三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる 傾斜面の直線加工における切削性能評価に関する研究* (送り方向が切削機構に及ぼす影響)

藤田 剛^{*1}, 岩部 洋育^{*2}

Study on evaluation for cutting performance of ball end milling with straight-line path method for inclined surface using 3D-CAD (Influence of feed direction on cutting mechanism)

Tsuyoshi FUJITA ^{*1} and Hiroyasu IWABE

^{*1} Graduate school of Science & Technology, Niigata University
8050, Ikarashi 2-nocho, Nishi-ku Niigata City 950-2181, Japan

Received 11 August 2013

Abstract

In this paper, the cutting mechanism and cutting performance of a ball end mill on an inclined surface using the straight-line path method are investigated. Ball end mills are used to make a variety of products such as molds and dies. However, due to the complexity of the edge shape, the cutting process is not clear, so it becomes difficult to select the tool and an effective method to achieve good cutting performance. Therefore, in this study, the purpose is proposal of high efficient and accurate cutting method using a 5-axis control machine tool. First, a cutting model assembled by a ball end mill and a workpiece with inclined surface is carried out using 3D-CAD (SolidWorks). Next, the cross-sectional cutting area is calculated by the interference of the rake surface of the tool and the uncut chip volume which can be removed by one cutting operation. Then, the evaluation value corresponding to a cutting torque is defined and calculated. After that, the cutting experiments are done in order to measure the cutting force and machined surface roughness. In addition, the cutting torques are calculated based on these results. Finally, high efficient and accurate cutting method are discussed using the analytical and experimental results, and then the cutting conditions which are expected good cutting performance are shown.

Key Words : Ball end mill, Inclined surface, 3D-CAD, Feed direction, Cutting mechanism, Cross-sectional cutting area, Cutting performance

1. 結 言

ボールエンドミルは金型等の様々な製品の製造過程で用いられているが、一般に切れ刃の切削速度が小さく仕上げ面粗さの悪化原因とされる工具先端近傍の関与を避けるために工具または工作物に傾斜を設けて使用される場合が多い。そのような条件を対象とした研究結果は近年だけでも数多く報告されており、分類すると(1)切削抵抗(Tsai, et al., 2010)(Matsumura and Usui, 2010)(笠原他, 2012), (2)仕上げ面創成機構(Matsuda, et al., 2008)(廣垣他, 2009)(Nicola, et al., 2010)(笠原他, 2010), (3) 再生びり振動(赤澤, 社本, 2009), (4) 切削エネルギー効率(Oda, et al., 2012), に関しての実験的, 解析的検討となる。一方, 筆者らは既報(藤田, 岩部, 2013)において主軸を送り方向に傾斜させた条件での傾斜面の等高線加工に対象を限定して, 5 軸制御加工を想定したボールエンドミルの切削機構および切削性能を検討するとともに, 工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させつつ最終的な仕上げ面として創成される領域では切削速度がゼロとならないような加工法を提案し, 高能率・高精度

* 論文 No.13-00614 [DOI: 10.1299/transjsme.2014dsm0034]

^{*1} 正員, 新潟大学大学院自然科学研究科 (〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)

^{*2} 正員, 新潟大学工学部機械システム工学科

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

を実現する加工法としての有用性を明らかにした。しかし、傾斜面の等高線加工を基本として解析を行ったにすぎず、走査線加工ならびに等高線加工との中間的な経路について加工精度(寺井他, 2004)や切削力解析(山田他, 2007)についての報告がなされているものの、切削性能の評価としては不十分な状況にある。また、複雑な三次元輪郭形状は微小平面の連続体であることから、自由曲面における切削現象を明らかにする上で傾斜面加工に基づく基礎的な検討は重要である。

そこで、本報では傾斜面の直線加工における工具の送り方向を変化させることにより、5軸制御加工を想定した高能率で高精度な切削条件を検討することを目的としている。具体的には後述する工具の送り方向角 β を $0\sim 180^\circ$ まで変化させており、等高線加工($\beta=0^\circ, 180^\circ$)および走査線加工($\beta=90^\circ$)を含む切削条件で検討を行っている。そのため、三次元輪郭形状を高能率・高精度加工する際のボールエンドミルの有効活用法が明らかにできるものと期待される。まず、文献(岩部他, 2006)でも用いた三次元CADを活用した解析方法により、工具および工作物をモデリングし、両者を切削が実現するように組み合わせるとともに1回の切削で除去されることになる未切削切りくず立体と回転する切れ刃を干渉させながら、切削の進行に伴って変化する切削断面積および切削トルクに相当する評価値を計算した。次に、切削実験を行い切削力および仕上げ面粗さを測定し、得られた切削力を用いて切削トルクを計算した。最後に、工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させる加工法が成立する切削条件でレーダチャート方式による切削性能の総合評価を行い、通常はトレードオフの関係にある高能率・高精度加工を両立する切削条件について検討した。

