では、トランスミッション内に発生するギアの摩耗粉など、硬質異物の侵入による軸受寿命の低下を抑制するため、接触タイプシールを適用することがある。しかし、シール部が軸受内輪に接触するため、回転時の摩擦トルクが大きくなる課題がある。さらに、近年のEVやHEVなどの高速回転が要求される用途では、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る。自動車のトランスミッション用軸受はさらなる低トルク化が求められているが、低トルク性とシール性は相反する性質のため、シール性を確保しながら大幅に低トルク化を達成することは、これまで困難であった。

上記課題の解決のため、シールリップの軸受内輪との摺動面に円弧断面形状の微小突起を等間隔に設けたトランスミッション向け玉軸受用低フリクションシールを開発した¹⁾。本シールは、潤滑油中の異物粒径と軸受寿命の関係に基づき、突起高さを軸受寿命に大きな影響を及ぼす異物サイズより小さくすることで、要求寿命を満足しつつ、低トルク化を達成した。一般的

なシールは、混合潤滑または流体潤滑状態と考えられているが^{2, 3)}、粗さ突起によるミクロなEHL（弾性流体潤滑）のため形成される油膜厚さは粗さのオーダー以下と非常に薄く、流体潤滑であってもせん断抵抗は大きい。本シールは、内輪に付着して円周方向に流れる潤滑油に対し、シールおよび内輪の表面粗さと比較して大きな微小突起によりくさび作用を発生させ、シールリップと軸受内輪との摺動面に積極的に潤滑油の油膜形成を図り流体潤滑状態とし、回転トルクの低減と周速限界の向上を実現している。

本稿では、突起部を含むシール全体の弾性変形と潤滑油の流体圧力とを連成させて解くソフトEHL解析によって、油膜形成のメカニズムと摩擦抵抗を調べた結果を報告する。

2. ソフトEHL解析

2.1 解析モデルおよびプログラム

図1に開発シールを示す。左の図はシールを装着した軸受の断面図、右の図はシールを円周方向に一部切り出した斜視図である。軸受内輪との摺動面に円弧断面形状の微小突起を等間隔に設けている。突起はアキ

*先端技術研究所

**自動車事業本部 自動車軸受技術部

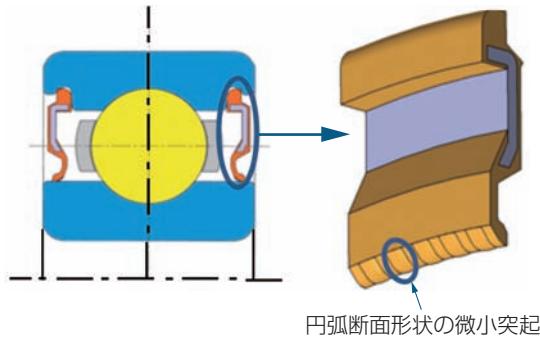


図1 低フリクションシール
Low friction seal

シール方向にも曲率を持っており、図2に示すように軸受装着時には内輪摺動面と点接触となる。図3に示すように、摺動面には潤滑油が存在し突起部では摺動面間の距離が円周方向、すなわち流れ方向に徐々に小さくなっていくため、回転時にはくさび作用により流体圧力が発生し、シール摺動面と内輪間に油膜が形成される。摺動面間に十分な油膜が形成できれば流体潤滑となり、突起のない従来のシールと比較して摩擦トルクの低減が期待できる。シールリップと軸受内輪間の油膜厚さおよび流体粘性抵抗によるシールの摩擦トルクを油膜圧力とシールの変形を連成させて解くソフトEHL解析により計算する。

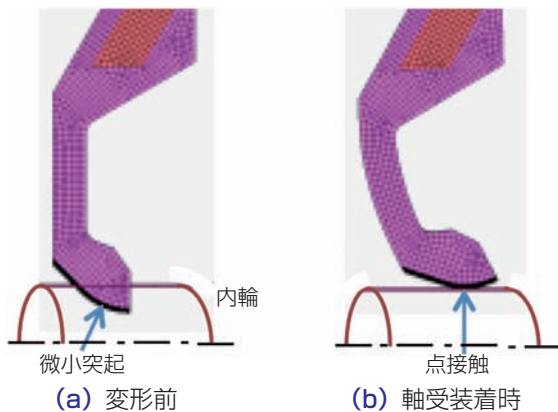


図2 軸受装着時のシールリップ先端変形形状
Deformed shape of the seal lip mounted in bearing

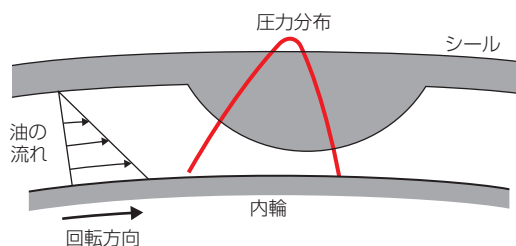


図3 微小突起部のくさび作用
Wedge action at the micro bump

一般に、転がり軸受などの油膜解析では弾性変形量が小さいため、形状を計算する構造解析では半無限弾性体近似を用いる。一方、ゴムシールでは弾性変形量が大きいので半無限弾性体近似が成り立たず、非線形構造解析を行う必要がある⁴⁾。ただし、発生した圧力によってシールが大きく変形することで圧力の増加は小さくなるため、圧力による潤滑油特性の変化は考慮しない。突起部を含むシールの変形は有限要素法による汎用の非線形構造解析ソフトウェアを用いて計算し、油膜圧力は潤滑面での粘性流体の運動を記述する次のReynolds方程式を解いて計算する⁵⁾。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = u_0 \frac{\partial(\rho h)}{\partial x}$$

ここで、 x ：流れ(円周)方向座標、 y ：流れ直交(回転軸)方向座標、 ρ ：密度、 h ：油膜厚さ、 η ：潤滑油粘度、 p ：圧力、 u_0 ：摺動面速度である。また、 x 方向の流速 u は膜厚方向座標 z の関数であり、次式で表される。

$$u = -\frac{1}{2\eta} \frac{\partial p}{\partial x} z(h-z) + \left(1 - \frac{z}{h}\right) u_0$$

右辺第1項は圧力差によって誘起されるPoiseuille流れ、右辺第2項は壁面の移動によって誘起されるCouette流れである。キャビテーション条件は、Swift-Steiberの条件⁶⁾を用いた。また、軸対称問題とし、周期境界条件を用いた。

構造解析と流体解析の繰り返し計算を行い、収束解を得る。油膜圧力はわずかな油膜厚さの変化で大きく変化し、シールはわずかな圧力の変化で大きく変形するため、連成解析では強い非線形性により収束性が悪化する場合がある。Reynolds方程式を緩和法⁷⁾で解く際の一 반복計算における緩和量を収束状況に応じて適切に制御することにより、図4に示すように収束性の良い計算を可能とした。また、計算は次の2ステップで行った。

第1ステップ：内輪と外輪で構成される軸受にシールを組み付けた状態を構造解析のみで計算する。無回転時のシールの状態に相当する。

第2ステップ：第1ステップの計算結果を初期条件として、流体との連成解析を行う。回転時の状態に相当する。初期油膜厚さは、第1ステップで計算した無回転時のシール形状で、油膜圧力による負荷容量と緊迫力が釣り合う内輪位置を探し設定

する。本ステップの前半では、内輪位置を所定位置へ戻す操作を行う。

トルクの計算は、シールリップ摺動面と内輪の間は油膜により十分に隔てられ、流体潤滑状態である場合を想定し、潤滑油の粘性抵抗によるトルクを考慮する。

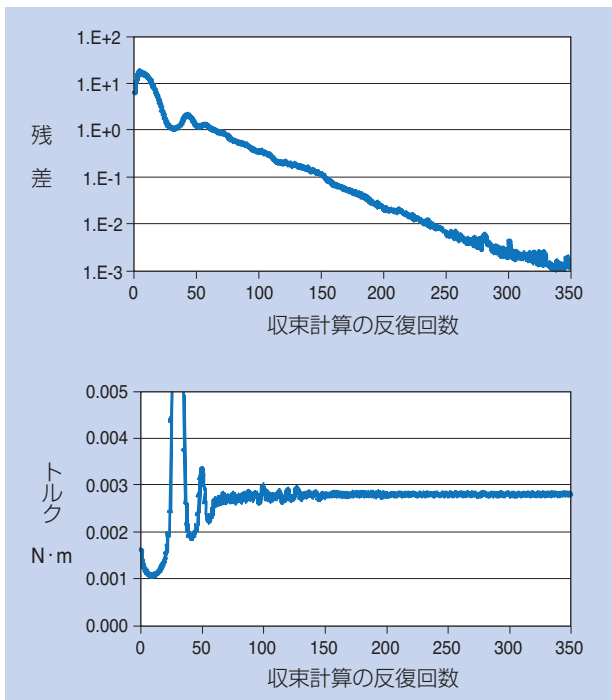


図4 計算の収束性
Convergence of calculation

表1 開発シールの仕様および運転条件
Properties and conditions

シール材料	アクリルゴム
軸受内輪外径 mm	64
突起半径 mm	1.5
突起高さ μm	40
突起数	180
潤滑油動粘度 (40 °C) mm^2/s	26
回転速度 min^{-1}	1500

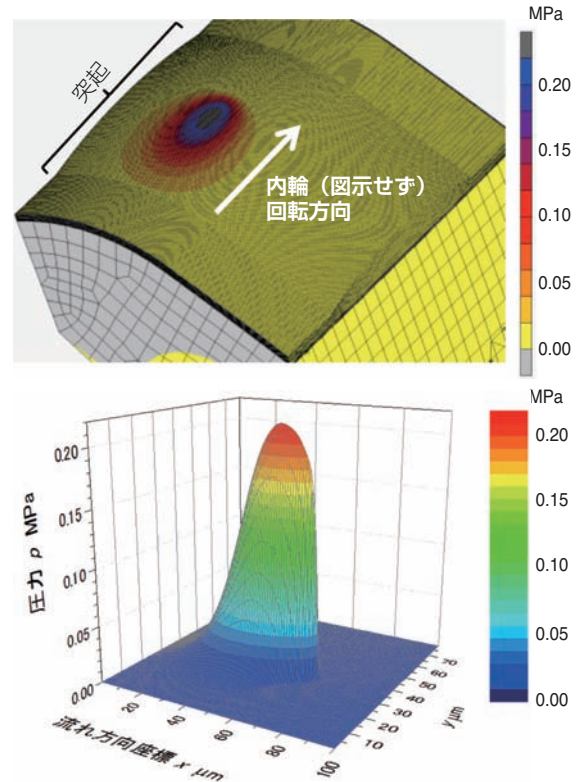


図5 油膜圧力分布 (120°C)
Calculation result of oil film pressure distribution

2.2 計算条件と計算結果

検討した開発シールの仕様と運転条件を表1に示す。ゴム剛性および潤滑油粘度は温度の関数とし、ゴムの熱膨張を考慮した。表面粗さ、ゴムの応力緩和、トランスミッション内での流量によるリップシールへの圧力、シャフトの芯ぶれなどの影響は本稿では考慮していない。図5、図6に計算結果の一例を示す。図5はシールリップ摺動面の油膜圧力分布を示しており、上の図はシールリップ摺動面を内輪側から見た図である。突起部で油膜圧力が生じている。図6は、最小油膜厚さ位置における流れ方向の油膜形状および圧力分布である。最大約0.22MPaの圧力が生じた。最小油膜厚さは約 $1\mu\text{m}$ である。摺動面の合成粗さは、 $Rq\ 0.22\mu\text{m}$ 程度であり、粗さと比較して十分な油膜が形成されており、流体潤滑状態である。図7は温度と最小油膜厚さの関係である。高温ほど油膜厚さが小さくなるが、 150°C でも最小油膜厚さは約 $1\mu\text{m}$ で

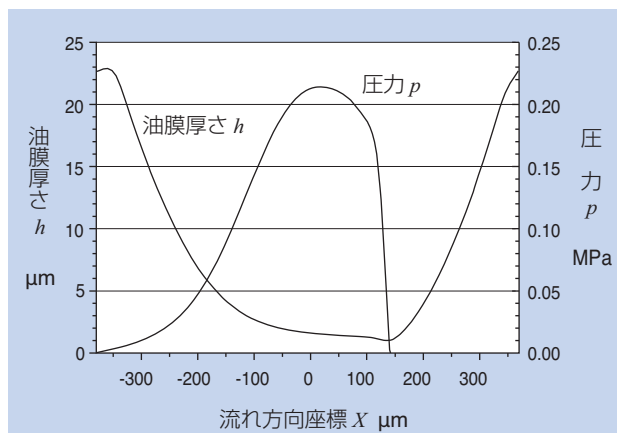


図6 油膜形状および圧力分布 (120°C)
Oil film thickness and pressure distribution

あり、粗さと比較して十分な油膜が形成されている。
 図8に温度とシールトルクの関係を示す。トルクは軸受1個に使用するシール2枚分の値である。また、トルク要因を突起部でのPoiseuille流れに起因するトルク、突起部でのCouette流れに起因するトルクおよび突起間の摺動面である非突起部でのCouette流れに起因するトルクの3つに分類し、色分けしている。なお、非突起部での圧力の増加は微小なため、非突起部のPoiseuille流れに起因するトルクは微小である。高

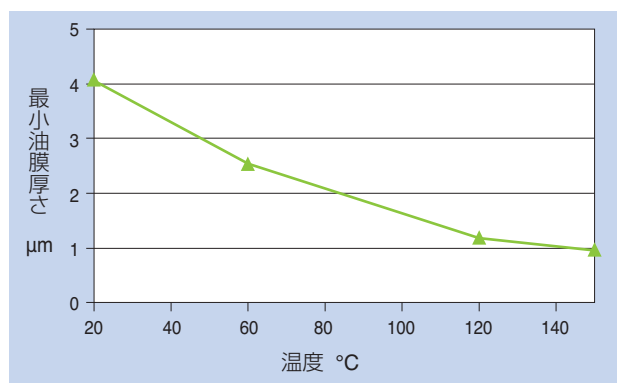


図7 温度と最小油膜厚さの関係
 Relationship between temperature and minimum film thickness

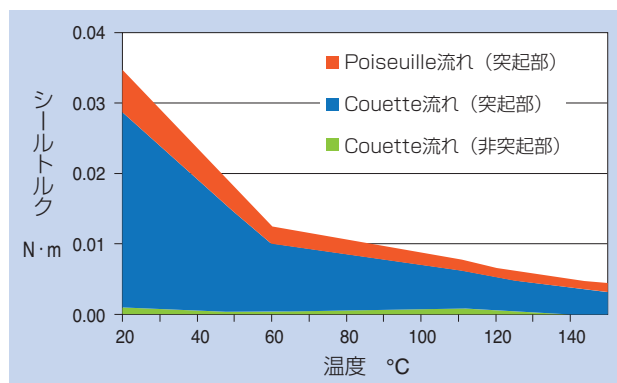


図8 温度とシールトルクの関係
 Relationship between temperature and seal torque

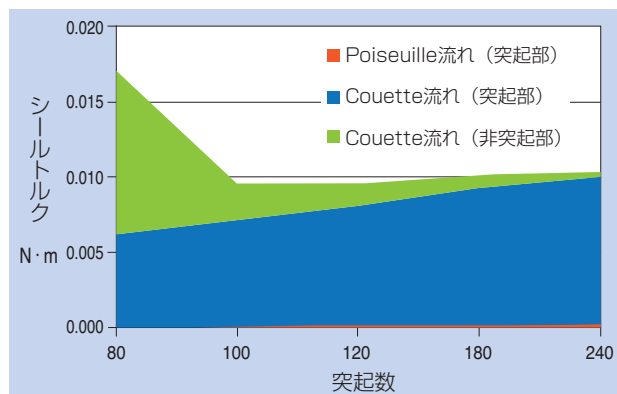


図9 突起数とシールトルクの関係
 Relationship between number of bumps and seal torque

温ほどトルクは低下し、120 °Cで約0.007N・mである。突起部のCouette流れがトルクの主要因である。

次に突起数とトルクを関係を示す。突起数が少ない場合には、非突起部のCouette流れによるトルクが増加する。これは、非突起部の摺動面面積が増加することに加え、非突起部の摺動面間すきまが小さくなるためである。摺動面間すきまが小さくなると、せん断抵抗が増加しシールトルクが増加する。突起数が少ない、すなわち突起と突起間の距離が長くなると、緊迫力により非突起部の摺動面が弾性変形し内輪摺動面に近づき、摺動面間すきまが小さくなる。弾性変形した形状の模式図を図10に示す。図11に突起数と停止時の非突起部中央すきまの関係を示す。図中の非突起部中央すきまは、突起高さに対する比である。本検討仕様の場合、突起数100個程度以下では非突起部中央すきまが0となり、非突起部摺動面が内輪と接触する。ただし運転時には、非突起部のすきまが小さい場合には、突起部と同様にくさび作用により油膜圧力が発生し油膜が形成されるため、直接接触は生じない。

突起数が多い場合には、突起部のCouette流れによるトルクが増加する。突起数が多いほど突起1個当たりの緊迫力が低下するため突起部の最小油膜厚さは

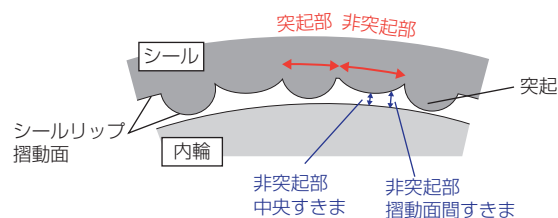


図10 非突起部弾性変形の模式図
 Schematic drawing of elastic deformation of non-bump area

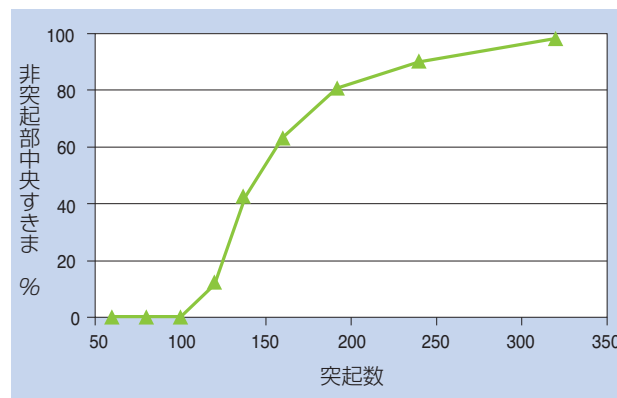


図11 突起数と停止時の非突起部中央すきまの関係
 Relationship between number of bumps and gaps in the middle between bumps under non-operating condition

