

## 加工工程設計支援システムの開発

—多数の穴を有する工作物への適用性と目的関数の複数化—

笠原 和夫\*<sup>1</sup>, 稲葉 達郎\*<sup>2</sup>, 池上 敦子\*<sup>3</sup>, 張 成基\*<sup>4</sup>

Development of Supporting System for Process Planning in Machining  
—Applicability to Product with a Large Number of Holes and Plurality of Objective Function—

Kazuo KASAHARA \*<sup>1</sup>, Tatsuro INABA \*<sup>2</sup>, Atsuko IKEGAMI \*<sup>3</sup>, Sung Ki JANG \*<sup>4</sup>

**ABSTRACT** : In order to improve the applicability to products having a large number of holes, the greedy algorithm is used in the process of searching for the solution. The constitution of the system was confirmed to be valid from a comparison between the machining time obtained by a proposed system and operator design. Then, the cutting force in milling and drilling processes performed on a workpiece having a large number of holes and steps is calculated through application of cutting models proposed by Usui et al., and the machining power and electric energy are estimated on the basis of the calculated cutting force. To enable process planning in which two objective functions such as machining time and electric energy are taken into consideration, it is proposed that convert those quantities to cost.

**Keywords** : process planning, machining power, electric energy, objective function

(Received September 18, 2013)

### 1. まえがき

近年、多軸制御マシニングセンタや複合型工作機械の開発が進み、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が1台の工作機械で実施できるようになった。そしてこの状況に対応すべく、工程設計を合理的に行なうための検討がなされている<sup>1)2)</sup>。しかし加工に必要な工具、工程数の増大に伴って加工順序の組み合わせが急増することから、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行なうことは困難となる。

そこで本報告ではマシニングセンタによる生産工程でよく見られる、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取り上げ、既報<sup>3)</sup>で提案したシス

テムを利用して得られる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・有効性を検証する。また工程設計で考慮される要素のひとつである消費動力・電力量の評価機能を組み込み、目的関数の複数化への拡張を試みるとともに、加工時間と電力量の2つの目的関数を考慮した工程設計の実施に際しては、コストが利用できることを提案している。

### 2. 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

①「センタドリル加工」→「ドリル加工」→「ねじ立て」のように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「センタドリル加工」を行なった面への「フライス加工」の実施のように、先行した加工が無効になるような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

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

\*<sup>2</sup>: 理工学研究科エレクトロメカニクス専攻修士学生  
(現、スズキ株式会社)

