

## 加工工程設計支援システムの開発（第2報）

—加工コストによる目的関数の複数化—

笠原 和夫\*<sup>1</sup>, 張 成基\*<sup>2</sup>, 池上 敦子\*<sup>3</sup>

Development of Support System for Process Planning in Machining (2nd Report)  
— Simultaneous Application of Multiple Objective Functions Based on Machining Cost—

Kazuo KASAHARA\*<sup>1</sup>, Sung Ki JANG\*<sup>2</sup>, Atsuko IKEGAMI\*<sup>3</sup>

**ABSTRACT** : We are working to develop a support system for process planning in machining. In the 1st part of this investigation, to improve the system's applicability to products with a large number of holes, a greedy algorithm was used to search among solutions. Through comparison of the machining time obtained by the system with that obtained by operator design, it was confirmed that the configuration of the system is valid. To take the system's two objective functions into account simultaneously, namely, minimization of machining time and minimization of electric energy consumption, here we propose a method to convert them into costs. The results show that process planning that prioritizes machining time instead of electric energy consumption is realistic, and that the percentages of the costs for machining time and electric energy consumption included in the machining cost vary depending on the shape of the workpiece.

**Keywords** : process planning, objective function, machining time, electric energy, machining cost

(Received March 5, 2015)

### 1. はじめに

多軸制御マシニングセンタや複合型工作機械の開発に伴って、完成までに多数の工具と工程を必要とする工作物の加工を1台の工作機械で実施することが可能になってきた。そしてこの状況に対応すべく、工程設計を合理的に行うための検討が各方面においてなされている<sup>1)~4)</sup>。しかしながら加工に必要な工具、工程数の増大に伴い加工順序の組み合わせが急増することや、生産過程における力学量の評価・算出に複雑な処理を必要とすることから、生産性に直結する加工時間のみならず、消費動力・電力量や仕上げ面品位といった点についても考慮した工程設計を、短時間でこなすことが可能なシステムの開発例は未だ数少ない<sup>5)6)</sup>。

前報<sup>7)</sup>においてはシステムの機能確認の第1ステップとして、マシニングセンタによる生産過程でよく見られる、段差をもち高さの異なる面に多数の穴を有する工作物の場合をとりあげ、加工時間に関して提案したシステムにより得られた解と人による設計結果との比較をとおして、システムの適用性・有効性を検証した。そして複数の目的関数を扱うための機能拡張と予備的検討を行った。

本報告では工程設計の実施に際して重要な要素となる加工時間と電力量を目的関数としてとりあげ、この2つの目的関数を同時に考慮した工程設計を実施し得る機能の拡張を試み、得られた結果について考察した。

### 2. システムの概要と工作物モデル

#### 2.1 システムの概要

図1にシステムの構成を示す。同図に示されるように、本システムでは工作物形状や工具情報、切削条件に基づいて

\*1 : システムデザイン学科教授 (kasahara@st.seikei.ac.jp)

