微小ニック付きエンドミルの開発とその切削性能*

仙波 卓 弥^{*1}, 佐久間 敬三^{*2}, 坂 田 通 考^{*1}

Development and Evaluation of a Finishing End Mill with a Fine Nick

Takuya SEMBA, Keizo SAKUMA, and Michitaka SAKATA

The magnitude of the ploughing force on a cutter edge can be reduced by decreasing the contact area between work surface and edge. In this paper, a fine nick is preformed to the cutter edge on a four-fluted end mill in view of the decreasing surface profile error produced by the tool deflection. The performance of the end mill with the fine nick is verified through the measurement of ploughing force and chip geometry in the face milling. It is shown that the magnitude of force drop exceeds the expected value that was calculated from the geometrical change of the contact area since the plastic sliding region decreased near the wedge that was created by the nick. The cutter has the capacity to reduce the surface profile error as well as to maintain the surface roughness by improving the wear resistance, while a deterioration of surface roughness produced by the groove wear is unavoidable under normal conditions.

Key Words: Cutting, Chip, Cutting Force, Cutting Tool, End Mill, Milling, Ploughing Force, Tool Wear

1. 緒 言

エンドミル加工では工作機械への工具の把持方式が片持支持であるため、工具のたわみに基づく加工の誤差は避けられない。例えば切削の範囲を仕上加工に限定したとしても、形状誤差を加工面の粗さと同程度にまで抑えることは極めて困難である。しかしエンドミルの曲げ剛性を上げると同時に切れ刃の上すべり⁽¹⁾を減らすことにより、誤差の値を縮小させることは可能である。

前報⁽²⁾ではエンドミルの切れ刃稜を平滑に成形することにより、幾何学的に高精度であるだけでなく平滑な加工面を得ることが可能であることを示した。その過程において切れ刃の上すべりと切れ刃に作用する押しならし力⁽³⁾は、切れ刃稜を鋭利に成形するとともに被削材と切れ刃との接触面積を減らすことにより軽減されることが判明した。

本論文ではエンドミルの切れ刃に微小な幅のニックを成形することにより、押しならし力を通常の切れ刃にも増して減少させることを試みた。すなわち工具の

たわみに基づく加工の誤差を軽減させる目的で切れ刃に微小な幅のニックを成形すると同時に切削実験を行うことにより、押しならし力に及ぼすニックの効果を明らかにした。

2. 微小ニックの形状と配置

本実験に使用したエンドミルの切れ刃先端形状を図1(a)に示す。ワイヤ放電加工により工具の中心軸と直交する方向に千鳥状の微小な幅のニックを成形した。ニックを付けたことによる切削荷重の変動とそれに基づく加工の誤差を極力小さく抑えるため、ニックの幅は125 μm とした。また切れ刃が付いていないニック部では切削を行わないようにさせるため、ニックの深さは100 μm としている。なお図1(b)に示すような傾斜状のニックも同時に成形したが、基礎実験の結果切りくずの排出性が劣悪であったため図1(a)に示した形状のニックを使用した。

3. 瞬間接触長さと瞬間切削面積

半径方向の切込みが微小である側面仕上げ切削を想定する。このとき切削に関与している現行刃の軌跡は展開面⁽⁴⁾を用いると図2(a)のとおり表される。横軸には被削材の下端を切削する切れ刃の回転角を示して

* 平成元年10月15日 第67期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成元年4月5日。

^{*1} 正員、福岡工業大学 (〒811-02 福岡市東区和白東3-30-1)。

^{*2} 正員、九州大学 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

いる。エンドミルの半径を R 、ねじれ角を β 、半径方向切込みを ΔR 、軸方向切込みを ΔZ とすると、

$$\phi = \cos^{-1}(1 - \Delta R/R) \dots \dots \dots (1)$$

$$\delta = \Delta Z \cdot \tan(\beta)/R \dots \dots \dots (2)$$

と求められる。切れ刃にニックが付いていない場合、瞬間切削面積や瞬間接触長さは $0 < \theta < \delta + \phi$ の範囲で非定常に変化するが、 $\phi < \theta < \delta$ の範囲では定常になることが特徴である。この定常切削時における瞬間切削面積を S_0 、瞬間接触長さを L_0 とすれば、

