

# 空気静圧主軸搭載の工作機械による高速・ サブミクロン・エンドミル加工に関する研究

(課題番号 09650132)

平成9年度～平成10年度科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))

研 究 成 果 報 告 書

平成11年10月

研究代表者 岩 部 洋 育

(新潟大学 工学部・助教授)

平成9年度～平成10年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））

研 究 成 果 報 告 書

（1）研究課題

空気静圧主軸搭載の工作機械による  
高速・サブミクロン・エンドミル加工に関する研究

（2）課題番号

09650132

（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

田村武夫（新潟大学工学部・助教授）  
嶽岡悦雄（新潟県工業技術総合研究所  
下越技術支援センター・専門研究員）

（5）研究経費

平成9年度	2,800千円
平成10年度	600千円
計	3,400千円

（6）研究発表

ア．学会誌等      該当なし

イ．口頭発表

- (i) 岩部洋育，飯田茂雄：エンドミルによる薄壁形状の高速・高精度加工に関する研究，1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，1999年3月17日
- (ii) 岩部洋育：エンドミルによる高速加工における加工精度に関する研究－軸方向送り加工による加工精度の改善－，1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，1999年9月30日

## 目 次

1. 緒言 .....	1
2. 薄壁加工法 .....	3
2. 1 従来の薄壁加工法 .....	3
2. 2 繰り返し段加工法による薄壁加工 .....	8
3. 実験条件および方法 .....	10
3. 1 実験条件および使用機器 .....	10
3. 1. 1 使用工具および実験条件 .....	10
3. 1. 2 使用機器 .....	19
3. 2 実験方法 .....	22
3. 2. 1 薄壁の加工法 .....	22
3. 2. 2 加工結果の評価方法 .....	25
4. FEMによる変形解析 .....	27
4. 1 加工時における工作物および工具の変形解析 .....	27
4. 2 測定時における工作物の変形 .....	34
5. 実験結果および解析結果と考察 .....	36
5. 1 解析結果 .....	36
5. 1. 1 加工時における工作物の変形 .....	36
5. 1. 2 加工時における工具の変形 .....	44
5. 1. 3 測定時における工作物の変形 .....	47
5. 2 加工誤差 .....	55
5. 2. 1 通常加工法による加工誤差 .....	55
5. 2. 2 繰り返し段加工による加工誤差 .....	60
5. 2. 3 実験結果と予測誤差との比較 .....	75

6. 軸方向送り加工の試みとサブミクロン加工の実現	9 2
6. 1 軸方向送り加工法	9 2
6. 2 実験条件および方法	9 4
6. 2. 1 使用機器および実験条件	9 4
6. 2. 2 実験方法	9 5
6. 3 実験結果および考察	9 9
6. 3. 1 軸方向送り加工による加工誤差	9 9
6. 3. 2 粗さ曲線と最大高さ	1 0 8
6. 3. 3 サブミクロン加工の実現とその条件	1 1 3
7. 結言	1 1 8
謝辞	1 1 9
参考文献	1 1 9
付録（研究発表別刷り 2 編）	1 2 0

## 1. 緒言

各種部品の機械加工に対する要求は高精度と高能率である。この相反する要求は、いつの時代にも存在している。1982 年に開催された第 11 回日本国際工作機械見本市で主軸の最高回転数が毎分 1 万回転を越え、送り速度も毎分数十 m を実現する高速加工機が出展された。この種の機械の開発によって、生産性は大幅に向上したが、その後も上記の加工機の主軸回転数や送り速度は年々高くなっており、さらなる機械加工の高速化が進んでいる。一方工具も高速加工に対応できる各種の工具材料やコーティング技術の開発によって、高速化の発展を支えている。

しかしながら、多くの高速加工機はマシニングセンタまたは NC フライス盤であり、工具には各種のエンドミルが使用される。その理由は各種加工に便利であるとともに、航空機産業におけるアルミニウム合金等の薄壁部品の加工には不可欠な工具だからである。また、薄壁部品には、各種電化製品、情報機器の発熱部に使用される放熱用フィンなどがあり、その製作に使用される金型にも薄壁は存在しており、エンドミルは同様に多用されている。

そこで本研究は、まず高速加工機を用いてエンドミルにより薄壁部品の高速・高精度加工について検討を行うことにする。エンドミルによる薄壁加工において、通常は側刃を用いた 1 回の送りで側面を仕上げている。しかし、切削力によって工作物および工具は変形し、得られる加工面には壁厚だけでなく加工精度にも限界が生じる。工作物の変形に関しては、壁の両側から同時に加工する二軸加工法<sup>1)</sup>を適用すれば除去することができる。しかし、壁厚の制御は容易ではなく、常に 1 組み 2 本の特殊な工具を必要とすることなどから 2 軸加工法は実用面で問題が多い。

そのため、通常の 1 軸加工を前提としながら高速加工機の特徴を生かして、微小な軸方向切込みを与え、それを繰り返して側面を仕上げる繰り返し段加工を提案する。また、各種条件により側面の高速・高精度加工を試

みるとともに，加工誤差の要因を分類し，それに基づく予測値を F E M 解析等を用いて求めているが，それらの結果は実験値とほぼ一致することを明らかにしている．さらに，この加工法は工具経路が大幅に長くなるが，通常の加工法では不可能な薄壁までの加工を可能とし，薄壁の仕上げ加工法として有効であることも示した．

しかしながら，上記の繰り返し段加工により得られた加工面は最大高さ  $R_y$  が  $2\ \mu\text{m}$  以下になっていない．そこで，加工面を高精度なサブミクロンとするために，新たな加工法を試みた．すなわち，工具を一定の間隔ごとに軸方向に送り，それを繰り返す軸方向送り加工である．この加工法によって，空気静圧主軸搭載の高速加工機を用いると，加工面の最大高さ  $R_y$  は送り方向および軸方向とも  $1\ \mu\text{m}$  以下となっており，高速サブミクロン加工を実現することができた．なお，実験条件の範囲では， $P_f=0.1\text{mm}$  が最も生産性の高い条件であった．

## 2. 薄壁加工法

### 2. 1 従来の薄壁加工法

薄壁形状の部品を加工する場合，図 2. 1 のように一本の工具を用いて側面切削することによって加工面を生成していた（以後，通常加工法と呼ぶ）。この加工法では，加工時に発生する切削力により工作物が変形し，壁に垂直方向の切削力が変形に大きく影響を及ぼす<sup>2)</sup>。また，反作用力  $F_x'$ ， $F_y'$ ， $F_z'$ により工具も変形するが，通常は工作物よりも工具の剛性が高いため，変形量は工作物に比べて小さい。従って，加工誤差は工作物の剛性が大きく影響し，図に示した工作物において壁部の中央部では剛性が低く，両端部では剛性が高くなる。そのため，壁部の変形量も加工位置によって異なり，一定の加工面を得ることは困難である。

図 2. 2 は薄壁の通常加工を送り方向から見た状態である。通常加工によって薄壁の仕上げ加工を行う場合，片面ずつ加工することになるが，はじめに目標の壁厚  $W_t$  に対して半径方向切込み  $Y_w$  を裏側の加工面に残した状態で表側の加工を行う。この場合の加工面を表面，裏側の加工面を裏面と呼び以後区別する。（a）図は表面の切削状態であり， $y$  分力  $F_y$  により工作物が変形し，その変形量は上面側ほど増大する。また，反作用力  $F_y'$  により工具も変形し，その変形量は上面側ほど減少する。加工後は切削力が開放されるため，それぞれの変形量は壁高さ方向の位置で加算され，（b）図に示す表面の加工誤差となる。

図 2. 3 （a）図は裏面における加工状態であり，目標の壁厚  $W_t$  に表面の加工誤差を加えた薄壁を加工することになる。ただし，表面の加工誤差は目標壁厚  $W_t$  および半径方向切込み  $Y_w$  に比べて小さいため，通常は無視できる。従って，表面に比べ半径方向切込み  $Y_w$  だけ小さい壁厚の加工をすることになる裏面の場合，薄壁の剛性が減少するため，工作物の変形量は表面に比べて大きくなる。しかし，工具の変形量は表

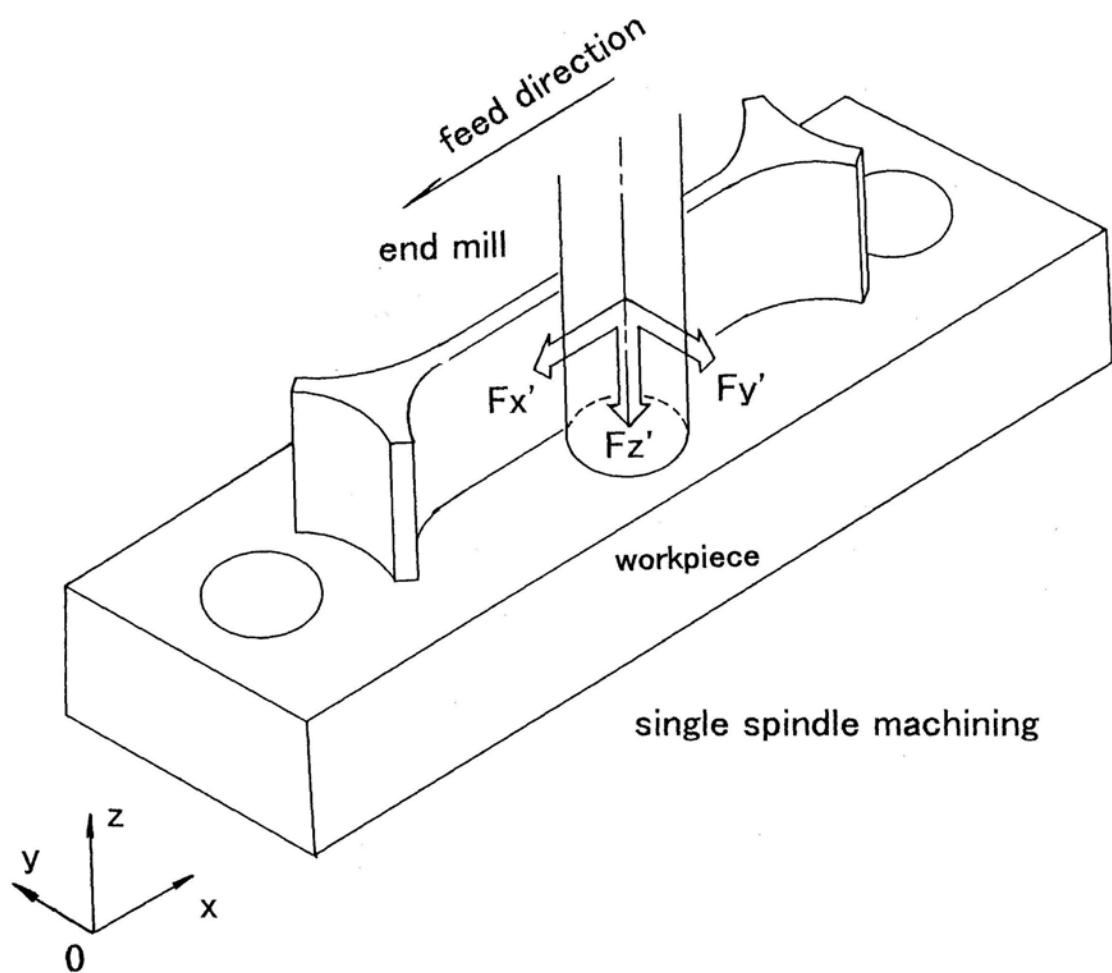
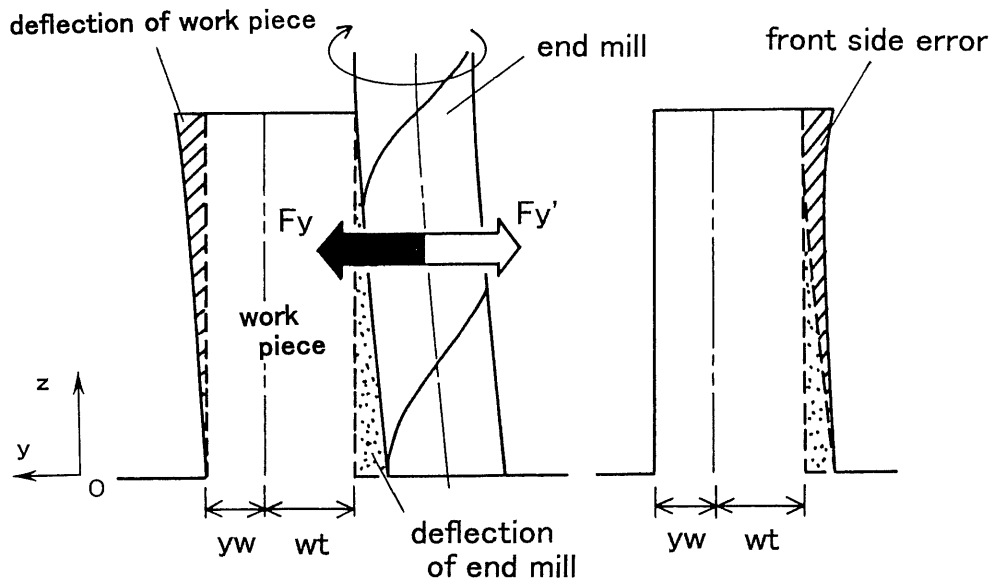


図 2. 1 通常加工法による薄壁形状部品の側面加工

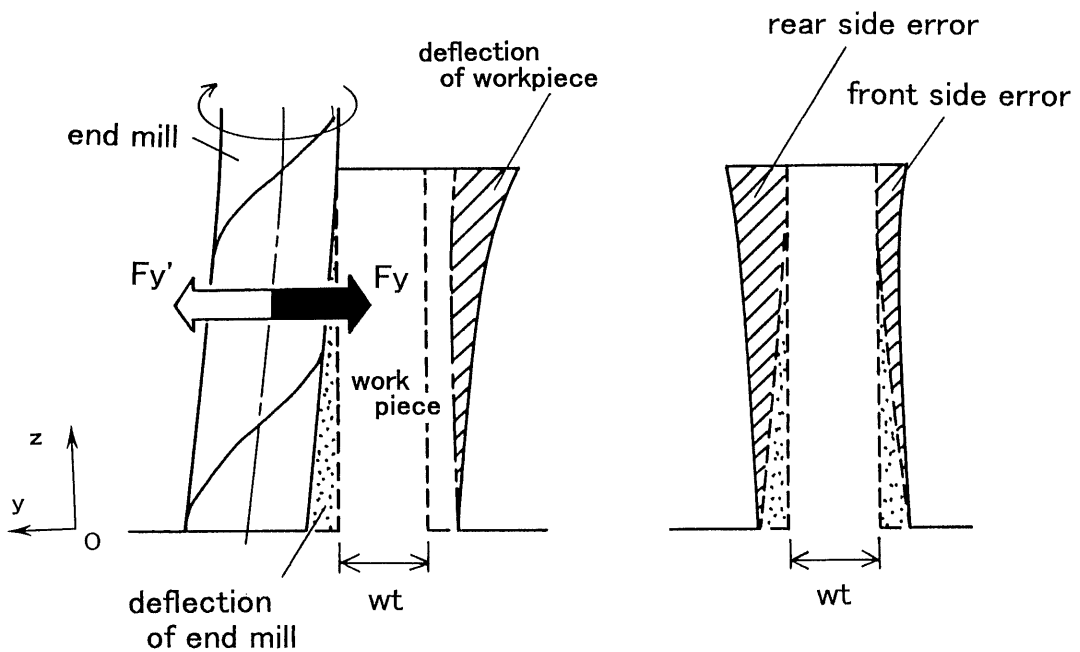




(a) 切削状態

(b) 加工誤差

図2.2 通常加工法による薄壁の表面における切削状態と加工誤差



(a) 切削状態

(b) 加工誤差

図2.3 通常加工法による薄壁の裏面における切削状態と加工誤差

面の加工の場合とほぼ等しくなるため、加工誤差は図 2. 3 (b) に示すように工作物の変形量の差分だけ裏面で大きくなる。つまり、通常加工においての加工誤差は加工の順序により両加工面で異なる。加工位置による加工誤差の違いに加え、加工面による違いも通常加工の問題点である。

このような通常加工の問題点を回避するために、岩部らによって平行二軸加工法が提案された<sup>1)</sup>。これは図 2. 4 に示すように薄壁を 2 本の工具で挟み込むように表面、裏面を同時に加工する方法である。図 2. 5 にこの加工法による切削状態を示す。薄壁に対して垂直方向に、大きさが等しく向きが反対となる切削力  $F_y$  が両軸の工具から作用するため、工作物においてその切削力  $F_y$  は相殺される。また、工作物に作用する送り方向 ( $x$ ) および軸方向 ( $z$ ) それぞれの分力の方向が等しいため、工作物において倍増するが工作物の変形にはほとんど影響しない。従って、二軸加工法による加工において薄壁は変形しないため、工作物の変形に起因する加工誤差は除去できる。しかし、反作用力  $F_y'$  により工具は変形するため、工具の変形に起因する加工誤差は残る。通常加工法では壁厚が小さくなるほど、また剛性の低い位置ほど工作物の変形量が大きくなり、加工誤差が増大する。それに対し、工作物の変形に起因する加工誤差を含まない二軸加工では、より工作物の変形しやすい条件において有効である。

しかし、二軸加工を実現するためには向かい合う二本の工具の条件が対称であることが前提である。そのために、二軸加工法では右刃右ねじれおよび左刃左ねじれの工具を用い、切れ刃の位相が等しくなるように取り付け、一方の軸を逆転させることによって加工を行った。また、二軸装置の軸間距離は固定されているため、使用する工具径を変化させて各壁厚に対応させた。さらに、二軸装置を用いた二軸加工法では直線的な加工は可能であるが、複雑に入り組んだ形状の加工は不可能である。

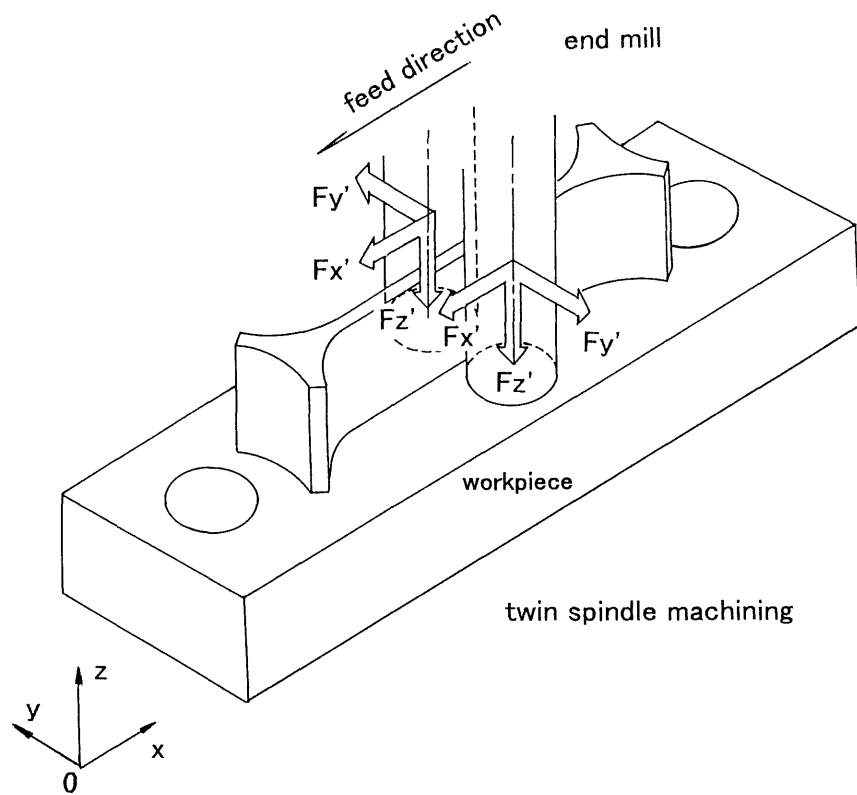


図 2. 4 二軸加工による薄壁形状部品の側面加工

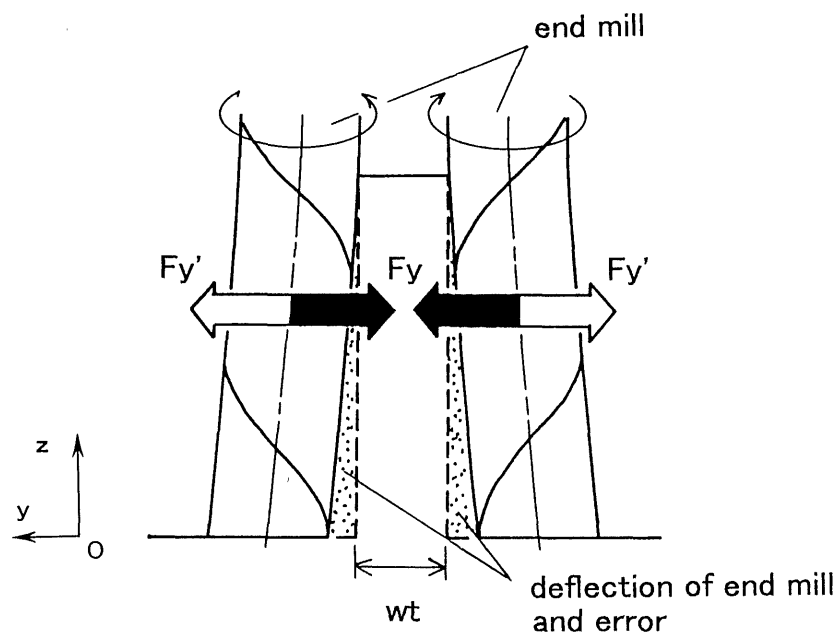


図 2. 5 二軸加工法による薄壁の切削状態と加工誤差

## 2. 2 繰り返し段加工法による薄壁加工

2. 1 節で述べたように通常加工法の問題点を回避するために二軸加工法が提案され、この加工法による加工誤差の改善は認められたが、実用的な面から考えると先に述べたような問題がある。そこで、特別な装置や機器を用いずに高精度な薄壁の加工を行うことを目的として繰り返し段加工法を提案する。通常加工法において、軸方向の切込み  $Z_w$  は加工しようとする壁高さ  $H$  と等しく設定し、半径方向切込み  $Y_w$  を数回に分け、側面切削を繰り返すことにより薄壁加工面を生成する。通常加工法および二軸加工法もこのような方法に該当することになる。それに対し、繰り返し段加工法とは、一度に与える軸方向の切込み  $Z_w$  を微小とし、半径方向切込み  $Y_w$  は目標壁厚になるように一定とする。これを壁の上部から開始し  $H/Z_w$  回繰り返すことによって加工面を生成するという加工法である。従来では多くの加工時間を必要とするため、このような加工法を仕上げ加工法として用いることは困難であった。しかし、近年では主軸回転数が毎分数万回転、送り速度が毎分数十メートルを実現できる、様々な高速かつ高精度な工作機械が一般に使用されるようになり、従来では長時間を要する加工を比較的短時間にできるようになってきた。

図 2. 6 は繰り返し段加工による薄壁の加工状態であるが、このように軸方向の切込み  $Z_w$  を微小としているため、一刀あたりの加工量も微小であり、このため切削力の影響による工作物および工具の変形は小さいと考えられる。従って、得られる加工面の加工誤差は従来に比べ向上することが期待できるが、加工日の違いおよび工具の取り付け状態に大きく左右されることが考えられる。また、軸方向切込み  $Z_w$  を微小とすることにより半径方向切込み  $Y_w$  を通常加工法に比べ大きく設定できるため、薄壁の仕上げ加工法として繰り返し段加工法を選択することで加工能率を極端に低下させることはないと考えられる。

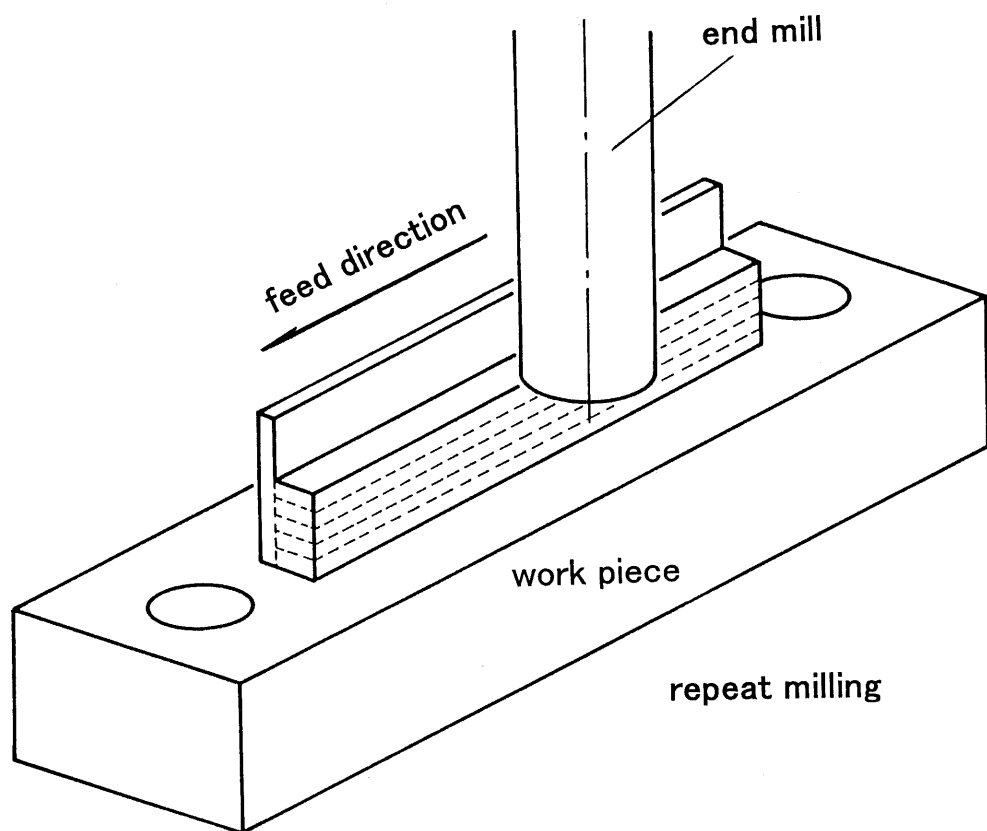


図 2. 6 繰り返し段加工法による薄壁形状部品の加工

### 3. 実験条件および方法

#### 3. 1 実験条件および使用機器

##### 3. 1. 1 使用工具および実験条件

本研究では薄壁形状の高速・高精度加工を目的としており，使用した工作機械は高回転および高速送りが可能なものである．この特徴を生かすため，さらに実際の様々な薄壁形状加工に対応できることを考慮して，直径4，6，8，10 mmの4種類の工具を用意した．なお，いずれの工具についてもOSG(株)の2枚刃，右刃右ねじれ，ねじれ角 $30^{\circ}$ ，超硬ソリッドエンドミルである．

まず，今回用いた工作機械による高速加工において，これらの工具が使用可能か否かを確認するために，剛性が十分あると思われるブロック状の工作物を治具に取り付けて側面加工を行った．一刃あたりの送り  $S_z$  を一定とし，回転数  $N$  を  $10,000$  ないし  $30,000\text{min}^{-1}$  の範囲で変化させ，加工面の状況から側面切削を行う場合の切削条件を決定した．なお，実際の加工を想定して，軸方向の切込み  $Z_w=2.5\text{ mm}$ ，半径方向の切込み  $Y_w=0.05\text{ mm}$  とした．図3. 1ないし図3. 4は各工具による加工面の状態を示しており，各図において●印はびびりが発生せずに加工できた条件，×印はびびりが発生した条件であることを示している．なお，びびりの判定は，加工面にびびりマークが発生しているか否かで行った．図3. 1および図3. 2に示すように直径4および6 mmの工具についてはどの条件においてもびびりを発生してしまったため，使用を取りやめた．なお，図3. 1に示した直径4 mmの工具については  $S_z=0.025\text{ mm/tooth}$ ， $N=22,000\text{min}^{-1}$  の条件において破損しており， $S_z=0.050\text{ mm/tooth}$  についても加工を行ったが，それ以上大きな負荷になるような条件においても不向きであるとみなし，実験を中止した．

図3. 3に示した直径8 mmの工具においては一刃あたりの送り  $S_z$  の

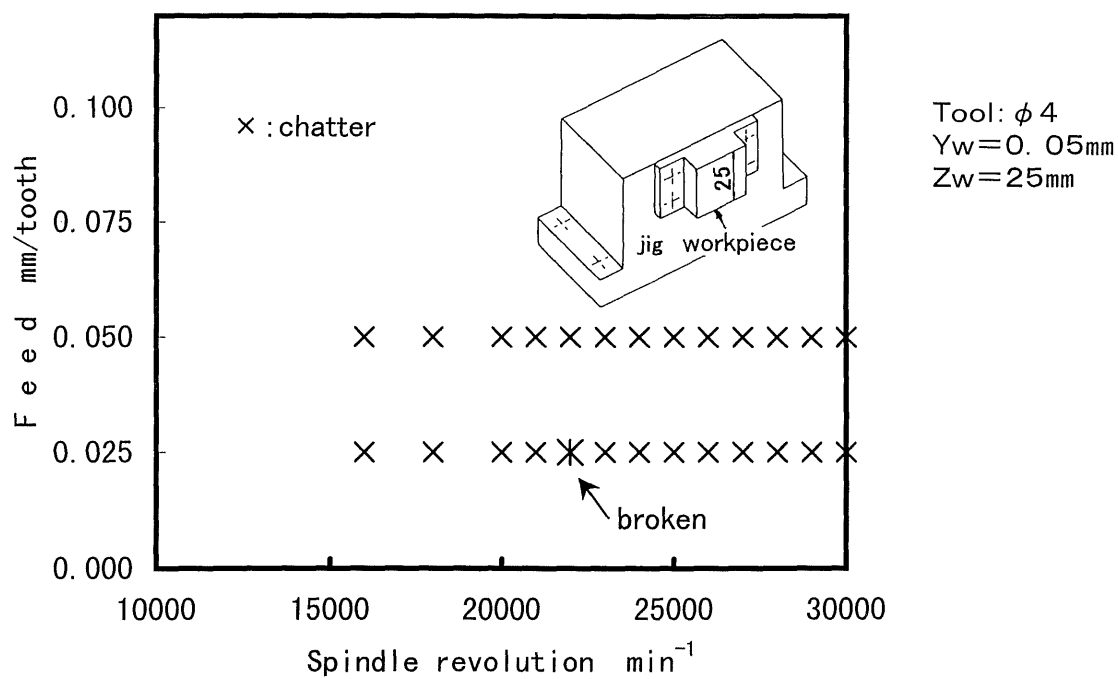


図3.1 適正切削条件の確認( $\phi 4$ )

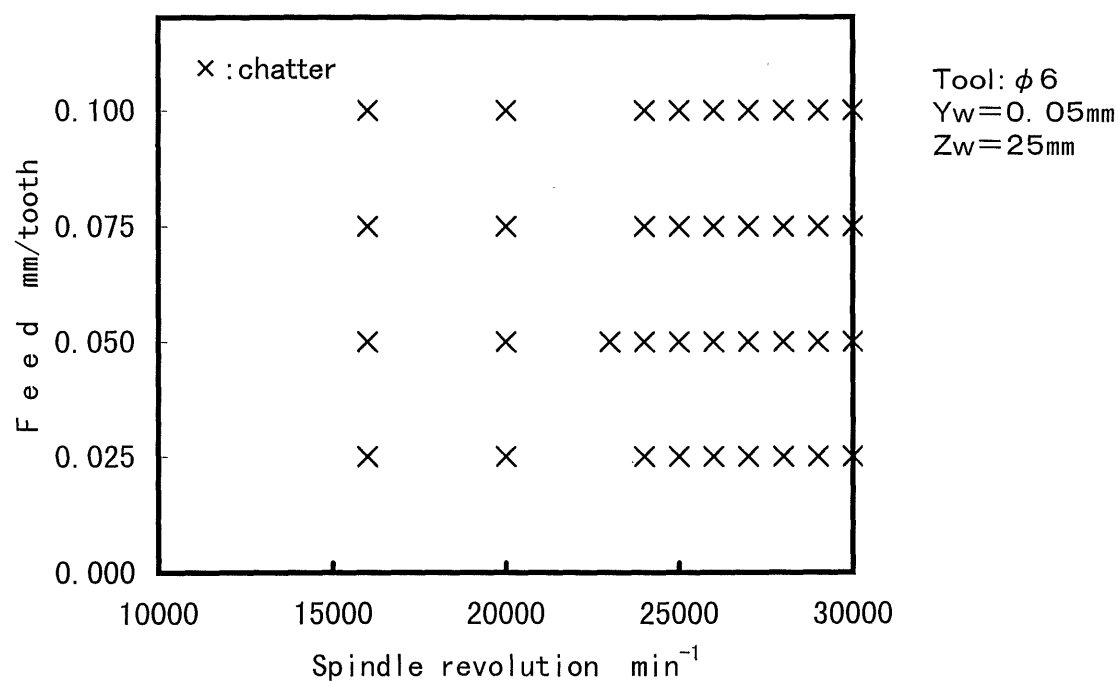


図3.2 適正切削条件の確認( $\phi 6$ )

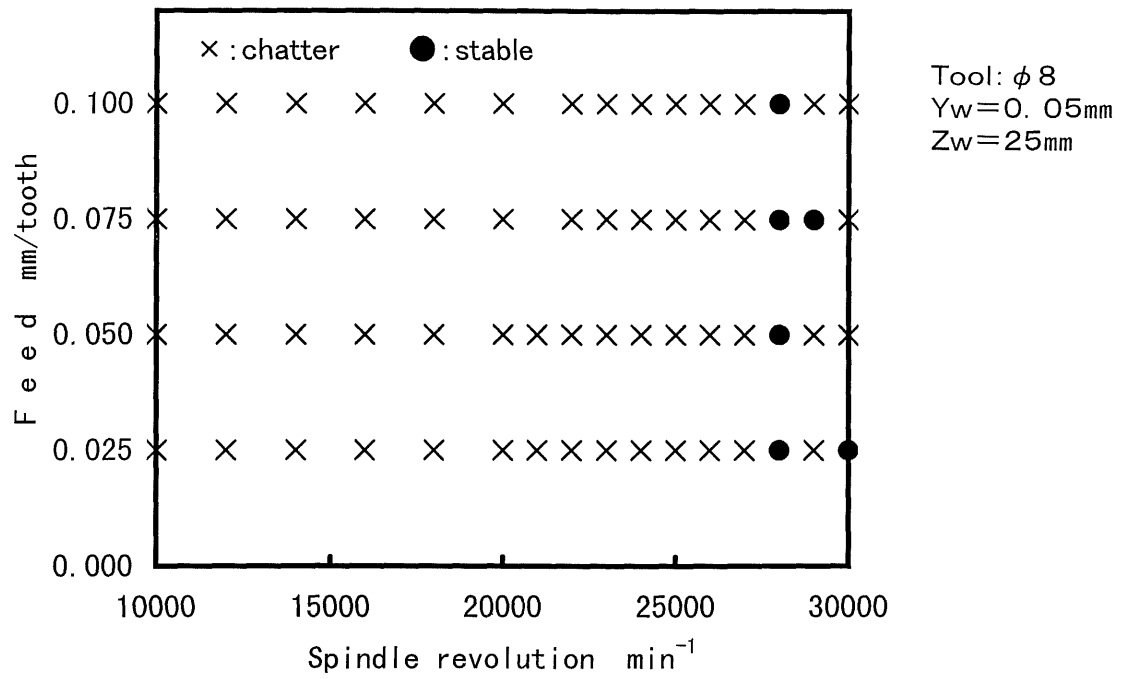


図3.3 適正切削条件の確認( $\phi 8$ )

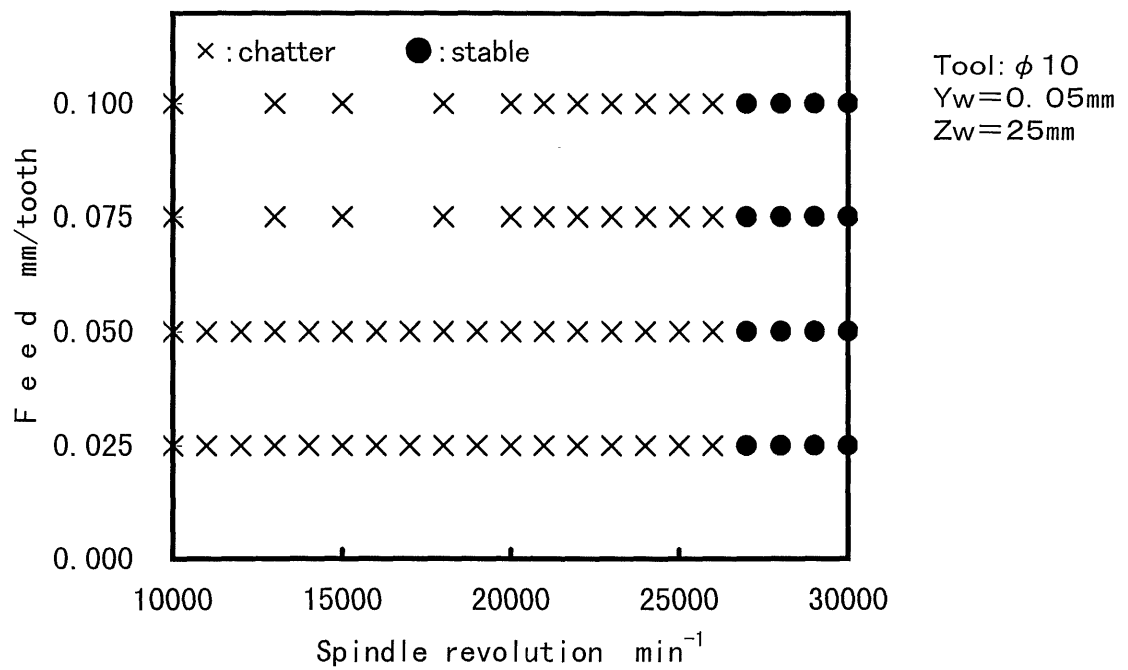


図3.4 適正切削条件の確認( $\phi 10$ )



大きさに関わらず  $N=28,000\text{min}^{-1}$  でびびりを発生することなく加工が可能であった。また、図 3. 4 に示した直径 10 mm の工具に関しては  $N=27,000$  ないし  $N=30,000\text{min}^{-1}$  において同様にびびりを発生することなく加工が可能であった。これらの結果より、高回転域で比較的安定している直径 10 mm の工具を用いることにした。さらに、これらのいくつかの切削条件における加工面の表面粗さを測定し、その軸方向の表面粗さの結果を表 3. 1 に、送り方向の表面粗さの結果を表 3. 2 に示す。また、主軸回転数  $N=15,000$  および  $30,000\text{min}^{-1}$  において、一刃あたりの送りを  $S_z=0.100$  および  $0.050\text{ mm/tooth}$  とした場合の軸方向の表面粗さ曲線を図 3. 5 に、送り方向の表面粗さ曲線を図 3. 6 に示す。

表 3. 1 側面切削による軸方向の表面粗さ  $R_y[\mu\text{m}]$

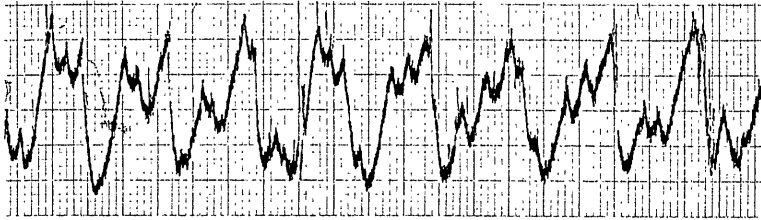
Feed $S_z[\text{mm/tooth}]$	Spindle revolution $N[\text{min}^{-1}]$				
	15000	20000	25000	28000	30000
0.100	5.10	2.24	1.94	0.92	0.96
0.075	3.56	1.80	1.76	0.86	0.84
0.050	2.80	2.58	1.72	0.84	0.88
0.025	2.80	1.56	1.42	1.00	0.96

表 3. 2 側面切削による送り方向の表面粗さ  $R_y[\mu\text{m}]$

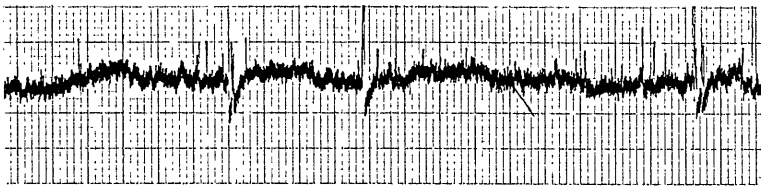
Feed $S_z[\text{mm/tooth}]$	Spindle revolution $N[\text{min}^{-1}]$				
	15000	20000	25000	28000	30000
0.100	8.60	6.36	2.82	1.28	1.46
0.075	7.60	3.47	2.74	1.27	0.93
0.050	4.36	2.55	2.72	0.61	0.69
0.025	3.09	2.12	2.98	0.74	0.51

表 3. 1 に示した値について、回転数が  $N=15,000$ ,  $20,000$  および  $25,000\text{ min}^{-1}$  においてはいずれの条件においても、びびりの発生により軸方向の表面粗さ  $R_y$  の値が大きくなっている。 $N=28,000$  および

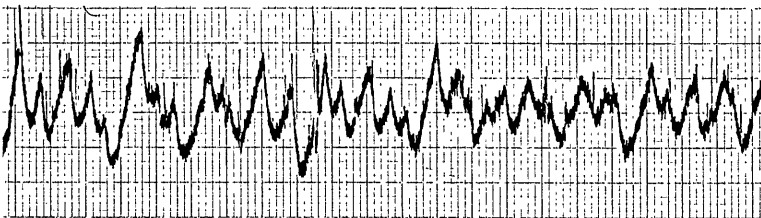
$S_z = 0.10 \text{ mm/tooth}$     $N = 15,000 \text{ min}^{-1}$



