

エンドミルによる薄壁形状部品の 加工精度に関する研究*

(切削力による工作物および工具の変形解析と加工精度)

岩部 洋育*¹, 島田 智晴*², 横山 和宏*¹

Study on Machining Accuracy of Thin Wall Workpiece by End Mill (Analysis of Deflection of Workpiece and Tool due to Cutting Force and Machining Accuracy)

Hiroyasu IWABE, Tomoharu SHIMADA and Kazuhiro YOKOYAMA

It is very difficult to machine the side surface of a thin wall workpiece with precision using an end mill because the deflection of the thin wall workpiece due to the cutting force is larger than that of a thick wall workpiece. There are a number of unclarified points regarding to the machining accuracy of a thin wall workpiece, and an error avoidance method has not been established. Therefore, in this study we analyze deflection of the workpiece and tool using FEM and present basic data on how to realize precision end milling of a thin wall workpiece. The main results are as follows. (1) The loads acting at the nodal points of the FEM model workpiece and tool are calculated based on the cutting mechanism of a helical end mill. (2) The deflections of the workpiece and tool at the surface generating point on the cutting edge are calculated using the FEM under forces obtained in (1). The machining error of the side surface is obtained from the relative displacement of the workpiece and tool. (3) Calculated values of machining error almost coincide with the experimental values; thus, the appropriateness of the meshed elements, assumptions of cutting force distribution and the calculation method for the nodal load are verified. (4) The displacement ratios of the workpiece and tool to the calculated values of machining error are shown. Under experimental conditions, the former ratio exceeds 0.5 in the region of the thin wall workpiece with height exceeding 15 mm.

Key Words: End Milling, Thin Wall Workpiece, FEM, Machining Accuracy, Deflection Analysis, Cutting Force

1. 緒 言

エンドミルは直径に比べて切れ刃長さが長いので、通常は切削力による主軸を含む工具の変形に基づく加工誤差が問題となる⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、コンプレッサの圧縮機に使用されるスクロールや航空機部品に見られるハニカム形状のように、壁の高さに比べてその厚さが薄い薄壁形状の加工においては、工具に比べて工作物の剛性が相対的に減少する。特に薄壁の上面近傍における剛性の急激な減少は避けられず、加工精度を大きく低下させることになる⁽³⁾。

上記のような薄壁形状のエンドミル加工に関する研究は少なく、Ti合金を対象として行った Altintas らの報告⁽⁴⁾⁽⁵⁾があるにすぎない。これらの報告では切削力による工作物と工具の相対変位が大きくなる条件で検討しており、ともにびびり振動が発生している。そ

のため、通常の仕上げ条件における加工誤差の形状や大きさ、さらには壁の高さによって変化するであろう加工誤差に占める工作物および工具の変位の比率等、加工精度の改善方法を検討する上で不明な点が多い。

そこで本研究は、薄壁形状の高精度加工を実現するための基礎資料を得ることを目的とする。本報では直線形状の薄壁を工作物に用い、仕上げ条件により側面加工を行って加工誤差ならびに切削力を測定した。また切削力によって生ずる工作物および工具の変形を有限要素法により解析するため、それらの要素分割を行った。有限要素法解析においては、切削力をねじれ刃の切削機構に基づいて、加工面を創成している切れ刃点に一致する節点および近傍の節点に与えている。また工具の回転に伴う切れ刃点の移動に対応させて、工具と工作物の変位を計算し、壁の下面から上面まで両者の相対変位により加工誤差の予測値を求めている。

加工誤差の予測値は実験値にほぼ一致しており、要素分割、切削力分布の仮定ならびに節点荷重の妥当性

* 原稿受付 1996年3月26日。

¹ 正員, 新潟大学工学部 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。

² 国際電気(株) (〒105 東京都港区虎ノ門2-3-13)。

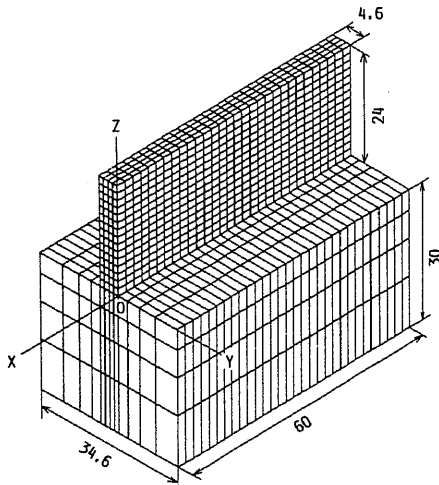


Fig. 1 Workpiece shape and elements meshed

が示された。また工作物の送り方向で変化する工作物の剛性が加工誤差に及ぼす影響および加工誤差に占める工作物ならびに工具の比率と壁高さ方向におけるそれらの変化について検討した。

