

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)

岩部 洋育*¹, 水落 真樹*², 横山 和宏*³

High Accurate Machining of Thin Wall Shape Workpiece by End Mill (Proposal of Twin Spindle Type Machining and Some Experiments)

Hiroyasu IWABE, Masaki MIZUOCHI and Kazuhiro YOKOYAMA

It is very difficult to machine the side surface of a thin wall workpiece with precision using an end mill, because the deflection of the thin wall workpiece due to the cutting force is much larger than that of a thick wall workpiece. Then usual cutting conditions under low feed and small depth of cut are used in order to control machining accuracy. But it is impossible to avoid low productivity in this case. Therefore, in this study we propose a new cutting method, we call twin spindle type machining. With this method, we are able to machine the side surface of a thin wall workpiece with high accuracy, ensuring in the same time high productivity. The new cutting method needs two end mills of the same radius and helix angle, however, one of the mills should be right-edge and right-helix cutter while the other one should be left-edge and left-helix cutter. Under this method we may expect that the deflection of the thin wall workpiece due to the cutting force can be neglected because the same cutting force appears on the both sides of the wall surface. We produced a prototype equipment for twin spindle type machining and carried out some experiments. The effects of the new cutting method were confirmed by the results from cutting force and machining accuracy measurements.

Key Words: Cutting, Accuracy, Cutting Force, End Milling, Twin Spindle Type Machining, Deflection, Thin Wall Workpiece

1. 緒 言

航空機部品等に見られるハニカム形状やコンプレッサの圧縮機に使用されるスクロールは、壁の高さに比べてその厚さが小さく、壁面を高精度に加工することが容易ではない。工具にはエンドミルが多用されているが、直径に比べて刃長が長くなると切削力の影響を受け、主軸を含む工具の変形に基づく加工誤差が生じる⁽¹⁾。主軸に1本の工具を取付けて行う通常の一軸加工の場合、上記の加工誤差を抑制するためには送りおよび切込みを小さくして切削力を減少させる以外に方法がなく、加工能率の低下は避けられない。また、壁の厚さが小さくなるにつれて工作物の剛性が急激に減少するため、工具の変形に比べて工作物の変形に基づく誤差が増大する。さらに壁の上面近傍および両端部では工作物の剛性が最も低下するため、より大きな誤差を生じることになる⁽²⁾⁽³⁾。

そこで本研究では、加工能率を低下させることなく、

また加工位置に依存せずに薄壁を高精度に加工することを目的として、二軸加工法を提案する。この加工法は2本の工具を用い、薄壁を両側から挟む形で表面と裏面を同時に仕上げる方法である。そのため、まず提案する加工法を実現する装置および工具を試作し、その後二軸加工実験による切削力および加工誤差の測定を行った。また、試作装置の1軸を用いた一軸加工実験および通常の工具ホルダを用いた一軸加工(通常一軸加工と呼ぶ)実験も行っており、得られた結果を比較することにより、本加工法の有効性を検討している。

2. 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一軸加工法による切削状態と加工誤差の生成機構のモデルを示したものである。切削中には図1(a)に示すように薄壁に垂直な y 分力 F_y が作用し、工作物の変形するため加工後に加工面に変形量に相当する誤差が生じることになる。工具半径に比較して半径方向切込みが小さい仕上げ条件では、下面より上面までのかなりの範囲で加工面を創成している切れ刃点に作用する切削力 F_y が一定とな

* 原稿受付 1998年8月24日。

¹ 正員, 新潟大学工学部(☎950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。

² 日立製作所(株)(☎312-8504 ひたちなか市市毛882)。

³ 正員, 新潟大学大学院自然科学研究科。

E-mail: iwabe@eng.niigata-u.ac.jp

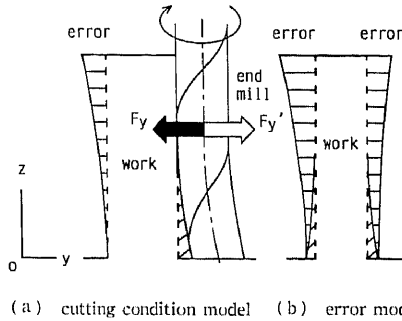


Fig.1 Cutting condition and error model by single spindle type machining

る。そのため、下面では工作物の剛性が高く変形量および加工誤差は非常に小さいが、壁の上面に近づくにつれて剛性が低下して変形量および加工誤差が増大する。このことは一軸加工法において避けられない問題点である。

