

モータ状態計測システムとエミュレータの開発

田畑克彦*、横山哲也*、大橋勉*、馬場公弘†、杉本圭三†

Development of motor monitoring system and a motor emulator

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

IoT 技術の進展により多様なデータが収集できるようになり、収集したデータの活用方法が重要となっている。製造業においては、製造設備等から収集したデータを活用して、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。しかしながら、これらの実現のためには、収集した大量のデータを分析する方法の確立が不可欠であり、このことが導入の際の大きな課題となっている。本研究では、この課題解決のモデルケースとして、製造工程で多く使用されているモータの状態を計測し、計測データから異常や故障予測を行うためのデータ分析技術の開発を行う。本年度はモータ状態を把握する計測システムと、モータ異常の再現や故障予測に資するためのエミュレータを開発したので報告する。

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。2019 年版ものづくり白書¹⁾は、中小企業の 30%がラインや製造工程の見える化を実施あるいは計画しており、データを活用したプロセス改善を目指していることに触れている。実際の製造現場においても、効率化やコストダウンにつなげるために、収集したデータを分析し、機械の故障予測、異常検知、制御の効率化などの機能を付加することに大きな期待が寄せられている。このため、製造分野においてもデータ分析を支援する動きが見られる。ハード面の支援では、ハードウェアに依存しない FA と IT システムのシームレスな連携を可能とする、エッジコンピューティング領域のソフトウェアプラットフォームなどの普及が始まっている。また、ソフト面では統計解析や AI による解析が比較的容易な Python や R といったデータサイエンスのためのプログラミング言語の普及が進んでいる。

しかしながら、製造設備・機器等のデータから得られる情報は企業毎に異なるため、情報の収集・分析方法や、実現したい機能について、それぞれの要望に合わせて開発する必要がある。また、収集したデータから故障等の可能性を分析するためには、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、長期間に渡りデータを収集する必要がある。このような状況では、対象を明らかにしていないと、本来の目的から逸脱してしまい、課題が解決しない、もしくは解決に時間を要することとなる。そこで本研究では、モデルケースとして、監視対象を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。

2. 現状におけるモータ状態の監視

従来のモータの異常検査の一例について記す。工場の生産設備を保守している県内企業では、検査者が 1 月に 1 度の頻度で、携帯端末と振動加速度センサからなる専用の検査システムを使用し、数百台規模のモータ一つ一つに対してモータ軸受近くに振動加速度センサを取り付け、その振動を測定する。そして、測定したデータを解析することによってモータの軸受交換などの修繕の要否を判定する。図 1 は、ブロワモータ検査の模式図である。モータの負荷側と反負荷側に 1 軸の振動加速度センサをとりつけ、振動データを計測しつつ、手元の携帯端末で収集する。

実際の修繕の要否の判定は専用の検査システムの判定のほか、検査者が異音やがたつきなどがないか、耳や触診、計測データなどから総合的に判断しており、熟練を要することから、検査者が異常を見落とす可能性がある。このような見落としがあると、モータの軸受損傷などにより製造ラインに不具合をきたし、大きな損害が発生する。この企業では 2016 年度以降にブロワモータ故障による製造ラインの不具合が数件発生している。このことから、検査品質の安定化と異常の予兆の見落としを抑制し、検査作業の効率化を図ったシステムの開発が喫緊の課題となっている。

