

[研究論文]

ヘール工具による薄壁形状の高精度加工に関する研究

— FEMを用いた工具および工作物の変形に基づく加工精度の解析 —

松橋 英明^{*1}, 岩部 洋育^{*1}, 福山 英人^{*2}, 高尾 仁^{*3}

High Accurate Machining for Thin Wall Workpiece by Non Rotational Tool

— Analysis of Machining Accuracy based on Deflection of Tool and Workpiece using FEM —

Hideaki MATSUHASHI, Hiroyasu IWABE, Hideto FUKUYAMA and Hitoshi TAKAO

Abstract – In this paper, the machining of a thin wall workpiece by the non rotational tool is tried in order to obtain the high accurate surface. And also, the machining accuracy of the thin wall by the non rotational tool is compared with that by an end mill. The main results are as follows. (1) FEM models for the tool and workpiece are made and the machining accuracy is predicted based on the deflection analysis using FEM due to the cutting force. (2) The tendency of the shape of machined surface is almost coincident to that of the predicted shape, then the propriety of the method of analysis is verified. (3) The shape error by the non rotational tool is not influenced on the radius of the curvature of the workpiece, the cutting speed and the type of machining side, and the tool realized about 3 μm of the shape error as the target. (4) The dimensional error is 3~9 μm larger than that by the predicted value. But, it is considered that about 2 μm of the spring back error caused by the radius of the tool edge is included in the above error. (5) The roughness R_y of the machined surface by the non rotational tool is smaller than 3 μm as the target, then it is possible to use the tool for machining the thin wall such as the scroll shape.

Key words : Non Rotational Tool, Machining Accuracy, FEM, Thin Wall Workpiece, Deflection Analysis, Cutting Force, Edge Radius

1. 緒 論

空調用圧縮機に対する高効率, 低騒音, 低振動などの要求によって, スクロールコンプレッサが多用されている. この圧縮機にはスクロールと呼ばれる渦巻き状の壁を持つ二つの部品が内蔵されているが, 圧縮ガス漏れや摩擦損失を低減させ, さらに高い性能を得るためには壁面の高精度加工が重要である.

通常, スクロール壁面はエンドミルにより加工されるが, 壁面の曲率半径が連続的に変化するため切削条件も変化し, 壁面の各位置で寸法ならびに形状を高精度に仕上げるのが困難になっている.

そこで, 本研究はスクロール壁面を高精度に加工することを目的として, ヘール工具による加工の可能性について検討を行なった. これまでのヘール加工に関する研究では, 曲面の平滑加工および凹部残り部の除去加工への適用例が報告されている¹⁾. しかし, 薄壁の加工に関する研究は見当たらない. 本研究は薄壁のヘール加工に関する基礎的解析ならびに実験であり, 工作物は簡略化のためにインボリュート曲線の特定の伸開角 θ における曲率半径を持つ薄肉円筒形状に近似している. また, 工具および近似した工作物の FEM モデルを作成して切削

^{*1} 新潟大学大学院自然科学研究科
(〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町 8050)
Graduate School of Science and Technology,
Niigata University

^{*2} (株)メイテック(〒107-0052 港区赤坂 8-5-26)
Meitec Co., Ltd.

^{*3} (株)松下電器産業(〒525-8502 草津市桜ヶ丘 5-1-5)
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

力による両者の変形解析を行い、加工誤差を予測した。なお、エンドミルについても同様に加工誤差を求め、ヘール工具との比較を行なった。さらに、刃先丸みによる削り残しについて考察を加えた。

2. スクロール形状および近似形状

図1はスクロール形状および解析を容易にするために近似した薄肉円筒の曲率半径を定める方法を示したものである。図中の中心部の円は基礎円であり、スクロール形状は基礎円に巻きつけた糸を緩みの生じないようにほどく際に、糸上の一点が描く軌跡により定義される。図1に示したスクロール形状は糸を反時計方向にほどいて得られるが、基礎円の半径を R 、伸開角(ほどいた糸の回転角)を θ とすると、スクロール上の点 P の座標は次式で与えられる²⁾。

$$\left. \begin{aligned} X_p &= R[\cos \theta + \{(\theta - 90) \cdot \pi / 180\} \sin \theta] \\ Y_p &= R[\sin \theta - \{(\theta - 90) \cdot \pi / 180\} \cos \theta] \end{aligned} \right\} (1)$$

図中の点 Q は基礎円上にあり、破線 PQ は基礎円に接している上記の糸に相当する。また、 X 軸より反時計方向に直線 OQ までの角度が伸開角 θ である。なお、図中の $t(=3 \text{ mm})$ は壁厚であり、上記インボリュート曲線を描く際に、 t だけ糸の長さを短くすると内壁に相当するスクロール形状を描くことになる。

