

スクロール形状部品の実用的な高精度・  
高能率加工法の確立に関する研究

(課題番号 04650104)

平成5年度科学研究費補助金(一般研究(C))

研究成果報告書

平成6年3月

研究代表者 岩部 洋育

(新潟大学工学部・助教授)

平成5年度科学研究費補助金（一般研究（C））

研究成果報告書

は し が き

（1）研究課題

スクロール形状部品の実用的な高精度・高能率  
加工法の確立に関する研究

（2）課題番号

04650104

（3）研究代表者

岩部洋育（新潟大学工学部・助教授）

（4）研究分担者

横山和宏（新潟大学工学部・助教授）

（5）研究経費

平成4年度 1,600千円

平成5年度 400千円

計 2,000千円

(6) 研究発表

ア. 学会誌等

該当なし

イ. 口頭発表

- (i) 岩部洋育, 島田智晴: エンドミルによるスクロール内面の加工精度改善に関する研究, 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 1992年10月14日
  
- (ii) 岩部洋育, 横山和宏, 島田智晴: エンドミルによる薄肉形状部品の加工に関する研究(切削力による工具および工作物の変形解析), 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 1994年3月22日

## 目 次

1 . 緒 言	・ ・ ・ ・ 4
2 . 薄肉形状部品の加工精度の解析	・ ・ ・ ・ 5
2 . 1  工作物および工具の形状と要素分割	・ ・ ・ ・ 5
2 . 2  解析条件の選定	・ ・ ・ ・ 8
2 . 3  解析および実験方法	・ ・ ・ ・ 12
2 . 4  解析結果および実験結果と考察	・ ・ ・ ・ 19
3 .  スクロール形状部品の高精度・高能率加工法	・ ・ ・ ・ 25
3 . 1  スクロール形状と工具経路	・ ・ ・ ・ 25
3 . 2  ねじれ刃による切削面積の計算	・ ・ ・ ・ 28
3 . 3  実験条件および方法	・ ・ ・ ・ 31
3 . 4  実験結果および考察	・ ・ ・ ・ 33
4 .  結 言	・ ・ ・ ・ 50
付 録  ( 研究発表別刷り  2 編 )	・ ・ ・ ・ 52

## 1. 緒 言

低振動，低騒音を最大の特徴とするスクロール圧縮機は，1905年フランス人 Creuxによりその原理が発明され，アメリカ合衆国において最初の特許<sup>1)</sup>が取られている。この圧縮機は近年空気漏を防ぐチップ・シール等の開発や数値制御工作機械を利用して曲面の加工が容易になったこと等により実用化されており，自動車および家庭用空調機，自動販売機等に利用されるようになった。スクロール圧縮機は，その心臓部が2つのスクロールと呼ばれる渦巻状の壁からなり，この壁の内外面はエンドミルによって加工される。しかしスクロールはインボリュート関数で表現される形状であるため，加工面の法線方向に一定の仕上げ代を与えても，中心部と外周部および内面と外面で切削状態が大きく変化する。すなわち一定切込みおよび送り速度による通常の加工法では，スクロールを高精度かつ高能率に加工することが困難である。そのため生産現場では加工能率を犠牲にして，送り速度を低くする簡易的な改善方法を利用する機会が多い。

そこで本研究は，スクロール形状部品の高精度・高能率加工法の確立を目的として，平成4年度および平成5年度の2か年に渡って以下に示す3項目に関して行われた。

- a. 有限要素法による薄肉形状部品の加工誤差の解明
- b. インボリュート曲線の高精度加工用プログラムの開発
- c. 切削機構に基づくスクロール内外面の高精度・高能率加工法の開発

本報告書は，上記3項目に関する研究成果をまとめたものである。

## 2. 薄肉形状部品の加工精度の解析

### 2.1 工作物および工具の形状と要素分割

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。本研究において、解析の対象とする工作物および工具の形状および要素の分割は図2.1および2.2に示す通りである。

まず図2.1に示す工作物に関して説明すると、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の薄肉壁が載っている形状である。要素の分割は全て8節点立体要素により行ない、薄肉部分の要素サイズは $\Delta X=2$  mm、 $\Delta Y=1.15$  mmおよび $\Delta Z=1.6$  mmとしている。しかし、土台の部分に関しては薄肉部への変形の影響が少ないため傾斜を付けた分割を採用し、 $\Delta X=2$  mm、 $\Delta Y=1.15$ 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、総節点は4340であり、直交座標系の原点Oは切削終了位置の薄肉部下面に相当する点としている。

次に図2.2に示す工具に関して説明すると、要素の形状および寸法は使用する工具に基づいて定めている。すなわち、直径13 mm、刃長24 mm、全長75 mm、2枚刃、ねじれ角右45°であり、分割要素は基本的には8節点立体要素を使用している。しかし、工具の断面形状は図2.3に示すように複雑であり、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。また、 $Z=\Delta Z \cdot n$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) における工具の断面は $Z=0$  mmの断面(図2.3)を時計方向に $\theta_c = \tan(\Delta Z \cdot n / r_c)$ 回転させた断面となる。ここで $r_c$ は工具半径である。

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、 $\Delta Z=1.6$  mmと大きく分割している。また、過渡区間の2断面およびシ

ヤンク部の断面とその分割方法は図2.4に示すとうりであり，工具に関して総要素数は3056，総節点は2756である。

なお，解析に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。

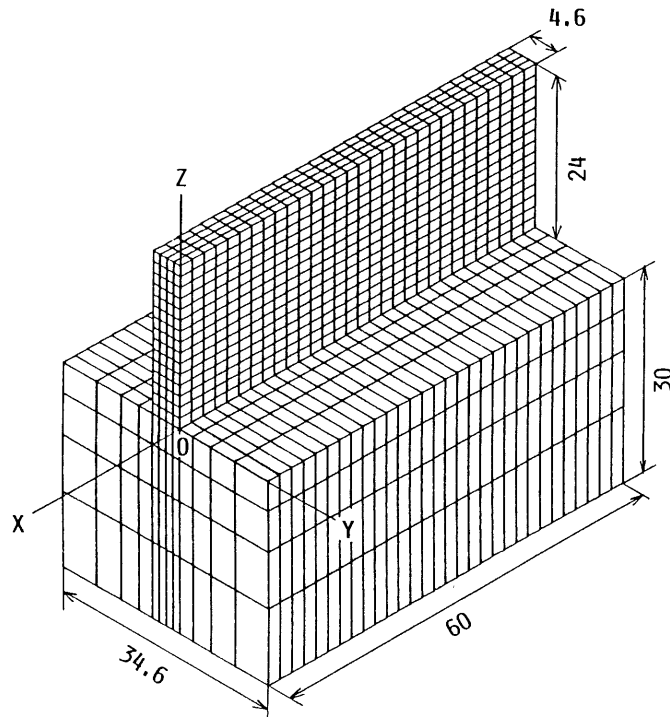


図 2.1 工作物の形状と要素分割

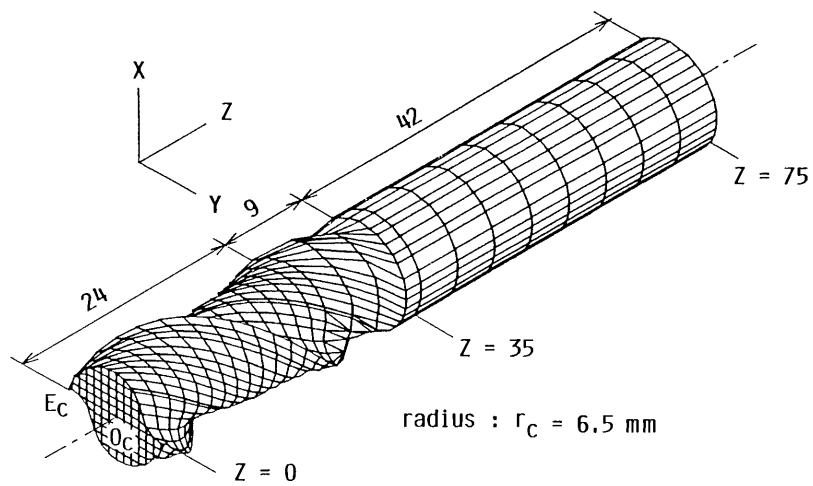


図 2.2 工具の形状と要素分割

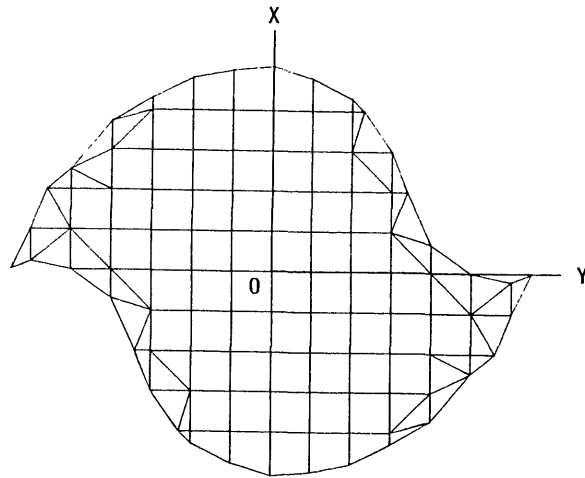


図 2.3 刃先位置における工具断面と要素分割

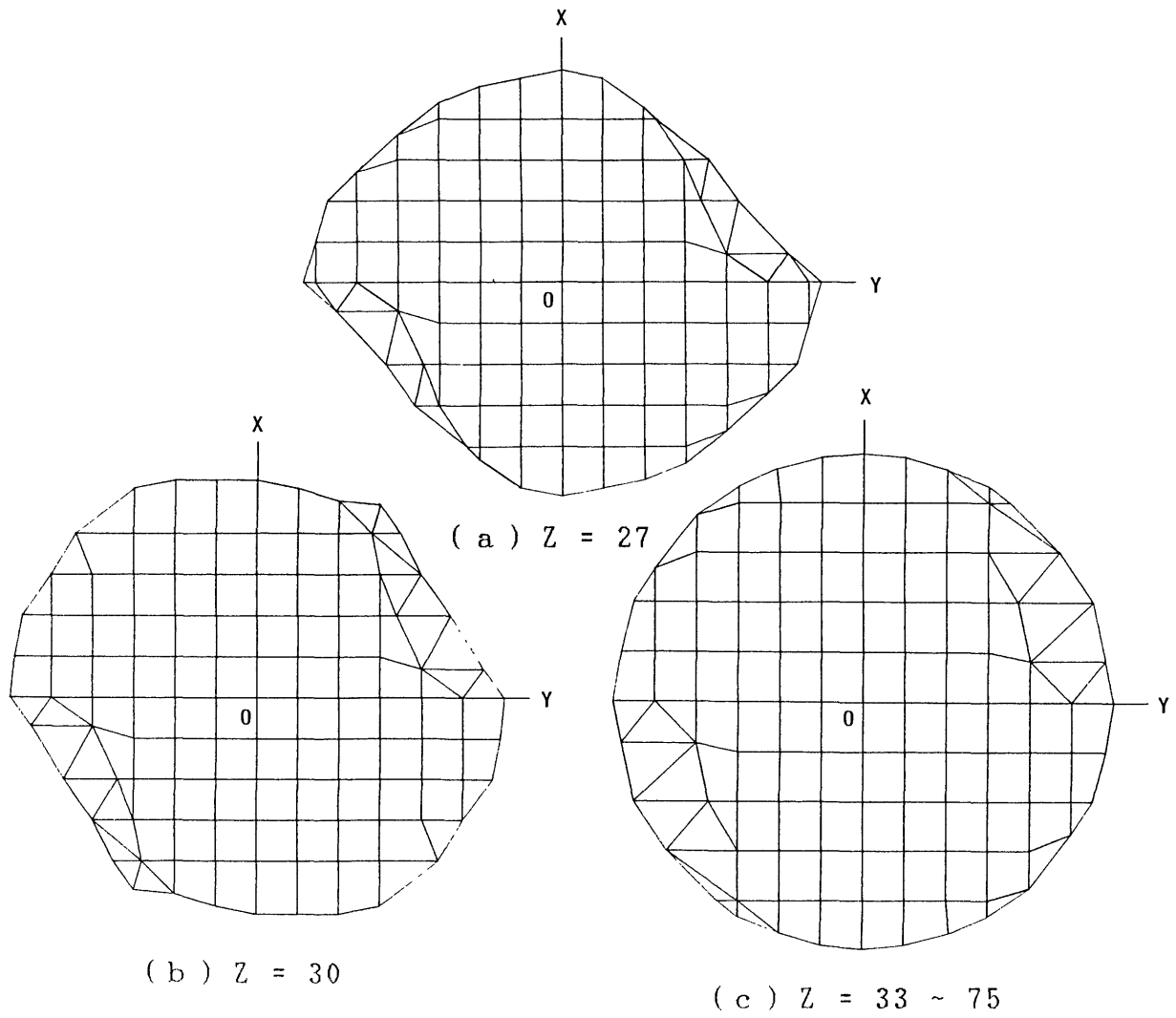


図 2.4 過渡区間およびシャンク部における工具断面と要素分割



## 2.2 解析条件の選定

### 2.2.1 荷重方法と拘束条件の選定

図2.1および2.2に示したモデルに荷重を与える方法には、集中荷重と分布荷重の2つの方法が考えられる。まず工作物に関して考えるが、図2.1に類似したモデル(図2.5)を用い、両荷重方法による荷重点における変形の収束性について検討することにする。集中荷重の場合、点A1(10,0,25)に $F_y=-100$  Nを与え、分布荷重の場合点A1およびA6(10,0,12.5)に $F_y=-20$  N、点A2(10,0,22.5)ないしA5(10,0,15)の4点に $F_y=-20$  Nを分布させ、その合力を-100 Nとしている。拘束条件は工作物下面の全節点変位を  $U_x=U_y=U_z=0$ としている。

図2.6はX方向の分割幅 $\Delta X$ による点A1の-Y軸方向の変形量を示したものである。図より集中荷重の場合、点A1の変形量は分布荷重に比べて約1.6倍大きくなっており、 $\Delta X$ が小さくなるにつれて増加する。一方分布荷重においては、 $\Delta X$ の変化に対して点A1の変形量の増分は非常に小さいため、後述する工作物の収束性の検討と要素サイズの選定に用いる荷重方法は分布荷重とすることにする。

また、工具の変形の収束性に関しても図2.6の結果に基づいて分布荷重により行うものとする。ただし、工具に関して荷重は  $Z=0$  ないし12 mmの切れ刃に相当する節点に与え、接線方向または中心軸方向にそれぞれ合力の絶対値が100 Nとなるようにしている。

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における $Z=35$ および75 mmの2節点の変位を  $U_x=U_y=U_z=0$  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、シャンク部の外周部の $Y=6$ および-6 mmの節点の変位をともに $U_x=0$ としている。

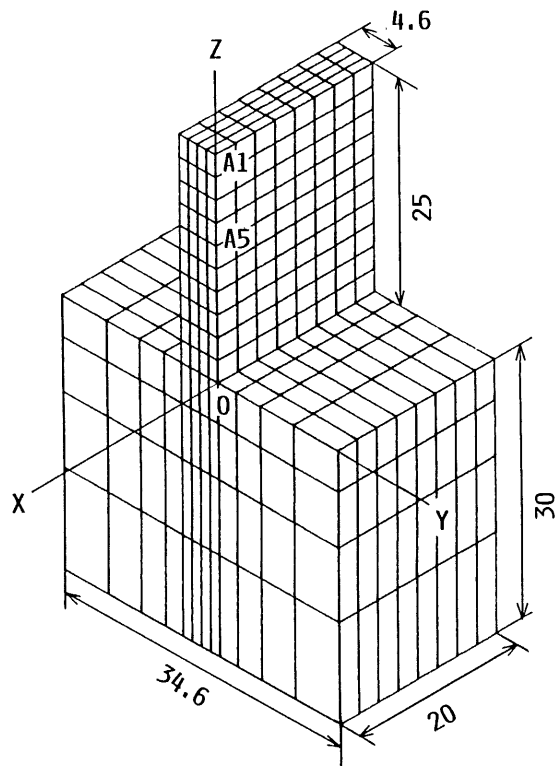


図 2.5 荷重方法と変形の収束性の検討用工作物モデル

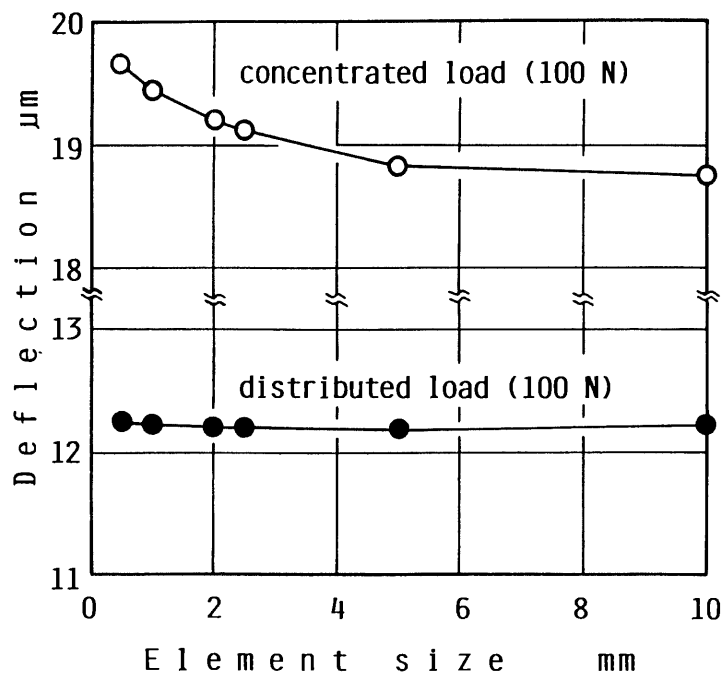


図 2.6 要素サイズと荷重方法による工作物変形量

### 2.2.2 収束性の判定と分割要素寸法の選定

図2.7は工作物のX, YおよびZ方向の要素サイズが点A1の変位に及ぼす影響を示したものである。分割幅が小さくなるにつれて各軸方向の変位は大きくなるが, 分割幅の減少により変位が急速に増加していないため, 各軸の変位は収束するものと考えられる。分割幅が零となる横軸における変位を変形量の予測値とすれば, 簡易的に次のように求めることができる。すなわち, 各軸方向とも分割幅の小さい2つの値による変位を直線で結び, その延長線(破線)が縦軸と交わる点の値をそれぞれの予測値とする。要素のX, YおよびZ方向の変形量の予測値はそれぞれ11.74, 11.79および11.80  $\mu\text{m}$ である。本研究においては上記の値より3%以内の誤差範囲となる分割幅, すなわち $\Delta X=2\text{ mm}$ ,  $\Delta Y=1.15\text{ mm}$ および $\Delta Z=1.6\text{ mm}$ を採用する。

次に工具の変形の収束性ならびに分割幅について検討する。工具においては, その断面が図2.3で示されるように複雑な形状をしており, X-Y断面の形状を変化させると要素の体積が変化することになる。そこで工具の変形の収束性に関してはZ軸方向の分割幅のみ変化させることとする。図2.8はZ軸方向の分割幅 $\Delta Z$ が工具先端の中心軸上の点0cおよび刃先点Ecの変形量に及ぼす影響を示したものである。図より分割幅が減少すると点0cおよびEcの変形量は増加するが, 図2.7と同様に分割幅の減少により変位が急速に増加していないため, 工具の変位は収束するものと考えられる。工作物の場合と同様に点0cおよびEcにおける変形量の予測値はそれぞれ11.28および10.90  $\mu\text{m}$ と求められる。また,  $\Delta Z=2\text{ mm}$ における変形量は上記の予測値の98%以上であるため, 工具のZ方向分割幅を $\Delta Z=1.6\text{ mm}$ し, 工作物の分割幅に一致させることが可能である。

