エンドミル加工における工具径と切込みの 一選定法*

李 勇** 藤井 義也*** 岩部 洋育***

A Selecting Method of Tool Diameter and Depths of Cut in End Milling

Li Yong, Yoshiya FUJII and Hiroyasu IWABE

This paper presents an optimized determination of tool diameter, radial and axial depths of cut in end milling process. For such a purpose, an index of performance is proposed of which machining accuracy, manufacturing cost as well as machining efficiency are taken into consideration. Consequently, by means of the proportional relation to cutting force, maximum chip area which affects machined surface is analyzed with the behavior of cutting edge. Furthermore, flexural rigidity of end mill is investigated and an experiment of tool wear is carried out. Through these approaches, the index of performance is calculated and the optimum values of diameter of end mill and depths of cut are discussed.

Key words: end milling, helical cutting edge, index of performance, tool diameter, depth of cut, ratio of rigidity, manufacturing cost, chip area, cutting force

1. 緒 言

FMS ないし CAD/CAM システムの発展が急速に推進されつつあり、工具及び切削条件の選択が自動加工のために重要な課題となっている。これまで旋削加工においては拘束条件の下で経済性の観点から、切削速度ならびに送り速度、さらに切込みの最適化が論じられてきた¹⁾。しかし、金型加工を始めとする各種加工に様々なエンドミルが多用されているにもかかわらず、エンドミル加工に関する切削条件の選定問題は報告されていない。一般にエンドミル加工では、エンドミルの突出し量が長く、工作機械、工作物に比べ、工具のたわみによる加工誤差が顕著である²⁾。そのため、エンドミル加工における工具径と切込みの決定は加工能率とともに加工精度に大きく影響すると考えられる。

そこで本研究ではねじれ刃エンドミルによる側面切削における工具径及び切込みの選定問題を取り上げる。この問題を取り上げるに当たって、加工誤差の抑制と生産性の向上を考慮した評価関数を提案する。前者に関しては切削面積による切削力の解析及び工具の

曲げ剛性が考慮され、後者に関しては加工能率及び加工コストが考慮されている。そして評価関数の数値計算を行い、その結果に基づいてエンドミル直径、半径方向切込み及び軸方向切込みの最適値の選定方法について検討を行う。

2. 評価モデル

切削加工プロセスを評価するには、加工誤差、加工コスト及び切削時間などの項目が考えられる。ここでは生産性及び加工精度の相反する評価項目を含んだ評価関数を考案する。

加工精度を向上させるためには、工具の曲げ剛性を大きくして切削力による変形を抑制するとともに、工具のたわみの原因となる切削力を小さくすることが必要である。そこで工具の曲げ剛性と切削力の比が工具変形による加工誤差に反比例すると考え、加工精度による評価は次式で行うことにする。

$$IP_1 = \rho / F \quad (1)$$

ここで、 ρ は後述する工具の剛性比であり、 F は切削抵抗を表す。

一方、加工能率と加工コストにより、加工プロセスを評価する場合は、次式を用いて行う³⁾。

$$IP_2 = \frac{R_d \cdot A_d \cdot S_z \cdot z \cdot N}{k_d + \frac{k_d \cdot t_c + k_t}{T}} \quad (2)$$

* 原稿受付 平成元年 11 月 8 日。昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会 (昭和 61 年 10 月 10 日) にて発表

** 学生会員 新潟大学大学院 (新潟市五十嵐二の町 8050)

*** 正 会 員 新潟大学工学部

式(2)で用いた記号は次の通りである。

k_d : 単位時間当たりの直接人件費+経費 (円/min)

k_t : 工具費(購入費, 再研削費を含む) (円/刃)

t_c : 工具交換時間 (min)

T : 工具寿命時間 (min/刃)

S_z : 1刃当たりの送り (mm/刃)

z : エンドミルの刃数

N : 主軸回転数 (rpm)

R_d : 半径方向切込み (mm)

A_d : 軸方向切込み (mm)

IP_2 は単位時間当たりの除去体積と単位時間当たりの加工費用の比を表している。式(1)または式(2)を単独で用いる時, その最大値に対応する加工条件がそれぞれ最適となる。

