

# モータ状態計測による転がり軸受の異常検出手法の研究

田畑克彦<sup>\*</sup>、大橋勉<sup>\*</sup>、横山哲也<sup>\*</sup>、馬場公弘<sup>†</sup>、村橋信之介<sup>†</sup>、杉本圭三<sup>†</sup>

A study on anomaly detection method of antifriction bearing using motor monitoring system

TABATA Katsuhiko<sup>\*</sup>, OHASHI Tsuyoshi<sup>\*</sup>, YOKOYAMA Tetsuya<sup>\*</sup>,  
BABA Kimihiro<sup>†</sup>, MURAHASHI Shinnosuke<sup>†</sup> and SUGIMOTO Keizo<sup>†</sup>

IoT 技術の進展により多様なデータの活用方法が検討され、製造業においても、製造設備の異常検知や機器の故障予測などのニーズが高まっている。本研究では製造工程で広く利用されているモータの状態を様々なセンサで計測し、その計測データから異常や故障予測を行うデータ分析技術を開発している。本年度は、実験室内でモータや軸受の異常を再現するエミュレータを稼働させ、昨年度開発したモータ状態計測システムを用いて、エミュレータの状態を観測し、各種センサの計測データから軸受故障に至る変動を分析した。

## 1. はじめに

近年の IoT 技術、クラウド技術、AI 技術の進展を背景に、データが生み出す価値への期待が高まり、製造現場の見える化が普及し始めた。製造現場では、収集したデータを分析し、機械の故障予測、異常検知、制御の効率化を実現し、高い信頼性とコストダウンにつなげることが期待されている。しかしながら、収集した生産設備のデータから知りたい情報を得るためには、どのデータをどのように解析するかが課題であるとともに、長期間に渡ってデータを収集する必要がある。工場内には多種多様な設備や機器が存在するため、対象を明らかにしていないと、本来の目的から逸脱し、課題が解決しない恐れがある。このため、本研究では、モデルケースとして、生産設備内で広く利用されているモータに着目してデータ収集を行い、異常の検知と予測を行う。

昨年度開発したモータ状態計測システム<sup>1)</sup>を用いて、本年度はモータや軸受の異常を再現するエミュレータを観測し、モータ負荷側にある軸受が故障に至る迄の計測データを分析した。また、軸受の分解調査により故障原因との関連性を調べ、計測データを分析した結果と故障原因が概ね一致していることを確認した。

## 2. モータ状態計測システムとエミュレータの開発

従来のモータの状態監視は振動検出による専用の検査装置の判定だけでなく熟練者の耳や触診などの五感による判断も加わっている。このため、精度良く状態を観測するためには、振動以外の様々な物理量の計測が必要と考えられる。また、モータの状態が急激に悪化する可能性があるため、定常的に観測することが望ましい。これらを実現するため、モータの様々な物理量を計測するセンサとデータ収集マイコンモジュール、計測データを収

集し蓄積するデータ収集サーバからなるモータ状態計測システムを製作した。図 1 はそのブロック図である。

モータ異常による製造ライン停止のほとんどが、最終的には軸受損傷によるものである。したがって、モータの異常検出や予測のためには、軸受損傷の異常を再現し、計測データの時間変動や特徴を把握する必要があるが、製造現場で発生させることは困難である。このため、モータの軸受損傷を実験環境下で発生させるため、図 2(a) に示すモータエミュレータを開発した。このエミュレータには、図 2(b) に示すように皿ばねによって転がり軸受のラジアル方向の荷重を調整できるようにし、軸受の寿命加速試験を行える機能を付与した<sup>2)</sup>。本エミュレータでは 2 次側プーリに 3 つの転がり軸受を設置し、この軸受をモータ軸受と想定して、各種センサの計測データを取得する。

