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加工方法の提案 —

Study on Evaluation of Cutting Performance with Ball End Milling for Inclined Surface using 3D-CAD
— Proposal of Cutting Method based on Cutting Mechanism and Cutting Performance —

正 岩部 洋育 (新潟大・院) 〇学 藤田 剛 (新潟大・院) 学 畠山 泰亮 (新潟大)

Hiroyasu IWABE, Tsuyoshi FUJITA and Taisuke HATAKEYAMA
Niigata University, 8050, Ikarashi 2-nocho, Nishi-ku Niigata City 950-2181, Japan

Key Words: Ball End Milling, Cutting area, Evaluation value, Cutting method, Cutting force, Surface roughness

1. はじめに

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、金型加工等に用いられている。近年、5 軸制御加工機や CAD・CAM の発展が著しく、高速、高能率、かつ高精度な加工が期待される。しかし、切れ刃形状が複雑なためにその切削機構は十分解明されておらず、工具の切削特性に応じた利用がなされているとはいえない。

本報では、前報¹⁾で示した切削機構および切削特性の解析結果に基づいてボールエンドミルによる傾斜面加工における加工方法を提案し、その有用性について解析ならびに実験に基づいて検証を行った。

2. 三次元 CAD を用いた切削機構および切削特性の検討

2-1 切削面積および評価値 図 1 は工具および傾斜面 (傾斜角: α) を持つ工作物の三次元 CAD (SolidWorks) モデルとその干渉による切削モデルである。切削は等高線方式を対象とする。図中の abcd 部は一回の切削で除去される切り屑立体、 λ は送り方向の主軸傾斜角であり、図の場合を負とする。

図 2 は切削面積の計算方法を示している。図中の切り屑立体 abcd は Z 方向、切れ刃は Z' 軸方向より投影しており、切り屑立体と切れ刃のすくい面が干渉する klmn 部を切削面積 A として計算している。また、主軸から切削面積の重心 G までの距離 L_G を求め、切削トルクに相当する評価値 E_d を次式により定義した。

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

2-2 切削特性 式(1)を用いて主軸および工作物の傾斜角 λ および α により変化する評価値を計算し、その最大値 E_{dmax} を図 3 に示す。後述する切削実験によって得られた切削三分力に基づいて切削トルクを算出しているが、文献 1) と同様の傾向を示すことから、評価値の妥当性を確認している。な

お、図 3 よりピックフィードを斜面下方にとるステップダウン、下向き切削、 $\alpha=15^\circ, \lambda=-5^\circ$ の条件で最大値 E_{dmax} は最小となり、文献 1) と同様にこの条件で良好な切削性能が期待できるが、工具中心軸が図 4 に示すように切り屑立体の内部を通過し、工具先端部を用いた切削となる。

3. 切削機構および切削特性に基づく加工方法の提案

ボールエンドミル加工において周速がゼロとなる先端部の切れ刃を用いると、構成刃先の発生により加工面にむしれが生じ、仕上げ面粗さは増大する。高精度加工の実現には加工面を傾斜させたり 5 軸制御加工機を用いる等、先端部が仕上げ面の創成に関与しない方法が選択される。しかし、小径工具においては先端部を切削に関与させることで主軸方向の切削力が作用し、びびり振動を抑制することが報告されている²⁾。そこで、傾斜面加工において、図 4 に示すような工具先端部を切削に関与させた加工方法を提案し検討を行う。

Fig.3 Maximum evaluation value E_{dmax}

Fig.1 Cutting model

Fig.2 Chip area

Fig.4 Cutting with the top of the tool

図4において、 F_z' 分力はX'-Y-Z'座標系における工具の中心軸方向の力である。X'およびY方向に比べてZ'方向の工具の剛性は高く、新しい加工方法による F_z' 分力の増加によってX'-Y面の変形を抑制するものと考えられる。

4. 実験条件および方法

表1に実験条件を示す。切削実験はベッド型NC万能フライス盤（ニイガタマシンテクノ，2UMD-SN）のテーブル上に据え付けた工具動力計（Kistler 9257B）に、傾斜面をもつ治具を介して板状の工作物（S45C，70×50×10 mm）を固定し、X軸方向に送りを与える等高線方式の切削を行った。工具は(TiAl)Nコーティングの超硬ソリッドボールエンドミル（2枚刃）を用い、切削三分力を測定した。また、触針式粗さ測定器（東京精密，SURFCOM 130A）によりピックフィード方向の仕上げ面粗さを測定した。

