データ解析による生産設備の保全に関する研究（第 2 報）

生産技術部
大坪昭文　中野太郎

製造業において，生産設備の摩耗や疲労・劣化による不具合は避けられない現象である．従来，熟練技術者が装置の稼働音を聞く，あるいは掌で振動を感じるといった官能評価によって機器類の不調を捉え維持管理を行っていたが，信頼性・再現性に課題があった．また，少子高齢化に伴う人手不足や技能伝承問題が深刻化し，属人的な保全活動の維持が困難になってきており，IoT や AI などを活用した設備保全の省力化や自動化の必要性が高まっている．本研究では，生産設備の動力源として用いられる三相誘導電動機の状態診断技術の高度化を図るため，位相情報を含んだ電圧・電流波形データを計測・収集可能なエッジデバイスを試作し，重量物搬送用コンベア装置へ本デバイスを設置した．また，稼働データ収集を行う計測システムを構築して，実機における有効性を確認した．

1. はじめに

製造業において，主要な装置に故障が発生すると，修理のために生産ラインを長時間停止せざるを得ず，納期の遅延や生産計画の変更等，企業の生産活動に多大な影響を及ぼす．一方，生産設備の摩耗，疲労および劣化による不具合は避けられない現象であるため，従来は，熟練技術者による装置の稼働音の聴診や振動の触診等の官能評価によって，機器類の状態監視および維持管理が実施されてきた．しかしながら，これらの手法には信頼性および再現性の確保に課題がある．また，少子高齢化に伴う人手不足や技能伝承問題が深刻化し，属人的な保全活動の維持が困難になってきており，IoT（Internet of Things）や AI（Artificial Intelligence）などを活用した自動化や設備保全が急務とされている．

本研究では，三相誘導電動機（三相交流モータ）の電圧・電流波形などの生産設備稼働データに基づき，故障や劣化といった装置異常の予兆検知に関わる技術開発を行う．本年度は，位相情報を含む電圧・電流波形を計測・収集するエッジデバイスを試作開発し，重量物搬送用コンベア装置へ本デバイスを設置した．更に現場でのデータ収集を行う計測システムを構築して，実環境での有効性を確認した．

2. 計測システムの構築

2.1 交流電流・電圧測定用 IoT デバイスの開発

工場や生産現場では多くの設備機器が電力で稼働しており，ファン，ポンプ，搬送機などの動力源として用いられる三相誘導電動機は，生産効率の観点から安定した連続運転が求められる．しかし，長時間使用されることにより，動力源であるモータあるいは駆動機構が劣化すると，トルクやインピーダンスの変化，ローターとステータ間のエアギャップ変動などが発生し，モータの電流に微小な信号変化が生じることが予想される．このような変動を高感度に検出するために，電圧および電流波形をデジタルデータとして蓄積・分析し，装置の各種状態を診断することが，保全効率の向上に寄与するものと考えられる．

設備に用いられる駆動モータの多くは交流電源で動いており，電気信号は周期的に変化している（西日本では 60Hz）．これらの信号波形をデジタルデータとして取得するには，機器に供給される電源線に電流および電圧測定用アナログセンサを取り付け，電源周波数に対して十分に高いサンプリングレートを持つ計測デバイスが必要となる．

2.2 電流センサ

電流センサには，シャント抵抗型，CT（カレントトランス）型，ホール素子型等があるが，ここでは安価で機器の電源線に取り付けやすい CT 型を採用する（図 1）．センサからの電流値はシャント抵抗で電圧値に変換するが，プラス/マイナスの周期的なアナログ信号（図 2）なので，電流波形としてデジタル信号に変換（AD 変換）するためにはプラス領域に底上げ（オフセット電圧を加算）する電子回路が必要であり [1]，図 3 に示すように同じ値の抵抗 2 個で直流電源電圧を分圧し電流センサのグランド側につな

