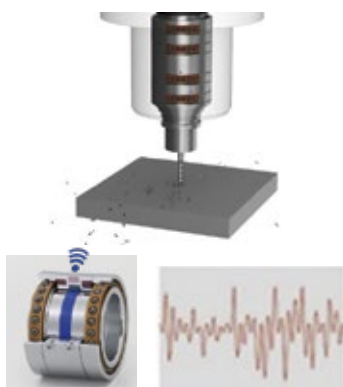


工作機械主軸用センサ内蔵軸受ユニットの開発 Development of Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles



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

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

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

1. はじめに

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

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

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

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

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

2. センサ内蔵軸受ユニットの機能と目的

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

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

* 産業機械事業本部 ロボティクス・センシング技術部

** 商品開発研究所

*** 産業機械事業本部 製品設計部

表 1 センサ内蔵軸受ユニットの機能と目的

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

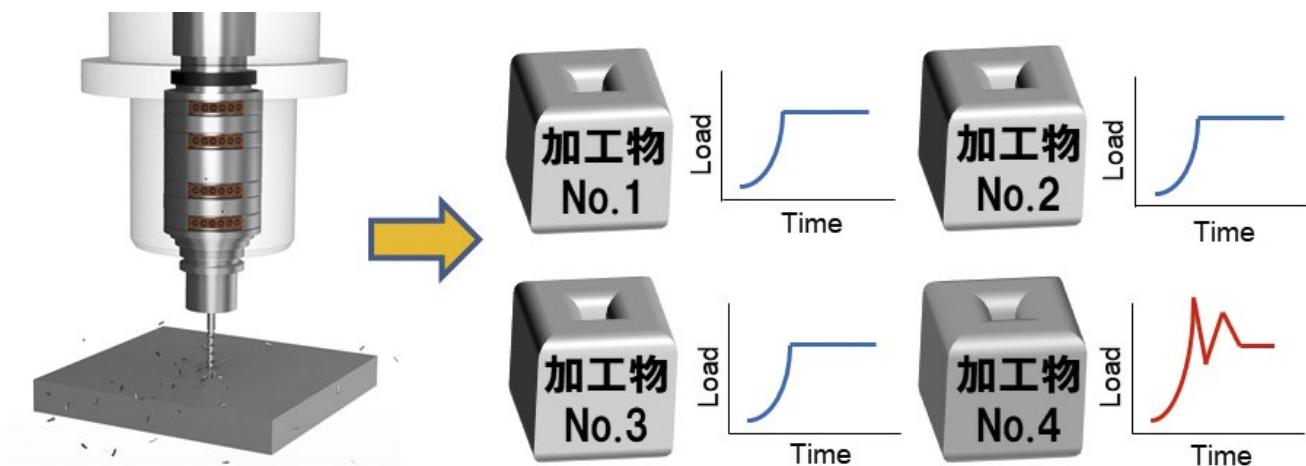


図 1 センサ内蔵軸受ユニットの活用イメージ
工作機械の製品ごとの加工データ紐づけによる加工品質向上の例

3. センサ内蔵軸受ユニットの構造と仕様

3.1 構造