本研究では $R=1.92 \text{ mm}$ とし、スクロール形状の中心

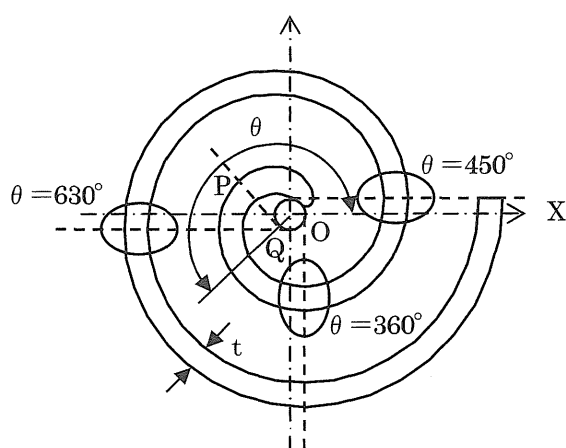


図1 スクロール形状と近似円筒形状の選定方法

表1 薄肉円筒の曲率半径

	$\theta=360^\circ$	$\theta=450^\circ$	$\theta=630^\circ$
Inside	9.2	12.1	18.1
Outside	12.2	15.1	21.1

(mm)

部より外周部までを、図中に示す 3 つの伸開角 θ ($=360^\circ, 450^\circ, 630^\circ$) で代表させ、解析ならびに実験にはそれぞれの位置(精円と X および Y 軸に平行な 3 本の破線の交点)における曲率半径と等しい薄肉円筒形状を用いている。表 1 に各伸開角 θ における内外壁の曲率半径を示している。

3. 実験条件および方法

実験に使用した工作機械は次の通りである。

スクロール加工機: トーヨーエイトック株式会社,
T402SCY

NC フライス盤: 大阪機工株式会社, MHA350

前者は薄肉円筒の加工実験に、後者は後述する FEM 解析に用いる切削 3 分力の測定実験に使用した。工具、工作物とその形状およびそれぞれの工具による切削条件は表 2 に示す通りである。

エンドミルはねじれ刃による切削機構に基づいて、切削面積を常に一定にできる最適ねじれ角 η_{opt} ($=18.9^\circ$) を選定し³⁾、その条件を満たす工具を用いている。一方、ヘール工具は円筒をその中心軸を通る平面で 2 分された形状をしており、直交する側刃と底刃の切れ刃を持つことになるが、それぞれすくい面となる切断面と円筒面および端面との交線である(図 3 参照)。

ヘール工具およびエンドミルによる加工は、ともに回転テーブルに治具を用いて取り付けられた工作物に半径方向より切込みを与え、工作物の回転運動により加工を行なっている。また、前者はすくい面が工作物の法線方向に一致するように工具を固定している。後者は工具に回転は与えるものの、前者と同様

表2 工具および切削条件

Tool	End mill	Non rotational tool	
	Diameter : 8.2 mm Helix angle : 18.9° (6 teeth)	Diameter : 8.0 mm Helix angle : 0° (1 tooth) Coating CVD diamond	
Cutting speed	334.9 m/min ($n=13000 \text{ min}^{-1}$)	1000 ~ 4000 mm/min	
Feed rate	1560 mm/min	—	
Type of milling	Up milling	—	—
Depth of cut	Radial Rd	10 μm	5 μm
	Axial Ad	10 μm	5 μm
Coolant	Emulsion	Emulsion	
Workpiece	FC250 Height : 14.0 mm	FC250 Height : 14.0 mm	

に加工面の法線方向から切込みを与えている。なお、両者とも中仕上げ加工は加工能率を重視した実際の生産工程に合わせて、エンドミルにより行なった。

図2はヘール工具による切削力測定実験の方法を示したものである。工作物は薄壁形状とし、テーブル上に設置した工具動力計（Kistler, 5257B）の上面に取り付けて、X軸方向への送りを与えて切削力の測定を行なった。なお、工作物の壁厚は後述する方法により薄肉円筒と剛性が等しくなる相当壁厚を求め、そのような工作物を用いた。加工誤差の測定は三次元測定機（Carl Zeiss, PMC850 CARAT）を使用し、薄肉円筒の内外壁面を円周方向には 10° 間隔、高さ方向には1mm間隔で測定した。また、仕上げ面粗さおよび側刃の刃先丸みの測定には粗さ計（株ミツトヨ, SURFTEST SV-600）を用いた。