\*2 : 理工学研究科エレクトロメカニクス専攻修士学生

\*3 : 情報科学科教授

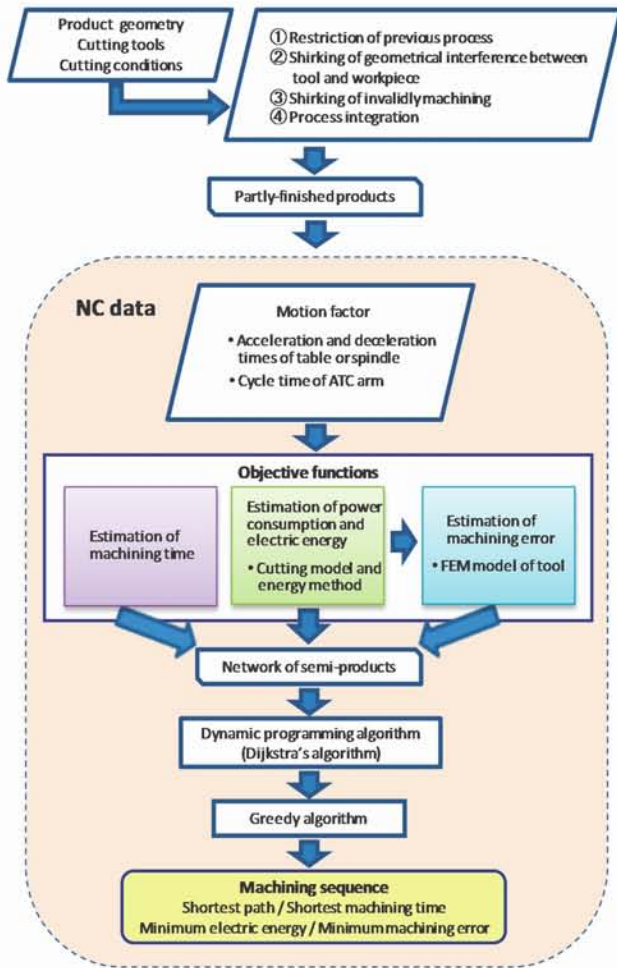


Fig.1 Constitution of a system.

① 加工順序が規定される工程の判断  
 ② 加工部位の深さや形状によって工具と工作物との干渉を生じる加工順序生成の回避  
 ③ 先行した加工が無効になる加工順序生成の回避  
 ④ 同一工具で異なる部位を加工する場合の工程集約などの判断・処理機能が組み込まれている。これらの機能によって機械加工の円滑な実施と、生成される中間製品の軽減を図っている。そして上記の条件下で得られるNCデータに基づき各工程で加工時間や力学的諸量が算出され、加工順序とそれらの関係を最短経路問題として解くことで、指定した目的関数が最小となる加工順序を短時間で求められるようにしている。

2. 2 工作物モデル

図2に本報告でとりあげた2つの工作物モデルを示す。これら工作物モデルの全長(図中のワーク座標系のX軸方向の長さに対応する)はどちらも150mmである。図中の記号 $T_2, T_3, T_4$ などは、当該部位の加工に用いる工具を示す。同図(a)の工作物モデルAでは全長と幅方向(Y軸方向に対応する)の長さの比 $\alpha$ が5で、製作には表1に示

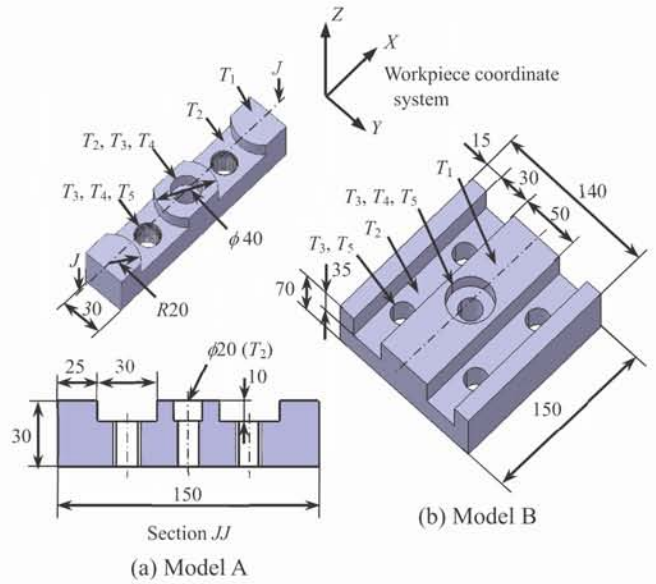


Fig.2 Product models used in analysis.

Table 1 Cutting tools, cutting conditions and NC code used in analysis.

Tool	Material NC code	Geometry	
		Feed rate, mm/min; Depth of cut, mm	Rotational speed, rpm (Cutting speed, m/min)
Model A			
Face mill $T_1$	Carbide G01	Diameter, 150 mm; Axial rake angle, 19°; Radial rake angle, 5°; Nose radius, 1mm; Number of tooth, 6	
		306; 2	255 (120)
Square end mill $T_2 (T_6)$	H.S.S. G01, G02	Diameter, 20mm; Helix angle, 30°; Number of tooth, 2	
		95; 10	477 (30)
Spot drill $T_3$	H.S.S. G81	Diameter, 5mm	
		191	1910 (30)
Drill $T_4$	H.S.S. G83	Diameter, 13.9 mm; Helix angle, 32°	
		137	687 (30)
Tap $T_5$	H.S.S. G84	M16 (Pitch, 2mm)	
		200	100
Model B			
Face mill $T_1$	Geometry and machining conditions are the same as in model A		
Square end mill $T_2$	H.S.S. G01	Diameter, 20 mm; Helix angle, 30°; Number of tooth, 2	
		143, 35	477 (45)
Spot drill $T_3$	H.S.S. G81	Geometry and machining conditions are the same as in model A	
Square end mill $T_4$	H.S.S. G01	Diameter, 30 mm; Helix angle, 30°; Number of tooth, 2	
		215	717 (45)
Drill $T_5$	H.S.S. G83	Diameter, 40mm; Helix angle, 32°	
		107, 20	358 (45)