本研究では加工条件を選定するための総合的な評価を行うため, その評価関数として次式を提案する。

$$IP = IP_1^m \cdot IP_2^n \quad (3)$$

ここで, m, n は粗加工, 中仕上げ加工及び仕上げ加工によって設定される指数であり, 0 ないし 1 の値をとる。式(1)及び式(2)により, 式(3)の値を最大とする工具径及び切込みが求める加工条件となる。

3. 切削面積による切削力の解析

エンドミル加工において, 瞬間切削力は切れ刃の回転に伴って時々刻々変化する。ところが, 切れ刃が加工面の生成に参与している区間における最大切削力が加工誤差に最も大きく影響するため, 切削条件の選定に際しては次式で与えられる最大切削力を用いることにする⁴⁾。

$$F_{\max} = K \cdot A_{\max} \\ = k \cdot h_{\max}^{-\varepsilon} \cdot A_{\max} \quad (4)$$

ここで, $A_{\max}$ は最大切削面積, K は比切削力, $h_{\max}$ は最大切削厚さであり, k 及び ε は被削材質, 切れ刃形状に依存する定数である。式(4)より, 切削面積及び切削厚さを求めれば, 切削力と切削条件との関係を推定することが可能となる。

まず最大切削厚さはエンドミル半径を R とすると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} h_{\max} &= R - \sqrt{(R - R_d)^2 + (R \sin \theta - S_z)^2} \\ \theta &= \cos^{-1} \frac{R - R_d}{R}; R_d \leq R \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

最大切削面積はエンドミル切れ刃の接触状況より以下のように解析される。ここでは基本となる1枚の切れ刃を対象とした結果を示すが, 2枚以上の切れ刃による同時切削が生じる場合には, 最大切削面積は各切

Fig. 1 Plan-view of end milling

れ刃における切削面積の和の最大値を用いる。

図1は切削中におけるエンドミル切れ刃の接触状況を示す切削面展開図であり, 図中の斜線はねじれ刃の切削位置を表す。また図1には後述する二つの切削タイプの場合を実線及び破線で示している。エンドミルの1回転ごとに, 切れ刃は点bより切削を開始し, 点a1またはa2で切削領域baa1b1またはbaa2b2を離れ, 切削を終了する。切削開始点bより点aに達するまでの間における切れ刃のエンドミル軸方向への最大投影長さを z_0 とすれば, 切れ刃の接触状況はエンドミルと切込みの組合せにより, $A_d < z_0$ (タイプI) 及び $A_d \geq z_0$ (タイプII) に分類される。なお z_0 はねじれ角を λ とすれば次式で表される。

$$z_0 = R \cdot \frac{\theta}{\tan \lambda} \quad (6)$$

また図1において A_{d1} 及び A_{d2} はそれぞれタイプI及びタイプIIに対応する軸方向切込みである。

タイプIの場合, 切れ刃が切削開始後 ϕ_1 だけ回転した位置b1cで切削面積が最大値となる。しかし切れ刃はaa1上になく, 加工面の生成に参与していない。そのため, 加工面に影響を及ぼす最大切削面積は切れ刃が ϕ_2 まで回転した位置b0aで生じ, 次式により求められる。

$$A_{\max} = S_z \cdot R \cdot \frac{1 - \cos \gamma}{\sin \lambda} \quad (7)$$

Fig. 2 Variance of flexural rigidity with diameter of end mill

$$\gamma = \frac{A_d \cdot \tan \lambda}{R}$$

タイプ II の場合、切削面積は切れ刃が回転角 ϕ_2 に回転した位置 b_{0a} で最大となり、その後 ϕ_3 まで一定である。その最大切削面積は次式で与えられる。

$$A_{\max} = S_z \cdot \frac{R_d}{\sin \lambda} \quad (8)$$

4. エンドミルの剛性比

式(1)より、切削力を小さくするとともに、エンドミルの曲げ剛性を大きくすれば、工具のたわみに起因する加工誤差が減少する。ここではエンドミルを片持ちはりとしてその曲げ剛性を考える。理論上曲げ剛性に関与するエンドミルのパラメータは材質のほか、刃長、刃形(断面形状)及び直径である。その上ねじれ角をもつため、ねじれ刃エンドミルの曲げ剛性を厳密に求めるのは非常に複雑な問題である⁵⁾。しかしながら、ねじれ角が一定で断面形状が相似であれば、剛性比を用いて曲げ剛性を比較することができる。本報では簡易的にエンドミル直径 D 、刃長 L_0 を用いて剛性比を次式で表す。