一方、 y 分力は反作用力 Fy' として工具に作用するため、工具は壁と反対方向に変形する。詳細については後述するが、工具の突き出し長さが最大となる下面で工具の変形は基本的に最も大きくなり、加工面を創成している切れ刃点が上面に移動するため加工誤差は減少する。両者を壁の高さ方向の各位置で加算すると図 1(b) に示す加工誤差となり、切削条件によっても変化するが、一軸加工法では下面に比べて上面近傍の加工誤差が大きい形状に仕上げられることになる。なお、図 1(b) において、薄壁の両面で加工誤差に差が生じている。これは右側(表面)を先に加工し、その後左側(裏面)を加工するものとしているためであり、後で加工する表面では先に加工した半径方向切込みの値だけ壁の厚さが小さくなり、工作物の変形量が先に加工する場合に比べて大きくなることによる。この点も一軸加工法における問題点である。

なお、ねじれ刃による切削機構によって切削方式が異なると切削力 Fy の分布が異なり、工具と工作物の変形量および両者の和による加工誤差の形状も異なるが、図 1 には基本的な切削状態と加工誤差のモデルを示すにとどめている。

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る。すなわち、薄壁を切れ刃形状が等しい右刃・右ねじれ刃と左刃・左ねじれ刃の 2 本の工具を用い、それぞれ右回転および左回転をさせながら同時に切削する方法である。この加工法では壁の両側から垂

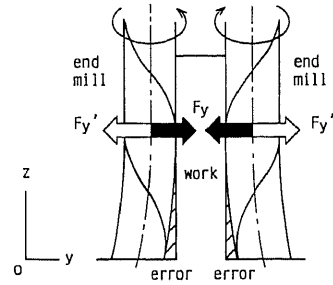


Fig.2 Cutting condition model by twin spindle type machining

直分力 Fy が壁を挟むように作用することになる。しかし、前述の工具を用い、壁両面における半径方向切込みを等しくすれば、 y 分力 Fy は大きさが等しく、向きが反対となるために相殺され、壁を変形させる y 分力の和は零となる。

一方、 x および z 分力 Fx および Fz は、通常の一軸加工を壁の両側で同時に行っているため、それぞれ倍増する。しかし、両分力の加工誤差に及ぼす影響は非常に小さく、無視することができる。なお 2 本の工具にはそれぞれ反作用力 Fy' が反対方向に作用し、それぞれの変形に起因する加工誤差が両側に残ることになる。壁の厚さが小さくなれば一軸加工法による工作物の変形量は大幅に増大することが予想されるため、壁の厚さが小さくなるほど提案した本加工法の効果はより高くなると考えられる。

3. 実験条件および方法

3.1 実験条件 実験に使用した工作機械、工具、工作物および切削条件は次のとおりである。

工作機械：大阪機工製 NC フライス盤 MH 350

制御装置：MELDAS 325 M-V (0.001 mm/pulse)

エンドミル：直径 40, 40, 42 mm, 刃長 45 mm, シャンク径 13 mm, 右刃・右ねじれ刃, 左刃・左ねじれ刃, 1 枚刃, ねじれ角 45°, 高速度鋼(図 4 参照)

工作物：アルミニウム合金(A 5052 s), 190×50×40 mm(図 5 参照)