す $T_1 \sim T_5$ の5本の工具を必要とする。ただし、溝と中央の穴の座ぐり加工に用いるスクエアエンドミル $T_2$ は、後述のようにこの2つの異なる部位の加工を1つの工程に集約して実行した場合と別々の工程として実行した場合との違いを検討できるように、後者の加工工程では $T_6$ と表示することにした。

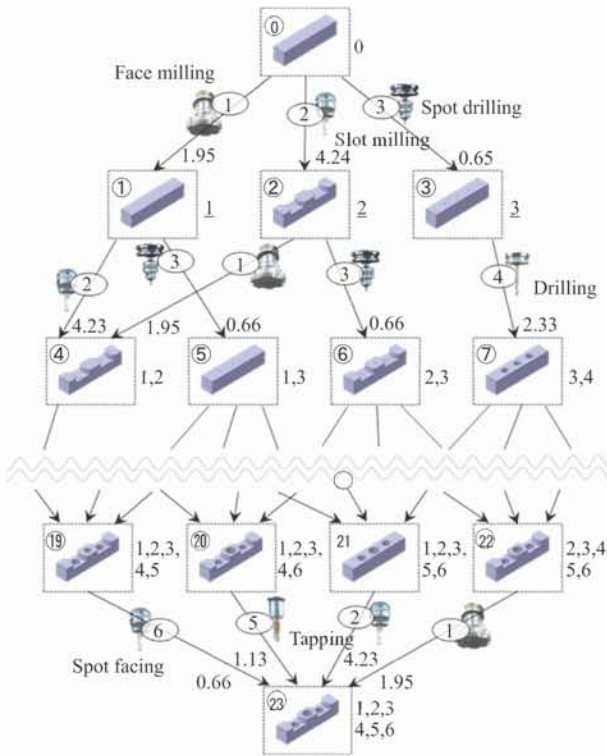


Fig.3 Network of semi-products (model A).

一方、同図(b)の工作物モデルBの場合の必要工具本数はAと同一であるが、タップ加工が含まれておらず2種類の異なる直径のスクエアエンドミルを必要とする点が異なる。そして $\alpha$ が1.2と正方形に近く溝部の深さが深いので、素材から完成に至るまでの材料の排除体積がモデルAの場合よりも大きくなる。なお供給される素材の高さ(Z軸方向に対応する)については、どちらの工作物モデルも完成時より2mm大きいものとする。

3. 中間製品ネットワークと実行可能な加工順序

ここでは工作物モデルAをとりあげ、上述の4つの判断・処理機能をとおして得られた中間製品ネットワークと実行可能な加工順序について述べる。図3はモデルAの中間製品ネットワークを、一部省略して示したものである。矢印上に記された数字は工程番号を、矢印先端部の数字は扱われる目的関数の大きさ(同図では加工時間をminの単位で表示している)を、枠内左上の丸付きの数字は中間製品番号を、そして枠外の右横に書かれた数字は加工を終了した工程を示す。

スクエアエンドミルによる加工では、既述のように円弧状溝部の加工と中央の座ぐり部の加工を1つの工程として連続的に実施する場合と、それぞれ独立した工程として実施する場合とが考えられる。前者の連続的に実施した場合、 $\phi 20$ の座ぐり部の深さと次の工程で用いるセ

Table 2 Executable machining sequence extracted by the system (model A).

Number of sequence	Machining sequence
$S_1$	$T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5$
$S_2$	$T_1 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5 \rightarrow T_2$
$S_3$	$T_1 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_2 \rightarrow T_5$
$S_4$	$T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5$
$S_5$	$T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_1 \rightarrow T_5$
$S_6$	$T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5 \rightarrow T_1$
$S_7$	$T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1 \rightarrow T_5$
$S_8$	$T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_2 \rightarrow T_5 \rightarrow T_1$
$S_9$	$T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_1 \rightarrow T_5 \rightarrow T_2$
$S_{10}$	$T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_5$
$S_{11}$	$T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5 \rightarrow T_1 \rightarrow T_2$
$S_{12}$	$T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$

