

不等リードエンドミルの切削機構に関する基礎研究*

(2枚刃による切削実験に基づく切削過程の検討)

岩 部 洋 育^{*1}

Fundamental Study on Cutting Mechanism of Different Helix Angles End Mills (Investigation of Cutting Process based on Cutting Tests by 2-Tooth End Mills)

Hiroyasu IWABE

This paper deals with the cutting mechanism based on cutting tests by 2-tooth end mills with different helix angles. The results are as follows. (1) There was a chip area decrease by a low helix angle edge and increase by a high helix angle edge, in the cutting process with no transition period in the end milling. (2) Behavior of the cutting force is coincident to that of chip area. However, in the cutting process except the transition period, the change in the cutting force is larger than that in the chip area. (3) Under the cutting conditions, the machined surface from the bottom to 5 or 7 mm is generated by a 41° helix edge due to smaller normal force, and the other part is generated by a 38° helix edge in the same manner. (4) Light and heavy chips are obtained by the 2-tooth end mill, but the chip weight is lighter for the former and heavier for the latter than each ideal value. (5) On the assumption that a high helix angle edge cuts a workpiece overmuch in the feed direction based on the results of cutting tests, calculated values of chip weight and cutting force agree with experimental values, respectively.

Key Words: Milling, Cutting Force, Helical End Mill, Different Helix Angles, Cutting Mechanism, Chip Area, Chip Weight

1. 結 言

1955年に浜口⁽¹⁾により考案された不等リードエンドミルは、切れ刃の少なくとも1枚のねじれ角が他の切れ刃と異なるもので、切れ刃のピッチは工具の軸直角断面のみならず軸方向においても変化する。

この種の工具はびびり振動を抑制する効果が期待され、Stone⁽²⁾および辻村⁽³⁾は実験によって切削性能の検討を行っている。またStone⁽²⁾および著者ら⁽⁴⁾により簡易的な解析も試みられているが、使用中に突然折損することがあるなど不明な点が多く、不等リード切れ刃による切削機構は十分解明されていない。

そこで本研究は不等リード切れ刃の切削機構を明らかにすることを目的として、まず不等リード2枚刃エンドミルによる切削実験を行った。実験は側面加工により行い、切削力の挙動を切削面積の計算値と比較するとともに、等リード切れ刃を持つ標準工具による結果との比較も行って、不等リード切れ刃による切削過程の特徴について考察した。また切削力に加えて加工精度および切りくず重量の測定結果より予想される、ねじれ角の大きい切れ刃による過切削現象を、過切削

に基づく切りくず重量および切削力の計算結果と比較することにより明らかにしている。なお背分力と加工精度を比較し、加工面の生成機構についても述べている。

2. 不等リード切れ刃による切削機構

2・1 切削過程と切りくず重量 図1は不等リード切れ刃を用い、下向き切削による側面加工の切削機構を示したものである。エンドミルは中心軸 O_0O_0' および切削している切れ刃位置(IB, I'C', I''C'等)のみを示して、その他は透視している。斜線部は切れ刃の各位置における切削面積であり、その計算方法については後述する。図中の主な記号は R_0 :工具半径, η_i :切れ刃 i ($i=1, 2$)のねじれ角, Yw :半径方向切込み, Zw :軸方向切込み, θ_{max} , θ_{min} :切削に関与している切れ刃の加工面CDからの最大, 最小角度である。

切れ刃 i は図1におけるIBの位置より切削を開始し、I'C', I''C'等を経て点Dに達して切削を終了する。図中の USz_i および BSz_i は工作物上面および下面における切れ刃 i による1刃当たりの送りであり、次式で与えられる。

* 原稿受付 平成3年9月2日。

*1 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

$$\left. \begin{aligned} USz_i &= Sz \left(1 + \frac{n\lambda_i}{2\pi} \right) \\ BSz_i &= USz_i + SzZw \left(\frac{\tan \eta_i - \tan \eta_{i+1}}{2\pi R_0} \right) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

なお η_{i+1} は先行したもう一方の切れ刃のねじれ角 ($\eta_3 = \eta_1$)、 Sz は一刃当たりの平均送り、 λ_i は切れ刃 i の工作物下面位置における分割角度偏差である。