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

図 3 は試作した二軸加工用装置であり、立フライス盤の主軸に装着した状態を示している。本装置の内部では通常の主軸回転を歯車を介して 2 軸の回転に伝達

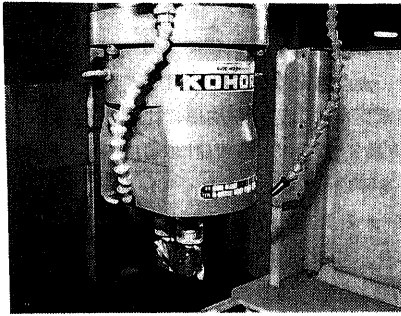


Fig. 3 Twin spindle type machining equipment

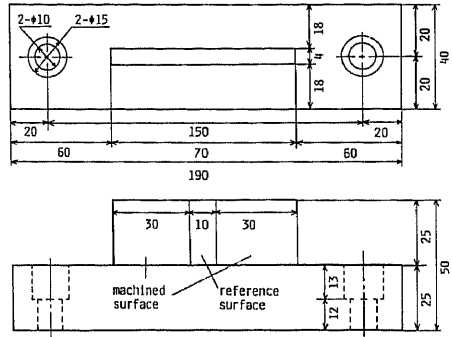


Fig. 5 Workpiece

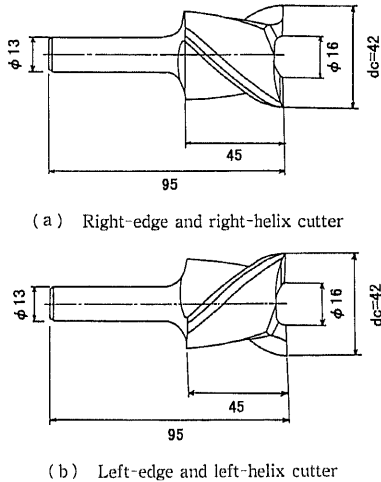
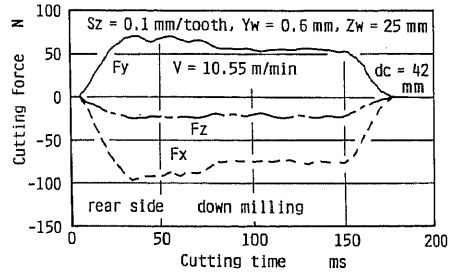


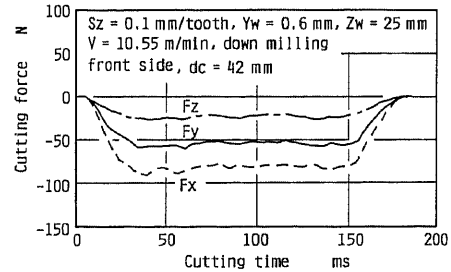
Fig. 4 End mills for twin spindle type machining

するとともに、0.8倍に減速している。また、2軸の軸間距離は45 mmであり、それぞれ右および左回転するようになっている。図4に壁厚3 mm加工用の工具を示しているが、工具径を $dc=41,40$ にすることにより壁厚4,5 mmを加工できる。なお、両工具とも2枚刃の一方を少し削り、ともに1枚刃として用いており、シャンク部の直径が13 mmと切れ刃の直径に比べて小さい理由は、試作装置に使用できる軸受寸法によるものである。図5は壁厚4 mmの場合を例に工作物の形状および寸法を示している。実験では幅70 mm、高さ25 mmの薄壁部の両面を加工するが、送り方向(x軸)中央の10 mmの位置には加工誤差を測定のために、微小切込みと低速送りにより基準面を作成している。

3.2 実験方法 実験は試作装置を用い、上記に示した各切削条件でx軸方向に送りと与えて薄壁の側面加工を行い、切削力および加工誤差を測定した。切削力は圧電素子を用いた工具動力計(KISLER-9257 A)を用い、加工誤差は薄壁の中央に作成した基準面



(a) Rear side



(b) Front side

Fig. 6 Cutting force by single spindle (in case of down milling)

を利用し、電気マイクロメータ(ANRITSU K-101 B)により機上で測定した。なお、試作装置と比較するために通常の弾性変形方式による工具ホルダ(T50-CTK-42)を用いて通常の一軸加工実験も行った。

4. 実験結果および考察

4.1 切削力による検討 図6は一軸加工による下向き切削の三分力の変化を示したもので、図6(a)は左刃・左ねじれ刃で裏面、図6(b)は右刃・右ねじれ刃で表面を加工した際の結果である。切削力は工具が受ける方向で示しているため、図6(a)と(b)でy分力 F_y の符合が逆転しているが、ともに壁に直角な

y 分力は工具を遠ざける方向に作用しており、その絶対値はほぼ等しい。一方、 x および z 分力の方向は同一方向であり、定常区間における値は両者ともにほぼ一致している。また、 x および z 分力はともに負の値を示しており、工具が切削中に進行方向に変形するとともに、工具ホルダから工具を引き抜いて底刃が工作物に食い込む方向に変形していることがわかる。また、 y 分力は約 50 N と x 分力の約 75 N に比べて小さいが、この理由は半径方向切込みが $Y_w=0.6$ mm と小さいためである。

