Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-04

# 数値制御工作機械の送り駆動系における消費電力の測定と評価

林, 晃生
佐藤, 隆太
白瀬, 敬一

(Citation)
精密工学会誌,79(10):930-936

(Issue Date)
2013

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90001945

# 数値制御工作機械の送り駆動系における消費電力の測定と評価*

林　晃生** 佐藤隆太*** 白瀬敬一***

Measurement and Evaluation of Electric Power Consumption of Feed Drive Systems in NC Machine Tool

Akio HAYASHI, Ryuta SATO and Keiichi SHIRASE

Reducing the electric power consumption in NC machine tools is strongly demanded in these years, because the NC machine tools are one of the main facilities in the manufacturing field. Thus measuring tests of the power consumption in an NC machine tool for all components were measured in other studies up to now. This study focused onto the power consumption of feed drive systems. In this study, electric power consumption of an actual 5-axis vertical type machining center consists of X, Y, Z, B and C axes is measured. In order to investigate the electric power consumption of feed drive systems, currency and voltage of servo amplifiers are measured. At first, the measuring tests of each axis are carried out under various feed rate. As the results of the measurements, it is clarified that the power consumption depends on the motion velocity and torque. In addition, acceleration-deceleration parameters and servo gains are also changed to investigate the influences of the parameters. These parameters have big influences on the power consumption during the acceleration-deceleration process. The results of this study show that the electric power consumption might be reduced by changing the motion and parameters of the axes.

**Key words** : NC machine tool, feed drive system, electric power consumption, acceleration-deceleration, servo gain, gravity

## 1. 諸　言

近年，地球温暖化やエネルギ資源の枯渇といった問題から，省エネ化は世界のあらゆる場で推進されている．日本国内では，原子力発電所の停止，全国的な電気料金の値上げなど様々な要因から節電の意識が高まっている．そのため，生産現場においては，改正省エネ法が施行される等，工場で消費される電力に目が向けられている．これまで，工場におけるエネルギ問題については，工場全体の電力を測定し管理する方法や，生産プロセスにおけるエネルギを算出する方法が提案されてきた[1)-3)]．

工場での節電の取り組みを行うためにも，生産設備そのものの消費電力削減が望まれている．工場でのエネルギ使用量の割合は生産設備が8割以上を占めており，そのため，特に生産設備の中核を占める工作機械の消費電力削減は重要であるといえる．このことから，工作機械の消費電力を明らかにするため様々な研究がおこなわれてきたが，それらは主に工作機械全体の消費電力を検討するものだった[4)-6)]．その結果，クーラントやインバータなどの周辺設備の消費電力が大きいことが明らかにされ，その消費電力削減がなされてきた．

しかし，実際に工作機械の消費電力を測定してみると，工作機械の運動創成に関わる送り駆動系の消費電力も無視できない．これまで，工作機械の送り駆動系については，位置決め精度や摩擦特性について多くの研究[7)-12)]がなされてきたが，その消費電力に関する研究は少ない．しかし，送り駆動系の消費電力は運動方向や送り速度，制御パラメータといった様々な要素の影響によって大きく変化することが考えられる．

そこで本研究では，工作機械の送り駆動系の消費電力に着目し，その消費電力の影響を及ぼす因子を明らかにすることで，消費電力を削減する方法を検討することを目的とする．送り駆動系はターニングセンタやマシニングセンタ，複合加工機などの数値制御工作機械だけでなく，搬送装置やロボットなどの一般産業機械など生産設備において幅広く使用されている為，送り駆動系の消費電力削減はこのような生産設備全般での消費電力削減につながることが期待される．

## 2. 測 定 方 法

本研究では図1に示すような立て形5軸制御マシニングセンタを対象に消費電力の測定を行った．また，図2に送り駆動機構を模式的に示す．図に示すように，直進軸は全て主軸側に配置され，Y軸の上でX軸，X軸の上でZ軸が駆動する構造となっている．テーブル側には回転軸が配置され，B軸の上でC軸

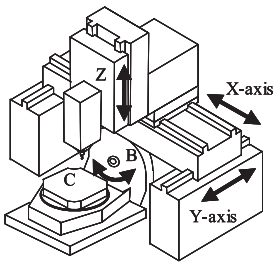



**Fig.1** 5-axis machining center

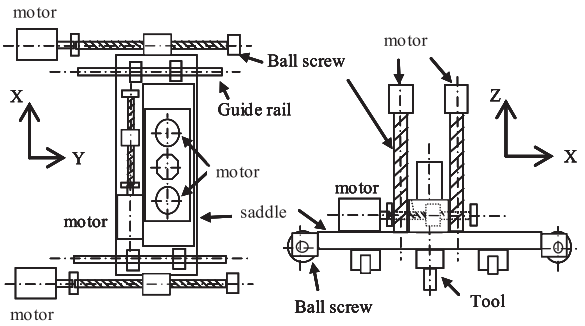



**Fig.2** Structure of feed drive systems

* 原稿受付　平成25年　5月　23日
** 学生会員　神戸大学大学院工学研究科 (神戸市灘区六甲台町1-1)
*** 正 会 員　神戸大学大学院工学研究科

**Table 1** Rated motor torque and output of each axis

| Axis | Rated motor torque Nm | Rated motor output kW |
|---|---|---|
| X and Y | 9.55 | 3.0 |
| Z | 5.97 | 2.5 |
| B | 950 | 7.2 |
| C | 200 | 3.2 |