切れ刃 i による切りくず容積は IJCDKH で囲まれた部分であり、その重量 W_i は工作物の比重を ρ とすると次式で与えられる。

$$W_i = \rho YwZw \frac{USz_i + BSz_i}{2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで2枚刃のねじれ角の大小関係を $\eta_1 > \eta_2$ と仮定すると、式(1)より $BSz_1 > USz_1$ となり、切れ刃1による送りは上面に移動するにつれて減少する。一方切れ刃2による送りは逆に増加し、切りくず重量は $W_1 < W_2$ となる。

2.2 切削面積の計算方法 ねじれ刃による切削面積は図1に示す斜線部を O_0O_0' 軸方向に投影してその面積を計算し、その後 $1/\sin \eta_i$ を乗ずることにより求められる。不等リード切れ刃の場合切りくずの送り方向厚さが連続的に変化するため、本報では投影面積の計算を図2を用いて以下のように行っている。

図2は図1に示す切れ刃 $I'C$ より HB' まで移動する場合を示しており、投影される図形は二つの曲線(切れ刃の軌跡)と一つの直線(前加工面)で囲まれる。この投影面積は微小要素に分割して計算するが、計算を容易にするため二つの曲線は次の手順により求めている。なお図中に示した曲線 DH および Q_0D は、標準工具による切れ刃の軌跡および1切れ刃前の軌跡であ

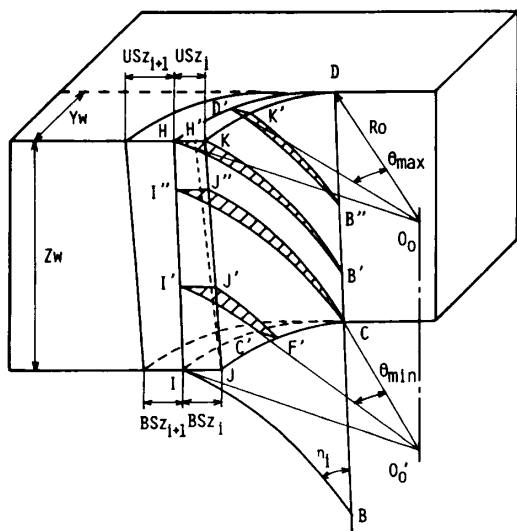


図1 不等リード切れ刃による切削機構

り、それぞれ円弧により近似することができる。

- (a) 一方の曲線を円弧 DH に一致させる。
 - (b) 工具中心点 O_0 より微小角度 $d\theta$ の間隔で直線 L_j を与える。
 - (c) 直線 L_j と円弧 Q_0D の交点 $Q_j(XQ_j, YQ_j)$ を求める。
 - (d) 後述の計算式(4)により $dXQ_{i,j}$ を求め、点 $Q'_j(XQ_j + dXQ_{i,j}, YQ_j)$ を定める。
 - (e) 手順(a)ないし(d)を $j=1 \sim m$ まで繰返し、点 Q'_j をなめらかに結んで他方の曲線 KD を得る。
- なお点 Q_j の座標および分割数 m は点 D を原点とする $x-y$ 座標系において、次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} XQ_j &= R_0 \sin(d\theta \cdot j - \theta_{\min}) \\ YQ_j &= R_0 \{ 1 - \cos(d\theta \cdot j - \theta_{\min}) \} \\ m &= \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{d\theta} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (3)$$

また点 Q'_j の点 Q_j に対する送り方向偏差 $dXQ_{i,j}$ は切削の進行のみならず、切れ刃によっても変化するが、図1の点 C を切削する時刻を $t=0$ とすると、次式により求めることができる。

$$dXQ_{i,j} = \frac{BSz_i - USz_i}{Zw} \left\{ \frac{\pi R_0 Nr}{30 \tan \eta_i} t + \frac{R_0 d\theta}{\tan \eta_i} j \right\} \dots \dots \dots (4)$$

ここで Nr は主軸回転数である。また図2において点 P_j は点 Q_j より x 軸方向に Sz だけ移動した点であり、四角形要素 $Q'_jP_jP_{j+1}Q'_{j+1}$ の面積を求めることが可能となる。したがって投影面積は $j=1 \sim m$ までの要素の面積を総和することにより求められる。なお後述の計算において $d\theta$ の値は 1° としている。

