

平行2軸回転工具によるハニカム形状部品の
高精度・高能率加工法に関する基礎研究

(課題番号 06650134)

平成7年度科学研究費補助金(一般研究(C))

研究成果報告書

平成9年3月

研究代表者 岩部 洋 育

(新潟大学工学部・助教授)

平成7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
平行2軸回転工具によるハニカム形状部品の
高精度・高能率加工法に関する基礎研究
- (2) 課題番号
06650134
- (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6年度 | 1,700千円 |
| 平成7年度 | 600千円 |
| 計 | 2,300千円 |
- (6) 研究発表
- ア．学会誌等 該当なし
- イ．口頭発表
- (i) 岩部洋育，水落真樹：平行2軸回転工具による高精度加工に関する研究，1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，1996年3月25日
- (ii) 岩部洋育，水落真樹，横山和宏，今井純一：平行2軸回転工具による薄壁の高精度加工法に関する研究，1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，1997年3月26日

目 次

1 . 緒 言	3
2 . 平 行 2 軸 加 工 法	5
2 . 1 1 軸 加 工 法 の 問 題 点	5
2 . 2 平 行 2 軸 加 工 法 の 提 案	9
3 . 実 験 条 件 お よ び 方 法	11
3 . 1 実 験 条 件 お よ び 使 用 機 器	11
3 . 2 実 験 方 法	17
4 . 工 作 物 お よ び 工 具 の 変 形 解 析	24
4 . 1 F E M に よ る 解 析 方 法	24
4 . 2 主 軸 剛 性 の 定 式 化	40
5 . 実 験 お よ び 解 析 結 果 と 考 察	44
5 . 1 切 削 力	44
5 . 2 解 析 結 果	67
5 . 3 加 工 誤 差	88
6 . 結 言	114
参 考 文 献	116
付 録 (研 究 発 表 別 刷 り 2 編)	117

1. 緒言

近年、航空機産業を中心に軽量かつ高剛性なハニカム構造部品の需要が高まってきている。ハニカム構造とは六角形の薄壁中空構造であり、通常はNCフライス盤あるいはマシニングセンタの主軸に工具を1本取付けて加工を行う（以下一軸加工と呼ぶ）。薄壁を通常の一軸加工によって側面加工を行う場合、壁に垂直方向の切削力（ y 分力）により壁が変形し、大きな加工誤差を生じてしまう。したがって、一軸加工において加工誤差を抑制するためには、1刃当たりの送りおよび切込みを小さくする以外に方法はなく、加工能率の低下は避けられない。また、ハニカム構造部品を構成する薄壁は両端で互いに結合されているため、薄壁の結合部は剛性が高く、中央部は剛性が低い。よって薄壁の位置により異なる加工誤差を生成することも問題点となる。

そこで、本研究では加工能率を低下させることなく薄壁を高精度に加工することを目的として、平行二軸加工法を提案した。平行二軸加工法とは、2本の工具で挟み込むように薄壁の側面加工を両面同時に行う加工方法である。本加工法の特徴は薄壁の両加工面において切削条件を等しくすることにより、薄壁に垂直方向の切削力は相殺され、薄壁の変形を大幅に減少できることである。また、本加工法を実現できる装置および工具を試作し、ハニカム構造部品を想定した工作物を用い加工実験を行った。測定した切削力および加工誤差を一軸加工の結果と比較した結果、本加工法は工作物においてより剛性の低い条件下での加工に対し有効であることを確認した。さらに一軸加工および二軸加工の加工誤差を予測するために、測定した切削力を用いてFEMによる静荷重変形解析も行った。FEM解析においては、各条件に対応した工作物および工具のモデルに対し、切削力を切削機構に基づいて切れ刃の位置に相当する節点に与

えている。また，求めた変形量に予備実験により得た主軸の剛性に基づく変形量を加算し，加工誤差の計算値とした。加工誤差の計算値は実験値にほぼ一致しており，送り方向の位置および壁厚の違いによる変化についても精度よく予測できた。また，加工誤差に占める工作物の比率を求めることにより，壁厚の減少に伴い二軸加工の効果が増大することを示した。

2. 平行二軸加工の提案

2.1 一軸加工法の問題点

図2.1は一軸加工によりハニカム構造部品の一部を模した工作物を側面加工している状態であり，下向き切削を想定している．加工中に工作物は切削力より変形するが，壁に垂直方向の切削力が変形に大きく影響を及ぼす．また，反作用力により工具も変形するが，薄壁形状部品の加工において通常は工作物に比べ工具の方が剛性が高く，変形量も小さい．図中の F_x' ， F_y' および F_z' はそれぞれ反作用力の x 分力， y 分力，および z 分力である．下向き切削では，工具の受ける反作用力の x 分力は送り方向に等しく， y 分力は薄壁から離れる方向であり， z 分力は工具が引き抜かれる方向に作用している．図において加工の進行とともに工作物の剛性は切削位置により異なり，薄壁の中央部では低く，薄壁の両端部では高い．したがって，加工中における薄壁の変形量も位置により異なり，薄壁の両端部に比べ中央部で加工誤差が大きくなるため，送り方向に対し一定の加工面を得ることは困難である．

図2.2は図2.1に示した薄壁の側面加工を送り方向から見た状態である．一軸加工により薄壁側面の仕上げ加工を行う場合，図2.2に示すように，初めに目標の壁厚 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加工を行なう．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)図において， y 分力 F_y により工作物は変形し，その変形量は壁高さに伴い増大している．一方，反作用力 F_y' により工具も変形しその変形量は壁高さに伴い減少する．加工後は切削力が開放され，それぞれの変形量は壁高さ方向の位置で加算されて(b)図に示す表面の加工誤差となる．加工誤差に占める工作物および工具の割合は，

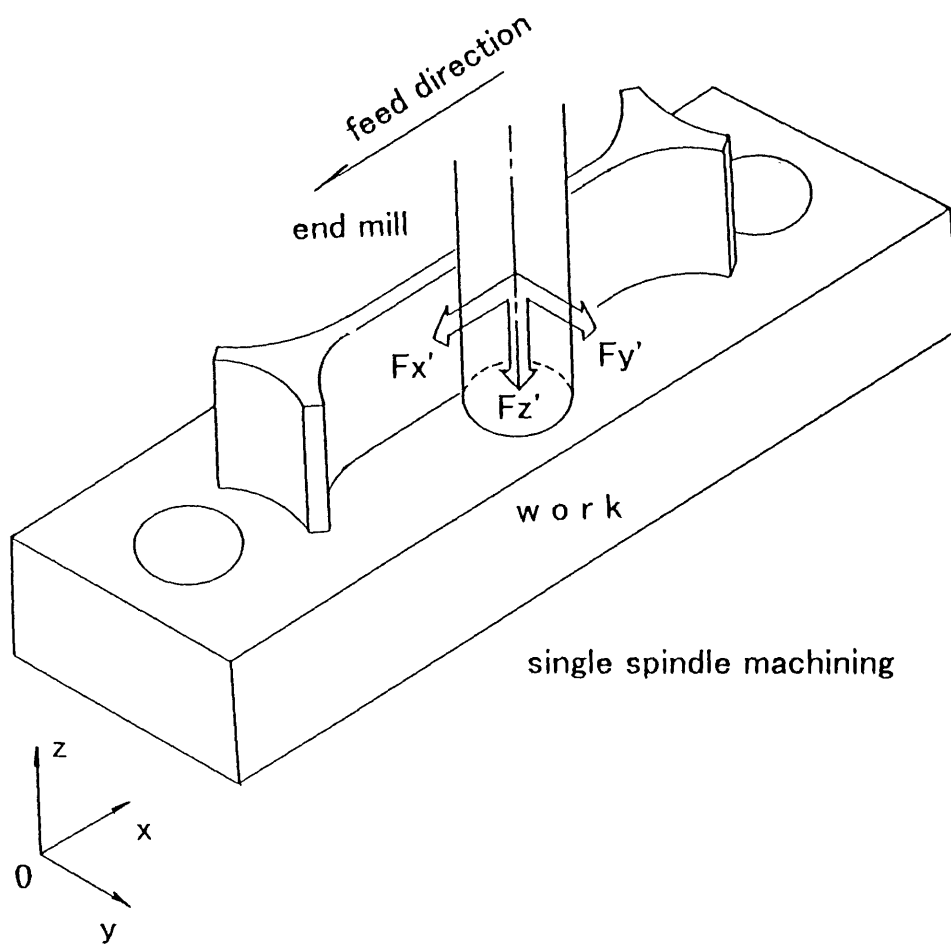
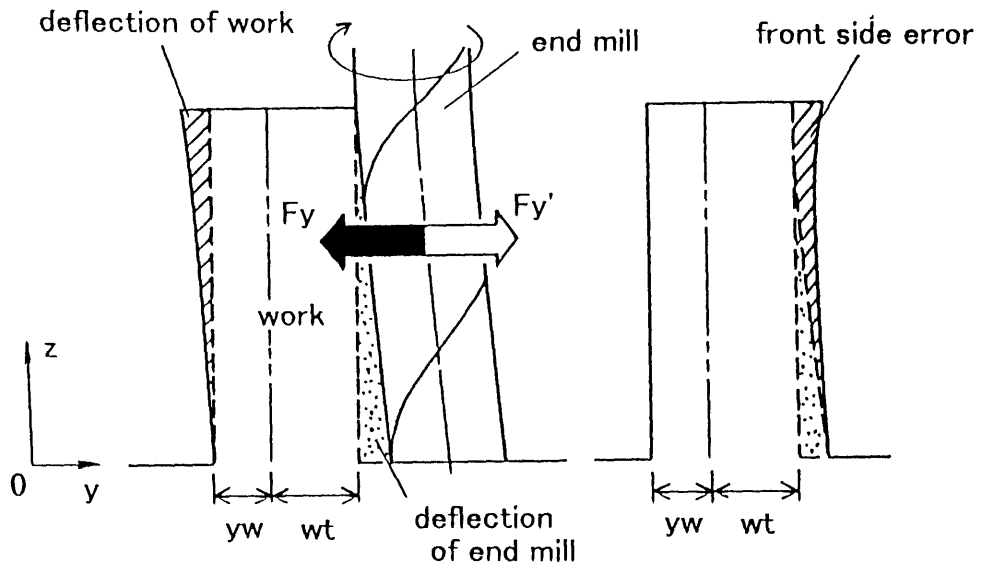


図2. 1 一軸加工法による薄壁形状部品の側面加工

front side machining

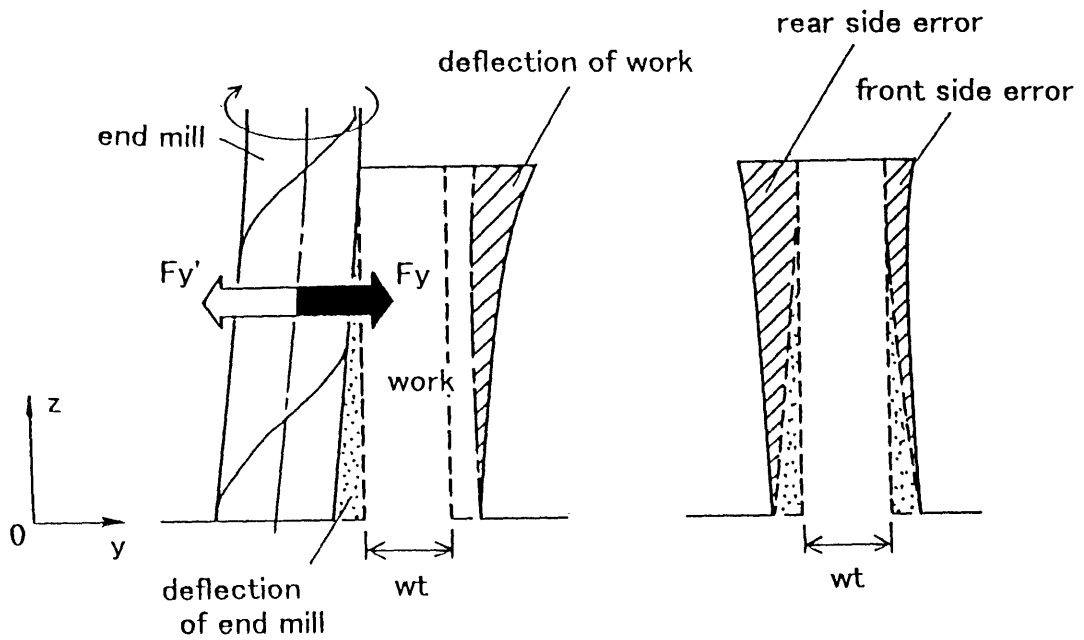


(a) 切削状態

(b) 加工誤差

図 2. 2 一軸加工法による薄壁の表面における切削状態と加工誤差

rear side machining



(a) 切削状態

(b) 加工誤差

図 2. 3 一軸加工法による薄壁の裏面における切削状態と加工誤差

下面近傍では工具の割合が大きく，壁高さに伴い工作物の割合が増加し，上面においては工作物の割合が最大となる．

図 2. 3 の (a) 図は裏面における側面加工の状態であり，目標の壁厚 w_t に表面の加工誤差が加わった薄壁を加工することになる．ただし，表面の加工誤差は通常壁厚 w_t および半径方向切込み y_w に比べ小さく無視できる．したがって，表面に比べ半径方向切込み y_w だけ小さい壁厚を加工する裏面の場合，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い．工具の変形量は表面の場合とほとんど変わらないため，加工後に生成する加工誤差は (b) 図に示すように工作物の変形量の差の分，裏面の方が大きいことが分かる．つまり，一軸加工においては加工面の順序（表面を先に加工し，その後に裏面を加工する）により加工誤差は両加工面で異なる．よって位置による加工誤差の違いに加え，加工面による加工誤差の違いも一軸加工の問題点である．

2. 2 平行二軸加工法の提案

2. 1 節で述べた一軸加工法の問題点を回避するために，本研究では平行二軸加工法を提案した．図 2. 4 は二軸加工によってハニカム構造部品の一部を模した工作物を側面加工している状態であり，下向き切削を想定している．本加工法の特徴は図に示すように薄壁を 2 本の工具で挟み込むように加工することで，薄壁に垂直方向の切削力を相殺できることである．また，二軸加工を実現するためには図 2. 5 に示す両加工面の切削条件を等しくしなければならない．よって，右刃右ねじれ刃および左刃左ねじれ刃の工具を切れ刃の位相が等しくなるように各軸に取付け，両加工面において下向き切削になるよう一方の軸を逆転させる必要がある．

二軸加工においては図 2. 4 に示すように工具に対し，反作用力 F_x' ， F_y' および F_z' がそれぞれの工具に加わり，切削力の方角については一軸加工と同様に， x 分力は送り方向に等しく， y 分力は薄壁から離れる方向であり， z 分力は工具が引き抜かれる方向に作用している．一方，工作物については図 2. 5 に示すように大きさが等しく，向きが反対方向の切削力 F_y が両軸の工具から作用するため，工作物において F_y は相殺される．また両軸から工作物に作用する x および z 分力は方向がそれぞれ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．したがって，本加工法により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を除去できる．なお，反作用力 F_y' により工具が変形するため工具の変形に起因する加工誤差は残る．両加工面に生成する加工誤差は下面で最大となっており，壁高さに伴い減少している．しかし，壁厚が小さくなるほど一軸加工における工作物の変形量は大きくなり，工作物の変形に起因する加工誤差を含まない二軸加工法の加工誤差改善効果は高くなると考えられる．

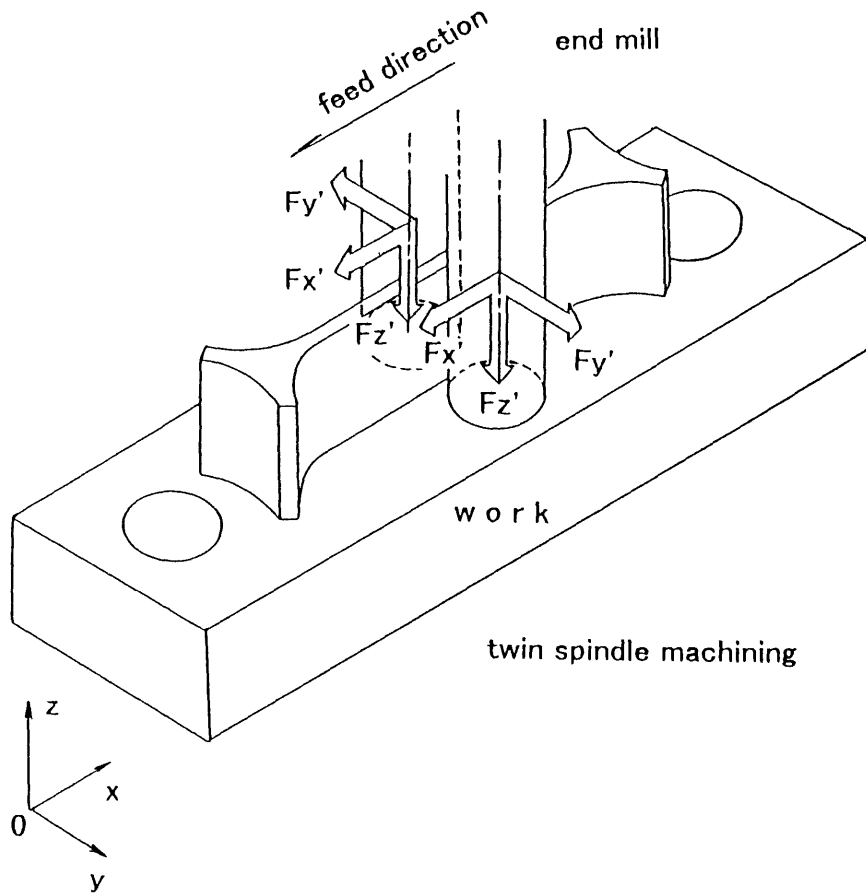


図2.4 二軸加工法による薄壁形状部品の側面加工

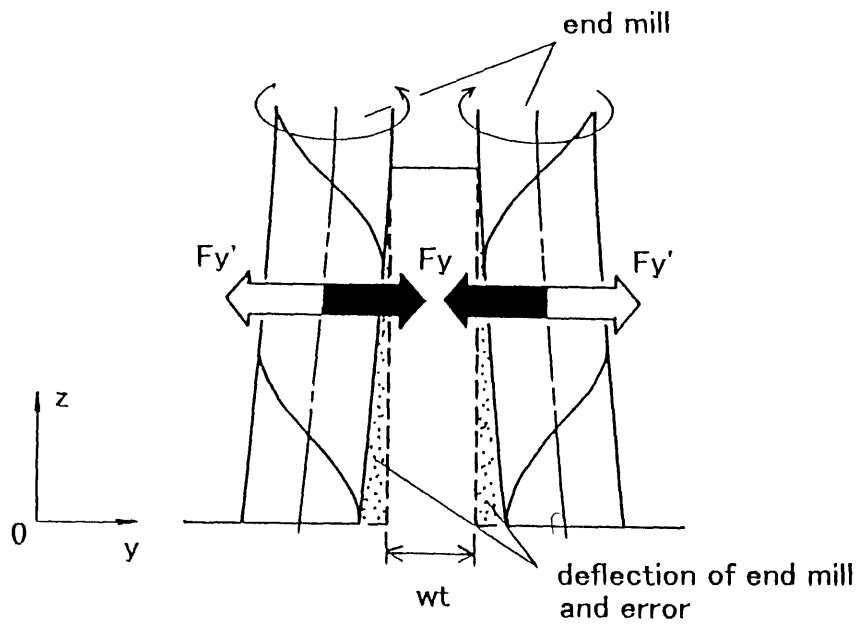


図2.5 二軸加工法による薄壁の切削状態と加工誤差

3. 実験条件および方法

3.1 実験条件および使用機器

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：OKK NCフライス盤MH350（大阪機工（株））

制御装置：MELDAS（三菱電気（株））

エンドミル：直径42，43，44mm，右刃右ねじれ，左刃左ねじれ，ねじれ角45°，2枚刃，高速度鋼

工作物：アルミニウム合金（JIS A5052s）

切削条件：切削速度10.6～11.1m/min，半径方向切込み $y_w = 0.6$ mm，軸方向切込み $z_w = 25$ mm，1刃当たりの送り $s_z = 0.1$ mm/tooth，下向き切削

測定機器：[切削力の測定]

動力計 3成分動力計 9257A
(KISTLER)

アンプ チャージアンプ 5007型
(KISTLER)

記録計 8001メモリーハイレコーダー
(HIOKI)

[加工誤差の測定]

三次元測定機 x y z a x SP600A
(東京精密（株）)

試作した二軸装置，工具および工作物の形状および寸法を図3.1ないし図3.3に示す。図3.1の二軸装置は，上部のテーパ部

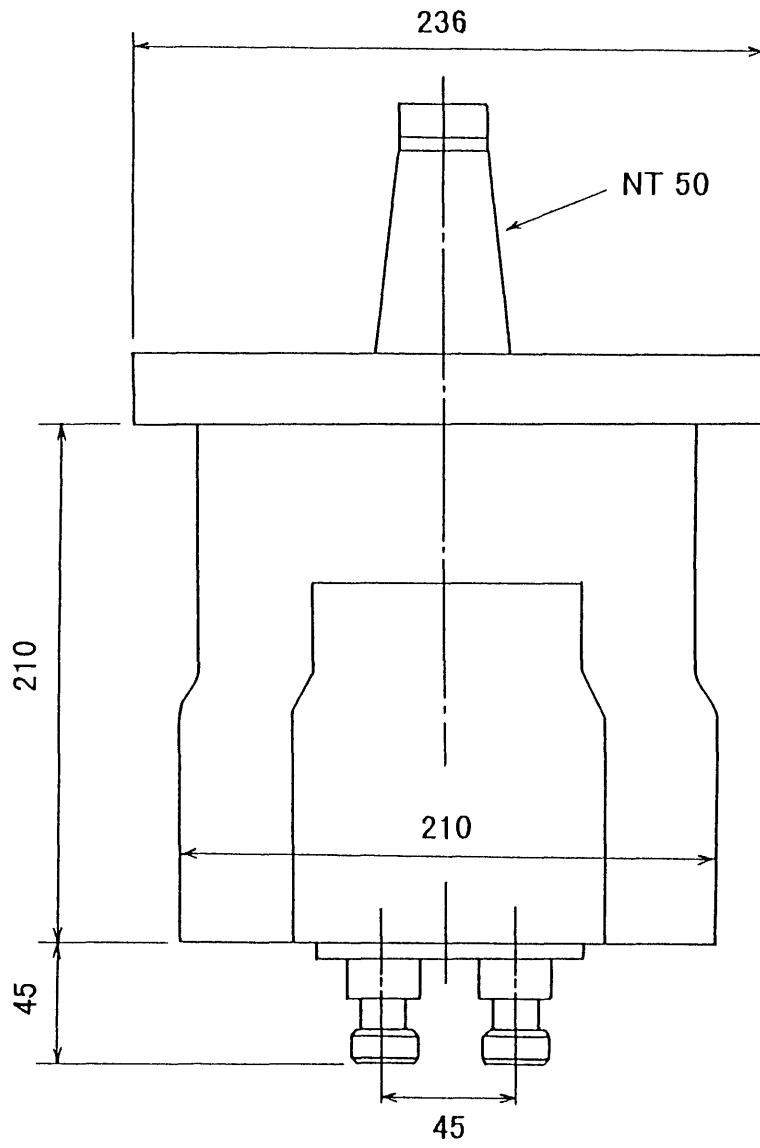
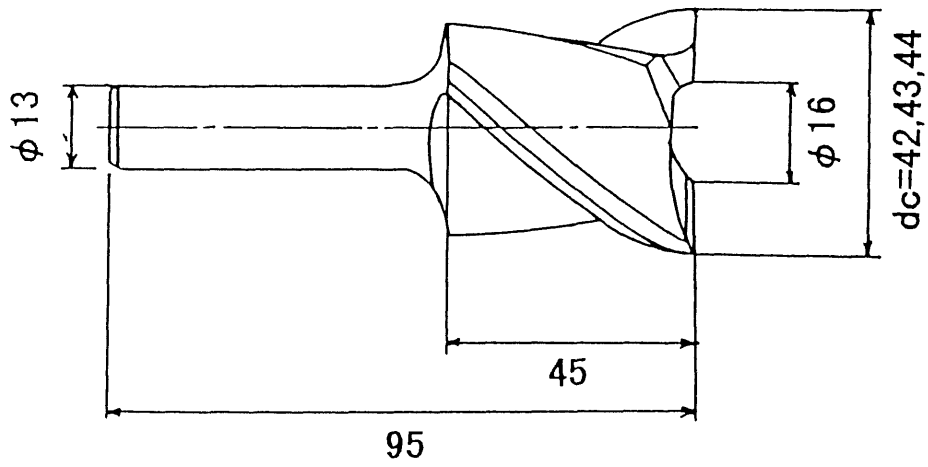


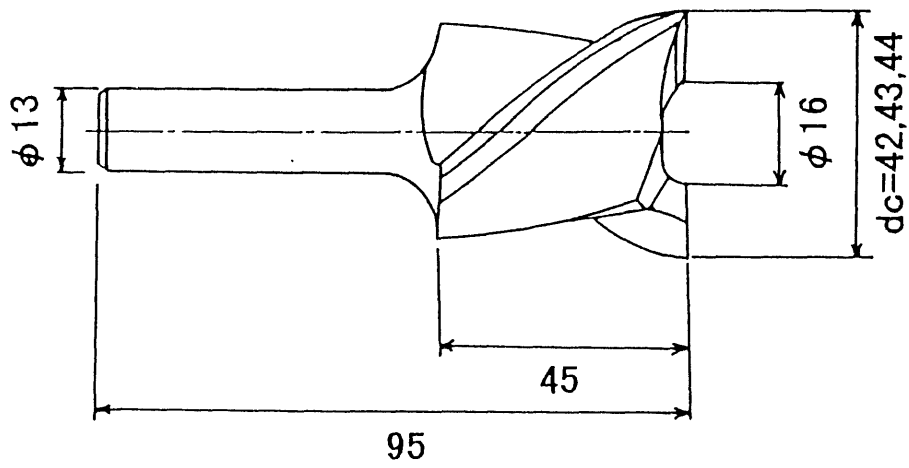
図3.1 二軸装置の形状および寸法

をドローパーによりNCフライス盤の主軸に取付けられ，さらにボルトで固定される．図3.2に示す工具において，試作した装置のチャックによりシャンク径は13mmであり，切れ刃の直径（dc）は42，43および44mmである．なお，（a）図は右刃右ねじれ刃，（b）図は左刃左ねじれ刃のエンドミルとなっている．図3.3に示す工作物の壁厚wtは，1，2および3mmの3種類の仕上げ寸法であり，前加工では表面および裏面にそれぞれ半径方向切込みyw=0.6mmを加えた壁厚にしている．また，ハニカム形状部品を想定して薄壁の両端は節状に加工しており，節部の曲面部分は工具半径に一致させている．

写真3.1は試作した二軸加工装置をNCフライス盤の主軸に取付けた状態であり，写真3.2は二軸加工装置に工具を取付け，薄壁形状部品の二軸加工を行っている様子である．



(a) 右刃右ねじれ刃



(b) 左刃左ねじれ刃

図3.2 工具の形状および寸法

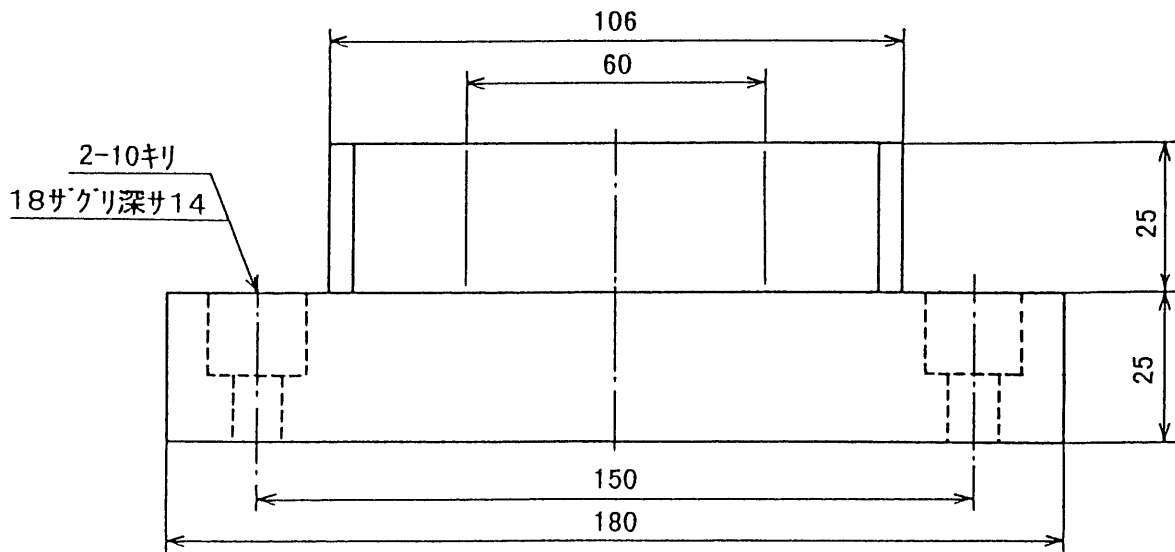
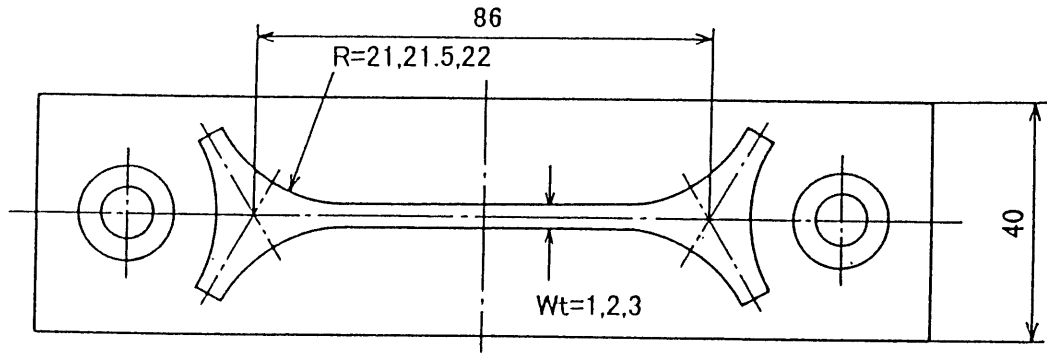


図 3 . 3 工作物の形状および寸法



写真 3 . 1 二軸加工装置

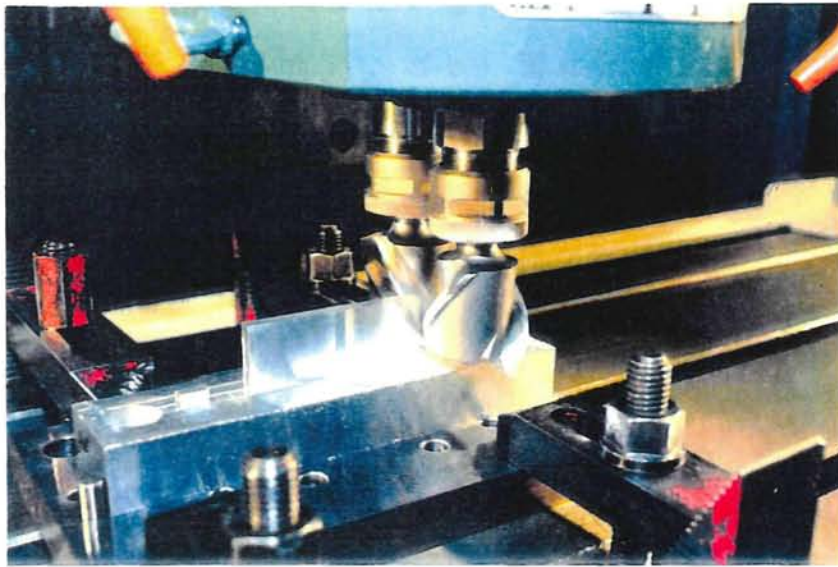
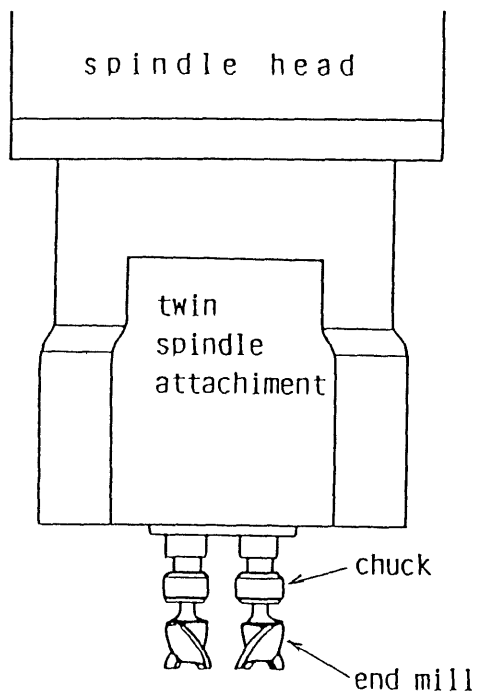


写真 3 . 2 二軸加工による薄壁の切削状態

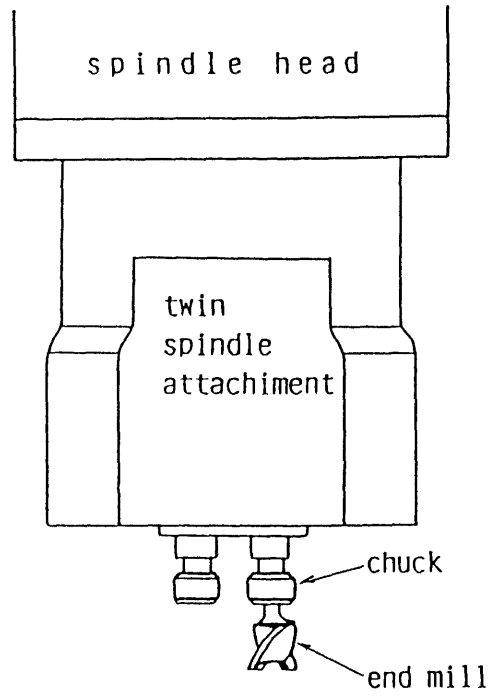
3.2 実験方法

3.2.1 加工方法

二軸加工の実験は，図3.4の(a)図に示すようにNCフライス盤の主軸に取付けられた装置に，右刃右ねじれおよび左刃左ねじれのエンドミルを切れ刃の位相が等しくなるよう両軸に取付け，3.1節に示した切削条件でx軸方向に送りを与えて行なった。なお，試作した装置の軸間は図3.1に示すように45mmと固定されているため，工具径を変えて各壁厚に対応させた。すなわち，壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ を加工する場合それぞれ直径44mmの工具の組み合わせで行い，壁厚 $w_t = 2\text{ mm}$ の場合は直径43mmの工具，壁厚 $w_t = 3\text{ mm}$ では直径42mmの工具をそれぞれ使用した。一方，比較のために行った一軸加工は軸剛性や振れ等の機械特性を二軸加工の場合と等しくするため，(b)図に示すように装置に1本の工具のみを取付けて加工を行った。また，NCフライス盤のテーブルに工作物を取付けた際に，手前側に面する加工面を表面として先に加工し，その後にコラム側に面する加工面を裏面として加工し区別した。



(a) 二軸加工法



(b) 一軸加工法

図3.4 加工法による工具の取付け状態

3.2.2 加工誤差および切削力の測定方法

加工誤差は図3.5に示す壁両端部にそれぞれ幅5mmの基準面を作成し、これらの基準面を利用して、三次元測定機によりz方向に1mm間隔で測定を行った。また、図3.6に示す送り方向(x方向)に対しては、薄壁の剛性が高い位置として $x = 2.5\text{ mm}$ の位置、剛性が低い位置として $x = 25\text{ mm}$ の位置を選択した。これらはそれぞれ薄壁の端部と中央部の位置であり、送り方向の位置により加工誤差が異なることが予測されるためである。