## 3. 軸受寿命加速試験

前章で述べたモータ状態計測システムとエミュレータを使用して、図 2(a) の軸受 No.3 のラジアル方向に荷重

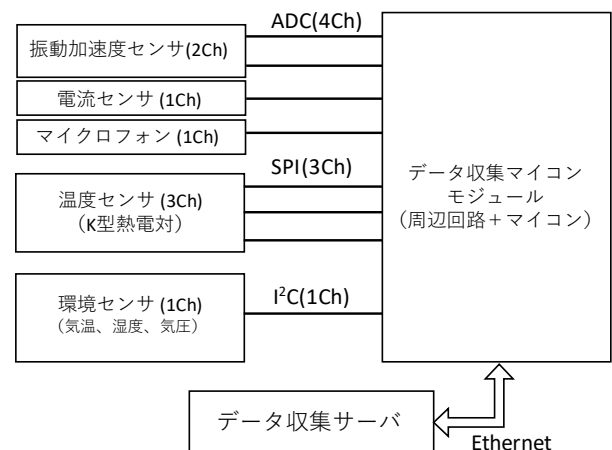
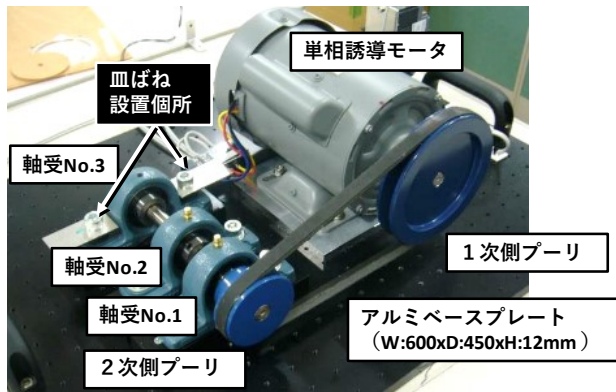


図 1 モータ状態計測システムのブロック図

<sup>\*</sup> 情報技術部

<sup>†</sup> イビデンエンジニアリング株式会社



(a) 全体構成

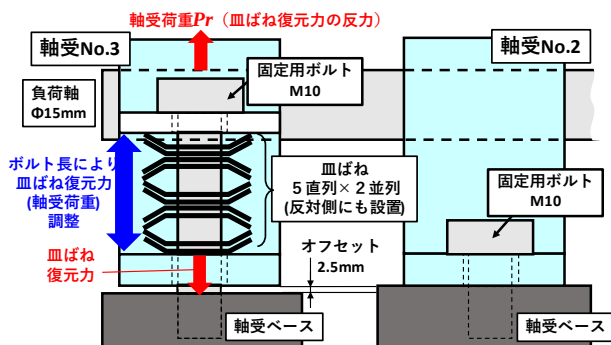
(b) 軸受荷重  $P_r$  生成の模式図

図2 モータエミュレータ

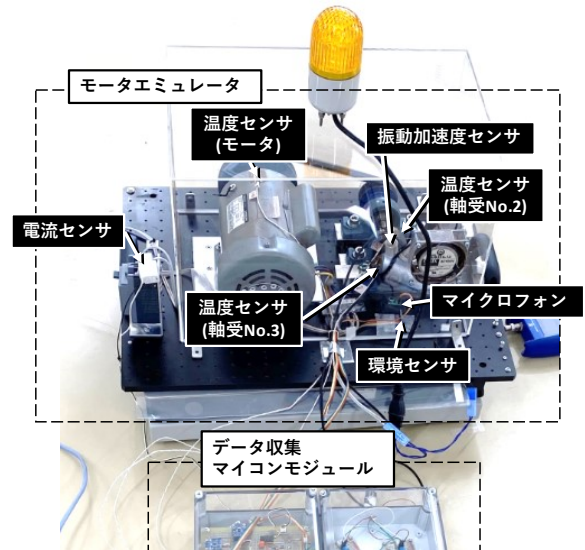


図3 各種センサを実装した外観

表1 試験結果概要

| 試験名  | ラジアル荷重 [kN] |         |         | 試験形態 | 試験時間 [h] | 試験終了理由 |
|------|-------------|---------|---------|------|----------|--------|
|      | 軸受 No.1     | 軸受 No.2 | 軸受 No.3 |      |          |        |
| 試験 1 | 9.1         | 15.2    | 6.1     | 断続*  | 305      | 振動過大   |
| 試験 2 | 4.0         | 10.1    | 6.1     | 断続*  | 397      | 回転負荷過大 |

\*平日の昼間のみモータ運転

をかけた軸受寿命加速試験を2回行い、軸受異常に至るまでの各種センサから得られた計測データの変動傾向を分析した。このうち、従来の軸受診断で重要な判断材料としている振動加速度センサのデータを分析し、分解調査による軸受異常の内容と整合しているか確認した。

### 3. 1 試験条件

軸受設計時の転がり軸受(ベアリング)の定格寿命は日本工業規格 JIS B 1518 で定義されている<sup>2)</sup>。本エミュレータではこの定義をもとに軸受のラジアル方向に荷重  $P_r$  をかけ、軸受寿命加速試験の軸受の寿命設定を行えるようにしている<sup>1)</sup>。