ンタドリル $T_3$ の工具ホルダからの突き出し長さによっては、 $T_3$ による加工工程で工具ホルダと工作物との干渉が生じる可能性がある。そこで同図および表1に示したように、スクエアエンドミルによる加工については、 $T_6$ として座ぐり加工を独立した6工程目で実施する場合も含めて検討することとした。

表2は図3の中間製品ネットワークに基づき得られた、実行加工な加工順序を列記したものである。これらの加工順序においては、上述の条件判断①~④により $T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5$ の順序の入れ替わりや、 $T_3 \rightarrow T_1$ 、 $T_3 \rightarrow T_2$ といった先行した加工が無効になるような加工状態の回避が考慮され、これによって、加工順序の組み合わせは12通りに絞られている。同表には上述の6工程目に想定した $T_6$ の座ぐり加工が含まれていない。これは工具ホルダと工作物との干渉発生の有無がCADデータに基づいて判断され、工程集約の点から溝加工と座ぐり加工が同一行程で実行可能であると判断されたためである。

なお工作物モデルBの結果については省略するが、このモデルBの実行可能な加工順序もモデルAと同様の12通りに集約される。

4. 電力量評価の概要およびコスト換算による目的関数の複数化

加工時間と消費動力の算出・評価方法の詳細については、前報<sup>7)</sup>で示した。そこでここでは電力量評価方法の概要ならびに、加工時間と電力量の2つの目的関数の取り扱いについて述べる。

4.1 電力量の評価

機械加工時の電力は工作機械自体の運動や周辺装置の



稼働によっても消費されるので、実用面から捉えればこの部分も考慮した検討が望まれる。しかしこの評価は生産設備に依存することになるので、この点を考慮した検討は別報に譲ることとし、本報告では切削現象により消費される部分のみをとりあげ議論を進める。

正面フライス、ドリルおよびセンタドリルによる加工での電力量の評価に際しては、エネルギー解法に基づく切削模型<sup>8)</sup>、幾何的相似性<sup>9)</sup>を利用して得られる切削抵抗主分力およびトルクの計算値を用いた。またスクエアエンドミルによる溝加工と座ぐり加工については、既報<sup>10)</sup>のボールエンドミルに関する切削模型の円筒部のみを利用した切削模型を、タップ加工については文献11)により公表されているトルクの算定式を利用した。

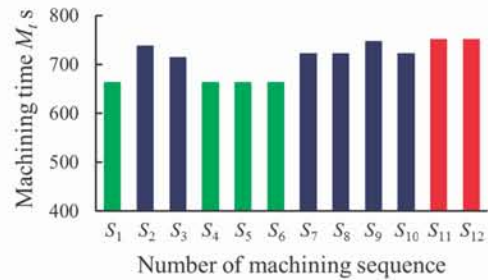
正面フライス $T_1$ とスクエアエンドミル $T_2$ による加工工程で評価される主分力は工具の回転とともに変化し、また切削に関与する切れ刃の数や工作物上の工具の位置によっても異なる値をとる。そこで複数の切れ刃が切削に関与する場合には、各切れ刃の主分力より定まるトルクを重ね合わせることで切削に関与する切れ刃全体の力を評価した。また工作物上の工具位置の影響については、切削開始時と終了時および工具経路の変化に応じた切削領域の幾何的变化を考慮して切削力を算出した。なお電力量の評価に際しては、主分力と切削速度との積として算出される消費動力の平均値を用いた。

表2に示した実行可能な加工順序のなかには、 $T_2 \rightarrow T_1$ や $T_4 \rightarrow T_2$ といった工程が含まれる。このような工程では、当該工具の切れ刃が先行した加工により形成された溝や穴部を通過する状況が生じる。これを考慮した計算は可能であるが、切削過程の幾何的取り扱いが煩雑である。そこで本システムでは3次元CADを利用して得られる除去体積に基づき、先行する加工の影響を考慮した電力量を評価する方法を採用した。