2. 三次元CADを活用した切削断面積および評価値の計算方法

2.1 切削モデル

文献(藤田, 岩部, 2013)でも用いた方法により、解析に用いる切削モデルを三次元CAD (SolidWorks) によって作成した。図1は工具モデルの作成方法を示しており、手順は以下のとおりである。

- (1) 直交3軸の主軸座標系($X'-Y'-Z'$)を定義し、原点を $O_c(0, 0, 0)$ とする。
- (2) Z' 軸を中心軸として $O_1(0, 0, -R_c)$ および $O_2(0, 0, R_c)$ を Z' 軸上に定義する。
- (3) $X'-Y'$ 面上に半径 R_c の四分円 $O_1P_1P_2$ を定義する。
- (4) 四分円 $O_1P_1P_2$ を Z' 軸の正方向へ右ねじれ角が η となるように回転させながら点 O_2 まで移動させ、すくい面 $O_1P_2P_2'O_2$ を含む立体 $O_1P_1P_2O_2P_1'P_2'$ を定義する。
- (5) 原点 O_c および半径 R_c の四分円弧を含む図形 $O_1Q_1Q_2Q_3Q_4$ を $Y'-Z'$ 面に定義する。
- (6) 図形 $O_1Q_1Q_2Q_3Q_4$ を Z' 軸周りに回転させ、手順(4)までに定義された立体から干渉する部分を除去する。

Z' 軸の正方向に半径および高さが R_c の円柱を、負方向に原点 O_c を中心とした半径 R_c の半球を定義し、それぞれ手順(6)までに定義された立体と合成する。

Fig.1 Method of 3D-CAD modelling of ball end mill. The modelling of the tool, the cutting edge and rake surface is carried out with cutter radius R_c and helix angle η using 3D-CAD (SolidWorks).

Fig.2 Method of 3D-CAD modelling of workpiece. The modelling of the inclined surface is carried out with workpiece inclination angle α using 3D-CAD (SolidWorks).

Fig.3 Comparison of measured cutting edge with estimated edge using 3D-CAD. The both cutting edge shapes are almost coincident and angle δ_c at each edge point is less than 3.3° .

図2は工作物モデルの作成方法を示しており、手順は以下のとおりである。

- (7) 直交3軸の工作物座標系 (X-Y-Z) および Y 軸上に長さ $4R_c$ の直線 ST を定義する。
- (8) 直線 ST を高さとし、対辺との角度が α となる台形 STUV を定義する。
- (9) 台形 STUV を X 軸の正方向に $4R_c$ だけ移動させ、立体 STUVV'U'T'S' を定義する。

図3は三次元 CAD で作成した工具モデルから計測した切れ刃形状と、後述する切削実験で用いた市販のボールエンドミルの先端部の切れ刃形状をデジタルマイクロスコプ (KEYENCE VH-6300) によって測定した結果を比較したものである。図は2枚の切れ刃のうち1枚の切れ刃を X' - Y' 面に投影しており、最小二乗法を用いて測定値と推定値を重ねると両者はほぼ一致している。また、両者の回転方向の誤差 δ_c は $\pm 4.0^\circ$ 、標準偏差は 3.3° 以内とともに小さく、作成した工具モデルが妥当なものであったといえる。

図4は工具および工作物モデルを組み合わせ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。図において、破線は切れ刃、角度 α は工作物傾斜角を示しており、角度 β は工具の送り方向角として図に示すように X 軸に平行な位置を基準とし傾斜面に対して右回りを正とする。そのため、 $\beta=0^\circ$ または $\beta=180^\circ$ の条件が等高線加工であり、 $\beta=90^\circ$ の条件が走査線加工となる。また、切削方式として工具の送り方向を斜面上方に与える図4の場合をゴーアップ、斜面下方に与える場合をゴーダウンと定義しており、上向きおよび下向き切削を考慮すると切削方式は計4通りの組み合わせが存在する。なお、等高線加工ではゴーアップ、ゴーダウンの定義はできな

Fig.4 Cutting model of ball end milling for inclined workpiece. β is the feed direction angle of the tool. When the inclined surface is machined from bottom to top with radial depth R_d and pick feed P_f , it is defined as “go up”.

Fig.5 Calculation method of cross-sectional cutting area. This figure is the enlarged view of the area surrounded by the dotted line as shown in Fig.4. The broken line represents cutting edge, the part $abcd$ is the uncut chip volume.