5. 実験結果と考察

5-1 切削力 図5は $\alpha=15^\circ$ ，ステップダウンの条件による切削力をX'-Y-Z'座標系に変換した F_x' ， F_y ， F_z' とその合力Fの最大値を示している。 λ を負方向に傾斜させ工具先端部を切削に関与させると、上向き切削，下向き切削ともに F_z' の値が増加している。一方、 $F_{y\max}$ の値は減少しているが、これは切削が連続的になることで一回の切削における切削時間が増加し、切削面積の最大値が抑制されているためと考えられる。

5-2 切削トルク 図6はX'-Y面において工具に作用する接線分力 F_t ， L_G および両者の積による切削トルクTの変化を示している。図より L_G の変化は小さいため、Tは F_t に大きく依存していることがわかる。

図7はステップダウン，上向き切削での主軸および工作物の傾斜角 λ および α による切削トルクの最大値 $T_{\max}$ の変化である。 $T_{\max}$ の値は λ の負方向への増加に伴って減少する傾向があり、 $\alpha=15^\circ$ ， $\lambda=-10^\circ$ の条件で最小値34.1 N・mmを示している。この理由は、前述のように切削が連続的になることで一回の切削における切削時間が増加し、 F_x' および F_y 分力が抑制されることおよび L_G の値が小さくなることによる。

5-3 仕上げ面粗さ 図8はステップダウン，上向き切削の条件における粗さ曲線を示している。図より、 $\alpha=5^\circ$ ， $\lambda=-5^\circ$ の条件では最大高さは $R_z=12.5\mu\text{m}$ と理論粗さ $R_{th}=10\mu\text{m}$ を上回る値を示し、むしろによって仕上げ面が悪化している。一方、 $\alpha=15^\circ$ ， $\lambda=-10^\circ$ の条件ではピックフィードによるツールマークが転写されており、最大高さは理論粗さにほぼ一致する $R_z=8.3\mu\text{m}$ の良好な仕上げ面が得られている。

図9は各種条件による最大高さRzを比較して示している。Rzは α の増加とともに増加し、 λ の負方向への増加に伴って減少する傾向を示している。また、 $\alpha=15^\circ$ ～ 20° および $\lambda=-15^\circ$ ～ -10° の条件においてRzは破線で示した理論粗さ $R_{th}=10\mu\text{m}$ に比べて小さく、むしろの発生がほとんどない良好な仕上げ面が得られた。

6. まとめ

三次元CADを活用して得られた解析結果に基づいて、ボールエンドミル加工において良好な切削特性が期待できる加工方法を提案した。また、切削力，仕上げ面粗さを測定するとともに切削トルクを算出し、本加工方法の切削特性を検討した。その結果，ステップダウン，上向き切削， $\alpha=15^\circ$ ， $\lambda=-10^\circ$ の条件において良好な切削性能が期待できること示すとともに提案した加工方法の妥当性を明らかにした。

文献 1) 藤田 剛, 岩部洋育, 徳原弘一, 日本機械学会北陸信越支部第47会総会・講演会講演論文集, (2009) 401-402
2) 嶺岡悦雄, 宮口孝司, 岩部洋育, 精密工学会誌, 65, 8 (1999) 1131-1135

Table 1 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	$0 \sim 25^\circ$
Spindle inclination angle	: λ	$-15 \sim 0^\circ$
Spindle revolution	: N	315 min^{-1}
Type of milling		Up & Down milling
Coolant		Wet (1.5 l/min)

Fig.5 Maximum component force and maximum resultant force ($\alpha=15^\circ$, Stepped down)

Fig.6 Tangential force F_t , L_G and cutting torque T

Fig.7 Maximum cutting torque $T_{\max}$ (Stepped down, Up milling)

Fig.8 Surface roughness (Stepped down, Up milling)

Fig.9 Maximum height R_z (Stepped down, Up milling)