ボールエンドミル加工における表面粗さの 生成過程の解析*

是田規之** 江川庸夫*** 黒田基文*** 渡部 健† 伊井良治††

Analysis of Surface Roughness Generation by Ball Endmill Machining

Noriyuki Koreta, Tsuneo Egawa, Motofumi Kuroda, Ken Watanabe and Yoshiharu Ii

The surface roughness generated by ball endmill cutting is analysed by simulating the envelope of the cutting edge of the endmill by computer. It is found that the cut remainder is formed in the vicinity of the rotational center of the endmill and is generally higher than the cusp height. The further analytical results show that the decrease of the inclination angle of the endmill, the reduction of the feed rate, flattening at the tip of the endmill, and forth and back cutting by the endmill are very effective to improve the roughness of the machined surface. These are also confirmed by the cutting experiments.

Key words: surface roughness, ball endmill cutting, cut remainder, cusp height

1. 緒 言

自動車,あるいは家電製品用金型の型彫りは,通常,ボールエンドミルを使用して行う。金型は,ボールエンドミルで型彫りされた後,表面粗さをよくするために研磨が施されているが,研磨は人手を要しかつ能率が低い,ため,研磨コストが全加工コスト中かなりの割合を占める。そのため,研磨を極力省略できるように,より良い表面粗さが得られるボールエンドミル加工法が望まれている。

従来,ボールエンドミル加工では1刃あたりの送り量が0.2~0.3mm/刃程度で低かったため,送り方向の表面粗さは問題にせず,送り方向に対して直角方向に間欠的に移動するいわゆるピックフィード f とボールエンドミルの工具半径 r によって決定される表面粗さ $r - \sqrt{r^2 - f^2/4}$ (近似的には $f^2/8r$)のみ問題とし,これをカスプ¹⁾と呼んでいた。しかし,最近のように,高能率化のため0.5mm/刃以上の高い送りが使用され始めると,カスプだけでなく送り方向の表面粗さを考慮しなければならなくなり,それはカスプより大きいと指摘

され,解析された²⁾が,必ずしも現実の表面粗さと一致するものではなかった。そこで,著者らは,ボールエンドミルの切れ刃の軌跡を計算機で時々刻々追跡して,加工面の生成過程を幾何学的に明らかにし,現実と合った表面粗さを得ることができた。それをもとに,切削条件の適切な選択,ボールエンドミルの工具軸の傾斜,および工具形状の修正などにより表面粗さをよくする改善策を見出した。本報では,まずボールエンドミル加工における表面粗さの生成機構を述べ,つぎに前記削り残しをなくす方法について報告する。

2. 加工機構の解析

2.1 表面粗さの生成機構の解析

加工面の形状を解析するために,ボールエンドミルの座標系 (u, v, w) と,被削材の座標系 (x, y, z) を図1(a)のように設定する。ここで,ボールエンドミルの回転中心軸 w は, $x-z$ 平面に平行で $x-y$ 平面とボールエンドミルの傾斜角 α で傾いており,ボールエンドミルは W 軸回りに回転しながら y 方向に送られ,間欠的に x 方向にピックフィードされるとする。さらに, xyz 面に平行な送りに伴い移動する W 軸を含む面を $B'y'A'$ とする。ボールエンドミルの切れ刃上の任意点を点 $P(u, v, w)$ としたとき,まずボールエンドミルの座標系での点 P の軌跡は次式で与えられる。

*原稿受付 平成5年2月24日

**正会員 菱明技研㈱(広島市西区観音新町4-6-22)

***正会員 三菱重工業㈱広島研究所(広島市西区観音新町4-6-22)

†正会員 三菱重工業㈱広島工機工場(広島市安佐南区祇園3-2-22)

††三菱重工業㈱広島工機工場

Fig. 1 Axis of coordinates of ball endmill and work material

$$\begin{aligned} u &= r \sin \xi \cos(\Theta + \theta) \\ v &= r \sin \xi \sin(\Theta + \theta) \\ w &= -r \cos \xi \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

r ; ボールエンドミルの工具半径 (mm)
 ξ ; O_1P と w 軸とのなす角 ($0 \leq \xi \leq \pi/2$) (rad)
 Θ ; 各切れ刃と u 軸とがなす初期角度 (rad)
 θ ; 切れ刃の初期角度よりの回転角 (rad)