3. 実験条件および方法

実験に使用した工具は直径 (D_0)20 mm、2枚刃の超硬ソリッドエンドミルであり、その形状および寸法は

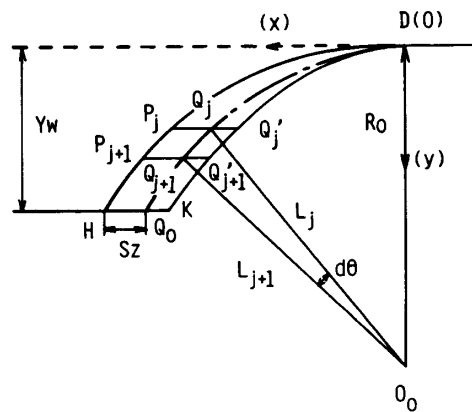


図2 切りくずの投影図

表1に示している。また工作機械、工作物および切削条件は次のとおりである。

工作機械：アマダ BM-104, NC フライス盤

制御装置：FANUC 10 M (1 μ m/pulse)

切削条件：切削速度 40.1 m/min, 半径方向切込み 3 mm, 軸方向切込み 25 mm, 送り 0.05, 0.10, 0.15 mm/刃, 下向き切削

工作物：炭素鋼 S 45 C (85×110×35 mm)

切削剤：マシンオイル 2.3 l/min

実験は上記の条件により側面加工を行い、切削力、加工精度および切りくず重量の測定を行った。なお実験に際しては、エンドミルの突出し長さを 55 mm とし、工具の先端より 25 mm の範囲で切削を行った。

切削力はひずみ計を用いた工具動力計に工作物を取付け、切削3分力を測定した。加工精度は工作物を万力を用いてテーブルに固定し、加工面を電気マイクロメータにより機上で測定した。なお工作物上には前もって仕上げ条件により測定の基準面を作成している。一方切りくずの重量は、各条件における切りくずをそれぞれ 100 個採取し、洗浄後直してんびんにより測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 切削面積と切削力の挙動 図3は横軸に切削時間をとり、縦軸に切削面積を示したもので、1刃当たりの平均送りをパラメータとして比較している。切削時間は図1の点Cをねじれ角 38° の切れ刃が通

表1 エンドミルの形状と寸法

End mill	n	λ	α	Lc
A: Different helix angles	38° 41°	0°	19.5°	48 mm
B: Standard	38°	0°	19.5°	45 mm
C: Standard	40°	0°	12.0°	45 mm
D: Standard	41°	0°	19.5°	44 mm
E: Standard	45°	0°	19.5°	47 mm

Lc: edge length

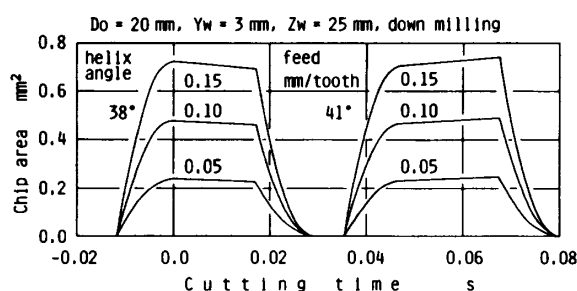


図3 不等リード切れ刃による切削面積

過する時刻を $t=0$ としている。切削面積は各切れ刃とも切削直後に急激に増加し、切れ刃が図1のI'CよりHLの区間でほぼ定常状態を示すが、その後急激に減少して終了する。また送りの増加につれて明確となるが、上記区間の切削で切削面積はわずかに減少または増加する。これはねじれ角 38° の切れ刃の場合 $USz < BSz$ となり、41° の切れ刃の場合その逆となるためである。

なお切れ刃は上方に移動するかのごとくに切削を行うため、切削に関与する時間は切れ刃が図1の点Bより点Dまで移動する時間となり、幾何学的に 38° の切れ刃が 41° の切れ刃に比べて短くなる。