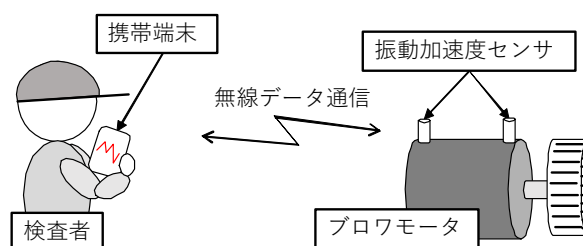


図1 モータ検査の一例

* 情報技術部

† イビデンエンジニアリング株式会社

3. モータ状態計測システムとエミュレータの開発

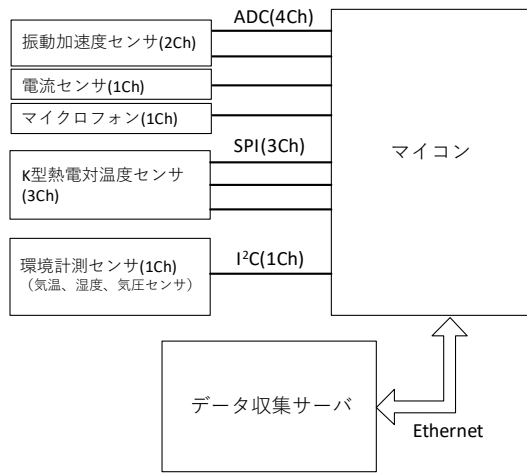
モータの状態監視は検査システムによる振動データの判定だけでなく熟練者の五感による判断も加わっていることから、振動以外の様々な物理量の計測が必要と考えられる。また、前述の製造ライン不具合の場合、故障する1カ月前のモータ検査の記録ではいずれも正常であったため、状態が急激に悪化する可能性がある。このため、状態を定常的に観測することが望ましい。これらを実現するために、モータの様々な物理量を計測するマイコンと計測したデータを収集するサーバからなるモータ状態計測システムを製作した。

また、モータの状態異常については、現状では軸受損傷などの致命的な損傷が何時発生するのか不明であり、製造現場で発生させることもできない。このため、実験環境下でモータの軸受損傷などを故意に発生させ、異常時の計測データの特徴を把握する必要がある。さらには、軸受が損傷してモータの異常停止に至る計測データの変動を分析することで、故障までの時間を予測する技術を開発することができると考えた。そこで、この2つの用途で使用するためのエミュレータを開発した。

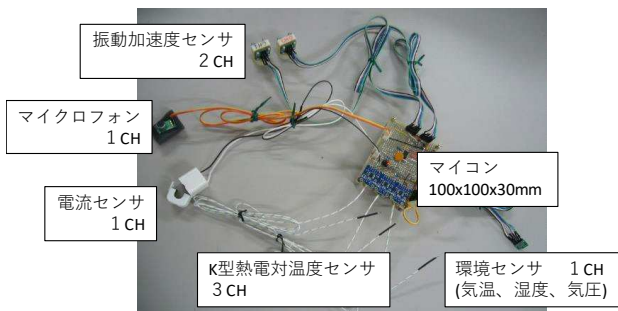
以降にそれぞれの概要について記述する。

3. 1 モータ状態計測システム

モータ状態計測システムのブロック図を図2(a)に示す。計測対象から様々な種類の物理量を計測するためのセン



(a)ブロック図



(b)製作したマイコンモジュール

図2 モータ状態計測システム

サ、計測データを取得するマイコン、さらにマイコンで計測したデータを集積するデータ収集サーバから構成される。

計測するセンサの種類は、現状で計測可能な物理量として、以下を選定した。

- ・振動加速度センサ(2Ch) :
従来のモータ監視で使用されている異常振動などを検出する。モータの負荷側と反負荷側の2箇所を設置する。
- ・電流センサ(1Ch) :
モータの負荷電流をモニタし、異常による負荷変動を検出する。
- ・マイクロフォン(1Ch) :
検査者の耳に代わるものとして、可聴域の異常音を検出する。
- ・温度センサ(3Ch) :
軸受部やモータ本体の異常による発熱を検出する。
- ・環境センサ(1Ch) :
気温、湿度、気圧の周囲環境をモニタする。
図2(b)は製作したマイコンモジュールである。

3. 2 モータエミュレータ

製造現場におけるモータの動作異常はいつどこで発生するのかが現状では予測できないため、モータの異常状態を再現するための用途と、軸受寿命に至るまでの計測データの変動を把握するための用途としてエミュレータを開発した。本エミュレータはこの2つの機能を兼ねており、その内容について記述する。

3. 2. 1 モータ異常の再現機能

開発するシステムの機能としては、モータの動作異常を検出する必要があるが、モータとその周辺を含む動作異常は表1のとおり多岐にわたり、異常の種類によって発生頻度も異なる。このため、故意に異常を再現させるシステムを開発し、異常時の計測データの特徴を事前に把握しておくことは有効である。図3が開発したモータ