増加するが、突起部の摺動面積の合計が増加するためトルクも増加する。本検討条件では、突起数100個程度が最も低トルクとなる。

3. 検証実験

3.1 油膜厚さ

シール突起部の油膜厚さを顕微赤外分光法で測定した。赤外分光法は、物質に赤外線を照射し、透過または反射した光を分光し、得られたスペクトルから試料の構造解析や定量を行う分析手法である。赤外線が物質中を通過すると物質固有のある周波数域の光が物質に吸収され、通過した光の強度が低下する。この通過した光の強度と物質中を通過する光路長との間には相関がある。測定装置の模式図を図12に示す。アクリルゴムは赤外光を吸収するため、ゴム表面で光が反射するように表面に金を0.3 μm 真空蒸着した。回転可能なサファイアディスクに突起部1個を模擬した試験片を押し当て、ディスクの反対面から赤外光を照射する。油膜を通過した後突起表面で反射した光の強度を測定することで、油膜厚さを推定する。Zステージによって押し付け荷重を制御した。また本実験では、荷重と速度をパラメータとした。

測定結果とソフトEHL解析による計算結果を図13に比較する。両者は傾向、オーダーが一致しており、1 μm 程度の油膜を確認した。ただし、油膜厚さが小さい領域では解析結果より測定結果が大きい。この要因として、測定範囲の影響とサファイアディスクの面振れの影響が考えられる。解析結果は最小油膜厚さであるが、測定結果は、30 \times 30 μm の平均値であるので、油膜厚さが大きく測定された可能性がある。また、ディスクの回転に伴う平面振れが約0.35 μm あり、油膜厚さが大きく測定された可能性がある。

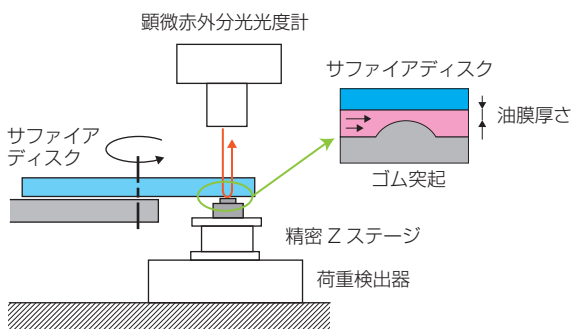


図12 油膜厚さ測定装置模式図

Schematic drawing oil film thickness measuring device

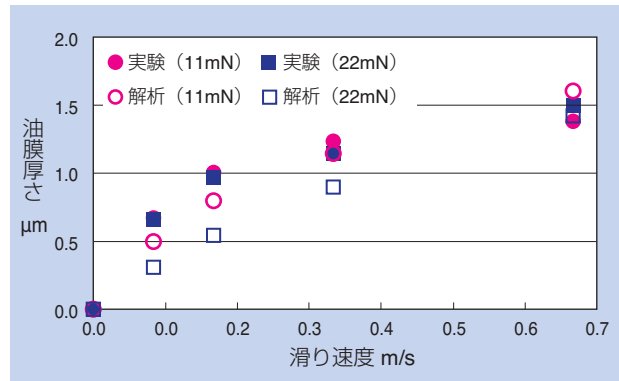


図13 油膜厚さの実験と解析の比較

Comparison of experimental results with analysis ones of film thickness

3.2 軸受トルク

開発シールをトランスミッション用軸受に適用し、軸受のトルクを測定した。シールの仕様、試験条件は表1と同じである。潤滑方法は、最下端転動体上面を油面とする油浴潤滑である。また、軸受にはラジアル荷重を754N負荷した。測定結果を、突起のない従来の接触タイプシールおよび非接触タイプシールを適用した軸受の測定結果と合わせて図14に示す。

突起のない従来の接触タイプシールを適用した軸受と比較して、トルクが最大80%低減した。従来の接触タイプシールでは、固体接触を伴う混合潤滑状態または流体潤滑状態と考えられているが、粗さ突起によるマイクロなEHLのため形成される油膜厚さは粗さのオーダー以下と非常に薄く、流体潤滑であってもせん断抵抗は大きい。一方、開発シールでは突起部で十分な油膜が形成され流体潤滑状態となったことが、摩擦トルクが低減した要因の1つと推測する。さらに、図9に示すように突起数が過少でない場合には、非突起部のCouette流れによるトルクは、突起部のCouette流れによるトルクと比較して小さいことから、開発シ

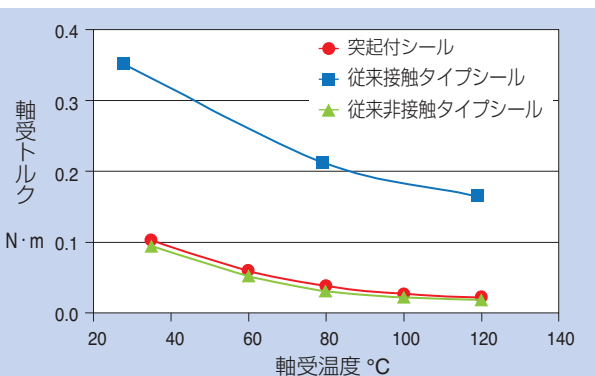


図14 軸受トルクの実験結果

Experimental results of bearing torque

ールでは、非突起部の摺動面間距離が増加したことも摩擦トルクが低減した要因と考える。

また、従来の非接触タイプシールを適用した軸受と比較すると、トルクの増加は $0.01\text{N}\cdot\text{m}$ 程度である。非接触タイプシールのシールトルクは微小と推測できることから、開発シールのシールトルクは $0.01\text{N}\cdot\text{m}$ 程度と見積もられ、図8、図9に示す計算結果と同程度である。

4. おわりに

シールリップの軸受内輪との摺動面に円弧断面形状の微小突起を等間隔に設け、シールリップと軸受内輪との摺動面間に油膜の形成を図ったシールについて、油膜形成のメカニズムと摩擦抵抗を調べるため、油膜解析プログラムを開発した。本稿で評価した条件の範囲では、開発シールは突起部の流体潤滑効果により油膜形成が容易であり、従来の接触タイプシールより低トルクとなることがわかった。

本稿では言及していないが、シールの締め代、突起高さおよびゴム物性のばらつき等もトルクに影響を与える。本プログラムにより開発シールのトルクの予測、突起仕様の最適化が可能である。

参考文献

- 1) 佐々木, 和久田, 水貝, 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) 水田, 回転用オイルシールの潤滑機構の解明と摩擦低減に関する研究, 博士論文 (2013)
- 3) 兼田, シールの密封理論, トライボロジスト, Vol.43, No.2, (1998), 125-130
- 4) 兼田, ソフトEHLの解析, トライボロジスト, Vol.38, No.10, (1993), 890-894.
- 5) 山本, 兼田, トライボロジー, 理工学社, (2007)
- 6) 中原, 流体油膜の挙動, 潤滑, Vol.26, No.3, (1981), 146-152.
- 7) C.H.VENNER, A.A.LUBRECHT, MULTILEVEL METHODS IN LUBRICATION, ELSEVIER, (2000)

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
自動車軸受技術部



和久田 貴裕
自動車事業本部
自動車軸受技術部

車両運動性能を向上させるステアリング補助機能付ハブベアリング Hub Bearing with Steering Function that Improves Vehicle Dynamic Performance

石原 教雄* Norio ISHIHARA 大場 浩量* Hirokazu Ooba 伊東 貴志* Atsushi ITOU
 石橋 満憲** Mitsunori ISHIBASHI 山門 誠** Makoto YAMAKADO 狩野 芳郎** Yoshio KANO
 安部 正人** Masato ABE



ハブベアリングに転舵角調整機構を組み込むことにより、車両の運動性能を向上させることが可能なステアリング補助機能付ハブベアリングを開発した。本開発品は、ドライバーの運転状況に応じて、左右の車輪を独立に補正転舵することが可能である。本報では、左右輪の角度を同期させるモードで、車両運動のシミュレーションモデル、および実車試験で運動性能を確認した結果について報告する。

NTN has developed a hub bearing with a next generation steering function capable of improving the motion performance of the vehicle by incorporating the steering angle adjustment mechanism in the hub bearing.

In this developed product, it is possible to independently correct and steer the left and right wheels according to the driving situation of the driver, but in this report we report on the result of the implementation in the mode to synchronize the left and right.

1. まえがき

ハブベアリングと転舵角調整機構を複合化した『ステアリング補助機能付ハブベアリング（以下sHUBとする）』を開発している。図1に示すように、従来の前輪転舵装置・懸架装置に取り付け、車両情報をもとにコントローラから出力される指令信号によって、左右の車輪を独立して補正転舵することができる。

sHUBは、車両の直進安定性の向上、燃費改善に有効であるとともに、コーナリング時の走行安定性の向上、スリップなどの非常時の危険回避が可能なシステムであり、将来の自動運転技術では回避動作などへの適用も期待できるシステムである。

sHUBを組み込んだ車両シミュレーションに取り組み、本システムが車両のヨーレートと横加速度の応答性を改善することを確認した。

また、この解析結果にもとづいて、sHUBの仕様を決定し、試作品を製作した。試作品（右輪用）の外観を図2に示す。

この試作品の台上試験を行い、基本性能が目標値を満足していることを確認した。また、実車試験により本制御則の効果も確認した。

本稿ではこれらの試験結果について報告する。

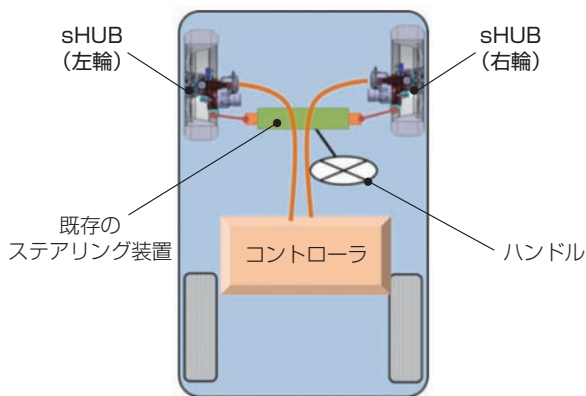


図1 sHUBの車両搭載イメージ
Image of Vehicle with sHUBs

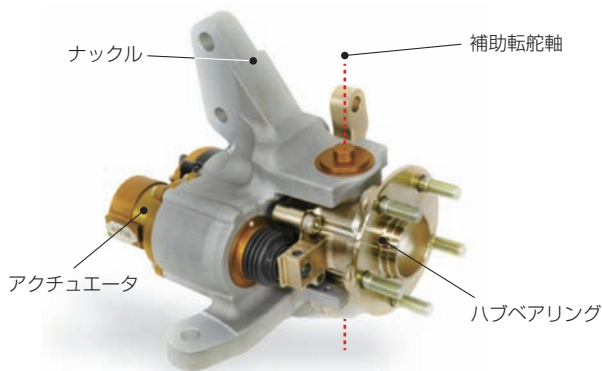


図2 sHUBの試作品
Prototype of sHUB

*商品開発研究所

**神奈川工科大学 自動車システム開発工学科

2. 車両運動制御則

2.1 前輪転舵による車両運動制御

神奈川工科大学の山門・狩野研究室で開発している Matlab/Simulink®車両運動シミュレーションモデル¹⁾を前輪の左右にsHUBを搭載した車両モデルに改良適用し、本車両の運動性能が向上する可能性を確認した。また、このシミュレーションモデルを用いて最適な制御パラメータの設定を検討した。

なお、本シミュレーションモデルはタイヤの前後、横力に対しサスペンションのリンク機構によるアンチダイブ、スクワット効果を考慮しているため、車体の姿勢変化を再現することができる。^{2) 3) 4)}

2.2 転舵の応答性を改善する制御

ドライバーの転舵に対して、車両のヨーレートと横加速度の応答性を改善する制御則を以下に示す。ここで、各記号は次のように定義する。

- n : ステアリングギヤレシオ
- V : 車両速度
- I : 車両のヨー慣性モーメント
- l : ホイールベース
- l_r : 車両重心点と後輪車軸間の距離
- K_r : 後輪1輪あたりのタイヤコーナリングパワー
- $\beta(s)$: 車両重心の横すべり角 β のラプラス変換
- $r(s)$: ヨーレート r のラプラス変換
- $\delta(s)$: 前輪のタイヤ角 δ のラプラス変換
- $\delta_h(s)$: ハンドル角 δ_h のラプラス変換
- $\ddot{y}(s)$: 横加速度 \ddot{y} のラプラス変換
- ω_n : ステアリング転舵に対する車両応答の固有振動数
- ζ : ステアリング転舵に対する車両応答の減衰比
- $G_{\delta}^{\beta}(0), G_{\delta}^r(0), G_{\delta}^{\ddot{y}}(0)$: ステアリング転舵に対する車両応答パラメータ

$$\frac{\delta}{\delta_h}(s) = \frac{1}{n} \left[\frac{1 + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + \frac{1}{\omega_n^2}s^2}{1 + \frac{2\zeta(1+\alpha_1)}{\omega_n(1+\alpha_2)}s + \frac{1}{\omega_n^2(1+\alpha_2)^2}s^2} \times \frac{1 + \left(\alpha_3 \frac{l_r}{V_{\beta=0}} + (1-\alpha_3) \frac{l_r}{V}\right)s + \frac{I}{2IK_r}s^2}{1 + \frac{l_r}{V}s + \frac{I}{2IK_r}s^2} \right] \quad (1)$$

$$\beta(s) = G_{\delta}^{\beta}(0) \frac{1 + T_{\beta}s}{1 + \frac{2\zeta s}{\omega_n} + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \frac{\delta}{\delta_h}(s) \quad (2)$$

$$r(s) = G_{\delta}^r(0) \frac{1 + T_r s}{1 + \frac{2\zeta s}{\omega_n} + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \frac{\delta}{\delta_h}(s) \quad (3)$$

$$\ddot{y}(s) = G_{\delta}^{\ddot{y}}(0) \frac{1 + \frac{l_r}{V}s + \frac{I}{2IK_r}s^2}{1 + \frac{2\zeta s}{\omega_n} + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \frac{\delta}{\delta_h}(s) \quad (4)$$

式(1)は、車両のヨーレートと横加速度の応答性を改善するために車両のタイヤ角を決定する制御則であり、この値からハンドル転舵によるタイヤ転舵角を引いた値をsHUBの補正転舵角とする。この制御則を式(2)、(3)、(4)に代入し、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の各パラメータを調整することで、横すべり角 β 、ヨーレート r 、横加速度 \ddot{y} の応答性を改善できる。このとき $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の各パラメータは、それぞれ、減衰比 ζ 、固有振動数 ω_n 、横加速度 \ddot{y} に対応した値である。本シミュレーションは、ドライバーの転舵速度が速くなる、または、横加速度が増加するほど、転舵に対する車両運動性能(ヨーレートと横加速度の応答性)が低下するなど、基本的な車両運動が再現できている。

実際のシミュレーションは二輪モデル(左右輪を同じ角度で制御する。)で行い $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の各パラメータが転舵応答性に与える影響について調査した。その結果をもとにパラメータを検討した⁵⁾。

図3に、0.5Hzの正弦波状の転舵でレーンチェンジ(約4.0m幅)を行う場合の解析結果を示す。

sHUBの制御パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は上記検討により決定した値を用いた。上から(a)ハンドル角、(b)前輪転舵角、(c)sHUBの作動角速度、(d)車両のヨーレート量、(e)車両の横加速度を示す。それぞれ赤線がsHUBにより補正転舵を行った場合、青線は補正なしの場合に対応する。どちらの場合もハンドル角変化量は等しい。

前輪転舵角の解析結果から、sHUBは補正転舵開始時にタイヤ転舵角の切り増しを行い、ハンドルの戻し開始時にはsHUBの補正転舵角がゼロとなるように制御されている。なお、図3(b)に示す前輪転舵角の赤線(sHUB付車両)と青線(通常車両)の差がsHUBの転舵角に相当する。

本制御によって、ヨーレートおよび横加速度の立ち上がりが速くなり、ドライバーの転舵に対するヨーレ

イトと横加速度の位相遅れが小さくなり、応答性が改善されていることが確認できる。

また、一般的に想定される範囲で速度、横加速度を変えて実施した解析結果にもとづいて、車両のヨーレートと横加速度の応答性を改善するために必要なsHUBの仕様を検討した。表1に検討結果を示す。最大転舵角は±3deg、最大角速度は10deg/sの性能を満たせば、車両応答性の改善効果が期待できる。

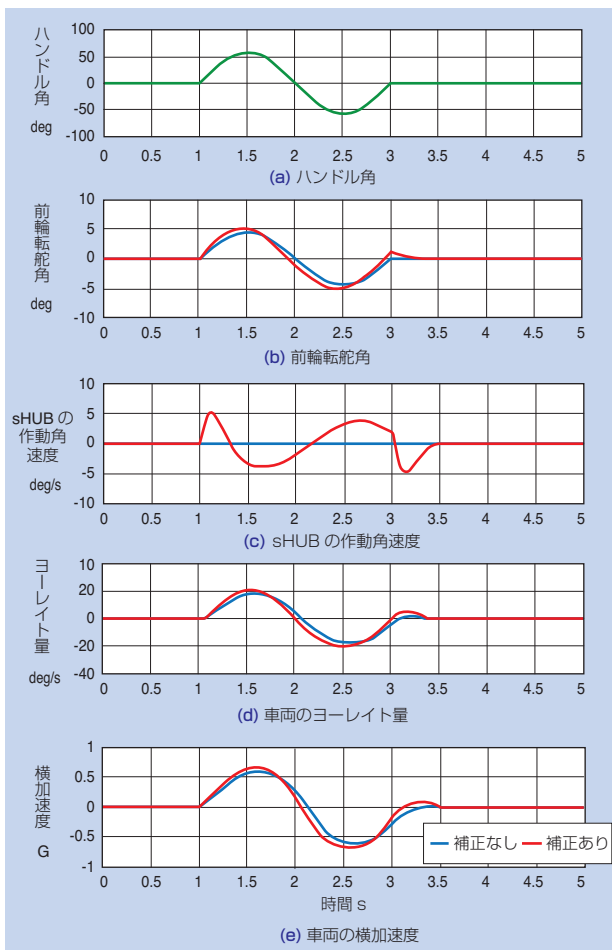


図3 シミュレーション結果
Simulation Results

表1 sHUBの目標スペック
Target Spec of sHUB

項目	数値
最大転舵角	±3 deg
最大転舵角速度	10 deg/s

3. sHUBの構造

3.1 構成要素

図4にsHUBの構成要素を示す。sHUBはハブベアリング部、ナックル部、アクチュエータ部の3要素で構成されている。それぞれの役割について次に示す。

- ・ハブベアリング部：タイヤを回転支持、ナックルに対して補助転舵軸回りの回転を支持
- ・ナックル部：車両の懸架装置と連結
- ・アクチュエータ部：ナックルに固定され、ハブベアリング部を転舵駆動