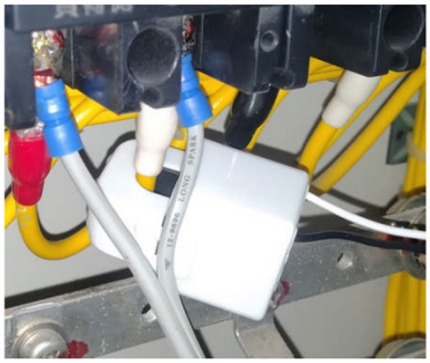


図 1　CT 型電流センサ

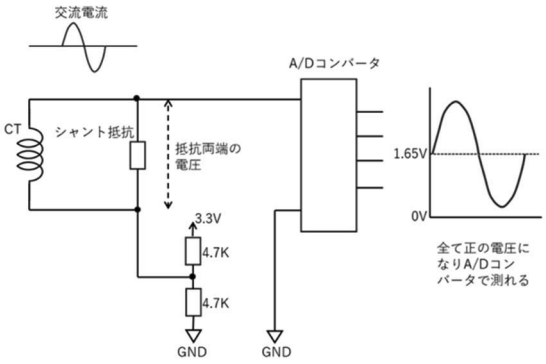


図 3　交流電流波形の測り方

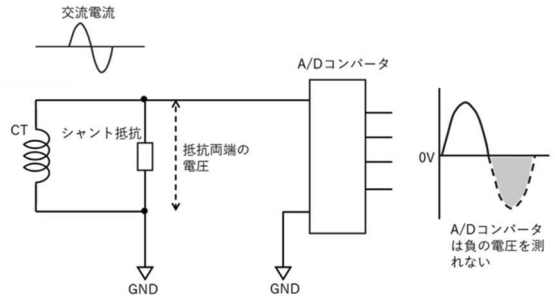
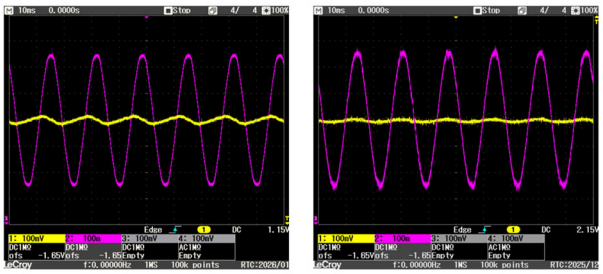


図 2　交流電流測定原理



(a) コンデンサ 0.1μF　　(b) コンデンサ 10μF

図 4　基準電圧のオフセット脈流対策

げる. ここで 200V 用電気ヒーターの電源線に CT 型電流センサを取り付け，シャント抵抗 50Ω の両端の波形をオスロスコープ（LeCroy 製 WaveJet 354A）で確認した（図 4(a)）. 電流波形（マゼンタ色）は 60Hz 周期として観察されたが，オフセット電圧には安定化のため 0.1μF のコンデンサを入れていたにもかかわらずオフセット電圧を加算したゼロＶ波形（黄色）に脈流が見られた．コンデンサを 10μF まで増やし脈流を減らしている（図 4(b)）が，基準値の傾向としてデータ収集しておくこととする.

2.3 電圧センサ

交流電圧波形を測定するためにはトランスを用いてマイコンに入力できる電圧レベルに変換し，電流波形計測と同様にオフセット電圧を加算する電子回路が必要となる．ここでは交流 200V をマイコンの電源電圧 Vcc のレベルへ変換する市販の交流用電圧センサ（ZMPT101B）を利用する. 本センサの動作確認のため 200V 用電気ヒーターを用いて，その電源線の交流電圧計測外観を図 5 に示すとともに，その波形をオシロスコープで観測した（図 6）. 200V 入力波形（黄色）に対し出力波形（マゼンタ色）とには位相のずれが見られる．これは交流用電圧センサの回路における２段の反転増幅とバンドパスフィルタの結果と考えられる. 200V 用電気ヒーターにおける電流センサと電圧センサからの波形をオシロスコープで確認した（図 7，電圧は黄色：電流はマゼンタ色）. 電気ヒーターは電気回路素子としては抵抗なので，原理的に電流と電圧の位相差は生じないが，電圧センサの特性から周期のずれが生じているため，収集した波形データを分析する際はこの位相差を考慮する必要がある.