$S_z = 0.10 \text{ mm/tooth}$     $N = 30,000 \text{ min}^{-1}$



$S_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$     $N = 15,000 \text{ min}^{-1}$



$S_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$     $N = 30,000 \text{ min}^{-1}$

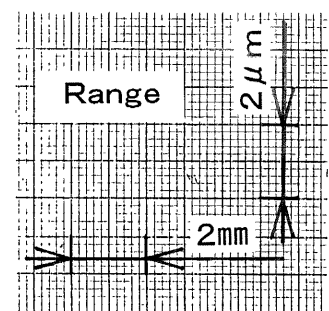
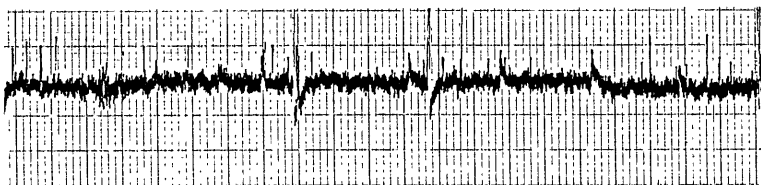


図 3.5 軸方向粗さ曲線

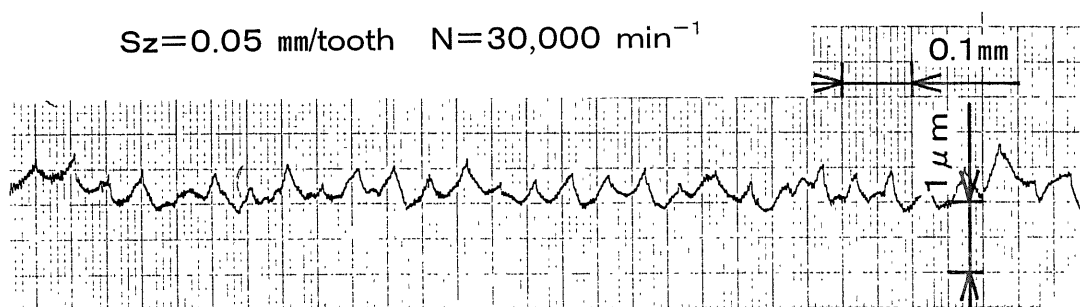
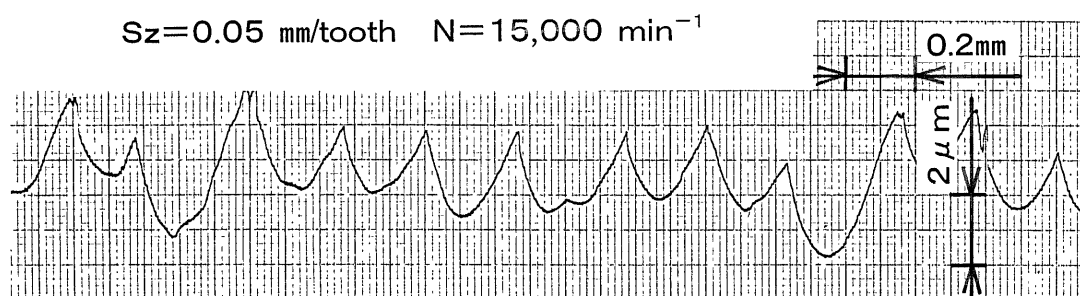
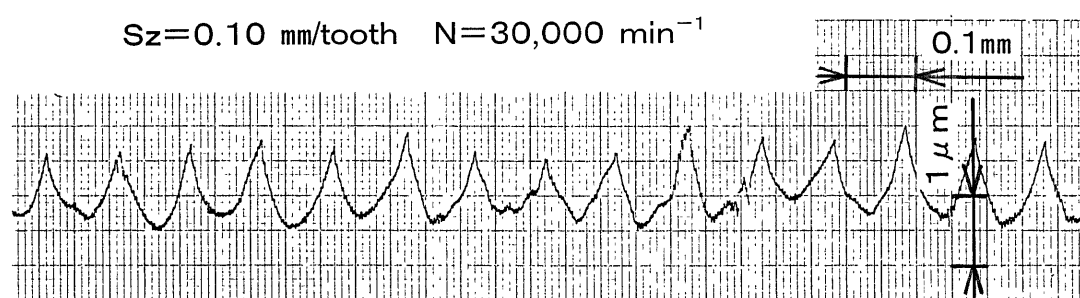
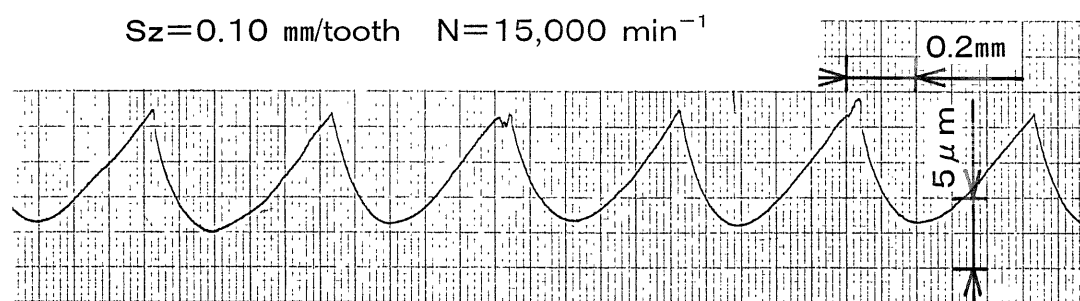


図 3. 6 送り方向粗さ曲線

30,000min<sup>-1</sup>においてはびびりが発生していないため1.0 μm以下と比較的小さい値となっている。また、一刃あたりの送り  $S_z$  を大きくすると表面粗さの値も増大する傾向があり、図3.5の粗さ曲線からもその様子がわかる。表3.2に示した送り方向粗さの値についても軸方向の表面粗さの結果と同様に、 $N=15,000$ ,  $20,000$  および  $25,000\text{min}^{-1}$  においてはびびりの発生により大きな値となっている。また、図3.6に示した粗さ曲線から  $N=30,000\text{min}^{-1}$  においては一刃あたりの送りの値がきれいに描かれているが、 $N=15,000\text{min}^{-1}$  においてはびびりが生じているため周期の大きな波形となっている。以上のことから、比較的安定している  $N=28,000$  および  $N=30,000\text{min}^{-1}$  での値に大きな違いはないが、加工能率の点も考慮して、基本的には回転数  $N=30,000\text{min}^{-1}$ 、一刃あたりの送り  $S_z=0.05\text{ mm/tooth}$ 、すなわち送り速度  $F=3,000\text{ mm/min}$  で加工を行うことにした。

また、実際の壁加工における切削条件を決定するために、各種条件で繰り返し段加工を行い、加工面の軸方向の表面粗さ  $R_y$  によって評価した。ここでも回転数および送りを選定した場合と同様に、十分な剛性があると考えられるブロック状の工作物を治具に取り付けて行った。繰り返し段加工においては半径方向の切込み  $Y_w$  は加工する壁厚によって決まるため、代表値として  $Y_w=1.0\text{ mm}$  と設定し、軸方向の切込み  $Z_w$  を変化させて切削条件の選定を行った。なお、軸方向の切込み  $Z_w$  は0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 および  $1.0\text{ mm}$  の7種類について加工を行った。薄壁の加工を想定しているため加工高さは25 mmである。表3.3は軸方向の切込み  $Z_w$  を変化させた場合における、加工面の軸方向の表面粗さ  $R_y$  を示しており、それぞれの条件における繰り返し回数を表中に併記した。

表 3. 3 繰り返し段加工による軸方向の表面粗さ

Axial depth of cut Zw[mm]	Roughness Ry[ $\mu$ m]	Number of repeat times Nr[pass]
0.05	0.4	500
0.1	0.4	250
0.2	1.5	125
0.4	1.5	63
0.6	1.6	42
0.8	2.4	32
1.0	3.2	25

$N=30,000\text{min}^{-1}$ ,  $F=3,000\text{ mm/min}$ ,  $Yw=1.0\text{ mm}$

切削効率の面から考えると、軸方向の切込み Zw を大きくすることは、繰り返し回数を減少させられるので大変有効なことではあるが、表 3. 3 に示すように軸方向の切込み Zw を大きくすることによって軸方向の粗さが大きくなっている。本研究では高精度な加工を得ることを優先させ、高速加工機を用いることで加工時間の短縮をはかっている。そこで、多段加工の切削条件として軸方向の切込み Zw は 0.05 および 0.10 mm に設定することにした。

なお、図 3. 7 は実験に使用した直径 10 mm の工具の形状および寸法であり、今後この工具を工具 A と呼び、通常の側面加工および薄壁の前加工にこの工具を用いた。また、工具 A の先端部 2 mm に切れ刃を残し、他の切れ刃を削り落とした工具 B を、繰り返し段加工法による薄壁の仕上げ加工に用いた。図 3. 8 は工具 B の先端部を拡大したものである。

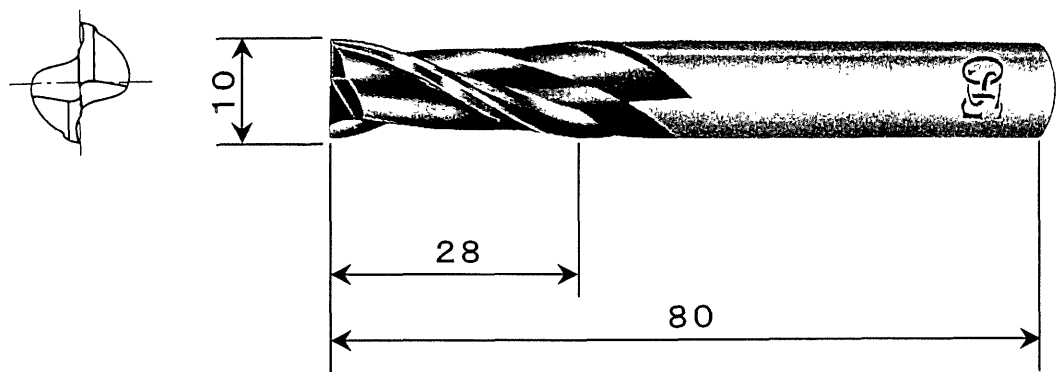


図 3. 7 工具の形状および寸法 (工具 A)

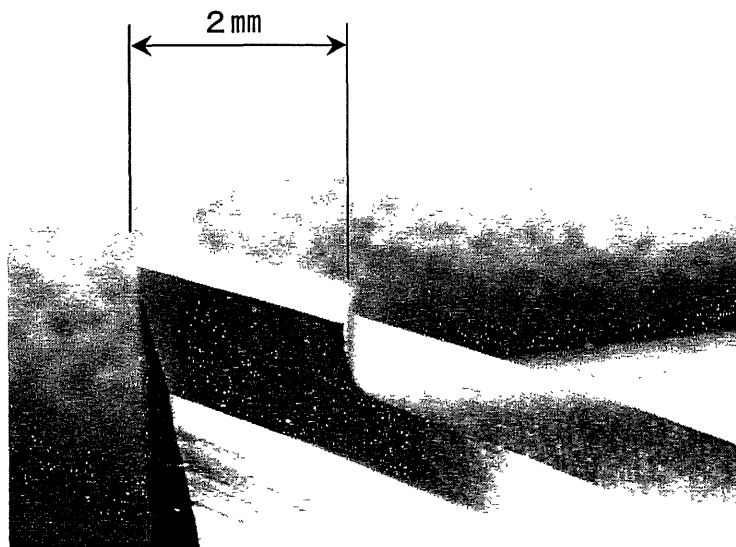


図 3. 8 工具 Bにおける刃先形状

### 3. 1. 2 使用機器

実験に使用した工作機械およびその他の使用機器は次の通りである.

工 作 機 械 : 空気静圧主軸搭載

立型NCフライス盤 ASV-40 (東芝機械(株))

制 御 装 置 : TOSNUC T-80M, 0.001 mm/pulse

エンドミル : [工具A]

直径 10 mm, 刃長 28 mm, 全長 80 mm, 2 枚刃

右刃右ねじれ, ねじれ角  $30^{\circ}$ , 超硬ソリッド

[工具B] (工具Aの刃部を研削したもの)

直径 10 mm, 刃長 2 mm, 全長 80 mm, 2 枚刃

右刃右ねじれ, ねじれ角  $30^{\circ}$ , 超硬ソリッド

工 作 物 : アルミニウム合金 (JIS A5052s)

切 削 条 件 : [通常加工法および前加工]

切削速度  $V=942.5 \text{ m/min}$ ,

半径方向切込み  $Y_w=0.05 \text{ mm}$ ,

軸方向切込み  $Z_w=25.0 \text{ mm}$ ,

1 刃あたりの送り  $S_z=0.05 \text{ mm/tooth}$ ,

下向き切削

[繰り返し段加工]

切削速度  $V=942.5 \text{ m/min}$ ,

半径方向切込み  $Y_w=0.5 \sim 3.0 \text{ mm}$

軸方向切込み  $Z_w=0.05, 0.1 \text{ mm}$ ,

1 刃あたりの送り  $S_z=0.05 \text{ mm/tooth}$ ,

下向き切削

測 定 機 器 : [加工誤差の測定]

三次元測定機    x y z a x    6 0 0 A (東京精密(株))

[粗さの測定]

粗さ測定機    S U R F C O M    2 B (東京精密(株))

[切削力の測定]

動力計 : 3 成分動力計    9 2 5 7 A (K I S T L E R)

アンプ : チャージアンプ 5 0 0 7 型 (K I S T L E R)

記録計 : 8 0 0 1 メモリーハイレコーダ (H I O K I)

図 3 . 9 は工作物の形状および寸法を示しており, 繰り返し段加工による壁厚  $W_t$  は 1.0 ないし 1.5 mm の仕上げ寸法であり, 薄壁部の加工長は 7 0 mm である.



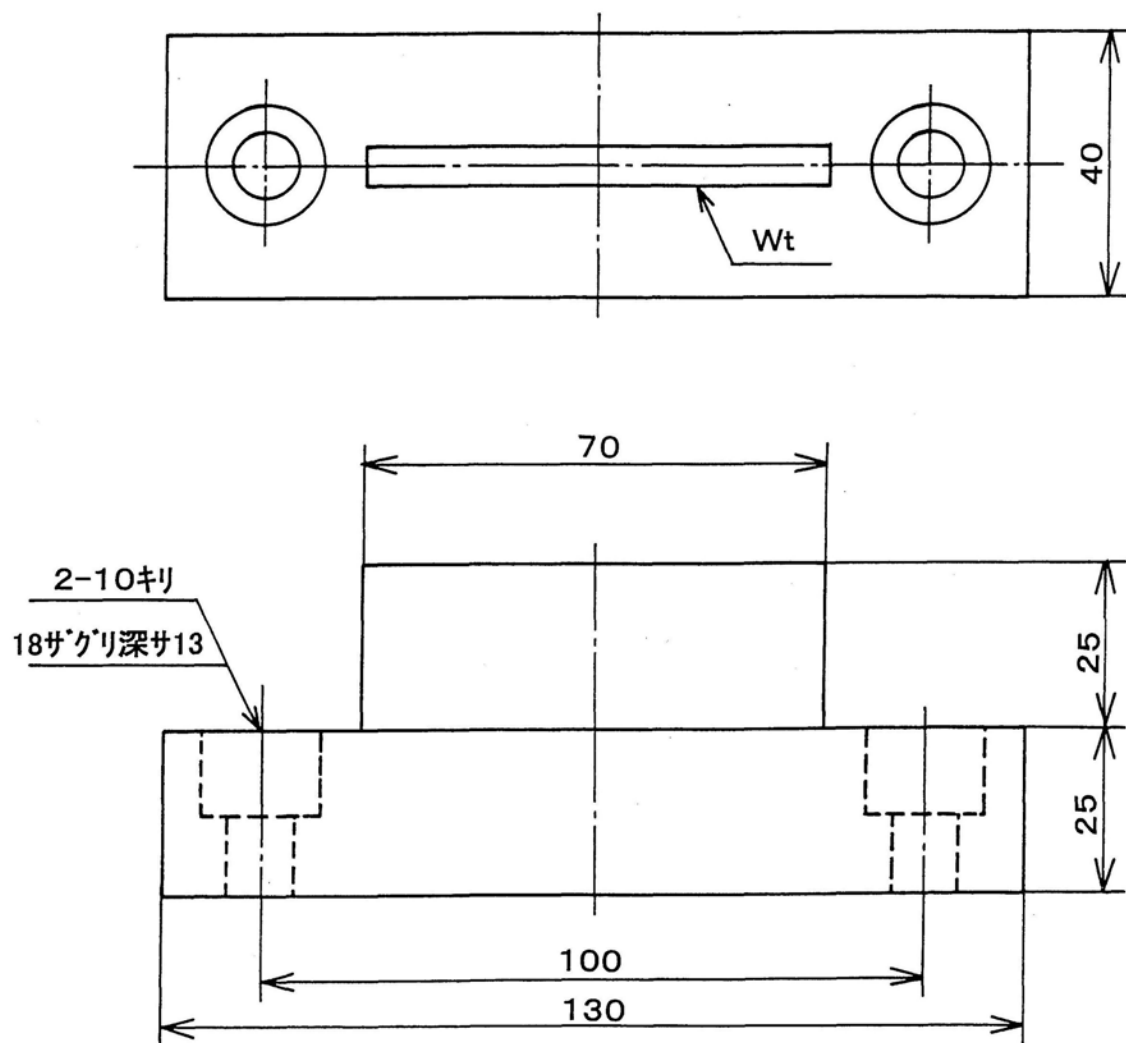


図 3. 9 工 作 物 の 形 状 お よ び 寸 法

### 3. 2 実験方法

#### 3. 2. 1 薄壁の加工方法

薄壁の加工実験は工作物の両壁面が機械の X 軸方向と平行になるように治具を介して行う。ここで、工作機械のテーブルに工作物を取り付けた際に、作業側から見て手前側の加工面を表面(おもてめん)、その反対側の面を裏面(うらめん)として区別した。なお、加工前の壁厚は任意の厚さとし、この状態からまず工具 A を用いて通常の側面加工によって前加工面を仕上げる。この場合の切削条件は 3. 1 節で述べたとおりであり、回転数  $N=30,000\text{min}^{-1}$ 、送り速度  $F=3,000\text{ mm/min}$ 、軸方向切込み  $Z_w=2.5\text{ mm}$ 、半径方向切込み  $Y_w=0.05\text{ mm}$  とした。表面、裏面それぞれの面についてこの切削条件によって加工を繰り返し、最終的な目標壁厚  $W_t$  に繰り返し段加工時の半径方向切込み分 ( $Y_w$  および  $Y_w'$ ) を加えた厚さに仕上げる。この面を前加工面とする。例えば、裏面、表面とも半径方向切込みを  $Y_w(=Y_w')=2.5\text{ mm}$  として壁厚  $W_t=1.0\text{ mm}$  の加工を行う場合には前加工面の壁厚は  $6.0\text{ mm}$  となる。

次に工具 B を用いて繰り返し段加工法により加工を行うが、まず裏面を繰り返し段加工によって仕上げ、その後表面の繰り返し段加工を行い加工を終了した。従って、表面の加工時には裏面での半径方向切込み  $Y_w'$  の分だけ薄い壁厚の加工を行うことになる。多段加工は半径方向切込みを与えた状態で軸方向の切込み  $Z_w$  を  $0.05$  あるいは  $0.10\text{ mm}$  とし、これを Z 軸（主軸）方向に繰り返すことによって加工面を得た。このとき、軸方向切込み  $Z_w=0.05$  および  $0.10\text{ mm}$  の 2 種類の実験を同一の工作物を用いて行った。図 3. 10 は繰り返し段加工における工具経路を示し、図 3. 11 はその工具経路を上から見た状態を示している。このように正面から向かって右側半分は  $Z_w=0.05\text{ mm}$ 、左側半分は  $Z_w=0.10\text{ mm}$  で裏面、表面のそれぞれの面で繰り返し段加工を行った。薄壁の壁高さは  $2.5\text{ mm}$  としているため、繰り返し回数は  $500$  あるいは  $250$

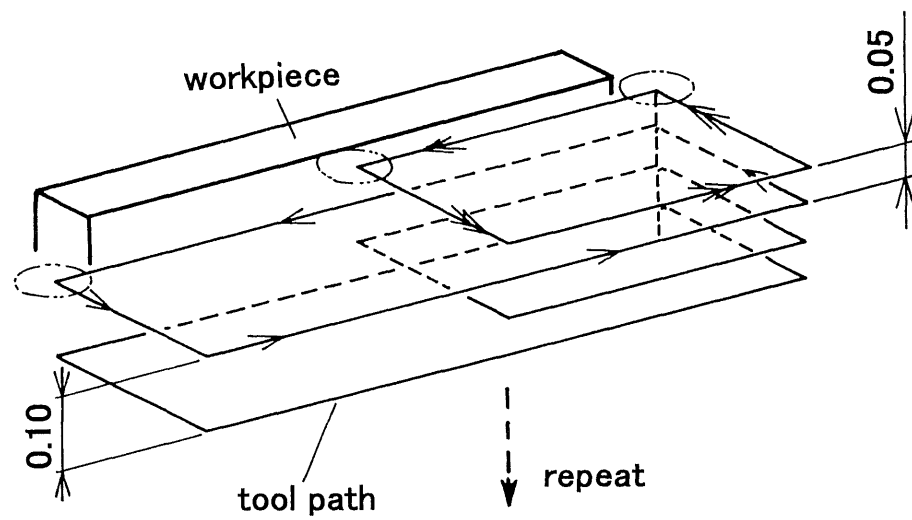


図 3. 10 繰り返し段加工における工具経路

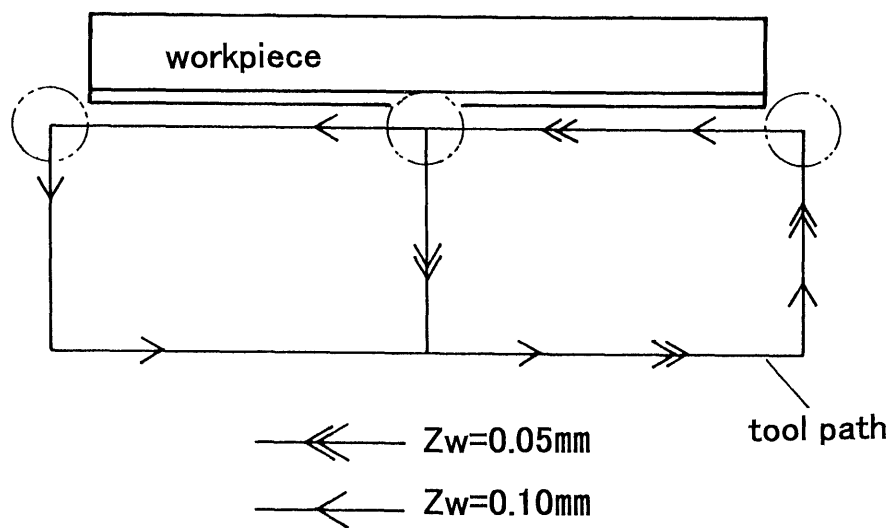


図 3. 11 繰り返し段加工における工具経路 ( Top view )

回である。

しかし、最終的な目標壁厚および設定する半径方向切込み  $Y_w$  の大きさによっては、前加工面の厚さが薄くなることがある。このような場合、工具 A を用いた通常加工によって前加工面を加工する段階において、びびりが発生してしまうことがある。このようなことを避けるため、壁厚の薄い前加工面を必要とする場合は、工具 B を用いて繰り返し段加工を行うことによって前加工面を作成した。

なお、送り速度を切削時  $F=3,000 \text{ mm/min}$ 、未切削時  $F=10,000 \text{ mm/min}$  として、幅  $70 \text{ mm}$  の加工を繰り返し段加工によって、軸方向切込み  $Z_w=0.10 \text{ mm}$  で行った場合には、繰り返し回数は  $250$  回となり、仮に加減速域はないものとする、切削時間は片面でおよそ  $8$  分となる。これに対し、通常の側面加工による方法では、半径方向の削り代によって繰り返し回数が異なる。仮に加工量を  $2.5 \text{ mm}$  とした場合、半径方向切込み  $Y_w=0.05 \text{ mm}$  に設定すると、繰り返し回数は  $50$  回となり、加工時間は繰り返し段加工の  $5$  分の  $1$  となる。通常加工法では、加工量が大きくなると切り返し回数が増え、その分加工時間も増加するが、繰り返し段加工においては、半径方向切込みの値を大きく設定しても繰り返し回数は変わらないため、加工能率を上げることができる。

### 3. 2. 2 加工結果の評価方法

加工誤差は薄壁加工時に土台部に作成した基準面を利用して、三次元測定機により Z 軸方向に 1 mm 間隔で測定を行った。ここで、右側半分は軸方向切込み  $Z_w$  を 0.10 mm、左側半分は軸方向切込み  $Z_w$  を 0.05 mm として繰り返し段加工を行った加工面であり、この違いを確認するために図 3. 12 に示したように表面、裏面の各面について、二点鎖線で示す  $X=\pm 5$  mm および  $X=\pm 2.5$  mm の位置で測定した。同じ切削条件における加工面について 2 ヶ所の測定を行った理由は、工作物の剛性の違いが加工誤差に影響を与える通常加工法と比較するためである。また、土台部に作成した基準面は、単に加工時の座標系と測定時の座標系とを一致させるものである。そのため向かい合う加工面の相対位置関係は知ることができるが、絶対位置を知ることはいできない。そこで、実際の工具径を考慮した実指令壁厚の中心と、各加工面の平均値の中心位置を一致させ、指令値と測定値との差を加工誤差として評価した。

また、軸方向の最大高さ粗さ  $R_y$  を粗さ測定機によって  $X=\pm 2.5$  mm の位置で測定し、各加工条件について比較を行った。

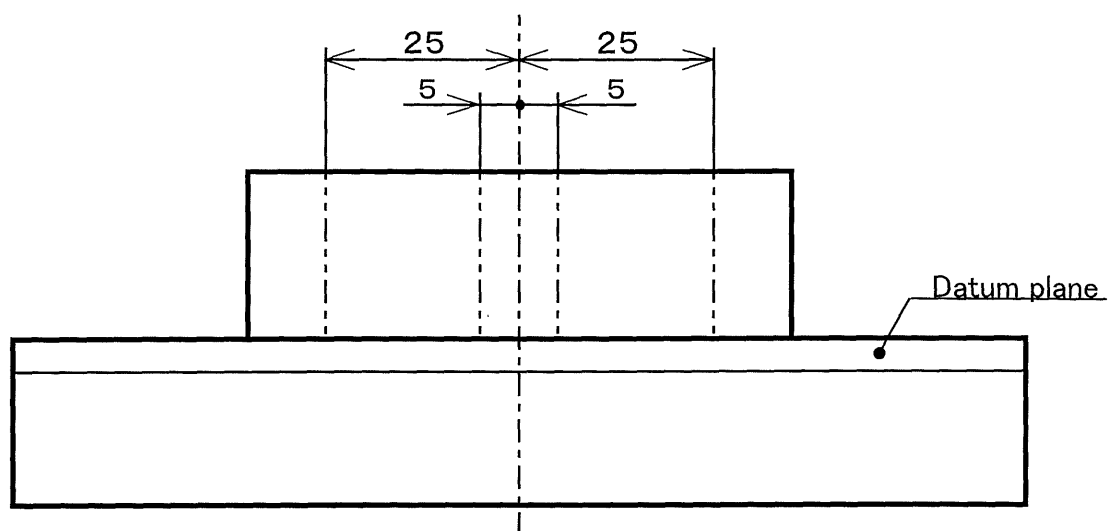


図3. 12 工作物の測定位置（送り方向位置）

## 4. F E Mによる変形解析

### 4. 1 加工時における工作物および工具の変形解析

実験条件において，工作物および工具の変形は静的な弾性変形として解析した<sup>2)</sup>．そのため，静荷重を加えたときの変形量をF E Mを用いて各モデルについて求めることにより，切削時におけるそれぞれの変形量を計算した．また，通常の側面加工による薄壁加工においては，それらの変形量を加算することで加工誤差を予測した．

図4. 1は裏面を繰り返し段加工によって壁厚  $W_t=4.0\text{ mm}$  に仕上げ，その後表面を繰り返し段加工によって  $W_t=1.2\text{ mm}$  の薄壁に仕上げている状態の工作物モデルであり，壁高さ  $Z=20\text{ mm}$  の位置の加工を想定している．工作物の要素分割は八節点六面体要素により行い，薄壁の仕上げ部分の要素サイズは  $\Delta x=2.5\text{ mm}$ ， $\Delta y=1.2\text{ mm}$  および  $\Delta z=2.5\text{ mm}$  としている．また，未切削領域に相当する部分に半径方向切込み部分の要素を加えており，この部分の要素サイズは  $\Delta x=2.5\text{ mm}$ ， $\Delta y=1.4\text{ mm}$  および  $\Delta z=2.5\text{ mm}$  としている．なお，繰り返し段加工における軸方向の切込みは半径方向の切込みに比べて小さいため，実際の軸方向切込み  $Z_w$  に相当する要素は付け加えておらず，送り方向の切削位置によるモデルの違いはないものとしている．一方，土台になる部分は薄壁の変形にほとんど影響しないため， $\Delta x=2.5\text{ mm}$ ， $\Delta y=1.0\sim 8.7\text{ mm}$  および  $\Delta z=3.6\sim 8.9\text{ mm}$  と要素サイズに傾斜をつけて壁部分に比べ分割数を少なくしている．なお，土台部は実際の寸法とは多少異なっているが解析時には拘束されるため，このことによる解析結果への影響は小さいと考えられる．加工する壁高さの位置によって工作物モデルは異なるため，総節点数は3636ないし4100，総要素数は2504ないし2952と変動している．

図4. 2はF E M解析における工具モデルの形状および要素分割を示

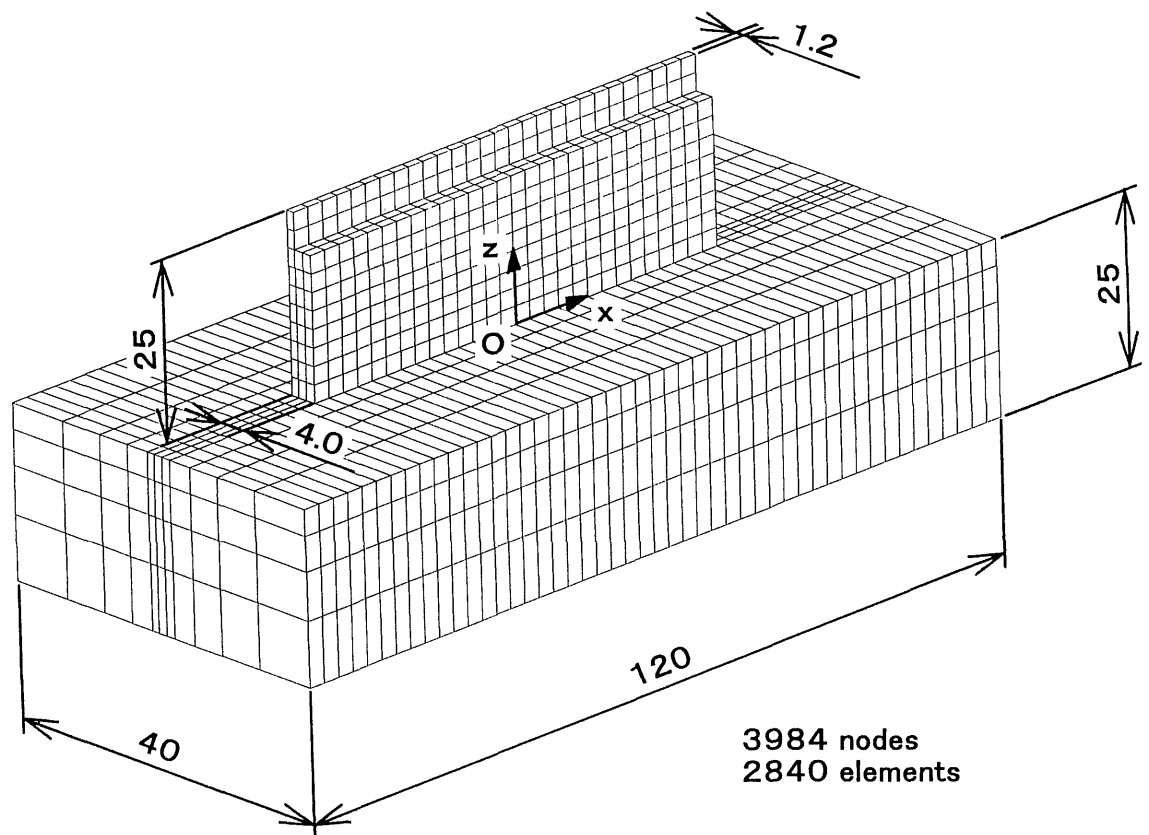


図 4. 1 工作物モデルの形状および寸法（切削時想定）



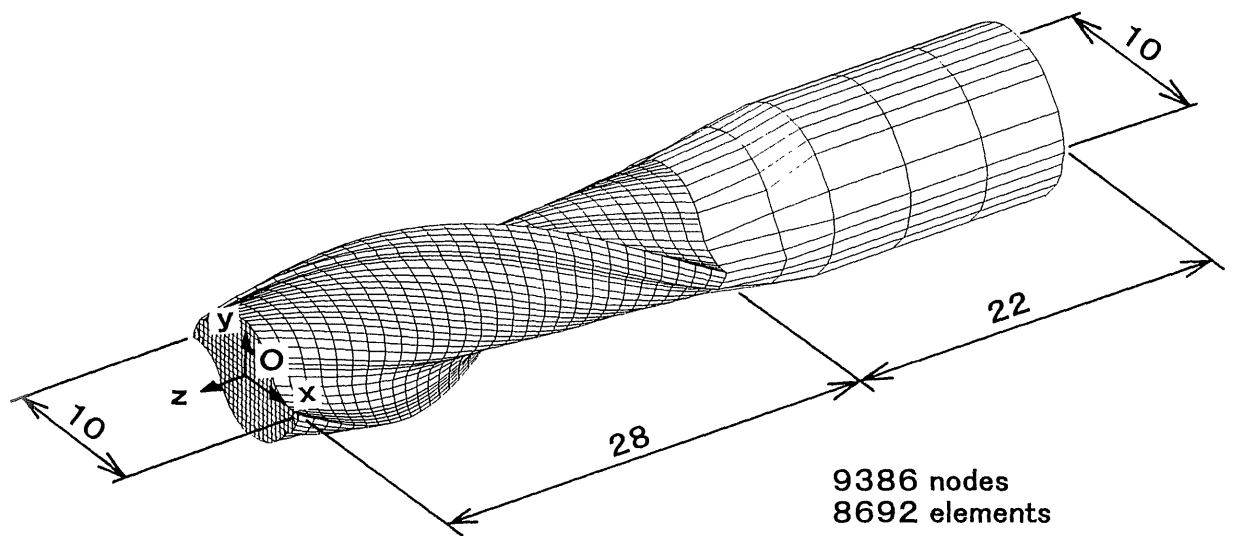
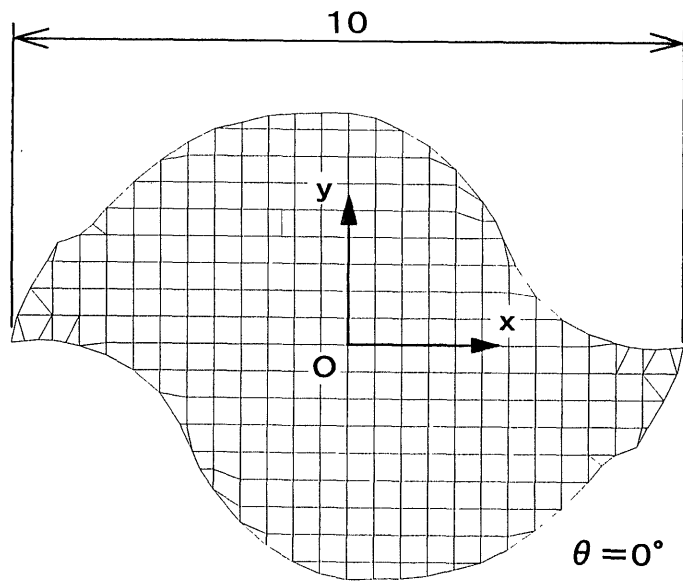


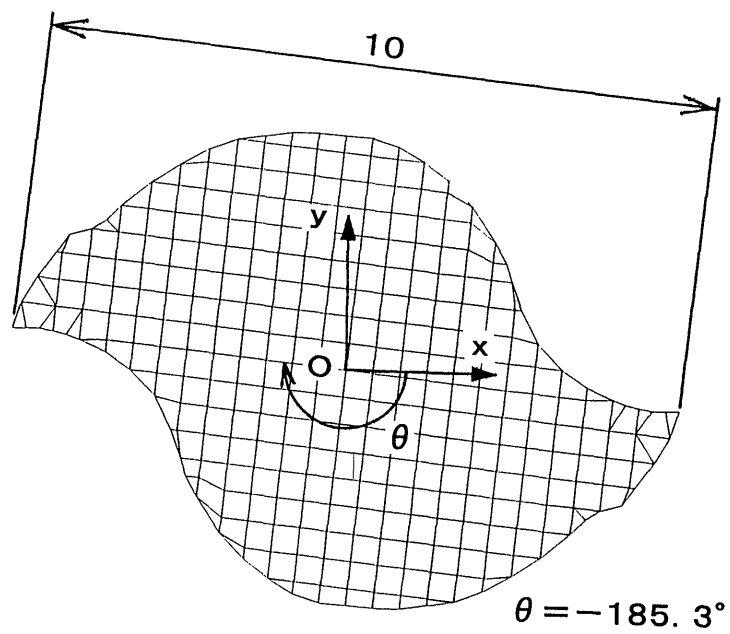
図 4. 2 工具モデルの形状および寸法

している．薄壁の繰返し段加工においては刃先先端 2 mmを残し他の刃部は削り落とした工具 B を用いたが，軸方向の切込みが微小である繰返し段加工においては実際に加工に関与している部分も微小である．また，削り落とした切れ刃も約 0.3 mmと直径に比べて小さく，先端部 2 mm以外の切れ刃がないことによる解析結果への影響は少ないものと考え，工具 A のモデルを解析に用いた．図 4. 3 は工具モデルの各位置における断面形状であり，中心部は八節点六面体要素を用い，外周部は六節点三角柱要素も含んでいる．六面体要素の要素サイズは  $\Delta x = 0.4 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 0.4 \text{ mm}$  および  $\Delta z = 1.0 \text{ mm}$  としている．なお，図 4. 3 (a) に示すように刃先先端断面を  $Z = 0 \text{ mm}$  とし，この断面形状において刃先に相当する部分を  $Y = 0 \text{ mm}$ ， $X = 5$  および  $-5 \text{ mm}$  として座標を定め，回転角を  $\theta = 0^\circ$  とした．図 4. 3 (b) は  $Z = -28 \text{ mm}$  における工具断面形状であり，工具のねじれ角  $\eta = 30^\circ$  であるため回転角は  $\theta = -185.3^\circ$  に変化している．また，この断面の要素サイズは  $Z = 0 \text{ mm}$  の位置における断面の場合と等しい．図 4. 4 (a) は  $Z = -32 \text{ mm}$  の位置における断面形状であり，切れ刃部分とシャンク部分をつなぐ過渡区間である．図 4. 4 (b) はシャンク部分に当たる  $Z = -35 \text{ mm}$  の位置における断面形状であり，直径は 10 mm である．実際の加工時には工具の突き出し長さが 35 mm であり，解析においても  $Z = -35 \text{ mm}$  より負の方向のシャンク部分を拘束させるため，工具モデルのシャンク部が短いことが刃先の変形に及ぼす影響は少ない．そこで，FEMモデルのシャンク部は実際の長さよりも短くし，さらに X，Y，Z いずれの方向の要素サイズとも刃部の要素サイズに比べて大きく設定した．また，シャンク部の断面における回転角は一定とし  $\theta = -191.9^\circ$  とした．なお，工具モデルの総節点数は 9386，総要素数は 8692 となった．