Table 1 Calculation and cutting conditions

Cutter radius	: R_c	8.0 mm
Helix angle	: η	30°
Radial depth	: R_d	0.8 mm
Feed rate	: S_z	0.16 mm / tooth
Pick feed	: P_f	0.8 mm
Workpiece inclination angle	: α	0 - 75°
Feed direction angle	: β	0 - 180°
Spindle revolution	: N	1363 min ⁻¹
Coolant		Machine oil (1.5 l/min)

いが, $\beta=0^\circ$ は $\beta<90^\circ$ の定義, $\beta=180^\circ$ は $\beta>90^\circ$ の定義に属するものとし, 両条件では工具の送り方向が逆となる. また, 各切削方式において α および β を増加させると上向きおよび下向き切削のいずれにも分類できない工具先端部が立体 $abcd$ 内に存在する状態や上向きおよび下向き切削の関係が逆転する条件も発生する. 本報では簡易的に $\alpha=0^\circ$ および $\beta=0^\circ$ の条件における定義を基準として上記の分類を行っているが, 切削条件と切削方式の詳細な分類に関しては今後の検討課題である.

2・2 切削断面積の計算方法

図 5 は図 4 に示した点線枠内の拡大図であり, 一回の切削で除去される部分である未切削切りくず立体 $abcd$ と立体 $abcd$ を通過する切れ刃 (破線) との関係および切削断面積の計算方法を示している. 切削断面積 A は切りくず立体 $abcd$ と切れ刃のすくい面 (工具軸直角断面におけるすくい角を 0° とする面) が干渉する部分 (斜線部 $klmn$) と定義している. また, 工具回転角 θ の基準は, 工作物座標系の Y 軸と工具座標系の Y' 軸の方向が一致する位置を $\theta=0^\circ$ とする. なお, 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.

2・3 評価値の計算方法

切削性能を検討する指標として評価値 E_d を式 (1) で定義する (藤田, 岩部, 2013). 図 5 において切削力が切削断面積 A の重心点 G に集中荷重として作用し, 切削力が A に比例すると仮定するとき, A に工具中心軸から点 G までの距離 L_G を乗じた E_d の値は切削トルクに相当する値と考えることができる. 既報 (岩部他, 2006) においても切削性能の簡易的な評価方法として評価値を用い, その最大値 E_{dmax} と最大切削トルクとの間には比較的良好な対応関係が得られており, 本報でも同様に評価値 E_d を用いることとした.

$$E_d = A \times L_G \quad (1)$$

3. 実験条件および方法

実験条件は先に述べた表 1 の計算条件と同様であり, 主な使用機器, 工具および工作物は表 2 に示すとおりである. 図 6 は切削実験の様子を示しており, ベッド型 NC 万能フライス盤のテーブル上に据え付けた圧電式工具動力計 (KISTLER 9257B) に, 傾斜面をもつ治具 (図 6 に示す $\alpha=45^\circ$ の場合: $85 \times 100 \times 64.5$ mm) を介して板状の

Table 2 Instruments for experiment		
Machine	NC universal milling machine 2UMD-SN	
tool	NIIGATA MACHINE TECHNO	
Tool	Carbide solid ball end mill (TiAl)N coating, 2 teeth	
Workpiece	0.45% carbon steel (S45C) (70×50×10 mm)	
Roughness tester	SURFCOM 130A	Tokyo SEIMITSU

Fig.6 Experimental setup. Cutting conditions and instruments are shown in table 1 and table 2, respectively. In the experiments, a plate type workpiece is fixed on the jig with a inclined surface.

工作物を固定している．なお，工具は突出し長さが 75 mm，偏心量が $2\ \mu\text{m}$ 以下となるように主軸に取り付けている．切削は工作物外周側から開始するように工具に送りを与えており，後に仕上げ面粗さを測定するために 1 条件につき溝加工 1 回，ピックフィード加工を 6 回行っている．切削三分力 (F_x , F_y , F_z) はピックフィード加工中のものを工作物に作用する力として測定しており，工具動力計，アンプ (KISTLER 5015A) およびオシロスコープ (GRAPHTEC WR300) を経由させてパソコンに記録した．仕上げ面粗さは触針式粗さ測定機を用いてピックフィード方向に測定した．

4. 計算および実験結果と考察

4・1 切削断面積

図 7 は横軸を工具回転角 θ とした切れ刃の回転に伴って変化する切削断面積 A の計算結果であり，ゴーダウン，下向き切削の条件における一例を示している．また，図 8 および 9 はそれぞれ図 7 (a) および (b) と同条件における未切削切りくず立体と切れ刃位置関係を示しており，破線はそれぞれ斜線部で示した最大切削断面積 $A_{\max}$

Fig. 7 Cross-sectional cutting area (Go down, Down milling). When the angle α is 15° , tool rotation angle with actual cutting θ_{cut} decreases and maximum cross-sectional cutting area $A_{\max}$ increases with the increase of the angle β . When α is 60° , under the conditions of $\beta=60^\circ$, 120° , θ_{cut} is larger and $A_{\max}$ is smaller than the values of $\beta=0^\circ$, 180° .

