

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（第2報）

田畑克彦*、大橋勉*、横山哲也*、馬場公弘†、村橋信之介†、杉本圭三†

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

TABATA Katsuhiko*, OHASHI Tsuyoshi*, YOKOYAMA Tetsuya*,
BABA Kimihiro†, MURAHASHI Shinnosuke† and SUGIMOTO Keizo†

本研究では工場などの製造設備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モータの異常や故障予測を行うデータ分析技術を開発している。これまでに、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と、モータを様々なセンサで計測するモータ状態計測システムを開発し、各種センサの計測データから軸受等が故障に至る変動を収集している。本年度は通常の軸受診断で使用する振動データの他に、音と負荷電流の変動も考慮して、軸受故障の異常検出と対応の緊急度を判定する軸受診断ソフトウェアを開発し、その動作を確認した。

1. はじめに

近年のIoT技術の進展に伴い、製造現場において収集したデータの分析により、機械の故障予測、異常検知、運転の効率化を実現し、工場設備の信頼性向上や運用コスト削減につなげることが期待されている。

本研究では、生産設備で広く使用されているモータに着目してデータ収集を行い、データ分析によりモータ異常の検知と予測技術を開発している。これまでの研究では、モータの状態を様々なセンサで計測してデータを収集するシステムと、モータや軸受の異常を比較的短時間で再現するエミュレータを開発し、特にモータ負荷側の出力軸や軸受が故障に至る迄のデータを収集した。また、収集したデータについて、従来から軸受診断に使用されてきた振動加速度および振動速度の計測データを分析した結果とその故障原因が概ね一致していることを確認し、モータエミュレータとモータ状態計測システムの妥当性を確認した¹⁾²⁾。

本年度は、昨年度から実施している軸受寿命加速試験を継続し、さらにモータ負荷側の軸や軸受故障に至るまでのデータ収集と分析を進めた。この結果、従来の振動の他に、異常初期では音の増大、異常末期ではモータ電流の変動が観測された。これらの分析結果をもとに、軸受診断アルゴリズムの検討を行い、異常の検出だけでなく、異常の緊急度も判定する軸受診断ソフトウェアを開発し、その有効性を試験データで検証したので報告する。

2. 軸受寿命加速試験

2. 1 試験目的と構成

製造現場において、モータ異常による製造ライン停止は、最終的には軸受損傷によるものが多い。したがって、

モータの異常検出や異常予測には、軸受損傷の発達を観察し、計測データの時間変動や特徴を把握する必要があるが、製造現場で異常を発生させることは現実的ではない。このため、モータの異常を実験環境下で発生させるため、図1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、軸受 No.3 の接合部に設けた皿ばねに、軸に対して直角（ラジアル）方向に荷重をかけることで、軸受の寿命加速試験を行える機能を有する¹⁾³⁾。