表1 異常内容と代表的な周波数帯

周波数帯	異常内容
DC ~ 1000 Hz	<ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物の緩やかな振動 ・ 軸の触れ回り振動 ・ 回転機器のアンバランス ・ 軸継手のずれ (ミスアライメント) ・ ゆるみ ・ ベースゆれ ・ 歯車の噛み合い不良 ・ 軸受部摩耗 ・ 電磁振動 ・ 溝高調波 ・ キンリ など
1000 Hz ~	<ul style="list-style-type: none"> ・ 転がり軸受の傷 ・ 転がり軸受の潤滑不良 ・ 転がり軸受や歯車損傷の衝撃 ・ 冷却ファンこすれ ・ ローターこすれ ・ 嵌め合いこすれ ・ 転がり軸受け内部構造のうねり など

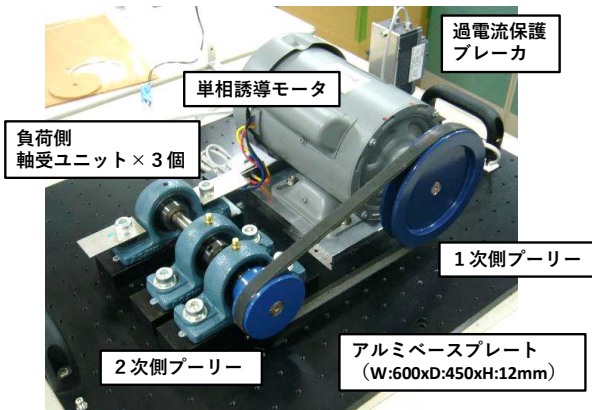


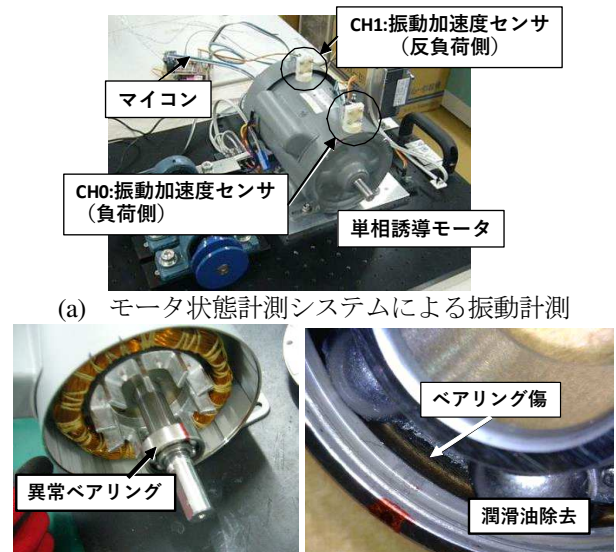
図3 モータエミュレータ試作機

表2 モータエミュレータの主な仕様

構成部品名	項目および仕様		備考
モータ	方式	単相誘導モータ	全閉外扇型
	出力	200W	
	電源	単相100V	
	定格電流	4.7A	
	全負荷回転速度	1730rpm	
	軸受構造	深溝玉軸受 (NSK 6202ZZ)	負荷側、反負荷側ともに
プーリー	1次側ピッチ径	114.5mm	
	2次側ピッチ径	51.0mm	
負荷側軸受ユニット	メーカー型番	旭精工株式会社 UCP202	3個使用
	軸受構造	深溝玉軸受	基本動ラジアル 定格荷重Cr = 12.8kN
軸受ユニット荷重用皿ばね	材質	ばね用鋼	
	最大ばね力	1.52kN	

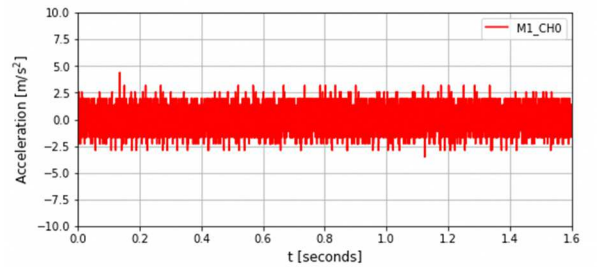
エミュレータである。エミュレータの構成部品は比較的一般に入手しやすいものを選定した。モータエミュレータの主な仕様を表2に示す。

