

# マイコンを用いた電力測定装置の開発

## Development of Microcontroller based Electrical Power Measurement System

市川 修 南川 英樹 小林 浩昭 (職業能力開発総合大学校)

Osamu Ichikawa, Hideki Minamikawa and Hiroaki Kobayashi

旋盤・フライス盤等の機械加工の職業訓練において、受講生が加工状態を定量的に把握することができれば、効果的な技能の習得が期待できる。モータを動力源とする機械は負荷の状態や機械の状態によって消費電力や電流などが変化するため、加工機械の電気入力を測定すれば、加工状態や加工条件の適否を判断する情報が得られる。本研究では、機械加工作業の妨げにならず、取り付けが容易に行える加工機械のモニタリング装置の構成を検討し、その装置の一部である電力測定装置を設計・製作した。本装置はマイコンを用いて小型で安価な構成とした。単相電力と三相電力の両方への対応、ひずみ電流波形への対応を可能とする演算処理方法を提案し、動作確認を行った。

キーワード：マイコン、三相電力、消費電力、状態診断、故障診断

### 1. はじめに

旋盤・フライス盤等の機械加工において、切削抵抗の大きさなどを指標として、作業者が自ら設定した加工条件の妥当性を確認できれば、効果的な技能の習得が期待できる。加工機械の切削抵抗を測定する方法として、切削動力計を用いた方法や、ひずみゲージを用いた方法などがある<sup>1)</sup>。これらは三分力の測定が可能であるが、取り付け・取り外しに手間がかかること、高価であること、測定装置が加工作業の妨げになることなどの問題がある。一方、加工機械やモータの入力である電気を測定することにより、機械の負荷状態を推定したり、オンラインで機械の故障検出・故障診断を行ったりする手法も、様々なものが提案されている<sup>2,3)</sup>。主軸モータの電圧・電流を測定すれば、比較的精度を高めることができるが、機械の内部にセンサを取り付けるのは手間がかかる。また、加工作業を行いながら測定結果を確認するのが困難であることから、機械加工の職業訓練への適用は困難である。

本研究では、機械加工の技能を習得しようとする訓練生のために、加工作業中に切削抵抗の大きさを確認できるモニタリング装置を開発する。加工作業の妨げにならず、取り付け・取り外しを容易にするために、旋盤・フライス盤等の電源ラインにセンサを接続して機械の消費電力を測定し、切削抵抗を推定する方式とした。この装置は、小型で安価、種々の加工機械への対応が求められる。そこで本研究では、モニタリング装置の一部である加工機械の消費電力測定装置について、加工機械の電源の種類や電流波形によらず使用できる安価な装置構成と演算処理方法を検討する。機械の電源の種類として三相 200V、単相 100V、単相 200V の 3 種類、電流波形

として正弦波、高調波成分を含むひずみ波やパルス状の波形を想定し、種々の負荷に対応できる電力測定方式を提案し、電力測定装置の開発と動作確認を行う。

### 2. モニタリング装置の構成と原理

#### 2.1 モニタリング装置の構成

本モニタリング装置は、加工機械などに取り付け、加工作業者が機械の動作状態をオンラインで確認するためのものである。仕様を以下に示す。

- 装置の取り付け、取り外しが容易であること。
- 三相 200V、単相 200V、単相 100V のいずれの電源で動作する加工機械にも接続できること。
- 電流波形が正弦波、高調波成分を含むひずみ波やパルス状の波形のいずれであっても消費電力を測定できること。
- 回転角度もしくは回転速度センサを備え、消費電力からトルクや切削抵抗を推定し、液晶画面に表示できること。
- ボタンスイッチを備え、演算に必要な情報の入力、表示内容の切り替えができること。
- 装置が加工作業の妨げにならず、加工作業中に表示内容の確認や操作が容易に行えること。

図 1 にモニタリング装置の設置方法を示す。電圧・電流検出器を電源と加工機械などの負荷との間に接続する。検出器からの信号をもとに消費電力や切削抵抗を演算・表示する機器は、加工作業の妨げにならない大きさとし、作業者が操作・視認しやすい場所に設置する。

