研究

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*

藤井 義也** 岩部 洋育**

Relationship between Cutting Force Curve and
Working Accuracy with Ball-nose End Mills

Yoshiya FUJII and Hiroyasu IWABE

This paper deals with the measuring method of the shape of a cutting edge of ball-nose end mill and also the influence of cutting force on working accuracy along a cutting edge. The results are as follows: (1) The shape error of ball-nose end mill is measured by holding a cutting edge perpendicular to the light beam of a tool microscope. (2) By indicating the times of the beginning and the end of cut, the working range of a cutting force curve is given corresponding to the contact angles along

a cutting edge. (3) It is shown that the working accuracy by ball-nose end mill is determined by the vertical component of cutting force and the dynamic stiffness of end mill and workpiece in the direction of the vertical axis Y . (4) Under the cutting condition, the size error of the curve portion is greater than that of the straight cutting edge. And also, concerning the size error, the straight cutting edge of ball-nose end mill at the inside of diameter is better than that at the outside.

Key words: ball-nose end mill, working accuracy, cutting force curve, cutting edge shape, measuring method, metal cutting, cutting process.

1. 緒 言

一般に任意三次元曲面の切削を行うとき、工具として先端部切れ刃の包絡面が半球となるボールエンドミルの使用により加工能率が向上するため、各種の切れ刃形状および工具材料のボールエンドミルが市販され、自動プログラミングの開発とともに広く用いられている。ボールエンドミルに関する研究は渦巻状刃先をもつボールエンドミルを用いた細井¹⁾の報告、円弧切れ刃ボールエンドミルを用いた岸浪²⁾の報告があり、切削性能および切削機構の検討が行われている。また仕上面粗さに関しては宮沢³⁾の報告がある。しかしボールエンドミルによる加工精度はその切れ刃形状が正確に測定されていないこと、加工面の生成に関する切削力曲線の範囲を決定することが困難であることから十分な資料が得られていない。本研究は上記の問題点を解決することを目的としてボールエンドミルによる加工精度について検討するものである。

2. 実験方法

2.1 先端部切れ刃形状の測定方法

ボールエンドミルの切れ刃形状の測定は工具顕微鏡お

よび割出し中心台を用いて両センタ支持方法で行うため、本研究においてはボールエンドミルにテーパリングを取り付け、そのリングに同じテーパ部をもつキャップをかぶせるようにしたジグを用いている。キャップには切れ刃の測定位置に窓を設けてある。測定時における中心軸の振れの値は最大最小差で $4\mu\text{m}$ 以内である。

図1は先端部切れ刃の模型図であり、 Z 軸は主軸、 X 軸は工具顕微鏡の光軸に一致し、原点 O はボール部の中心である。切れ刃上に任意の点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ をとり、 $\overline{OP_i}$ と Z 軸のなす角を θ_i とする。角 θ_i は後述する切れ刃位置を示すパラメータであり、この角度を切れ刃の接触角(以後接触角と略す)と呼ぶことにする。切れ刃形状は各接触角における点 P_i の半径を測定することにより求める。点 P_i の半径は $\overline{OP_i} = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}$ で与えられるため、(b)図に示すように点 P_i をまず $X-Z$ 面上に一

Fig.1 Measuring method of cutting edge

* 原稿受付 昭和56年7月6日。昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和54年10月11日)にて発表。

** 正会員 新潟大学工学部(新潟市五十嵐2の町8050番地)

Fig. 2 Cutter path on workpiece

致させ、その後 Z 軸を時計回りに 90° 回転させて $x_i=0$ とし、 $Y-Z$ 面上で y_i または z_i の値を次の方法で測定することにより切れ刃形状を求めた。すなわちエンドミルの公称半径 $R_0=10$ mm を用い、原点 O を先端より 10 mm の位置として接触角 45° における測定誤差以上にならないようにするため、 $\theta_i \leq 45^\circ$ では $y_i = R_0 \cdot \sin \theta_i$ における z_i の値、 $\theta_i > 45^\circ$ では $z_i = R_0 \cdot \cos \theta_i$ における y_i の値を 2° 間隔で測定した。その後半径の中心位置を原点 O に対して Z 軸上を $1 \mu\text{m}$ 間隔で移動させ、円輪郭に沿って測定値の二乗誤差が最小となる位置を計算で求め、この位置を中心とするそれぞれの半径の値をもって切れ刃形状とした。