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

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

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

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

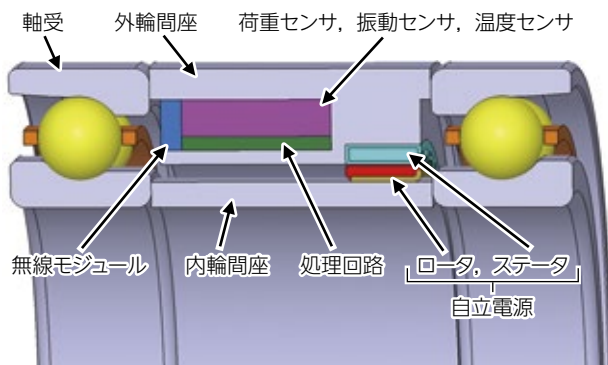


図2 センサ内蔵軸受ユニットの構成イメージ

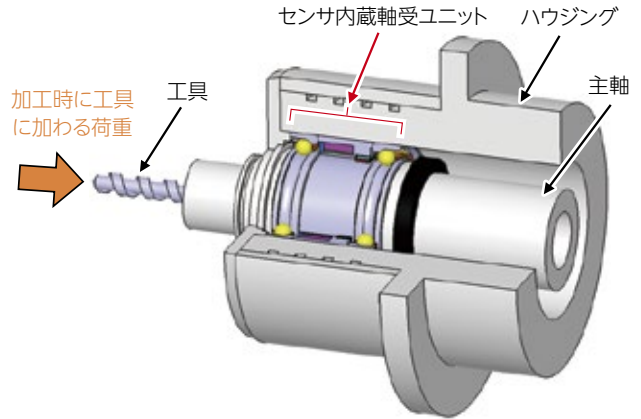


図3 センサ内蔵軸受ユニットの工作機械主軸への適用例

3.2 仕様

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

表2 センサ内蔵軸受ユニットの仕様

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

4. 装置への接続

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

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

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

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

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

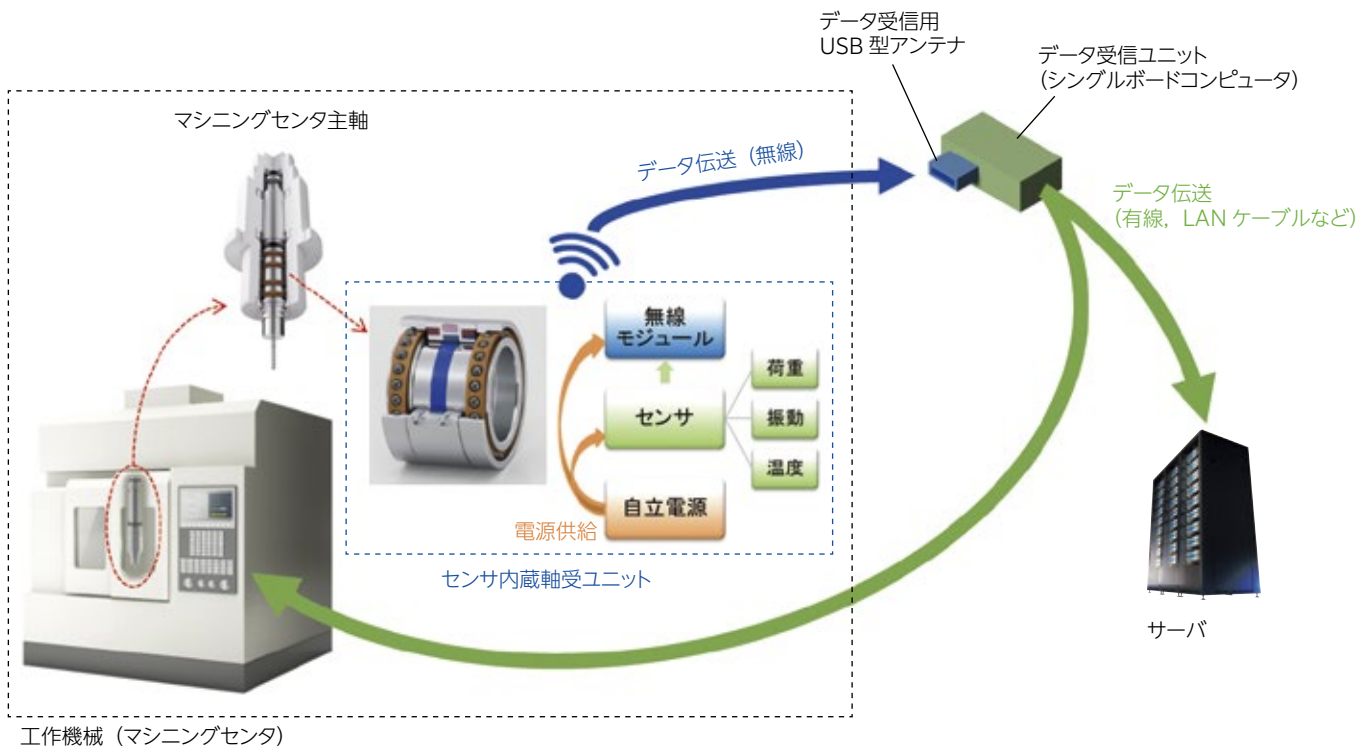


図4 センサ内蔵軸受ユニットの使用例

5. 評価試験

本軸受ユニットに内蔵した荷重、温度、振動センサの試験結果を紹介する。

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

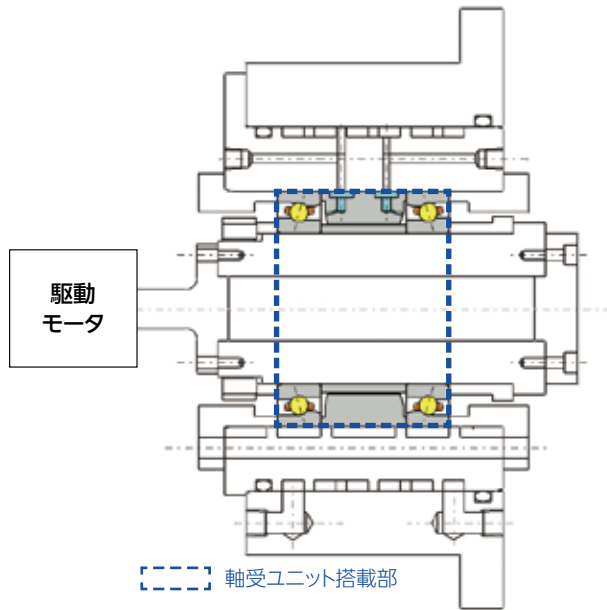


図5 評価主軸の構造