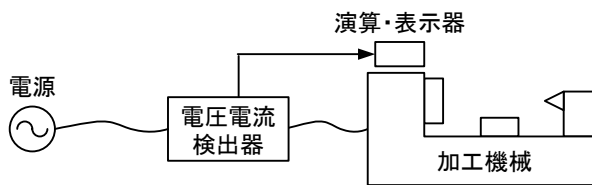


図1 モニタリング装置の設置方法

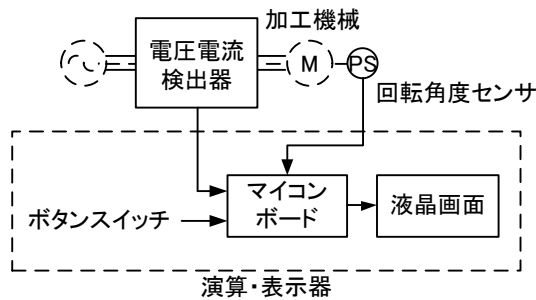


図2 モニタリング装置の全体構成

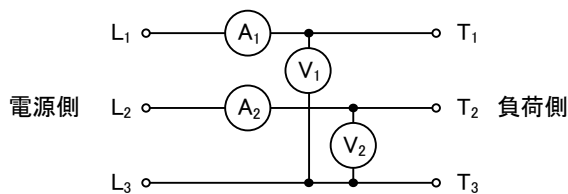


図3 電圧電流検出器の構成

図2にモニタリング装置の全体構成を示す。電源は単相もしくは三相である。負荷は加工機械であるが、主に電力を消費するのは主軸を駆動するための電動機である。マイコンは電圧電流検出器の電圧・電流信号をもとに消費電力を計算する。この消費電力を回転速度で割れば負荷トルクを推定でき、さらに加工半径で割れば切削抵抗が求まる。消費電力、トルク、切削抵抗などの情報は小型液晶画面に表示する。なお、回転速度は、主軸に設置した非接触式回転角度センサの信号を演算処理することにより求める。

図3は電圧電流検出器の構成である。電圧センサと電流センサを2個ずつ備え、それぞれ電圧の瞬時値  $v_1, v_2$ 、電流の瞬時値  $i_1, i_2$  をアナログ信号として出力する。

## 2.2 電力計測の原理

電圧・電流の瞬時値から電力を求める方法は複数考えられる。電圧・電流の大きさ、電圧と電流の位相差を測

定して電力を求める方法は、演算処理が少なく済むが、電流波形が歪んだ場合に正確な電力が求められない。特に、小型の加工機械でコンデンサ入力型整流回路を内蔵しているものは、電流波形がパルス状になるため位相差の測定が困難である。また、基本波成分を抽出するには多くの演算処理が必要となる。

そこで、マイコンを用いて波形によらず正確な電力を求めるために、本研究で提案する装置では瞬時電力から消費電力を求めることとした。

三相正弦波交流の電力  $P_3$  は、図3の電圧電流検出器から得られる電圧、電流の瞬時値  $v_1, v_2, i_1, i_2$  を用いて、次式により求めることができる。

$$P_3 = v_1 i_1 + v_2 i_2 \quad (1)$$

単相正弦波交流の電力  $P_1$  は、電源を端子  $L_1, L_3$  に、負荷を  $T_1, T_3$  にそれぞれ接続し、電圧、電流の瞬時値  $v_1, i_1$  を用いて、次式により求めることができる。単相の瞬時電力は電源電圧の半分の周期で脈動するため、電力の周期の整数倍の期間にわたって平均を計算し、有効電力を計算する必要がある。

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T v_1 i_1 dt \quad (2)$$

電流波形が歪んでいた場合、単相電力は式(2)で求められるが、式(1)による三相電力は脈動する。さらに、式(1)ではノイズ等による影響を受けやすい。そこで、これらの問題を解決し、三相電力と単相電力の両方を同じ装置で計測するために、次式により電力を計算する。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (v_1 i_1 + v_2 i_2) dt \quad (3)$$

ここで、積分期間  $T$  は、電力波形1周期の整数倍、すなわち電圧波形半周期の整数倍である。また、実際の計測では、一定の時間間隔でサンプリングした電圧・電流データを用いて式(3)に相当する演算を行う。