$$\rho = \delta \cdot \frac{D^4}{L_0^3} \quad (9)$$

ここで、 δ は比例係数で 1 mm^{-1} の値で与えられている。図2はN社製の高速度鋼、2枚刃エンドミルを例にして、式(9)による剛性比を示すものである。また図中には L_0/D の値も併記した。図よりエンドミルは直径の広い範囲において L_0/D 比がほぼ一定である。一方剛性比は直径 14~24 mm においてほぼ一定であるが、14 mm 以下では直径にほぼ比例した変化を示し、24 mm 以上では直径の増加につれて急激に増大する。

Table 1 Cutting speed (m/min)

Diameter mm	Spindle speed rpm				
	171	238	327	463	641
16	—	12.0	16.4	23.3	32.2
20	—	15.0	20.5	29.1	40.3
25	13.4	18.7	25.7	36.4	—
32	17.2	23.9	32.9	46.5	—

Fig. 3 Taylor curves for helical end mill at $VB=0.1$ mm

5. 工具寿命実験

5.1 実験条件及び方法

実験に使用した工作機械は新潟鉄工所製 2 UMBN 型 NC フライス盤である。使用したエンドミル直径、主軸回転数及び切削速度は表1に示すとおりである。切削条件は送り 0.1 mm/刃、半径方向切込み 5 mm、軸方向切込み 20 mm である。またエンドミルは高速度鋼、2枚刃、右ねじれ角 30° である。被削材は炭素鋼 S45C で、切削方式は下向き、湿式で側面切削を行った。

実験ではエンドミルの先端にリングを取り付けて、軸方向にエンドミルと工作物との相対位置を一定にした。切れ刃の逃げ面摩耗の測定には、工具顕微鏡を用い、寿命判定基準 $VB=0.1$ mm まで、切れ刃に沿って逃げ面摩耗幅の最大値を測定した⁶⁾。

5.2 実験結果及び考察

図3は摩耗実験で得られた測定値に基づき、摩耗基準値 $VB=0.1$ mm に達する切削長さを工具寿命とした寿命曲線である。図3の結果を用いて回帰分析を行い、切削速度と工具径の工具寿命に及ぼす影響を次式

Fig. 4 Total manufacturing cost

のように求めることができる。

$$V \cdot T^{1.22} \cdot D^{-0.98} = 13 \quad (10)$$

また切込み R_{dl} を選択する場合、 R_{dl} に対する工具寿命 T_l は実切削時間として考えているため、式 (5) を用いて次式のように換算している。

$$\left. \begin{aligned} T_l &= \frac{\theta}{\theta_1} \cdot T \\ \theta_1 &= \cos^{-1} \frac{R - R_{dl}}{R} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

図 4 は図 3 に示した工具寿命値を用いて、加工コストの変化を示した一例である。なお製品 1 個当たりの加工コストは次式を用いて計算している。

$$M = k_d \cdot (t_m + t_l) + (k_d \cdot t_c + k_l) \cdot \frac{t_m}{T} \quad (12)$$

ここで、 t_m は正味切削時間 (min/個)、 t_l は非切削時間 (min/個) である。 k_d を 120 (円/min) と定め、 k_l の値は図中に示している工具径に対して再研削なしにそれぞれ 3850, 5510, 7710 及び 15200 (円/刃) である。なお t_c, t_l はそれぞれ 3 min と仮定した。図より各工具径には最小加工コストに対応する経済切削速度が存在している。直径 25 mm の場合を除くと、工具径が大きくなるにつれて経済切削速度が増加し、直径が加工コストに大きく影響を与えることがわかる。

6. 選定計算と考察

上述の計算アルゴリズムに基づき、式 (3) を用いて工具径及び切込みの最適値を求める

ことが可能となる。ただし以下の計算においては 1 回の切削における半径方向切込みはエンドミル半径以下、軸方向切込みは切れ刃長さ以下にし、半径方向切込みは軸方向切込みより小さくする拘束条件が含まれる。一方、切削速度及び送り速度は自由に指定できるが、計算例では主軸回転数を 641 rpm、送りを 0.1 mm/刃とした。また中仕上加工を想定し、指数 m を 0.75, n を 1 としている。切削力に関する定数 k, ϵ の値は実験により定められ、それぞれ 47.14, 0.462 である⁴⁾。