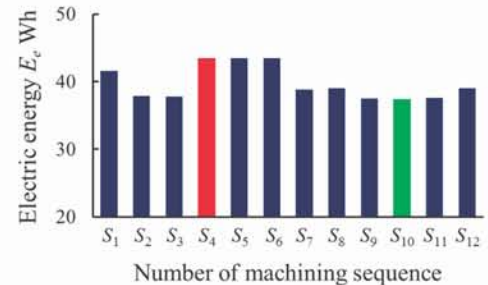
#### 4.2 コストを用いた目的関数の複数化

目的関数が複数存在する場合の最適化問題は、多目的最適化問題と呼ばれる。この最適化問題を解くためには一般に各目的関数に適切な重みを設定し、単一の目的関数を有する最適化問題に変更する方法が用いられる<sup>12)</sup>。そしてお互いに競合する複数の目的関数のもとで最適化を行うと、通常はパレート最適解となる。しかしながら、以上の取り扱いは目的関数の性質によっては複雑な処理過程を必要とする。そこで本報告では解探索の厳密さを犠牲にし、利用の簡便さと実用性を優先させる以下の方法を用いた。

加工時間と電力量はそれぞれコストに換算することが



(a) Machining time



(b) Electric energy

Fig.4 Variation of machining time and electric energy with sequence of machining (model A). Analytical conditions: material cut, S48C steel (annealed); cutting fluid, dry or fatty oil. Other conditions are same as in Tables 1 and 2.

できる。すなわち、前者と後者の目的関数の単位時間当たりのコストをそれぞれ $c_T$ 、 $c_E$ とすれば、総加工時間に対応するコスト $C_T$ （加工時間コストと呼ぶ）と総電力量に対応するコスト $C_E$ （電力量コストと呼ぶ）は、それぞれ $C_T = M_i \cdot c_T$ 、 $C_E = E_e \cdot c_E$ で求められる。ただし $M_i$ は総加工時間、 $E_e$ は総電力量であり、それぞれ各加工工程で算出される加工時間の和 $M_1 + M_2 + \dots + M_m$ 、および電力量の和 $E_{e1} + E_{e2} + \dots + E_{en}$ （添え字1, 2, ..., nは各工具による加工工程を表わす）で与えられる。以下では $M_i$ を加工時間、 $E_e$ を電力量と記す。上記2つの物理量に限定して議論するものとすれば、加工コスト $M_C$ は加工時間コストと電力量コストとの和、すなわち $M_C = C_T + C_E$ で定義される。したがってこの $M_C$ が最小となる状態を探索することで、加工時間と電力量を考慮した工程設計が可能になる。

一般の機械加工では $C_T$ と $C_E$ が必ずしも1:1対応する場合のみが扱われるとは限らず、生産の戦略によってその比率を変える必要も生じる。この場合、 $C_T$ と $C_E$ に上記の状態を考慮した重みを与えることで、製品の仕様に適合した生産形態の選択が可能になると考えられる。なお以下で示す結果は模擬的に $c_T = 3500$ 円/h、 $c_E = 30$ 円/kWhと設定して得られている。

## 5. 結果と検討

### 5. 1 工作物形状および加工順序による加工時間と電力量の差異

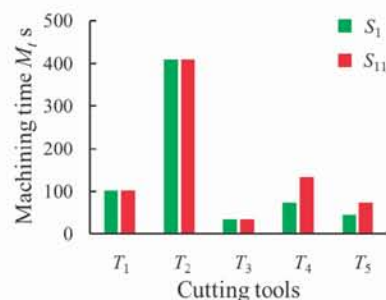
#### 5. 1. 1 工作物Aの場合

図4(a)は表2に示した工作物モデルAの実行可能な12通りの加工順序 $S_1 \sim S_{12}$ で算出された加工時間 $M_t$ を比較したものである。 $M_t$ は $S_1, S_4 \sim S_6$ の4つの加工順序のときに最小値を、一方 $S_{11}, S_{12}$ の2つの加工順序で最大値をとっている。このように加工時間については加工順序が異なっても、同一値をとる状態が生じる。最小値と最大値の差を比で表わすと約12%である。同図(b)は電力量 $E_e$ の結果を示したものであり、 $E_e$ は $S_{10}$ で最小、 $S_4$ で最大となっている。このように、 $E_e$ と $M_t$ は加工順序 $S_1 \sim S_{12}$ に対して1:1対応の関係を示していない。これは同一工具による加工においても、その前にいかなる工程が実施されたかによって当該工具の切削距離や材料の排除体積が異なり、これにより加工時間と電力量に差が生じるためである。

