

マシニングセンタの瞬時電力の測定および評価に関する一考察

桑原 修

インバータ制御されたマシニングセンタ主軸モータの電力測定において、実際に企業で行われている測定の比較をした。今回の装置においては、インバータの波形を測定するためサンプリング周期が 0.05~0.01ms 程度での測定が必要であった。測定器によってはサンプリング周期が一定となっていないものがあることがわかった。また、得られた電力波形を平均化処理するとき、平均化の位相の違いによって電力波形が大きく異なることが分かった。

キーワード： 電力測定、インバータ、マシニングセンタ、モータ

1. 緒言

最近の機械加工の研究においては、加工機の主軸モータの瞬時電力を計測し、それを加工の評価に用いる研究が多くある^{(1)~(5)}。(通常、電力といえば有効電力のことであるが、本文では瞬時電力のことを電力と称す。)しかし、電力を測定したことのある者なら、ある疑問が頭に思い浮かぶはずである。ここで測定している電力波形は、本当に正しい波形であるのか。そういった疑問、疑念を持ちながらも、検証する手段を持たないため、測定器を信頼して実験を続けているのが実情である。

ここではそういった疑念に対し少しでも真の姿を知るために、各種の電力測定器で計測を行い、測定装置の違いによる電力測定について検討した。

2. 電力の測定方法

三相 3 線式交流モータの電力測定を図 1 に示す。実際のところ電力の測定には、電力計を用いる方法や、渡邊による電流・電圧を測定してコンピュータによる演算で電力値に変換する方法⁽⁶⁾などがある。

電力の測定には電流、電圧、時間の計測が必要となる。電流の測定は簡易に測定ができる電磁誘導式のクランプセンサが多く用いられ、ケーブルに流れる電流をセンサーで電圧に変換して出力している。

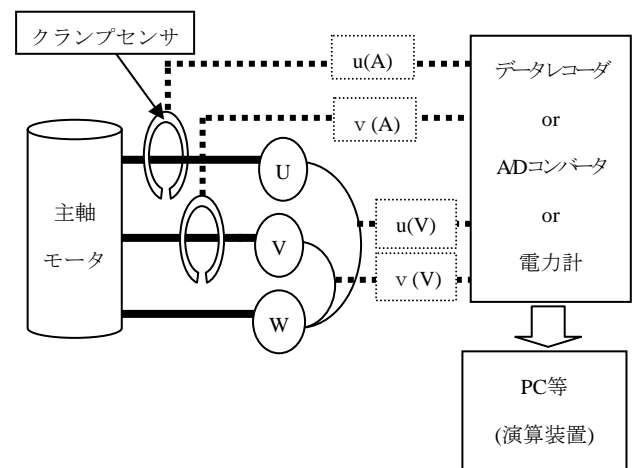


図 1 三相 3 線式交流モータの電力測定

モータの電圧やクランプセンサから出力される電圧の測定にはデータレコーダや電力計が用いられる。電流・電圧のデータから電力を求めるためには、パソコンにデータを入力して演算するか、演算機能を持った電力計で演算する方法がある。

こうした電力測定において、正しい測定が行われているかどうか疑問となるため、幾つかの方法で電力測定を行い、その違いについて考察した。

3. 電力測定の比較実験

今回の実験は、実際に企業で行っている電力測定方法について検討するため、企業の技術者と協力して、それぞれが使用している測定器で電力の測定を行った。実験は中四国公設試験機関共同研究 精密加工分野に

おける研究の一環として行った。マシニングセンタは、広島県立総合技術研究所西部工業技術センター生産技術アカデミー所有の装置(大阪機工(株)PCV40)を使用し、空転時の主軸モータの電力を計測した。このモータは、三相3線式交流式であり、電圧を正弦波PWMによるインバータ制御を行っている。最高回転速度は10000min⁻¹である。三相3線のモータ電力は、2相分の電流と電圧から算出できる⁽⁷⁾ので以下の式で算出した。