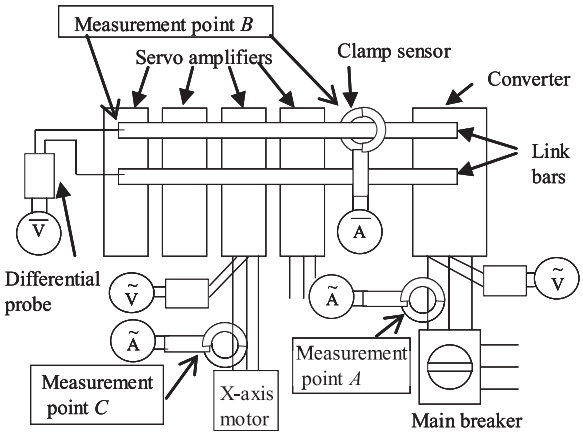



**Fig.3** Measurement points

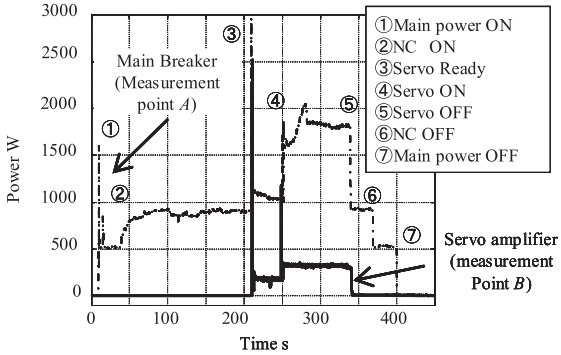



**Fig.4** Measurement results of power consumption at main breaker and servo amplifiers

が駆動する構造となっている．直進軸はモータとボールねじにより駆動され，Y 軸および Z 軸は 2 本のボールねじによって駆動されている．また，回転軸は両軸ともダイレクトドライブモータにより直接駆動されている．各軸に使用されているモータの定格トルクおよび出力を**表 1** に示す．

消費電力の測定箇所を模式的に**図 3** に示す．本研究では，送り駆動系のみの消費電力を測定するため，メインブレーカ部（図 3 中の測定点 A）と，コンバータとサーボアンプをつなぐリンクバー（図 3 中の測定点 B）の 2 箇所で測定を行い結果を比較した．電流はクランプ型の電流計を用いて電圧に変換し，電圧は差動プローブを使って 1000 分の 1 に変換して測定したものを，データロガーによって記録した．電力は測定された電流と電圧の積として算出した．メインブレーカ部では三相 200V の交流電圧となるため，実効電力を計算する際の力率は一般的な値とされる 0.8 とした．一方，サーボアンプ部では，電圧はコンバータによって直流に整流されるため力率は用いず計算を行った．

送り軸の運動は行わず，主電源投入から運転準備を完了した後，主電源をオフするまでの電力を測定した結果を**図 4** に示す．図 4 によると，メインブレーカ部における測定結果では，主電源を投入しただけで約 500W，NC の電源を投入することで約

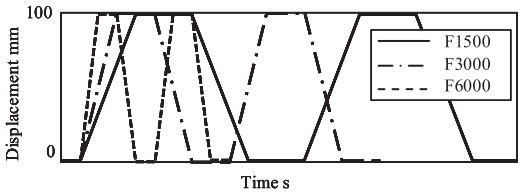



**Fig.5** Motion pattern for measurement tests

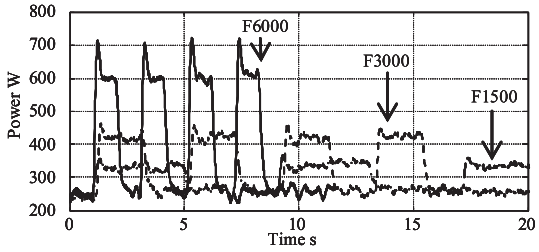



**Fig.6** Comparison of power consumption of X-axis with each velocity

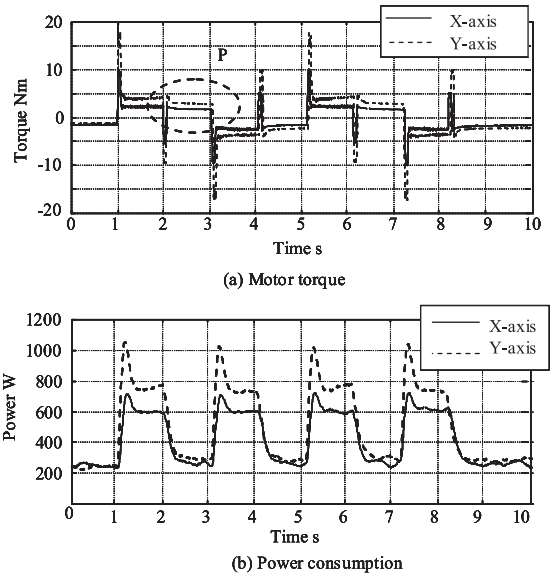



**Fig.7** Power consumption of X-and Y-axis

1kW の電力が消費されており，これらには送り駆動系での消費電力に加えて NC 本体や周辺機器の消費電力が含まれている．一方，サーボアンプ部における測定結果では，サーボオン状態以外での消費電力はゼロとなっており，サーボオン時に電力が立ち上がっている．このことから，サーボアンプ部で電力を測定することで周辺機器による影響を含まない送り駆動系のみの消費電力が測定できると考えられる．