## 3. 構成要素の選定と試作

安全な計測を行うため、電圧センサ、電流センサはいずれも閉ループホール効果を利用し、一次側と二次側が絶縁されているものを選定した。分解能を高めるため、端子台の接続によって電流センサの一次側巻数を1、3、5ターンから選択できるようにした。電圧・電流センサの出力は正負の電流信号であるため、それらを0~5Vの範囲の電圧信号に変換する回路を製作した。

回転角度センサは小型の反射型光電式とした。主軸に

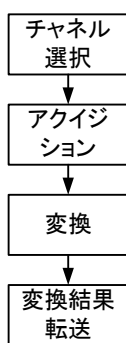


図4 A/D変換の処理 (1ch分)

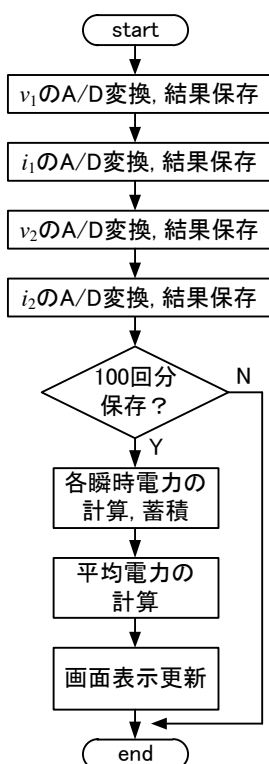


図5 割り込み演算処理

表1 乗算に要する処理時間

処理内容	処理時間
float(24-bit)同士の乗算	100 $\mu$ s
long(24-bit)同士の乗算	36 $\mu$ s

反射シールを貼り、その周辺にセンサを磁石で取り付けることとした。

マイコンへの入力、電圧・電流センサからのアナログ信号 4ch、回転角度センサからのデジタル信号 1点、電力計測および切削抵抗等の演算処理の設定などのた

めの押しボタンスイッチ入力 6点である。また、マイコンからの出力は、液晶画面表示のためのデジタル信号 6点である。入出力信号の数から、マイコンは microchip 社の PIC18F25K22 を選定した。このマイコンは、デジタル I/O を最大 25 本、アナログ入力を最大 17 本使用することができ、10 ビットの A/D 変換器を内蔵している。また、8 ビット×8 ビットのハードウェア乗算器を備えており、高速な電力演算が期待できる。マイコンのクロックは 32MHz とした。

液晶表示器は 16 文字×2 行のキャラクタディスプレイであり、視認性を高めるために比較的大きいものを採用した。カーソルを含む 1 文字の大きさは、約 5mm×10mm である。

マイコンのプログラム開発は、microchip 社の統合開発環境 MPLAB X IDE と、C コンパイラ XC8 を使用した。コンパイラは最適化機能が制限されている無償版である。

#### 4. 電力計測のための演算処理

##### 4.1 処理時間の評価

モニタリング装置のうち、電力測定の実装し、マイコンの処理に要する時間を実験的に評価した。

図4は A/D 変換 1 チャンネル分の処理を示している。選定したマイコンは、A/D 変換回路への入力信号を内部で切り替えることにより、複数チャンネルの A/D 変換を実現している。瞬時電力を計算するためには、電圧と電流のアナログ信号計 4 チャンネルについて、1 チャンネルずつ順に図4の処理を行い、それぞれ別の int 型変数 (16 ビット) に転送する必要がある。A/D 変換のクロック周期を最短の 1 $\mu$ s に設定し、A/D 変換の処理に要する時間を計測した。処理時間の計測は、計測対象となる処理の前後でデジタル出力を変化させ、その時間間隔をオシロスコープにより測定した。図4の処理を 4 チャンネル連続で行うために要した時間は 94 $\mu$ s (1 チャンネルあたり 23.5 $\mu$ s) であった。単に 4 チャンネル分のデータを取り込むだけであれば、10kHz でのサンプリングが可能である。

実際には、A/D 変換したデータを用いて式(3)の計算を行うために、

- 10 ビットの変換データ (int 型) から、実際の電圧・電流 (float 型) を求める
- 電圧と電流の積を求める
- 求めた積を加算し、最後にデータ数で割る (もしくはデータ数で割りながら加算する)