また、モータ状態計測システムの動作を確認するための予備実験として、正常なモータ (M1 モータ) と、負荷側の軸受部のベアリング (NSK 6202ZZ) の潤滑グリスを除去して潤滑不良とし、さらにベアリング外輪部に金属やすりで傷をつけたモータ (M2 モータ) をそれぞれ回転させ、モータ状態計測システムにより観測した。図4のとおり振動加速度センサは2つ使用しており、CH0が負荷側ベアリング、CH1が反負荷側ベアリングの真上にマグネットで固定して計測した。正常モータ、異常モータそれぞれの負荷側に取り付けられた CH0 の振動加速度センサで計測した振動加速度の時系列データを図5 (a) (b)の上段に示す。また、このデータに対するフーリエ変換後に得られた周波数分布を図5(a)(b)下段に示す。図5の振動加速度の時系列データの振幅値は異常モータ (M2 モータ)の方が大きく、周波数分布でも異常モータの1kHz以上の周波数帯に振動成分が発生していることが確認できる。これは表1に記載されているように、転がり軸受 (ベアリング) 異常時に現れる周波数帯である³⁾。このため、M2モータのベアリング外周傷や潤滑不良に起因するものであり、妥当な結果と考えられる。今

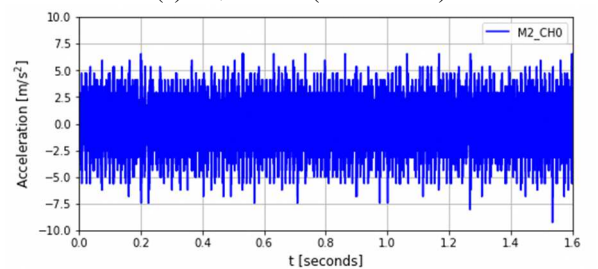
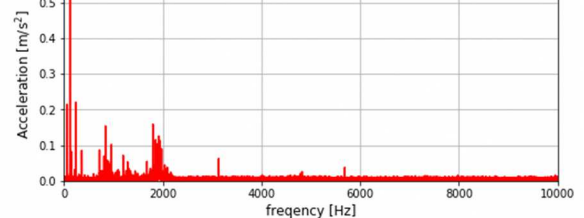


(b)異常ベアリングの取付け(M2 モータ)

図4 計測システムの動作確認実験



(a)正常モータ(M1 モータ)



(b)異常モータ(M2 モータ)

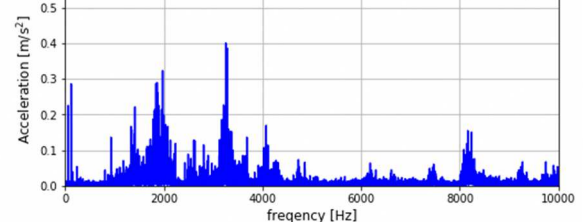


図5 振動加速度のデータ計測例

後は、取得した振動加速度の時系列データに対して振動加速度の包絡線処理や振動速度への変換などに加え、その他の物理量の計測データに関する分析も進める予定である。

3. 2. 2 軸受寿命加速試験機能

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 では、以下のように定義されている²⁾。

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^p \quad (1)$$

ここで L_{10} は基本定格寿命と呼ばれ、通常使用条件において信頼度が 90% の寿命として定義されており、一群の同じ軸受を同じ条件で運転したとき、90% の軸受が剥離を起こさずに回転できる総回転数である。この値は、通常は 100 万(10⁶)回転に設定される。また C_r は基本動ラジアル定格荷重[kN]であり、基本定格寿命に理論上耐えうるような定格荷重であり軸受の材質や寸法によって設定される。さらに P_r は動等価ラジアル荷重[kN]であり、実際の荷重条件下で所望の軸受寿命が得られるような軸受にかかる一定の静止荷重[kN]である。最後に、 p は軸受の転動体の形状によって決まる定数であり、玉軸受では $p=3$ である。

ブロワモータのように一定回転数の軸受に使用する場合は時間で表すことが多く、(1)式をもとに基本定格寿命時間 L_{10h} [h]は以下の式で表すことができる。

$$L_{10h} = \left(\frac{10^6}{60 \cdot n}\right) \times \left(\frac{C_r}{P_r}\right)^p \quad (2)$$

