

[研究論文]

三次元CADを用いた楕円エンドミルによる傾斜面加工における 切削機構の解析と切削性能に関する研究

岩部 洋育^{*1}, 熊木 孝佳^{*2}, 堀 功^{*3}

Study on Cutting Mechanism and Cutting Performance for Inclined Surface by Oval End Mill using 3D-CAD

Hiroyasu IWABE, Takayoshi KUMAKI and Isao HORI

Abstract – This paper deals with the cutting mechanism and cutting performance by oval end milling of an inclined surface using a contour path method. At first, the modeling of a cutter, an edge, a rake surface and a workpiece with an inclined surface are carried out using 3D-CAD. Secondly, the chip area is calculated by the interference of the rake surface and the chip volume removed by one cutting operation. The influence of cutting conditions on the behavior of the chip area is shown and the evaluation value E_d for cutting performance is proposed. And also, the theoretical surface roughness by an oval end mill is analyzed and calculated. Values are compared with those of a machined surface and it is shown that both values are almost coincident each other.

Key words : Oval End Mill, Cutting Mechanism, 3D-CAD, Chip Area, Surface Roughness, Cutting Performance

1. 緒 論

ボールエンドミルは三次元輪郭形状の加工に不可欠な工具であり, 様々な寸法および材料の工具が多用されているため, 関連した基礎研究および応用・開発研究の報告は少なくない. 主な文献^{(1)–(22)}では各種切削条件における切削機構, 切削特性の解明や高精度加工法等が検討されており, 多くの知見が得られている. 一方, 近年三次元形状の高精度・高能率加工を目的として, エッグタイプおよびスプーンタイプと呼ばれる2種類の楕円エンドミルが開発されている⁽²³⁾. 前者は傾斜角の大きな面の加工, 後者は傾斜角の小さな面の加工に使用することが推奨されている⁽²⁴⁾. しかし, 両タイプとも切れ刃形状は複雑であり, それらの切削機構に関する研究報告は見当たらない.

そこで, 本研究ではエッグタイプの楕円エンドミルに限定し, 三次元CADを用いて工具, 切れ刃, すくい面および工作物のモデリングを行なった⁽²⁰⁾. これらのモデルを用いて, 1回の切削により除去される切りくず立体を定義するとともに, すくい面との干渉による切削面積を精度良く計算した. また, 楕円エンドミルによる傾斜面の等高線加工における仕上げ面粗さの幾何学的な解析を行い, 切削実験による妥当性の検証も行なっている. さらに, 切削特性の一つである切削トルクに相当する評価値を定義し, 良好な切削特性が期待できる切削条件について言及している. なお, エッグタイプの楕円エンドミルでは傾斜角の大きい条件で仕上げ面粗さを大幅に改善できるため, ピックフィードを大きくして生産性を高めることが可能となるが, そのような条件における切削特性についても, 評価値および切削トルクに基づいて比較検討を行った.

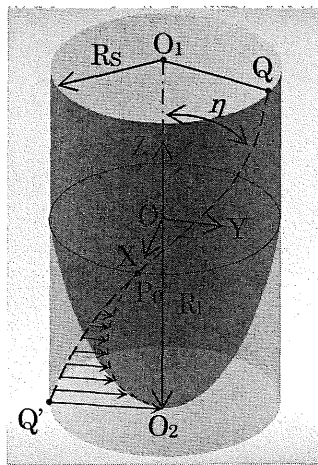
2. 三次元CADによるモデリング

図1は三次元CAD(CATIA-V5)を用いたモデリングの作成方法を示したもので, 同図(a)が工具およ

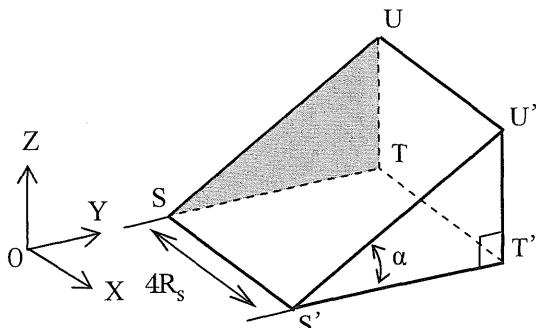
*1 新潟大学大学院自然科学研究科
(〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)
Graduate School of Science and Technology,
Niigata University
*2 (株)ツガミ(〒940-8630 長岡市東蔵王1-1-1)
Tsugami Corporation
*3 (株)不二越(〒930-8511 富山市不二越本町1-1-1)
Nachi-Fujikoshi Corporation

び切れ刃, 同図(b)が工作物の場合である. モデリングにおける主な手順は次の通りである.