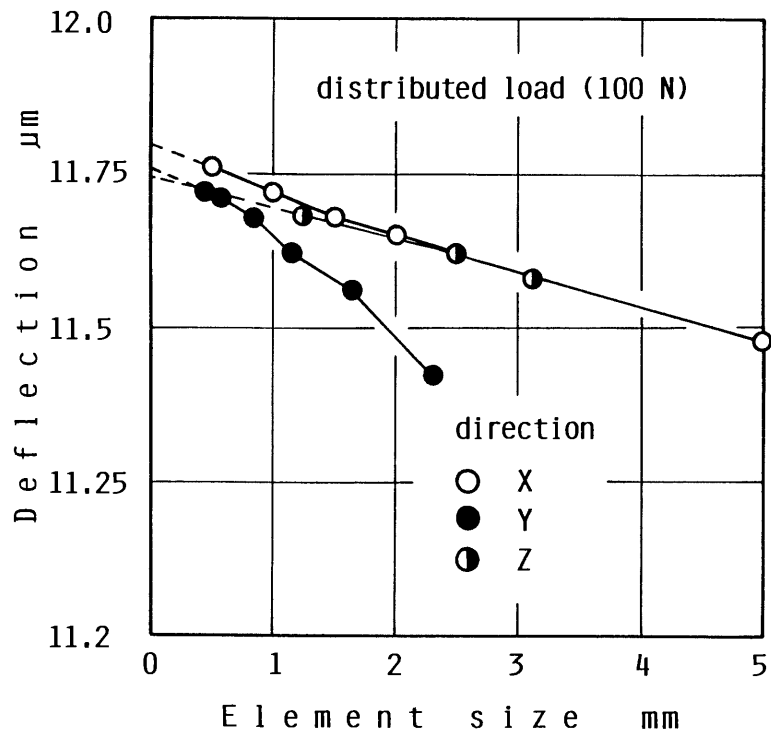


図 2.7 要素サイズによる工作物変形量

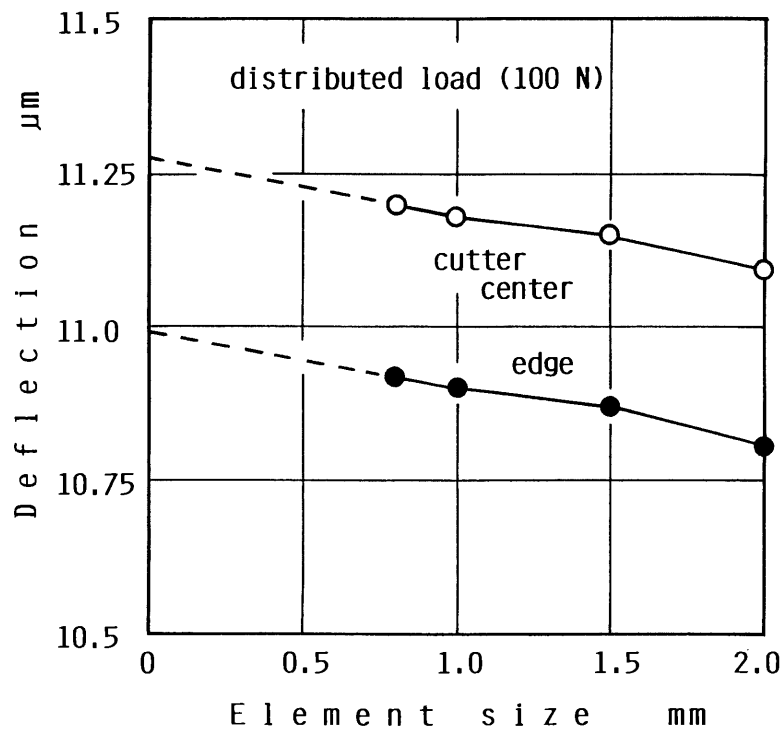


図 2.8 要素サイズによる工具中心および刃先の変形量

## 2.3 解析および実験方法

### 2.3.1 節点荷重の計算方法

節点に加える荷重は，後述する切削実験により得られる切削力に基づいて求めている。図2.9はねじれ刃による側面加工の切削過程を示しているが，切れ刃は $K_bI_s$ の位置より切削を開始するものの， $K'I_b$ の位置より加工面の創成が始まる。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 $\eta=45^\circ$ より $I_bI'$ の距離は1.6 mm，切れ刃の接触角 $\theta_b$ は約 $14.5^\circ$ となる。斜線部は切削面積であり， $\theta_b$ が小さい範囲でこの面積はほぼ三角形状をしている。また，切削力が切削面積にほぼ比例することより，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ができる。

そこで次に工作物の場合点 $I_b$ および $I'$ ，工具の場合点 $I_b$ および $K'$ に相当する節点に加える荷重を求めることにする。図2.10は切削力分布および節点荷重のモデル図であり，(a)図は切削力分布 $D_aD_bD_c$ の両端が節点 $Na$ および $Nb$ に一致する場合，(b)図は節点 $Nd$ がその中間にある場合である。各節点荷重の計算における基本的な考えは，2つの節点に挟まれた三角形 $D_aD_bD_c$ または台形 $D_dD_eD_bD_c$ の面積を重心位置 $G1$ ないし $G3$ で2分し，それぞれの重心位置と節点までの距離の逆比により荷重を加えることとしている。そのため図より節点荷重 $f_a$ ないし $f_e$ の値は次式により与えられる。なお， $l_1$ ないし $l_6$ は節点から各重心までの距離， $F$ は切削力の $X$ ， $Y$ および $Z$ 分力である。

$$\left. \begin{aligned} f_a &= F \cdot l_2 / (l_1 + l_2) \\ f_b &= F \cdot l_1 / (l_1 + l_2) \\ f_c &= F \cdot l_4 / (l_3 + l_4) \\ f_d &= F \cdot l_3 / (l_3 + l_4) + F \cdot l_6 / (l_5 + l_6) \\ f_e &= F \cdot l_5 / (l_5 + l_6) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

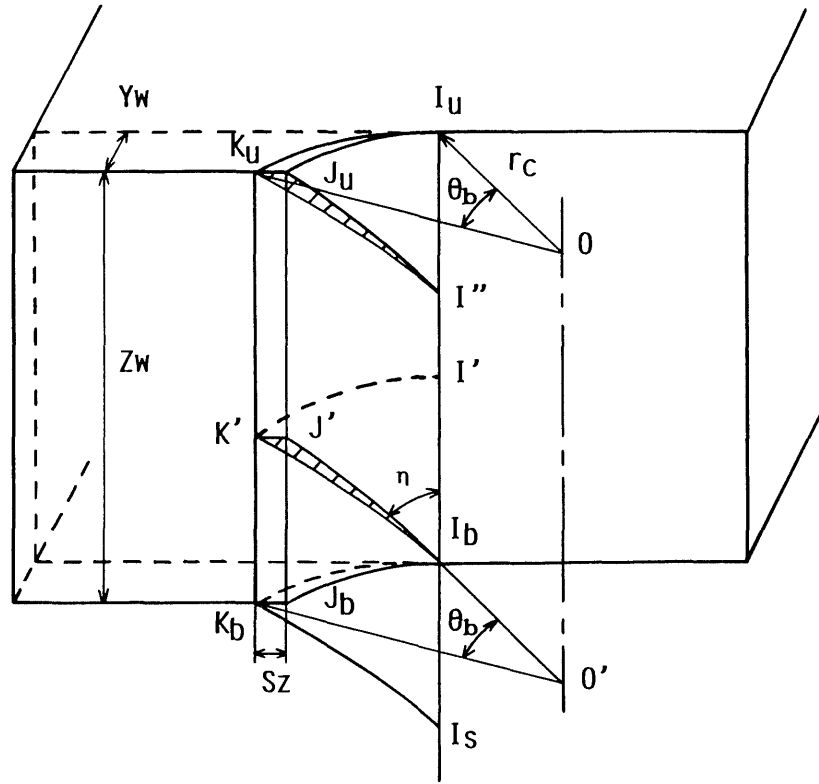


図 2.9 ねじれ刃による切削過程

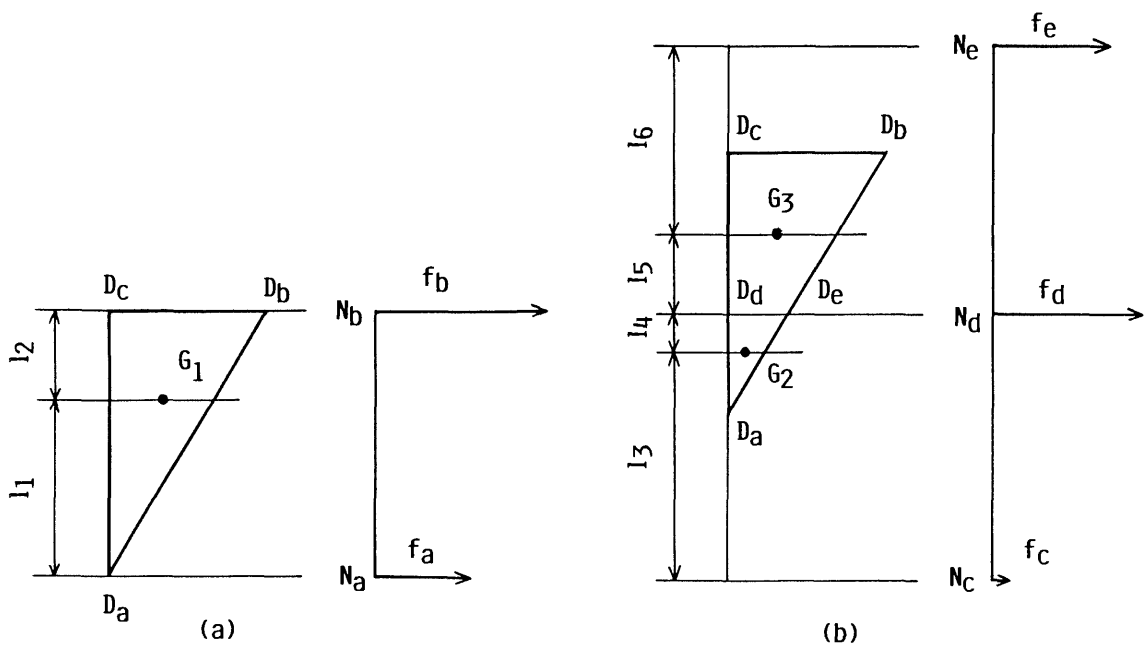


図 2.10 切削力分布に基づく節点荷重の計算方法

これらの荷重を工作物の各節点に加えるが、切削の進行に伴って図2.9に示した切れ刃はK'Ibの位置より上方に移動し、KuI''の位置を経て点Iuに達して切削を終了する。そこで、下面より上面まで荷重を加える節点の位置は移動することになる。

図2.11は代表的な切れ刃の位置であり、○印と●印の間に切削力の分布があることを意味している。また、○印は図2.9に示す点Ibの位置に対応し、その位置で変位を計算している。図において、条件1ないし3は2枚の切れ刃による同時切削が行なわれる場合であり、条件1および2は5点荷重、条件3は4点荷重となる。その他の条件は1枚の切れ刃による切削となるため全て2点荷重である。

### 2.3.2 荷重条件および拘束条件

後述する切削実験により切削力の3分力は次のように与えられる。

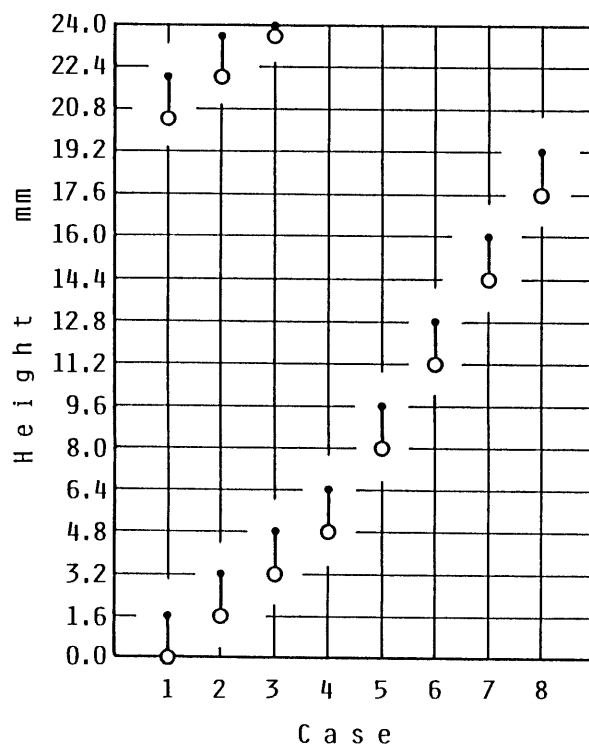


図 2.11 壁高さ方向における切れ刃位置と荷重点の関係

$$\left. \begin{aligned} F C_x &= 41.733 \text{ N} \\ F C_y &= 50.644 \text{ N} \\ F C_z &= 17.016 \text{ N} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

式(2.1)のFに式(2.2)のF C<sub>x</sub>の値を代入すると、節点NaないしNeのX分力f<sub>x,a</sub>ないしf<sub>x,e</sub>が計算できる。同様にF C<sub>y</sub>およびF C<sub>z</sub>の値を用いてYおよびZ分力が求められる。

一方、工具に対しては切れ刃がねじれているため、工作物の節点Naに対応する節点Na'に加える荷重のXおよびY成分を次式を用いて変換する必要がある。なお、θ<sub>c</sub>はtan(ΔZ・n/r<sub>c</sub>)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_{x,a} &= f_{x,a} \cdot \cos \theta_c + f_{y,a} \cdot \sin \theta_c \\ F_{y,a} &= -f_{x,a} \cdot \sin \theta_c + f_{y,a} \cdot \cos \theta_c \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

表2.1は計算により求めた工作物への荷重であり、ケース1ないし8に関して示している。また、表2.2は同様の方法により計算した工具への荷重である。

この他、解析に必要な工作物および工具の縦弾性係数および前述した拘束条件を整理すると次のようになる。

(1) 工作物

- a) 縦弾性係数：206 GPa
- b) 拘束条件：工作物下面の変位；U<sub>x</sub>=U<sub>y</sub>=U<sub>z</sub>=0

(2) 工具

- a) 縦弾性係数：578.2 GPa
- b) 拘束条件：Z=35,75 mmの中心軸の節点変位；U<sub>x</sub>=U<sub>y</sub>=U<sub>z</sub>=0  
Z=75 mm, Y=-6,6 mmの節点変位；U<sub>x</sub>=0



### 2.3.3 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通りである。

工作機械：アマダBM-104NCフライス盤，FANUC 10M (1  $\mu$ m/pulse)

工具：直径20 mm，2枚刃，ねじれ角右45°，超硬ソリッド  
エンドミル

工作物：炭素鋼S45C (図2.12および2.13参照)

切削条件：切削速度 60 m/min，半径方向切込み 0.2 mm，軸方向  
切込み 1, 10, 24 mm，送り 0.03 mm/tooth

図2.12は切削力を求めるために使用した工作物であり，薄板による切削力を重ね合わせて厚板加工による切削力を求めている。また，図2.13は薄肉形状の加工精度を測定するために使用した工作物である。図の中央にある厚肉部(30 mm)の両側は仕上げ条件により加工して，薄肉部(4.6 mm)の加工精度の基準面としている。なお，加工精度は機械に取り付けたままの状態，電気マイクロメータを用いて行っている。

表 2.1 工作物に加える荷重条件

(a) case 1			(b) case 2		(c) case 3		
Z (mm)	load (N)		Z (mm)	load (N)	Z (mm)	load (N)	
0.0	$f_{x,a} = -13.9$	$f_a$	1.6	$f_a$	3.2	$f_a$	
	$f_{y,a} = 18.9$		3.2	$f_b$	4.8	$f_b$	
	$f_{z,a} = 5.7$		20.8	$f_c$	22.4	$f_c$	
1.6	$f_{x,b} = -27.8$	$f_b$	22.4	$f_d$	24.0	$f_{x,f} = -2.2$	
	$f_{y,b} = 31.7$		24.0	$f_e$		$f_{y,f} = 2.6$	
	$f_{z,b} = 11.3$			$f_{z,f} = 0.8$			
19.2	$f_{x,c} = -0.2$	$f_c$	(d) case 4 to 8				
	$f_{y,c} = -0.2$		case 4	4.8	$f_a$	6.4	$f_b$
	$f_{z,c} = 0.2$		case 5	8.0	$f_a$	9.6	$f_b$
20.8	$f_{x,d} = -23.5$	$f_d$	case 6	11.2	$f_a$	12.8	$f_b$
	$f_{y,d} = 28.5$		case 7	14.4	$f_a$	16.0	$f_b$
	$f_{z,d} = 9.6$		case 8	17.6	$f_a$	19.2	$f_b$
22.4	$f_{x,e} = -18.1$	$f_e$					
	$f_{y,e} = 22.0$						
	$f_{z,e} = 7.4$						

表 2.2 工具に加える荷重条件

(a) case 1		(b) case 2		(c) case 3	
Z (mm)	load (N)	Z (mm)	load (N)	Z (mm)	load (N)
0.0	$F_{x, a} = -18.9$	1.6	$F_{x, a} = -21.7$	3.2	$F_{x, a} = -23.2$
	$F_{y, a} = -13.9$		$F_{y, a} = -8.9$		$F_{y, a} = -3.4$
	$F_{z, a} = -5.7$		$F_{z, a} = -5.7$		$F_{z, a} = -5.7$
1.6	$F_{x, b} = -37.6$	3.2	$F_{x, b} = -41.1$	4.8	$F_{x, b} = -42.2$
	$F_{y, b} = -19.3$		$F_{y, b} = -9.5$		$F_{y, b} = -0.8$
	$F_{z, b} = -11.3$		$F_{z, b} = -11.3$		$F_{z, b} = -11.3$
19.2	$F_{x, c} = -0.0$	20.8	$F_{x, c} = -0.2$	22.4	$F_{x, c} = -0.3$
	$F_{y, c} = -0.1$		$F_{y, c} = -0.2$		$F_{y, c} = -0.1$
	$F_{z, c} = -0.1$		$F_{z, c} = -0.1$		$F_{z, c} = -0.1$
20.8	$F_{x, d} = -29.7$	22.4	$F_{x, d} = -34.1$	24.0	$f_{x, d} = -3.4$
	$F_{y, d} = -21.9$		$F_{y, d} = -14.0$		$f_{y, d} = -0.5$
	$F_{z, d} = -9.6$		$F_{z, d} = -9.6$		$f_{z, d} = -0.9$
22.4	$F_{x, e} = -26.3$	24.0	$F_{x, e} = -28.1$		
	$F_{y, e} = -10.8$		$F_{y, e} = -4.1$		
	$F_{z, e} = -7.4$		$F_{z, e} = -7.4$		

(d) case 4		(e) case 5		(f) case 6	
Z (mm)	load (N)	Z (mm)	load (N)	Z (mm)	load (N)
4.8	$F_{x, a} = -23.3$	8.0	$F_{x, a} = -19.4$	11.2	$F_{x, a} = -10.9$
	$F_{y, a} = -2.4$		$F_{y, a} = -13.1$		$F_{y, a} = -20.7$
	$F_{z, a} = -5.7$		$F_{z, a} = -5.7$		$F_{z, a} = -5.7$
6.4	$F_{x, b} = -40.8$	9.6	$F_{x, b} = -30.8$	12.8	$F_{x, b} = -13.5$
	$F_{y, b} = -11.0$		$F_{y, b} = -29.0$		$F_{y, b} = -40.0$
	$F_{z, b} = -11.3$		$F_{z, b} = -11.3$		$F_{z, b} = -11.3$

