研究

電動機負荷特性を利用した切削抵抗主分力の測定*

廣 田 平 一** 篠 崎 襄**

Measurement of Main Cutting Force using the Load Characteristics of an Induction Motor

Heiichi HIROTA, Noboru SHINOZAKI

In this paper, based on the load characteristics of an induction motor, which is usually the main power source of machine tools, the new measuring method of main cutting force is reported. As the slip of an induction motor is proportional to the load, the cutting energy can be measured by detecting the slip. Rotary encoder (out-put frequency is n pulse/rev) which is connected to the rotor of an induction motor is used to measure the slip and the digital counter is applied to count the electric pulse. The experiment is carried out using a lathe and the results obtained are as follows:

- (1) There is a good linearity between the cutting energy and the slip of an induction motor.
- (2) The sensitivity of this method increases as the gate time and the number of pulse increase.
- (3) In this experiment, the accuracy of this method is within $\pm 0.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ under any conditions.
- (4) Time-lag of this measuring system is less than $1/10 \text{ s}$ and this time-lag is governed by torsional frequency of the rotational elements of the machine tool.
- (5) For the reference of a gate clock, the electric power frequency method is good compared with the crystal method.

1. ま え が き

切削加工の自動化に伴い、切削現象のインプロセス測定は重要な課題であり、切削抵抗の測定もその一つである。従来、切削力の測定は工具または被削材に加わる力を変位またはひずみとして測定する方法が多くなされ、その周波数特性を向上させ、切削現象の解明を主目的として発達してきた。

切削抵抗のインプロセス測定に対し測定手段の具備しなければならない条件は、測定精度、感度が良いことはもちろん、被削材の寸法と形状、工具の寸法と形状等の多様化に対処ができること、測定装置の設置による作業領域が限定されないこと、突発事故等による装置の破損がないこと、応答速度が速いことなどが望まれる。現在、切削力のインプロセス測定法としては電力計、圧電素子、静圧軸受¹⁾、刃物台自体²⁾の変位などを利用したものが報告されているが、本報では上述した具備条件を満たす測定手段として、工作機械の主な動力源である三相誘導電動機の負荷特性³⁾を利用した切削抵抗主

分力の測定方法について報告する。

2. 測 定 原 理

図1に、ある旋盤に使用されている誘導電動機(3.7 kW)の負荷特性を示す。負荷(機械的出力)に対する電流、力率の変化は直線的でないが、すべり率は負荷に対し直線関係を示している。そこで負荷とすべり率の関係を加工における切削力と電動機のすべりの関係に適用すると次式が導かれる。

$$\frac{R_0 - R_1}{R_0} + \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{W_0}{75H} \cdot \varepsilon_0 + \frac{W_c + W_{cf} + W_f}{75H} \cdot \varepsilon_0 \quad (1)$$

図1 三相交流 3.7 kW 誘導電動機特性曲線

* 原稿受付 昭和51年11月2日。昭和49年度精機学会春季大会学術講演会(昭和49年4月6日)および昭和50年度精機学会春季大会学術講演会(昭和50年4月5日)にて発表。

** 正会員 職業訓練大学校(相模原市相原1960)

図2 測定感度と切削速度の関係

ただし, R_0 : 電動機同期速度 (rps), R_1 : 機械空運転時の電動機回転数 (rps), ΔR : 切削による電動機回転数減少分 (rps), H : 電動機馬力 (PS), ϵ_0 : 電動機定格すべり率, W_0 : 機械空運動動力 (kg·m/s), W_c : 切削動力 (kg·m/s), W_{cf} : 機械の切削に伴う摩擦動力 (kg·m/s), W_f : 切削送り動力 (kg·m/s).

式(1)において切削送り動力 W_f は旋削においては

$$W_f = \{(P + F_c)\mu + F_t\} \cdot \frac{f \cdot N}{6 \times 10^4} \quad (2)$$

で与えられる。ただし, P : 刃物台テーブル重量 (kg), F_c : 切削主分力 (kg), F_t : 送り分力 (kg), μ : 案内面摩擦係数, f : 送り (mm/rev), N : 主軸回転数 (rpm). W_f の切削動力に対する割合をちなみに求めると, $P=150$ kg, $F_c=300$ kg, $F_t=150$ kg, $\mu=0.2$, $f=0.3$ mm/rev, $N=660$ rpm, $V=2$ m/s とすると, $W_f=0.72$ kg·m/s, $W_c=600$ kg·m/s となり, W_f は W_c の 0.12% となりほとんど無視できる。また切削に伴う機械の摩擦動力はスラスト軸受, ラジアル軸受, 歯車歯面, V ベルトなどにおける摩擦動力の和であるが, これを定量的に取扱うことは困難である。これを一對の歯車伝動軸として考慮すれば, スラスト摩擦動力は相対的に小さく, ラジアル軸受および歯面の摩擦動力は原理的には歯車と軸受自体の仕様によって決まる定数と切削動力の積として求められるから, W_{cf} をここでは $W_{cf}=\alpha W_c$ とし, α を可変定数とすることの妥当性については実験的に検討することにする。また式(1)の左辺, 右辺の第1項は機械空運動動力に相当し, これを消去すると式(1)は近似的に次式のようになる。