具体的な軸受荷重  $P_r$  のかけ方について説明する。図2(a)に示すようにモータ出力軸に1次側プーリーを取り付け、ベルトを介して径が約半分の2次側プーリーを回転させる。図2(b)は負荷側の拡大図である。軸受 No.3 は他の軸受 No.1 と No.2 に対して下方に2.5mm オフセットさせて設置されている。軸受 No.3 の固定用ボルトを締め付けると、皿ばねを圧縮できるので、図2(b)のように皿ばねの復元力により軸受 No.3 の上端にラジアル方向の軸受荷重  $P_r$  をかけることができる。

今回の試験では、図2(a)(b)のように軸受 No.3 の2箇所の固定用ボルトに各々5直列2並列の皿ばねを最大に圧縮して取り付けたため、ラジアル方向の軸受荷重  $P_r$  は最大ばね力 1.52kN より  $P_r = 1.52\text{kN} \times 2 \times 2 = 6.08\text{kN}$  と

なる。また、軸受仕様から基本動ラジアル定格荷重  $C_r$  は 12.8 kN である。なお、今回の試験で負荷  $P_r$  をかけている時の負荷軸の回転数  $n$  は実測値で  $3500\text{min}^{-1}$  程度であった。以上の設定値から軸受 No.3 の 90%信頼度の基本定格寿命<sup>2)</sup>  $L_{10h} = 44.4\text{h}$  が求められ、この条件で軸受寿命加速試験を行った。

図3はモータエミュレータに各種センサを実装した外観図である。今回の実験では、直接荷重をかけている軸受 No.3 の状態を観測するため、軸受 No.3 付近に振動加速度センサ等の主要センサを集中して配置した。電流センサは 200W のモータに供給する電流を計測している。

### 3. 2 試験結果

実施した2回の試験の概要を表1に示す。軸受 No.3 にかけた荷重は梁構造により軸受 No.1 と No.2 にも作用するため、その荷重も併記した。両試験で軸受 No.1 と No.2 の荷重が異なるのは、軸受間距離を変更したためである。また、安全性を考慮して平日昼間のみモータを稼働させ、夜間及び休日はモータを停止した。

#### 3. 2. 1 試験1の結果

試験1においては、振動加速度センサの固定用マグネットの吸着力では、軸受の観測点がずれるほどの異常振動が発生したため、試験時間は延べ 305h で終了した。

試験終了後に、再度モータを稼働させて、共同研究企業の工場設備点検者が既存の振動診断システムを用いた

従来のモータ診断を行った。その結果、軸受 No.3 の振動速度が限界値を超えており、「軸受部の摩耗とゆるみによる異常」と診断され、「早急に軸交換などの整備が必要である」との判定であった。さらに、軸受部を分解調査した結果、軸受 No.2 の内輪側とその付近の軸に筋状の摩耗痕（かじり摩耗を伴うクリープ）が観察され（写真1）、判定結果と同じく、この軸摩耗による異常振動であることが確認された。

図4は、試験時間150h経過後の振動加速度の実効値、加速度ピーク値を5で除した値、ならびに波高率の時系列変化を示したグラフである。また、図5は振動速度における同様の時系列変化を示したグラフである。振動速度は20kHzのサンプリング周波数で32,768サンプル取得した振動加速度値を積分して算出し、振動速度領域で感度が高いとされる10~1000Hzのバンドパスフィルタで抽出した値である。なお、夜間や休日などのモータが休止している時間は削除しているが、メンテナンス時のモータ停止等によって発生した不良データ(図4、図5の