(g) case 7		(h) case 8	
Z (mm)	load (N)	Z (mm)	load (N)
14.4	$F_{x, a} = -0.1$	17.6	$F_{x, a} = -11.2$
	$F_{y, a} = -23.4$		$F_{y, a} = -20.6$
	$F_{z, a} = -5.7$		$F_{z, a} = -5.7$
16.0	$F_{x, b} = -7.0$	19.2	$F_{x, b} = -25.9$
	$F_{y, b} = -41.7$		$F_{y, b} = -33.4$
	$F_{z, b} = -11.3$		$F_{z, b} = -11.3$

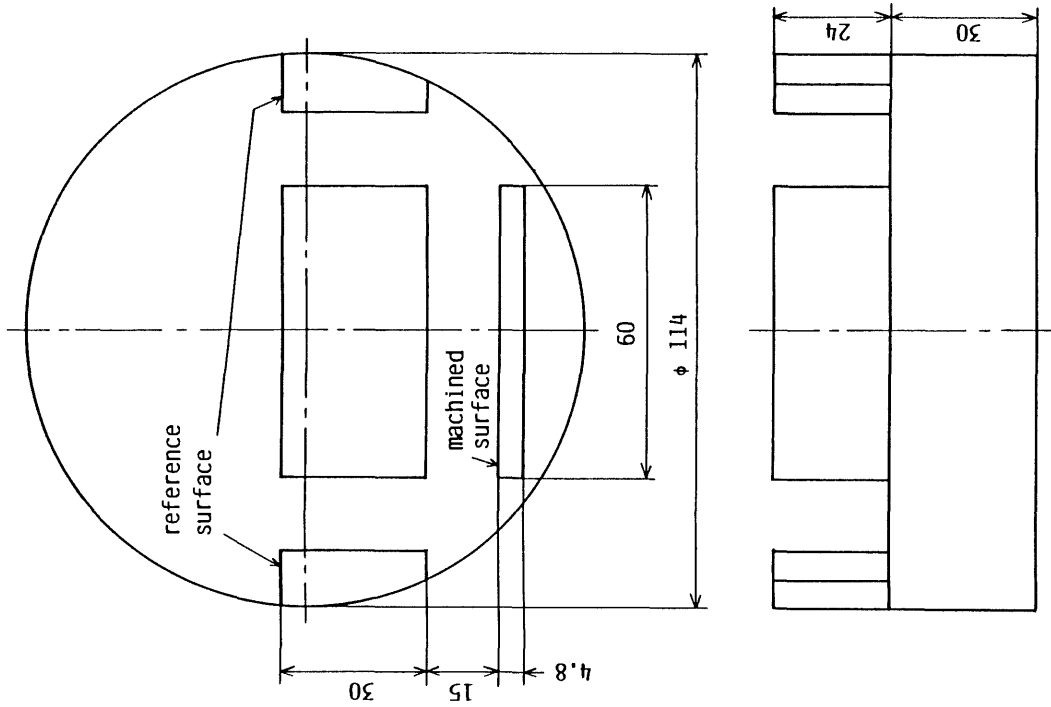


图 2.13 工作物 (加工精度测定用)

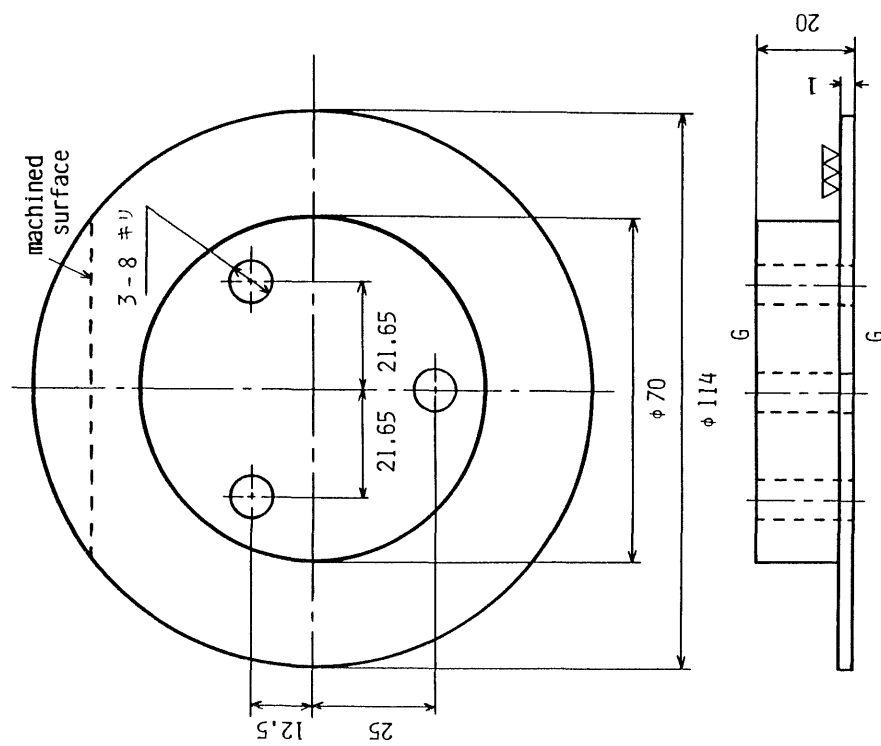


图 2.12 工作物 (切削力测定用)

## 2.4 解析結果および実験結果と考察

### 2.4.1 切削力曲線と荷重

図2.14は板厚1 mmによる加工を行ない、その切削力を重ね合わせて1.6 mm以上となる2 mmの切削力曲線にしたものである。ねじれ刃が図2.9の $K'I_b$ の位置に達する時刻は、切削開始( $K_bI_s$ )より2.35 ms進んだ時刻である。したがって、その時刻における切削力の3分力は式(2.2)に示す値として求められる。

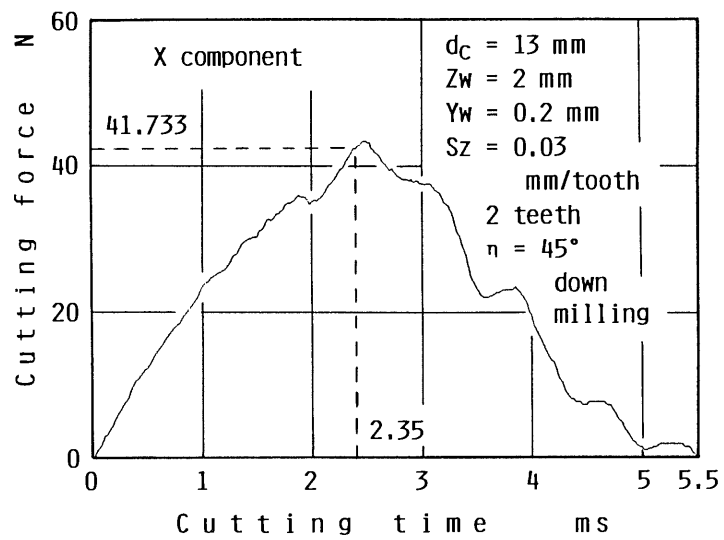
### 2.4.2 工作物および工具の変形解析

図2.15は横軸に変位、縦軸に壁の高さをとり、解析により求めた工作物の変形を示している。工作物の変形は壁の下面で小さいが、上面に近づくとつれて増加し、22 mmの位置でともに最大値を示している。また壁の端部に相当する切削開始近傍( $X=-58$  mm)で変形量が最も大きい、中央部に近づくとつれて減少し、 $X=-30$  mm(中央)で最も変形が小さい。各切削位置で最大値を示す壁高さ22 mmの位置と比較すると、端部では $5.4 \mu\text{m}$ に対して中央部では $2.5 \mu\text{m}$ と半減している。

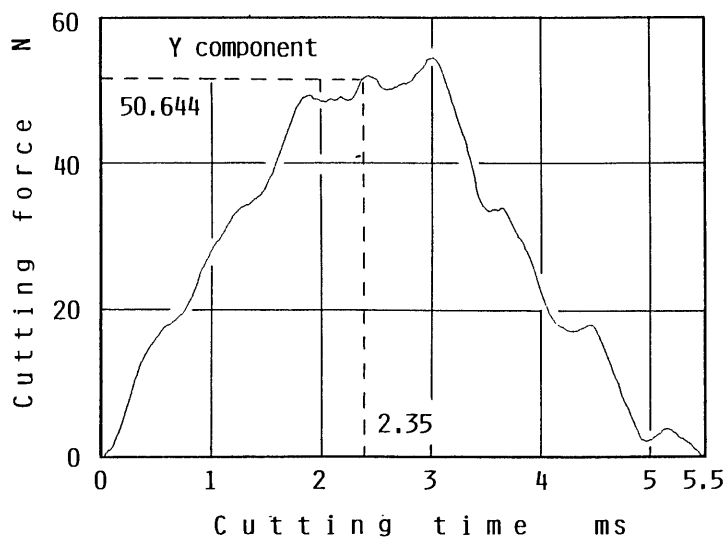
図2.16は工具の変形を示したものである。工具の場合切削位置が変化しても切削力は同様に作用するため、解析によって得られる変形量は変わらない。工具は片持ちはり状態で使用されるため、刃先に近い部分で変形量が最も大きく、シャンク部に近づくとつれて減少する。なお壁の高さ3 mmおよび22 mm付近で変形量が少し大きくなっているが、これは2枚の切れ刃による同時切削が生じて切削力が増加したためである。

### 2.4.3 解析および実験結果と考察

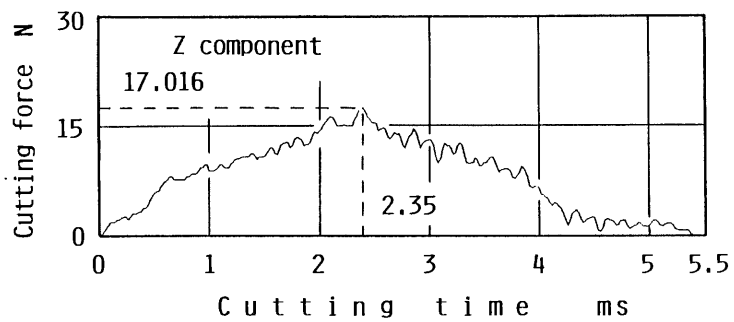
図2.17は解析結果と実験結果を比較したものであり、一点鎖線に



(a) X 分力



(b) Y 分力



(c) Z 分力

图 2.14 切削力曲线

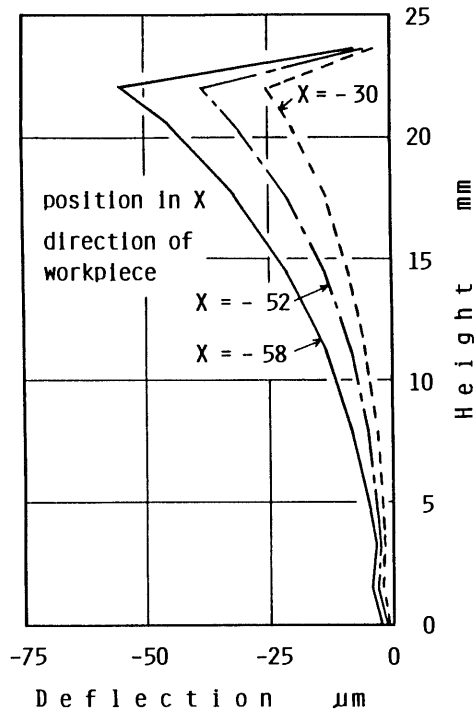


図 2.15 工作物の変形

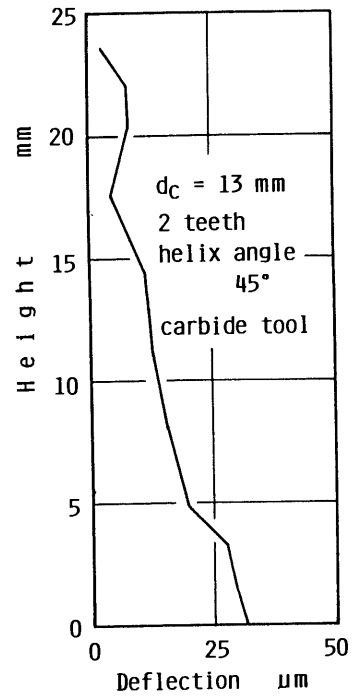


図 2.16 工具の変形

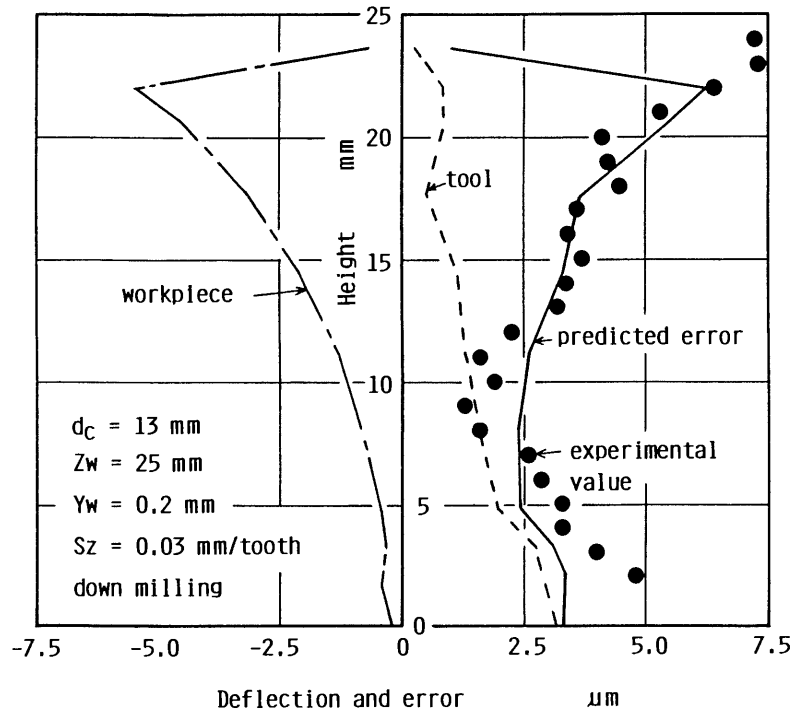


図 2.17 薄肉形状部品の加工誤差生成機構

より工作物，破線により工具の変形を示し，実線は両者の相対変位である。●印は実験値であり，加工誤差の予測値となる実線の大きさおよび形状とよく一致している。図2.18は他の切削位置における解析結果と実験値を比較しているが，図2.17と同様に両者はほぼ一致している。両者の差により予測誤差を計算すると図2.19に示すようになり，壁の上面を除くと最大値は $2\mu\text{m}$ 以下である。また壁の上面の2点を除いて各切削位置における予測誤差の平均値および標準偏差値を計算し，その結果を図2.20に示すと両者はともに小さい。なお，上面における予測誤差と実験値の差に関しては今後の検討課題である。

図2.21は予測誤差に占める工作物の変形の比率を示したものである。壁の下面では工作物の変形が小さいため比率も小さいが，上面に近づくにつれて変形量が増加するため比率も大きくなり，壁の高さ15mmで50%を越えている。一方，工具の比率は刃先部に相当する壁の下面近傍で変形が大きいため比率は非常に大きいですが，上面に近づくにつれて減少することになり，高さ17mm近傍より比率は30%程度になっている。