という処理が必要である。4 チャンネル分の変換データから瞬時電力を求めるためには、float 型同士の乗算が不可欠である。乗算の演算処理には時間がかかるため、A/D 変換の処理と同様に処理時間を計測した。表1に乗算に要する時間の計測結果を示す。

#### 4.2 処理手順の検討

積分計算を行うために、タイマ割り込みを用いて一定の時間間隔で電圧・電流信号を取り込む。測定の精度を上げるためには、高速にサンプリングして多くの瞬時電力を平均化処理したい。演算結果の画面表示は、常に最新の結果を表示することが望ましいが、作業者が読み取ることを考慮し、1秒間に5回程度の画面更新とした。

A/D 変換の待ち時間に演算処理をすることもできるが、表1の結果より、電力の計算は100μsの間には収まらない。そこで、一定期間電圧・電流データを取り込んだ後、まとめて演算して表示する方式とした。変数のメモリの制約から、10kHzのサンプリングで10ms間、100回分のデータを保存し、平均電力を計算することとした。これは電源周波数50Hzにおける単相電力波形の1周期に相当する。60Hzの場合は8.33ms間のデータから計算を行う。図5に割り込み処理のフローチャートを示す。

保存されている100回分(400個)のデータから瞬時電力を積分し、平均電力を計算するのに要する時間を計測した結果、136msであった。A/D変換の時間とあわせても、1秒間に5回以上の電力測定と画面更新が可能である。

#### 4.3 測定精度の検討

本装置は、マイコンに内蔵されているひとつのA/D変換器を切り替えて使用するため、電圧・電流の同時サンプリングを行うことができない。式(3)の被積分関数において、電圧と電流の間、および第1項と第2項の間には、時間的なずれが生じる。このずれによる影響を検討した。

サンプリングは、 $v_1, i_1, v_2, i_2$ の順に行う。このとき、式(3)における $v_1$ と $i_1$ および $v_2$ と $i_2$ の計測には、それぞれ図4の処理時間に相当する23.5μsの時間的なずれが生じる。このずれによる電力の演算誤差を計算した。電源周期 $T$ に対して電流の計測が $\Delta T$ ずれると、次式に示す $\Delta\phi$ [deg]だけ位相が遅れているように観測される。

$$\Delta\phi = \frac{\Delta T}{T} \times 360 \quad (4)$$

電源周波数50Hzでは、23.5μsのずれが0.423度の位相遅れに相当する。これによる電力の演算誤差

$$\left| \frac{\Delta P}{P} \right| = \frac{\cos\phi - \cos(\phi + \Delta\phi)}{\cos\phi} \quad (5)$$

を図6に示す。誤差の割合は力率角 $\phi$ によって異なる。力率が低いほど影響が大きくなるが、力率0.2(力率角78.5度)においても誤差は3.6%程度である。

