エンドミルによるコーナ部加工に関する研究

(第2報)*

——切削力の加工精度に及ぼす影響と精度改善について——

岩 部 洋 育** 藤 井 義 也**

Study on Corner Cut by End Mill (2nd Report)

—Influence of Cutting Force on Machining Accuracy and Improvement of Accuracy—

Hiroyasu IWABE and Yoshiya FUJII

This paper deals with influence of cutting force on machining accuracy and improving method of the accuracy in corner cut by end mill. Errors by corner cut are extremely greater than that of steady state cutting. When a cutter radius is equal to a radius of curvature of the corner, maximum machining error becomes 13 to 22 times as large as that of steady state cutting. Describing the position of maximum error by rotating angle ϕ from start point of corner cut, the position by the angle is $\phi=10^\circ$ in down milling and $\phi=0^\circ$ in up milling. And also cutting forces in corner cut are measured, and machining accuracy is analysed by a simple error generating model that depends upon cutting force vector and resulting stiffness of machine-tool-workpiece system. Calculated values or shape errors are almost coincident with that of experimental values. To improve machining accuracy, plunge and twice looped path cutting are recommended. But under the experimental conditions, difference of accuracy between steady state cutting and corner cut is smaller by diameter 17 mm in down milling and 14 mm in up milling.

Key words: end milling, corner cut, cutting force, machining accuracy, error generating model, looped cutter path, plunge cutting, improving method.

1. 緒 言

コーナ部をもつ内面の加工にエンドミルを用いる場合、工具半径と内面の曲率半径の差が小さい程、実半径方向切込みが増大する。その結果コーナ部で切削面積及び切削力が急増し、加工精度の低下及び工具損傷の原因となっている。前報¹⁾においてはコーナ部における切削機構を幾何学的に解析するとともに、過渡現象を軽減する方法としてループ経路による加工法を提案し、その有効性を示した。しかしコーナ部における加工誤差及びその生成機構は明らかではなく、精度改善の対策に関しても十分検討されていない。

そこで本報ではコーナ加工における切削力及び凹曲面の加工精度を測定し、切削力の挙動が加工精度に及ぼす影響を考察するとともに、機械-工具-工作物系の総合剛性に基づく加工誤差生成機構の検討を行う。さ

らにループ経路による加工を含めた各種切削条件により精度改善を試み、同一条件における直線部の加工精度と比較して改善効果を検討する。

2. 実験方法

実験に使用した工作機械、エンドミル、工作物及び主な切削条件は次の通りである。

工作機械：アマダ BM-104 NC フライス盤

制御装置：FANUC 10 M (1 μ m/pulse)

エンドミル：直径 20, 18, 17, 16, 14, 12 mm, 4 枚刃,
ねじれ角右 30°, 高速度鋼

工 作 物：炭素鋼 S 45 C (図 1 参照)

切削条件：切削速度 20.5 m/min, 軸方向切込み 20 mm, 半径方向切込み 1 mm, 送り 0.1 mm/刃, 上向き切削, 下向き切削

切 削 剤：マシンオイル 2.3 l/min

図 1 は工作物の形状及び実験に使用した 4 種類の工具経路を示したものである。第 1 象限はコーナ部の曲率半径と等しい工具半径, 第 2~第 4 象限はコーナ部

* 原稿受付 平成 3 年 3 月 16 日。1989 年度精密工学会秋学大会学術講演会 (平成元年 11 月 7 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)

Fig. 1 Workpiece and cutter path

の曲率半径より少し小さい工具径による場合である。第3及び第4象限はループ経路による加工を示し、前者はループ1回、後者はループ2回の工具経路である。また図には示していないが、コーナ部の曲率半径と等しい工具径を用い、主軸方向に送りを与える底刃加工も行っている。なお比較のためにコーナ加工の前

後で、x軸及びy軸に平行な面を直線加工するが、それぞれその前半部または後半部で仕上条件により測定基準面を作成している。

工作物はジグを用いてテーブル上面に固定し、図1に示す第3及び第4象限における加工もジグを180°回転させて、第1及び第2象限の位置で行っている。加工精度は前述した基準面を利用して三次元測定機(ミットヨ F304)により測定した。切削力はひずみ計を用いた工具動力計によりx,y及びz分力を測定し、電磁オシログラフに記録した。