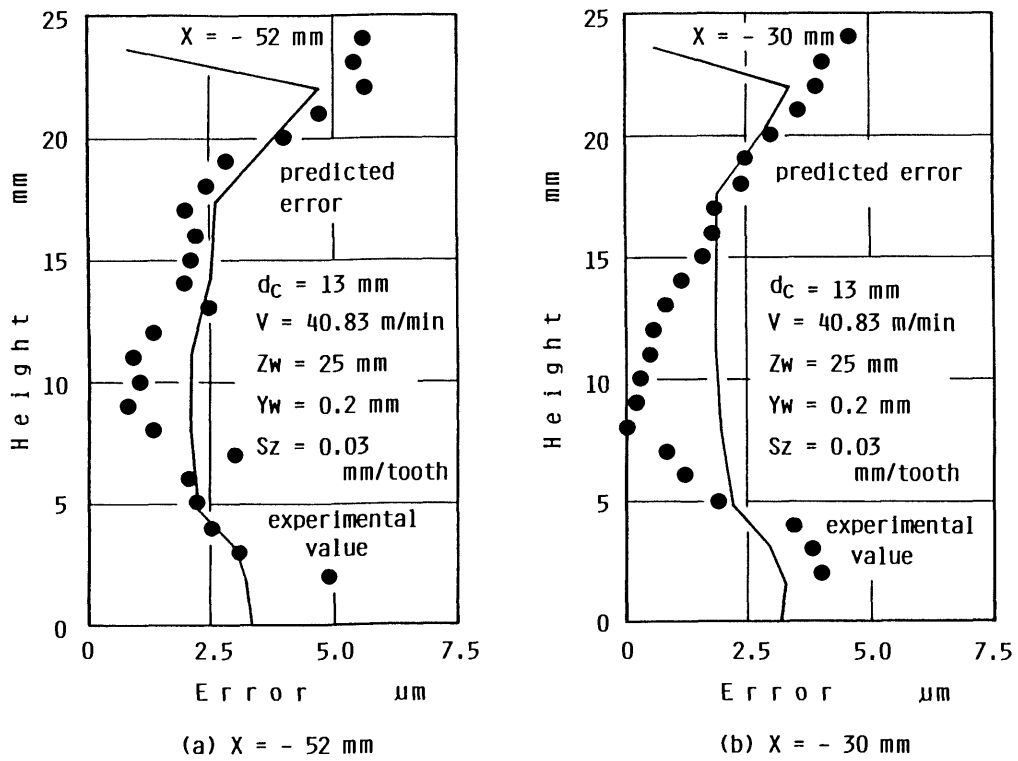


図 2.18 加工誤差の予測値と実験値の比較

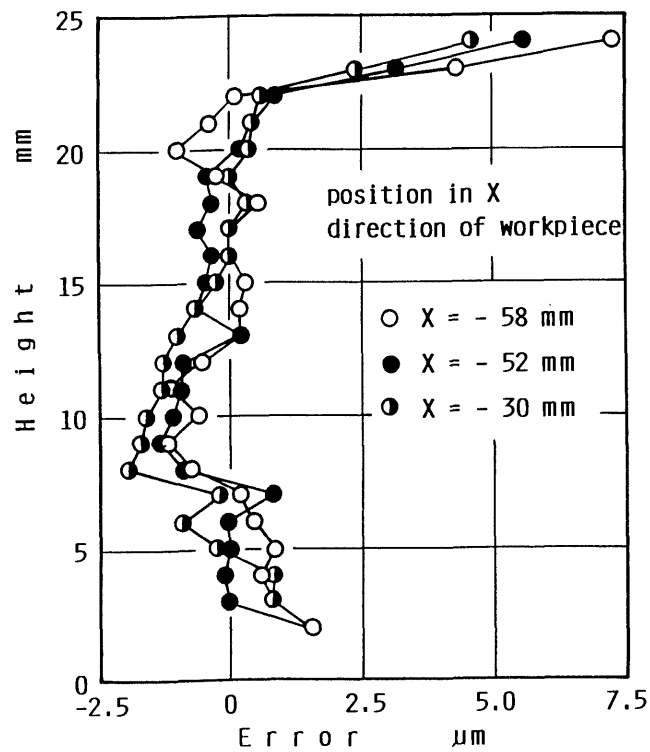


図 2.19 予測誤差



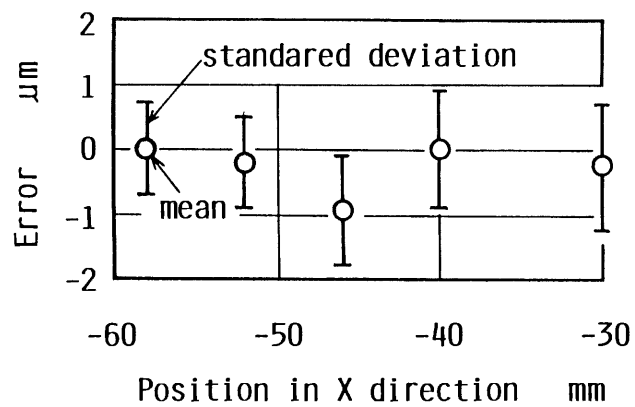


図 2.20 切削位置による予測誤差

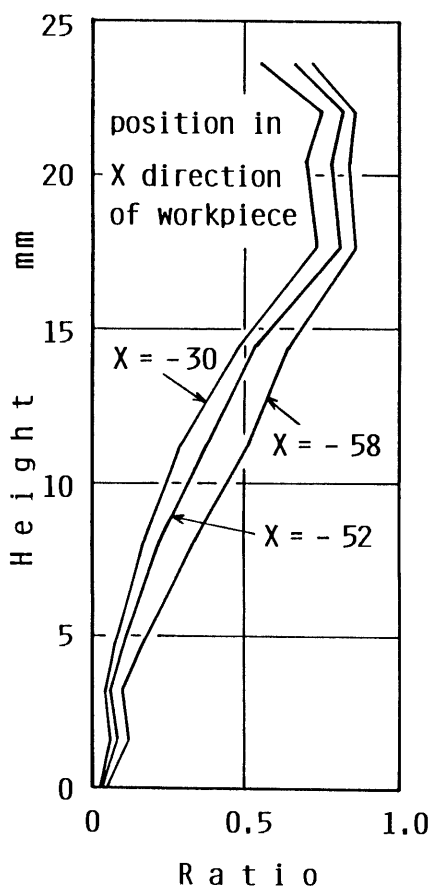


図 2.21 予測誤差に占める工作物の変形の比率

### 3. スクロール形状部品の高精度・高能率加工法

#### 3.1 スクロール形状と工具経路

##### 3.1.1 スクロール形状の計算方法

スクロール形状はインボリュート関数により与えられ、インボリュート曲線から一定の距離  $s$  離れた曲線により定義される。図3.1はX-Y座標系において両者の関係を示したもので、図においてインボリュート曲線上の点 $T_i$ と点 $T_i$ より  $s$  はなれたスクロール曲線上の点 $P_i$ を結ぶと、その延長線は基礎円上の点 $Q_i$ で接する。 $r_g$ を基礎円半径、 $\Delta t$ を分割角度、X軸から反時計方向に点 $Q_i$ までの角度を $t_i$ とすると、点 $P_i$ の座標は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} X_i &= r_g \cdot \cos(t_i) + (r_g \cdot t_i - s) \cdot \sin(t_i) \\ Y_i &= r_g \cdot \sin(t_i) - (r_g \cdot t_i - s) \cdot \cos(t_i) \\ t_i &= \Delta t \cdot i \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

図3.2は $r_g=3.5$  mm,  $t=0.09$  rad,  $s=-7.9$  (内面)および $4.3$  mm(外面),  $n=130$ の条件を式(3.1)に代入して点 $P_i$ の座標を計算し、各点を結んだものである。図中の点Aないし $0$ は、後述する切削実験において加工精度の測定位置であり、スクロールの内面または外面とX軸、Y軸および両軸と $45^\circ$ をなす一点鎖線との交点である。なお、内面は $B_i$ ないし $0_i$ 、外面は $A_0$ ないし $0_0$ として区別している。

##### 3.1.2 工具経路の補間および計算方法

図3.2で示したスクロール形状を3軸制御工作機械を用い、円弧補間指令により加工する場合、曲率中心および曲率半径の値が必要となる。図3.3はその計算方法を示しており、連続する3点 $P_i, P_{i+1}$

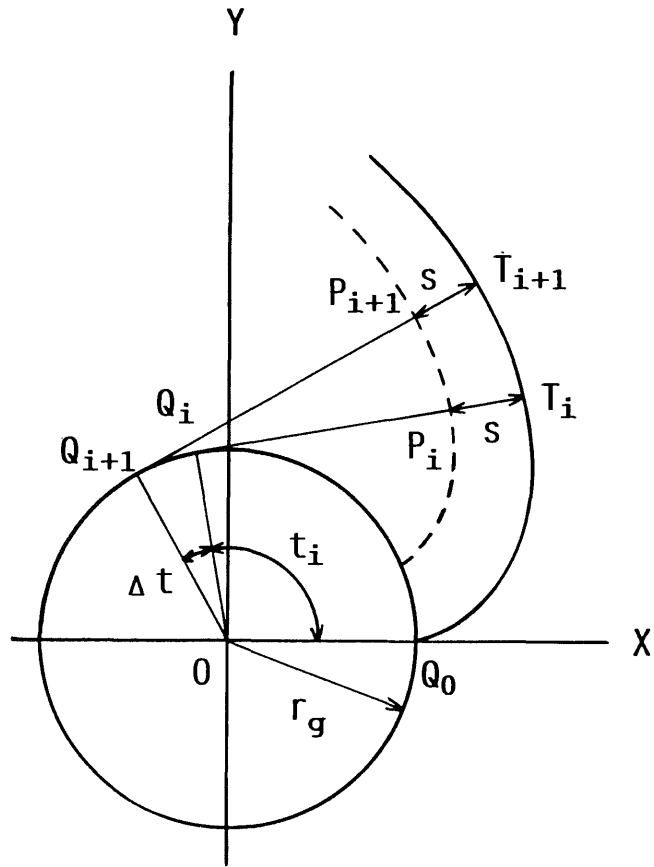


図 3.1 スクロール形状の定義

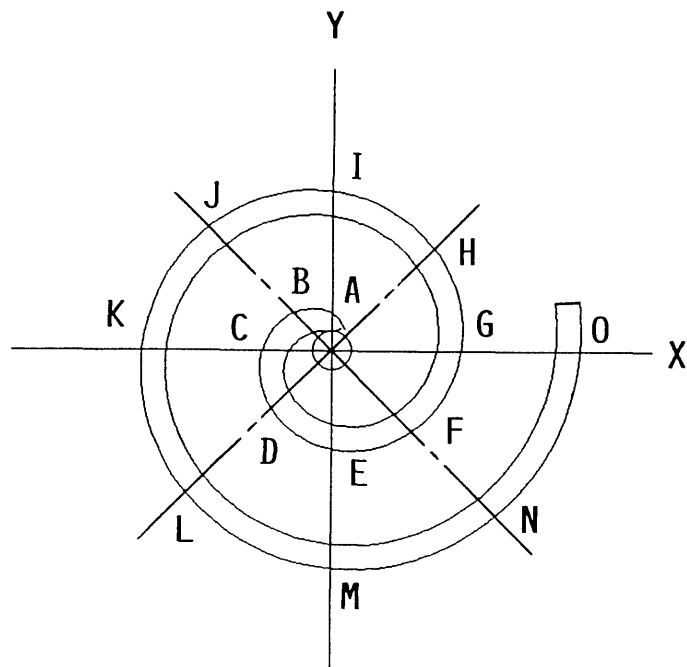


図 3.2 スクロール形状と座標系

および $P_{i+2}$ を通る円弧を順次計算して求めている。すなわち円の方  
程式は次式で与えられるため、3点の座標値を次式に代入して連立  
方程式を解き、係数 $C_1$ 、 $C_2$ および $C_3$ を計算している。

$$X_k^2 + Y_k^2 + C_1 X_k + C_2 Y_k + C_3 = 0 \quad (k=i, i+1, i+2) \quad (3.2)$$

曲率中心点 $A_i(XA_i, YA_i)$ および曲率半径 $R_i$ は式(3.2)の係数 $C_1$ ない  
し $C_3$ を用いて次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} XA_i &= -C_1/2, & YA_i &= -C_2/2 \\ R_i &= \sqrt{(C_1^2 + C_2^2)/4 - C_3} \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

しかしインポリュート曲線を複数の円弧で近似するため、近似に  
よる誤差は避けられず、その大きさは分割角度 $\Delta t$ に依存する。こ  
の誤差を小さくするためには分割角度をできる限り小さくすればよ  
いが、 $\Delta t=0.09$  radで $0.16 \mu\text{m}$ である。1パルス $1 \mu\text{m}$ で指令する数  
値制御工作機械を用いて加工することを考えると、この値は十分小  
さい値であり、以下の計算においてはこの値を使用している。

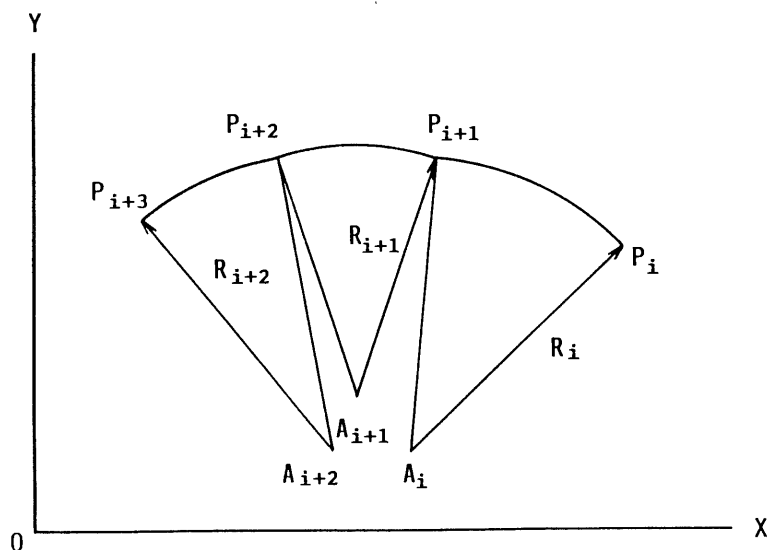


図 3.3 円弧による近似の方法

### 3.2 ねじれ刃による切削面積の計算

図3.4はスクロール内面の点 $P_i$ より $P_{i+1}$ までの区間の切削状態を工具軸方向より投影して示したものである。図においては工具中心点を $C_{j,2}$ で示し、点 $C_{j,1}$ は1切れ刃前の工具中心位置である。円弧 $P_i P_{i+1}$ を加工する間における最大切削面積 $A_{max,i}$ を求めるために、まず3点 $I_j, J_j, K_j$ で囲まれる投影面積(斜線部)を計算する必要がある。この投影面積は、後述する方法により求められる上記3点の座標を用い、シンプソンの積分公式により計算することができる。図3.4に使用した $U_i-V_i$ 座標系は、曲率中心点 $A_i$ を原点とし、点 $P_i$ と $P_{i+1}$ が $V_i$ 軸に対して対称となるように定めている。また点 $P_i$ より $P_{i+1}$ の間で最大切削面積 $A_{max,i}$ は一定であるが、以下の計算を容易にするため、 $V_i$ 軸上に $C_{j,2}$ があるものとする。 $U_i$ 軸は $X$ 軸に対して反時計方向に $\alpha_i$ だけ回転しており、この角度は点 $P_i$ および $P_{i+1}$ の座標を用いて次式により与えられる。

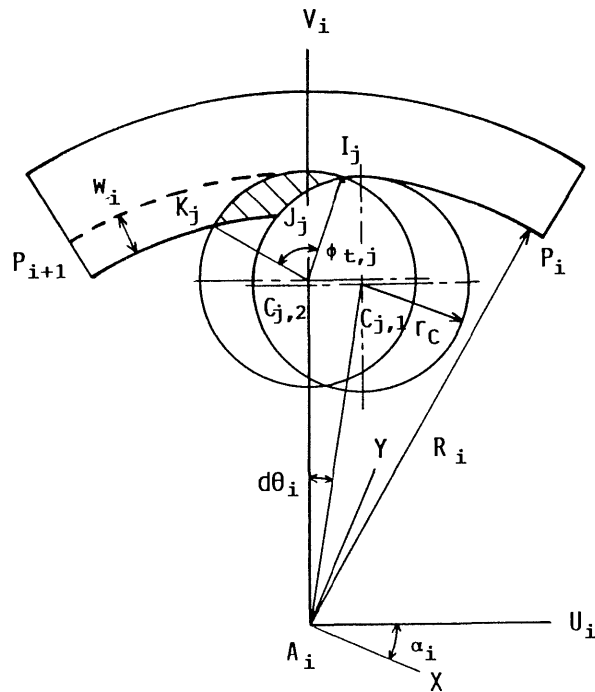


図 3.4 スクロール内面における切削面積の計算方法

$$\alpha_i = \tan^{-1}\{(Y_{i+1} - Y_i)/(X_{i+1} - X_i)\} \quad (3.4)$$

なお工具中心点 $C_{j,2}$ および $C_{j,1}$ の座標は主軸回転数を $N_s$ ，送り速度を $F_s$ ，刃数を $Z_n$ とするとそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} UC_{j,2} &= 0 \\ VC_{j,2} &= R_i - r_c \\ UC_{j,1} &= (R_i - r_c)\sin d\theta_j \\ VC_{j,1} &= (R_i - r_c)\cos d\theta_j \\ d\theta_j &= Z_n \cdot N_s / \{60 F_s (R_i - r_c)\} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

3点 $I_j(UI_j, VI_j)$ ，点 $J_j(UJ_j, VJ_j)$ および $K_j(UK_j, VK_j)$ の座標は，中心が点 $C_{j,2}(U_{j,2}, V_{j,2})$ および $C_{j,1}(U_{j,1}, V_{j,1})$ とし，半径がそれぞれ $r_c$ の円および中心が点 $A_i$ ，半径が $R_i$ の円のうち2円の交点により与えられる。なお $\angle I_j C_{j,2} K_j$ は切削を行っている切れ刃の最大接触角に相当し，この角を $\phi_{t,j}$ とすると次式で与えられる。

$$\phi_{t,j} = \cos^{-1}\left\{ \frac{(UIC_j \cdot UKC_j + VIC_j \cdot VKC_j)}{\sqrt{UIC_j^2 + VIC_j^2} \cdot \sqrt{UKC_j^2 + VKC_j^2}} \right\} \quad (3.6)$$

ここで $UIC_j$ ， $VIC_j$ ， $UKC_j$ および $VKC_j$ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} UIC_j &= UI_j - UC_{j,2} \\ VIC_j &= VI_j - VC_{j,2} \\ UKC_j &= UK_j - UC_{j,2} \\ VKC_j &= VK_j - VC_{j,2} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

最大投影面積 $AP_{\max,i}$ の計算は、3点 $I_j$ 、 $J_j$ および $K_j$ の座標およびシンプソン積分公式を用いて行っている。求めた最大投影面積に $1/\sin n$  ( $n$ :ねじれ角)を乗じることにより最大切削面積 $A_{\max,i}$ が求められる。

一方図3.5は外面の加工における切削面積の計算方法を示したもので、工具の進行方向は図3.4の逆になる。最大切削面積の計算方法は内面加工の場合と同様であり、まず3点 $I_j$ 、 $J_j$ および $K_j$ の座標を計算する。次にシンプソンの積分公式により斜線部で示す最大投影面積を計算し、その値に $1/\sin n$ を乗じて求めている。ただし、式(3.5)において、 $R_i - r_c$ を $R_i + r_c$ に置換する必要がある。

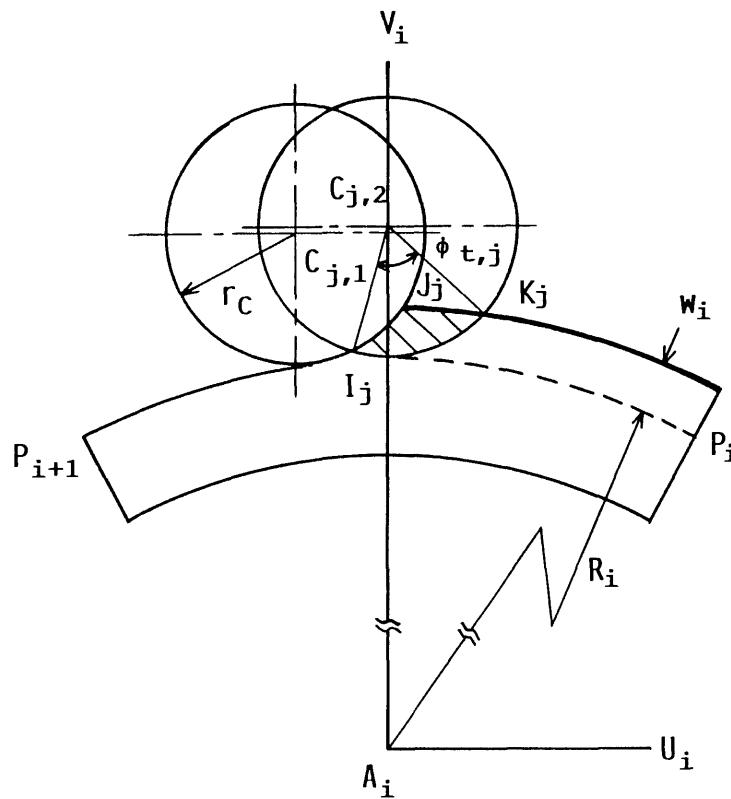


図 3.5 スクロール外面における切削面積の計算方法

### 3.3 実験条件および方法

実験に使用した工作機械，工具，チャックおよび工作物は次の通りである。

工作機械：アマダBM-104 NCフライス盤 (FANUC 10M)

工具：直径13 mm，2枚刃，超硬ソリッドエンドミル，ねじれ角右45°

チャック：弾性変形方式(チャックA)，油圧方式(チャックB)

切削方式：下向き切削，湿式 (マシンオイル 1.3 l/min)

工作物：炭素鋼S45C，直径 115 mm，高さ 64 mm

切削条件は表3.1に示す通りである。なお，後述するが加工精度および加工能率の改善方法として，半径方向切込み，送り速度および主軸回転数を変化させて切削面積を一定する方法を提案しており，表3.1にはそれらの条件についても示している。

実験は工作物を治具を用いてテーブルに固定し，荒加工および中仕上げ加工の後に表3.1の条件で仕上げ加工を行っている。なおチャックは弾性変形を利用したチャックAを用いるとともに，各種改善方法に関しては偏心による影響が少ない油圧を利用したチャックBを用いて加工精度の比較を行っている。

加工精度は工作物は機械に取り付けたまま電気マイクロメータを用いてスクロール内外面の側面の誤差形状を測定しているが，その基準にはスクロールに沿って仕上げ条件により加工した上面より5 mm幅の基準面を利用している。



表 3.1 ( a ) スクロール内面加工における切削条件

	ordinary cutting	feed control	radial depth control	spindle revolution control
V m/min	40.84	40.84	40.84	61.06 ~ 28.96
Ns rpm	1000	1000	1000	1580 ~ 712
Zw mm	25	25	25	25
Yw mm	0.2	0.2	0.04 ~ 0.28	0.2
Fs mm/min	60	12 ~ 84	60	60
Amax mm <sup>2</sup>	0.068 ~ 0.01	0.014	0.014	0.014