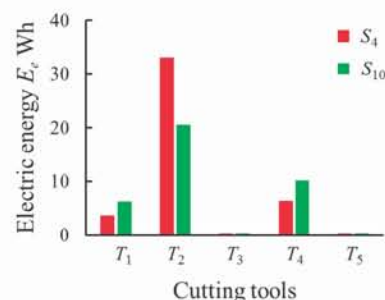
例えば、加工時間が短く電力量が大きな $S_4 \sim S_6$ の加工順序についてみると、表2に示されるようにスクエアエンドミル $T_2$ による加工が最初に行われるからこの工程では前加工の影響が無く、すべての加工領域で切削深さがこのときの設定切込み量12mmで加工される。一方、正面フライス $T_1$ に関しては $T_2$ による溝や $T_4$ による穴が形成された後に加工が実施されるから、材料の排除体積がその影響を受けて減少する。この状況が上記の $E_e$ と $M_t$ の推移が1:1対応しない状況をもたらしている。

以上の現象は実行可能な加工順序 $S_1 \sim S_{12}$ で種々変化して現れる。そこでこの状況を考察するため、図5にこれらの加工順序のなかで加工時間 $M_t$ と電力量 $E_e$ がそれぞれ最小および最大となる加工順序をとりあげ、各工具が占める相対的大きさを比較してみる。同図(a)は加工時間 $M_t$ が最小の $S_1$ と最大の $S_{11}$ について示したものである。 $M_t$ についてはスクエアエンドミル $T_2$ が全体の約62%および54%と大きな比率を占めており、次いで $T_1, T_4, T_5$ がこれに続き、センタドリル $T_3$ の占める時間が約5%と最も小さくなっている。

特徴的な点は加工時間 $M_t$ に大きな影響を及ぼしている $T_2$ の工程やこれに次ぐ $T_1$ の工程で、加工順序 $S_1$ と $S_{11}$ で差が生じていないことである。一方、 $T_4$ と $T_5$ の工程での $M_t$ は、 $S_1$ の方が $S_{11}$ より小さい。以上の現象は $T_1, T_2$ による加工時の工具移動距離が $S_1, S_{11}$ の加工順序でそれぞれ同一になることと、 $T_4$ と $T_5$ は既述のように工具移動距離に差が生じることによるものである。



(a) Machining time



(b) Electric energy

Fig.5 Variation of machining time and electric energy with cutting tools (model A). Analytical conditions are same as in Fig.4.

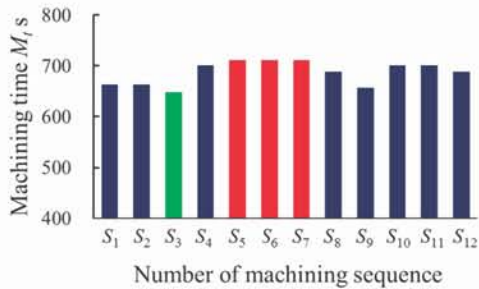
同図(b)は電力量 $E_e$ に関する結果である。加工時間 $M_t$ と同様に $E_e$ においても $T_2$ が大きな比率を占めている。しかし $M_t$ と異なり $E_e$ には $T_1, T_2$ に関しても加工順序による差が生じている点が異なる。すなわち、 $T_1$ では $S_{10}$ より $S_4$ のときの $E_e$ が小であるのに対し、 $T_2$ では逆に $S_4$ より $S_{10}$ のときの $E_e$ が小となっていることである。これは2つの工程で $T_1$ と $T_2$ の順序が入れ替わることによって、上述のように材料の排除体積が変化するために生じたと考えられる。また同図より $T_3$ は直径、切削距離および送り、 $T_3$ は切削速度、切削断面積が小であることから、それら工具により消費される電力量 $E_e$ は小さな値をとり、 $E_e$ 全体に及ぼす影響は小さいことがわかる。

#### 5. 1. 2 工作物Bの場合

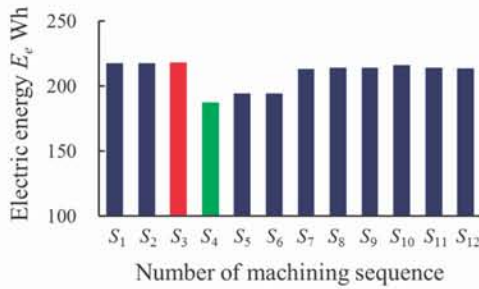
図6、図7は工作物モデルBに関する結果を、それぞれ図4、図5に対応させて示したものである。このモデルBの加工に用いられる工具の構成は表1に示すように、タップを除けばモデルAの場合とほぼ同様である。