2.2 工具通路と加工誤差の測定方法

図 2 は切削におけるボールエンドミルと被削材の位置関係および工具通路を示している。座標系はテーブル長手方向を X 軸、前後方向を Y 軸および上下方向を Z 軸としている。被削材はジグを用いて Z 軸に 45° 傾斜させ、先端部切れ刃がすべて切削に関与するような工具通路で X 軸方向に送りを与えている。指令の始点 Q' は $Y-Z$ 面において測定の基準点 Q と一致させるため、 Y 軸に関しては心出し顕微鏡、 Z 軸に関してはエンドミルに取り付けたテーパリング上端の研削面を利用した。図は上向き切削の場合を示しているが、入口部にはそれぞれ仕上切削条件(半径方向切込み 0.06 mm, 送り 0.02 mm/tooth, その他の条件は後述する)により繰返し切削を行い基準面を作成した。斜線部は切削される領域であり、加工誤差の測定は切削後破線の位置で被削材を切断し、工具顕微鏡を用いて行った。図 2 のように被削材上面を u 軸、ボール部中心 O_1 を通り u 軸に垂直方向を v 軸とする。 u および v 軸を工具顕微鏡の左右および前後移動方向に一致させると、切れ刃位置点 P_i における半径方向誤差は $\angle P_i O_1 S_1$ が接触角 θ_i であるため次式で与えられる。

Fig. 3 Radial error of cutting edge

$$E(\theta_i) = \{v_i + 10/\sqrt{2} - R \cdot \cos(\theta_i - 45^\circ)\} \cos(\theta_i - 45^\circ) \quad (1)$$

ここで、 R (mm) はボール部の半径、 v_i (mm) は $u_i = R \cdot \sin(\theta_i - 45^\circ)$ における測定値である。

2.3 実験条件とその方法

実験の条件は次のとおりである。

工作機械: 新潟鉄工 2 UMBN 型 NC フライス盤

エンドミル A: 高速度鋼ボールエンドミル, 先端半径公称 10 mm, 2 枚刃, 突出し長さ 70 mm (不二越)
 エンドミル B: 超硬ろう付けボールエンドミル, 先端半径公称 10 mm, 1 枚刃, 突出し長さ 90 mm (ダイジェット工業)

被削材: 炭素鋼 SS 41 (板厚 30 mm, 幅 100 mm, 長さ 130 mm)

切削速度 (最外周での速度): 18.8 (エンドミル A), 77.9 (エンドミル B) m/min

送り: 0.1 mm/tooth

半径方向切込み: 0.74, 2.93 mm

切削方式: 上向き切削, 下向き切削

切削剤: エンドミル A のみ湿式 (マシン油 1.3 l/min)

切削は図 2 に示す工具通路をテープで指令し、割円の弧の高さに相当する切込み 2.93 mm または弧の高さ 2.19 mm で割円を切削後半径方向に 0.74 mm の切込みを与えている。切削力曲線の測定は八角形リングにひずみ計を貼りつけた工具動力計および電磁オシログラフを用いて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 先端部切れ刃形状と切削過程