2. 工作物および工具の変形解析

2・1 工作物および工具の形状と要素分割 図1は本研究において有限要素解析の対象とした工作物の形状および要素分割を示している。工作物は長さ60 mm、幅34.6 mm、高さ30 mmの土台の上に、幅4.6 mm、高さ24 mmの薄壁が載っている形状である。要素の分割はすべて8節点立体要素により行い、薄壁部の要素サイズは $\Delta X=2$ mm、 $\Delta Y=1.15$ mmおよび $\Delta Z=1.6$ mmとしている。有限要素法を用いて変形解析を行う場合、要素の形状および分割サイズは解析結果に大きく影響を与える。そのため、工作物の要素サイズの選定については図1とほぼ同形状のモデルおよび同一の座標を用い、Z軸上の上面から五つの節点に合計100 Nの荷重を分布荷重として与え、変位の収束性を確認している。また、横軸に要素サイズ、縦軸に変形を示す図を用い、各軸とも要素サイズの小さい二つの値(X軸方向: 0.5, 1.0, Y軸方向: 0.4, 0.6, Z軸方向: 1.2, 2.0 mm)による変形を通る直線が、要素サイズ零となる縦軸と交わる点(変形の予測値)を求め、選定した上記の要素サイズによる変形がともに各軸の予測値より3%以内の誤差範囲に入っていることを確認している。

一方土台の部分に関しては薄壁への変形の影響が少ないため、X軸方向を除いて傾斜を付けた分割を採

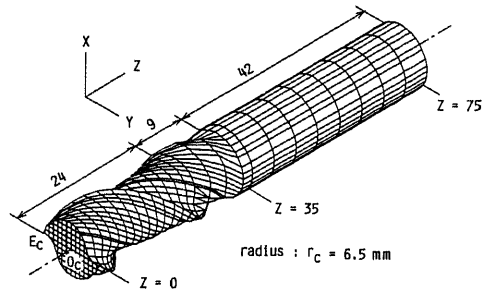


Fig. 2 Tool shape and elements meshed

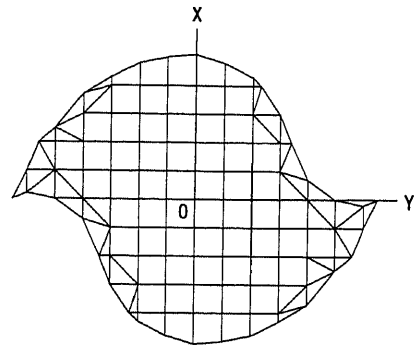


Fig. 3 Tool cross section and elements meshed (Z=0 mm)

用し、 $\Delta Y=1.15$ ないし 5.6 mm および $\Delta Z=4.48$ ないし 11.2 mm としている。工作物に関して総要素数は3240、総節点数は4340であり、直交座標系の原点oは切削終了位置の薄壁下面に相当する点としている。

図2は図1と同様に、解析の対象とした工具の形状および要素分割を示している。工具は直径13 mm、刃長24 mm、全長75 mm、2枚刃、ねじれ角右45°である。分割要素は基本的には8節点立体要素を使用しているが、工具の断面形状は図3に示すように複雑であり、刃先近傍の外周部には三角柱要素を用いている。要素サイズは切れ刃に相当する $Z=0$ ないし 24 mmにおいて、 $\Delta X=\Delta Y=1$ mm および $\Delta Z=1.6$ mm としている。なお、 $Z=\Delta Z \cdot n$ ($n=1, 2, \dots$) における工具の断面は、工具半径を r_c とすると図3に示した $Z=0$ mmの断面を時計方向に $\theta_0=\tan \eta(\Delta Z \cdot n/r_c)$ 回転させた断面となる。