ここで n は軸受部の軸回転数(min⁻¹)である。

本エミュレータでは図3に示すようにモータ負荷軸に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6(a)は負荷側の拡大写真であるが、プーリーにはφ15mmのSUJ2製の出力軸が3つの軸受ユニット(UCP202)により保持されている構造である。このうち、図6(a)の左端の軸受は他の2つの軸受に対して下方に0.5mmオフセットさせて設置されている。このため、図6(b)のように皿ばねを取り付けることで、皿ばねの復元力によりベアリング上端のラジアル方向に対して荷重をかけることができる。例えば、図6のように2箇所5直列2並列の皿ばねを最大に圧縮して取り付けられた場合、動等価ラジアル荷重 P_r は表2の最大ばね力 1.52kN より $P_r=1.52\text{kN} \times 2 \times 2=6.08\text{kN}$ となる。また、メーカー型番の仕様から基本動ラジアル定格荷重 C_r は 12.8 kN である。さらに、無負荷時に実測したモータ軸回転数の 1800min⁻¹ と、プーリーのピッチ径の比から負荷側軸の回転数 $n=4050\text{min}^{-1}$ が求められる。以上の数値を(2)式に代入すると基本定格寿命は $L_{10h}=38.4\text{h}$ となり、軸受部の 90% 信頼度の寿命を短縮することができる。皿ばねの直列数、並列数によりラジアル荷重を調整することにより、時間軸を変化させ軸受部のベアリングが異常に至る過程の観察が期待できる。

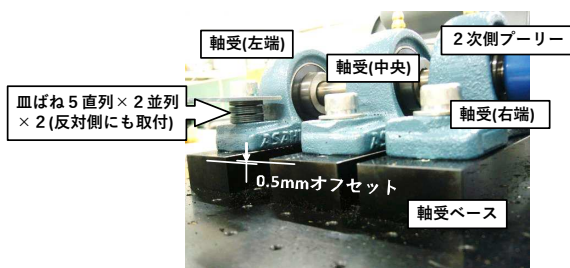
4. まとめ

製造現場で広く使用されるモータに対して精度良く異常検知と故障予測を行うため、振動データだけでなく、電流や音、温度、環境などの様々な物理量を計測し、計測データを蓄積するためのモータ状態計測システムを試作した。また、製造現場ではモータ異常を適当なタイミングで発生させることが事実上困難である。このため、異常状態を再現し計測データの特徴を捉えること、軸受に対して人工的な負荷をかけて寿命加速させることにより短期間で異常に至る計測データを収集することを目的としたエミュレータを試作した。このエミュレータは皿ばねにより軸受荷重を生成することによりコンパクトなシステムとすることができた。さらに開発したシステムにより、正常モータと異常モータの振動加速度データを計測し、時系列データや周波数分布を得ることで潤滑油不足などの異常を捉えることができ、モータ状態計測システムの基本的な動作を確認した。

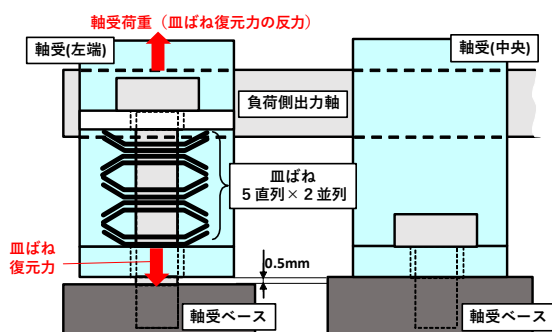
今後は本計測システムを使用し軸受が異常に至るまでの計測データを収集し、解析することにより、モータの異常予測を試みる。また、本計測システムを製造現場のブロワモータに適用することで、製造現場での計測データの変動からも分析を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 経済産業省, 2019年版ものづくり白書, 2019
- 2) 日本規格協会, 転がり軸受-動定格荷重および定格寿命 JIS B 1518, 2013
- 3) 野田伸一, モータの騒音・振動と対策設計法, 科学情報出版株式会社, 2014



(a) 負荷側拡大写真



(b) 荷重生成模式図

図6 皿ばねによる負荷側軸受への荷重生成