しかしながらこれらの図の比較からわかるように、モデルBを加工した場合の電力量 $E_e$ は、既述のように2つのモデル間で材料の排除体積に大きな差があることからモデルAの約5倍ほど大きい。またモデルBの加工時間 $M_t$ ならびに電力量 $E_e$ が最小となる加工順序は、モデルAのそれと異っている。特に正面フライス $T_1$ とドリル $T_3$ によ



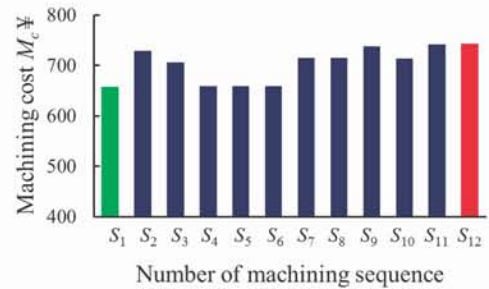


(a) Machining time

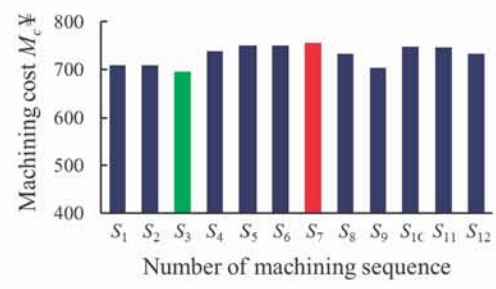


(b) Electric energy

Fig.6 Variation of machining time and electric energy with sequence of machining (model B). Analytical conditions are same as in Fig.4.

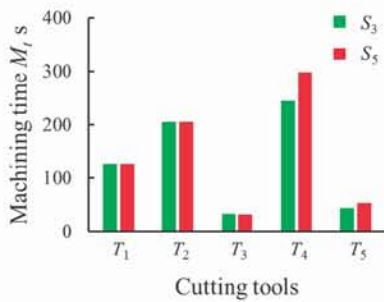


(a) Model A

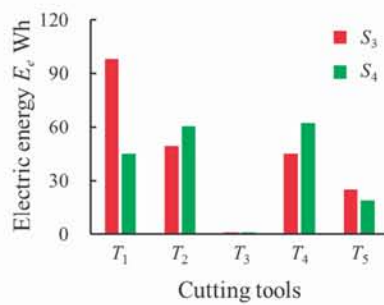


(b) Model B

Fig.8 Variation of machining cost of models A and B. Analytical conditions are same as in Fig.4.



(a) Machining time



(b) Electric energy

Fig.7 Variation of machining time and electric energy with cutting tools (model B). Analytical conditions are same as in Fig.4.

る加工で顕著な差が見られる。これは工作物形状の差異、すなわち幅、溝の深さや穴の直径の差異によって生じている。

## 5. 2 加工時間と電力量を同時に考慮した場合

4. 2 で述べたように時間と電力量は異なる単位をもつ物理量であるから、この2つの物理量を目的関数として同時に扱うために本システムではコストを用いることにした。図 8(a)は工作物モデルAの場合の結果を示す。同図に示されるように、この結果は図 4(a)に示した加工順序を示す $S_1, S_2 \dots$ による $M_i$ の変化の傾向にほぼ対応する。すなわちモデルAの場合、電力量コスト $C_E$ に比べて加工時間コスト $C_T$ が大きく、加工コスト $M_c$ に占める $C_T$ の比率が大きいことが上記の結果をもたらしている。

図 8(b)の工作物モデルBの場合にもモデルAの場合と同様に、モデルBを加工する際の電力量がモデルAの約5倍大である(図 4(b), 図 6(b)参照)にも関わらず $M_c$ は $C_T$ に依存するものとなり、 $C_E$ の $M_c$ に及ぼす影響は小さいものとなった。しかし以下では工作物の形状によっては加工時間コスト $C_T$ と電力量コスト $C_E$ の比率が変わることを示す。

図 9は正面フライス $T_1$ による加工での加工時間と電力量から評価されたコスト $C_T$ と $C_E$ を工作物モデルAとBについて示したものである。同図(a), (b)の比較からわかるように、加工時間から評価されたコスト $C_T$ はモデルAよりもモデルBの方が小さく、一方電力量から評価されたコスト $C_E$ は逆にBよりもAの方が小さくなっている。この結果は、工作物の形状・大きさの違いがもたらしたものであり、すなわち工作物の形状・大きさと工程によって、加工コスト $M_c$ に占める加工時間コスト $C_T$ と電力量コ