- (1) 直交3軸 (X 軸, Y 軸, Z 軸) を定義し, 原点を $O(0, 0, 0)$ する.
- (2) Z 軸を中心軸とし, 半径 $R_s=8\text{mm}$ の円筒を $Z=-12\sim+10\text{mm}$ に定義する.
- (3) 円筒面上に右ねじれ角 $\eta=30^\circ$ の切れ刃 QQ' を定義する. (点 $P_0(8,0,0)$ を通るものとする)
- (4) 原点 $O(0, 0, 0)$ を楕円体の中心とし, $Z=-12\sim 0\text{mm}$ の位置に短軸が $R_s=8\text{mm}$, 長軸が $R_l=24\text{mm}$ の楕円体(下半分)を定義する.
- (5) 切れ刃の P_0Q' 部分を中心軸方向に, 半楕円体の表面まで移動(矢印)させ, 切れ刃 QP_0O_2 を定義する.
- (6) 切れ刃 QP_0O_2 , 直線 O_1Q および Z 軸 O_1O_2 で囲まれる面によりすくい面を定義する.
- (7) Y-Z 面に直線 ST を底辺とし, 斜面の角度が α の直角三角形 STU を定義する.
- (8) 直角三角形 STU を X 軸正方向に $4R_s$ 移動させ, 直角三角形 $S'T'U'$ を定義する.



(a) 工具および切れ刃モデル



(b) 工作物モデル

図1 3D-CADモデルの作成方法

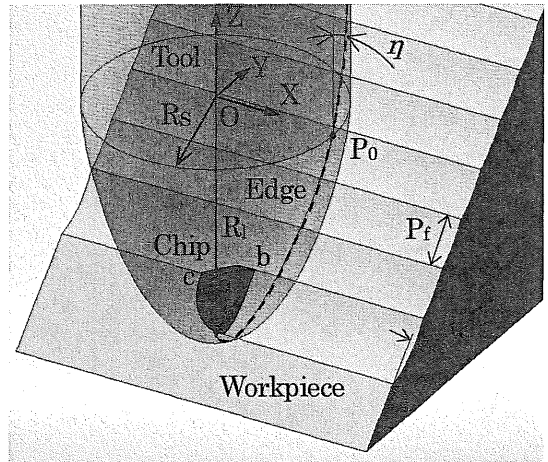


図2 傾斜面加工における切削モデル

- (9) 2つの直角三角形で囲まれる立体 $STUU'T'S'$ により工作物を定義する.

図2は, 切削面積の計算のために工具, 切れ刃および工作物モデルを結合させて示した切削モデルであり, 座標軸および使用した記号も併記している. 切削は切り込みを R_d とし, X 軸方向への送りを与えて行なっている. 図2の場合は送りが X 軸負方向に与えているため下向き切削となるが, さらにピッチフィード P_f が傾斜面に沿って下方に与えられており, ステップダウンによる切削となる. 図中の破線は切れ刃であり, $abcd$ は1回の切削によって除去される切りくず立体である. この切りくず立体は, 楕円柱の一部 bcd , 楕円体の一部 abd および abc そして傾斜面の一部 acd によって囲まれている.

図3は市販の楕円エンドミル先端部の切れ刃をデ

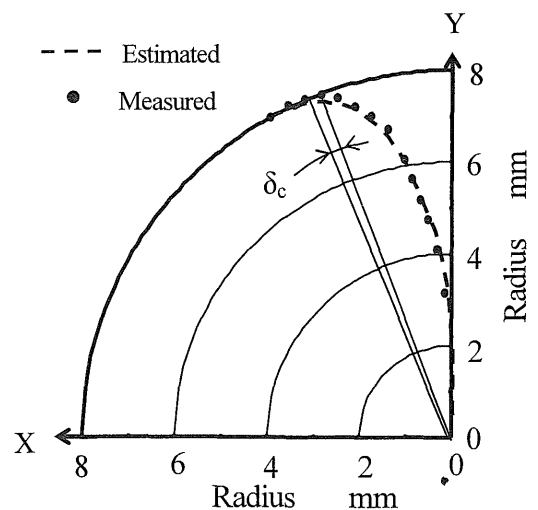


図3 切れ刃形状の比較

デジタルマイクロスコープ(キーエンス VH-6300)を用いて測定し、その結果をX-Y面に示すとともに、図1(a)のモデルから推定した切れ刃形状を破線で示している。なお、任意の切れ刃点 $P_c(x_c, y_c)$ は、文献(20)に示した式(1)において、 $R_c=R_s$ と置換することによっても求めることができる。図3は2枚のうち1枚の切れ刃の結果を投影しているが、最小2乗法を用いて切れ刃の測定値と推定値を重ねると、両者はほぼ一致している。両者の回転方向の誤差 δ_c は $\pm 1.5^\circ$ 以内と小さく、切れ刃の定義方法が妥当であったことを示している。