\*<sup>3</sup>: 情報科学科教授

\*<sup>4</sup>: 理工学研究科エレクトロメカニクス専攻修士学生

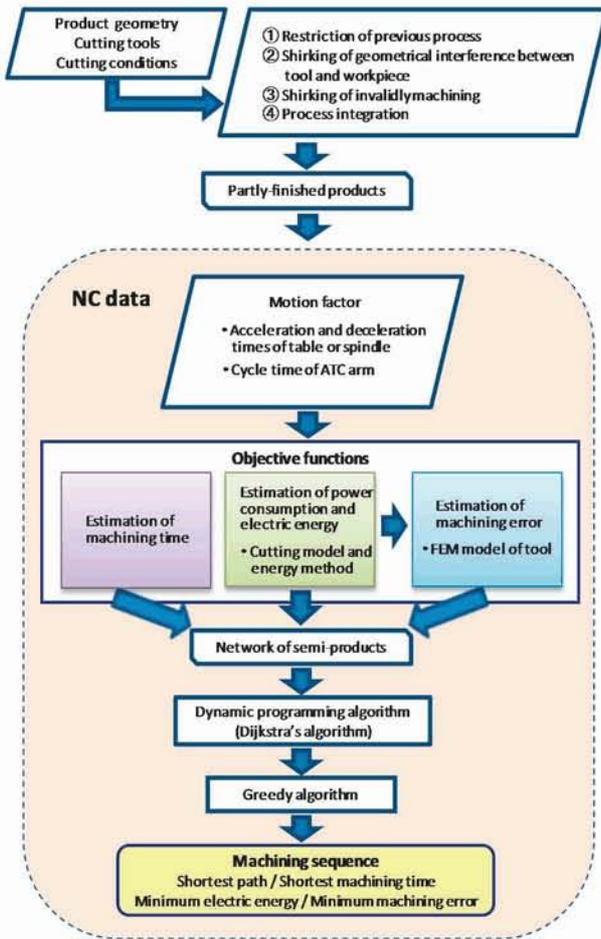


Fig.1 Constitution of a system

といった機能をもたせることによって機械加工の円滑な実施を行なえるようにし、かつ生成される中間製品数の軽減を図っている。そして工程設計で主要な要素となる加工時間に加え、切削抵抗の予測機能を組み込むことによって算出された切削抵抗に基づいて、消費動力・電力量や仕上げ面品位といった複数の目的関数の取り扱いを可能にするための、機能の実装を目指している。

### 3. 穴加工順序の決定と消費動力・電力量の評価

#### 3.1 穴加工順序の決定

図2に本報告でのドリルによる穴加工順序決定で取り上げた工作物モデルを示す。この工作物モデルは段差を有し、かつ多くの穴が不規則に配置されており、加工時間を最小とする穴加工順序の決定は、ドリルの移動距離を最小化する巡回セールスマン問題を解くことになる。そこで、穴加工順序決定に際しては、巡回セールスマン問題の解法の中で実装が非常に容易なnearest-neighbor法を利用した。この解法は欲張り法の一つであるから、得られる解の厳密性に乏しい。しかし今後、厳密解法や精

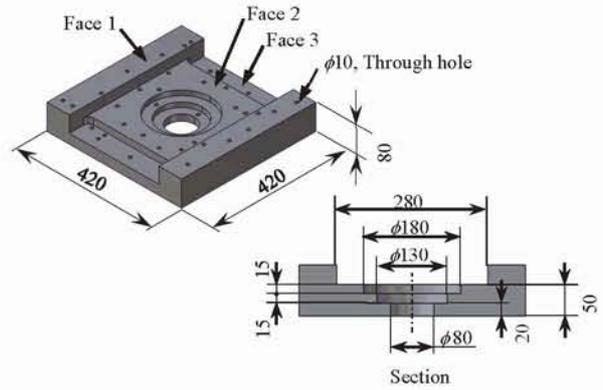


Fig.2 Product model used in analysis

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

Tool	Material	Geometry	
		Feed rate, mm/min; depth of cut, mm	Rotational speed rpm
T1 Face mill	Carbide	Diameter, 150mm; Axial rake angle, 19°; Radial rake angle, 5°; Nose radius, 1mm; Number of tooth, 6	
		G01	225; 2   212
T2 Shoulder mill	Carbide	Diameter, 80mm; Axial rake angle, 20°; Radial rake angle, 13°; Nose radius, 1mm; Number of tooth, 6	
		G01	478; 5   398
T3 Spot drill	H.S.S.	Diameter, 5mm	
	G81	95	1910
T4 Drill	H.S.S.	Diameter, 10mm; Lead, 50mm	
		G83	190   1270
T5 Square end mill	H.S.S.	Diameter, 20mm; Helix angle, 30°; Number of tooth, 2	
		G01, G03	85   425
T6 Drill	H.S.S.	Diameter, 30mm; Lead, 150mm	
		G83	65   425

度の高いヒューリスティック解法に差し替えることが可能であるので、本報告では上記解法を用いて検討を進めることにした。

#### 3.2 消費動力・電力量の評価方法

同図に示されるように素材の外形寸法は 420mmに仕上げられており、厚さは 82mmで与えられるものとする。このモデルは正面フライスT1を用いて形成される面1上に 14、面2上に 15および面3と中央の円形上の段差部にそれぞれ 9と4の合計 42個の穴が設けられている。これらの穴はすべて直径 10mmの通り穴で、ドリルT4によってあけられる。なおモデルの材料は炭素鋼S45Cとし、その模擬加工には表1に示す6種類の工具とGコードおよび切削条件を用いた。