切削力の測定は、治具を用いて工作物に取付けられた動力計によりx, yおよびz分力の3成分を測定し、アンプを介して記録計で出力した。

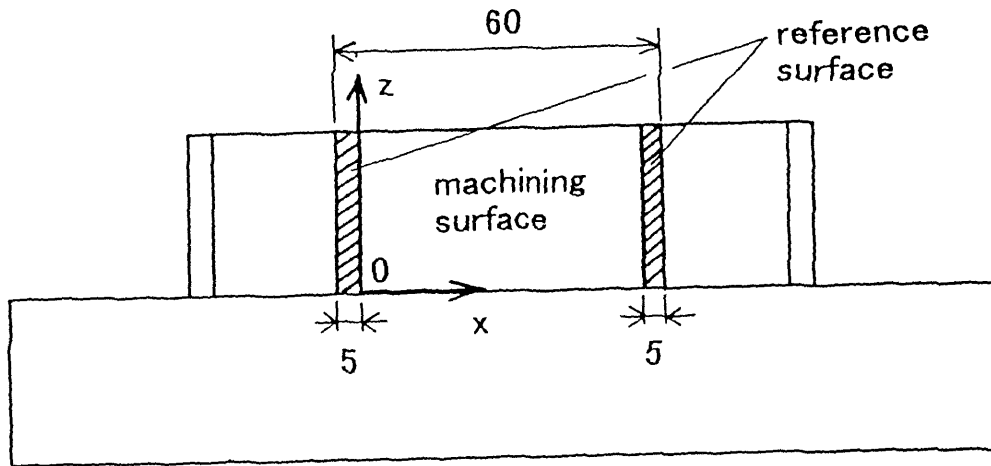


図 3 . 5 工作物における基準面の位置

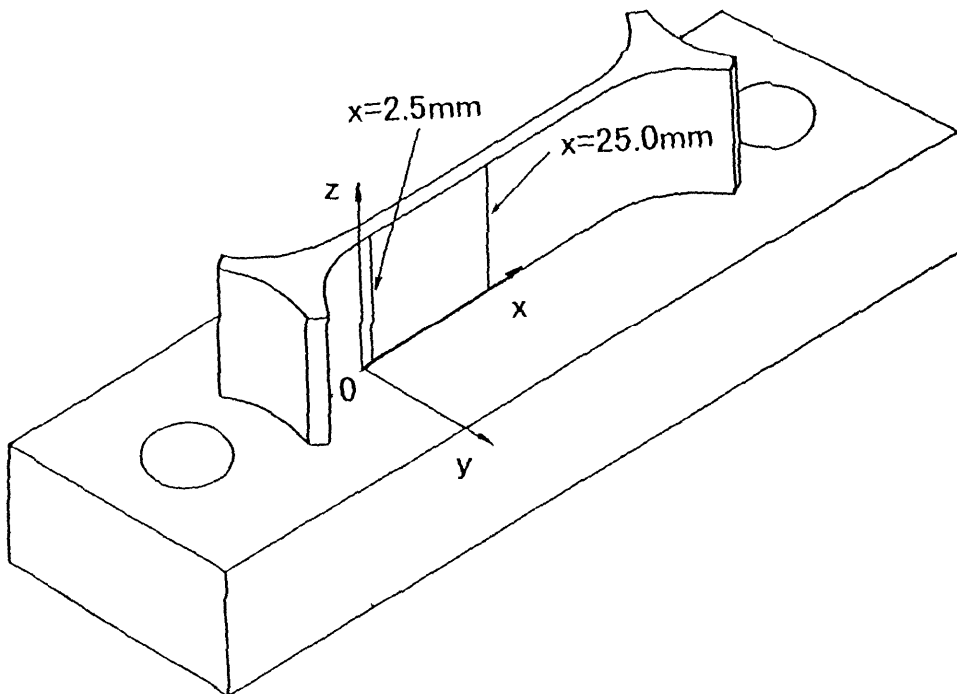


図 3 . 6 工作物の測定位置

3.3.3 主軸剛性の測定方法

試作した装置は軸間を狭くすることで主軸径が制約され、通常のNCフライス盤に比べて主軸剛性が低い。したがって、静荷重における変形量に基づいて加工誤差を予測する場合、工作物および工具の他に主軸の変形量も大きくなることが予測され、これらの影響も考慮する必要がある。したがって、図3.7に示す静剛性試験より各高さの変形量を測定し、主軸の剛性に基づく変形量の実験式を求めた。試作した装置の主軸にテストバーを取付け、テーブルに固定された滑車を介してステンレスワイヤーにより重りと結び、テストバーの変位をダイヤルゲージ ($1\mu\text{m}/\text{div}$) によって測定した。また、加工実験において反作用力 F_y' は、表面の軸においては手前側、裏面の軸はコラム側に作用し、両軸がお互い離れる方向に変形する。したがって、主軸剛性の測定では表面の軸は、二軸装置を実験の状態にNCフライス盤に取付けてテストバーに荷重を加えた。また、裏面の軸は二軸装置をNCフライス盤の主軸を中心に 180° 回転させて取付け、荷重を加え変形量を測定した。テストバーは図3.8に示す形状および寸法であり、材質はエンドミルと同じ高速鋼である。測定点および荷重点は同じ位置であり、テストバー端面 ($z=0$) から 5, 15, 25, 35, 44 mm の5点で順に測定を行った。また、求める実験式は切削力の y 分力のみを使用するが、加工実験の y 分力はいずれの条件においても 80 N 以下であるため、主軸剛性を精度よく測定するためには 80 N 以上に相当する重りを使用する必要がある。そこで、本試験では 80 N を上回る重りとして 10 kgf (98 N) の重りを用いた。

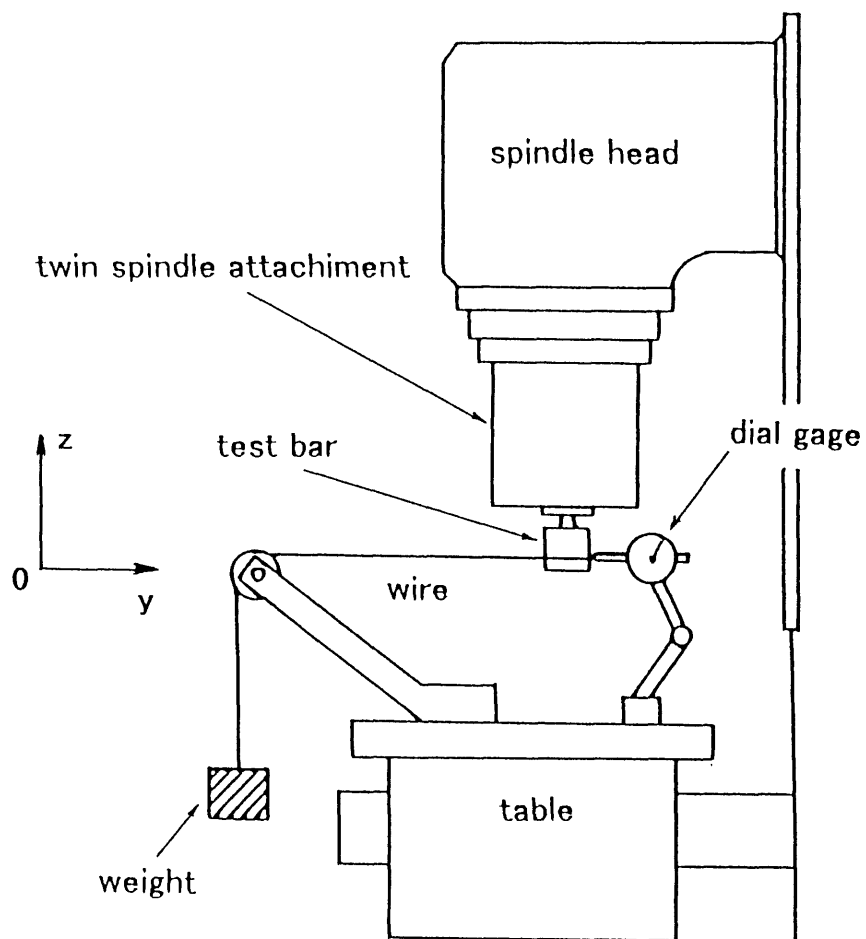


図 3 . 7 主軸の静剛性試験

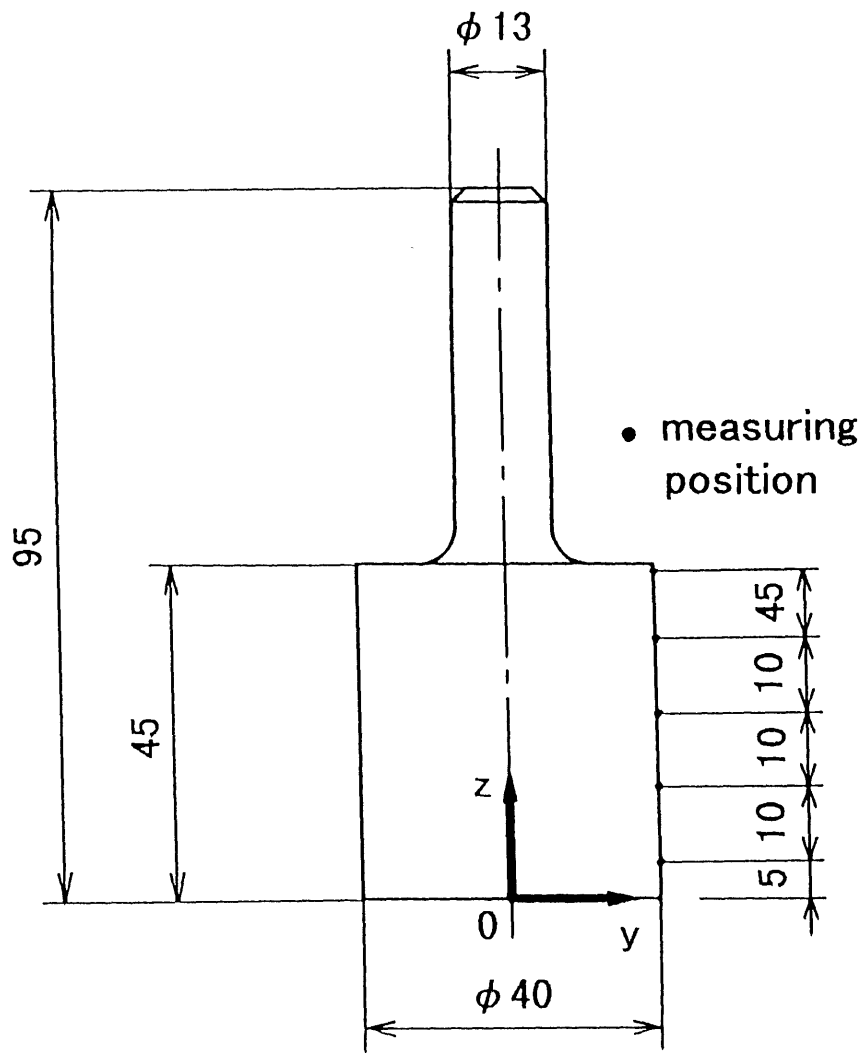


図3.8 テストバーの形状，寸法および測定位置

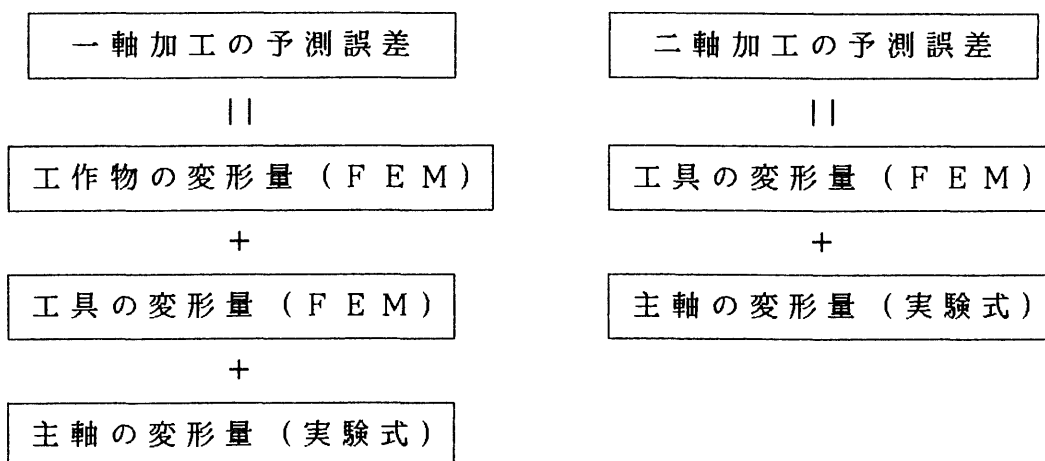
4. 工作物および工具の変形解析

4.1 FEMによる変形解析

4.1.1 FEMによる解析方法

工作物および工具の変形は静的な弾性変形の範囲に含まれている¹⁾。したがって、静荷重を加えたときの変形量をFEMにより各モデルについて求め、加算することにより加工誤差を予測できると考えた。表4.1に示すように一軸加工の加工誤差を予測する場合、工作物および工具の変形量をFEMにより求め、さらに実験式による主軸の変形量を加算した値を加工誤差とした。一方、二軸加工の場合は、工作物は変形しないと仮定しているため、工具および主軸の変形量のみを加算して加工誤差とした。

表4.1 一軸および二軸加工の誤差予測



4. 1. 2 工作物の形状と要素分割

壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ の工作物の表面を送り方向 $x = 25 \text{ mm}$ の位置で一軸加工していると仮定した場合，FEM解析における工作物モデルは図4.1のように示される．工作物の要素分割は8節点立体要素により行ない，薄壁における仕上げ部分の要素サイズは $\Delta x = 2.5 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 1.0 \text{ mm}$ および $\Delta z = 2.5 \text{ mm}$ としている．さらに実際の加工状態に近づけるため，切削の進行によって加工される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²⁾，この部分の要素サイズは $\Delta x = 2.5 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 0.6 \text{ mm}$ および $\Delta z = 2.5 \text{ mm}$ としている．また，加工面と未切削領域部分のつなぎは三角柱の要素を用いて作成している（拡大図参照）．ただし，表面の加工を想定した解析については，裏面に半径方向切込み y_w に相当する要素を付け加えており，加工の順序による実質的な壁厚 ($w_t + y_w$) を考慮している．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，要素サイズは $\Delta x = 2.5 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 1.0 \sim 8.7 \text{ mm}$ および $\Delta z = 3.6 \sim 8.9 \text{ mm}$ と傾斜をつけて分割数を薄壁部分に比べ少なくしている．工作物モデルは壁厚あるいは送り方向の位置により異なるため，総節点数は4123ないし6297，総要素数は2438ないし3812となった．

送り方向の未切削領域を考慮したモデルによる解析と比較するために，図4.2に示す送り方向の未切削領域を考慮しないモデル（拡大図参照）を作成し解析を行った．両工作物モデルを用いて解析を行ったときに，予測値の差が明確に現われる条件として最も剛性の低いと思われる条件として，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ，送り方向 $x = 25 \text{ mm}$ の位置を選択した．薄壁部分における仕上げ部分の要素サイズは $\Delta x = 2.5 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 1.0 \text{ mm}$ および $\Delta z = 2.5 \text{ mm}$

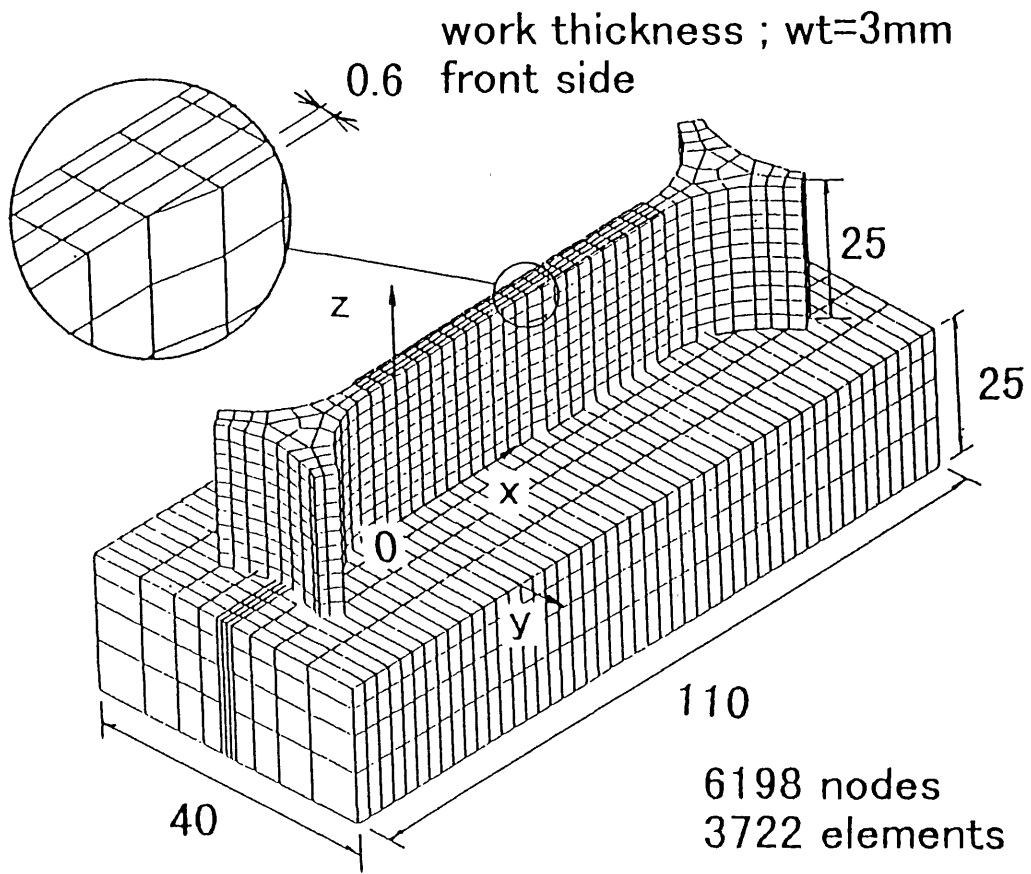


図4.1 工作物モデルの形状および寸法

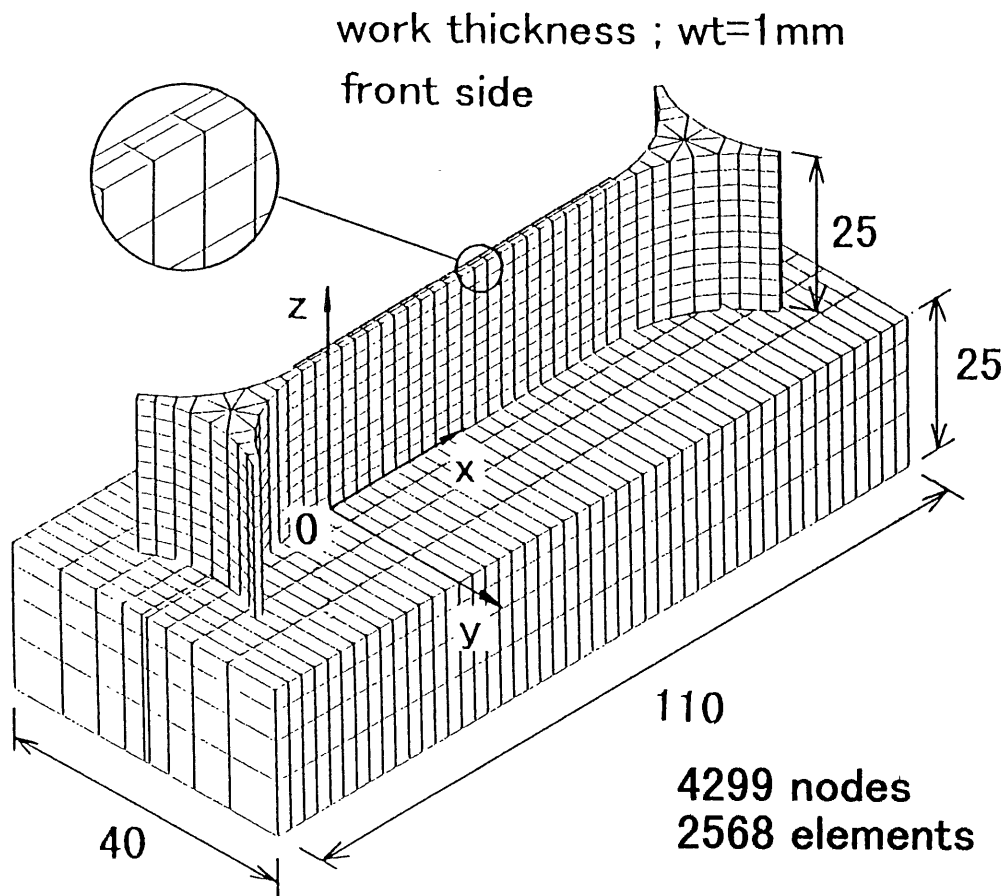


図4. 2 送り方向の未切削領域を考慮しない工作物モデル

mとしている。なお，表面の解析では裏面に $\Delta x = 2.5 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 0.6 \text{ mm}$ および $\Delta z = 2.5 \text{ mm}$ の半径方向切込みywに相当する要素を付け加えている。

解析は汎用構造解析プログラム（ansys-PC）を用い，弾性変形の静的解析を行った。

4. 1. 3 工具の形状と要素分割

図4. 3はFEM解析における工具モデルの形状および要素分割を示している。加工実験では壁厚によって工具径を変えて対応しているが、FEM解析においては全て同じ工具モデルを使用した。工具モデルの直径 d_c は40mmであり、加工実験に用いた工具との差は最大4mmである。しかし切れ刃の径に比べシャンク径は13mmと1/3以下であり、主にシャンク部分で変形していると考えられるため、4mm程度の切れ刃径の違いは無視できる。図4. 4の(a)図は工具モデルの $z = 0$ mmの位置における断面形状であり、中心部は六面体要素、外周部は三角柱要素も含んでいる。六面体要素の要素サイズは $\Delta x = 2.0$ mm、 $\Delta y = 2.0$ mmおよび $\Delta z = 2.5$ mmとしている。なお、 $z = 0$ mmの位置の断面形状において刃先に相当する部分を $x = 0$ mm、 $y = 20$ および -20 mmとして座標を定め、回転角 $\theta = 0^\circ$ とした。(b)図は $z = 45$ mmの位置における工具断面形状であり、工具のねじれ角 $\eta = 45^\circ$ から回転角 $\theta = -114.6^\circ$ と変化している。要素サイズは $z = 0$ mmの位置における断面形状の場合に等しい。(c)図は $z = 47.5$ mmの位置の断面形状であり、切れ刃部分とシャンク部分をつなぐ過渡区間である。また、切れ刃部分とシャンク部分を滑らかにつなぐため、要素サイズを $\Delta x = 1.4$ mm、 $\Delta y = 1.4$ mmおよび $\Delta z = 2.5$ mmと絞り込むように小さくしている。形状はほぼ円であるが直径は14mmとシャンク径13mmに比べやや大きくなっている。回転角は $z = 45$ mmの位置から変化していないため、 $\theta = -114.6^\circ$ となっている。(d)図はシャンク部分に当たる $z = 52.5$ mmの位置における断面形状である。直径は13mmであり、回転角 $\theta = -114.6^\circ$ となっている。過渡区間 $z = 47.5$ mmの位置における断面形状に比べ要素数は同

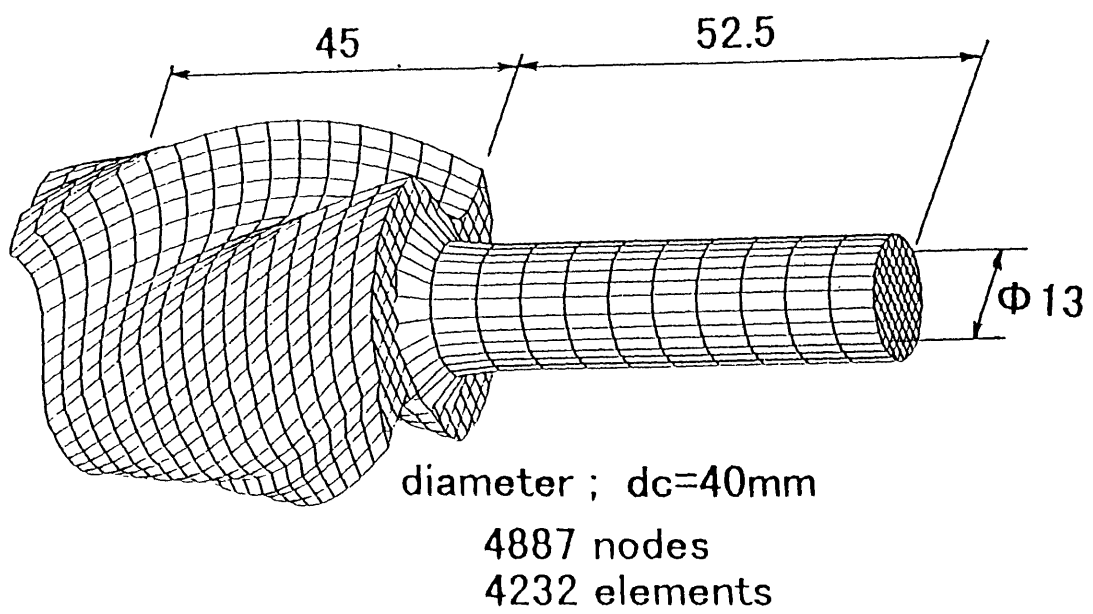
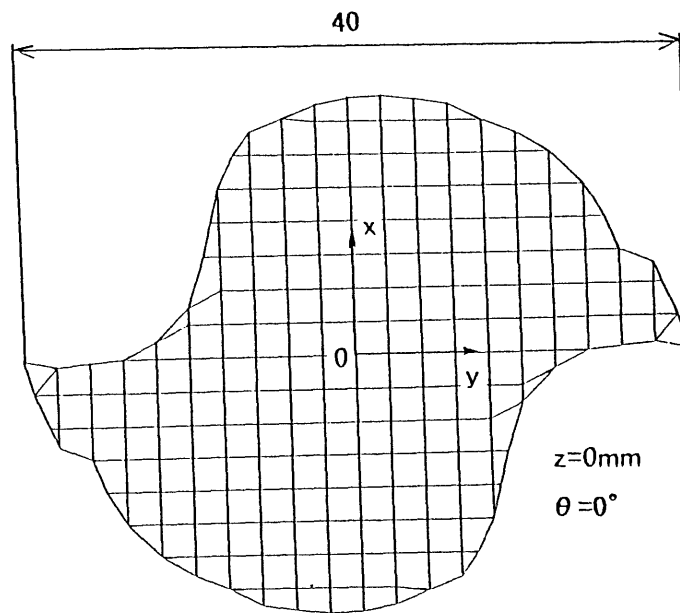
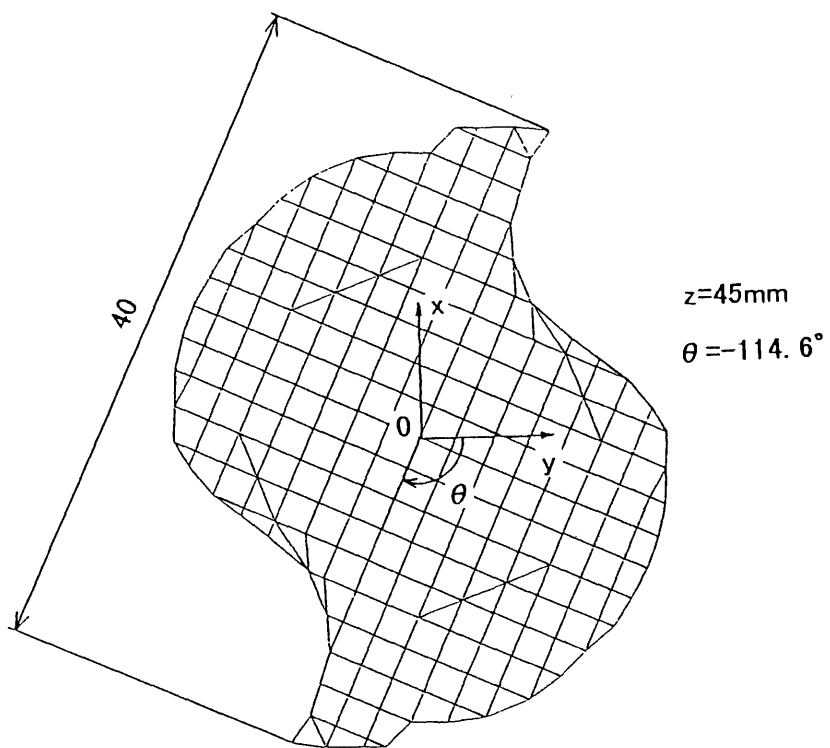


図4.3 工具モデルの形状および寸法

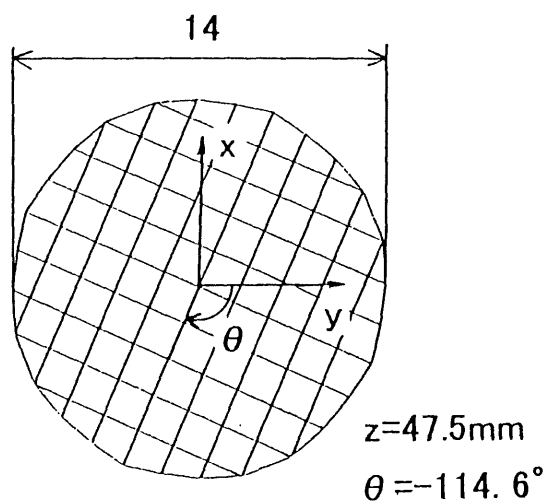


(a) $z = 0 \text{ mm}$

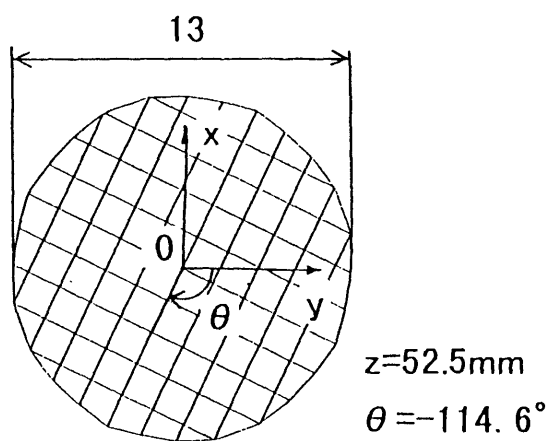


(b) $z = 45 \text{ mm}$

図 4 . 4 工具モデルの断面形状



(c) $z = 47.5 \text{ mm}$



(d) $z = 52.5 \text{ mm}$

図 4. 4 工具モデルの断面形状

じであるが，要素サイズは $\Delta x = 1.3 \text{ mm}$ ， $\Delta y = 1.3 \text{ mm}$ および $\Delta z = 5.0 \text{ mm}$ と $x y$ 方向に小さく，シャンク部分は拘束されるため変形に影響が少ないことから， z 方向に倍増させている．なお， $z = 52.5 \text{ mm}$ 以後についても（d）図の断面形状に等しく，回転角も $\theta = -114.6^\circ$ と同じである．なお，工具モデルの総節点数は4887，総要素数は4232となった．

4. 1. 4 切削力分布に基づく荷重の計算方法

FEM解析に用いる荷重および荷重の分配は図4.5に示すねじれ刃の切削機構に基づいて定めている。切れ刃は $KbIs$ の位置から切削を開始するが $K'Ib$ の位置より加工面を創成する。図中の斜線部は切れ刃による切削面積であり、切削面積は区間 $IsIb$ では増加、区間 IbI'' では定常、区間 $I''Iu$ では減少と変化する。壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ の場合、増加区間は切削時間 $t = 0 \sim 27.9\text{ ms}$ 、定常区間は切削時間 $t = 27.9 \sim 135.6\text{ ms}$ 、減少区間は切削時間 $t = 135.6 \sim 163.5\text{ ms}$ である。壁厚 $w_t = 2\text{ mm}$ の場合、増加区間は切削時間 $t = 0 \sim 28.3\text{ ms}$ 、定常区間は切削時間 $t = 28.3 \sim 138.7\text{ ms}$ 、減少区間は切削時間 $t = 138.7 \sim 167.0\text{ ms}$ である。また、壁厚 $w_t = 3\text{ mm}$ の場合、増加区間は切削時間 $t = 0 \sim 28.6\text{ ms}$ 、定常区間は切削時間 $t = 28.6 \sim 142.1\text{ ms}$ 、減少区間は切削時間 $t = 142.1 \sim 170.7\text{ ms}$ である。工具の切れ刃と工作物の接触角 θ_b は 14° 以下と小さいため、切削面積を展開するとほぼ三角形になる。また、切削力が切削面積に比例すると仮定した場合、切削力は図4.6に示す三角形分布により分配できると考えられる。図4.5において高さ h は工具径 d_c により異なり、工具径 $d_c = 44\text{ mm}$ の場合は $h = 5.14\text{ mm}$ 、工具径 $d_c = 43\text{ mm}$ の場合は $h = 5.22\text{ mm}$ 、工具径 $d_c = 42\text{ mm}$ の場合は $h = 5.27\text{ mm}$ となる。これらの高さ h は、工作物および工具モデルの荷重節点位置における z 方向の要素サイズ $\Delta z = 2.5\text{ mm}$ に対し、要素数2（節点数3）に近似できる。したがって、定常区間においては図4.6の（a）図に示すように3節点を含む長さで表すことができ、減少区間においては（b）図に示すように2節点を含む長さで表せる。（a）図に示す定常区間の場合、三角形 ABC の面積は切削力