Fig. 8 Positional relationship between uncut chip volume and cutting edge (Go down, Down milling, $\alpha=15^\circ$, $A_{\max}$). When the angle α is 15° , the cutting edge length engaged in the cutting process increases because the volume $abcd$ rotates in clockwise with the increase of β and the position where the cutting edge passes varies.

Fig. 9 Positional relationship between uncut chip volume and cutting edge (Go down, Down milling, $\alpha=60^\circ$, $A_{\max}$). When the angle α is 60° , the cutting edge length engaged in the cutting process decreases because volume $abcd$ rotates in clockwise with the increase of β and the volume $abcd$ becomes wide to the tool rotational direction around $\beta=90^\circ$.

を得る位置での切れ刃を示す。

図7 (a) に示す工作物傾斜角 $\alpha=15^\circ$ の条件では、工具の送り方向角 β の増加に伴って切削に關与する工具回転角（以下、 θ_{cut} とする）が減少し、 A_{max} が増加している。これは、 β が大きくなり送り方向が変化すると図8に示すように未切削切りくず立体 $abcd$ が右回りに回転し、切れ刃の通過位置も変化することで切削に關与する切れ刃長さが増加するためと考えられる。 α が小さな条件では、工具先端近傍の切れ刃を用いるためにこの傾向がみられる。一方、図7 (b) に示す $\alpha=60^\circ$ の条件では、 $\beta=60^\circ, 120^\circ$ で $\beta=0^\circ, 180^\circ$ の条件に比べて θ_{cut} が大きく、 A が小さな値を示している。これは前述と同様に、 β の増加により図9に示すように立体 $abcd$ が右回りに回転し、図には示していないが $\beta=90^\circ$ 前後では未切削切りくず立体が工具回転方向に横長となることで、切削に關与する切れ刃長さが減少するためと考えられる。 α が大きな条件では工具側面近傍の切れ刃を用いるためにこの傾向が顕著となる。

図10は α および β に対する最大切削断面積 A_{max} の変化を示す。図10 (a) の上向き切削では、 $\alpha=0^\circ$ かつ $\beta=0^\circ \sim 180^\circ$, $\alpha=0^\circ \sim 75^\circ$ かつ $\beta=90^\circ \sim 180^\circ$ の条件において A_{max} が大きな値を示しており、最大値はゴーアップ、 $\alpha=30^\circ, \beta=135^\circ$ の条件で 0.103 mm^2 を示している。また、図10 (b) の下向き切削では、 $\alpha=0^\circ$ かつ $\beta=0^\circ \sim 180^\circ$, $\alpha=0^\circ \sim 75^\circ$ かつ $\beta=0^\circ \sim 45^\circ, 135^\circ \sim 180^\circ$ の条件において A_{max} が大きな値を示しており、最大値はゴーダウン、 $\alpha=60^\circ, \beta=15^\circ$ の条件で 0.098 mm^2 を示している。一方、4つの切削方式に共通して A_{max} が小さな値を示す条件は $\alpha=30^\circ \sim 75^\circ$ かつ $\beta=60^\circ \sim 75^\circ$ であり、その値は $A_{\text{max}}=0.048 \sim 0.055 \text{ mm}^2$ となる。このうち A_{max} の最小値は、ゴーアップ、下向き切削、 $\alpha=75^\circ, \beta=75^\circ$ の条件で 0.048 mm^2 を示しており、角度を与えない $\alpha=0^\circ, \beta=0^\circ$ の条件における A_{max} の値（上向き切削： $A_{\text{max}}=0.084 \text{ mm}^2$ ，下向き切削： $A_{\text{max}}=0.080 \text{ mm}^2$ ）と比較するとその減少率は約40%となる。図に示すように A_{max} が大きく変化する理由は、先に述べたように α および β の両角度により未切削切りくず立体 $abcd$ と切れ刃の位置関係が変化するためと考えられる。

Fig.10 Maximum cross-sectional cutting area A_{max} . A_{max} is able to decrease with the increase of α and β , and, under the condition of all cutting modes, $\alpha=30^\circ \sim 75^\circ$ and $\beta=60^\circ \sim 75^\circ$, A_{max} indicate small values.

Fig.11 Three component cutting forces and resultant force (Go down, Down milling). When the angle α is 15° , each component cutting force F_x , F_y , F_z and resultant force F decrease with the increase of β . When the angle α is 75° , F_x , F_y , F_z and F decrease with the increase of β , however, the actual cutting time is almost the same.

