ボールエンドミル仕上げ加工の高精度化に関する研究 -凹面加工時の加工面曲率半径が加工誤差に及ぼす影響-

Improvement of machining accuracy of finishing process by ball endmill - Effect of concave curvature radius on machining accuracy -

○学 宗賢次郎, 正 扇谷保彦, 正 小島龍広, 正 小山敦弘, 正 矢澤孝哲 (長崎大学)

Kenjiro SO, Yasuhiko OGIYA, Tatsuhiro KOJIMA, Atsuhiko KOYAMA, Takanori YAZAWA
Nagasaki university graduate school, bunkyoumachi 1-14, Nagasaki-shi, Nagasaki

Key Words : Ball Endmill, Tool deflection, Machining Error, Zero Cut, Cutting region

1. 緒言

ボールエンドミル仕上げ加工では, 工具に作用する切削抵抗により工具がたわみ, 削り残し(加工誤差)を生じる. 著者らは切削抵抗実測値と工具系の静的コンプライアンスに基づいて切込み量を補正することで加工誤差を低減できることを報告した⁽¹⁾. しかし, その検討では等高線切削による平面加工を対象としており, 金型等に多く見られる凹曲面の加工に関する検討はなされていない. 凹面加工では平面加工に比べて切れ刃の接触長さが長くなること, 特に工具切れ刃輪郭の工具軸直角方向曲率半径と加工部の曲率半径が近い状態で加工がなされる場合には, 切り込みが比較的小さい仕上げ加工においても, 切れ刃の接触長さ増大に伴う切削抵抗の増加が加工誤差に影響を及ぼすことが予想される⁽²⁾.

本報告では, ボールエンドミルによる凹面の仕上げ加工における加工誤差に及ぼす加工面曲率半径の影響を, ボールエンドミルで円錐面(凹面)の仕上げ加工を行って検討した内容を述べる.

2. 実験方法

2. 1 実験装置

本実験では図1に示すような角度 $\phi = 45[\text{deg.}]$ の傾斜平面と円錐形状の凹面を有する試験片(Uddeholm, STAVAX: 50HRC)に多成分動力計(Kisler, 9257B)を介してマシニングセンタ(牧野フライス製作所, F3)テーブル上に固定し, 超硬ボールエンドミル(三菱マテリアル製, VC2PBPR0300, 直径6[mm], 刃数2)で切削した. 実験では, 動力計で図1に示す3方向の切削抵抗を計測した.

2. 2 切削条件・切削方法

本実験の切削条件を表1に示す. 本実験では, 切削条件を工具メーカー推奨値に準じて設定し, 図1に示すように工具送りおよびピックフィードを与えて等高線切削を行った.

切削実験に先立ち, 表1の切削条件で, 切込深さ測定の基準となる面(基準面)を含む被削面全体を削り出した後, 図1に示すように傾斜平面と円錐面との境界線に沿って工具を斜面上り方向に送り, 切削時に傾斜平面と円錐面の境界を検出するための深さ0.18[mm], 幅約2[mm]の溝を削り出した.

図2(a), (b)に切削実験後の試験片を示す. 切削実験では図2(a)(b)に示すように傾斜平面と円錐面の仕上げ面の両側に基準面が残るように仕上げ面I, IIを切削し, 切削抵抗を測定した. さらに, 削り出した幅5[mm]の仕上げ面の両端に幅1[mm]だけ, 仕上げ加工時と同一の工具経路でゼロカットを施し, 図2(c)に示すようにゼロカット面②を削り出した.

2. 3 加工誤差の測定

本研究では, 切削実験後, 表面粗さ形状測定機(東京精密, SURFCOM130A)で得られた傾斜平面部および円錐面部の断面曲線から仕上げ加工時の加工誤差を求めた. 具体的には, 基準面から仕上げ面①およびゼロカット面②までの段差を t_1 , t_2 とし, その差 $t_2 - t_1$ を加工誤差量 δt として評価した. なお,

t_2 の値は仕上げ面の両側に削り出したゼロカット面と基準面の段差の平均値とした.