図3 実験装置の概略

$$W_c(1+\alpha) = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{75H}{\epsilon_0} \quad (3)$$

式(3)より α が既知であれば, ΔR がわかれば W_c が求まるが, ΔR を求める手段として電動機回転軸にパルス発生器を取付け, 空運転時と切削時の出力パルス数の差を求めることにする。パルス発生器の1回転当たりの発生パルス数を n , カウンタのゲート時間を T (s) とすれば式(3)は

$$W_c = \frac{75H}{n \cdot T \cdot R_0 \cdot \epsilon_0 (1+\alpha)} \cdot n \cdot T \cdot \Delta R \quad (4)$$

となる。 ΔR をデジタル的に求めるときの必要条件は, $n \cdot T \cdot \Delta R \geq 1$ であるから, $n \cdot T \cdot \Delta R = 1$ とすれば式(4)より測定可能な分解能が得られる。すなわちデジタル測定できる最少切削抵抗 ΔF_c は切削速度を V (m/s) とすれば

$$\frac{\Delta F_c}{H} = \frac{75}{n \cdot T \cdot R_0 \cdot \epsilon_0 (1+\alpha)} \cdot \frac{1}{V} \quad (5)$$

となる。実験上の目安をつけるため, 式(5)において $T=1$ s, $\epsilon_0=0.03$, $R_0=25$ rps, $\alpha=0$ とし, n をパラメータとして $\Delta F_c/H$ と V の関係を図示すると図2のようになる。

図より明らかなように測定感度は n , T , V の増加につれ良くなり, $n=420$ P/rev とすると通常の鋼切削では $\Delta F_c/H=100$ g/PS, 研削加工では 10 g/PS 程度の感度を得られる。

3. 実験方法

実験に使用した切削抵抗主分力の測定方法を図3のブロック図で示す。

使用機械：池貝製 A-20 型旋盤

電動機：7.5 kW, 定格回転数：

1 450 rpm

パルス発生器：光反射板式とロータ

リエンコーダ

$n=60, 180, 420, 450, 900, 1800,$

3 600 (P/rev)

工具動力計：共和電業製 500 kg 工

具動力計

パルスカウンタ：

電源ゲート方式 (4 けた + オーバ
フロー)

水晶ゲート方式 (7 けた, 1×10^{-6} /
day)

被削材：S 45 C, $\phi 150 \times 300$

工具：P 20, 33-3 型 (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0, 3)

電動機の回転数変化は、パルス発生器を使用し、デジタル量として検出しているが、測定系の応答速度を調べるため、試作した F-V 変換器を用いてアナログ量とし、差動増幅器を介して電動機のすべりを電磁オシロに記録した。測定感度は n, T の増加により良くなる (図 2) が、測定精度との関係を見るため、 $n=60 \sim 3600$ P/rev の範囲でパルス発生数を変化させ、精度に対する感度の限界を調べた。

この測定法で問題となる点は電動機回転の安定性である。特に誘導電動機は電源周波数によって回転数が決まるが、電源周波数 (50 Hz) の保証安定度は $\pm 0.1\%$ とされているため、誘導電動機の回転数も $\pm 0.1\%$ 変動すると見なければならない。電動機の定格すべり率 (3% 前後) に対する周波数変動 $\pm 0.1\%$ は約 4% に相当するため、測定精度に問題がでてくる。そこで商用周波数変動の影響を相殺するため、パルスカウンタのゲート方式に電源ゲート方式を採用し、水晶ゲート方式のカウンタは参考として使用した。

この測定法では切削抵抗を直接知ることが出来ないの、工具動力計により切削主成分を測定し、これと切削速度の積 (切削動力) と電動機回転数変化との対応を検討した。切削速度は工具切れ刃の切削中央点として被削径を求め、算出した。

4. 実験結果と考察

電動機のすべりを検出することにより切削動力を求めるとき、問題となるのは測定値のばらつきである。特に電源周波数は $\pm 0.1\%$ 変動すると一般に言われているため、この周波数変動が測定値にどの程度影響するか、ま