4・2 切削力

図 11 は実験で得られた切削三分力の変化を示しており、ゴーダウン、下向き切削の場合である。横軸の切削時間は工具が半回転する時間（0.022 s）にほぼ一致している。図 11 (a-1), (b-1), (c-1) に示した α が小さな 15° の条件では、 β の増加に伴って各分力および切削合力 F ($=\sqrt{F_x^2+F_y^2+F_z^2}$) の絶対値の最大値が増加し、切削が行われている正味切削時間が減少する傾向を示している。これは 4.1 節で述べた切削断面積の変化と同様の傾向を示しており、その理由も同様に未切削切りくず立体 $abcd$ と切れ刃の位置関係の変化によるものと考えられる。図 11 (a-1) における $\alpha=15^\circ$, $\beta=15^\circ$ の条件では切削力が常に作用しており連続切削を示しているが、この理由は工具中心軸が立体 $abcd$ を通過しているためである。

一方、図 11 (a-2), (b-2), (c-2) に示した α が大きな 75° の条件では、 β の増加に伴って各分力および切削合力 F の絶対値の最大値が減少しているが、正味切削時間にはあまり変化がみられない。なお、 $\alpha=75^\circ$, $\beta=15^\circ$ の条件では切削が終了する直前に切削力曲線が乱れており、この他の $\alpha=60^\circ$, 75° におけるいくつかの条件でも同様の現象がみられたが、これはびびりの発生によるものと考えられ、工作物の加工面に縞状のびびりの発生痕が確認された。

4・3 評価値と切削トルク

図 12 および 13 はそれぞれ、上向き切削の条件における工作物傾斜角 α および工具の送り方向角 β に対する評価値の最大値 E_{dmax} とその値を伴う L_G (以下、 $L_G(E_{dmax})$ とする) の変化を示す。図 12 より E_{dmax} は α が大きくなると増加する傾向を示しており、この理由は、図 13 に示すように L_G の値が α とともに増加するためである。また、 E_{dmax} は α が大きな条件で大きな値を示す領域が存在するが、これは図 10 (a) に示した A_{max} の傾向と類似している。この理由は、図 13 に示すように α の増加に伴って $L_G(E_{dmax})$ の変化が緩やかになり、その変動幅が減少するためと考えられる。なお、 E_{dmax} はゴーダウン、上向き切削、 $\alpha=15^\circ$, $\beta=150^\circ$ の条件で最小値 0.042 mm^3 を示している。

図 14 は図 12 と同様の座標軸における最大切削トルク T_{max} の変化を示す。切削トルク T は実験で得られた工具の接線分力 F_t を計算し、式 (2) により求めた。

$$T = F_t \times L_G \quad (2)$$

T_{max} はゴーダウン、上向き切削、 $\alpha=15^\circ$, $\beta=150^\circ$ の条件で最小値 $76.8 \text{ N}\cdot\text{mm}$ を示しており、図 12 に示した E_{dmax} の変化と比較すると、その傾向はほぼ一致している。そのため、定義した評価値 E_d の最大値により簡易的な切削性能を検討することの妥当性が示された。

Fig.12 Maximum evaluation value E_{dmax} (Up milling). E_{dmax} increases with the increase of α because L_G increases similarly as shown in Fig.13.

Fig.13 Distance from tool center axis to the point G with E_{dmax} $L_G(E_{dmax})$ (Up milling). $L_G(E_{dmax})$ increases with the increase of α .

Fig.14 Maximum cutting torque T_{max} (Up milling). The behaviors of T_{max} and E_{dmax} as shown in Fig.12 are almost the same.

4・4 仕上げ面粗さ

ボールエンドミル加工におけるピックフィード方向の仕上げ面の理論粗さ R_{th} ($= P_f^2 / 8R_c$) は表 1 に示した条件 ($P_f=0.8 \text{ mm}$, $R_c=8.0 \text{ mm}$) より $R_{th}=10 \mu\text{m}$ となる。

図 15 はゴーアップ、下向き切削における仕上げ面の粗さ曲線の一例を示す。図 15 (a-1) に示した $\alpha=30^\circ, \beta=0^\circ$

Fig.15 Roughness curve (Go up, Down milling, Pick feed direction). Tears decrease with the increase of α and β , then R_z decrease similarly. R_z is almost similar to R_{th} without the condition of $\alpha=30^\circ, \beta=0^\circ$ as shown in Fig.(a-1)

Fig.16 Maximum height R_z (Up milling). The inside of the area surrounded by the dotted line are smaller than $10 \mu\text{m}$, the area under the condition of go down is 4.5 times larger than go up.

