119 円筒面のボールエンドミル加工に関する研究 (任意方向における加工誤差の理論解析)

Study on Ball End Milling of Cylindrical Surface (Prediction of Machining Error in Arbitrary Cutting Direction)

正 田中 久隆 (鳥取大) 正 佐藤 昌彦 (鳥取大) 准 陸 琳 (鳥取大院)

Hisataka TANAKA, Masahiko SATO, Tottori University, 4-101 Minami, Koyama-cho, Tottori
Lin LU, Graduate School of Tottori University

This research effort is focused on analyzing machining error in arbitrary direction in ball end milling of cylindrical surface theoretically. Ball end milling is widely used to machine dies, molds and various aerospace components that are characterized by 3-dimensional free form surface. They are always required to be of high accuracy. In this study, the machining errors at various parts of machined surface are evaluated. And the theoretical results are verified by the experiments. The workpiece material is 0.45%C plain carbon steel. And the cutting tool used in this research is HSS. The theoretical results agree well with the experimental values.

Key words: Ball End Milling, Machining Error, Cylindrical Surface, Tool Deflection, Cutting Direction Angle

1. はじめに

ボールエンドミル加工はマシニングセンタで多用され、金型製作やプロペラ、飛行機の翼、自動車部品などに広く使用されている。近年、商品の品質向上にともなって金型の高精度化が強く求められている。ボールエンドミル加工の加工誤差の理論解析は、高精度とともに高生産性も保証する切削方法を見出すために有用である。

これまで著者らは、円筒面の周方向および軸方向に切削送りを与えて加工面の加工誤差を調べた⁽¹⁾。本研究では、円筒面の軸に対して一定の傾斜角でボールエンドミル加工を行い、主に加工誤差に及ぼす切削方向の影響を理論的・実験的に明らかにした。

2. 実験装置および実験方法

実験には立形マシニングセンタ（瀧澤鐵工所製 MAC-VIE）を用いた。図1に示すように、マシニングセンタテーブル上に固定した圧電型切削動力計に円筒状被削材を取り付け、傾斜角 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ で円筒面に沿って、それぞれ湿式切削を行った。まず、工具にたわみが生じない程度の低い送り速度で加工誤差のない基準面をつくり、指定の送りに変えた後、切削を行い、切削角度 $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の3箇所加工誤差に及ぼす影響を調べた。

加工誤差の測定方法は、図2に示すように三次元座標測定機（Mitutoyo Super BHN506）を用いて、送りを変化させた前後の段差を測定し、それを加工誤差とした。加工誤差は加工面の場所により異なるため、測定箇所は切削面の上部、中部、下部の3箇所とした（図2）。

表1に本実験で使用した工具と被削材の諸元および主な実験条件を示す。被削材には炭素鋼 S45C を使用し、工具には Co-HSS の1枚刃ボールエンドミルを使用した。

Fig. 1 Experimental set up

Fig. 2 Measurement of machining error

Table 1 Cutting conditions

Radius of ball end mill	7mm
Tool material	HSS (JSI SKH51)
Tool overhang length	60mm
Spindle speed	600 min ⁻¹
Cross-feed	1mm
Depth of cut	1mm
Feed rate	0.1mm/tooth
Cutting direction angle	0° ~ 90°
Milling position angle	30° ~ 60°
Workpiece material	S45C
Radius of workpiece	40mm
Coolant	Water miscible

3. 実験結果および考察

図3に、傾斜角 $\alpha=0^\circ \sim 90^\circ$ に対する加工誤差の測定結果と解析結果を示す(Up cross-feed, Upward cut).

図3に示された解析結果をみると、Up cross-feed, Upward cutの切削モードでは、下部での加工誤差は傾斜角の影響を受けやすく、中部と上部では傾斜角の影響は少ない。測定結果と理論解析結果の値はかなり異なる箇所もあるが、両者の傾向は比較的似ている。

また、この切削モードの理論解析結果をみると、傾斜角 $\alpha=0^\circ$ の場合、上部(upper)で加工誤差が最大になり、傾斜角 $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合、逆に下部(lower)で最大になることがわかる。これは仕上げ面の生成過程によって説明することができる。図4に、Up cross-feed, upward cutの切削モードの場合の傾斜角 0° と 45° での仕上げ面の生成過程をそれぞれ示している。傾斜角 $\alpha=0^\circ$ の場合、面 $m-p-n-m$ と面 $q-t-s-q$ は、それぞれ現在の切削と1刃前の切削で削られた面であり、面 $m-q-s-n-m$ が最終的に仕上げ面として残る。切削に関わっている切れ刃の長さは下部より上部の方が長いため、上部での工具のたわみが大きく、したがって、上部での加工誤差が大きい。傾斜角 α の増加とともに、下部での切削に関わっている切れ刃の長さは長くなり、上部での長さは逆に小さくなる(図4)。ある傾斜角において、下部での加工誤差は上部での加工誤差より大きくなり、逆転する。この逆転する傾斜角は、加工誤差の理論解析により計算することができる(図3)。ちなみに、この切削条件の場合、逆転する傾斜角 α は約 12° であった。

4. おわりに

本研究では、円筒面の軸に対して一定の傾斜角でボールエンドミル加工を行い、任意方向における加工誤差を理論的、実験的に調べた。解析結果と測定結果の傾向は比較的良く似ている。この理論解析結果を利用し、加工精度の良い切削方法を選択することが可能となった。

Fig. 3 Influence of cutting direction angle on machining error (Up cross-feed, Upward cut)

Surface generation process
Fig. 4 Surface generation process (Up cross-feed, Upward cut)

謝 辞

最後に、本研究を遂行するにあたりご協力いただきました鳥取大学工学部 岡村 進 技術職員に感謝いたします。

参考文献

- (1) 例えば, B. W. Ikua, H. Tanaka, et al., Prec. Eng., 25-4 (2001), 266-273.