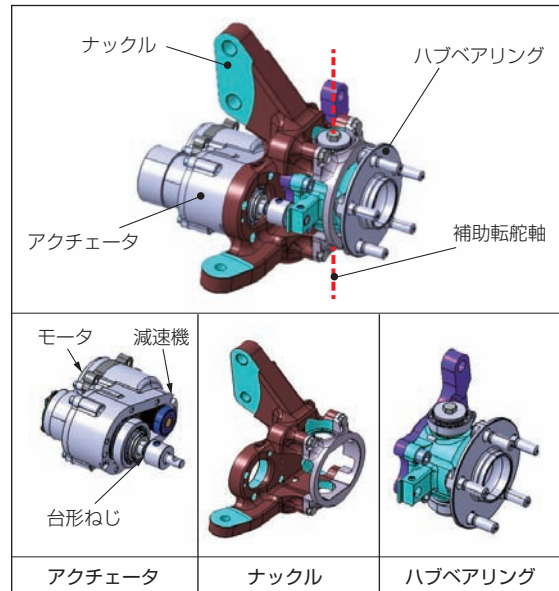


図4 sHUBの構成要素
Components of sHUB

アクチュエータ部のモータは、車両の车速やハンドル角を入力条件としてコントローラで制御される。このモータの回転運動を、減速機を介して台形ねじのナットに伝達し、直進運動に変換している。この台形ねじの直動部がハブベアリング部に設けたアームの端部を駆動することで、転舵軸を中心にタイヤが転舵される。

タイヤからの逆入力、この台形ねじのセルフロック機能により防止される。したがって、モータの消費電力を削減することができる。

3.2 sHUBのスペック

表1の仕様を満足し、かつ、試験車両のステアリングジオメトリを変更することなく搭載可能な試作品の仕様を表2に示す。質量は原型車両のノーマル品（ナックルとハブベアリング）に対して+5kg以下の13.8kgとした。

表2 試作品のスペック
Specifications of sHUB Prototype

項目	数値
最大転舵トルク	350 Nm
電源電圧	24 V
最大転舵角	±3.5 deg
最大転舵角速度	16 deg/s
質量	13.8 kg

4. 台上試験結果

4.1 特性試験機

試験機の構成を図5に示す。試作品のナックル部を試験機に固定し、転舵軸から120mm離れたフランジ端面の1点にエアシリンダで負荷を与え、タイヤからの反力を模擬した。

また、sHUBが動作している時に、実際にフランジ面にかかる荷重をロードセルで測定した。

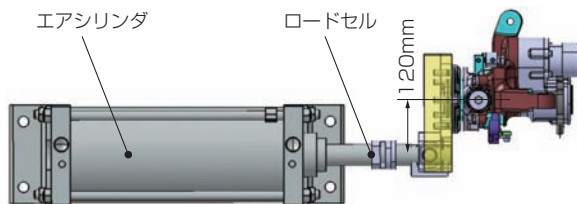


図5 sHUBの試験装置
Test equipment of sHUB

4.2 モータ指令値と転舵角の関係

図6に、モータ指令値に対する転舵角の関係を示す。転舵角は実測したハブフランジ面の角度とした。

本試作品は指令値に対して線形に作動していることを確認した。

ここで、タイヤはハブフランジ面にボルト固定されるため、ハブフランジ面の角度とタイヤ角は等しい。

4.3 応答速度

ハブベアリングにステアリングトルクを負荷（エアシリンダで120mmの位置に負荷）した状態で、図7

に示す指令値（破線）をコントローラに与えsHUBを転舵させ応答速度を求めた。応答速度は、sHUBの転舵角（図7：実線）の最大立ち上がり速度とした。図8に負荷トルクに対するsHUBの転舵最大角速度を示す。

負荷トルクが増加すると最大角速度は減少するが、目標を満足する十分な角速度を確認した。

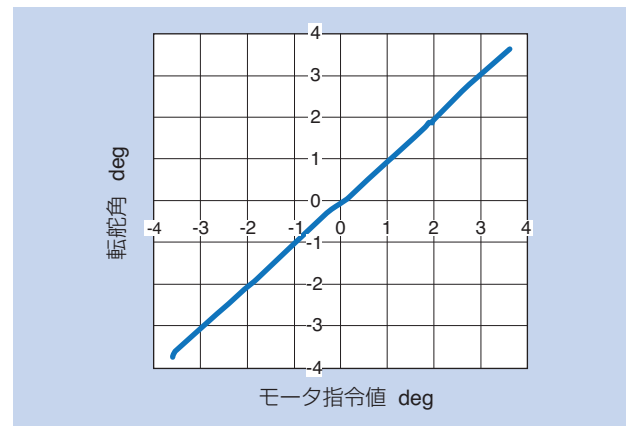


図6 モータ指令値と転舵角の関係
Relationship between Motor Command Value and Steering Angle

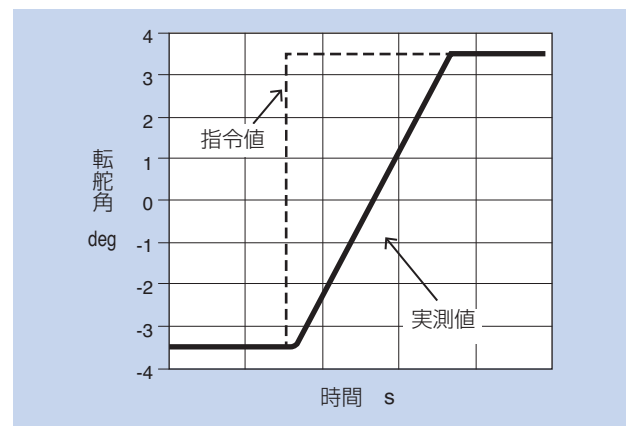


図7 指令値と転舵角
Input Value and Steering Angle

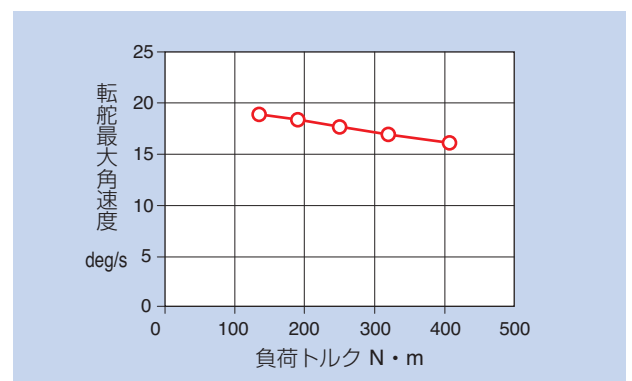


図8 負荷トルクと転舵最大角速度の関係
Maximum Angular Speed on Steering Torque

5. 実車試験結果

5.1 パラメータの設定

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ の各パラメータの値は、sHUBを搭載した試験車両のシングルレーンチェンジ試験、およびスラローム走行試験における感応評価の結果にもとづき決定した。

5.2 応答試験

本システムを試験車両に搭載し、指令値に対するsHUBの機械的な応答性を確認した。

図9に示すシングルレーンチェンジのコースを車速80 km/hで走行した。路面はアスファルト（ドライ）である。

図10に、シングルレーンチェンジ時のsHUBへの指令値を黒線で、実際の補正転舵角を赤線で示す。図10(a)には試験全体のデータを、(b)は(a)の破線内を拡大したデータを示す。(b)に示すように最大で

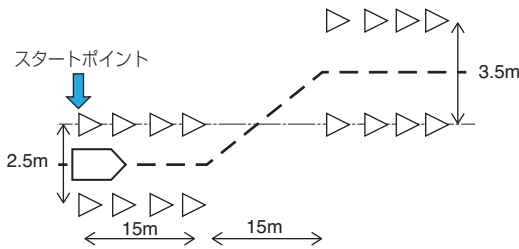


図9 シングルレーンチェンジ試験コースレイアウト
Course Layout for Single Lane Change

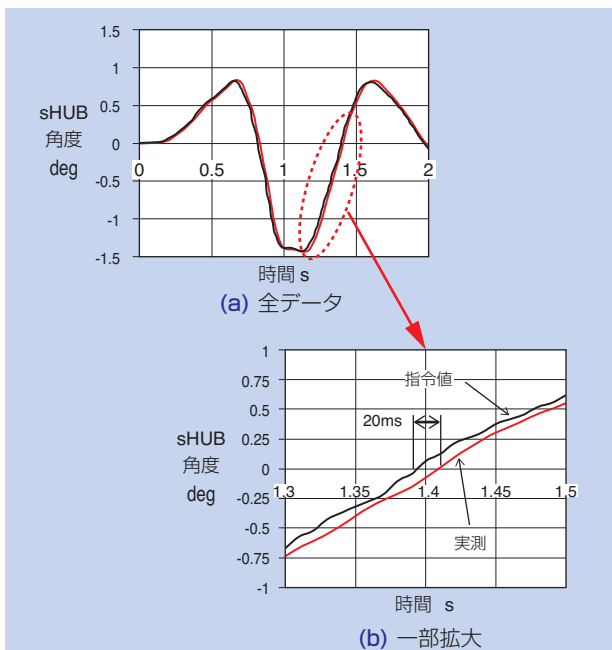


図10 シングルレーンチェンジ時の応答性
Mechanical Response Motion for Single Lane Change

20ms程度の遅れがあったが、走行試験においては、問題ないレベルであった。

5.3 転舵過渡応答試験

本制御則で制御されるsHUBによる車両の応答性の改善を確認するため、「乗用車の操だ過渡応答試験方法(JASO Z110:2003)」の“パルス操だ入力”試験を実施した⁶⁾。試験場の広さの制限により、試験条件は車速80km/h、パルス幅0.5sとした。図11にハンドルの操作方法を示す。ドライバーのハンドル操作で三角波を入力する。

本試験で得られたデータから、ハンドル角に対するヨーレイト (a) と横加速度 (b) の周波数応答特性の解析結果を図12に示す。赤線がsHUBによる補正転舵あり、青線が補正なしの結果であり、それぞれ3回ずつ試験を実施し同様な傾向を確認した。

本制御を用いることで、ヨーレイト、横加速度ともに、通常走行で使用するハンドル角の周波数 (0.5~2.0Hz) 域でピーク値の増加と位相遅れの改善傾向が見られ、車両の運動性能が高まった。これによりドライバーは、ハンドル操作に対する車両の応答性が良く、思い通りの操作が実感できる。

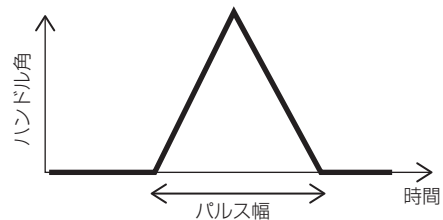


図11 ハンドル入力条件
Input Steering Condition

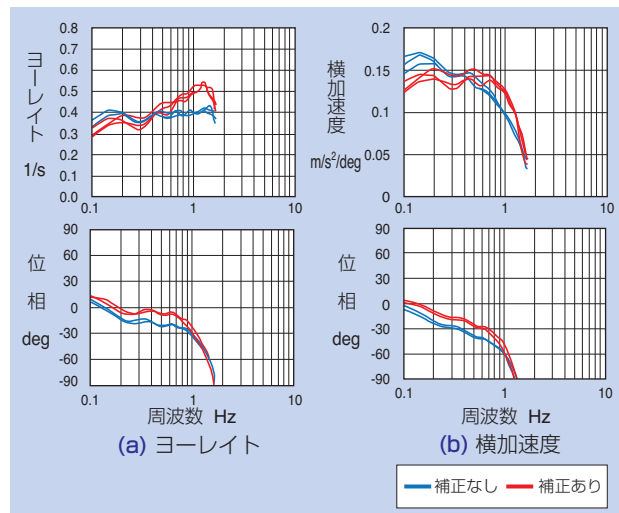


図12 周波数応答特性の解析結果
Transient Response Characteristic

5.4 シングルレーンチェンジ走行試験

車両の走行限界性能（一定車速条件の車両の挙動、応答性、収束性など）を評価するため、シングルレーンチェンジ試験を実施した。コースレイアウトは図9と同様である。

スタートポイントに車速80km/hで侵入し、スタートポイント通過後、アクセルオフの状態で行った。

図13に本試験結果を示す。赤線がsHUBによりタイヤ角の補正を行った場合、青線は補正なしの場合に対応する。車速は補正の有無にかかわらず変化は見られなかった。

sHUBにより補正転舵を行うと、ドライバーのステアリング転舵量が全体的に小さくなるとともに、レーンチェンジ後のドライバーの補正転舵量が小さくなっている。このためドライバーは運転がしやすく、思

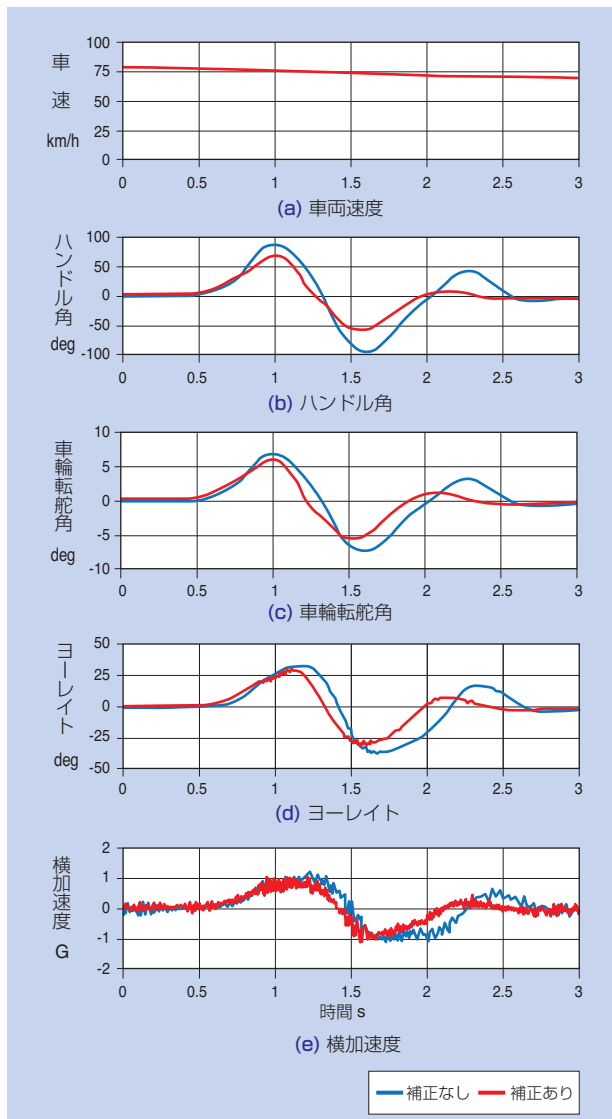


図13 試験結果 (シングルレーンチェンジ)
Test Result

い通りの操作が可能になっていると考えられる。

また、ドライバーのハンドル操作に対する車両のヨーレイト、横加速度ともにピークの遅れが小さく、応答性が改善されている。

図14に本試験の走行軌跡を示す。sHUBにより補正転舵を行うことで、ハンドルの戻し時の膨らみを抑えて走行できている。

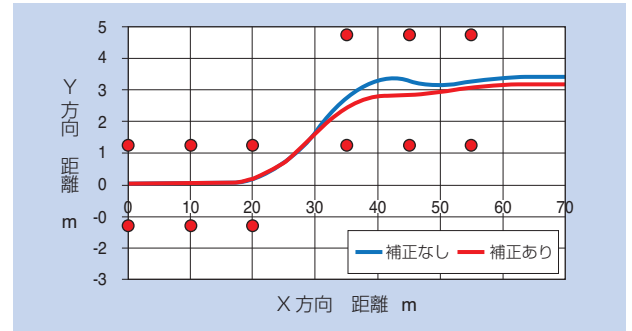


図14 車両の走行軌跡
Vehicular Swept Path

5.5 スラローム走行試験

操縦安定性の確認試験として、スラローム試験を実施した。

本試験のコースレイアウトを図15に示す。スタートポイントに車速50km/hで進入して試験を実施した。

図16および、図17にハンドル角に対するヨーレイトと、横加速度の変化を示す。赤線がsHUBにより補正転舵を行った場合、青線は補正なしの結果である。

sHUBを制御することで、ハンドル角が小さくなるとともに、ヨーレイト、横加速度は線形性が向上し、ドライバーは運転操作がしやすくなっている。

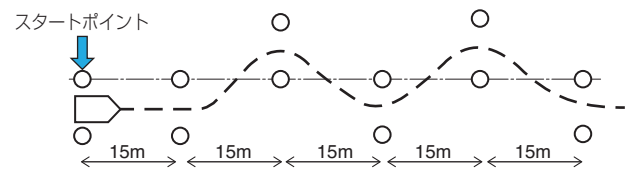


図15 スラローム試験コースレイアウト
Course Layout for Slalom

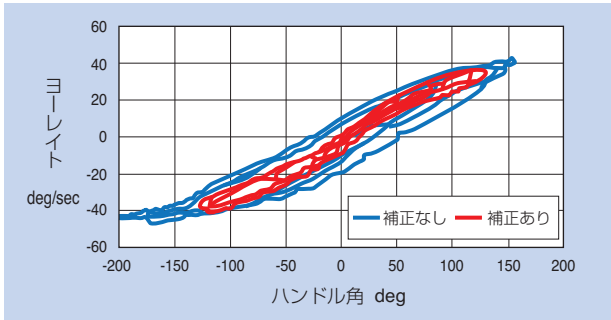


図16 ハンドル角とヨーレイトの関係
Relationship between Steering Angle and Yaw Rate

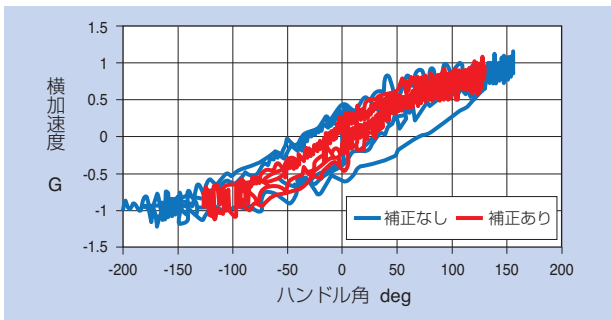


図17 ハンドル角と横加速度の関係
Relationship between Steering Angle and GY

6. まとめ

ドライバーの操安性向上等を目的として、前輪左右のホイール内にそれぞれ配置されるステアリング補助機能付ハブモジュール (sHUB) を開発した。走行条件に合わせて左右輪を適切に補正転舵することで、車両の運動性能を向上させることができた。以下に得られた結果を示す。