3. 実験結果と考察

3.1 加工精度と切削力

図2はコーナ部及びその前後に加工を行った直線部の加工誤差である。直線部は送り方向に2 mm及び1 mm間隔、コーナ部は凹曲面に沿って曲率中心より中心角10°間隔に測定し、それぞれ板厚方向の平均値により示している。(a)図は下向き切削、(b)図は上向き切削の結果であり、直径20 mm及び17 mmの場合を比較しているが、17 mmについてはループ1回の加工による結果も併記している。図よりコーナ部においては下向き切削の場合削り残しによる正の誤差、上向き切削の場合主として削り過ぎによる負の誤差を生じており、この傾向はねじれ刃を用いた直線加工による誤差と一致する²⁾。誤差の最大値は直径20 mmの場合349 μm(下向き切削)及び-283 μm(上向き切削)と大きく、コーナ部手前の直線部における誤差15.5~21.4 μmと比較すると絶対値は13~22倍であ

(a) Down milling

(b) Up milling

Fig. 2 Machined accuracy in corner cut

Fig. 3 Cutting force in corner cut

る。直径 17 mm の工具を用いると切削面積が減少するために両切削方式とも加工誤差は改善されるが、それぞれ最大値が $245 \mu\text{m}$ （下向き切削）及び $-126 \mu\text{m}$ （上向き切削）に改善されるのみである。

誤差の形状は、下向き切削の場合コーナ手前 2 mm より正の誤差が急激に増加し、中心角 $\phi=10^\circ$ で最大値を示す。その後誤差は徐々に減少して $\phi=90^\circ$ ではほぼ直線部の誤差に一致する形状を示し、直径 17 mm の場合も同様である。一方、上向き切削の場合、コーナ手前 4 mm より負の誤差が急激に増加し、中心角 $\phi=0^\circ$ で最大値を示す。その後誤差は減少し、直径 20 mm では $\phi=35^\circ$ 、直径 17 mm では $\phi=60^\circ$ 付近で正の誤差に転じている。なお前者は $\phi=70^\circ$ において正の最大値をもつ凸形状が特徴的である。これらの誤差形状の生成機構については後述する。

図 3 は上向き切削によるコーナ加工の切削力曲線であり、(a) 図に直径 20 mm、(b) 図に直径 17 mm の結果を示す。横軸は切削時間を示しており、破線の時刻には工具中心点 PC(XC, YC) の指令位置を併記している。ただしここで用いる X-Y 座標系は、後述の図 5 に示すように、コーナの前後で加工する直線部をそれぞれ X 軸及び Y 軸としている。(a) 図の場合、実験の条件では工具中心が点 PC(14, 10) 以前は定常区間の切削となるため、各分力とも小さい値を示す。

しかしコーナ部に近づくにつれて各分力は増加し、点 PC(10, 10) で y 分力は最大値を示す。この挙動は前報¹⁾で示した切削面積の変化によく対応している。正の y 分力によりエンドミルは工作物に引き寄せられるため、y 分力が最大値を示す位置、すなわち図 2 (b) の $\phi=0^\circ$ において加工誤差も最大となる。しかし切削力はその後急速に減少し、再び定常区間における値を示すが、その際 x 分力と y 分力が入れ代わることになる。一方 (b) 図に示すように工具径を小さくするとコーナ部は $\phi=0^\circ$ より $\phi=90^\circ$ の間で加工され、各分力の最大値は減少するが、定常区間の値に比べるとかなり大きい。

下向き切削による切削力曲線は示していないが、図 3 の結果と比較すると次の点が主に異なっている。すなわち y 分力の方向が逆となること、x 分力の絶対値が小さいこと及びコーナ以前では負となる x 分力がコーナ以後で正に転ずることである。

図 4 は直径 17 mm の工具でループ 1 回の前加工を行い、その後仕上加工を行った際の切削力曲線である。図より中心角 $\phi=0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で切削力は大きく減少しており、特に (b) 図に示す上向き切削の結果を図 3 (b) と比較するとループ 1 回の前加工による切削力低減の効果が明らかとなる。上向き切削の x 分力は他の分力より大きい、最大値を示す $\phi=0^\circ$ にお

Fig. 4 Cutting force in corner cut by finishing (roughing : looped path cutting)

いて主分力に相当し、その後中心角の増加につれて減少するため加工精度に与える影響は小さい。そのため両切削方式ともループ加工によって図2に示すように加工精度が改善している。

3.2 加工誤差生成機構

図2より、凹曲面における加工誤差の値は切削方式により大きく異なるとともに、加工面に沿って特異な形状をしている。そこで次に簡単なモデルにより、その生成機構について検討する。