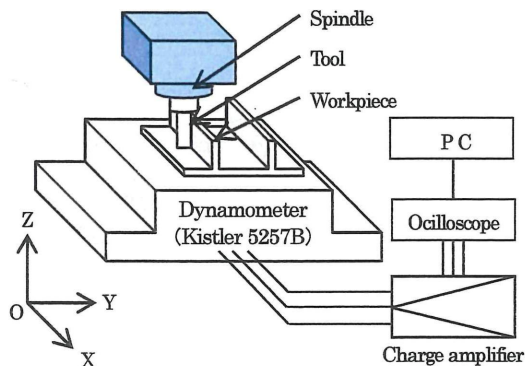


図2 切削力の測定方法

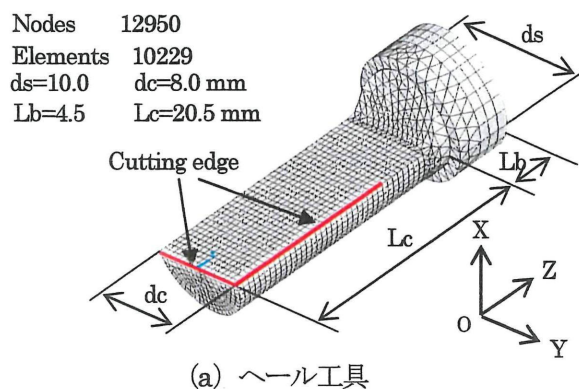
4. モデルおよび解析方法

4.1 FEMモデル

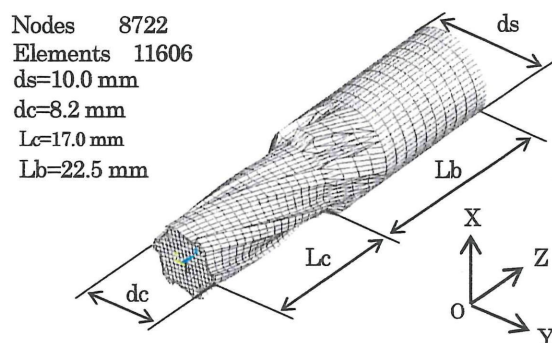
図3はFEM解析に用いた工具モデルを示しており、(a)図がヘール工具、(b)図がエンドミルである。両モデルはともに4, 6および8節点要素から構成されており、各要素サイズはヘール工具では $\angle X = \angle Y = \angle Z = 0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$ 、エンドミルでは $\angle X = \angle Y = \angle Z = 0.2 \sim 2.0 \text{ mm}$ としている。また、節点数、要素数、直径 d_c 、シャンク径 d_s 、切れ刃長さ L_c 等の寸法は図中に示す通りである。

図4はFEM解析に用いた薄肉円筒形状工作物モデルを示しており、伸開角 $\theta = 360^\circ$ の場合である。このモデルは全て8節点要素から構成されており、要素サイズは薄壁部では $\angle X = \angle Y = \angle Z = 1.0 \text{ mm}$ 、

土台部では $\angle X = \angle Y = 1.5 \text{ mm}$ 、 $\angle Z = 2.0 \text{ mm}$ である。また、節点数、要素数、薄肉円筒の内外径 d_1 および d_2 は図中に示す通りである。なお、伸開角 $\theta = 450^\circ$ および 630° に対しても同様の薄肉円筒形状モデルを作成している。



(a) ヘール工具



(b) エンドミル

図3 工具のFEMモデル

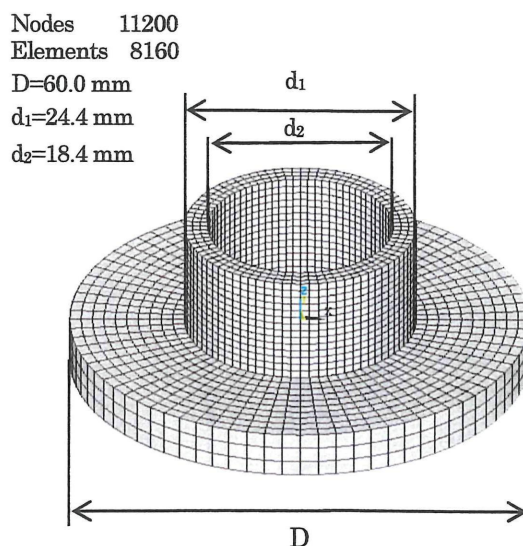


図4 薄肉円筒形状のFEMモデル

4. 2 解析条件および方法

本研究では FEM 解析に汎用解析ソフト「ANSYS」を使用し、工具および工作物の変形解析を行った。変形解析する際の拘束条件は、実際の加工条件と等しくするために、工具の突き出し長さ ($L_c + L_b$) が図 3(a) に示すヘール工具では 22.5 mm, 図 3(b) に示すエンドミルでは 24.5 mm となる箇所より上方の X, Y, Z 軸方向の自由度を拘束した。荷重は切削に関与する側刃の位置に、後述の実験で得られた切削 3 分力を対応する各節点に均等な分布荷重として与えている。一方、工作物に対しては加工される壁高さ 14.0 mm の区間に、向きが逆になる反作用力を同様に均等な分布荷重で与えている。

解析により得られた工具および工作物の変位は、各節点の変位より加工誤差に大きく影響を与える Y 成分を抽出するとともに、各高さ位置で両者を加算し、工具と工作物の相対変位による加工誤差の予測値を求めている。

4. 3 相当壁厚の計算

図 5 は壁面への分布荷重と変形状況のモデルである。薄肉円筒形状および薄板形状工作物に実験で得た切削力を分布荷重として与えると、片持ちはりとなるため壁面の上面でより大きく変形する。上面における両者の最大変形量をそれぞれ ER_w および EP_w で表すことにする。