3. 実験結果および考察

3.1 凹面加工時の切削抵抗測定結果

図3に動力計で計測した切削抵抗 F_x の時間波形を示す. 傾斜平面と円錐面との境界に削り出した溝を工具が通過する($B: T_1 \leq T < T_2$)とき切削抵抗がほぼ0[N]になる. 本研究では, このタイミングで傾斜平面の切削から円錐面の切削に移行すると見なし, 直線経路切削区間($A: 0 \leq T < T_1$)と輪郭(円弧)経路区間($C: T_2 \leq T < T_3$)を区別した. 図3において傾斜平面切削時に切れ刃による切削過程ごとに現れる F_x 波形のピーク値は, 切削開始と終了付近を除き, ほぼ一定である. 本実験では, 他の二方向の切削抵抗成分 F_y および F_z についても同様の時間波形であった.

Fig.1 Cutting method

(c) Profile of experiment surface I or II
Fig.2 Workpiece after cutting tests

Table1 Cutting conditions

Angle of cutting point ϕ [deg.]	45
Spindle speed S [min^{-1}]	8,000
Feed rate f [mm/min]	1,100
Pick feed f_p [mm/path]	0.1
Depth of cut t [mm]	0.18
Tool overhang [mm]	32
Radius of cutting point r [mm]	2.1
Radius of curvature in cutting surface ρ [mm]	12.7~3.2

一方、円錐面切削時には、三分力測定方向に対して送り方向が時々刻々変化するため、図3の区間Cの F_x の時間波形に示されるように切削位置に応じて切削抵抗ピーク値が変化する。このため円錐面切削時の切削抵抗工具軸直角方向成分については時間 $T(T_2 \leq T < T_3)$ と送り速度 f の関係から推定される工具位置を求め、そのときの切削抵抗の送り方向(接線方向)成分 F_θ 、送り垂直方向成分 F_r を F_x, F_y から算出した。図4に F_x, F_y および F_θ, F_r の関係を示す。

図5に円錐面切削時(図3の区間C)の切削抵抗 F_θ, F_r の時間波形を示す。2枚刃のどちらで切削しているかによって若干の違いはあるが、切削過程ごとの F_θ および F_r 波形のピーク値もまた円錐面切削領域の切削開始(終了)付近を除けば、工具位置に関わらずほぼ一定の値を示す。

3.2 凹面加工時の加工面曲率半径 ρ が切削抵抗および加工誤差に及ぼす影響

円錐面切削において、工具切れ刃上の創成点(本実験条件では切れ刃輪郭上の $\phi = 45[\text{deg}]$ となる点)が含まれる水平方向断面における加工面輪郭の曲率半径 ρ と工具半径 $r = R \sin \phi$ の比 ρ/r が切削抵抗 F_θ, F_r, F_z とのピーク値に及ぼす影響を図6に示す。ここで切削抵抗 $F_{\theta \text{ peak}}, F_{r \text{ peak}}, F_{z \text{ peak}}$ は工具が1回転する間の各切削抵抗ピーク値(最大値)の10回転分以上の平均をとった値である。円錐面切削時の切削抵抗 F_θ, F_r, F_z は傾斜平面切削時の切削抵抗 F_x, F_y, F_z にそれぞれ相当する。本研究では傾斜平面切削時の切削抵抗と円錐面切削時の切削抵抗に関し、 F_x, F_y, F_z の最大値の平均 $F_{x \text{ peak}}, F_{y \text{ peak}}, F_{z \text{ peak}}$ と $F_{\theta \text{ peak}}, F_{r \text{ peak}}, F_{z \text{ peak}}$ をそれぞれ比較し考察した。なお、図6において ρ/r に対応してプロットされている $F_{x \text{ peak}}, F_{y \text{ peak}}, F_{z \text{ peak}}$ は、円錐面切削において該当する ρ/r となる z 位置で傾斜平面を切削する際に測定された切削抵抗ピーク値を示している。