車両運動シミュレーションにより、転舵の応答性を改善し、理想的な車体姿勢を実現する制御則を示した。

上記シミュレーション結果から、sHUBの目標仕様を決定し、試作品による台上試験を行い、目標を満足する性能を確認した。

sHUBを試験車両に搭載し、上記制御則により車両の運動性能が向上することを確認した。

今後、左右のsHUBを独立して制御する制御則の検討を進め、実車での効果を確認していく。

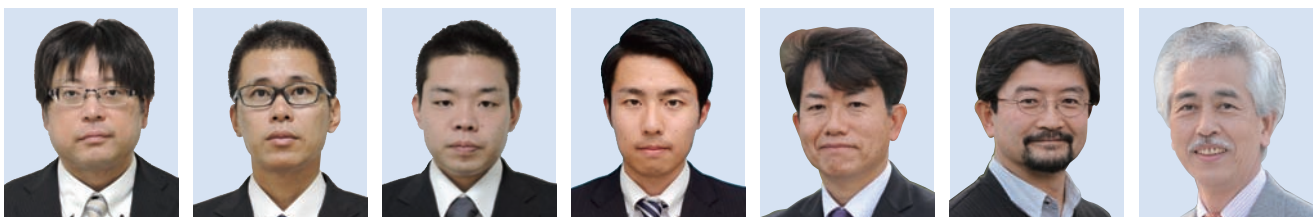
追記

本記事は、原著論文 (2018年自動車技術会春季大会学術講演会予稿集 No.58-18 20185263『車両運動性能を向上させる前輪アクティブ転舵機能付ハブベアリング』) をもとに和訳、転載したものである。

参考文献

- 1) 関谷拓磨, 「車両モデルの高精度化による挙動再現性の向上に関する研究」, 神奈川工科大学 卒業論文 16YKN02, (2016).
- 2) 宮本勝祥, 「基礎的な車両諸元と転舵特性に関する研究」, 神奈川工科大学 卒業論文 12ABE05, (2012).
- 3) 関谷拓磨, 田中利緒, 山門誠, 狩野芳郎, 安倍正人, 「ばね上3次元車両運動の簡易な記述式車両運動モデルによる運動評価」, 2017年秋季大会学術講演会講演予稿集20176253, (2017), p1365-1369.
- 4) 宮本勝祥, 松本浩幸, 桑山勲, 狩野芳郎, 安倍正人, 「タイヤコーナリング特性に依存して車両の基本諸元が転舵特性評価に及ぼす影響 (第2報)」, 2014年学術講演会前刷集, 2014753, No.122-14, (2017), p1-4.
- 5) 安部正人, 『自動車の運動と制御』, 第2版, 東京電機大学出版局, (2012).
- 6) JASO Z110, 2003「自動車規格 乗用車の操だ過渡応答試験方法」.

執筆者近影



石原 教雄
商品開発研究所

大場 浩量
商品開発研究所

伊東 貴志
商品開発研究所

石橋 満憲
神奈川工科大学
自動車システム開発工学科

山門 誠
神奈川工科大学
自動車システム開発工学科

狩野 芳郎
神奈川工科大学
自動車システム開発工学科

安倍 正人
神奈川工科大学
自動車システム開発工学科

早期異常検知機能付円すいころ軸受 "Tapered Roller Bearings" with Early Failure Detection Sensor

山本 直太* Naota YAMAMOTO
内村 宙史** Hiroshi UCHIMURA
東穂 翔太** Shota TOHO



本稿では、軸受運転中に発生したはく離を早期に検出可能な「早期異常検知機能付円すいころ軸受」について紹介する。

はく離した軸受を継続して使用すると、軸受の回転異常やはく離片の拡散により周辺部品への2次被害を引き起こすが、機械全体の振動や音に紛れ検出が困難である。

開発品は独自の分割型フィルタ付シールリング構造により、円すいころ軸受に磁気式金属センサを取り付けることができ、はく離の検出とはく離片の軸受外への流出を防止することが可能である。

In this paper, we introduce "Tapered Roller Bearings" with early failure detection sensor, which can detect flaking that may occur on bearings during operation. Continuous use of bearings with flaking failure leads to a risk of damage to peripheral components such as the shaft and housing due to abnormal bearing rotation. Furthermore, such flaking might also cause secondary damage such as damage to gear parts when flaking debris from bearings is dispersed and becomes stuck in the gears. Therefore, when flaking occurs on bearings, it is best to stop operation promptly. However, until now, it was difficult to detect flaking on bearings because it was undetectable due to the vibrations or noise of the entire machine. The developed product utilizes a magnetic sensor for the tapered roller bearing, with its own split type filter seal structure. Therefore the developed product can detect failure and prevent flaking debris from flowing out of the bearings.

1. はじめに

油潤滑で使用される建設機械用軸受は、ライフ・サイクル・コスト（LCC: Life Cycle Cost）低減のため、長寿命化や信頼性向上に加えて、損傷（はく離）の早期検出が求められている。

はく離とは、軸受の転がり面がうろこ状にはがれる現象で、はく離が生じた軸受を継続して使用すると、転がり面全体に進展し（図1）、異音や異常振動を誘発



図1 はく離が進展した円すいころ軸受の内輪
Inner ring of tapered roller bearing which flaking had spread

し、滑らかな回転が阻害される。また、はく離片が機械内部に拡散すると、歯車などの他の機械要素を損傷させる恐れがある。このため、LCC低減には、はく離の発生やその進展を早期に検出することが重要となる。

本稿では、これらの取組みとして「早期異常検知機能付円すいころ軸受」（以下、開発品）を紹介する。

2. 構造と特長

開発品は、建設機械をはじめ、重荷重条件で多く使用される円すいころ軸受と、磁気式金属センサを内蔵した「フィルタ付シールリング」（以下、シールリング）で構成される（図2）。シールリングは、軸受の通油性を確保しつつ、はく離片が軸受外部へ流出することを防ぐ。また、内蔵した磁気式金属センサは、はく離の発生を早期に検出することができる。

*産業機械事業本部 適用技術部
**産業機械事業本部 製品設計部

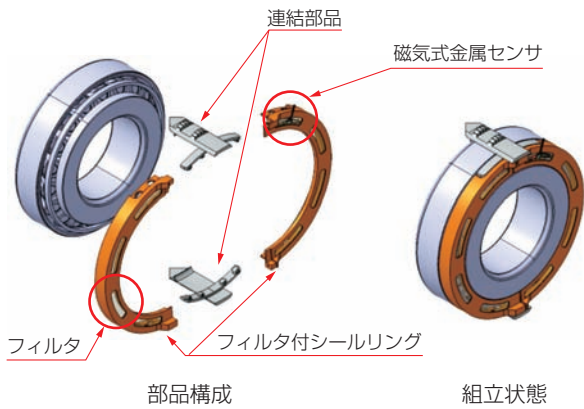


図2 早期異常検知機能付円すいころ軸受 "Tapered Roller Bearings" with early failure detection sensor

2.1 磁気式金属センサ

開発品は、はく離片の検出に磁気式金属センサを用いる。センサの回路図を図3に示す。基板上に2つの永久磁石を設置しており、その間にはく離片が付着して導通することで、出力電圧が低下する。

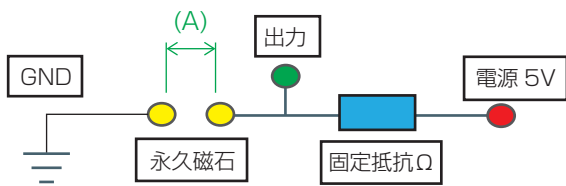


図3 センサ回路図
Sensor circuit diagram

この方法では、図3の2つの永久磁石の間の距離 (A) は、はく離片の検出感度に影響し、距離 (A) が離れるほど、検出感度は低下する。一方、距離 (A) が近づくと、はく離片よりも小さな摩耗粉も検出するため、その結果、はく離片の検出精度が低下する (図4)。そこで、開発品は距離 (A) を最適化し、はく離片の検出精度を高めている。

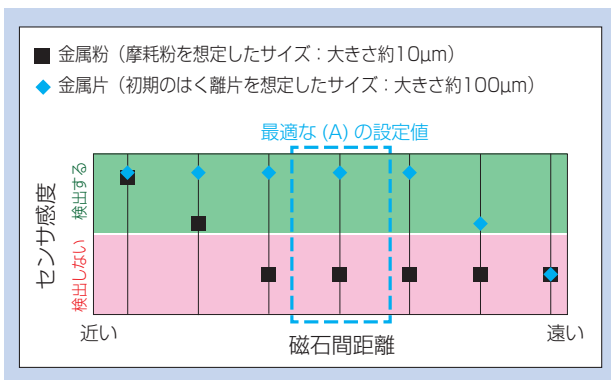


図4 磁石間距離とセンサ感度
Magnet distance and sensor sensitivity

2.2 フィルタ付シールリング

循環給油では、歯車などの機械要素の潤滑を軸受と兼用することが多い。この場合、軸受がはく離すると、はく離片が潤滑油とともに機械内部に拡散し、他の機械要素を損傷させる恐れがある。このため、シールリングを以下の仕様とし、軸受のはく離片の流出を防いでいる。

- シールリングと内輪のすきまを小さくする (図5※1)。
- シールリングに磁石を複数配置するとともに、捕獲したはく離片を保持するポケットを設けている。
- 通油性を確保するため、フィルタを複数箇所設けている (図6)。

また、シールリングがはく離片を捕獲した様子を図7に示す。

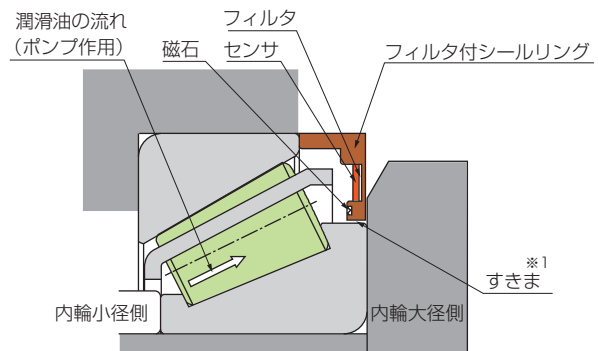


図5 開発品の断面図
Cross sectional view of developed product

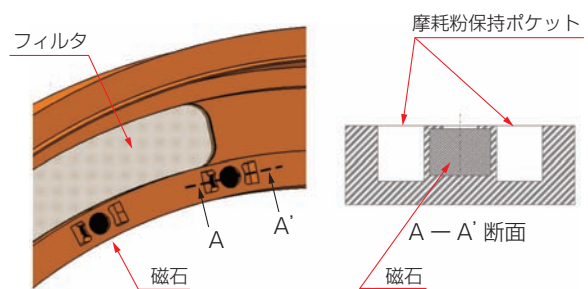


図6 フィルタと内蔵磁石
Filter and built-in magnet

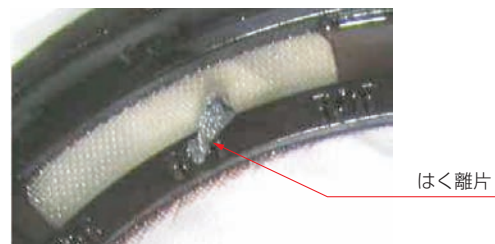


図7 磁石に捕獲されたはく離片 (試験後)
Magnet with flaking pieces

シールリングは、機械への組込性を確保するため、**図2**に示すように、2つの半円型部品からなる分割型としており、連結方法の違うAタイプとBタイプがある（**図8**）。円すいころ軸受とシールリングを同時に軸受箱へ挿入する場合は、軸受箱内径面の溝に連結部品を挿入して固定するAタイプを用いる¹⁾。また、シールリングを軸受箱の肩部や端部にボルトで固定する場合は、Bタイプを用いる。どちらのタイプもシールリングは軸受箱に固定されており、運転中に外輪が回転するクリープが発生したとしても、センサ用配線が切断されることはない。

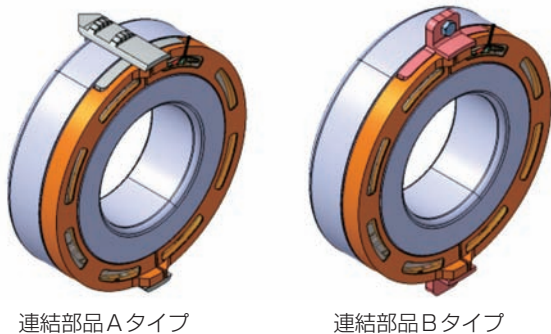


図8 連結部品の種類
Types of connected parts

3. 性能試験結果

3.1 はく離片の検出性能

はく離片の検出性能を確認するため、**図9**、および**表1**に示す評価試験を行った。はく離を生じやすくなるため、試験前の軸受のころ転動面に圧こみを付与した（**図10**）。

試験結果を**図11**に示す。試験開始から102時間後に、磁気式金属センサの出力電圧に低下が認められたため、試験機を停止し、軸受を観察したところ、1本のところ転動面にはく離が生じていることを確認した（**図12**）。

また、本試験では、一般的な異常検出方法である軸受箱外周面での振動計測も実施し、磁気式金属センサとの比較を行った。その結果、軸受箱外周面での振動計測でも磁気式金属センサと同様、試験開始から102時間後に振動値の変化が認められた。しかし、開発品の主要用途である建設機械は、軸受の外部から大きな振動が加わることがあるため、それを軸受の異常と判

定しないよう、安定稼働時に発生する振動値の2~3倍をしきい値とすることがある。この設定では、**図11**の上昇は異常と判定されず、はく離の発生後も機械は継続して運転されるため、はく離の進展や他の機械要素の損傷を誘発する恐れがある。

以上より、開発品は、一般的な異常検出方法よりもはく離片を早期に検出可能であることを確認した。

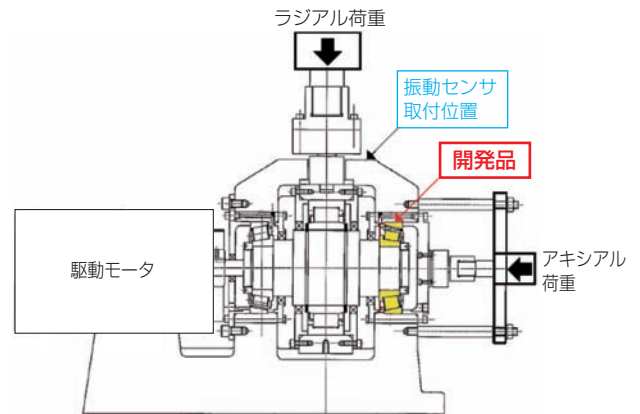


図9 試験装置
Test equipment

表1 試験条件
Test Condition

軸受 内径×外径×総幅	円すいころ軸受 φ65×φ130×37 mm
回転速度	2,000min ⁻¹
潤滑油	タービン油 (VG46)
潤滑方法	循環給油
ラジアル荷重	12.5kN
アキシアル荷重	100kN
最大接触面圧	2,070MPa

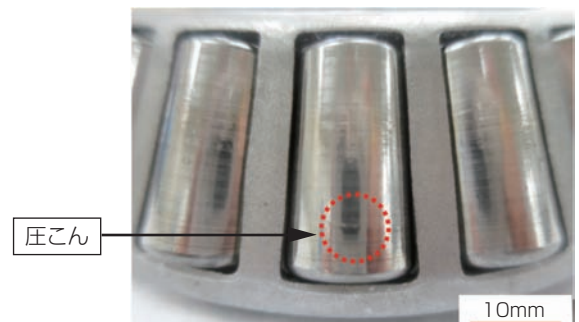


図10 試験前のころ
Test bearing before the test

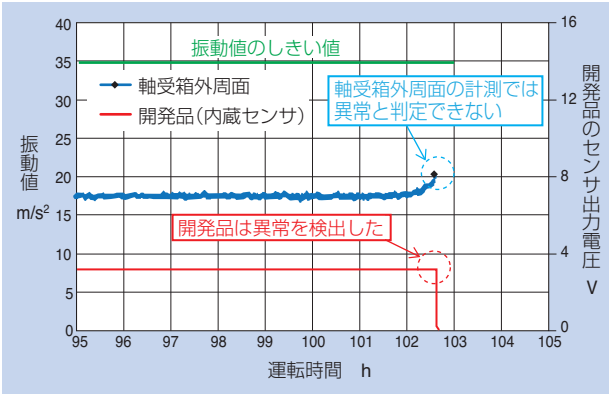


図11 性能試験結果
Test result

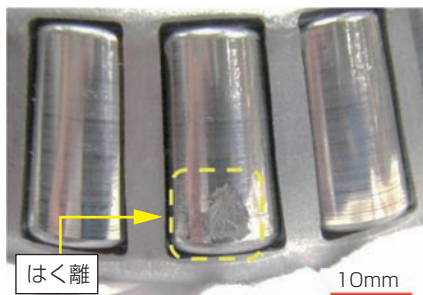


図12 ころに発生したはく離
Test bearing after the test

3.2 はく離片の捕獲性能

建設機械では、開発品がはく離片を検出した後も、継続して運転される場合がある。このため、シールリングには、はく離片を捕獲し他の機械要素の損傷を防止することが求められる。3.1項の試験後軸受を再び図9の試験機に組み込み、表1に示す評価試験を継続して行った。

その結果、試験開始後13時間でモータが過負荷となったため、試験機を停止し、軸受を観察したところ、ころ転動面のはく離が進展していることを確認した(図13)。また、シールリングには多量のはく離片が捕獲されており、開発品がはく離片の流出を防ぐことを確認した(図14)。