よって本研究では，送り駆動系のみの消費電力を議論するためサーボアンプ部で消費電力の測定を行うこととする．

## 3. 送り駆動系の消費電力

### 3.1 直進軸の消費電力

直進軸（X 軸, Y 軸,および Z 軸）が送り運動中に消費する電力を測定するために， 1500，3000，6000 mm/min の 3 通りの送り速度で，初期位置から 100 mm の距離を 2 往復させたときの消費電力を測定した．動作パターンの模式図を**図 5** に示す．0 mm および 100 mm の位置地点ではドウエル指令により静止させ，そのときの静止時間は 100 mm を移動するのに要する時間と同じになるように設定した．測定は各軸を別々に動かして行

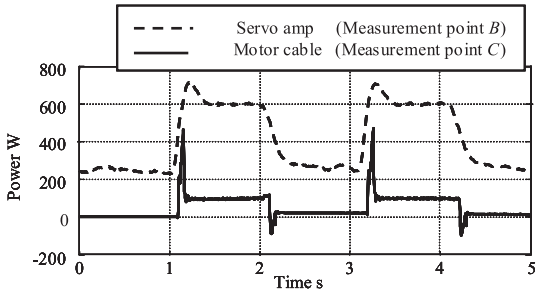
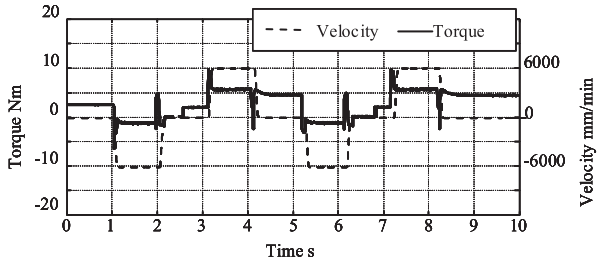
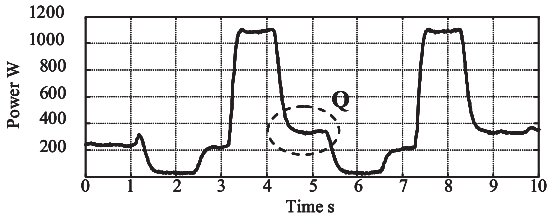



**Fig.8** Comparison of measured results at servo amplifiers and motor cable

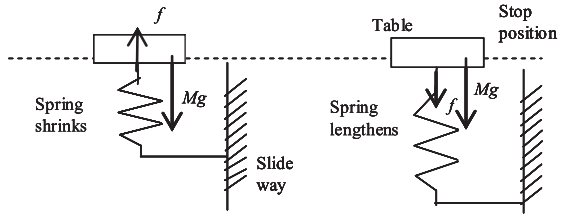



(a) Motor torque and velocity




(b) Power consumption

**Fig.9** Power consumption of Z-axis



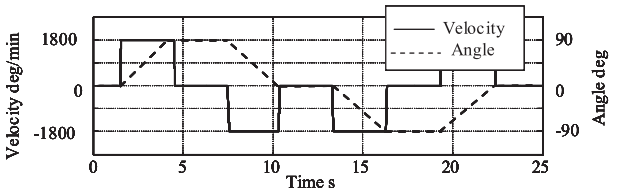

(a) After down direction motion (b) After up direction motion

**Fig.10** Friction force direction of Z-axis

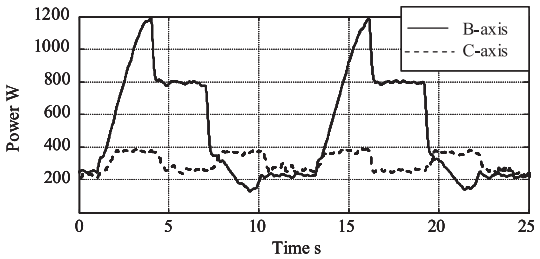
い，そのときの速度および各軸のトルクについてもNCの波形診断機能を用いて取得した．図6に各速度におけるX軸の消費電力を示す．図によると，速度に依存して消費電力が大きくなることがわかる．

送り速度を6000 mm/minとしてX軸とY軸を動かしたときの測定結果を図7に示す．ここで，図7(a)はモータトルク，(b)は消費電力である．本研究で測定の対象としたマシニングセンタのY軸は2つのモータにより駆動されており，消費電力はその合計を示している．消費電力についてみると，X軸，Y軸ともに加速時に大きく電力が消費されていることがわかる．また，Y軸を動かしたときの消費電力がX軸よりも大きくなっている．これは，測定対象とした機械ではY軸の上でX軸が駆動する構造になっており，Y軸のほうが被駆動体の質量が大きいためである．図7(a)をみると，Y軸のモータトルクがX軸よりも大きくなっていることがわかる．