3. 仕上げ面粗さの解析

図4はY-Z面に2つの楕円および加工される傾斜面を示すとともに、ピックフィードによる削り残しによって生じるカスプ高さ、すなわち理論仕上げ面粗さ R_{th} との関係を示している。図より、理論粗さ R_{th} は2つの楕円IおよびIIの交点 P_t (y_t, z_t) と傾斜角 α の面との距離によって求められる。短軸を R_s 、長軸を R_l とし、点Oを中心とする楕円および点Oから斜面に平行にピックフィード P_f はなれた点 P_2 (y_2, z_2) = ($P_f \cdot \cos \alpha, P_f \cdot \sin \alpha$) を中心とする楕円の方程式はそれぞれ式(1)および(2)で与えられる。また、傾斜角 α の加工面の方程式は式(3)で与えられる。

$$\frac{y^2}{R_s^2} + \frac{z^2}{R_l^2} = 1 \quad (1)$$

$$\frac{(y - y_2)^2}{R_s^2} + \frac{(z - z_2)^2}{R_l^2} = 1 \quad (2)$$

$$z = my - \sqrt{R_s^2 m^2 + R_l^2} \quad (3)$$

なお、 $m = \tan \alpha$ であり、式(1)ないし(3)より交点 P_t の座標は次のように求めることができる。

$$y_t = \frac{y_2}{2} + \frac{z_2 R_s}{2 R_l} \sqrt{\frac{4 R_s^2 R_l^2}{R_l^2 y_2^2 + R_s^2 z_2^2} - 1} \quad (4)$$

$$z_t = -\frac{R_l}{R_s} \sqrt{R_s^2 - y_t^2} \quad (5)$$

理論粗さ R_{th} はこれらの結果を用いて次式で与えられる。

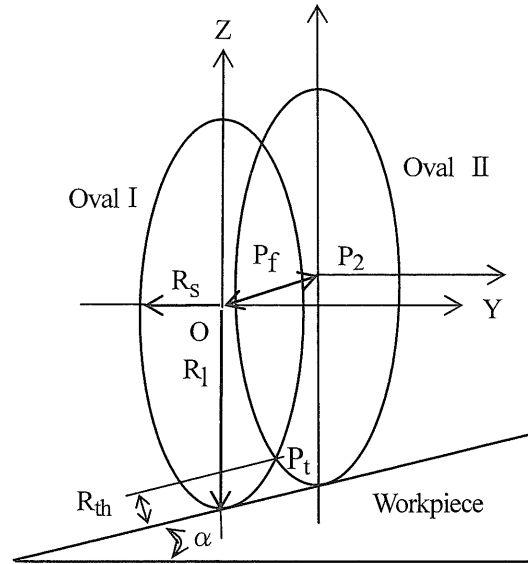


図4 仕上げ面粗さの解析

$$R_{th} = \frac{my_t - z_t - \sqrt{R_s^2 m^2 + R_l^2}}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (6)$$

4. 計算および実験方法

4.1 切削面積の計算方法

図5は図2に示した切りくず立体abcdをZ軸よりX-Y面に投影するとともに、工具の回転に伴ってこの切りくず立体を通過する切れ刃(破線)との関係および切削面積の計算方法を示している。図において、切れ刃1で切削を開始し、切れ刃2および3を経て切れ刃4の位置で基本的切削を終了するが、切削面積Aは切りくず立体abcdと切れ

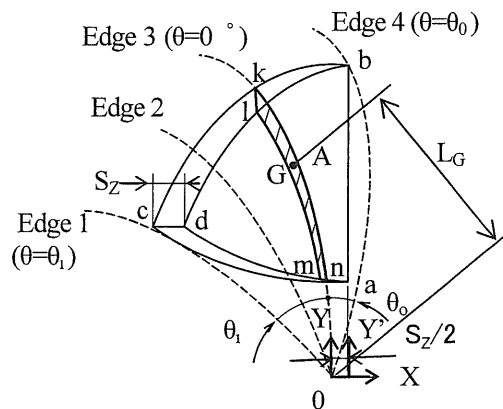


図5 切削面積の計算方法

刃を含むすくい面が干渉する部分であり、切れ刃3の位置では斜線部 $k1mn$ となる。切削面積の計算および後述する切削実験には表1に示す条件を用いた。工具の回転角の基準 ($\theta=0^\circ$) は切れ刃がY軸に接した切れ刃3の位置である。

一方、図中の点Gは切削面積の重心であり、その座標値および主軸から点Gまでの距離 L_G の計算もCAD内蔵の解析ツールを用いている。なお、計算精度を高める目的で、工具および工作物モデルは一度100倍に拡大して計算を行い、その後元の倍率におけるそれぞれの値に変換している。