繰返し段加工においては軸方向の切込みを微小に設定するため，切削時における工具と工作物の接触長さも微小となり，軸方向切込みが

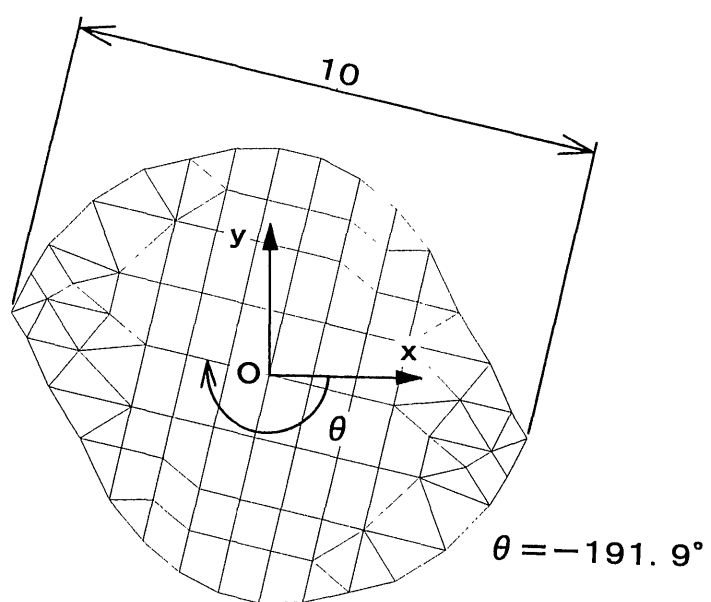


(a)  $Z = 0\text{ mm}$

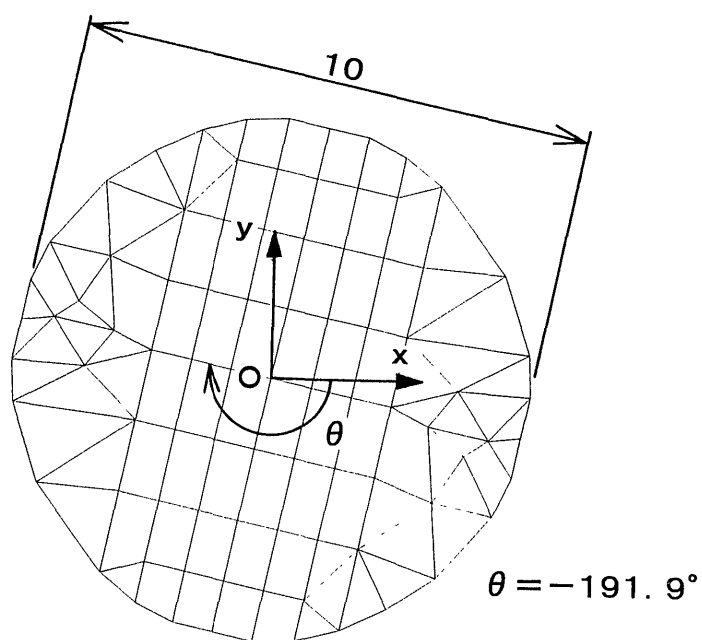


(b)  $Z = -28\text{ mm}$

図4.3 工具モデルの断面形状



(a)  $Z = -32 \text{ mm}$



(b)  $Z = -35 \text{ mm}$

図 4. 4 工具モデルの断面形状

$Z_w = 0.1 \text{ mm}$ の場合，接触長さは $0.115 \text{ mm}$ である．この大きさは要素サイズに比べて小さいため，工作物の変形解析には加工面に対応する節点一点に，また，工具の変形解析には  $Z = 0 \text{ mm}$ の刃先先端の節点一点に切削力に相当する荷重を加えて解析を行う．

なお，解析は汎用構造解析プログラム `ANSYS Release5.3`（サイバネットシステム(株)）を用い，弾性変形の静的解析として行った．

#### 4. 2 測定時における工作物の変形解析

本研究において、加工後の工作物形状の測定は三次元測定機を用いて測定した。三次元測定機による測定では工作物にプローブを押し当て、ある一定の変位を検出した位置を測定座標としている。従って、プローブに力が加わることによって座標を検出していることになり、同時に工作物にも反力が加わることになる。十分な剛性のある工作物であれば、この反力による影響はほとんどないが、本研究で加工した薄壁のような工作物では、測定によるプローブの反力によって測定物自体が変形することが考えられる。すなわち、剛性の低い測定物では、得られるデータは実際の値よりもプローブを接近させるときの向きと同じ方向に変形した状態の座標データということになる。

実験で加工した薄壁の壁厚  $W_t$  は 1.0 ないし 1.5 mm であり、この場合においても測定によって工作物に変形していることが考えられ、この変形量を確認するために F E M による変形解析を行った。図 4. 5 は加工後の工作物を想定した壁厚  $W_t=1.2$  mm の工作物モデルである。このモデルは図 4. 1 に示した切削状態のモデルから切込み量に相当する要素を取り除いた形状である。薄壁部の要素サイズは  $\Delta x=2.5$  mm,  $\Delta y=1.2$  mm および  $\Delta z=2.5$  mm とし、土台部の要素サイズは  $\Delta x=2.5$  mm,  $\Delta y=1.0 \sim 8.7$  mm および  $\Delta z=3.6 \sim 8.9$  mm と要素サイズに傾斜をつけて壁部分に比べ分割数を少なくしている。この工作物モデルの総節点数は 3030, 総要素数は 2008 である。測定点に相当する薄壁部の節点にプローブによる測定力を荷重として加え、測定による工作物の変形量を確認した。なお、解析は切削力による変形解析と同様に汎用構造解析プログラム A N S Y S Release5.3 を用い、弾性変形の静的解析として行った。

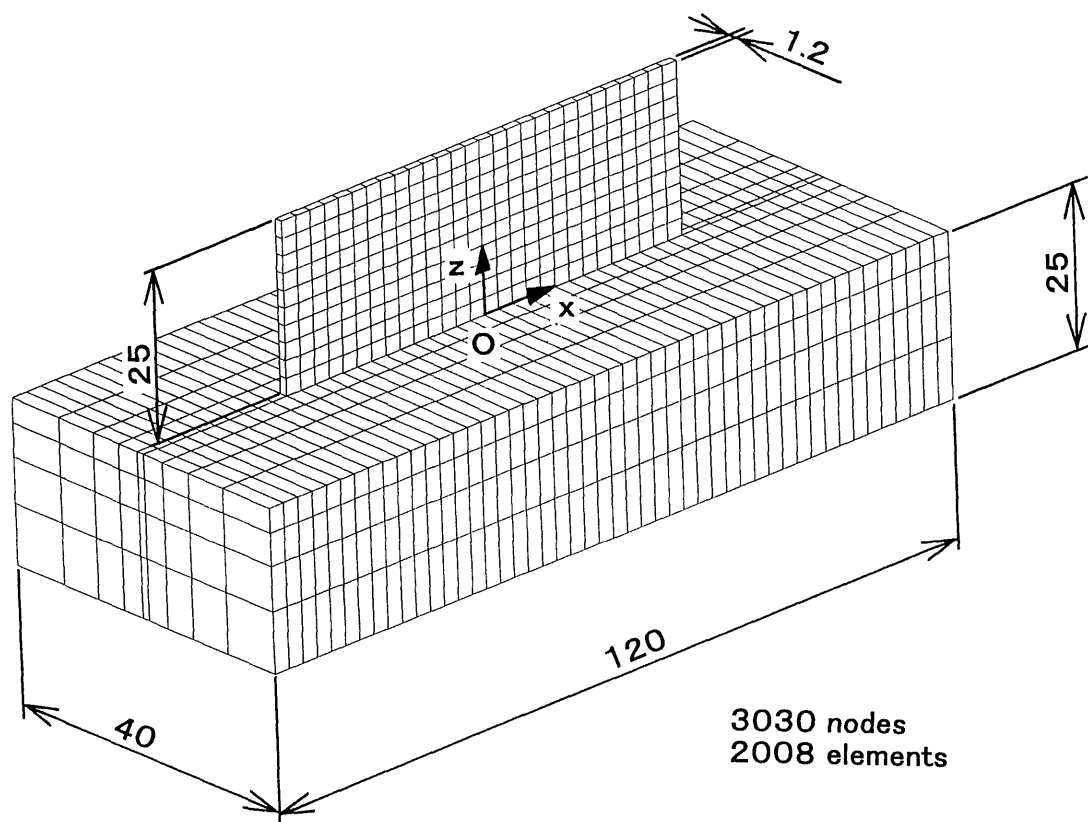


図4.5 工作物モデルの形状および寸法（測定時想定）

## 5. 実験および解析結果と考察

### 5. 1 解析結果

#### 5. 1. 1 加工時における工作物の変形

図 5. 1 は繰り返し段加工によって壁厚  $W_t=1.2\text{ mm}$  に仕上げた場合を想定した FEM 解析による工作物の変形量を示したものである。これは繰り返し段加工によって裏面を壁厚  $4.0\text{ mm}$  に加工し，その後の表面における仕上げ加工を想定したものである。図 5. 1 より薄壁の最上面  $Z=2.5\text{ mm}$  の変形量が最大であり，加工高さが下面側に下降するにつれて変形量は減少している。壁の上面を加工しているときは壁厚  $4.0\text{ mm}$  の壁部に荷重を加えている状態に近いが，加工高さが次第に下面側に下降していくにつれて，壁厚  $1.2\text{ mm}$  の薄壁に荷重を加えている状態に近づく。しかし，変形量は工作物の剛性と荷重を加える高さによって決まるために図のような結果となる。また，図において○印が  $X=5\text{ mm}$ ，●印が  $X=2.5\text{ mm}$  の位置における値である。中央部付近である  $X=5\text{ mm}$  の値よりも  $X=2.5\text{ mm}$  の値が大きくなっており，これは工作物の剛性の違いによる影響であるといえる。なお，図中の破線は最小二乗法によって算出した回帰曲線であり，後述する予測誤差の計算には回帰式を用いて工作物の変形量を予測した。図 5. 2 は壁高さ  $Z=2.0\text{ mm}$ ， $X=5\text{ mm}$  の加工を，図 5. 3 は壁高さ  $Z=2.0\text{ mm}$ ， $X=2.5\text{ mm}$  の加工を想定した解析結果について壁に垂直方向の節点変位を大きさごとに色分けして示したものである。

図 5. 4 は壁厚  $6.0\text{ mm}$  の工作物を壁厚  $4.0\text{ mm}$  に繰り返し段加工によって裏面を加工した場合の解析結果である。図 5. 1 と同様に最上面  $Z=2.5\text{ mm}$  で最大値を示しており，また， $X=5\text{ mm}$  の値よりも  $X=2.5\text{ mm}$  の値が大きくなっている。しかし，図 5. 1 と比べると約  $1/3$  と小さい値であり，先に加工する裏面における切削力による工作物の変形が，表



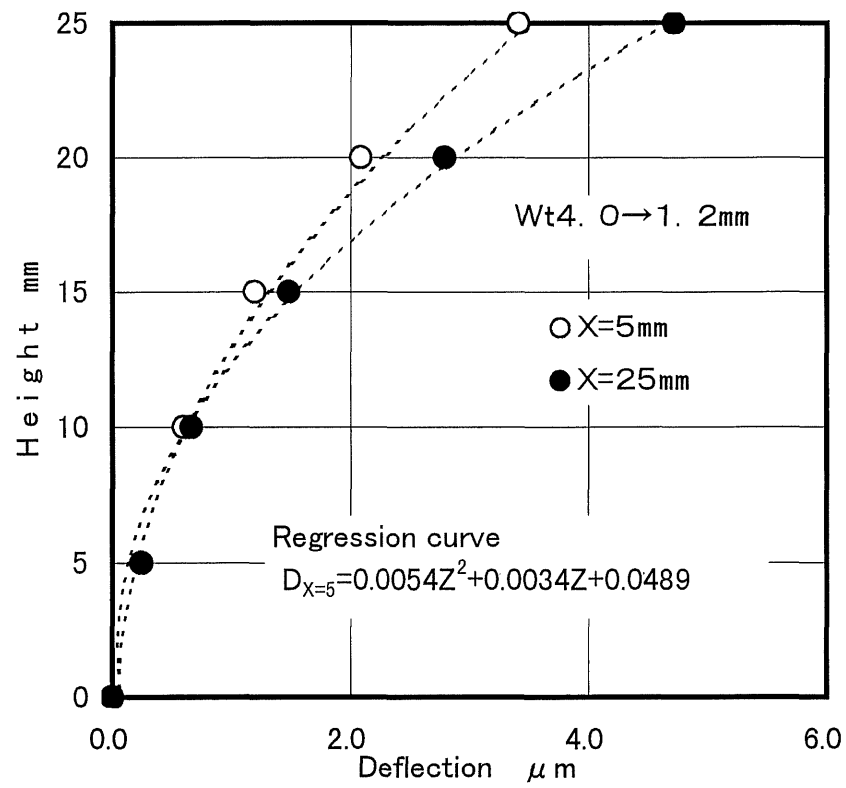


図5. 1 工作物の変形(Wt4. 0→1.2mm:表面加工想定)

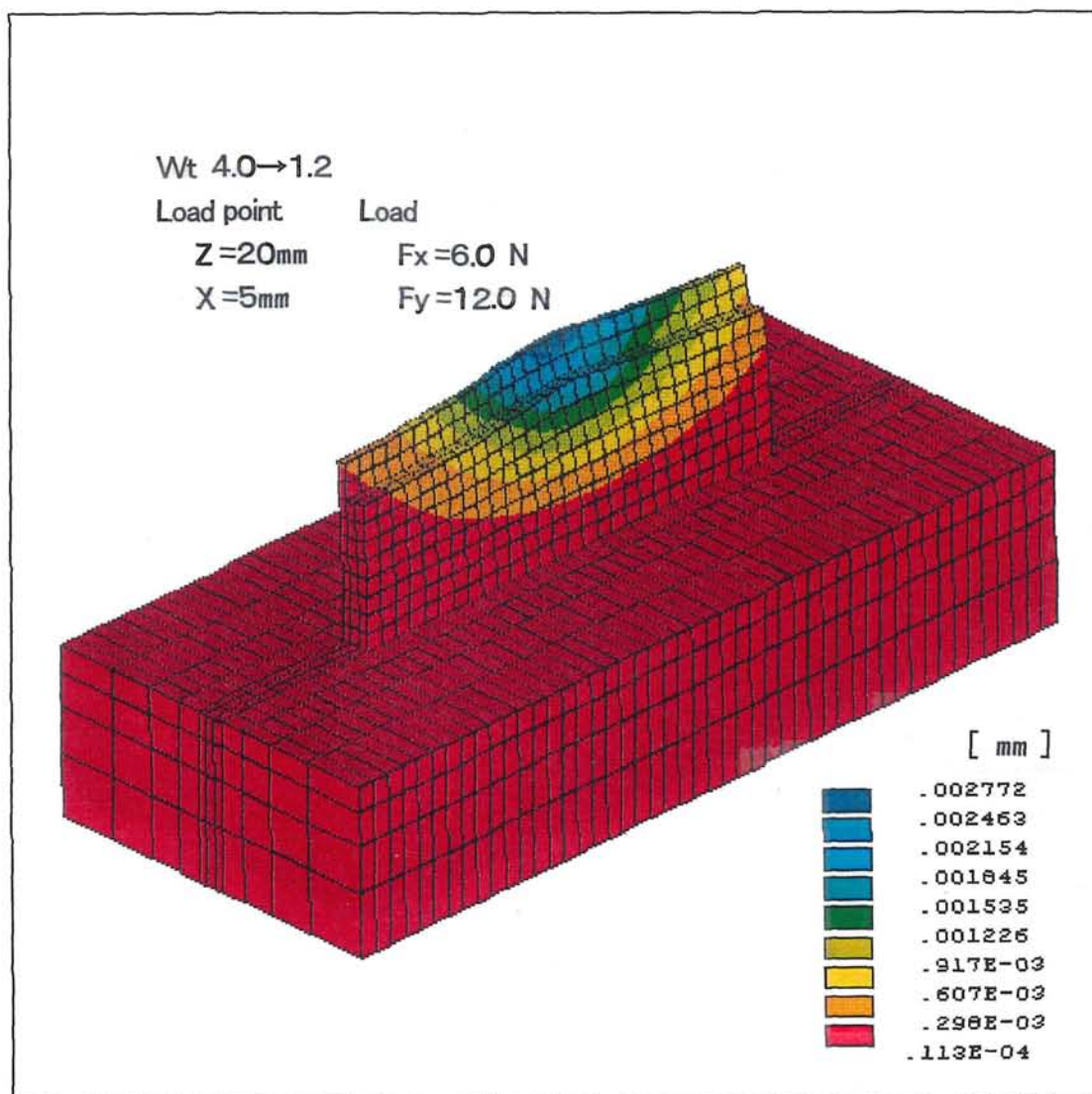


図 5. 2 解析による工作物モデルの節点変位  
 (繰返し段加工における変形解析 : X = 5 mm)

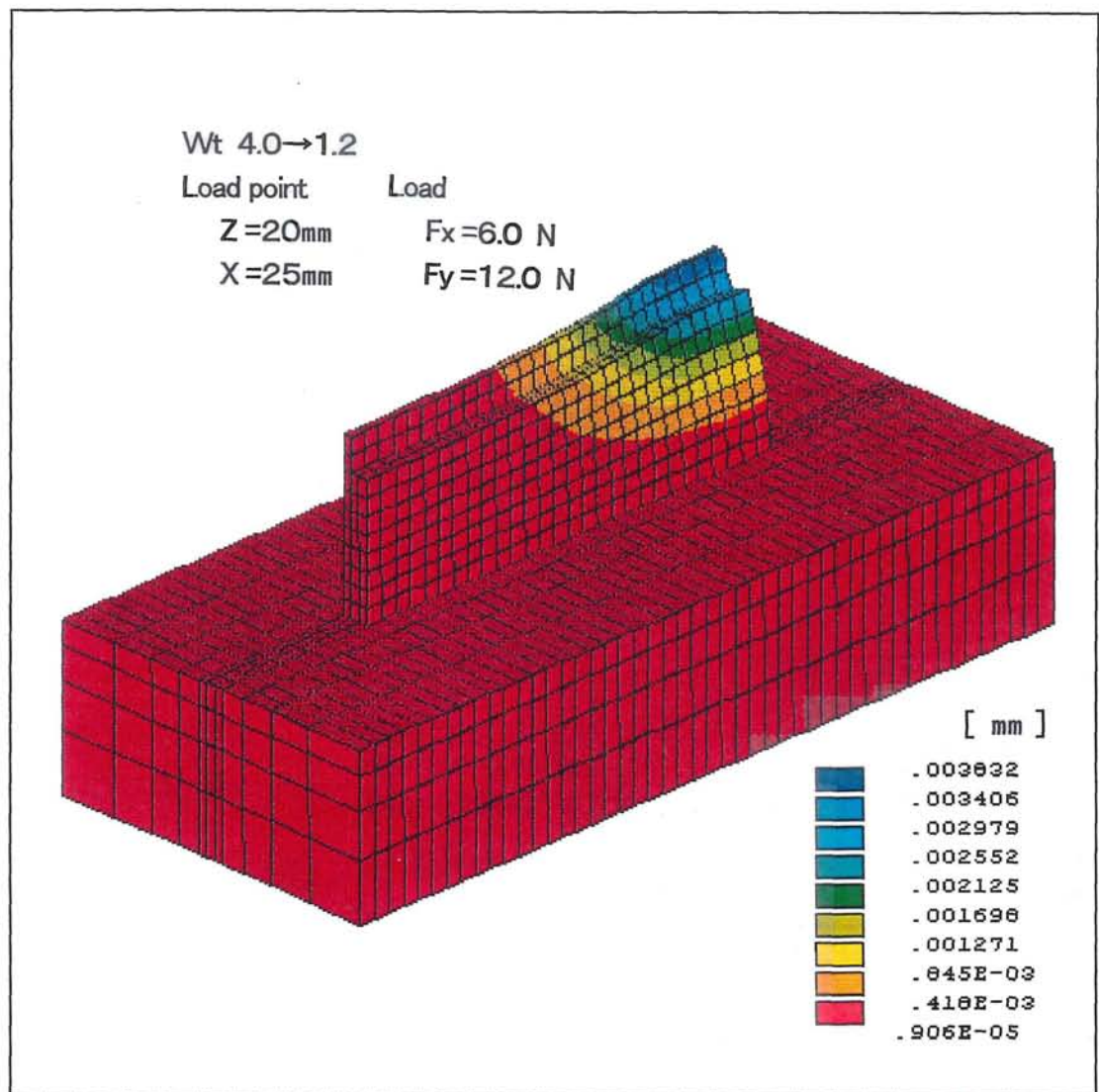


図 5. 3 解析による工作物モデルの節点変位  
 (繰返し段加工における変形解析: X=25mm)

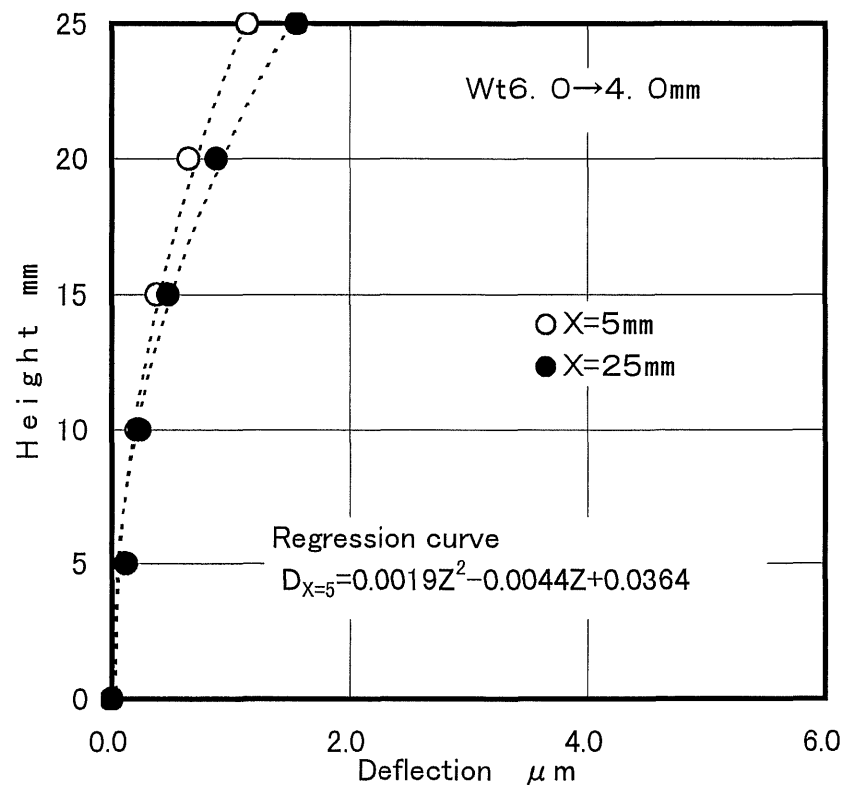
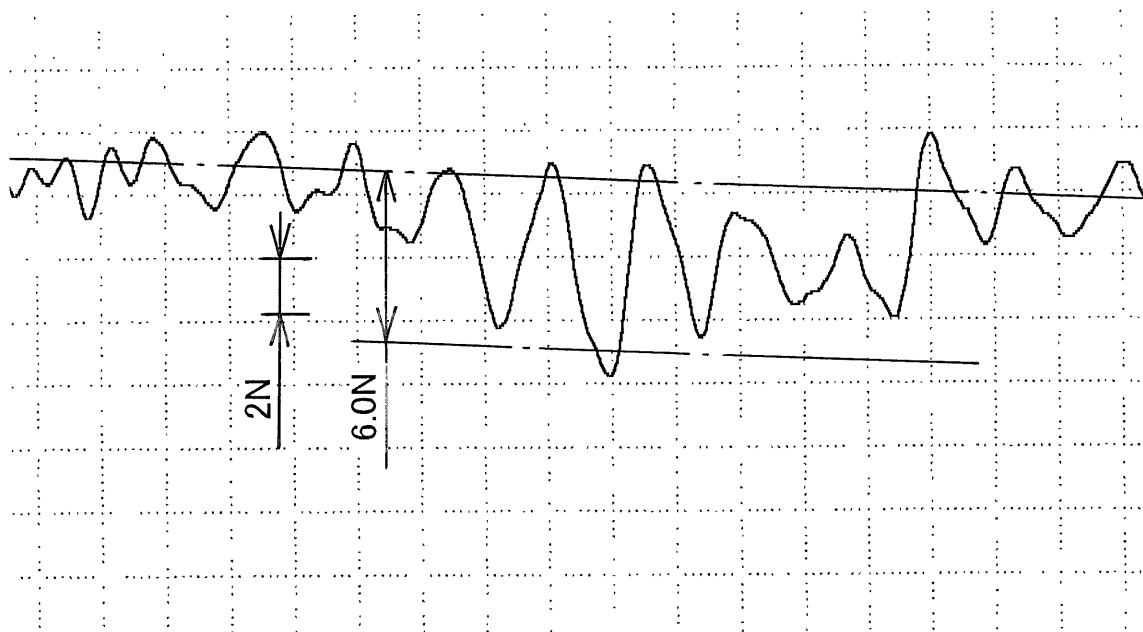


図5. 4 工作物の変形 (Wt6. 0→4. 0mm:裏面加工想定)

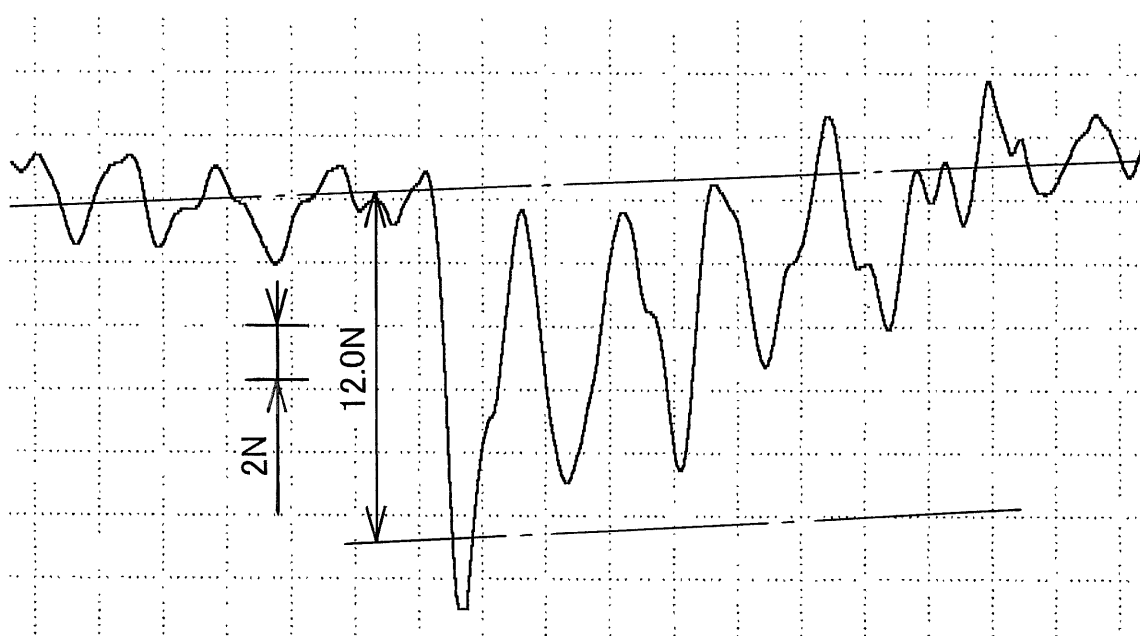
面の加工に及ぼす影響は小さいといえる。

工作物の F E M モデルはヤング率を  $73\text{ GPa}$  として作成し，解析時における拘束条件は土台部の全節点の変位を  $u_x = u_y = u_z = 0$  とした．なお，実際の加工は主軸回転数  $N=30,000\text{min}^{-1}$  で行っており，このような切削条件における切削力を通常の動力計で測定することはできない．そこで，汎用機（立型 NC フライス盤：OKK MH350）を用い，一刃あたりの送りが等しくなるような切削条件で工作物を加工した場合の切削力を測定し，この値を繰り返し段加工時における切削力として解析に用いた．図 5. 5 は測定によって得られた送り方向および半径方向の切削力波形である．繰り返し段加工における一刃あたりの加工量は通常の加工に比べてかなり小さいため，通常の側面加工に比べると切削力も小さくなる．切削力測定において，このように小さな切削力を読み取るためにアンプおよび記録計の倍率を上げて測定したため，工作機械の振動および測定機やケーブルのノイズなども増幅された格好となり，図に示すように鮮明な切削力波形を得ることはできなかった．そこで，得られた切削力波形の最大値を加工面生成時における切削力とした．特に軸方向の分力においては切込みが微小であるため，確認することはできなかった．しかし，工作物の変形に大きな影響を及ぼすのは半径方向の分力であるため，軸方向の分力を 0 とすることによる解析結果への影響は小さいのとし，半径方向および送り方向の分力を荷重として工作物モデルに加えて変形解析を行った．解析に使用した荷重は送り方向分力が  $6.0\text{ N}$ ，半径方向分力が  $12.0\text{ N}$  である．また，繰り返し段加工において，加工に携わるのは工具の刃先部分のみであるため，工作物に加わる切削力は加工壁高さおよび送り方向の加工位置によらず同一であると考えられる．

図 5. 1 および図 5. 4 に示した解析結果はあくまでも汎用機による加工で測定した切削力を用いた結果である．本研究において，高速加工



(a) 送り方向分力



(b) 半径方向分力

OKK MH350  
 $Y_w = 2.5 \text{ mm}$        $Z_w = 0.1 \text{ mm}$   
 $S_z = 0.05 \text{ mm/tooth} (N = 2500 \text{ min}^{-1})$

図 5.5 繰返し段加工における切削力

機による実際の加工時にどの程度の切削力が作用し，どの程度の変形が起きているかについての実験は行わなかったため，実際の状況を把握することはできないが，切削力によって工作物の変形する場合には，上面側ほど削り残しの誤差が大きくなり，さらに送り方向における加工位置による違いが現れることになる．

### 5. 1. 2 加工時における工具の変形

加工時の切削力により工作物が変形すると同時に，その反作用力が工具に作用する．その反作用力による影響を確認するために，5. 1. 1で示した工作物モデルに加えた荷重と同じ荷重を工具のFEMモデルに加えることによって，繰り返し段加工を想定した工具の変形量を求めた．繰り返し段加工においては軸方向の切込みが微小であるため，工具モデルの刃先に相当する一つの節点に荷重を加え，その点における変形量を求めた．加えた荷重は工作物の解析に用いた値と同様に，送り方向分力として6.0 N，半径方向分力として12.0 Nである．

工具のFEMモデルはヤング率を470 GPaとして作成し，解析時における拘束条件は $Z=-35\text{ mm}$ より先の中心軸および $X=\pm 5\text{ mm}$ に相当する節点の変位を $u_x = u_y = u_z = 0$ とした．これは突き出し長さを35 mmとして加工したことによるものであり， $X=\pm 5\text{ mm}$ の節点を拘束した理由は回転を拘束するためである．また，図5. 6はこの解析による半径方向の節点変位を大きさごとに色分けして示したものである．表5. 1はこのような条件で解析を行った場合の刃先に相当する節点の変位である．

表 5. 1 工具刃先における変形量

Direction	Deflection [ $\mu\text{m}$ ]
Feed direction	2.13
Radial direction	2.98

先にも述べたように，繰り返し段加工においては加工位置，壁高さによらず一定の条件による加工が行われるため，工具の変形量および工具の変形が加工面に及ぼす影響も加工位置，壁高さによらず一定となる．切削力によって表5. 1に示した値だけ工具が変形したとすれば，半径



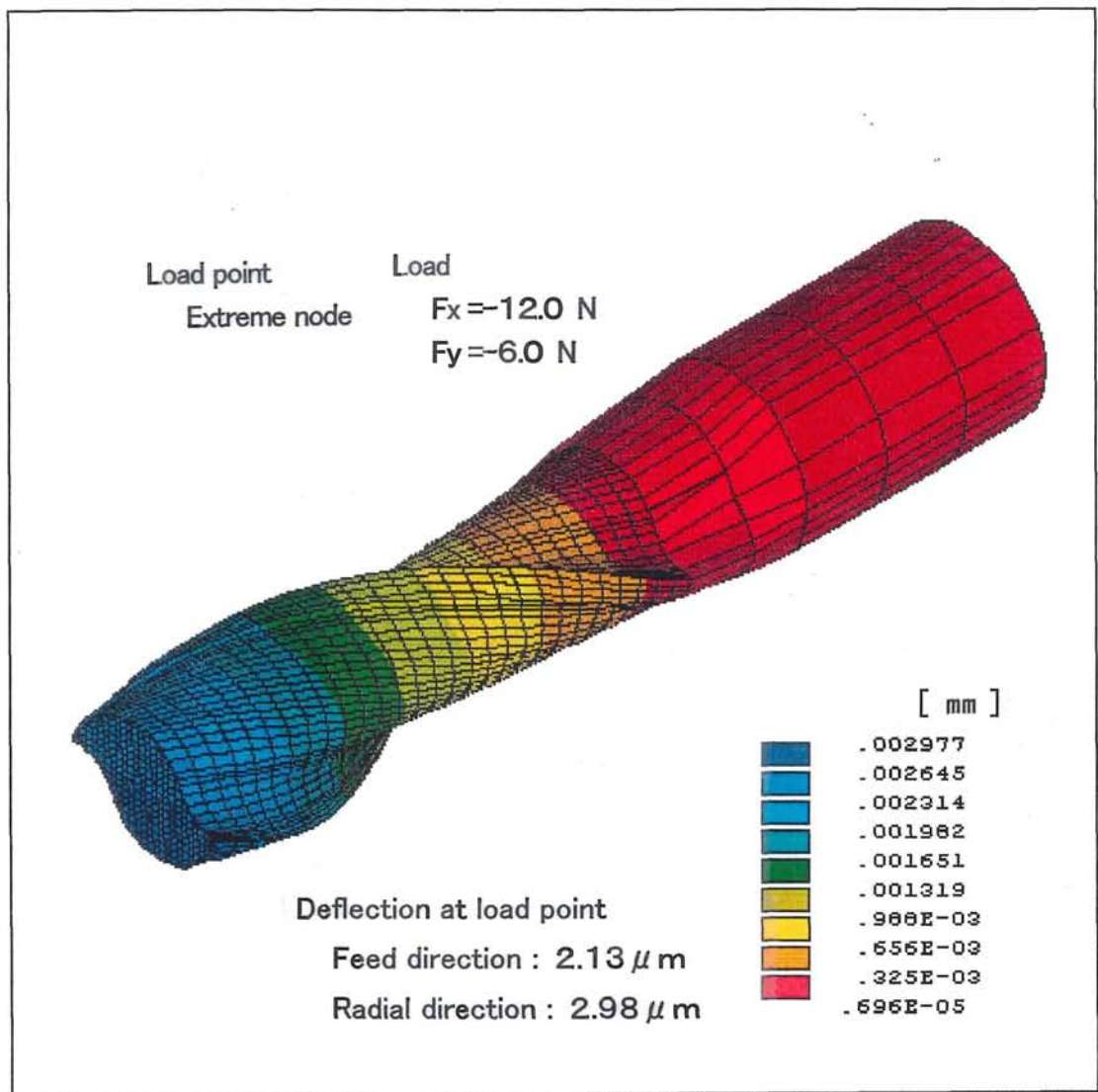


図 5. 6 解析による工具モデルの節点変位  
(繰返し段加工における変形解析)

方向の変位である  $2.98 \mu\text{m}$  だけ加工面を削り残すということになる。

ここでも、解析に用いた切削力は実際の繰り返し段加工による値ではないため、あくまでも参考値である。

### 5. 1. 3 測定時における工作物の変形

三次元測定機を用いて測定を行う際、剛性の低い工作物の場合にはプローブの測定圧によって工作物が変形する。解析に用いた工作物のモデルは4. 2節に示したような形状であり、対象とする各工作物ごとに壁部の厚さおよび要素分割が異なる。本研究の測定に用いた三次元測定機（東京精密(株)）に使用されているプローブ（RENISHAW TP1）が測定位置を感知する力の大きさは15 gf（0.147 N）とされている。この力を測定力として各工作物モデルに荷重として加え、測定による変形量を求めた。なお、工作物のFEMモデルはヤング率を73 GPaとして作成し、解析時における拘束条件は土台部の全節点の変位を $u_x = u_y = u_z = 0$ とした。これは繰り返し段加工時における工作物の変形解析の場合と同じである。

図5. 7ないし図5. 11は壁厚  $W_t$  を0.7, 1.0, 1.2, 1.5 および6.5 mmとした壁形状の工作物を測定した場合における変形の様子を示している。壁厚の大きさに関わらず、壁高さ  $Z=2.5$  mmで最大値を示し、壁高さが下面側に下降するにつれてその値は減少し、壁高さ  $Z=0$  mmで変位0と変化している。測定位置で比較すると、 $X=5$  mmよりも  $X=2.5$  mmの値の方が大きくなっている。すなわち、壁部の上面側ほど、さらに中央部よりも両端部側で変形量が大きくなっていることがわかる。また、壁厚が大きくなるほど変形量は小さくなり、壁厚  $W_t=6.5$  mmにおける変形量は非常に小さな値となっている。いずれの解析においても、加えている荷重の大きさは等しいため、工作物の剛性の違いによる影響であることがわかる。なお、図中には各解析結果の回帰曲線を併記した。さらに、解析によって得られた変形量と回帰曲線との差の平均値と標準偏差を各壁厚ごとに求め図5. 12に示した。壁厚が大きくなると変形量が小さくなるため、差の平均値および標準偏差ともに小さくなる傾向がある。また、いずれの壁厚においても平均値の値は（a）

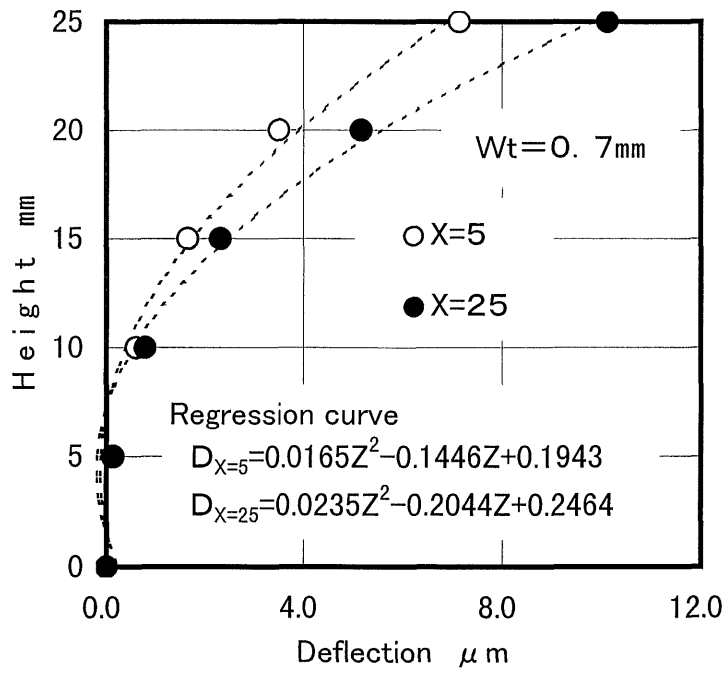


図5.7 測定時における工作物の変形量(Wt=0.7mm)

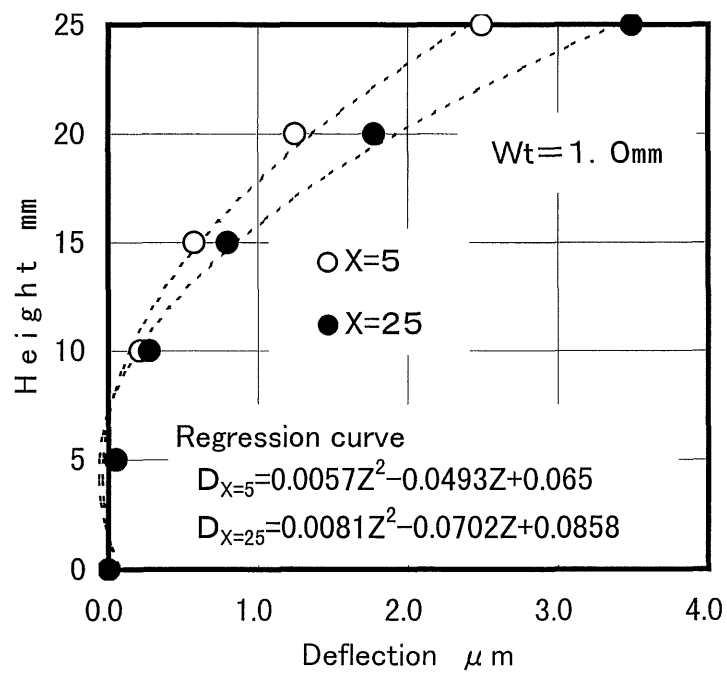


図5.8 測定時における工作物の変形量(Wt=1.0mm)

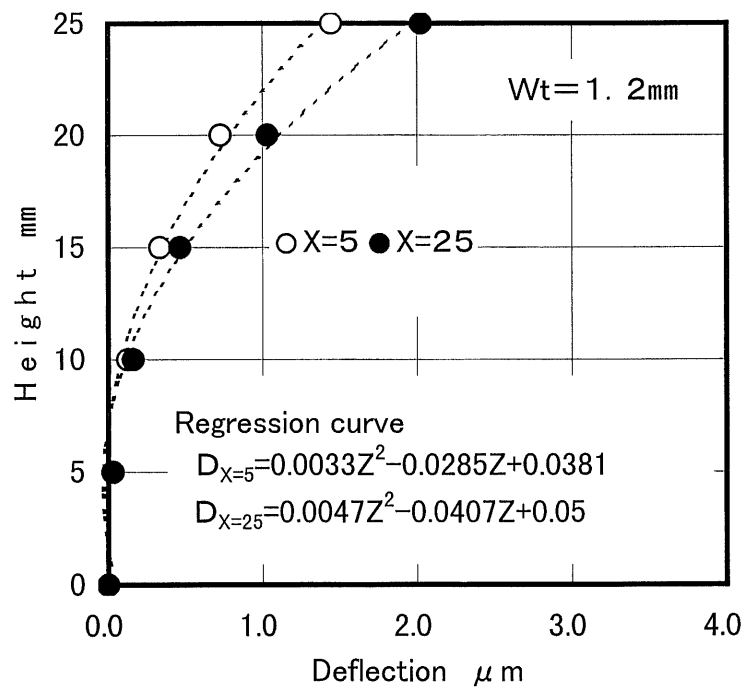


図5.9 測定時における工作物の変形量(Wt=1.2mm)

