

エンドミル加工における切削力の予測とその精度* (重ね合わせ法による簡易予測法)

岩部 洋育*¹, 古泉 昭彦*²
藤井 義也*¹ 浅見 敏彦*³

Prediction of Cutting Force in End Milling (Simple Prediction Method by Superposition)

Hiroyasu IWABE, Akihiko KOIZUMI
Yoshiya FUJII and Toshihiko ASAMI

This paper proposes a simple and accurate method for the prediction of the cutting force in end milling. The cutting force in end milling of a thick plate can be predicted by adding the cutting forces in end milling of a thin plate. The following were obtained from the comparison of the predicted cutting force with the experimental results. (1) The error of the predicted cutting force is reduced with a increased helix angle of the cutting edge of the end mill and a decreased radial depth of cut. (2) The error of the predicted cutting force of a 1-tooth end mill is less than about 200 N under cutting conditions of 2~10 mm radial and 2~20 mm axial depth of cut and 10°~50° helix angle. The maximum error occurs at the helix angle of 10°, but the ratio of the error to the maximum cutting force is less than 10%. (4) The cutting force of a 4-tooth end mill can be predicted by superposition of that of a 1-tooth end mill. The maximum error and ratio are also less than 200N and 10% respectively.

Key Words: Milling, Cutting Force, Simple Prediction Method, Superposition, Helical End Mill, Helix Angle, Predicted Error, Error Ratio, Depth of Cut

1. 緒 言

エンドミルは直径に比べて切れ刃長さが長いので、切削力の影響を受けて変形し、加工面に大きな加工誤差を生じる。この誤差はねじれ刃による切削過程において、加工面を創成している切れ刃点とその位置における工作物との相対変位が、切れ刃の周期で変化することに起因するもので、板厚方向に生じる誤差の形状およびその大きさはさまざまである⁽¹⁾。エンドミルによる高精度加工を実現するためには、切削条件によって変化する加工誤差を高い精度で予測しなければならない。そのためには切削力の高精度な予測が必要となる。

しかし、エンドミル加工は切りくず厚さが変化する非定常切削であるとともに、ねじれ刃による断続切削であるため切削機構が複雑である。そのため、比切削抵抗を用いる方法⁽²⁾および傾斜切削モデルに基づいてせん断強さとするくい面摩擦角を用いる方法⁽³⁾によ

り切削力の予測が試みられているが、その予測精度は高くない。一方、加工精度の予測精度を高める目的で切削力を実験値に依存すると⁽⁴⁾、必要とする条件において切削力をすべて測定しなければならず、実用的ではない。

そこで本報では、薄板加工において測定したエンドミルの切削力を重ね合わせることによって、厚板加工における切削力を簡易的に、かつ精度よく予測する方法を提案するものである。この場合、切削力予測に必要なとする実験回数が極めて少なくすむという利点がある。なお実験においては1枚刃のエンドミルを用い、切削力の予測精度に及ぼすねじれ角の影響を検討するとともに、その結果を用いて多刃エンドミルによる切削力の予測が容易にできることを示している。

2. ねじれ刃による切削機構と 重ね合わせ法

2-1 ねじれ刃による切削機構と重ね合わせ原理

図1はねじれ刃による切削機構と重ね合わせ原理を示したものである。(a)図において、エンドミルは切削に關与する切れ刃の一部を示しており、図中の点 B_1, B_2, \dots, B_N は加工面となる直線CDの延長線と切れ刃との交点である。また直線 B_1D 上の各点を切れ刃が

