

## 工具逃げ面の高精度化による仕上げ面粗さの改善\*

岩部 洋育\*<sup>1</sup>, 大瀬戸 隆之\*<sup>2</sup>, 後藤 隆夫\*<sup>3</sup>Improvement of Surface Roughness for End Milling using Cutting Edge  
with High-Accurate Flank SurfaceHiroyasu IWABE\*<sup>4</sup>, Takayuki OSETO and Takao GOTO\*<sup>4</sup>Niigata University, Dept. of Mechanical and Production Engineering,  
8050 Ikarashi 2 nomachi, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper deals with improvement of the surface roughness for end milling using the cutting edge with a high-accurate flank surface. In usual end milling, it is very difficult to machining a high-accurate surface even if finishing conditions are used, because of the surface machined is copied by the roughness curve of flank surface of a cutting edge. Then it is investigated that the surface roughness of machined surface in axial direction is improved by high-accurate cutting edges. The main results are as followings. (1) Maximum height of roughness curve of machined surface in axial direction is almost 10 times as large as that in feed direction. (2) The roughness curve of flank surface of cutting edge was copied on that of machined surface, and the degree of transference is diffined by the mean of the absolute value of differences of both roughness curves. (3) The maximum height of roughness curve of a flank surface decreases from 1.71  $\mu\text{m}$  to 0.53  $\mu\text{m}$  of which surface is finished by a diamond wheel. (4) The maximum height of roughness curve of machined surface decreases drastically from 2.53  $\mu\text{m}$  to 0.58  $\mu\text{m}$  using the above high-accurate cutting edge.

**Key Words:** Cutting, Accuracy, End Milling, Surface Roughness, High-Accurate Cutting Edge, Flank Surface, Roughness Improvement

## 1. 緒 言

機械加工において、加工精度と加工能率はいつの時においても相反する事項でありながら、ともに向上することが求められており、エンドミル加工においても例外ではない。しかし、エンドミルは直径に比べて切れ刃長さが長い為、切削抵抗の影響を受けて変形する。切削中には反作用力による工作物の変形も生じており、仕上げ面を創成している切れ刃点における両者の相対変位が加工誤差となる<sup>(1)</sup>。

高精度加工を実現するためには加工能率を犠牲にし、切削抵抗が小さくなる仕上げ条件を用いる以外に方法はない。しかし、切込みおよび送りの小さい仕上げ条件においては、これまで考慮していなかった工具逃げ面の粗さの影響が加工誤差要因として顕著になる。すなわち仕上げ面には送り方向に一定の間隔でツールマークが発生するだけでなく、軸方向には工具逃

げ面の粗さが転写され、軸方向の最大高さはツールマークによる粗さの10倍にも達することがある<sup>(2)</sup>。仕上げ面粗さを改善するためには、工具逃げ面の粗さを小さくすることがまず考えられる。

そこで本研究では、工具逃げ面の粗さが仕上げ面粗さに及ぼす影響を明らかにするとともに、前者が後者に転写される状況の評価する方法を提案し、その際に必要な転写位置および転写誤差の定義も行った。次にダイヤモンドホイールを用いて工具逃げ面の最大高さを減少させ、側面加工による仕上げ面粗さの改善を試みた。その結果、仕上げ面の最大高さは大幅に減少し、 $Ry=1\mu\text{m}$ 以下の高精度な加工面を実現することができた。また、仕上げ面粗さに及ぼすランド幅の影響を検討するとともに、さらなる仕上げ面の改善を目的として、大森が開発したELID研削<sup>(3)</sup>を用いて逃げ面の高精度化を試み、その結果についても報告する。

## 2. 転写の評価法

2・1 ねじれ刃による仕上げ面形状 図1はエンドミルにより加工された側面の理想的な形状を示したもので、1刃当たりの送り $S_z$ 間隔にツールマークが残されることになる。また、図において工具は回転しながら $X$ 軸方向に移動するため、 $n$ 枚刃によって仕

\* 原稿受付 2001年6月4日。

<sup>1</sup> 正員,新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。<sup>2</sup> セイロジャパン(株)(〒262-0013 千葉市花見川区猿橋町320-5)。<sup>3</sup> 正員,新潟県工業技術総合研究所(〒950-0915 新潟市鏡西1-11-1)。