表 3.1 ( b ) スクロール外面加工の切削条件

	ordinary cutting	feed control
V m/min	40.84	40.84
Ns rpm	1000	1000
Zw mm	25	25
Yw mm	0.2	0.2
Fs mm/min	60	112 ~ 282
Amax mm <sup>2</sup>	0.003 ~ 0.007	0.014

### 3.4 実験結果および考察

#### 3.4.1 内面の加工精度改善方法とその評価

図3.6は図中の条件によりスクロール内面を通常の加工法(一定の半径方向切込みおよび送り速度)により仕上げ加工を行う場合の, 最大切削面積 $A_{max}$ の変化を示したものである。中心部より外周部に向かって加工すると, 矢印の方向に切削面積は変化し, 特に点 $D_1$ 近傍より急激に減少して外周部の点 $O_1$ 近傍では中心部の点 $C_1$ の約 $1/7$ となる。この理由は凹曲面をエンドミルで加工する場合, その曲率半径が中心部の点 $C_1$ 近傍のように工具の半径に近くなると, 実際の半径方向切込みが幾何学的に設定した半径方向切込みに比べて非常に大きくなることによる<sup>2)</sup>。なお, 一点鎖線はスクロールの終了位置( $t=12.8$  rad)を示している。

図3.7は縦軸に側面の位置をとり, 横軸にスクロールの点 $C_1, F_1$ および $O_1$ における壁の加工誤差を示したものである。図より最大切削面積が $0.068$   $\text{mm}^2$ と大きくなる点 $C_1$ で, 誤差の平均値に相当する寸法誤差および最大値と最小値の差による形状誤差が大きく, それぞれ $41$   $\mu\text{m}$ および $32$   $\mu\text{m}$ である。一方点 $F_1$ および $O_1$ において, 最大切削面積はそれぞれ $0.014$ および $0.01$   $\text{mm}^2$ と小さいため, 両点における寸法誤差および形状誤差もそれぞれ $20.2, 18.8$   $\mu\text{m}$ および $10.0, 10.0$   $\mu\text{m}$ と小さい。

エンドミルによる加工誤差は, 切削力により主軸を含むチャック及び工具と工作物の変形によって生じる<sup>3)</sup>。切削力は切削面積に比例することより, 加工精度を向上させるためには, 図3.7に示すような最大切削面積の変化を抑制し, スクロールの任意の位置の加工に対して一定の値にする必要がある。

そこで本研究においては, 上記の目的を実現する方法として, (1)前加工面により半径方向切込みを制御する方法, (2)送り速度

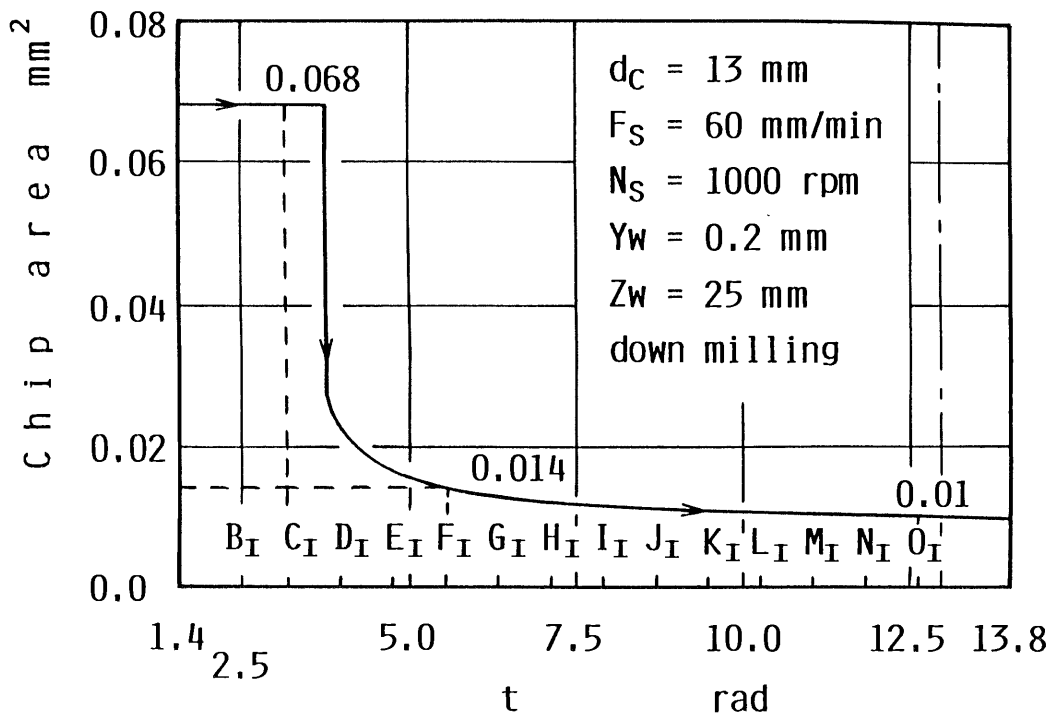


図 3.6 スクロール内面加工における切削面積の変化

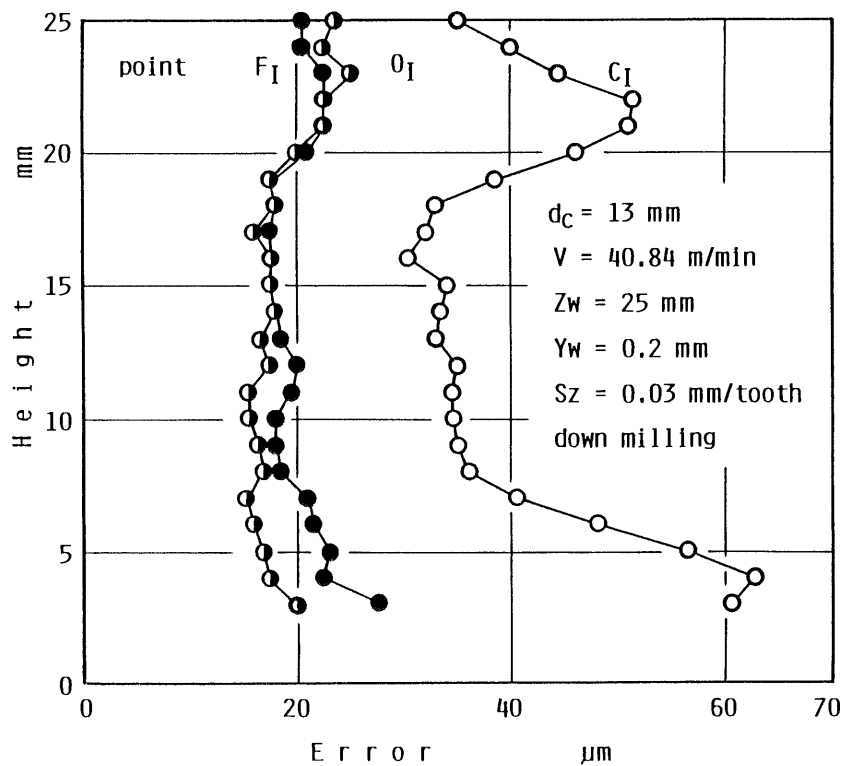


図 3.7 スクロール内面加工における加工誤差

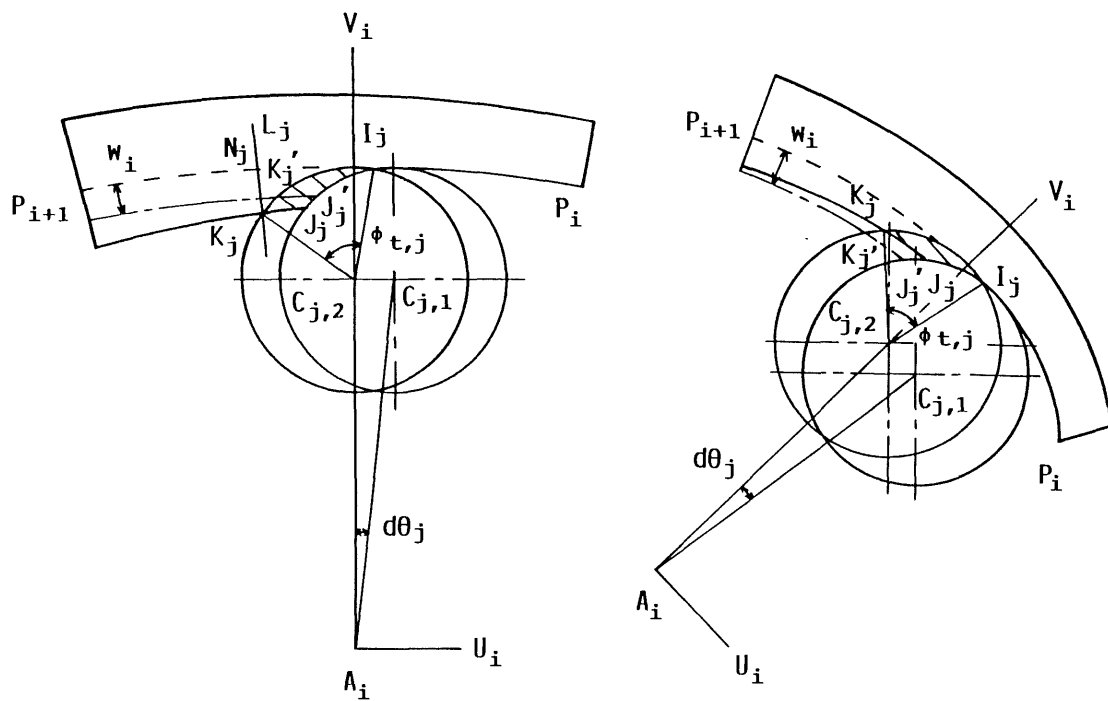
を制御する方法および(3)主軸回転数を制御する方法を提案する。  
 なお上記の方法においては、ともに最大切削面積を一定にしており、  
 その値は図3.6および3.7の結果より点F<sub>1</sub>における値(0.014mm<sup>2</sup>)を  
 用いることにする。

図3.8および3.9は加工精度改善方法の概略図であり、図3.8が上  
 記の(1)の方法、図3.10が(2)または(3)の方法に関して示している。  
 また両図は図3.6と同様に主軸方向より工具およびスクロールを投  
 影している。

まず図3.8に関して説明すると、通常の加工法は一定の半径方向切  
 込みw<sub>i</sub>を与える前加工面(一点鎖線)を切削する場合であり、切屑  
 は3点I<sub>j</sub>、J<sub>j</sub>'およびK<sub>j</sub>'で囲まれた形状となる。しかし、(a)図に  
 示す曲率半径の大きいスクロール外周部の加工においては投影切削  
 面積は減少し、(b)図に示す曲率半径の小さい中心部では逆に増加  
 する。工具の中心点C<sub>j,2</sub>の位置を変更せずに投影切削面積を一定に  
 するためには、半径方向切込みが増減するように前加工面を作成す  
 る必要がある。そのような前加工面を実線で示しているが、この前  
 加工面は工具中心点C<sub>j,2</sub>を中心とし、実験の条件では点I<sub>j</sub>より反時  
 計方向にφ<sub>t</sub>=18.3°(=φ<sub>t,j</sub>)回転した点K<sub>j</sub>(UK<sub>j</sub>,VK<sub>j</sub>)を次式により計  
 算し、それらの点を2.2節で述べた方法を用いて円弧で結ぶことに  
 より求めている。

$$\begin{Bmatrix} UK_j \\ VK_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_t & -\sin \phi_t \\ \sin \phi_t & \cos \phi_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} UI_j - UC_{j,2} \\ VI_j - VC_{j,2} \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

図3.8(a)のみ示しているが、点K<sub>j</sub>より破線で示す加工予定面に法  
 線L<sub>j</sub>を引き、その交点をN<sub>j</sub>とすると、K<sub>j</sub>N<sub>j</sub>の長さが制御された半径  
 方向切込みとなる。この値の変化を図3.10に示すと、スクロール中  
 心部近傍で大きく減少することになり、その結果最大切削面積は一



(a) 曲率半径が大きい場合 (b) 曲率半径が小さい場合

図 3.8 半径方向切込みを制御する方法

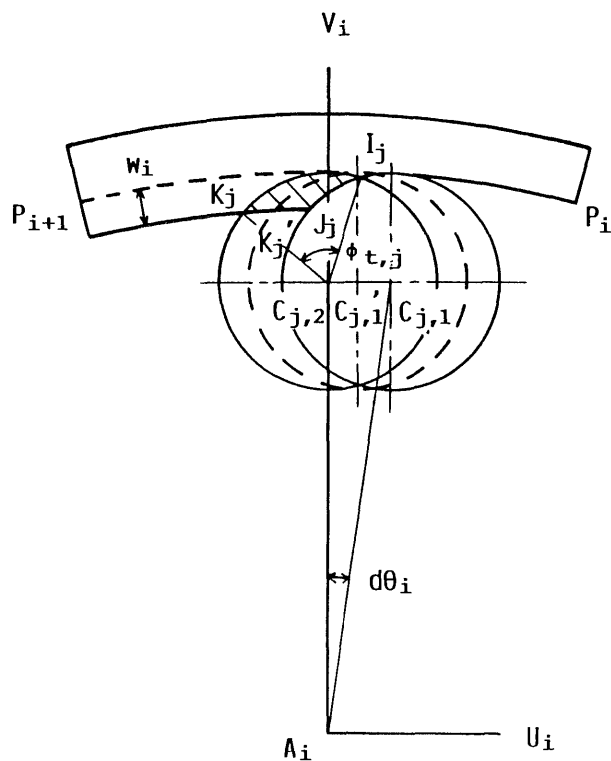


図 3.9 送り速度または主軸回転数を制御する場合

定値(0.014 mm<sup>2</sup>)になる。図中には図3.6の結果および最大切削面積を破線により併記しているが、両者の比較により、半径方向切込みおよび最大切削面積の変化が明らかである。

次に図3.9に示す送り速度及び主軸回転数制御の方法について説明する。まず前者について考えると、前加工面の位置を変更せずに投影切削面積を一定にするためには、送り速度を増減させて工具中心点の位置を変更する必要がある。図において工具中心点 $C_{i,2}$ を基準に考えれば、次の切れ刃の工具中心は通常の手順による点 $C_{i,1}'$ より $C_{i,1}$ に移動していることになる。このような送り速度 $F_{s,i}$ を近似的に次の手順により求めている。

- (1) 設定送り速度 $F_s=60$  mm/minを式(3.5)に代入し、点 $C_{j,2}$ 及び点 $C_{j,1}$ の座標を計算する。
- (2) 3点 $I_j$ 、 $J_j$ 及び $K_j$ の座標およびシンプソン積分公式を用いて、最大切削面積 $A_{max,i}$ を計算する。
- (3)  $A_{max,i} \times 1.01 > 0.014$  ならば $F_s = F_s + 1$ 、 $A_{max,i} \times 1.01 < 0.014$  ならば $F_s = F_s - 1$ として手順(1)にもどる。その他の場合は $F_{s,i} = F_s$ とする。

上記手順により、最大切削面積が一定な条件でスクロールの各位置を加工するための送り速度が求められる。図3.11の実線は上記手順を用いて $F_s=60$  mm/minの条件による送り速度を計算したものである。図より中心部から点 $F_1$ 近傍まで送り速度は急増し、その後外周部に移動するにつれてゆるやかな増加となる。

一方半径方向切込み及び送り速度が一定な条件においては、主軸回転数を変化させることにより最大切削面積を一定にすることが可能である。すなわち主軸回転数 $N_s$ を手順(1)ないし(3)で求めた送り速度 $F_{s,i}$ の増加率の逆数を乗じた値とすればよく、 $F_s$ を $N_s$

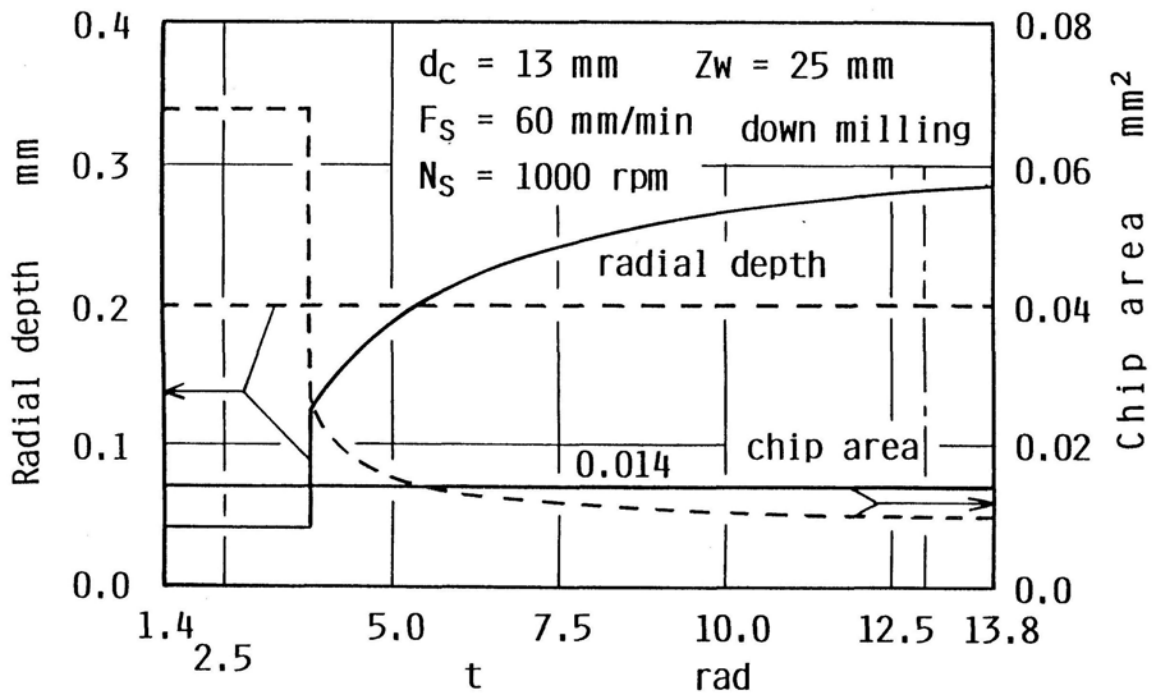


図 3.10 半径方向切込み制御による切込みと切削面積の変化

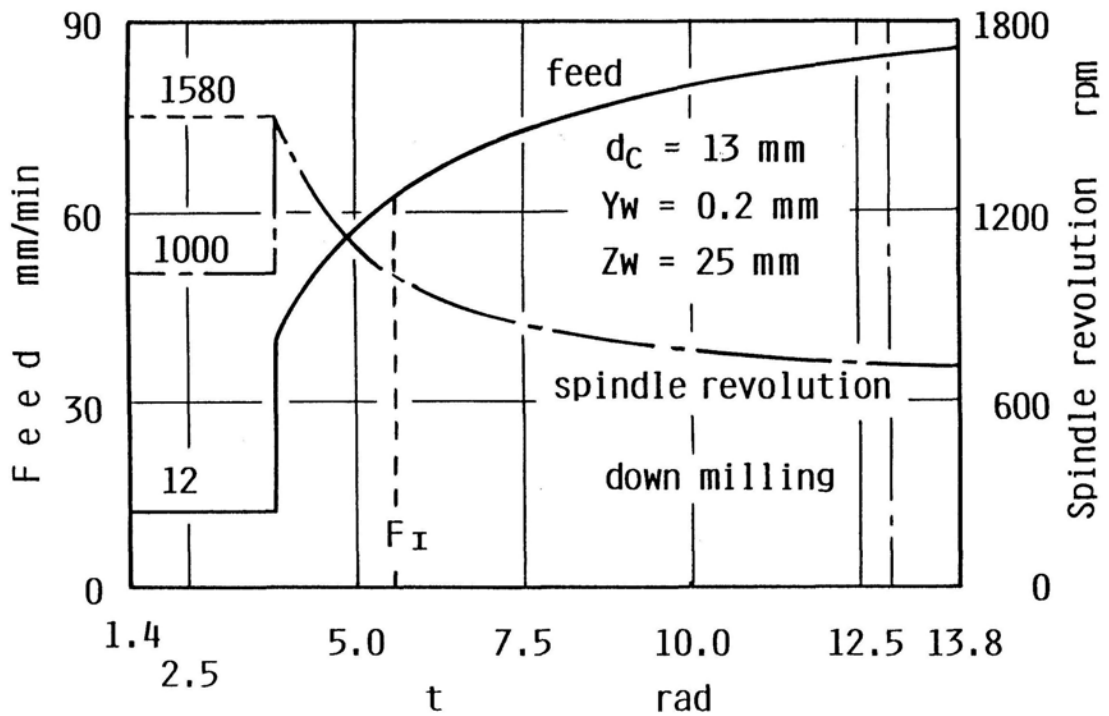


図 3.11 送り速度または主軸回転数制御による送りと主軸回転数の変化

に $F_{s,i}$ を $N_{s,i}$ に置換すればよい。ただし不等号に関しては逆向きになる。

$N_s=1000$  rpmの条件を用いてスクロールの各位置における主軸回転数を計算し、図3.11の一点鎖線で示すと、中心部より点 $F_1$ 近傍まで急減し、その後外周部に移動するにつれてゆるやかな減少となり、送り速度と反対の傾向を示している。なお中心部で一部主軸回転数の変化が不連続となっている。本来なら破線で示す値を指令すべきであるが、加工精度の再現性を調べる目的から、送り速度制御による中心部の加工条件に一致するような主軸回転数(1000rpm)を指令しているためである。