シャンク部は切れ刃部の変形にほとんど影響を与えないため、 $\Delta Z=5$ mmと大きく分割している。図4は過渡区間における2断面とシャンク部の断面の要素分割を示している。工具に関する総要素数は3056、総節点数は2756である。

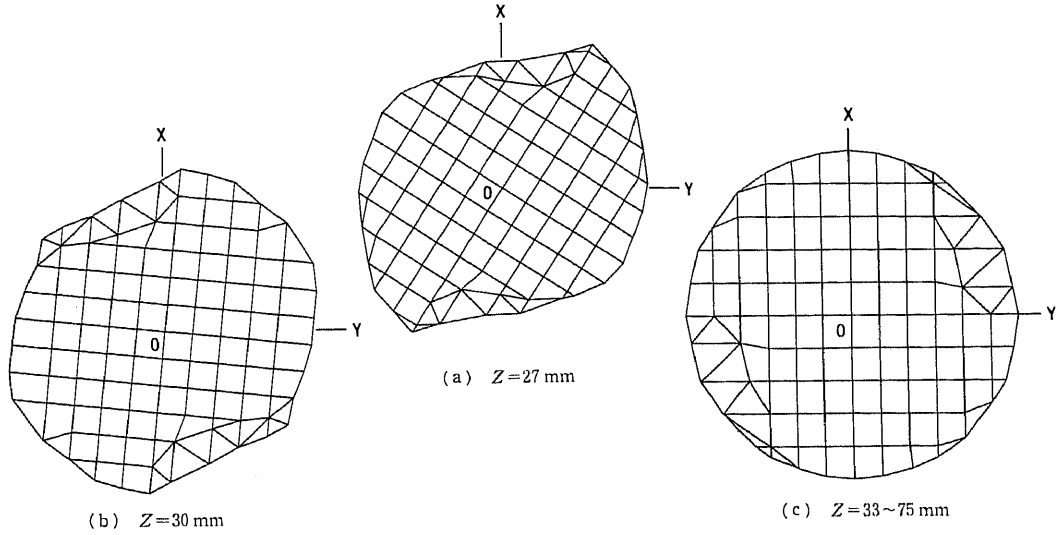


Fig. 4 Variation of tool cross section and elements meshed

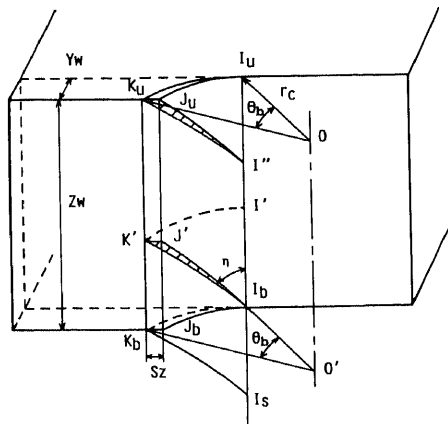
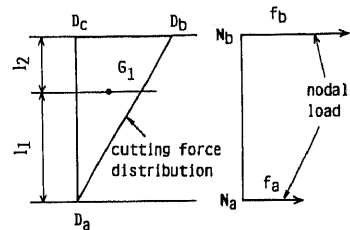
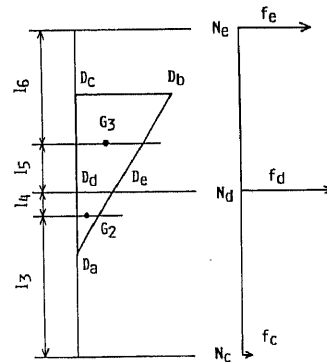


Fig. 5 Cutting mechanism of helical edge (down milling)

2.2 ねじれ刃による切削機構と節点荷重の計算
 図1および2に示した要素の節点に加える荷重は、後述する切削実験により求めているが、荷重および荷重の分配は、図5に示すねじれ刃による切削機構に基づいて定めている。図において工具は中心軸 $00'$ および切削している切れ刃位置(K_bI_b , $K'I_b$, K_uI'')のみを示し、その他は透視している。切れ刃は K_bI_b の位置より切削を開始するが、 $K'I_b$ の位置より加工面の創成を始める。実験の条件では半径方向切込み $Y_w=0.2$ mm, 工具半径 $r_c=6.5$ mm, ねじれ角 $\eta=45^\circ$ であるため、距離 I_bI' は1.6 mmとなる。工具の回転に伴って、切れ刃はあたかも上方に移動するかのごとくに切削が進行する。その後 K_uI'' の位置を経て点 I_u に