図 6 は薄板形状の壁厚を $t=6.6\sim 7.4$ mm に変化させるとともに、壁厚 30mm, 長さ 20mm の工作物による切削実験の結果に基づいて得た切削力 $F_y=110$ N を分布荷重に変換して与え、それぞれの

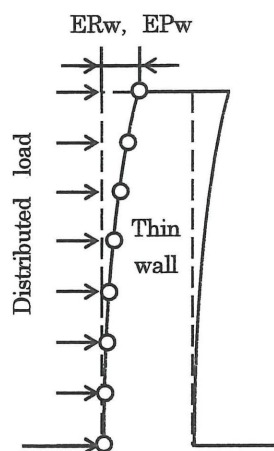


図 5 工作物の変形モデル

壁厚による変形 EP_w が示されている。図より壁厚が小さいほど変形量が大きくなっているが、図中に伸開角 $\theta=360^\circ$ に対応した曲率半径をもつ薄肉円筒における変形量 ER_w (◇印) を併記すると、壁上面近傍における変形は上記壁厚の変形内に存在する。

そこで、壁面の上面における薄肉円筒形状と薄板形状の変形量の差 $\angle E_w = ER_w - EP_w$ を 2 乗した値 ($\angle E_w^2$) を用い、工作物の剛性が等しい相当壁厚 t_e を最小二乗法により計算した。図 7 はその推定方法であり、縦軸に示す $\angle E_w^2$ の変化を壁厚 t に関する 3 次式にそれぞれ回帰させ、それらの曲線が示されている。図より各伸開角に対してそれぞれ $\angle E_w^2$ を最小とする相当壁厚 t_e が存在し (図中の赤印)、伸開角 $\theta=360^\circ, 450^\circ$ および 630° に対してそれぞれ $t_e=6.2, 6.6$ および 7.0 mm となる。

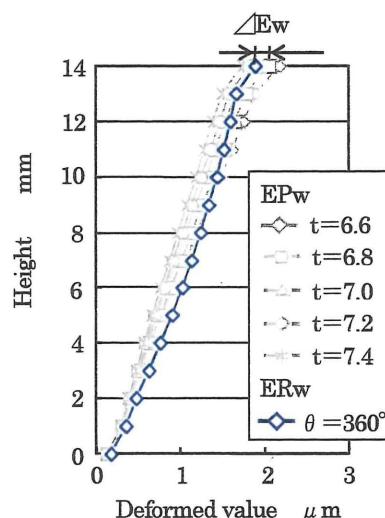


図 6 壁厚による変形の比較

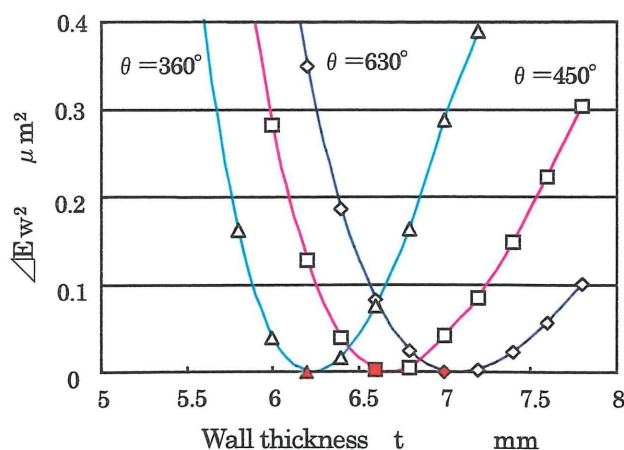
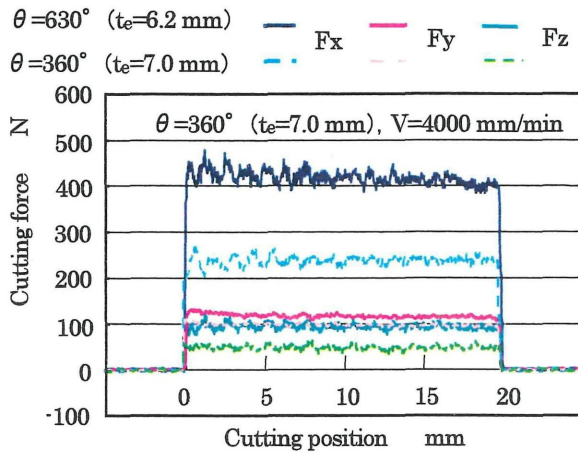