図4は図3と同一条件による切削力の合力を示している。切削力の変化の様子は図3の変化と対応しており、切削力は切削面積に大きく依存している。しかし切削開始直後および終了直前の過渡区間を除いた中間部においては、切削面積の変化に比べて切削力の減少量または増加量が大きい。これはねじれ角の大きい切れ刃による過切削現象によるものと考えられ、後に検討する。また切削力の減少量または増加量は送りの小さい条件ほど顕著である。この点については本報で検討していないが、工具の偏心による影響と考えられる。

4.2 標準工具による切削力と比切削抵抗 図5は図4と同一条件による標準工具Eの切削力を示したものである。切削力は送りの増加に比例して増大し、基本的には図4の結果と一致する。しかし、標準工具による中間部の切削力はほぼ一定の値を示し、不等リード切れ刃による結果との差が明らかである。さらに不等リード切れ刃による切削特性を検討するためには不等リード切れ刃による切削力の推定が重要となる。そこでまず表1に示す標準工具BないしEによる切削力および切削面積を求め、定常区間の値を用いて比切削抵抗(切削力/切削面積)の計算を行う。しかしねじれ角が異なると、軸直角断面のすくい角 α が等しく

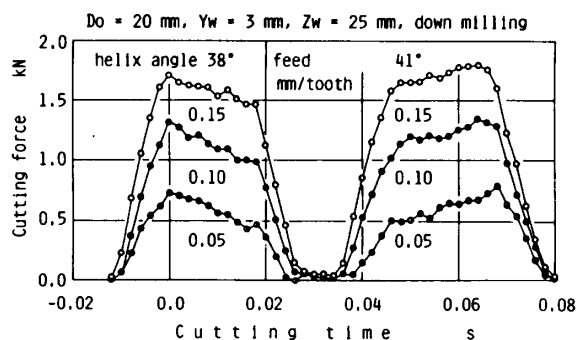


図4 不等リード切れ刃による切削力

でも垂直すくい角 α_n および有効すくい角 α_e は変化する。

そこで次の仮定を行う。(i)ねじれ刃による切削をねじれ角の補角に等しい傾斜角の切れ刃による傾斜切削とする⁽⁵⁾。(ii)切削力は切りくずの重心に最も近い切れ刃点に集中力として作用する⁽⁶⁾。(iii)切りくずの流出方向が傾斜角に一致する⁽⁷⁾。図6は上記の仮定により求めた比切削抵抗 C (kN/mm^2) であり、最小二乗法を用いて平均送り S_z および有効すくい角 α_e の関数として回帰直線を表現すると、次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C &= f(S_z)\alpha_e + g(S_z) \\ f(S_z) &= -0.12S_z - 0.046 \\ g(S_z) &= -0.37S_z + 4.664 \\ \alpha_e &= \sin^{-1}\{\sin \eta \cdot \cos \eta (1 + \sin \alpha_n)\} \\ \alpha_n &= \tan^{-1}(\sin \alpha \cdot \sin \eta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