$$S_0 = S_t \cdot \Delta R / \sin(\beta) \dots \dots \dots (3)$$

$$L_0 = R \cdot \phi / \sin(\beta) \dots \dots \dots (4)$$

となる。 S_t はエンドミル一刃当たりの送り量である。

一方切れ刃にニックを付けることにより瞬間切削面積や瞬間接触長さは $\phi < \theta < \delta$ の範囲で非定常に変化する。例えば図 2 (a) に示したとおり、

$$Z_L < Z_i < Z_U \dots \dots \dots (5)$$

の高さに現行刃では被削材の下端から l 番めから m 番め、先行刃では l' 番めから m' 番めのニックが含まれていると考えれば、ニックを付けたことによる瞬間

切削面積の変化率 α_s は、

$$\alpha_s(\theta) = \left(\sum_{i=l'}^{m'} S_t \cdot \sin(\theta_n)_i \cdot d\theta_n \right) - \sum_{i=l}^m S_t \cdot \sin(\theta_n)_i \cdot d\theta_n / S_0 \dots \dots \dots (6)$$

と求められる。被削材の下端から i 番めのニックに着目すれば、

$$\left. \begin{aligned} Z_i &= R \cdot \theta_i / \tan(\beta) \\ (\theta_n)_i &= \theta - \theta_i = \theta - Z_i \cdot \tan(\beta) / R \\ d\theta_n &= B_n \cdot \tan(\beta) / R \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

となる。 B_n はニックの幅である。また l 番めから m 番めまでの $(l-m+1)$ 個のニックが切削に関与していることによる接触長さの減少率 α_L は

$$\alpha_L = (m-l+1) \cdot B_n / (L_0 \cdot \cos(\beta)) \dots \dots \dots (8)$$

と求められる。なお $(l-m+1)$ を 4 個とすれば、瞬間切削面積は図 2 (a) のように表すことができる。

表 1 の切削条件、ただしニックの軸方向間隔 ΔZ_n を 1.09 mm、 S_t を 0.1 mm/刃、図 2 (a) に示した被削材の下端から 1 番めのニックまでの高さ Z_L を $\Delta Z_n/3$ と設定した場合に解析された α_s と α_L の変化を図 3 に

図 1 ニックの形状

表 1 切削条件

End mill	Type : Finishing end mill with high rigidity
	Nick interval ΔZ_n : 0.54, 0.82, 1.09 1.63, 1.90, 2.72 mm
Parameters	Nick width B_n : 125 μ m
	Radius of cutter R : 5 mm
	Number of flutes : 4
	Helix angle β : 30 deg
	Rake angle : 5 deg
	Relief angle : 15 deg
	Initial margin width : 25~28 μ m
Parameters	Axial depth of cut ΔZ : 10 mm
	Radial depth of cut ΔR : 0.1 mm
	Feed rate S_t : 20~100 μ m/tooth (8.3 μ m/tooth)
	Spindle speed : 120 rpm (300 rpm)
	Overhang : 27.5 mm
	Cutting direction : Up cut milling
	Workpiece : Brass (S50C)

図 2 切れ刃の軌跡と瞬間切削面積

図 3 ニックを付けたことによる瞬間切削面積と瞬間接触長さの変化

示す。 $\phi < \theta < \delta$ の変化の様子を示したものであり、先行刃の切り残しをさるうことによる α_s の増加率と、現行刃の切り残しによる α_s の低下率を同図に細線で示した。また ΔZ_n と B_n とを用い、

$$\alpha'_L = B_n / \Delta Z_n \quad \dots\dots\dots (9)$$

と幾何計算される接触長さの減少率を同図に破線で示している。

α_s ならびに α_L とも $\phi < \theta < \delta$ の範囲で非定常に変化しているが、それらの平均値はそれぞれ $\alpha_s = 0$ ならびに $\alpha_L = \alpha'_L$ となることを確認した。同様の結果は ΔZ_n ならびに S_i を変化させた場合にも得ることが可能であった。そこで式(3)のように計算される瞬間切削面積の値を S_i 、 α'_L と L_0 とを用い

$$L_i = (1 - \alpha'_L) \cdot L_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