消費動力・電力量の評価に際しては、ここでは6種類の工具の中から肩削りフライスT2とドリルT4をとりあげる。これら2種類の工具による加工で消費される動力

は、エネルギー解法に基づく切削模型<sup>45)</sup>を利用して得られる切削抵抗主成分およびトルクの計算値を用いて評価した。また電力量は加工状態によらず力率 $\eta$ を80%一定とし、消費動力の平均値から求めた。

#### 4. T4による穴の加工順序および加工時間に関する結果と検討

##### 4.1 穴加工順序

図3は穴加工に関してのオペレータにより設計された順序と本システムで得られた結果を、中間製品を用いて比較したものである。同図(a)のケース1では正面フライスT1によって面1を形成後、この面1上でT4による全ての穴の加工が実施される。すなわち、工程設計に際して工具突き出し長さが短いセンタドリルによる下穴加工で工具ホルダと工作物との干渉回避が優先され、かつ工程集約による加工時間の短縮が考慮されている。しかし一方で、この工程設計では穴が深い状態でドリル加工が実施されることになるから、その累積穴深は大となる。

同図(b)のケース2はオペレータ6(後述の図6を参照されたい)によるもので、この工程設計では面2を形成後一部の穴を面2上で加工することにより、累積穴深さを軽減させることが考慮されている。同図(c)のシステムによる結果では、スクエアエンドミルT5で面3を形成後にこの面上の幾何学的干渉が生じない一部の穴が加工され、ケース2よりもさらに累積穴深さが短くなっている。

図4(a)~(c)は図3(a)~(c)に対応する3つのパターンで穴加工経路を比較したものである。ケース1は面1上ですべての穴加工の実施を選択した6人の中で、後述する加工時間が全オペレータのほぼ平均値をとる設計を行なったオペレータ10によるものである。オペレータ6によるケース2では、高さが異なる面1と面2に同一工程内で穴加工が実施される。この段差の存在が面2における経路設計に影響を及ぼし、ケース1との差異をもたらしている。

システムでは上述のように累積穴深さの軽減が考慮され、面3形成後にこの面上で工具と工作物との干渉が生じない一部の穴加工を実施する工程が解となる。また中央の円形状段差部の穴加工が面2上で実施されるように工程が決定されるので、面2での穴加工経路はケース2と異なる結果が導出されている。