E-mail: iwabe@eng.niigata-u.ac.jp

上げられるツールマークの谷部  $C_1D_1, C_2D_2, \dots, C_iD_i$  は  $X-Z$  面の  $Z$  軸に対して  $\theta_a$  rad 傾斜する。最大高さの理論値  $R_{th}$  および傾き  $\theta_a$  は工具半径を  $R_0$ 、刃数を  $n$ 、ねじれ角を  $\eta$  deg とすると次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} R_{th} &= Sz^2 / (8 \cdot R_0) \\ \theta_a &= \tan^{-1} \{ n \cdot Sz \cdot \tan \eta / (2\pi R_0) \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

実験に用いた工具および切削条件 ( $R_0=10$  mm,  $n=1$ ,  $\eta=45^\circ$ ,  $Sz=0.1$  mm/刃) を式(1)に代入すると,  $R_{th}=0.13$   $\mu$ m,  $\theta_a=0.091^\circ$  となる。このことは上記の条件を用いれば, 図1中の破線で示した理想的な平面に仕上げることが不可能であるが, 幾何学的に高い精度で加工面を仕上げることができることを意味する。また,  $\theta_a$  も非常に小さく, 後述する軸方向の粗さを測定する際にこの角度を考慮する必要がないことになる。

**2.2 転写位置と転写誤差の計算方法** 工具逃げ面の粗さが加工面の粗さに及ぼす影響を明らかにするためには, 粗さ曲線を測定した加工面の位置が切れ刃のどの部分で仕上げられたのかを明らかにしなければならない。図2はそれぞれ後述する転写位置と転写誤差の計算方法を示すもので, 実線は仕上げ面の粗さ曲線  $Y_w$ , 破線は工具逃げ面の粗さ曲線をねじれ角を考慮するとともに  $Y$  軸を反転させて求めた曲線  $Y_t$  である。図2において,  $m, p$  および  $s$  は整数,  $T$  はサンプリング間隔であり, 両曲線は個数がそれぞれ  $s+1$  および  $m+1$  個のデータより構成されている。図2に示すように曲線  $Y_w$  を固定し, 曲線  $Y_t$  を  $Z$  軸方向に長さ  $p \cdot T$  移動させ, 逃げ面の粗さが仕上げ面に転写された可能性の高い位置およびその違いの程度をそれぞれ転写位置および転写誤差と定義し, 以下の手

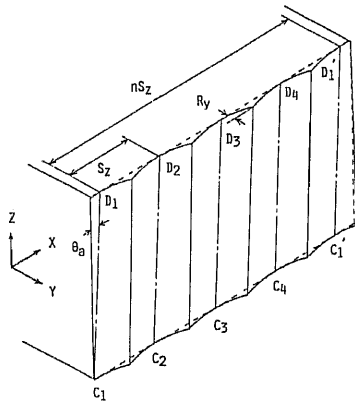


Fig. 1 The ideal shape of a surface machined using an end mill

順で求めている。

- (1) 工具逃げ面の粗さをねじれ刃に沿って間隔  $Tl = T/\cos \eta$   $\mu$ m で  $s+1=201$  個測定し, その平均値を  $Z$  軸に一致させる。
- (2)  $s=1$  のデータが  $Y$  軸に一致するように移動させ, その後  $Z$  軸の値に  $\cos \eta$  を乗じて  $T$   $\mu$ m 間隔の点群データにする。
- (3)  $Y$  軸を反転させ, その後  $Y$  軸の値に  $\cos \beta$  を乗じて粗さ曲線  $Y_t$  とする。(  $\beta$ : 軸直角断面における逃げ角)
- (4) 仕上げ面の軸方向の粗さを間隔  $T_w = T/\cos \eta$   $\mu$ m で  $l=347$  ( $\approx 400 \cos \eta$ ) 個測定し, その平均値を  $Z$  軸とする。
- (5)  $l=1$  のデータが  $Y$  軸に一致するように移動させ, この点群による粗さ曲線を  $Y_w'$  とする。
- (6) 粗さ曲線  $Y_w'$  を構成する点群の値を順番に直線で結んで折れ線とし, その後直線  $Z=i \cdot T$  ( $i=0 \sim 400$ ) と折れ線との交点により  $T$   $\mu$ m 間隔の  $m+1=401$  個のデータを計算する。
- (7) 手順(6)により得られたデータの平均値を新たに  $Z$  軸とし, この点群による粗さ曲線を  $Y_w$  とする。
- (8) 粗さ曲線  $Y_w$  を固定し, 粗さ曲線  $Y_t$  を  $k \cdot T$  ( $k=0 \sim 200$ ) 移動させながら次式で示す  $E(k)$  を計算する。

$$E(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s [Y_t(i \cdot T) - Y_w\{(i+k) \cdot T\}]^2}{s}} \dots\dots\dots (2)$$