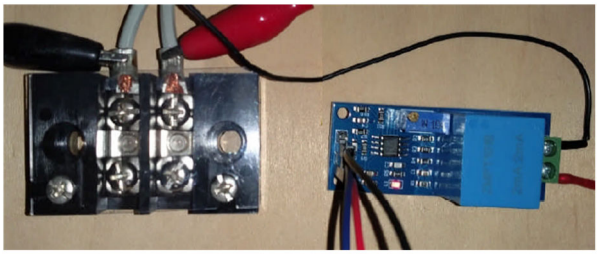


図 5　交流電圧計測の外観

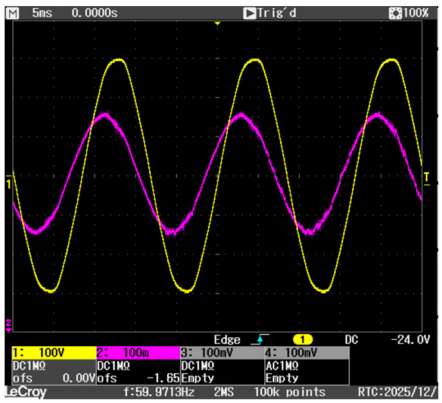


図 6　AC200V 交流電圧の入力波形（黄色）と
出力波形（マゼンダ色）
2 回の反転増幅により位相が 2π 弱遅れている

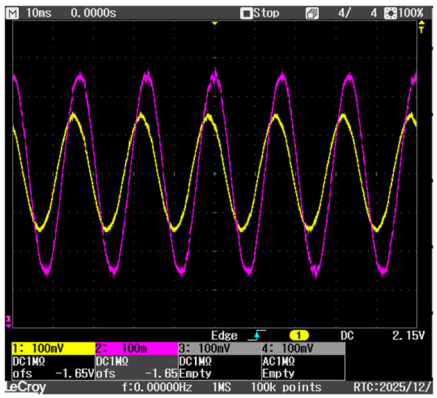


図 7　センサ出力後の電圧（黄色）と電流（マ
ゼンダ色）のアナログ波形

3. IoT デバイスの設計製作

交流電流センサから２個，交流電圧センサから１個，計３個のアナログ信号をデジタルデータ化するため A/D 変換を行う IoT デバイスを設計製作する．ここでは，マイコンに M5Stack Basic [2)]を採用する．このマイコンは WiFi の通信規格が利用できるため昨年度構築した API サーバ[3)]に送信可能であり，CPU はデュアルコアの ESP32，フラッシュメモリ 16 MB SPI を搭載し高速なプログラム実行が可能である．また，Grove インターフェース（汎用コネクタ）をはじめ，I2C，SPI 規格などに対応し拡張性に優れており様々な IoT アプリケーションの開発に広く利用できる．プログラミングの統合開発環境（IDE）としては，Microsoft 社の Visual Studio Code（VS Code）を使用し C++言語で開発した．

マイコンの M5Stack Basic の A/D 変換用入力ポートが２個だったため，別途 AD 変換 IC として入力数８チャンネル 12 ビットの分解能をもつ MCP3208 を用いる．MCP3208 は SPI 通信インターフェースにより M5Stack Basic から制御することができる．図 8 に交流電流・電圧波形計測用 IoT デバイス回路図を，図 9 に交流電流・電圧波形計測用 IoT デバイスの外観を示す．なお，M5Stack Basic とのインターフェース用にオリジナルの拡張基板を設計試作して，電流センサ，電圧センサ，および AD 変換 IC などを配置した．

交流電源の周波数は 60Hz（西日本の場合）なので，その周期は約 16.7m 秒である．1 周期の波形を 20 点で離散化するために約 800μ 秒間隔でサンプリングした．測定時間は 50 周期分の約 0.8 秒とする．電流についてはオフセットした基準値と実際の測定値を，電圧については実際の測定値を，1 サンプリングで３回 A/D 変換することになる．M5Stack Basic では約 0.8 秒間計測した後，３つの波形を液晶上にグラフ表示している．グラフ表示するのに時間を要するため結果として約 1 秒間隔での波形観測となる．また，直近の 50 周期分のデータを 30 秒間隔で API サーバへ WiFi 経由で送信している．サーバ側では受信したデータをファイルとして保存している．

計測した 200V 用電気ヒーターにおける電流と電圧の波形の例を図 10(a)に示す．オシロスコープでの観測（図 7）の際と同様に電流と電圧の波形に位相差が見られる．図 10(b)は電流と電圧の波形の位相差を補正して同位相にした場合である．企業の工場や生産現場で電動機が使用されている場合，負荷変動で位相差（力率）を観測する必要が出てくることが考えられるので，分析の際の前処理として考慮する必要がある．