図2はモータエミュレータに各種センサを実装した外觀図である。各種センサで計測されたデータは、データ

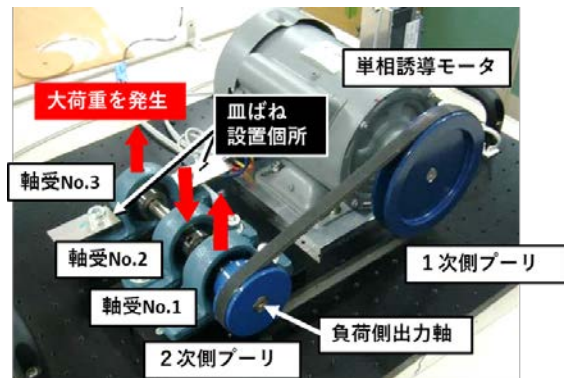


図1 モータエミュレータ

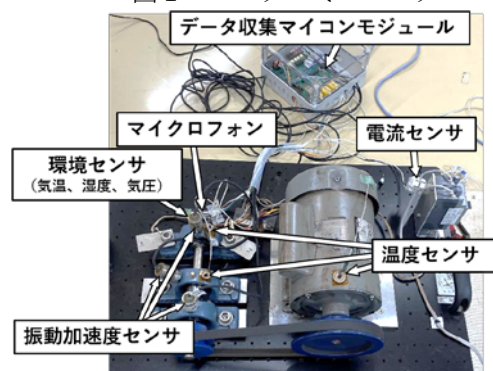


図2 各種センサによる計測データの収集

* 情報技術部

† イビデンエンジニアリング株式会社

表1 軸受寿命加速試験の結果概要

試験名	試験形態*	試験時間 [h]	試験終了理由	異常原因	備考
試験1	断続	305	振動過大	軸摩耗	音計測不良
試験2	断続	397	負荷過大	軸受破損 保持器破損 転動体欠け 潤滑不良	
試験3	24h	94.5	出力軸破断	軸破断	
試験4	24h	3456	出力軸破断	軸破断	1657hで プーリベルト切断 (交換後、続行)
試験5	24h	42.9	異常振動 及び騒音	ガタ、ゆるみ 軸受外輪キズ	軸受No. 2にダイ ヤモンドペースト (#5000)注入
試験6	24h	530	異常振動 及び騒音	軸摩耗、 軸受キズ	

* 断続：平日の昼間のみモータ運転、24h：24時間連続運転

収集マイコンモジュールを経由して、データ収集サーバに蓄積され、データ分析や軸受診断ソフトウェア開発に用いる。

2. 2 試験結果

前節で述べた軸受寿命加速試験の結果を表1に示す。表中の試験1および2は、昨年度実施した軸受寿命試験の結果である²⁾。昨年度は軸受異常が1件あったのに対して、本年度は軸関連の異常が主であり、軸受異常は多少の傷が発生しているものの試験終了の直接原因となっていなかった。試験にあたっては、軸受間の距離や皿ばねの荷重を調整した他、軸受に砂埃を模したダイヤモンドペーストを注入して軸受異常を促進させるなどの対策を施したが、軸受異常は発生しなかった。この理由として、昨年度の試験と今年度を比較すると、断続運転と24時間連続運転の試験形態の違いが考えられる。断続運転はモータの停止や起動時に軸受へダメージを与えるが、連続運転ではそれが無いことも一因と考えられる。また、軸受よりも軸の強度が弱い可能性があるため、今後は軸材料の再検討や軸破断時は新しい軸に取り換えて試験を続行するなどの対応が必要であると考えている。

3. 軸受診断アルゴリズムの開発

3. 1 振動の分析

軸受の外輪傷や転動体傷などの軸受の異常はその発達に伴い振動加速度や振動加速度包絡線が増大する。一方、それ以外の軸摩耗や組付ガタなどの軸関連の異常は振動速度が増大することが知られており⁴⁾、昨年度の軸受寿命加速試験においても同様の結果が得られた²⁾。また、振動速度に関してはJIS B 0906(機械振動の評価に関する一般的指針⁵⁾)において判定基準が規定されており、振動加速度に関しては相対判定基準やAMD基準(旭化成振動基準)などにより異常診断ができる⁶⁾。

3. 2 音の分析

軸受寿命加速試験を通して、全般的に異常初期は音が増大し、その後、振動が増大するという順番となること

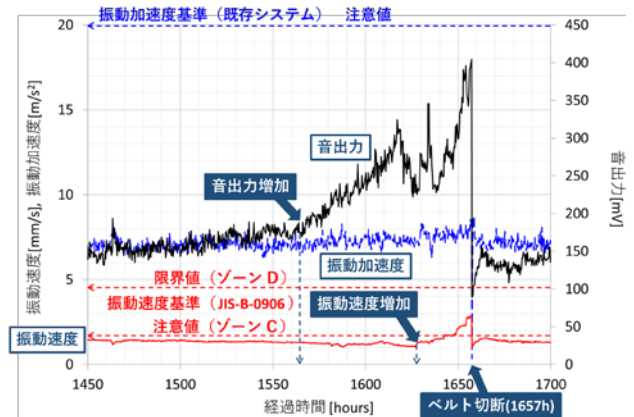


図3 異常初期における音の増大（試験4）

が分かった。図3は、試験4においてプーリベルトが切断するまでの、音の最大振幅値、振動加速度および振動速度の実効値の変動を示すグラフである。なお、試験における振動、音およびモータ電流の計測は20分毎に1.6s間サンプリング周波数20kHzで収集している。ベルトの切断は経過時間1657hに発生しているが、その約30h前から振動速度が上昇を始め、その後JIS B 0906のゾーンC（長期の連続運転は期待できないゾーン）を超えて切断に至っている。ここで、振動加速度には明確な増加が見られないことから、異常は軸受ではなく、軸関連にあることを示しており、妥当な結果を示している。一方で、音出力の上昇は経過時間1555hから始まっており、ベルト切断よりも約90h前、振動速度の上昇よりも約60h早く兆候が表れていた。