5.1 加減速試験における荷重および温度の応答性検証

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

表3 加減速試験条件

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

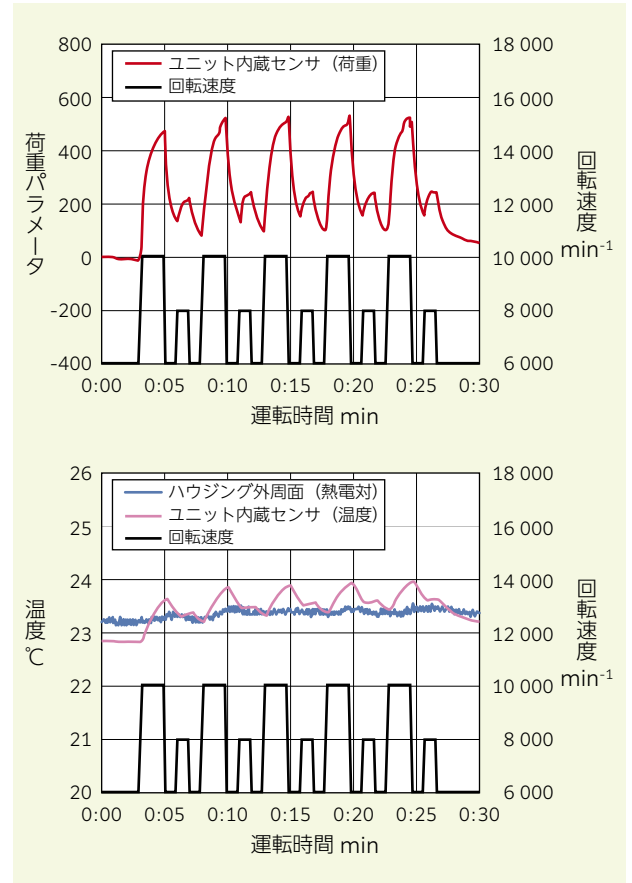


図6 加減速試験結果

5.2 圧こん軸受の振動検証試験

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

表4 振動検証試験条件

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

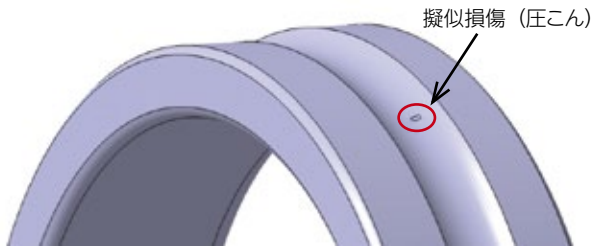


図7 軸受軌道面に形成した擬似損傷(圧こん)の3Dイメージ

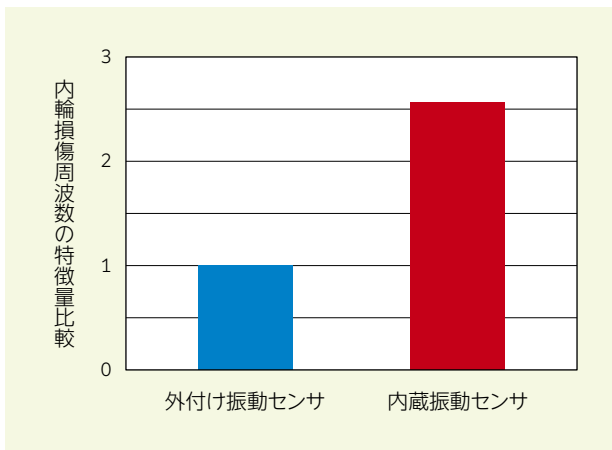


図8 圧こん軸受の振動検証試験結果

6. まとめ

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

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

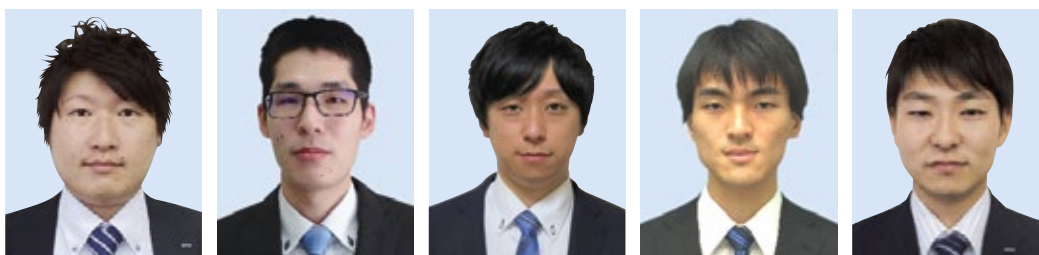
引き続き、本軸受ユニットの運用テストなど実用化に向けた評価を重ね、更なる性能向上と改良を進める。また、本軸受ユニットにAI技術も組み合わせ、より高度な状態監視や予知保全の技術確立にも取り組む。これにより、工作機械の効率的運用を支援する。

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

参考文献

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

執筆者近影



橋爪 翔平
産業機械事業本部
ロボティクス・
センシング技術部

中野 勇大
産業機械事業本部
ロボティクス・
センシング技術部

近藤 大地
商品開発研究所

大口 耀示
商品開発研究所

山本 庸平
産業機械事業本部
製品設計部