(a) 2-points loading



(b) 3-points loading

Fig. 6 Cutting force distribution and nodal load model

達して加工面の創成ならびに切削を終了する。斜線部は切削面積であり、切れ刃の接触角 θ_b が約 14.3° と小さい範囲では、この面積を展開するとほぼ三角形となる。また、切削力が切削面積にほぼ比例する⁽⁵⁾ため、切れ刃 $K'I_b$ に作用する切削力分布を三角形分布と仮定することにする。

以上の切削過程に基づいて、工作物および工具の変形解析は、汎用構造解析プログラム(ansys-pc)を用い、弾性変形の静的解析を行った。なお、計算は基本的に切れ刃が $I'I_b = AZ$ 移動することに行っており、荷重は工作物に対しては点 I' から I_b までに含まれる節点、工具に対しては点 K' から I_b までに含まれる節点に加えている。また、上記の切削過程は切削に関与する切れ刃が1枚の場合の説明であるが、実験の条件では切れ刃が図5に示した点 I_u に達する以前に次の切れ刃が点 K_b より切削を開始するため、節点への荷重を重ね合わせて計算を行っている。

図6は切削力分布および節点荷重のモデル図であり、図6(a)は切削力分布 $D_aD_bD_c$ の両端が節点 N_a および N_b に一致する場合である。節点荷重 f_a および f_b は三角形 $D_aD_bD_c$ の重心 G_1 からの距離 l_1 および l_2 に逆比例するように式(1)から求められる。図6(b)は節点 N_d が切削力分布の中間にある場合である。節点 N_d で分割された三角形 $D_aD_bD_c$ および台形 $D_aD_eD_bD_c$ の重心をそれぞれ G_2 および G_3 とすると、節点荷重 f_c, f_d および f_e は各重心からそれぞれの節点までの距離 l_3 ないし l_6 に逆比例するように、式(1)から求められる。ただし、式(1)の F はそれぞれ切削力の x, y または z 成分である。

$$\left. \begin{aligned} f_a &= F l_2 / (l_1 + l_2) \\ f_b &= F l_1 / (l_1 + l_2) \\ f_c &= F l_4 / (l_3 + l_4) \\ f_d &= F l_3 / (l_3 + l_4) + F l_6 / (l_5 + l_6) \\ f_e &= F l_5 / (l_5 + l_6) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

2.3 荷重条件および拘束条件 図7は縦軸に工作物の高さおよびZ軸方向に分割した節点の位置を

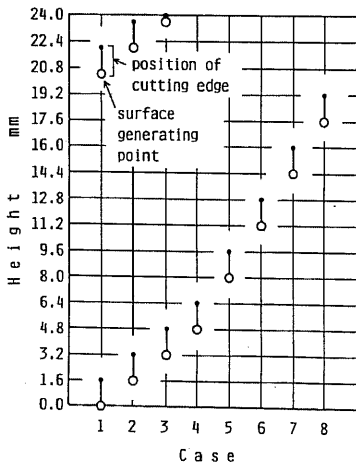
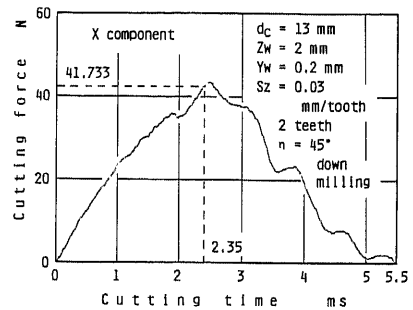


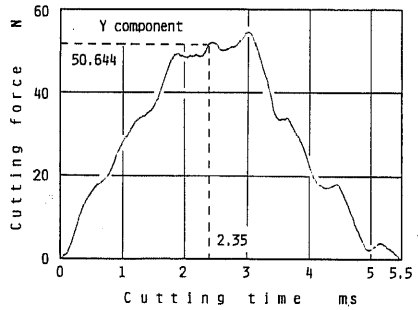
Fig. 7 Eight cases for deflection analysis