図3.12は図3.7と同様の座標軸を用いて点 $C_1$ における加工誤差を示したもので、通常の加工法と各種加工精度改善方法による結果を比較している。切込み制御、送り速度制御および主軸回転数制御によりともに加工誤差は大幅に減少しており、誤差の平均値による寸法誤差はそれぞれ-1.0, 3.2および1.4  $\mu\text{m}$ である。また誤差の最大値と最小値の差による形状誤差も大きく改善されており、それぞれ8.0, 7.0および11.0  $\mu\text{m}$ である。なお、送り速度制御の場合、通常の加工と同様に弾性変形を利用したチャックAを用いているが、その他の結果は工具の取付け時の偏心を抑制するため油圧を利用したチャックBを用いている。送り速度制御の結果より両チャックによる差を比べると、チャックBの方が寸法誤差で約4  $\mu\text{m}$ 、形状誤差で約1  $\mu\text{m}$ 良くなっている。

図3.13は図3.12と同様に点 $F_1$ および $O_1$ において加工精度改善方法を比較したものである。(a)図に示す点 $F_1$ においては、どの制御を行っても最大切削面積は全て等しくなるにもかかわらず、上記の各制御を行った加工誤差が小さくなっている。一方、(b)図に示す点 $O_1$ においては、各制御を行うことにより通常の加工法に比べて最大切削面積が増加するため、形状誤差は少し増加してい



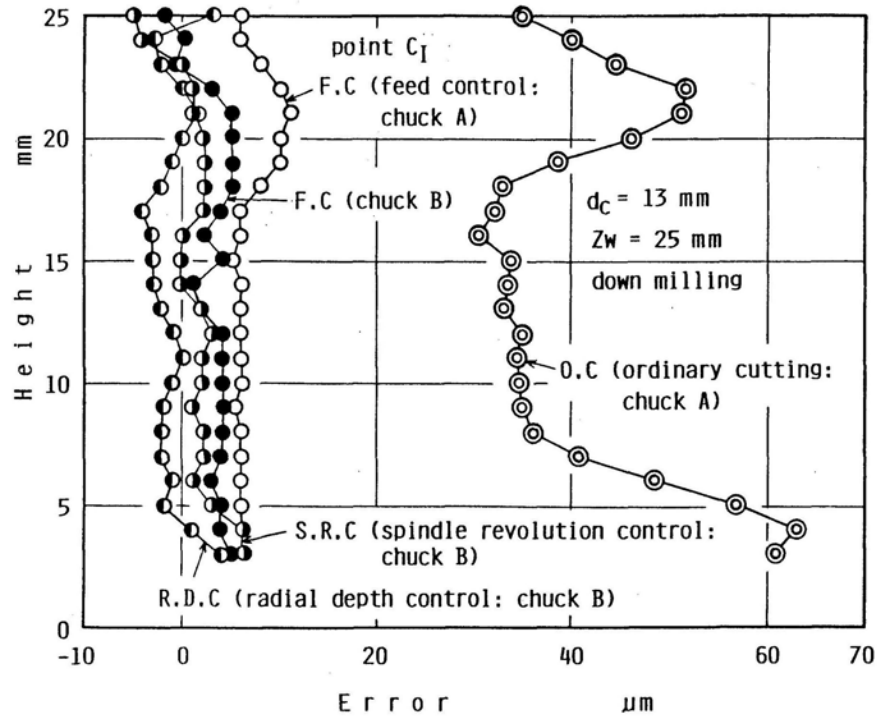
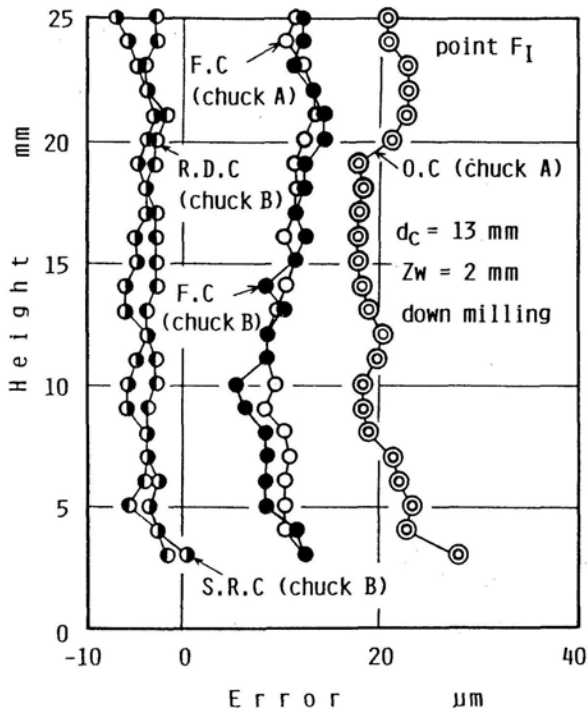
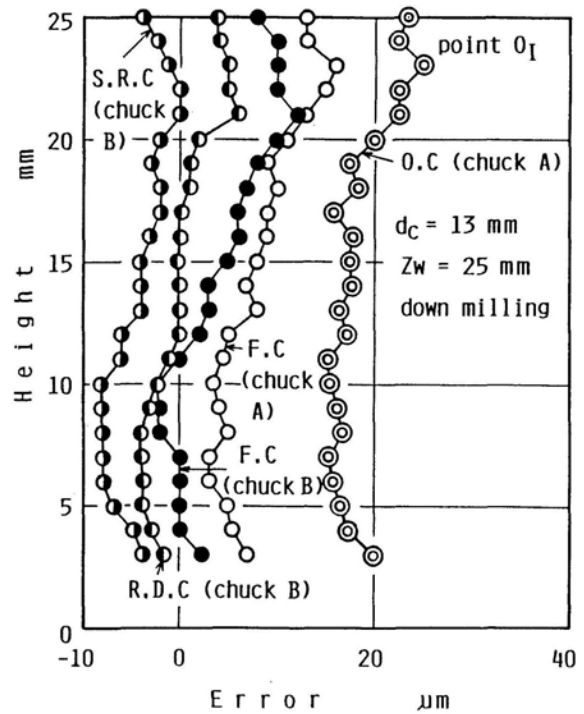


図 3.12 各種加工法による加工誤差の比較 (点C<sub>1</sub>)



(a) 点F<sub>1</sub>



(b) 点O<sub>1</sub>

図 3.13 各種加工法による加工誤差

るものの、寸法誤差はともに小さくなっている。これは前加工面を精度良く仕上げるために、中仕上げ加工を2度行ったことによる。すなわち通常の加工では取り代に中仕上げ加工による削り残しの誤差が加算されるためと考えられる。

図3.14はスクロール内面に関して、加工位置における寸法誤差および形状誤差の値を示し、各種加工精度改善方法の効果を比較したものである。図より特に中心部となる点B<sub>1</sub>、C<sub>1</sub>およびD<sub>1</sub>において加工誤差が大きく減少しており、改善効果が大い。その他の加工位置においても、ほぼ±10 μmの範囲に入っており、寸法誤差および形状誤差はともに改善されている。また、制御方法による加工誤差の差は明確ではない。しかし、表3.1に加工時間を比較すると、送り速度制御による方法が他の方法に比べて約16%短かく、能率が良いことになる。

なお、写真3.1は加工を終了した工作物である。

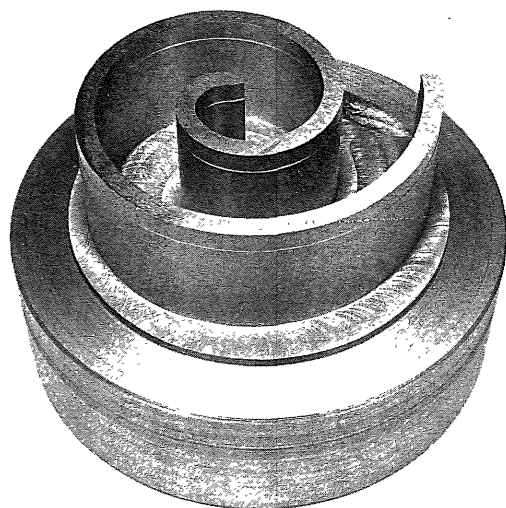
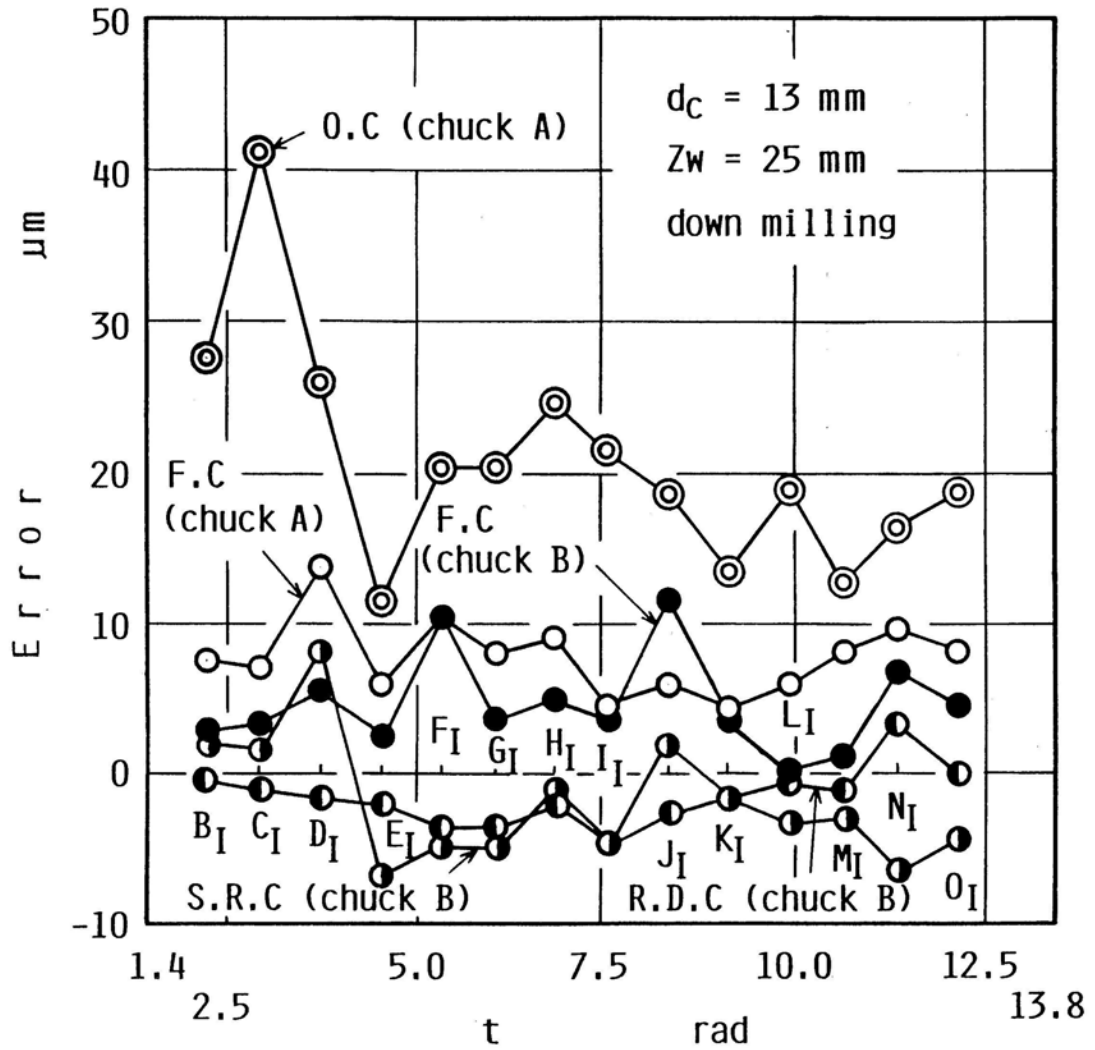
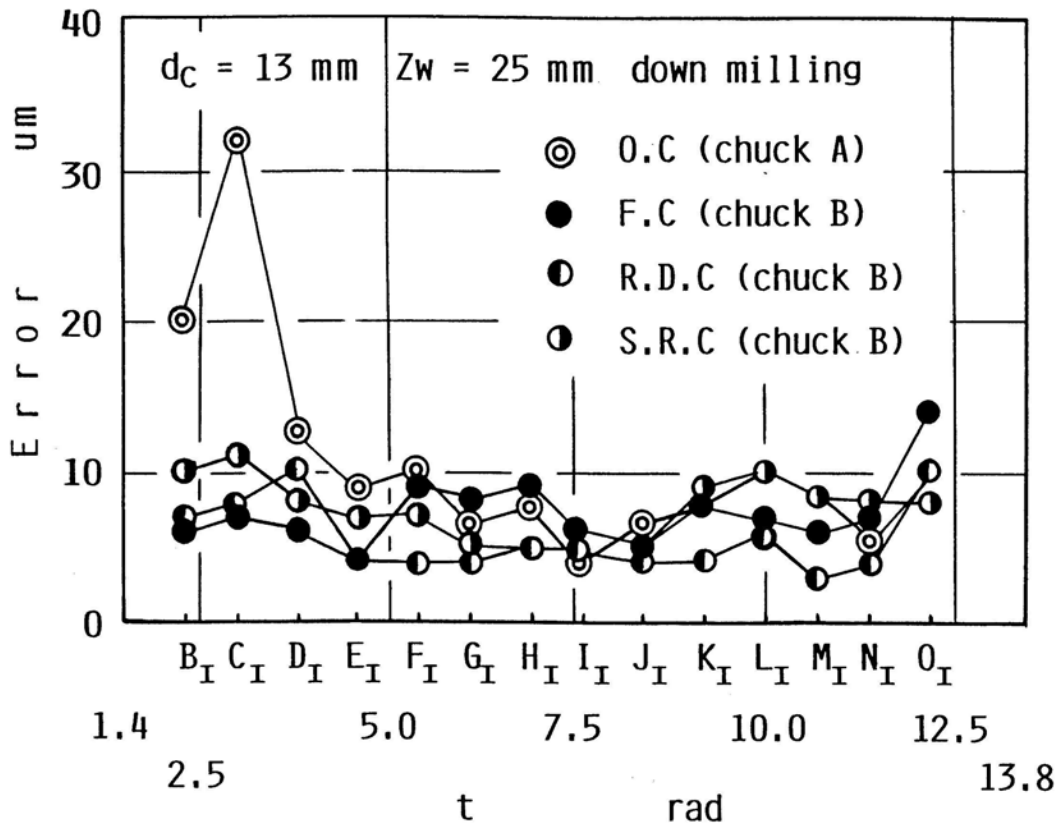


写真 3.1 工作物



( a ) 寸法誤差

図 3.14 加工位置における加工誤差の比較 (内面加工の場合)



(b) 形状誤差

図 3.14 加工位置における加工誤差の比較 (内面加工の場合)

表 3.2 スクロール内面加工の加工時間

cutting method	cutting time	rate
ordinary cutting	3 min 9.9 s	1.00
feed control	2 min 40.1 s	0.84
radial depth control	3 min 13.6 s	1.02
spindle revolution control	3 min 9.9 s	1.00

### 3.4.2 外面の加工能率改善方法とその評価

図3.15は図3.6と同様の座標軸に外面加工における最大切削面積の計算値を示したもので、下向き切削においては矢印の方向に変化する。図3.5より外面加工の場合、一定の半径方向切込み及び送り速度で切削しても、内面加工に比べて斜線部で示す切屑の投影面積が小さくなる。内面加工に比べて外面加工における最大切削面積は小さく、破線で示す点 $F_0$ の位置で比較すると外面加工による値( $0.007 \text{ mm}^2$ )は内面加工の約半分である。すなわち外面の切削条件は内面の条件に比べて能率が低いことを意味する。

しかし加工能率を高めるために送り速度を高めると、中心部は曲率半径の小さい凸曲面であるため、次式で与えられるツースマークによる仕上げ面粗さが増大する。なお、 $S_z$ は1刃当りの送りである。

$$\left. \begin{aligned} R_{m, \max} &= S_z^2 \cdot R_i / \{8r_c(R_i + r_c)\} \\ S_z &= (R_i + r_c) \sin d\theta_i \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

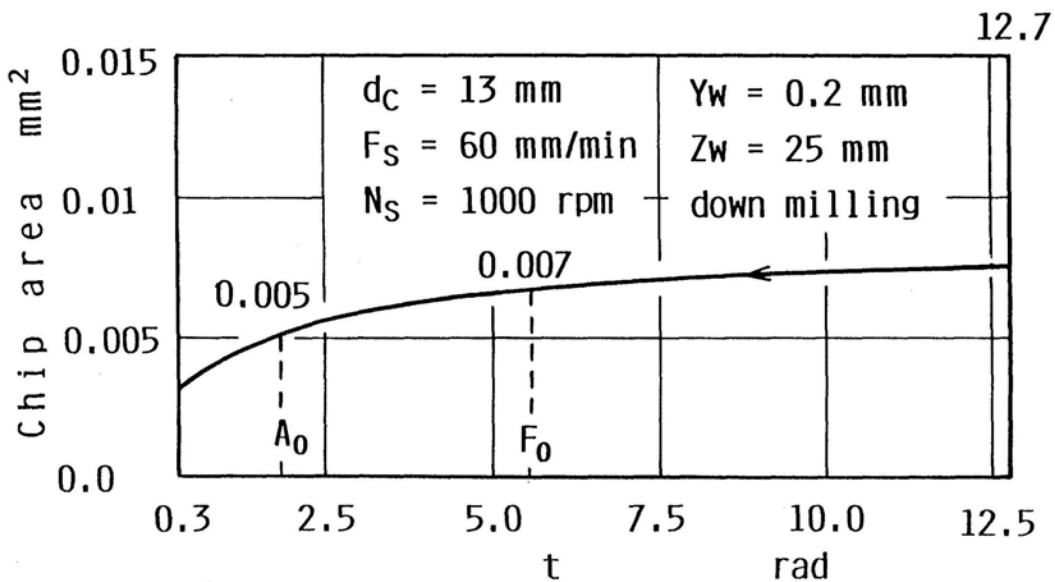


図 3.15 スクロール外面加工における切削面積の変化

図3.16は実験の条件を式(3.9)に代入して求めた仕上げ面粗さである。図より外周部では $0.3\mu\text{m}$ と小さく、中心部に移動するにつれてゆるやかに増加するが、点 $A_0$ 近傍より急激に増加し、スクロールの先端では点 $O_0$ の約15倍に達する。