図13 継続試験ではく離が進展したころ
Test bearing after the continuous test

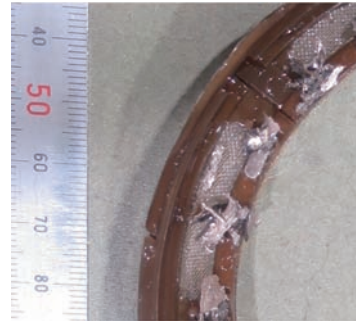


図14 継続試験で捕獲されたはく離片
Test bearing after the continuous test

4. 機能拡大に向けた取組み

本稿で紹介したはく離片の検出のほか、軸受温度や振動の計測による状態監視が行われている。軸受温度や振動の場合、センサの取付箇所の制約があり、軸受箱の外周面など、軸受から離れた場所で計測されるため、十分な感度や信頼性が得られない恐れがある。

また、機械の出力を制御するため、軸の回転速度の計測も広く行われている。しかし、センサの取付け易さから、機械の外側に取り付ける場合は、外部環境が厳しく、早期に故障するという課題がある。

そこで、本開発品に温度と回転速度センサを追加することを検討した(図15)。

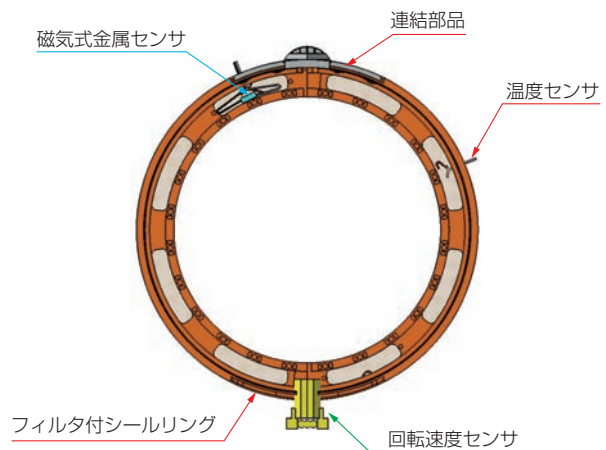


図15 試作品イメージ
Prototype image

4.1 温度センサ試験結果

シールリングに温度センサを内蔵し、軸受内部を通過する潤滑油の温度を計測した。比較のため、軸受の外輪外径面で温度を計測した。

3.2項のはく離片の捕獲性能試験で、試験機停止までの温度の計測結果を図16に示す。

シールリングに内蔵した温度センサの計測値は、外輪外径面での計測値に対し、試験開始2時間後で5℃程度の温度差が認められるが、8時間後には温度差が2℃以内になり、ほぼ同等であることを確認した。

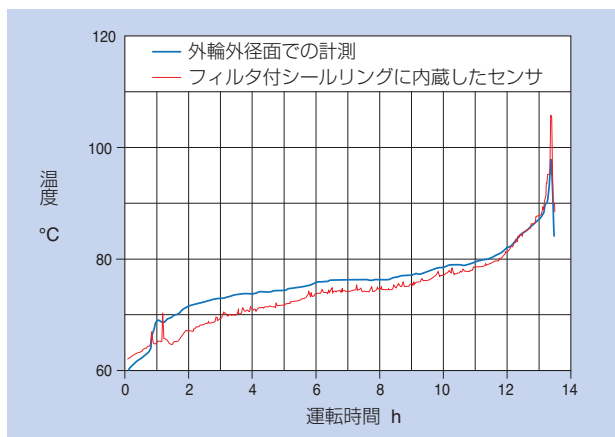


図16 温度上昇試験結果
Temperature rise test result

4.2 回転速度センサ試験結果

潤滑油の中で使用可能な回転速度センサ²⁾を、シールリングに内蔵し、保持器の回転速度を計測した。ここで、保持器と主軸の回転速度には相関があり、保持器回転速度の計測値を主軸回転速度へ換算すると、試験機の主軸回転速度と一致する結果が得られた(図17)。

今後、潤滑油中で使用可能な回転速度センサとして、開発品への実装が期待できる。

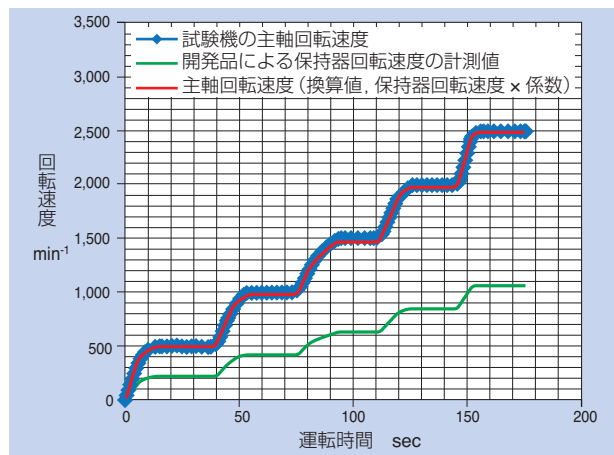


図17 回転速度計測結果
Rotational speed instrumentation result

5. おわりに

「早期異常検知機能付円すいころ軸受」の構造とその特長について紹介した。

本開発品は、軸受の早期損傷(はく離)を検出するとともに、はく離片の拡散による周辺部品への2次被害を防止し、ライフ・サイクル・コストの低減が期待できる。また、各種センサを搭載でき、マルチセンシングやIoTへの活用が期待できる。

今後もより付加価値の高い商品開発に努める。

参考文献

- 1) 山本直太, 内村宙史, 東穂翔太: 早期異常検知機能付円すいころ軸受, 油空圧技術(2017) 19-23.
- 2) 内藤健一郎, 山本直太, 曾根克典: 超大型ダンプロック・ホイール軸受の動向と高機能化, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80(2012) 78-82.

執筆者近影



山本 直太
産業機械事業本部
適用技術部



内村 宙史
産業機械事業本部
製品設計部



東穂 翔太
産業機械事業本部
製品設計部

[商品紹介]

風力発電装置主軸用「左右列非対称自動調心ころ軸受」 Asymmetrical Spherical Roller Bearings for Wind Turbine Main Shafts



瀬古 一将* Kazumasa SEKO
山本 貴志** Takashi YAMAMOTO

風力発電装置の主軸受に使用される自動調心ころ軸受では、風荷重による一方の方向のアクシアル荷重により片列負荷となる。また、自動調心ころ軸受特有の転がりすべりと潤滑不足による軌道面ところの金属接触により、外輪軌道面に摩耗が生じ、はく離や割れが発生することがある。

NTNは本事象の対策として左右列でころの長さや接触角が異なる、風力発電装置主軸用「左右列非対称自動調心ころ軸受」を開発したので紹介する。

Wind turbine main shaft bearings are subjected to axial loading caused by wind loads. The use of spherical roller bearings for such applications results in one row being subjected to larger loads as compared to the opposite row. Additionally, spherical roller bearings have a characteristic of rolling and sliding due to inherent internal geometry. These conditions, combined with insufficient lubrication at the roller/raceway contact, lead to wear at the outer raceway surface. As a result damage might occur particularly in the outer ring raceway surface.

NTN has developed “Asymmetrical Spherical Roller Bearings” for wind turbine main shafts that have an asymmetrical design utilizing different length rollers and a different contact angle between internal left and right roller rows in order to address these issues.

1. はじめに

風力発電は二酸化炭素を排出せず、環境への影響が少ないクリーンエネルギーの一つとして、これまでグローバルで飛躍的な発展を遂げてきた。

世界風力会議（GWEC）の発表によると2017年末の風力発電装置累計導入量は約540GWで、この10年間でおよそ5倍以上に増加している。また、同会議の今後5年間の市場予測では、約9～10%の年成長率で増加が想定されている（図1）。

これまで、風力発電は固定価格買取制度（FIT）などの国の政策補助によって導入の促進が図られてきた。しかし、欧米では風力発電を火力や水力などの他の電力と競争させるために、補助金を徐々に削減し、国の補助なしで採算をとることができるエネルギー源へと成長させようとする動きがある。

また、陸上で適切な設置場所が減少していることや、発電効率および設備稼働率向上を目的として、風力発電装置メーカー各社が洋上機種を開発を本格化させている。

洋上機種のコストは陸上機種よりも大幅に増加するため、1基あたりの発電容量を大きくした装置が採用されるようになり、12MWまで開発が進んでいる。

一方で、風力発電装置は不具合が一旦発生すると軸受の交換に多大な費用が必要になるため、大型化や洋上化される風力発電装置用軸受には、より一層高い信頼性が求められる。

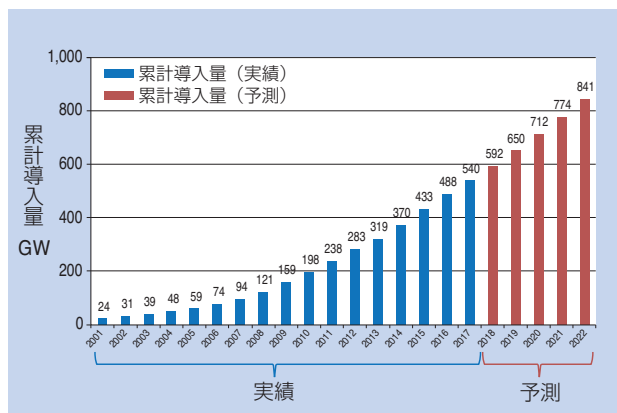


図1 風力発電装置累計導入量の推移 1)
Global cumulative installed wind capacity

*産業機械事業本部 適用技術部

**産業機械事業本部 製品設計部

2. 風力発電装置の構造

2.1 軸受使用箇所

風力発電装置には水平軸、垂直軸の形式があるが、商業用大型機の主流である3枚ブレード（翼）の水平軸プロペラ型風車を紹介する。

図2に2MW程度の陸上機種で主流の誘導発電タイプのナセル部を示す。ブレードで風エネルギーを受け、ロータが回転し、増速機で回転数を増速させた後、誘導発電機でこの運動エネルギーを電気エネルギーに変換する。

軸受は、ロータ軸の支持部、増速機、発電機で 사용되는ほか、3枚のブレード付根の旋回部やタワー頂部のヨー旋回部と、それらを駆動する減速機に使用される。軸受は1基あたり20～30個使用される。

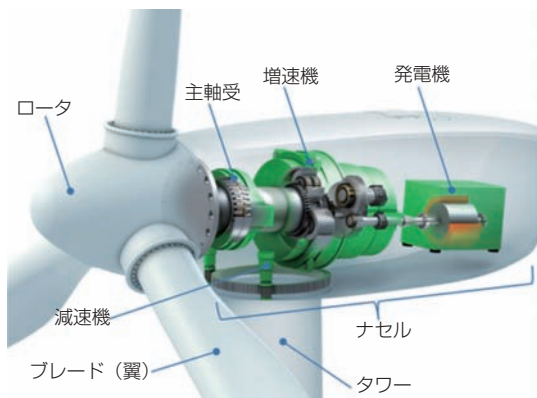


図2 風力発電装置の構造
Internal structure of wind turbine

2.2 主軸受の種類

ロータ軸を支持する主軸受は大型化の一途を辿ってきたが、洋上風力発電装置では一般産業機械でも経験が少ない外径2mを超える大型サイズの軸受を使用する。その軸受形式も発電容量によって変化する。発電容量が2MW程度の風力発電装置では、高負荷容量で取付誤差に対する許容能力に優れた自動調心ころ軸受が多く使用されている。

一方、2MW以上の機種では、風力発電装置の構造や発電方式がメーカー毎にさまざまであるため、使用される軸受形式も単列円すいころ軸受の背面組合せや、急こう配複列円すいころ軸受、円筒ころ軸受と複列円すいころ軸受の組合せなど多岐にわたる。5MW以上の洋上機種では、接触角をもち、モーメント荷重の負荷に有利な円すいころ軸受が主流になりつつある。

図3に発電容量と主軸受の軸受形式の関係を示す。

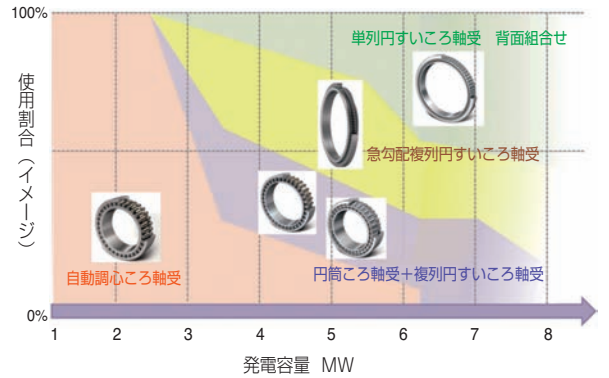


図3 風力発電装置の発電容量と主軸受形式の関係)
Relationship between generation capacity and type of main shaft bearings

3. 破損事例と対策

3.1 市場の技術課題

前述のとおり、風力発電装置用軸受には高い信頼性が要求されるが、軸受の計算寿命より短時間で主軸受が破損する場合があります。特に現在主流となっている発電容量2MW程度の風力発電装置の主軸受に多く使用される自動調心ころ軸受の長寿命化の要求がある。

風力発電装置の主軸受はロータやブレードなどの重量が垂直方向に作用するラジアル荷重に加えて、風荷重が水平一方向に作用するアキシアル荷重を受けるため、主流のアップウインド型^{※1}風力発電装置では、フロント列（ブレードに近い側）に比べてリア列（ブレードから遠い側）により大きな荷重が作用する（図4）。

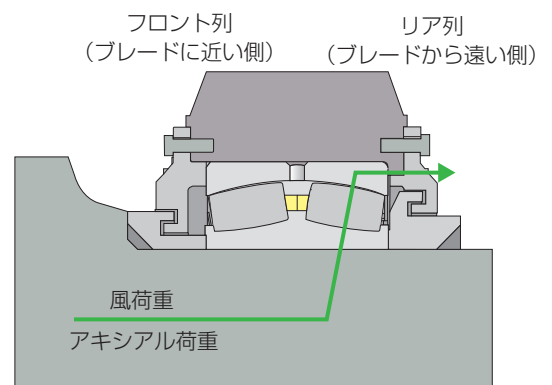


図4 主軸受に使用される自動調心ころ軸受の荷重負荷状態
Loading condition of SRB for main shaft bearings

※1 アップウインド型：風を受けるロータが風上側に位置する風力発電装置。

また、自動調心ころ軸受特有の転がりすべり※² (図5) と潤滑不足 (油膜切れ) による軌道面とここの金属接触により、 PV 値※³の高い箇所から軌道面の二山摩耗が進行する。これにより、摩耗の発生しない純転がり部に応力集中が起こり、特に大きな荷重が作用する外輪のリア列にはく離や割れが発生することがある (図6, 図7 (a)~(c))。回転する内輪は、軌道面全周に均一に荷重が負荷されるが、外輪はハウジングに固定されるため荷重負荷域が特定の範囲に集中し繰り返し負荷されることで、損傷が発生する。

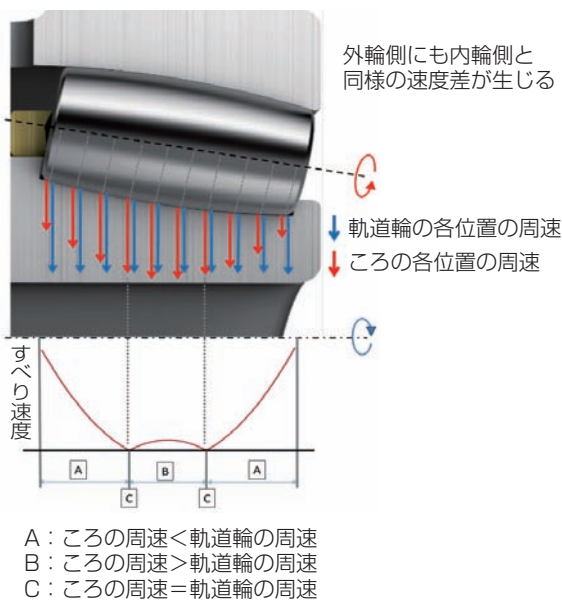
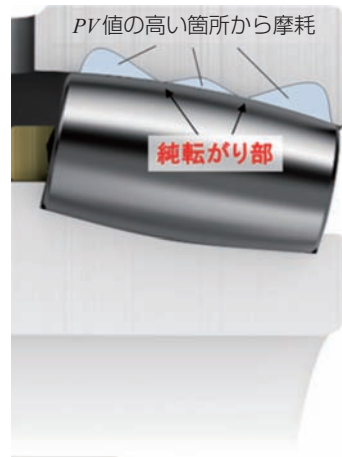


図5 自動調心ころ軸受の転がりすべりの概略図
Image of rolling and sliding in SRB



図6 純転がり位置でののはく離
Flaking on non-slip line



(a) 摩耗発生箇所
Area of wear occurrence



(b) 応力集中発生箇所
Area of stress concentration occurrence



(c) はく離発生箇所
Area of flaking occurrence

図7 二山摩耗破損のメカニズム
Mechanism of flaking on non-slip line

※² 転がりすべり：ころと軌道輪の間に生じる回転方向の速度差に起因するすべり。

※³ PV 値：接触面圧(P)と転がりすべり速度(V)の積。

3.2 非対称設計による対策

このような損傷への対策としてNTNが開発した「左右列非対称自動調心ころ軸受」(以下、開発品)は、こうした風力発電装置特有の条件で使用するため、ころの設計を見直し、寿命と耐摩耗性を向上させた。具体的には開発品の接触角を従来品に対し、フロント列は小さく、リア列は大きくし、ころの長さはフロント列よりリア列を長くすることで、風によるアキシャル荷重をリア列で効率よく受け、ラジアル荷重をフロント列で積極的に受ける設計とした。これにより、フロント列、リア列のころで荷重を適切に分担することができる(図8)。(3) 4)