以上の結果から、音の増大は、その現象だけでは致命的な異常ではないものの異常の兆候を示すものと解釈した。また、音が異常と判定する条件として、本試験の稼働直後0h時の音出力が約70mVであったため、音出力の最低値の2.0倍以上を異常（の兆候あり）と判定する。

3. 3 電流の分析

軸受寿命加速試験では異常発生により試験が終了する直前に、モータ電流が変動することを確認している。図4は試験1において振動過大により試験が終了するまでのモータの負荷電流の最大振幅値、振動加速度および振動速度の実効値の変動を示す。軸摩耗によって振動速度基準の限界値を超えた付近のタイミング(経過時間290h付近)で、モータ電流が減少後増加する変動が現れている。また、経過時間270h付近での電流の増加は、軸受のラジアル負荷を増加させたためであるが、その後は軸受負荷を調整していない。よって、試験末期の290h以降におけるモータ電流の変動は、軸や軸受異常に起因する末期症状を示すものと解釈した。

この電流変動による異常は、変動係数比CVRを求めることで電流変動を定量化し判定する。ここで変動係数比CVRとはある区間（以下、“算出区間”と記述）の変

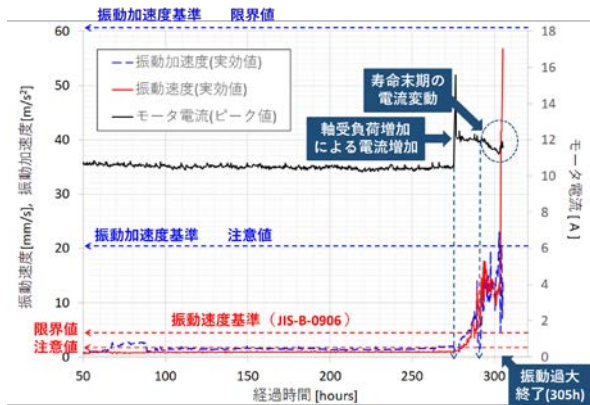


図4 モータ電流の変動（試験1）

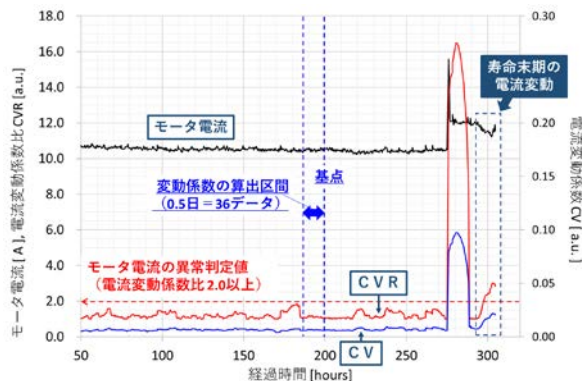


図5 モータ電流変動係数比による異常判定

動係数 CV を算出区間の最小の変動係数で除した値として定義する。なお、変動係数 CV とは、算出区間のデータの標準偏差 σ を平均値 $\bar{x}$ で除した値であり、平均値に対するデータとバラツキの関係を相対的に評価する際に用いる数値で以下の数式で表される。

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (1)$$

変動係数を判定に用いた理由は、平均値に対するバラツキを指標とすることで、様々な出力のモータに対応できるためである。

図5は試験1の電流データに対して電流変動係数 CV と変動係数比 CVR をプロットしたグラフである。例えば、図のように 200h 時点での電流変動係数は、200h を基点として算出区間のデータ群に対して算出する。なお、算出区間が長いと時間分解能が低下するため、変動が激しい期間の特定が困難となり、短いと変動の大きい時間帯が強調されず、異常の特定が困難となる。このため、試験データをもとに算出区間を検討し、0.5 日間(12h)とした。試験でのデータ計測の間隔は 20 分毎であるため、算出区間のデータ数は 36 である。さらに、図5で示すように電流安定時の変動係数 CV は 0.01 以下の値であるため、算出区間における変動係数 CV の最小値との比を取ることで、数値変動の把握を容易にした。

電流異常の判定条件は、図5の寿命末期における変動係数比 CVR は 2.0 を超えているため、2.0 を超える場合とした。ただし、図5に示されているように、270h 付