- (9)  $E(k)$  の最小値を転写誤差,  $k \cdot T$  の値を転写位置と定義する。

図2は  $k=p$  の計算における両粗さ曲線の状態であり, 測定および計算には  $T=1$   $\mu$ m を用いた。なお, 後述する工具 A ないし C は逃げ面を円筒研削しており, 手順(3)において  $\beta=0^\circ$  としている。

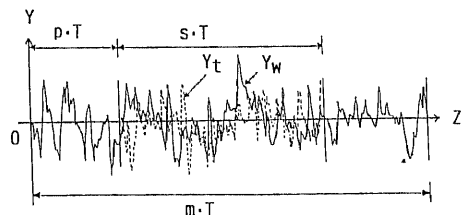


Fig. 2 Calculation method of degree of transference from the cutting edge to the machined surface

### 3. 実験条件および方法

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：超精密旋盤(豊田工機：AHP 50-32)

エンドミル：直径 20 mm, 1 枚刃, 超硬ソリッドエンドミル, ねじれ角 45° (表 1 参照)

工作物：アルミニウム合金 (A 7075), 20×75×14 mm

切削条件：切削速度 188.4 m/min, 半径方向切込み 0.05 mm, 軸方向切込み 10 mm, 送り 0.1 mm/刃, 上向き切削, 乾式

表 1 は使用した工具, 逃げ面の高精度化に使用したダイヤモンドホイールおよびその研削条件を示したものである。工具 D は市販の工具であるが, その他の工具は逃げ面の粗さを改善させたものであり, 平面研削盤のテーブルに工具を両センタ方式で支持および回転を与える装置に取付け, 逃げ面をわずかに円筒研削している。なお, 工具 A に関しては ELID pulser (新東工業：EPD-10 A) を用い, ELID 研削を付加して仕上げている。これらの工具の逃げ面には, 軸直角断面における逃げ角 0° のランド幅が創成され, 後述する図 9 に示す SEM 写真では黒い帯び状の部分として観察さ

Table 1 End mills used and grinding conditions

tool	A	B	C, C1-C5	D
diameter mm	20			
number of teeth	1			
helix angle deg.	45			
relief angle deg.	0			
land width μm	46	40	30, 23~65	0
diamond wheel	#4000 (ELID)	#1000	#600	
grinding speed m/min	942			
radial depth mm	0.001			
feed mm/min	50			
coolant	water soluble			

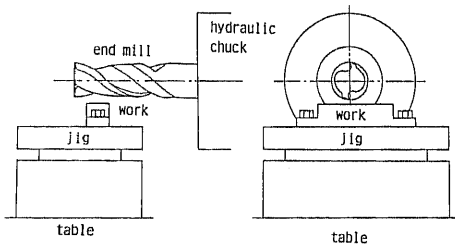


Fig. 3 Experimental arrangement

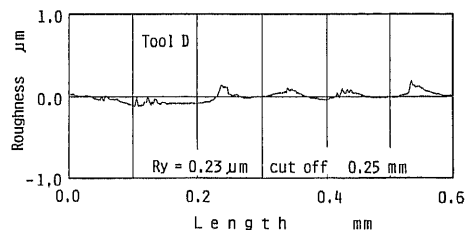
れる。このランド幅を切れ刃に対して  $\eta=45^\circ$  方向に測定し, その値を表中に示している。実験はすべて 1 枚刃で行っており, 他の切れ刃は半径方向に約 0.5 mm 削り落としている。また, ランド幅が仕上げ面粗さに及ぼす影響を調べる目的で, 工具 C と同条件で研削し, ランド幅の異なる工具 C 1 ないし C 5 を準備しており, それらの範囲も示している。