と求められる L_i を瞬間接触長さとして使用した。

4. ニックを成形したことによる 押しならし力の変化

4.1 押しならし力と瞬間接触面積との関係 工具摩耗を促進させる目的で S50C を切削した後、快削黄銅の側面切削を行った場合に得られた瞬間切削力 F_i と S_i との関係を図 4 に示す。 ΔZ_n を 0.82 mm、 ΔR を 0.1 mm とした上で S_i を変化させた場合に得られた結果である。縦軸には $\phi < \theta < \delta$ の範囲で測定され

た半径方向切削力と送り方向切削力との合力、パラメータには S50C の切削長さ CL を用いている。なお S50C の切削条件は表 1 に括弧で示したとおりである。

同じエンドミルのニックを付けていない部分からは図 4 に破線で示すように得ることが可能であった実験の結果と比較すると、 F_i が線形に増加する領域での直線の傾きは両者で同じであることが判る。したがって切れ刃にニックを付けたとしても、単位面積の切りくずを排除するのに必要な切削力は軽減されていないと判断される。一方 S_i が零の場合に推定される切削力を押しならし力 Pf (Ploughing force)⁽³⁾ と定義すれば、S50C を 5 m 切削する間に増加した Pf の値は明らかに軽減されている。

図 4 と同様の実験を表 1 に示した各エンドミルについて行い、 CL を変化させた各場合に得られる Pf と

$$S_c = (1 - \alpha'_L) \cdot L_0 \cdot d \quad \dots\dots\dots (11)$$

と幾何計算される瞬間接触面積 S_c との関係を求めると図 5 に○印で示すとおり表される。 d は切削過程下において測定した切れ刃に直交する方向の逃げ面摩耗幅である。比較のためニックが付いていない場合の結果を同図に実線で示している。

図 4 のように得られた Pf の低下が単に被削材と切

表 2 切りくずの形状

Nick interval ΔZ_n (mm)	Chip geometry	Cross section	
		Lower	Upper
1.36
2.45

図 4 瞬間切削力と瞬間切削面積との関係

図 5 押しならし力と瞬間接触面積との関係

図 6 切れ刃の上すべり領域と切削領域

れ刃との接触面積が減少したことによるのであれば、図5に示した Pf と S_c との関係はニックの有無に依存せず、同図に実線で示した結果と一致するはずである。一方ニックを付けた場合、 Pf に関する増加の割合は明らかに軽減されている。この結果は、瞬間接触面積が減少したこと以外の要因によっても押しならし力は軽減されていることを表している。

4.2 ニックにより分断された切りくずの形状

ΔR を 0.1 mm, S_c を 0.1 mm/刃, CL を零とした場合に排出された切りくずの形状を表2に示す。 ΔZ_n を変化させた各場合とも切りくずの巻き具合は一樣ではなく、切りくずの下部で湾曲していることが明らかである。また湾曲した部分では切取り厚さに比例した切りくずが排出されているのに対し、切りくずが伸びた部分では被削材への食いつき時に本来生成されるべきはずの切取り厚さの薄い切りくずが認められない。ここで湾曲した切りくずが得られているのは、ニックで挟まれた切れ刃の下部であることを確認している。

上のように得られた結果は、ニックで挟まれた切れ刃の上部と下部で上すべり⁽⁴⁾の状態が異なっていることを表している。すなわち図6に模式図を示したように、切れ刃の下部では被削材への食いつきが良く、被