送り運動後に静止しているときのモータトルク（図6(b)中の




(a) Velocity and angle




(b) Power consumption

**Fig.11** Power consumption of B- and C-axis

P部）は運動中とほぼ同じであるが，停止中の電力は運動中と比べて大きく下がる．ここで，停止中に発生するトルクについては，ボールねじ送り駆動系におけるころがり案内の摩擦力を微視的にみると非線形ばね特性を有していることが知られており，このことが原因であると考えられている[10)~12)]．しかし，停止中には速度がゼロとなり，運動に要するエネルギがないため電力が大きく下がると考えられる．以上のことから，運動中の消費電力は速度とトルクの両方に依存しているといえる．

また両軸とも，停止中に250Wの電力を消費している．この原因を明らかとするために，X軸のモータ動力ケーブル部(図3中の測定点*C*）で消費電力の測定を行い，サーボアンプ部での測定結果と比較した．X軸を送り速度6000mm/minで動かした時の測定結果を図8に示す．図より，モータ動力ケーブル部の測定結果では，停止中の消費電力がゼロになっていることがわかる．このことから，サーボアンプ部での測定結果においてみられる停止中に消費される電力は，サーボアンプが定常的に消費している電力であると考えられる．

送り速度6000 mm/minでZ軸を100 mm運動させたときの速度とモータトルクを図9(a)，消費電力の測定結果を図9(b)に示す．なお，Z軸もY軸同様に2つのモータで駆動されているため，消費電力はその合計を示している．図9(b)をみると，Z軸の消費電力は上昇時に極端に大きく，下降時にはゼロに近い．これは重力による影響である．また，Z軸は停止中の消費電力にも違いが見られ，図9(b)中のQ部に示すように，上昇後に停止した場合のほうが下降後に停止した場合よりも電力が大きくなっている．さらに図9(a)をみると，停止中のトルクに関しても上昇後に停止した場合のほうが下降後に停止した場合よりも大きくなっている．すべり案内面の摩擦力をバネ要素で表した研究例[8)]をもとにこの現象を模式的にあらわしたものを図10に示す．図によると，Z軸が下降運動を行った後では，摩擦力はばねが縮んだ状態であらわされ，重力と逆方向に作用するためZ軸にかかる力は小さくなる．一方，上昇運動後には，摩擦力はばねが伸びた状態であらわされ重力と同じ方向に作用するため，Z軸にかかる力が大きくなると考えられる．このことから，Z軸停止中のモータトルクが摩擦特性に起因して直前の運動方向に依存することで，停止中の消費電力も直前の運動方向により変化するといえる．

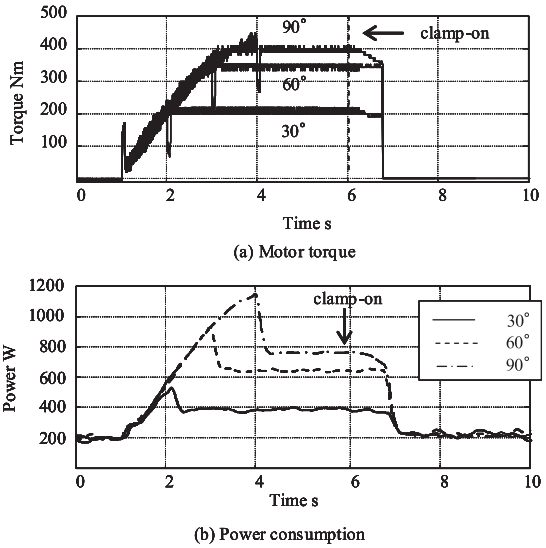



**Fig.12** Power consumption of B-axis during stops

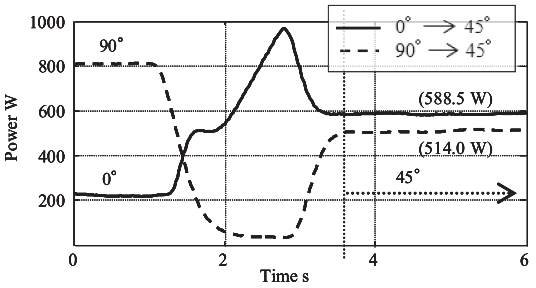



**Fig.13** Influence of the motion direction to the power consumption of B-axis during stops

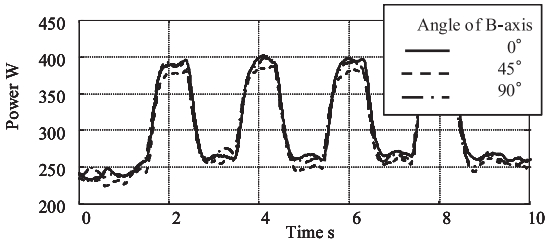



**Fig.14** Influence of the angle of B-axis to the power consumption of C-axis

### 3.2　回転軸の消費電力

回転軸（B 軸と C 軸）動作中の消費電力を明らかにするため，900，1800 および 3600 deg/min の 3 通りの送り速度で，初期位置から 90°回転させたときの消費電力を測定した．その際，0°および 90°の地点で一旦静止させ，そのときの静止時間は 90° 回転するのに要する時間と同じになるように設定した．送り速度 1800 deg/min で動作させた時の速度と角度の変化を図 11(a)に，消費電力を図 11(b) に示す．図によると，C 軸と比べて，重力の影響を受ける B 軸の消費電力は極端に大きくなっているほか，回転方向により消費電力が大きく違う．また B 軸を 90°傾けた状態で停止させたときの消費電力は，800 W とかなり大きい．なお，速度を変化させたときの消費電力は，両軸共に速度に依存して増加した．