* 原稿受付 平成2年12月11日。

¹ 正員, 新潟大学工学部(☎950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

² 准員, ソニー(株)(☎141 東京都品川区西五反田8-9-5)。

³ 正員, 姫路工業大学工学部(☎671-22 姫路市書写2167)。

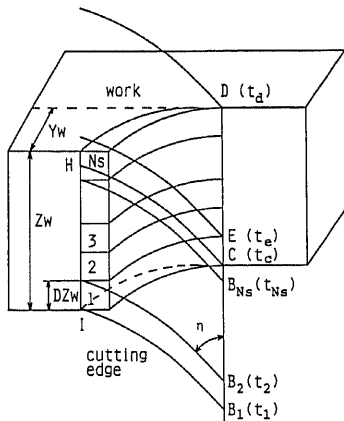
通過する時刻を $(t_1), (t_2)$ 等で示し、(b)図の時刻と対応させている。ねじれ刃は IB_1 の位置より切削を開始し、この時刻が t_1 である。その後工具の回転に伴って切れ刃は上方 (z 方向) に移動するかのごとくに切削を行い、工作物下面の点 C および点 C より DZ_w 上方の点 E を通過した後、点 D に到達して切削を終了する。この過程は板厚が DZ_w の薄板を N_s 枚重ねた場合の切削と考えることができる。すなわち 1 枚目の薄板については時刻 t_1 より切削が開始され、時刻 t_e で終了する。2 枚目の薄板については、ねじれ刃が板厚方向に DZ_w 移動する時間 Dt だけ遅れた時刻 t_2 より切削を開始することになるが、切削過程は 1 枚刃と同様である。したがって (b) 図に示すように、薄板による切削力の変化を横軸に Dt 時間を遅らせながら N_s 個並べ、任意時刻における重複部分の切削力を加算することにより厚板切削における切削力の変化を簡易的に求めることができる。

2.2 重ね合わせ条件 図 1 (b) に示した切削力曲線は、サンプリング時間 T_s で測定される。そのため重ね合わせ法により厚板の切削力を予測する場合、重ね合わせる回数 N_s および T_s 間隔のデータを移動させる個数 N_p は、整数または整数に非常に近い値に選

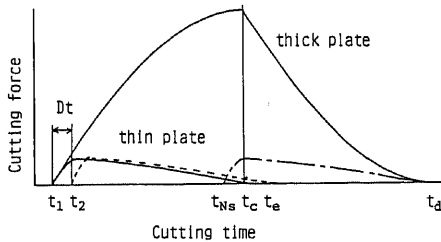
択する必要がある。また工具直径を D_0 、ねじれ角を η 、主軸回転数を N_r 、切れ刃の z 方向 (主軸方向) 速度を V_z とすると、各パラメータは幾何学的に次式を満足していなければならない。

$$\left. \begin{aligned} N_s &= Z_w / DZ_w \\ DZ_w &= N_p \cdot T_s \cdot V_z \\ V_z &= \pi \cdot D_0 \cdot N_r / \tan \eta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

通常は工具に関する変数 D_0 および η は与えられるため、式 (1) において N_s および N_p が整数になるような板厚 DZ_w と主軸回転数 N_r を定めればよいことになる。表 1 および表 2 はサンプリング時間 T_s を 0.5 ms として計算した組合せ結果を示したもので、表 1 は $N_r = 327$ rpm、表 2 は $DZ_w = 2$ mm とした例である。表 1 より切削速度 V を一定にすると、薄板の寸法はねじれ角により変化し、準備する板厚の種類が多くなる。一方表 2 より板厚を一定にすると、主軸回転数が変化して切削速度が変化することになる。両者を比較すると数値制御工作機械を用いる場合、主軸回転数の設定が容易であること、また表 2 の場合切削速度は 21 ± 2 m/min 程度であることより、表 2 の条件を用い



(a) ねじれ刃による切削機構



(b) 重ね合わせ原理

図 1 ねじれ刃による切削機構と重ね合わせ原理

表 1 切削速度一定の重ね合わせ条件

$V = 20.5 \text{ m/min} (N_r = 327 \text{ rpm})$

η (deg)	DZ_w (mm)	Dt (ms)	N_s	N_p
10	2.613	1.5	7	3
	1.882	2.0	11	4
30	0.890	1.5	22	3
	1.186	2.0	17	4
	1.483	2.5	13	5
40	1.779	3.0	11	6
	0.816	2.0	25	4
	1.020	2.5	20	5
50	1.224	3.0	16	6
	0.862	3.0	23	6
	1.006	3.5	20	7
	1.419	4.0	17	8

表 2 板厚一定の重ね合わせ条件

$DZ_w = 2 \text{ mm}, N_s = 10$

η (deg)	N_r (rpm)	Dt (ms)	N_p	V (m/min)
10	336	1.0	2	21.1
20	347	2.0	4	21.8
30	315	3.5	7	19.8
	367	3.0	6	23.1
40	356	4.5	9	22.4
50	325	7.0	14	20.4
	350	6.5	13	22.0