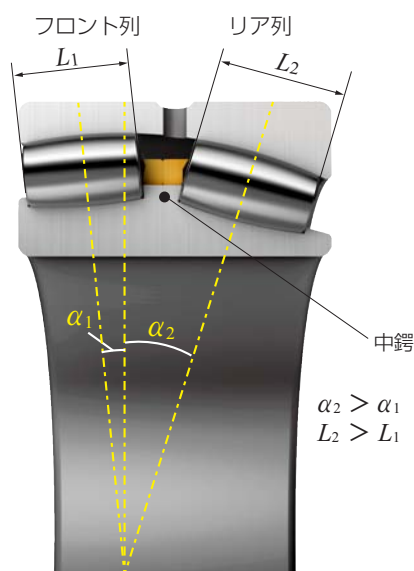


図8 開発品の断面図
Cross section of Asymmetrical SRB

本開発品は従来品と同じ主要寸法で設計可能で、既存の風力発電装置で使用中の従来品に対して置き換えることで、長寿命化と早期破損の抑制をもたらし、メンテナンスコストの削減にも寄与する。本開発品は風力発電装置主軸受特有の使用条件で、計算寿命が約2.5倍、摩耗に影響する指標であるPV値の約30%低減を実現した(図9、図10)。

さらに、本開発品は従来品と同等の寿命を持つ主軸受を内径約10%減、質量約30%減で設計可能である。例えば、従来品240/600B(φ600×φ870×幅272)と開発品240/530B(φ530×φ780×幅250)の寿命は同等である。風力発電装置の新規設計時に本開発品を採用することで、従来品に対し軸受

のダウンサイジングが可能となり、風力発電装置全体のコンパクト化・軽量化に寄与する(図11)。

また、本開発品は内輪に中鏢を有し、ころの姿勢を内輪軌道面、外輪軌道面、内輪中鏢面の3点で支持する(図8)。これによりころのスキュー*4を防止し、軌道輪ところの間のすべりを抑制する。

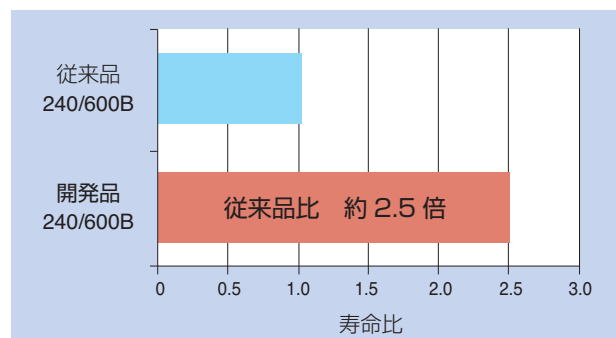


図9 従来品と開発品の計算寿命の比較
Comparison result of calculation life of conventional SRB and asymmetrical SRB

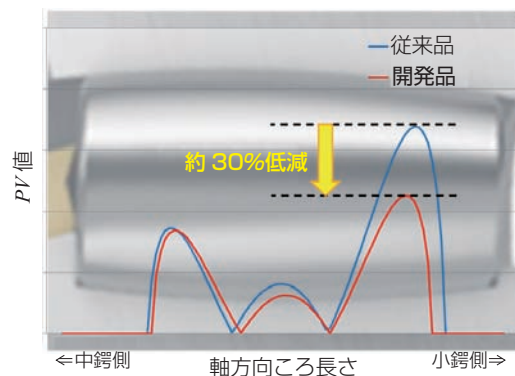


図10 従来品と開発品のPV値の比較(リア列)
Comparison result of PV value on rear side row of conventional SRB and asymmetrical SRB

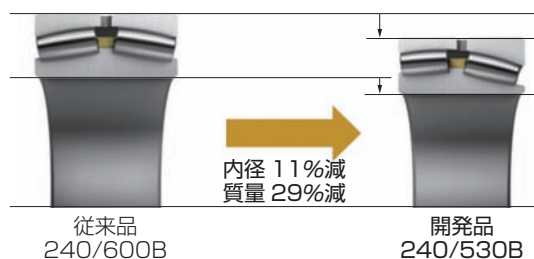


図11 設計例(ダウンサイジング)
Example of design for down sizing

*4 スキュー：ころ軸受において、ころが正規の自転軸に対して傾くこと。

4. 実機サイズ軸受による評価

図12, 表1に試験機および試験条件を示す。負荷荷重は、実際の風力発電装置の軸受荷重を平均化したラジアル荷重とアキシアル荷重の組合せとした。実機で発生し得る回転数を含む3水準で運転温度を測定し評価した。

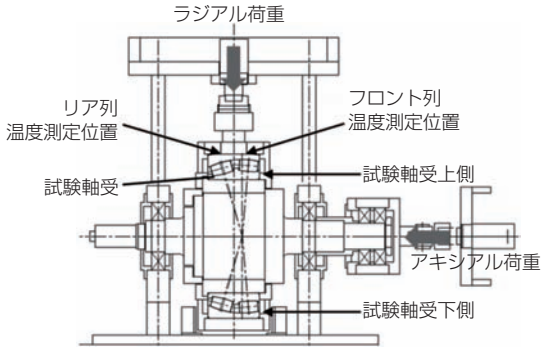


図12 実機サイズ軸受試験の試験機
Testing machine for actual size bearings test

図13に試験結果および各軸受の転動体荷重分布の計算結果を示す。試験結果を比較すると、開発品のリア列の温度上昇は従来品と比較して2~3℃低くなっており、フロント列とリア列の温度差も小さくなっている。この結果から開発品は転動体荷重分布の計算結果が示すとおり、風力発電装置の平均的な荷重条件下において、従来品よりも左右列で効率的に荷重を分担しているといえる。

表1 実機サイズ軸受試験の試験条件
Test condition of actual size bearing test

試験軸受	従来品	開発品
軸受サイズ (mm)	内径600×外径870×幅272	
軸受設計	標準設計	非対称設計
回転数 (min ⁻¹)	10, 30, 50 (ステップアップ)	
試験時間 (h)	各回転数 32	
負荷荷重 (kN)	ラジアル	392 (0.06C _r)
	アキシアル	115

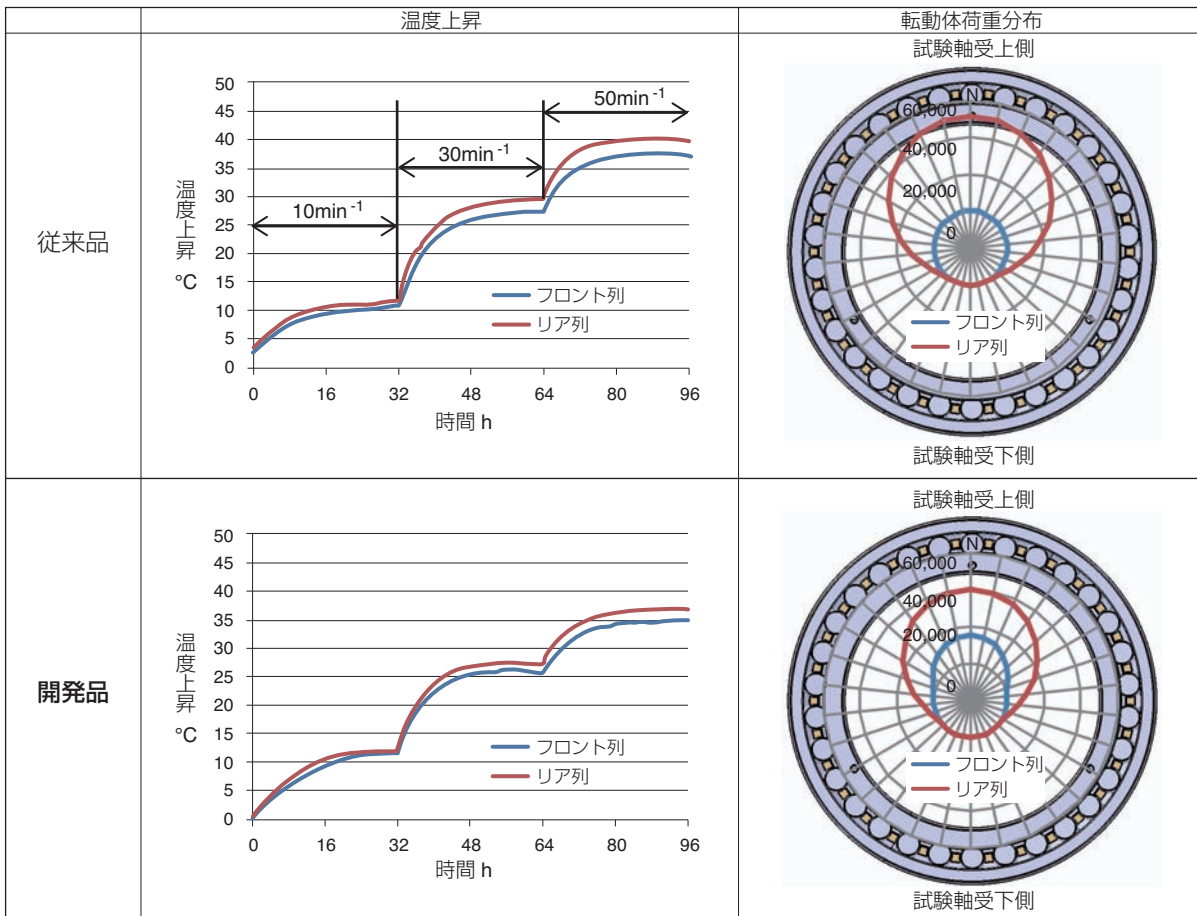


図13 実機サイズ軸受の試験結果, 転動体荷重分布計算結果
Test result and calculation result of load duration distribution with actual size bearings

5. まとめ

風力発電装置の主軸受に使用される自動調心ころ軸受では、風荷重による一方向のアキシャル荷重がリア列により作用することに加え、当該軸受特有の転がりすべりと潤滑不足により、リア列の外輪軌道面に摩耗が生じ、はく離や割れが発生することがある。

NTNはこの対策として左右列でころの長さや接触角が異なる風力発電装置主軸用「左右列非対称自動調心ころ軸受」を開発した。以下に開発品の特徴を示す。

- ・左右列のころの長さや接触角が異なる非対称設計
- ・計算寿命が2.5倍に向上（従来品比）*
- ・PV値が30%低減（従来品比）により、耐摩耗特性が向上*
- ・従来品と同等寿命の主軸受を内径約10%減、質量約30%減で設計可能

*当社が算出した風力発電装置主軸受に作用する平均的な疲労荷重条件にて算出。

参考文献

- 1) GWEC, GLOBAL WIND STATISTIC 2017, (2018年2月), 3頁.
- 2) 堀 径生, 伊藤 夏海, 静内 誠, 高橋 亨, 風力発電装置の軸受技術動向, 日本風力エネルギー学会40周年記念号, 通巻123号 (2017年11月), 454頁.
- 3) 瀬古 一将, NTN新商品, 風力発電装置主軸用「左右列非対称自動調心ころ軸受」の紹介, クリーンエネルギー, 通巻307号, (2018年2月), 67頁.
- 4) 瀬古 一将, 風力発電装置主軸用「左右列非対称自動調心ころ軸受」の開発, 月刊トライボロジー, No.368, (2018年4月), 16頁.

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

系統連系用NTNマイクロ水車 Grid Connectable NTN Micro Hydro Turbine



伊藤 隆志* Takashi ITOU
木村 寛太* kanta KIMURA
金村 泰成* Yasunari KANAMURA

地球温暖化やエネルギーミックスへの関心の高まりから、水力発電などの再生可能エネルギーの需要が急速に高まっている。NTNは、既存の農業用水路や工業用水路に設置して発電した電力をバッテリーに充電し、電力系統が敷設されていない場所での電力利用を可能にするNTNマイクロ水車を商品化している。今回新たに電力系統に連系して、発電した電力を売電可能な「系統連系用NTNマイクロ水車」を開発した。本稿では、開発品の特長や構造について紹介する。

Demand of renewable energy such as hydroelectric power generation is increasing rapidly from rise of global warming and the interest to the energy mix. NTN already commercialized the NTN Micro hydro Turbine which is used in existing agricultural canal and industrial canal and makes electric power available in the place where the no power system exists. NTN develops Grid Connectable NTN Micro hydro Turbine. This paper introduces the features and the structure of the developed products .

1. はじめに

持続可能な社会を実現するため、エネルギー問題は世界規模で取り組むべき課題である。主な取組みとして、昨今の気候変動に関わる温室効果ガス排出の抑制および脱化石燃料化に向けた省エネルギー化、あるいは再生可能エネルギーの利用推進によるエネルギーの多様化が進められている。図1に東日本大震災前の電源構成の実績と2030年度の想定を示す。特に、再生可能エネルギーは東日本大震災前の実績と比較して2倍以上高く想定されており、今後の成長が期待されている¹⁾。

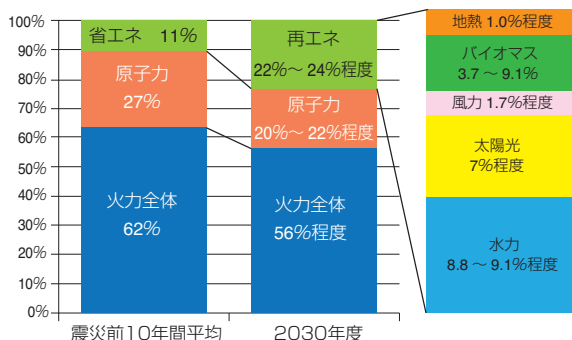


図1 2030年度想定電源構成
The power supply construction in FY2030

自然災害などの非常時における電源確保も大きな課題である。非常用電源として予備発電機の設置が行われているが、燃料の備蓄などの課題がある。再生可能エネルギーは燃料の備蓄が不要で、非常用電源への活用が期待されている。NTNは、太陽光発電と風力発電の発電電力をバッテリーに充電し、夜間の照明や非常用電源として活用可能なグリーンパワーステーションを商品化している。

水力発電は、太陽光発電や風力発電と比較して発電量の変動が小さく安定して電力を供給することが可能である。NTNは、水路を流れる水の速度エネルギーを利用した流水式の小水力発電装置、「NTNマイクロ水車」を開発し商品化している²⁾。NTNマイクロ水車は、発電した電力をバッテリーに充電して、電力インフラが整備されていない場所での電力供給や災害時の非常用電源などに利用する自家消費を想定した独立電源タイプである。

一方、日本では再生可能エネルギーの普及を図るため、2012年7月より電力固定価格買取制度（以下、FIT）が開始された。FITとは、再生可能エネルギーで発電した電力を電力会社が一定の価格で買い取ることを義務付けた制度である。この制度の導入により投資

回収が容易になるため、同じ再生可能エネルギーである太陽光発電は導入量が大きく伸びている。

NTNが行った市場調査では、水力発電に対する需要は、FITを利用して売電が可能な系統連系タイプのものが多いことがわかった。また、表1に示すように200kW未満の水力発電の買取価格は2020年度まで34円/kWhと、200kW以上より優遇されているため、今後200kW未満の水力発電の普及が進むと考えられる³⁾。

本稿では、発電した電力の売電が可能な「系統連系用NTNマイクロ水車」を開発したので、その構造や特長について紹介する。

表1 水力発電の買取価格(1kWh当たり)
FIT price of hydro turbine

	1,000kW以上 5,000kW未満	200kW以上 1,000kW未満	200kW未満
2017年度 2018年度 2019年度 2020年度	24円+税	29円+税	34円+税
買取期間	20年間		

2. 系統連系とは

系統連系とは、図2に示すように太陽光発電や水力発電などの発電設備を電力会社の送電線または配電線（電力系統）に接続することである。発電設備を系統連系することで、発電した電力を電力会社に売電することが可能になる。

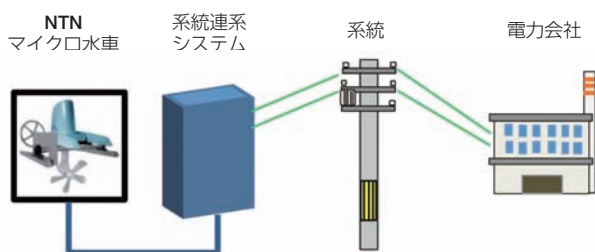


図2 系統連系のイメージ
Image of grid connection

3. 系統連系用NTNマイクロ水車の構成

NTNマイクロ水車の外観を図3に、仕様を表2に、系統連系用NTNマイクロ水車の構成を図4に示す。

NTNマイクロ水車が発電した交流電力は、コントローラにより直流電力に変換され、その後パワーコンディショナに入力される。

パワーコンディショナは、直流電力を交流電力に変換して電力系統に送電する機器である。このコントローラとパワーコンディショナを合せて系統連系システムと呼び、NTNマイクロ水車が発電した電力を安全に効率よく系統に送電し、売電を可能にする。



図3 NTNマイクロ水車
NTN Micro Hydro Turbine

表2 NTNマイクロ水車仕様
Specification of NTN Micro Hydro Turbine

水車翼径 mm	出力 kW	定格流速 m/s	推奨水路 mm 以上
600	0.4	2	幅 : 700 水深 : 700
900	1.0	2	幅 : 1,000 水深 : 1,000
1,300	2.0	2	幅 : 1,400 水深 : 1,400

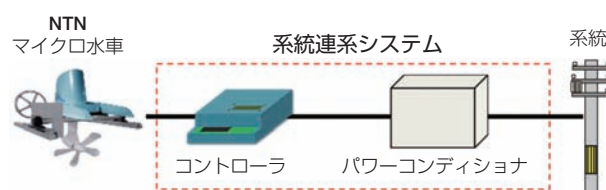


図4 系統連系用NTNマイクロ水車の構成
System configuration of Grid Connectable
NTN Micro Hydro Turbine

4. 系統連系システム構成機器の機能

(1) コントローラ

コントローラは、発電機が発電した電力を整流する整流回路部と、系統連系用NTNマイクロ水車の制御を行う制御回路部から構成される。コントローラは以下の機能を有している。

- ①発電機が発電した交流電力を直流電力に変換（整流）し、パワーコンディショナに入力する。
- ②発電機の発電電力や回転速度を監視する。
- ③水車翼に巻き込まれた異物を水流により押し流すための水車翼の回転速度制御を行う²⁾。

(2) パワーコンディショナ

コントローラにより変換された直流電力を電力系統に送電可能な交流電力に変換し、電力系統へ送電する機器である。系統連系用NTNマイクロ水車の系統連系システムでは、発電電力を最大化する制御は最大電力点追従制御（Maximum Power Point Tracking、以下、MPPT）を採用している。