そこで外面加工においては、仕上げ面粗さに最大値を定め、その値を最大切削面積より優先させて送り速度を求める方法とする。本研究においては、最大仕上げ面粗さ $R_{m,\max}$ を $1\mu\text{m}$ と定めており、手順(1)と(2)の間に次の手順を挿入して計算している。

- (1)' 式(3.9)を用いて仕上げ面粗さ $R_{m,\max}$ を計算し、 $R_{m,\max} \times 1.01 > 1\mu\text{m}$ ならば $F_s = F_s - 1$ として(1)にもどる。その他の場合は(2)に進む。

最大仕上げ面粗さを最大切削面積より優先させて定めるため、中心部近傍では図3.17に示すように送り速度(実線)ならびに最大切削面積(破線)は一点鎖線( $t = 1.9\text{ rad}$ )の位置より減少することになる。

図3.18はスクロール外面の点 $B_0$ 、 $F_0$ および $O_0$ における加工誤差を、通常の加工法と送り速度制御による場合を比較したものである。内面加工においては、切削面積が最大となる点 $C_1$ で比較しているが、外面加工においては図3.17より送り速度と切削面積が最大値となる近傍の点 $B_0$ の位置で比較を行っている。図より送り速度制御により寸法誤差は増加するが、その最大値はほぼ $\pm 10\mu\text{m}$ である。図3.19は図3.14と同様の座標軸により、加工位置における寸法誤差および形状誤差を示したものである。(a)図に示す寸法誤差はどの加工位置に対してもほぼ $\pm 10\mu\text{m}$ の範囲に入っているが、(b)図に示す形状誤差の場合点 $C_0$ および $D_0$ と点 $J_0$ ないし $L_0$ 。

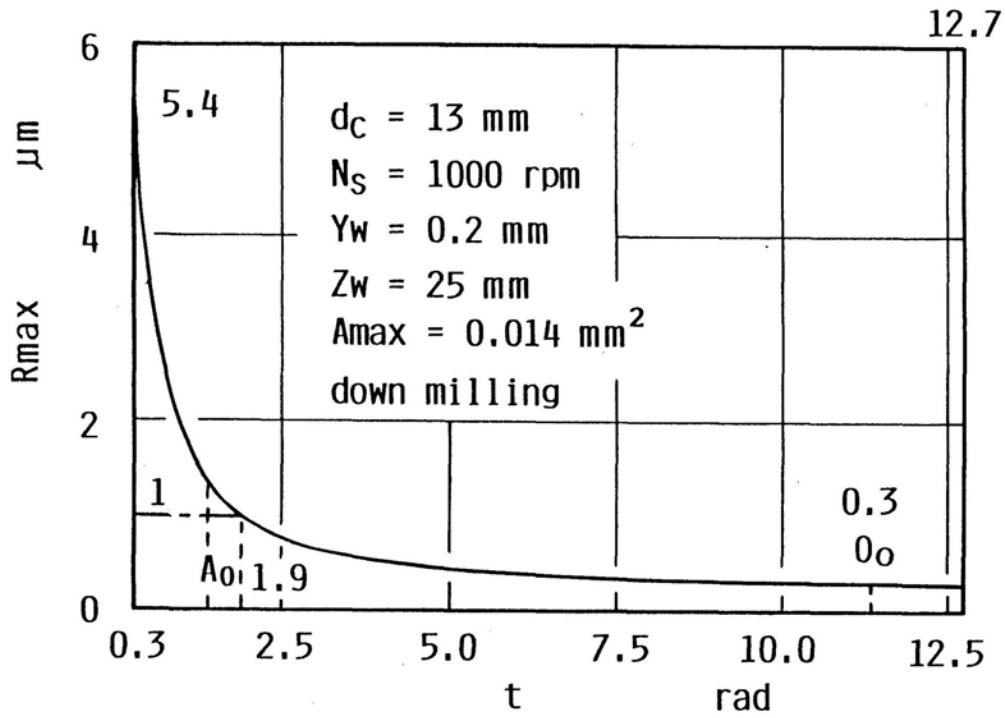


図 3.16 送り速度制御によるスクロール外面の仕上げ面粗さの変化

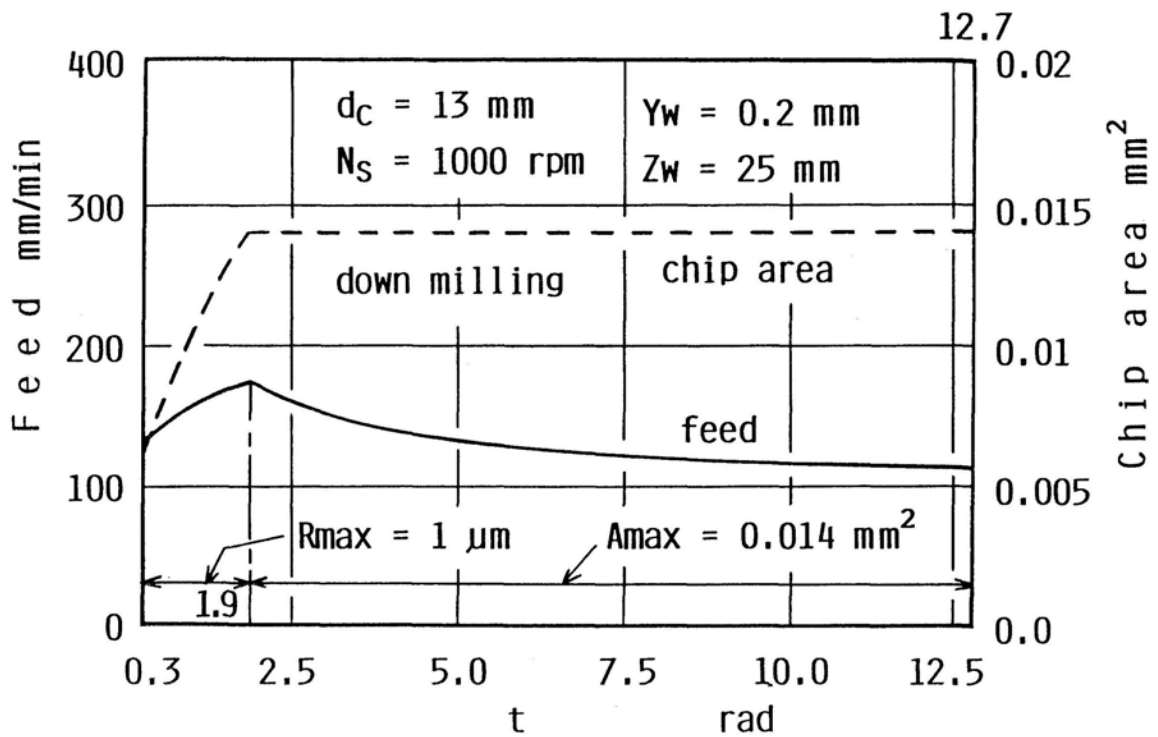
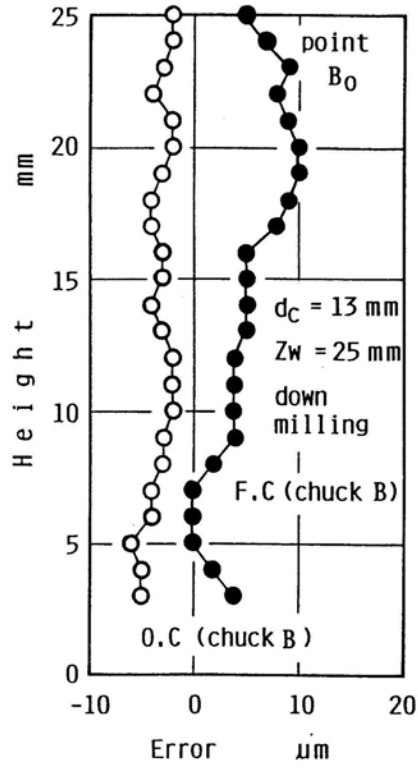
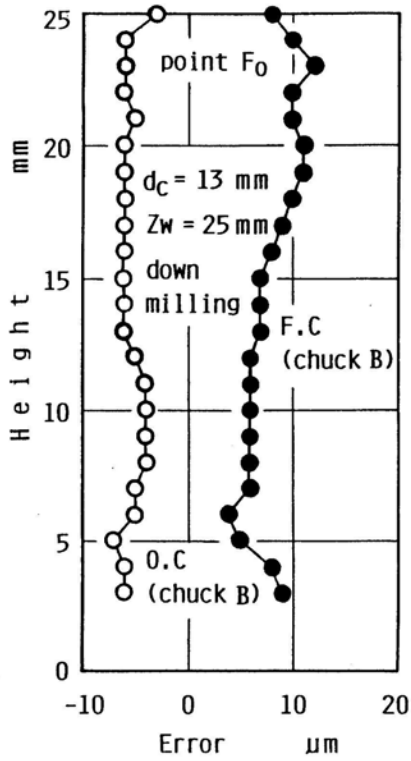


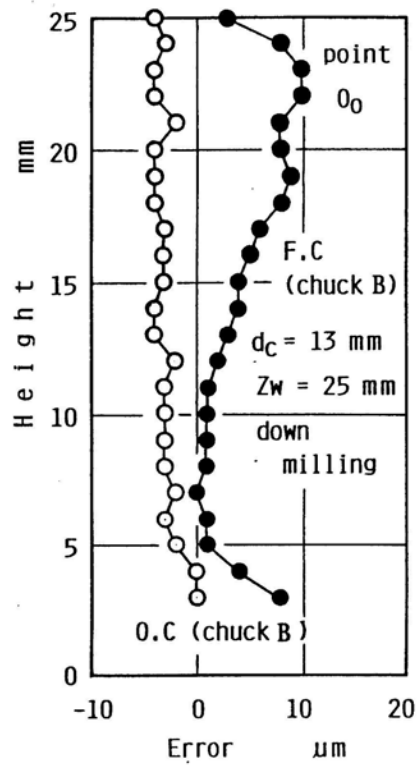
図 3.17 送り速度制御による送り速度と切削面積の変化



( a ) 点  $B_0$



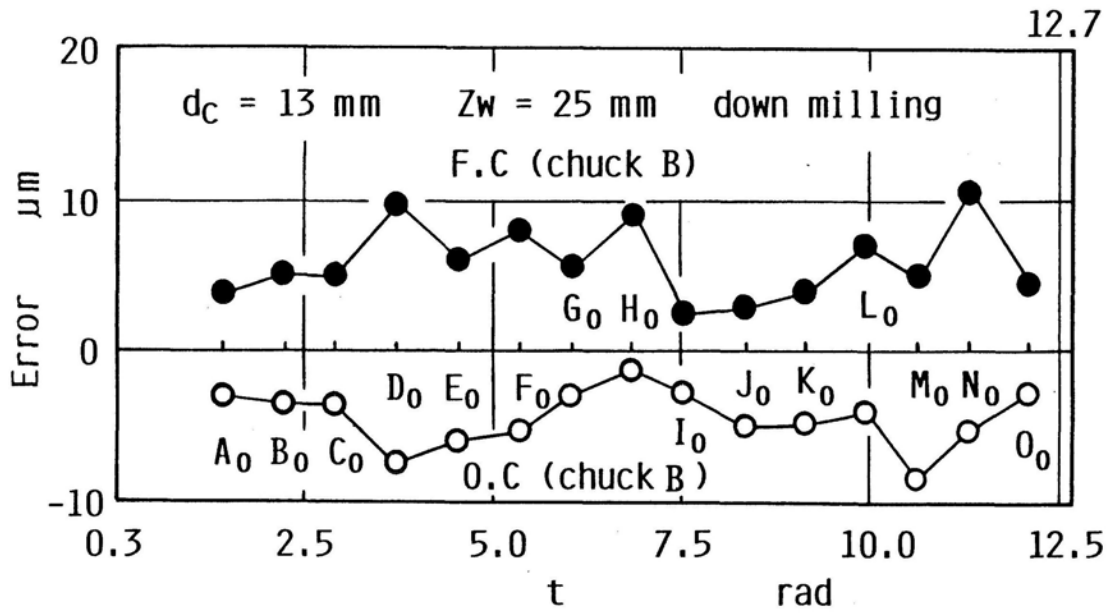
( b ) 点  $F_0$



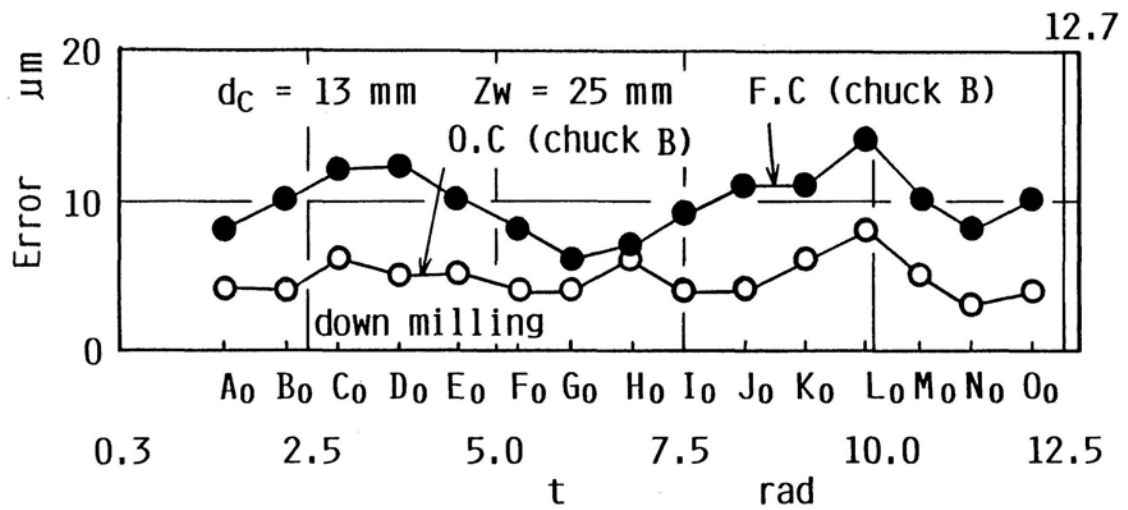
( c ) 点  $O_0$

図 3.18 スクロール外面加工の加工誤差





(a) 寸法誤差



(b) 形状誤差

図 3.19 加工位置における加工誤差の比較 (外面加工の場合)

において $10\mu\text{m}$ を越えている。しかし、図3.2よりこれらの点の原点に関して反対側にある点 $G_0$ ,  $H_0$ ,  $F_0$ ,  $N_0$ および $O_0$ においては反対に形状誤差が小さい。また横軸の変化に対応する加工位置の角度がスクロールに沿って元の角度に戻る間の、例えば点 $B_0$ より $J_0$ までに注目すると、形状誤差は正弦曲線的に変化している。この理由として主軸が $X-Z$ 面で傾いていたことが考えられる。主軸の傾きに上記誤差の主な原因があるとすると、主軸の傾きを補正することにより形状誤差は減少することになる。その結果形状誤差の値は、一円周に相当する8個のデータの平均値約 $9\mu\text{m}$ 程度になるものと推定される。したがって、スクロールの外周加工においても送り速度制御が有効であると言える。また、加工時間を比較して表3.3に示すと、通常の加工法に比べて加工時間が半減しており、大幅に加工能率が向上することになる。

表 3.3 スクロール外面加工の加工時間

cutting method	cutting time	rate
ordinary cutting	3 min 11.0 s	0.48
feed control	6 min 34.6 s	1.00

## 4. 結 言

本研究をまとめると以下の通りである。

### a. 有限要素法による薄肉形状部品の加工誤差の解明

- (1) ねじれ刃の切削機構に基づいて、切削力の実験値より節点に加える2点荷重および4点荷重または5点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切れ刃点における変形量を計算し、両者の相対変位による加工誤差の予測値を求めた。
- (3) エンドミルによる薄肉形状部品の側面加工を行ない、加工誤差の予測値と実験値を比較し、両者がほぼ一致することを示した。
- (4) 加工誤差の予測値に占める工作物の変形の比率は、薄肉部の高さが高くなるにつれて増加し、実験の条件では15 mm以上で50%を越えている。

### b. インポリュート曲線の高精度加工用プログラムの開発

- (5) インポリュート曲線を複数の円弧により表現し、両曲線の差が $0.2 \mu\text{m}$ 以下となるように近似を行った。実験の条件では、分割角度 $\Delta t = 0.09 \text{ rad}$ によりインポリュート曲線を分割して上記の近似を実現している。
- (6) (5)の近似によるインポリュート曲線を加工する工具経路を自動生成するプログラムを作成した。

c. 切削機構に基づくスクロール内外面の高精度・高能率加工法の開発

- (7) スクロール内面の加工に関して，加工精度を改善する方法として(i)前加工面により半径方向切込みを制御する方法，(ii)送り速度を制御する方法および(iii)主軸回転数を制御する方法を提案した。
- (8) スクロール内面の加工精度は(7)で提案した3種類の方法により大幅に改善され，寸法および形状誤差は $\pm 10 \mu\text{m}$ 以内である。なお，制御の方法による加工精度に差はほとんどないが，加工時間は(ii)の方法が最も短かく，加工能率が良い。
- (9) スクロール外面の加工に関して，加工精度を悪化させることなく加工能率を改善する方法として，送り速度を制御する方法を提案した。
- (10) (9)の方法によりスクロール外面の加工能率は約2倍に向上し，加工精度も寸法および形状誤差は一部の例外を除いてほぼ $\pm 10 \mu\text{m}$ の範囲に入っている。

参 考 文 献

- 1) Creux, L. : "Rotary Engine", US.P.801, 182 (Oct. 3, 1905)
- 2) 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)，84
- 3) 藤井義也，岩部洋育：ねじれ刃エンドミルのたわみに及ぼすチャックおよびコレットの影響と加工精度，精密工学会誌，55，2(1986)，273

付録(研究発表別刷り(1))

岩部洋育，島田智晴

エンドミルによるスクロール内面の加工精度改善に関する研究

1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集

1992年10月14日

## 要 旨

スクロール形状を補間誤差を一定にして円弧補間により加工する方法を示した。この部品をエンドミルで加工する場合、中心部に向かうにつれて切削面積が急激に増加する。そこで切削面積を一定に保つように切込みまたは送り速度を制御する方法を提案し、実験により加工精度改善に及ぼす効果について検討を行った。

## 1. はじめに

近年、空調機の振動、騒音の発生を最小限に抑える事を目的として、スクロール圧縮機が注目されている。しかし、スクロール形状は加工面の曲率半径が中心部に向かうにつれ減少するため、エンドミルにより内面の加工を行う場合切削面積の急激な増加が避けられない。そのため通常の加工法では加工精度を一定に保つことが困難である。そこで、本研究はスクロール内面の加工精度の改善を目的として、切削面積を一定に保つように切込みまたは送り速度を制御する方法を提案し、実験により改善効果の検討を行ったものである。