るほうが実用的であると考えられる。なお表2において、ねじれ角 30° および 50° の場合2種類の主軸回転数が求められているが、本実験においては切削速度の差が小さくなる $N_r=367$ および 350 rpmの条件を選択する。

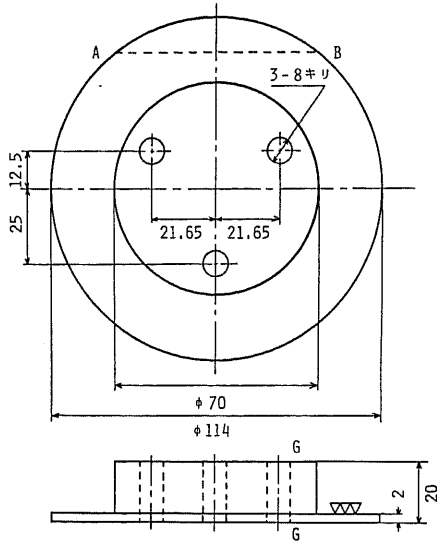


図2 工作物の形状

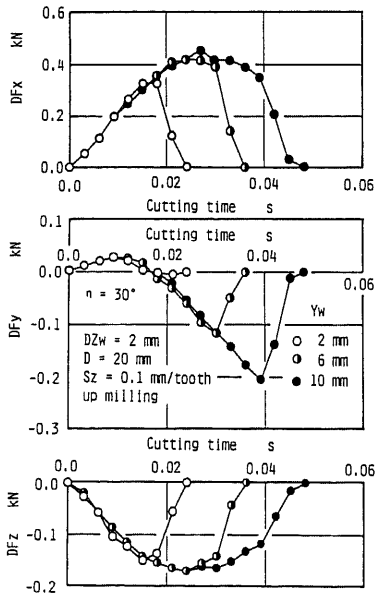


図3 薄板による切削力(上向き切削)

3. 実験条件および方法

本実験に使用した機械、エンドミルおよび切削条件は次のとおりである。

工作機械：アマダ NC フライス盤 (BM 104 NC)

制御装置：FANUC 10 M (1 μ /pulse)

エンドミル：直径 20 mm, 1 枚刃 (4 枚刃より 3 枚を落としている), ねじれ角右 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$, 高速度鋼

切削条件：半径方向切込み 2, 6, 10 mm, 軸方向切込み 2, 20 mm, 送り 0.1 mm/刃, 切削速度 21.1~23.1 m/min, 切削方式上向き切削, 下向き切削

工作物：炭素鋼 S 45 C (図 2 参照)

切削剤：マシンオイル 3.2 l/min

図 2 は薄板加工の実験に使用した工作物の寸法および形状であり、厚板の場合は薄板部の 2 mm を 20 mm に仕上げている。実験はテーブル長手方向(x 軸)に送りを与えて工作物の破線 AB 部まで前加工を行い、その後上記の条件により直線加工を行っている。工作物は治具によりひずみ計を用いた工具動力計に取付け、切削力の x, y および z 分力を測定し、動ひずみ計を介して電磁オシログラフに記録した。

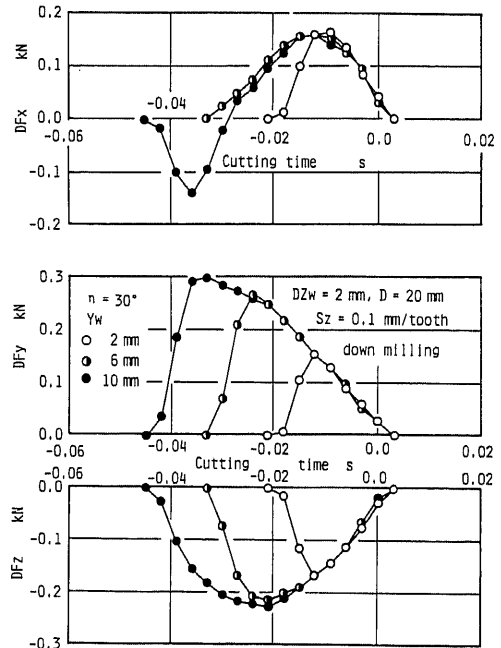


図4 薄板による切削力(下向き切削)

