エンドミル加工用知能化工程設計システム に関する研究(第2報)*

— 切削条件の決定法と工具寿命の予測方法 —

室住正憲** 小川圭二*** 中川平三郎*** 垣野義昭†

Intelligent Process Planning System for End-milling Process (2nd Report)
— Decision Method of Cutting Conditions and Tool Life Estimation Method —

Masanori MUROZUMI, Keiji OGAWA, Heisaburo NAKAGAWA and Yoshiaki KAKINO

This paper deals with a decision method of cutting conditions and tool life estimation method for end-milling processes of plain carbon steel. Basic cutting conditions for side cutting of a step, one of the most basic milling processes, are chosen from the database given by a cutting tool manufacturer. These data are transformed for individual milling processes, e.g. trochoidal grooving, spiral hole enlarging, and corner milling, such that constant cutting force is kept by using feedforward control. Cutting tests were conducted for the workpiece composed of various cutting features, and it was clarified that adequate cutting conditions and adequate tool life are simply decided using by this method.

Key words: end-milling, process planning, cutting data base, cutting condition, tool life, canned cycle

1. 緒 言

エンドミル工具を用いて加工する場合の工程設計を、固定サイクルを組み合わせて加工コストを最小とする条件下で行なう方法について前報で提案した¹⁾²⁾。固定サイクルとは、ある指定された領域の材料を除去する際に、後述するような指定された工具パスパターンを用いて加工するように規定された加工の方法である。ただし、提案した方法では加工コストを構成する機械コストと工具コストのうち、後者を算出するために工具寿命を正確に予測する必要がある。本報ではこの工具寿命の予測のために必要な各固定サイクルを用いる場合の切削条件の決定法と工具寿命の予測法について研究することとした。

エンドミル工具は段加工、溝加工、穴広げ加工、ポケット加工、隅加工など様々な用途に使用されている。特別な高精度が必要でない場合には、これらの加工を1本のエンドミル工具を用いて加工されることが多い。このように多種類の加工を同一の工具で行う場合、切削条件をどのように定め、工具寿命をどのように予測するかは非常に難しい問題である。しかし、1種類の加工のみに使用する場合には、工具寿命を予測することはそれほど難しい問題ではない。そこで、最も基本となる段加工で使用する場合の切削条件を基にして、各種の固定サイクルを混在させて使用する場合の切削条件を定める方法とその時の工具寿命の予測法について研究することとした。

2. 知能化工程設計システムの概要

前報で構築したエンドミル加工用知能化工程設計システムの概要を図1に示す。すなわち、加工すべき部品形状が素形材形状と除去すべき加工フィーチャー群で記述されて

Fig.1 The intelligent process planning system

入力されると、これらを加工できる固定サイクル列に自動的に変換し、候補となる多数の固定サイクル列を生成する。

次にこれらの固定サイクル列を構成する各固定サイクルについて、切削条件と機械チャージ（人件費も含む）と工具価格および加工時間から定まる工具コストと機械コストの和で決まる加工コストを算出し、それが最小となる固定サイクル列を求めて工程設計を行うシステムである。

* 原稿受付 平成 21 年 7 月 10 日

** 正 会 員 (株)森精機製作所 (奈良県大和郡山市井戸野町 362)

*** 正 会 員 滋賀県立大学工学部 (彦根市八坂町 2500)

† 正 会 員 垣野技術研究所 (京都市下京区玉津島町 316・2 川南ビル 6F)

加工コスト C_{ms} ¥ は次式で与えられるものとしている。

$$C_{ms} = C_m \cdot T_m + C_t \cdot L_f / L_f \quad (1)$$

ここで, C_m は 1 時間当たりの機械チャージと人件費の和 ¥, T_m は加工時間 hour, C_t は工具 1 本のコスト ¥/本, L_f はその部品を加工するために必要なべ擦過距離 mm, L_f はその工具のべ擦過距離で表した寿命 m である。

前述のようにこのシステムを用いて工程設計を行なうためには各固定サイクルについて適切な切削条件を定め, 工具寿命を予測する必要がある。前報ではこれは各固定サイクルについて工具メーカの推奨する切削条件を用い, その切削条件の下で切削実験を行なって個々に工具寿命を定めていた。この工具寿命試験は多大の時間と経費を必要とする極めて煩雑なものであり, かつ工具がチッピングする危険性があった。