4・2 実験方法

実験に使用した機械、工具、工作物および測定機器は次の通りである。

機械:NC 立フライス盤(大阪機工(株), MHA-350)

工具:直径 16 mm, 2枚刃, ねじれ角 30° , 超硬ソリッド楕円エンドミル(エッグタイプ), (TiAl) Nコーティング

工作物:炭素鋼(S45C), $110 \times 115 \times 64$ mm

工具動力計:Kistler 9257A

粗さ計:触針式(東京精密, SURFCOM-2B)

図6は切削実験の状況を示したものである。実験に際しては図に示すように、あらかじめ傾斜した面を作成するとともに、X軸方向に平行となるように工作機械テーブル上に設置した工具動力計上に取り付けている。切削3分力はアンプを介してパソコンに

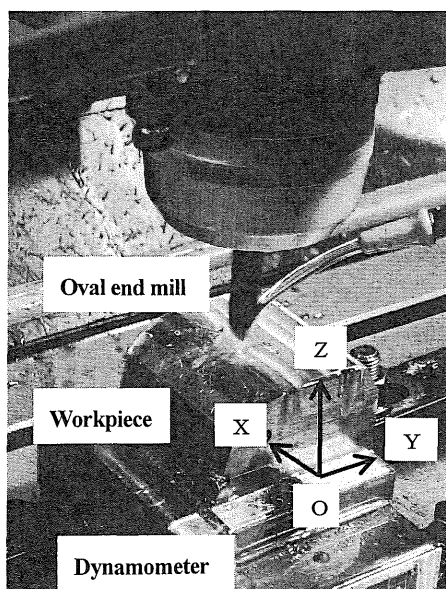


図6 切削実験の状況

表1 計算および切削条件

Cutter radius	: R_l	24 mm
	: R_s	8 mm
Radial depth of cut	: R_d	0.8 mm
Feed rate	: S_z	0.16 mm/tooth
Pick feed	: P_f	0.8 mm (constant) 0.462~1.780 mm (controlled)
Inclination angle	: α	$0 \sim 75^\circ$

記録した。また、切削後に工作物を取り外し、ピックフィード方向の粗さを測定した。切削方式は上向きおよび下向き切削とし、ピックフィードは傾斜面の上方および下方に与えるステップアップおよびステップダウンであり、計4つの組み合わせパターンで行なった。切削条件は表1に示しており、計算条件とも重複するが、ピックフィード $P_f = 0.462 \sim 1.780$ mmは式(4)ないし(6)を用いて各傾斜面加工における理論粗さが $R_{th} = 10 \mu m$ の条件を満足させるための制御値である。ピックフィード制御とはこの値を用いた加工を意味する。なお、後述する切削トルクは切削力データを用いて計算している。

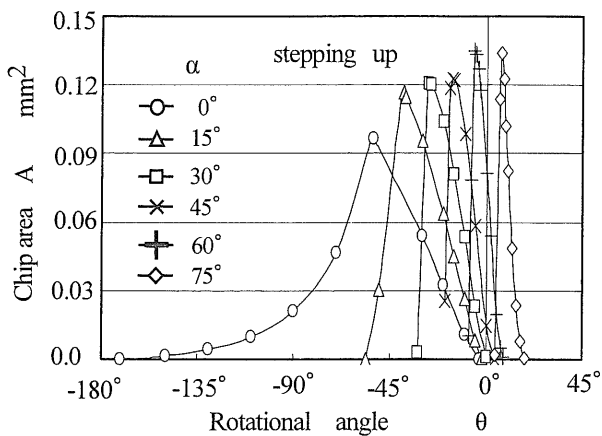
5. 計算および実験結果と考察

5・1 切削面積

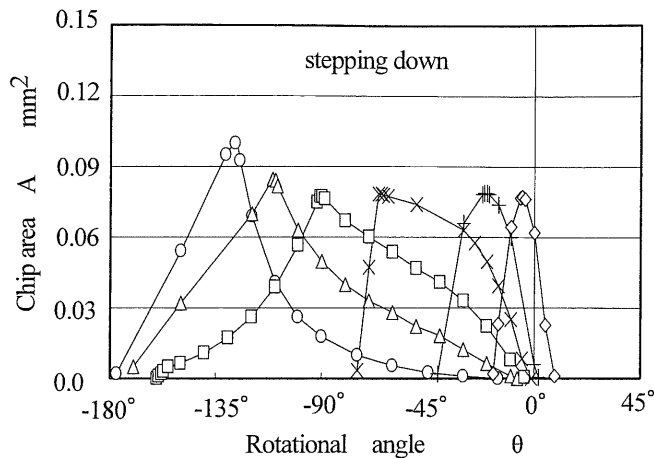
図7は横軸に工具回転角をとり、傾斜角をパラメータとして下向き切削による切削面積の変化を比較したものである。(a)図に示すステップアップの場合、切削面積の最大値は傾斜角 α の増加に連れて増加するが、切削に関与する工具回転角の範囲は減少する。この理由は傾斜角の増加により、切りくず立体が工具中心軸から遠ざかるとともに、形状がカーブした外周部の切れ刃で切削することによる。