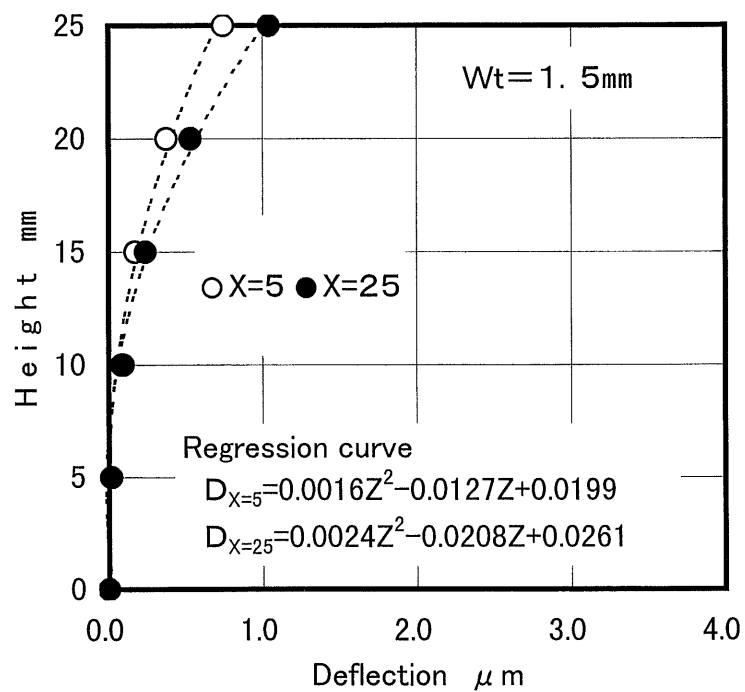


図5.10 測定時における工作物の変形量(Wt=1.5mm)

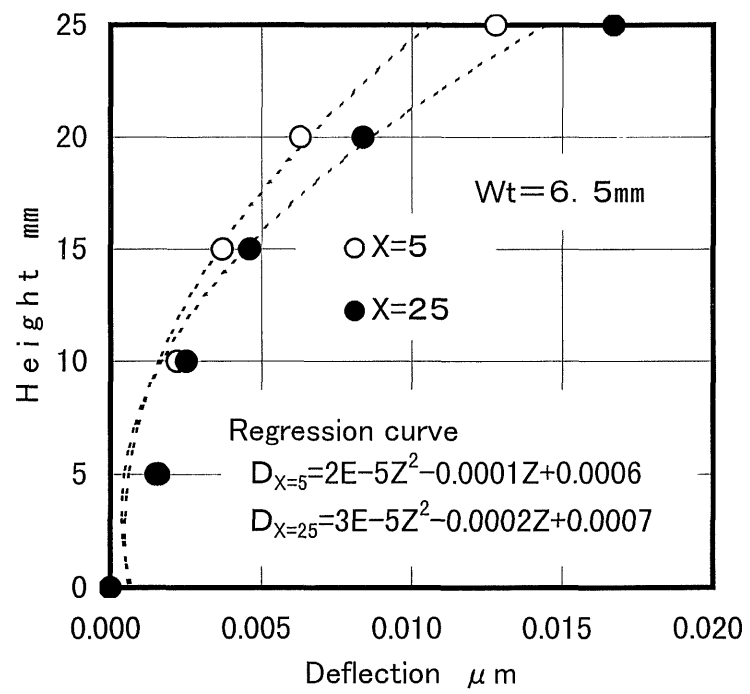
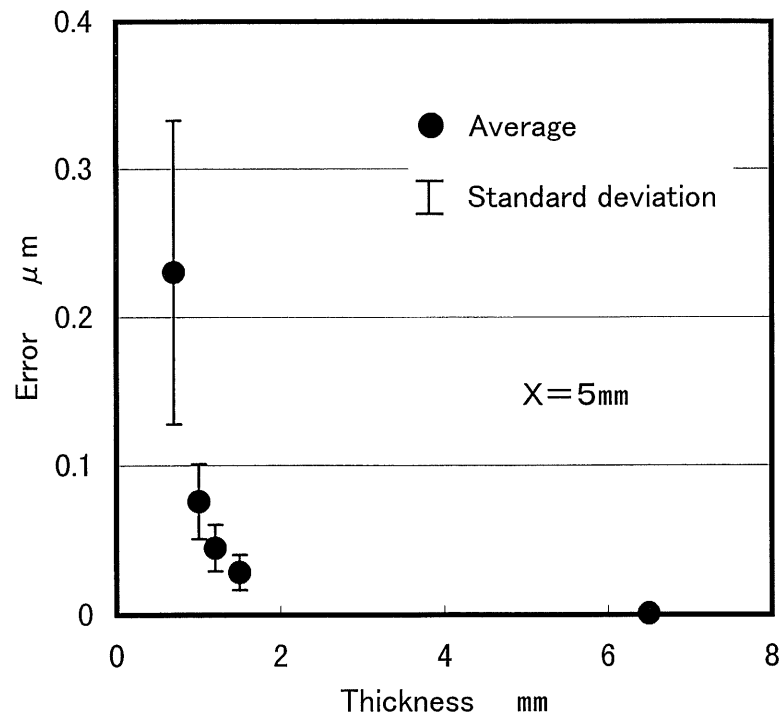
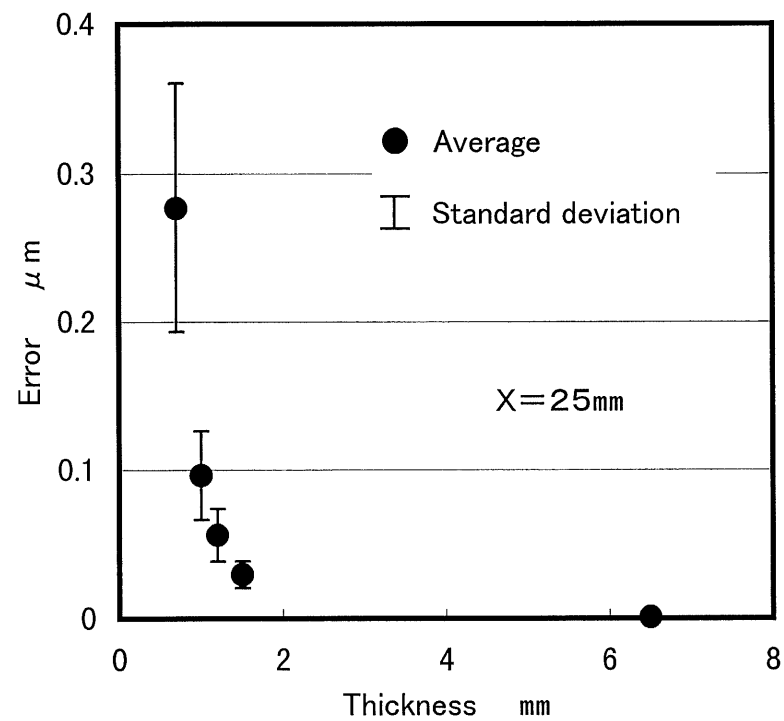


図5. 11 測定時における工作物の変形量(Wt=6. 5mm)



(a)  $X=5\text{mm}$



(b)  $X=25\text{mm}$

図5.12 解析結果と回帰曲線との誤差 ( $X=25\text{mm}$ )

図に示した  $X=5\text{ mm}$  よりも (b) 図に示した  $X=2.5\text{ mm}$  の値の方が大きくなっているが、これは工作物における剛性の違いによるものであり、最大でも (b) 図に示した壁厚  $W_t=0.7\text{ mm}$  において  $0.28\text{ }\mu\text{ m}$  である。標準偏差の値についても最大で  $0.10\text{ }\mu\text{ m}$  ( $W_t=0.7\text{ mm}$ ,  $X=5\text{ mm}$ ) と小さくここで求めた回帰曲線が妥当なものであるといえる。

図 5. 13 は壁高さ  $Z=2.5\text{ mm}$  における変形量と壁厚の関係を示したもので、この図より壁厚  $W_t=1.0\text{ mm}$  以下では測定力による変形が急激に増加することがわかる。このように変形量が大きくなる工作物を測定する場合には変形量を補正する、あるいは別の測定方法を選択するなど何らかの対応が必要であるといえる。本実験で測定した工作物は壁厚がすべて  $W_t=1.0\text{ mm}$  以上であり、最大で約  $3.5\text{ }\mu\text{ m}$  の変形量が生じていることになるが、測定の段階では特に補正などの操作は行わず、誤差を比較する際にこの点を考慮することにした。図 5. 14 は壁厚  $W_t=1.2\text{ mm}$  の工作物の  $X=2.5\text{ mm}$ 、壁高さ  $Z=2.5\text{ mm}$  の位置の測定を想定した場合の解析結果であり、壁に垂直方向の節点変位を大きさごとに色分けして示している。この解析における最大の変形量は壁高さ  $Z=2.5\text{ mm}$  の位置において  $2.03\text{ }\mu\text{ m}$  である。



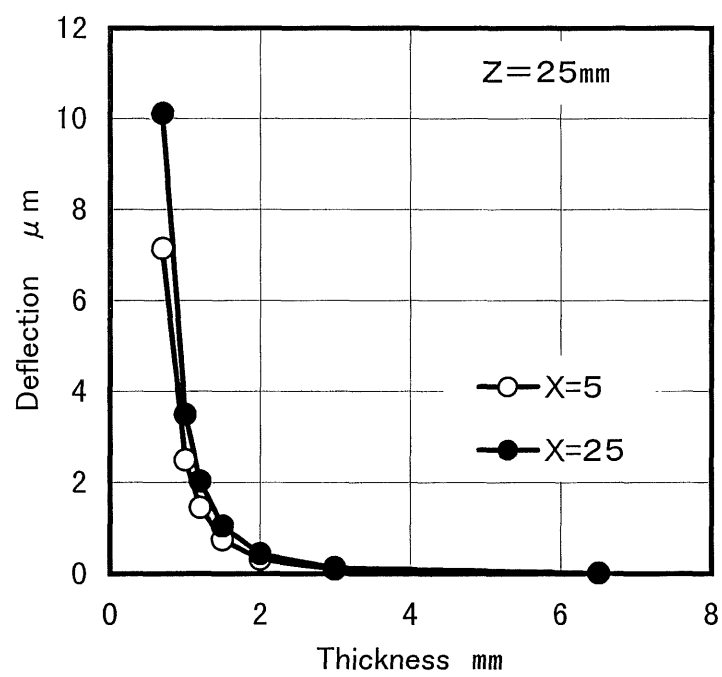


図5. 13  $Z=25\text{mm}$ における変形量の比較

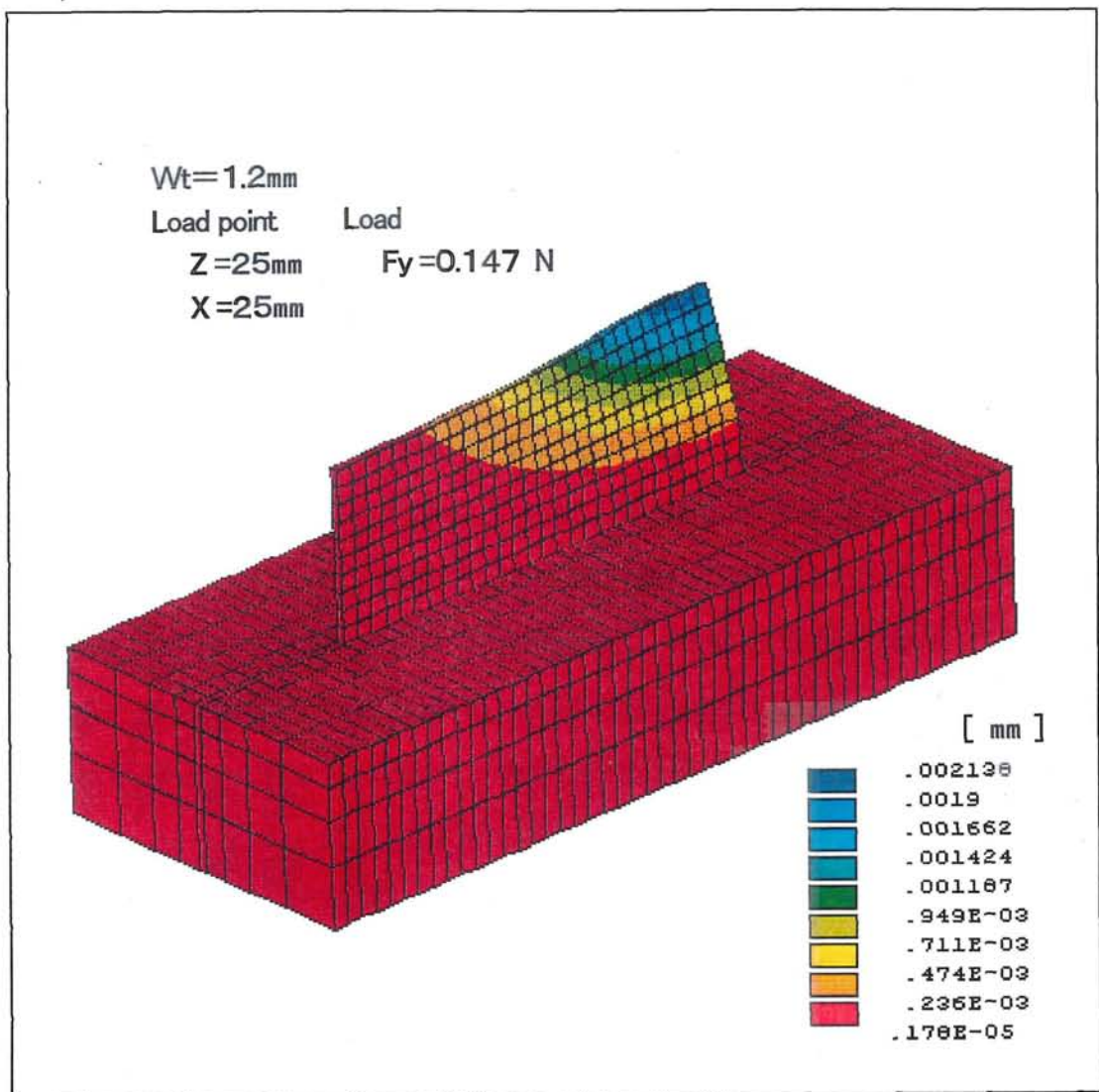


図 5. 14 解析による工作物モデルの節点変位  
 (測定力による変形解析)

## 5. 2 加工誤差

### 5. 2. 1 通常加工法による加工誤差

図 5. 1 5 は通常加工法によって側面加工を行った時の壁厚と加工面の軸方向の表面粗さ  $R_y$  の関係を示しており，図 5. 1 6 は壁厚  $W_t=6.0$  および  $W_t=3.8$  mm の側面加工を行った場合の軸方向の粗さ曲線である．工具は刃長 28 mm の工具 A を用い，半径方向切込み  $Y_w=0.05$  mm，軸方向切込み  $Z_w=25.0$  mm，一刃あたりの送り  $S_z=0.05$  mm/tooth で加工を行った．工具の取り付け状態および切れ味，機械の状態などによって多少の差はあるが壁厚が約 4 mm 以上においては軸方向の表面粗さは  $1.0\ \mu\text{m}$  近傍を推移しており，びびりも発生せずに比較的良好な加工面が得られる．しかし，壁厚が約 4 mm を境に加工面にびびりが発生してしまい，そのために軸方向の表面粗さ  $R_y$  の値も急激に増加している．従って，この条件で壁形状を通常加工法によって加工する場合，壁厚約 4 mm が限界ということになる．境界となる壁厚 4 mm を図 5. 1 5 中に破線で示した．なお，同じ壁厚における値が複数存在するのは，同一切削条件で加工を行った場合においても，工具の取り付け状態，機械および工作物などの状態の違いによって，びびりを発生した加工面に差あったためである．壁厚が  $W_t=4$  mm 以下になると図 5. 1 6 (b) に示したようにびびりの発生によって，周期的な波の形をした粗さ曲線となり，加工面の状態によっては  $R_y=10\ \mu\text{m}$  以上になることもある．繰り返し段加工における前加工面は，通常加工法によって上記の切削条件で加工を行った．しかし，壁厚  $W_t=4$  mm 以下の前加工面が必要な場合，通常加工法ではびびりが発生してしまうため，壁厚  $W_t=4$  mm までは通常加工法によって加工し，その後，繰り返し段加工法を用いて前加工面を生成した．

図 5. 1 7 は工具 A を用いた通常加工法によって壁厚 6.5 mm の表面，裏面の両面を加工した場合の加工誤差を示している．(a) 図は  $X=-$

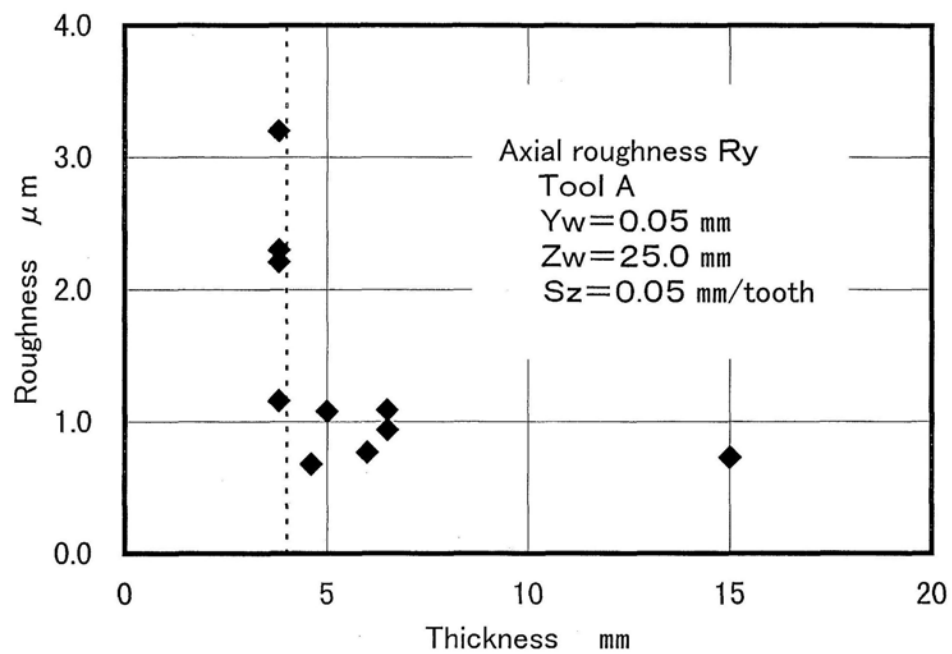
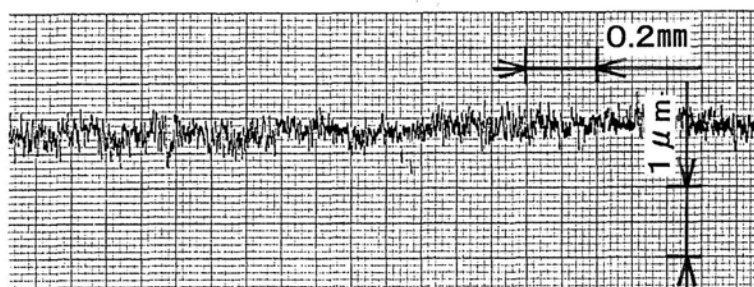
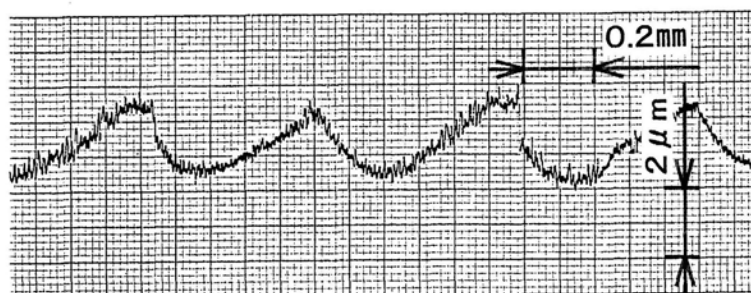


図5.15 通常加工法による壁厚と軸方向粗さの関係

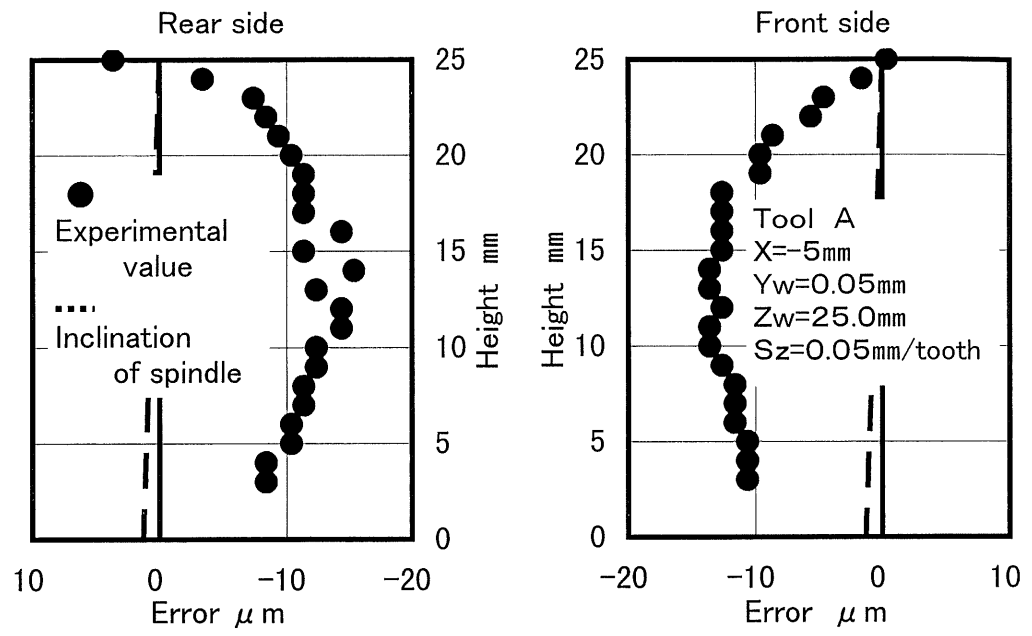


(a)  $W_t = 6.0 \text{ mm}$

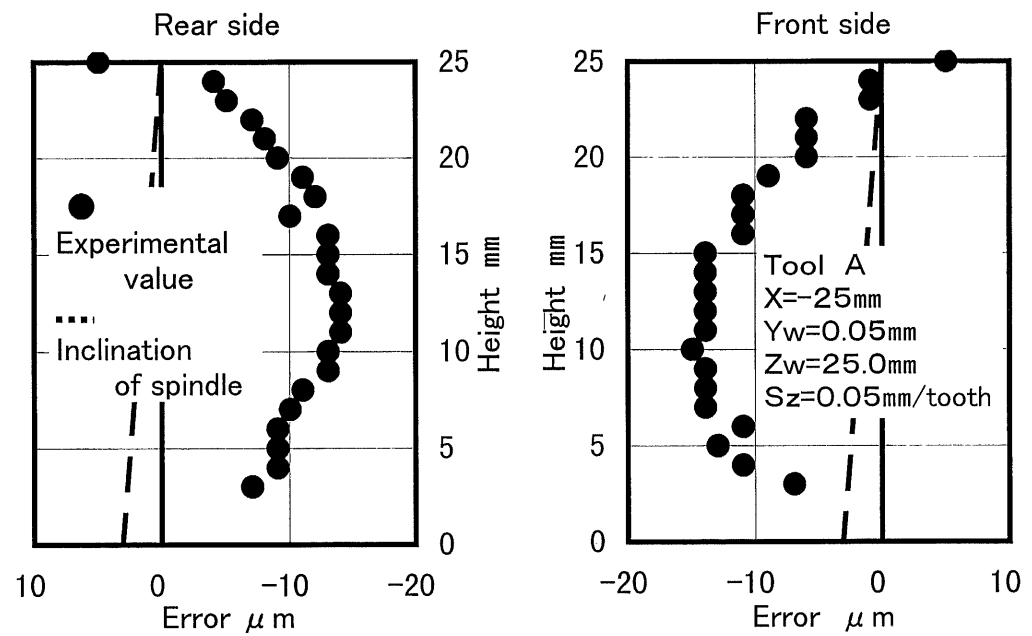


(b)  $W_t = 3.8 \text{ mm}$

図5.16 通常加工法による軸方向粗さ曲線



(a)  $X = -5\text{mm}$



(b)  $X = -25\text{mm}$

図5. 17 通常加工法による加工誤差 ( $W_t=6.5\text{mm}$ )

5 mm の位置，(b) 図は  $X = -2.5$  mm の位置における値であり，右側に表面，左側に裏面の加工誤差を示している．それぞれの図において，外側に正の加工誤差，内側に負の加工誤差を示している．なお，ここに示した加工誤差の値は，各加工面の平均値の中心位置と実工具径を考慮した実際の指令値の中心位置を一致させたときの加工面と指令値との差を示したものである．従って，今後説明に用いる誤差および加工誤差という言葉は寸法誤差を指す．図より壁上面付近では数  $\mu\text{m}$  の削り残しとなっているが，これは測定時に最上面のバリの部分を測定してしまった可能性が考えられる．加工面の壁高さ方向ほぼ全域にわたって削り過ぎを表す負の加工誤差となっており，中央部付近で最小の加工誤差を示し，上面および下面側ほど誤差の大きさは小さくなる傾向がある．これは振れ回りを含めた工具の偏心による影響であると考えられる<sup>3)</sup>．使用した工具は呼び径 10 mm，2 枚刃であるため，1 枚の切れ刃が壁高さ  $Z = 0$  mm で加工を開始した場合，加工高さが  $Z = 27.2$  mm に達した時点でもう 1 枚の切れ刃が加工を開始する．この点を考慮すると，図 5. 17 に示した鼓形の加工誤差は正弦波の半周期に近い形状であるといえる．

(a) 図に示した  $X = -5$  mm の位置における最小値を比較すると，表面は壁高さ  $Z = 1.4$  mm で  $-1.5 \mu\text{m}$ ，裏面は壁高さ  $Z = 1.3$  および  $1.4$  mm で  $-1.4 \mu\text{m}$  となり，ほぼ同じ壁高さで最小値を示している．また，加工誤差の最大値と最小値の差による形状誤差は表面で  $1.4 \mu\text{m}$ ，裏面で  $1.9 \mu\text{m}$  である．表面よりも裏面で多少大きくなっているが，これは壁高さ  $Z = 2.5$  mm における値の差が影響しているといえる．また，誤差の平均値による寸法誤差は  $10.3 \mu\text{m}$  であり，これは工具の振れ回りによる影響が含まれていると考えられる<sup>4)</sup>．

(b) 図に示した  $X = -2.5$  mm の位置における加工誤差も (a) 図に示した  $X = -5$  mm の加工誤差と傾向はほぼ同じであり，壁厚  $W_t = 6.5$  mm においては加工位置による加工誤差の違いは見られない．加工誤差の最小

値を比較すると，表面は壁高さ  $Z=10\text{ mm}$  で  $-15\text{ }\mu\text{ m}$ ，裏面は壁高さ  $Z=11$  ないし  $13\text{ mm}$  で  $-14\text{ }\mu\text{ m}$  となり，(a) 図よりも多少低い高さで最小値となっているが，両面ともほぼ同じ壁高さで最小値を示している．また，形状誤差は表面で  $20\text{ }\mu\text{ m}$ ，裏面で  $19\text{ }\mu\text{ m}$ ，寸法誤差はそれぞれ  $9.8\text{ }\mu\text{ m}$  である．

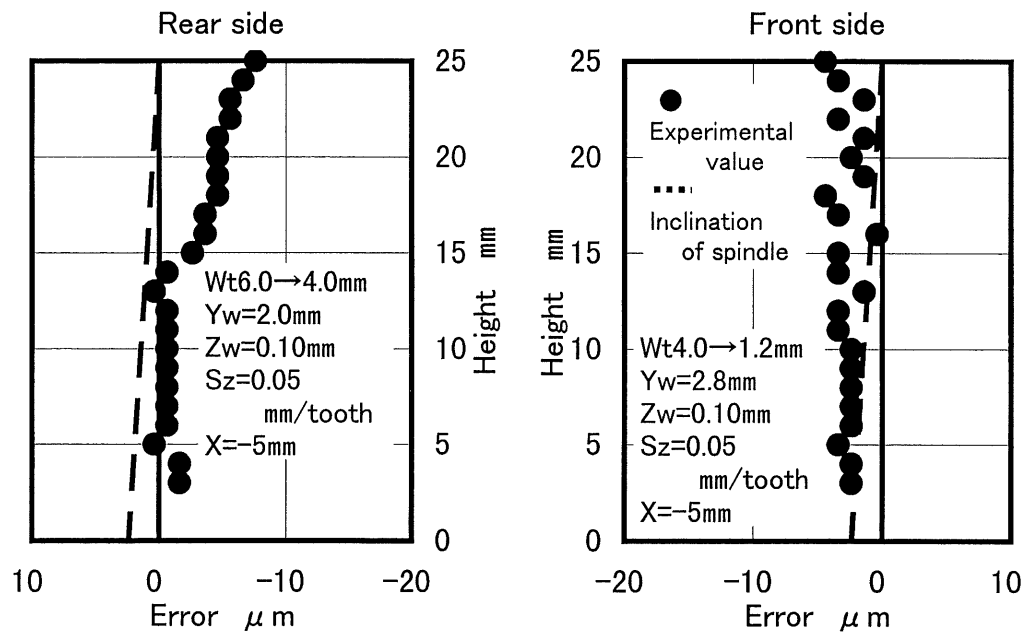
通常加工において工作物が切削力によって変形したとすれば，下面側よりも上面側で削り残す傾向になり，さらに中央部よりも剛性の低い端部側ほどその傾向は大きくなる．上面側で多少削り残しの誤差となっているが，これは先に述べたように工具の振れ回りを含めた偏心の影響である．このように (a) 図 (b) 図の加工誤差ともほぼ同様の傾向を示していることから，通常加工法による壁厚  $W_t=6.5\text{ mm}$  の壁加工においては工作物の変形は無視できるといえる．

また，表面，裏面の結果を見比べると (a) 図 (b) 図どちらの加工誤差の値とも，上面側が多少表面側に傾いている傾向がある．各壁高さごと表面，裏面の加工誤差の平均値を求め，その傾きを最小二乗法によって算出し，各面に対して壁高さ  $Z=25\text{ mm}$  を始点として破線で図 5.17 中に併記した．この傾きは使用した工作機械の主軸の傾きであると考えられ，工具の偏心および振れなどその他の要因が全くないとすれば，理論的にはこの破線で示した加工面が得られることになる．主軸の傾きによる  $Z=25\text{ mm}$  と  $Z=0\text{ mm}$  における加工位置の違いは  $X=-5\text{ mm}$  で  $1.3\text{ }\mu\text{ m}$ ， $X=-25\text{ mm}$  で  $3.1\text{ }\mu\text{ m}$  である．この値は実験時における工具の取り付け状態および機械の状態によって多少の違いはあるが，上面側が表側に傾いているという点では一致している．

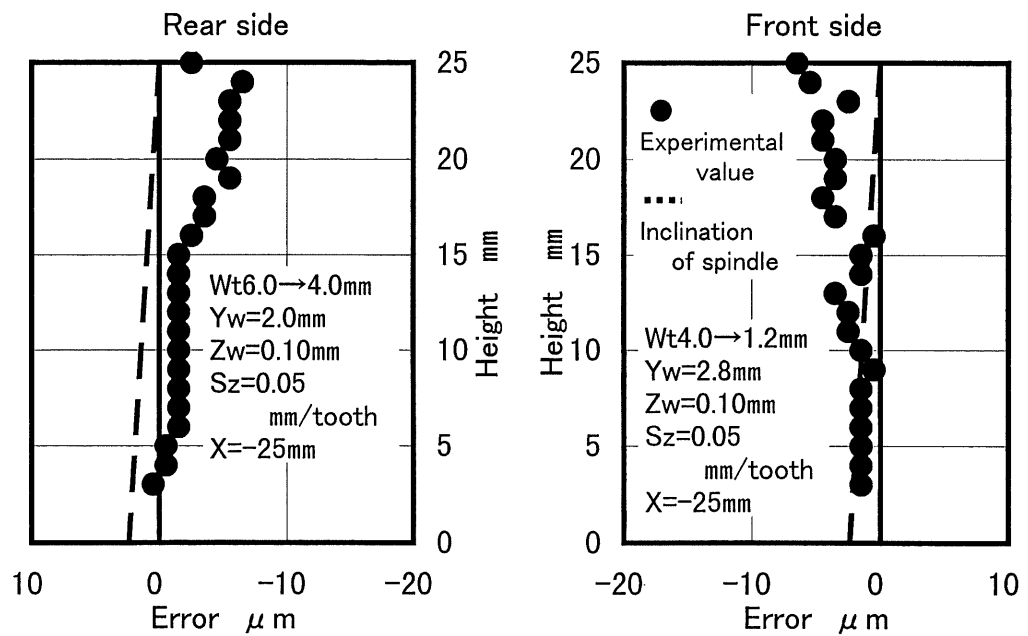
### 5. 2. 2 繰り返し段加工による加工誤差

図 5. 1 8 および図 5. 1 9 は前加工において壁厚  $W_t=6.0\text{ mm}$  とした工作物の裏面を，繰り返し段加工により壁厚  $W_t=4.0\text{ mm}$  に加工し，その後，表面を繰り返し段加工で壁厚  $W_t=1.2\text{ mm}$  に加工した場合の加工誤差を示している．右側に表面，左側に裏面の加工誤差を示し，それぞれ外側に正の誤差，内側に負の誤差を示している．ここに示した誤差は指令値からの誤差ではなく，指令した壁厚に対して実際の各加工面の平均値が表面，裏面で等しいものとした場合の誤差の値である．繰り返し段加工において，同一の工作物上で 2 種類の軸方向切込みの加工を行っており，図 5. 1 8 は軸方向切込み  $Z_w=0.10\text{ mm}$ ，図 5. 1 9 は軸方向切込み  $Z_w=0.05\text{ mm}$  による加工の結果を示している．これらの図より壁高さ方向のほぼ全域で削り過ぎを示す負の加工誤差となっていることがわかる．つまり，指令した壁厚に対し加工された壁厚は小さくなっており，各加工位置における片面での誤差の平均値は図 5. 1 8 (a) で  $-2.7\text{ }\mu\text{m}$ ，同図 (b) で  $-2.7\text{ }\mu\text{m}$ ，図 5. 1 9 (a) で  $-2.8\text{ }\mu\text{m}$ ，同図 (b) で  $-4.8\text{ }\mu\text{m}$  である．軸方向の切込みおよび加工位置に関わらず上面側ほど削り過ぎの傾向は大きくなっている．これは 5. 1 節で述べたように，測定時における工作物の変形が上面側ほど大きくなったためと考えられる．しかし，プローブの測定圧による変形の影響としてこの誤差は大きすぎるため，他の要因が考えられる．図 5. 1 8 および図 5. 1 9 のいずれにおいても上面側の誤差が (a) 図に示した  $X=-5\text{ mm}$  の値に比べ (b) 図に示した  $X=-2.5\text{ mm}$  で多少大きくなっている傾向がある．これは工作物の剛性の違いによって測定時の変形量も異なるためである．通常の加工法においては切削力により工作物に変形するため，加工後には工作物の上面側および剛性の低い加工位置ほど削り残しの加工誤差が大きくなる傾向があるが，ここではそのような結果にはなっていない．従って繰り返し段加工による薄壁の加工



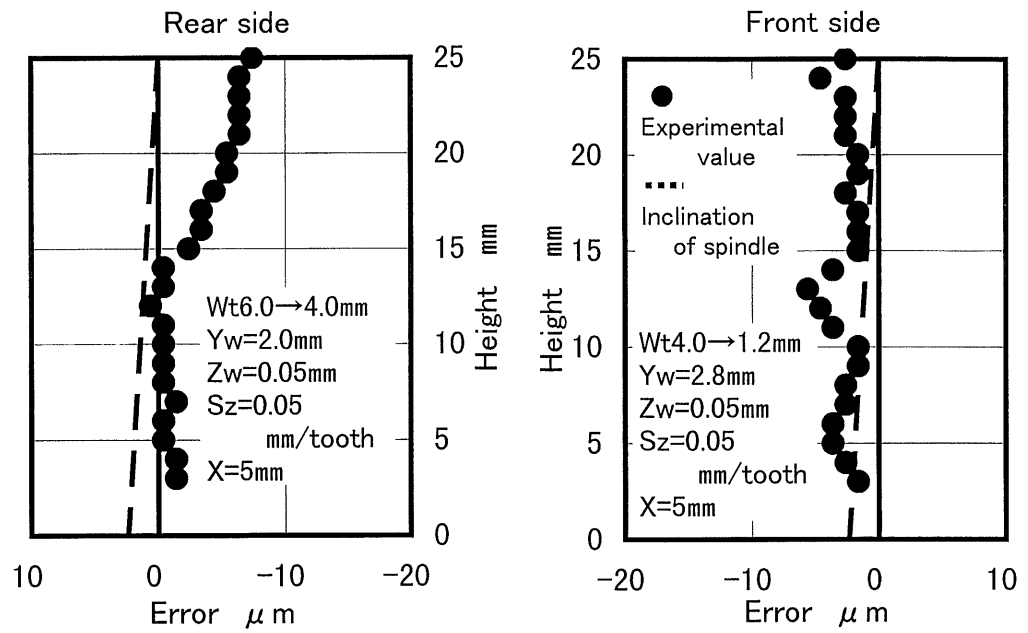


(a)  $X = -5mm$

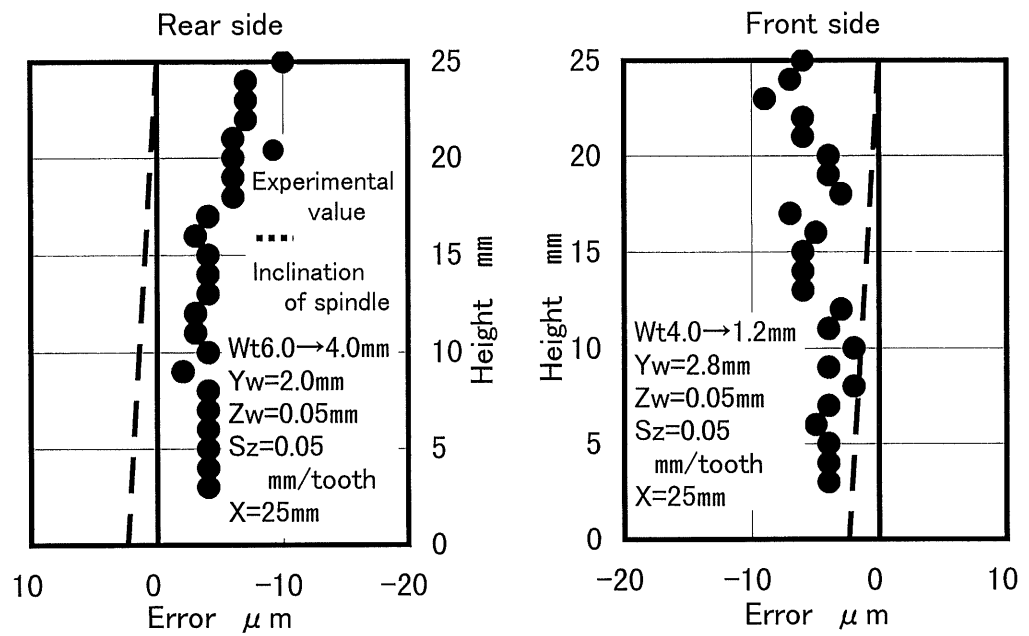


(b)  $X = -25mm$

図5. 18 繰り返し段加工による壁厚 $Wt = 1.2mm$ の加工誤差  
( $Zw = 0.10mm$ )



(a)  $X=5\text{mm}$



(b)  $X=25\text{mm}$

図5. 19 繰り返し段加工による壁厚  $W_t = 1.2\text{mm}$  の加工誤差  
(  $Z_w = 0.05\text{mm}$  )

においては、切削力による影響は受けていないと考えられる。誤差の最大値と最小値の差である形状誤差の値を表 5. 2 に示す。

表 5. 2 繰り返し段加工法による形状誤差

Axial depth of cut Zw [mm]	X position [mm]	Shape error[ $\mu$ m]	
		Rear side	Front side
0.10	X=-5	8.0	4.0
	X=-25	7.0	6.0
0.05	X=5	8.0	4.0
	X=25	8.0	7.0

いずれにおいても表面よりも裏面での値が大きくなっている。これは使用した工作機械の主軸の傾きに加え、加工時間の経過に伴って加工位置が表面側に移動したことによる影響であると考えられる。この点については後で述べる。なお、図 5. 18 および図 5. 19 中には加工時における主軸の傾きと考えられる値を破線で示した。これは各加工面における誤差について、壁高さごとの平均値の回帰線を最小二乗法で求め、その値を加工時の傾きとして Z=25 mm の位置を基準として示したものである。図 5. 19 (b) に示した誤差は壁高さ方向全域にわたって大きくなっているが、図 5. 18 に示した軸方向切込み Zw=0.10 mm の結果と図 5. 19 に示した軸方向切込み Zw=0.05 mm の結果を比べてみても全体的な傾向は一致しており、軸方向切込みの大きさの違いによる加工誤差への影響はないといえる。同程度の加工面が得られる加工であれば、より効率の良い軸方向切込み Zw=0.10 mm での加工の方が望ましい加工であるといえる。今後は軸方向切込み Zw=0.10 mm による中央部付近での位置、すなわち X=-5 mm における加工誤差について述べることにする。