図6には3種類の送りに対する式(5)の回帰直線を一点鎖線により示しているが、図より比切削抵抗は有効すくい角の増加につれて減少し、送りが減少すると増加する。

4.3 加工面の生成機構 図7は横軸に誤差をと

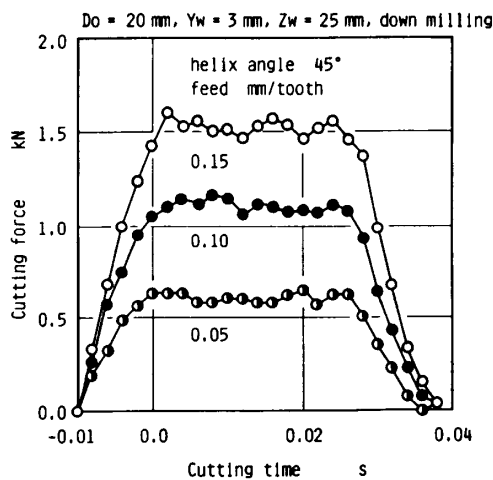


図5 等リード切れ刃による切削力

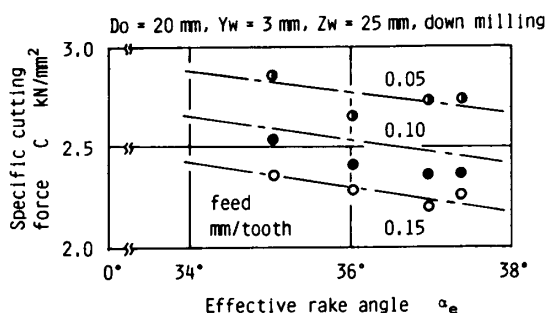


図6 比切削抵抗と回帰直線

り、図4と同一条件による加工誤差を示したものである。下向き切削のため削り残しによる正の誤差を示しており、送りにほぼ比例して誤差は増大する。誤差の形状は下面より約16mmまでほぼ平坦であるが、その後上面に近づくにつれて減少している。なお図中には誤差の平均値 E_a および標準偏差値 σ_a を併記している。

加工誤差は加工面と直角な背分力 (F_y) の挙動に大きく影響される⁽⁸⁾。すなわち図7では削り残しによる正の誤差を生じており、2枚の切れ刃のうちで背分力の小さい切れ刃が最終的に加工面を仕上げたことを意味する。そこで図1に示す切れ刃が創成している加工面CD上の板厚位置、例えば切れ刃D'B'なら点B'の位置に、その切れ刃による背分力をプロットして図8に示す。背分力はそれぞれ切削時間0.002s間隔で示しているが、ねじれ角が異なると切れ刃でZ軸方向の切削速度に差が生じるため、プロットした板厚位置は異なっている。図8より背分力は下面においてねじれ角41度の切れ刃が小さいが、5~7mmの位置で交差し、その後は上面まで38度の切れ刃のほうが小さい。ねじれ角の差3度によるエンドミルの曲げ剛性の差は小さいと推定できるため⁽⁹⁾、図7の加工面は下面より5~7mmまでを41度の切れ刃、残りの部分を38度の切れ刃が仕上げたものと考えられる。

4.4 切りくず重量および切削力と切りくず生成機構 図9は不等リード切れ刃による切りくず重量の度数分布の一例である。不等リード2枚刃の場合式(2)より切りくずは2種類の重さを示す。しかし各分布の平均値は()内に示した計算値と一致していな

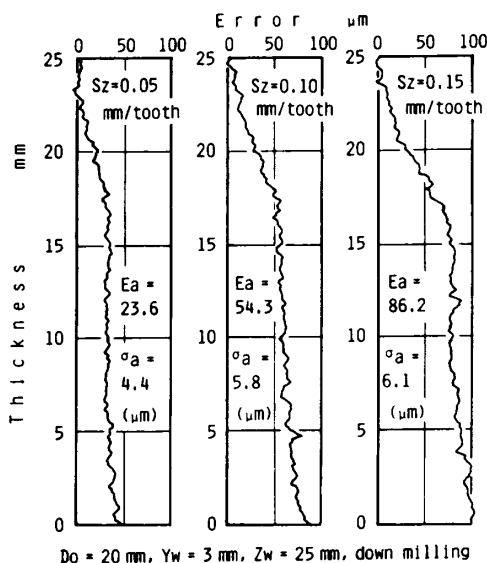


図7 側面の加工誤差

い。すなわちねじれ角 38° の切れ刃の場合、計算値 85.4 mg に対して実験値は 74.3 mg と軽くなり、 41° の切れ刃の場合それぞれ 91.6 mg に対して 92.1 mg と重くなっている。図 10 は計算値に対する実験値(○印)を比較して示したもので、他の条件においても軽い切りくずはより軽く、重い切りくずはより重くなっている。

一方切削面積に比切削抵抗を乗じて切削力を推定し、図 11 に実験値と比較を行っている。図 11 において、破線で示す計算値は切削の過渡区間を除いた中間部で実験値と一致しておらず、ねじれ角 38° では実験値より大きく、 41° ではその逆であり、しかも徐々に差が大きくなっている。すなわち両切れ刃はともに半径方向に削り残しながら、 41° の切れ刃は切削面積および切りくず重量を増加させ、 38° の切れ刃はその反対の切削を行っている。そこで切りくずの生成を簡易的に次のように仮定し、切削力および切りくず重量の