・電力の計算

$$P = u_i \times u_v + v_i \times v_v \dots \dots \dots (1)$$

・電流の計算

$$I = u_i + v_i \dots \dots \dots (2)$$

・電圧の計算

$$V = u_v + v_v \dots \dots \dots (3)$$

P: 電力, I: 電流, V: 電圧

u_i: U相電流, u_v: U相電圧

v_i: V相電流, v_v: V相電圧

ここでは、主軸の回転速度を 3000~7000min⁻¹ まで1000min⁻¹毎に変化させ、この変化に対する電力の変化を検討することとした。

今回の実験における、それぞれの計測システムの概要を表1に示す。(ア)(イ)は電流と電圧を計測し、PC上で電力を計算する方式である。(ウ)は電流と電圧の計測ケーブルを電力計につなぎ、装置内で電力を演算し出力する方式である。また、電流電圧データも出力することができる。その時、データは 1/50 又は 1/60(s)毎に自動で平均化される。

サンプリング周期は、インバータ制御された電圧波形を確実に計測するため、図2のように最も短い矩形の電圧波形の中にデータを2つ取れるように設定し0.01msとした。データを2つというのは、計測開始の位相がずれた場合でも最低1つのデータは計測できるからである。(イ)(ウ)については、装置の最大能力とした。

表1 電力測定実験の計測システム概要

呼称	測定システムの概要
(ア)	方法：電流・電圧を測定しPCで演算 ①市販の電力計をデータレコーダとして使い、電流電圧データをPCで演算 ②クランプセンサ 測定帯域:20Hz~20kHz 最大測定電流:400A ③サンプリング周期:0.01ms
(イ)	方法：電流・電圧を測定しPCで演算 ①A/Dコンバータを介しPCにデータを入力し演算 ②クランプセンサ 測定帯域:DC~100kHz 最大測定電流:200A ③サンプリング周期:0.05ms
(ウ)	方法：電力計を用いた電力測定 ①電流・電圧から電力を演算。演算は電力計が行い、自動でデータを平均化 ②クランプセンサ 測定帯域:1Hz~100kHz 最大測定電流:20A ③サンプリング周期:7.8ms ④データ出力周期:1/60s ⑤使用範囲:45Hz~66Hz用 備考:50Hz又は60Hzの電源用の電力計である。データを自動で平均して出力される。

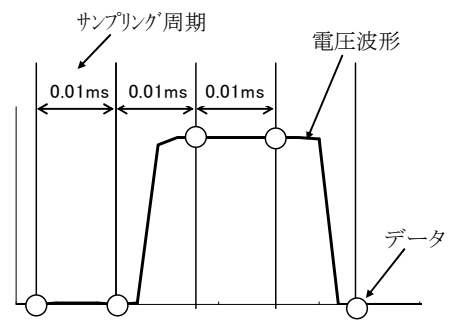


図2 サンプリング周期の決め方

それぞれの計測条件で電力測定の比較を行った。また、これらの電力データは膨大な量になり、市販の表計算ソフトでは計算が困難になるため、今回の電力データの計算には、大容量のデータでも計算可能な数値計算ソフト Scilab を用いた。

4. 結果と考察

4.1 電力の総平均値と分散値

このマシニングセンタの電力波形を図3に示す。ここではグラフを見やすくする目的で0.5msで電力を平均化してある。図の波形は(ア)の計測によるものであるが、(イ)の計測においても同様の波形が得られた。このマシニングセンタは、回転速度 5000min^{-1} の電力が不安定である特徴があり、その結果が図に表れている。他の(イ)(ウ)の測定方法でも同様に 5000min^{-1} は不安定となった。 5000min^{-1} で電力が不安定になる原因は不明であるが、すべての計測システムで同様の結果が得られたので、計測側ではなく装置側の要因で発生していると考えられる。

図4に計測した電圧波形を示す。(ウ)の計測による電圧波形は、サンプリング速度の不足からインバータ制御の電圧を計測できていないことがわかる。

図5に、回転速度と総平均電力の関係を示す。ここでの総平均電力は、得られた電力データをすべて平均して算出した。電力は、回転速度の変化に比例して上昇し、 6000min^{-1} までは電力が上昇し、 7000min^{-1} で上昇が鈍化している。サンプリング周期の異なる(ア)(イ)においても傾向が同じであるので、サンプリングが追従しないのではなく、実際の電力がそうなっているものとする。総平均電力は(ア)(イ)に比べて(ウ)は少ない電力値を示した。(ウ)の電力計は50又は60Hz電源測定用のもので、図4で見られるように今回のインバータ制御の電圧測定に追従しなかったためであり、この電力の測定には適さないことが分かる。