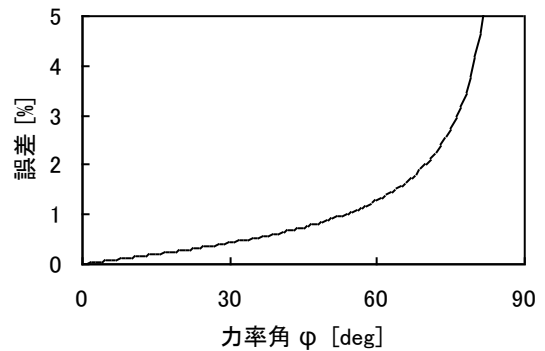


図6 電力の測定誤差

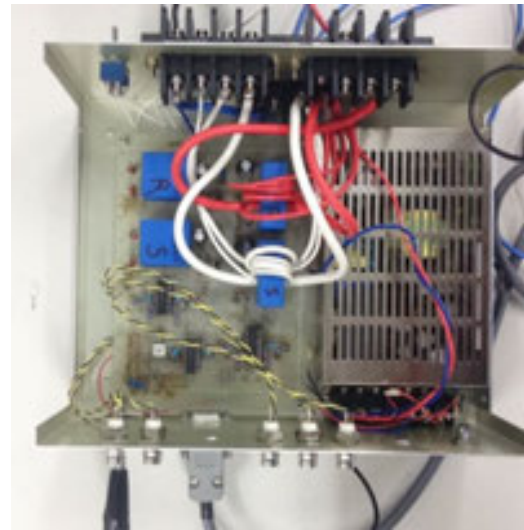


図7 電圧電流検出器

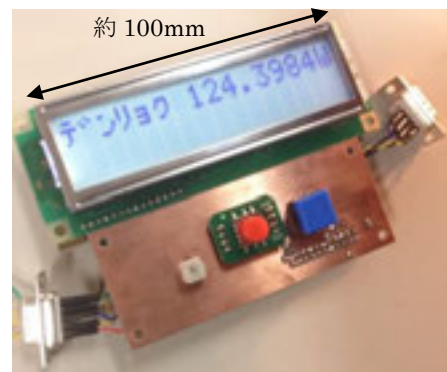


図8 演算・表示器

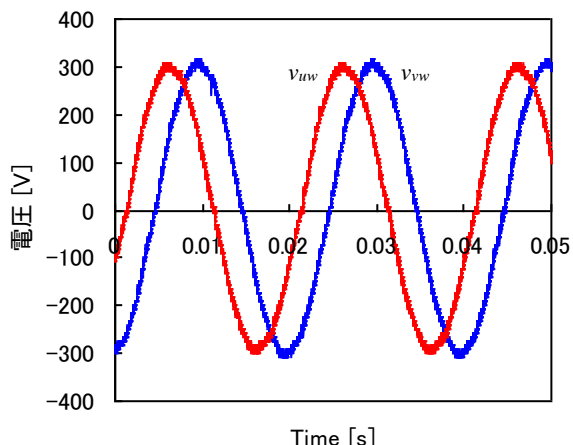


図9 電圧信号

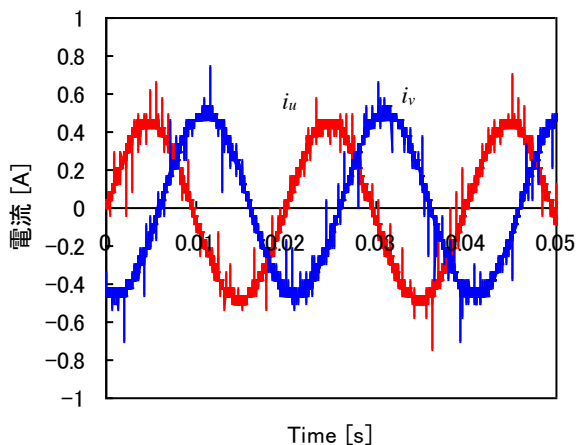


図10 電流信号

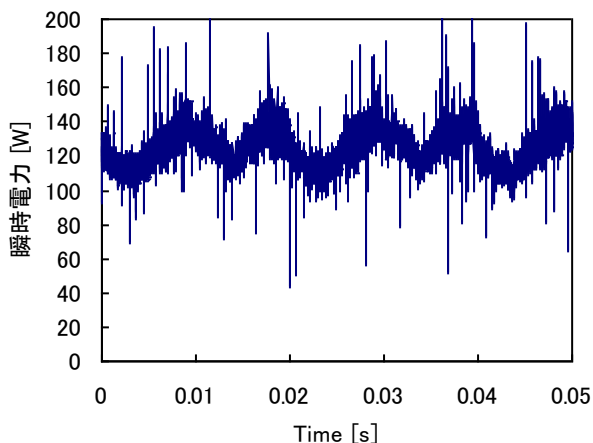


図11 瞬時電力

式(3)の被積分関数第1項と第2項の間には、 $47\mu\text{s}$ の時間的なずれが生じる。しかし、定常状態にある電力を

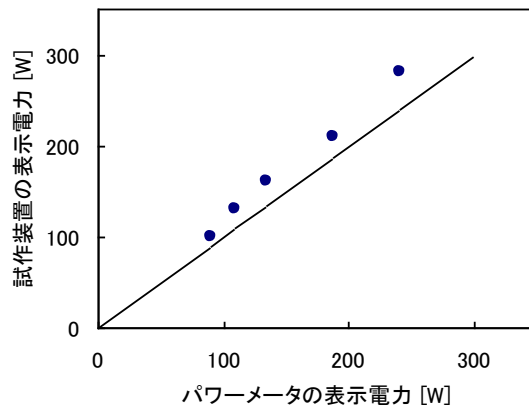


図12 電力計測結果

1周期分積分すれば、その誤差は打ち消される。また、過渡的に変化する状況であっても、100回分の瞬時電力の平均を取るにより、その変化による誤差は極めて小さくなる。

以上より、A/D変換の時間的なずれによる電力の測定誤差は無視できることがわかる。

## 5. 電力計測結果

### 5.1 センサからの信号と電力

図7、図8は、それぞれ製作した電圧電流検出器、演算・表示器である。演算・表示器は、設置したときに邪魔にならないようにすると同時に、液晶表示が見えやすい大きさになるように配慮した。

電力測定装置としての動作を確認するために、三相200V電源と120W純抵抗負荷との間に本装置を接続し、三相電力を計測した。図9、図10は、電圧電流検出器からマイコンに入力される信号をオシロスコープで測定した結果である。実際は0~5Vの信号であるが、実電圧、実電流を表すように大きさとレベルを変換して示している。図11は図9、図10の波形から、瞬時電力を求めたものである。若干の脈動が見られるが、図11の瞬時電力の10ms間の平均値は123Wである。このときの電力演算表示器の表示は、図8に示すとおり124Wであった。電圧・電流信号から電力を演算する機能については、正しく動作していることがわかる。

同じ条件で横河電機(株)製のパワーメータで電力を測定した結果は109Wであり、10%程度の誤差があった。この誤差は電圧電流検出器の電圧・電流信号に起因するものである。図9で電圧信号が実際より大きくなっていることが原因として考えられる。

## 5.2 電力の比較

図 12 は、三相誘導機を接続し、誘導機の負荷の大きさを変えた時の電力である。横河電機(株)製のパワーメータによる測定結果と、開発した装置による測定結果を比較している。電力の大きさを変えても 10%程度の誤差があるが、電力測定装置として動作していることが確認できる。