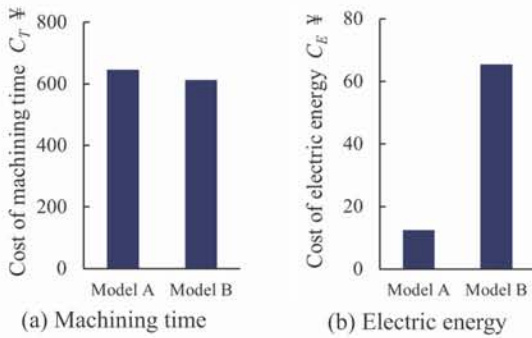


Fig.9 Difference of machining cost with product shape in milling using a face mill T1. Analytical conditions are same as in Fig.4

スト $C_E$ の比率が変化することを示唆するものである。

以上のように形状の異なる2つの工作物モデルA, Bをとりあげ、加工時間と電力量を目的関数として加工コストの点から合理的な加工順序を検討した結果、その決定についてはどちらのモデルにおいても加工時間が支配的であることが明らかになった。この要因の1つとして電力量 $E_e$ の評価を切削現象のみに限定し、工作機械や周辺装置によって消費される $E_e$ の影響を考慮していないことが考えられる。

## 6. まとめ

複数の目的関数の取り扱いを可能とする加工工程設計支援システムの構築を目的として、工程設計の実施に際して重要な要素となる加工時間と電力量に着目しコストに変換する方法を提案した。そして形状の異なる2つの工作物モデルをとりあげ、上記2つの目的関数を同時に考慮した工程設計が可能であることを示した。その結果、切削現象のみにより電力量を評価した場合、本報告で取り扱った2つの工作物モデルでは形状に顕著な差異があるにも関わらず、加工順序の決定に際しては電力量よりも加工時間優先で工程設計してよいことが導かれた。

以上の点から電力量の評価には機械設備やその周辺装置の影響を考慮する必要があると言える。この検討は今後の課題としたい。

## 謝 辞

本研究の一部は2012年度成蹊大学理工学部特別研究費の助成を受けて行なわれた。また本研究で用いた単位加工時間当たりのコスト $c_{rk}$ については、出雲産業株式会社(栃木県宇都宮市)関山隆雄氏にご教示いただいた。ここに、記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 井原透, 小川操, 伊東誼: 直感型工程設計システムにおける加工困難さの同定, 精密工学会誌, 59, 3, (1993) 435.
- 2) 小池稔, 八十川貴子, 妻屋彰, 若松英史, 荒井栄司: 製品の機能や要求精度を考慮した自動工程設計システム, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2006) 17.
- 3) 岩田一明, 福田好朗: 多種極少量生産のための動的工程設計の提案, 精密工学会誌, 54, 12, (1988) 2340.
- 4) 韓 剛, 白瀬敬一, 若松英史, 妻屋彰, 荒井栄司: 切削加工の目的や環境の変動に柔軟に対応できる工程設計支援システムの開発, 日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会講演論文集, (2004) 299.
- 5) W. Grzesik: Advanced Machining Process of Metallic Materials, elsevier, (2008).
- 6) 杉村延広: 工程設計システムの現状と将来, 精密工学会誌, 72,2(2006)165.
- 7) 笠原和夫, 稲葉達郎, 池上敦子, 張 成基: 加工工程設計支援システムの開発, 成蹊大学理工学研究報告, 50, 2 (2013) 123.
- 8) E. Usui, A. Hirota and M. Masuko: Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process (Parts 1 and 2), Trans. ASME, Ser.B, 100, 2, (1978) 222, 229.
- 9) 笠原和夫, 広田明彦: ドリルの幾何的相似性に基づいた切削抵抗の予測, 精密工学会誌, 55,3(1989)545.
- 10) 笠原和夫, 広田明彦, 笹井洋介: ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第1報), 精密工学会誌, 69, 3, (2003) 396.
- 11) OSG, Technical Data, タップ加工, シリーズ No.6, 2013年4月改訂版.
- 12) 中山弘隆, 谷野哲三: 多目的最適化の理論と応用, コロナ社, (1994).