6.1 工具径の選定

図 5 は図中に示す条件を用い、工具径と評価関数の関係を示したものである。図より、 IP_1 は剛性比が主要因で工具径の増加とともに増大する。一方 IP_2 は工具径の減少につれて工具費用が減少するため増大するが、直径 10 mm 未満では前述の拘束条件により半径方向切込み 5 mm を 2 回以上で切削するため、加工コストは急激に増加して IP_2 の値は大きく減少する。 IP_1 と IP_2 の値を式 (3) に代入して評価関数 IP を求めると、図に示すように IP を最大とする工具径が存在し、その直径は 14 mm である。図において IP がのこ歯状の変化を示しているが、これは切れ刃の長さ及び工具費用が不連続的に変化することによる。

また切込み R_d と A_d を変化させて同様の計算を行い、評価関数 IP を最大とする工具径を求めると表 2 のようになる。表より $m=0.75, n=1$ の場合は最適工具径が 14 または 10 mm であり、 $m=1, n=1$ の場合は A_d が小さく R_d が大きい値をもつ時に最大径の 50 mm が最適である。さらに $m < n$ において最適工具径は 10 ないし 14 mm となり、 m が n に近づくほど最大径 50 mm が最適値となる計算結果も得られている。 $m < n$ の場合は評価関数 IP において IP_1 による加工精度の評価を考慮しながらも IP_2 にウェイトが

Fig. 5 Index of performance versus diameter of end mill

Table 2 Diameter of endmill (mm)

$m=0.75$ $n=1.00$		R_d mm					
		1	2	3	4	5	6
A_d mm	10	10	14	14	14	14	14
	15	10	10	10	10	10	10
	20	14	14	14	14	14	14
	25	14	14	14	14	14	14
$m=1.00$ $n=1.00$		R_d mm					
		1	2	3	4	5	6
A_d mm	10	10	50	50	50	50	50
	15	10	10	50	50	50	50
	20	14	14	14	14	50	50
	25	14	14	14	14	14	14

置かれて生産性が重要視されるためであり、 m が n の値に近づく場合は IP_1 , IP_2 の切込みに対する増減率によって工具径の選定結果が影響されることによる。そこで指数 $m < n$ に限定すれば工具径の選定は切込みの変化に多少影響されても使用可能な工具径の範囲内に特定の値を算出でき、 IP による評価が有用であると考えられる。なお加工精度を重視する $m > n$ の仕上加工については工具摩耗の加工精度に及ぼす影響ならびに精度限界と切込みの関係などを考慮することが必要となり別報で検討する。

6.2 半径方向切込みと軸方向切込みの選定

図6は直径14 mmのエンドミルを用いて前述した拘束条件の下で、半径方向切込みと軸方向切込みの組合せによる評価関数の挙動を示したものである。 $m=1$, $n=0$ と $m=0$, $n=1$ により IP はそれぞれ IP_1 , IP_2 となるので、図6(a), (b)及び(c)はそれぞれ評価関数 IP_1 , IP_2 及び IP と切込みの関係を示している。図6(a)において、 R_d と A_d をともに小さい値に選定す

れば、 IP は最大となる。図6(b)では生産性の見地より切込み R_d と A_d をともに最大限にすれば最適となる。しかし、限りなく小さい切込みの組合せは工具摩耗を増加させ、最大切込みの組合せは工具損傷の原因になって実用上問題がある。そこで切込み R_d と A_d の選定に際しては IP_1 または IP_2 による一方的な評価は望ましくないことが明らかである。そのため、生産性ととも加工精度を考慮した評価関数 IP は図6(c)に示すように IP_1 と IP_2 のバランスを図って半径方向切込みと軸方向切込みの選定を可能にすると考えられる。図6(c)より、 A_d の上限値または $A_d=R_d$ の近傍では IP が最大値となっており、 $A_d=7$ mmと $R_d=7$ mmまたは $A_d=25$ mmと $R_d=1.5$ mmの組合せが得られる。