図5は以下の解析で用いるモデル及び座標系を示しており、点 $O_0(X_0, Y_0)$ は凹曲面の曲率中心である。工具中心は二点鎖線上を点 Q_a より点 Q_b 、点 Q_c を経て点 Q_d まで指令されるものとする。工具半径 R_c に比べて1刃当たりの送り S_z が十分小さいため、切れ刃の軌跡は半径 R_c の円弧で近似できる。また実験の条件ではツースマークによる粗さは無視できるため、破線で示す仕上予定の加工面は工具中心点 $PC_i(XC_i, YC_i)$ を中心とする半径 R_c の円弧の包絡線により創成される。しかし切削力の主として x 及び y 分力(F_{xi} , F_{yi})によって工具及び工作物に変形し、両者にはそれぞれ相対変位 dX_i 及び dY_i が生じる。また解析を容易にするため相対変位をすべて工具中心点 PC_i の変位として考えると、点 PC_i が点 $PC_i'(XC_i + dX_i, YC_i + dY_i)$ に変位することになって、切れ刃の軌跡は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} & \{X - (XC_i + dX_i)\}^2 \\ & + \{Y - (YC_i + dY_i)\}^2 \\ & = R_c^2 \\ & dX_i = F_{xi}/K_x \\ & dY_i = F_{yi}/K_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで K_x 及び K_y は機械-工具-工作物系の x 及び y 方向の総合剛性である。

図5において、仕上げを予定された工作物上の点 $PW_j(XW_j, YW_j)$ における加工誤差 E_j の生成機構は次のように考えることができる。すなわち、工具中心点 PC_i 、点 PC_{i+1} 、 $\dots$ 、点 PC_m が切削力により点 PC_i' 、点 PC_{i+1}' 、 $\dots$ 、点 PC_m' に変位し、これらの点を中心とする切れ刃の軌跡を C_i' 、 C_{i+1}' 、 $\dots$ 、 C_m' とすると、図5においては点 PW_j を最も深く削る軌跡 C_{i+1}' によって加工誤差 E_j が生じる。

誤差 E_j は点 PW_j の法線方向の

誤差であり、次の手順により求めることができる。

- (1) 直線 L_j を与える式(2)を式(1)に代入し、切れ刃の軌跡 C_i' と直線 L_j の交点 PL_j を求める。
- (2) 手順(1)を $i=1 \sim m$ まで繰り返し、点 O_0 との距離が最大となる点 $PL_{jmax}(XL_{jmax}, YL_{jmax})$ を求める。
- (3) 式(3)により E_j を求める。

$$\left. \begin{aligned} & Y = \cot \phi_j (X - X_0) + Y_0 \\ & \phi_j = \tan^{-1} \{ (X_0 - XW_j) / (Y_0 - YW_j) \} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Fig. 5 Generating mechanism of shape error at inside corner

(a) Down milling

(b) Up milling

Fig. 6 Relationship between predicted shape errors at inside corner and experimental values

$$E_j = R_c - \sqrt{(X_{Lj\max} - X_0)^2 + (Y_{Lj\max} - Y_0)^2} \quad (3)$$

上記の手順 (1)~(3) を $j=1 \sim n$ について繰り返すと、凹曲面に沿った加工誤差の計算値が求められる。図 6 は直線加工による実験から定めた総合剛性の値 (直径 20 mm : $K_x=18.33$, $K_y=9.69$, 直径 17 mm : $K_x=11.41$, $K_y=6.88$ N/ μ m) を用いて、計算値と実験値を比較したものである。図より下向き切削の場合、●印で示す計算値はコーナの手前 2 mm 付近から急増して中心角 $\phi=10^\circ$ で最大値を示し、その後徐々に減少しており、直径 20 mm 及び 17 mm とともに○印で示す実験値の傾向とよく一致している。また上向き切削の場合も、計算値と実験値の形状はよく一致しており、特に直径 20 mm においては中心角 $\phi=20^\circ$ 以降で誤差の値もよく一致している。しかし大きな切削力が作用し、加工誤差が大きくなる程実験値との差が大きくなり、実験値が最大値を示す位置で計算値との差はそれぞれ直径 20 mm の場合 79~95 μ m、17 mm の

場合 50~66 μ m である。これは実験値を板厚方向の平均値により示しているため、計算値に用いた切削力は各切れ刃ごとの平均値としたことによる。より厳密に解析するためには、時々刻々に変化する切削中の工具及び工作物の変位に基づく文献 2) の方法を用いる必要がある。