前述の測定法による先端形状は図 3 に示すようになる。図中誤差ゼロが公称半径である。切れ刃はエンドミル A において破線、エンドミル B において一点鎖線に

Fig. 4 Cutting process

よる平均半径のまわりに変動しており、その最大最小差 μm および標準偏差 μm を併記すればエンドミル A の場合 (126, 39), エンドミル B の場合 (77, 20) である。また平均半径はそれぞれ 10.078 mm および 10.028 mm である。ところで切れ刃を Z 軸方向から投影するとエンドミル A の場合中心部で直線、外周部で曲線形状、エンドミル B の場合中心部で曲線、外周部で直線形状である。図 4 はこの切れ刃を用いた場合、実験の条件で 1 枚の切れ刃の切削開始から切削終了までの切削過程を示しており、楕円形状は 45° 傾斜した被削材表面に生じる輪郭である。(a), (b) 図ともにそれぞれエンドミル A および B について上向き切削 (右半分) と下向き切削 (左半分) の場合を重ねて示している。破線部はそれぞれの加工面位置となり、切削される部分はそれぞれ楕円と破線で囲まれる斜線部の領域である。上向き切削の場合加工面の切削終了後切れ刃 4 の位置まで切削が行われ、下向き切削の場合加工面の切削以前に切れ刃 1 の位置から切削が開始される。したがって加工精度に影響を及ぼす範囲は加工面を切削する切れ刃 2 から 3 の位置までとなる。この切れ刃 2 から 3 までの主軸回転角はエンドミル A および B についてそれぞれ 25° および 62° である。図 5 はこの範囲における主軸回転角と切れ刃の加工面上での接触角の関係を示している。図において切れ刃の直線部と曲線部の境界は明りょうではないが、強い境界を

Fig. 5 Relationship between rotational angle and contact angle

Fig. 6 Working accuracy

与えれば破線で示す 40° 付近である。エンドミル A は左側、B は右側が直線切れ刃であり、この部分は瞬時に加工面を仕上げている。

3.2 ボールエンドミルによる加工精度

図 6 は上向き切削および下向き切削におけるエンドミル A および B による加工誤差を比較したものである。図において横軸は接触角、縦軸は半径方向の加工誤差である。両エンドミルにおいてともに上向き切削では負の誤差 (削りすぎ), 下向き切削では正の誤差 (削り残し) を示している。この結果は基本的にはスクウェアエンドミルの側面切削と同様である⁴⁾。誤差の最大最小差 μm を

Fig. 7 Cutting force curve (End mill A)

半径方向切込み 2.93 mm の条件でエンドミル A および B について比較すると, 上向き切削の場合 (76, 86), 下向き切削の場合 (37, 163) となってエンドミル A が B に比較して誤差が小さい。半径方向切込み 0.74 mm の条件で誤差の最大最小差 μm を接触角 40° を境界として切れ刃の直線部と曲線部について比較すると, エンドミル A の場合上向き切削および下向き切削においてそれぞれ (13, 54) および (28, 34) であり, エンドミル B の場合 (34, 45) および (42, 99) となっても直線部切れ刃位置で変動が小さい。更に同一条件において直線部切れ刃の範囲内で誤差の平均値 μm と標準偏差 μm により示すと, エンドミル A および B において上向き切削の場合 (-5, 4) および (-22, 18), 下向き切削の場合 (2, 8) および (81, 12) となっており, 直線部切れ刃が中心付近に存在するエンドミル A が B に比べ加工誤差が小さい。以上の検討から実験の範囲では加工精度の見地よりエンドミル A が B よりすぐれていることがわかる。

切削速度がゼロになる接触角 0° の誤差はエンドミル A の場合両切削方式とも $\pm 5 \mu\text{m}$ の範囲に存在するが, エンドミル B の場合負側にあり, ばらつきの範囲が大きい。これは接触角 0° 近傍の切れ刃による送り方向の仕上面粗さが, エンドミル A では送りマークが確認できて R_{max} は 6 ないし $9 \mu\text{m}$ と小さいが, エンドミル B では送りマークは部分的に確認できるものの構成刃先の生成により仕上面はむしろ生じて R_{max} が 32 ないし $146 \mu\text{m}$ と大きく変動しているためと考えられる。

3.3 切削力曲線と加工精度との関係

図 7 および図 8 は横軸に時間, 縦軸に切削力を取り, エンドミル A および B による 3 分力を示している。図 7

は主軸 1 回転, 図 8 は 2 回転中の挙動を被削材が受ける力で示している。図中時刻 $t_1 \sim t_4$ はそれぞれ切れ刃の切削中における位置が図 4 に示した切れ刃 1~4 の位置にあるときの時刻であり, 上向き切削では切削開始時刻 t_2 , 下向き切削では切削終了時刻 t_3 を基準としている。その後それぞれの切れ刃位置間の回転角を主軸の角速度で除して時間を求めることにより時刻 $t_1 \sim t_4$ が定められる。エンドミル A の場合 1 回転中に大きさの異なる波形が現れているが, これは主軸の振れおよび 2 枚の切れ刃の形状および切れ刃に沿った各位置におけるすくい角および逃げ角が等しくないためと考えられ, エンドミル B にこの現象は生じていない。