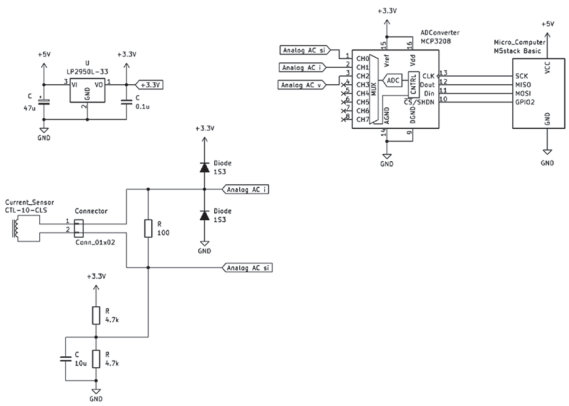


図 8　交流電流・電圧波形計測用
IoT デバイス回路図

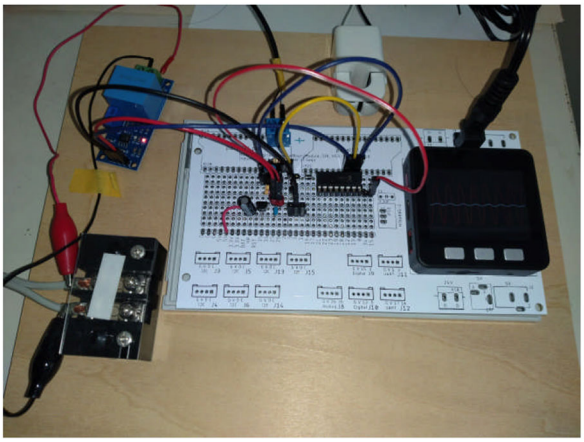
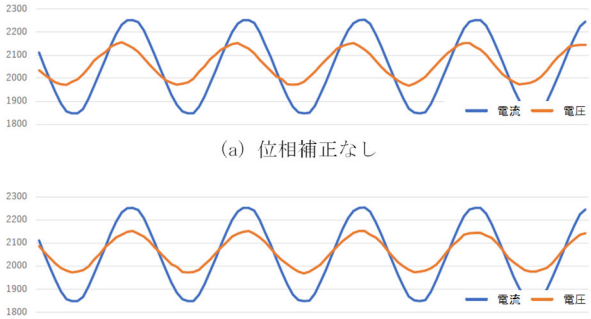


図 9　交流電流・電圧波形計測用
IoT デバイス回路の外観



（a）位相補正なし

（b）電圧波形を19/21サンプリング進めたもの

図 10　A/D 変換後の電流電圧波形比較

4. おわりに

本研究では，三相誘導電動機の状態診断に向けた電圧・電流波形の解析技術の高度化を目的とし，位相情報を保持した波形データを収集する IoT エッジデバイスの開発に取り組んだ．従来，電気信号の計測システムは高価な専用機器に依存することが多く，生産現場への導入にはコスト面での課題があった．そこで，CT 型電流センサと小型電圧センサ（ZMPT101B）を組み合わせることで，低コストかつ電源線への取り付けの容易性を確保した．また，マイコンの性能とデータ送信効率のバランスを考慮し，M5Stack Basic と外部 AD 変換 IC（MCP3208）を用いた構成により，800μ 秒間隔（1 周期約 20 点）のサンプリングで波形計測しながら，液晶ディスプレイによる現場での波形確認機能と WiFi による定期的なデータ送信機能を実装した．

開発にあたっては，電流センサのオフセット電圧に脈流が生じるという回路設計上の課題を，コンデンサ容量の最適化により緩和できることを実験的に確認した．また，電圧センサの位相特性に起因する電流波形との位相差を定量的に把握し，データ解析前処理において位相補正が可能であることを示した．これらの検討により，計測データの信頼性向上に向けた具体的な設計指針を得ることができた．

実際に 200V 電気ヒーターを用いた検証実験において，約 0.8 秒間（50 周期分）の連続波形を 1 秒間隔で観測し，30 秒間隔でサーバへ送信するという実環境での運用が可能であることを確認した．特に，純抵抗負荷においても位相差が検出されたことから，センサ特性を考慮したデータ補正の重要性が明らかとなった．

現在，開発したデバイスを重量物搬送用コンベア装置に設置し，実稼働データの収集を継続している．今後は，収集した電圧・電流データに基づき，波形の微小変動から異常の兆候を検知する解析技術の開発に取り組む予定である．

参考文献

1) 電流センサ：下島健彦, IoT 開発スタートブック，昭和情報プロセス株式会社，137-166（2019）
2) M5StackBasic, https://docs.m5stack.com/ja/core/basic
3) 中野太郎，大坪昭文，データ解析による生産設備の保全に関する研究（第 1 報），佐賀県工業技術センター研究報告書，2025，No.33，p.67-70.