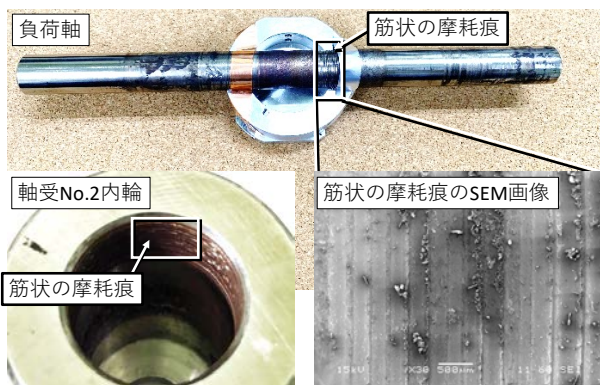


写真1 試験1実施後の分解調査結果（軸摩耗）

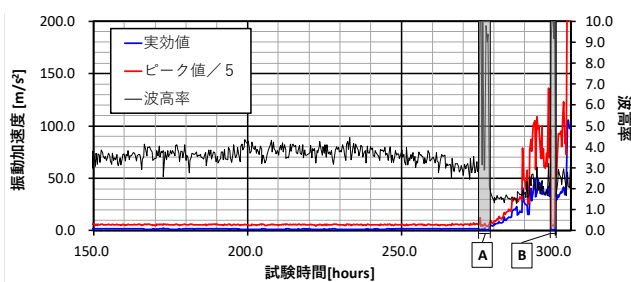


図4 振動加速度の時間変動（試験1）

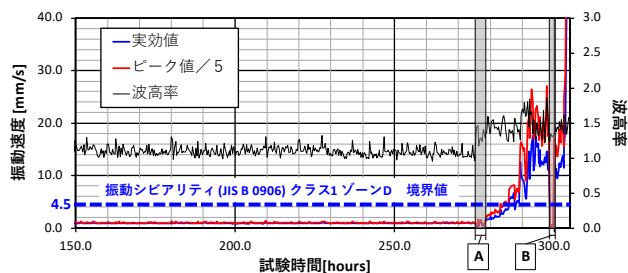


図5 振動速度の時間変動（試験1）

A及びB部)はそのままとしている。ここで波高率は、振動のピーク値と実効値との比であり、異常が進むとスパイク状ノイズなどの波形の歪みにより値が増大する傾向があり、軸受等の異常の判定に用いられている。なお、本稿では便宜的にピーク値を5で除した値を使用して波高率を算出している。

振動加速度及び振動速度ともに、試験終了近くの約280h経過後から、実効値及びピーク値が増大していることがわかる。特に、図5の振動速度の実効値は、290h経過後からJIS B 0906(機械振動の評価に関する一般的指針)<sup>3)</sup>のクラスIのゾーンDの境界値4.5mm/sを超えている。ここで、クラスIとは、代表例として出力15kW以下の汎用電動機を指し、当試験で使用した200Wのモータもこのクラスに属する。また、ゾーンDとは損傷を起こすのに十分なほどに振動が大きい領域であり、対応が必要であることを示している。

さらに、振動速度の波高率は振動速度と加速度の上昇と同じタイミングで1.0付近から1.5付近まで上昇しており、何らかの異常が発生していることを示している。

振動速度は、1kHz以下の振動周波数成分で支配的であることが知られており<sup>4)</sup>、今回のような「軸の摩耗とゆるみによる異常」は、振動速度に変化が表れるため、分解調査結果と整合していることを確認できた。

### 3. 2. 2 試験2の結果

試験2は、軸受の異音が大きくなったため、メンテナンス作業後に、モータを再稼働させようとしたところ、軸の回転負荷が過大となり、再稼働できなかったため、試験時間は延べ397hで終了した。

そのため、既存の振動診断システムによるモータ診断は行わず、分解調査のみ実施した。写真2は試験実施後の軸受No.2の分解調査の結果である。写真のように軸受の構成部品である転動体の割れ、転動体間の位置を固定する保持器の破損、及びグリスの炭化が確認された。そのため、軸受No.2の軸受内部の破損が異常停止の原因と判定された。

図6と図7はそれぞれ、試験時間250h経過後の振動加速度、振動速度のピーク値、実効値ならびに波高率の



写真2 試験2実施後の分解調査結果（軸受破損）

時系列変化を示したグラフである。試験1と同様、メンテナンス時のモータ停止等によって発生した不良データ(図6, 図7のA及びB部)はそのままとしている。試験1と異なる点は、寿命末期でも振動速度がほとんど変化していないことである。これは今回の異常原因が前回と異なることを示している。一方、振動加速度は試験終了前の380h経過後から増大している。振動加速度の増大は軸受損傷と関係していることから<sup>4)</sup>、今回の異常内容と一致している。しかしながら今回の試験では波高率には変化が現れなかった。この理由の1つとして今回の試験では振動加速度センサは軸受 No.3 に取り付けしており、軸受 No.2 から距離(50mm)があるため、計測感度が低下していたことが考えられる。

図8は392h経過後の振動加速度の計測データから得られた加速度包絡線の時系列波形(上段)とその時の周波数分布(下段)のグラフである。保持器異常の周波数 $f_m$  [Hz]と転動体傷の周波数 $f_b$  [Hz]は、計測時の軸回転速度(3446min<sup>-1</sup>)と軸受の幾何学形状から求めることができ<sup>4)</sup>、この時の試験条件では $f_m=22\text{Hz}$ 、 $f_b=116\text{Hz}$ である。この周波数は図中のピークと一致しており、軸受の保持器異常と転動体異常が検出できていることがわかる。