であり、 Θ はボールエンドミルの刃数 Z によってつぎのように表すことができ、各切れ刃についてそれぞれ軌跡を求める。

$$\Theta = (n-1) \frac{2\pi}{Z} \quad (1 \leq n \leq Z) \quad (2)$$

ここで、切刃の一つを U 軸に一致させ、これを第一の切れ刃 ($n=1$) とする。

つぎに、切れ刃上の任意点 P の軌跡を被削材の座標系 (x, y, z) で示すとつぎの通りである。

$$\begin{aligned} x &= r \sin \xi \cos(\Theta + \theta) \sin \zeta + x_c \\ y &= r \sin \xi \sin(\Theta + \theta) + y_c \\ z &= -r \sin \xi \cos(\Theta + \theta) \cos \zeta + z_c \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、

(x_c, y_c, z_c) ; 点 P の回転中心 O_2 の座標
 ζ ; 傾斜角 (rad)

いま、ボールエンドミルの回転数を N (rpm)、送り速度を F (mm/min)、および切込み深さを t (mm) とすると、 O_2 (x_c, y_c, z_c) の座標は式(4)のように表すこ

とができる。

$$\begin{aligned} x_c &= \left(\frac{r-t}{\sin \zeta} - r \cos \xi \right) \cos \zeta \\ y_c &= \frac{F}{N} \cdot \frac{\theta}{2\pi} \end{aligned} \quad (4)$$

$$z_c = \left(\frac{r-t}{\sin \zeta} - r \cos \xi \right) \sin \zeta$$

式(4)を式(3)に代入することにより、切れ刃上の任意点 P の軌跡は、式(5)で表せる。

$$\begin{aligned} x &= r \sin \xi \cos(\Theta + \theta) \sin \zeta \\ &+ \left(\frac{r-t}{\sin \zeta} - r \cos \xi \right) \cos \zeta \\ y &= r \sin \xi \sin(\Theta + \theta) + \frac{F}{N} \cdot \frac{\theta}{2\pi} \\ z &= -r \sin \xi \cos(\Theta + \theta) \cos \zeta \\ &+ \left(\frac{r-t}{\sin \zeta} - r \cos \xi \right) \sin \zeta \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 ξ_1, ξ_2 は図1(c)に示すようにボールエンドミルの切れ刃と、ボールエンドミル中心 O_1 を通る $B'A$ 平面の B' 軸との交点を、 Q_1, Q_2 とすると
 $\xi_1 = \angle O' O_1 Q_1, \xi_2 = \angle O' O_1 Q_2$ と表せる。

ボールエンドミル1回転、すなわち $0 \leq \theta \leq 2\pi$ の範囲で各切れ刃の切削幅 ($\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$) 内の軌跡を計算することにより、表面粗さが求まる。

2.2 解析結果と実験結果

ボールエンドミルの傾斜角 ζ 、1刃あたりの送り量 $F/N \cdot z$ および工具半径 r と表面粗さとの関係を求めた。

2.2.1 ボールエンドミルの傾斜角と表面粗さの解析

ボールエンドミルの傾斜角 ζ が 90° の場合の表面粗さを、式(5)を用いて解析した結果を図2に示す。同図中の切れ刃 A に着目すると、ボールエンドミルが回転しながら同図(b), (c)の状態へと、移動して加工が進むとする。この時、カスプ高さは $6.3 \mu\text{m}$ であるのに対し、式(5)で解析した結果は、図2(d)に示すごとく著しい削り残しを生じ、その高さは $25 \mu\text{m}$ にも達することがわかった。従来、実際の切削において表面粗さがカスプと比べて大幅に悪化するのは、エンドミルの回転中心付近でむしれが発生しているためと考えられていた。むしれも表面粗さ悪化の一因とは考えるが、本解析により幾何学的形状誤差である削り残しが、表面粗さを悪化させる大きな要因であることが明らかになった。

Fig. 2 Cutting process of a horizontal surface

Fig. 3 Workpiece machined

実験により得られた加工面写真を図3に示す。ダウンカット側に高さ $25\mu\text{m}$ の削り残しが生じており、その形状も解析結果とほぼ一致している。図3の中央部には、送り方向が右側のときの削り残しが示されているとともに、たまたま次のピックフィードで左側に送った時の削り残しがダウンカット側に同位相で示されている。なお、解析の結果得られた図2は、削り残しを際立たせるため、水平方向に対し、垂直方向は3倍に拡大しているため相似形にはなっていない。

Fig. 4 Simulation of cut remainder due to change of angle of inclination

つぎに、図2と同一条件でボールエンドミルの傾斜角 ζ を 87° および 80° にした場合の表面粗さの解析結果を 90° の場合と対比して図4に示す。傾斜角 ζ が 87° の場合、削り残し高さは $20\mu\text{m}$ と 90° の場合より低くなり、さらに 80° まで傾斜させると削り残しは、 $12.5\mu\text{m}$ になる。傾斜角を 80° より更に小さくしても被削材と切れ刃の相対的關係は同じなので、表面粗さは一定となる。