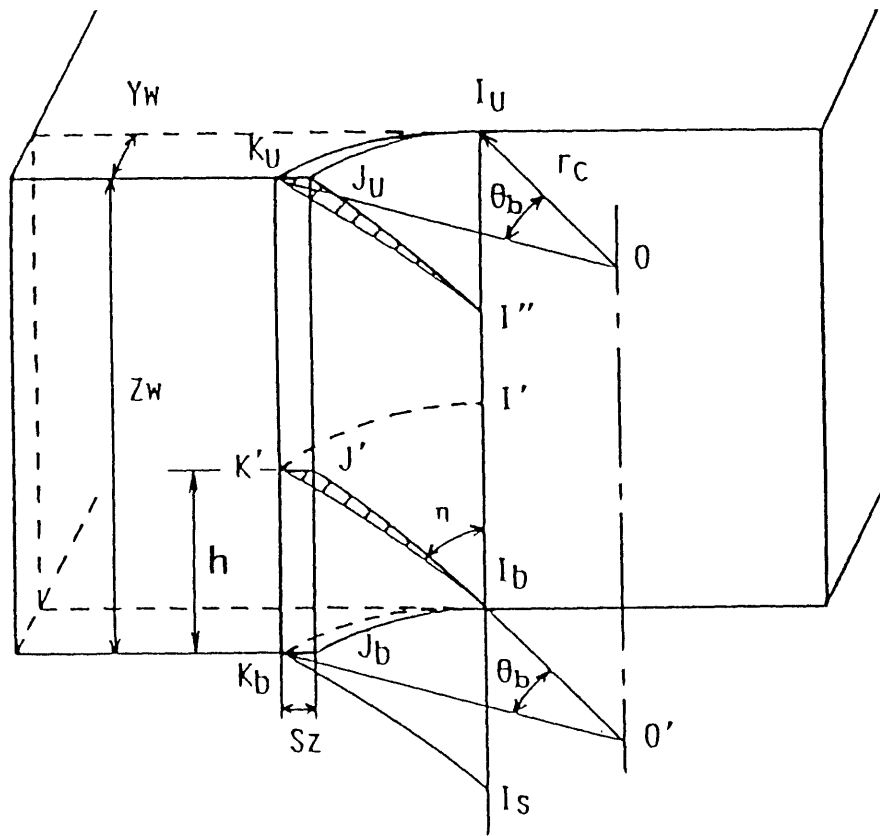
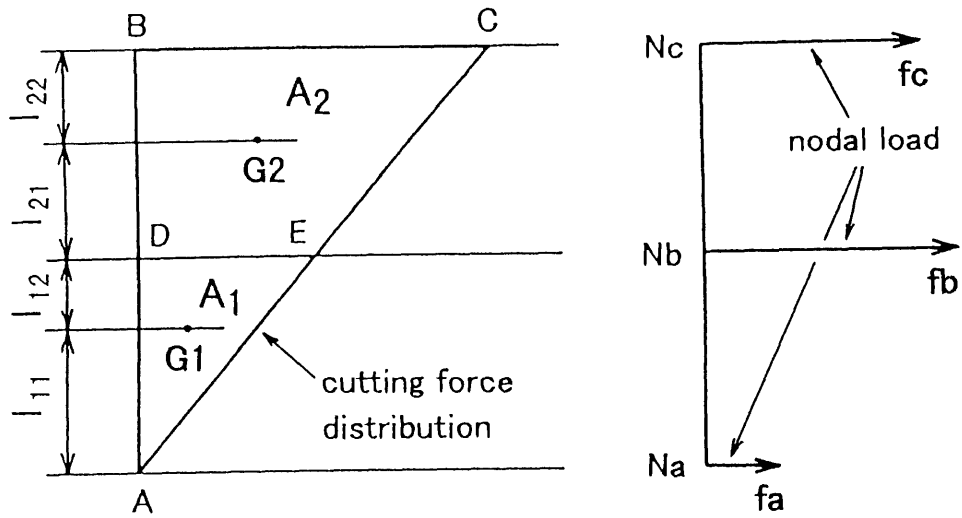
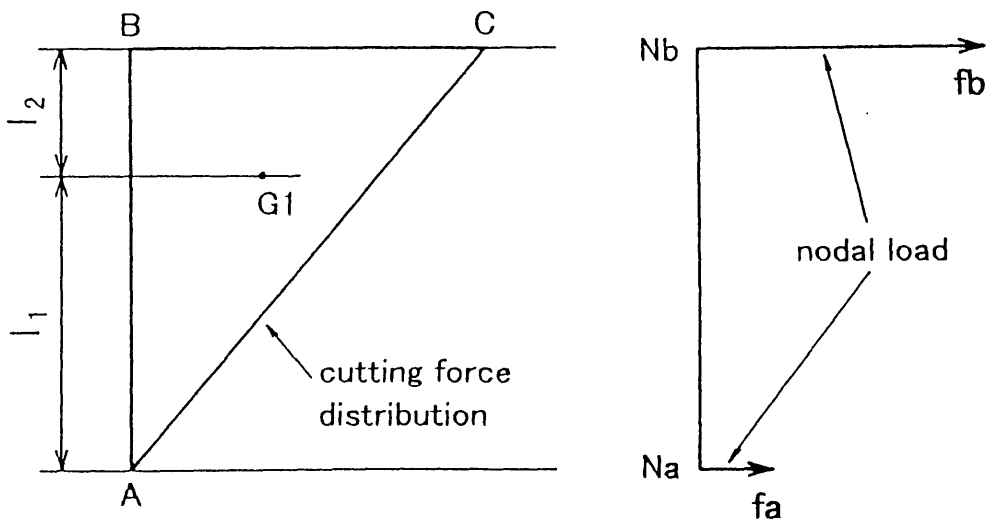


図4.5 ねじれ刃による切削機構（下向き切削）



(a) 3点荷重



(b) 2点荷重

图4.6 切削力分布と節点荷重

f の大きさを表しており，節点 N b によって三角形 A D E と台形 D E B C に分けられる．3 節点に加わる荷重は各重心からの距離に逆比例しており，切削力 f は三角形 A B C の面積を 1 とした場合の面積 A_1 および A_2 と各重心 G_1 および G_2 からの距離 l_{11} ないし l_{22} によって各節点に分配される．したがって，全荷重 f および各節点荷重 f_a ， f_b および f_c は次のように表すことができる．

$$f = f_a + f_b + f_c \quad (4.1)$$

$$f_a = f \times A_1 \times l_{12} / (l_{11} + l_{12}) \quad (4.2)$$

$$f_b = f_{b1} + f_{b2} \quad (4.3)$$

$$f_{b1} = f \times A_1 \times l_{11} / (l_{11} + l_{12})$$

$$f_{b2} = f \times A_2 \times l_{22} / (l_{21} + l_{22})$$

$$f_c = f \times A_2 \times l_{21} / (l_{21} + l_{22}) \quad (4.4)$$

一方，(b) 図に示す減少区間の場合，三角形 A B C の面積は切削力 f の大きさを表しており，2 節点に加わる荷重は重心 G_1 からの距離に逆比例している．したがって，各節点荷重は次のように表すことができる．

$$f = f_a + f_b \quad (4.5)$$

$$f_a = f \times l_2 / (l_1 + l_2) \quad (4.6)$$

$$f_b = f \times l_1 / (l_1 + l_2) \quad (4.7)$$

各節点荷重は，図 4.7 に示すように工具切れ刃のねじれ角 $\eta = 45^\circ$ を考慮して工作物に対しては斜めに加えており，工具に対しては刃先に相当する節点に加えている．なお，図中の f_{ia} ， f_{ib} ，および f_{ic} は式 (4.2) ないし式 (4.4) によって各高さについて求めた荷重である．

工具に対する荷重分布は，x および y 方向の荷重が工具切れ刃のねじれ角に応じて変わるため，工具モデルの回転角 θ に対応させて工作物への荷重を次式により変換する．

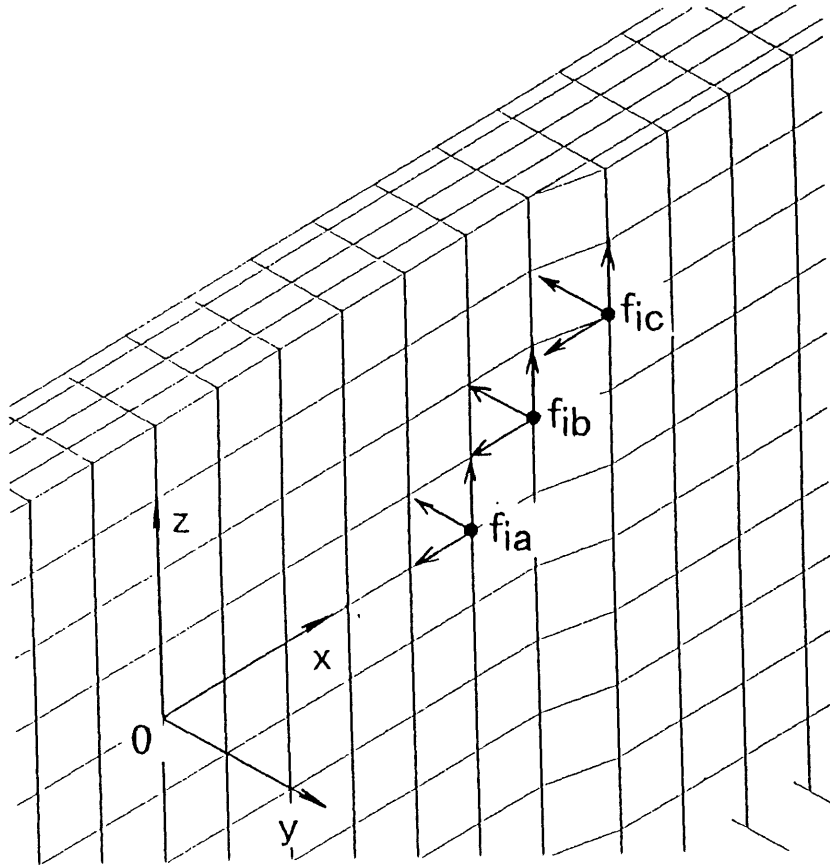


図4.7 工作物モデルにおける荷重状態

$$F_x = f_x \cdot \cos \theta + f_y \cdot \sin \theta \quad (4.8)$$

$$F_y = -f_x \cdot \sin \theta + f_y \cdot \cos \theta \quad (4.9)$$

ただし、 f_x および f_y は各断面における x および y 分力であり、この変換を各断面に対して行ない、工具の荷重を求める。

4.2 主軸剛性の計算

4.2.1 静荷重による主軸の変形

図4.8は二軸装置の静剛性試験の測定結果であり，○は表面側の主軸における変形量，●は裏面側の主軸における変形量を示している．高さ $z = 5\text{ mm}$ において表面側の主軸は $30\text{ }\mu\text{ m}$ ，裏面側の主軸は $36\text{ }\mu\text{ m}$ 変形しており，両者の差は $6\text{ }\mu\text{ m}$ と最大となっている．高さに伴い両軸の変形量は減少しており，高さ $z = 44\text{ mm}$ においてはともに $6\text{ }\mu\text{ m}$ となった．したがって，両軸は明らかに異なる剛性であり，各軸に対してそれぞれ剛性式を求めなければならない．測定した値は主軸の変形量の他にテストバーの変形量も含んでおり，主軸のみの剛性式を得るためにはテストバーの変形量を差し引いた値を求める必要がある．図4.9はテストバーのFEMモデルであり，静荷重による弾性変形解析を行った．テストバーのFEMモデルは四面体要素によるフリーメッシュ方式で要素分割しており，荷重点および測定点は静剛性試験と同じ位置を選択した．なお荷重は 98 N (10 Kg f)とし，境界条件は実際のチャックによる締めつけ位置にあわせて，簡易的にシャンク部分の端面 $z = 57.5\text{ mm}$ の位置を $u_x = u_y = u_z = 0$ として拘束した．その結果，静剛性試験に含まれていたテストバーの変形量は図4.8の実線で示す値となった．テストバーの変形量は主軸と同様に壁高さの減少とともに2次的に増加している．なお，変形量は $z = 5.0\text{ mm}$ の位置で $7.7\text{ }\mu\text{ m}$ と最大となっている．

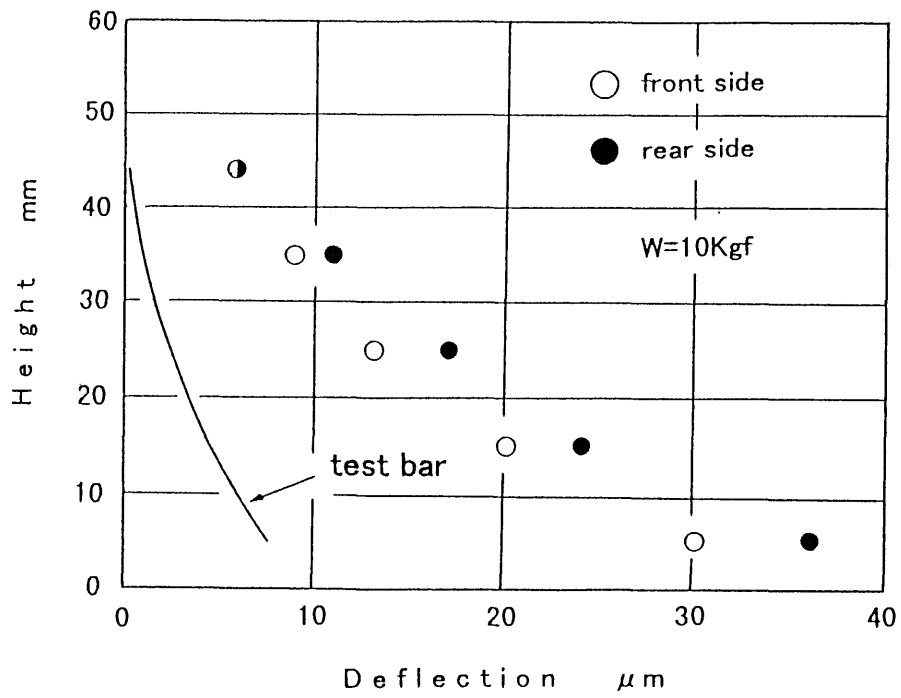


図4.8 静剛性試験の測定結果

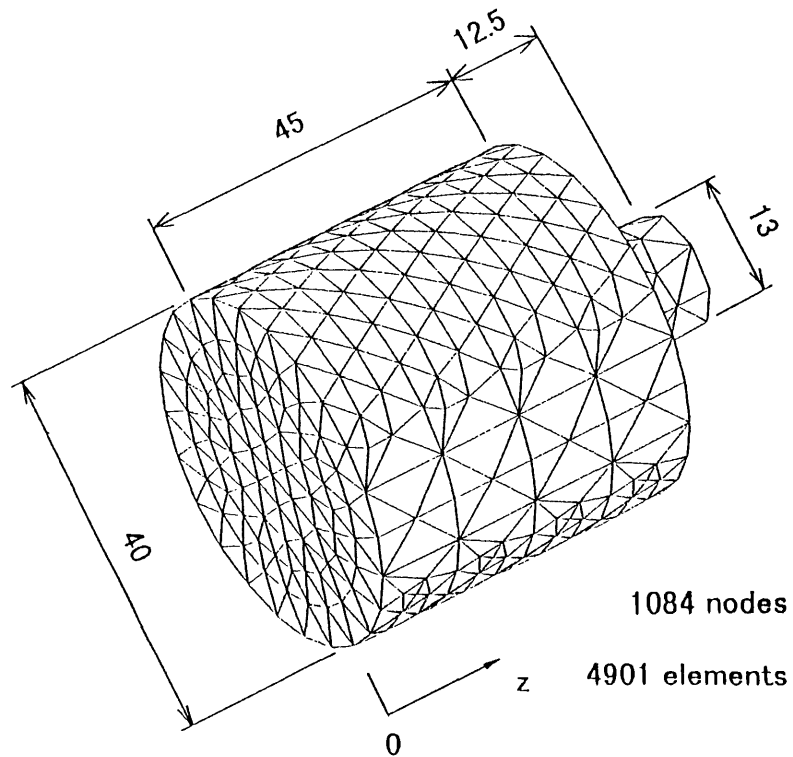


図4.9 テストバーのフリーメッシュモデル

4. 2. 2 主軸剛性の定式化

図4. 10は図4. 8の測定点からFEMによるテストバーの変形量を差し引いた値であり，○は表面側の主軸，●は裏面側の主軸における値である．ここで，変形量は荷重に比例し，z方向に対して二次式で近似できると仮定した場合，求める剛性式は次のように表せる．

$$E = f (a z^2 + b z + c) \quad (4. 10)$$

E : 主軸の変形量

a , b , c : 定数

z : 工具の端面からの距離

f : 荷重

式(4. 10)を用いて，最小二乗法により測定点を通る式を両軸について求めると次式のようなになる．

$$E_f = f_y (8.432 \times 10^{-5} z^2 - 8.388 \times 10^{-3} z + 0.2657) \quad (4. 11)$$

$$E_r = f_y (6.761 \times 10^{-5} z^2 - 8.997 \times 10^{-3} z + 0.3273) \quad (4. 12)$$

E_f : 表面側の主軸による変形量

E_r : 裏面側の主軸による変形量

f_y : y方向の荷重

荷重については，薄壁に垂直方向（y方向）の変形量を求めるために測定したy分力f_yを与えている．式(4. 11)および式(4. 12)は図4. 10に実線（E_f）および一点鎖線（E_r）で示されており，それぞれの標準偏差は表面側の主軸では0. 14 μm，裏面側の主軸では0. 25 μmと小さく，両軸の測定点が式にほぼ一致している．加工誤差の予測に用いる主軸の変形量は，式(4. 11)および式(4. 12)に測定したy分力および壁高さに相当するzを代入して求める．

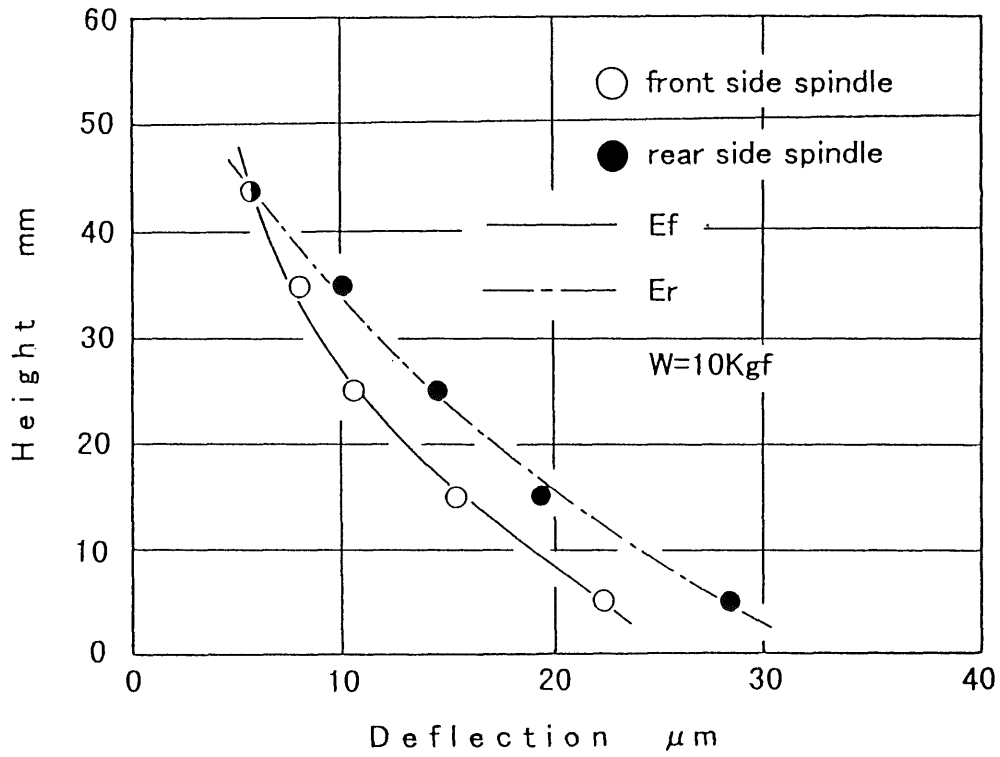


図4. 10 主軸の変形量および式値

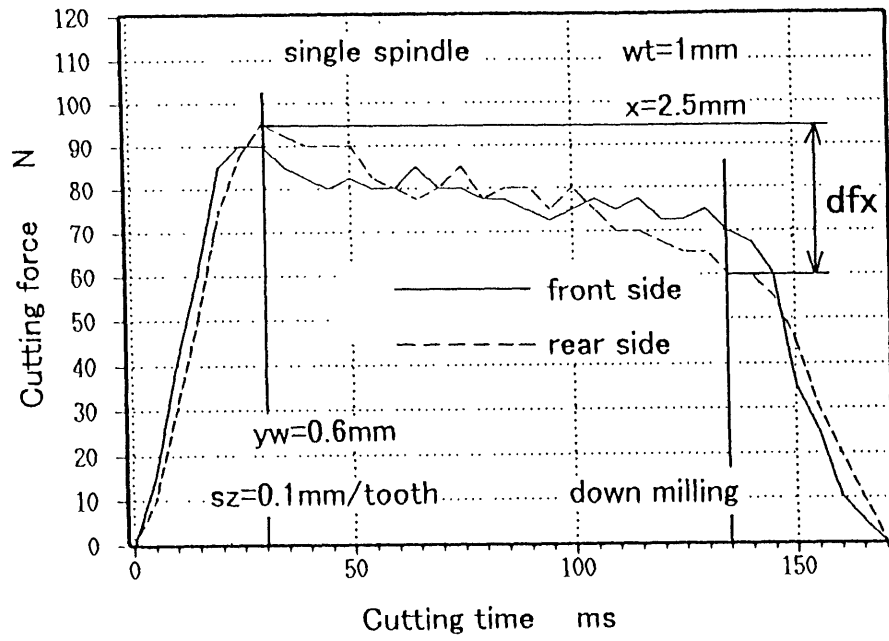
5. 実験および解析結果と考察

5.1 切削力

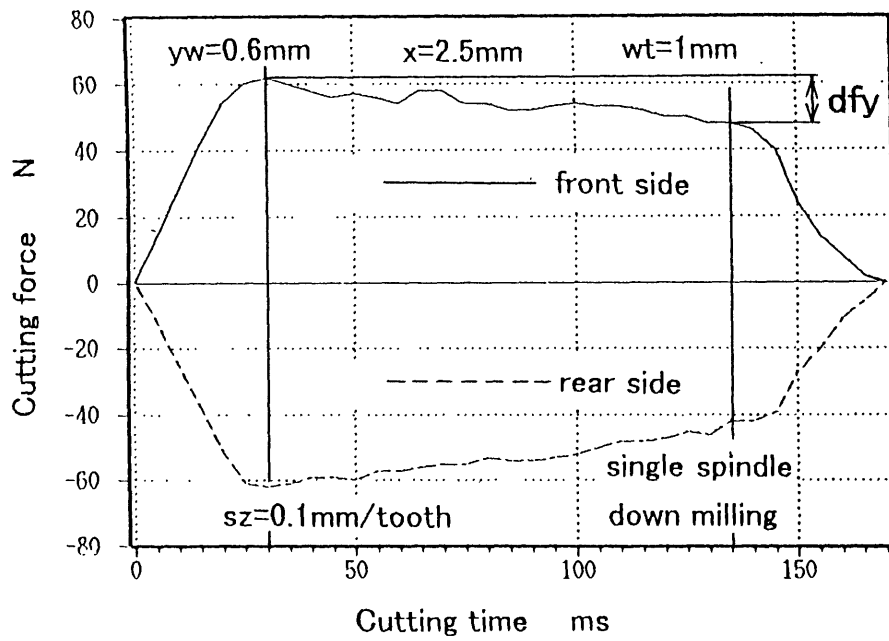
5.1.1 一軸加工の切削力

図5.1および図5.2は壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ における一軸加工の切削力を示したもので、切削時間 $t = 5\text{ ms}$ おきに測定した値を送り方向の位置により比較している。4.1.4節に示した切削機構により切削力および切削面積の増加区間は切削時間 $t = 0 \sim 30\text{ ms}$ に近似できる。また、定常区間の場合、壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ においては $t = 30 \sim 135\text{ ms}$ 、壁厚 $w_t = 2$ および 3 mm においては $t = 30 \sim 140\text{ ms}$ に近似できる。さらに、減少区間は壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ の場合 $t = 135 \sim 165\text{ ms}$ 、壁厚 $w_t = 2\text{ mm}$ においては $t = 140 \sim 165\text{ ms}$ 、壁厚 $w_t = 3\text{ mm}$ においては $t = 140 \sim 170\text{ ms}$ に近似できる。

図5.1の(a)図に示す壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ 、 $x = 2.5\text{ mm}$ における x 分力の場合、両加工面ともに定常区間において減少しているが、これは切削力によって薄壁が変形し、その分だけ半径方向切込み y_w が減少するために切削面積が減少したことによるものと考えられる。したがって、加工面の上面に移動するにつれ工作物の変形に起因する加工誤差が増大していると予測できる。定常区間で両加工面の切削力を切削時間 $t = 30\text{ ms}$ で比較すると表面に比べて裏面の方が 5 N 大きい。しかし、切削時間 $t = 135\text{ ms}$ で比較すると逆に裏面に比べ表面の方が 10 N 大きい。これは、定常区間において裏面の切削力の方が減少量が大きいためであり、加工中に裏面の方が大きく変形したのと考えられる。このことから、加工誤差も表面よりも裏面の方が大きいと予測できる。図中の df_x ない

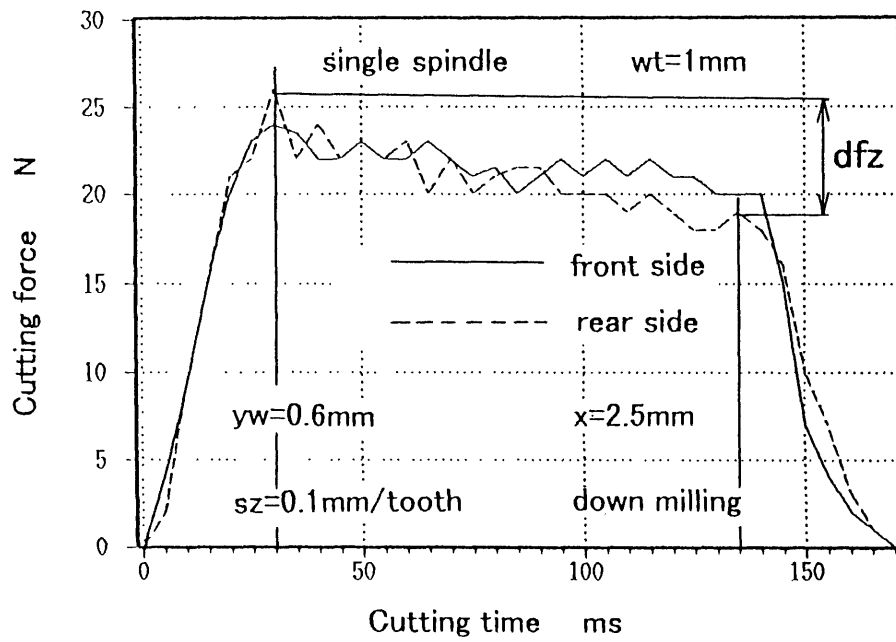


(a) x 分力



(b) y 分力

図5.1 一軸加工による壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 2.5 \text{ mm}$ の切削力



(c) z分力

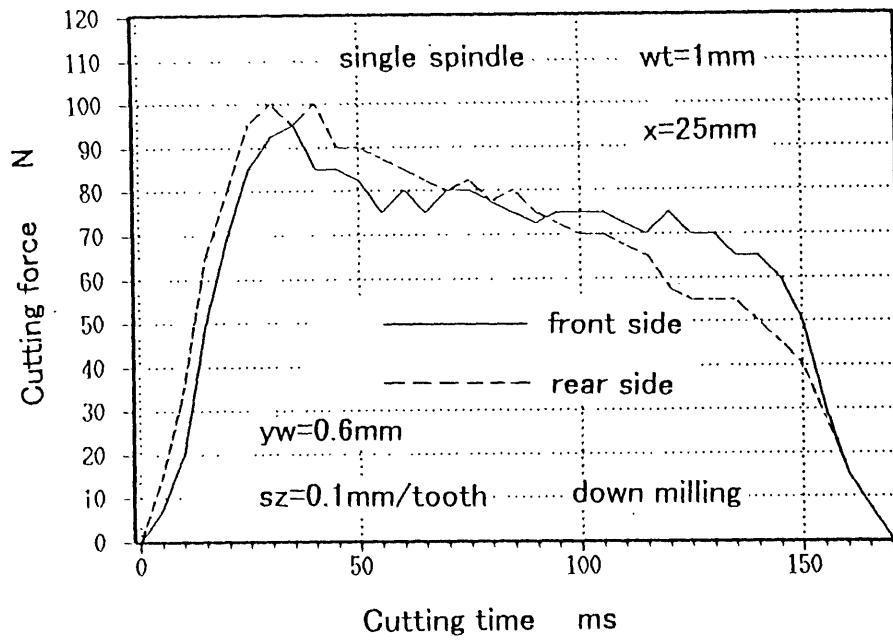
図5.1 一軸加工による壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 2.5 \text{ mm}$ の切削力

し df_z は，定常区間における各分力の減少量であり，（a）図に示す x 分力において表面は $df_x = 23\text{ N}$ ，裏面は $df_x = 35\text{ N}$ と加工面で大きく異なっている．また，（b）図に示す y 分力についても x 分力と同様に，定常区間において切削力は減少しており，各加工面の減少量は表面については $df_y = 16.5\text{ N}$ ，裏面については $df_y = 20\text{ N}$ とやはり裏面の減少量の方が大きい値である．

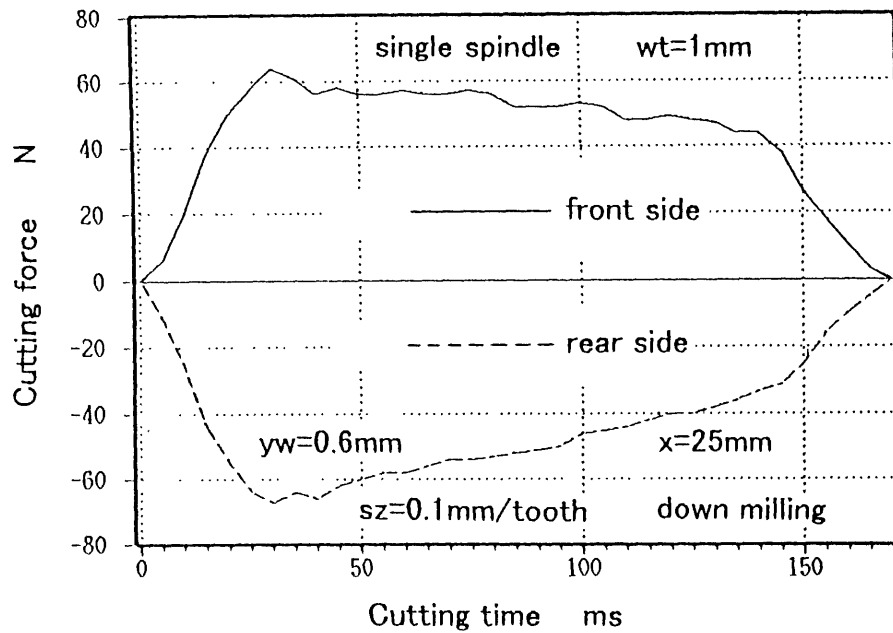
（c）図に示す z 分力においても定常区間において切削力の減少が確認でき，表面においては $df_z = 3.5\text{ N}$ ，裏面においては $df_z = 7.5\text{ N}$ となっており，3分力ともに裏面の減少量の方が大きいことが分かる．よって切削力による薄壁の変形量は裏面の方が大きく，加工後の加工誤差も裏面の方が大きいと予測できる．

図5.2は一軸加工における壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ ， $x = 25\text{ mm}$ の位置についての切削力であり，3分力について示している．（a）図に示す x 分力について，送り方向 $x = 2.5\text{ mm}$ の位置における x 分力と比較すると，表面および裏面ともに切削時間 $t = 30\text{ ms}$ では3および5 N程度 $x = 25\text{ mm}$ の位置における切削力の方が大きい．しかし，切削時間 $t = 135\text{ ms}$ では両加工面ともに $x = 2.5\text{ mm}$ の位置における切削力の方が逆に大きくなっており，その差は5 N程度である．したがって， $x = 25\text{ mm}$ の位置における切削力の減少量は，表面においては38 N，裏面においては45 Nと $x = 2.5\text{ mm}$ の位置に比べ増大している．この傾向は y および z 分力についても一致しており，このことから薄壁の端部（ $x = 2.5\text{ mm}$ ）に比べ中央部（ $x = 25\text{ mm}$ ）の方が剛性が低く変形しやすいことがわかる．

図5.3の（a）図に示す壁厚 $w_t = 2\text{ mm}$ ， $x = 25\text{ mm}$ の位置における一軸加工の x 分力について，表面では定常区間における切削力の減少がほとんど現われていないのに対し，裏面については

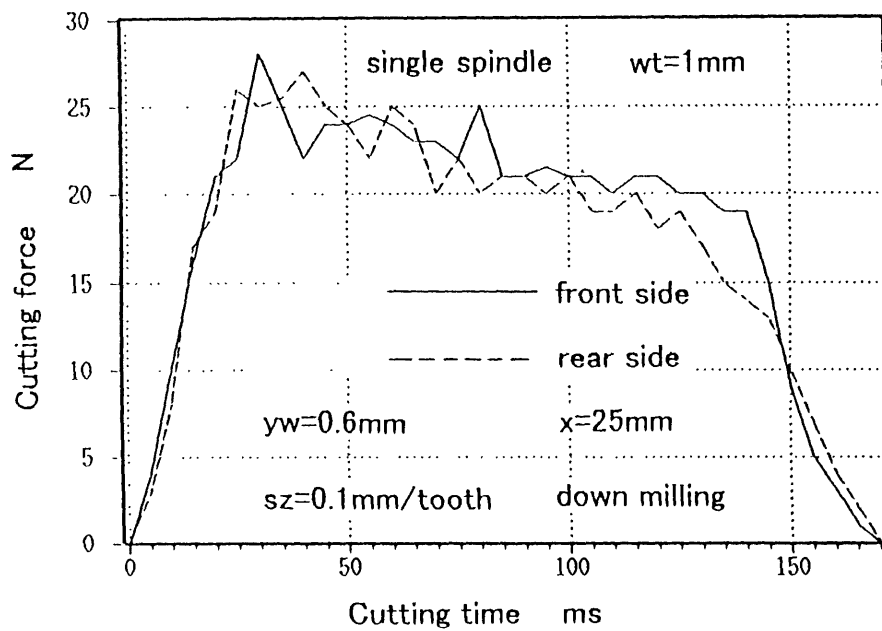


(a) x分力



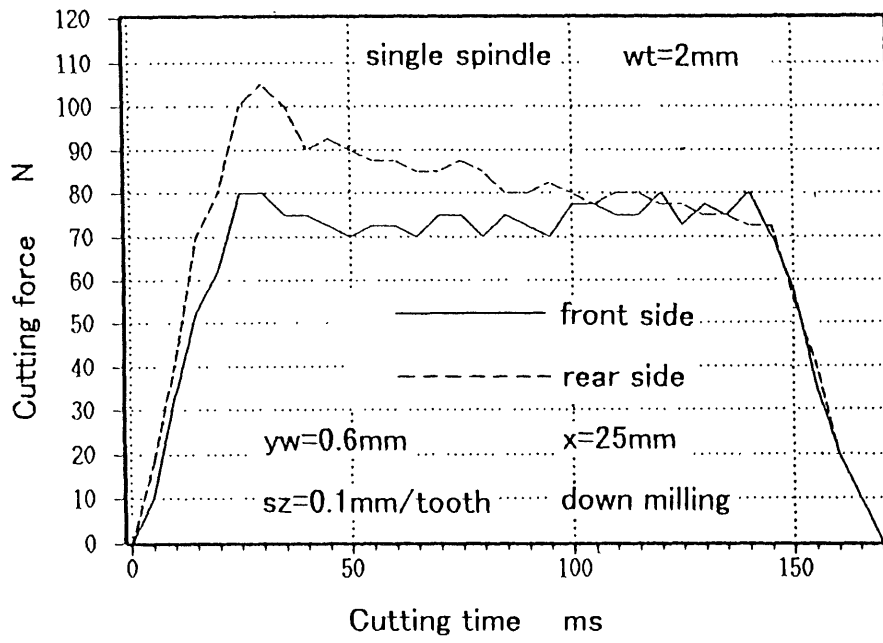
(b) y分力

図5. 2 一軸加工による壁厚 $w_t = 1\text{mm}$, $x = 25\text{mm}$ の切削力

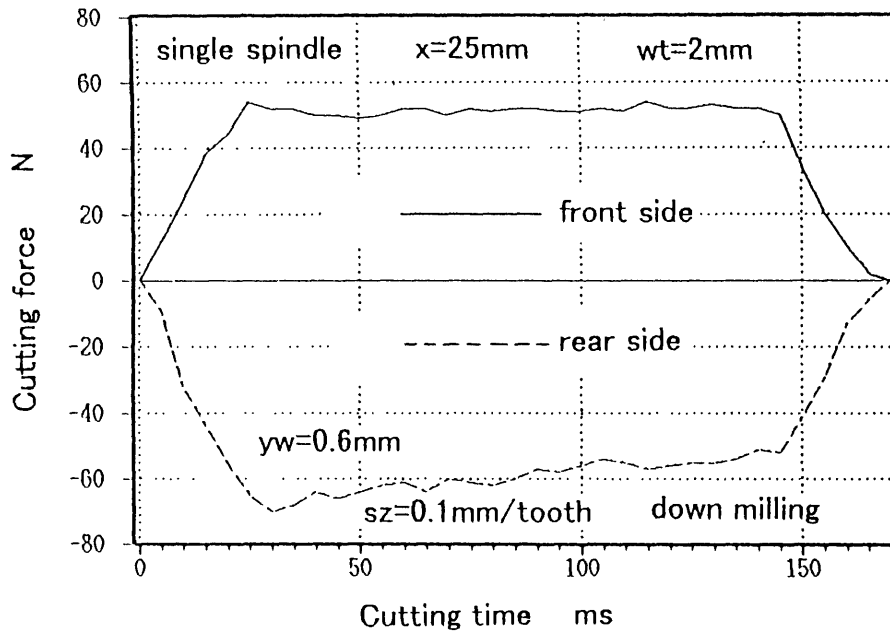


(c) z 分力

図5.2 一軸加工による壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の切削力

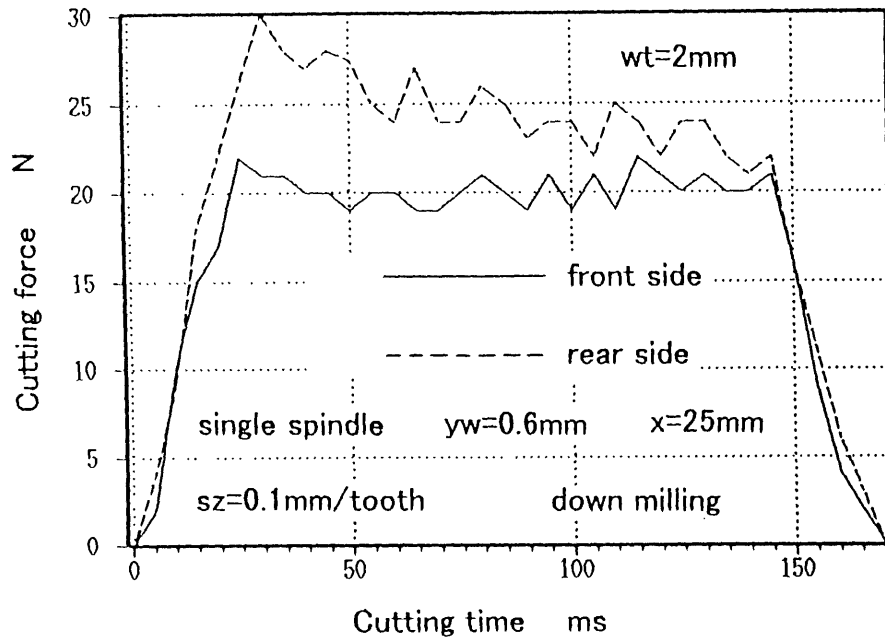


(a) x分力



(b) y分力

図5.3 一軸加工による壁厚 $w t = 2 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の切削力