図 7 相当壁厚の推定方法

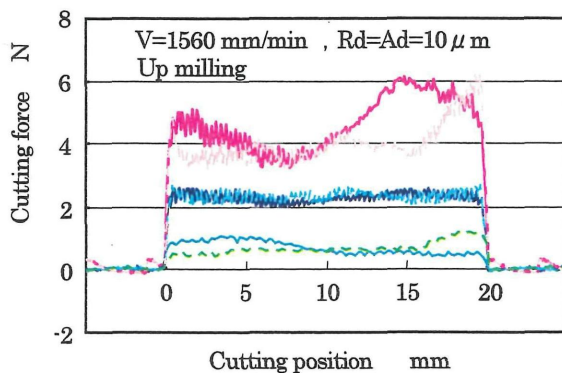
5. 計算および実験結果と考察

5. 1 切削力

図8は工具による切削3分力を比較したもので (a) 図がヘール工具, (b) 図がエンドミルによる



(a) ヘール工具



(b) エンドミル

図8 切削力

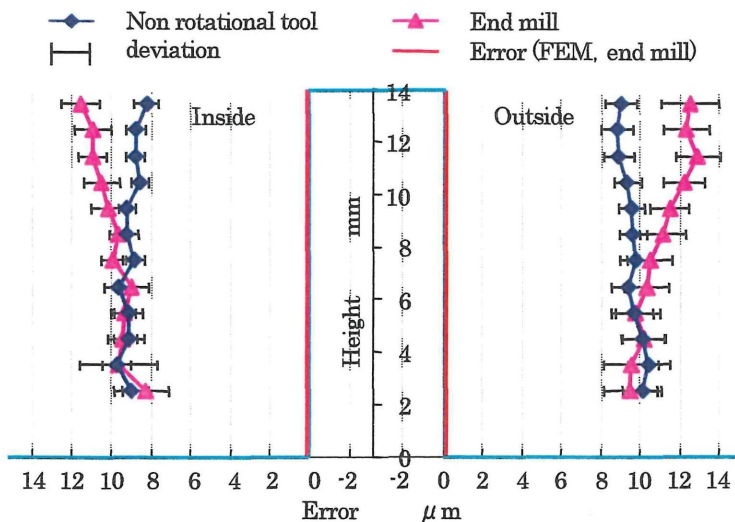


図9 加工方式による壁面の加工誤差

場合である。また、伸開角による2種類の壁厚による比較も行っている。(a) 図に示すヘール工具では、切削長さ 20 mm の間で3分力とも大きな変動はなく、安定した切削が行われていることが分かる。しかし、3分力中 Fx 分力が最も大きく、壁厚の薄い $t_e=6.2$ mm ($\theta=630^\circ$) では 400 N を越えている。一方、 $t_e=7.0$ mm ($\theta=360^\circ$) では約 250 N と小さい。この理由は切込みを均一にするために行った仕上げ条件による前加工で、工具の剛性の差による工作物の変形が生じ、その分だけ実切込みが加算されたためと考えられるが、詳細については今後の課題である。なお、加工誤差に最も影響を与える Fy 分力は 100~120 N であり、伸開角による Fy 分力の差は小さい。

一方 (b) 図に示すエンドミルでは、切削長さ 20 mm の間で Fy 分力に大きなうねりが認められるが、縦軸の数値はヘール工具に比べて非常に小さく、変動幅も無視できる。そこで、両工具とも FEM 解析に用いる各分力は 20 mm 間の平均値とした。

5. 2 加工方式による影響

図9は縦軸に壁高さ、横軸に誤差をとってヘール工具による薄肉円筒形状の加工における内外壁の加工誤差を示したもので、FEM 解析により求めた工具と工作物の変形量および両者の変形量の和による加工誤差の予測値と比較している。また、図中にはエンドミル加工における結果を示し、加工方式による比較も行なっている。

まずエンドミル加工の場合について考えると、切削力は3分力ともに 6N 以下であり、加工誤差の予測値はほぼ零となる。しかし、実験

値は内外壁とも壁の上面の誤差が下面の誤差よりも大きいテーパ形状を示している。この原因は工具取り付け時の偏心により切削中に工具が振れ回り、工具先端においてより大きく振れ回ったためと考えられる。

エンドミルを注意深く主軸に取り付けても、5 μ m 程度の偏心は避けがたく、主軸を毎分 1 万回転以上で回転すればさらに遠心力による影響を受けることになる。文献4)より取り付け時の偏心を 5 μ m と仮定すれば、主軸回転数 $n=13000\text{min}^{-1}$ の条

件では振れ回りが $7\mu\text{m}$ と推定され、図9の結果にはこの値程度の振れ回りによる誤差が含まれているものと考えられる。

一方、ヘール工具の場合、下面での誤差はエンドミルの場合とほぼ等しいが、上面では小さくなっている。また、下面に比べて上面の誤差がわずかに小さく、エンドミルとは逆のテーパ形状を示している。なお、壁の各高さ位置での値は円筒面の円周における平均値と標準偏差 σ によりばらつきを示しているが、どの高さにおいてもヘール工具による標準偏差は小さく、エンドミルに比べて円周方向に均一な面が仕上がっていることを示している。

図10は図9の結果を用いて加工方式による形状誤差および寸法誤差を切込み $R_d=A_d=10\mu\text{m}$ 、切削速度 $V=2000\text{ mm/min}$ の条件で比較したもので、他の伸開角の結果も併記している。(a)図に示す形状