図 5. 20 および図 5. 21 は図 5. 18 および図 5. 19 と裏面の

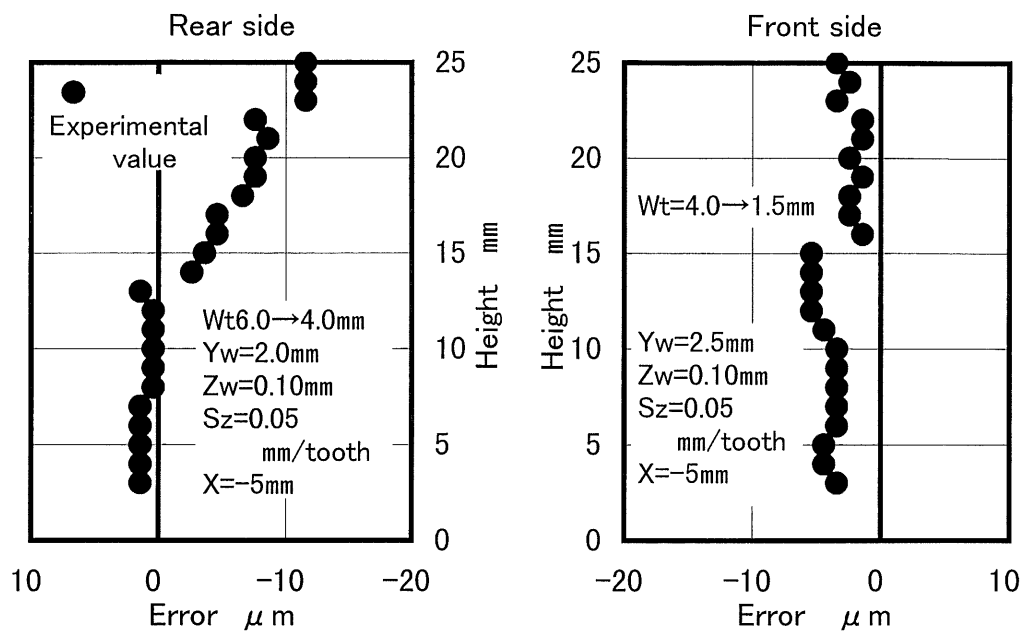


図5. 20 繰り返し段加工による壁厚 $W_t = 1.5\text{mm}$ の加工誤差

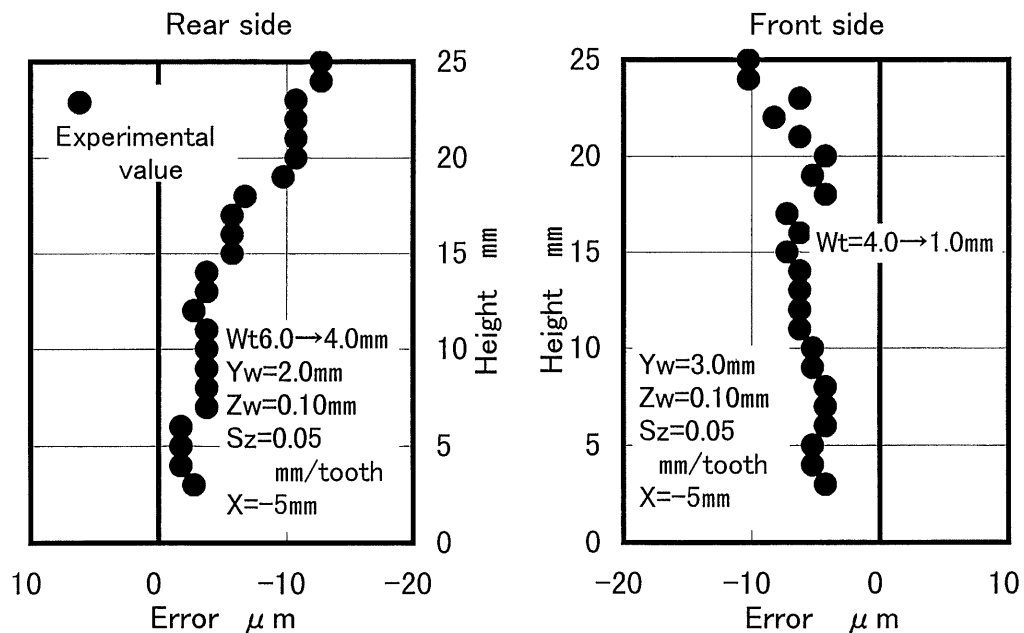
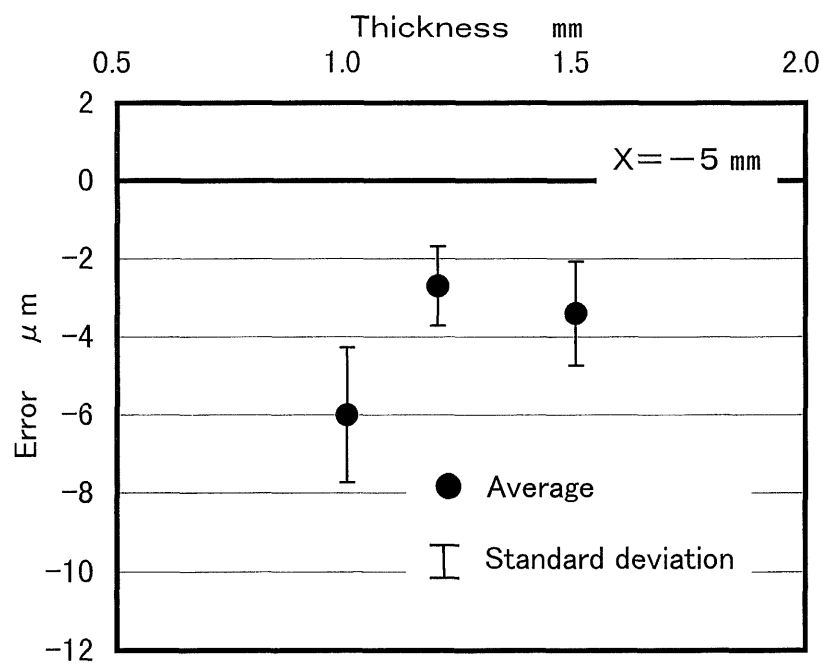


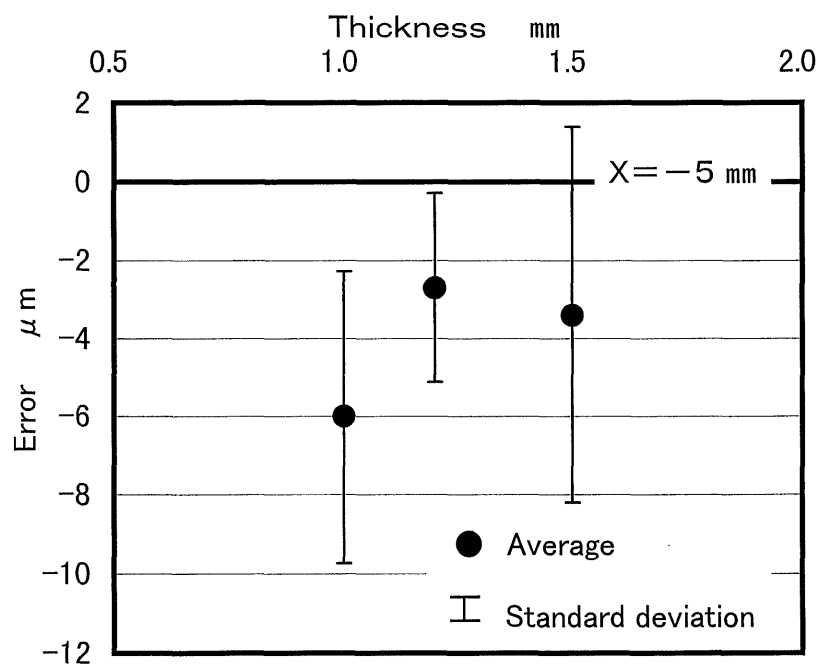
図5. 21 繰り返し段加工による壁厚 $W_t = 1.0\text{mm}$ の加工誤差

加工は同様であり，表面の加工において壁厚  $W_t=1.5$  および  $1.0$  mm とした場合の軸方向切込み  $Z_w=0.10$  mm による  $X=-5$  mm の結果である．すなわち，裏面はいずれも壁厚  $W_t=6.0$  mm から  $W_t=4.0$  mm への同様の加工であり，表面を壁厚  $W_t=4.0$  mm から  $W_t=1.5$  mm および壁厚  $W_t=4.0$  mm から  $W_t=1.0$  mm への加工を行った結果である．図 5. 20 に示した壁厚  $W_t=1.5$  mm の結果に比べ図 5. 21 に示した壁厚  $W_t=1.0$  mm の結果は削り過ぎを表す負の誤差が大きくなっている．図 5. 22 は図 5. 18 (a) に示した壁厚  $W_t=1.2$  mm の結果も含めて，壁厚に対する誤差の平均値および標準偏差の値を示したものであり，この図からも壁厚  $W_t=1.0$  mm における負の誤差が大きいことがわかる．(b) 図に示した裏面における標準偏差の値が，(a) 図に示した表面の値に比べて大きくなっているのは，表面に比べて，裏面の加工誤差が上面側で大きくなっているためである．誤差が全体的に加工面の上面側ほど表面側に傾いていることは主軸の傾きおよび後述する加工時間に伴う切削位置の移動によって説明ができる．しかし，壁厚が薄くなるほど負の誤差の値が大きくなる点については，切削力による工作物の変形と結びつけることはできない．従って，繰り返し段加工による薄壁加工では，通常加工の場合に起こるような切削力による工作物の変形は生じていないと考えられる．

図 5. 23 ないし図 5. 25 は裏面，表面ともに半径方向切込みの大きさを  $Y_w=2.5$  mm 一定として壁厚  $W_t=1.5$ ， $1.2$  および  $1.0$  mm の壁加工を繰り返し段加工法によって行った場合の結果である．これらの図においても壁高さ方向のほぼ全域にわたって負の誤差となっている．半径方向の切込み  $Y_w$  が等しいため，各加工面の切削において加工条件も等しくなるが，誤差の値で比較すると壁厚  $W_t$  が小さいほど誤差の値は大きくなっている．図 5. 26 に壁厚に対する誤差の平均値および標準偏差の値を示す．誤差の平均値はそれぞれ  $-3.7 \mu\text{m}$ ， $-5.0 \mu\text{m}$  お



(a) 表面



(b) 裏面

図5.22 加工誤差の平均値と標準偏差

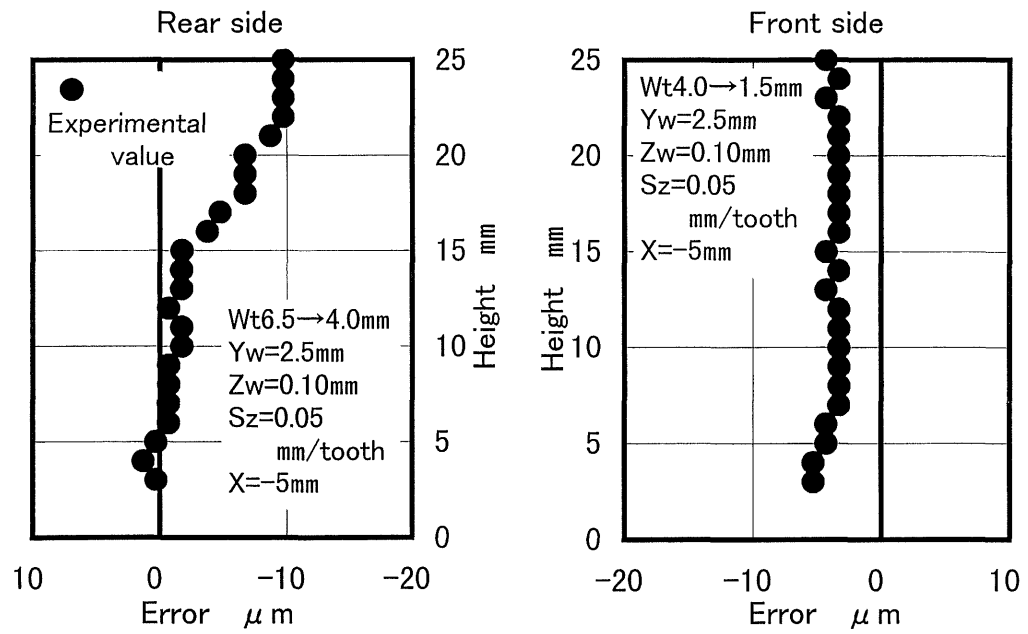


図5. 23 繰り返し段加工による壁厚 $W_t=1.5\text{mm}$ の加工誤差

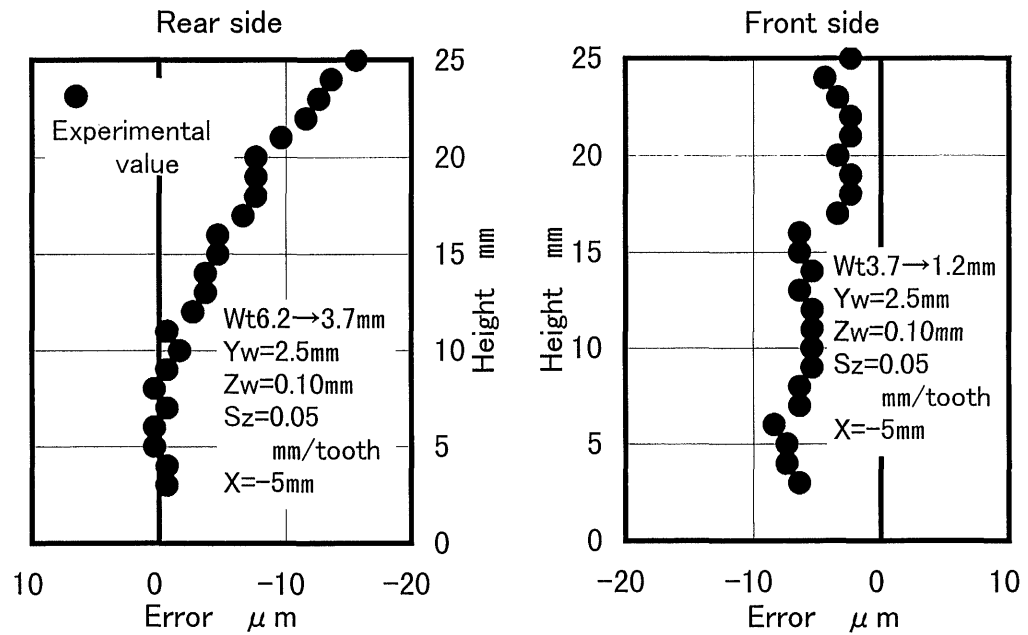


図5. 24 繰り返し段加工による壁厚 $W_t=1.2\text{mm}$ の加工誤差

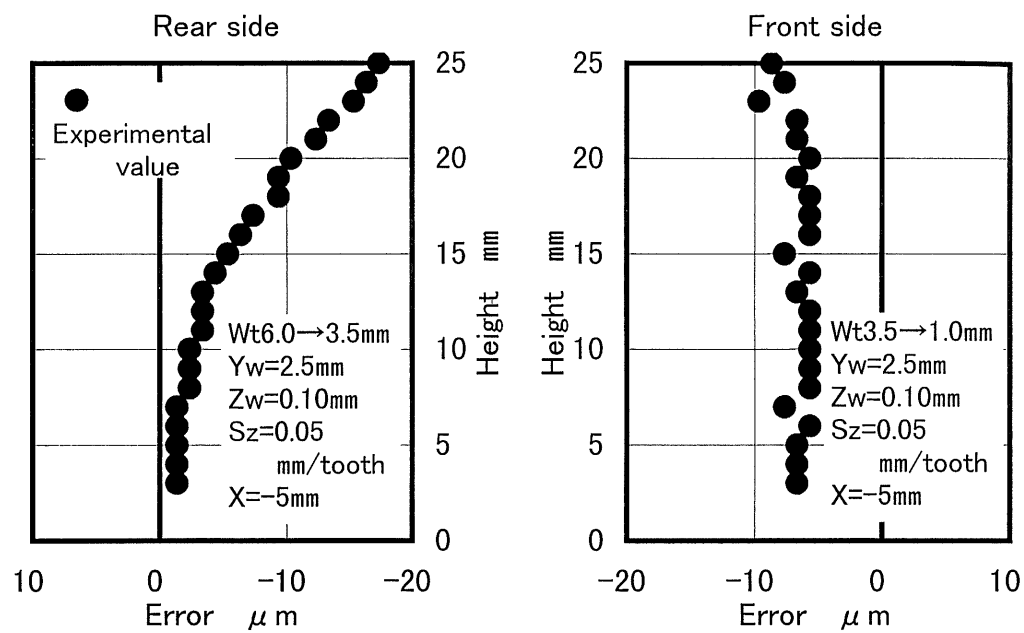
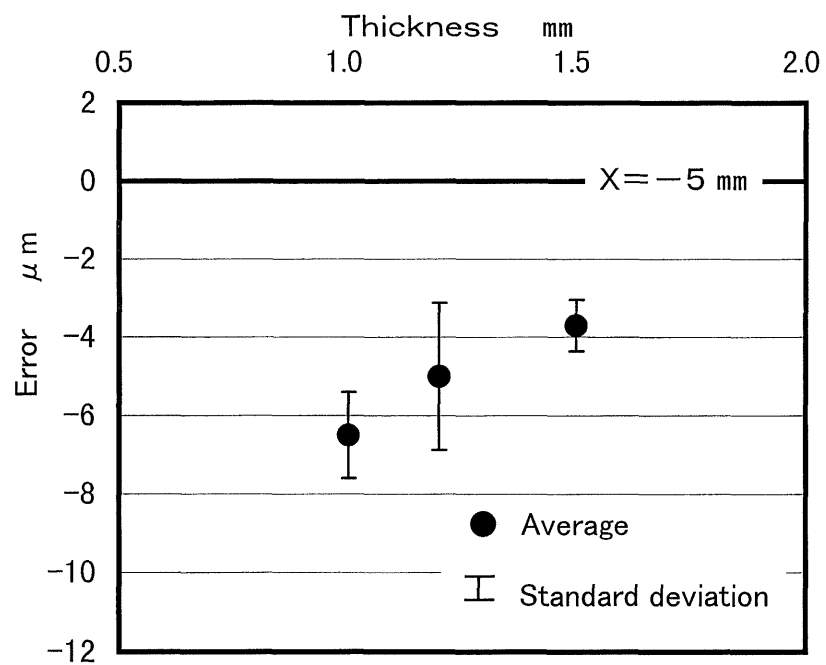
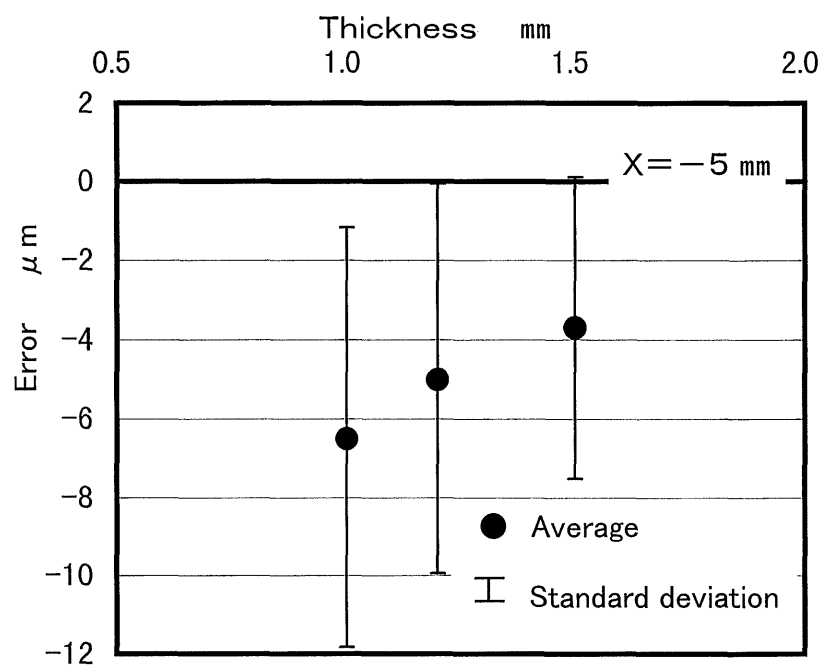


図5. 25 繰り返し段加工による壁厚 $W_t = 1.0\text{ mm}$ の加工誤差





(a) 表面



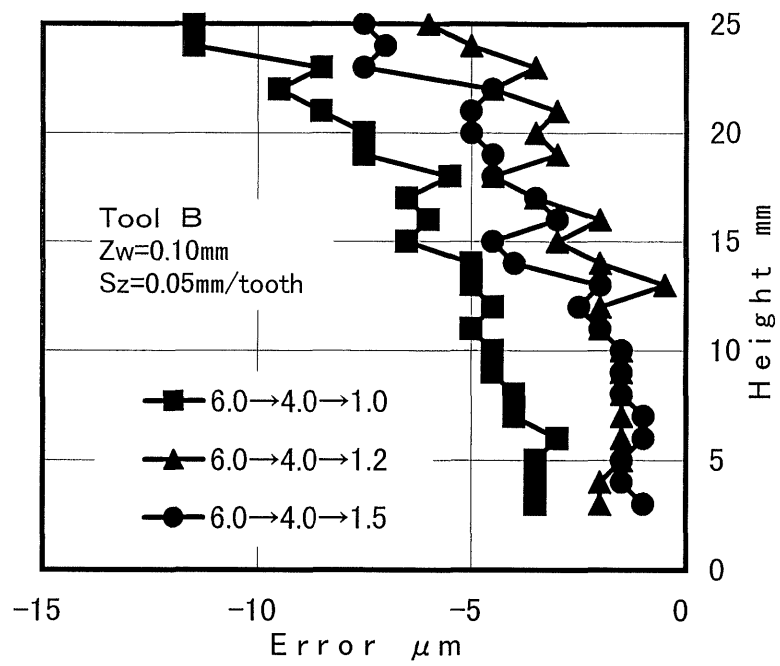
(b) 裏面

図5. 26 加工誤差の平均値と標準偏差

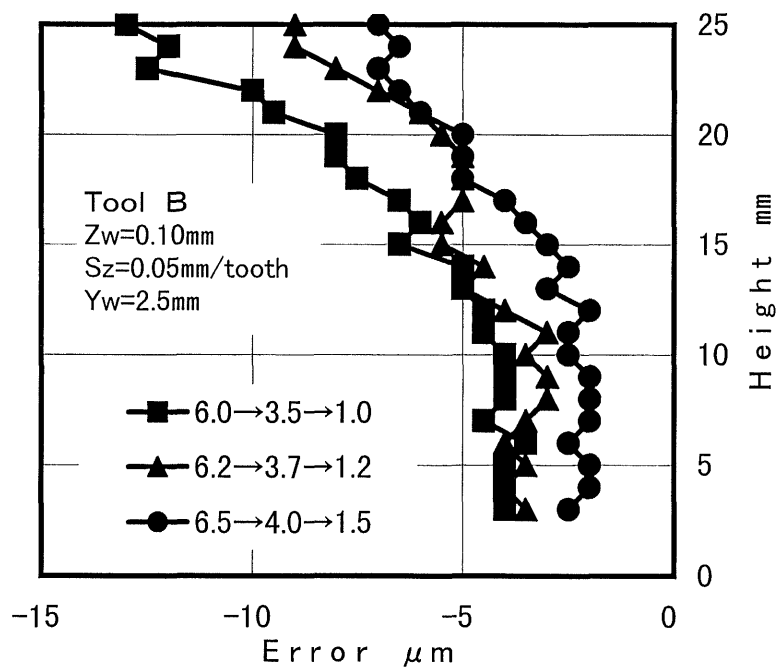
よび  $-6.5 \mu\text{m}$  であり，壁厚の減少により正の誤差が増加するのではなく，逆に負の誤差が増加している．切削条件が等しいにもか関わらずこのような結果となることから，繰り返し段加工において工作物の剛性の違いが何らかの影響を及ぼしていることになる．図 5. 26 (b) に示した裏面における標準偏差が表面に比べ大きいのは，図 5. 22 と同様に裏面の上面側での加工誤差が大きいことによるものである．また，先に示した図 5. 18 ないし図 5. 21 における加工と比較すると工具の取り付け状態および機械の状態（加工日の違い，運転開始からの経過時間等）が異なるため，加工面の傾き具合も異なっていると考えられる．

図 5. 27 は指令厚さと加工厚さの差を  $1/2$  の値で示したものである．この図は加工面の傾きなどは無視した状態ではあるが，壁高さごとの指令厚さに対する加工された工作物の厚さの誤差を示している．

(a) 図は加工前厚さ一定の場合，(b) 図は半径方向切込み一定の場合である．(a) 図に示した壁厚  $W_t=1.2 \text{ mm}$  および  $1.5 \text{ mm}$  の結果については反転しているが，(a) 図，(b) 図ともに上面では加工する壁厚が小さいほど削り過ぎる傾向を示していることがわかる．多少のばらつきはあるものの，工具および機械の状態が同一の場合，異なる切削条件においても比較的下面側における誤差はほぼ等しくなっている．加工時に工作物が何らかの影響を受けて変形をしていたと仮定しても，下面側でその影響は小さくなる．後述するが，使用した工作機械において，加工位置が時間の経過に伴い熱変形によって表面側に移動するという傾向があった．そのため，加工後には設定した加工厚さに加えその移動量の分だけ壁厚が厚くなるが，実際は工具の振れ回り等により，結果的には削り過ぎとなっていると考えられる．従って，図 5. 27 に示した誤差の値は熱変形による誤差と工具の振れ回り等による誤差を含めた値であると考えることができる．ただし，後にこの誤差を扱う場合，比較的安定していると考えられる壁高さ  $Z=7 \text{ mm}$  以下における誤差の値を用いる



(a) 加工前厚さ一定の場合



(b) 半径方向切込み一定の場合

図5. 27 指令厚に対する加工誤差

ことにする．壁高さ  $Z=7\text{ mm}$  以下における各壁厚についての誤差の平均値を表 5. 3 に示す．

表 5. 3 指令厚さに対する誤差の平均値 ( $Z=7\text{ mm}$  以下)

Thickness of wall [mm]	Error [ $\mu\text{ m}$ ]
6.0 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.0	- 3.8
6.0 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.2	- 1.6
6.0 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.5	- 1.3
6.0 $\rightarrow$ 3.5 $\rightarrow$ 1.0	- 4.0
6.2 $\rightarrow$ 3.7 $\rightarrow$ 1.2	- 3.7
6.5 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.5	- 2.2

繰り返し段加工において，実際に加工面を生成するのは軸方向の切込み量  $Z_w$  すなわち刃先先端  $0.1\text{ mm}$  のみであるため，振れ回り量は壁高さに関わらず一定であると考えられる．なお，ここでいう振れ回り量には切削力による工具の変形による影響，および工具径の測定誤差等も含めた値である．

表 5. 4 は繰り返し段加工による薄壁の加工面における軸方向粗さ  $R_y$  の値を示している．なお，軸方向切込み  $Z_w=0.05\text{ mm}$  および  $Z_w=0.10\text{ mm}$  で加工した  $X=5\text{ mm}$  および  $X=-5\text{ mm}$  の位置における表面での測定結果である．この表より，加工した薄壁の厚さの違いによる明確な影響は確認できない．また，軸方向切込みの大きさによっては  $Z_w=0.05\text{ mm}$  の値よりも  $Z_w=0.10\text{ mm}$  の値がやや大きくなっている．さらに半径方向切込みを一定とした場合に比べ，加工前厚さを一定とした場合の値が大きくなっている．これは，加工日が異なることにより，工具の取り付け状態および機械の状態（テーブル上の加工位置，運転開始からの経過時間等）などが異なるためであると考えられる．

表 5 . 4 繰り返し段加工による加工面粗さ

Cutting condition	Thickness of wall [mm]	Axial roughness Ry[ $\mu$ m]	
		Zw=0.10 mm	Zw=0.05 mm
Wt(before cutting) const.	6.0→4.0→1.0	7 . 3 1	6 . 0 9
	6.0→4.0→1.2	5 . 1 9	6 . 2 9
	6.0→4.0→1.5	5 . 7 3	5 . 7 4
Yw const.	6.0→3.5→1.0	4 . 0 7	3 . 6 0
	6.2→3.7→1.2	2 . 6 7	2 . 3 8
	6.5→4.0→1.5	3 . 0 8	2 . 5 7

また、図 5 . 2 8 は軸方向切込み  $Zw=0.10$  mm における軸方向の粗さ曲線を示している。繰り返し段加工によって薄壁加工を行った場合の加工面は、微小な範囲で見れば粗さの値は小さいが、これらの粗さ曲線に示したように所々で大きな波がほぼ全面にわたって現れている。これは加工時に切り粉を巻き込んだもの、あるいは工作物材料中の不純物ではないかと考えられる。また、部分的ではあるが、軸方向の切込み  $Zw$  の大きさも転写されていることがわかる。なお、切削条件を決定する際に測定した粗さは  $1.0 \mu\text{m}$  以下であったのに対し、薄壁加工面の粗さが表 5 . 4 および図 5 . 2 8 に示したようになっているのは、一回一回ごとの切削においてはびびりが発生していたことが考えられる。これは加工時にびびりが発生しても、軸方向の切込みが微小であるために、加工面全体としてはびびりが発生したときのような加工面にはなっていないのではないかと考えられる。しかし、このように粗さは大きくなり、また、加工面はかすんだ面となっている。薄壁を繰り返し段加工法で行うことにより、加工可能な壁厚および誤差は向上したが、粗さの面では問題が残る。

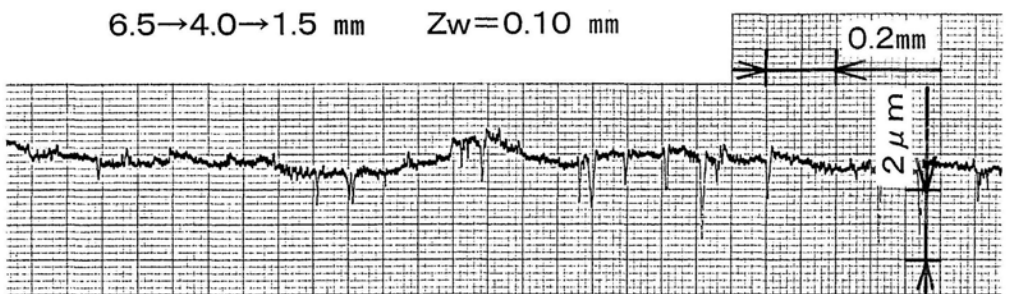
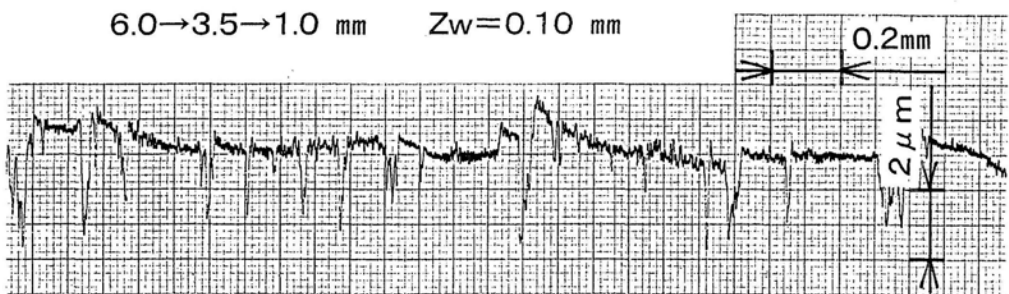
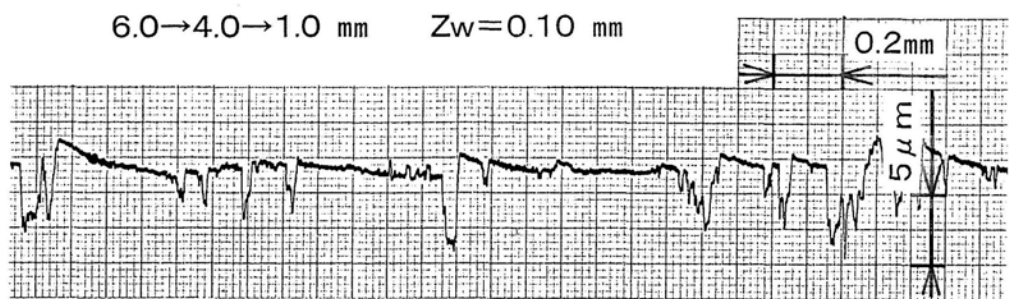
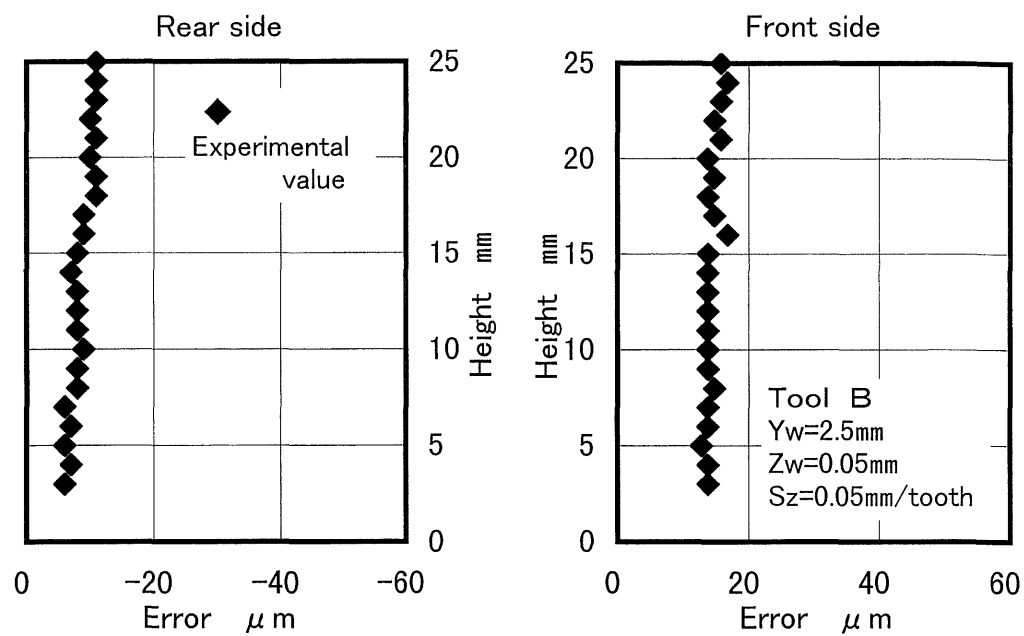


図 5.28 繰返し段加工による加工面の軸方向粗さ

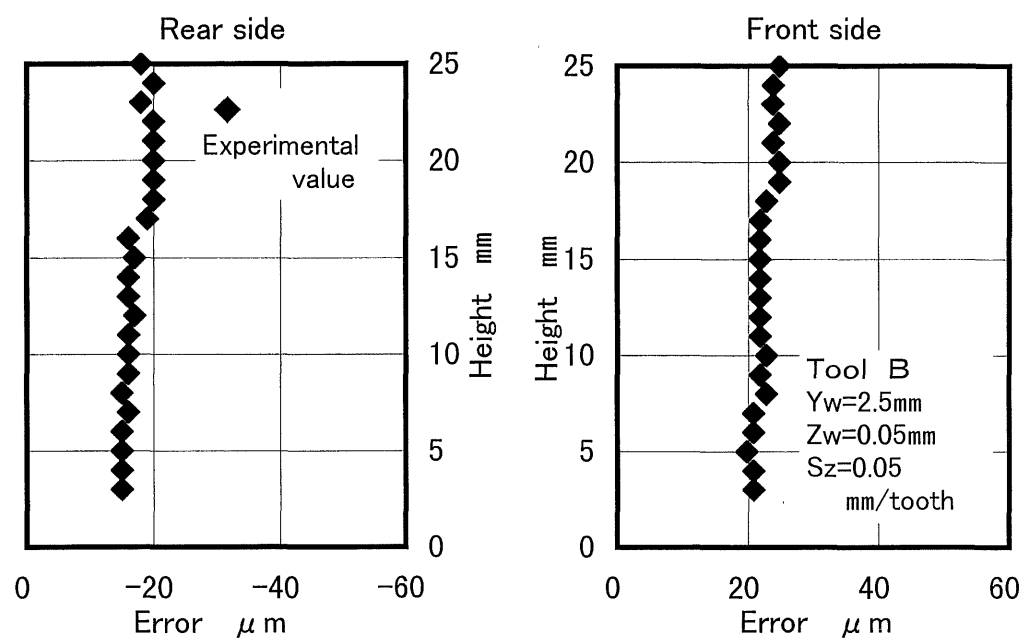
### 5. 2. 3 実験結果と予測誤差との比較

加工誤差に影響を及ぼしている要因として、主軸の傾き、工具の振れ回り、および測定時における測定力による工作物の変形などが考えられる。薄壁の繰返し段加工においては上面側で削り残しの誤差が大きくなっていることから、切削力による工作物の変形は発生していないものとする。また、使用した工作機械は時間の経過に伴い、熱の影響による変形が発生していると考えられ、熱変形の様子を確認する実験を行った。薄壁加工実験に用いた工作物の壁部分の厚さを約 3.0 mm とした工作物を用意し、加工を開始してから 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 および 3.0 時間おきに向かい合う各面を繰返し段加工によって加工した。なお、切削条件は軸方向切込み  $Z_w = 0.05 \text{ mm}$ 、半径方向切込み  $Y_w = 2.5 \text{ mm}$ 、一刃あたりの送り  $S_z = 0.05 \text{ mm/tooth}$ 、切削長さは約 1.1 mm とし、すべて同一の工作物上で実験を行った。実験は裏面、表面の順に加工を行い、次の加工を行うまでの空き時間は主軸を  $N = 30,000 \text{ min}^{-1}$  で空転させた。

図 5. 29 ないし図 5. 31 は各経過時間ごとの加工面の状態を表しており、右側は表面、左側は裏面の結果であり、各面の指令位置からの誤差を示している。ここで言う経過時間とは各面の加工開始時刻からの時間を表しており、実際には表面の加工時刻に裏面に比べ片面の加工時間に相当する 1.5 分のずれがあることになるが、各面の加工を開始した時刻を基準としたときの経過時間で示した。経過時間に関わらず裏面では削り過ぎの負の誤差、表面では削り残しの正の誤差となっている。経過時間に伴い誤差の量は増大しており、これは次第に加工位置が表面側（機械の手前側）に移動していることを意味する。これらの加工誤差においても主軸の傾きの影響は確認できる。図 5. 29 ないし図 5. 31 の誤差の平均値と経過時間の関係を図 5. 32 に示す。ここでは表面の加工が裏面の加工の 1.5 分後に行われていることも考慮している。この図より測定範囲内ではほぼ線形になっていることがわかり、最小二乗法によって求めるとその変化量は  $-14.15 \text{ } \mu\text{m/h}$  である。測定値と