4. 実験結果および考察

4.1 薄板による切削力 図3および図4はそれぞれ横軸に切削時間をとり、ねじれ角 30° の工具による薄板加工の切削3分力(DF_x, DF_y, DF_z)を示したもので、上向き切削および下向き切削の結果を比較している。切削時間は切れ刃が図1に示す工作物下面の点Cを切削する時刻 t_0 を基準としており、この時刻を $t=0$ とした。切削力はエンドミルが受ける力を示しており、各分力とも半径方向切込みがパラメータとしてとられている。両図より半径方向切込みが増加するにつれて切れ刃の切削に関与する時間が長くなるが、上向き切削の場合には前半部、下向き切削の場合には後半部で切削力曲線が重なっている。これはフライス切削機構の特徴であり、図5に示すように各分力とも基本的には切削面積の変化にほぼ一致するためである。

また薄板加工の場合 x および y 分力に及ぼすねじれ刃の影響が少なく、合力は切れ刃が工作物に切込む方向とほぼ反対方向に作用する。そのため x 分力は上向き切削、下向き切削ともに正となり、 y 分力は上向き切削の場合には負、下向き切削の場合には正となる。

なお上向き切削の y 分力が切削初期に正の値を示しているが、これは図5(a)に示すように、切削開始直後の切込みおよびその増加率が小さいため、また工具の刃先丸みの存在によって切れ刃は理想的に工作物

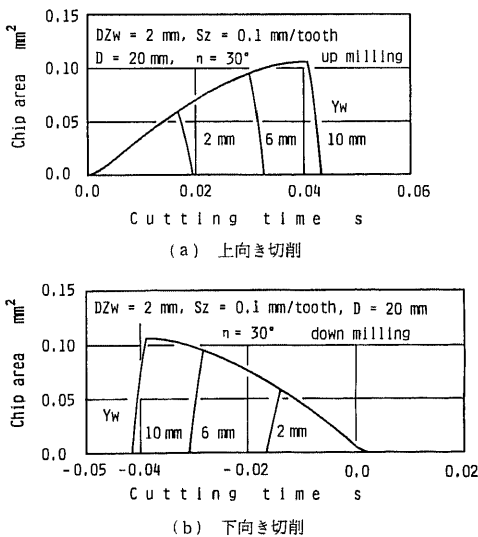


図5 薄板による切削面積の変化

に切込んでおらず、工作物を押付ける状態になるためと考えられる。一方、下向き切削の半径方向切込み10 mmの場合 x 分力が切削初期に負の値を示している。これは切削初期に工具の進む方向(x)と切れ刃が切削する方向がほぼ直角となり、切削力の法線方向分力である背分力が x 分力に一致するためである。その後工具の回転により接線分力である主分力および背分力の方向が変化するため x 分力も変化するが、切削開始点より約 30° 回転した位置で x 分力が零となり、これは小林の結果⁽⁵⁾と一致する。なお z 分力は右ねじれ刃による切削であるため、両切削方式とも工具を引き抜く方向(負の方向)に作用する。

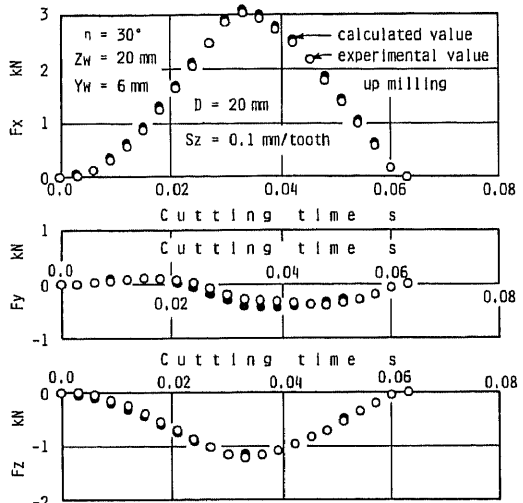


図6 重ね合わせによる切削力の予測 (上向き切削, 1枚刃)