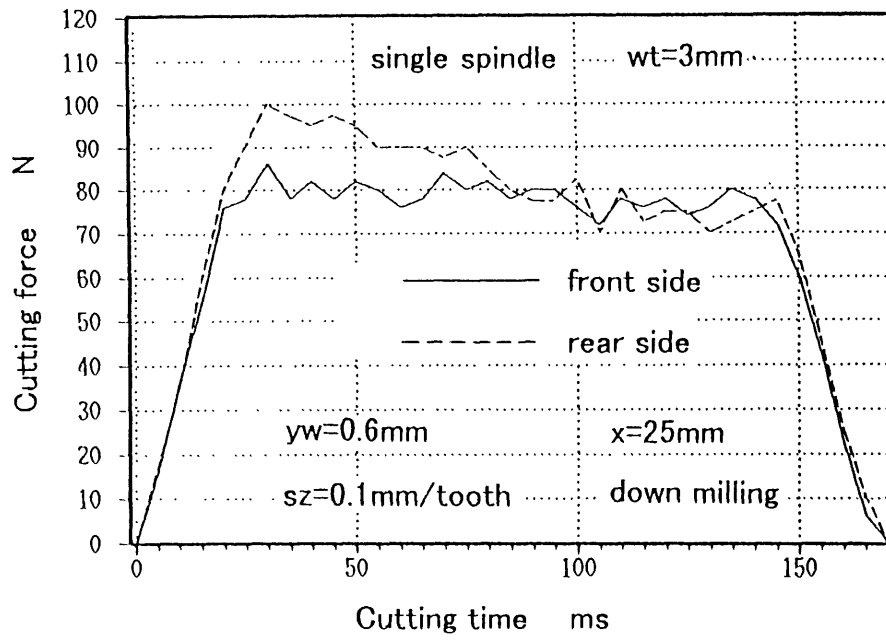
(c) z分力

図5.3 一軸加工による壁厚 $w t = 2 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の切削力

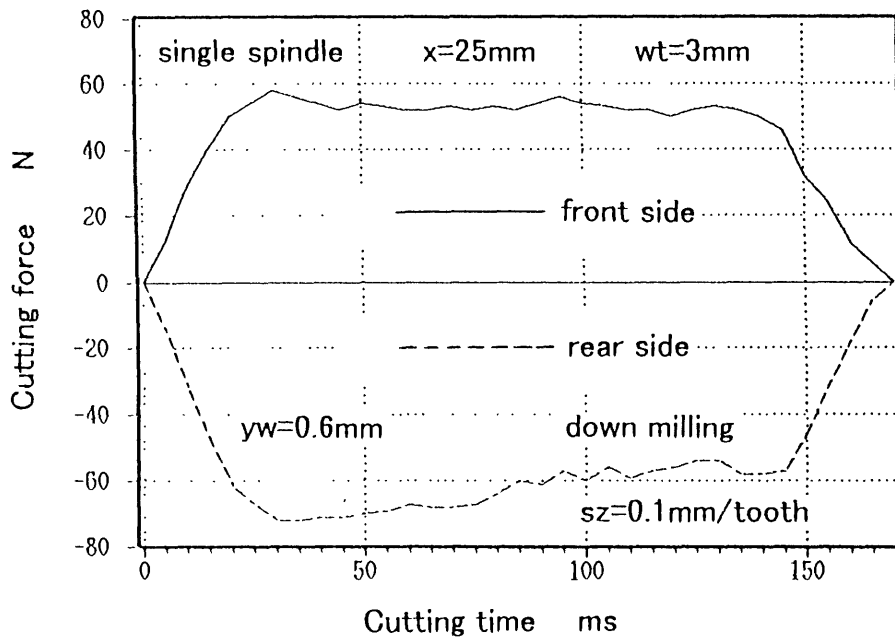
$d f_x = 30 \text{ N}$ と非常に大きい値となった。この傾向は y および z 分力についても同様であり、表面においては減少量は数 N となっているが、裏面において各分力の減少量は 9 ないし 20 N と大きい。これは裏面における軸の倒れもしくは振れにより、加工面の下面近傍に比べ上面近傍で、切込み量が大幅に減少したためと考えられる。また、両加工面における切削力の変化の違いから表面の加工誤差は比較的小さいが、裏面の加工誤差は上面に移動するにつれて増大していると予測できる。

図 5. 4 は壁厚 3 mm 、 $x = 25 \text{ mm}$ の位置における一軸加工の 3 分力を示している。(a) 図に示す x 分力について、表面では定常区間においてほぼ一定の値であり、減少量 $d f_x = 8 \text{ N}$ と小さい。一方、裏面について切削時間 $t = 20 \sim 75 \text{ ms}$ では表面に比べ最大 19 N 程度大きくなっている。この傾向は y 分力についても現れているが、 z 分力においては明確に現れていない。この原因は、壁厚 2 mm の場合と同様に軸の倒れおよび振れによる切込み量の違いだと考えられる。ここで、一軸加工の定常区間における切削力を整理して、切削時間 $t = 30$ および 140 ms における切削力の減少量 $d f_x$ ないし $d f_z$ を図 5. 5 に示した。

初めに (a) 図に示す $x = 2.5 \text{ mm}$ の位置における減少量について、壁厚により比較すると、全体的に減少量は壁厚の減少に伴い増大しており、裏面の x 分力は 35 N と最大値をとっている。また、壁厚 $w_t = 1$ および 2 mm においては全ての減少量は表面に比べ裏面の方が大きい。壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ においては明確な傾向は確認できない。これは、壁厚の減少に伴い工作物の剛性が低くなり、加工面による実質的な壁厚の変化、すなわち先に表面を加工した後に裏面を加工することに起因する壁厚の違いが工作物の変形に大きく影響を及ぼしたためと考えられる。

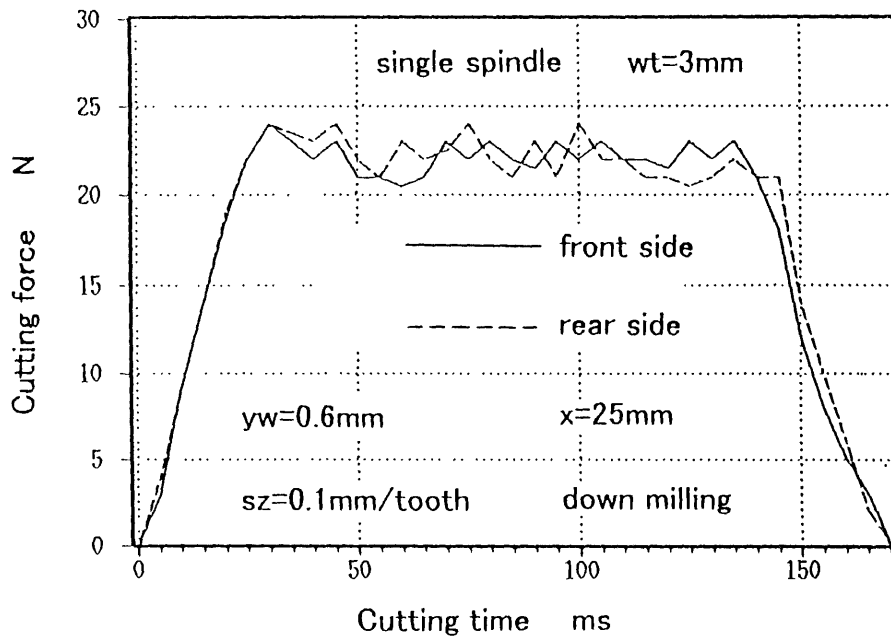


(a) x分力



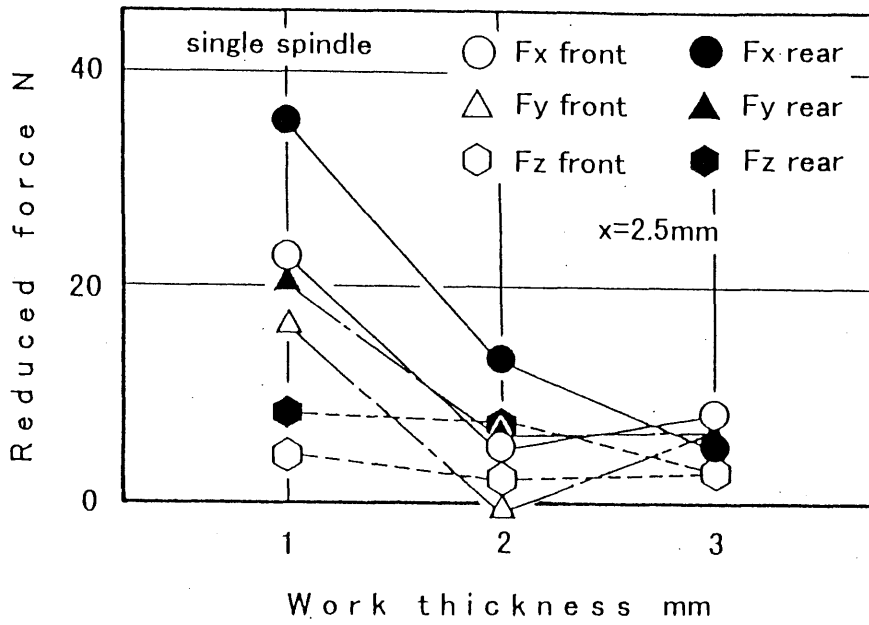
(b) y分力

図5.4 一軸加工による壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の切削力

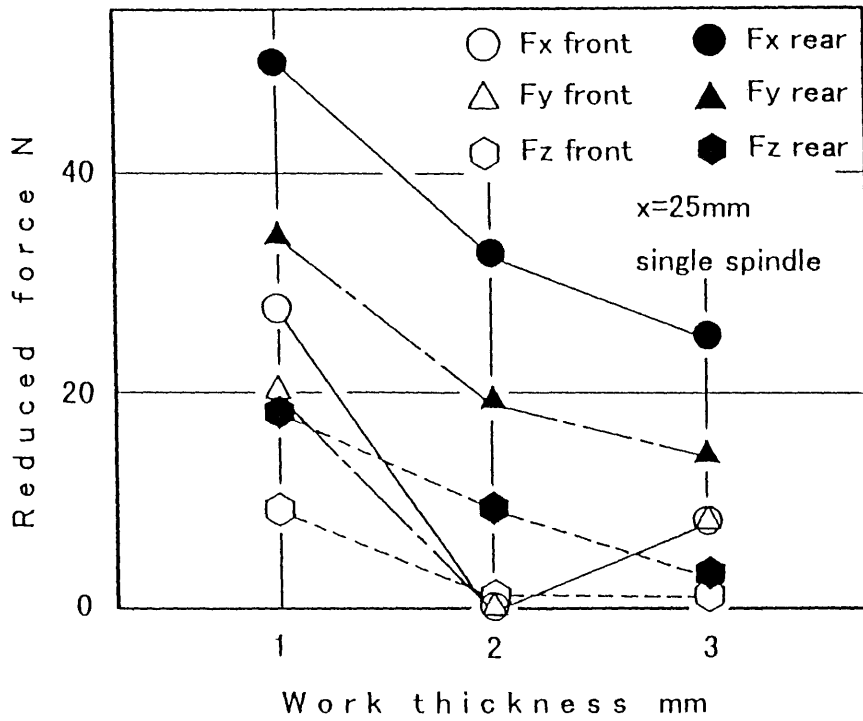


(c) z 分力

図5.4 一軸加工による壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の切削力



(a) $x = 2.5 \text{ mm}$



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

図5.5 定常区間における切削力の減少量

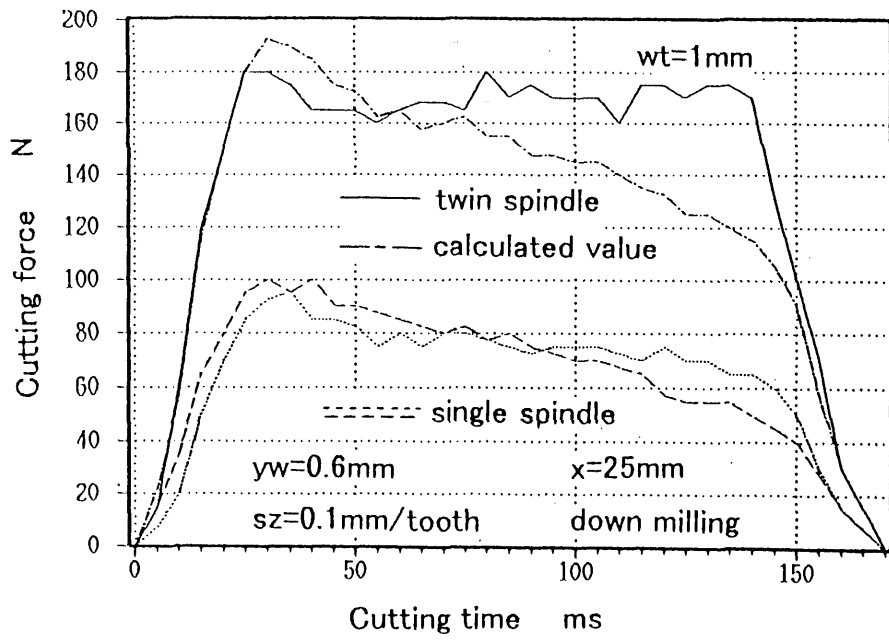
次に (b) 図に示す $x = 25 \text{ mm}$ の位置における減少量において、壁厚により比較すると一部の壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ における減少量を除くと壁厚の減少に伴い二次的に増加している。また、加工面について比較するといずれの減少量においても裏面の方が大きく、壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ の裏面において 45 N と最大になった。さらに両図を比較すると減少量は $x = 2.5 \text{ mm}$ よりも $x = 25 \text{ mm}$ の方が全体的に大きく、多少のばらつきはあるものの、2倍程度に増加している。以上より、壁厚が小さくなるほど、あるいは測定位置が中央部に近いほど薄壁の剛性が低く、変形しやすいことがわかる。

5. 1. 2 二軸加工の切削力

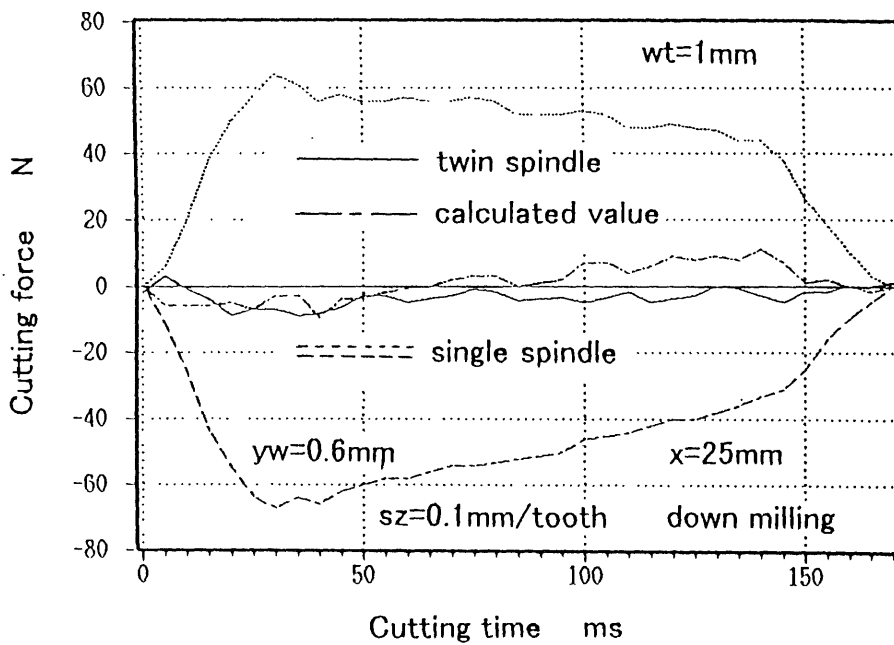
図5. 6ないし図5. 8は二軸加工の切削力（実線）と一軸加工における両加工面の切削力（点線および破線）および両加工面の切削力を足し合わせた計算値（一点鎖線）を各壁厚について示している。まず図5. 6の（a）図に示す壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， x 分力 F_x の場合について考えると，切削時間 $t = 30 \sim 135 \text{ ms}$ における定常区間では，二軸加工の実験値は減少量 $df_x = 7.0 \text{ N}$ に対し，計算値は $df_x = 70 \text{ N}$ と大きく，実験値の平均切削力が 140.6 N であるのに対し，計算値の平均切削力は 127.4 N と計算値の方が 13.2 N 小さいことがわかる。これは，実際の二軸加工において工作物の変形が抑制されているのに対し，計算値は一軸加工の切削力を用いているため，一軸加工における工作物の変形に起因する切削力の減少が大きく影響したものと考えられる。

続いて（b）図に示す y 分力 F_y について考えると，二軸加工の実験値と計算値はともに数 N の範囲で零近傍を推移している。絶対値により平均を求めると実験値で 3.7 N ，計算値では 4.4 N と小さく，このことは加工実験において二軸加工がほぼ期待通りに行われ，薄壁の両側から作用する F_y が打ち消し合ったためと考えられる。一方，（c）図に示す z 分力は x 分力と同様に切削時間 $t = 30 \text{ ms}$ 付近では実験値と計算値は近い値となっているが，切削時間とともに計算値は減少しており，両者の差は増大している。実験値の平均切削力は 39.1 N であるのに対し，計算値の平均切削力は 35.5 N と 3.6 N 小さい。これも x 分力の場合と同様に，実際の二軸加工において工作物の変形が抑制されているのに対し，計算値は一軸加工の切削力を用いているため，工作物の変形に起因する切削力の減少が大きく影響したものと考えられる。

次に図5. 7の（a）図に示す壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ の x 分力につい

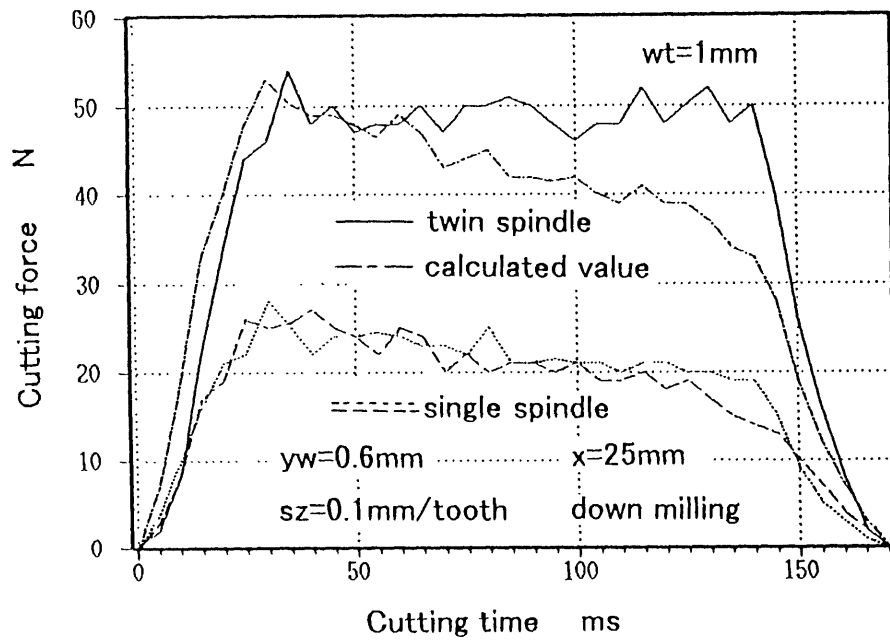


(a) x分力



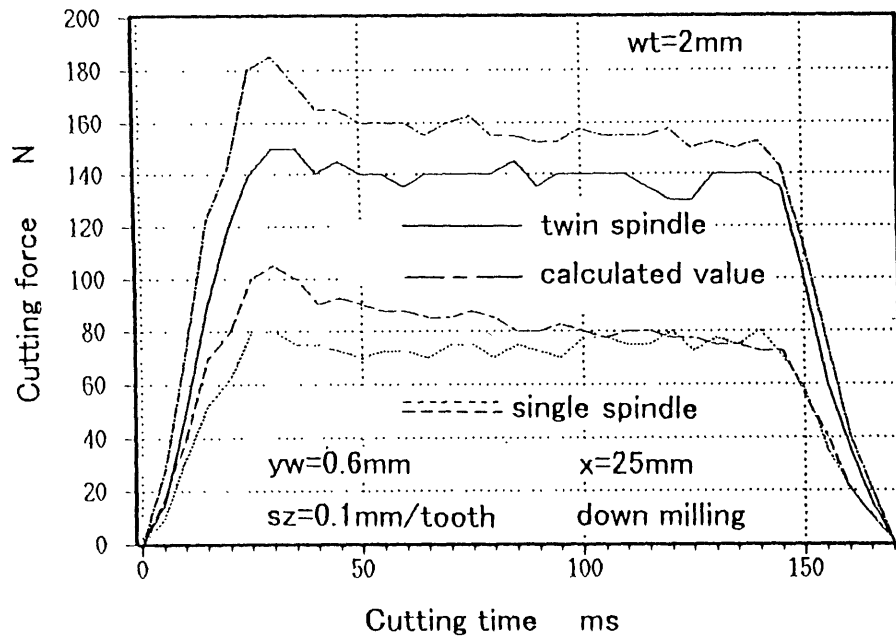
(b) y分力

図5.6 二軸加工による壁厚 $w_t = 1\text{mm}$, $x = 25\text{mm}$ の切削力と計算値

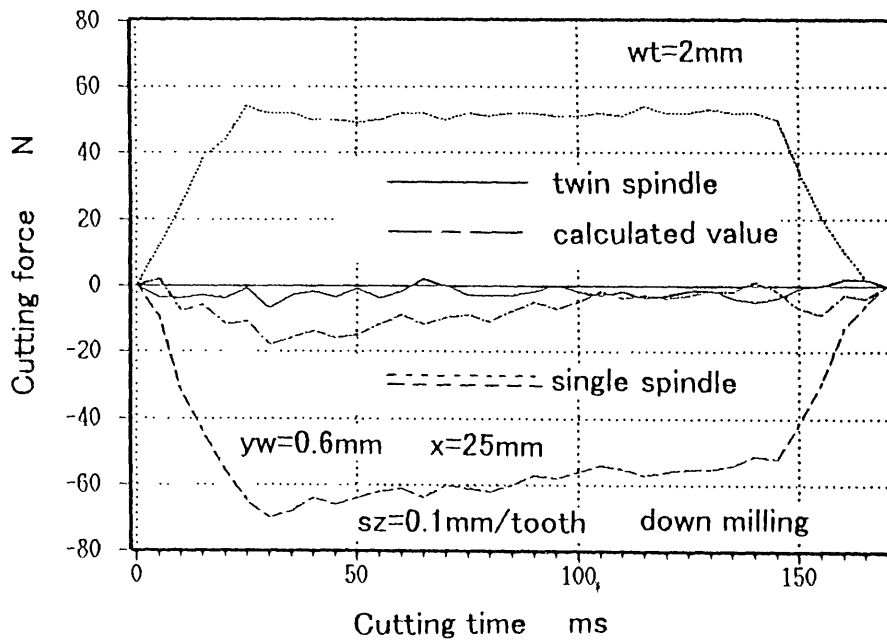


(c) z 分力

図5.6 二軸加工による壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の切削力と計算値

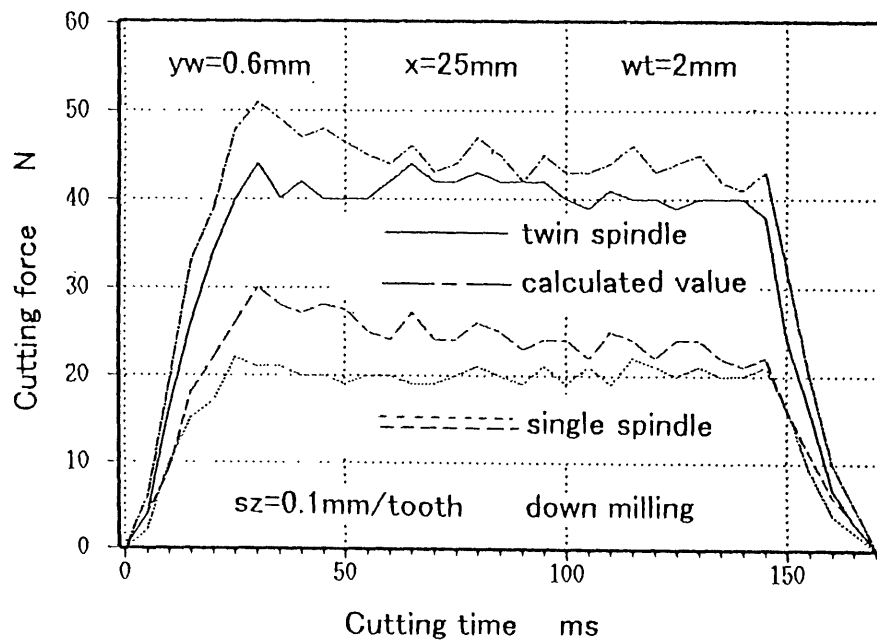


(a) x 分力



(b) y 分力

図5.7 二軸加工による壁厚 $w_t = 2\text{mm}$, $x = 25\text{mm}$ の切削力と計算値



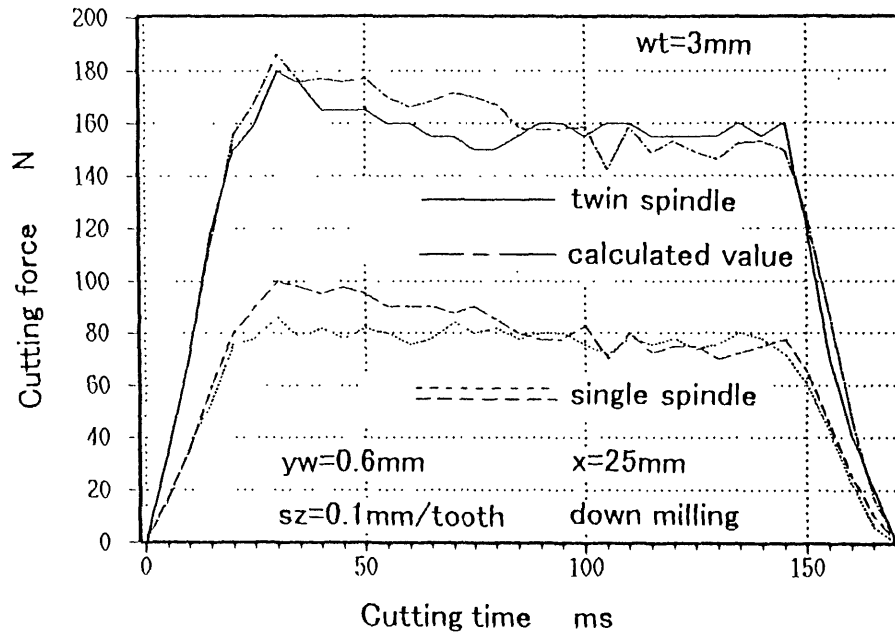
(c) z分力

図5.7 二軸加工による壁厚 $w_t = 2\text{mm}$, $x = 25\text{mm}$ の切削力と計算値

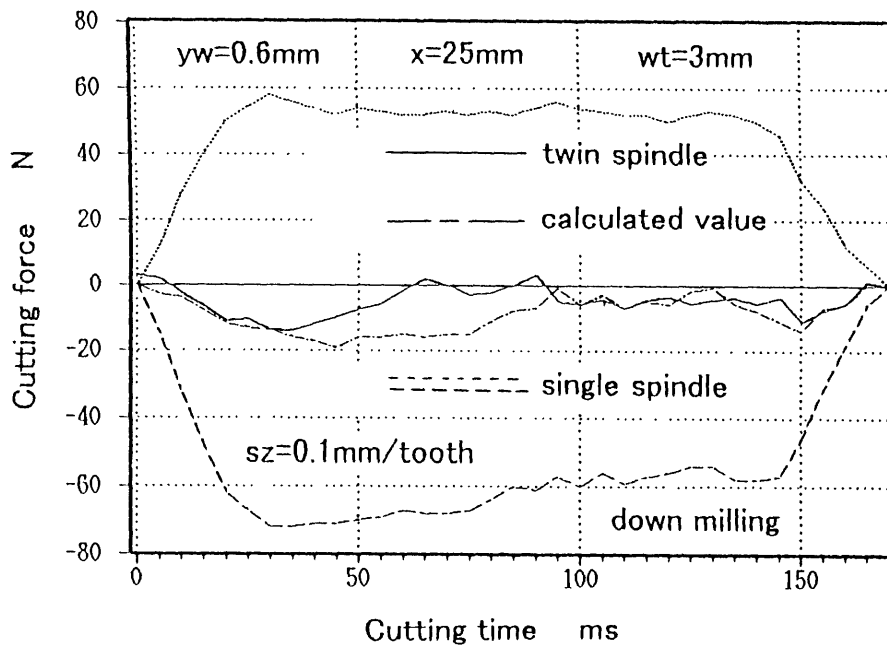
て考えると，定常区間の全域で実験値と平均値に差が生じており，平均値で比較すると実験値では116.9 Nであり，計算値では134.8 Nと計算値の方が17.9 N大きい値となっている．この原因としては，一軸加工における軸の倒れまたは振れによる切込み量の増加に伴う切削面積の増加が考えられる．続いて（b）図に示すy分力について，絶対値をとった平均値は実験値において2.5 Nであり，計算値においては7.4 Nと計算値の方が大きい値となった．これは表面に比べ裏面の切削力が大きい値となったためであり，この原因としては裏面側の軸の倒れおよび振れによって切削面積が増加したためと考えられる．また，実験値において壁厚 $w_t = 1\text{ mm}$ における平均切削力3.7 Nに対し壁厚 $w_t = 2\text{ mm}$ の方が1.2 N小さく，高精度の加工面が得られると予測できる．また（c）図に示すz分力については一軸加工における裏面の切削力が表面に比べ大きい．二軸加工の実験値の平均値は33.9 Nであり，一軸加工における表面の平均切削力は17.1 Nとほぼ1/2であるため，一軸加工における表面に対する裏面の切削力の差が二軸加工の実験値と計算値の差となっている．

図5.8に示す壁厚 $w_t = 3\text{ mm}$ の場合については，（a）図および（c）図に示すxおよびz分力において，実験値は計算値にほぼ一致しており，両者の平均値の差はそれぞれ2.8 Nおよび0.3 Nと非常に小さい値となっている．一方，（b）図に示すy分力の実験値と計算値はともに切削時間 t に伴う変動の傾向が等しく，一軸加工および二軸加工の切削状態が表面と裏面でほぼ同じであったと考えられる．また，y分力 F_y が相殺しきれていないため，工作物の変形に起因する加工誤差は残ると予測できる．

ここで，二軸加工の切削力を整理し，二軸加工の平均切削力を一軸加工の平均切削力で除した値を切削力比として測定位置別に図5.