一方(b)図に示すステップダウンの場合、傾斜角の増加により切削に関与する工具回転角は同様に減少するが、最大切削面積も減少する。この理由はステップダウンでは主として中心部に近い直線形状の切れ刃による切削となるためである。

図8は4つの切削方式による傾斜角と最大切削面積を比較したものである。図より、↑印で示す



(a) ステップアップ



(b) ステップダウン

図7 工具回転角による切削面積の変化（下向き切削）

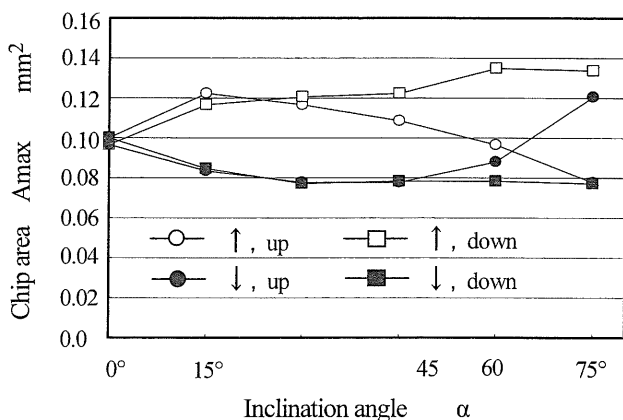


図8 傾斜角による最大切削面積の変化

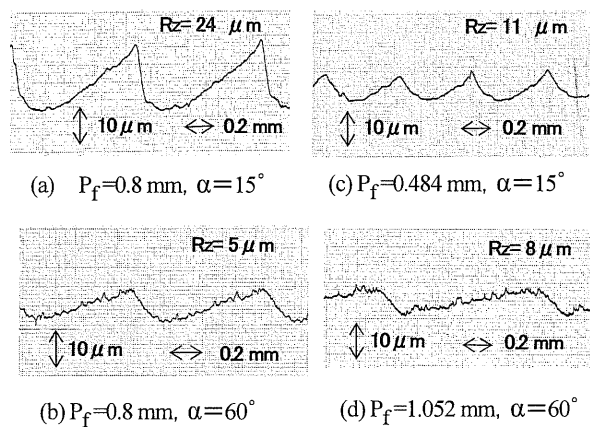


図9 傾斜面加工における粗さ曲線

ステップアップでは傾斜角の増加により最大値が増加し、↓印で示すステップダウンでは減少するとともに、前者が後者に比べて大きくなっている。しかし、ステップダウン、下向き切削の条件で、傾斜角 $\alpha=60^\circ$ 以上で増加し、ステップアップ、 $\alpha=45^\circ$ 以上で減少する理由に関しては明らかではなく、今後の検討課題である。

5・2 仕上げ面粗さ

図9は加工面の粗さ曲線を示しており、同図(a)および(b)はピックフィード $P_f=0.8\text{mm}$ 、同図(c)および(d)は $R_{th}=10\mu\text{m}$ を得るために計算したピックフィード制御値による結果である。同図(a)および(b)から、傾斜角 α が 15° より 60° に増加すると加工面の最大高さ R_z は $24\mu\text{m}$ より $5\mu\text{m}$ へと大幅に減少することが分かる。このことは、傾斜角が大きい加工面を高精度に仕上げる上で、エッジ

タイプの楕円エンドミルの使用が有効であることを意味している。

一方、同図(c)および(d)においては、ピックフィードの制御値は $\alpha=15^\circ$ に対して $P_f=0.484\text{mm}$ 、 $\alpha=60^\circ$ に対して $P_f=1.052\text{mm}$ である。両図より、加工面の最大高さ R_z はそれぞれ 11 および $8\mu\text{m}$ であり、目標値の $10\mu\text{m}$ にほぼ一致している。しかし、加工面に残るツールマークのピッチは傾斜角の増加につれて増加することになる。

図10は楕円エンドミルによる仕上げ面粗さの理論値と実験値をそれぞれ4つの切削パターンに対して比較したものである。一点鎖線で示す理論値と、ピックフィード $P_f=0.8\text{mm}$ による実験値は $\alpha=0^\circ$ の条件を除いてほぼ一致している。一方、同図には破線で示す $R_{th}=10\mu\text{m}$ を目標値とし、式(4)ないし(6)を用いて計算したピックフィード制御値を求め、