##### 4.2 穴加工時間

図5(a)は図4に示した経路で、位置決めのための工具移動時間 $T_i$ を比較したものである。ただし、同図の結果は

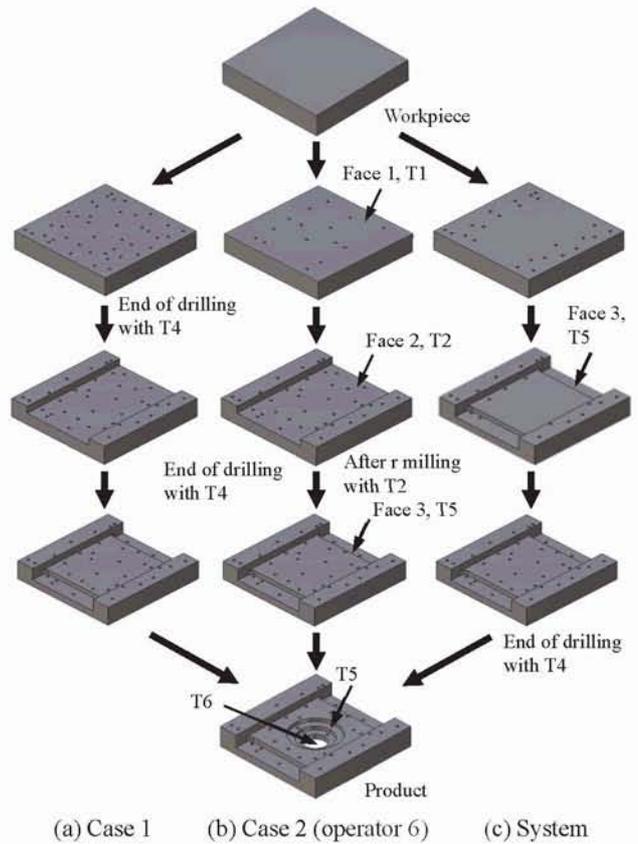


Fig.3 Comparison of machining process

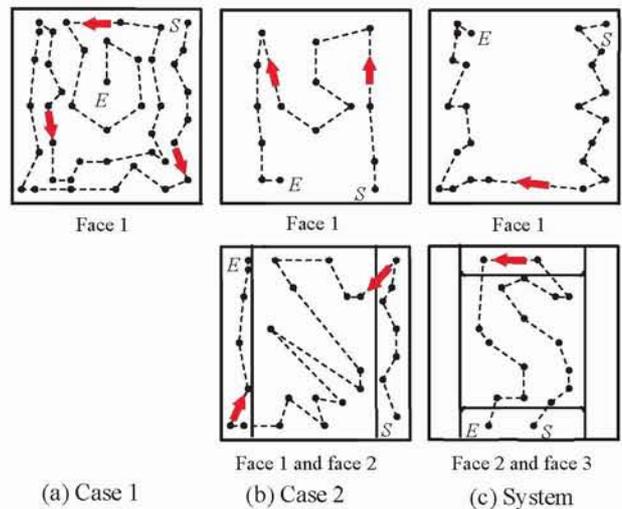


Fig.4 Comparison of drilling sequence

本研究で対象とした立形マシニングセンタ(大阪機工, MCV-410)においての、早送り速度12m/minに基づいて得られたものである。ケース2ではケース1に比べ高さに対応するZ軸方向の工具移動距離が長くなるから、これにより移動時間 $T_i$ は長くなる。一方、同図(b)に示す加工時間 $D_i$ を見ると、 $T_i$ とは逆にケース2よりケース1の方が長くなっている。システムでは移動時間、加工時間

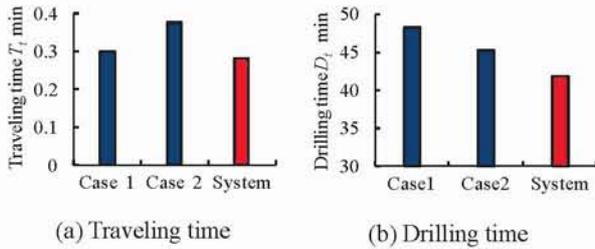


Fig.5 Comparison between traveling time and drilling time. Cutting and calculated conditions are same as in Table 1

ともにケース 1, 2 より短くなる結果が得られた。

### 4.3 総加工時間の評価結果

図6は図2の工作物モデルが完成に至る総加工時間を、各オペレータと本システムとで比較したものである。同図に示されるように、オペレータ 5, 12 および 13 において相対的に短い加工時間が得られている。これは上述の累積穴深さの短縮が考慮されたためである。同図より、13 人のオペレータの中で最も短い加工時間を得ているオペレータ 12 によって設計された工程での加工時間よりも、システムではさらに時間短縮が実現されていることがわかる。

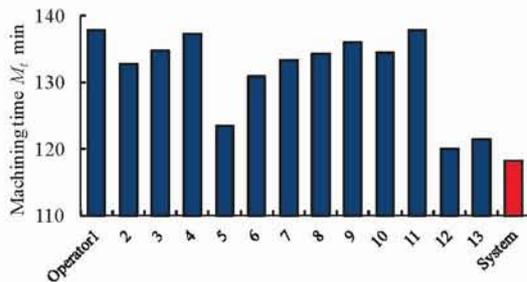


Fig.6 Comparison of total machining time obtained by using the system and operator's design. Cutting and calculated conditions are same as in Table 1