図 4 カウンタゲート方式による測定値のばらつき

た測定感度は式 (5) から明らかなように 1 回転当たりの発生パルス数 n 、ゲート時間 T の増加により良くなるが、 n, T の変化により測定値のばらつきはどうなるか検討した。図 4 は $N=450$ rpm, $n=180$ P/rev, $T=1$ s のときの出力パルス数のばらつきを度数分布で示したもので、図 (a) は電源ゲート方式のカウンタ、図 (b) は水晶ゲート方式のカウンタでそれぞれ測定したものである。サンプリングの間隔は約 4 s である。完全無負荷状態での出力周波数は $n \cdot T \cdot R_0$ で求まり、この場合 4500 Hz であるが、実際には機械の空運転の仕事分だけ周波数は低下している。

パルスカウンタは入力パルス列とゲートクロックのタイミングにより原理的に ± 1 Hz の測定誤差を伴うことを考慮して図 (a), (b) を見ると、図 (a) では大多数が 2 値的な値で測定値のばらつきはほとんど無いといえる。これに対し図 (b) では正規分布的なばらつきが見られ、中央値に対する範囲は ± 5 Hz あり、中央値に対し $\pm 0.1\%$ のばらつきとなり、商用電源周波数の確度と一致している。電源ゲート方式での測定が安定する原因は、電動機の回転数が電源周波数の変動に追従して変化するのに対し、カウンタのゲート時間も同時に変化し、出力パルスの変動と同期することにより、電源変動を相殺するためである。

この傾向を広範囲に検討するため $n=60 \sim 3600$ P/rev, $T=0.1, 1$ s の範囲で変化させ、カウンタ精度 (すなわち 2 値的な値) で測定値が検出できる確率 (中央値の度数 / 試行回数) を求めると図 5 のようになる。横軸は $n \times T$ または測定感度である。試行回数は各点につき 150~300 回である。図よりゲート方式では電源ゲート方式が良いこと、ゲート時間は大きいほど測定値のばらつきがない

図5 測定精度と感度の対応

図6 主軸回転数変化に伴う電動機回転変動

こと, ± 1 Hz の精度で測定できる限界は $T=1$ s では $n \approx 500$ P/rev であることがわかる。

$n=500$ P/rev の測定感度は $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m/s}\cdot\text{PS}$ に相当し, $V=2 \text{ m/s}$ の切削では 100 g/PS , $V=30 \text{ m/s}$ の研削加工では約 7 g/PS の主分力測定感度となる。

図6は種々の主軸回転数における出力パルス列の変動を, F-V 変換してアナログ的に見たもので, 電動機回転には約 10 Hz と 100 Hz 程度の変動成分があり, その振幅は主軸回転数によって異なり, $N=450 \text{ rpm}$ において最も大きくなっている。図5の感度と精度の対応は, この最大振幅を持つ主軸回転数での検討結果であり, 他の回転数での測定値のばらつきはさらに小さくなっている。デジタル測定におけるゲート時間は図6の変動曲線を積分するときの範囲に相当し, 平均値を求めるには積分範囲が広いほど安定な値が得られることになる。

以上の測定値のばらつきの検討は機械を空運転したと

図7 定常切削における測定値のばらつき

きの結果であるが, 実際の切削時における測定例を図7に示す。図5より, $n < 500$ の条件に近い $n=420$ P/rev を用い, $T=1$ s で測定した。

図には切削条件2通りの例が示されており, 実線が電源ゲート方式による測定値である。切削時間は5 min 弱であるが, 測定値のばらつきは完全に ± 1 Hz の誤差内に入っており, 無負荷運転時と切削時のばらつきに差異のないことを示している。

次に測定系の応答速度を調べた。この測定系には電動機回転子のはかに V ベルト, 歯車, 主軸等が介在するため, 応答時定数は大きくないと考えられる。そこで連続切削における応答と断続切削によるステップ応答を調べ, ひずみゲージを用いた工具動力計(周波数特性 $< 700 \text{ Hz}$) の出力波形と比較した。

図8(a)は連続切削, 図(b)は断続切削におけるステップ応答を示す。電動機には図6に示したような周期的な変動成分があるが, 図(a)のように毎秒10回転程度の連続切削には十分追従している。しかし図(b)のような重切削の断続切削では電動機回転変化には2次遅れ現象が観察できる。この遅れ時間は約 $1/10$ s であるが, この時間は図6の変動周期と一致し, 測定系のねじれ固有振動周期と考えられる。このことから測定装置の応答速度は動力伝達経路全体のねじれ固有振動周期に制限されるといえる。図(c)はフィルタを用い図(b)の出力を波形整形したものである。またアナログ測定における変動成分として, 電源周波数確度 ($\pm 0.1\%$) があり, 長時間測定では前にも述べたように $\pm 4\%$ 前後の測定誤差が入るが, パルス列の F-V 変換出力を差動増幅すると

図 9 機械のウォームアップ時間と測定値の変化

図 10 旋盤主軸回転数と出力周波数の初期値

きの基準電圧を電源周波数変動に同期させて変化させれば、この測定誤差は取除くことが可能である。

電動機の回転数は電動機温度、機械の軸受温度によっても変化するはずであり、その様子を図 9 に示す。使用する機械の特性により運転開始から、回転数が安定するまでの経過は様々であろうが、ここで使用した A-20 型旋盤では時間の経過とともに上昇し、一定回転数になる