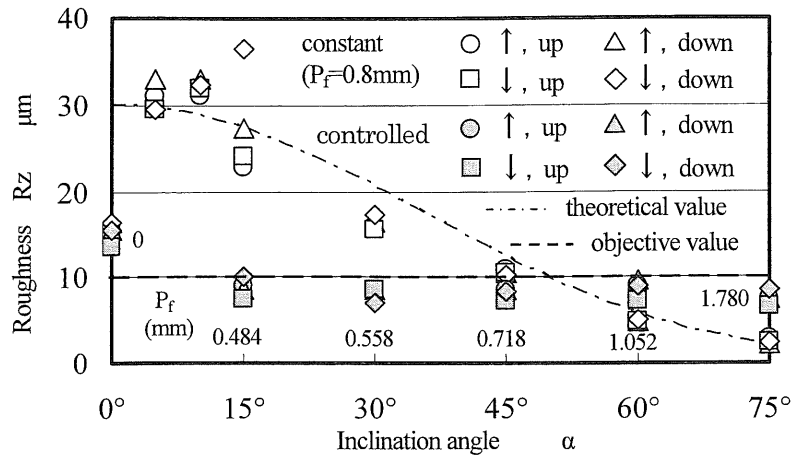


図10 楕円エンドミルによる傾斜面加工における仕上げ面粗さとピックフィード制御による効果

それらの値を用いて加工した仕上げた面の最大高さ R_z も併記している。図より、どの傾斜角においても、ピックフィードを制御することで目標とした仕上げ面粗さ $10 \mu\text{m}$ をほぼ達成しており、式(4)ないし(6)で示した解析結果が妥当であったことが明らかである。

なお、 $\alpha=0^\circ$ 、 $P_f=0.8\text{mm}$ の条件で理論値と実験値が大きく異なっているが、この理由は使用した楕円エンドミルの先端部が幅約 0.6mm 平坦に仕上げられていたことによる。

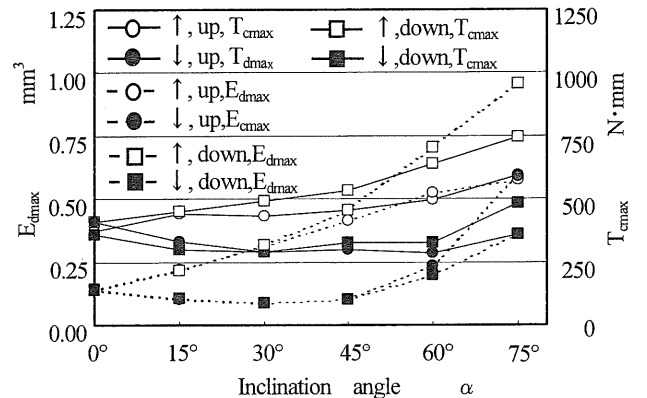
5・3 評価値と切削トルク

本研究では、切削力が切削面積の重心 G に集中荷重として作用することを仮定し、次式による評価値 E_d を定義する。

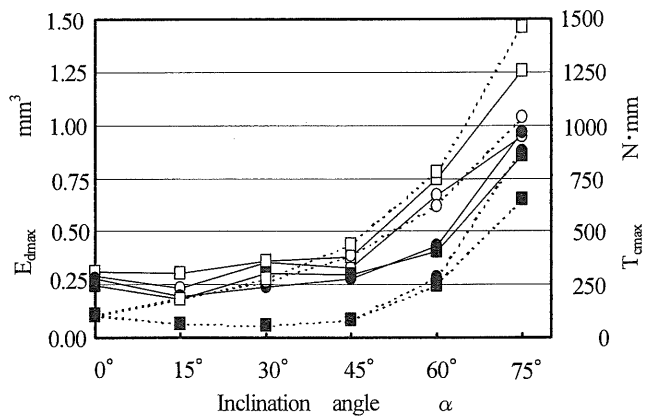
$$E_d = A \cdot L_G \quad (7)$$

ここで、 A は切削面積、 L_G は主軸から点 G までの距離である。また、切削合力の最大値と切削面積の最大値の比 ($F_{\text{max}}/A_{\text{max}}$) は、 $\alpha=15^\circ \sim 45^\circ$ の条件で $3333 \sim 3750\text{N}/\text{mm}^2$ である⁽²⁵⁾。そこで、比切削抵抗が一定で切削力が切削面積に比例すると仮定すれば、式(7)により簡易的に切削特性の一つである切削トルク T_c を評価することが可能となる。