今回の2つの試験ともに、最初に異音が発生し、その次に振動加速度や振動速度が上昇し、最後に負荷電流値が不安定になって軸受寿命を迎える傾向であった。その一方で、試験1ではマイク不良の発生、試験2ではモータ起動時に軸受荷重の抵抗により起動できず、荷重調整が必要になるなど、計測データ値に基づいて異常判定するには課題があった。また、生産現場では24時間連続運転しているモータの割合が高く、温度等の環境データも断続運転による不連続な計測値では十分な変動傾向を把握できない。そのため、今後は適切な軸受負荷をかけながら、モータを24時間連続運転することで、実利用に近い状態のデータ計測を行い、軸受異常時における緊急度の判定方法等について検討を進めたい。

4. まとめ

本年度は開発したモータ状態計測システムにより、モータの重要部品である軸受故障等を再現するエミュレータの状態を観測し、軸受故障に至る計測データの時間変動を把握した。また、軸受の分解調査により故障原因との関連性を調べ、データ分析の結果と概ね一致していることを確認し、モータ状態計測システムとエミュレータの妥当性を確認できた。今後は実運用に近づけるため、24時間のモータ運転による計測を行い、多種類のセンサデータから異常の緊急度の判定方法について検討する予定である。

#### 【参考文献】

- 1) 田畑ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.1, pp95-98, 2020
- 2) 日本規格協会, 転がり軸受-動定格荷重及び定格寿命 JIS B 1518, 2013
- 3) 日本規格協会, 機械振動-非回転部分における機械振動の測定と評価-一般的指針 JIS B 0906, 2018
- 4) 旭化成エンジニアリング, <https://www.asahi-kasei.co.jp/aec/pmseries/index.html>, 2021

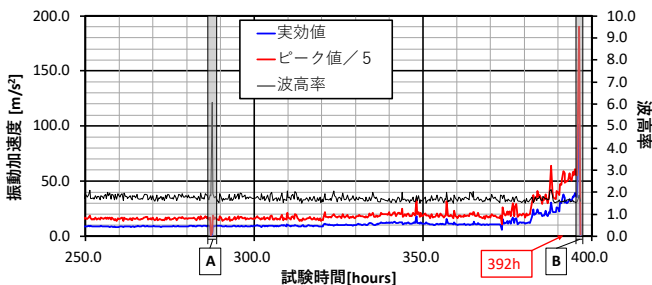


図6 振動加速度の時間変動 (試験2)

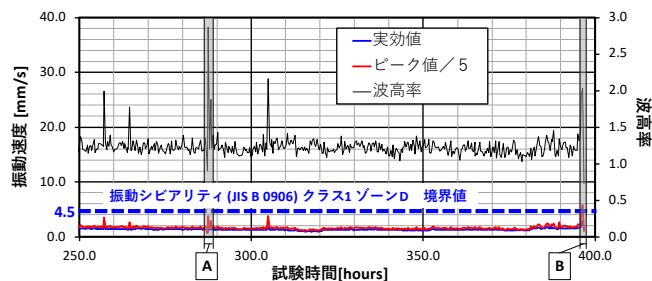


図7 振動速度の時間変動 (試験2)

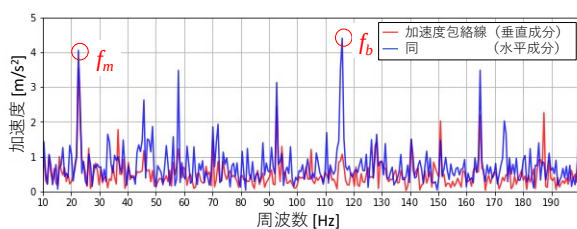
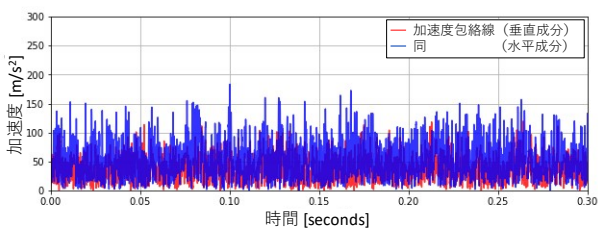


図8 392h後の加速度包絡線の周波数分析