示し、変形解析を行った八つのケースにおける切れ刃の位置を表現したものである。それぞれ○印と●印の間に切れ刃が存在し、○印の位置で加工面を創成していることを意味する。ケース1ないし3においては2枚の切れ刃によって切削が行われ、同時切削の状態である。壁の高い位置は先行している切れ刃が加工面を創成しているが、その点(○印)は節点上にないため荷重点の数が多くなる。ケース1および2では5点荷重、ケース3では4点荷重となり、その他のケースは1枚の切れ刃による切削となるため、すべて2点荷重である。

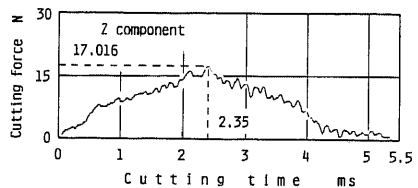
図8は後述する切削実験により得られた切削力分力である。図5において切削開始より切れ刃が $K'I_b$ に達するまでの時間は2.35 msであり、この時刻における各分力 F_x, F_y および F_z の値は図中に示すとおりである。式(1)の F に F_x の値を代入すると、工作物



(a) X component



(b) Y component



(c) Z component

Fig. 8 Cutting force curve

の節点 N_a ないし N_e に与える荷重の x 分力 $f_{x,a}$ ないし $f_{x,e}$ が求められる。同様に F_y および F_z の値を式 (1) に代入することにより、各節点荷重の y および z 分力が求められる。

一方、工具は切れ刃がねじれているため、工作物の節点 N_a に対応する工具側の節点 N'_a に加える荷重 $f'_{x,a}$, $f'_{y,a}$ および $f'_{z,a}$ を次式を用いて変換している。

$$\begin{Bmatrix} f'_{x,a} \\ f'_{y,a} \\ f'_{z,a} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_b & \sin \theta_b & 0 \\ -\sin \theta_b & \cos \theta_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{x,a} \\ f_{y,a} \\ f_{z,a} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

図 1 に示した工作物の拘束条件は、工作物下面の全節点の変位を $U_x=U_y=U_z=0$ としている。一方図 2 に示す工具側の拘束条件は、コレットに把持されるシャンク部の中心軸上の $Z=35$ mm において $U_x=U_y=0$, $U_z=75$ mm において $U_x=U_y=U_z=0$ とするとともに、回転変位を拘束するため $Z=75$ mm の断面において、シャンク部の外周の $Y=6$ および -6 mm の節点変位をともに $U_x=0$ としている。なお、工作物および工具の縦弾性係数はそれぞれ $E_w=206$ GPa および $E_c=578.2$ GPa の値を用いた⁽⁶⁾。

3. 実験条件および方法

実験に使用した工作機械、工具および切削条件は次のとおりである。

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)

工 具：直径 13 mm, 2 枚刃, ねじれ角右 45°, 超

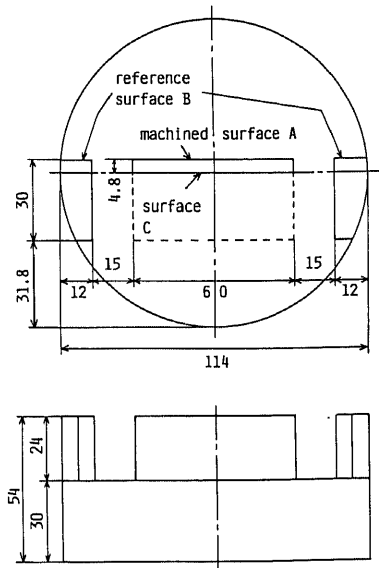


Fig. 9 Workpiece shape and size

硬ソリッドエンドミル

工 作 物：炭素鋼 S 45 C (図 9 参照)

切削条件：切削速度 60 m/min, 送り 0.03 mm/tooth, 半径方向切込み 0.2 mm, 軸方向切込み 24 mm, 下向き切削, 湿式 (1.3 L/min, マシンオイル)

図 9 は実験に使用した工作物の形状および寸法を示している。直径 114 mm, 厚さ 54 mm の円板状の工作物をジグを用いてテーブルに固定し、まず図に示す形状に前加工を行った。前加工の方法は、破線で示すように 30 mm の厚さの壁の状態まで加工面 A および基準面 B を仕上げ、その後面 C の位置まで壁を削りとることにより行った。その際軸方向には均等に 6 回の切込みを与え、さらに最終の加工において半径方向切込みを与えずに工具を一往復させて壁の厚さを 4.8 mm に仕上げた。その後上記の切削条件により加工面 A の加工を行って壁の厚さを 4.6 mm にするとともに、基準面 B も仕上げ条件により作成している。加工誤差の測定は機械に取付けたままの状態、基準面 B に基づいて電気マイクロメータを用いて行った。