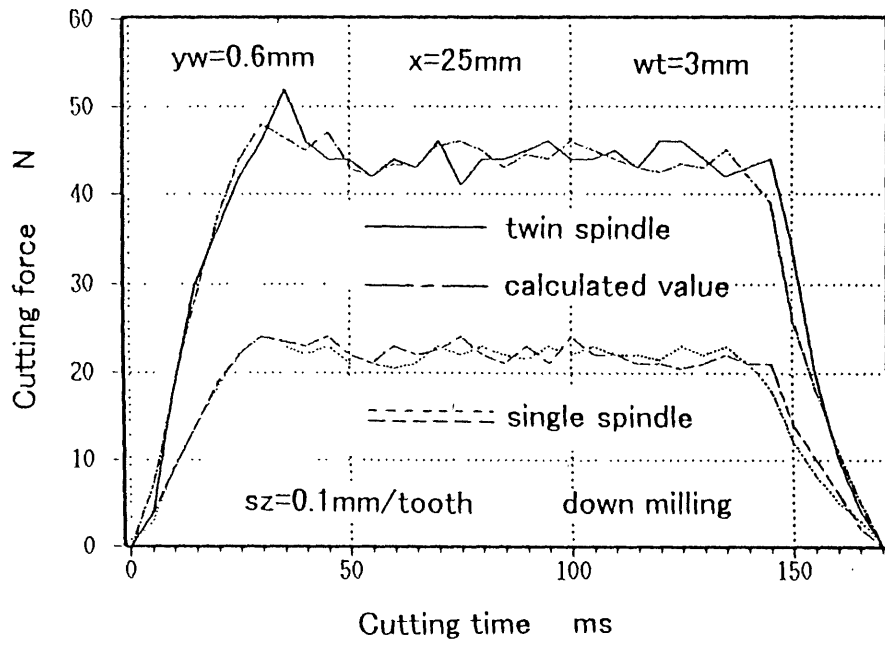


(a) x分力



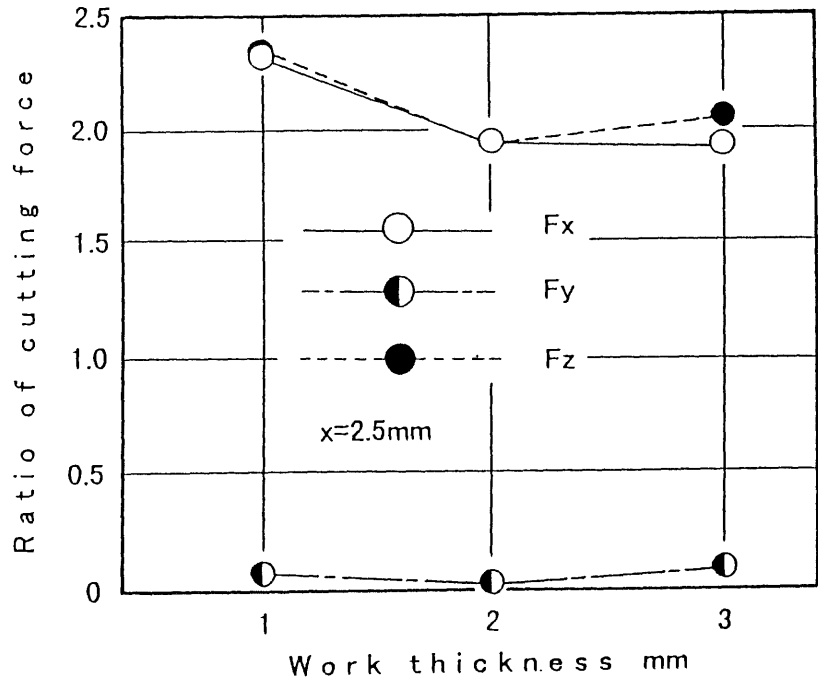
(b) y分力

図5.8 二軸加工による壁厚 $w_t=3\text{mm}$, $x=25\text{mm}$ の切削力と計算値

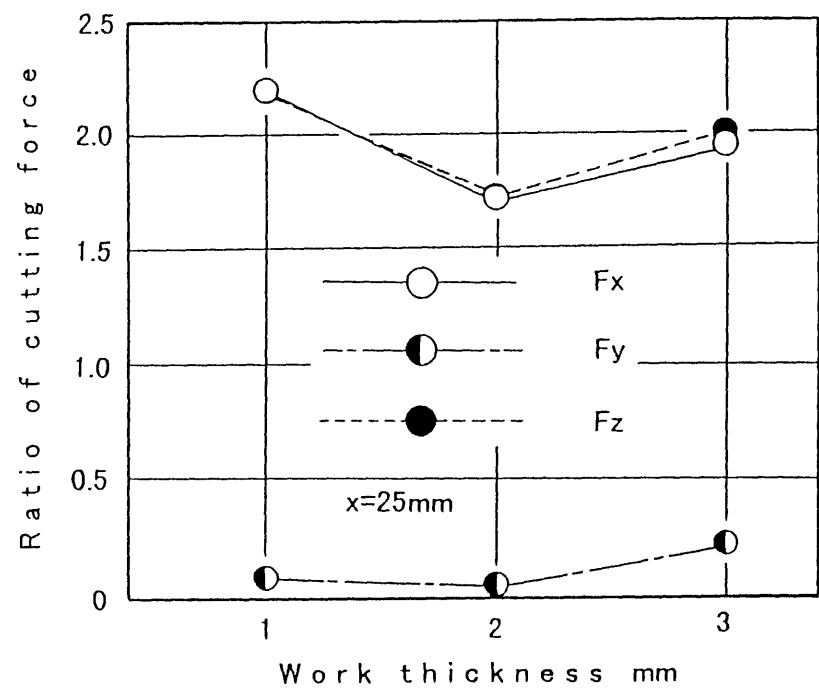


(c) z分力

図5.8 二軸加工による壁厚 $w_t=3\text{mm}$, $x=25\text{mm}$ の切削力と計算値



(a) $x = 2.5 \text{ mm}$



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

図5.9 一軸加工対する二軸加工の切削力比

9に示す。(a)図は $x = 2.5 \text{ mm}$ において、 y 分力の比はいずれの壁厚も0.1未満であり、9割以上の y 分力が相殺されたことを示している。最小値は壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ の y 分力比であり、このときの値は0.03である。一方 x および z 分力は壁厚 1 mm を除いてほぼ2倍になっており、2.2節の二軸加工における切削特性にほぼ同じ結果となった。 x および z 分力が壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ において、2.32および2.34と大きくなった原因として、一軸加工における切削力の減少が挙げられる。これは壁厚が $w_t = 1 \text{ mm}$ と小さく剛性が低いため、一軸加工において薄壁が大きく変形し切削力が減少したことに起因したものと考えられる。

次に(b)図は $x = 2.5 \text{ mm}$ の場合であり、 y 分力の比は壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ で0.23とやや大きくなっているがその他の壁厚では0.1未満であり、 y 分力がほぼ相殺されたことを示している。 x および z 分力は壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ において $x = 2.5 \text{ mm}$ の場合と同様に、2.2程度の大きい値であり、一軸加工の定常区間における切削力の減少によるものと考えられる。すなわち、一軸加工の定常区間において切削力は減少しているものの、二軸加工においては定常区間において切削力はほとんど変化しなかったため、一軸加工の切削力に対して比を取ると2倍以上の値になる。

以上から、若干のばらつきはあるものの、薄壁形状部品を二軸加工法により側面加工を行うことにより、工作物において y 分力は相殺され、 x および z 分力は倍増することが示された。

5.2 解析結果

5.2.1 解析条件および方法

工作物および工具の変形解析に使用した条件は次の通りである。

工作物

ヤング率： $73 \times 10^9 \text{ Pa}$

荷重：表5.1および図5.10参照

拘束条件：工作物下面の全節点の変位を $u_x = u_y = u_z = 0$ とする。また，薄壁の両端部分を結びつけている節部分の下面の変位を $u_x = u_y = u_z = 0$ とする。

工具

ヤング率： $206 \times 10^9 \text{ Pa}$

荷重：表5.2参照

拘束条件：刃先 ($z = 0 \text{ mm}$) より 57.5 mm ないし 97.5 mm の中心軸および $y = -6.5, 6.5 \text{ mm}$ に相当する節点 (回転拘束のため) の変位を $u_x = u_y = u_z = 0$ とする。

主軸については式(4.9)および式(4.10)を用いて各軸の変形量を求める。荷重については後述する表5.3に一例を示した。

一軸加工の切削力は各壁厚および測定位置で異なっており，静荷重による変形解析で加工誤差を精度よく予測するためには，全ての条件に対して個別に荷重を求める必要がある．したがって，ここでは一例として壁厚 3 mm， $x = 2.5$ mm の表面に対する荷重について述べる．図 5. 10 は加工実験で求めた切削力を解析モデルの節点間隔 (f_i ないし f_{11}) に相当する切削時間 t_i ないし t_{11} でサンプリングしている状態である．ここで得た切削分力 f_{ix} ， f_{iy} および f_{iz} は式 (5. 1) ないし式 (5. 5) によって工作物に対する節点荷重に変換され，表 5. 1 に示す値となる．

・定常区間の場合 ($f_i : i = 1 \sim 9$)

$$f_{ia} = f_i / 12 \quad (5. 1)$$

$$f_{ib} = f_i / 2 \quad (5. 2)$$

$$f_{ic} = f_i \times 5 / 6 \quad (5. 3)$$

・減少区間の場合 ($f_i : i = 10$)

$$f_{ia} = f_i / 3 \quad (5. 4)$$

$$f_{ib} = f_i \times 2 / 3 \quad (5. 5)$$

なお，式 (5. 1) ないし式 (5. 3) は式 (4. 2) ないし式 (4. 4) に，式 (5. 4) および式 (5. 5) は式 (4. 6) および式 (4. 7) に実際の数値を代入したものである．使用した式および数値は，次の通りである．

・定常区間の場合

$$f_a = f \times A_1 \times l_{12} / (l_{11} + l_{12}) \quad (4. 2)$$

$$f_b = f_{b1} + f_{b2} \quad (4. 3)$$

$$f_{b1} = f \times A_1 \times l_{11} / (l_{11} + l_{12})$$

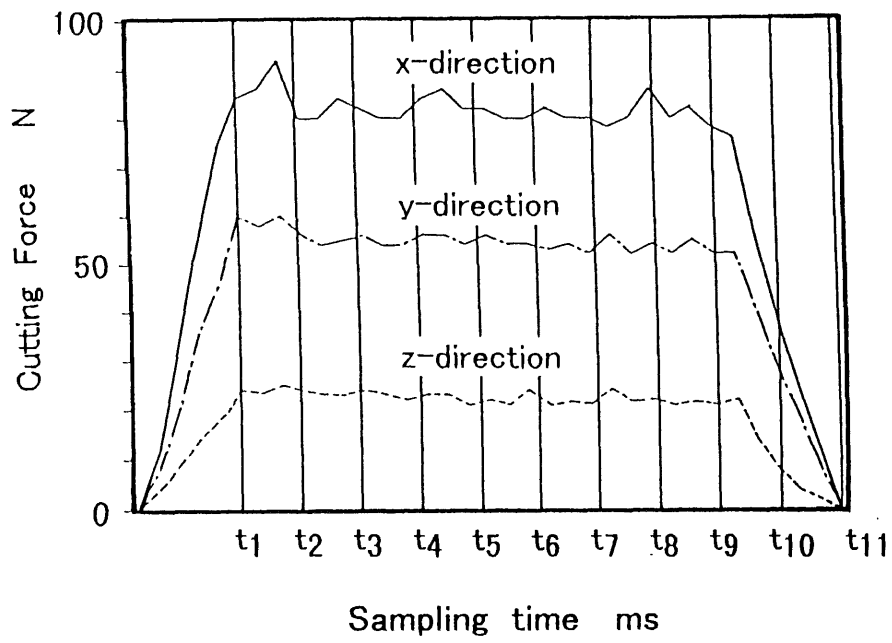


図5. 10 切削力のサンプリング

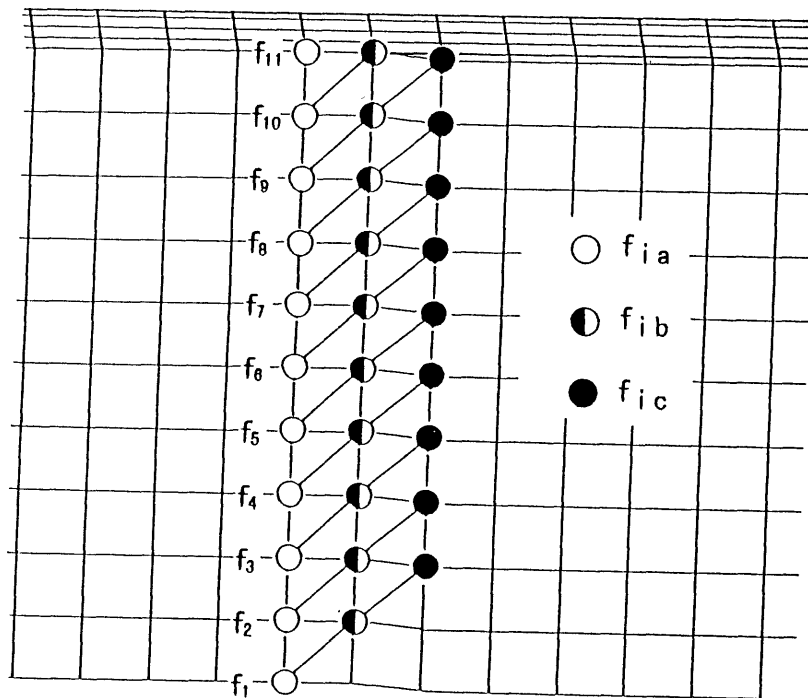


図5. 11 工作物の荷重条件

表5. 1 一軸加工における壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$, $x = 2.5 \text{ mm}$,
表面の工作物に対する荷重

		f	f_{1a}	f_{1b}	f_{1c}
f_1	f_{1x}	114.0	9.5	57.0	47.5
	f_{1y}	58.0	4.8	29.0	24.2
	f_{1z}	25.0	2.1	12.5	10.4
f_2	f_{2x}	80.0	6.7	40.0	33.3
	f_{2y}	54.0	4.5	27.0	22.5
	f_{2z}	23.0	1.9	11.5	9.6
f_3	f_{3x}	84.0	7.0	42.0	35.0
	f_{3y}	54.0	4.5	27.0	22.5
	f_{3z}	23.0	1.9	11.5	9.6
f_4	f_{4x}	86.0	7.2	43.0	35.8
	f_{4y}	56.0	4.7	28.0	23.3
	f_{4z}	23.5	2.0	11.8	9.8
f_5	f_{5x}	82.0	6.8	41.0	34.2
	f_{5y}	55.0	4.6	27.5	22.9
	f_{5z}	22.0	1.8	11.0	9.2
f_6	f_{6x}	84.0	7.0	42.0	35.0
	f_{6y}	53.0	4.4	26.5	22.1
	f_{6z}	22.0	1.8	11.0	9.2
f_7	f_{7x}	80.0	6.7	40.0	33.3
	f_{7y}	54.0	4.5	27.0	22.5
	f_{7z}	24.0	2.0	12.0	10.0
f_8	f_{8x}	84.0	7.0	42.0	35.0
	f_{8y}	52.0	4.3	26.0	21.7
	f_{8z}	21.0	1.8	10.5	8.8
f_9	f_{9x}	78.0	6.5	39.0	32.5
	f_{9y}	51.0	4.3	25.5	21.3
	f_{9z}	22.0	1.8	11.0	9.2
f_{10}	f_{10x}	40.0	13.3	26.7	—
	f_{10y}	22.0	7.3	14.7	—
	f_{10z}	9.0	3.0	6.0	—
f_{11}	—	0	—	—	—

$$f_{b2} = f \times A_2 \times l_{22} / (l_{21} + l_{22})$$

$$f_c = f \times A_2 \times l_{21} / (l_{21} + l_{22}) \quad (4.4)$$

$$A_1 = 1 / 4$$

$$A_2 = 3 / 4$$

$$l_{11} = 2$$

$$l_{12} = 1$$

$$l_{21} = 4$$

$$l_{22} = 5$$

・減少区間の場合

$$f_a = f \times l_2 / (l_1 + l_2) \quad (4.6)$$

$$f_b = f \times l_1 / (l_1 + l_2) \quad (4.7)$$

$$l_1 = 1 / 3$$

$$l_2 = 2 / 3$$

また、 f_{11} は減少区間にあるが値が零であり、変形解析においても変形量は零になるためここでは特に求めていない。

求めた工作物の荷重は、図5.11に示すように各壁高さに対し切れ刃のねじれ角 $\eta = 45^\circ$ に応じて斜めに荷重を加えている。図中の○は加工面に相当する節点であり、変形量の測定点でもある。

工具に対する荷重は、表5.1に示す工作物の荷重を式(4.8)および式(4.9)により変換すると表5.2に示す値となる。この荷重を刃先に相当する節点に壁高さに応じて加える。

主軸の変形量に対する荷重は、図5.10のy分力のみを用いるため、表5.3に示す値となる。この値と各壁高さzを式(4.11)および式(4.12)に代入し、主軸の変形量を求める。

表5.2 一軸加工における壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$, $x = 2.5 \text{ mm}$,
表面の工具に対する荷重

		f	f_{1a}	f_{1b}	f_{1c}
f_1	f_{1x}	114.0	0.4	10.6	15.3
	f_{1y}	58.0	10.7	63.1	51.0
	f_{1z}	25.0	2.1	12.5	10.4
f_2	f_{2x}	80.0	2.3	19.4	20.7
	f_{2y}	54.0	7.7	44.2	34.5
	f_{2z}	23.0	1.9	11.5	9.6
f_3	f_{3x}	84.0	3.2	24.7	24.9
	f_{3y}	54.0	7.7	43.4	33.3
	f_{3z}	23.0	1.9	11.5	9.6
f_4	f_{4x}	86.0	4.3	31.0	29.9
	f_{4y}	56.0	7.4	40.9	30.6
	f_{4z}	23.5	2.0	11.8	9.8
f_5	f_{5x}	82.0	5.1	35.0	32.5
	f_{5y}	55.0	6.5	34.9	25.2
	f_{5z}	22.0	1.8	11.0	9.2
f_6	f_{6x}	84.0	5.7	38.4	35.0
	f_{6y}	53.0	6.0	31.5	22.0
	f_{6z}	22.0	1.8	11.0	9.2
f_7	f_{7x}	80.0	6.4	41.6	36.9
	f_{7y}	54.0	4.9	24.4	15.9
	f_{7z}	24.0	2.0	12.0	10.0
f_8	f_{8x}	84.0	6.9	44.6	39.1
	f_{8y}	52.0	4.4	21.3	13.0
	f_{8z}	21.0	1.8	10.5	8.8
f_9	f_{9x}	78.0	7.1	44.6	38.3
	f_{9y}	51.0	3.2	13.6	6.6
	f_{9z}	22.0	1.8	11.0	9.2
f_{10}	f_{10x}	40.0	14.2	29.5	—
	f_{10y}	22.0	5.5	7.4	—
	f_{10z}	9.0	3.0	6.0	—
f_{11}	—	0	—	—	—

表5.3 一軸加工における壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$, $x = 2.5 \text{ mm}$,
表面の主軸に対する荷重

z	f_y
0.0	58.0
2.5	54.0
5.0	54.0
7.5	56.0
10.0	55.0
12.5	53.0
15.0	54.0
17.5	52.0
20.0	51.0
22.5	52.0
25.0	0.0

5. 2. 2 工作物の変形

図5. 12ないし図5. 15は一軸加工における工作物の変形解析の結果を示しており，それぞれ壁厚 $w_t = 1$ ないし 3 mm の結果である．各図とも横軸の変形量零を挟み右側に表面の正の変形量，左側に裏面の正の変形量を示しており，それぞれ実線が $x = 2.5 \text{ mm}$ ，一点鎖線が $x = 25 \text{ mm}$ の位置における結果である．

初めに図5. 12に示す壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ の結果を考えると，いずれの測定位置における変形量も壁高さ $z = 0 \text{ mm}$ では $0.1 \mu\text{m}$ 程度と土台によりほぼ拘束されていることがわかる．また，変形量は壁高さにつれて増加しており，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ において最大となり，その後は減少し壁高さ $z = 25 \text{ mm}$ ではいずれも変形量零である．これは切削機構によるもので，切削力の定常区間はいずれの壁厚においても壁高さ $z = 0 \sim 19.9 \text{ mm}$ ないし $z = 0 \sim 19.7 \text{ mm}$ に相当しており，解析における測定点では壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ で最も工作物の変形しやすく，その後は切削力の減少区間であるため変形量も減少している．

そこで，各条件の違いにより最も変形量が増加する壁高さとして $z = 20 \text{ mm}$ における変形量を送り方向の測定位置について比較すると，表面において $x = 2.5 \text{ mm}$ では $33.9 \mu\text{m}$ であり， $x = 25 \text{ mm}$ では $69.8 \mu\text{m}$ と $x = 2.5 \text{ mm}$ の約2.1倍に増大している．また裏面において $x = 2.5 \text{ mm}$ では $57.9 \mu\text{m}$ であり， $x = 25 \text{ mm}$ では $118.7 \mu\text{m}$ と表面と同様に $x = 2.5 \text{ mm}$ に比べ2.1倍に増大しており，いずれの加工面においても $x = 2.5 \text{ mm}$ に比べ $x = 25 \text{ mm}$ の変形量の方が大きく，加工位置による剛性の違いが明確に現われている．また加工面について比較すると，表面に比べ裏面の値はいずれの測定位置においても1.7倍になっている．解析に用いた壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ に相当する y 方向の荷重

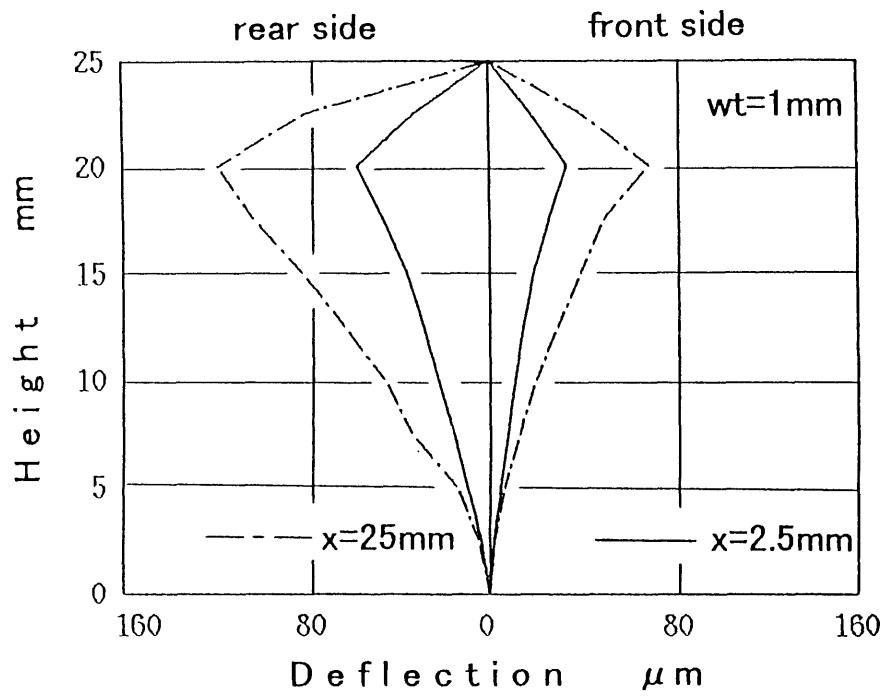


図5.12 壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$ における工作物の変形量 (解析結果)

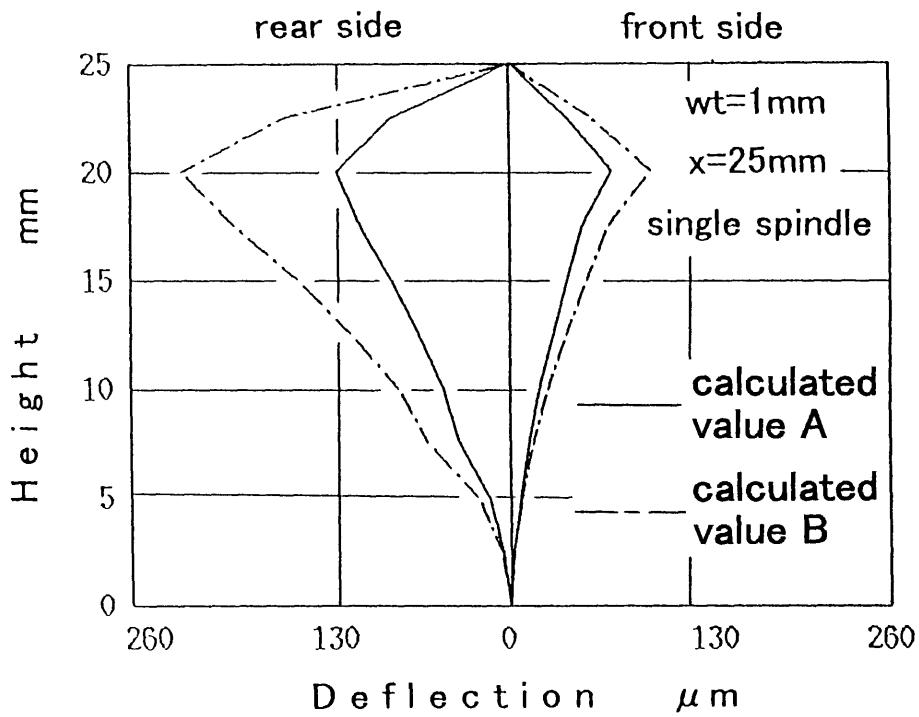


図5.13 計算値Aと計算値Bの比較

f_y は，裏面に比べ表面の方が $x = 2.5 \text{ mm}$ において 8 N ， $x = 25 \text{ mm}$ において 15 N 大きい。しかし，本研究では加工の順序を考慮し半径方向切込み y_w の要素を加えた解析モデルを用いた結果，逆に裏面の変形量の方が大きい値となった。

図 5. 13 は，壁厚 $z = 1 \text{ mm}$ ， $x = 25 \text{ mm}$ における，未切削領域を考慮していない解析モデル（図 4. 2 参照）を用いた変形解析の結果（計算値 B）を一点鎖線，未切削領域を考慮している解析モデルを用いた結果（計算値 A：図 5. 12 では一点鎖線で示している）を実線で示している。下面近傍では両者ともに変形量零に漸近しており，壁高さにつれ両者の差は増大している。壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ において両者を比較すると，計算値 A に比べ計算値 B は表面において $27.3 \mu\text{m}$ ，裏面においては $106.1 \mu\text{m}$ 大きい値となっており，計算値 A に対する比で計算値 B を示すと表面において 1.4 ，裏面においては 1.9 となった。表面に比べ裏面で大きな差が生じており，壁厚が小さくなるほど加工中における未切削領域の影響が大きくなると考えられる。

次に，図 5. 14 に示す壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ について考えると，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ の場合と同様に，いずれの加工面においても下面近傍では変形量がほぼ零であり，壁高さにつれ増大し，高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で最大となっている。壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較を行うと， $x = 2.5 \text{ mm}$ に比べ $x = 25 \text{ mm}$ の変形量は表面において 1.7 倍，裏面においては 1.9 倍に増大しており，加工位置による剛性の違いに起因する変形量の変化が明確に現れている。また，加工面について壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較すると，表面に比べ裏面の変形量は $x = 2.5 \text{ mm}$ において 1.5 倍， $x = 25 \text{ mm}$ において 1.7 倍に増加している。そのときの y 分力を加工面について比較すると，いずれの測定位置においても 1.0 N 未満の

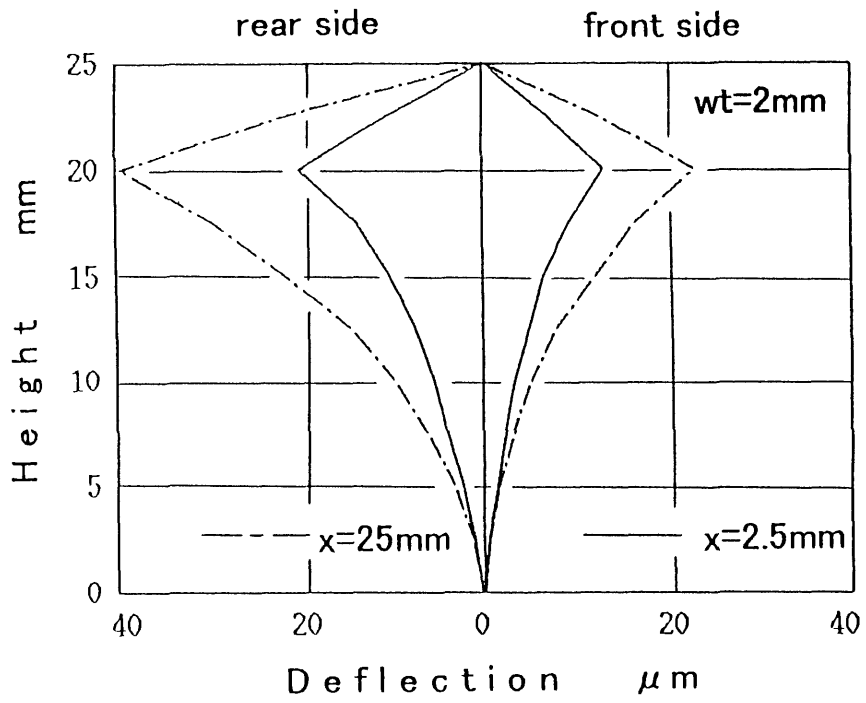


図5. 14 壁厚 $w t = 2\text{mm}$ における工作物の変形量 (解析結果)

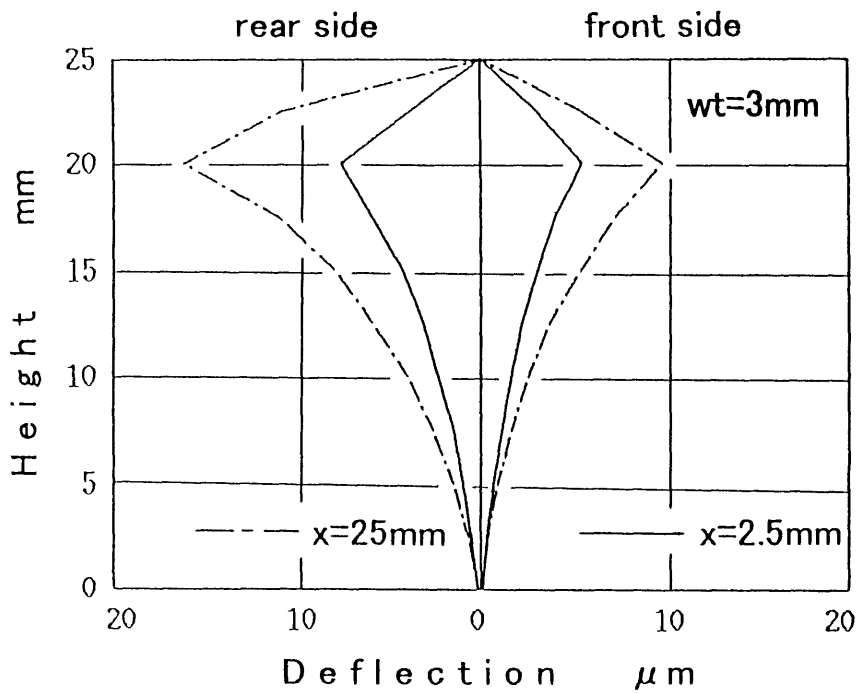


図5. 15 壁厚 $w t = 3\text{mm}$ における工作物の変形量 (解析結果)

差に収まっており，ほぼ同じ荷重を加えている．しかし，解析において加工面により変形量が異なっていることから，加工面による変形量の差は，加工の順序を考慮した解析モデル，すなわち表面の加工を想定した解析において裏面に半径方向切込み y_w の要素を付け加えた解析モデルの影響であると考えられる．

続いて図 5. 15 に示す壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ について考えると，壁厚 $w_t = 1$ および 2 mm の場合と同様に，いずれの加工面においても下面近傍では変形量がほぼ零であり，壁高さにつれ増大し，高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で最大となっている．壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較を行うと， $x = 2.5 \text{ mm}$ に比べ $x = 25 \text{ mm}$ の変形量は表面において 1.7 倍，裏面において 2.1 倍に増大している．また，加工面について壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較すると，表面に比べ裏面の変形量は $x = 2.5 \text{ mm}$ において 1.4 倍， $x = 25 \text{ mm}$ において 1.6 倍に増加している．この傾向も壁厚 $w_t = 1$ および 2 mm における変形量の変化と同様である．

壁厚により変形量を比較すると，いずれの壁厚においても $x = 25 \text{ mm}$ ，裏面における壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置において最大となっており，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ で $118.7 \mu\text{m}$ ，壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ では $39.5 \mu\text{m}$ ，また壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ では $16.2 \mu\text{m}$ と壁厚の減少に対し二次的に増加していることがわかる．以上より，壁厚が小さくなるほどあるいは加工位置の剛性が低いほど工作物の変形量が増加することを確認した．

5. 2. 3 工具の変形

図5. 16ないし図5. 18は壁厚 $w_t = 1$ ないし 3 mm における工具の変形解析の結果であり， $x = 2.5 \text{ mm}$ の変形量を実線， $x = 25 \text{ mm}$ の変形量は破線で示している。

図5. 16に示す壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ について考えると，いずれの測定位置における変形量も下面では 13.4 ないし $14.5 \mu\text{m}$ と $1 \mu\text{m}$ 程度の差に収まっている。また，いずれの変形量も下面から壁高さにつれて減少し，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ から急激に零に漸近している。この傾向は切削機構による切削力の変化，および壁高さに伴う工具モデルの剛性の変化に起因している。工作物モデルと同様に壁高さ $z = 0$ ないし 20 mm は切削力の定常区間であるため，壁高さに伴う変形量の変化は，若干の切削力の減少による影響が含まれているものの，殆どが壁高さに伴う工具剛性の変化に起因している。すなわち，壁高さにつれて荷重点と拘束位置 ($z = 57.5 \text{ mm}$) の距離が小さくなるため，工具モデルに作用する拘束位置を基準としたモーメントの減少に伴い，変形量も減少したと考えられる。壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ 以後は切削力の減少区間であり，切削力に基づいて計算された荷重 f も減少するため，変形量は急激に減少したと考えられる。また，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ 付近において加工面により差が生じており， $x = 2.5 \text{ mm}$ においては $0.8 \mu\text{m}$ ， $x = 25 \text{ mm}$ においては $1.2 \mu\text{m}$ 裏面の方が小さい。これは定常区間における切削力の減少に起因していると考えられる。図5. 5に示した切削力の減少量は，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ において，両加工面ともに $x = 2.5 \text{ mm}$ に比べて $x = 25 \text{ mm}$ の方が大きく，この減少量の影響は図5. 16の両加工面において実線と一点鎖線の壁高さに対する傾きの違いに現れている。

次に，図5. 17に示す壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ について考えると，壁

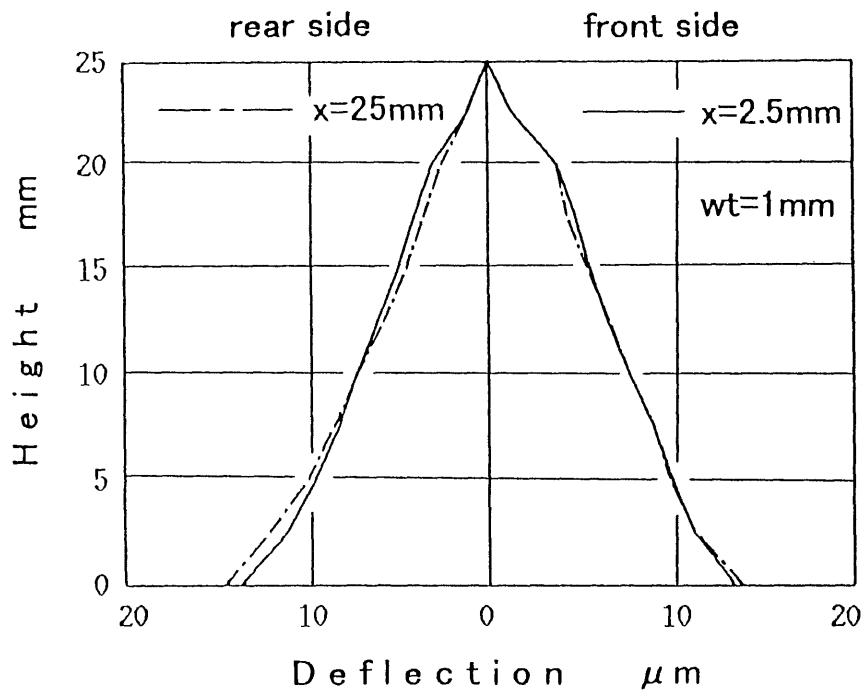


図5. 16 壁厚 $w t = 1\text{mm}$ における工具の変形量 (解析結果)

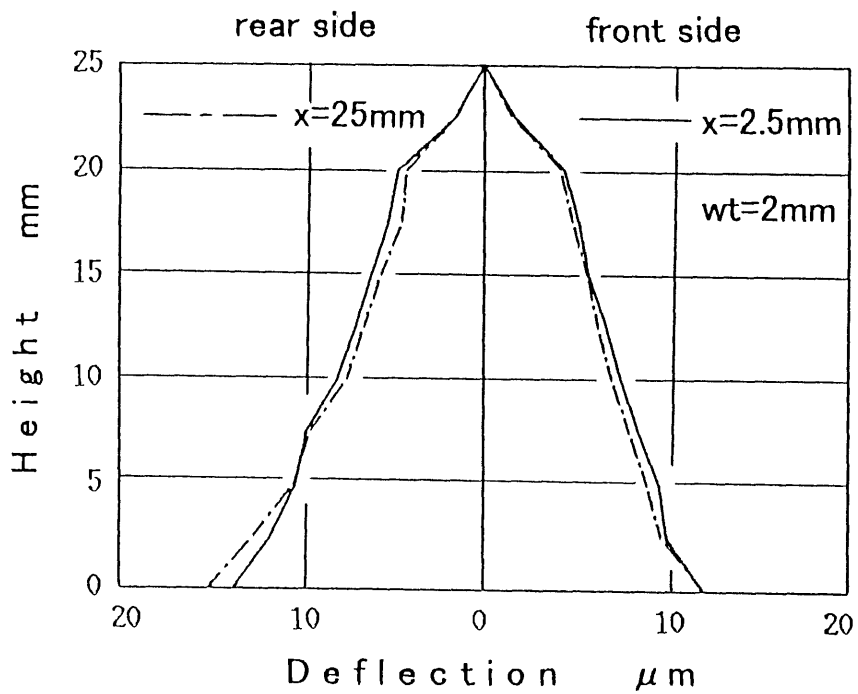


図5. 17 壁厚 $w t = 2\text{mm}$ における工具の変形量 (解析結果)