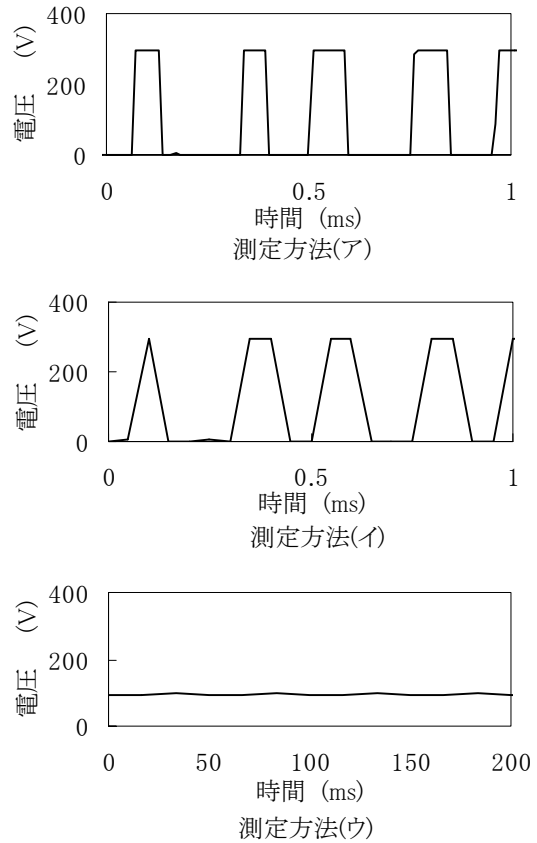


図4 電圧生波形

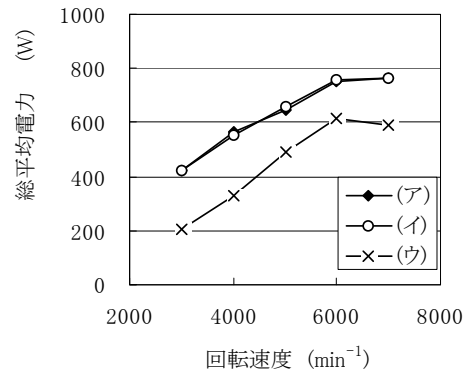


図5 総平均電力の変化

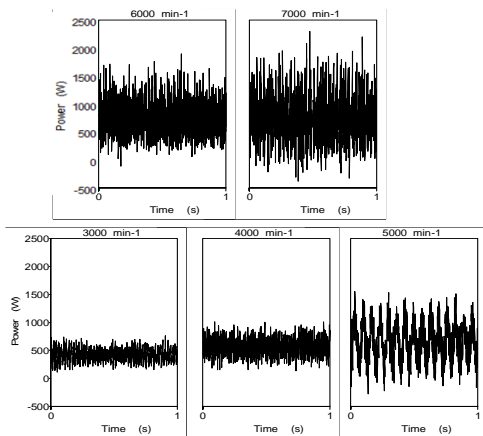


図3 電力波形

また、電力波形の評価としては、平均値だけでなく、ばらつきを表現する分散や標準偏差による方法が考えられる。図6に回転速度と分散値の関係を示す。ここでは、平均化処理を行わない電力波形から分散値を計算した。(ウ)については自動で平均化処理が行われるため、今回の評価からは省いた。結果は、総平均電力と同様に(ア)(イ)は同じ傾向を示した。

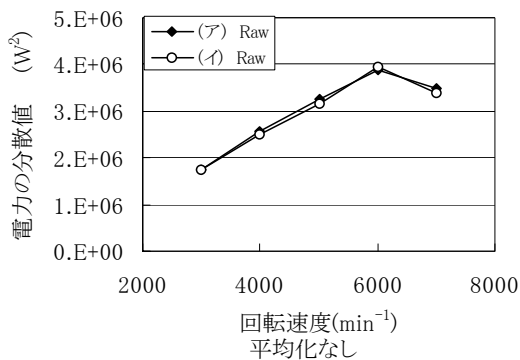
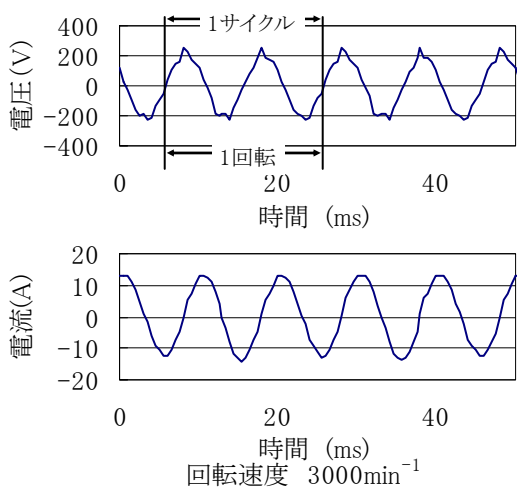