図 3 は実験方法の概略図である。機械主軸端面に特製の油圧チャックを取付けてエンドミルを固定し, 工作物はジグを介してテーブルに取付けているが, 切込みはジグに内蔵したねじにより与えている。仕上げ面および工具逃げ面の粗さは触針式粗さ計 (Rank Taylor Hobson: Form Talysurf, Talysurf 6) を用いて測定した。粗さ曲線のデータは粗さ計よりパーソナルコンピュータの記録装置に取り込み, その後に前述した計算処理を行っている。

### 4. 実験結果と考察

4.1 仕上げ面粗さ 図 4 は工具 D を用いて加工した仕上げ面の粗さ曲線であり, 図 4 (a) が送り方向, 図 4 (b) が軸方向に測定した結果である。図 4 (a) には 0.1 mm 幅のツールマークが観察され, その最大高さは  $Ry=0.23 \mu\text{m}$  であり, 式 (1) による理論値 ( $R_m=0.13 \mu\text{m}$ ) にほぼ一致する。一方, 図 4 (b) に示す軸方向の最大高さは  $Ry=2.65 \mu\text{m}$  と大きく, 送り方向の 10 倍以上である<sup>(2)</sup>。

図 5 は工具 D の逃げ面の粗さ曲線を示しており, ねじれ刃の刃先より 20 ないし 40  $\mu\text{m}$  の距離において,



(a) Feed direction

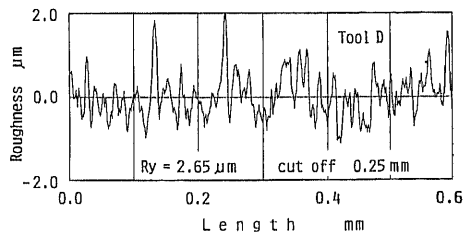


Fig. 4 Roughness curve of the machined surface

ねじれ刃に沿う方向に測定した結果である。逃げ面は切れ刃がねじれているために曲面となっており、その曲率半径を文献(1)の式(10)ないし(12)を用いて計算すると、 $\eta=45^\circ$ の条件では工具半径の4倍になる。しかし、使用した粗さ計(Form Talysurf)ではこの円弧によるうねり成分を自動的に補正し、出力する機能を持っており、その後に前述の手順(1)ないし(3)により粗さ曲線  $Yl$  を求めている。

このようにして求めた図5と4(b)を比較すると、前者の振幅は後者に比べて少し小さいが、両者は変動の周期が類似しており、工具逃げ面の粗さが仕上げ面の粗さにほぼ転写されたものと考えられる。

そこで式(2)を用いて転写の位置および転写誤差の計算を試み、その結果を図6に示す。図6(a)は  $E(k)$  の変動を示しており、 $k=59$ において最小値  $E(k)_{\min}=0.42\mu\text{m}$  が得られている。したがって

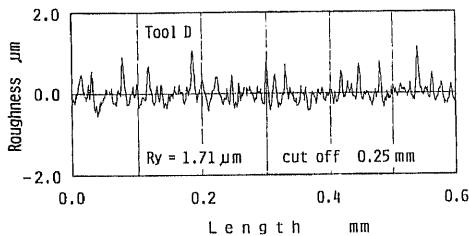
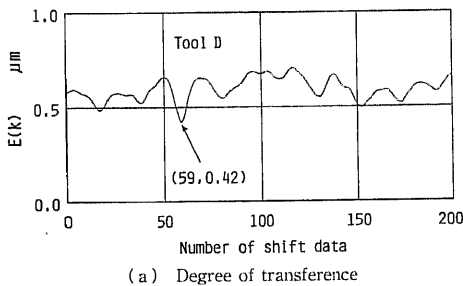
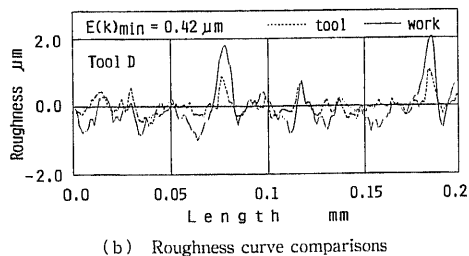