■ $\theta=360^\circ$ ■ $\theta=450^\circ$ □ $\theta=630^\circ$

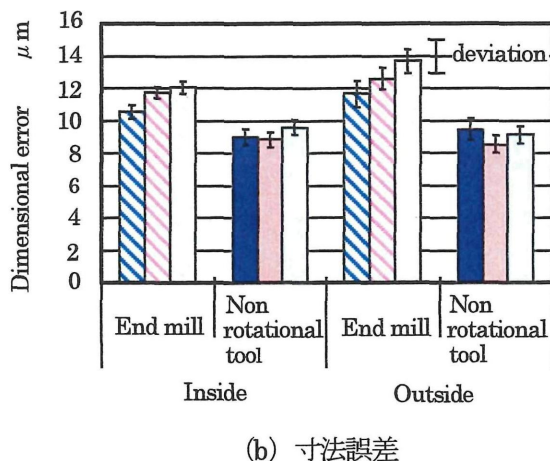
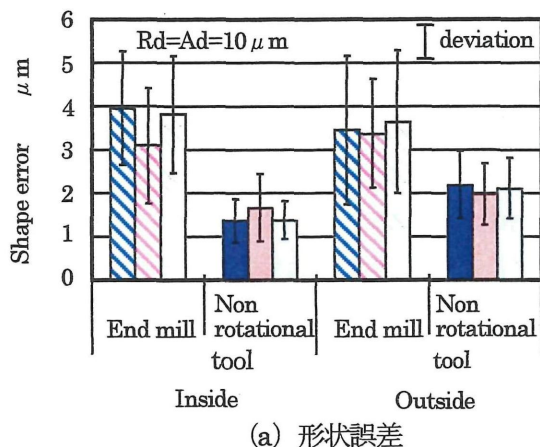


図10 加工方式による形状および寸法誤差

誤差の場合、伸開角による差はあまり認められず、内外壁による差も小さい。しかし、加工方式による差は大きく、ヘール工具がエンドミルに比べて約 $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$ 小さい。また、ヘール工具では目標値とした $3\mu\text{m}$ を達成するとともに、標準偏差も同様に小さく、エンドミルの約 $1/2$ 程度である。

一方、(b)図に示す寸法誤差の場合、ヘール工具においては伸開角や内外壁による差も小さく、基本的には(a)図と同様である。また、エンドミルに比べても値が $2\sim 5\mu\text{m}$ 小さく、標準偏差も小さい。

しかし、エンドミルの場合は伸開角が大きくなるにつれて内外壁とも寸法誤差が増大する傾向を示しているが、この理由については明らかではなく、今後の検討課題としたい。

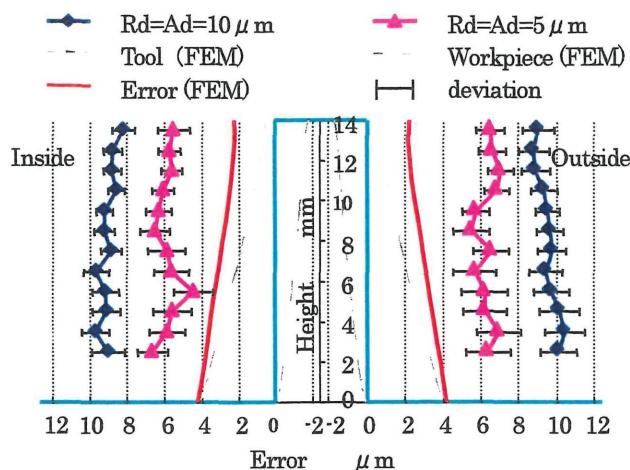
5. 3 ヘール工具による加工精度

5. 3. 1 壁面の加工誤差

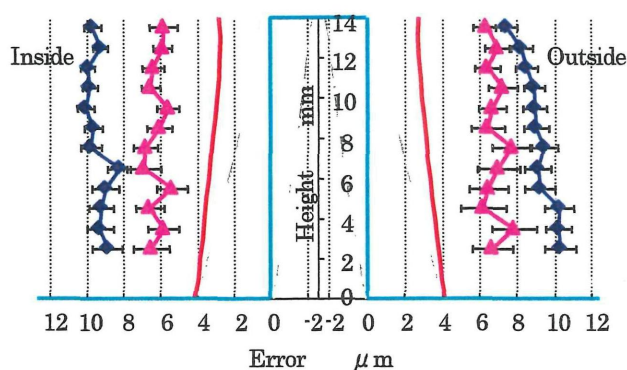
図11は縦軸に壁高さ、横軸に誤差をとり、切削速度 $V=2000\text{ mm/min}$ 、切込み $R_d=A_d=5\mu\text{m}$ および $10\mu\text{m}$ の条件における内外壁面の加工誤差を示したもので、(a)図が $\theta=360^\circ$ 、(b)図が $\theta=630^\circ$ の場合である。なお、図中にはFEM解析により求めた工具および工作物の変形量と両者の和による加工誤差の予測値も併記しているが、 $R_d=A_d=5\mu\text{m}$ と $10\mu\text{m}$ の条件で切削力の差は非常に小さく、寸法および形状誤差の差が $0.1\mu\text{m}$ 以内であったため、後者の解析値のみ示している。