3.3 精度改善の方法とその効果

図 7 はコーナ部の精度改善を目的とし、工具直径、半径方向切込み、ループの回数等を変化させて実験を行い、その効果をそれぞれ誤差の最大値と最小値の幅

Fig. 7 Improving methods of machined accuracy and error range

Table 1 Comparison of errors by steady state cutting and corner cut

D_c mm	Up milling		Down milling	
	Steady state	Corner	Steady state	Corner
17	4	6.2 (18.8)	27	20.9 (9.5)
16	7	2.5 (10.8)	31	20.4 (15.2)
14	5	-2.5 (8.6)	42	19.2 (8.9)
12	26	14.1 (15.1)	192	104.7 (59.5)

() standard deviations, μm

で示したものである。図より通常の方法によるコーナ加工 (type II) において、工具直径を 20 mm より 17 mm に、半径方向切込み Y_w を 1.0 mm より 0.5 mm に減少させると、誤差の幅は大きく減少する。またループ経路を用いると、直径 18 ないし 14 mm において同様に誤差の幅は減少し、上向き切削において精度改善の効果が大きい。しかし直径 20 mm による直線加工 (type I) における誤差と同程度まで改善するためには、底刃加工またはループ 2 回による加工が必要である。

このほかに軸方向切込みの減少及び主軸電流値を用いた拘束適応制御法が検討されているが³⁾、前者は底刃加工と同様に加工時間が長くなり、後者は設備が高価となるため実用には問題が残る。

そこで最も実用的と考えられるループ 2 回の加工に注目すると、直径 14 mm の工具による結果が最もよく、それ以下の直径では工具剛性の低下により精度は悪化する。一方ループ経路による加工はループを移動する時間だけ加工時間が長くなり、実験の条件では直径 14 mm の場合 15.74 s の増加となる。この時間をコーナ部における送りを減少させることによって消化すれば、送り速度 F は 52.0 mm/min となる。この送り速度によって加工誤差の幅は減少するが、ループ 2 回による結果と比較すると 2 倍以上大きくなっている。

表 1 は工具直径がループ 2 回加工によるコーナ部と定常区間における誤差に及ぼす影響を平均値及び標準偏差値により比較している。表より下向き切削では直径 17 mm を用いるとコーナ部と直線部で誤差の差が小さく、標準偏差値も小さい。一方、上向き切削では直径 17~14 mm による両部の誤差は小さく、誤差の

差も小さい。しかし直径 14 mm を用いると標準偏差値が最も小さく、コーナ部における精度の改善効果が大きい。

前報¹⁾で幾何学的に求めた最適工具径 (17 mm) より小さい工具径においてよい結果が得られている理由は、上向き切削の場合背分力が主分力に比べて小さいため、工具剛性が加工精度の低下に及ぼす影響が減少するためと考えられる。

4. 結 論

- (1) コーナ部の加工誤差は定常区間の誤差と比べて非常に大きく、曲率半径と等しい工具半径を用いると最大値は定常区間における値の 13~22 倍にまで達する。
- (2) コーナ部の加工誤差は下向き切削の場合正、上向き切削の場合主として負となり、それぞれ最大値は中心角 $\phi=10^\circ$ 及び 0° に生じている。
- (3) コーナ加工における切削力曲線を測定するとともに、機械-工具-工作物系の総合剛性に基づく簡易モデルを用いてコーナ部の加工誤差を計算し、実験値またはその形状と計算値がよく一致することを示した。
- (4) コーナ部の加工精度改善を試み、底刃加工とループを 2 回用いる加工法が有効であることを示した。なお実験の条件では、下向き切削の場合直径 17 mm、上向き切削の場合 14 mm の工具を用いると定常区間とコーナ部における誤差の差が小さい。

最後に本研究に対して御助言をいただきました北海道大学教授斎藤勝政先生に心より御礼申し上げます。また工具は(株)不二越及び(株)オー・エヌ・ジー、工作物は大同特殊鋼(株)の御好意により、実験には今井純一技官の協力をいただきました。付記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 岩部洋育, 藤井義也, 斎藤勝政, 岸浪建史: エンドミルによるコーナ部加工に関する研究——コーナ部における切削機構の解析と新しい加工法, 精密工学会誌, 55, 5 (1989) 841.
- 2) 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, 精密機械, 43, 7 (1977) 807.
- 3) 李 勇, 岩部洋育, 藤井義也: エンドミルによるコーナ加工の精度改善に関する研究, 日本機械学会論文集 (C 編), 56, 532 (1990) 3444.