

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



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

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

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

## 1. はじめに

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

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

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

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

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

※主要寸法および形式が国際的に標準化された転がり軸受



(a) 風力発電装置用状態監視システム  
「Wind Doctor®」



(b) 工作機械主軸用  
「センサ内蔵軸受ユニット」



(c) ポータブル  
異常検知装置

**図 1** 状態監視の関連商品

\* 商品開発研究所

## 2. 特長および構造

### 2.1 特長

開発品の主な特長を示す。

#### ①高度な状態監視・異常診断

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

#### ②互換性

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

#### ③高い利便性

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

### 2.2 構造

#### 2.2.1 全体構造

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

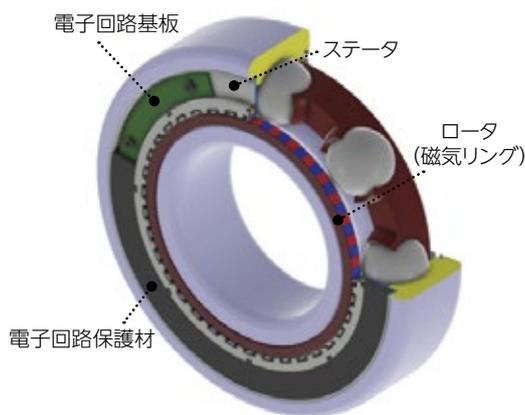


図2 センサ内蔵軸受「しゃべる軸受®」の構造