4. 解析結果および実験結果と考察

4.1 工作物および工具の変形解析 図 10 は横軸に変位、縦軸に壁の高さをとって有限要素法による解析により求めた工作物の変位を示しており、送り方向 (X 軸) の切削位置をパラメータとして比較している。なお変位を負とした理由は、切削力が工作物に対しては図 1 に示した Y 軸の負の方向に作用するためである。工具の回転によって切削力が作用する位置および加工面を創成している切れ刃位置は壁の下面から上面に移動する。そのため、図 10 に示した工作物の変位

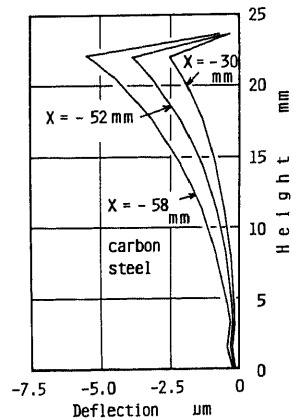


Fig. 10 Deflection of thin wall workpiece

は、図7の○印で示した節点における値を計算しており、それらの値を下面から上面まで結んで示している。図10より、工作物の変位は壁の下面では小さいが、上面に近づくにつれて工作物の剛性が低下するために増加し、 $Z=22\text{ mm}$ の位置で最大となる。その後上面の25 mmまで変位は大きく減少しているが、これはねじれ刃の切削機構に基づくもので、この位置から切削面積が減少し、それに伴う切削力の急激な減少によるものである。工具の剛性が無限大ならば工具の変形は零となるため、図10に示した工作物変位のみが切削後には元にもどり、削り残しによる加工誤差となる。一方工作物の剛性は送り方向にも変化し、剛性の最も低い端部の近傍($X=-58\text{ mm}$)で変位は最も大きい。切削位置が中央部($X=-30\text{ mm}$)に近づくにつれて工作物の剛性が増加し、変位は最も小さくなる。各切削位置で最大値を示す壁高さ22 mmの位置で比較すると、端部近傍で $5.4\text{ }\mu\text{m}$ の変位は中央部で $2.5\text{ }\mu\text{m}$ に半減している。

図11は図10と同様の座標軸を用いて、工具の変位の解析結果を示したものである。工具の場合、切削力はY軸の正の方向に作用するため変位は正の値となる。また、工具の回転に伴う切削力の変化は、送り方向のどの位置においても等しいと仮定しているため、工具の変位は図11に示す値だけとなる。厳密には、図10に示したように工作物の変位が送り方向で変化することによって切削力の値も影響を受けることになる。この問題に関しては今後の検討課題であるが、工具の剛性が小さい壁の下面では工作物の変位は小さく、工作物の変位が大きくなる壁の上面近傍では工具の剛性が大きくなって、工具の変位に及ぼす影響は小さくなくなると考えられる。また、解析を容易にするため、

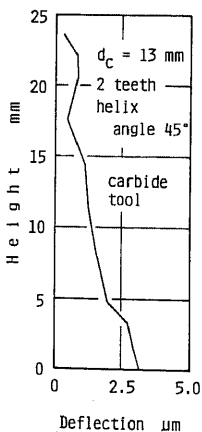


Fig. 11 Deflection of tool

本研究では工作物の変位が工具の変位に及ぼす影響を考慮していない。

図11より工具の変位は壁の下面を切削する工具先端で剛性が最も低くなるため大きな値を示す。その後工具の回転に伴って切れ刃位置は上方に移動するが、切削力の作用する位置がシャンク側に近づくにつれて工具の変位は減少することになる。なお壁高さ $Z=20\text{ mm}$ 近傍で工具変位がわずかに増加するが、これは次の切れ刃による切削が開始して切削力が増大したことによる。工作物の剛性が無限大ならば、工作物の変位は零となり、図11に示した工具変位のみが切削後に削り残しとなるため、正の加工誤差となる。