5. 系統連系用NTNマイクロ水車の発電電力制御について

MPPTは発電電力を自動で最大化する制御である。

水力発電の発電電力制御にMPPTを適用することで、発電電力を常時測定しながら発電機の負荷を変えて水車翼の回転速度を変化させ、最大の発電電力が得られる水車翼の回転速度に制御する。系統連系用NTNマイクロ水車は発電電力0.4kW、1kW、2kW用があり、MPPTの標準搭載は発電電力2kW以下の小水力発電装置では業界初である。系統連系用NTNマイクロ水車に搭載したMPPTは以下の利点がある。

- ・事前に設置する水路の水路幅、水位、流速を測定してコントローラを調整する作業が不要となり、設置工数・費用を大幅に削減できる。
- ・水路の水位や流速が変化しても最大電力で発電できる。

MPPTの制御手順を以下に示す（図5）。

- ①水車翼の回転速度をN1からN2に下げて発電電力をP1からP2に増加させる。
- ②水車翼の回転速度をN2からN3に下げて発電電力をP2からP3に増加させる。

- ③水車翼の回転速度がN3からN4に下がると発電電力がP3からP4になる。
 - ④発電電力がP4に減少したため、回転速度を上げてN3に戻す。
 - ⑤水車翼の回転速度がN3からN2に上がると発電電力がP3からP2になる。
 - ⑥発電電力がP2に減少したため、水車翼の回転速度を下げN3に戻す。
- この制御を繰り返し、発電出力を最大化する。

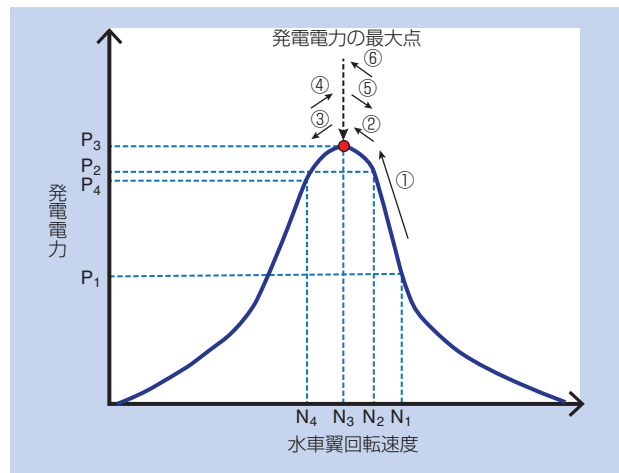


図5 MPPTの制御手順
Control Method of MPPT

しかしながらMPPTを水力発電制御に適用する場合、以下により最大の発電電力が得られないことがあった。

水路の流速、流量が短時間に大きく変化し、MPPTの最大電力点から大きく外れた場合、制御が追従せず、発電機の負荷が上昇し続け、水流から発生する水車翼トルクが不足し、水車翼回転速度が低下する場合がある。この現象は、図6に示す水車翼回転速度-水車翼トルク特性で、通常は①にある作動条件が①→②のようにストール領域に移動した場合に発生し、水車翼回転速度および水車翼トルクが低下して、最大発電電力が得られなくなる。

系統連系用NTNマイクロ水車は、最大発電電力が得られるよう水車翼回転速度と発電電力を常時比較し、ストール領域に移動しないよう制御する。

また、ストール領域に陥った場合でもこれを判定し、MPPTが最大電力点に復帰する制御を組み込むことで、これらの問題を解決した。

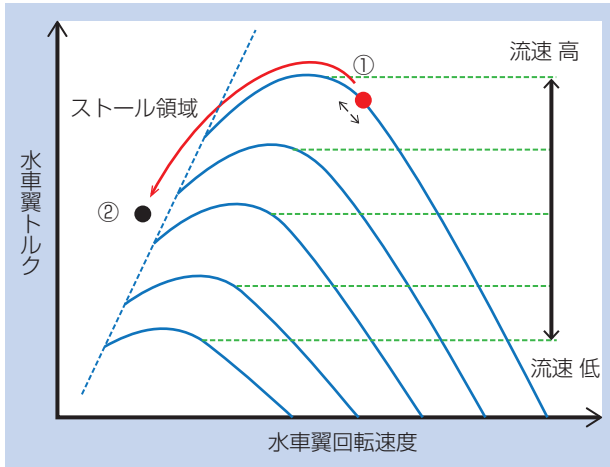


図6 水車翼回転速度-トルク特性例
Rotation speed of propeller vs torque characteristic diagram

6. 実水路での実証試験

開発した系統連系システムの実証試験を行い、性能評価を行った。実証試験の状況を図7に、実証試験条件を表3に示す。実証試験では、パワーコンディショナのMPPTによる最大発電電力の追従性能を検証した。なお、実証試験に使用した水路は水深が十分でなく、水車翼の一部が水面から出ている状態であった。

まず、実証試験対象水路の発電電力の最大値を確認するため、図8(a)に示すように、コントローラ出力に電子負荷を接続し、発電機の発電電圧(水車翼の回



図7 実証試験
Field test

表3 実証試験条件
Test condition

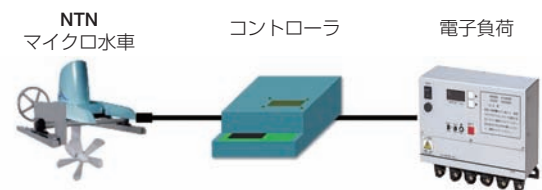
項目	条件
水車翼径	φ900
水深	670 mm
実証試験時流速	2.0 m/s

転速度に比例)を変化させ、発電電力の推移を測定した。その測定結果を図9に示す。発電電力は最大749Wであった。

次に、図8(b)に示すように、パワーコンディショナを接続し測定した。この実証試験では模擬電源負荷を使用し、系統に接続した状況を再現した。

発電電力を測定した結果を図10に示す。発電電力は平均738Wとなり、最大発電電力を良好に追従している。

(a) 電子負荷接続時



(b) パワーコンディショナ接続時

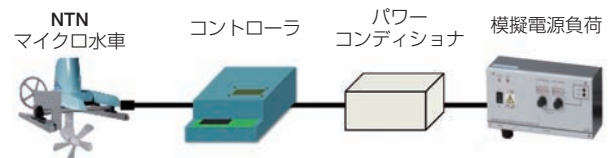


図8 実証試験の構成図
Test lig layout of field test

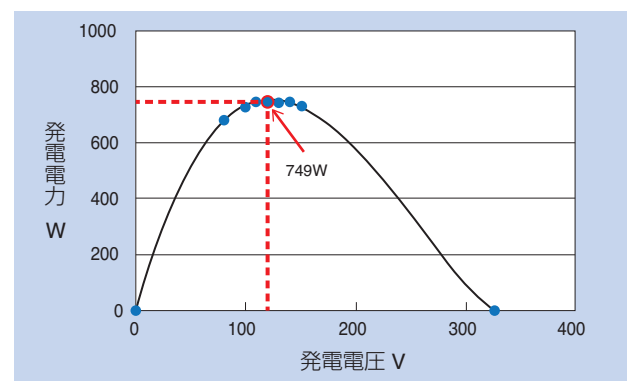


図9 電子負荷接続時の最大発電電力の測定結果
Result of field test

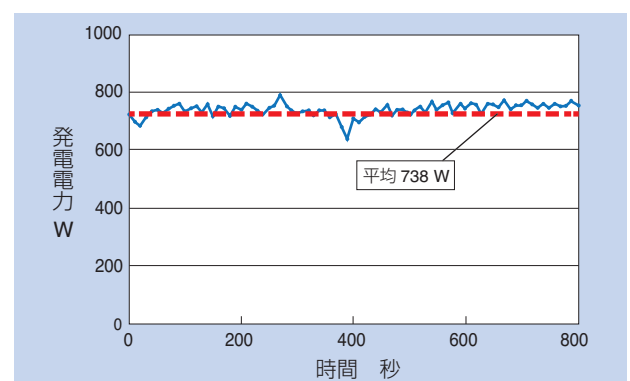


図10 パワーコンディショナ接続時の発電電力の測定結果
Result of field test

7. 簡単操作機構「イージーリフト」

台風などの増水時に水路に流れる流木やゴミなどにより水車本体が損傷を受けるのを防ぐ必要がある。予め水車翼を水面より上方へ引き上げることができれば、より安全な稼働が可能である。NTNマイクロ水車は、これらの緊急時に一時的に水車翼を水流から引き上げる機構「イージーリフト」を装備可能である。

また、本機構により定期的な保守の際にもクレーンなどの大掛かりな設備が不要で、安全かつ容易に引上げ、引下げができるので、保守点検作業の短縮と費用の削減が可能となる。図11にNTNマイクロ水車の通常稼働時、図12に引上げ時の状態を示す。

「イージーリフト」の操作方法は、回転軸に固定された水車本体をNTNベアリングユニットで回転可能に支持し、操作レバーで手動操作するレバー式（図13）と、電動モータが装着可能なウォームギヤ式（図14）がある。

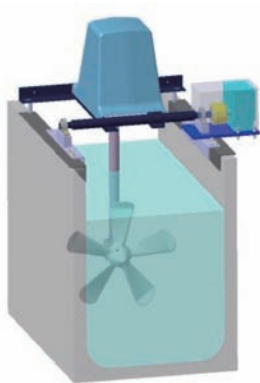


図11 通常稼働状態
Normal operation

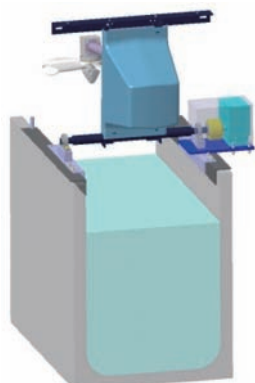


図12 水車翼引上げ状態
After lifting up blade unit

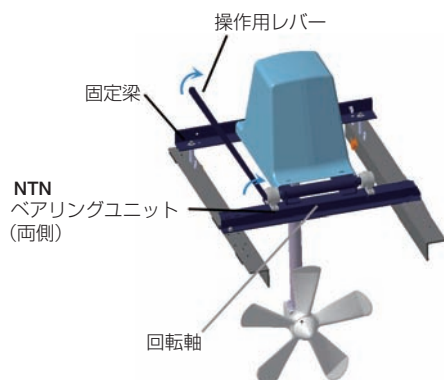


図13 レバー式
Lever type

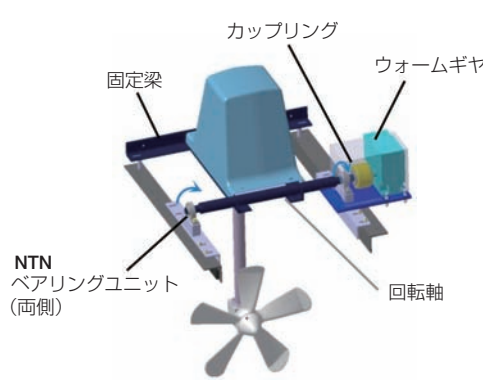


図14 ウォームギヤ式
Worm gear type

8. おわりに

本稿では、NTNマイクロ水車で発電した電力を売電することを可能にする「系統連系用NTNマイクロ水車」の機能や特長、NTN独自の高効率な系統連系システムのコントローラやパワーコンディショナの構成や性能および一時的に水車翼を水流から引き上げ、引き下げることが可能な機構「イージーリフト」について紹介した。

農業用水路などを利用した水力発電の市場はさらなる拡大が期待されるが、投資回収年数の短縮やユーザにとって安全で使いやすい水力発電装置が求められている。今後、小水力発電の利用拡大に向け、さらなる高効率化とニーズの取込みを図っていく。

またNTNは、エネルギー供給源の多様化と持続可能な社会の実現に貢献していくため、太陽光発電、風力発電を含めた自然エネルギーを活用した関連商品の拡充にも取り組んでいる。

2016年より販売開始したNTNハイブリッド街路灯⁴⁾は、需要と用途が拡大している。大阪大学が開発した日本最大級の災害救援・防災マップである「災救マップ」アプリと、一般社団法人「全国自治会活動支援ネット」が普及を進めている、みまもりカメラ機能を持つWi-Fiステーション「みまもりロボくんⅢ」の独立電源および駆体としてNTNハイブリッド街路灯が採用されている⁵⁾。「みまもりロボくんⅢ」はLED照明に加え、監視カメラやWi-Fiなどの機器が標準装備され、比較的風況や日照状況が悪い環境においても安定した電源供給が必要であり、このためハイブリッド街路灯を高発電容量化したグリーンパワーステーションとして新たに導入している。

今後もこれらの共同研究や、自然エネルギーを活用した商品の開発と販売を通じて、地域でエネルギーを創出し地域で消費する地産地消型エネルギーの提案を進め、低炭素化社会の実現にも貢献していく。また地方自治体や自治会などへの需要喚起により、地域コミュニティの安全・安心にも貢献していく。

参考文献

- 1) 経済産業省，長期エネルギー需給見通し関連資料。
- 2) 川合智哉，向井浩氣，後藤知美，マイクロ水車，NTN TECHNICAL REVIEW，No.84,(2016) 29。
- 3) 経済産業省ホームページ，なっとく！再生可能エネルギー。
- 4) NTN新製品ニュース，静粛性の高いハイブリッド街路灯の販売開始，https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news201600058.html
- 5) NTN新製品ニュース，産官社学連携による「ITを用いた防災・見守り・観光に関する共同研究」に参画 <https://www.ntn.co.jp/japan/news/press/news201700086.html>

執筆者近影



伊藤 隆志

自然エネルギー商品事業部
技術部



木村 寛太

自然エネルギー商品事業部
技術部



金村 泰成

自然エネルギー商品事業部
技術部

受賞案件の紹介

2017年“超”モノづくり部品大賞 自動車部品賞受賞

自動車用ULTAGE^{※1} (アルテージ)円すいころ軸受
ULTAGE^{※1} Tapered Roller Bearing for Automotive Application

川井 崇
Takashi KAWAI

藤掛 泰人
Yasuhiro FUJIKAKE

石川 貴則
Takanori ISHIKAWA

宮入 進
Susumu MIYAIRI

1. はじめに

世界最高水準の高負荷容量と高速回転性能を実現した「自動車用アルテージ円すいころ軸受¹⁾」が、モノづくり日本会議・日刊工業新聞社主催の2017年“超”モノづくり部品大賞自動車部品賞を受賞した。

理論に基づき軸受の最大寿命を得るために「軸受内部設計の新たな最適化設計技術」を構築し「独自のころ加工技術」を確立した点が独創的技術として評価された。

(3) 世界最高水準の高速回転性能

許容回転速度 約10%向上

(4) 許容傾き角 (ミスアライメント量)

許容傾き角 最大で4倍

軌道面軸方向断面での接触面圧分布の計算例を図2に示す。自動車用アルテージ円すいころ軸受では、特殊クラウニングの適用により、接触領域端部の過大な圧力 (エッジロード) を抑えつつ、接触面圧分布全体が最小化されることから、軸受寿命の向上に繋がる。

2. 構造

自動車用アルテージ円すいころ軸受の概略構造を図1に示す。

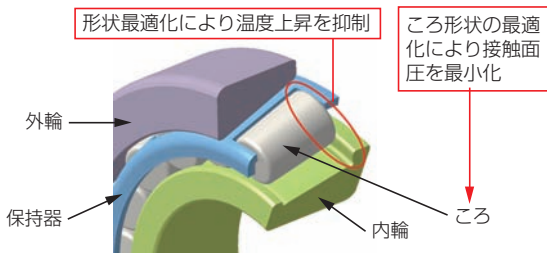


図1 自動車用アルテージ円すいころ軸受の構造
Structure of ULTAGE Tapered Roller Bearing for Automotive Application

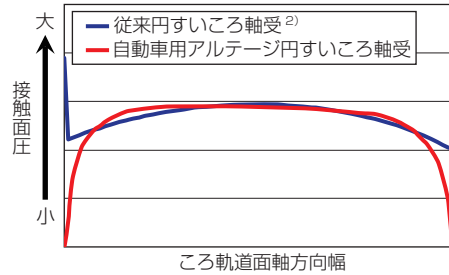


図2 軌道面に生じる面圧分布
Contact stress distribution on raceway

3. 特長

従来円すいころ軸受²⁾との比較による自動車用アルテージ円すいころ軸受の特長を以下に示す。

(1) 世界最高水準の高負荷容量

基本動定格荷重 1.3倍

(2) 長寿命 (基本定格寿命比)

標準タイプ (軸受鋼, 標準焼入れ) 2.5倍以上

高機能タイプ (FA処理) 3.8倍以上

4. まとめ

自動車用円すいころ軸受では使用条件は益々厳しくなる一方、小形化や長寿命化の要求が高まっている。これら要求に応える自動車用アルテージ円すいころ軸受を自動車の省燃費化に貢献できる商品として幅広く市場に展開していきたい。

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) NTN, 転がり軸受総合カタログ, CAT. No. 2202-VII/J.