## 5. 消費動力・電力量に関する結果と検討

### 5.1 肩削りフライス工程

図7に肩削りフライスT2で工作物モデルの面2を加工する工程の模式図を示す。図8は図7(a)に対応する穴が関与しない場合の、切削動力 $P_m$ の回転角 $\theta$ による変化を示したものである。図中の $P_m=0kW$ の状態を含む重なり合った山形の実線は、各切れ刃が独立して切削する状態に対応する切削動力の変化を示す。この切削過程では刃数が6枚であるから、各波形は $60^\circ$ ずつ位相がずれた図示のものとなる。上部の約8~9kWの間で1本の波状に変動する波形は各切れ刃の $P_m$ を重ね合わせて求めた、実際の切削過程に対応する切削動力の変化である。

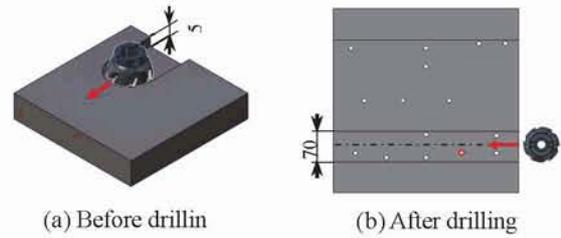


Fig.7 Schematic diagram of the milling process with shoulder mill

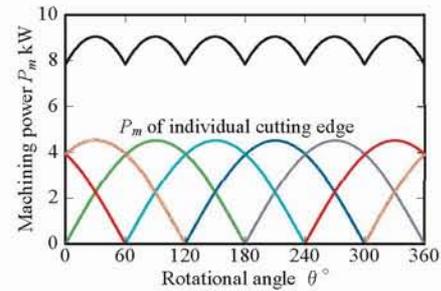


Fig.8 Variation of machining power with rotational angle. Cutting and calculated conditions: depth of cut, 5mm; cutting speed, 130m/min; material cut, S45C steel; cutting fluid, dry. Other conditions are same as in Table 1 (for the case corresponding to Fig.7 (a))

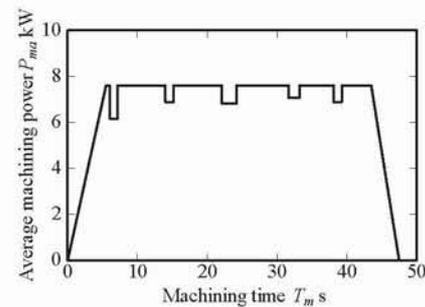


Fig.9 Variation of average machining power with machining time. Cutting and calculated conditions are same as in Fig.8

図9は図7(b)の一点鎖線上を工具が移動し切削を開始してから終了するまでの、加工時間 $T_m$ による切削動力の平均値 $P_{ma}$ の変化を示したものである。 $P_{ma}$ の線図に見られる窪みは、工具が穴を通過するときに対応する。図9と図7(b)の比較からわかるように、切れ刃の通過軌跡上に存在する穴の数や位置によって $P_m$ は変化するから、平均化した $P_{ma}$ の線上に現れる窪みの深さと幅は同一ではない。

以上のように穴の位置と直径および工具移動経路が指定されると、 $P_{ma}$ の時間変化が算出される。そこでシステムではこの $P_{ma}$ で囲まれる部分の面積に基づいて、穴が存在する場合の電力量が評価されるようにした。

## 5. 2 ドリル加工およびフライス加工での電力量

図 10(a)は以上の手順によりドリルT4 による切削過程での電力量 $E_e$ を求め、その結果を図 5 に対応させて示したものである。ドリルによる穴加工での $E_e$ の大きさは図 5(b)に示した穴加工時間に見られる結果と同様、ケース 1 →ケース 2 →システムの順に小となり、システムにより得られた工程のときに最小値をとる。

同図(b)は図(a)の結果を与える工程を用いて肩削りフライスT2 の消費電力量を評価した結果である。同図に示される 3 つの設計パターンの中ではフライス加工時に通