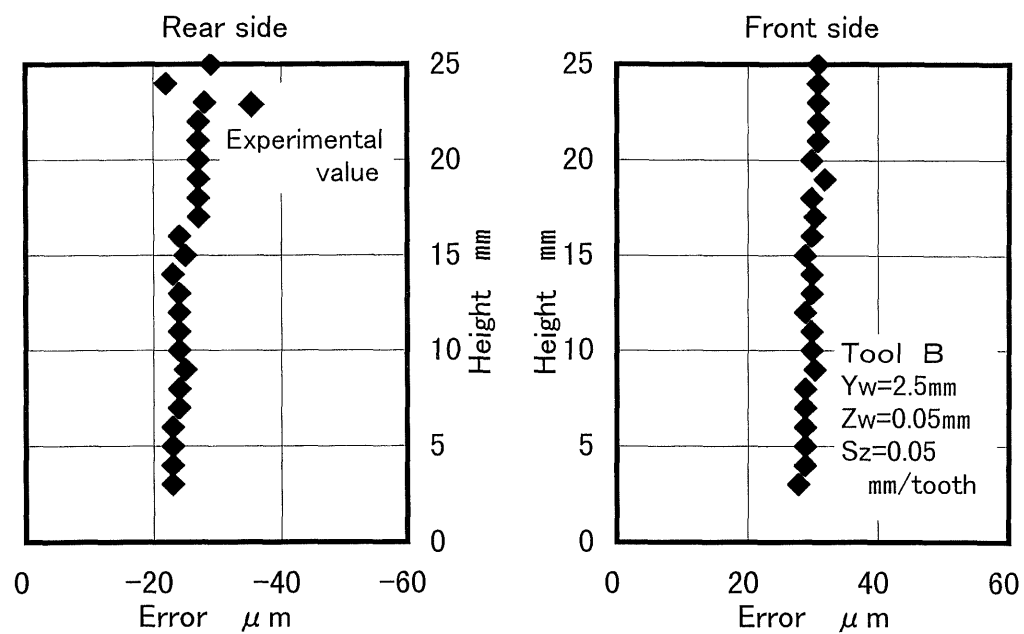
(a) 0.5時間後



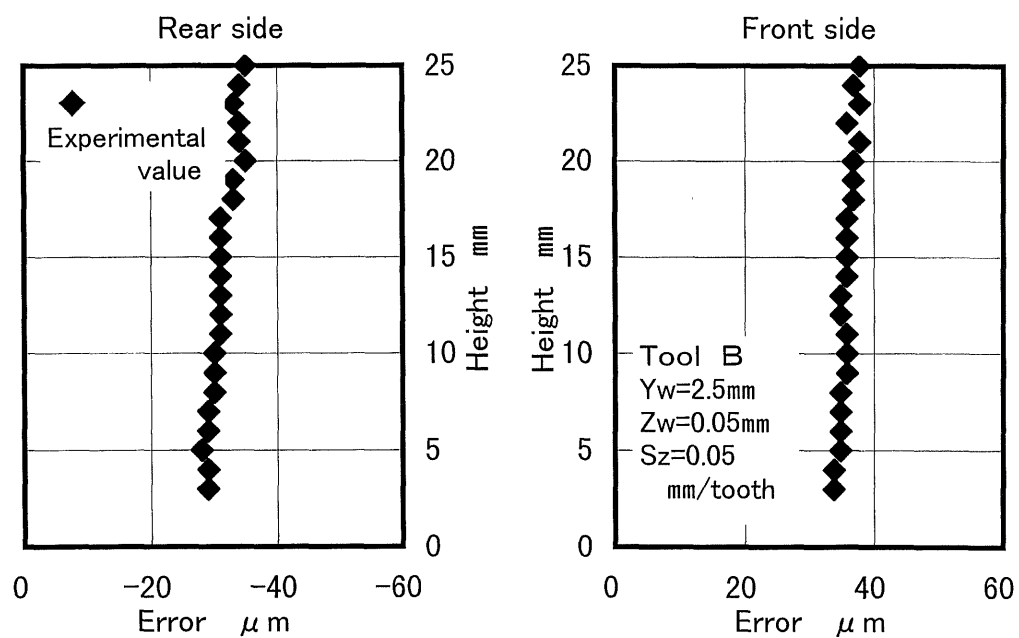
(b) 1.0時間後

図5.29 経過時間による加工誤差





(a) 1. 5時間後



(b) 2. 0時間後

図5. 30 経過時間による加工誤差

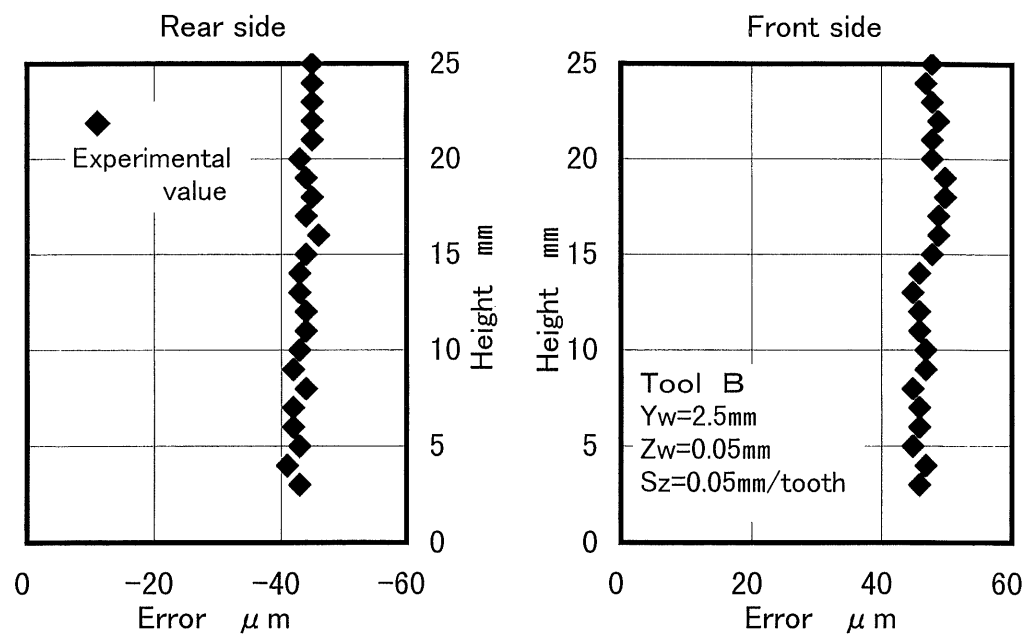


図5. 31 経過時間による加工誤差(3. 0時間後)

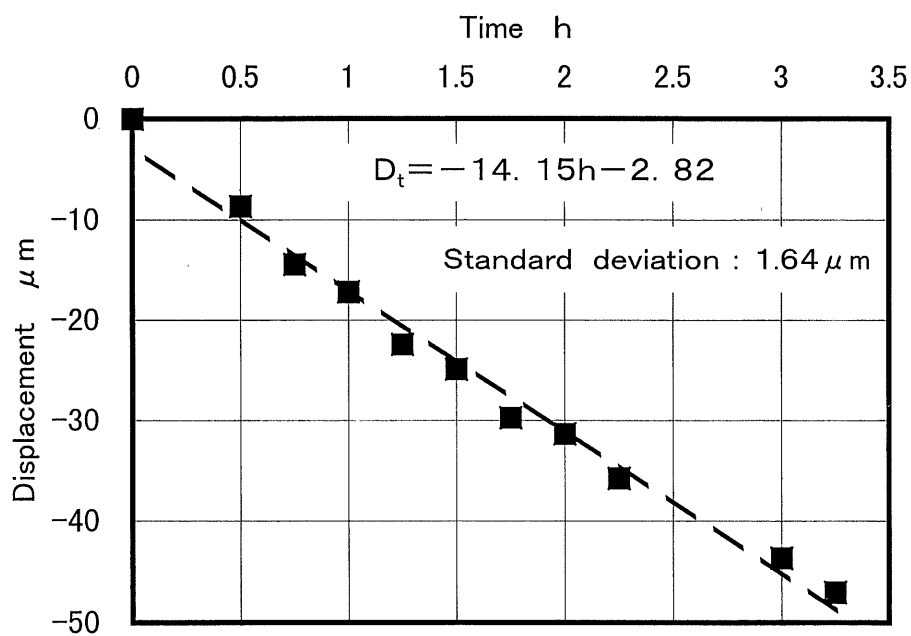


図5. 32 経過時間と変位量の関係

回帰直線との誤差の平均は  $1.36 \mu\text{m}$ ，標準偏差は  $1.64 \mu\text{m}$  と小さく，今後，熱変形による影響を検討する場合，この値を用いることにする．何時間でこの変形量が飽和するかは不明だが，本研究における加工はこの時間内で収まるものであるため，図 5. 32 に示した測定にとどめた．なお，工作機械における切削位置が Y 軸の負の方向に移動しているという意味で変位量も負の値で示した．

繰り返し段加工による薄壁形状の加工面の誤差要因は，先に述べたように次の 5 つに分類できる．すなわち，E1：主軸の傾きによる誤差，E2：工具による誤差，E3：熱変形による誤差，E4：切削力による誤差（工作物の変形），E5：測定圧による誤差である．

ここでまず，E2 の工具による誤差について考えてみる．先にも述べたが，図 5. 27 に示した指令厚に対する誤差の値には工具の振れ回りによる誤差だけでなく，熱変形による誤差も含んでいる．実験の手順上，裏面と表面の加工には 80 分の差があり，このため，加工面の下面近傍における加工時刻にも同様に 80 分の時間差がある．熱変位は  $-14.15 \mu\text{m/h}$  であるので，この 80 分間に  $-18.87 \mu\text{m}$  の加工位置の移動があったと考えられる．ここで図 5. 27 に示した指令厚さに対する誤差を  $E_o$  とすると，工具の振れ回り等による誤差  $E_t$  は (5. 1) 式のように表すことができる．

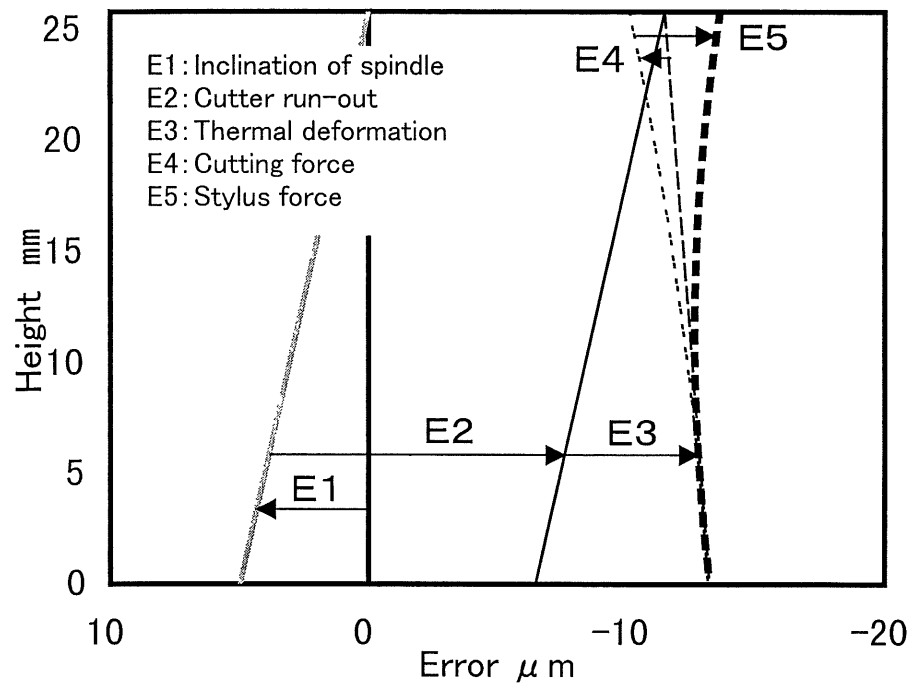
$$\begin{aligned} E_t &= -(2E_o + 18.87)/2 \quad \cdots \cdots \cdots (5. 1) \\ &= -(E_o + 9.44) \end{aligned}$$

なお，この計算を行う場合の指令厚さに対する誤差の値  $E_o$  は表 5. 3 に示した壁高さ  $Z=7 \text{ mm}$  以下における誤差の平均値を用い，各加工においての工具による誤差は表 5. 5 に示すとおりである．また，この誤差  $E_2 (=E_t)$  には，切削力による工具の変形に起因する誤差も含まれているものとする．

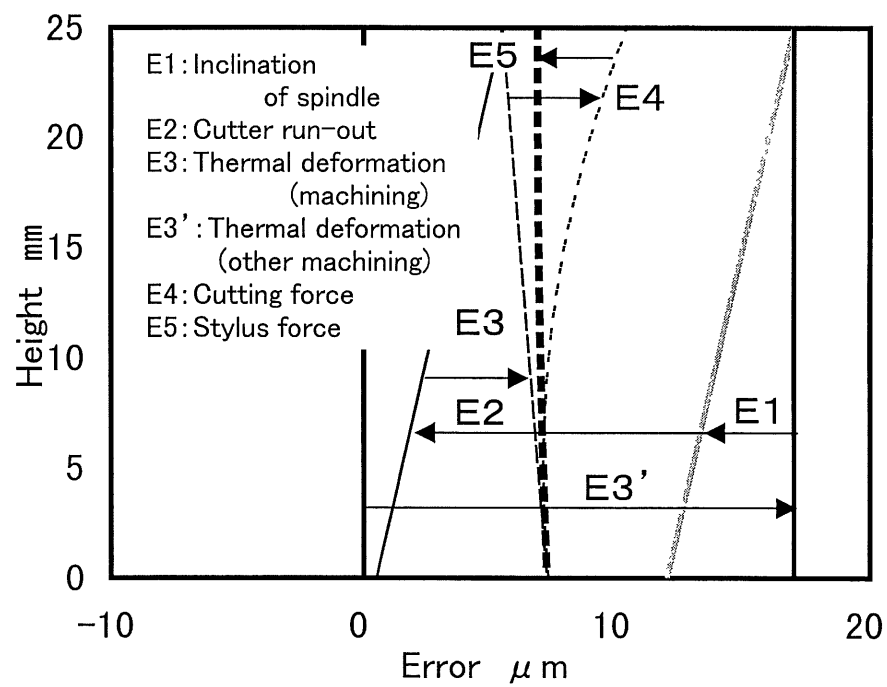
表 5. 5 工具による誤差

Thickness of wall[mm]	Over cut error Eo[ $\mu$ m]	Tool error Et[ $\mu$ m]
6.0 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.0	- 3.8	- 1 3.2 4
6.0 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.2	- 1.6	- 1 1.0 4
6.0 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.5	- 1.3	- 1 0.7 4
6.0 $\rightarrow$ 3.5 $\rightarrow$ 1.0	- 4.0	- 1 3.4 4
6.2 $\rightarrow$ 3.7 $\rightarrow$ 1.2	- 3.7	- 1 3.1 4
6.5 $\rightarrow$ 4.0 $\rightarrow$ 1.5	- 2.2	- 1 1.6 4

では、これらの誤差要因が、生成される加工面に与える影響を各面ごとに図 5. 33 を用いて考えてみる。まず先に加工される裏面を示した (a) 図について順を追って考えてみる。右側に負の加工誤差、左側に正の加工誤差を示しており、加工開始位置である壁高さ  $Z=2.5$  mm を基準と考える。壁高さ  $Z=2.5$  mm から加工を開始し最下面  $Z=0$  mm まで加工が進行した結果、誤差を引き起こす要因が全くなければ、壁高さ全域にわたって誤差は零となる。しかし、主軸が傾いていること (E1) により、灰色の実線で示したように、加工の進行に伴い下面側ほど正の誤差が大きくなる。また、使用した工具は振れ回りおよび偏心等 (E2) によって、加工における実有効径が実直径よりも大きくなるため削り過ぎることになり、実線で示したような加工面となる。なお、繰り返し段加工において、加工に携わるのは刃先のみであるため E2 の値は壁高さ方向全域にわたって一定である。さらに、加工を開始してから終了するまでに約 20 分が経過しており、その間加工位置が表面側に  $-14.15 \mu\text{m/h}$  で移動している。すなわち加工が終了するまでに  $-4.72 \mu\text{m}$ 、壁高さ 1 mm ごとに  $-0.19 \mu\text{m}$  移動していることになる。この熱変形によると考えられる加工位置の移動 (E3) により、長い破線で示したように下面側ほど負の誤差が大きくなる。さらに切削力による工作物の変形量 (E4) 加えたものが実際に得られた加工面となる。そして最後



(a) 裏面



(b) 表面

図5. 33 誤差計算モデル

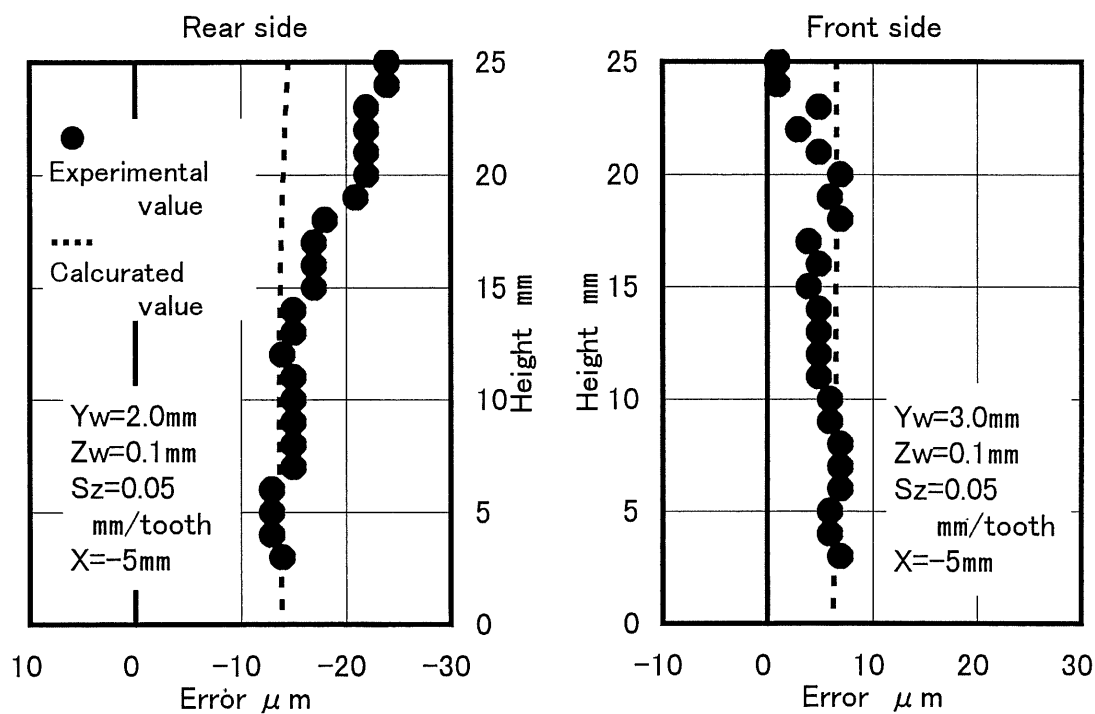
に，測定の際のプローブの測定力によって工作物が変形する（E5）．この変形量は上面側ほど大きく，最終的には太い破線のような形状の加工誤差が得られることになり，これを裏面における加工面の予測誤差とする．

次に，図 5. 33（b）に示した表面について考えてみる．右側は正の誤差，左側は負の誤差であり，やはり加工開始位置である壁高さ  $Z=25\text{ mm}$  の位置を基準とする．表面の加工においては，裏面と比べると誤差の正負が逆になる点があるが，ほぼ同様に考えることができる．実験の手順上，裏面の加工が終了してから表面の加工を開始するまでは，いずれの加工においても約 80 分間の時間差がある．先に述べたように，この間にも熱による変形（E3'）により，加工位置が表面側に移動する．この値はすべての加工において一定， $18.87\text{ }\mu\text{m}$  であり，太い実線で示した位置が表面加工の開始位置となる．この位置を基準として主軸の傾き（E1）により下面側ほど負の誤差が大きくなり，灰色の実線で示したような加工面となる．また，工具の振れ回り等（E2）によって壁高さ方向全域にわたって負の誤差が加算され，実線で示したような加工面となる．さらに熱変形による誤差（E3）により加工高さが下降するにつれて加工位置が表面側に移動するため，長い破線で示すような形状となり，さらに切削力による工作物の変形量（E4）を加えたものが実際に得られた加工面の状態である．そして，測定における工作物の変形（E5）によって，誤差の値は上面側ほど負の方向に変形するため，最終的には太い破線で示したような加工誤差となり，これを表面における加工面の予測誤差とする．

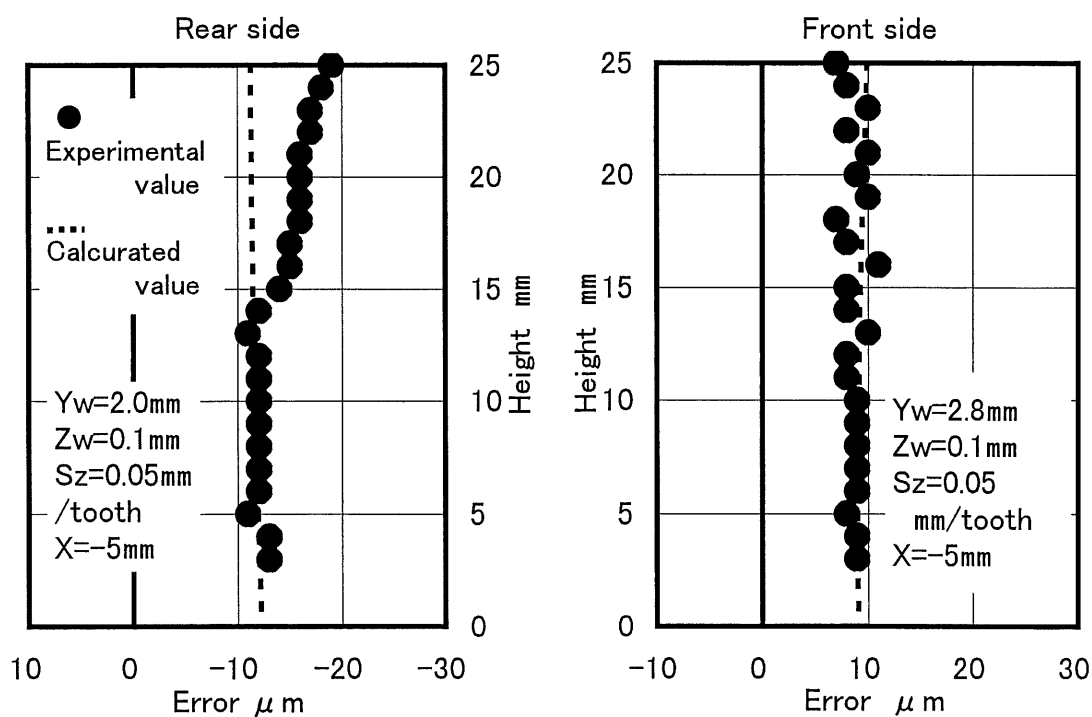
なお，主軸の傾き（E1）および工具の振れ回り等（E2）による誤差の大きさは加工時の工具の取り付け状態，テーブル上の工作物の取り付け位置等によって異なり，また測定圧による工作物の変形量による誤差（E5）も工作物の壁厚および測定状況によって異なるため，各加工面の予測誤差の値もそれぞれの条件によって異なってくる．しかし，工具

の振れ回りに等による誤差 (E2) および熱変形による誤差 (E3 および E3') によって裏面, 表面の予測誤差は, とともに指令した加工位置よりも表面側に寄った形状となると考えられる.

図 5. 3 4 および図 5. 3 5 は前加工および裏面における加工を同じ条件で行った後, 表面を繰り返し段加工によって壁厚  $W_t=1.0, 1.2$  および  $1.5\text{ mm}$  に仕上げた場合の実験値と計算値を比較したものである. なお, 破線で示した計算値は先に加工を行った裏面の壁高さ  $Z=2.5\text{ mm}$  の位置を基準として求めた予測誤差である. ●印で示した実験値は 5. 2. 2 に示したものと同一であるが, 壁高さ  $Z=7\text{ mm}$  以下における計算値の平均値と, 実験値の平均値の差を表裏の各面で等しくなるようにシフトさせ, 実際の加工誤差として示したものである. いずれの図においても誤差の値が表面側に移動した形状となっているが, これは工具の振れ回り等による誤差 (E2) および加工位置が表面側に移動したことによる誤差 (E3 および E3') による影響が大きいためであると考えられる. また, 壁高さ約  $1.5\text{ mm}$  付近までは実験値と計算値はよく一致しているが,  $Z=1.5\text{ mm}$  以上では裏面, 表面ともに実験値が計算値よりも内側にプロットされている傾向がある. これは予測誤差を求める際に用いた各誤差要因の値と, 実際の値に差があったことが考えられる. 例えば, 熱変形が原因と考えられる移動量 (E3 および E3') はテーブル上の加工位置や機械の状態によって異なるであろうし, プローブの測定圧による工作物の変形量の値も実際には規定値よりも大きな測定圧が加わっていたということも考えられる. さらに, 切削力に起因する工作物の変形量を求める FEM 解析には, 汎用の NC フライス盤によって加工を行った場合の切削力を用いた. しかし, 主軸回転数が高速となる場合に作用する切削力は, 主軸回転数が比較的低速の場合に比べて小さくなると考えられる. 従って, 切削力による工作物の変形による誤差を大きく見積もってしまったことが, 実験値と計算値の差が上面側で大きくなってしまった原因ではないかと考えられる. しかし, このように上面側ほど削



(a) 壁厚  $W_t=1.0\text{mm}$



(b) 壁厚  $W_t=1.2\text{mm}$

図5.34 実験値と計算値の比較



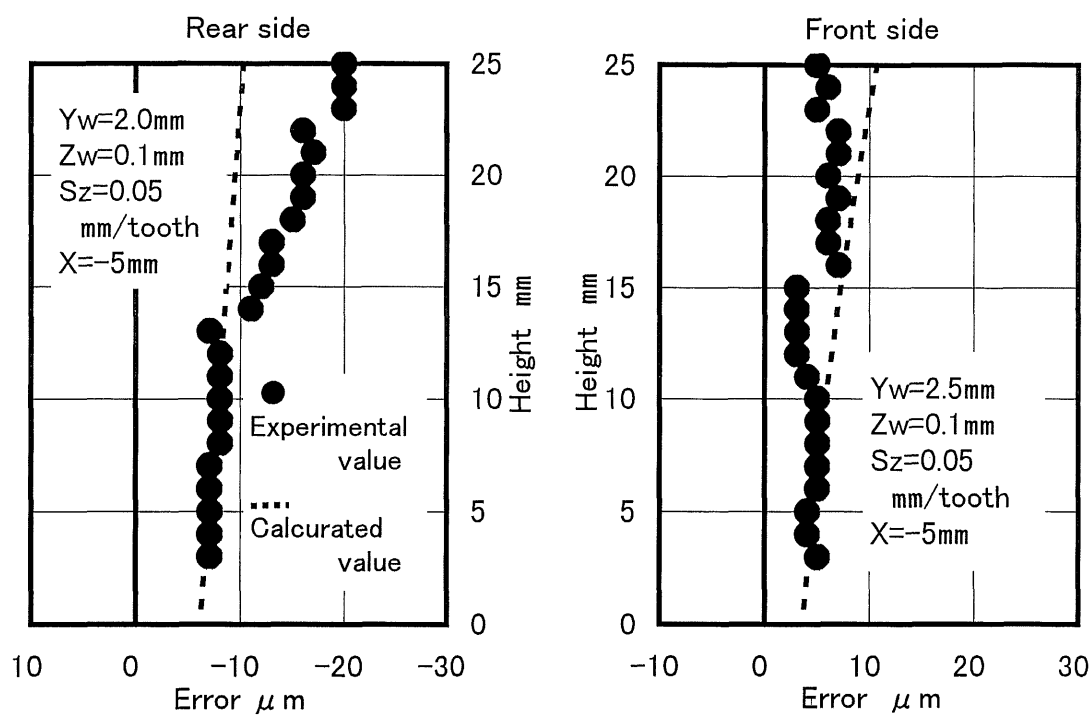
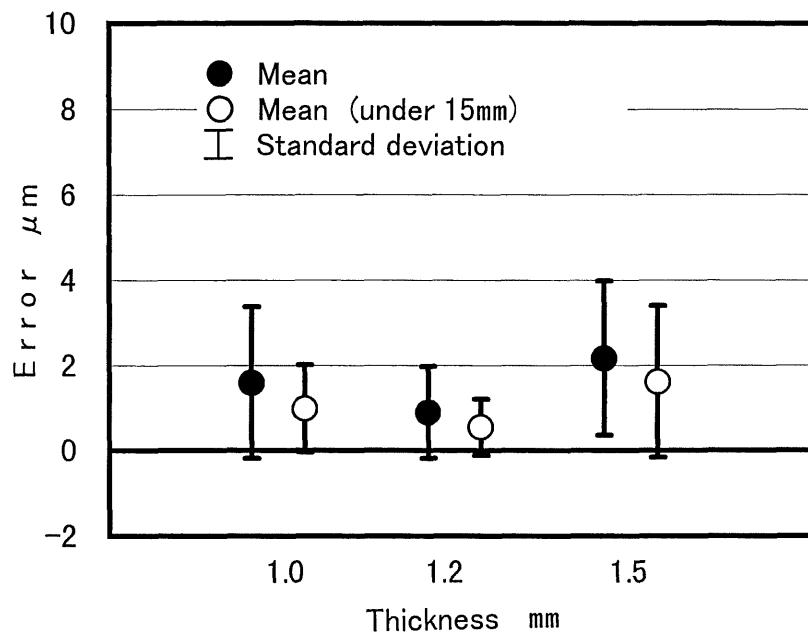


図5.35 実験値と計算値の比較 (  $W_t = 1.5\text{mm}$  )

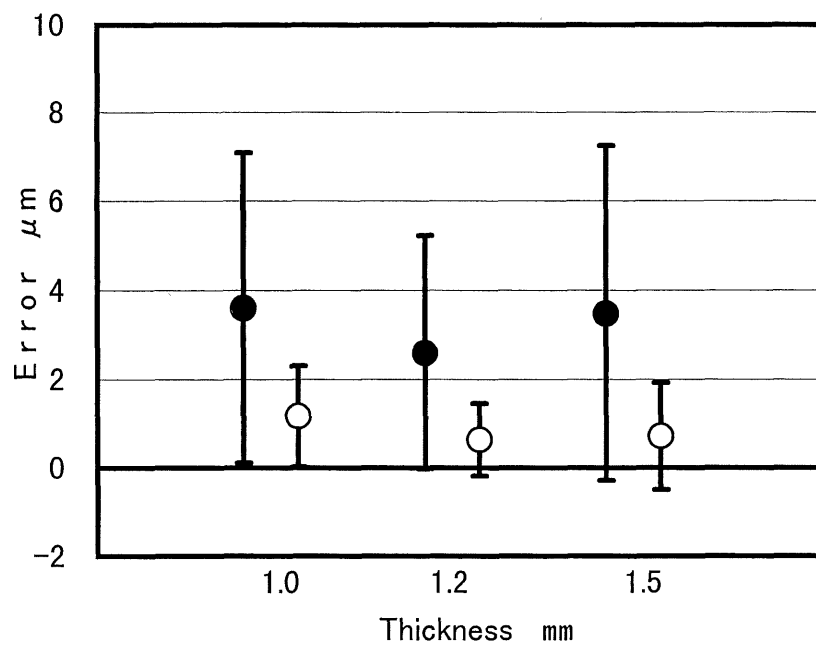
り過ぎの量が大きくなるという結果から、加工時において内部応力や振動など何らかの影響を受け工作物が工具側に変形した可能性も考えられる。図 5. 3 6 はこれらの実験値と計算値の差について、平均値と標準偏差を示したものである。●印は壁高さ全域における値であり、○印は壁高さ  $Z=1.5\text{ mm}$  以下における値である。(a) 図に示した表面の値は壁厚に関わらずともに小さく、また、●印と○印の差も小さく実験値と計算値が壁高さ全域にわたってほぼ一致していることを示している。

(b) 図の裏面の値については壁高さ  $Z=1.5\text{ mm}$  以上で実験値と計算値の差が大きくなっていることから、●印の値が大きくなっているが、○印の値は小さく、高さ  $Z=1.5\text{ mm}$  以下においてはほぼ一致していることを示している。●印の値は表面の値に比べ大きくなっているものの、平均値の最大値が  $3.60\text{ }\mu\text{m}$  ( $Wt=1.0\text{ mm}$ )、標準偏差の最大値が  $3.76\text{ }\mu\text{m}$  ( $Wt=1.5\text{ mm}$ ) と他の値と比較すると多少大きくなっているが、これは先に述べたように、切削力に起因する工作物の変形による誤差が実際には小さかったこと、さらに、他の誤差要因による影響ではないかと考えられる。

図 5. 3 7 および図 5. 3 8 は裏面、表面ともに半径方向切込み  $Y_w=2.5\text{ mm}$  の同じ切削条件で繰り返し段加工によって壁厚  $Wt=1.0$  ,  $1.2$  および  $1.5\text{ mm}$  に仕上げた場合の実験値と計算値を比較したものである。これらの図より表面、裏面とも先の図 5. 3 4 および図 5. 3 5 に示した結果と同様に壁高さ  $Z=1.5\text{ mm}$  付近まではほぼ一致しているが、それ以上では両者の差が大きくなっている。これは、実際には主軸の傾きが予想した値よりも大きかったためではないかと考えられる。図 5. 3 9 はこれらの実験値と計算値の差について、平均値と標準偏差を示したものである。図 5. 3 6 と同様に壁高さ全域における値を示した●印は表面で小さく、裏面で比較的大きくなっているが、これは裏面の上面側における実験値と計算値の差が大きくなっているためである。●印の平均値および標準偏差の最大値は（ともに  $Wt=1.0\text{ mm}$ ）それぞれ  $3.6$

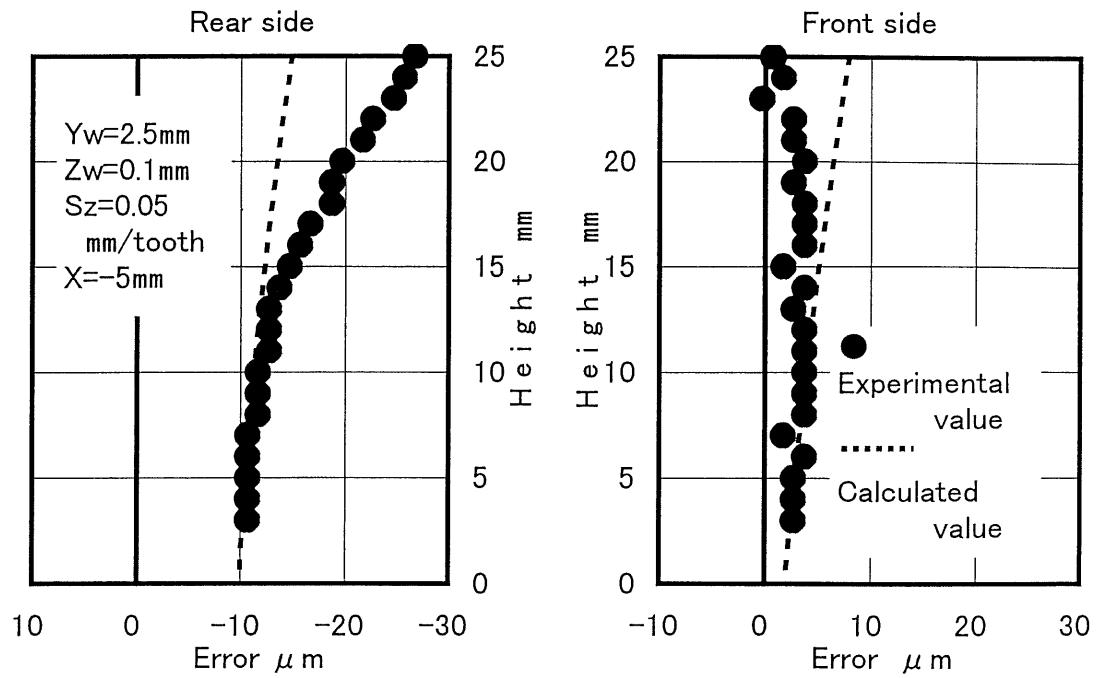


(a) 表面

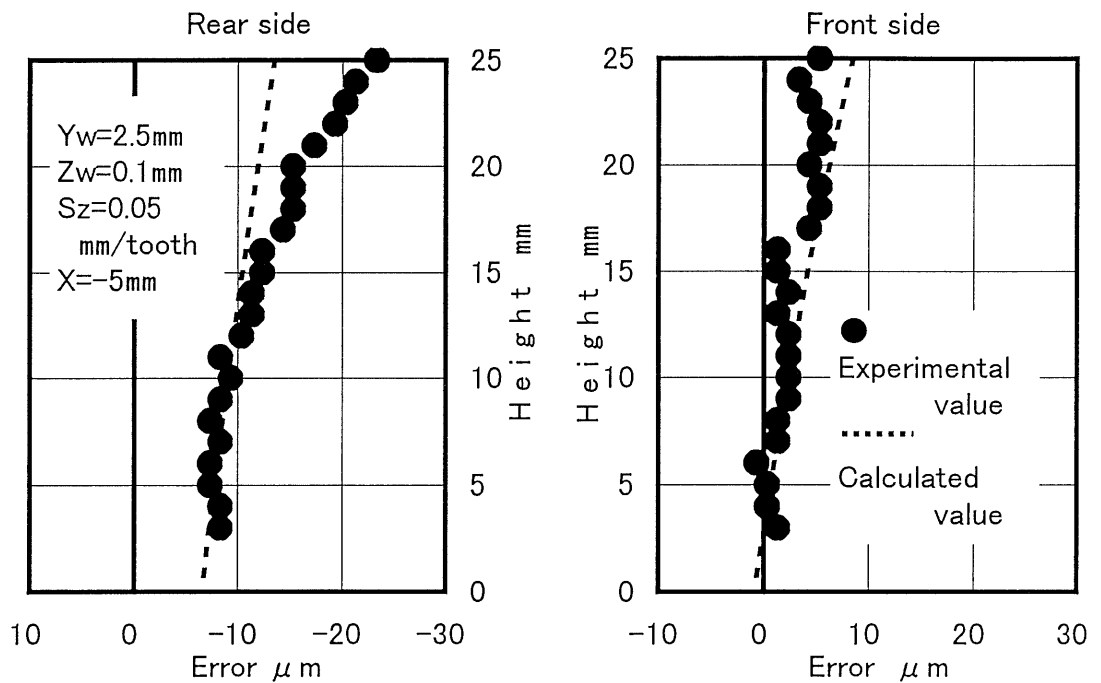


(b) 裏面

図5. 36 実験値と計算値の誤差



(a) 壁厚 $W_t=1.0\text{mm}$



(b) 壁厚 $W_t=1.2\text{mm}$

図5.37 実験値と計算値の比較

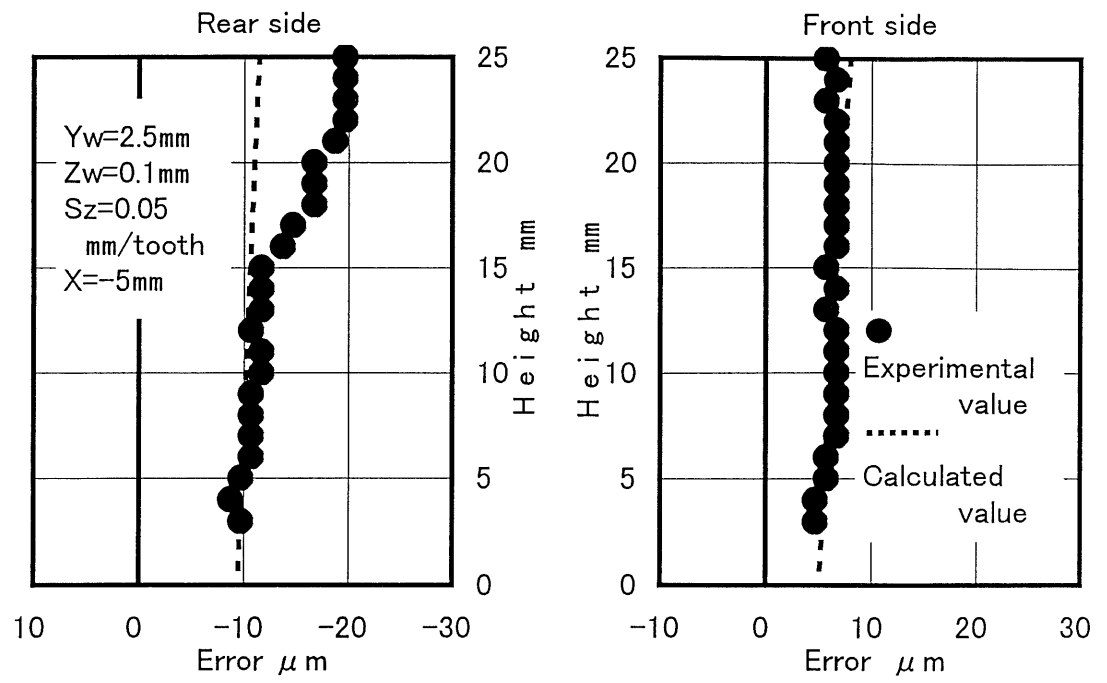
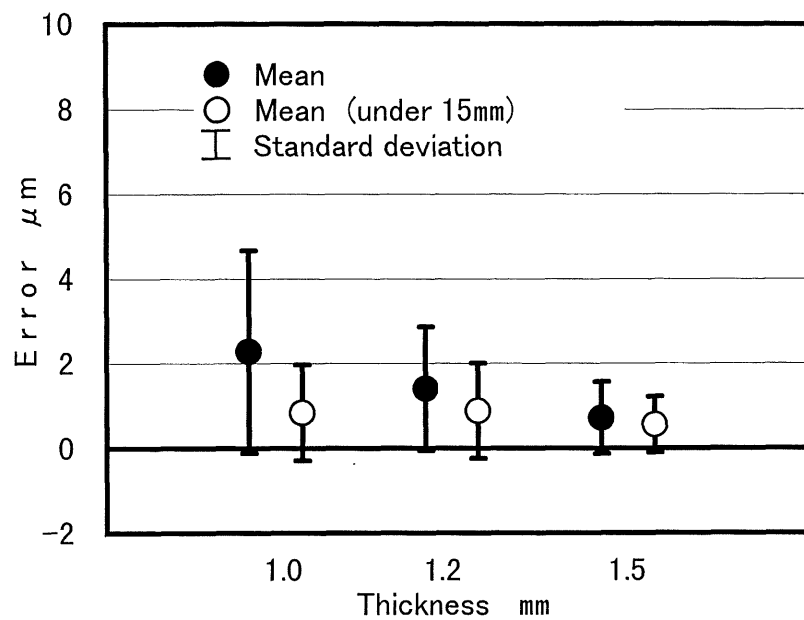
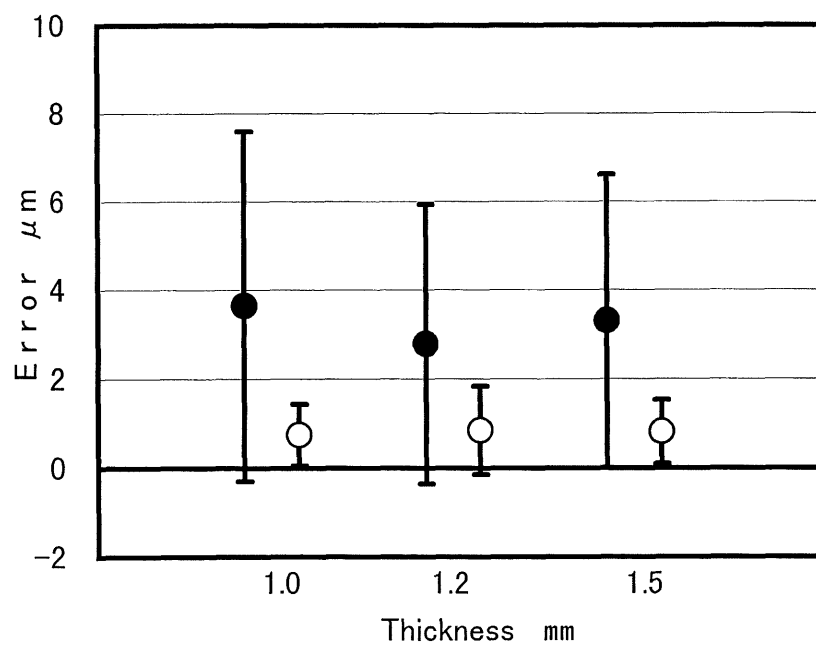


図5. 38 実験値と計算値の比較（壁厚 $W_t=1.5\text{mm}$ ）



(a) 表面



(b) 裏面

図5. 39 実験値と計算値の誤差

5  $\mu\text{m}$ , 3.94  $\mu\text{m}$  と多少大きな値となってしまうている．それに比べ，○印の値は表面，裏面さらに壁厚に関わらず小さい値であり，壁高さ  $Z = 1.5\text{ mm}$  以下においては実験値と計算値がよく一致していることがわかる．

いずれにしても，現段階で考えられる誤差要因，すなわち，軸の傾きによる誤差 (E1)，工具による誤差 (E2)，熱変形による誤差 (E3 および E3')，切削力による誤差 (E4) および測定圧による誤差 (E5) のそれぞれの誤差の大きさを踏まえた上で NC プログラムを再検討すれば，さらに誤差を小さく抑えることは理論的には可能である．また，今回は刃長を 2 mm とした工具を用いたが，さらに精度を向上させるためには工具の選択，あるいは熱変形の小さい工作機械および主軸については工具の取り付け精度および振れまわり誤差等の高精度化が重要な因子となることは確実である．

## 6. 軸方向送り加工の試みとサブミクロン加工の実現

### 6. 1 軸方向送り加工法

繰り返し段加工法によって、実験の条件では壁厚 1.0 mm まで高精度に仕上げられることを明らかにした。しかし、軸方向の最大高さ  $R_y$  は最もよい加工面でも 2.4 ないし 2.7  $\mu\text{m}$  を実現しているにすぎない。図 5.28 に示した粗さ曲線を観察すると、軸方向切込み  $Z_w=0.1\text{mm}$  ごとに加工面には切り欠き状の溝が残されており、切れ刃先端部に付着した切りくずによって生成したものと考えられる。

そこで、新たに図 6.1 に示すような加工法を試みることにする。すなわち、主軸方向に送りを与えてそれを一定の間隔で繰り返して側面を仕上げる加工法である。本研究では軸方向送り加工と呼ぶことにする。図に示す一定の間隔  $P_f(\text{mm})$  はボールエンドミルによる型加工におけるピックフィードに相当する。使用する工具は図 3.8 に示した工具 B であり、加工面は工具の先端部切れ刃によって、丁度ボーリング工具により円筒内面の一部を生成し、ピックフィードの幅でそれらを順番に連ねながら側面の創成を行うことになる。

したがって、試みる加工法は通常加工において発生する工具の偏心に基づく形状誤差は生じないことになり、繰り返し段加工と同様である。また、加工面の創成に切れ刃の一部しか使用しないため、工具逃げ面の影響は 1 刃当たりの送りに相当する非常に短い長さとなる。

一方、微小なピックフィード量による加工となるため、工具経路が非常に長くなり、繰り返し段加工と同様に、主軸回転数および送り速度が高い高速加工機を用いることが不可欠である。また、本研究ではアルミニウム合金を使用し、新しい切れ刃で実験を行ったが、この加工法による工具摩耗に関しては今後検討する必要がある。



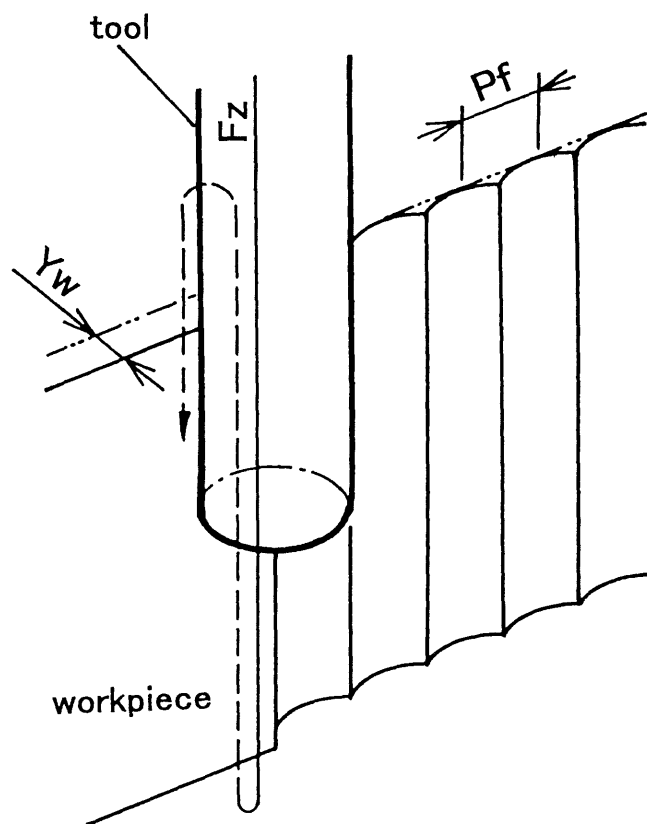


図 6 . 1 軸方向送り加工

## 6. 2 実験条件および方法

### 6. 2. 1 使用機器および実験条件

使用機器および切削条件は以下の通りである.