削材の表面をすべった部分の面積が減少したことを表している。

切りくずの流出方向がスタブラの法則⁽⁵⁾に従うと考えれば、ニックで挟まれた切れ刃の下部ではくさび角が60度の刃物が被削材に食いついたことになる。したがってニックを付けた場合に図5のように Pf が低下したのは、くさびの効果により切れ刃の上すべりが減少したためであると考察される。

4.3 押しならし力の低下割合

図4のように得られた実験の結果をもとに、 Pf と CL との関係を求めると図7のとおり求められる。 ΔZ_n を 1.63 mm とした場合の結果である。比較のため同じエンドミルのニックを付けていない部分より得られた結果を○印、○印で示した Pf の値から切れ刃にニックを付けたことによる瞬間接触面積 S_c の減少率 α_l' に相当する荷重を引くことにより、

$$Pf' = Pf - a \cdot \alpha_l' \cdot L_0 \cdot d \quad \cdots \cdots (12)$$

と推定される Pf' の値を破線で示している。なお a は図5に実線で示した直線の傾きである。

先に考察したとおり、図7に●印で示した Pf の値は幾何学的に式(12)のように推定される Pf' にも増して軽減されている。いまニックを成形したことによる Pf の減少率 r に着目すると、 r と CL との関係は

図7 ニックを付けたことによる押しならし力の低下

図8 押しならし力の低下率と切削長さとの関係

表3 切りくずの形状		
Nick interval ΔZ_n (mm)		
0.54	1.36	2.72
3.0 mm

図9 押しならし力の低下率とニック間隔との関係

図7に付記したとおり表される。 CL が20 cm付近で最大となった後、一定の値に減少していることが明らかである。

ΔZ_n をパラメータに用いると、図7のように得ることが可能である r と CL との関係は図8のとおりまとめられる。瞬間接触面積 S_c の減少率 α_i' をもとに式(12)のように推定される押しならし力の減少率 r' を同図に破線で付記している。 r の値は ΔZ_n を狭くするに従い増加している。ここで切れ刃の摩耗が定常状態に達したと考えられる CL が3 mでの結果に着目すると、 r と式(9)により計算される α_i' との関係は図9のとおり表される。同図に破線で示した r' との隔たりは ΔZ_n が増すに従いわずかに増えているが、ほぼ一定であることがわかる。

図9のように得られた実験の結果を理解する目的で採取した切りくずの形状を表3に示す。 ΔZ_n を広くするに従い切りくずの湾曲は増している。しかしいずれの場合にも湾曲した切りくずが得られているのは、切りくずの中央を境にして片側半分であることが明らかである。したがって r と r' との隔たりがほぼ同じであったのは、切れ刃の上すべりが減少した部分の面積が ΔZ_n を変化させた各場合で同じ程度であったため

であると考察される。

5. ニックを成形したことによる 加工面積精度の変化

5.1 加工面の粗さ 表1の切削条件、ただし S_f を20 $\mu\text{m}/\text{刃}$ 、 ΔZ_n を1.63 mmとした場合に得られた加工面の形状を図10に示す。逃げ面摩耗の状態が異なる CL が零の場合と CL が4 mの場合の比較を示したものである。横軸には被削材下端からの長さを用いている。同図に逃げ面摩耗の一例を付記したとおり、ニックを付けたエンドミルでは先行刃の切り残しをさらう後続刃の位置に境界摩耗が生じるため、 $\Delta Z_n/2$ の周期で切り残しが発生する。

この切り残しが発生した場合については重み付き最小二乗法⁽⁶⁾により境界摩耗の影響を受けていない部分の加工面形状を重視した平滑化を行うと、図10に細線で示すうねり曲線を得る。図10に太線で示した断面曲線からうねり曲線を引くことにより加工表面の板厚方向粗さ R_z を求めると、 R_z と CL との関係は図11に示すとおり表される。縦軸には十点平均粗さ、比較のため同じエンドミルのニックが付いていない部分より得られた R_z と CL との関係を同図に付記している。