図11は横軸に傾斜角 α をとり、評価値の最大値 E_{dmax} (破線) と切削トルクの最大値 T_{cmax} (実線) を比較したものであり、同図(a)が一定のピックフィード $P_f=0.8\text{mm}$ 、同図(b)がそれぞれ制御値を用いた場合である。切削トルクの計算は、切削3分力のうち X - Y 面における F_x および F_y を用いて接線方向および法線方向分力 F_t および F_n に変



(a) $P_f=0.8\text{mm}$ の場合



(b) ピックフィード制御の場合

図11 傾斜角による評価値と切削トルクの変化

換するとともに、次式により計算している。

$$T_c = F_t \cdot L_G \quad (8)$$

図11(a)に示したピックフィード一定の場合、ステップアップの条件では評価値および切削トル

クの最大値とともに傾斜角の増加につれて増加しており、ステップダウンの条件では $\alpha=45^\circ$ まで両者はほぼ一定値を示すものの、その後はともに増加しており、変化の傾向はよい対応関係にある。

一方、図 11 (b) に示すピックフィード制御の場合、ステップアップの条件で評価値の最大値は傾斜角の増加につれて図 11 (a) と同様に増加する傾向を示す。それ以外は $\alpha=45^\circ$ までともにほぼ一定の値を示しているが、 45° 以上においては評価値および切削トルクの最大値が急増している。そこで、 $\alpha=45^\circ$ におけるそれぞれの値を基準値 1.0 とし、 $\alpha=60^\circ$ および 75° における最大切削トルクの比率を求め、表 2 に示す。

表 2 より、傾斜角が大きい条件ほどピックフィード制御を用いると最大切削トルクの比率が増加し、 $\alpha=75^\circ$ では 2.9~3.5 となる。このことは工具の折損や工具のたわみによる加工誤差の増加につながり、楕円エンドミルを使用する際に十分注意が必要であることを意味している。

しかし、図 11 は $\alpha=0\sim 45^\circ$ 、ステップダウンの条件なら、上向き切削および下向き切削ともに切削トルクの最大値を小さく抑制することが可能なことを同時に示している。すなわち、上記の切削条件を用いれば、ピックフィード制御の有無に係わらず、エッグタイプの楕円エンドミルによる良好な切削特性を期待できることになる。

6. 結論

- (1) 楕円エンドミルおよび傾斜角をもつ工作物の三次元 CAD モデルを作成するとともに、1 回の切削で除去される切りくず立体と工具すくい面の干渉による切削面積を精度良く計算した。
- (2) 切削面積の最大値は、傾斜角 α の増加によってステップアップでは増加、ステップダウンでは減少する傾向にあり、 $\alpha=60^\circ$ 以下では前者が後者に比べて大きい。
- (3) 楕円エンドミルによる傾斜面加工における仕上げ面粗さの理論式を導いた。
- (4) ピックフィード一定の条件で、傾斜角による仕上げ面粗さの変化は理論値にほぼ一致した。また、ピックフィード制御を用いると仕上げ面粗さを目標値に一致させること

表2 最大切削トルクの比率

α	Rate of T_{cmax} ($P_f: 0.8 \text{ mm}$)	Rate of T_{cmax} ($P_f: \text{controlled}$)
45°	1.0	1.0
60°	1.0~1.2	1.4~2.1
75°	1.1~1.4	2.9~3.5

ができ、解析結果の妥当性が示された。

- (5) 切削特性のための評価値を定義し、切削トルクを簡易的に評価できることを示した。
- (6) $\alpha=0\sim 45^\circ$ 、ステップダウンの条件で、楕円エンドミルによる良好な切削特性を期待できる。