3. 提案する切削条件決定法と工具寿命の予測法

3.1 切削条件の決定法

切削条件の決定は次の手順で行う。

1) 固定サイクルの中で最も基本となる段加工固定サイクルについて工具メーカの推奨する切削条件下で対象とする素材について切削実験を行い, 切削初期の切削抵抗 (以後, これを標準切削抵抗と呼ぶ) を測定するとともに, 工具寿命を求める。ここでいう切削抵抗とは, 多数の切刃を有するエンドミル工具で切削した時に工具動力計で測定される平均的な切削抵抗をいう。

2) 各固定サイクルについて, 1) で求めた段加工の際の標準切削抵抗と等しくなるように数学モデルを用いて 1 刃当たりの送り量を定める。送り以外の切削条件は段加工固定サイクルの場合と同一とする。ただし, 固定サイクル毎に使用する工具パスのパターンが異なり, それによって切削抵抗が変化するので, これを避けるために切削抵抗を一定化する送り速度のフィードフォワード制御を用いる。このフィードフォワード制御法については文献 3) を参照されたい。

3) 隅加工固定サイクルについては, 切刃にチッピングが生じないように工具パスにアプローチとエスケープ用のパスを追加する。

3.2 部品加工を行う場合の工具寿命の予測法

部品加工を行う場合の工具寿命の予測は次の手順に従って行う。

1) 各加工固定サイクルを用いて, 上記のように決めた切削条件で切削試験を行い, 逃げ面平行部摩耗幅 (V_B) が 0.2mm に達した時を工具寿命とし, それまでの工具刃先ののべ擦過距離 (= 工具寿命に達するまでののべ擦過距離 L_f) を求める。

2) 前報の方法を用いて対象とする部品についてそれを構成している加工フィーチャー群とそれを加工するための固定サイクル列を作成する。

3) 固定サイクルごとにそれを用いて除去する領域 (= 加工フィーチャー) の形状と大きさからそれを除去するのに必要なべ擦過距離 L_i を算出する。

4) これをすべての固定サイクルについて求め, それを合計して, 1 個の対象部品を加工するために必要なべ擦過距離を各々の固定サイクル列について算出する。

5) 工具寿命に達するまでののべ擦過距離 L_f を 4) で求めた 1 部品を加工するために必要なべ擦過距離 L_i で除し, 1 本

Fig.2 Tool path for side milling canned cycle

Fig.3 Straight cutting

の工具で加工できる部品個数を算出する。これを用いて工具コスト $C_t \cdot L_i / L_f$ を算出する。

3.3 固定サイクルで用いる工具パスとのべ擦過距離の算出法

以下に各加工モードで使用する固定サイクルにおける工具パスとその加工に必要なべ擦過距離 L_i の算出法について考察する。ただし, 前述のように各固定サイクルでは切削抵抗が一定となるように送り速度のフィードフォワード制御が行なわれているものとする。

1) 段加工固定サイクル

幅 W mm, 長さ A mm の段形状を加工するために使用する工具パスを図 2 に示す。この形状を標準切削条件の下で加工するために必要な工具中心の送り距離 D_c mm は, 式(2)となる。

$$D_c = \frac{W}{p} A \quad (2)$$

1 つの切刃が主軸 1 回転の間にワークを削る距離 (= 擦過距離) l_0 mm は直線切削の場合には図 3 より式(3)のように決まる。

$$l_0 = r \cdot \cos^{-1} \left(\frac{r-p}{r} \right) \quad (3)$$

トロコイド溝加工などの固定サイクルでは円弧状の工具パスを用いるので, 式(2)に若干の修正が必要であるが, 同様に求められる。それについては文献 4) に詳しいので参照されたい。これより刃先ののべ擦過距離 D_s m は, エンドミル工具の刃数を z とすると式(4)となる。

$$D_s = \frac{D_c \cdot l_0}{1000 \cdot z \cdot f} \quad (4)$$

2) トロコイド溝加工固定サイクル

幅 W mm, 長さ A mm の溝形状をトロコイド溝加工固定サイクルを用いて加工するために使用する工具パスを図 4 に示す。また図 4 中の網掛け部分に記入されている曲線は工具の擦過軌跡を示したものである。この形状を標準切削条件の下で加工するために必要な工具中心の送り距離 D_c mm は, 工具径 d mm とすると, 式(5)となる。

$$D_c = \frac{(A+W/2)}{p} \cdot \frac{\pi}{2} (W-d) \quad (5)$$

Fig.4 Tool path for trochoidal grooving canned cycle

Fig.5 Tool path for scrolling canned cycle

Fig.6 Tool path for cornering canned cycle

これよりフィードフォワード制御を用いない場合にこの溝を加工するための刃先ののべ擦過距離 D_m は、式(4)と同様になる。一方、送り速度を調整した場合ののべ擦過距離 D_m は1刃当たりの送り f に代えて、平均の1刃当たりの送り f_0 を用いて、式(6)となる。