B 軸停止中の消費電力について明らかにするため，B 軸を 1800 deg/min の速度で 30°，45°，60°および 90°回転させ，回転後に静止させた時のトルクと消費電力とを図 12(a)および(b)にそれぞれ示す．ここで，運動開始から 5 秒後に回転軸を機械的にクランプする指令を出している．図 12 によると，機械的なクランプをした状態ではトルクおよび消費電力は発生しておらず，クランプを解除すると消費電力およびトルクが発生する．この時の消費電力は角度に依存しており，90° 傾けて停止させた時の消費電力は図 11(b)に示した停止中の消費電力と同じである．また，本実験機における B 軸および C 軸のクランプ方式は，油圧式のディスクブレーキであり，クランプのための電力を消費しない．このことから，B 軸を静止させたときの消費電力は停止角度に応じたトルクに依存しており，機械的なクランプを活用することで B 軸を静止させたときの消費電力を削減できることがわかる．

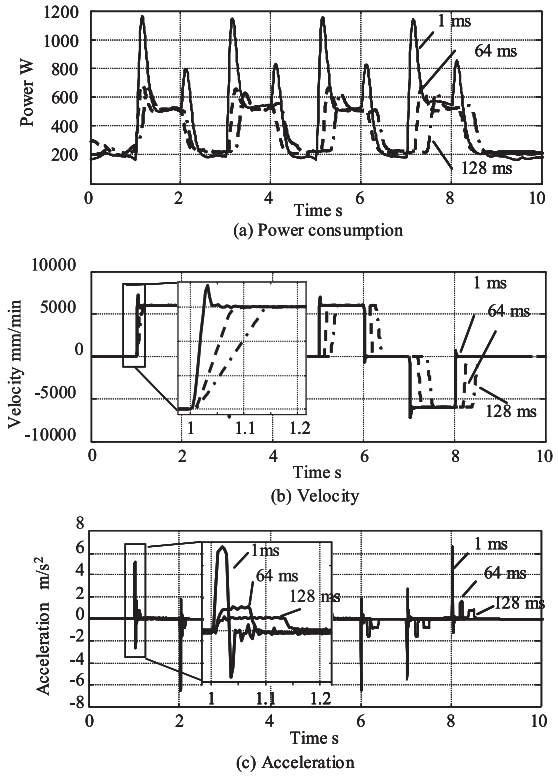



**Fig.15** Influence of acceleration-deceleration time

さらに，重力の影響を受ける B 軸停止中の消費電力が，Z 軸同様に直前の運動方向により変化することが予想されたため，B 軸を 0 °から 45°まで回転させ停止した場合と，90°から 45°まで回転させ停止した場合の消費電力を測定し比較した．その結果を図 13 に示す．図より，B 軸停止中の消費電力が直前の運動方向により大きく違うことがわかる．このことは Z 軸同様，B 軸停止中のモータトルクが，摩擦特性に起因して直前の運動方向に依存することで，消費電力に影響を及ぼすためであると考えられる．

一方，C 軸の消費電力に B 軸の傾斜角度により重力の影響を明らかにするため，B 軸を 45°および 90°に傾斜させた状態で C 軸を回転させたときの消費電力を測定した．図 14 に測定結果を示す．この結果，C 軸の消費電力は B 軸の傾斜角度に依存しないことが明らかとなった．このことは，C 軸はダイレクトドライブモータにより直接駆動されており，モータがその中心に位置しているため，モーメントに影響を受けずトルクに変化がないためである．しかしながら，テーブル上にワークを設置した場合には，ワーク形状や設置場所によっては偏心が生じることで，その消費電力が変化することが予想される．

**Table 2** Comparison of energy consumption influenced by acceleration time

| Acceleration time ms | Motion time s | Energy consumption J |
|---|---|---|
| 1 | 8.02 | 4081 |
| 64 | 8.26 | 3592 |
| 128 | 8.64 | 3629 |

## 4. 制御パラメータの影響

### 4.1 加減速時定数の影響

制御パラメータによる影響を調査するために，X 軸送り駆動系のサーボゲインや加減速時定数を変え，送り速度 6000 mm/min で 100 mm の距離を 2 往復させたときの消費電力を測定した．加減速時定数を 1，64，および 128 ms の 3 通りに変化させた時の測定結果を図 15(a)に示す．このとき，加減速時定数による影響のみを調べるため，位置ループゲインは 10 $s^{-1}$ としてある．また，この時の速度と加速度の変化を図 15(b)および(c)にそれぞれ示す．図 15(a)によると，時定数を 1 ms とした場合には加減速時の消費電力が極端に大きくなることがわかる．しかし，等速中の消費電力に変化はみられなかった．また，速度をみると加減速時にオーバシュートが生じていることがわかる．さらに加減速時定数を 1 ms とした場合には減速時にも電力が消費されている．加速度の変化(図 15(c))をみると，加速時と減速時の両方で加速度波形に振動がみられ，このことが加減速時の消費電力が極端に大きくなったことの原因であると考えられる．