ところでエンドミル加工においては軸方向に2回以上切削すれば工具の偏心及び切削中のふれまわりにより段差が生じる。そのため、与えられた板厚を軸方向切込みとすることが望ましい。この場合、切込みの選定は半径方向切込みだけとなり、図6(c)よりも容易に選定できることがわかる。例えば $A_d=20$ mmに対し、 IP の最大値に応じて R_d の値は1.5 mmである。

次に指数 m , n の変化が切込みの選定に及ぼす影響を検討する。ここでは n を1と固定し、 m を変化させて、与えられた A_d に対する R_d の最適値を表3に示す。表より軸方向切込みの小さい場合は指数 m の値によらず半径方向切込みの値は最大値の7 mmでよい。 A_d が大きな値となる場合、拘束条件($R_d \leq R$ と $R_d \leq A_d$)の範囲内では R_d の最適値が得られる。しかも指数 m の増大につれて R_d の最適値が最小値まで減少する。なお計算上では R_d の下限を0.1 mmとしている。これは実験より R_d をそれ以上小さくして

Fig. 6 Curved surface of IP versus depths of cut in case of $R=7$ mm

Table 3 Optimized radial depth of cut (mm)

$n=1.00$		m					
		0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
A_d mm	10	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
	15	7.00	7.00	7.00	7.00	0.32	0.10
	20	5.90	4.09	2.29	0.94	0.32	0.10
	25	5.90	4.09	2.29	0.94	0.32	0.10

Fig. 7 IP with depths of cut under constant IP_2

も加工精度の向上が認められなかったことによる。

6.3 生産性を維持する場合の切込みの選定

図7には評価関数 IP_2 を一定にした場合の切込みと評価関数 IP の関係を示している。図中の破線は指定された IP_2 によって求められた半径方向切込みである。この場合、 IP_2 の値に対する R_d と A_d の組合せが存在する。評価関数を最大とするため、すなわち生産性を維持し、加工精度を向上させるためには、 R_d を小さく、または A_d を大きく選定すればよい。ただし、 R_d か A_d か一方を選択すれば他方は式(3)より定まる。なお図7より軸方向切込みを最大限に選定し、軸方向に1回で切削を行えば加工精度を向上させる意味で有利であることもわかる。

7. 結 論

ねじれ刃エンドミルによる側面切削における工具径及び切込みの選定問題を検討し、以下の結論が得られた。

- (1) 加工条件の最適化を目的として、生産性とともに加工精度を考慮した加工条件の評価関数を考案した。
- (2) 上記の評価関数の数値計算を行い、その値を最大にする最適工具径の選定を行った。最適工具径は $m=0.75$, $n=1$ の中仕上加工において14 mm または10 mm である。
- (3) 指数 m 及び n をパラメータとし、半径方向切込みと軸方向切込みを変数とする評価関数を求めることにより、その最大値に基づく最適切込みの組合せが定められる。
- (4) 軸方向の切込み回数が1回に制限される場合は与えられた軸方向切込みに対し拘束条件の範囲内で半径方向切込みの最適値が求められる。その値は指数 m の増大につれて減少する傾向にある。

参 考 文 献

- 1) 岩田一明ほか：不確定因子を考慮した最適加工条件の設定（第3報）——切込み回数ならびに切込み量の最適化，精密機械，41，5（1975）420.
- 2) 藤井義也，岩部洋育：ねじれ刃エンドミルのたわみに及ぼすチャックおよびコレットの影響と加工精度，精密工学会誌，52，2（1986）273.
- 3) R. M. Centner and J. M. Idelson：Adaptive Controller for a Metal Cutting Process，IEEE Trans. on AC，5，（1964）154.
- 4) 藤井義也：最急傾斜法による定数推定とガウス積分を用いたねじれ刃エンドミルの切削機構の解析，昭和59年度科学研究補助金（一般研究C）研究成果報告書.
- 5) 藤井義也，岩部洋育：ねじれ刃エンドミルの断面形状と曲げ剛性，精密機械，49，6（1983）735.
- 6) 藤井義也，岩部洋育：エンドミルの逃げ面摩耗による加工精度の変化，精密機械，46，8（1980）1015.