4.2 実験値と計算値の比較 図12は図10および11を用いて、工作物と工具の切れ刃位置における相対変位、すなわち加工誤差の計算値(実線)と実験値(●印)を比較したもので、工作物の変位(一点鎖線)および工具の変位(破線)も併記している。まず計算値について考えると、壁の下面では主に工具の変形による誤差が大きいが、工具の剛性の増加により $Z=5\text{ mm}$ まで誤差が減少している。しかし、その後壁の上面に移動するにつれて工作物の剛性が大きく減少して変位が増加する。そのため加工誤差は増加し、 $Z=22\text{ mm}$ で最大値を示すが、その後切削力が減少するため再び加工誤差は減少している。

一方、実験値は工作物の送り方向位置が $X=-58\text{ mm}$ における結果を示しているが、壁の各高さ位置における誤差の大きさはほぼ計算値と一致している。また誤差の形状も、一部の例外を除くと壁の下面から $Z=5\text{ mm}$ 付近まで減少するが、その後上面に移動するにつれて増加し、 $Z=22\text{ mm}$ で最大値を示した後に誤

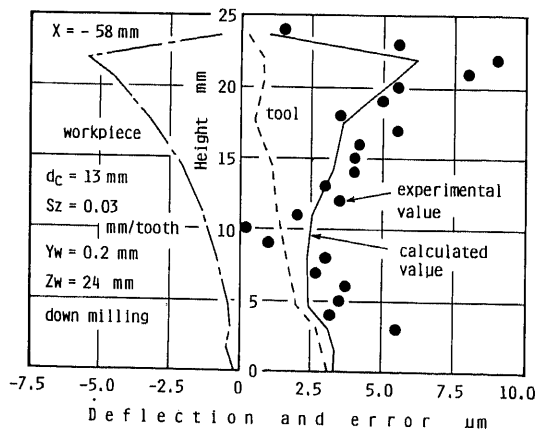


Fig. 12 Deflections of thin wall workpiece and tool and machining accuracy ($X=-58\text{ mm}$)

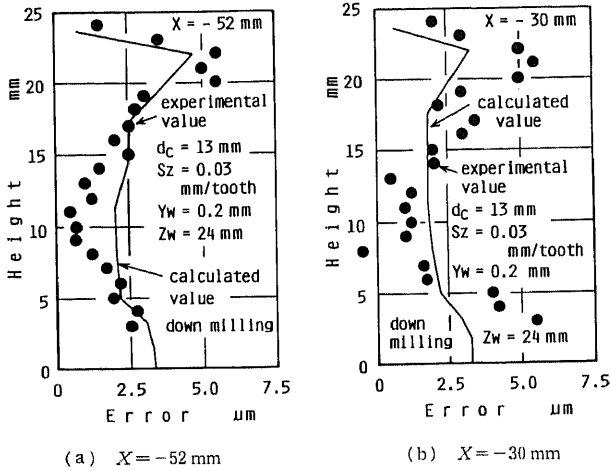


Fig. 13 Calculated and experimental values of machining accuracy (Thin wall workpiece)

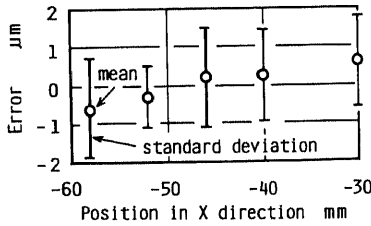


Fig. 14 Predicted error and position in X direction

差が減少しており、計算値の誤差形状とほぼ一致している。壁の各高さにおける計算値と実験値の差の平均値により予測誤差を求めると、図12の場合は $-0.63 \mu\text{m}$ と小さい。

図13は図12と同様の座標軸を用いて、他の送り方向の位置における加工誤差の計算値と実験値を比較したものである。図13(a)に $X = -52 \text{ mm}$ 、図13(b)に中央となる $X = -30 \text{ mm}$ の結果を示している。両図とも実線で示す計算値は誤差の形状および大きさがほぼ一致しており、予測誤差はそれぞれ -0.3 および $0.6 \mu\text{m}$ と小さい。

図14は工作物の送り方向切削位置による予測誤差と標準偏差値の変化を示したものである。図より、本研究における実験ならびに計算条件においては、予測誤差は $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下と小さく、標準偏差値も最大 $1.3 \mu\text{m}$ である。したがって前述した工作物および工具の要素分割、切削力分布の仮定ならびに切削力に基づいた節点荷重が妥当であったと考えられる。