一方，時定数を 128 ms に設定すると，加減速時の消費電力は小さくなっている．消費電力のピークを抑えるためには加減速時間を大きく設定することが有効であると考えられる．しかし，加速度の変化を見ると，時定数を大きくした場合，加速度は小さくなるが加速に要する時間が長くなっているため，運動に要する時間が増大している．すなわち，加減速時定数が短すぎても長すぎても，総消費エネルギが増加するといえる．このことは，運動に要する総消費エネルギを最小にする加減速時定数が存在することを示唆している．

加減速時定数の影響による運動に要する消費エネルギの違いを調査するために，加減速時定数を変えて 100 mm の距離を 2 往復したときの消費電力を時間積分した．このときの運動に要する時間は加減速時定数によって変化するため，積分時間は運動開始から 2 往復の運動が終わり 3 往復目を開始するまでの時間とした．運動に要した時間と消費エネルギの計算結果を表 2 に示す．表 2 によると，加減速時定数を 1 ms と小さく設定した場合には運動時間が短くなるものの，総消費エネルギは最も大きい．これは加減速時の消費エネルギが極端に大きくなってしまっているためである．そのため，加減速時定数を 64 ms とすると，1 ms の場合に比べて 14 %消費エネルギが小さくなることがわかる．

一方，加減速時定数を 128 ms と大きく設定した場合には運動に要する時間が長くなり，時定数を 64 ms とした場合と比べて総消費エネルギの差は 1 %と，ほとんど違いはみられない．以上のことから，最適な加減速時定数を設定することで運動に要する総消費エネルギの削減が可能であることがわかる．

### 4.2 サーボゲインの影響

同様の運動条件で，位置ループゲインを 10, 60, および 120 $s^{-1}$ と変化させた時のトルクの変化を図 16(a)に示す．また，消費電力の測定結果を図 16(b)に示す．このとき，位置ループゲインによる影響のみを調べるため，加減速時定数は 1 ms としてある．図 16(b)によると，位置ループゲインを 120 $s^{-1}$ と大きくした場合には加速時の消費電力が大きくなり，減速時にも電力が大きく消費されている．一方，位置ループゲインを 10 $s^{-1}$ とした場合には，加減速時の消費電力はほかと比べて大幅に小さくなっているが，運動に要する時間は大きく変化していない．よって，運動精度が要求されない場合には，位置ループゲインを小さく設定することで運動に要する総消費エネルギを削減できる可能性がある．

また，どの場合にも等速運動中の消費電力に大きな違いはみられないが，停止中の消費電力がわずかに大きくなっている．トルクの変化(図 16(a))をみると，位置ループゲインを 10 $s^{-1}$ とした場合は停止中のトルクがほかの位置ループゲインの場合と比べて大きく発生しており，このことが停止中に消費電力が増大していることの原因と考えられる．

位置ループゲインの影響による運動に要する消費エネルギの違いを調査するため，100 mm の距離を二往復させた時の消費エネルギを算出した．運動に要した時間と消費エネルギの計算結果を表 3 に示す．表 3 によると，位置ループゲインを変化させても運動に要する時間は変わらないが，サーボゲインを小さく設定した場合に総消費エネルギが小さくなることがわかる．特に，位置ループゲインを 10 $s^{-1}$ と設定した場合には，120 $s^{-1}$ と設定した場合に比べて約 16 %も消費エネルギが小さくなっている．これは，位置ループゲインを 10 $s^{-1}$ と設定した場合，加減速時の消費電力が極端に小さくなっているためである．以上のことから，位置ループゲインを小さく設定することで，運動時間に影響を与えることなく，その運動に要する消費エネルギを削減可能であることがわかる．

**Table 3** Comparison of energy consumption influenced by position loop gain

| Position loop gain $s^{-1}$ | Motion time s | Energy consumption J |
|---|---|---|
| 10 | 8.00 | 3407 |
| 60 | 8.01 | 3720 |
| 120 | 8.02 | 4081 |