高さに伴う変形量の変化の傾向は壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ の場合と同じであるが，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ 付近においていずれの変形量も 4.2 ないし $4.7 \mu\text{m}$ と壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ に比べ大きい値である．これは，図 5.5 に示す壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ における切削力の減少量は壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ に比べ小さく，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ （切削時間 $t = 140 \text{ ms}$ ）付近において壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ の切削力が壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ の切削力よりも荷重が大きかったためと考えられる．また，裏面について考えると， $x = 2.5 \text{ mm}$ における変形量（実線）に比べ $x = 25 \text{ mm}$ における変形量（一点鎖線）は壁高さに伴う減少が大きくなっていることが確認できるが，表面については明確に現れていない．これは図 5.5 に示した切削力の減少量において表面の場合，定常区間では三分力ともに小さい値になっており，明確な差として現れなかったと考えられる．

続いて，図 5.18 に示す壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ について考えると，傾向は壁厚 $w_t = 1$ および 2 mm の変形量と同じであるが，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ 付近において変形量は 4.2 ないし $4.6 \mu\text{m}$ と壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ の値（ 4.2 ないし $4.7 \mu\text{m}$ ）に近い値となっている．また，裏面について， $x = 2.5 \text{ mm}$ における変形量（実線）に比べ $x = 25 \text{ mm}$ における変形量（一点鎖線）は壁高さ $z = 0$ ないし 7.5 mm において明確な差が生じている．これは図 5.4 に示した切削力曲線において，切削時間 $t = 30$ ないし 75 ms で表面に比べ裏面の方が三分力とも大きく，壁高さにすると $z = 0$ ないし 7.9 mm と上記の範囲と一致する．

二軸加工については，壁厚および送り方向の位置にかかわらず一定の切削状態であると仮定しているため，比較的安定した切削力を用いる必要がある．そこで，図 5.19 に示す壁厚 3 mm ， $x = 2.5 \text{ mm}$ ，表面の切削力が，定常区間における切削力の減少量 $d_f x$

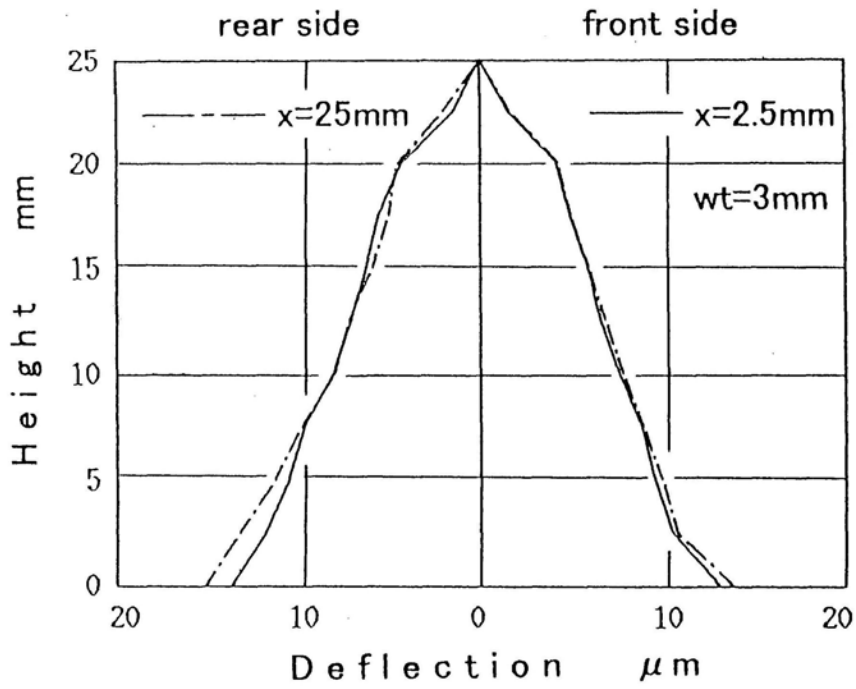


図5. 18 壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$ における工具の変形量 (解析結果)

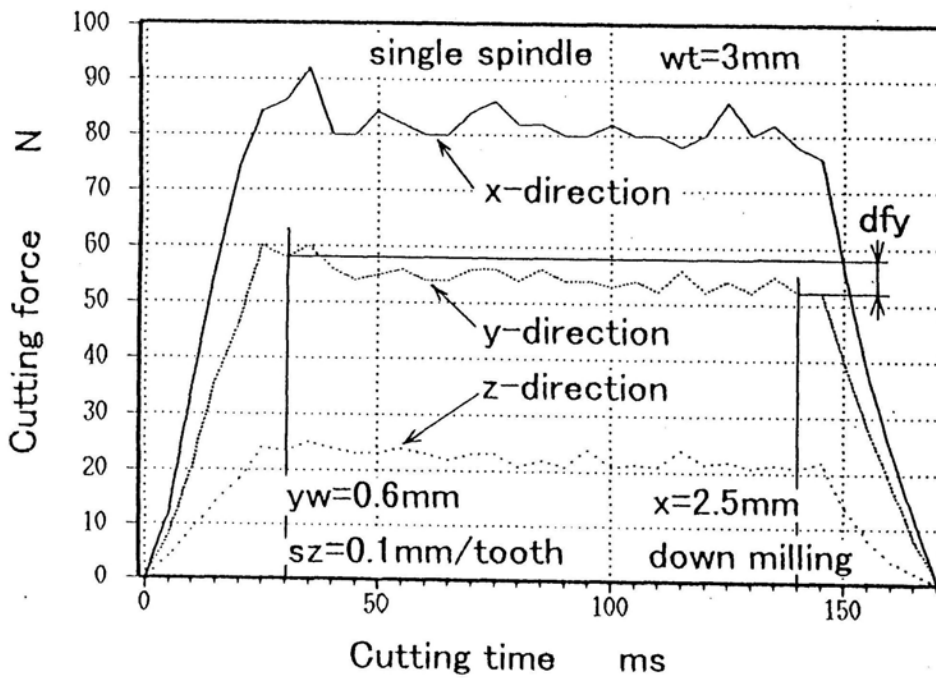


図5. 19 一軸加工による壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$, $x = 2.5 \text{ mm}$,
表面の切削力

ないし $d f z$ がいずれの場合も $7 N$ 以下と小さいため，この条件における工具の変形量を二軸加工における工具の変形量として用いる．

5. 2. 4 主軸剛性に基づく変形

図5. 20ないし図5. 22は、式(4. 11)および式(4. 12)により求めた一軸加工における主軸の変形量であり、 $x = 2.5$ mmの変形量を実線、 $x = 25$ mmの変形量は破線で示している。

図5. 20に示す壁厚 $w_t = 1$ mmの場合、壁高さ $z = 0$ mmの変形量を比較すると、表面については 17.0 および 17.6 μ m、裏面については 21.6 および 22.3 μ mと加工面により大きく異なっている。これは、4. 2節で述べたように、表面側の主軸剛性と裏面側の主軸剛性の違いによる影響が大きい。上面に移動するにつれ両加工面の変形量の差は小さくなり、壁高さ $z = 20$ mm以後は切削力の減少により急激に減少している。また、裏面の壁高さに伴う変形量の変化について考えると、 $x = 2.5$ mmにおける変形量(実線)に比べ $x = 25$ mm(一点鎖線)の変形量の方が大きい。これは工具の変形と同様であり、図5. 5に示すように壁厚 $w_t = 1$ mm、裏面の場合、 $x = 2.5$ mmに比べ $x = 25$ mmの方が減少量が大きいことに起因している。

次に、図5. 21および図5. 22に示す壁厚 $w_t = 2$ および 3 mmを考えると、壁高さに伴う変形量の傾向は壁厚 $w_t = 1$ mmと同様である。壁高さ $z = 0$ mmの変形量を比較すると、表面については 14.9 ないし 15.4 μ mでありその差は 0.5 μ mと小さいが、裏面については 20.6 ないし 23.9 μ mでありその差は 3.3 μ mと比較的大きい。これは裏面において各条件により切削力の変化が大きかったためと考えられる。一方上面近傍については、いずれの壁厚および測定位置についても差は 1 μ m程度と小さい。主軸の変形量を求めるために用いた式(4. 11)および式(4. 12)は、荷重 f_i 以外の値は全ての条件に対して同じであるため、条件の違いによる変形量の差は荷重 f_i の差に依存している。しか

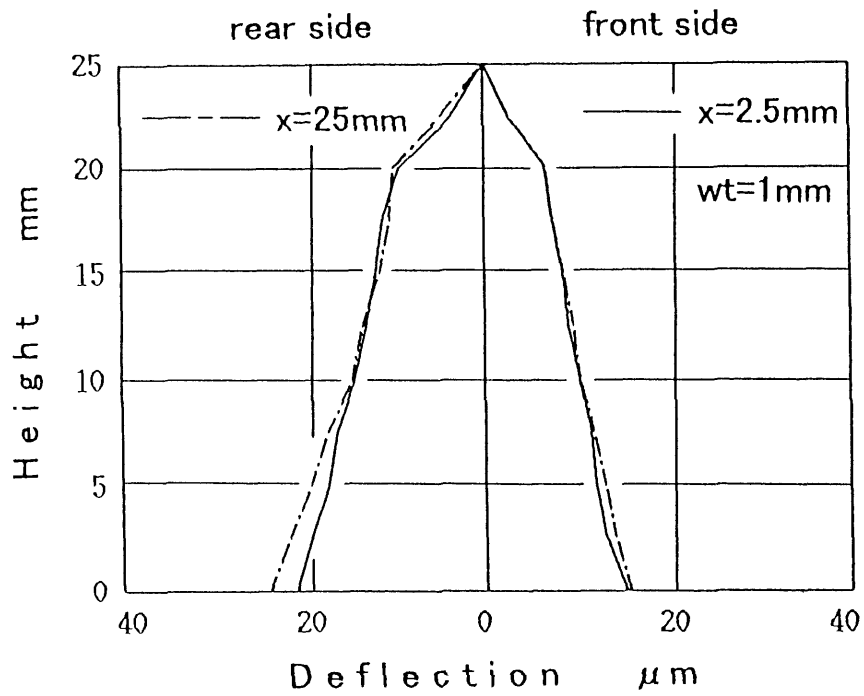


図5. 20 壁厚 $w t = 1\text{mm}$ における主軸の変形量 (計算結果)

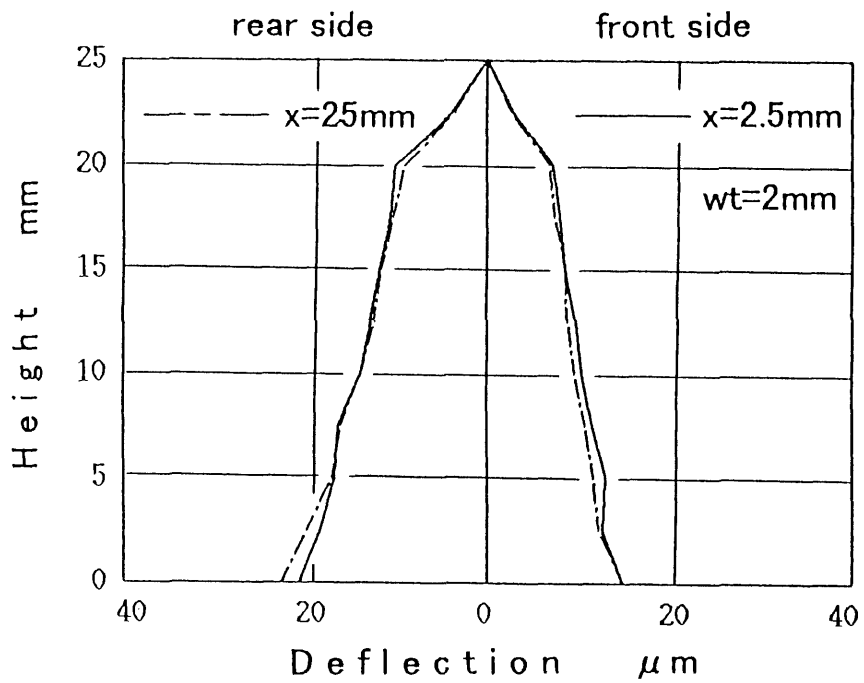


図5. 21 壁厚 $w t = 2\text{mm}$ における主軸の変形量 (計算結果)

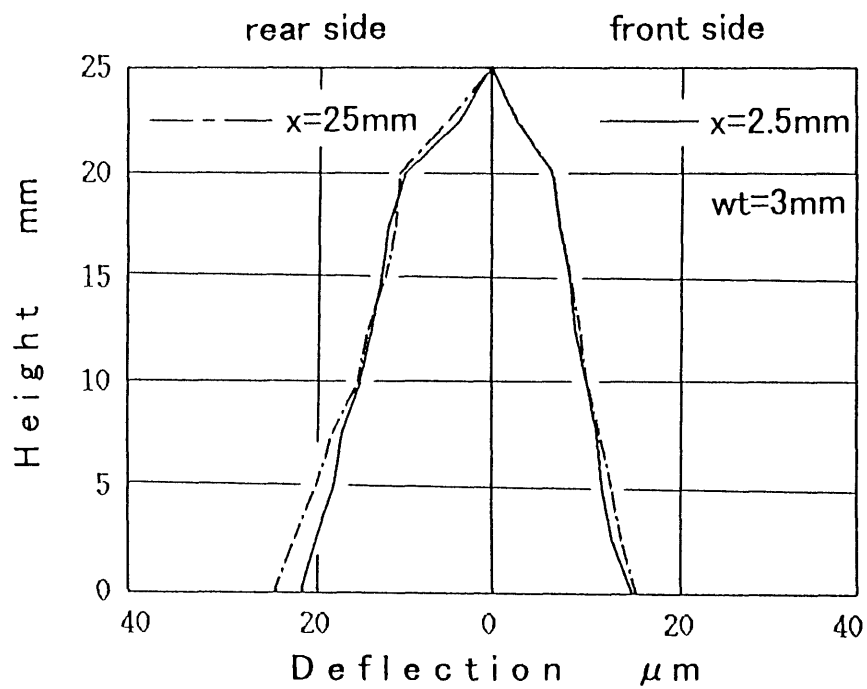


図5.22 壁厚 $w_t = 3\text{mm}$ における主軸の変形量 (計算結果)

し，工具の場合と同様に切削力の減少量が大きい壁高さ $z = 20 \text{ m}$ では主軸の変形量自体が小さいことにより条件の違いによる差が明確に現われなかったと考えられる。

二軸加工については，工具の変形と同様の理由により壁厚 3 mm ， $x = 2.5 \text{ mm}$ における主軸の変形量を用いる。

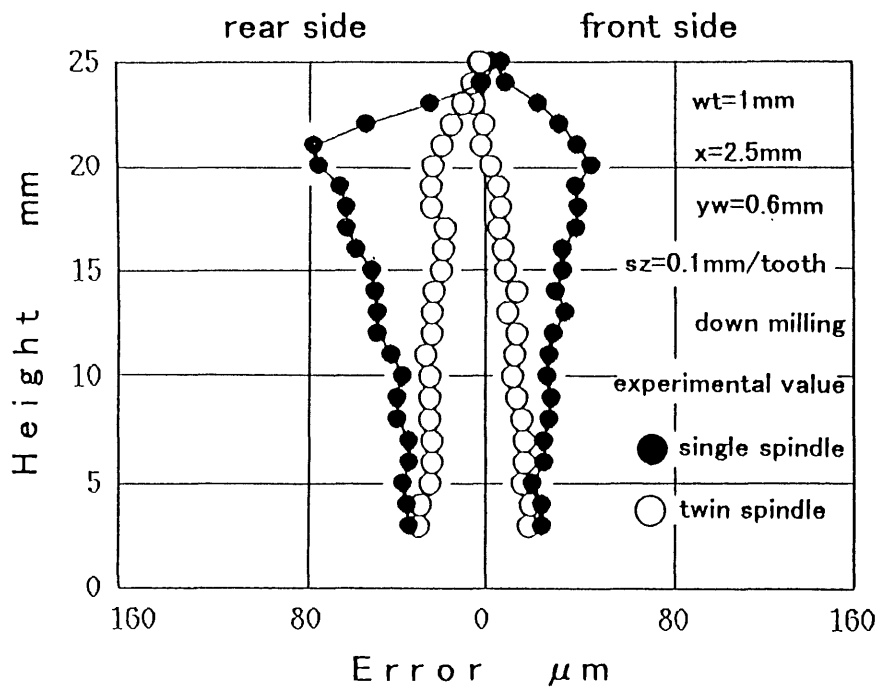
5.3 加工誤差

5.3.1 加工方法による加工誤差

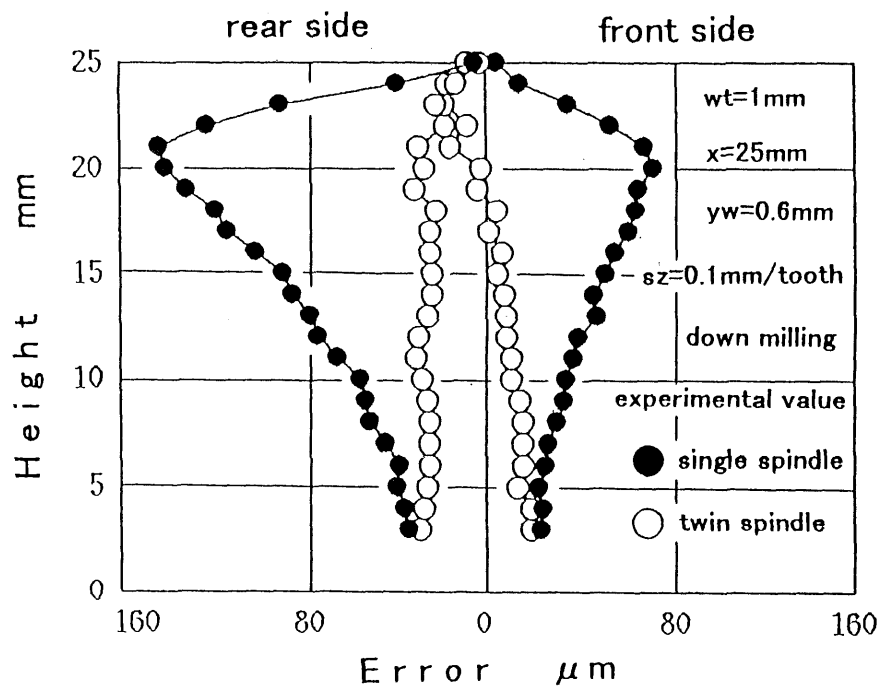
図5.23ないし図5.25は加工実験による一軸加工（●印）および二軸加工（○印）の加工誤差であり，加工誤差零を挟んで右に表面の正の誤差，左に裏面の正の誤差を示している．

図5.23の（a）図に示す壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ において一軸加工の加工誤差は壁高さに伴い両加工面ともに増加している．最大値は壁高さ 20 mm 付近であり，その後は減少して加工誤差零に漸近している．切削力の定常区間は壁高さ $z = 0 \sim 20 \text{ mm}$ 付近に相当し，切削力の減少に寄与する工作物の変形が加工誤差となって明確に現われている．また，加工面について比較すると表面よりも裏面の加工誤差の方が大きく，壁高さ 20 mm で比較すると $25 \mu\text{m}$ の差が生じている．これは表面を先に，その後に裏面を加工したことによる実質的な壁厚の違いに起因していると考えられる．また壁高さにつれて，加工順序による壁厚の違いが両加工面の差に大きく影響しているが，下面近傍における差は図4.10で示したように主軸剛性に違いがあり，表面を加工する主軸の剛性が裏面を加工する主軸の剛性より 20% 程度大きいことによる．一方二軸加工の場合，加工誤差の値は下面近傍において一軸加工の加工誤差とほぼ一致しているが，壁の位置が上面に移動するにつれて減少しており，一軸加工との差は増大している．一軸加工と二軸加工を壁高さ 20 mm で比較すると前者に比べて後者の加工誤差が小さく，表面で $44 \mu\text{m}$ ，裏面では $50 \mu\text{m}$ 二軸加工により加工精度が向上している．

次に（b）図に示す壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の場合，一軸加工の加工誤差は $x = 2.5 \text{ mm}$ の場合に比べて大幅に増加して



(a) $x = 2.5 \text{ mm}$



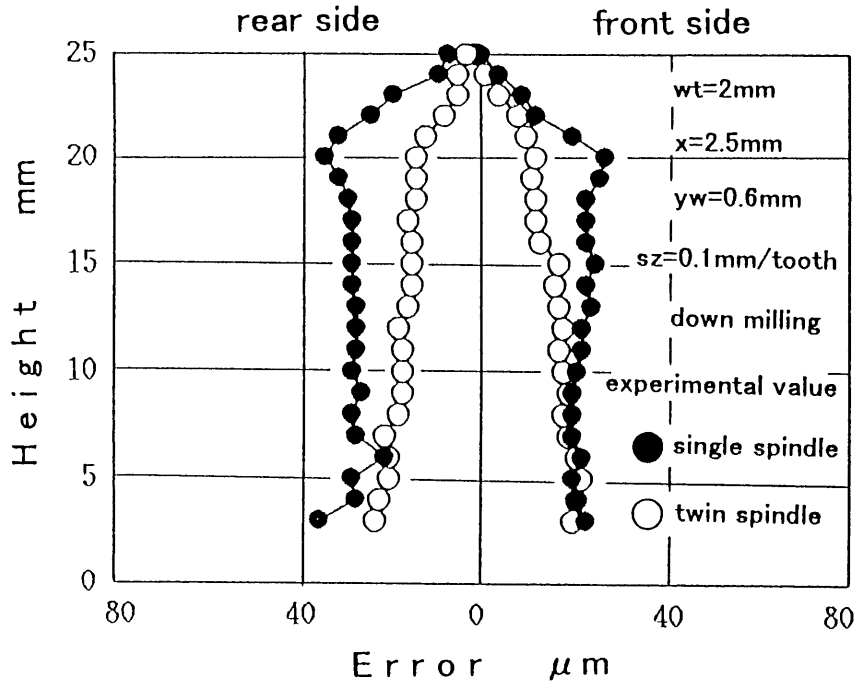
(b) $x = 25 \text{ mm}$

図5.23 壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$ の加工誤差

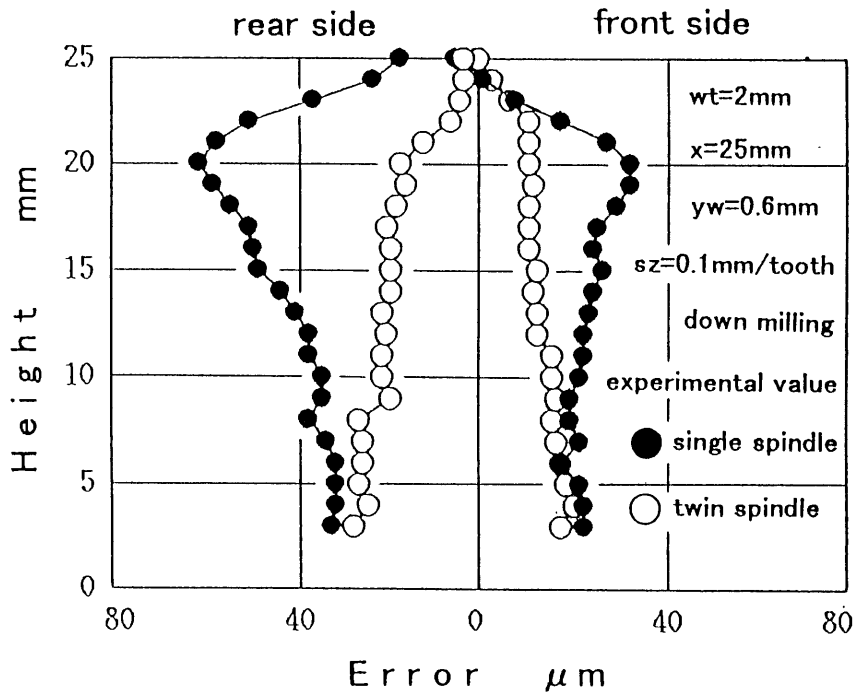
おり，二軸加工との差も壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較すると，表面で $75 \mu\text{m}$ ，裏面では $113 \mu\text{m}$ 増大している．これにより，一軸加工においては薄壁の端部では加工誤差が小さく，薄壁の中央部においては加工誤差が大きいが，二軸加工においては送り方向の位置に拘らず一定の加工面を創成しており，位置により剛性の異なる工作物に対しても二軸加工が有効であることが示された．

図5.24の(a)図に示す壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差について，壁高さに伴う加工誤差の傾向は壁厚 1 mm ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差に一致しているが，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較すると一軸加工の場合，表面において $27 \mu\text{m}$ ，裏面において $34 \mu\text{m}$ と壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差に比べ約 $1/2$ と小さい値になっており，壁厚の増加によって工作物の剛性が増加したことを示している．一方，二軸加工の加工誤差については，下面から壁高さに伴い減少しており，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差と傾向が一致している．一軸加工と二軸加工の加工誤差を壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較すると，表面において $15 \mu\text{m}$ ，裏面において $20 \mu\text{m}$ の差になり，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差改善効果（表面で $44 \mu\text{m}$ ，裏面では $50 \mu\text{m}$ ）に比べ小さくなっている．続いて，(b)図に示す壁厚 $w_t = 2 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差において，一軸加工の加工誤差は $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差に比べて両加工面ともに増加しているが，二軸加工の加工誤差はほとんど変わらない．壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較すると両者の差は表面について $22 \mu\text{m}$ ，裏面について $44 \mu\text{m}$ となっており， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差に比べ加工誤差改善効果が増大したことを示している．

次に図5.25の(a)図に示す壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の加工誤差について考えると，壁高さに伴う加工誤差の傾向は

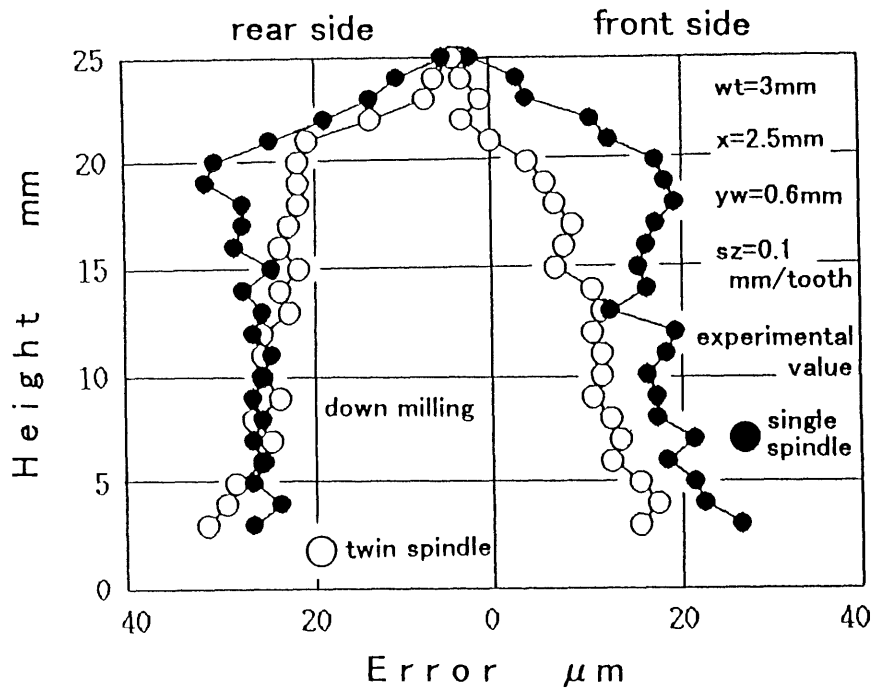


(a) $x = 2.5 \text{ mm}$

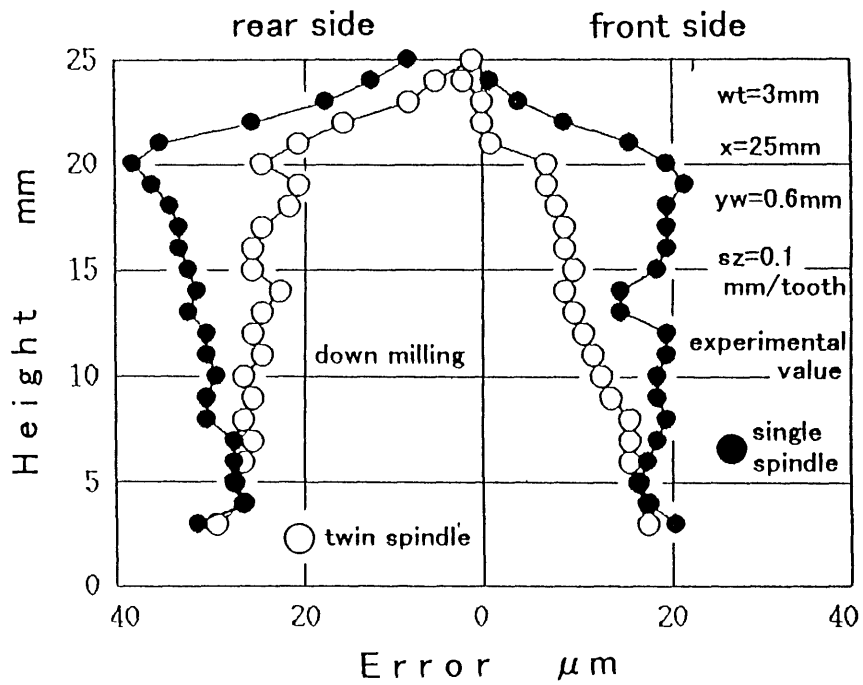


(b) $x = 25 \text{ mm}$

図5.24 壁厚 $w t = 2 \text{ mm}$ の加工誤差



(a) $x = 2.5 \text{ mm}$



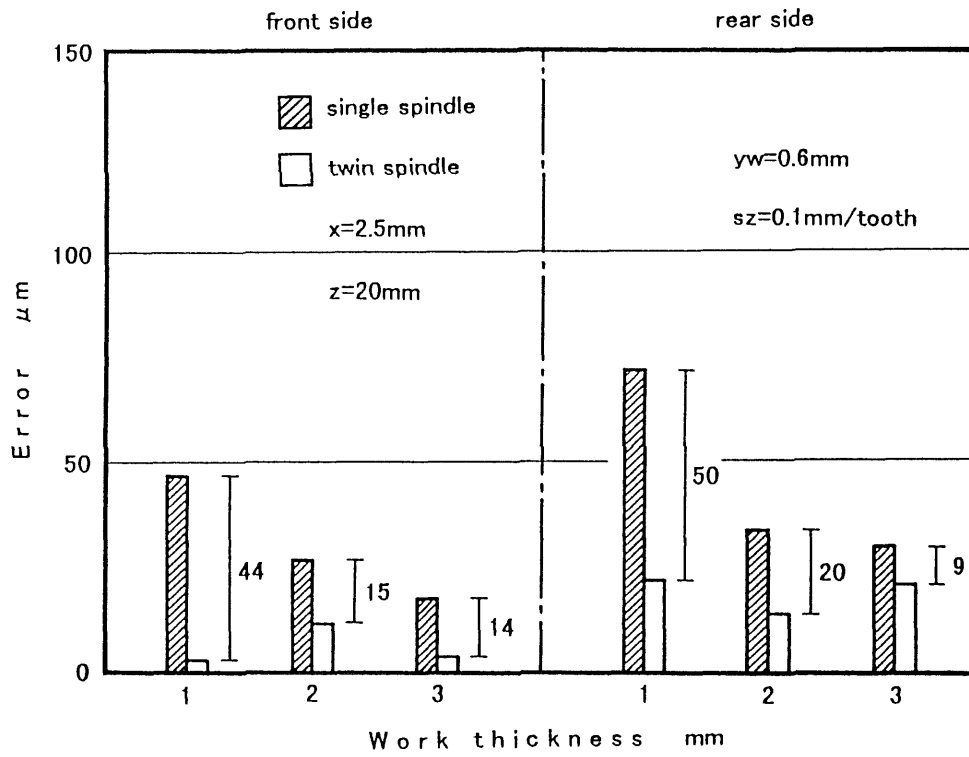
(b) $x = 25 \text{ mm}$

図5. 25 壁厚 $w t = 3 \text{ mm}$ の加工誤差

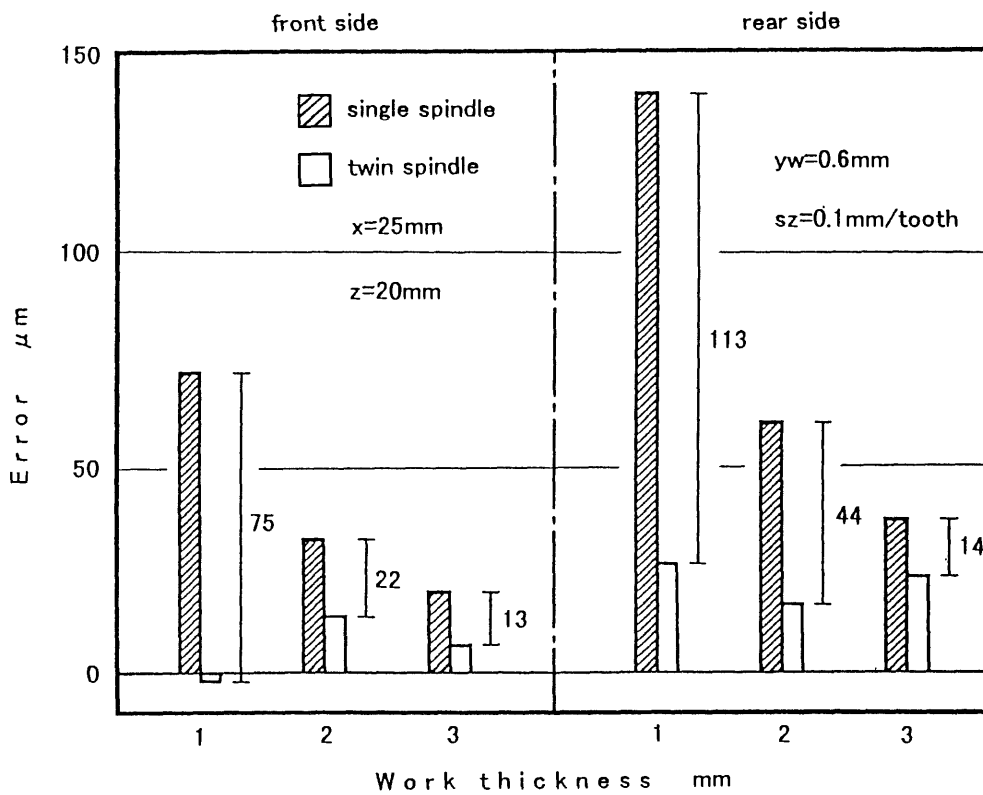
壁厚 1 および 2 mm の加工誤差に一致しているが，二軸加工の加工誤差改善効果は壁高さ $z = 20$ mm において，表面では $13 \mu\text{m}$ ，裏面では $9 \mu\text{m}$ と他の壁厚に比べて小さい．また一軸加工の場合，壁高さ $z = 20$ mm の位置で加工面について比較すると， $14 \mu\text{m}$ 裏面の方が大きい．これは，主軸剛性の違いによる差も含まれているが，加工順序による影響すなわち実質的な壁厚の違いによるものと考えられる．(b) 図に示す $x = 25$ mm の加工誤差について壁高さ $z = 20$ mm の位置で比較すると，一軸加工と二軸加工の加工誤差の差は，表面において $13 \mu\text{m}$ ，裏面において $14 \mu\text{m}$ と $x = 2.5$ mm に比べ増加しており，加工位置による加工誤差の変化が現れている．