執筆者近影



川井 崇
自動車事業本部
自動車軸受技術部



藤掛 泰人
自動車事業本部
自動車軸受技術部



石川 貴則
自動車事業本部
自動車軸受技術部



宮入 進
自動車事業本部
自動車軸受技術部

※1 ULTAGE[®] (アルテージ)とは究極を意味する【Ultimate】とあらゆる場面での活躍を意味する【Stage】を組み合わせた造語で、世界最高水準のNTN新世代軸受のシリーズ総称です。

受賞案件の紹介

日本材料学会 「第51回X線材料強度に関するシンポジウム 最優秀発表賞」 受賞

転がり軸受のピーリング損傷におよぼす残留応力の影響
Effect of Residual Stress on Peeling of Rolling Bearings

嘉村 直哉
Naoya KAMURA

藤田 工
Takumi FUJITA

佐々木 敏彦
Toshihiko SASAKI

1. はじめに

本研究では、ピーリング損傷に至る転動疲労の進行過程を、2次元検出器を有するX線残留応力測定装置を用いて調査し、転動疲労が残留応力、半価幅、残留オーステナイトの変化だけでなく、結晶配向もともなう現象であることを明らかにした^{1),2)}。

この度、日本材料学会主催の「第51回X線材料強度に関するシンポジウム」における本研究に関する発表が、若手研究者を対象として選考される「最優秀発表賞」を受賞した。本報では、その発表内容の概要を紹介する。

2. 概要

転動疲労試験には二円筒試験機を使用し、希薄潤滑条件下で転動疲労させた試験片表面のX線測定を実施した。測定には2次元検出器を有するX線回折環分析装置を使用し、三軸応力解析理論を用いた残留応力測定と残留オーステナイト測定、結晶配向を調査した。試験片にはSUJ2の標準熱処理品と浸炭窒化品を使用し、両者の転動疲労にともなうX線分析値の変化を調べた。図1に実験で得られたX線回折環の例を示す。

結晶配向の進行度を表すパラメータ S/S_0 の変化を図2に示す。浸炭窒化品は標準熱処理品に比べて結晶配向の進行が遅くなることがわかった。これには残留オーステナイトと固溶元素（主に窒素）が影響していると考えられる。

3. 今後の展開

X線分析を用いた転動疲労度の推定は、転がり軸受の破損予知や転動疲労の迅速評価を可能にする重要な技術であり、今後も本研究に継続的に取り組む。

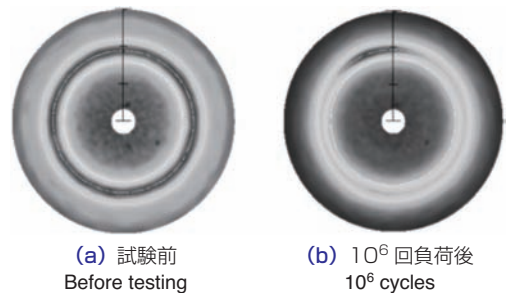


図1 試験前後のX線回折環
Diffraction rings before and after testing

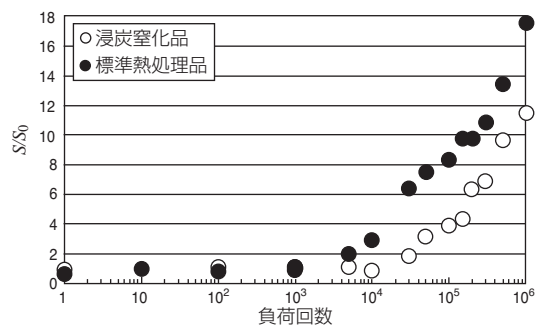


図2 結晶配向の進行度 S/S_0 と負荷回数の関係
Relationships between progress of crystal orientation S/S_0 and the number of loading cycles

S_0 : 試験前の回折環の強度分布の標準偏差
Standard deviation of intensity distribution of diffraction ring before testing.
 S : 各負荷回数での回折環の強度分布の標準偏差
Standard deviation of intensity distribution of diffraction ring while testing.

参考文献

- 1) 嘉村 直哉, 藤田 工, 佐々木 敏彦: 転がり軸受のピーリング損傷におよぼす残留応力の影響(第2報), 第51回X線材料強度に関するシンポジウム予稿集, (2017)109-112.
- 2) 嘉村 直哉, 藤田 工, 佐々木 敏彦: X線回折環分析装置による転動疲労の評価, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 83, (2015) 67-74.

執筆者近影



嘉村 直哉
先端技術研究所



藤田 工
先端技術研究所



佐々木 敏彦
金沢大学 人間科学系

2017年度 「日本トライボロジー学会 論文賞」 受賞

低λ条件でのスラスト玉軸受の転動疲労寿命

Rolling Contact Fatigue of Thrust Ball Bearing under Low Lambda Condition

藤田 工
Takumi FUJITA

長谷川 直哉
Naoya HASEGAWA

嘉村 直哉
Naoya KAMURA

佐々木 敏彦
Toshihiko SASAKI

1. はじめに

日本トライボロジー学会の学会誌「トライボロジスト」に投稿した首記論文¹⁾が2017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

希薄潤滑条件（以下、低λ条件）におけるスラスト玉軸受の転動疲労寿命試験の結果に基づいて、低λ条件での転動疲労寿命に影響を与える様々な要因について考察した。具体的には、転動体と軌道輪の表面粗さ、荷重、転動速度を系統的に変えた試験を行い、計算寿命と実寿命の関係性を調査した（図1）。また、計算寿命と実寿命の関係性を、試験前後の表面粗さの変化（以下、なじみ）のデータとはく離形態の調査結果に基づいて検討した²⁾。

その結果、表面起点型のはく離形態が転動体と軌道輪の初期の表面粗さとなじみの状況の違いによって2種類（本論文では、転走跡幅に近い大きさのはく離をフレーキング、数十μmの微小はく離の集合をピーリングと呼んで分類）現れることを見出した。また、運転条件によってなじみの挙動が変わること、はく離形態の違い（図1中のNo.1～9とNo.10～12のはく離形態はそれぞれフレーキングとピーリング）によって転動疲労寿命に及ぼす荷重の影響が異なることを明らかにした。

これらの知見に基づいた「低λ条件での転がり軸受の転動疲労寿命の推定では、運転条件によって変わるなじみも考慮すべき」という本論文の主張は、従来の寿命推定式（ISOおよびJISの寿命推定式）に反映されていない考え方である。本論文の内容をふまえると、今後の低λ条件での転がり軸受の転動疲労寿命推定では、以下が今後の研究課題になると考えられる。

- ①潤滑条件と転動部品の材質によるなじみの推定
- ②なじみを考慮した表面粗さと潤滑油の荷重分担の推定

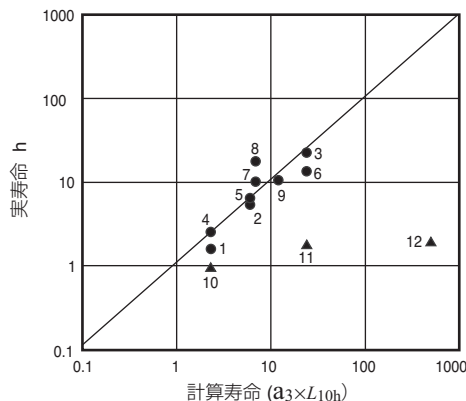


図1 計算寿命 ($a_3 \times L_{10h}$) と実寿命の関係
Correlation diagram between calculated life ($a_3 \times L_{10h}$) and estimated life from experimental results.

- ③②の結果と残留応力を考慮した真実接触部下の内部応力の推定
- ④③の応力と寿命の関係（SN線図）の確立

3. 今後の展開

低λ条件での転がり軸受の寿命推定方法の研究は、機械の高効率化の要請により潤滑油の低粘度化が進む昨今の状況において、転がり軸受の信頼性を決める重要な研究分野である。今後も、本論文で明らかになった本研究分野の課題に継続して取り組み、当社の転がり軸受の信頼性向上につなげる。

参考文献

- 1) 藤田工, 長谷川直哉, 嘉村直哉, 佐々木敏彦: 低ラムダ条件でのスラスト玉軸受の転動疲労寿命, トライボロジスト, 60, 11 (2015) 741-751.
- 2) 藤田工, 長谷川直哉, 嘉村直哉, 佐々木敏彦: 低ラムダ条件でのスラスト玉軸受の転動疲労寿命, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 84, (2016) 85-95.

執筆者近影



藤田 工
先端技術研究所



長谷川 直哉
先端技術研究所



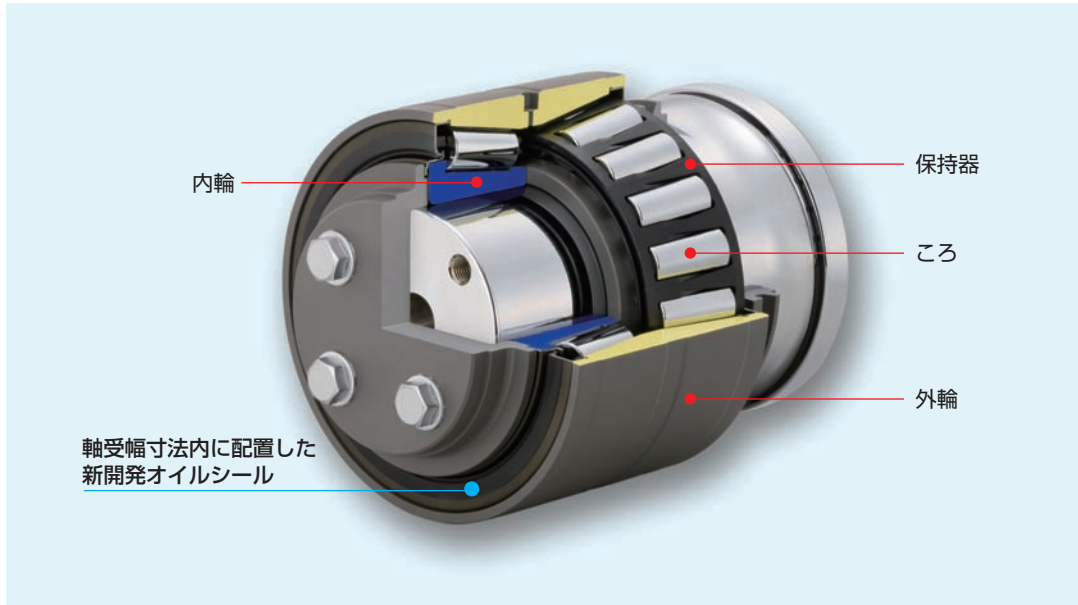
嘉村 直哉
先端技術研究所



佐々木 敏彦
金沢大学 人間科学系

鉄道車両用小型密封式車軸軸受ユニット

車軸軸受ユニットの密封性の確保と軸方向寸法の短縮を実現

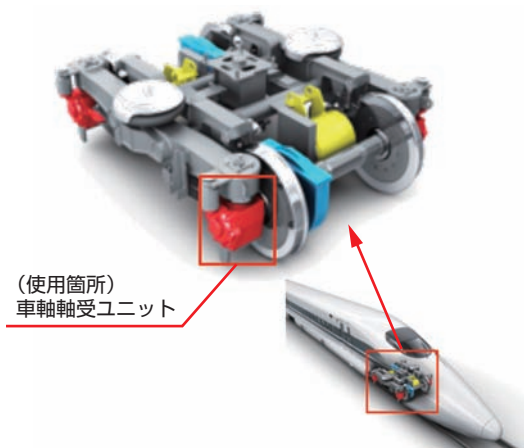


特長

- ① 車軸軸受ユニットの軸方向寸法を約15%短縮，車軸たわみを約30%低減することで，車軸軸受の耐久性向上に貢献
- ② 従来品と同等の定格荷重，高速性，グリース密封性を実現

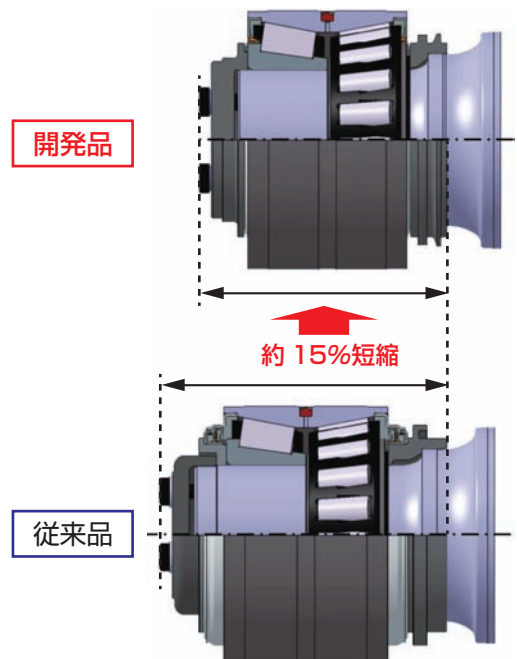
用途

- 鉄道車両用車軸軸受



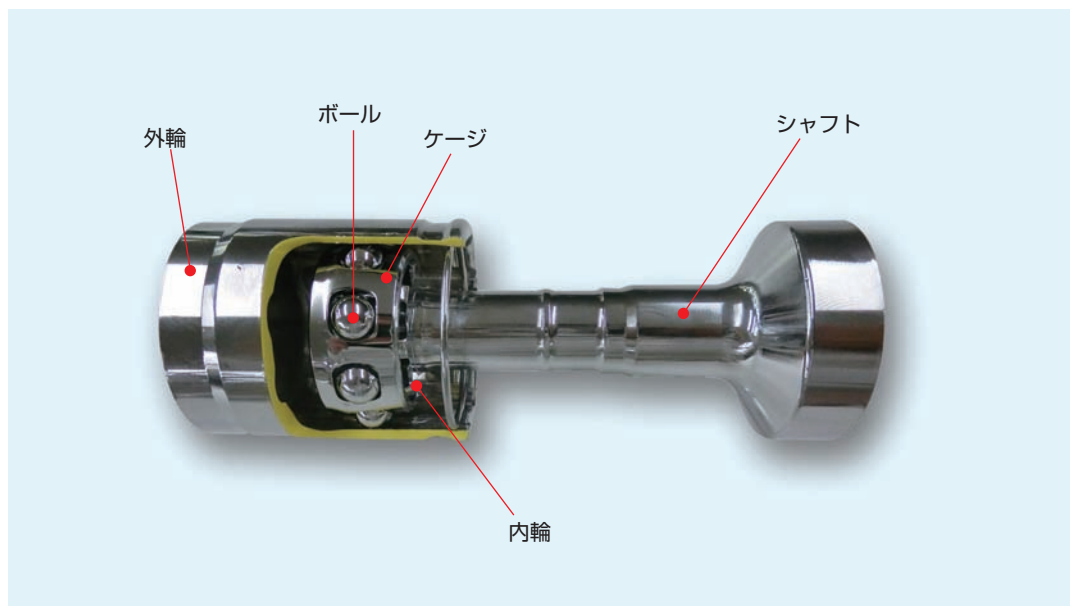
構造

新開発したオイルシールを軸受幅寸法内に配置することで，車軸軸受ユニットの密封性の確保と軸方向寸法の短縮を実現



プロペラシャフト用小型しゅう動式等速ジョイント (HEDJ-P)

小型・軽量化を実現したプロペラシャフト用しゅう動式等速ジョイント



特長

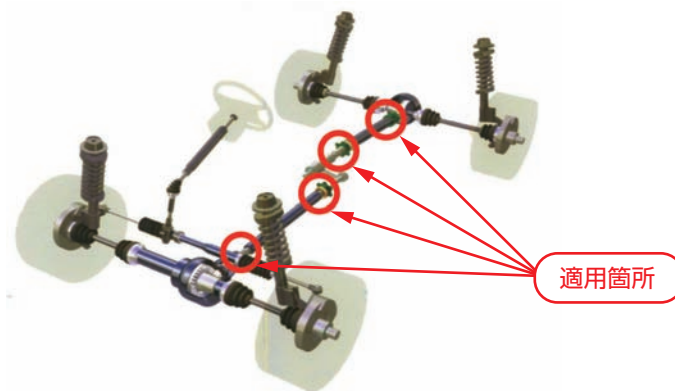
- 質量 : 17%低減 (従来品比)
- 外輪外径 : 6%低減 (従来品比)
- 強度, 耐久性 : 従来品と同等

構造

プロペラシャフト用等速ジョイントの必要機能に絞って軽量コンパクト化を達成

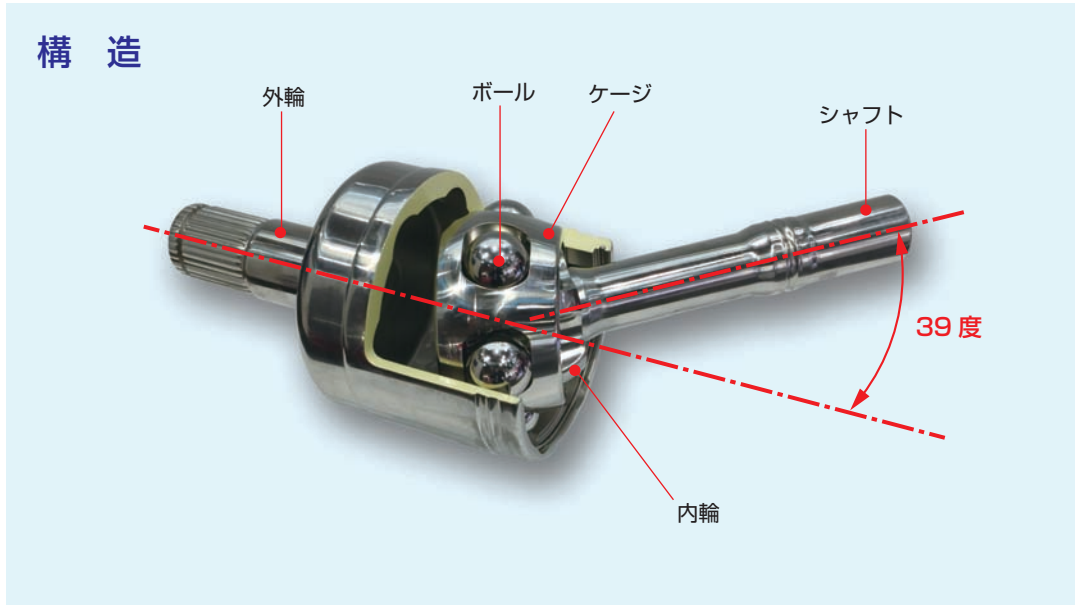
用途

- プロペラシャフト用等速ジョイント



多目的オフロード車両※用超高角DOJ (DOJ-W)

作動角39度を実現したしゅう動式等速ジョイント



特長

- 最大作動角：39度（従来品：30.5度）
- 強度，耐久性：従来品と同等
- 外輪外径：コンパクト設計で外径寸法の増加を8%以下へ

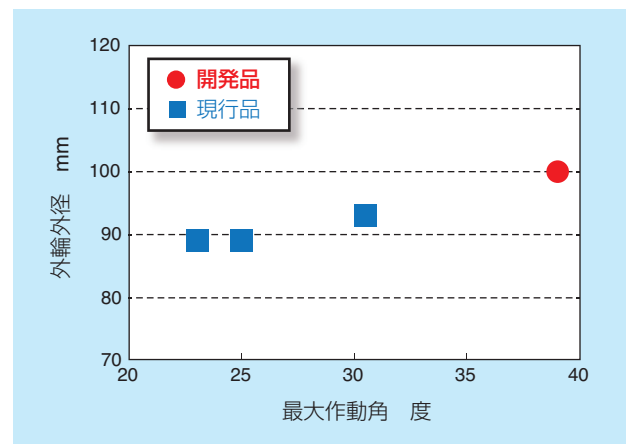
用途

- 多目的オフロード車両用ドライブシャフト等

○ 適用部位



最大作動角と外輪外径



※SSV (Side by Side Vehicle) やUTV (Utility Task Vehicle) あるいはROV (Recreational Off highway Vehicle) と呼ばれ、米国を中心に、業務用からレジャー用まで幅広い用途で人気を博している丸ハンドルタイプの4輪バギー車の総称