Fig. 5 Roughness curve of flank surface



(a) Degree of transference

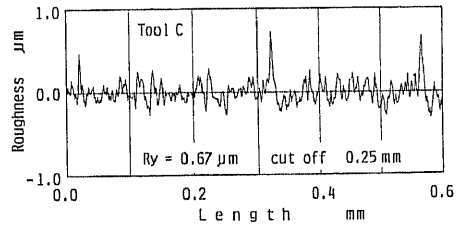


(b) Roughness curve comparisons

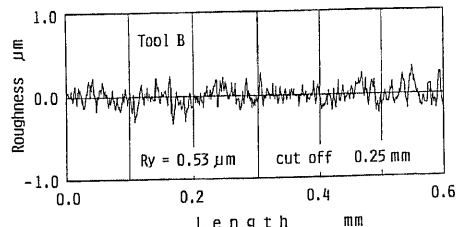
Fig. 6 Influence of surface roughness of the flank surface exerted on the surface roughness of the machined surface

$k \cdot T=59\mu\text{m}$  が転写位置、 $0.42\mu\text{m}$  が転写誤差となる。 $E(k)$ はその値が小さいほど逃げ面が仕上げ面によく転写されたことを意味する。上記の転写位置における工具逃げ面の粗さ曲線(破線)および仕上げ面の粗さ曲線(実線)を比較して図6(b)に示すと、両粗さ曲線はほぼ一致している。また、図6(a)より  $E(k)$  は約  $20\mu\text{m}(k \cdot T=20)$  の周期で極小値を示すような変化をしていることがわかる。この周期的な変化の理由として、逃げ面の仕上げに用いた砥石表面にドレッシング時の送りマークが残り、工具逃げ面を介して仕上げ面に転写された可能性および逃げ面の研削時に発生したツールマークが同様に転写された可能性が考えられる。しかし、詳細については明らかではなく、今後の検討課題である。

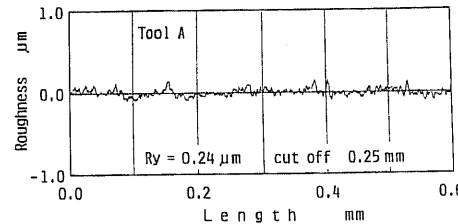
4.2 逃げ面の高精度化とランド幅の影響 図6の結果より工具逃げ面の粗さ曲線が完全に転写されるわけではないが、逃げ面の最大高さを小さくすることにより、仕上げ面の粗さを改善することが期待できる。そこで、表1に示す3種類のダイヤモンドホイールを用いて逃げ面をわずかに円筒研削し、工具A, B,



(a) Tool C (#600)



(b) Tool B (#1000)



(c) Tool A (#4000 + ELID)

Fig. 7 The roughness curve of the flank surface

CおよびC1ないしC5を準備した。図7は工具C、BおよびAの逃げ面の粗さ曲線を示しているが、砥石の粒度が細くなるほど高い精度で仕上げられている。すなわち、#600または#1000のダイヤモンドホイールを用いた工具CまたはBで最大高さはそれぞれ  $Ry=0.67$  または  $0.53 \mu\text{m}$  となり、工具Dの  $Ry=1.71 \mu\text{m}$  に比べて大幅に改善している。また、#4000のダイヤモンドホイールにELID研削を付加して準備した工具Aでは、その最大高さが  $Ry=0.24 \mu\text{m}$  とさらに高精度に仕上げられている。

図8は逃げ面のランド幅  $48 \mu\text{m}$  の工具C3を用いて加工した仕上げ面の粗さ曲線を示しており、送り方向の測定結果である。図8より粗さ曲線はツールマークの山部で突起が顕著な形状となり、最大高さも  $Ry=0.56 \mu\text{m}$  と大きい。そのおもな理由は、逃げ面に付着した切りくずの一部が次の切削時に工作物によってこすられ、ツールマークの山部に再度付着したためと考えられる。図9は逃げ面のSEM写真であるが、切れ刃の下方  $5 \mu\text{m}$  付近まで付着物の残りがわずかに確認され、この図からも切りくずの一部が逃げ面ランドを経由して仕上げ面に再度付着したものと推察できる。なお、図4(a)に示したランド幅がない工具Dによる仕上げ面と図8を比較すると、両者の差は明らかである。