図10 境界摩耗に伴う加工面形状の変化

図12 境界摩耗による加工面粗さの劣化

図11 切削長さの増加に伴う加工面粗さの劣化

図13 半径方向切削力と形状誤差との関係

図 14 半径方向切削力と瞬間切削面積との関係

図 15 ニックを付けたことによる半径方向切削力の低下

切れ刃稜やマージン面に関する成形の状態が個々のエンドミルではわずかに異なっているため、この R_z と CL との関係はエンドミルを変えた場合に上下に変動する。そこでニックを付けたことによる粗さの増加分 ΔR_z のみを求めると、 ΔR_z と CL との関係は図 12 のとおりまとめられる。 ΔZ_n を変化させた各場合とも CL が 1 m 以上の範囲では境界摩耗に基づく加工面粗さの劣化は避けられていないが、1 m 以内の範囲ではニックを付けていない通常の加工面と同程度の粗さが得られている。

5.2 形状誤差 図 10 に細線で示したように得ることが可能であるうねり曲線からその最大値 $H_{\max}$ を求め、 $H_{\max}$ と切削過程下において測定された半径方向切削力 F_y との関係を求めると図 13 に○印で示す結果を得る。図 10 の結果と同様、 S_i を 20 $\mu\text{m}/\text{刃}$ 、 ΔZ_n を 1.63 mm とした場合の結果である。比較のために通常のエンドミルを用いた場合の結果を同図に●印で示している。図 10 に細線で示したような加工面の平滑化を行うことにより、通常のエンドミルを用いた場合と同様の $H_{\max}$ と F_y との関係を得る。

この $H_{\max}$ に影響を及ぼす F_y に着目すると F_y と S_i との関係は図 14 のとおりまとめられる。また図 14 の結果をもとに F_y に関する押しならし力 $(Pf)_y$ と CL との関係を求めると図 15 に示す結果を得る。ニックが付いていない場合の結果に比べ、 $(Pf)_y$ は最大で 30 % 程度軽減されていることが明らかである。この値は図 8 に示した Pf の減少率と一致する。図 12 ならびに図 8 の結果を合わせて考えれば、 CL が 20 cm 付近の切れ刃の先端形状を長時間維持し得る工具材種を用いることにより、従来のエンドミルと同程度の面粗さを得た上で形状誤差を最大 30 % 程度減少させることが可能であると考察される。

6. 結 言

エンドミルの切れ刃に微小な幅のニックを成形するとともに切削実験を行うことにより、押しならし力に及ぼすニックの効果を明らかにした。主要な結論は以下のとおりまとめられる。

(1) 押しならし力はニックの有無にかかわらず被削材と切れ刃との接触面積が増すに従い増加するが、増加の割合はニックを付けることにより減少する。

(2) (1) のように得られた押しならし力に関する増加率の低下は、被削材へ食い込む切れ刃の角度が鋭角となるニックの近傍で、切れ刃の上すべりが減少したためであることを確認した。

(3) 被削材と切れ刃との接触面積がより多く減少したことで切れ刃の上すべりが減少したことの両方の効果により、押しならし力の低下率はニックの間隔を狭くするに従い増大する。

(4) 境界摩耗に基づく面粗さの劣化は避けられないが、切れ刃の耐摩耗性を向上させることにより、従来と同程度の粗さを得た上で形状誤差を減少させることが可能である。

なお工具の試作には東芝タンガロイ(株)・穂積 豊氏、ニックの成形には西部電機(株)・渡 大作氏のご助力を得たことを記し、ご好意に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 岡村・ほか 6 名, 精密工学講座 11 切削工学, (1981), 326, コロナ社.
- (2) 仙波・佐久間・下浦, 本論文集 195 ページ.
- (3) Albrecht, P., *Trans. ASME, Ser. B*, 82(1960), 348.
- (4) Tlustý, J. and MacNeil, P., *Annals of the CIRP*, 24-1(1975), 21.
- (5) 臼井, 切削・研削加工学上 切削加工, (1981), 91, 共立出版.
- (6) 田島・小牧, 最小二乗法の理論とその応用, (1988), 140, 東洋書店.