図6 主軸回転速度と電力の分散値の傾向

4.2 電力の生波形

(ア)と(イ)の計測について更に詳しく調べるため、測定された電流及び電圧波形について比較した。図7に式(2)及び(3)により計算した(ア)の電流・電圧波形を示す。ここでは波形を分かりやすく可視化するために0.5msで平均化してある。このモータは、2極で駆動しているため、1回転で正弦波形が2つ発生する。この波形の微小な部分を観察すると、複数の波形を1サイクルとして同じ波形が繰り返し出現していることがわかる。この繰り返しは、3000 min⁻¹では1回転分の波形が、4000 min⁻¹では4回転分、5000 min⁻¹では6回転分の波形が繰り返されており、回転速度によって1サイクルの波形の数が異なる特徴がある。



測定方法(ア), 0.5msで平均化

図7 電流電圧波形

この波形の繰り返し間隔において、電力波形を重ね合わせると、図8のように波形が重なる。ここでは1回転電力の最初部分だけを拡大して表示してある。

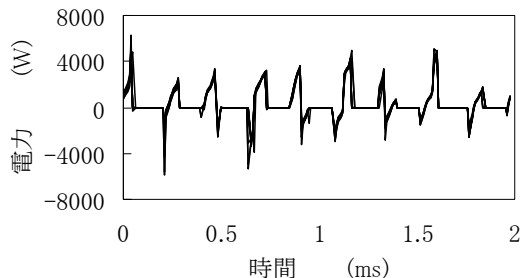


図8 (ア)の電力波形の重ね合わせ

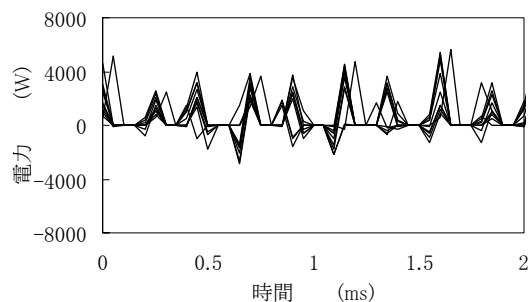


図9 (イ)の電力波形の重ね合わせ

同様の操作を(イ)の計測についても行うと、電力波形は図9のようになる。電力波形は、ある程度重なっているが、波形にずれが生じている。(ア)の波形については、100波形の重ね合わせを行っても、ほぼ同じ位置に重なるので、偶然波形が重なったとは考えられないので、ずれが生じているのは(イ)の方であると考えられる。(イ)の測定方法は、A/Dコンバーターを介してデータを直接PCに取り込んでいる。その時に取り込まれるのは電流電圧のデータだけで、時間のデータは取り込まれていない。時間データは、後からサンプリング周期の設定値を元に演算するため、サンプリングのタイミングがずれると図9のように電力波形にずれが生じることとなり、今回は、(イ)のサンプリング周期にずれが生じているものと考えられる。

ここでは、計測器の性能評価として、回転速度が一定であることを前提に1サイクルの時間で電力波形の重ね合わせを行ったが、実際に加工することを考えると、時間に対する回転のずれが発生する可能性は高い。加工負荷により回転ずれが発生するのは、当然のことであるので、その場合には、回転角度の基準を決めるなどして補正する必要がある。

4.3 電力の平均化処理

加工の電力評価においては、電力の平均化処理がよく行われる。平均化処理する場合、平均化時間と電力の周期性に注意しなければならない。図10に示す例で、ある平均化時間において平均化の位相を①から③へと徐々にシフトしたとき、電力波形に大きな差が現れる。図11に6000min⁻¹において表れる電力波形の違いを示す。平均化時間は同じだが、位相の違いにより電力波形が異なり、それは電力の分散値で表すことができる。このような現象は電力に周期性があるために起きている。