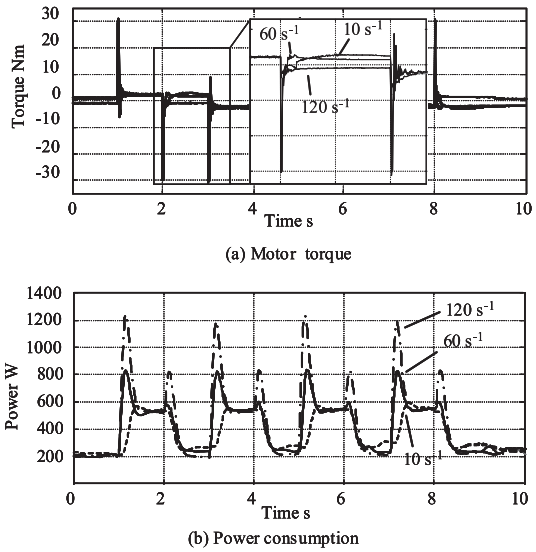



**Fig.16** Influence of position loop gain

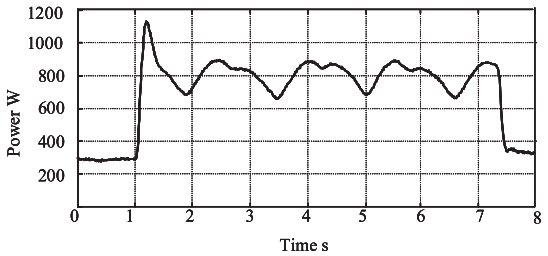



**Fig.17** Power consumption under circular motion

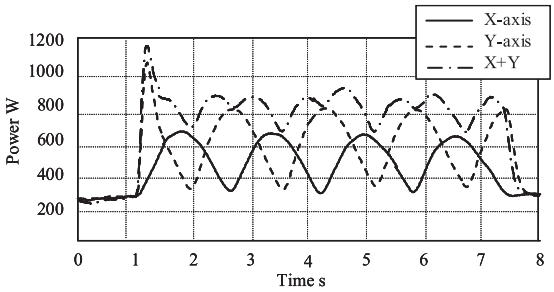



**Fig.18** Power consumption of X-and Y-axis under circular motion

## 5. 同時多軸制御時の消費電力

### 5.1 同時 2 軸制御運動

同時多軸制御運動時の消費電力について明らかにするため，まず，同時 2 軸制御である円運動時の消費電力を測定した．XY 平面上で半径 50 mm，送り速度 6000 mm/min の円運動を 0 度の位置から 2 周行ない，その時の消費電力を測定した．測定結果を図 17 に示す．図によると，円運動中の消費電力は周期的に変動している．周期的な変動の原因を調べるため，円運動時と同じ運動を各軸に指令して 1 軸ごとに運動を行わせ，円運動時における X 軸および Y 軸の消費電力を個別に測定した．その結果を図 18 に示す．図によると，各軸の消費電力が周期的に変動しており，これは円運動時に各軸の速度が周期的に変動するためである．また，2 つの軸の消費電力の合計は，同時 2 軸制御時の消費電力と同じ波形となっている．この結果から，同時 2 軸制御時の消費電力はそれぞれの軸において消費される電力の合計であるといえる．

### 5.2 同時 5 軸制御運動

回転軸も含む同時多軸制御運動として，円すい台加工運動を行った時の消費電力を測定した．送り運動にのみ要する電力を測定するため，主軸の回転などは行わず送り動作のみを指令した．図 19 に円すい台の想定形状，図 20 に運動中の各軸の速度条件を示す．また，想定する加工条件とワークの設置条件を表 4 に示す．円すい台加工運動時における消費電力の測定結果を図 21(a)に示す．また，円運動の場合と同様に，円すい台加工運動と同じ運動を各軸に指令することで，各軸単体での運動を行って消費電力を測定した．その結果を図 21(b)に示す．さらに，各軸の消費電力を合計した結果も図 21(a)にあわせて示す．図 21 によると，各軸の消費電力の合計が同時多軸制御時の消費電力と同じ波形になっており，回転軸を含む同時多軸制御運動時における消費電力も，各軸の消費電力の合計であらわすことができるといえる．また，図 21(b)の各軸の消費電力をみると，X 軸，Y 軸および C 軸は速度の変化が大きいのにもかかわらず消費電力の変化は小さく，全体の消費電力にはほとんど影響がないことがわかる．

**Table 4** Cutting and setting conditions

| | |
|---|---|
| Tool type | Square end mill |
| Tool diameter | 10 mm |
| Feed rate | 600 mm/min |
| Inclination angle | 10 deg |
| Half apex angle | 15 deg |
| Center offset | 60 mm |
| Diameter of bottom surface | 90 mm |

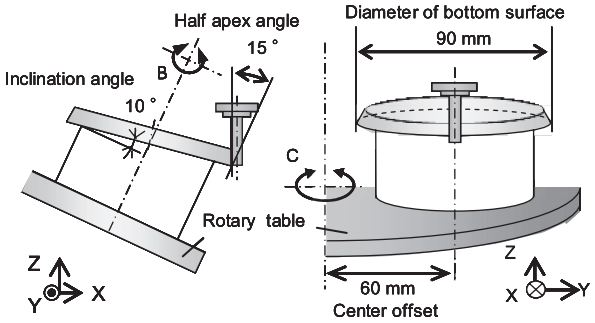



**Fig.19** Work piece setting for cone frustum cutting motion

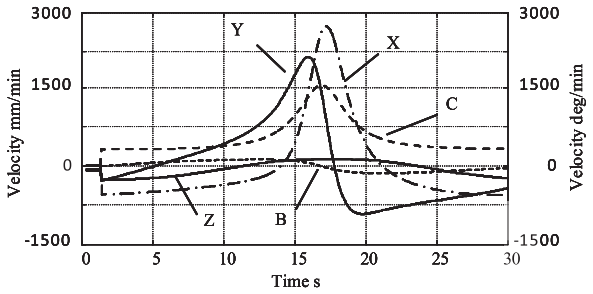
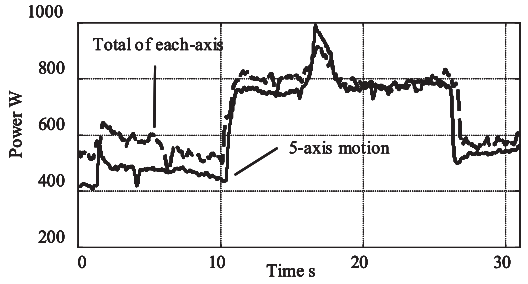
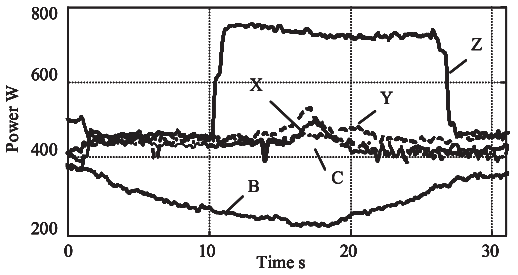