図 7 は図 6 と同様に一軸加工による上向き切削の三分力を示している。図 7 より y 分力と z 分力は図 6 と同一方向に現れているが、 x 分力は下向き切削と逆方向に作用しており、工具は切削中に送り方向に変形している。これらの挙動はねじれ刃の切削機構によるもので、文献(3)とよく一致している。また、上向き切削においては x 分力が大きくなる傾向にあるが、 y 分力の約 4 倍と大きい理由は、下向き切削と同様に半径方向切込みが小さかったためである。一方、 z 分力の作用する方向は図 6 と同様であり、絶対値も約 25 N とほぼ等しい。

図 8 は工具径 41 mm による壁厚 4 mm、下向き切削における二軸加工の y 分力を示したもので、図 8 中には一軸加工による裏面と表面の加工で得られた切削力(破線)および横軸の各時刻で加算した結果(一点鎖線)を併記して示している。図 8 より実線で示す二軸加工における y 分力は一軸加工の y 分力が相殺されており、一点鎖線で示す計算結果とほぼ一致している。定常区間における平均値と比較するとそれぞれ 4.75(実験値)および 5.0 N(計算値)であり、一軸加工における平均値の約 8% となっている。

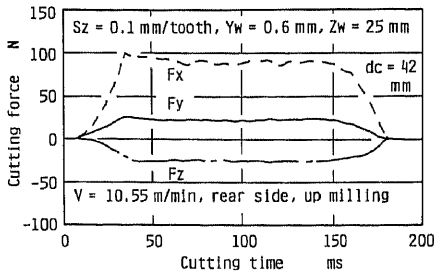
一方、 x および z 分力は一軸加工に比べてほぼ倍増しており、定常区間における平均値は上向き切削、下向き切削ともに裏面と表面の値を加算した値にほぼ一致している。表 1 および 2 は一軸加工の平均値と二軸加工の結果を整理して示したものであり、これらの結果は試作した装置の動作状態ならびに試作工具の切れ刃形状が妥当であったことを示している。なお、壁厚

Table 1 Cutting force and ratio (in case of down milling)

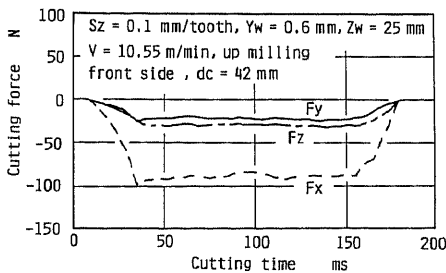
component	spindle & ratio	thickness		
		3 mm	4 mm	5 mm
X	single	81.8	84.3	78.5
	twin	196.2	185.2	179.5
	ratio	2.40	2.20	2.28
Y	single	57.3	58.3	55.8
	twin	9.44	4.75	2.0
	ratio	0.16	0.08	0.04
Z	single	22.9	23.9	22.7
	twin	52.9	53.4	51.1
	ratio	2.32	2.24	2.26

Table 2 Cutting force and ratio (in case of up milling)

component	spindle & ratio	thickness		
		3 mm	4 mm	5 mm
X	single	97.0	86.3	95.8
	twin	188.2	188.2	195.7
	ratio	1.94	2.18	2.04
Y	single	29.4	25.9	28.2
	twin	8.64	1.96	1.73
	ratio	0.29	0.08	0.06
Z	single	24.8	23.2	25.0
	twin	49.0	48.6	50.4
	ratio	1.98	2.10	2.02



(a) Rear side



(b) Front side

Fig. 7 Cutting force by single spindle (in case of up milling)

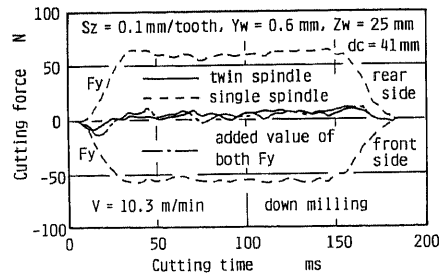


Fig. 8 Relationship of cutting force F_y between single and twin spindle type machining (in case of down milling)