$$D_t = \frac{D_c \cdot l_0}{1000 \cdot z \cdot f_0} \quad (6)$$

3) 渦巻き加工固定サイクル

初期半径 R_1 mm, 最終半径 R_2 mm の円筒形状を渦巻き加工固定サイクルを用いて加工するために使用する工具パスを図5に示す。この形状を加工する際の幅方向の切削回数 n は、式(7)となる。

$$n = \frac{R_f - R_s}{p} \quad (7)$$

また、 i 周目の円の半径 R_i mm は、式(8)となる。

$$R_i = R_s + i \cdot p \quad (8)$$

i 周目の切削距離 D_{ci} mm は工具径を考慮すると、式(9)で表される。

$$D_{ci} = 2 \cdot \pi \cdot (R_s + i \cdot p - d) \quad (9)$$

よって標準切削条件の下で加工するために必要な工具中心の送り距離 D_c mm は、式(10)となる。

$$D_c = \sum_{i=1}^n \{2 \cdot \pi \cdot (R_s + i \cdot p - d)\} = 2 \cdot n \cdot \pi \left\{ R_s - d + \frac{p}{2} (n+1) \right\} \quad (10)$$

式(8)~(10)は近似式であり、厳密には正しくないが実用上問題ない程度の近似となっている。

これよりフィードフォワード制御を用いない場合に刃先ののべ擦過距離 D_m は、式(4)と同様になる。

これにフィードフォワード制御を用いることによる送りの減少によって生じるのべ擦過距離 D_m は1刃当たりの送り f に代えて、平均の1刃当たりの送り f_0 を用いて、式(6)と同様になる。

4) 隅加工固定サイクル

初期半径 R_1 mm, 最終半径 R_2 mm の隅形状を溝加工固定サイクルを用いて加工するために使用する工具パスを図6に示す。

この形状を加工する際の切削回数 n は、式(11)となる。

$$n = \frac{R_s - R_f}{p} \quad (11)$$

また、 i 回目の円の半径 R_i mm は、式(12)となる。

$$R_i = R_s - i \cdot p \quad (12)$$

i 回目の切削距離 D_{ci} mm は工具径を考慮すると、

$$D_{ci} = \frac{\pi \cdot (R_s - i \cdot p - d)}{2} \quad (13)$$

よって、標準切削条件で加工するために必要な工具の送り距離 D_c mm は、式(14)となる。

$$D_c = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{\pi \cdot (R_s - i \cdot p - d)}{2} \right\} = \frac{n \cdot \pi}{2} \left\{ R_s - d - \frac{p}{2} (n+1) \right\} \quad (14)$$

これよりフィードフォワード制御を用いない場合に刃先ののべ擦過距離 D_m は、式(4)と同様になる。

これにフィードフォワード制御を用いることによる送りの減少によって生じるのべ擦過距離 D_m は1刃当たりの送り f に代えて、平均の1刃当たりの送り f_0 を用いて、式(6)と同様になる。

本システムでは以上の固定サイクルのほか、5) 全幅溝加工固定サイクル、6) ヘリカル穴加工固定サイクルを使用しているが、これらの固定サイクルでは切削抵抗を一定とする送りのフィードフォワード制御を使用できず、かつ6) ヘリカル穴加工固定サイクルは底刃が中心となる加工であるので、本研究の対象とせず、従来通り個別に工具メーカの推奨する切削条件を用いて工具寿命を求めることとする。

4. 試験装置と方法

一般によく使用されている機械構造用炭素鋼 S50C を (Al, Ti) N コーティングされた超硬製のストレートエンドミル (φ10mm, 4 枚刃) で加工する場合に、前章までに述べてきた方法が妥当であるかどうかを実験的に検証する。そのために、各固定サイクルを用いた工具寿命試験と実際の部品加工を想定した工具寿命試験を行う。試験に用いる工作機械は、以下に示す(株)森精機製作所製立形マシニングセンタ SV-400 である。また、切削抵抗の測定のために用いるセットアップを図7に示す。

ストローク: X 軸 600mm, Y 軸 430mm, Z 軸 460mm

最大送り速度: 60000mm/min(X, Y, Z 軸)