図5.26は一軸加工と二軸加工における加工誤差を壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で比較したものである。なお、一軸加工の加工誤差は壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で最大となるため、棒グラフで示した値の差は加工法による最大加工誤差の差を意味する。(a)図に示す $x = 2.5 \text{ mm}$ の位置について、両加工面ともに壁厚の減少に伴い一軸加工の加工誤差が増大しているが、二軸加工の加工誤差は壁厚の減少に拘らず変化が小さいため、両者の差は増大している。両者の差は壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ 、裏面の場合に $50 \mu\text{m}$ と最も大きいですが、壁厚が大きくなるにつれて、減少している。また、同一の壁厚で比較すると裏面の方が大きく、加工の順序および主軸剛性の違いによる影響が明らかである。

次に(b)図に示す $x = 25 \text{ mm}$ の位置について考えると、加工誤差の差は上記の傾向は一致しているものの、 $x = 2.5 \text{ mm}$ の結果と比較するといずれの条件においても加工誤差の差が大きくなっており、加工位置による薄壁の剛性の違いに起因している。最大加工誤差の差を $x = 2.5 \text{ mm}$ の結果と比較し、前者に対する比を求めると、壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ 、裏面の場合 $113 / 50 = 2.3$ と最も大きく、表面の $75 / 44 = 1.7$ との差が大きい。しかし、壁厚が増加するにつれて比は小さくなり、壁厚 $w_t = 3 \text{ mm}$ において裏面では 1.6 、表面では 0.9 となり、両者の差は小さくなっている。



(a) $x = 2.5\text{mm}$



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

図5. 26 壁高さ $z = 20\text{mm}$ の位置による加工誤差の比較

5.3.2 実験結果と解析結果の比較

図5.27は一軸加工における加工誤差の計算値（実線）と実験値（●印）の一例であり，壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 25 \text{ mm}$ における表面の結果である．また，工具と主軸の変形量を加算した主軸系の変形量（破線）および工作物の変形量（一点鎖線）も併記している．図より，計算値と実験値は下面近傍から，壁高さに伴い増加しており，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ の位置で最大となっている．そのときの値はそれぞれ $79.7 \mu\text{m}$ および $73 \mu\text{m}$ となり予測誤差は $6.7 \mu\text{m}$ ある．また，壁高さ別に両者の差をとり，平均と標準偏差を求めたところ，平均予測誤差は $4.0 \mu\text{m}$ ，標準偏差 $2.1 \mu\text{m}$ と小さく，両者はほぼ一致している．計算値において，下面近傍では工具の変形量の割合が大きいが，上面に移動するにつれて工作物の変形量は増加し，工具の変形量は減少しているため，工作物の割合が増大している．

図5.28は一軸加工と二軸加工の計算値および実験値を比較したものであり，誤差零を挟んで右側に表面，左側に裏面の正の加工誤差を示している．（a）図に示す壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ ， $x = 2.5 \text{ mm}$ の場合，一軸加工においては両加工面ともに計算値と実験値は壁高さに伴い増加しており，壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ において最大となっている．また，両者は壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ 以後では減少し，加工誤差零に漸近しており，傾向は一致している．壁高さ別に両者の差について平均値および標準偏差を求めたところ，表面における平均値は $2.7 \mu\text{m}$ ，標準偏差は $1.8 \mu\text{m}$ ，裏面における平均値は $2.6 \mu\text{m}$ ，標準偏差は $2.2 \mu\text{m}$ と小さく，いずれの加工面においても両者はほぼ一致している．したがって，表面を先に，その後裏面を加工することによって生ずる加工誤差の違い，すなわち実質的な壁厚の違いに起因する加工誤差の違いについても精度よく予測でき

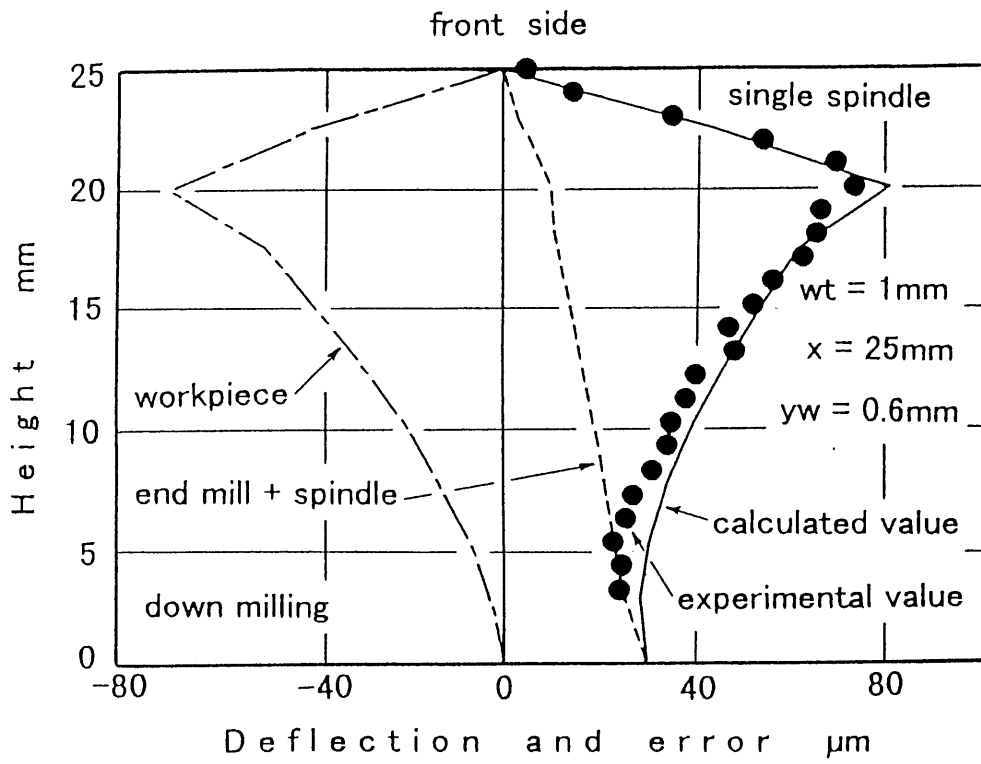
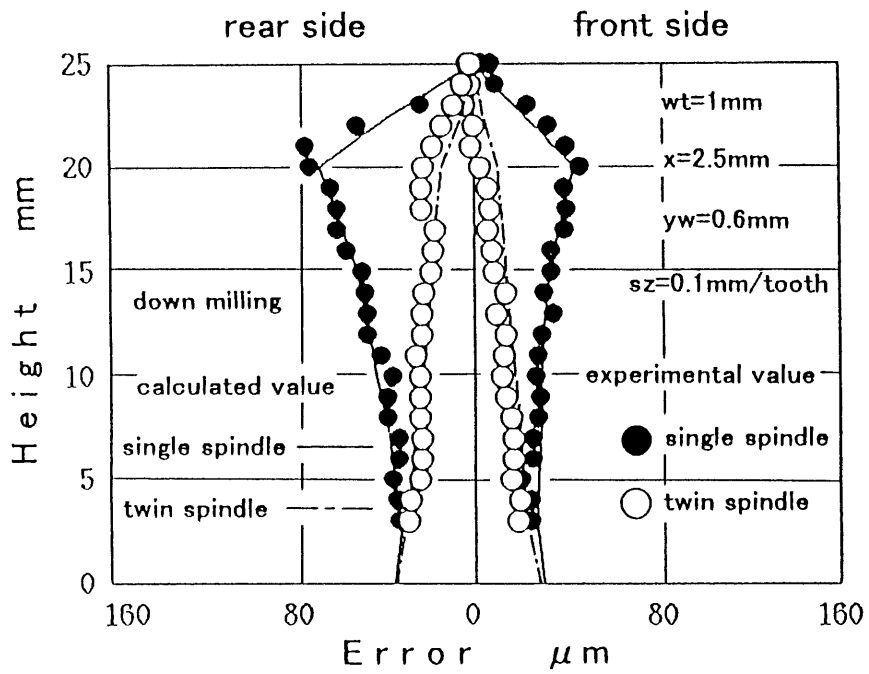
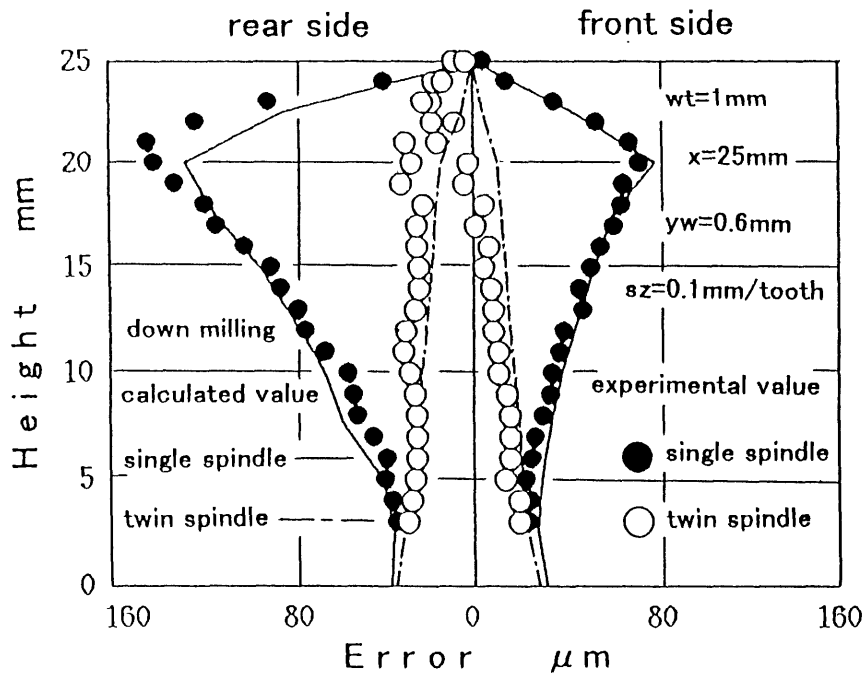


図5.27 一軸加工における加工誤差の計算値と実験値



(a) $x = 2.5 \text{ mm}$



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

図5. 28 壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$ における加工誤差の計算値と実験値

たと考えられる。一方二軸加工の場合，実験値と計算値は壁高さに伴い減少しており，上面では加工誤差零に漸近していることから，両者の傾向は一致している。また，一軸加工と同様に二軸加工において，壁高さ別に両者の差について平均値および標準誤差を求めたところ，表面における平均値は $5.7\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $1.2\ \mu\text{m}$ となり，裏面における平均値は $5.0\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $3.6\ \mu\text{m}$ と小さく，いずれの加工面においても両者はほぼ一致している。

次に(b)図に示す壁厚 $w_t = 1\ \text{mm}$ ， $x = 25\ \text{mm}$ の場合，一軸加工において計算値と実験値の差は，表面において平均値は $8.1\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $1.9\ \mu\text{m}$ となり，裏面における平均値は $9.4\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $6.0\ \mu\text{m}$ と平均値は大きくなっているものの，全体の加工誤差から考えると小さく，いずれの加工面においても両者はほぼ一致している。また，加工位置による工作物の剛性の違いに基づく加工誤差の変化すなわち薄壁の端部では加工誤差が小さく，中央部では加工誤差が大きくなる現象を精度よく予測できている。

図5.29は，壁厚 $w_t = 1\ \text{mm}$ ， $x = 25\ \text{mm}$ の位置について，加工中における未切削領域を考慮していない工作物モデル(図4.2参照)を用いた場合の計算値(計算値B：一点鎖線)と実験値(●印)を示したもので，比較のために未切削領域を考慮した工作物モデルを用いた計算値(計算値A：実線)も併記している。図より計算値Aと実験値はほぼ一致しているが，計算値Bは両者に比べ大きい値を示している。計算値Aと計算値Bを壁高さ $z = 20\ \text{mm}$ で比較すると，表面では $27.3\ \mu\text{m}$ ，裏面では $106.1\ \mu\text{m}$ と大きい差が開いている。また，壁高さ別に計算値Bと実験値の差を求めると，表面において平均値は $14.5\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $8.4\ \mu\text{m}$ となり，裏面において平均値は $53.8\ \mu\text{m}$ ，標準偏差は $27.6\ \mu\text{m}$ と大きい値となった。この結果より，壁厚の小さい薄壁形状

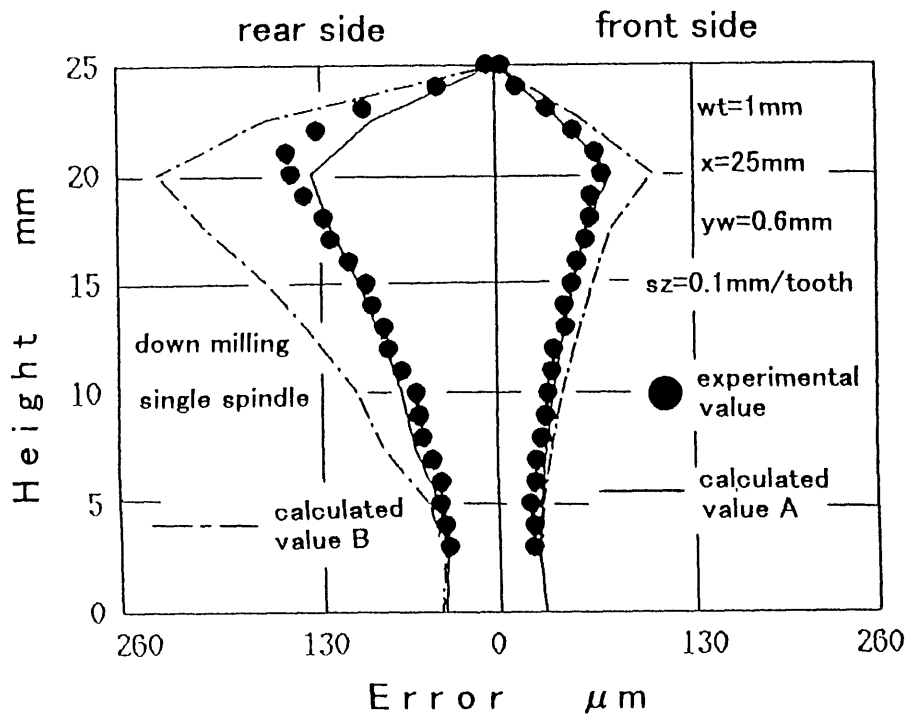


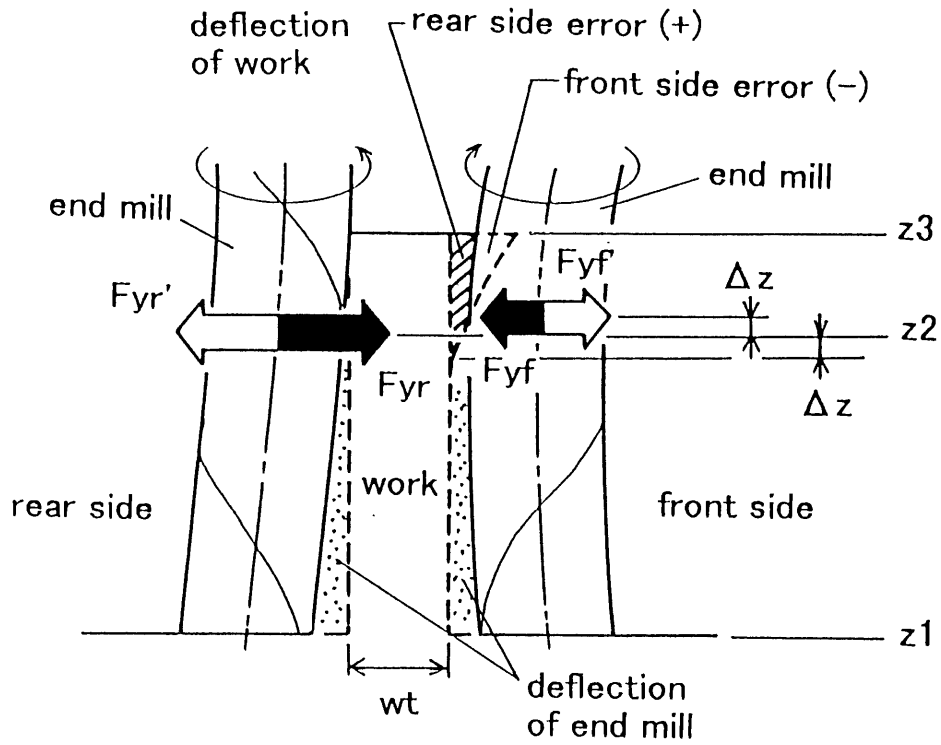
図5. 29 壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の位置における計算値 A と計算値 B の比較

部品の F E M 解析において，未切削領域を考慮した工作物モデルを用いることで，高精度な解析が可能であることが示された．

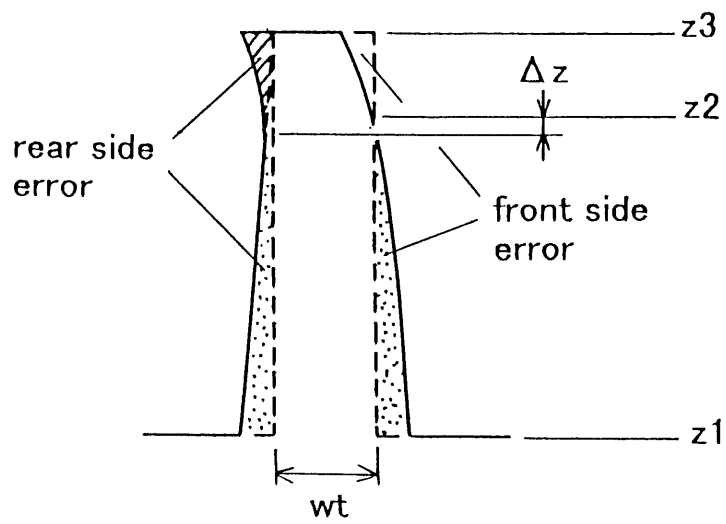
また，図 5 . 2 8 の (b) 図に示す二軸加工において上面近傍で実験値は両加工面ともに計算値の左側にずれている．これは，二軸加工に用いた工具の切れ刃形状もしくは取付けの誤差により図 5 . 6 に示す y 分力が完全に相殺されなかったため，薄壁が変形したものと考えられる．ここで，二軸加工において，工具の取付け誤差により両軸の工具の位相が一致していなかった場合について考えると，その切削状態および加工誤差は図 5 . 3 0 のようになる．

(a) 図は，表面側の切れ刃に対し裏面側の切れ刃の位相が，壁高さ方向に Δz 遅れた場合における二軸加工の切削状態である．図において，区間 $z_1 z_2$ は切削力の定常区間であり，区間 $z_2 z_3$ は減少区間である．切削の進行に伴い，切れ刃による切削位置は薄壁の下面から上面に移動する．定常区間 $z_1 z_2$ に二軸の切削位置がある時刻には表面側の軸および裏面側の軸から薄壁に作用する y 分力 $F_{y f}$ および $F_{y r}$ は大きさが等しい．また Δz は小さいため，両軸からの y 分力はお互いに打ち消し合い薄壁は変形しない．しかし，表面の切削位置が減少区間 $z_2 z_3$ に移動した場合， $F_{y f}$ は $F_{y r}$ に比べ小さくなり，両者の合力は薄壁が表面側に変形する方向に作用する．薄壁の変形により目標の壁厚から表面に突出した薄壁は，表面の切れ刃により切削される部分と切り残される部分（斜線部）があり，薄壁の変形は加工後に切削力から開放され (b) 図に示すような加工誤差を生ずる．

(b) 図において，表面は壁高さ z_2 から工作物の切り過ぎ量により裏面の方向に湾曲した形の加工面が生成される．一方裏面については，表面の切削位置が z_2 に達した時刻では裏面の切削位置は $z_2 - \Delta z$ の位置であり，この位置から切り残し量の影響により表



(a) 切削状態



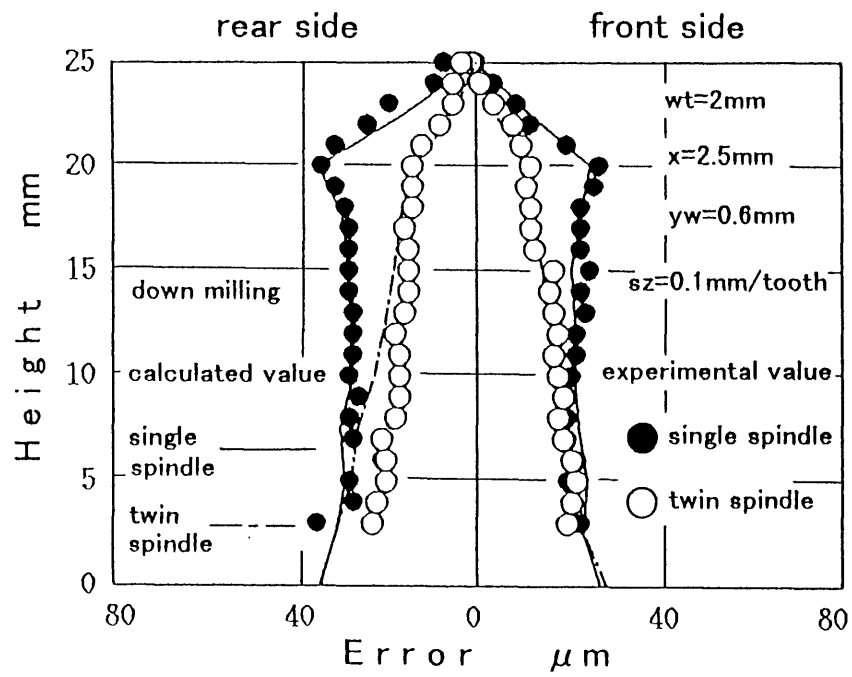
(b) 加工誤差

図5.30 切れ刃の位相差を含んだ二軸加工の切削状態と加工誤差

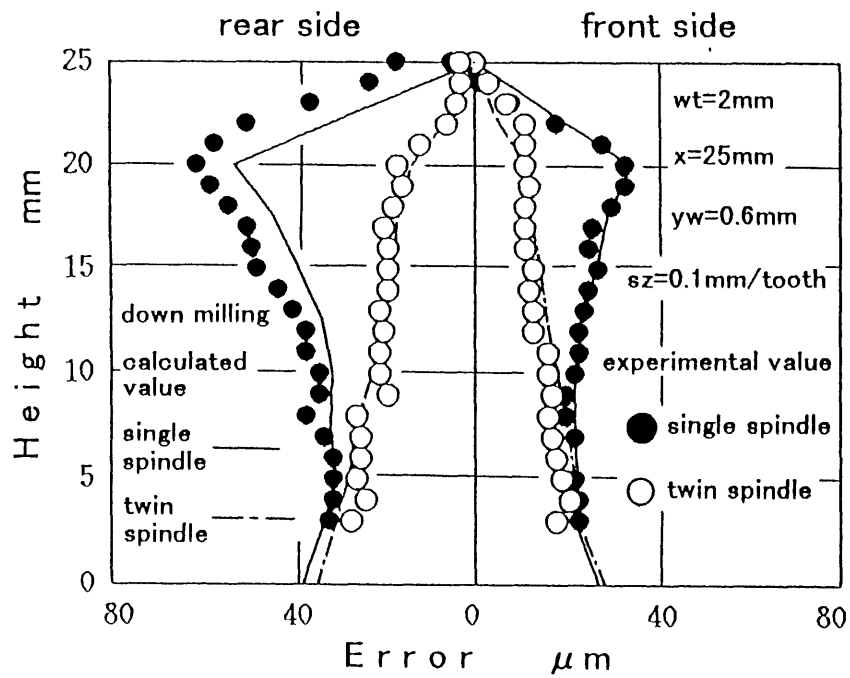
面と同じ方向に湾曲した形の加工面を生成する。したがって、図5.28に示す二軸加工における計算値からの実験値のずれは、工具の取付け誤差でほぼ説明ができる。

図5.31の(a)図に示す壁厚 $w_t = 2\text{ mm}$ 、 $x = 2.5\text{ mm}$ の位置における計算値と実験値について比較すると、一軸加工および二軸加工ともに傾向が一致している。一軸加工における計算値と実験値の差は、表面では平均 $2.2\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $1.5\text{ }\mu\text{ m}$ であり、裏面では平均 $1.0\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $0.7\text{ }\mu\text{ m}$ と小さく両加工面において両者はほぼ一致している。また、二軸加工においても両者の差は、表面で平均 $1.1\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $0.8\text{ }\mu\text{ m}$ となり、裏面では平均 $3.7\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $2.3\text{ }\mu\text{ m}$ と小さい値であることから、両者はほぼ一致していると考えられる。また、(b)図に示す $x = 2.5\text{ mm}$ の位置についても計算値と実験値の差は平均 $5.3\text{ }\mu\text{ m}$ 以下、標準偏差 $3.0\text{ }\mu\text{ m}$ 以下と小さく、両加工法において加工誤差を精度よく予測できている。

図5.32の(a)図に示す壁厚 $w_t = 3\text{ mm}$ 、 $x = 2.5\text{ mm}$ の位置における計算値と実験値について比較すると、一軸加工および二軸加工ともに傾向はほぼ一致しているが数値については加工法により差が生じている。一軸加工における計算値と実験値の差は、表面では平均 $1.7\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $0.7\text{ }\mu\text{ m}$ であり、裏面では平均 $3.1\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $2.6\text{ }\mu\text{ m}$ と小さく両者はほぼ一致している。しかし、二軸加工において両者の差は、表面で平均 $6.0\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $1.1\text{ }\mu\text{ m}$ となり、裏面では平均 $3.1\text{ }\mu\text{ m}$ 、標準偏差 $2.2\text{ }\mu\text{ m}$ と大きい。この傾向は(b)図に示す $x = 2.5\text{ mm}$ の位置についても同様であり、二軸加工に用いた工具の切れ味の違いあるいは軸の倒れおよび振れによる切込み量の違いにより、工作物に作用する y 分力が相殺しきれず、薄壁が変形したものと考えられる。

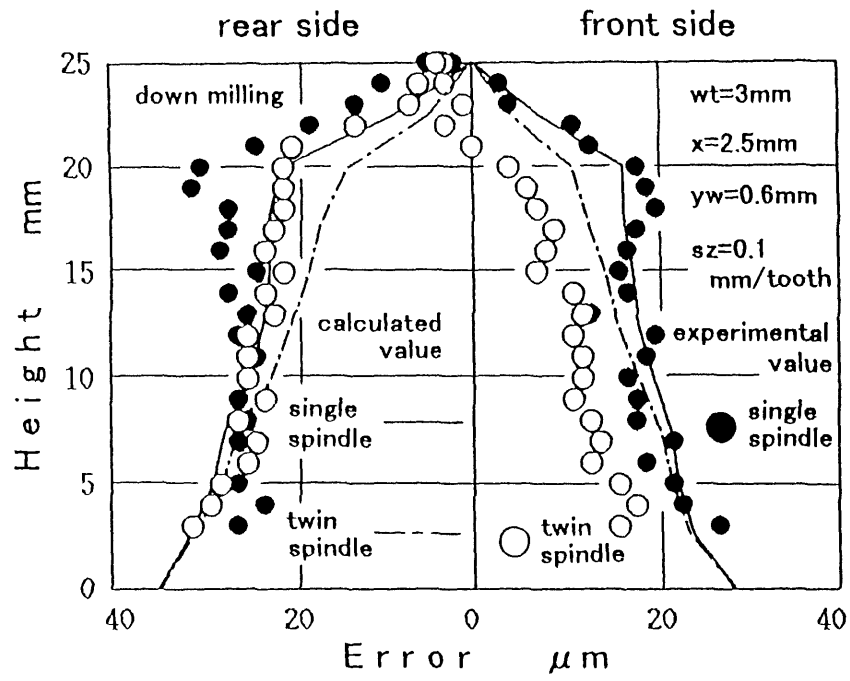


(a) $x = 2.5\text{ mm}$

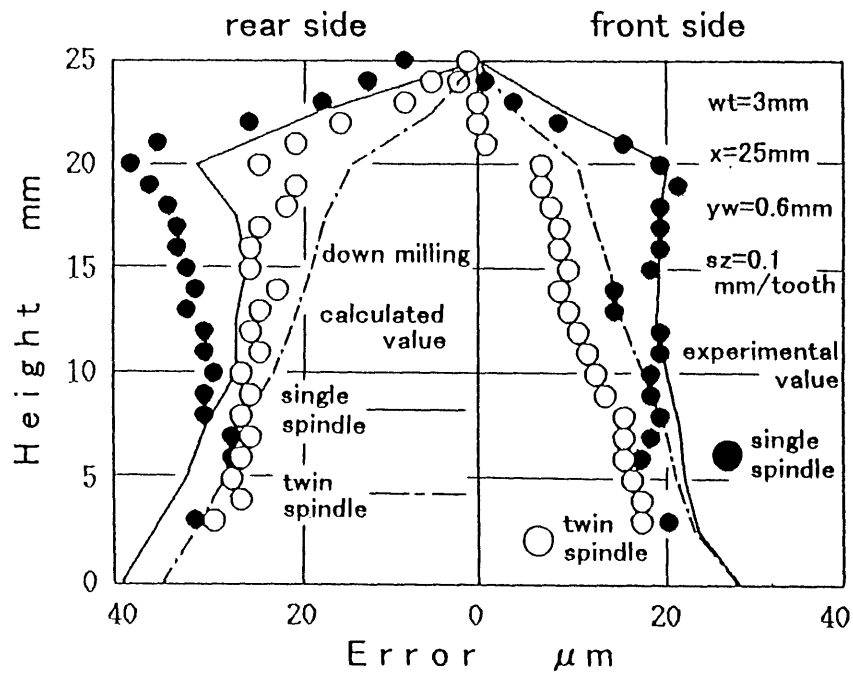


(b) $x = 25\text{ mm}$

図5.31 壁厚 $w t = 2\text{ mm}$ における加工誤差の計算値と実験値



(a) $x = 2.5\text{ mm}$



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

図5. 32 壁厚 $w_t = 3\text{ mm}$ における加工誤差の計算値と実験値

図5.33および図5.34は二軸加工における各壁厚の実験値を、壁高さによる平均値および標準偏差を各加工面について示している。

初めに図5.33に示す表面について考えると、壁高さ $z = 3 \text{ mm}$ の位置では平均値 $18.7 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $1.6 \mu\text{m}$ とばらつきは少ないが、上面に移動するにつれて標準偏差は増加しており、壁高さ $z = 22 \text{ mm}$ の位置で $8.8 \mu\text{m}$ と最大になっている。これは、上面近傍において薄壁の剛性が小さく変形しやすいためであり、二軸加工により相殺されなかった y 分力が作用した場合、 y 分力が数 N と小さい値であっても薄壁は変形して、加工誤差を生ずる。また、平均値が上面近傍において負の値となっているが、この理由の1つとして、工具の取付け誤差による切れ刃の位相の違いが考えられる。これは、図5.30に示すように裏面側の切れ刃の位相が遅れている場合であり、切削力の減少区間（壁高さ $z = 20$ ないし 25 mm ）は平均値が著しく減少している範囲と一致している。

次に図5.34に示す裏面の場合について考えると、壁高さ $z = 3 \text{ mm}$ の位置では平均値 $27.2 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $3.8 \mu\text{m}$ と表面に比べるとばらつきがやや大きいものの、全体の加工誤差から見ると小さい。また、上面に移動するにつれて標準偏差は増加しており、表面と同じく壁高さ $z = 22 \text{ mm}$ の位置で $6.6 \mu\text{m}$ と最大になっている。壁高さ $z = 20 \text{ mm}$ 以上で標準偏差が大きくなっている理由としては、表面と同様に上面近傍において薄壁の剛性が小さいく変形しやすいためである。

以上より、二軸加工により薄壁の上面近傍を除けば加工誤差は両加工面において標準偏差 $4.7 \mu\text{m}$ 以下であり、いずれの壁厚においても送り方向に対しほぼ一定の加工面を創成できることが示された。