の条件では、むしれの発生によりピックフィードによるツールマークが不明瞭であるが、図 15 (c-2) の $\alpha=60^\circ, \beta=120^\circ$ の条件ではむしれが少なくツールマークが確認できる。図 15 の 6 条件を比較すると、 α および β の増加により仕上げ面のむしれが減少し、その結果、最大高さ R_z は減少する傾向を示している。この理由の一つには、両角度の増加に伴って切削速度の大きい工具外周側の切れ刃により切削が行われることが考えられる。同様の傾向は図 15 に示されていない他の 3 つの切削方式においてもみられるが、むしれの発生および R_z の値が減少する切削条件はそれぞれ異なっている。なお、 R_z の値は図 15 (a-1) の $\alpha=30^\circ, \beta=0^\circ$ の条件を除き、ほぼ R_{th} と同等の値を示している。

図 16 は上向き切削の条件における α および β に対する R_z の変化を示す。図中に示す点線は $R_{th}=10 \mu\text{m}$ を示しているが、ゴーアップに比べてゴードアウンの条件で点線により囲まれる領域が約 4.5 倍大きい。特に、ゴードアウンの条件では $\alpha=45^\circ \sim 75^\circ, \beta=90^\circ$ 近傍の条件で $R_z=6.0 \mu\text{m}$ 程度と非常に小さな値を示しており、工具逃げ面によるバニシングによる効果は確認されているが、両者の因果関係ならびにそのメカニズムは明らかでなく今後の検討課題である。

5. 高能率・高精度を両立する切削条件および加工法の検討

既報(藤田, 岩部, 2013)で筆者らは、主軸を送り方向に傾斜させた条件での傾斜面の等高線加工において工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させる加工法を提案し、高能率・高精度を両立する加工が実現できることを示した。この加工法は、本報で検討している傾斜面の工具送り方向を変化させた加工においても適用可能である。そこで、工具先端切れ刃を用いる加工法が成立する切削条件を明らかにするとともに切削性能の総合評価を行い、その有用性について以下に検討する。

Fig.17 Cutting conditions with the bottom edge. 4 areas show cutting conditions of 4 cutting modes, respectively. The areas of up milling and the ones of down milling are bilateral symmetries on the basis of $\beta=90^\circ$.

Fig.18 Cobweb chart for overall evaluation (Go down, Up milling, $\alpha=15^\circ$, $\beta=150^\circ$). S is the area of the triangle covered by the shaded and dotted pattern, and is defined by Eq.(6).

5・1 加工法が成立する切削条件

提案している加工法を成立させるためには、工具中心軸が未切削切りくず立体を通過することが条件となる。図 17 は 4 つの切削方式において工具中心軸が未切削切りくず立体を通過する α および β に関する切削条件を領域で示している。図より、4 つの領域は上向きおよび下向き切削に関して $\beta=90^\circ$ を基準としてほぼ左右対称の形を示すが、ゴーアップに比べてゴーダウンの条件で大きな領域となる。図中には実験を行った領域内の条件についてそれぞれ記号で示しており、次にこれらの条件についての切削性能の総合評価ならびに工具先端切れ刃の使用に関する有用性を検討する。

5・2 レーダチャートを用いた切削性能の総合評価による検討

切削性能の総合評価には、既報(藤田, 岩部, 2013)と同様にレーダチャート方式を用いた。評価対象は切削実験の結果より得られた主軸方向分力 $F_{z\max}$ 、最大切削トルク $T_{\max}$ および仕上げ面の最大高さ Rz とし、各パラメータは式 (3) から (5) に示すようにそれぞれの最大値により正規化することで各比率を評価指数 r_F 、 r_T および r_R と定義する。なお、 $T_{\max}$ および Rz は小さな値が望ましく、指数 r_T および r_R はともに小さい値で良好な効果が期待できる。一方、 $F_{z\max}$ は工具剛性の最も大きい主軸方向に作用する分力であり、この分力が増加することによって工具の曲げ変形に影響を与える分力 F_x および F_y が相対的に減少する傾向にある。そのため、 $F_{z\max} / (F_{z\max})_{\max}$ の値は 1 に近づくことが望ましく、指数 r_F に関しても r_T および r_R と同様な変化を示すような式 (3) を用いている。これにより、独立した複数項目による切削性能の評価が可能となり、高能率・高精度を両立する切削条件を導き出すことできる。

$$r_F = 1 - \frac{F_{z\max}}{(F_{z\max})_{\max}} \quad (3)$$

$$r_T = \frac{T_{\max}}{(T_{\max})_{\max}} \quad (4)$$

$$r_R = \frac{Rz_{\max}}{(Rz_{\max})_{\max}} \quad (5)$$

また、図 18 は各評価指数を結んで描いたレーダチャートの一例であり、内部の三角形の面積（網かけ部）は総合指数 S として、式 (6) により定義する。

$$S = \frac{\sqrt{3}}{4} (r_F \times r_T + r_T \times r_R + r_R \times r_F) \quad (6)$$

Fig.19 Evaluation with overall index. Assuming that r_F , r_T and r_R are 0.3, the index S is 0.117. And if $S=0.117$ is used threshold value, under the conditions with asterisks, the value S is smaller than 0.117.