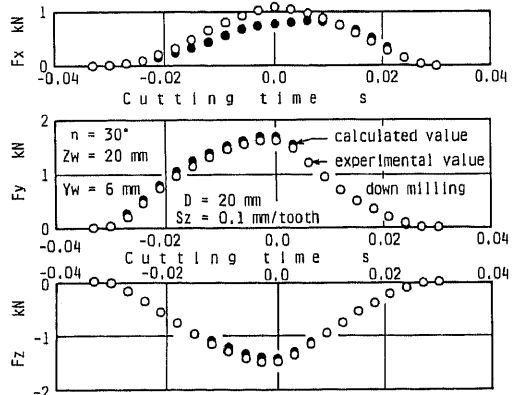
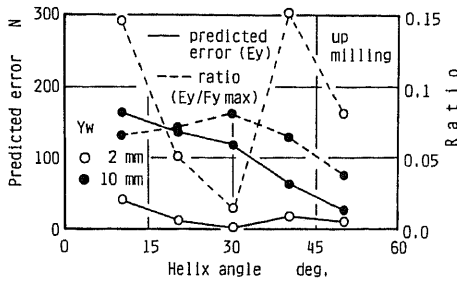
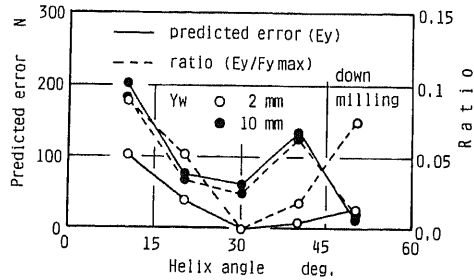


図7 重ね合わせによる切削力の予測 (下向き切削, 1枚刃)



(a) 上向き切削



(b) 下向き切削

図 8 y 分力の予測精度および最大値との比

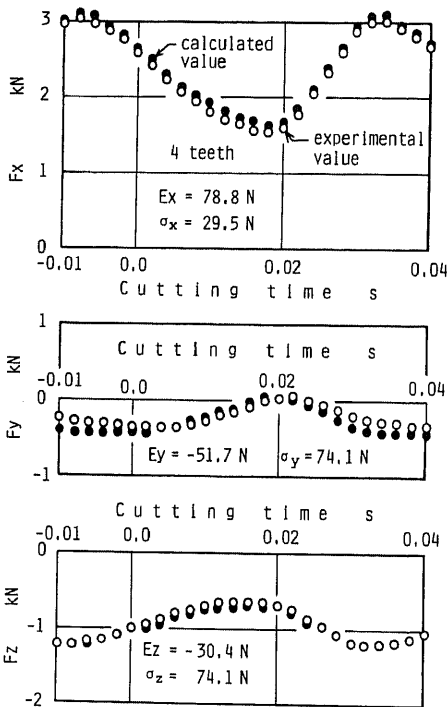


図 9 重ね合わせによる切削力の予測 (上向き切削, 4 枚刃)

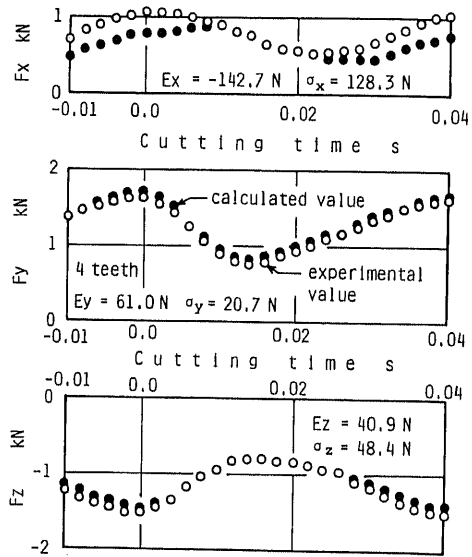


図 10 重ね合わせによる切削力の予測 (下向き切削, 4 枚刃)

4・2 重ね合わせによる切削力と予測精度 図 3 および図 4 の結果を表 2 の条件により重ね合わせ, 厚板加工による切削力 (F_x, F_y, F_z) を予測すると, 図 6 および図 7 のようになる。それぞれ半径方向切込み 6 mm の場合について比較したもので, ●印で示す予測値と○印で示す厚板による実験値はほぼ一致している。各時刻における予測値より実験値を差引いた値を求め, その平均値により予測精度を表現すると各分力は上向き切削の場合 $-51.7 \sim 78.8 \text{ N}$, 下向き切削の場合 $-142.0 \sim 61.0 \text{ N}$ である。3 分力のうち加工精度に