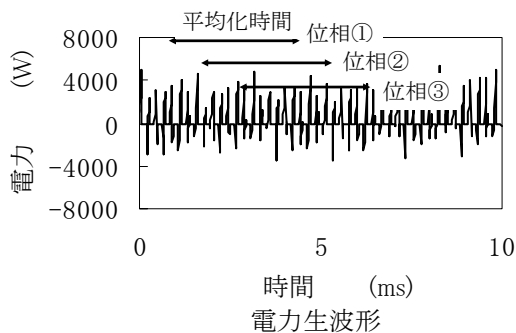
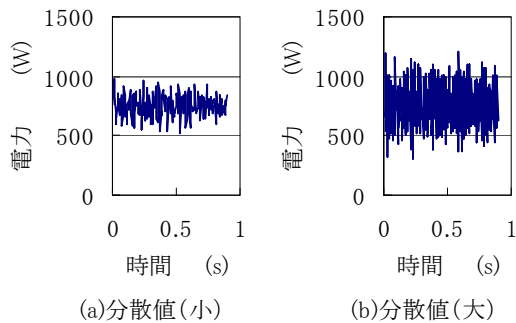


図10 平均化する時の位相



測定(ア), 回転速度6,000min⁻¹, 平均化(5ms)

図11 平均化時の位相による電力波形の違い

更に詳しく調べるために、各平均化時間において位相を0.1ms刻みに6msまでシフトさせ、そのときの電力分散値の変化を図12に示す。この図から最も差が大きいのは、平均化時間5msのときであることがわかる。6000min⁻¹における5msとは図7の電流電圧波形の1波形分の長さになる。他の回転速度でも同様の計算を行った結果、電流電圧波形の1波形分の長さで平均化を行うとき電力の分散値が大きく変化することがわかった。

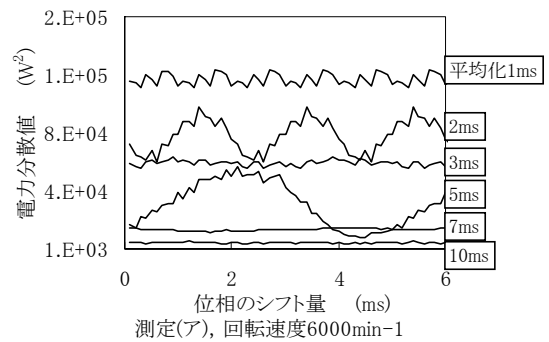


図12 位相の変化による分散値

図13に平均化の位相の変化によって生じる分散値の最大最小を示す。各回転速度において分散値に大きな差が生じているが、その差は、(ア)に比べ(イ)のほうが小さい。これは、図9でも見られるように、測定のサンプリング周期が不安定となっているため、平均化の位相を変化させたときの影響を受けにくかったものと考えられる。

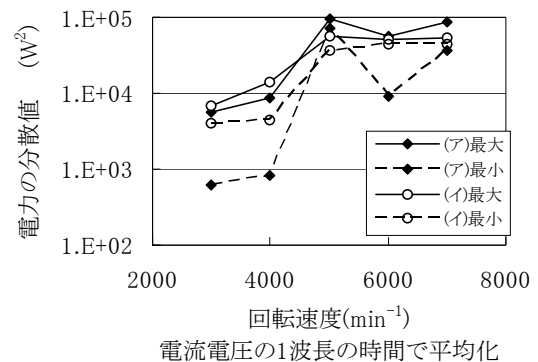


図13 電力分散値の最大と最小

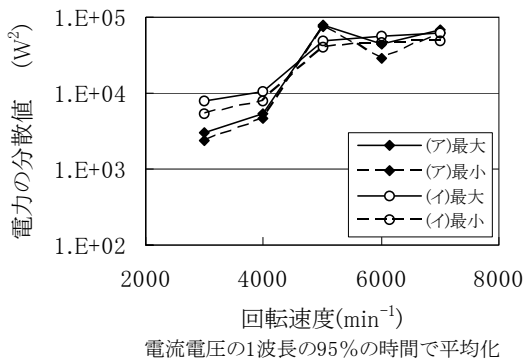


図14 平均化時間を変えた時の電力分散値の最大と最小

平均化するときの電力の周期性の問題は、平均化時間を1波長の時間から少しずつすることによって緩和できる。図14に平均化時間を1波長の95パーセントに設定したときの電力分散値の最大最小の変化を示す。その結果、図13に比べ分散値の最大最小の差が小さくなっていることが分かる。こうした電力の周期性と平均化の問題は、平均化時間=1波長以外でも起きるので、平均化処理するときには位相の違いの影響を確かめる必要がある。