## 2. スクロール形状と工具経路の補間方法

## 2.1 スクロール形状の計算方法

スクロール形状は、インボリュート曲線に沿って一定厚さの曲面壁をつくるように構成されている。インボリュート曲線において、基礎円半径を $r_b$ 、オフセット量を $s$ 、角度を $t=i \cdot \Delta t$ とすれば、その座標 $P_i(X_i, Y_i)$ は次式で与えられる<sup>1)</sup>。ここで、 $\Delta t$ は分割幅である。

$$\left. \begin{aligned} X_i &= r_b \cdot \cos(t) + (r_b \cdot t + s) \cdot \sin(t) \\ Y_i &= r_b \cdot \sin(t) - (r_b \cdot t + s) \cdot \cos(t) \end{aligned} \right\} (1)$$

図1は $\Delta t=0.09$ (rad)、 $i=1-130$ とし上式を用いて計算したスクロールの形状である。

## 2.2 工具経路の補間方法

2点間の補間には円弧補間を用いている。連続する3つの補間点 $i, i+1, i+2$ を通る円弧を点 $i$ と $i+1$ 間の経路とする。この計算を繰り返して工具経路を求めているが、インボリュート曲線の場合曲線に沿った補間幅は一定とならず曲率半径も変化するため、円補間による誤差が問題となる。しかし、 $\Delta t$ を $0.09$ radと小さくすることにより補間誤差は $0.2 \mu\text{m}$ 以内になる。

## 3. 加工精度改善方法

図2および図3は切込みおよび送り速度の制御方法を示したもので、それぞれ曲率の異なる位置における工具中心 $(O_1, O_2, O_1', O_2')$ 、曲率中心 $(O_0, O_0')$ 、投影切削面積 $(i'jk, i'j'k')$ の関係を示している。エンドミルにより凹曲面の加工を行う場合、加工面の曲率半径が小さくなると、斜線部で示す投影切削面積が増加し、加工精度が低下する。加工精度を均一にするためには

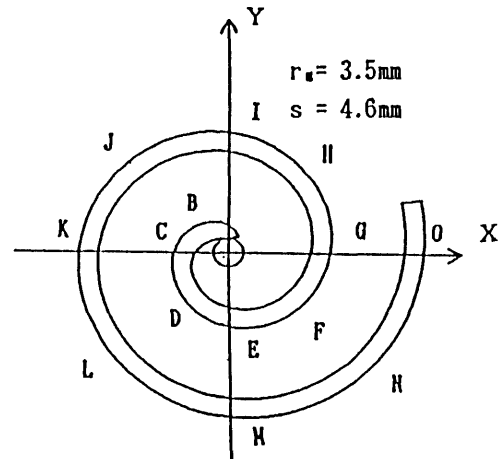


図1 スクロール形状

この投影切削面積を一定にする必要があり、次の2つの方法を提案する。

1つは半径方向切込み $T_i$ を曲率に対応させて変化させる方法(図2)である。すなわち図中の角 $\psi_i$ が一定となるように点 $k$ および $k'$ の座標値を計算し、それらを結んで実線で示す前加工面を作成後、仕上げ加工を行う方法である。もう1つの方法は半径方向切込みを一定とするため、曲率により距離が異なる工具中心間 $(O_1O_2, O_1'O_2')$ を、工具が1/2回転する間に通過するように送り速度を制御する方法(図3)である。

## 4. 実験方法

実験に使用した機械はNC立フライス盤(アマダ104 NC)、工具は直径13mm、2枚刃、ねじれ角右45°、超硬ソリッドエンドミルである。切削条件は切削速度40.8 m/min、基準半径方向切込み0.2mm、軸方向切込み25mm、基準送り速度0.03mm/刃とし、湿式、下向き切削で行った。工作物は炭素鋼S45Cを用い、スクロール内面の加工精度の測定は、工作物の上面より5mm幅で基準面を作成し、機械に取付けたまま電気マイクロメータを用いて行った。

## 5. 実験結果および考察

図4はスクロールに沿って加工する場合の切削面積の変化と送り速度および半径方向切込みの関係を示したものである。それぞれ、一定の送り速度(60mm/min)

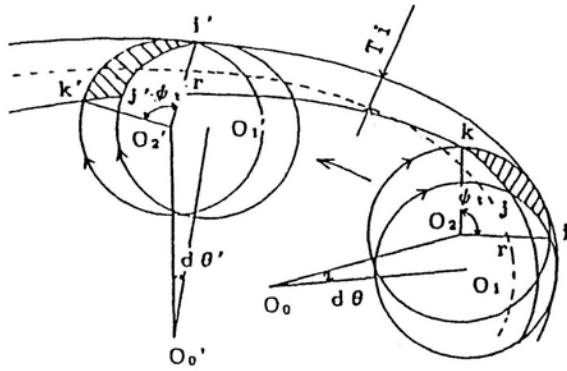


図2 切込み制御の方法

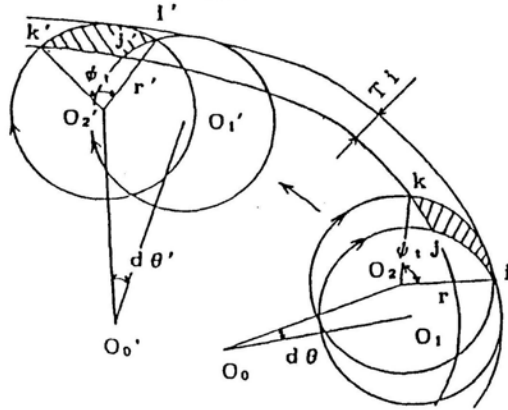


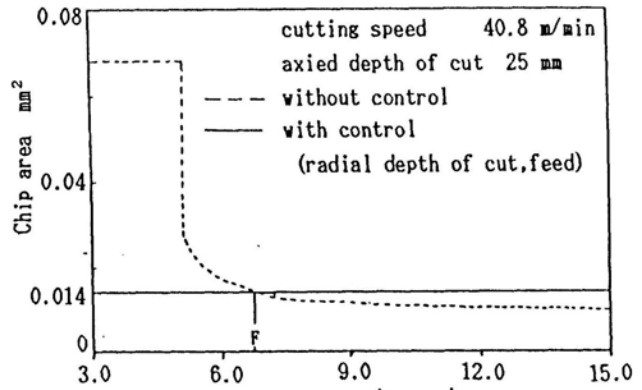
図3 送り速度制御の方法

と半径方向切込み(0.2mm)による通常の加工法と、切削面積を一定な値(0.014mm<sup>2</sup>)となるように計算した結果を比較している。(a)図より通常の加工法では中心部(t=3.0~5.2)付近で切削面積が急激に増加するが、(b)図の実線または破線で示すように、切込みまたは送り速度を制御することによって切削面積は(a)図の実線のように一定となる。なお中心部で切込みと送り速度が一定値を示しているが、これは中心部を円弧で近似していることによる。

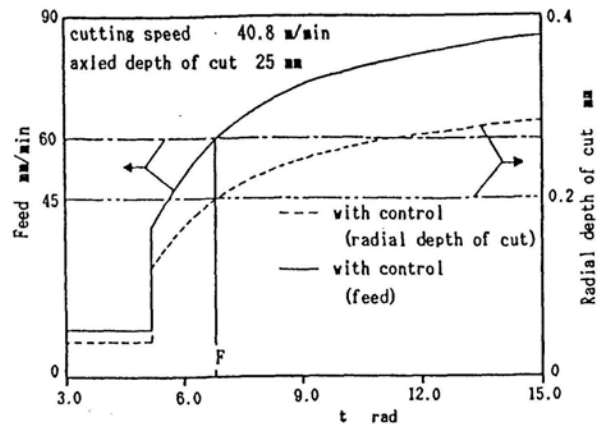
図5は図1に示した点BよりOにおける加工誤差の平均値を示したものである。一定切込みおよび一定送り速度で加工すると、○印で示すように中心部(点B,C,D)において誤差が大きくなる。一方切込みまたは送り速度を制御する方法によって、中心部の加工誤差が減少し、加工精度は改善する。なお実験の条件では2つの方法とも切削面積が等しいにもかかわらず、後者による加工誤差が小さくなっている。この理由は、下向き切削の場合切込みの増加により背分力が増加するためと考えられる。なお加工時間は、実験条件の場合前者の10min56sに対して後者は18s長くなる程度である。

## 6. 結論

スクロール形状を補間誤差を一定にして円弧補間に



(a) 切削面積の変化



(b) 半径方向切込みおよび送り速度の変化

図4 切削面積と半径方向切込みおよび送り速度の関係

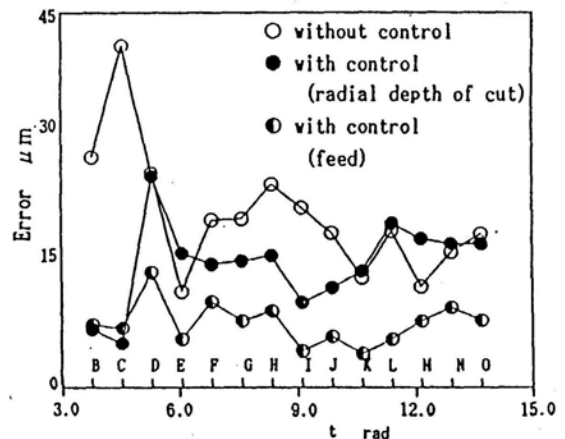


図5 加工誤差の比較

より加工する方法を示した。また中心部に向かうにつれて増大する切削面積を一定に保つため、切込みまたは送り速度を制御する方法を提案した。なお実験により上記の方法による加工精度の改善効果が確認された。

## 参考文献

- 1) 藤井義也, 實沢康朗, 岩部洋育: 精密工学会1989年度北海道支部学術講演会講演論文集(1989)81.

付録(研究発表別刷り(2))

岩部洋育，横山和宏，島田智晴

エンドミルによる薄肉形状部品の加工に関する研究（切削力による  
工具および工作物の変形解析）

1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集

1994年3月22日



要 旨

エンドミルによる薄肉形状部品の高精度・高効率加工を目的として、切削力による工具および工作物の変形を有限要素法により計算し、切れ刃点における両者の変位から加工誤差を予測した。また薄肉部の高さ方向で変化する両者の変位より、加工誤差に占める工具および工作物の比率を求めた。さらに加工実験により加工誤差を求めて予測値と比較し、誤差の形状がほぼ一致することを示した。

1. はじめに

エンドミルによる薄肉形状部品の加工においては、加工誤差に及ぼす工作物の変形が無視できない。そこで本研究では、実験により求めた切削力分布を用い、加工面を創成している切れ刃位置における工具および工作物の変位を、有限要素法により計算した。また両者の相対変位、すなわち加工誤差の予測値に占める工具および工作物の比率を求めるとともに、切削実験による結果と比較を行った。

2. 工具、工作物および加工条件

使用した工具は直径13 mm、2枚刃、ねじれ角右45°の超硬ソリッドエンドミル( $E_c:578.2$  GPa)であり、図1には後述する方法により行った要素分割および寸法が示されている。工作物は炭素鋼S45C( $E_w:206$  GPa)を用い、図2には同様に解析に使用した要素分割ならびに寸法が示されている。切削実験は、切削速度40.84 m/min、送り0.03mm/tooth、半径方向切込み0.2mm、下向き切削の条件で工作物の薄肉部の加工を行った。

3. 有限要素解析

3.1 要素分割

エンドミルは総要素数2756、総節点数3056で要素分割を行っている(図1)。その際、切れ刃部( $Z=0\sim 24$  mm)の軸直角断面の輪郭形状に一致するように、断面の外周部は三角形を用いて分割を行ない、内部は矩形断面(8節点立体要素、 $\Delta X=\Delta Y=0.3\sim 1.2$ 、 $\Delta Z=1.6$  mm)を用いている。なお $Z=1.6$  mmにおける分割図は $Z=0$  mmのものを $\theta=\tan^{-1}(\Delta Z/r_c)$ だけ時計方向に回転させている。

工作物は図2に示すように8節点立体要素で分割し、総要素数は3240、総節点数は4340である。なお薄肉部の分割は $\Delta X=1.15$ 、 $\Delta Y=2$ 、 $\Delta Z=1.6$  mmとした。

3.2 拘束条件および解析方法

エンドミルは、図1の $Z=75$  mmの面内において、中心軸上の節点の変位を $U_x=U_y=U_z=0$ とするとともに、 $Z=75$  mmの面の $y=6$ 、 $-6$ の点の変位を $U_x=0$ とすることにより回転変位を拘束した。 $Z=35$  mmの中心軸上の変位は $U_x=U_y=0$ とした。工作物は図2の底面の全節点の変位を $U_x=U_y=U_z=0$ とした。

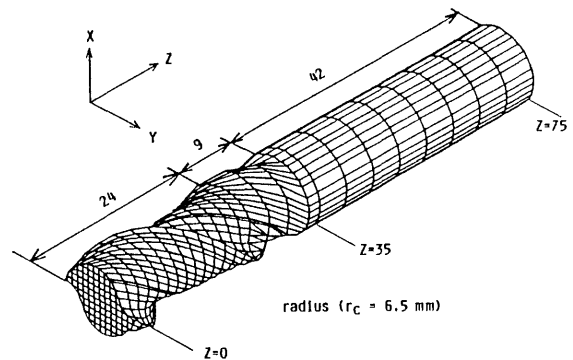


Fig.1 Shape of end mill and Partitioning

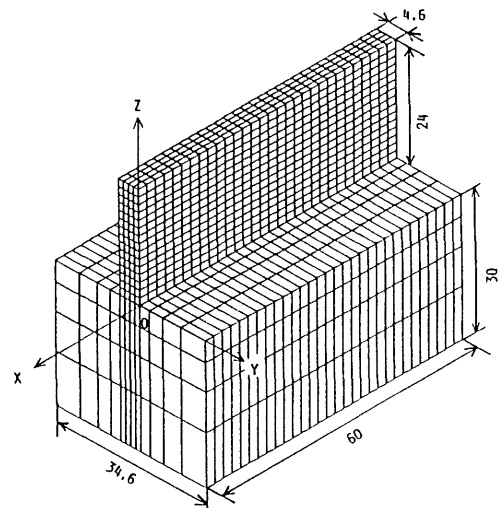


Fig.2 Shape of workpiece and Partitioning

解析に必要な切削力は、厚さ1 mmの薄板による切削力から求めている。まず重ね合わせ法<sup>1)</sup>により厚板に

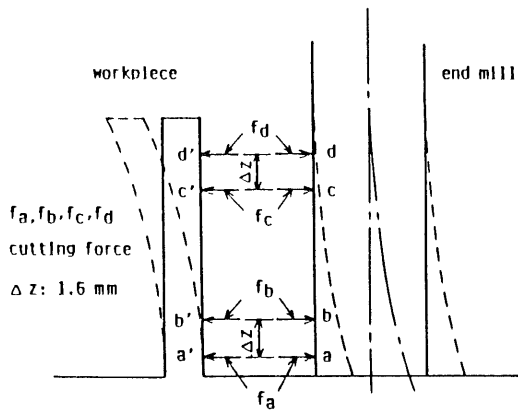


Fig.3 Deflection model

よる切削力を定め、次に切れ刃に作用する切削力分布を求め、その分布より節点に加わる荷重を計算している。図3は切削力の作用点と工具および工作物の変形を示しており、切削力 $f_a$ ないし $f_d$ が工具および工作物のそれぞれ2つの領域 $[a, b]$ ,  $[c, d]$ および $[a', b']$ ,  $[c', d']$ に作用する場合である。加工誤差は加工面を創成している切れ刃点 $a(a')$ および $c(c')$ における工具と工作物の相対変位により計算できる。そこで工具の回転によりZ方向に移動する切削力を各作用点に加え上記計算を切れ刃点の各位置で行って薄肉部の下面から上面までの加工誤差を求める。次に工具の位置を図2のX方向に移動させて同様の計算を行ない、加工面全体の加工誤差を求めている。なお解析に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。

#### 4. 解析結果および実験結果

図4はエンドミルおよび工作物の変形の解析結果であり、図2の $x=-58$ および $-30$  mmにおける場合である。図より実線および破線で示す工作物の変形は上面および加工面の端近傍( $x=-58$  mm)で大きく、一点鎖線で示す工具の変形は下面を加工する切れ刃先端で大きい。両者の相対変位すなわち加工誤差の予測値に占める工作物の比率を $Z=2, 12$ および $22$  mmの位置で求めると、 $x=-58$ および $-30$  mmの位置ではそれぞれ $(0.06, 0.03)$ 、 $(0.56, 0.33)$ および $(0.85, 0.73)$ である。なお工具の変形は切削力分布を一定であると仮定しているため、X方向どの位置においても等しく、加工誤差の予測値の差は工作物の変形の差に依存する。

図5は図4に示した加工誤差の予測値と実験値を比較したものである。図より誤差の形状は薄肉部の下面より上面に移動するにつれて誤差が大きくなり、 $Z=20$  mm付近より減少し、予測値の傾向と一致している。また加工面のX方向位置により誤差の大きさに差が生じているが、工作物の変形の差に大きく影響されており、その平均値 $(2.2 \mu\text{m})$ は予測値における差 $(1.1 \mu\text{m})$ にほぼ

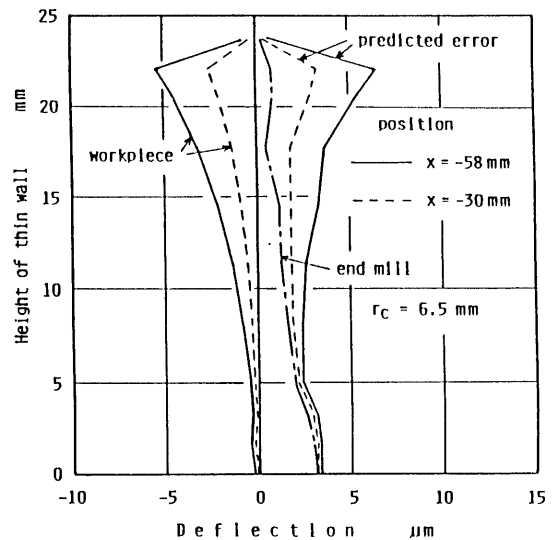


Fig.4 Deflection of end mill and workpiece

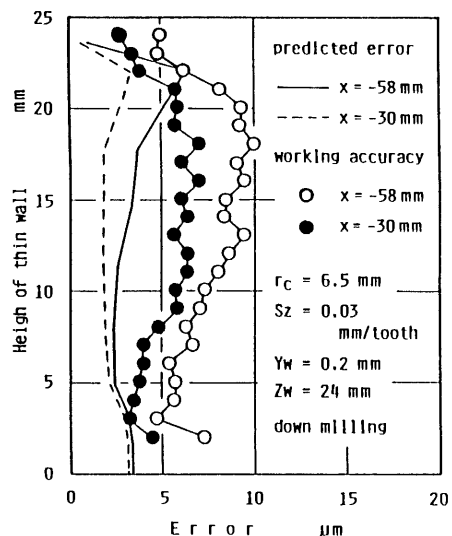


Fig.5 Predicted error and working accuracy

等しい。しかし予測値と実験値には平均約3ないし $4 \mu\text{m}$ の差が生じている。これはチャックを含む主軸系の変形によるものと思われる。

#### 5. 結論

エンドミルによる薄肉形状部品の加工における加工誤差を、有限要素法を用いて求めた工具および工作物の変形により予測した。また予測値に占める工具および工作物の変形の比率を求めた。さらに加工誤差と予測値を比較し、誤差形状がほぼ一致することを示した。文献1)岩部, 古泉, 藤井, 浅見; 日本機械学会論文集(C編) 57, 540 (1991-8), 2746-2751.