図 19 は工具先端切れ刃を用いる切削条件における S の変化を示す。既報(藤田, 岩部, 2013)と同様に r_F , r_T および r_R がそれぞれ 0.3 の場合の $S=0.117$ を条件選定の閾値として用いると, 図中に星印を付けたゴーダウン, 上向き切削, $\alpha=15^\circ$, $\beta=135\sim165^\circ$ の条件およびゴーダウン, 下向き切削, $\alpha=15^\circ$, $\beta=15\sim45^\circ$ の条件で S の値が閾値(図中の破線)を下回る。

すなわち, これらの切削条件を選択することで高能率・高精度を両立する加工を実現でき, 良好な切削性能が期待できると考えられる。

6. 結 言

- (1) 三次元 CAD により切削モデルを作成し, ボールエンドミルによる傾斜面の直線加工において工具の送り方向を変化させた場合の切削断面積 A および評価値 E_d を求めた。
- (2) 工作物傾斜角 α または工具の送り方向角 β の増加により, 最大切削断面積 $A_{\max}$ を減少させることが可能であり, $\alpha=30\sim75^\circ$ かつ $\beta=60\sim75^\circ$ の条件では 4 つの切削方式のいずれでも $A_{\max}$ が小さな値を示した。
- (3) 実験で得られた切削力の変化は, ゴーダウン, 下向き切削, $\alpha=15^\circ$ の条件で切削断面積の変化と同様の傾向を示したが, その理由は未切削切りくず立体 $abcd$ と切れ刃の位置関係の変化によるものと考えられる。
- (4) 切削トルクの最大値 $T_{\max}$ と評価値の最大値 $E_{d\max}$ の傾向はほぼ一致しており, 評価値 E_d による簡易的な切削特性の評価について妥当性が示された。
- (5) 仕上げ面粗さは α および β の増加によりむしろ減少するため最大高さ R_z が減少する傾向を示した。また, 上向き切削の条件ではゴーアップに比べてゴーダウンの条件で理論粗さ $R_{th}=10\mu\text{m}$ を満たす切削条件が多く得られた。
- (6) 工具先端切れ刃を未切削切りくず立体内部に存在させる加工法が成立する切削条件でレーダチャート方式による切削性能の総合評価を行い, ゴーダウンにおける上向き切削, $\alpha=15^\circ$, $\beta=135\sim165^\circ$ および下向き切削, $\alpha=15^\circ$, $\beta=15\sim45^\circ$ の条件で高能率・高精度を両立する加工を実現でき, 良好な切削性能が期待されることを示した。

文 献

- 赤澤浩一, 社本英二, 低剛性工作物のボールエンドミル加工における再生型びり振動に関する研究 (切削送り方向周りの工具傾斜を考慮した解析モデルの構築), 精密工学会誌, Vol. 75, No. 8 (2009), pp. 984-989.
- 藤田剛, 岩部洋育, 三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる傾斜面加工における切削性能評価に関する研究 (切削機構および切削特性に基づく高能率・高精度加工法の提案), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 800 (2013), pp. 1102-1111.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 小川圭二, 川口二俊, 末田秀則, 須知亮, 5 軸制御マシニングセンタで創成される仕上げ加工面の考察 (ボールエンドミル加工における切削点一定化の効果と最適加工条件の設定法), 精密工学会誌, Vol. 75, No. 10 (2009), pp. 1238-1244.