図15に(ア)から(ウ)の測定による、平均化時間を変化させたときの電力の分散値の変化を示す。(ウ)については、電力計が自動で17ms平均化した結果を出力するため、その結果を掲載した。(ア)(イ)については、問題となる平均化時間以外で平均化を行い、更に位相をシフトした分散値の平均を掲載した。

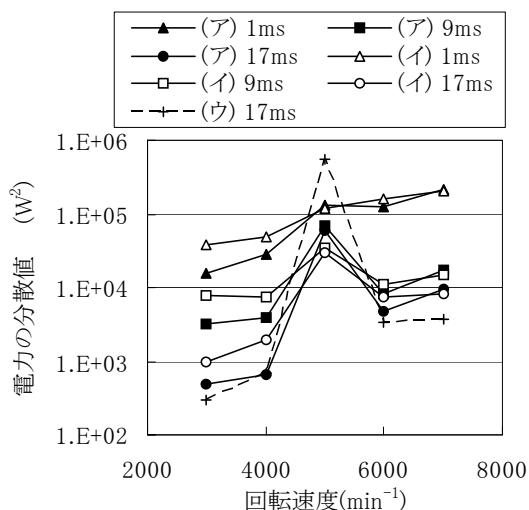


図15 平均化と電力の分散値

分散値は、平均化時間を長くすると低下するが、5000 min⁻¹ではほとんど低下しない。図3に示すように、この回転速度の電力波形には大きなうねりを含んでいる。平均化処理は、ローパスフィルタの効果があるので、周期の短い変動は消失し大きなうねり成分が残るため、この回転速度の分散値は、低下しなかったのである。(ウ)は、自動で17ms平均化を行うが、この装置でも分散値の傾向をつかむことはできる。

(ア)(イ)の分散値は、平均化することにより、図6の電力生波形から求めた分散値では見られなかった違いが出ている。これは、計測装置の違いというよりも、平均化処理の問題と考えた方がよい。計測装置によって程度は違うにしろ平均化処理の影響を受ける。平均化処理はデータ量を減らして処理を高速化するなどの効率の面で有効であるが、平均化するときの位相の影響は確かめておく必要がある。

5. 結言

マシニングセンタのインバータ制御されたモータの瞬時電力測定において、実際に行っている各々の電力測定方法について比較し、以下のことが分かった。

- (1) サンプリング周期が不足している場合があるので、電流・電圧波形を確認するなどして、サンプリング周期が十分であるかどうかを確かめる必要がある。
- (2) 測定器によっては、サンプリング周期が一定ではなく変動しているものもあり、電力の計測においては電流と電圧のみでなく、時間の計測が重要となる。
- (3) 電力を平均化処理する場合、平均化の時間と位相によって電力波形が大きく異なる。特に平均化時間が電流電圧の1波長の時間と一致するとき、電力の波形が大きく異なってくる。また、こうした問題は平均化の時間を少しずつだけで回避できる。

今回の実験で分かったことは、計測器による差があるということのみである。精密に測定するならばサンプリング周期を短くすれば良いのだが、計測の目的は、

精密に測定することではなく、正当な評価を行うことにある。そのため、今後、測定器の良し悪しを評価するには、正当な評価について明確にし、測定と評価の関係から判断することになる。

文献

- (1) 高橋和仁他、電力を利用した切削加工条件の最適化、品質工学 8, 1 (2000) pp24-30
- (2) 佐藤英憲他、新しい軽量耐熱合金の電力による穴あけ加工性の検討、品質工学 10, 1 (2002) pp49-53
- (3) 玉村都夫他、マシニングセンタ主軸の機能性評価に関する研究、品質工学 10, 4 (2002) pp26-33
- (4) 平井泰史他、ドライ加工技術の実用化/ー電力と切削重量に着目したセミドライドリル加工条件の評価ー、品質工学 10, 4 (2002) pp53-59
- (5) 久米原宏之他、ボールエンドミルによる高速フライス加工条件の最適化、品質工学 13, 4 (2005) pp74-79
- (6) 渡邊泰行、機械加工の機能性評価のための瞬時電力測定法、品質工学 13, 2 (2005) pp46-52
- (7) 計測工学ハンドブック (2005) p451、朝倉書店