最大主軸回転数: 20000min⁻¹

モーター馬力(15分/連続): 15/11kW

工具の切刃のランアウトが大きい場合には工具寿命が非常に短くなるので、ランアウトが 5μm 以下になるように取り付ける。

基準的な加工である段加工固定サイクルで用いる切削条件として工具メーカが推奨している表1の条件を用いる。

表1の条件で切削した時に測定された切削抵抗 (=標準

Fig.7 The cutting force monitoring system

Table 1 Cutting condition for step milling canned cycle

Tool diameter mm	10
Spindle speed min^{-1}	3500
Cutting speed m/min	110
Feedrate mm/min	1120
Feed per tooth mm/tooth	0.08
XY cutting amount mm	1
Z cutting amount mm	15
Chip removal rate cc/min	16.8

(a) Mold parts shape

(b) Location of dispatched canned cycles

Fig.8 Model part shape and location of dispatched canned cycle

切削抵抗)はXY方向(半径切り込み方向と工具送り方向)の合力 $F_{xy}=431\text{N}$ となった。

本研究で対象とする部品としてモデル的なものを考え、図8(a)に示すような形状とする。この部品は加工フィーチャーとしては、段、溝、隅、ポケットから構成されており、これを加工するために段加工固定サイクル、トロコイド溝加工固定サイクル、隅加工固定サイクルに加えて、ポケットの加工用にヘリカル穴加工固定サイクルと渦巻き加工固定サイクルを併せて使用する場合を想定する。それぞれの固定サイクルで除去する領域を同図(b)に示すように定めた場合について検討する。ここで、切削深さが異なると境界摩耗の位置が変化して工具寿命に与える影響が無視できなくなるため、切削深さは各固定サイクルとも段加工と同じにする。

これらの固定サイクルでは1刃当たりの送りを切削抵抗

Fig.9 Measured cutting force change in trochoidal grooving canned cycle with and without feed forward control

Fig.10 Measured cutting force change in cornering canned cycle with and without feed forward control

が上記の標準切削抵抗である $F_{xy}=431\text{N}$ と同じになるように工具パスの曲率半径に応じて次のように変化させる。

トロコイド溝加工固定サイクル: $0.05 \sim 0.58\text{mm/tooth}$

隅加工固定サイクル: $0.05 \sim 0.56\text{mm/tooth}$

渦巻き加工固定サイクル: $0.02 \sim 0.8\text{mm/tooth}$

この条件で、各固定サイクルについて一定送り距離切削するごとに切削を中断して、工具の損傷状態を写真撮影しその状態での切削抵抗を測定する。これを工具寿命として定めた逃げ面平行部摩耗幅が $V_B=0.2\text{mm}$ に達するまで行なう。同様の加工試験を図8に示した部品についても行なう。

工具の平行部摩耗幅は全ての切刃について測定するが、工具寿命の判定にはその最大のものが前述のように $V_B=0.2\text{mm}$ に達する切削送り距離とする。

5. 実験結果と考察

5.1 単独の固定サイクルでの試験

送り速度を変えることによって切削抵抗を一定に保つフィードフォワード制御を行なうと、加工時間が短くなり、加工に必要なのべ擦過距離も短くなる。その割合は工具パスひいては加工形状によって異なる。それらが激しく変化するのはトロコイド溝加工固定サイクルと隅加工固定サイクルである。

トロコイド溝加工固定サイクルの場合に測定された切削抵抗の一例を図9に示す。フィードフォワード制御によって1サイクル中で切削抵抗はほぼ一定に保たれている。フィードフォワード制御しない場合、切削抵抗は大きく変化している。工具が溝の中央部付近にあるときは送りを小さくするが、サイクルの初めと終わりのところでは送りを大きくするので、加工時間は32%短くなり、刃先ののべ擦過距離も17%短くなる。

Fig.11 Relation between cutting length and tool wear at various canned cycle(P1,P2,P3 denote Part1,Part2,and Part3 machinings)

Table 2 Total cutting length at various canned cycle

CC : Canned Cycle	Total cutting length m
Side milling CC (SM.CC.)	734
Trochoidal grooving CC (T.CC.)	740
Corner milling CC (C.CC.)	757
Scroll milling CC (SC.CC.)	732

隅加工固定サイクルの場合は工具パスの形状の変化はもっと激しいので、フィードフォワード制御を用いない場合、切削抵抗は図 10 に示すように非常に大きくなり、刃先がチッピングする危険性が非常に大きい。フィードフォワード制御を用いると、切削抵抗はほぼ一定に保たれ、全サイクルで加工時間は 34% 短くなり、刃先ののべ擦過距離も 25% 短くなる。