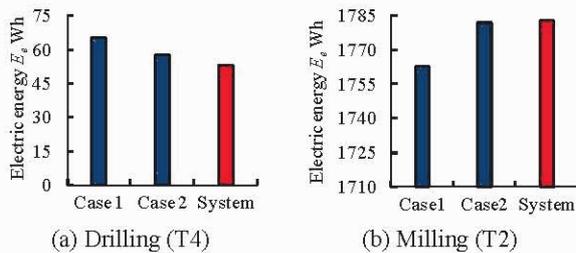


Fig.10 Comparison of electric energy consumed in drilling and milling processes. Cutting and calculated conditions are same as in Fig.8

過する穴の数が多く存在するケース 1 で、フライス加工時の電力量は最も少ない値をとっている。この結果は最短加工時間を与える加工順序と最小消費電力量を与える加工順序とが、同一でないことを示唆するものである。

## 6. 目的関数複数化の検討

以上のように、エネルギー解法に基づく切削模型を用いて算出される切削抵抗の予測値を用いれば、加工時間に加えて消費動力・電力量の評価は可能である。しかし実際の生産過程では、複数の目的関数を考慮した工程設計を実施することも少なくない。しかしこのような工程設計を実現するには目的関数が多くなると、解を求める際の取り扱いが複雑になる<sup>9)</sup>。そこでここでは、本報告で取り扱った加工時間と電力量をとりあげて、これら 2 つの目的関数を同時に考慮した工程設計を実施するための実用的な方法について考察する。

加工時間と電力量はそれぞれコストに換算することができる。すなわち、前者の単位時間当たりのコストを $c_T$ 、後者の単位電力量当たりのコストを $c_E$ とすれば、総加工時間に対応するコスト $C_T$ と総電力量に対応するコスト $C_E$ はそれぞれ $C_T = M_t \cdot c_T$ 、 $C_E = E_e \cdot c_E$ で求められる。そこでこれらの和 $C_T + C_E$ 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。しかし

ながら、一般の機械加工では $C_T$ と $C_E$ を必ずしも 1:1 対応させた場合のみを扱うとは限らず、生産の戦略によってその比率を変える必要も起り得る。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、加工時間と電力量を考慮した工程設計が可能になると考えられる。この具体的な検討については、今後の課題としたい。

## 7. あとがき

肩削りフライスとドリルによる切削過程を取り上げ、エネルギー解法に基づく切削模型を利用して得た切削抵抗に基づき、消費動力・電力量の評価機能をシステムに組み込んだ。そして最短加工時間を導く工程設計結果と消費電力量の比較から、最短加工時間を与える加工順序と最小消費電力量を与える加工順序は同一ではないことを示した。物理量の異なる目的関数を取り扱うためには、簡便な方法として相互に関連する量を用いる方法、すなわち加工時間と電力量の 2 つの目的関数を考慮した工程設計については、コストが利用できると考えられる。

## 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。また本研究での人による工程設計を実施するにあたり、出雲産業株式会社（栃木県宇都宮市）関山隆雄氏と横山達生氏にご協力をいただいた。ここに、記して感謝の意を表する。

## 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) 笠原和夫, 石森 茂, 池上敦子: 最短経路問題の解法を利用した加工工程設計支援システムの開発 (第 1 報), 精密工学会誌, 76, 10, (2010) 1188.
- 4) E. Usui et al.: Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process (Parts 1 and 2), Trans. ASME, Ser.B, 100, 2, (1978) 222, 229.
- 5) 広田明彦, 笠原和夫: ドリル加工における切りくず生成状態と切削抵抗の解析的予測 (第 1 報), 精密工

学会誌, 47,8, (1981)987.

- 6) 山口淳史, 池上敦子, 笠原和夫 : k-Shortest Paths 問題のアルゴリズムを利用した加工工程設計, 日本機械学会第 21 回設計工学システム部門講演会講演論文集, (2011) 556.