Fig. 5 Relation between angle of inclination of tool axis and surface roughness

工具半径を 5, 10, 15mm, 傾斜角を 90° から 75° ままで変えた場合の削り残しの高さを解析した結果を図 5 に示す。傾斜角を小さくすると、ある傾斜角までは削り残しは急激に減少し、それ以降は徐々に小さくなって一定値となる。例えば、傾斜角 80° では、1 刃あたり送り 0.5mm/刃 の条件下で工具半径 5 mm では $12.5\mu\text{m}$, 10mm では $6.4\mu\text{m}$, 15mm では $4.2\mu\text{m}$ となる。また、工具半径が大きいほど同じ傾斜角で比較すると削り残しは小さく、また工具半径が大きくなるほど傾斜角での改善効果は小さくなる。解析と同じ条件で実際に切削実験した結果を工具半径 5 mm は○印, 10mm は●印, 15mm は■印で示しているが、解析結果と実験結果は比較的よい一致を示している。

2.2.2 1 刃あたりの送り量, 工具半径と表面粗さ

工具の傾斜角 90° で 1 刃あたりの送り量を変化させたときの表面粗さの解析結果を、工具半径 5 mm, 10mm, 15mm 別に図 6 に示す。表面粗さは 1 刃あたりの送り量が大きくなる程あるいは工具半径が小さくなる程悪くなる。同図で 1 刃あたりの送り量が零の時の表面粗さが従来のカスプの高さと等しくなり、1 刃あたりの送り量が大きくなるにつれて、送り方向の凹凸²⁾が大きくなってカスプに加算されるため、表面粗さは徐々に悪くなる。さらに 1 刃あたりの送り量が大きくなると表面粗さは急激に悪化し、この原因が前述の削り残しである。すなわち、本解析で用いた工具半径の範囲では 1 刃あたりの送り量が従来の平均的な 1 刃あたりの送り量約 0.3mm/刃 以上になると、カスプと送り方向の凹凸とで与えられる表面粗さより削り残しの方が高くなり、削り残しが表面粗さを決定するようになる。同図中には実験結果も併記しており、解析結果と実験結果はよく一致している。

Fig. 6 Relation between feed rate and surface roughness

(a) Fixed angle of inclination (b) Variable angle of inclination controlled by numerical control

Fig. 7 Attachment for numerically controlled machine tools to keep the angle of inclination best

3. 表面粗さの改善策

3.1 ボールエンドミルの傾斜角の制御

2.2.1 項の結果より傾斜角を小さくすると削り残しは急激に減少し、それ以降削り残しが一定になることがわかった。よって削り残しが一定になる傾斜角以下に制御して切削すれば削り残しは図 5 に示すように小さくできる³⁾。この成果を利用して図 7(a)に示すように、門形数値制御工作機械に、前述の解析から得られる傾斜角だけ工具を垂直方向から傾斜させるアタッチメントを装着することにより、水平面に近い曲面加工では削り残しをなくすることができる。さらに、図 7(b)に示す数値制御 2 軸ユニバーサルヘッドを装着して、自由曲面上の任意の切削点において常に所要の傾斜角をもつように同時 5 軸制御することにより、自由曲面に対しても前述の削り残しが生じない条件で加工できる。

Fig. 8 Flat center endmill

 Fig. 9 Cutting test by flat endmill
($r_0 = 0.55\text{mm}$)

3.2 主軸の高速化

図6に示す通り，削り残しは1刃あたりの送り量が小さい程小さくなる．送り速度が同一の場合，エンドミルの回転数を高くすれば1刃あたりの送り量が小さくなり削り残しは少なくなる．よって，加工能率を保ったまま削り残しを少なくするには主軸の高速化が有効である．

3.3 工具先端部切れ刃の平坦化

前述のように削り残しが生じるのは，工具先端付近で加工する場合であるから，図8に示すように工具先端部をわずかに平坦にした工具を用いれば，削り残しの発生を抑えることができる⁹⁾．