実験の条件で加工精度に大きく影響する分力は時刻 t_2 から t_3 の Y 方向分力である。被削材はジグを用いてテーブルに, エンドミルはスリーブおよびチャックを用いて主軸にそれぞれ固定されており, 時刻 t_2 から t_3 の範囲の切削力によって生じる機械構造各部の変形が最終的には被削材と切れ刃の相対位置変化となって加工誤差となる。この加工誤差を解析するにあたって切削系の総合剛性 K (kgf/mm) が被削材側の剛性 K_w (kgf/mm) および工具側の剛性 K_c (kgf/mm) によって次式で与えられるものとする。また $\alpha = K_w/K_c$ とする。

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_w} + \frac{1}{K_c} = \frac{1+\alpha}{\alpha \cdot K_c} \quad (2)$$

いま時刻 t (s) における切削力 $F_y(t)$ (kgf) がボール部中心 O に作用し, 図 9 に示すように被削材およびエンドミルに $D_{yw}(t)$ (mm) および $D_{yc}(t)$ (mm) の変形が生ずる。同時刻に加工面を切削している切れ刃の接触角 θ (deg) における加工面の半径方向誤差 $E(\theta)$ (mm) は

Fig. 8 Cutting force curve (End mill B)

Fig. 9 Mechanism of generating working accuracy

変形量, 切削力および剛性を用いて次式のように表現される.

$$E(\theta) = \{D_{yw}(t) + D_{yc}(t)\} \sin \theta = F_y(t) \sin \theta / (1000 \cdot K) \quad (3)$$

主軸の角速度を ω (rad/s) とし, 加工面の切削開始より時刻 t までのエンドミルの回転角を $\varphi(t)$ (deg) とすると

$$\varphi(t) = 180(t - t_2)\omega / \pi \quad (4)$$

図5の縦軸 $\varphi(t)$ を与えて接触角 θ を求め, 同時刻における切削力 $F_y(t)$ を図7および図8より求める. 式(3)より総合剛性が与えられると加工誤差 $E(\theta)$ が計算できることになる. また任意の切れ刃形状に対しては図5に示す関係を求めることにより上記方法が適用できる. 本実験においては加工誤差の実験値を式(3)に代入して求めた平均値を総合剛性の代表値とすれば, その平均値 kgf/ μm および標準偏差 kgf/ μm はエンドミル A による場合 (0.92, 0.20), エンドミル B による場合 (0.97, 0.29) となる. もちろん解析にはエンドミルおよび被削材の切削中の剛性を独立に測定しなくてはならない. このため

Fig. 10 Comparison of calculated value to experimental value

の実験は別に行う予定である. なお実験の範囲内では取付状態でエンドミルのボール部および被削材の中央に静的荷重を加えて, その変位よりエンドミル A について 0.63 kgf/ μm , エンドミル B について 0.94 kgf/ μm の静的剛性を得ており, 被削材とエンドミルの静的剛性比 α は切削力の大きさによりそれぞれ 6.90 および 2.53 としている. α の値が動的状态においても変化しないもの

と仮定すると, 動的剛性は静的剛性に比べエンドミル A の場合 1.66 倍, エンドミル B の場合 1.44 倍大きな値を示している。

図 10 は上向き切削および下向き切削における加工精度の計算値と実験値を比較したもので, それぞれエンドミル A および B について示している。切削条件は図 7 および図 8 と同一条件で比較しており, 上向き切削の場合エンドミル A において接触角 75° 以下で両者はよく一致しているが, 75° 以上では一致していない。これは 75° 付近から X 方向分力が大きくなってエンドミルが X 軸方向にたわみ, 加工面を切削する時刻が遅れるためと考えられる。このような傾向はエンドミル B においても同様である。一方, 下向き切削の場合 X 方向分力は小さく, X 軸方向へのたわみも小さいため両エンドミルともに計算値と実験値はほぼ一致している。誤差の形状および大きさの違いは切れ刃形状に応じて切削力曲線が変化することによる。