(a)および(b)図より、切込みおよび伸開角によるばらつきの差は見られない。また、内外壁ともに伸開角 θ に関係なく、誤差形状が予測値の傾向と一致している。しかし、内面における誤差形状は予測値よりも垂直に近い形状をしている。この理由は、エンドミルによる中仕上げ時にも生じた図9に示すようなテーパ形状の加工誤差を、外壁に比べて実切込みがやや大きくなる内壁において、ヘール工具が壁高さの中央より上面にかけてわずかに切削し、結果として垂直に近い形状を示したのと考えられる。なお、標準偏差は内外壁とも切込みに関係なく $1\mu\text{m}$ 以下と小さい。

一方、加工誤差の実験値は切込み $R_d=A_d=5\mu\text{m}$ では $6\sim 8\mu\text{m}$ 、 $R_d=A_d=10\mu\text{m}$ では $10\sim 12\mu\text{m}$ とFEMによる予測値の $3.2\mu\text{m}$ に対して $3\sim 9\mu\text{m}$ 大きい削り残しによる正の誤差を生じている。この原因として、工作機械の位置決め誤差、主軸系の弾性



(a) $\theta=360^\circ$, $V=2000$ mm/min



(b) $\theta=630^\circ$, $V=2000$ mm/min

図 11 ヘール工具による内外壁面の加工誤差

変形による誤差、工作機械の熱変形および次節で検討する工具の刃先丸みによる誤差等が考えられる。各誤差要因の解明にはより詳細な検討が必要であり、今後の課題ではあるが、この種の誤差に対しては制御装置の工具オフセット機能を用いて補正する方法が有効である。

5. 3. 2 刃先丸みによる加工誤差

図 12 は触針式の粗さ計により測定したヘール工具の刃先の断面形状である。図中には刃先のくさび角 (90°) を考慮してほぼ直交する 2 つの直線(すくい面と逃げ面)に接するように刃先形状を破線による円で当てはめているが、図より刃先丸みの半径 R_c は $10\mu\text{m}$ と推定できる。刃先丸みによって加工面にはスプリングバックによる削り残しを生じることが知られており、削り残し量 δ は次式で与えられる⁵⁾。

$$\delta = 0.75 \cdot R_c \cdot \beta \cdot \{2 \cdot \exp(\alpha - 0.5)\} \quad (2)$$

$$(\alpha = P_m / \sigma_y, \beta = \sigma_y / E)$$

ここで、 P_m は被削材の塑性流動圧力 (Pa)、 σ_y

は被削材の単軸引張り降伏応力 (Pa)、 E は被削材の縦弾性係数 (Pa) である。

なお、切削状況における工作物の寸法に対して、 $\alpha=3$ 、 $\beta=10^{-2}$ と仮定することができ⁵⁾、これらの値および $R_c=10\mu\text{m}$ を式(2)に代入すると $\delta \approx 1.7\mu\text{m}$ となる。

以上のことより、前述の削り残しによる寸法誤差 $3 \sim 9\mu\text{m}$ には、刃先丸みに起因するスプリングバック量の約 $2\mu\text{m}$ が含まれていると考えられる。

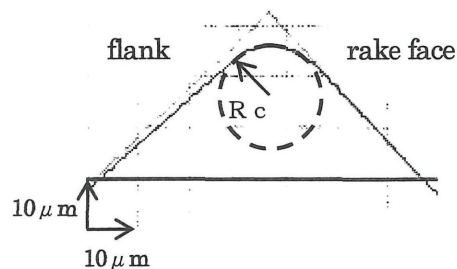
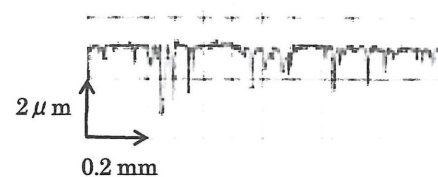


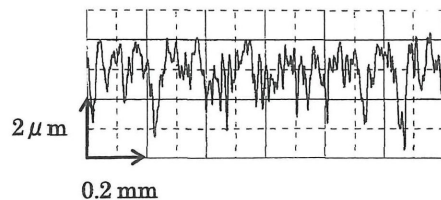
図 12 刃先形状と刃先丸み

5. 3. 3 仕上げ面粗さ

図 13 は図 9 と同条件により加工した壁面の高さ方向の粗さ曲線を示しており、(a) 図がヘール工具、(b) 図がエンドミルの場合である。図よりヘール工具では変動が小さく、最大高さ R_y は $1.5 \sim 2.2\mu\text{m}$ である。一方、エンドミルでは R_y が $2.0 \sim 3.4\mu\text{m}$ と前者に比べて大きく、変動幅も約 2 倍である。しかし、仕上げ条件による加工面であり、