#### 2.2.2 電子回路

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

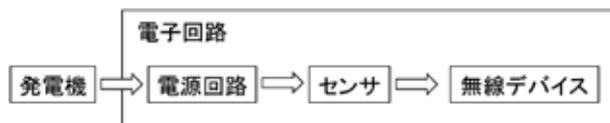


図3 開発品の機能ブロック図

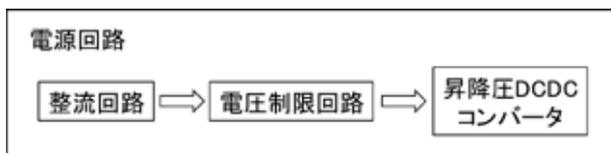


図4 電源回路のブロック図

## 3. 仕様

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

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

表 1 センサ内蔵軸受「しゃべる軸受®」の仕様

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

#### 4. 利用例

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

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

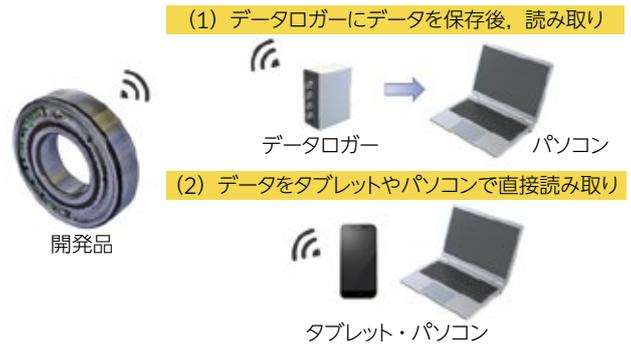


図 5 通信構成例

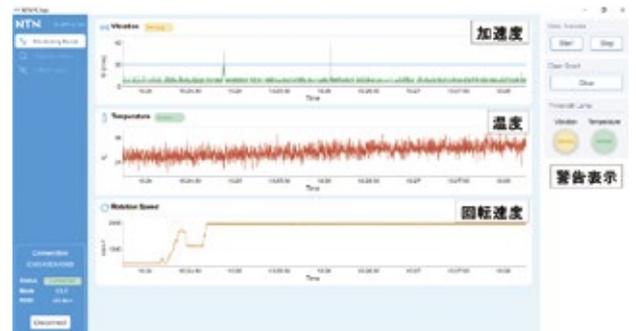


図 6 監視モードのデータ表示例

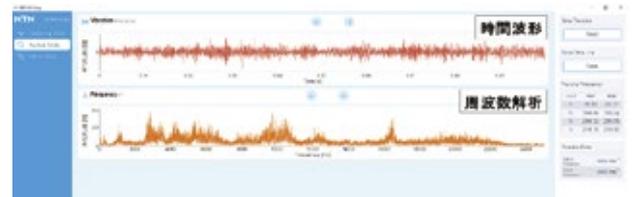


図 7 解析モードのデータ表示例

#### 5. 性能試験

##### 5.1 振動検出性能

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

##### 5.1.1 試験機および試験条件

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

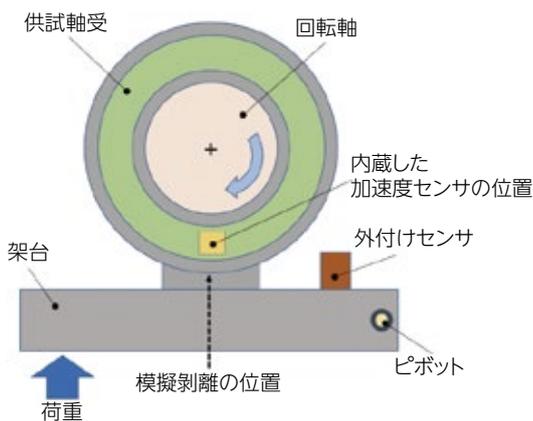


図 8 試験装置の概略図

### 5.1.2 供試軸受

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

表 2 外付けセンサの仕様

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

表 3 供試軸受の仕様