4. 結 論

- (1) ボールエンドミルの先端部切れ刃形状を工具顕微鏡の視野の中で平面, すなわち $Y-Z$ 面上に投影することにより測定した。
- (2) 上向き切削の場合切削開始, 下向き切削の場合切削終了時刻を基準とし, 切れ刃の接触角に対応する主軸回転角の回転時間を求めて切削力曲線のうち加工面の生成に関与する範囲を定めた。

(3) 切削力の 3 分力のうち Y 方向分力が加工誤差に影響することから, 工具側および被削材側の Y 方向の動的総合剛性を与えて加工誤差が求められることを示した。

(4) ボールエンドミルによる加工誤差は, 上向き切削で削りすぎ, 下向き切削で削り残す傾向があり, 基本的にはスクウェアエンドミルによる側面切削の場合と同様である。

(5) 実験の条件では, 加工誤差は切れ刃の曲線部に比べ直線部で小さい。また直線部切れ刃に関して外周部にあるエンドミル B に比べ中心部にあるエンドミル A で加工精度がよい。

終わりに工具については(株)不二越および(株)ダイジェット工業, ジグの設計・製作については桜井福二技官にご協力いただいたことを付記し深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 細井俊明, 星 鉄太郎: 渦巻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, **44**, 378(1977)822.
- 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切削機構に関する研究 (第 1 報) および (第 2 報), 精密機械, **46**, 10 (1980) 1303 および **47**, 4 (1981) 459.
- 3) 宮沢伸一, 高田孝次: 三次元曲面のマイクロミリング, 精密機械, **47**, 2 (1981) 234.
- 4) 藤井義也, 岩部洋育, 鈴木雅晴: 切削中におけるエンドミルの挙動と加工精度との関係 (第 1 報), 精密機械, **43**, 7 (1977) 803.

情 報

55 年度科学技術研究費 5 兆円

総理府統計局がこのほど発表した昭和 55 年度わが国の会社, 研究機関, 大学などの科学技術研究費総額は 5 兆 2 462 億円に達し, 国民総生産 (GNP) に占める割合は 2.19% と 54 年度 (2.07%) より伸びたことが判明した。

また, 会社の研究費総額 (3 兆 1 423 億円) が, 法人企業の交際費総額 (3 兆 1 152 億円) を戦後初めて上回った。

会社等の中で研究費が多い産業をみると, 産業用ロボットなどを研究・開発する電気機械工業がトップ (26%) で, 以下, 化学工業 (17.8%), 輸送用機械工業 (16.2%) などの順となっている。

総額 5 兆 2 462 億円を研究主体別にみた場合, 会社等が全体の 59.9% を占め, 前年度より 1.8% 増えた。大学等は 25.5%, 研究機関は 14.6% で, この順位は前年度と同じであった。

更に研究費の国・地方公共団体と民間の負担割合は, 民間が 3 兆 7 763 億円と, 前年度の 70.4% から 72.0% に上昇したのに対し, 国・地方公共団体は 1 兆 4 650 億円と前年度の 29.5% から 27.9% に低下し, 民間主導型がより顕著になった。

研究費の国際比較では, 米国は日本の 2.8 倍だが, 西ドイツは日本の 0.87 倍, フランスは約半分, 英国は約 1/3 で, 日本の研究費総額は西側先進国の中では, 米国に次いで第 2 位となっている。

また, 国際技術交流をみると, 会社等の 55 年度の技術輸出件数は 4 万 1 003 件と前年度と比べ 436 件増であり, 受取額も 1 596 億円となり, 265 億円増えた。

一方, 技術輸入は 7 248 件と, 件数で 236 件増えたものの, 支払額は 2 395 億円と対前年度比 0.6% 減となった。

これは 49 年度以来の現象で, 技術の入超傾向が鈍化したことを物語っている。(服部 敏夫)