各固定サイクル単独で切削した場合ののべ擦過距離と工具摩耗の関係を全ての固定サイクルの場合について図 11 に示す。工具メーカーの推奨する切削条件の下で行なった段加工固定サイクルではのべ擦過距離 $L_f=734m$ で工具寿命に達した。それに対し、各固定サイクルを用いて行なった試験では、それぞれ表 2 のようなのべ擦過距離で工具寿命に達した。どの固定サイクルを用いて加工した場合もほぼ同じのべ擦過距離 740m 付近で工具寿命に達していることがわかる。ただし、この値は 1 本の工具についてであり、使用した工具には 1 本に 4 個の切刃があるので、1 刃あたりに換算すると、寿命は 185m となる。本試験のように切削抵抗の大きさをほぼ一定に抑え、チッピングの発生を抑制して切削すると、工具は正常摩耗のみが進展し、これで工具寿命に達したのではほぼ様な工具摩耗が進行し、以上のような結果が得られたものと思われる。

5.2 部品加工試験

図 8 に示した部品 1 個を加工するために必要な各固定サイクルののべ擦過距離 D_s は次のようになる。

段加工固定サイクル	: 33m
トロコイド溝加工固定サイクル	: 73m
隅加工固定サイクル	: 7m
渦巻き加工固定サイクル	: 27m

ただし、ポケット穴にエンドミル工具が入るために必要なヘリカル穴加工固定サイクルについては使用する工具が異なるためのべ擦過距離には入れていない。これを合計するとこの部品 1 個を加工するために必要なのべ擦過距離 D_s は 139m になる。工具寿命 $L_f=740m$ の場合、1 本の $\phi 10mm$

のエンドミル工具で 5.3 個の部品が加工できることになる。3 本の工具で実際に部品加工を行ったところ、それぞれ 6, 7, 8 個の加工を終わった時には工具寿命に達していた。実際の部品加工で工具寿命が若干長くなったのは、固定サイクル間を繋いでいる早送りパスが必要なため、工具のエアーカット時間が長くなり、工具が冷却されたためではないかと推測される。この平均 30% 程度寿命が長くなるのは工具寿命の推定値に対する一種の余裕と見なしても良いのではないかと判断される。

図 8 に示した部品を 3 本の工具で加工した場合ののべ擦過距離と逃げ面平行部摩耗幅 V_B の関係は先の図 11 に示されているように、単独の固定サイクルで加工した場合とほとんど同じになった。

6. 結 論

エンドミル加工用の知能化工程設計を構築するために必要な固定サイクルで使用する切削条件を、炭素鋼 S50C を加工する場合について決定し、工具寿命を予測する方法について研究した結果、次のような結論が得られた。

- (1) 固定サイクルの中で最も基本となる段加工固定サイクルについて工具メーカーの推奨する切削条件下で対象とする素材について切削実験を行い、初期の切削抵抗と工具寿命を求め、この切削抵抗と等しくなるように各固定サイクルでの 1 刃当たりの送りを定めて、切削条件を決める方法を開発した。
- (2) 切削抵抗を一定に保つ送りのフィードフォワード制御でチッピングが生じないように加工した場合には、工具寿命は切刃ののべ擦過距離で評価することができる。
- (3) 固定サイクルで除去する領域の形状と大きさが決まれば、その加工に必要な切削条件、加工時間、工具寿命の消費割合を予測するシステムが構築できた。
- (4) (3) のシステムを用いて、実際に部品加工を行ったところ、1 本の工具で加工できる部品個数が平均 30% 程度の余裕をもって見積ることができた。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、三菱マテリアル(株)西明石工場の方々に多大のご支援をいただきました。ここに深甚の謝意を表させていただきます。

参 考 文 献

- 1) 室住正憲ほか：エンドミル加工用知能化工程設計システムに関する研究，精密工学会誌，71，8(2005)1010。
- 2) M.Murozumi et al., INTELLIGENT PROCESS PLANNING SYSTEM MORI-IPPS FOR END MILLING PROCESS, Proceedings of ISFA2008, JS018, (2008)1.
- 3) H. Otsuka et al., Advanced Feed Forward Control for Constant Cutting Forces in Die Machining, Proceedings of 2002 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, (2002)445.
- 4) 大塚裕俊ほか，焼入鋼のエンドミル加工に関する研究（第 2 報）— 工具経路の移行部を含む曲線切削時の切削抵抗の一定化制御—，精密工学会誌，67，8(2001)990。