図15は図12と同様の座標軸を用いて、厚壁の加工における加工誤差を図11に示した工具の変形(実線)

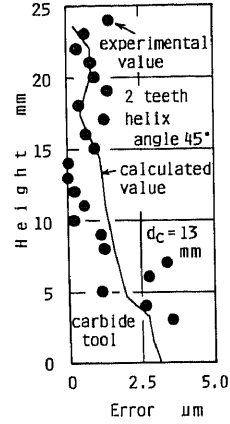


Fig. 15 Calculated and experimental values of machining accuracy (Thick wall workpiece)

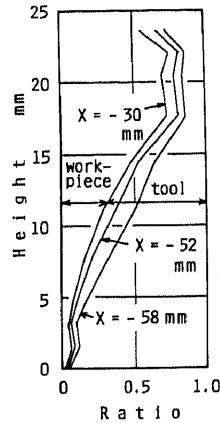


Fig. 16 Ratios of error factors

と比較したもので、工作物の中央($X = -30 \text{ mm}$)における結果である。加工誤差は壁の各高さにおいて工具の変形とよく一致しており、両者の差の平均値は $-0.5 \mu\text{m}$ 、標準偏差値は $0.8 \mu\text{m}$ と小さい。すなわち実験の条件では壁厚 30 mm の場合工作物の変形は無視できることを示している。

4.3 加工誤差要因の比率 図16は加工誤差の計算値に占める工作物および工具の比率を示したもので、工作物の送り方向の3箇所と比較している。横軸の比率は、工作物に関して示しているが、工具に関しては右側の縦軸を基準とし、数値を入れ替えればよい。図より下面では加工誤差に占める工具の比率が非常に大きい。これは図10から明らかのように、壁の下面では工作物の変位が小さく、逆に工具の変位が図11に示すように下面で大きいためである。しかし、上

面に移動するにつれて工作物の変位は増大するが工具の変位は減少するため、加工誤差に占める前者の比率が増大する。工作物の中央($X=-30$ mm)では $Z=15$ mmの高さで工作物の比率が0.5を超え、 $Z=17.6$ mmの高さで比率は最大の0.75に達している。この傾向は工作物の剛性が小さくなる端部($X=-58$ mm)に移動するにつれて大きくなっており、薄壁形状の加工においても、加工誤差に占める工作物の変位が非常に大きいことを示している。

5. 結 論

エンドミルにより薄壁形状の側面加工を行うとともに、有限要素法を用いて工作物および工具の変形解析を行った。得られた結果を整理すると次のとおりである。

(1) 実験により求めた切削力およびねじれ刃の切削機構に基づいて、要素分割を行った工作物および工具の節点に加える荷重の値を計算した。

(2) (1)で求めた荷重による工作物および工具の加工面を創成している切れ刃点における変位を有限要素法により計算し、両者の相対変位により側面加工における加工誤差の計算値を求めた。

(3) エンドミルによる薄壁形状の側面加工を行い、加工誤差の実験値を計算値と比較した。実験値と計算値は誤差の形状および大きさがほぼ一致しており、工作物および工具の要素分割、切削力分布の仮定ならびに節点荷重の計算方法およびその値の妥当性が示された。

(4) 加工誤差の計算値に占める工作物および工具の比率を示し、実験の条件では壁高さが15 mm以上では前者の比率が0.5以上と大きいことを示した。

最後に本研究を行うに当たり、実験データの整理に関して大学院生水落真樹君の多大な協力を得た。付記して深甚の謝意を表す。

文 献

- (1) 藤井義也・岩部洋育, 精密機械, 43-7(1977), 807-813.
- (2) 藤井義也・岩部洋育, 精密工学会誌, 52-2(1986), 273-278.
- (3) Budak, E. and Altintas, Y., *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 35-3(1995), 459-476.
- (4) Montgomery, D. and Altintas, Y., *Trans ASME, J. Eng. Ind.*, 113-5(1991), 160-168.
- (5) 岩部洋育, 機論, 58-549, C(1992), 1496-1501.
- (6) 藤村善雄, 実用切削加工法(第2版), (1991), 110-116, 共立出版.