工作機械：空気静圧主軸搭載

立型NCフライス盤 ASV-40 (東芝機械(株))

制御装置：TOSNUC T-80M, 0.001 mm/pulse

エンドミル：[工具A]

直径10 mm, 刃長28 mm, 全長80 mm, 2枚刃

右刃, 右ねじれ角30°, 超硬ソリッド

[工具B] (工具Aの刃部を研削したもの)

直径10 mm, 刃長28 mm, 全長80 mm, 2枚刃

右刃, 右ねじれ角30°, 超硬ソリッド

工 作 物：アルミニウム合金 (JIS A5052s)

壁高さZ=25 mm, 壁厚Wt=約60 mm

切削条件：[前加工]

切削速度  $V=942.5$  m/min

半径方向切込み  $Y_w=0.05$  mm

軸方向切込み  $Z_w=25.0$  mm

1刃当たりの送り  $S_z=0.05$  mm/tooth

下向き切削

[軸方向送り加工]

切削速度  $V=942.5$  m/min

半径方向切込み  $Y_w=0.1 \sim 2.0$  mm

ピックフィード  $P_f=0.05 \sim 0.2$  mm

軸方向1刃当たりの送り

$S_z=0.017 \sim 0.067$  mm/tooth

下向き切削

## 6. 2. 2 実験方法

工作物は図 6. 2 に示した形状であり，加工する壁高さは 25 mm とした．工作機械のテーブル上に治具を介して，加工面が機械の X 軸と平行になるように取り付ける．作業側から見て手前側の加工面を表面，後ろ側の加工面を裏面と呼び，この区別は繰り返し段加工の場合と同様である．

まず，工具 A を用いて  $N=30,000\text{min}^{-1}$ ， $F=3,000\text{ mm/min}$ ， $Y_w=0.05\text{mm}$  として全面が加工されるまで繰り返す．この面を前加工面とし，表面，裏面とも同様に加工する．その後，工具 B を用いて，軸方向送り加工によって加工面を得る．このとき，主軸回転数は  $N=30,000\text{min}^{-1}$  一定とし，軸方向送り速度  $F_z$ ，ピックフィード  $P_f$  および半径方向切込み  $Y_w$  の 3 つのパラメータを変化させて加工実験を行った．軸方向送り加工の状態は図 6. 1 に示されている通りであり，半径方向切込み  $Y_w$  を与え，軸方向に  $F_z$  で工具を送り，壁面の加工を行う．そして加工面と平行にピックフィードを  $P_f$  与え，これを繰り返すことで加工面を得る．実験に使用した切削条件は表 6. 1 に示す通りである．

表 6. 1 実験条件

	変化 パラメータ	$F_z$ (mm/min)	$P_f$ (mm)	$Y_w$ (mm)
①	$F_z$	1000	0.1	0.2
		2000		
		4000		
②	$P_f$	2000	0.05	0.2
			0.2	
③	$Y_w$	2000	0.1	0.1
				0.2
				0.4
				1.0
				2.0

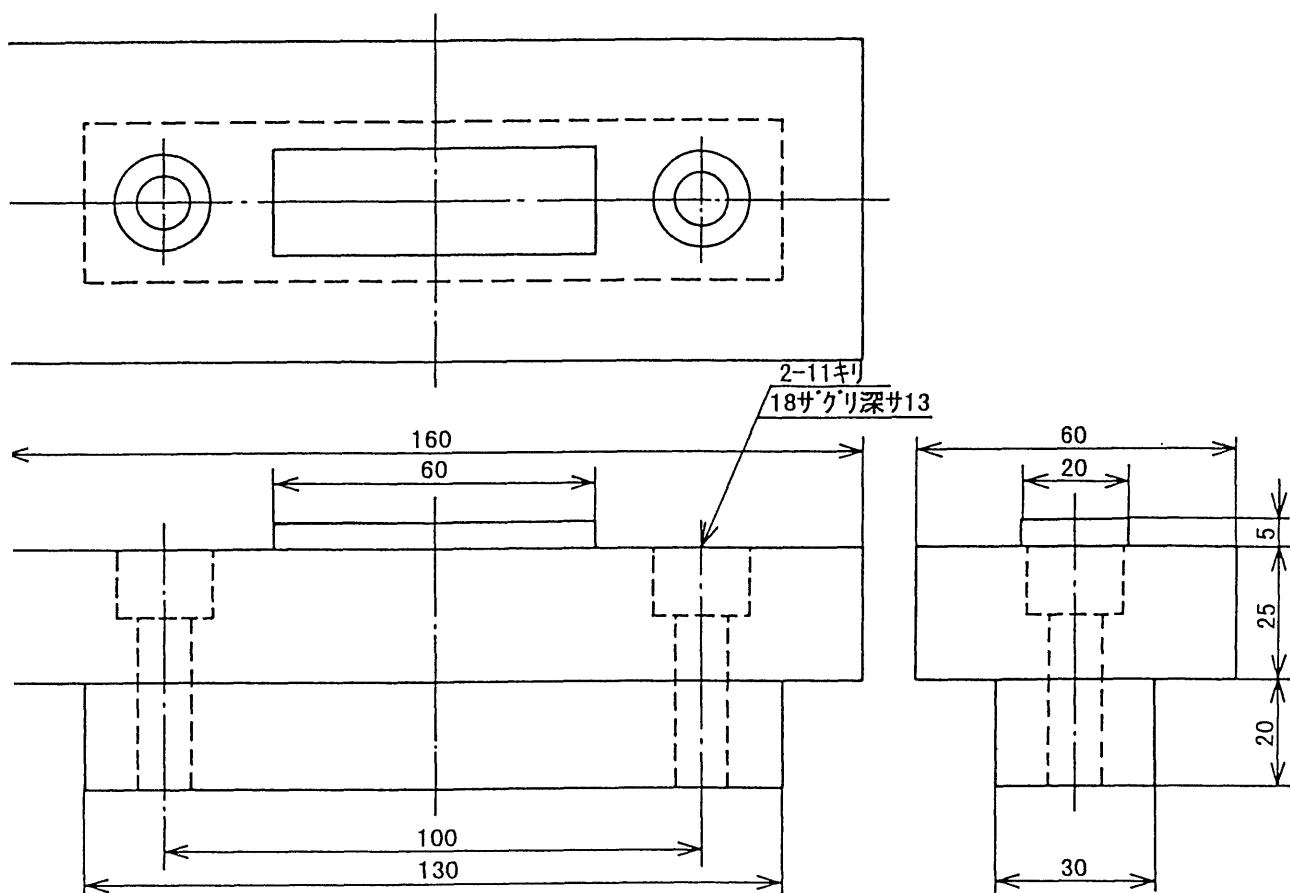


図 6 . 2 工作物形状

実験には工作物を2つ用意し，表6. 1中に示した①および②は同一の工作物を用い，③は別の工作物を用いた．なお，各切削条件においてX方向に11 mmの加工面を生成させ，繰り返し回数は55ないし220回となる．また，加工誤差の測定には工作物上面に工具Aによって作成した基準面を用い，各加工面におけるX方向中心位置の軸方向の誤差形状を三次元測定機により測定した．

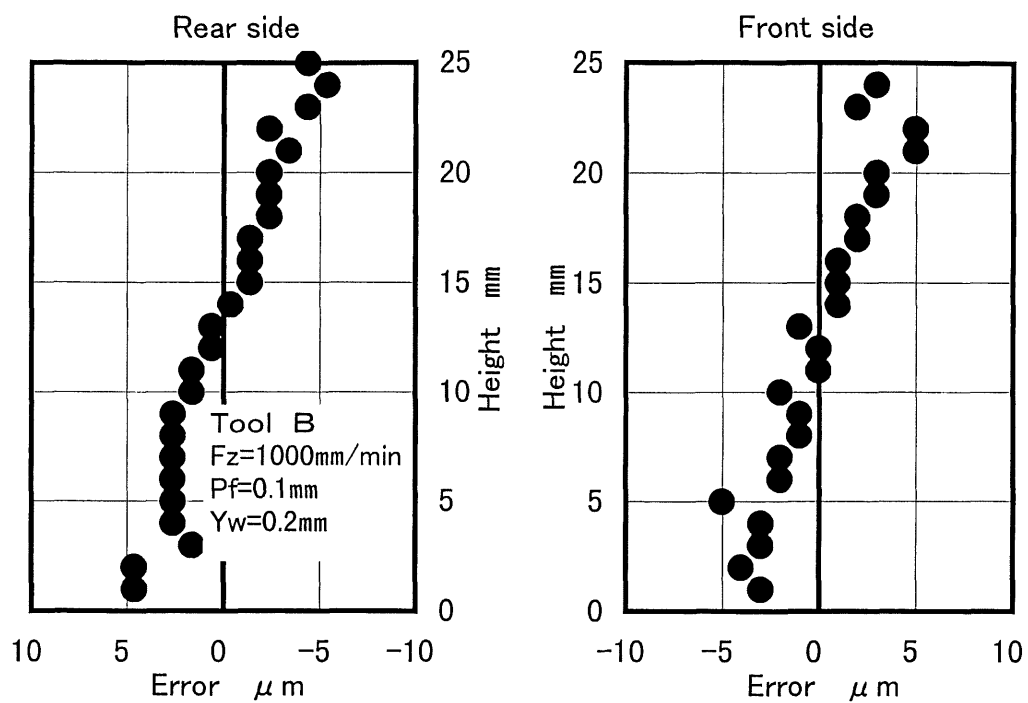
### 6. 3 実験結果および考察

#### 6. 3. 1 軸方向送り加工による加工誤差

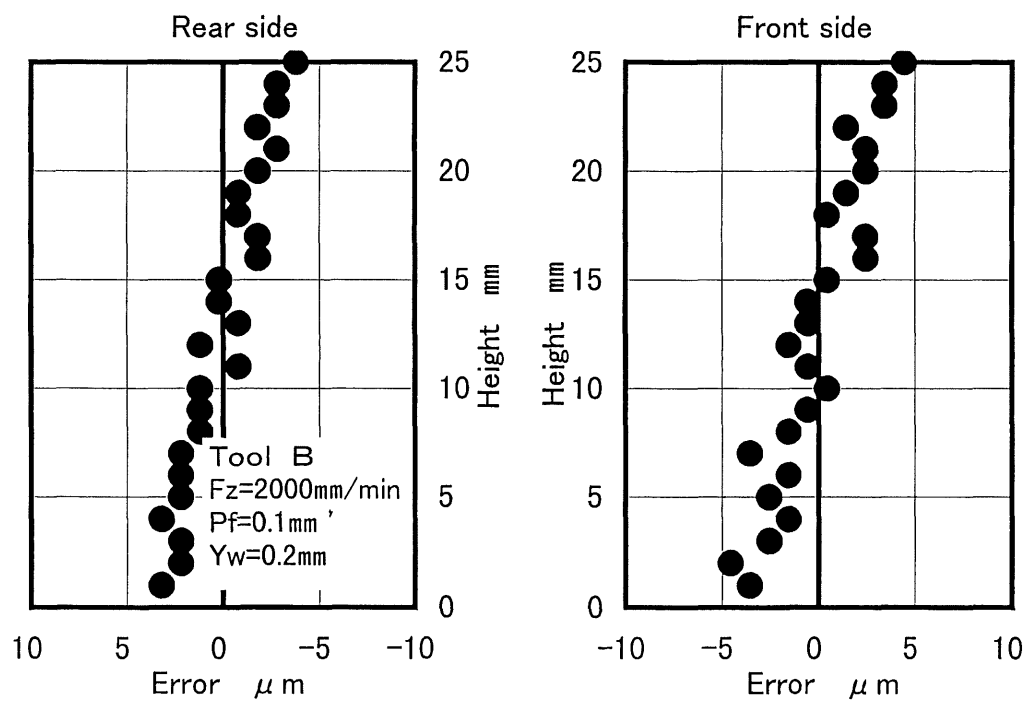
図 6. 3 および 6. 4 はピックフィード  $Pf=0.1\text{mm}$ 、半径方向切込み  $Yw=0.2\text{mm}$  とし、軸方向の送り速度  $Fz$  を  $1,000$ 、 $2,000$  および  $4,000\text{mm/min}$  と変化させたときの軸方向送り加工による誤差形状を示したものである。これらの図は、各面の測定値の平均値を零とした場合の誤差を示している。いずれの条件においても表面、裏面とも上面側が表面側に傾いた形状であり、これは使用した工作機械の主軸の傾きによるものと考えられる。なお、図 6. 5 は軸方向の送り速度を変化させたときの形状誤差を比較したものであるが、その値は  $7$  ないし  $10\mu\text{m}$  と表面、裏面とも条件の違いによる大きな差はない。この図から軸方向の送り速度を変化させても加工面形状には差がなく、主軸の傾きの影響が大きく現れることがわかる。

図 6. 6 は半径方向切込み  $Yw=0.2\text{mm}$ 、軸方向の送り速度  $Fz=2,000\text{mm/min}$  として、ピックフィード  $Pf$  を  $0.05$  および  $0.2\text{mm}$  としたときの軸方向送り加工による誤差形状を示したものである。この結果についても主軸の傾きにより、上面側が表面側に傾いた形状となっている。また図 6. 7 は形状誤差の値を比較したものである。なお、この図には、図 3 (b) に示した  $Yw=0.2\text{mm}$ 、 $Fz=2,000\text{mm/min}$ 、 $Pf=0.1\text{mm}$  の結果も併記した。図 6. 7 より、いずれの条件においても、裏面よりも表面の形状誤差が多少大きくなる傾向があるが、ピックフィード  $Pf$  を変化させても、加工面の誤差形状には違いが見られないことがわかる。

図 6. 8 ないし 6. 10 は軸方向の送り速度  $Fz=2,000\text{mm/min}$ 、ピックフィード  $Pf=0.1\text{mm}$  として、半径方向切込み  $Yw$  を  $0.1$ 、 $0.2$ 、 $0.4$ 、 $1.0$  および  $2.0\text{mm}$  としたときの軸方向送り加工による誤差形状を示したものである。図 6. 8 (b) に示した  $Yw=0.2\text{mm}$ 、裏面の結果において、壁高



(a)  $F_z=1000\text{mm/min}$



(b)  $F_z=2000\text{mm/min}$

図 6. 3 平均値からの誤差形状

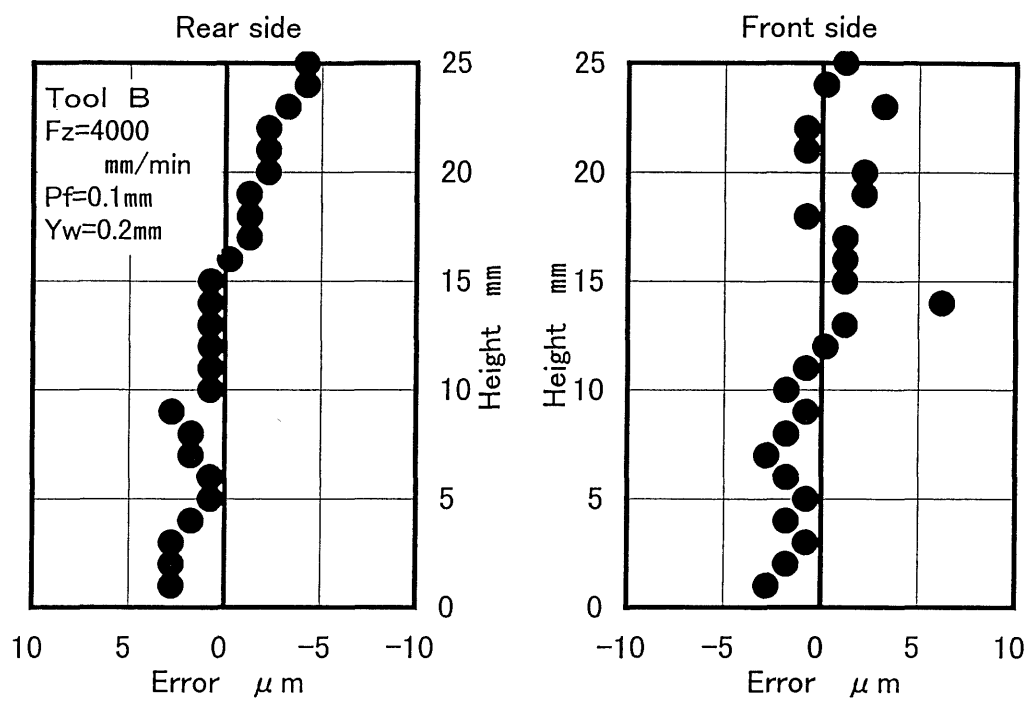


図 6. 4 平均値からの誤差形状 ( $F_z=4000$  mm/min)

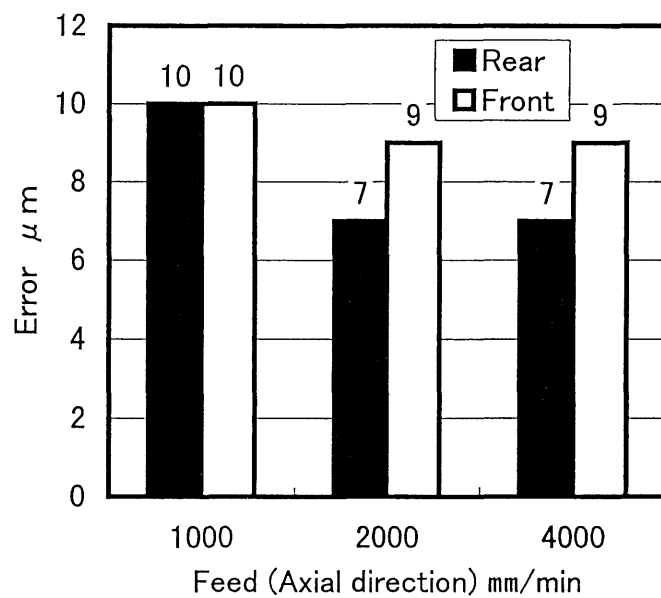
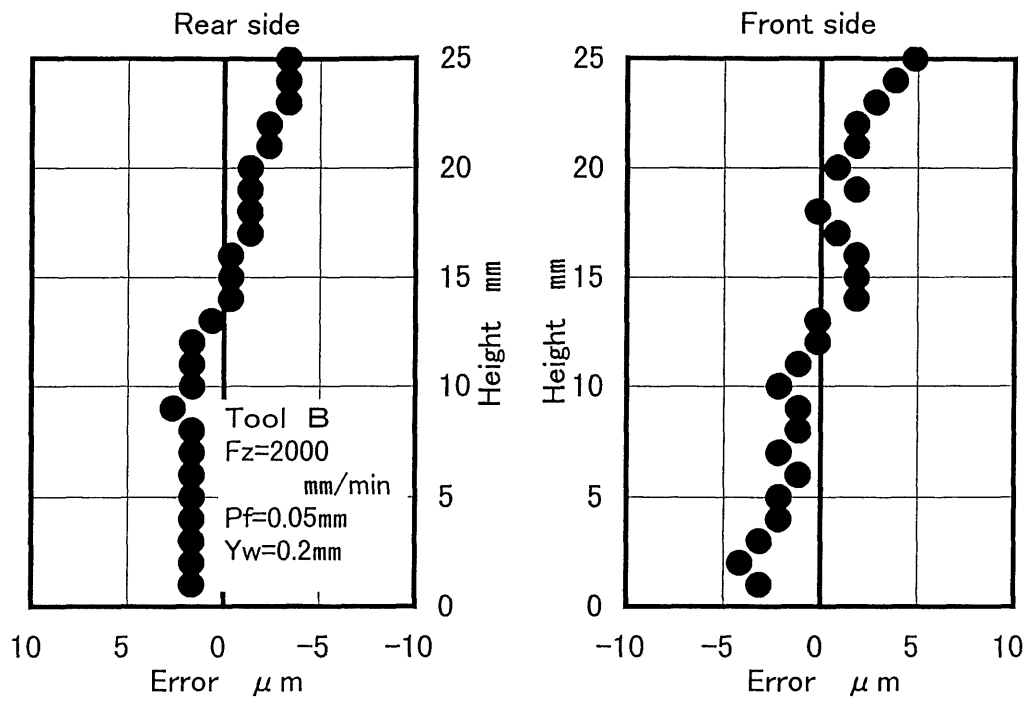
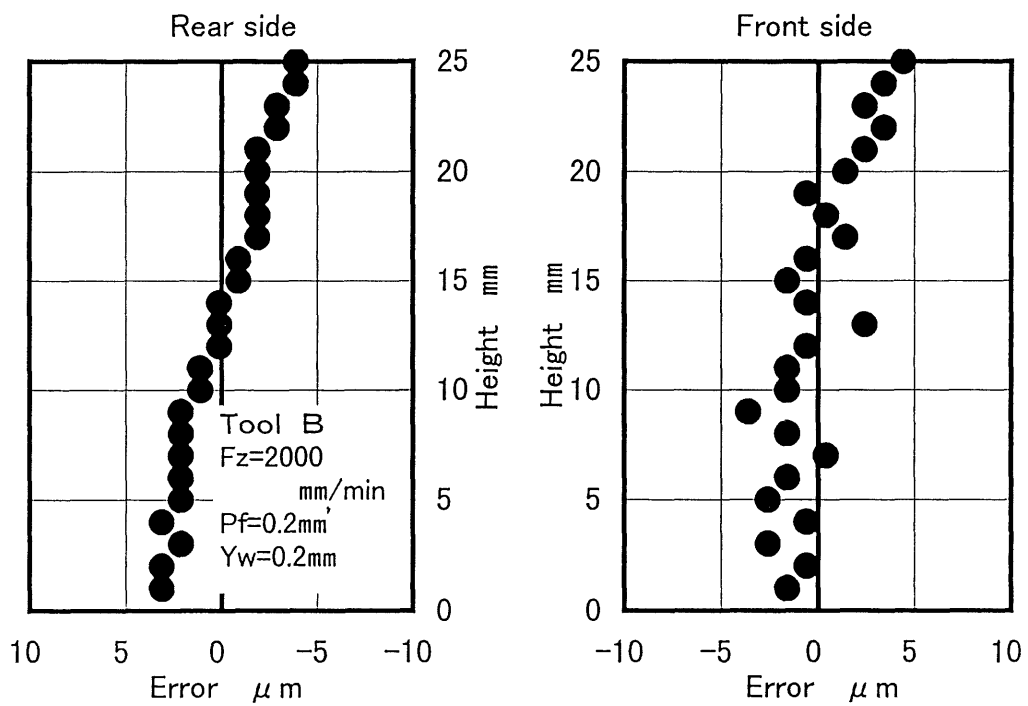


図 6. 5 送り速度による形状誤差





(a) Pf=0.05mm



(b) Pf=0.2mm

図 6.6 平均値からの誤差形状

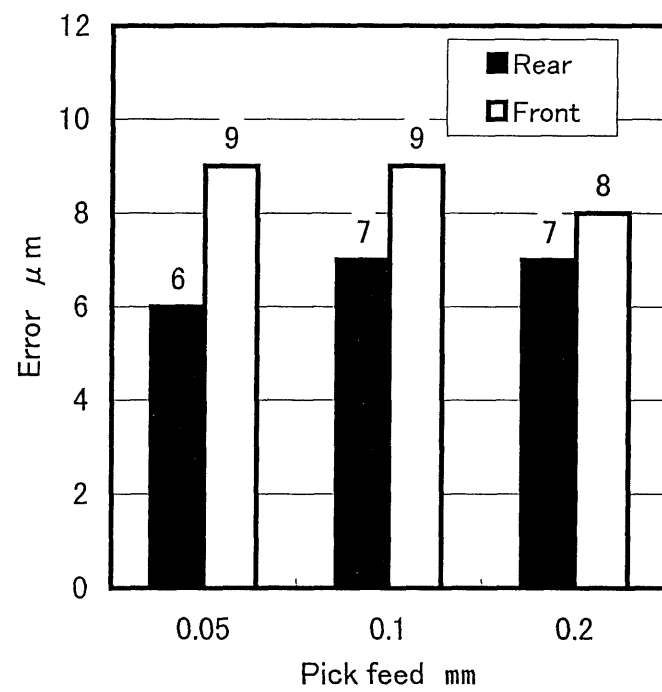
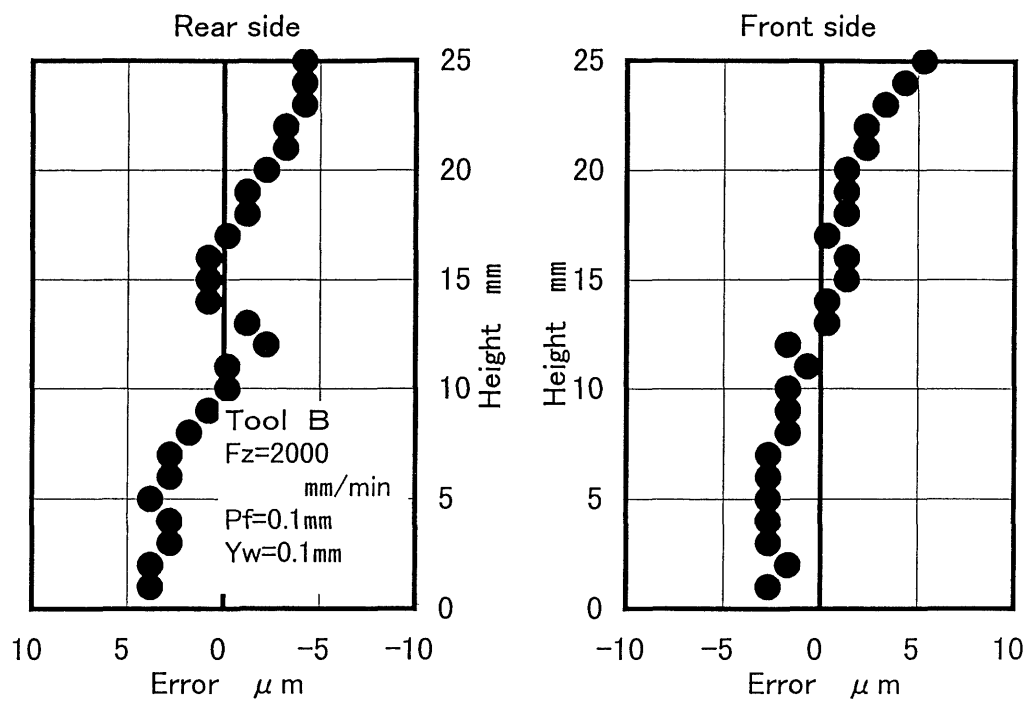
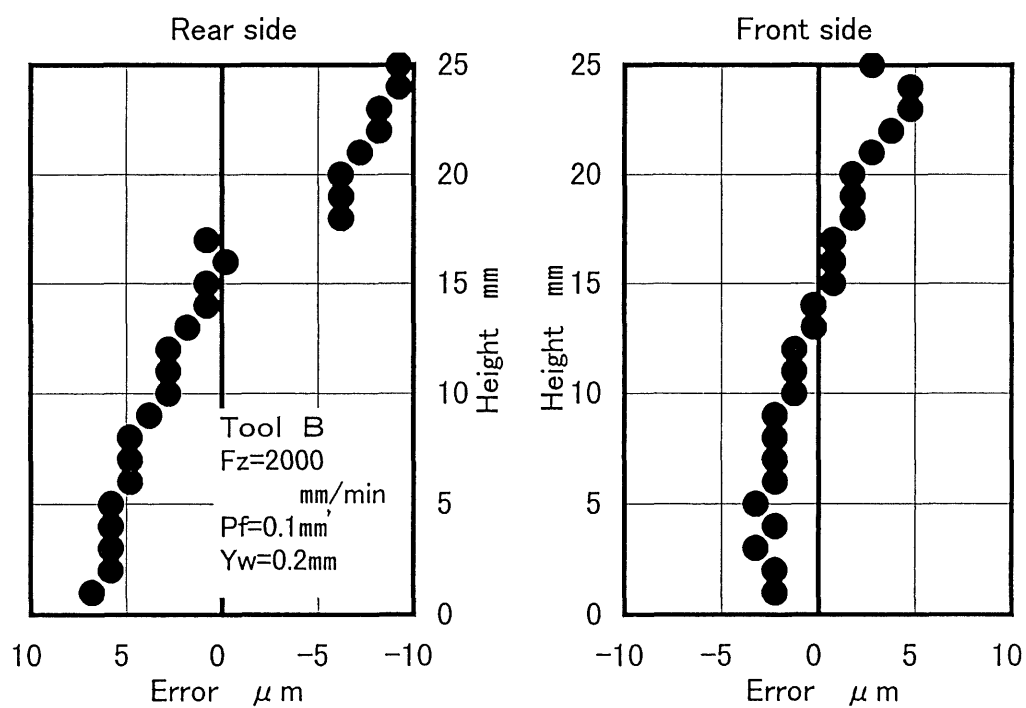


図 6. 7    ピックフィードによる形状誤差

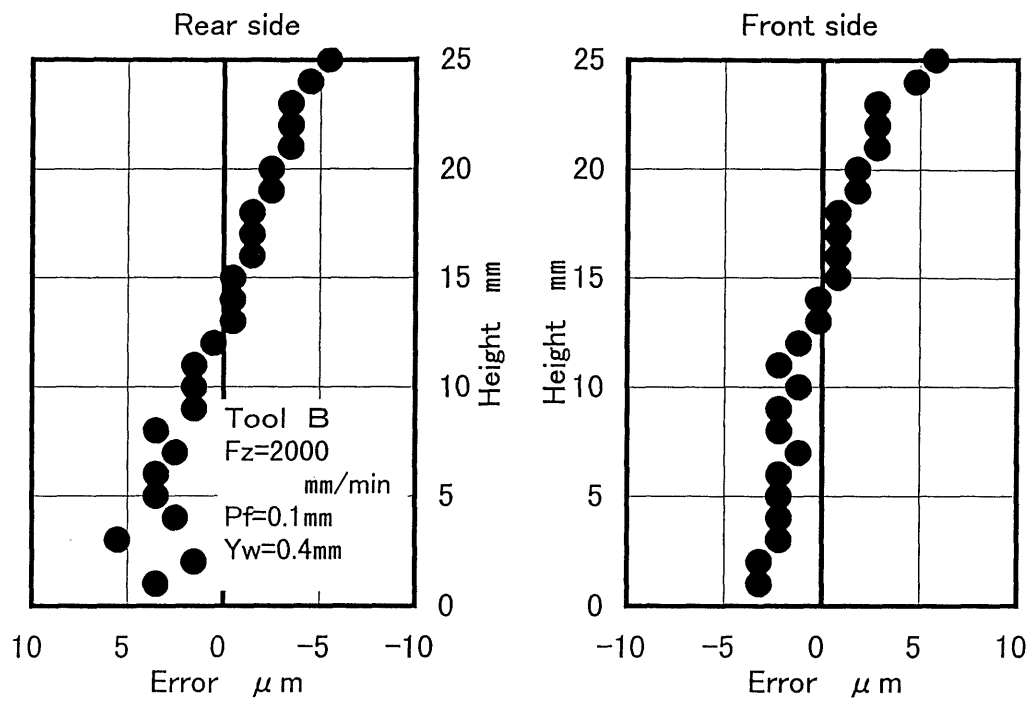


(a)  $Y_w = 0.1 \text{ mm}$

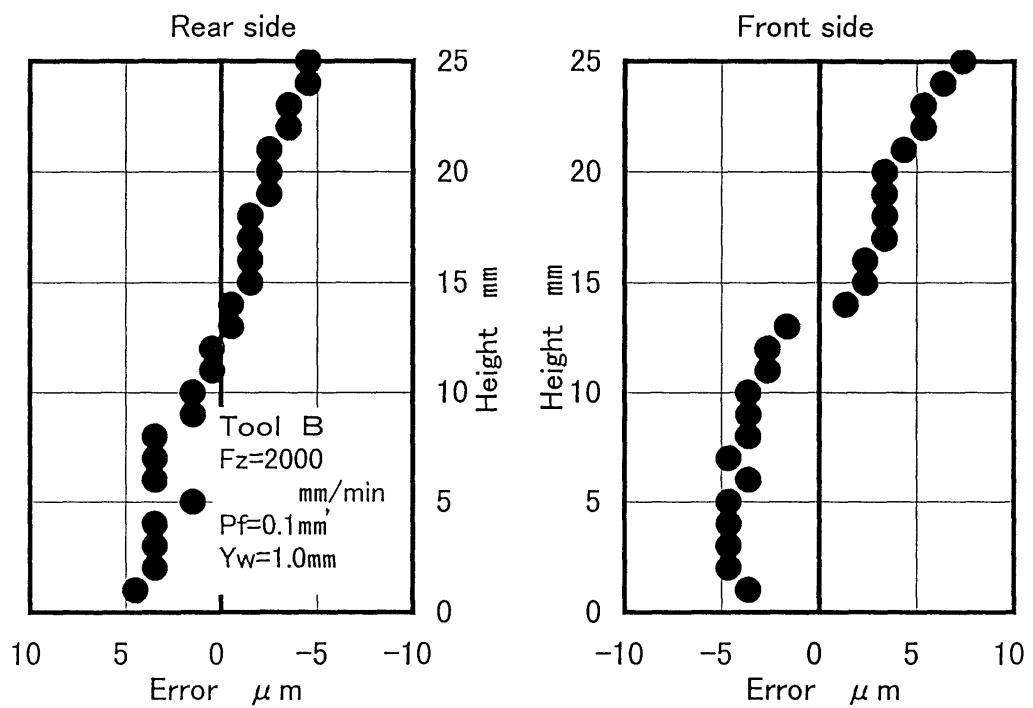


(b)  $Y_w = 0.2 \text{ mm}$

図 6. 8 平均値からの誤差形状



(a)  $Y_w = 0.4mm$



(b)  $Y_w = 1.0mm$

図 6 . 9 平均値からの誤差形状

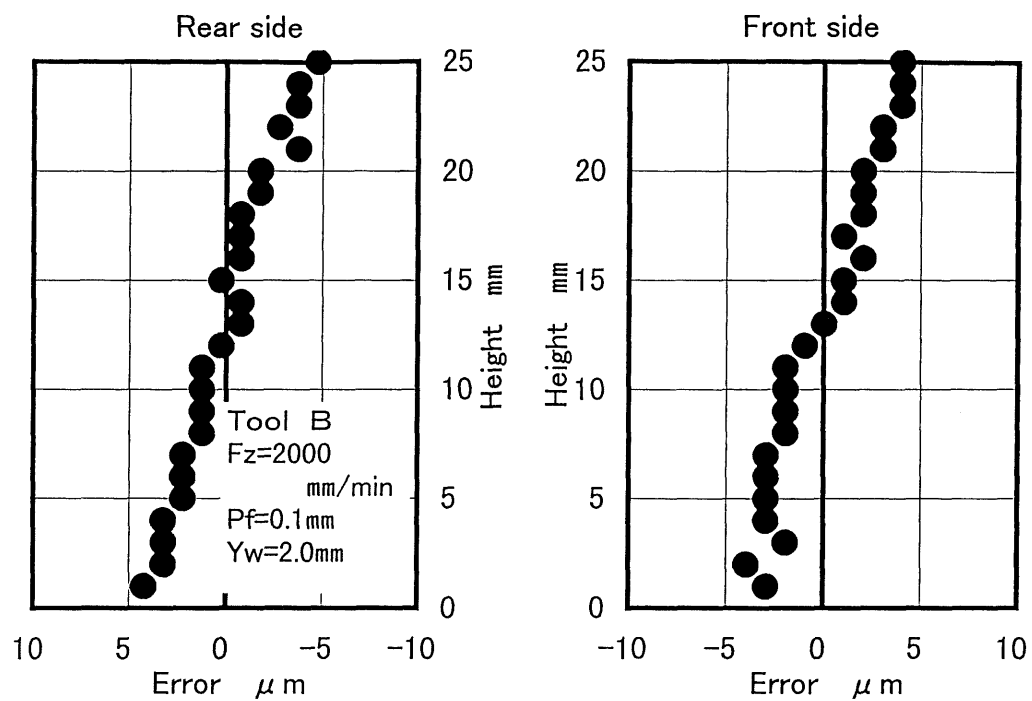


図 6 . 1 0 平均値からの誤差形状

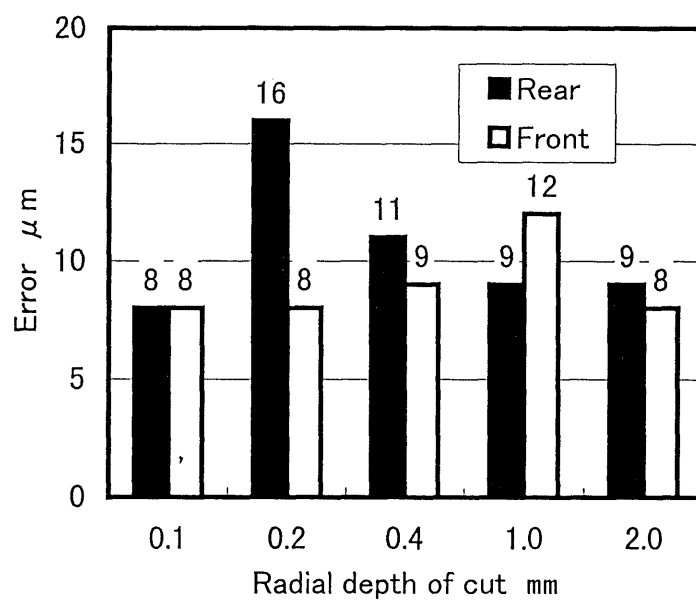


図 6 . 1 1 半径方向切込みによる形状誤差

さ  $Z = 1.7 \text{ mm}$  と  $1.8 \text{ mm}$  を境に値がずれ状態となっているが、これは誤差の測定時において、プローブに何らかのごみが付着したものと考えられる。全体的な傾向としては、先に示した  $F_z$  を変化させた場合、 $P_f$  を変化させた場合と同様に上面側が表面側に傾いている。また、図 6. 11 は半径方向切込みの値を変化させたときの形状誤差を比較したものである。先に説明した理由により、 $Y_w = 0.2 \text{ mm}$ 、裏面の値が大きくなっているが、この値を除けば形状誤差は  $8$  ないし  $12 \mu\text{m}$  であり、半径方向切込みの違いによる形状誤差への影響は小さいと言える。

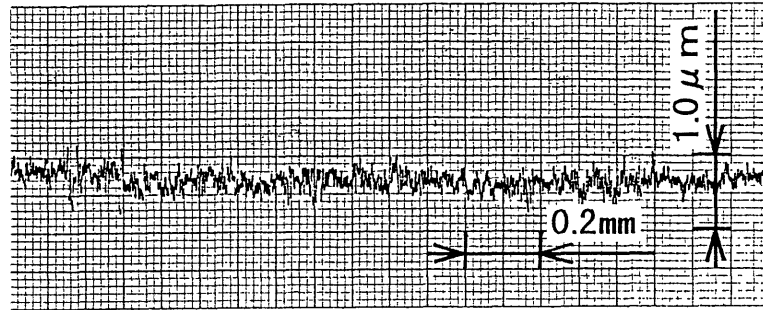
以上、軸方向の送り速度  $F_z$ 、ピックフィード  $P_f$  および半径方向切込み  $Y_w$  のそれぞれを変化させた場合の形状誤差を示したが、各条件を変化させても、加工面の形状および誤差形状などに関しては、ほぼ同一の傾向となる。ここで行った実験においては、十分な剛性のある工作物を用いているため、切削力および測定力による工作物の変形は無視できる。また、軸方向に送りを与えるため、加工中における工作機械の熱変形の影響も無視できる。ここで示した誤差は平均値を基準としたときの誤差であるため、工具による誤差および待ち時間における工作機械の熱変形による誤差は含まれていない。したがって、ここに示した誤差要因は主軸の傾きによる誤差のみであるため、異なる切削条件においても誤差形状に関してはほぼ同一の加工面が得られることになり、切削条件を変化させても同程度の誤差形状の加工面が得られるならば、より効率の良い切削条件が望ましいと言える。

### 6. 3. 2 粗さ曲線と最大高さ

図 6. 1 2 は  $Y_w=0.2\text{mm}$ ,  $P_f=0.1\text{mm}$  とし, 軸方向の送り速度  $F_z=1,000$  及び  $4,000\text{mm/min}$  の各条件で加工した側面の粗さ曲線を示しており, (a) および (b) 図は軸方向, (c) および (d) 図は送り方向の結果である. 図より, 軸方向の粗さ曲線は変動周期が短く, 最大高さに相当する変動幅も  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下である. 一方, 送り方向の粗さ曲線には  $P_f=0.1\text{mm}$  によるツールマークが現れているが, 送り速度による差はなく, 軸方向とともに最大高さ  $R_y$  は  $0.6\text{ }\mu\text{m}$  程度と小さい.