そこで、次に工具C1ないしC5を用いて側面加工を行い、逃げ面のランド幅が仕上げ面の最大高さに及

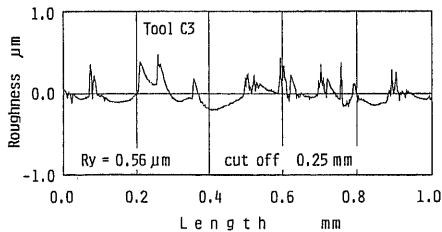


Fig. 8 The roughness curve of the machined surface in the feed direction (land width:  $48 \mu\text{m}$ )

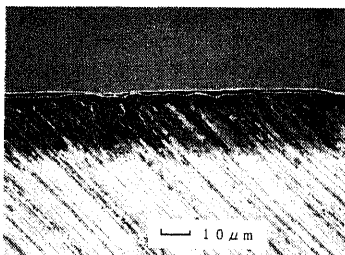


Fig. 9 SEM image of tool flank surface (Tool C)

ぼす影響を図10に示す。図10(a)は送り方向、図10(b)は軸方向の結果であり、最大高さ  $Ry$  の値は3個の測定値の平均および最大値と最小値の幅で示している。図10(a)よりランド幅が大きくなるほど送り方向の最大高さは増加する傾向にあり、ランド幅が  $65 \mu\text{m}$  の条件(工具C5)では一点鎖線で示す理論粗さ ( $0.13 \mu\text{m}$ ) の約5倍に達している。一方、図10(b)に示す軸方向についてはランド幅が増加しても一点鎖線で示す平均値 ( $0.92 \mu\text{m}$ ) にほぼ一致し、ほとんどランド幅の影響を受けていない。この理由は、軸方向の粗さ曲線はツールマークの谷部で測定していることおよ

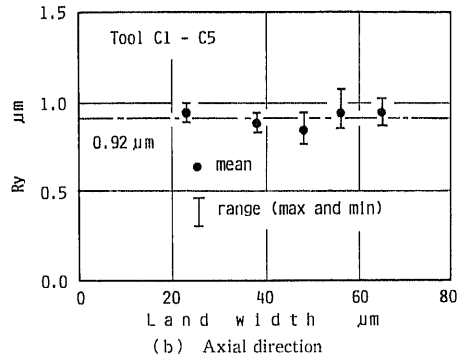
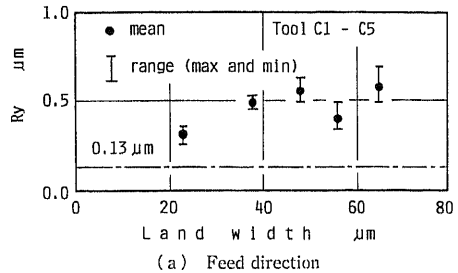


Fig. 10 The relationship between the land width and the maximum height of the machined surface

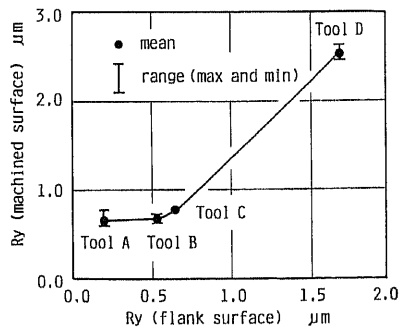


Fig. 11 The relationship between the maximum height of the flank surface and the machined surface

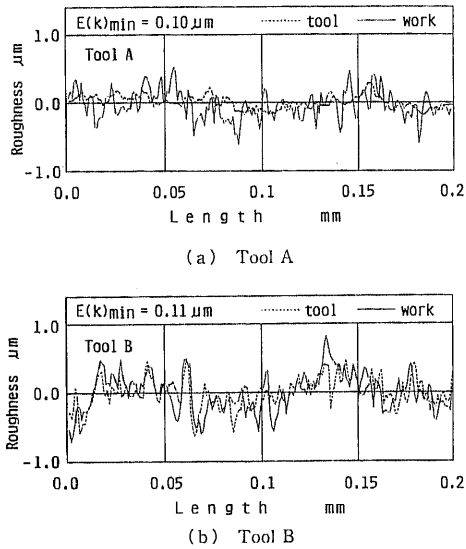


Fig. 12 The influence of roughness curve of the flank surface on the roughness curve of the machined surface