最も大きく影響する分力は y 分力である。そこで次に y 分力に注目してその予測精度を比較する。

図 8 は半径方向切込み 2 mm および 10 mm による y 分力の予測精度および最大値との比を絶対値と比較したもので, (a) 図が上向き切削, (b) 図が下向き切削の結果である。図より実線で示す予測誤差は切込みの大きい 10 mm で大きな値を示すが, 一部の例外を除いてねじれ角が増加するにつれて減少している。この理由は基本的にはねじれ角の増加により最大切削力が減少するためである。なおねじれ角 10° では切込み 10 mm の条件で最大 202 N の誤差となっている。

一方破線で示す最大切削力との比は上向き切削, 半径方向切込み 2 mm の場合, ねじれ角 10° および 40° で 15% 前後の大きな値を示しているが, これは最大

切削力が小さいことによるもので、予測誤差はそれぞれ 42 および 18 N と小さい。他の条件では最大切削力との比は小さく、予測誤差が最大値を示すねじれ角 10°、切込み 10 mm の条件で 9.2% である。図に示していないが他の分力においてもほぼ同様の結果が得られており、本実験条件の範囲では重ね合わせ法により切削力を予測誤差±200 N または最大値との比 10% 以下で予測することが可能である。

以上は 1 枚刃による結果であるが、加工能率を高めるためにエンドミルは通常 2 ないしそれ以上の刃数で使用される。そこで 1 枚刃の結果を次式による切れ刃の周期 t_z だけ移動させて重ね合わせ、次に多刃による結果と比較を行う。

$$t_z = 2\pi D_0 / (n V_z \tan \eta) \dots\dots\dots (2)$$

ここで n は刃数である。図 9 および図 10 は半径方向切込み 6 mm、ねじれ角 30° の条件により 4 枚刃の場合と比較している。図 9 は上向き切削、図 10 は下向き切削の結果であり、それぞれほぼ切れ刃の周期 t_z における 3 分力の変動である。両図は図 6 および図 7 と異なり、各分力は零を示さない。これは 4 枚のうち必ず 1 枚の切れ刃は切削に関与するためである。なお実験の条件では、上向き切削の場合時刻 0 s より約 0.02 s まで、下向き切削の場合約 0.01 s より約 0.03 s までの区間で同時に 2 枚の切れ刃により切削が行われている。両図より予測値と実験値は変化の様子および値がほぼ一致している。図中に示す各分力の予測誤差および標準偏差は、図 10 に示した下向き切削における x 分力の場合を除いて小さく、図 8 に示した最大予測誤差以下である。

5. 結 論

本研究では、エンドミルによる薄板加工時の切削力

を重ね合わせることによって厚板加工における切削力を予測することを試み、以下の知見を得た。

- (1) 重ね合わせ条件の選択にあたっては、切削速度一定および板厚一定とする二つの方式が考えられる。しかし主軸回転数を自由に選択できる数値制御工作機械においては、後者の方式が実用的である。
- (2) 半径方向切込みが減少するか、エンドミルのねじれ角が増加すれば最大切削力が減少する。そのため予測誤差は一般に減少する。
- (3) 本実験条件の範囲では、重ね合わせ法による切削力の各分力の予測精度は±200 N 程度または最大切削力の 10% 以下である。
- (4) 1 枚刃による結果をさらに重ね合わせて 4 枚刃による切削力を予測し、その予測誤差が上記の誤差範囲にあることを示した。

本研究を遂行するにあたり、エンドミルは神戸製鋼株式会社およびオーエスジー(株)、工作物は大同製鋼(株)のご好意によった。付記して深甚の謝意を表す。

文 献

- (1) 藤井・岩部・鈴木, 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係(第 1 報)-加工誤差生成機構-, 精密機械, 43-7 (1977), 807.
- (2) Kline, W. A., Devor, R. E. and Lindberg J. R., The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, 22-1 (1982), 7.
- (3) 白瀬・稲村・安井, エンドミル加工における加工誤差の推定と要因分析, 精密工学会誌, 53-9 (1987), 1433.
- (4) 藤井・岩部, ねじれ刃エンドミルのたわみに及ぼすチャック及びコレットの影響と加工精度, 精密工学会誌, 52-2 (1986), 273.
- (5) 小林, エンドミルの溝削りにおける切削特性, 精密工学会誌, 53-10 (1987), 1555.