## 6. まとめ

機械加工の職業訓練において加工状態や加工条件の適否を判断するための装置として、加工機械のモニタリング装置の構成を検討し、加工作業の妨げにならず取り付けが容易で、安価に実現できる構成を提案した。さらにその装置の一部であるマイコンを用いた消費電力測定装置を設計、製作した。本装置は A/D コンバータ内蔵のマイコンを用い、簡単な回路構成である。加工機械の電源の種類や電流波形によらず使用できる構成と演算処理方法を提案し、原理的には無視し得る程度の誤差で電力測定が行えることを示した。

提案する電力測定装置を製作して精度を評価した結果、10%程度の誤差が観測された。この原因は電圧電流検出器のゲインの誤差に起因すると推測される。

今後は、これらの誤差を修正したうえで、電力から加工機械のトルクや切削抵抗を演算する機能を実装する。さらに、機械加工のモニタリング装置として職業訓練への適用を検討する予定である。

## 参考文献

1. 松原厚: 機械加工におけるプロセス計測/制御技術の現状と動向, 計測と制御, Vol. 41, No. 11, pp.781-786 (2002)
2. 岩永英樹, 犬島浩: 誘導電動機の零相電流分析による絶縁劣化診断システムの開発, 電気学会論文誌 D, Vol. 132, No. 12, pp.1084-1090 (2012)
3. 電気学会誘導機故障診断技術調査専門委員会編: 電気学会技術報告第 1196 号「誘導機の故障診断技術」(2010)

(原稿受付 2015/3/24、受理 2015/6/10)

\*市川修, 博士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: o.ichika@uitech.ac.jp  
Osamu Ichikawa, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishimachi, Kodaira, Tokyo 187-0035

\*南川英樹, 学士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: Minamikawa.Hideki@jeed.or.jp  
Hideki Minamikawa, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishimachi, Kodaira, Tokyo 187-0035

\*小林浩昭, 修士 (工学)

職業能力開発総合大学校, 〒187-0035 東京都小平市小川西町 2-32-1 email: kobayashi@uitech.ac.jp  
Hiroaki Kobayashi, Polytechnic University,  
2-32-1 Ogawa-Nishimachi, Kodaira, Tokyo 187-0035