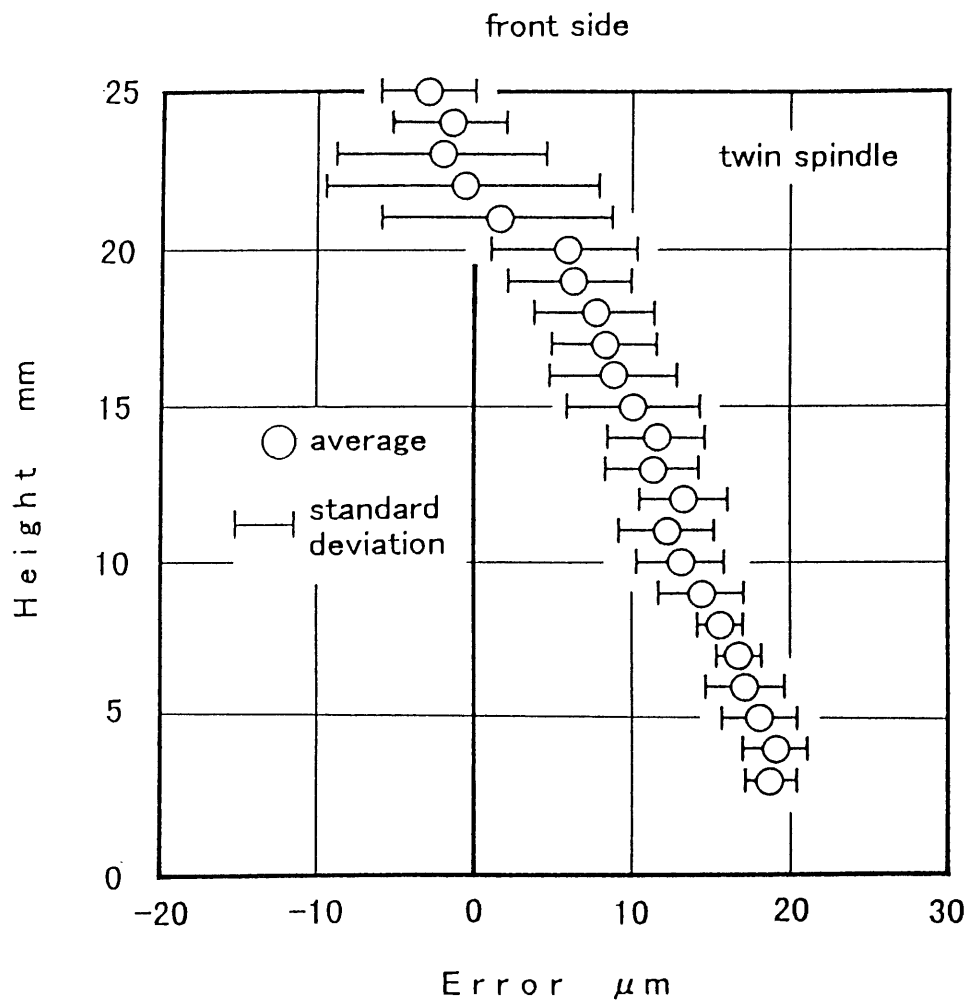


図5.33 二軸加工による加工誤差の平均値と標準偏差（表面）

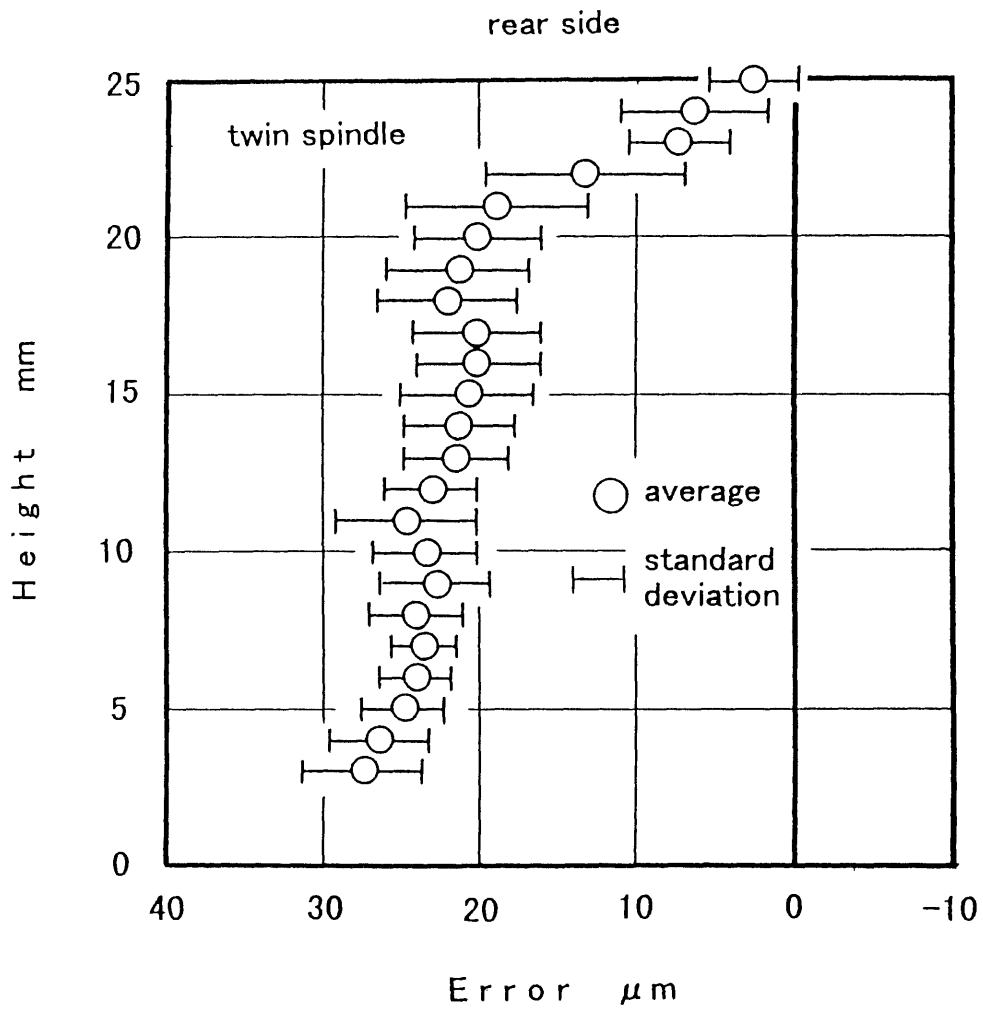
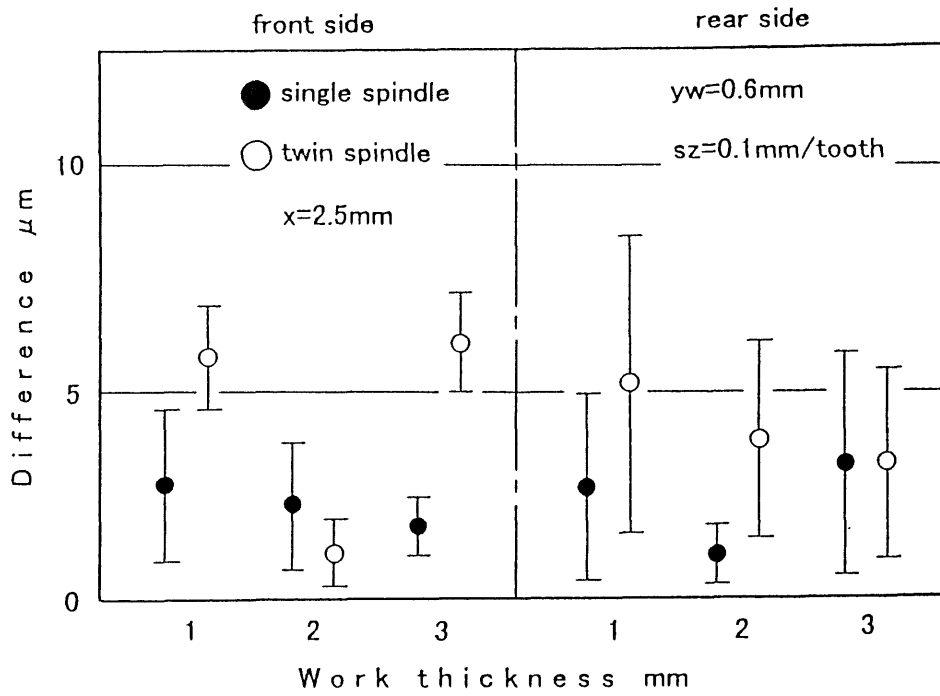


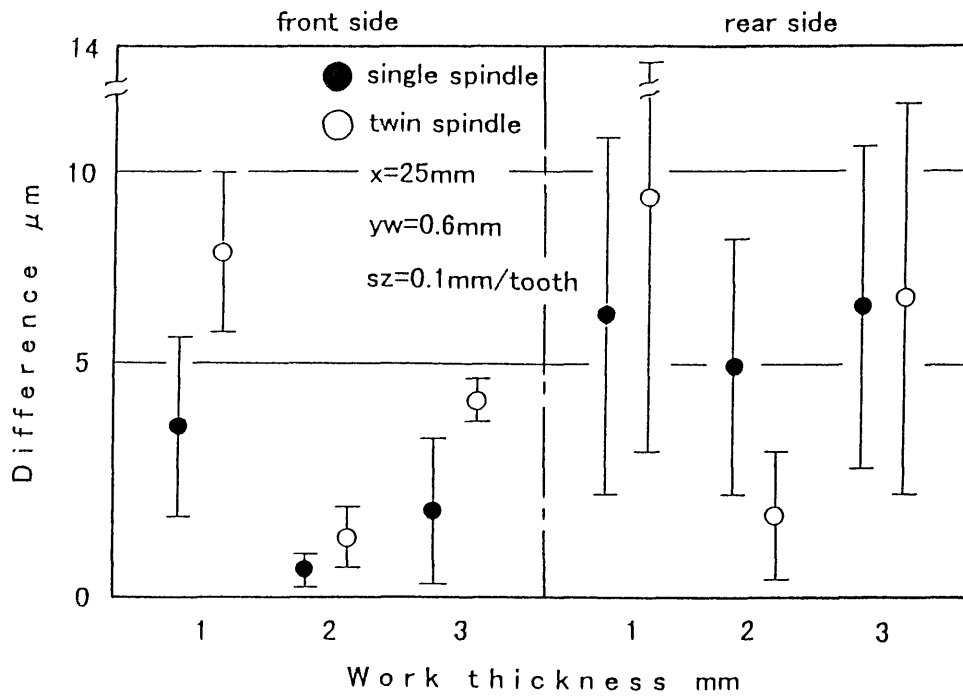
図5.34 二軸加工による加工誤差の平均値と標準偏差（裏面）

図5.35は実験値に対する計算値の平均予測誤差であり、誤差の標準偏差も併記している。(a)図に示す $x = 2.5 \text{ mm}$ の位置では、壁厚 $w_t = 1$ および 3 mm における二軸加工の結果が、平均予測誤差 $5.7 \mu\text{m}$ および $6.0 \mu\text{m}$ とやや大きいものの、その他の条件では一軸加工および二軸加工ともに平均予測誤差 $5.0 \mu\text{m}$ 以下、標準偏差 $3.5 \mu\text{m}$ 以下と小さい値となっており、前述した工作物、工具および主軸の変形解析に用いた諸条件が妥当だったと考えられる。

一方、(b)図に示す $x = 25 \text{ mm}$ における一軸加工について、壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ の条件で平均誤差の平均値および標準偏差がともに大きいことを考えると、十分な精度で予測できたといえる。しかし、二軸加工の場合は、相殺しきれなかった y 分力が工作物の剛性が最も低くなる条件(壁厚 $w_t = 1 \text{ mm}$ 、 $x = 25 \text{ mm}$)の薄壁に作用したため、工作物の変形が避けられず実験値と計算値に大きな差が生じたものと考えられる。他の壁厚については、一軸加工および二軸加工ともに平均予測誤差 $7.1 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $4.6 \mu\text{m}$ 以下と小さい値となっており、精度よく予測できている。



(a) $x = 2.5\text{mm}$



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

図5.35 壁厚による予測誤差

5. 3. 3 加工誤差要因の比率

図5. 36は一軸加工における壁厚 $w t = 2 \text{ mm}$, 表面の加工誤差の計算値に占める工作物および工具と主軸を加算した主軸系の比率を $x = 2.5 \text{ mm}$ では実線, $x = 25 \text{ mm}$ では一点鎖線で示している。また, ○印は $x = 2.5 \text{ mm}$, ●印は $x = 25 \text{ mm}$ の位置における比率の平均値であり, 縦軸の中央に示した。その値は $x = 2.5 \text{ mm}$ の位置において 0.23 , $x = 25 \text{ mm}$ の位置においては 0.33 である。横軸は工作物に関して示しているが, 右側の縦軸を基準とし数値を入れ替えると加工誤差に占める主軸系の比率になる。図より, 下面においては主軸系の比率が大きく, 上面に移動するにつれ工作物の比率が増大している。また, 加工位置により比較すると下面近傍では両者はほぼ同じ値であるが, 上面に移動するにつれ差が大きくなっており, 加工位置により薄壁の剛性が異なることを示している。ここで, 他の壁厚および加工面における比率について比較するために, 各条件の比率の平均値および工作物の比率が最大となる位置として壁高さ $z = 22.5 \text{ mm}$ の比率を求め, 図5. 37に示した。

図より, 一部を除き平均値および壁高さ $z = 22.5 \text{ mm}$ の比率は壁厚が減少するにつれ二次的に増大していることがわかる。平均値は壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の裏面において最大値 0.63 となった。また, 壁高さ $z = 22.5 \text{ mm}$ の比率についても壁厚 $w t = 1 \text{ mm}$, $x = 25 \text{ mm}$ の裏面において最大となっており, その値は 0.96 と大きく, 上面において加工誤差の殆どが工作物の変形に依存していることがわかる。加工面について比較すると全ての条件で表面に比べ裏面の比率の方が大きく, また位置より比較すると $x = 25 \text{ mm}$ の位置における比率の方が大きい。以上より, 工作物の変形を抑制する二軸加工は薄壁の剛性がより低い条件下にお

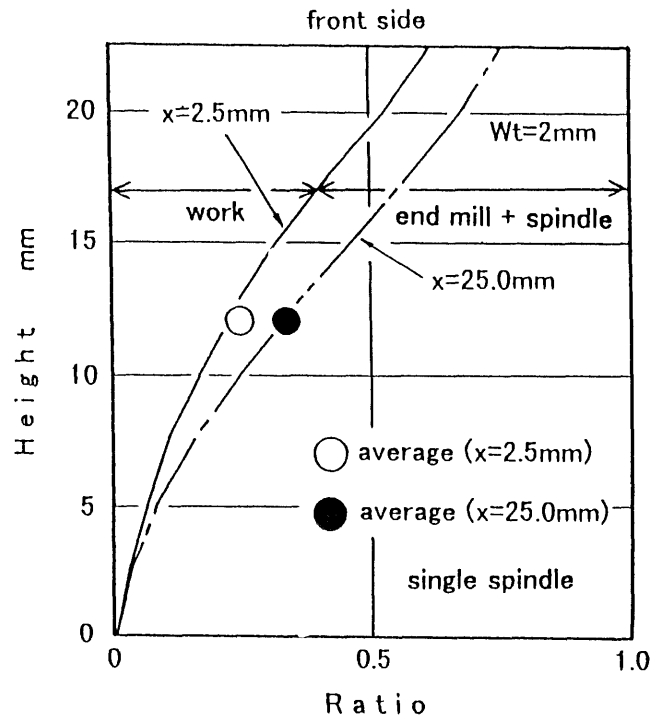


図5.36 加工誤差に占める工作物の比率

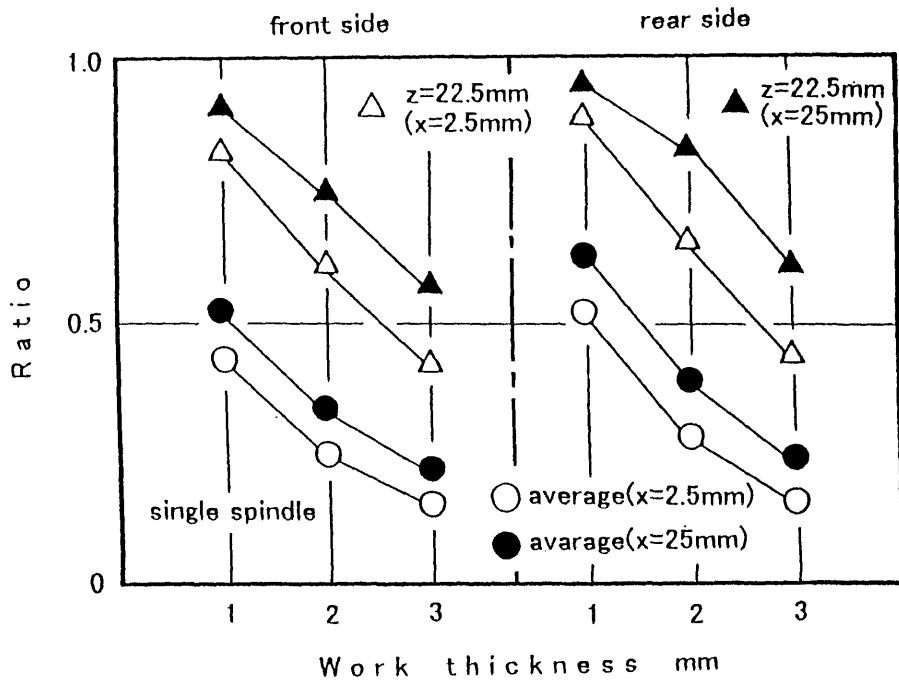


図5.37 壁厚による工作物の比率

いて加工誤差改善効果が高くなると考えられる。

6. 結言

(1) 薄壁形状部品の高精度・高能率加工を目的として平行二軸加工を提案し，その加工を実現できる工具および装置を試作した．

(2) 薄壁を二軸加工法を用いて加工すると，加工誤差に大きく影響を及ぼす y 分力はほぼ相殺され， x および z 分力は一軸加工法に比べ倍増した．

(3) 薄壁を一軸加工法で加工すると加工誤差は工作物の壁厚が小さくなるほど増加するが，二軸加工法を用いると壁厚にかかわらず加工誤差はほぼ一定であるため，二軸加工法の加工誤差改善効果は壁厚が小さくなるほど高い．

(4) FEM解析に使用する工作物のモデルを加工中における未切削領域を考慮して作成することにより，実際の加工状態により近い解析を可能とした．

(5) FEM解析により工作物および工具の変形量を解析し，主軸の静剛性試験に基づいた変形量を加算することにより予測した加工誤差は実験値とほぼ一致した．

(6) FEM解析による加工誤差の計算値は加工位置，加工の順序および主軸の剛性の差により変化する加工誤差の実験値をそれぞれ精度よく予測しており，解析に用いたモデルならびに計算方法の妥当性が示された．

(7) 一軸加工における加工誤差の計算値に占める工作物の比率は、壁厚の減少とともに増加しており、また壁の端部に比べ工作物の剛性が低い壁中央部で大きい。したがって、工作物の変形に起因する加工誤差を抑制する二軸加工法は、より工作物の変形しやすい条件において有効であることが確認された。

参考文献

- 1) 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巻, 605号 (1997-1) 239-246.
- 2) E. Budac and Y. Altintas, Modeling and Avoidance of Static Form Errors in Peripheral Milling of Plates, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 35, No. 3 (1994) pp. 459-476.

平行2軸回転工具による高精度加工に関する研究

新潟大学・工 岩部洋育 ○新潟大学大学院 水落真樹

要 旨

エンドミルによる薄壁形状部品の高精度・高能率加工を目的として、壁を両側から挟みながら加工を行う平行二軸加工法を提案し、そのような加工を実現できる装置を試作した。また、その装置を用いて加工実験を試み、切削力および加工精度の測定を行った。その結果、通常の一軸加工に比べて薄壁に垂直な切削力が著しく減少し、薄壁の変形に起因する加工誤差成分を除去できることを確認した。

1. はじめに

エンドミルによる薄壁形状部品の加工において、加工誤差は薄壁に垂直方向の切削力に大きく依存する。加工誤差を抑制するため、主軸に1本の工具を取付けて行う通常の加工法(以下では一軸加工法と呼ぶ)では、送りおよび切込みを小さくする以外に方法がなく、加工能率の低下は避けられない。

そこで本研究は加工能率を低下させることなく薄壁を高精度に加工することを目的として、平行二軸加工法を提案する。また試作した装置により二軸加工の実験を行い、切削力および加工誤差を一軸加工の結果と比較することにより、本加工法の有効性を検討した。

2. 一軸加工法の問題点と平行二軸加工法の提案

2.1 一軸加工法の問題点

図1はNCフライス盤またはマシニングセンタの主軸に1本の工具を取付けて、薄壁の側面加工を行う場合の切削状態と加工誤差の生成機構を示している。切削中には(a)図に示すように薄壁に垂直な y 分力 F_y が作用し、工作物は変形する。変形量は壁の上面に近づくにつれ増大し、高精度な加工面を得ることが困難となる。一方、 y 分力は反作用力 $F_{y'}$ として工具に作用するため壁の下面近傍では工具の変形が最大となる。両者を壁の高さ方向の各位置で加算すると、(b)図に示す誤差が生じる。図においては右側を先に、その後左側を加工するものとしているため左側の加工誤差は右側に比べて大きくなり、この点も一軸加工の問題点である。

2.2 平行二軸加工法の提案

上記の問題点を回避するために、図2に示すような平行二軸加工法を提案する。本加工法の特徴は図1(a)と比較すると明らかであり、薄壁に垂直な y 分力 F_y が壁を挟むように作用するもの、右ねじれ右刃と左ねじれ左刃の工具を用いて切削するため、大きさが等しく向きが反対な y 分力 F_y を相殺できることである。一方 x および z 分力 F_x および F_z は、一軸加工法に比べてそれぞれ2倍に増大するが、加工誤差に及ぼす影響は無視できる。なお工具の変形に起因する誤差は残るが、壁の厚さが小さくなれば工作物の変形量は大幅に増大するため、本加工法の加工誤差改善効果はより高くなると考えら

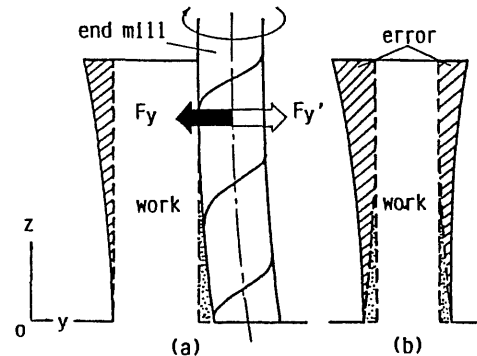


図1 一軸加工法による薄壁の切削状態と加工誤差

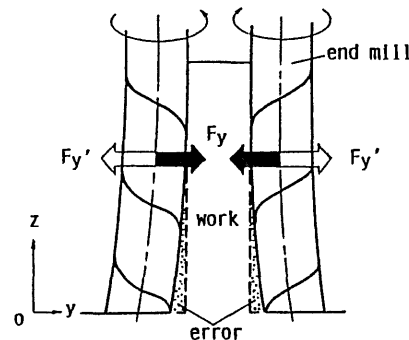


図2 二軸加工法による薄壁の切削状態

れる。

3. 実験条件および方法

3.1 実験条件

実験に使用した機械、工具および切削条件は次の通りである。

工作機械：大阪機工製NCフライス盤MH350

エンドミル：直径40, 41, 42mm, 刃長45mm, シャンク直径13mm, 右刃右ねじれ, 左刃左ねじれ, ねじれ角45°, 2枚刃, 高速度鋼

工作物：アルミニウム合金A5052S, 190×95×40mm

切削条件：切削速度10.1~10.6m/min, 半径方向切込み0.6mm, 軸方向切込み25mm, 送り0.1mm/tooth, 上向き切削, 下向き切削

図3は試作した平行二軸加工用の装置で、立フライス盤の主軸に装着した状態である。内部では主軸の回転を歯車を介して2軸の回転に0.8倍に減速しており、45mm

の間隔となっている2軸はそれぞれ右および左回転する。

3.2 実験方法

実験は上記に示す条件でx軸方向に送りを与えて行い、工具動力計を用いて3分力の測定を行った。加工誤差は工作物上に作成した基準面を利用し、機上で電気マイクロメータにより測定した。なお、比較のために試作装置を用いて一軸加工も行っている。

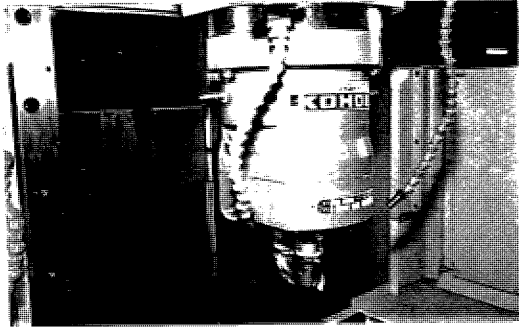


図3 平行二軸回転装置

4. 実験結果および考察

4.1 切削力および力積比による検討

図4はy分力 F_y の変化の例であり、二軸加工(実線)と一軸加工(点線)を比較している。図より二軸加工のy分力は零近傍を変動して、その平均値は4.6Nと小さく、y分力がほぼ相殺されていることがわかる。また一軸加工のy分力を加算した結果(一点鎖線, 平均58.3N)を併記すると、二軸加工の結果とよく一致している。さらに両者の力積を求め、一軸加工に対する二軸加工の力積比で比較すると0.08と小さく、上向き切削においても同様である。図6は壁厚による力積比を示しており、壁厚3mmにおいて両切削方式とも力積比が大きくなっているが、工具の取付け誤差によって生じる前加工面の精度の不均一さに起因するものと考えられる。

一方xおよびz分力に関する力積比は、下向き切削の一部を除くと両切削方式とも予測値2.0にほぼ一致しており、試作装置により二軸加工が実現できているものと考えられる。

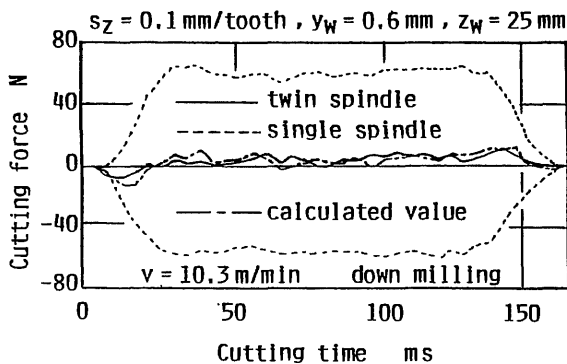


図4 一軸および二軸加工の切削力

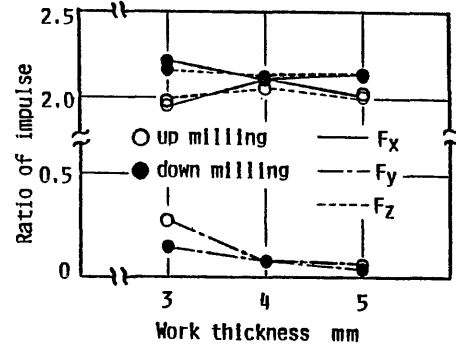


図5 一軸加工の切削力に対する二軸加工の切削力比

4.2 加工誤差による検討

図5は、加工法の違いによる壁両面(壁厚3mm)の誤差を送り方向 $x=2mm$ の位置で比較しており、誤差零となる縦軸の左右に示している。図より共に削り残しによる正の誤差を示しているが、一軸加工(●印)では下面より高さが20mmまで誤差が増加し、その位置で最大の15.5および23 μm に達する。一方二軸加工(○印)では上面に移動するにつれて誤差が減少するため最大値は高さ2mmの位置に生じる。しかし、両面の最大値はそれぞれ9.2および16.5 μm と一軸加工に比べて30ないし40%小さく、加工精度は大幅に改善している。●印と○印の差が工作物の変形に起因する誤差で20mmの高さでそれぞれ8.5および14 μm である。両者の差は二軸の剛性の差によるが、壁が薄くなるほどこの値は大きくなり、二軸加工による精度改善の効果は増大するものと推測される。

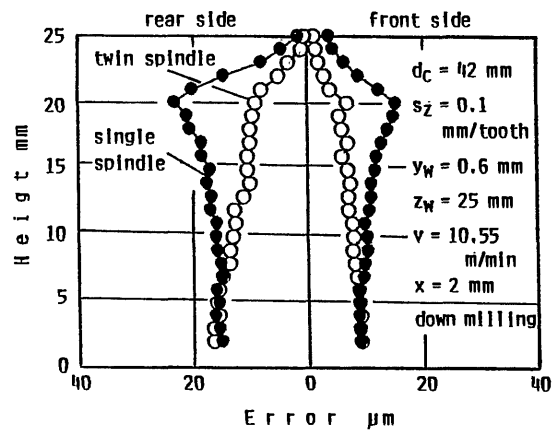


図6 加工法の違いによる加工誤差

5. 結論

薄壁形状部品を高精度に加工することを目的として平行二軸加工法を提案し、その装置を試作した。また実験によりその装置を用いることにより、加工誤差に影響を及ぼすy分力を相殺し、工作物の変形に起因する加工誤差を取り除くことができ、一軸加工に比べて加工精度が大幅に向上することを示した。

文献 1) E. Budak and Y. Altintas, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 3 (1995) 459

平行2軸回転工具による薄壁の高精度加工法に関する研究

新潟大学・工 岩部洋育 ○新潟大学大学院 水落真樹 新潟大学・工 今井純一 横山和宏

要 旨

エンドミルによる薄壁形状部品の高精度・高能率加工を実現するため、前報¹⁾で提案した平行二軸加工法を用いて各種条件により実験を行った。またFEMにより加工誤差の予測値を計算し、実験値と比較した。その結果通常の一軸加工法に比べて二軸加工法による加工誤差が非常に小さく、本加工法の有効性が示された。また加工誤差の計算値は両加工法とも実験値にほぼ一致しており、解析方法の妥当性が明らかにされた。

1. はじめに

エンドミルによる薄壁形状部品の加工において、加工誤差は薄壁に垂直方向の切削力に大きく依存する。加工誤差を抑制するため、主軸に1本の工具を取付けて行う通常の加工法(以下では一軸加工法と呼ぶ)では、送りおよび切込みを小さくする以外に方法がなく、加工能率の低下は避けられない。

そこで本研究は加工能率を低下させることなく薄壁を高精度に加工することを目的として、平行二軸加工法を提案するとともにその装置を試作し¹⁾、加工実験により加工誤差の測定を行った。また、工具と工作物の切削力による変形をFEMにより解析し、加工誤差の予測値を求めるとともに、一軸加工による結果と比較し、本加工法の有効性を明らかにした。

2. 平行二軸加工法と加工誤差

平行二軸加工法は図1に示すように、右ねじれ右刃と左ねじれ左刃の工具で薄壁を挟むように加工する方法である。そのため薄壁に垂直な方向に、大きさが等しい y 分力 F_y が両側から作用して y 分力は相殺され、壁の変形に基づく加工誤差は生じない。一方、 x および z 分力 F_x および F_z は一軸加工法の2倍となるが、加工誤差に及ぼす影響は無視できる。

なお、 y 分力の反作用力 $F_{y'}$ は残るため、 $F_{y'}$ による工具の変形に基づく加工誤差は避けられない。しかし、壁の厚さが小さくなれば、工作物の変形量は大幅に増大するため、本加工法の加工誤差改善効果は高くなる。

3. 解析による加工誤差の予測

図2および図3は、FEM解析に用いた工作物および工具の寸法、形状および要素分割を示している。工作物はハニカム構造部品の一部をモデル化し、壁厚(wt)は1, 2および3mmの3種類とした。なお、切削の進行によって加工される半径方向切込み部分の要素(図2拡大図参照)を考慮している²⁾。

解析において、節点荷重は実測した切削力をねじれ刃の切削機構に基づいて分配し、工具および工作物の変形量は加工面を創成する切れ刃点の位置で計算した。一軸加工の加工誤差は両変形量に主軸の静剛性試験に基づく主軸の変形量を加算し、二軸加工の場合は工具の変形

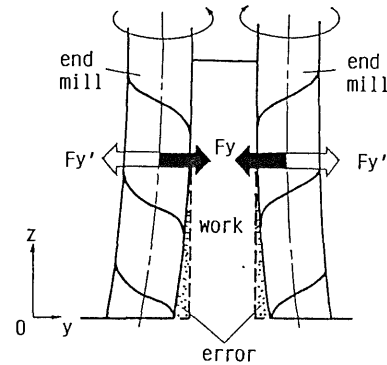


Fig.1 Cutting condition of twin spindle type milling

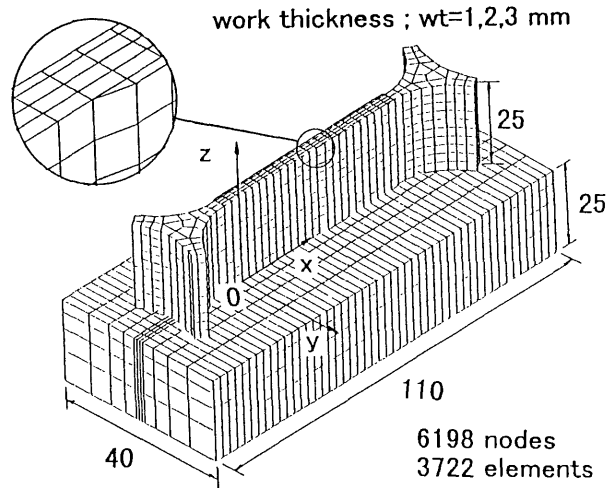


Fig.2 Work model

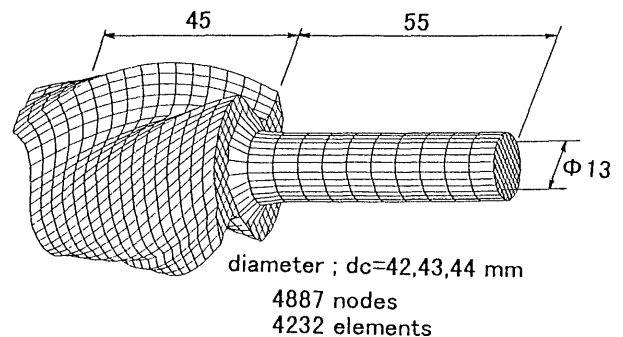


Fig.3 Tool model

量と主軸の変形量の和により求めている。

4. 実験条件および方法

実験条件は次の通りである。

工作機械：大阪機工製NCフライス盤MH350

エンドミル：直径42, 43, 44mm, 右刃右ねじれ, 左刃左ねじれ, ねじれ角45°, 2枚刃, 高速鋼

工作物：アルミニウム合金(JIS A5052s)

切削条件：切削速度10.6~11.1m/min, 半径方向切込み $y_w=0.6\text{mm}$, 軸方向切込み $z_w=25\text{mm}$, 1刃当たりの送り $s_z=0.1\text{mm/tooth}$, 下向き切削

実験は上記に示す条件でx軸方向に送りを与えて行い, 加工誤差は工作物上に作成した基準面を利用し, 三次元測定機により測定した。なお, 比較のために試作装置を用いて一軸加工も行っている。

5. 結果および考察

図4は, 一軸加工における加工誤差の計算値(実線)と実験値(●印)の一例であり, 工具と主軸の変形量を加算した主軸系の変形量(破線)および工作物の変形量(一点鎖線)も併記している。図より計算値と実験値はほぼ一致しており, 下面近傍での加工誤差は主軸系の変形に依存して小さい。しかし上面に移動するにつれて工作物の変形が大きくなって加工誤差は増大し, 壁高さ $z=20\text{mm}$ で最大となる。なお, その後は切削機構に基づいて切削力が減少するために加工誤差も減少する。

図5は, 一軸加工と二軸加工の計算値と実験値を比較したものであり, 誤差零の位置はそれぞれ表面および裏面の切込み設定位置を示している。一軸加工の場合計算値と実験値はほぼ一致している。また, 表面を先に加工し, その後に裏面の加工を行うことによって生じる加工誤差の変化も精度よく予測できていることがわかる。一方二軸加工の場合, 一軸加工に比べて加工誤差は非常に小さく, 壁高さ $z=20\text{mm}$ の位置で比較すると表面で $71\mu\text{m}$, 裏面は $113\mu\text{m}$ 加工精度が向上している。これは二軸加工によりy分力がほぼ相殺されたためである。しかし, 上面近傍で実験値はともに計算値の左側にずれている。これは, 二軸加工に用いた工具の切れ刃形状および取付け位置の誤差によりy分力を完全に相殺できなかったためと考えられる。

図6は, 一軸加工と二軸加工における加工誤差の実験値と計算値を壁高さ $z=20\text{mm}$ の位置で比較したものである。図より壁厚が小さくなるにつれて両加工法の加工誤差の差が大きくなり, 二軸加工法が薄壁加工における加工誤差の改善に有効であることが明らかである。また計算値(○, ●)と実験値の差は $14\mu\text{m}$ 以下であり, FEMによる解析の方法および節点荷重の方法が妥当なものであったと考えられる。

6. 結論

平行二軸加工法により薄壁形状部品を高精度に加工

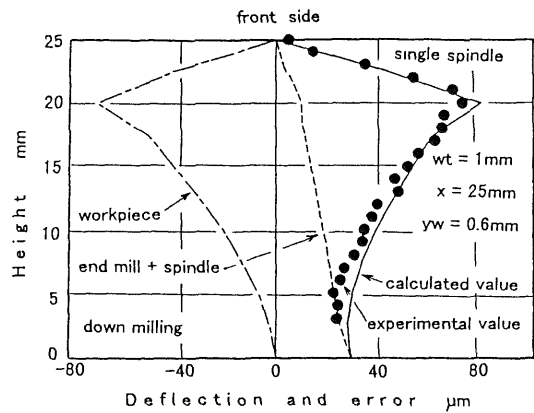


Fig.4 Deflection and error

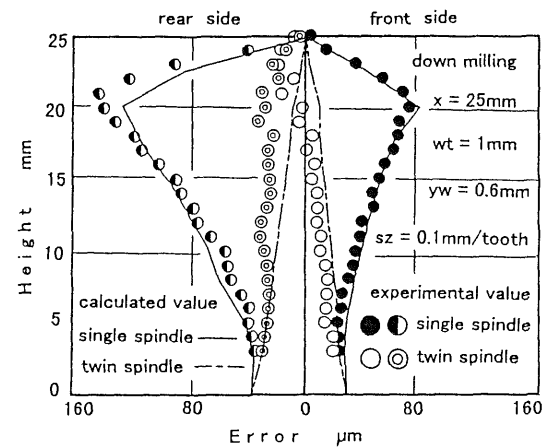


Fig.5 Calculated and experimental error

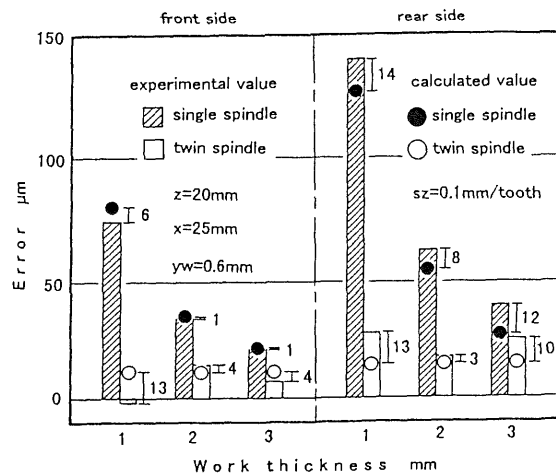


Fig.6 Comparison of errors with single and twin spindle

できることを示した。またFEM解析により工具および工作物の変形量を解析し, 主軸の静剛性試験に基づいた変形量を加算することにより加工誤差を精度よく予測できることを示した。

文献 1) 岩部, 水落, 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 135

2) E. Budak and Y. Altintas, Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 35, No. 3 (1995) 459