び逃げ面に付着した切りくずが、前述したように次の切削の開始時にその多くをツールマークの山部に残し、谷部では付着物が非常に少なくなったことによるものと考えられる。

4.3 逃げ面の高精度化による仕上げ面粗さの改善  
 図 11 は工具逃げ面の最大高さ $Rz$ と仕上げ面の軸方向の最大高さ $Ry$ を比較したものであり、図 10 と同様に 3 個の測定値の平均および最大値と最小値の幅で示している。図 11 より市販の工具 D に比べ工具逃げ面を高精度に仕上げた工具 A ないし C によって、仕上げ面の最大高さ $Ry$ が大幅に改善することが明らかである。また、各工具とも工具逃げ面に比べて仕上げ面の最大高さのほうに少し大きな値を示しているが、前者の最大高さをサブミクロンに高精度化することによって、後者の最大高さも $Ry=1\mu\text{m}$ 以下を達成できることを示している。

一方、工具 A ないし C による加工面への転写誤差は $0.10$ ないし $0.14\mu\text{m}$ であり、工具 D による $0.42\mu\text{m}$ に比べて小さくなっている。このことは工具逃げ面を高精度に仕上げることによって、その粗さが仕上げ面に転写されやすくなることを意味しており、図 11 に示した仕上げ面精度の改善に寄与したのと考えられる。

しかし、ELID 研削を付加し、さらに高精度に仕上げた工具 A を用いても、仕上げ面の軸方向の最大高さは工具 B による $Ry=0.73\mu\text{m}$ に比べて $Ry=0.58$

$\mu\text{m}$ であり、大きな改善は得られていない。図 12 は図 6 と同様に工具 A および B の逃げ面と仕上げ面の軸方向の粗さ曲線を比較しており、図 12(a)が工具 A、図 12(b)が工具 B による結果である。図 12 より両工具とも転写誤差が $0.1\mu\text{m}$ 程度と小さいためそれぞれ工具逃げ面の粗さ曲線が仕上げ面によく転写されているが、前者の仕上げ面には逃げ面の粗さ曲線を中心に振幅が $0.2\mu\text{m}$ 程度の粗さが残っている。そのため、工具 A においては逃げ面の粗さを大きく改善したにもかかわらず、仕上げ面の最大高さは $Ry=0.6\mu\text{m}$ 程度にとどまっている。このことは仕上げ面の精度改善に工具逃げ面を ELID 研削することが有効ではあるが、実験条件の範囲では上記の値が精度改善のほぼ限界と考えられる。

### 5. 結 論

ねじれ刃エンドミルを用いてアルミニウム合金の仕上げ加工を行い、仕上げ面粗さに及ぼす工具逃げ面の粗さの影響について検討した。また、逃げ面の高精度化による仕上げ面粗さの改善を試み、次のような結論を得た。

- (1) 仕上げ面の送り方向の粗さ曲線にはツールマークが見られ、最大高さは理論値にほぼ一致するが、軸方向の最大高さは送り方向の約 10 倍と大きい。
- (2) 仕上げ面の軸方向の粗さ曲線はねじれ角を考慮した逃げ面の粗さ曲線とよく一致しており、後者が前者に転写されている。
- (3) 工具逃げ面の粗さが仕上げ面粗さに転写される状況を評価するために転写位置および転写誤差を定義し、その計算方法を提案した。
- (4) 工具逃げ面を高精度に仕上げることにより転写誤差が大きく減少し、仕上げ面に逃げ面の粗さが転写されやすくなり、仕上げ面の軸方向の最大高さは市販工具による $Ry=2.53\mu\text{m}$ から $0.75$ ないし $0.58\mu\text{m}$ へと大幅に改善された。
- (5) 工具逃げ面の高精度化に ELID 研削の使用は有効であるが、実験条件の範囲では、軸方向の最大高さ $Ry=0.6\mu\text{m}$ が仕上げ面の精度改善における限界である。

最後に本研究を遂行するにあたり、工具は三菱マテリアル(株)のご好意によった。また、工具逃げ面の高精度化には新潟県工業技術総合研究所の石川淳氏に協力いただいた。付記して感謝の意を表す。

### 文 献

- (1) 藤井義也・岩部洋吾・鈴木雅晴、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) 岩部洋育・後藤隆夫, エンドミルによる仕上げ加工に関する研究—逃げ面の仕上げ面粗さに及ぼす影響—, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991-3), 723.
- (3) 大森整, 超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法, 精密工学会誌, 59-9 (1993), 1451.
-