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

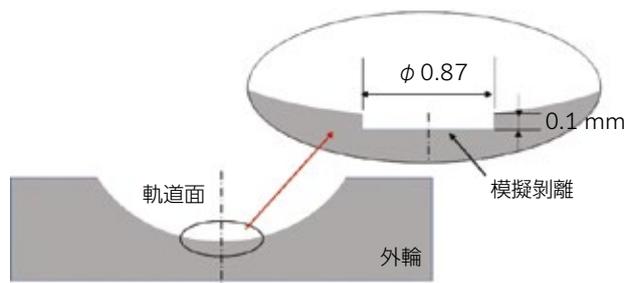


図 9 模擬剥離の模式図



図 10 スプーリング損傷事例

### 5.1.3 試験結果

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

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

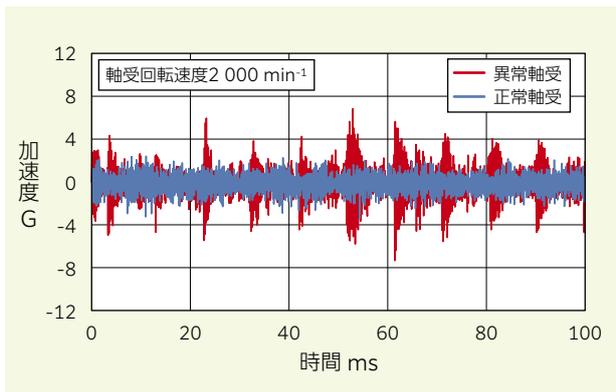


図 11 正常軸受と異常軸受の内蔵センサ出力の比較

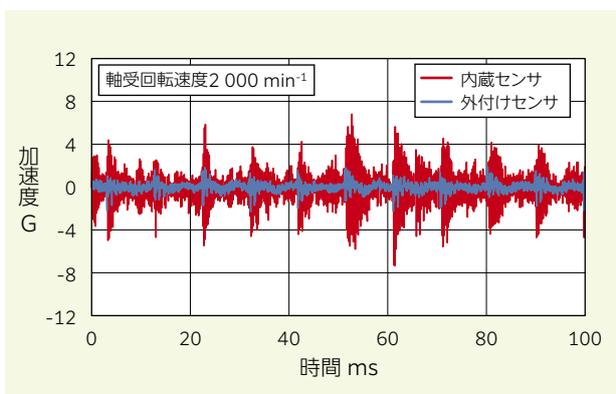


図 12 異常軸受における内蔵センサと外付けセンサの加速度の比較

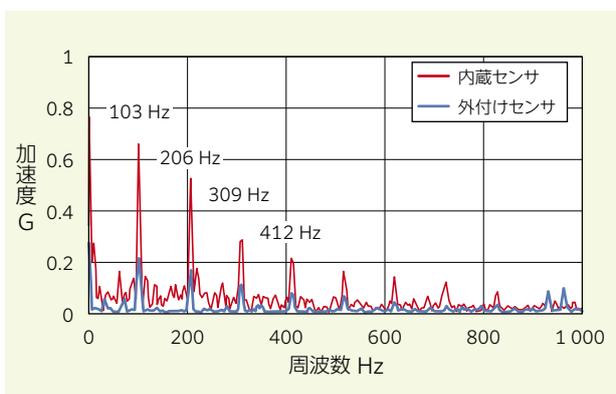


図 13 内蔵センサと外付けセンサの周波数解析の比較

## 5.2 温度検出性能

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

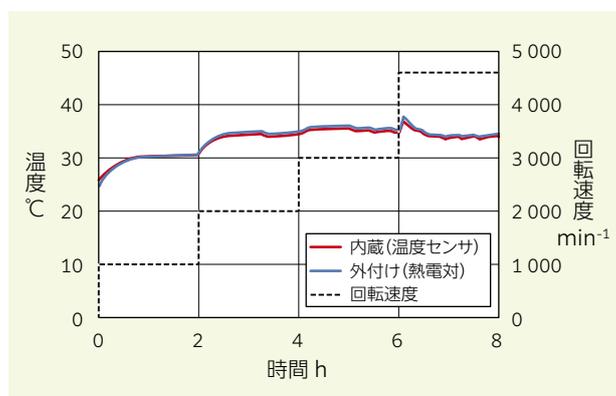


図 14 内蔵したセンサと外付けの熱電対との温度の比較

## 5.3 温度上昇特性

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

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

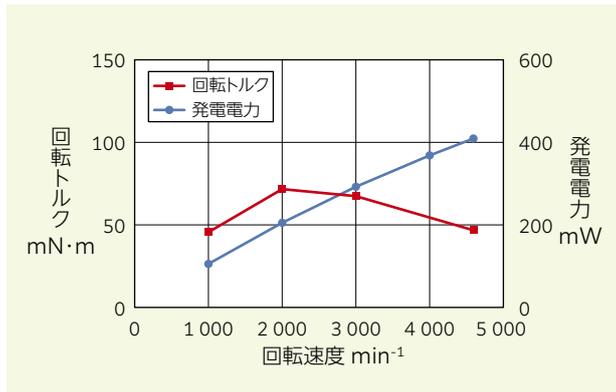


図 15 開発品の発電電力と回転トルク

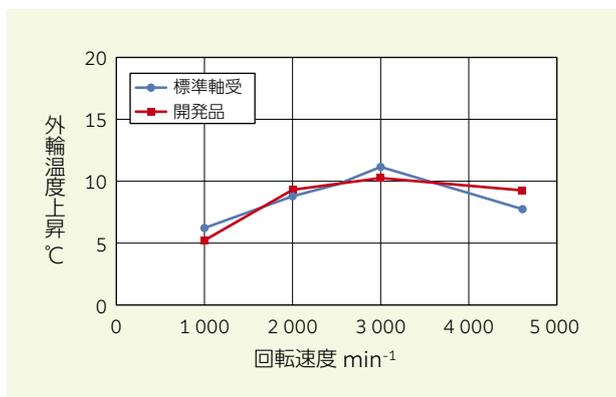


図 16 開発品と標準軸受の温度上昇特性

## 6. まとめ

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

## 参考文献

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

## 執筆者近影



福島 靖之  
商品開発研究所

後藤 知美  
商品開発研究所

豊口 陽亮  
商品開発研究所

一毛 大吾  
商品開発研究所

松林 晃平  
商品開発研究所