図 6. 1 3 は  $F_z=2,000\text{mm/min}$ ,  $Y_w=0.2\text{mm}$  とピックフィード  $P_f=0.05$  および  $0.2$  ももの条件で同様に粗さ曲線を比較したものである. 図より, 軸方向の場合  $P_f=0.05\text{mm}$  では最大高さは  $0.1\text{mm}$  程の周期で突起が生じており, 最大高さ  $R_y$  は  $1.44\text{ }\mu\text{m}$  となっている. 一方, 送り方向に関してはピックフィードが  $P_f=0.2\text{mm}$  と大きくなると, ツールマークによる粗さが  $P_f^2/8R$  ( $R$ : 工具半径) で増大し, (d) 図では最大高さ  $R_y$  は  $1.62\text{ }\mu\text{m}$  に達している.

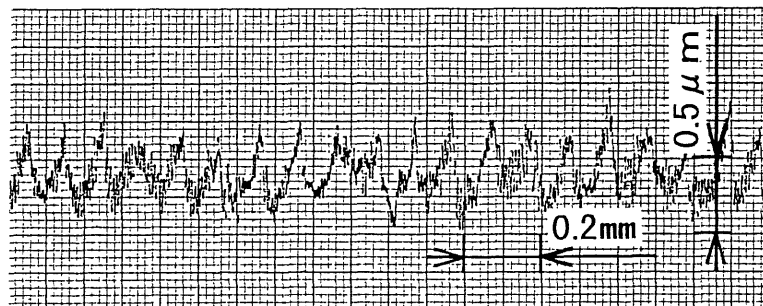
図 6. 1 4 は  $F_z=2,000\text{mm/min}$ ,  $P_f=0.1\text{mm}$  とし, 半径方向切込み  $Y_w=0.1$  および  $1.0\text{mm}$  の条件で同様に比較したものである. 図 6. 1 2 と同様で, 軸方向の粗さ曲線は周期および変動が小さく, 送り方向にツールマークが現れている. しかし, とともに最大高さ  $R_y$  は  $0.6\text{ }\mu\text{m}$  と小さく, 高精度な加工面が得られている. これらの結果をまとめて表 6. 2 に示す.



( a )  $F_z=1000 \text{ mm/min}$  軸方向



( b )  $F_z=4000 \text{ mm/min}$  軸方向



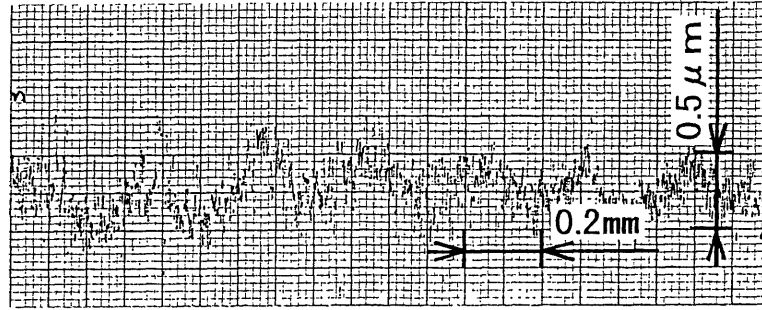
( c )  $F_z=1000 \text{ mm/min}$  送り方向



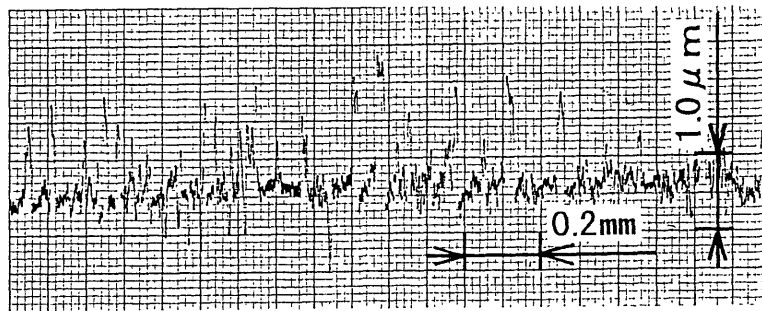
( d )  $F_z=4000 \text{ mm/min}$  送り方向

図 6 . 1 2 送り速度による粗さ曲線

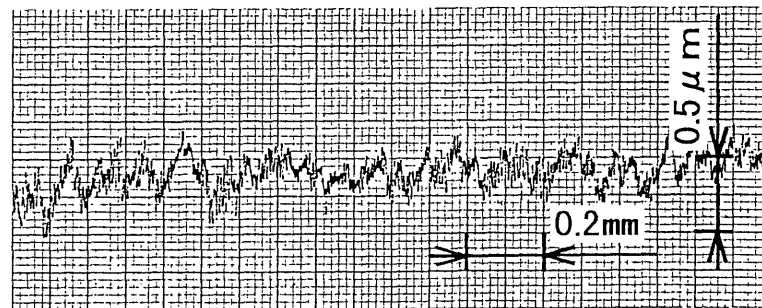




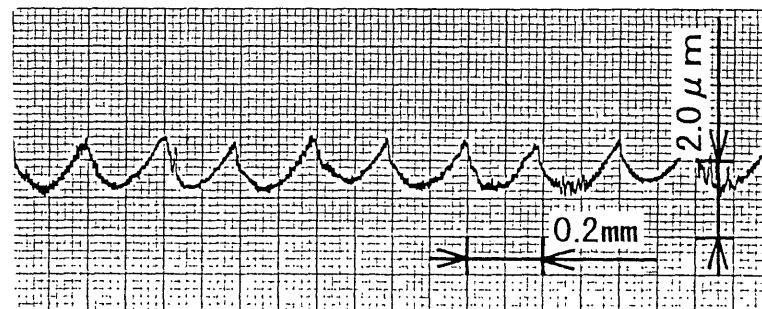
( a ) Pf=0.05 mm 軸方向



( b ) Pf=0.2 mm 軸方向

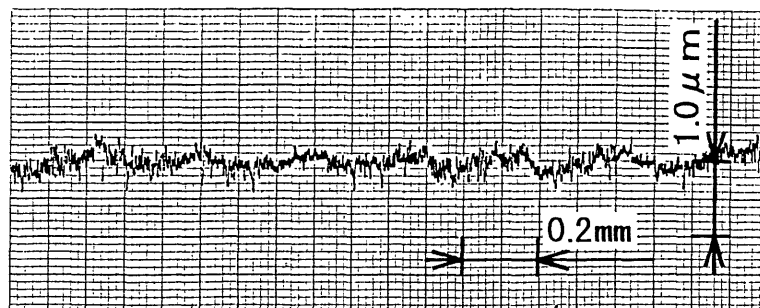


( c ) Pf=0.05 mm 送り方向

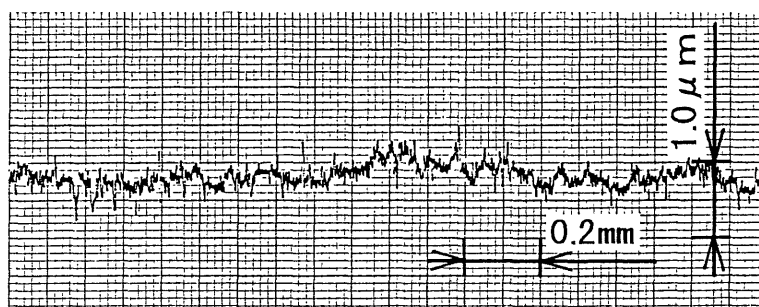


( d ) Pf=0.2 mm 送り方向

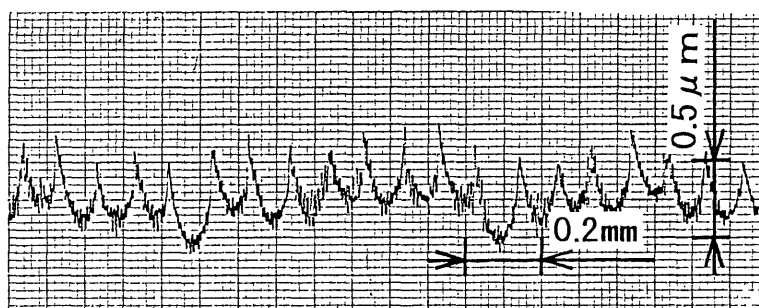
図 6 . 1 3 ピックフィードによる粗さ曲線



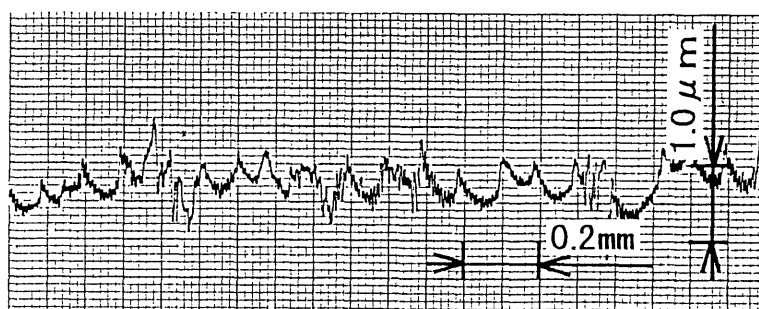
(a)  $Y_w = 0.1 \text{ mm}$  軸方向



(b)  $Y_w = 1.0 \text{ mm}$  軸方向



(c)  $Y_w = 0.1 \text{ mm}$  送り方向



(d)  $Y_w = 1.0 \text{ mm}$  送り方向

図 6. 1 4 半径方向切込みによる粗さ曲線

表 6 . 2 軸方向送り加工による加工面の最大高さ  $R_y$  [ $\mu m$ ]

	Cutting Condition	Axial direction	Feed direction
①	Fz=1000	0.61	0.63
	Fz=2000	0.61	0.56
	Fz=4000	0.57	0.65
②	Pf=0.05	0.65	0.47
	Pf=0.2	0.72	1.62
③	Yw=0.1	0.48	0.64
	Yw=0.2	0.69	0.56
	Yw=0.4	0.66	0.73
	Yw=1.0	0.53	0.64
	Yw=2.0	0.61	0.56

### 6. 3. 3 サブミクロン加工の実現とその条件

図 6. 15 ないし 6. 17 は図 6. 12 ないし 6. 14 の結果を棒グラフで示したものであり，それぞれ加工された側面の軸方向および送り方向で比較している．これらの図より，図 6. 17 に示した  $P_f=0.2\text{mm}$  条件を除いて，すべての加工面の最大高さが  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下となっている．すなわち加工面をサブミクロンに加工することができたことを意味する．図 6. 18 は最大主軸回転数  $N=2,500\text{min}^{-1}$  の汎用の NC フライス盤（機械 B：大阪機工，MHA350）を用いて同様の実験を行い，加工面の粗さを比較したものである．図の場合， $P_f=0.1\text{mm}$ ， $Y_w=0.2\text{mm}$  であり，機械 A は本研究に使用している機械である．図より機械 B ではともに最大高さが大きくなっており， $R_y=1.5$  ないし  $1.8\text{ }\mu\text{m}$  である．機械 A による値が  $0.6\text{ }\mu\text{m}$  と良好な理由は，機械 A の主軸が空気静圧軸受で支持されており，工具の振れ回りが小さかったことによるものと考えられる．

なお，図 6. 19 は  $P_f$  を変化させて両機械による加工面の最大高さを比較したものである．図より機械 A の送り方向の最大高さ  $R_y$  は， $P_f$  の増加により一点鎖線で示す理論粗さに沿って変化している．一方機械 B ではそのような傾向は見られず， $P_f=0.2\text{mm}$  までの条件でも最大高さ  $R_y$  は  $1.5\text{ }\mu\text{m}$  以下となっていない．

以上の結果より，空気静圧主軸を搭載した高速加工機を用い，軸方向送り加工を行うことによって，加工面の最大高さを送り方向および軸方向ともに  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下となるサブミクロン加工を実現した．実験の条件ではピックフィード  $P_f=0.1\text{mm}$  以下で実現しているが， $P_f=0.05\text{mm}$  の条件との差がほとんどないため， $0.1\text{mm}$  の条件が最も生産性が高いことになる．

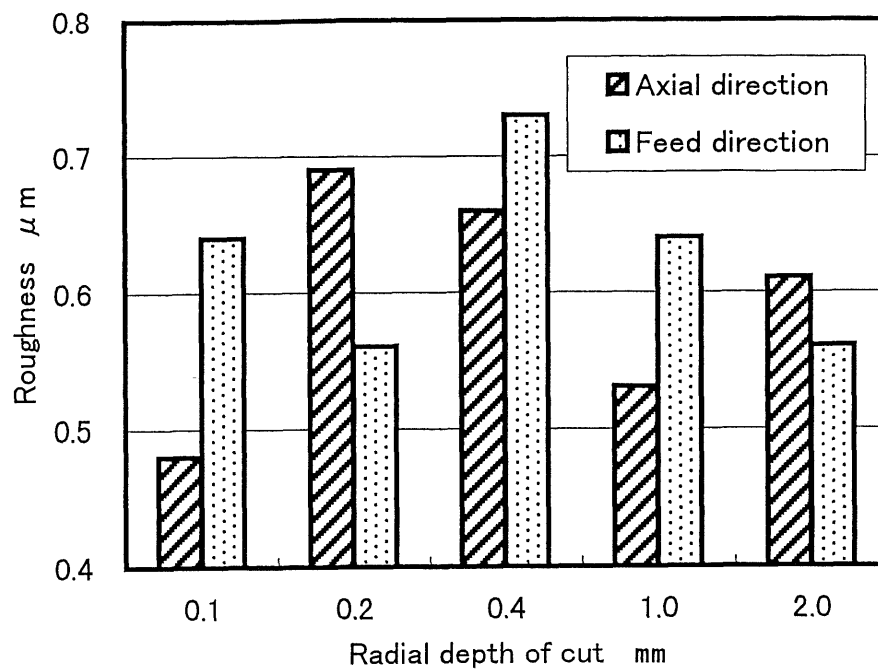


図 6 . 1 5 半径方向切込みによる最大高さ

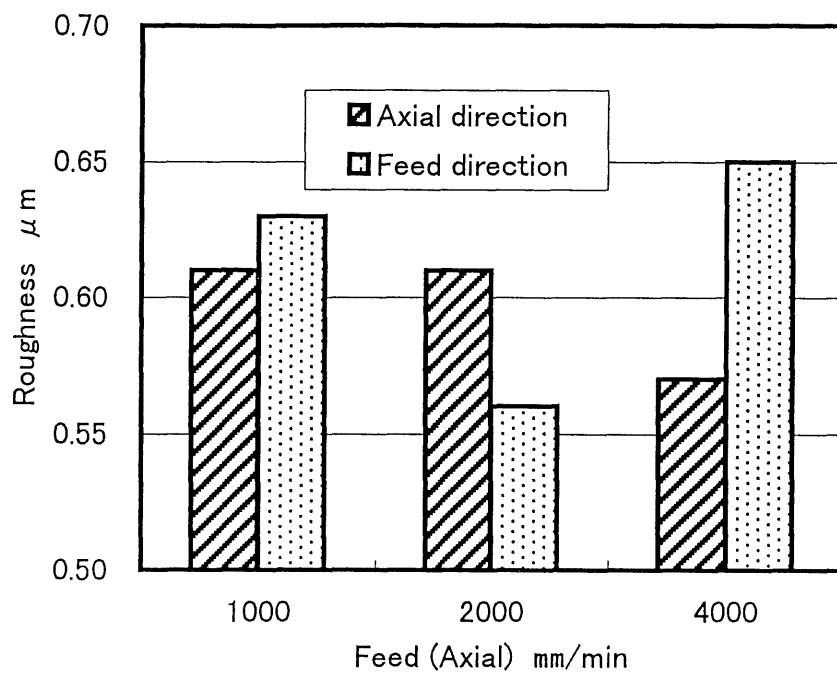


図 6 . 1 6 送り速度による最大高さ

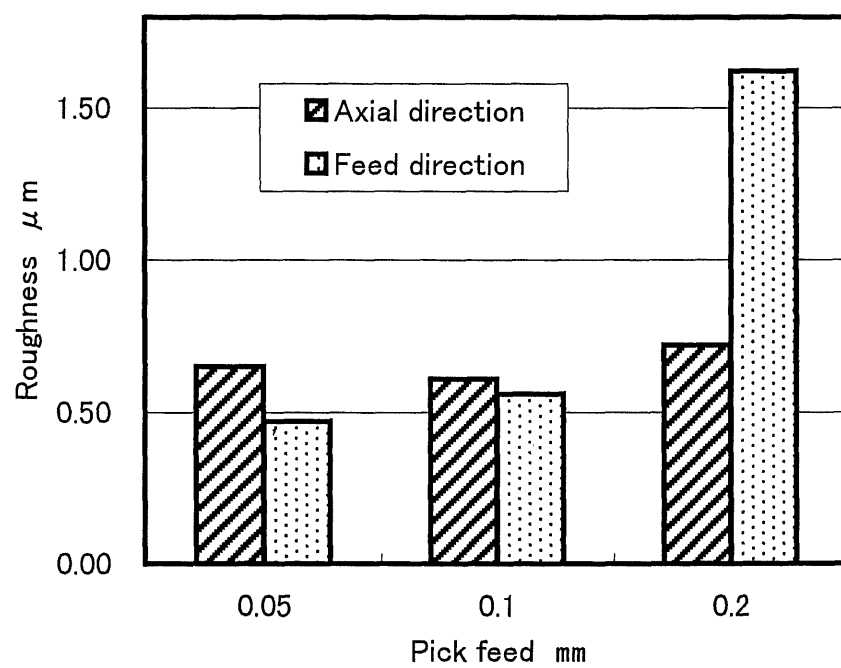
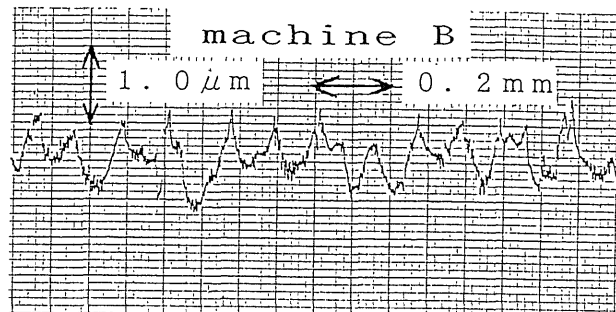
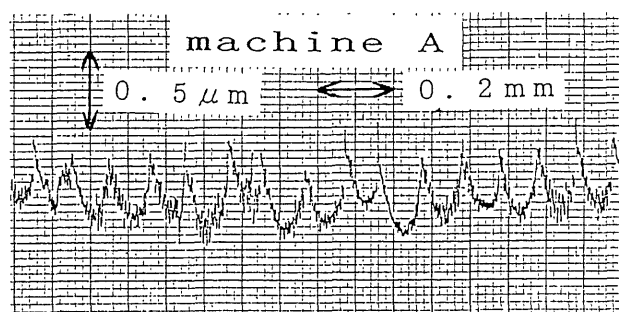
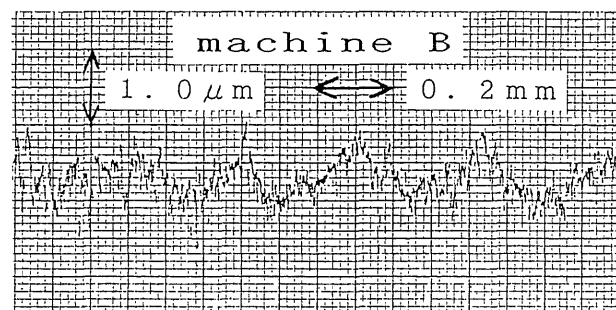
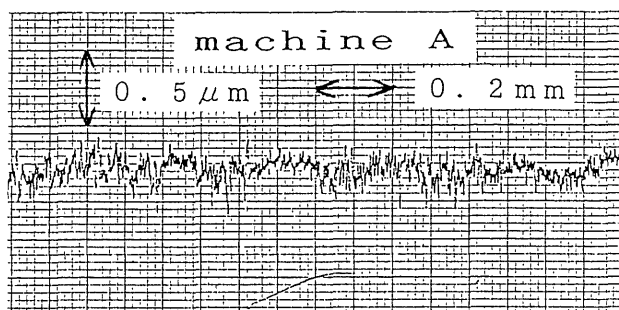


図 6 . 1 7 ピックフィードによる最大高さ



(a) 送り方向



(b) 軸方向

図 6.18 工作機械による粗さ曲線

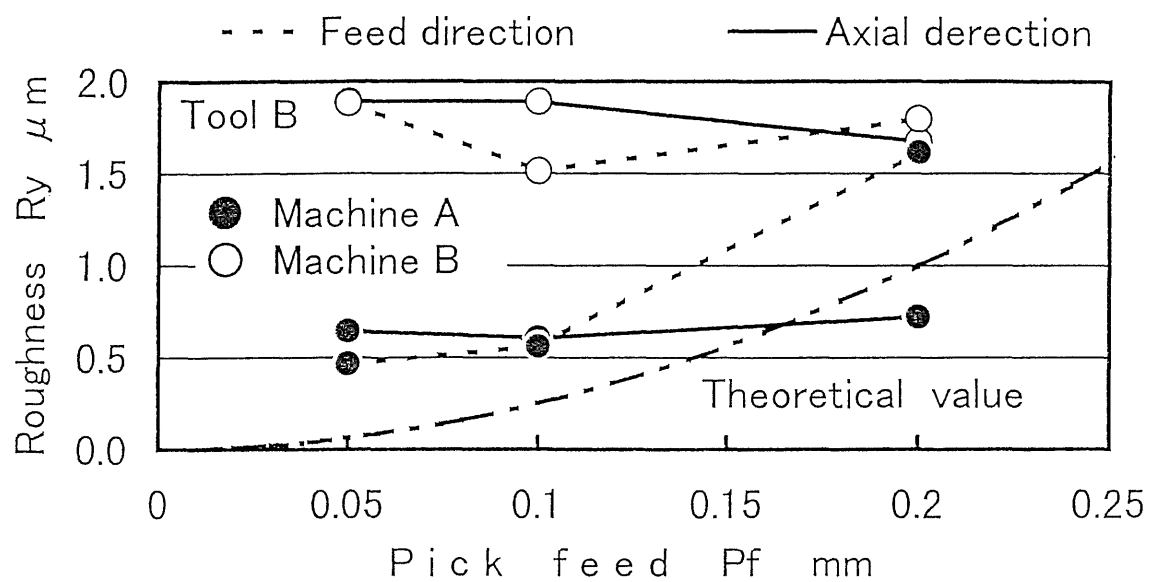


図 6. 1 9 ピックフィードによる最大高さ



## 7. 結言

- (1) エンドミルを用い，薄壁形状の仕上げ加工を通常の側面加工法で行う場合，安定して加工できる壁厚に限界があり，実験の条件では 4 mm 以上である．
- (2) 壁厚 4 mm 以下の薄壁の仕上げ加工を実現するため，軸方向の切込みを小さく設定し，その繰り返しによる加工法を試みた．実験の条件では高さ 25 mm，幅 70 mm の工作物に対し，壁厚 1.0 mm までの加工を実現しており，寸法誤差は 6  $\mu$ m であった．
- (3) 薄壁の両面に生じる加工誤差要因を (a) 主軸の傾き，(b) 工具の振れ回り等，(c) 工作機械の熱変形，(d) 切削力による工具および工作物の変形および (e) 測定力による工作物の変形に分類した．
- (4) 実験結果より上記の (a) ないし (e) の要因による誤差を推定するとともに，(d) および (e) の要因による誤差については FEM 解析により工具および工作物の変形量を求めた．実験結果と各誤差を加算した予測値は壁高さ 15 mm 以下ではほぼ一致するが，15 mm 以上では差が大きくなっており，これは他の誤差要因による影響と考えられる．
- (5) 工具を一定の間隔で主軸方向に送り，それを繰り返す軸方向送り加工を試み，加工面の送りおよび軸方向の最大高さ  $R_y$  が 1  $\mu$ m 以下となる高精度な加工面を実現した．
- (6) 上記サブミクロン加工は高速加工機により実現しており，実験の条件ではピックフィード  $P_f=0.1$  mm で最も生産性が高い．

## 謝 辞

本研究の遂行に当たり、工作機械に関しては（株）ツバメックス、工具に関してはオーエスジー（株）のご好意によった。また、加工実験やデータ整理等で自然科学研究科博士前期課程2年生飯田茂雄君および工学部4年生保谷 誠君の協力を得た。付記して深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 岩部洋育,水落真樹,横山和宏:エンドミルによる薄壁形状部品の高精度加工に関する研究(二軸加工法の提案と加工実験),日本機械学会論文集(C編),65,632,(1999-4),1719
- 2) 岩部洋育,島田智晴,横山和宏: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),日本機械学会論文集(C編),63,605,(1997-1),239
- 3) 岩部洋育,三星 宏:ねじれ刃エンドミルの偏心が加工精度に及ぼす影響,精密工学会誌,61,6,(1995),834
- 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),63,612,(1997-8),2878

## エンドミルによる薄壁形状の

## 高速・高精度加工に関する研究

新潟大学 岩部洋育 ○飯田茂雄

## 1. はじめに

本研究はエンドミルにより薄壁形状を高速・高精度で加工することを目的としている。通常の側面加工では加工できる壁厚に限界が生じ、切削力による工具および工作物の変形が無視できない<sup>1)</sup>。

そこで、軸方向に微小切込みを与えて繰り返し加工法(繰り返し段加工法と呼ぶ)を試み、通常加工法との比較によりその有効性を検討した。なお、この方法は工具経路が大幅に長くなるため主軸回転数および送り速度が高い高速加工機を用いて加工時間の短縮をはかった。

## 2. 実験条件および方法

実験には高速加工用NCフライス盤(東芝機械:ASV40)を用い、表1に示す仕上げ条件で繰り返し段加工を行った。工具には直径10mm、刃長28mm、ねじれ角30°の超硬ソリッドエンドミル(工具A)および同工具の先端部2mmに切れ刃部を残した工具Bの2種類を用いた。工作物にはアルミニウム合金5052sを用い、加工面の壁高さは25mm、壁厚は1ないし2mmであり、壁の裏面、表面の順序で加工した。

Table 1 Cutting conditions

Spindle revolution	min <sup>-1</sup>	30,000
Feed rate	mm/tooth	0.05
Depth of cut (repeating times)	mm	Zw=0.05(×500)/0.10(×250) Yw=0.5~2.5
Type of milling		Down milling

通常加工は工具Aを用いて行い、繰り返し段加工はまず工具Aにより同様に前加工面を仕上げ、その後工具Bを用いて設定寸法まで半径方向切込みYwを与えて行った。両面とも250または500回の繰り返しで仕上げ、加工誤差の測定は三次元測定機(東京精密:XYZAX SP600A)および粗さ計(東京精密:SURFCOM 2B)を用いて行った。

## 3. 実験結果と考察

図1は図中の条件で通常加工法により得られた加工面の軸方向粗さRvと壁厚Wtの関係を示す。図より壁厚が約4mm以下ではびびりの発生によって粗さが急増しており、この条件では通常加工法によって良好な加工面が得られる壁厚は4mmである。

図2は通常加工法により得られた加工面の誤差形状を示し、右図が表面、左図が裏面の結果である。図より両面ともに削り過ぎによる負の誤差を示すとともに壁高さ10~15mmの位置でくぼんだ形状をしており、最大値と最小値の差による形状誤差は20μmと大きい。この理由は工具の偏心によるもので<sup>2)</sup>、両面の誤差はほぼ左右対称となる。また誤差の平均値による寸法誤差は10.3μmであり、この値には工具の振れ回りによる影響も含まれていると考えられる<sup>3)</sup>。

図3は工具Bにより軸方向切込みZw=0.1mmで繰り返し段加工を行い、その誤差形状を図2と同様の座標軸で示す。図より繰り返し段加工によって形状誤差は8μmと大幅に改善し、壁厚Wt=1.2mmでもびびりが発生せず軸方向粗さはRv=0.6μmと小さい。一方、図中の破線は後述する加工面の予測誤差であり、実験値(●印)との差の平均値、標準偏差は表面で-2.6、1.2μm、裏面で-2.6、2.3μmと小さい。

図4は図3の結果に基づいて整理した繰り返し段加工による加工面の誤差要因のモデル図である。最初に加工される裏面上面の位置を基準にすると、誤差要因は次の4つに分類できる。すなわち、E1:主軸の傾斜による誤差、E2:工具径による誤差、E3:熱変形による誤差およびE4:測定圧(切削力を含む)による誤差である。図3において予測値がともに表面側に移動しているが、これは誤差要因E3の発生によるものである。また、壁の上面では下面に比べて約2μm厚さが小さくなっているが、この理由は誤差要因がE3>E4の関係にあるためと考えられる。

1999年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集

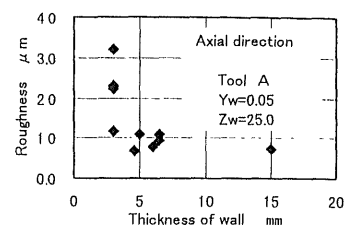


Fig.1 Relationship between roughness and thickness of wall

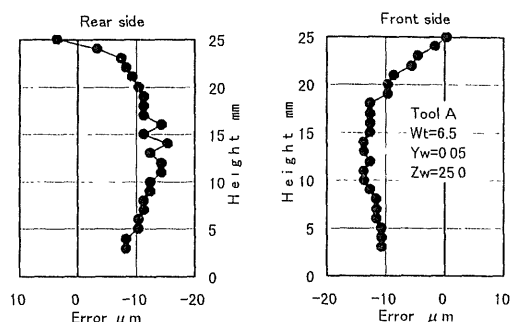


Fig.2 Cutting error (conventional method, Wt=6.5)

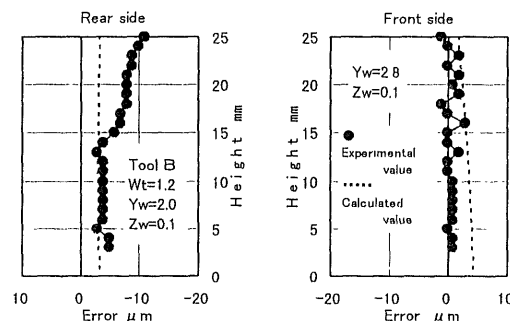


Fig.3 Cutting error (repeat milling method, Wt=1.2)

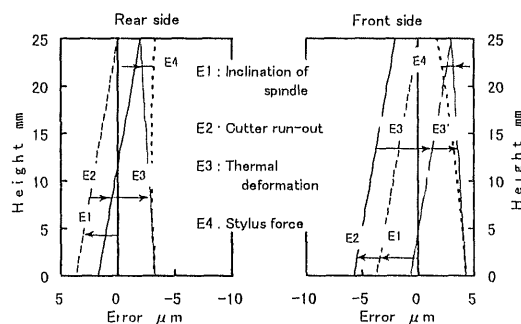


Fig.4 Error model

## 4. まとめ

エンドミルによる薄壁形状の高速・高精度加工を目的として通常の側面加工と繰り返し段加工を比較し、後者の方法が形状誤差の改善に有効であるとともに薄い壁厚の加工が可能であることを明らかにした。また、繰り返し段加工による加工誤差の要因を分類しそれに基づく予測値が実験値にほぼ一致することを示した。

## 参考文献

- 1) 岩部, 島田, 横山, 日本機械学会論文集(C編), 63, 605, (1997-1), 239
- 2) 岩部, 三星, 精密工学会誌, 61, 6, (1995), 834
- 3) 岩部, 竹本, 今井, 日本機械学会論文集(C編), 63, 612, (1997-8), 2878

# エンドミルによる高速加工における加工精度に関する研究

—軸方向送り加工による加工精度の改善—

新潟大学 岩部 洋 育

## 1. はじめに

高速加工機を用いたエンドミルの側面加工においても、加工面の高精度化を目的として、通常は微小切込みによる仕上げ条件が用いられる。しかし、工具の偏心によって形状誤差が生じ<sup>1)</sup>、逃げ面の粗さが加工面に転写するため<sup>2)</sup>、その実現は容易ではない。

そこで、本報ではエンドミルを一定の間隔で軸方向に送り、それを繰り返すことによって加工面を高精度に仕上げる軸送り加工を試み、その結果について報告する。

## 2. 実験条件および方法

実験には高速加工用NCフライス盤(東芝機械:ASV40)および比較のために汎用のNCフライス盤(大阪機工:MHA350)を用い、表1に示す仕上げ条件により行った。工具は直径(2R)10 mm、刃長28 mm、2枚刃、ねじれ角30°の超硬ソリッドエンドミル(工具A)および同工具の先端2 mmに切れ刃を残した工具Bを使用した。工作物はアルミニウム合金(JIS-5052s)を用い、高さ25 mm(幅160, 厚さ50mm)の壁の両面で加工を行っている。

加工誤差の測定は三次元測定機(東京精密:XYZAXSP600A)および粗さ計(東京精密:SURFCOM2B)を用いて行った。

## 3. 実験結果および考察

図1は側面の加工誤差を示し、(a)図が通常加工、(b)図が軸方向送り加工の場合である。(a)図より2種類の機械とも高さ10 mm付近で加工面がくぼんでいるが、これは工具の偏心による<sup>1)</sup>。一方、(b)図は工具Bにより仕上げており、ともに平坦な加工面を実現している。なお機械Aの場合、加工面が傾斜しているが、主軸が傾いているためと考えられる。

図2は誤差の最大値と最小値の差による形状誤差と平均値による寸法誤差を比較しており、機械Aに関しては主軸の傾斜を補正した結果を示した。図より両機械とも軸方向送り加工によって形状誤差は大幅に改善している。一方、機械Bで軸方向送り加工の寸法誤差が大きい理由は工具Bの取付け時の偏心が大きかったためと考えられる。

図3は軸方向送り加工による加工面の粗さ曲線を両機械で比較したものがある。機械Bの場合、送り方向にピクフィード(Pf)0.1 mmの周期が認められるが、最大高さRyは1.5  $\mu\text{m}$ であり、理論粗さ( $Pf^2/8R=0.25 \mu\text{m}$ )に比べて大きく、軸方向についてもRy=1.8  $\mu\text{m}$ と大きい。一方、機械Aによる加工面は変動幅が小さく、両方向ともにRy=0.5~0.6  $\mu\text{m}$ と高精度な加工面を実現している。この理由は機械Aの主軸が空気軸受けで支持されており、振れ回りが小さかったことによると考えられる。

図4は仕上げ面の最大高さとピクフィードの関係を示したものである。図より実験条件の範囲では軸方向送り加工により高精度な加工面を得る条件は、Pf=0.1 mmまでとなる。

Table 1 Cutting conditions

Spindle speed $\text{min}^{-1}$	N = 30000 (machine A) N = 2500 (machine B)
Depth of cut mm	radial: Yw = 0.05, 0.1, 0.2 axial: Zw = 25
Feed mm/tooth	Sz = 0.017 ~ 0.067 (axial feed) Sz = 0.05, 0.1 (conventional feed)
Pick feed mm	Pf = 0.05, 0.1, 0.2
Type of milling	down milling

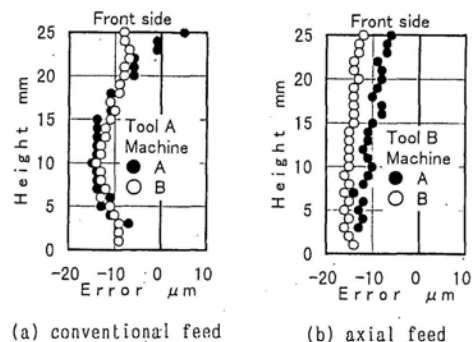


Fig.1 Machining error

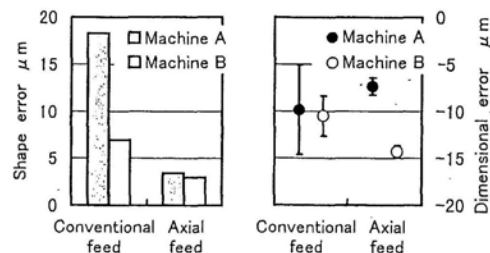


Fig.2 Shape error and dimensional error

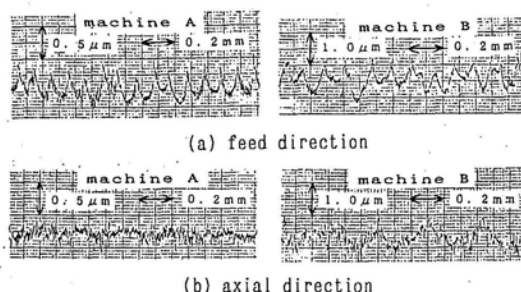


Fig.3 Surface roughness curves (axial feed milling)

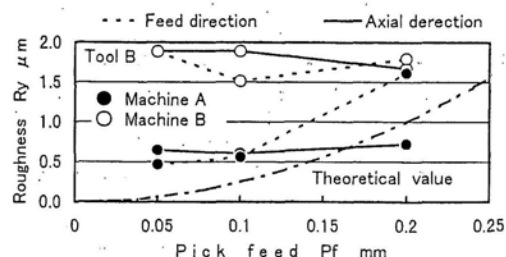


Fig.4 Surface roughness (axial feed milling)

## 4. 結論

高速加工機を用い、エンドミルによる側面加工の高精度化を目的として軸方向送り加工を試みた。その結果、通常の加工法と比較して形状誤差は大幅に改善し、Pf=0.1mm以下の条件では加工面の粗さが、送り方向および軸方向ともに最大高さ1  $\mu\text{m}$ 以下となる高精度な加工面を実現した。

- 文献 1) 岩部, 三星, 精密工学会誌, 61, 6, (1995), 834.  
2) 岩部, 大瀬戸, 後藤, 坂岡, 石川, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 133.