**Fig.20** Velocity profile of each axis under cone frustum cutting motion




(a) Total power consumption




(b) Power consumption of each axis

**Fig.21** Power consumption during cone-frustum cutting motion

一方で，B 軸の消費電力は連続的に変化しているほか，Z 軸上昇時には消費電力がステップ状に大きく増加しており，B 軸および Z 軸はその動作範囲が小さいのにもかかわらず，消費電力が大きく変化していることがわかる．このことから，重力の影響を受ける B 軸および Z 軸はその動作範囲の大小によらず，全体の消費電力に大きな影響を及ぼすといえる．

## 6. 結　　言

本研究では，立て形 5 軸マシニングセンタの送り駆動系における消費電力を測定し，その大小に影響を及ぼす因子を調査した．以下に得られた結果を示す．

(1) 送り駆動系の消費電力はモータの速度とトルクに依存する．

(2) 重力が作用する Z 軸および B 軸は，他の軸に比べて非常に大きな電力を消費する．また，運動方向によって大きく違う．

(3) Z 軸停止中のモータトルクが摩擦特性に起因して直前の運動方向に依存するために，停止中の消費電力も直前の運動方向により変化する．

(4) 加減速時の消費電力は加減速パラメータの設定により変化する．加減速時定数は運動時間にも影響を及ぼし，運動に要するエネルギを最小にするパラメータが存在する．位置ループゲインは運動時間に影響を及ぼすことなく，その運動に要する消費エネルギを削減可能である．

(5) 同時多軸制御運動時の消費電力は各軸の消費電力の合計となり．特に Z 軸および B 軸の消費電力の影響が支配的である．

本研究の結果に基づいて，各軸の運動やパラメータを変更することで送り駆動系の消費電力が削減可能となれば，工作物の設置方向や工具経路，送り速度や加減速パラメータを適切に決定するだけで消費電力の削減が実現できるようになり，工作機械の消費電力削減に大きく貢献できると考えられる．

## 謝　　辞

本研究は，製造科学技術センター調査・研究助成，マザック財団研究助成および昭和報公会研究助成により行われた研究の一部であり，関係各位に深く感謝の意を表する．また，実験に使用した機械は MTTRF から提供されたものであり，関係各位に深く感謝の意を表する．

## 参 考 文 献

1) N. Diaz, S. Choi, M. Helu, Y. Chen, S. Jayanathan, Y. Yasui, D. Kong, S. Pavanaskar and D. Dornfeld: Machine Tool Design and Operation Strategies for green Manufacturing, Proceedings of 4th CIRPInternational Conference on High Performance Cutting, (2010).

2) C.herrman, S Thiede, S Kara, J.Hsselbach: Energy oriented simulation of manufacturing systems – consept and application, CIRP Annals, Manufacturing Technology, (2011) 45.

3) 成田浩久, 河村浩志, 則久孝志, 陳連怡, 藤本英雄, 長谷部孝男: 工作機械による加工の環境負荷予測システムの開発, 日本機械学会 論文集(C 編), **71**, 704, (2005)1392.

4) 下河辺学, 原雄太, 田中智久, 斉藤義夫: 工作機械の消費電力に関する測定と評価, 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2004) 68.

5) 原雄太, 田中智久, 斎藤義夫: 工作機械の消費電力評価方法の構築, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005) 459.

6) M.Mori, M.Fujishima, Y.Inamasu, Y.Oda, A study on energy efficiency improvement for machine tools, CIRP Annals-Manufacturing Technology, (2011)145.

7) 佐藤隆太, 堤正臣: AC サーボモータと直動転がり案内を用いた送り駆動系の数学モデル, 精密工学会誌,**71**,(2005), 633

8) 堤正臣, 大友誠司, 岡崎裕一, 酒井浩二, 山崎和雄, 葛東方: 摩擦を考慮した CNC 工作機械の送り駆動機構の数学モデル, 精密工学会誌, **61**, 10, (1995) 1458.

9) D.A.Haessig,Jr., B.Friedland : On the Modeling and Simulation of Friction, Joarnal of Dynamic Systems, Measument, and Control, 113 (1991) 354.

10) 深田茂生, 成瀬慎也, 松本貴広: ボールねじの微視的変位挙動に関する研究(第 1 報)-準静的特性に関する基礎実験-, 精密工学会誌, **66**, (2000) 7.

11) 大塚二郎, 青木一平, 石川智海: 転がり要素の非線形ばね特性の研究(第 1 報) : 簡易測定法, 精密工学会誌 **66**, (2000) 944.

12) 堺大陸, 松原厚: すべりの概念をいれたころがり案内の摩擦力の解析, 第 9 回生産加工・工作機械部門講演会, (2012) 71.

13) N. Kato, R. Sato, M. Tsutumi: Analysis of Circular Trajectory Equivalent to Cone-frustum Milling in Five-axis Machining Centers using Motion Simulator, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 64 (2013) 1.