本実験において切込み不足として計測される加工誤差の発生には、送り方向かつ工具軸に垂直な方向の切削抵抗成分、すなわち、傾斜平面切削時の F_y 、円錐面切削時の F_r が、大きな影響を及ぼすと考えられる。図6において、切削抵抗 $F_{r \text{ peak}}$ は $F_{y \text{ peak}}$ に比べ、若干増加しているがその差は1~3[N]程度と小さい。また、工具軸直角方向曲率半径 r に対し、加工部の曲率半径 ρ が $1.5r$ 程度に小さくなる場合でも $F_{r \text{ peak}}$ と $F_{y \text{ peak}}$ の差は $\rho/r > 5$ の場合に比べ若干大きくなる程度であり、加工面曲率半径 ρ が $F_{r \text{ peak}}$ に及ぼす影響は小さい。

表2に t_1, t_2 および加工誤差 δt の測定結果を示す。実験面IおよびIIともに傾斜平面と円錐面の加工誤差 δt はほぼ同じとなった。これは、切削抵抗の工具軸垂直方向成分 $F_{r \text{ peak}}$ と $F_{y \text{ peak}}$ がほぼ同じ値になったことによると考えられる。

以上の結果は、ボールエンドミルを等高線方向に送って凹面(円錐面)の仕上げ加工をする場合、工具軸直角断面における加工面曲率半径が加工誤差に及ぼす影響は小さいことを示している。これはボールエンドミルによる仕上げ加工では、切込みが浅く、切削領域が狭いため、 $\rho/r > 1.5$ となる加工面曲率半径の切削では、 ρ の変化に伴う切れ刃の接触長さの変化およびそれに起因する切削抵抗への影響が現れにくいと考えられる。このことは、ボールエンドミルを等高線方向に送って凹面(円錐面)の仕上げ加工をする場合の加工誤差に関する検討は、 $\rho/r \approx 1$ となるような場合を除き、傾斜平面の切削実験で代替しうることを意味する。

4. 結言

本研究では、ボールエンドミルによる凹面の仕上げ加工における加工誤差に及ぼす加工面曲率半径の影響を、ボールエンドミルで円錐面(凹面)の仕上げ加工を行って検討した。検討に際してはボールエンドミルに等高線方向の送りを与えて円錐面を加工し、加工面曲率半径と切削抵抗および加工誤差の関係を調べた。検討の結果、以下の内容が明らかにな

った。

- (1) 仕上げ加工では切込みが小さく、工具軸直角方向曲率半径 r に対し、加工部の曲率半径 ρ が $1.5r$ 程度に小さくなくても、切削抵抗や加工誤差にはほとんど影響を及ぼさない。
- (2) したがって、ボールエンドミルを等高線方向に送って凹面の仕上げ加工をする場合の加工誤差に関する検討は、 $\rho/r \approx 1$ となるような場合を除き、傾斜平面の切削実験で代替しうる。

参考文献

- (1) 宗 他：ボールエンドミル仕上げ加工の高精度化に関する研究(切削抵抗実測値に基づく切込補正の検討)、2013年度精密工学会秋季大会講演論文集、(2013)、pp.131-132
- (2) 岩部 他：3次元CADを用いたボールエンドミルによる凹面加工における切削機構と切削特性に関する研究、日本機械学会誌、No.047-1、(2005)、pp.331-332

Fig.3 Measured cutting force of F_x ($\rho/r=1.5$)

Fig.4 Definition of cutting force

Fig.5 Components of measured cutting force in the radial and tangential direction ($\rho/r=1.5$)

Fig.6 Relation cutting force and radius ratio

Table2 Measured Machining error of cut surface

Experiment surface		Measured depth of cut		Machining error δ [μm]
		t_1 [μm]	t_2 [μm]	
I	Inclined plane	168.9	172.2	3.3
	Conical surface	168.9	172.2	3.3
II	Inclined plane	169.2	172.3	3.1
	Conical surface	168.7	172.0	3.3