計算を改めて行うことにする。

(1) ねじれ角の大きい切れ刃 (41°) が図 1 の破線 JH' に沿って送り方向に過切削する。

(2) ねじれ角の小さい切れ刃 (38°) は実線 IH に沿って予定の位置を切削する。

なお切りくず重量に関しては、計算値と実験値の差すなわち切りくずの未回収分の重さが 2 種類の切りくずで等しいものとしている。その結果実験の条件では、平均送り $0.05, 0.10$ および 0.15 mm/刃 に対して図 1 に示す $H'K$ の長さはそれぞれ $0.009, 0.016$ および 0.019 mm となる。また図 7 に示した加工誤差は削り残しを生じており、その平均値に相当する値だけ式 (2) の半径方向切込み Yw を小さく見積もる必要がある。その結果切りくず重量は上記の送りに対してそれぞれ $0.23, 1.06$ および 2.54 mg 軽くなる。以上の結果を図 10 に●印で示すと、各条件とも 2 種類の切りくず重量は理論値である一点鎖線により接近することになる。

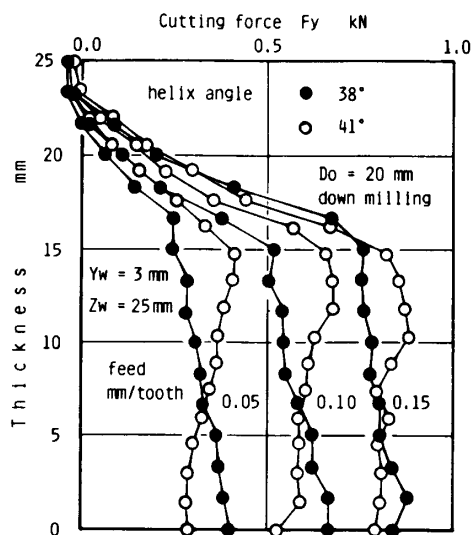


図 8 加工面の生成に関与する背分力

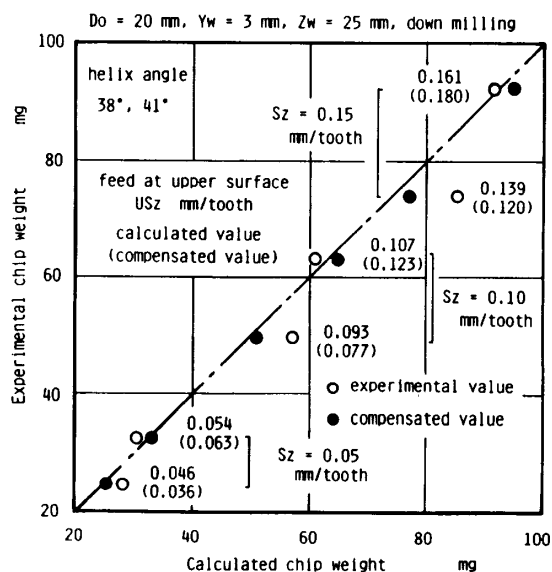


図 10 切りくず重量の計算値と実験値の比較

Chip weight	Frequency
mg	
66 - 67	Do = 20 mm, Yw = 3 mm, Zw = 25 mm
68 - 69	Sz = 0.15 mm/tooth
70 - 71	*
72 - 73	*****
74 - 75	*****
76 - 77	*****
78 - 79	38° : mean 1 74.3 mg
80 - 81	helix angle (85.4 mg)
82 - 83	41° : mean 2 92.1 mg
84 - 85	helix angle (91.6 mg)
86 - 87	*****
88 - 89	*****
90 - 91	*****
92 - 93	*****
94 - 95	*****
96 - 97	() calculated value
98 - 99	