(a) ヘール工具



(b) エンドミル

図 13 粗さ曲線

両工具とも逃げ面の粗さが転写されたものと考えられるが⁶⁾、ヘール工具においては後述の図 14 の結果より目標値 $3\mu\text{m}$ を達成している。そのため工具逃げ面をさらに高精度に仕上げる必要は特にないと考えられる。

図 14 は切削速度および伸開角が仕上げ面粗さに及ぼす影響を比較しており、エンドミルによる結果も併記している。図より、切削速度による最大高さの変化は認められないが、実験条件の範囲が狭かったことによるものと考えられる。また、伸開角および外壁と内壁による差も明確ではない。しかし、ヘール工具の場合はどの条件も一点鎖線で示した目標値 $3\mu\text{m}$ 以下であり、エンドミルによる結果と比較して最大高さは約 $2/3$ と小さく、良好な加工面が得られている。

以上のことを総合すれば、ヘール工具をスクロール壁面の高精度加工に十分適用できるものと考えられる。

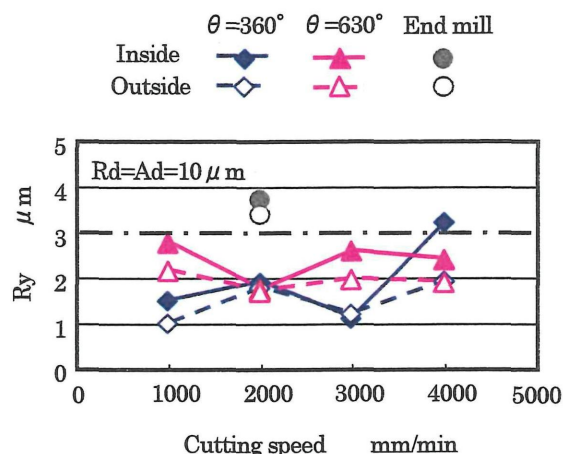


図 14 最大高さの比較

6. 結 論

スクロール壁面の高精度加工を目的としてヘール工具による加工誤差について解析ならびに実験を行なうとともに、エンドミルとの比較も行なった。得られた結果は以下の通りである。

- (1) ヘール工具、エンドミルおよび工作物の FEM モデルを作成するとともに、実験により得た切削分力を用いて工具および工作物の変形を解析し、加工誤差の推定を行った。
- (2) ヘール工具による加工面の形状は予測値の傾

向とほぼ一致しており、解析方法の妥当性が示された。

- (3) ヘール工具による切削力はエンドミルに比べ数百倍大きくなるが、壁高さ方向の形状精度は内外壁、曲率半径および切削速度の影響を受けず、目標値の $3\mu\text{m}$ を実現しており、スクロール壁面の加工にヘール工具を用いることの可能性が示された。
- (4) 寸法誤差は FEM 解析による予測値に比べて $3\sim 9\mu\text{m}$ 削り残しの誤差が生じている、そのうちの約 $2\mu\text{m}$ は刃先丸みによるスプリングバックによるものと考えられる。
- (5) ヘール工具による仕上げ面の最大高さ R_y は目標値 $3\mu\text{m}$ 以下であり、良好な加工面が得られた。また、エンドミルと比較して寸法および形状精度も高く、ヘール工具のスクロール壁面の高精度加工への適用は十分可能である。

参考文献

- 1) 神谷昌秀, 島田元浩, 鈴木裕, 竹内芳美, 佐藤眞: 非回転切削機構を用いた曲面加工用 CAM システムの開発, 日本機械学会論文集(C 編), 62 巻, 600 号(1996-8), 3326-3332.
- 2) 岩部洋育, 島田智晴: エンドミルによるスクロール形状部品の高精度・高能率加工に関する研究(第 1 報, 最大切削面積と仕上げ面粗さに基づく高精度・高能率加工法の提案), 日本機械学会論文集(C 編), 61 巻, 583 号(1995-3), 1184-1191.
- 3) 岩部洋育: エンドミルによる加工精度に関する基礎研究, 学位論文(北海道大学), 1986.
- 4) 岩部洋育, 竹本和博, 今井純一: エンドミルによる高速加工に関する研究(輪郭加工による加工精度と誤差要因), 日本機械学会論文集(C 編), 63 巻, 612 号(1997-8), 2878-2885.
- 5) 井川直哉: ダイヤモンド工具と被削材(刃先の鋭さ・なめらかさ・強さ・親和性が条件), 工作機械 84・1st Issue, (超精密加工), 大河出版, 1984.
- 6) 岩部洋育, 大瀬戸隆之, 後藤孝夫: 工具逃げ面の高精度化による仕上げ面の改善, 日本機械学会論文集(C 編), 68 巻, 666 号(2002-2), 650-656.