図 11 切削動力と電動機回転数の関係

までに 20 min 程度を要する。また運転初期の 2 min 間はその変化が激しく、測定時期としては好ましくない。

図 10 は各主軸回転数において、電動機回転数が定常状態になった時点での、空運転における出力パルス周波数を示す。各主軸回転数における歯車列の効率、消費エネルギーの差により、電動機回転数の初期値が異なることを示している。

図 11 は切削動力と電動機回転数の関係を主軸回転数をパラメータとして示したもので、 $n=180\text{P/rev}$ とし、図 3 に示した測定方法により、切込み、送りを種々に変化させ、工具動力計より求めた切削抵抗主分力とその時の切削速度より切削動力を求め、出力周波数との対応を調べたものである。

各主軸回転数における切削動力とパルス周波数には非常に良い直線関係があること、また各パラメータにおける直線の傾きは同一であることが明らかである。このことから図 9 のように主軸回転数によってパルス周波数の初期値が異なっても、初期値と校正直線の傾きがわかっているれば、空運転時と切削時の出力周波数の差から、切削動力または切削抵抗主分力を容易に求めることができる。直線の傾きは測定感度に相当し、図 11 より $n=180$

図12 切削動力と出力周波数減少の関係

図13 微小切込み変化に対する測定値の変化

P/rev における感度を求めると $5.7 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{Hz}$ となる。図2より計算上の感度を求めると $5.55 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{Hz}$ となる。

式(3)において機械の摩擦動力は切削動力に比例するとしたが、図11から判断すれば歯車の組合せを変えて主軸回転数を変化させても、切削動力に対する電動機回転数の変化が同一であるから摩擦動力は切削動力に比例し、歯車列によって決まる可変定数 α は実験の範囲では機械固有の定数として取扱えるといえる。

以上の結果より、主軸回転数を任意とし、電動機定格負荷まで切削動力を変化させ、出力パルス周波数の相対差との対応を見たものを図12に示す。 n としては図5の感度に対する精度 $\pm 1 \text{ Hz}$ を満足する $n=420 \text{ P/rev}$ を用いた。切削動力と相対周波数差には良い直線関係があるが、 $n=180 \text{ P/rev}$ の場合と比較すると、わずかにば

らつきが多いようである。また重負荷の領域で測定点が少し上にずれているが、これは測定感度を増加させたこと、工具動力計の測定誤差が含まれていることなどによるものと考えられる。

図12が本測定法で得られた 7.5 kW 電動機を備えた旋盤における較正図であるが、 $n=420 \text{ P/rev}$ での感度を図より求めると $2.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{Hz}$ となる。

測定感度 $2.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{Hz}$ が切削条件として、どの程度の変化に追従するか、またその時の測定値のばらつきはどの程度であるか、具体的に示すと図13のようになる。図中に示すように 500 mm で 0.1 mm の直径差のある丸鋼を、切込み 2.5 mm 、送り 0.25 mm/rev で切削したときの測定周波数を切削時間に対しプロットしたもので、水晶ゲート方式での測定では切削抵抗変化が測定値のばらつきに吸収されているが、電源ゲート方式での測定では切込みの微小増加につれ、測定値は徐々に減少し、最終的に 5 Hz 減少している。これを切削条件に換算すると $V=100 \text{ m/min}$ 、 $f=0.25 \text{ mm/rev}$ の条件で、切込み 0.01 mm の変化を検出していることになる。また測定値のばらつきも $\pm 1 \text{ Hz}$ となっている。

5. ま と め

- (1) 誘導電動機のすべりをデジタル測定することにより切削抵抗主分力平均値を精度よく測定できる。
- (2) 電源周波数の変動を相殺するために電源ゲート方式のカウンタが有効である。
- (3) 測定感度は電動機1回転における発生パルス数とゲート時間に比例するが、測定精度から限界があり、実験の範囲では $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s} \cdot \text{PS}$ である。
- (4) 測定装置の応答速度の時定数は約 $1/10 \text{ s}$ であったが、これは動力伝達経路のねじれ固有振動数に支配される。
- (5) この測定法は加工速度の早い加工法に対し、より有効である。

参 考 文 献

- 1) 関口 博, 竹山秀彦, 白城嗣久: 静圧刃物台, 昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会前刷(1972) 67.
- 2) 佐田登志夫, 小尾 誠, 武田健二: 旋削加工の適応制御のためのインプロセス測定, 昭和46年度精機学会春季大会学術講演会前刷(1971) 87.
- 3) 野中作太郎: 電気機器(II), 森北出版(1971) 30.