- 岩部洋育, 清水啓輔, 佐々木三宣, 三次元 CAD を活用したボールエンドミルによる切削機構の解析 (傾斜面加工における切削面積と評価値による切削特性), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 713 (2006), pp. 247-254.
- 笠原和夫, 田中勇士, 広田明彦, 斜面のボールエンドミル加工における工具挙動と仕上げ面生成機構の解析(第 2 報) (工具のたわみに基づく仕上げ面性状と加工誤差の検討), 精密工学会誌, Vol. 76, No. 8 (2010), pp. 901-906.
- 笠原和夫, 鈴木千博, 大高健太郎, 村田圭介, 広田明彦, ボールエンドミル加工での切削抵抗および工具挙動に及ぼす工具姿勢の影響 (第 2 報) (ピックフィード加工の場合の切削抵抗の結果と工具挙動の予備的検討), 精密工学会誌, Vol. 78, No. 10 (2012), pp. 899-904.
- Matsuda, H., Sasahara, H., Tsutsumi, M., Generation of a regularly aligned surface pattern and control of cutter marks array by patch division milling, INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE, Vol. 48, No. 1 (2008), pp. 84-94.
- Matsumura, T., Usui, E., Predictive cutting force model in complex-shaped end milling based on minimum cutting energy, INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE, Vol. 50, No. 5 (2010), pp. 458-466.
- Nicola, Gerson L., Missell, Frank P., Zeilmann, Rodrigo P., Surface quality in milling of hardened H13 steel, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol. 49, No. 1-4 (2010), pp. 53-62.
- Oda, Y., Mori, M., Ogawa, K., Nishida, S., Fujishima M., Kawamura, T., Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination, CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol. 61, No. 1 (2012), pp. 119-122.
- 寺井久宣, 浅尾晃通, HAO Minghui, 吉川浩一, 水垣善夫, ボールエンドミル加工における工具姿勢と加工精度との関係, 日本機械学会 第 5 回生産加工・工作機械部門講演会講演論文集 (2004), pp. 259-260.
- Tsai, Chung-Liang, Liao, Yunn-Shiuan, Cutting force prediction in ball-end milling with inclined feed by means of geometrical analysis, INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY, Vol. 46, No. 5-8 (2010), pp. 529-541.
- 山田誠, 田中文基, 近藤司, 岸浪建史, 5 軸 NC 工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究(第 3 報) (ボールエンドミル傾斜加工における切削力解析による工具姿勢評価), 精密工学会誌, Vol. 73, No. 5 (2007), pp. 563-567.

References

- Akazawa, K., Shamoto, E., Study on regenerative chatter vibration in ball end milling of flexible workpieces (Construction of analytical model with consideration of tool inclination around cutting feed direction), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 75, No. 8 (2009), pp. 984-989 (in Japanese).
- Fujita, T., Iwabe, H., Study on evaluation of cutting performance with ball end milling for inclined surface using 3D-CAD (Proposal of cutting method with high efficiency and high accuracy based on cutting mechanism and cutting performance), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 79, No. 800 (2013), pp. 1102-1111 (in Japanese).
- Hirogaki T., Aoyama, E., Ogawa, K., Kawaguchi, T. Sueda, H., Shuuchi, R., Investigation on finished surface machined by five-axis machining center (Ball nose end-milling under constant contact angle and optimum machining condition), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 75, No. 10 (2009), pp. 1238-1244 (in Japanese).
- Iwabe, H., Shimizu, K., Sasaki, M., Analysis of cutting mechanism of ball end mill using 3D-CAD (Chip area by inclined surface machining and cutting performance based on evaluation value), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 72, No. 713 (2006), pp. 247-254 (in Japanese).
- Kasahara, K., Tanaka, Y., Hirota, A., Analysis of tool deflection and mechanism of surface generation in ball end milling of an inclined surface (2nd Report) (On the properties of machined surface and machining error caused with tool deflection), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 76, No. 8 (2010), pp. 901-906 (in Japanese).
- Kasahara, K., Suzuki C., Ohtaka, K., Murata, K., Hirota, A., Influence of tool tilting angles on cutting forces and tool deflection in ball end milling (2nd Report) (Results of cutting forces and preliminary examination of tool deflection in pick-feed milling), Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 78, No. 10 (2012), pp. 899-904 (in Japanese).
- Matsuda, H., Sasahara, H., Tsutsumi, M., Generation of a regularly aligned surface pattern and control of cutter marks array by patch division milling, INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE, Vol. 48, No.

1 (2008), pp. 84-94.

- Matsumura, T., Usui, E., Predictive cutting force model in complex-shaped end milling based on minimum cutting energy, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MACHINE TOOLS & MANUFACTURE*, Vol. 50, No. 5 (2010), pp. 458-466.
- Nicola, Gerson L., Missell, Frank P., Zeilmann, Rodrigo P., Surface quality in milling of hardened H13 steel, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Vol. 49, No. 1-4 (2010), pp. 53-62.
- Oda, Y., Mori, M., Ogawa, K., Nishida, S., Fujishima M., Kawamura, T., Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination, *CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Vol. 61, No. 1 (2012), pp. 119-122.
- Terai, H., Asao, T., HAO, M., Kikkawa, K., Mizugaki, Y., Relationship between the tool orientation and the machining accuracy in the ball-nosed end milling, *The 5th Manufacturing & Machine Tool Conference (2004)*, pp. 259-260 (in Japanese).
- Tsai, Chung-Liang, Liao, Yunn-Shiuan, Cutting force prediction in ball-end milling with inclined feed by means of geometrical analysis, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, Vol. 46, No. 5-8 (2010), pp. 529-541.
- Yamada, M., Tanaka, F., Kondo, T., Kishinami, T., Sculpture surface machining by automatically indexing tilted tool axis on 5-axis machine tools (3rd report) (Evaluation of tool attitude by analysis of cutting force on tilted tool axis ball end milling), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 73, No. 5 (2007), pp. 563-567 (in Japanese).