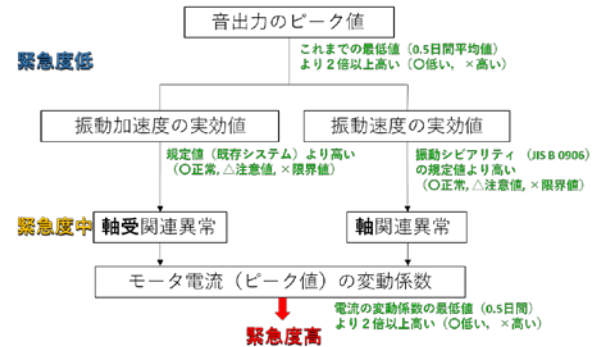


図6 軸受診断ソフトウェアの処理フロー

表2 軸受診断の緊急度（異常度合）判定

凡例 ○：正常 △：注意 ×：異常	緊急度	判定				内容
		音	振動加速度	振動速度	電流	
	0	○	○	○	○	正常
	1	×	○	○	○	異常の兆候
	2	×	△	or △	○	異常の発生 (要調査)
	3	×	×	or ×	○	重症の異常 (速やかに対応)
	4	×	△	or △	×	重大な異常 (直ちに対応)
	5	×	×	or ×	×	緊急事態 (手遅れに近い)

近で実施した負荷調整でも異常と判定されるため、音や振動が異常であることを前提とする必要がある。また、一定負荷でない場合には、実際の負荷状態と合わせた判定が必要となる可能性がある。

3.4 軸受診断ソフトウェアの開発

前節までのデータ分析の結果をもとに、熟練検査者に代わって自動で軸受診断を行うソフトウェアを開発した。開発言語 Python により開発したソフトウェアの処理フローを図6に示す。軸受や軸の異常度が増すに従い、音、振動、電流の順に異常判定が進んでいく。

音は3.2節のとおり、異常の兆候を示すものである。音が異常と判定された場合、振動加速度と振動速度の実効値を算出し、それらが注意値や限界値を超過しているか判定する。前述のとおり、振動加速度が超過していれば軸受関連の異常であり、振動速度が超過していれば出力軸に関連する異常と判断する。注意値や限界値については、振動加速度は既存の振動診断システムの基準値を、振動速度は振動シビアリティ (JIS B 0906) の基準値を用いた。

次に、振動加速度または振動速度が異常を示しているとき、電流値の変動を確認する。モータ電流の変動係数比が規定値を超えた場合は、軸または軸受は末期症状を示していると判断される。

以上の処理フローから表2に示す緊急度を判定した結果を必要に応じて担当者に通知する等の対応を行う。なお、振動加速度と振動速度については、注意値を超過した場合は注意 (△) と判定し、限界値を超過した場合は異常 (×) と判定する。また、振動加速度については、

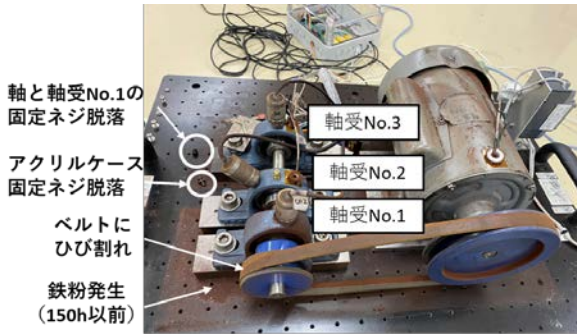


図7 試験6終了時の状態

振動加速度包絡線の実効値も振動加速度と同様の傾向を示すため、加速度もしくは加速度包絡線の大きい方を判定に用いる。

4. 軸受診断ソフトウェアの試験データへの適用

開発した軸受診断ソフトウェアの有効性を検証するため、試験6の計測データをもとに診断を行った。図7は試験6の終了時の写真である。試験は令和3年12月14日から令和4年1月5日にかけて実施され、経過時間100h以前から軸受No.1付近で異音が発生し、図7のように軸受No.1付近に鉄粉が堆積し始めた。その後、試験を続行したところ、1月5日の530h時点で複数のネジの脱落を確認した。脱落したネジのうち2個は軸受No.1のものであり、軸受No.1と軸は非固定状態となり空回りしていた。このため、復旧作業により脱落したネジで軸と軸受と再度固定した後、モータを再稼働させたが振動が激しいため試験を終了した。分解調査等の結果、異常原因は軸受No.1付近の軸摩耗により、軸心がずれたことによる異常振動と判定された。