謝辞

本論文の図面作成には、新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程 1 年生の藤田 剛君の協力を得た。付記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 細井俊明, 星 鐵太郎: うず巻き状刃先をもつボールエンドミルの切削作用, 日本機械学会論文集 (第 3 部), 44, 378 (昭 53-2), 722.
- (2) 岸浪建史, 鈴木 裕, 斎藤勝政: 円弧切れ刃ボールエンドミルのすくい面切削速度成分の解析-円弧切れ刃ボールエンドミルの切削機構に関する研究 (第 1 報)-, 精密機械, 46, 10 (1980), 1303.
- (3) 藤井義也, 岩部洋育: ボールエンドミルによる切削力曲線と加工精度との関係, 精密機械, 48, 5 (1982), 649.
- (4) 藤井義也, 寺井文浩: ボールエンドミルシミュレータに関する研究-切削抵抗解析-, 精密工学会誌, 54, 12 (1988), 2301.
- (5) G. W. Vickers, K. W. Quan: Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining, Trans. of the ASME, Jour. of Eng. for Industry, Feb. 1989, Vol. 111/22.
- (6) M. Yang, H. Park: The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling, Int. Jour. Mach. Tools Manufact., Vol. 31, No. 1 (1991), 45.
- (7) 是田規之, 江川庸夫, 黒田基文, 渡部 健, 伊井良治: 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, 精密工学会誌, 59, 9(1993), 1537.
- (8) 趙 曉明, 堤 正臣, 是田規之, 葛 東方, 陳 亮: 5 軸制御加工におけるボールエンドミルの最適傾斜角決定方法-仕上げ面粗さを基準にした決定方法とニューラルネットワークの応用-, 精密工学会誌, 62, 7(1996), 101.
- (9) 田中久隆, 小幡文雄, 足森雅己, 松原十三生: ボールエンドミル加工の再生びり振動に関する研究(第 1 報)-振動発生限界の理論的解析-, 精密工学会誌, 64, 7(1998), 1047.
- (10) 高橋一郎, 安斎正博, 中川威雄: 10 万回転超高速ミーリングにおける超硬小径ボールエンドミルの摩耗特性, 精密工学会誌, 65, 6(1999), 867.
- (11) 郝 明暉, 浅尾晃道, 寺井久宣, 水垣善夫: 球面のボールエンドミル加工における加工面創成機構の理論的解析, 精密工学会誌, 65, 10(1999), 1476.
- (12) 齋藤明德, 趙 曉明, 堤 正臣: ボールエンドミル加工における曲面上への凹凸模様の形成方法, 精密工学会誌, 66, 12(2000), 1963.
- (13) T. Miyaguchi, M. Masuda, E. Takeoka and H. Iwabe: Effect of tool stiffness upon tool wear in high spindle speed milling using small ball end mill, Precision Engineering, Vol. 25, No. 2(2001), 145.
- (14) 香山 仁, 近藤 司, 金子俊一, 五十嵐 悟: ボールエンドミルの摩耗推定と高精度曲面加工への応用, 精密工学会誌, 67, 9(2001), 1427.
- (15) 寺井久宣, 郝 明暉, 吉川浩一, 水垣善夫: ボールエンドミル加工における工具回転中心近傍の切削機構に関する幾何学的考察, 日本機械学会論文集(C編), 68, 672(2002-8), 2457.
- (16) 笠原和夫, 広田明彦, 笹井洋介: ボールエンドミル切削における切りくず生成状態と切削抵抗の予測(第 1 報)-球体部の切れ刃形状と切削模型-, 精密工学会誌, 69, 3(2003), 396.
- (17) 吉川浩一, 水垣善夫, 郝 明暉, 寺井久宣: 球面のボールエンドミル加工における加工面創成機構の理論的解析(第 3 報)-加工面形状の工具姿勢依存性-, 精密工学会誌, 69, 3(2003), 407.
- (18) 芦 毅, 竹内芳美, 高橋一郎, 安斎正博, 加瀬 究: 高速ミーリング用ボールエンドミルの創成とその切削特性-異なるねじれ角・すくい角をもつボールエンドミルの実験的・幾何学的評価-, 精密工学会誌, 69, 4(2003), 530.
- (19) 岩部洋育, 山口恒志, 清水啓輔, 中西賢介: 小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工における工具寿命と仕上げ面粗さに関する研究, 日本機械学会論文集(C編), 69, 687(2003-11), 2457.
- (20) H. Iwabe, K. Shimizu and M. Sasaki: Analysis of Cutting Mechanism by Ball End Mill using 3D-CAD (Chip Area by Inclined Surface Machining and Cutting Performance Based on Evaluation Value), JSME International Journal Series C, 49, 1(2006), pp. 28-34.
- (21) H. Iwabe and H. Miwa: Study on Cutting Mechanism and Cutting Performance of Machining for Curved Surface by Ball End Mill using 3D-CAD, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2, 4(2008), pp. 513-521.
- (22) 笠原和夫, 広田明彦, 赤間 知: 斜面のボールエンドミル加工の切削抵抗と切削機構の解析(第 1 報)-切削過程の幾何学量と切削模型および予備的検討-, 精密工学会誌, 74, 9(2008), 965.
- (23) 後藤明弘, 寺本一成, 小長哲郎: 曲面加工用楕円エンドミルの切削特性, 1990 年度精密工学会学術講演会論文集, 77.
- (24) 西尾弘康, 河淵照之: 楕円エンドミルによる金型加工と CAD/CAM “E” s の活用, ツールエンジニア, 43, 9(2002), 28.
- (25) 熊木孝佳: 三次元 CAD を用いた楕円エンドミルによる傾斜面加工における切削機構の解析と切削特性に関する研究, 新潟大学大学院自然科学研究科平成 17 年度修士論文 (2005) .