図 9 切りくず重量の分布

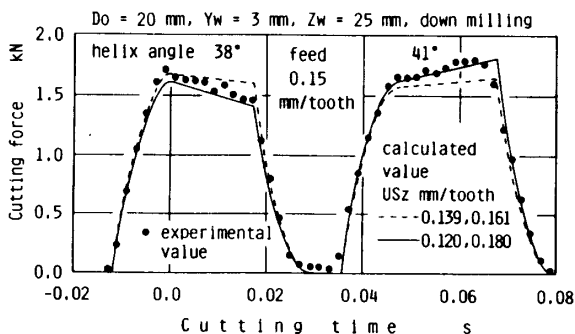


図 11 切削力の計算値と実験値の比較

表 2 切削力の予測誤差

End mill	Feed (mm/tooth)	n	Predicted error (N)		* Predicted error (N)		Cutting force (N) F
			E_f	σ_f	E_c	σ_c	
A	0.05	38°	-69.4	88.0	-2.2	65.5	552.2
		41°	-21.6	75.4	-76.9	53.6	623.6
A	0.10	38°	-68.1	85.5	37.1	53.3	1130.4
		41°	55.0	53.9	-43.7	30.4	1232.3
A	0.15	38°	-58.5	55.7	59.9	26.2	1575.9
		41°	118.0	32.6	9.9	28.5	1716.2
B	0.15	38°	-39.5	40.5	—	—	1663.6
D	0.15	41°	41.6	36.8	—	—	1580.6

* compensated value

一方上記の仮定により送りを補正して切削面積を計算し、その値に比切削抵抗を乗じて図 11 に切削力の計算値(実線)を示す。図 11 より実験値と送り補正による計算値は大きさおよび中間部における変化の傾向がほぼ一致する。切りくず生成に関する仮定(1)および(2)を評価するため、中間部における実験値と補正による計算値の差の平均値 E_c により予測誤差および標準偏差値 σ_c を計算し、補正前の値 E_f および σ_f と比較して表 2 に示す。また表 2 には中間部における切削力の平均値 F および標準工具 B および D による予測誤差および標準偏差値も併記している。表 2 より予測誤差 E_c および標準偏差値 σ_c は一部の例外を除いて送り補正により小さくなり、標準工具によるそれぞれの値とほぼ同程度の値を示している。また予測誤差 E_c の絶対値は切削力 F の 3.8% 以下と小さく、図 10 の結果と合わせて仮定(1)および(2)は妥当であると考えられる。

なお本実験の範囲では、工具の折損は起きていない。しかし工具の折損とねじれ角の大きい切れ刃による過切削現象との関係を、今後解明する必要がある。

5. 結 論

本研究によって得られた結果は次のとおりである。

(1) 不等リード切れ刃による切削過程は、切削開始直後および終了直前の過渡区間を除き、ねじれ角の

小さい切れ刃において切削面積が減少し、ねじれ角の大きい切れ刃において増加する。

(2) 切削力の変化は切削面積の変化に対応しているが、切削の過渡区間を除いた中間部において、送りの小さい条件ほど切削面積に比べて切削力の減少量または増加量が多い。

(3) 加工面は削り残しによる正の誤差を生じるため背分力が小さい切れ刃によって仕上げられ、下面より 5~7 mm まではねじれ角 41° の切れ刃、その他の部分はねじれ角 38° の切れ刃により仕上げられたものと考えられる。

(4) 不等リード 2 枚刃においては、ねじれ角の小さい切れ刃により軽い切りくず、ねじれ角の大きい切れ刃により重い切りくずが生成されるが、切りくず重量の平均値は軽い切りくずが理論値より軽く、重い切りくずがより重くなっている。

(5) (2)ないし(4)の結果に基づいて、ねじれ角の大きい切れ刃の過切削現象を仮定し、送りと半径方向切込みを補正して切りくず重量および送りを補正して切削力を計算すると、計算値はそれぞれ実験値にほぼ一致する。

最後に本研究を行うに当たり、ご支援いただいた藤井義也博士に心より御礼申し上げます。またエンドミルは三菱マテリアル(株)、工作物は大同特殊鋼(株)のご好意により、実験には今井純一技官の協力をいただいた。付記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) 特許(昭 30-5244)。
- (2) Stone, B. J., *Preprints of 11th MTDR*, (1970), 169.
- (3) 辻村, 型技術, 2-2 (1987), 95.
- (4) 岩部・藤井, 精密工学会誌, 56-10 (1990), 1889.
- (5) 白瀬・稲村・安井, 精密工学会誌, 53-9 (1987), 1433.
- (6) 藤井・岩部, 精密工学会誌, 52-2 (1986), 273.
- (7) 臼井, 切削・研削加工学 上-切削加工-, (1981), 91, 共立出版。
- (8) 藤井・岩部, 精密機械, 43-7 (1977), 807.
- (9) 岩部, 学位論文, (北海道大学), (1986)。