図8に軸受診断ソフトウェアによる試験6データの診断結果を示す。60h後から異音が始まり(d)、100hには振動速度が限界値を超え(c)、緊急度3の“速やかに対応”を示している(e)。その後、一旦は収まるが、250hから再び異音が高まり(d)、振動加速度やその包絡線が増大し(a)(b)、緊急度3に達している(e)。最後の再稼働時(530h)には、モータ電流変動係数比CVRが急激に増加し、緊急度は5を示している(e)。通常の運用であれば、100h超における緊急度3(速やかに対応)の異常時に是正することで、530hの緊急事態(手遅れに近い)を未然に防ぐことができるため、妥当な判定結果となった。

5. まとめ

本年度は、工場設備の重要部品である軸受故障等を再現するモータエミュレータと収集データにより、軸周辺や軸受故障に至る計測データの変動を分析し、軸周辺または軸受異常とその緊急度を判定する軸受診断ソフトウェアを開発した。また、開発ソフトウェアを軸受寿命加速試験で収集した計測データに適用し、その妥当性を確認した。今後は、工場内の一部設備の軸受等にデータ収

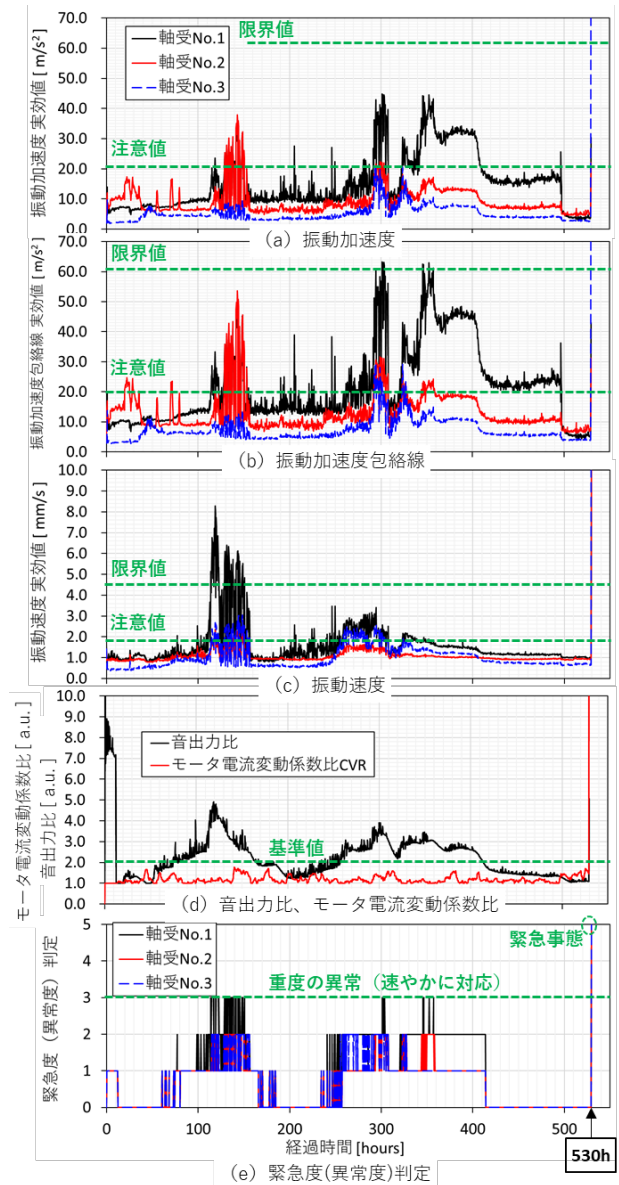


図8 試験6の軸受診断結果

集マイコンモジュールを実装し、開発した軸受診断ソフトウェアの現場実証および改良を行う予定である。

【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) 田畑ら, 岐阜県産業技術総合センター研究報告 No.2, pp87-90, 2021
- 3) 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
- 4) 野田伸一, 科学情報出版株式会社 モータの騒音・振動と対策設計法, pp127-138, 2014
- 5) 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
- 6) 旭化成エンジニアリング, <https://www.asahi-kasei.co.jp/aec/pmseries/index.html>, 2022.3.17 時点