ここで，ボールエンドミルの回転数 N (rpm)，送り速度 F (mm/min)，ピックフィード量 f (mm)，ボールエンドミルの刃数 Z (枚)，時刻 t_N (min)として，つぎに示す式(6)で r_M ， r_N を計算し，大きい方の値を平坦部の半径 r_0 とすればよい．

$$r_M = \frac{Z+2}{4Z} \cdot \frac{F}{N} \quad (6)$$

$$r_N = \frac{f}{2 \sin 2\pi N t_N}$$

$$\text{ただし, } t_N \text{ は, } F \cdot t_N + r \cos(2\pi N t_N) = \frac{Z+2}{4Z} \cdot \frac{F}{N}$$

を満足する値 ($0 \leq t_N \leq \frac{1}{4N}$) とする．

したがって，ボールエンドミルで形成された直線状切れ刃の長さにもとづいて，削り残しが発生しない，ピックフィード量や送り速度，ないし回転数を適切に設

定できる．図9に $r_0 = 0.55\text{mm}$ として工具先端を平坦化したボールエンドミルで切削した場合の加工面状況を示す．図8に示す誤差 δ が許容できれば従来のNC加工プログラムで切削可能となる．

3.4 不等ピック加工法 (往復切削)

従来の加工法では，図10に示すように片道ごととピック操作を行う．そのため，ダウンカットによる加工面と，アップカットによる加工面が交互にはっきりと現れる．したがって，図2からもわかるようにそのダウンカット側に，削り残しが生じ表面粗さを悪くしていた．そこで，同一箇所を往復で切削すれば，ダウンカットによって加工された面が，つぎにはアップカットによって加工され，削り残しは削り取られて仕上げ面に残らない．

ここで，図10(a)に示すように，図上右方向に切削を行った後，右端でピックフィード f をかけて，今度は左方向に切削を行った後左端でピックフィード $a \cdot f$ ($0 \leq a \leq 1$) をかけ，次に右方向に切削するというようなジグザグ切削を行う．このとき，往，復時のピックフィード量を変更することによる削り残し，および往，復とも等しいピックフィード量で上記の1/2のピックフィード量にした場合を含めた削り残しを図10(b)に示す6パターンで解析した．解析した結果，パターンIの場合を図11(a)に示すが，I，II，III，IV，VIのパターンは全く同一で，送り方向に直角な削り残しの最も大きい断面の形状は図11(b)となる．往復切削と言われるパターンVでは，往きは図11(b)と同じ断面形状，帰りは左右対称の2点鎖線で示す断面形状となる．したがって，往復切削すると削り残し高さは $8.7\mu\text{m}$ となり，他のパターンにくらべると削り残し高さは激減する．この6パターンの削り残し高さと切削能率 (パターンIを100%と仮定) をまとめて図12に表示する．この図より，削り残しの観点からは本研究で提案する．

Fig. 10 Pick feed pattern when forth and back cutting

Fig.11 Simulation of cut remainder

Fig.12 Comparison of surface roughness and efficiency between six patterns

パターンV, 切削能率の観点からは従来加工法であるパターンIがよい。どちらにするかは、手仕上工数まで含めてトータルで考えなければならないが、全体的な形状誤差も修正逆伝達関数制御により高い送りが可能となってきたので、トータルの金型生産効率面よりも往復切削が実用的になってきたと言えよう。

4. 結 言

- (1) ボールエンドミル加工における表面粗さの生成機構を幾何学的に解析し、その結果ボールエンドミルの回転中心付近で加工する際に切れ刃がスパイラルに運動するため削り残しが生じることが明らかになった。
- (2) その削り残しの高さは、1刃あたりの送り量が大きいくほど高くなり、従来より送りが高くなっている現状では、表面粗さはこの削り残しによって決定される場合が多いことが明らかになった。
なお、解析結果と実験結果を対比させた結果、よく一致した。
- (3) 削り残しは、主軸の高速化による1刃あたりの送り量の低減、ボールエンドミルの回転軸の傾斜、工具先端部切れ刃の平坦化、さらには往復切削化等により改善できることを明らかにした。

最後に、本研究取りまとめにあたりご指導、ご助言いただいた理化学研究所佐田登志夫副理事長に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 佐田登志夫, 大越 諄: 切削仕上面の粗さ, 科学研究所報告, 33-5(1957) 295.
- 2) 阿部忠之: 自動車用金型の高品位型彫加工の実際, 第20回工作機械関連技術者会議, 7(1990) B1-3-1.
- 3) 江川庸夫, 寺井久宣, 松本隆博, 木下俊之, 高林信利: 同時5軸制御加工機の開発, 三菱重工技報, Vol.27 No.2(1990-3) 139.
- 4) 桑原晴義, 江川庸夫, 寺井久宣, 藤井英治, 外村 保: ボールエンドミル加工の面粗さの改善, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 725.