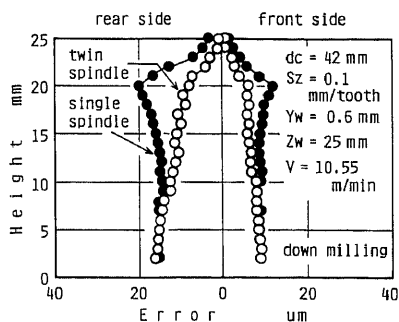


Fig. 9 Relationship of machining accuracy between single and twin spindle type machining (in case of down milling)

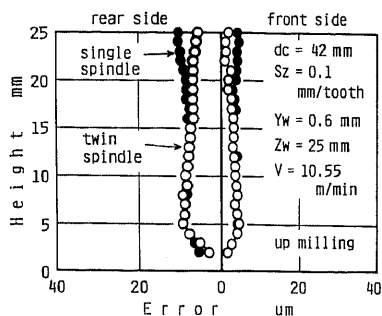


Fig. 10 Relationship of machining accuracy between single and twin spindle type machining (in case of up milling)

が 3 mm の各条件で誤差が大きくなる傾向を示しているが、これは一軸加工法で前加工面を作成するために生じる設定切込みの差に起因するもので、その誤差が壁厚の減少につれて大きくなったためと考えられる。

4・2 加工誤差による検討 図 9 は横軸に加工誤差、縦軸に壁高さをとり、一軸および二軸加工による加工誤差を示したもので、下向き切削の場合である。

図 9 においては、誤差零の位置より右側に表面、左側に裏面の結果を示しているが、ともに削り残しによる正の誤差を生じていることがわかる。●印で示す一軸加工においては、下面から 15 mm まではそれぞれ 10 および 16 μm の誤差を示しているが、その後少し増加して 20 mm の位置で最大値(12 および 20 μm)を示す。しかし、上面に移行するにつれて減少し、ともに上面ではほぼ零になっている。

ねじれ刃の切削機構に基づいて考察すると、実験の条件では下面より 20 mm の高さまで切削面積が変化しない定常区間である。したがって切削力がほぼ一定となり、加工誤差も 15 mm 近傍までほぼ一定になっている。15 mm より 20 mm の間で加工誤差が増加する理由は、同一の切削力が作用しても、壁のたわみ下面に比べて上面で大きくなるためである。また、20 mm より上面で誤差が減少する理由は、この位置から上面まで切削面積の減少による切削力の減少が起るためである。

一方、○印で示す二軸加工の場合、下面における加工誤差は一軸加工と等しいが、上面に移行するにつれて加工誤差が小さくなっている。これは反作用力 F_y' による主軸系を含む工具の変形によるもので、高さ 20 mm まではほぼ一定の比率で減少している。この理由は、ほぼ一定の反作用力を受ける工具の位置が上面の方向に移動するため、主軸系の剛性が増加して工具

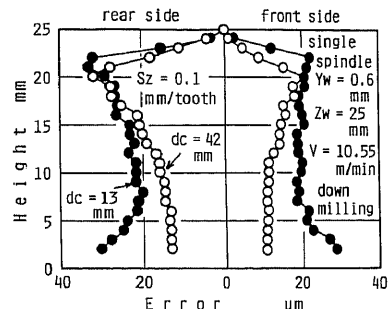


Fig. 11 Machining accuracy of thin wall by conventional single spindle type machining (in case of down milling)

の変形量が減少したもので、20 mm 以上における加工誤差の急激な減少はさらに切削力の減少が加わるためである。両者の差は壁のたわみを意味しており、下面から 20 mm まで移動するにつれて大きくなっているが、その後は切削力の減少につれて減少している。

高さ 20 mm の位置で加工誤差を比較すると、二軸加工によって誤差は一軸加工の 40% (裏面) および 53% (表面) へと大幅に改善されている。なお、裏面と表面は同一の切削条件で加工したにもかかわらず、裏面の加工誤差は各高さ位置で約 50% 大きくなっている。これは試作した装置の主軸剛性に差があるためであり、詳細については次報で述べる。

図 10 は図 9 と同条件による上向き切削の加工誤差を示したものである。下向き切削と同様に裏面(左側)および表面(右側)ともに削り残しによる正の誤差を示しているが、その大きさは両者とも下向き切削の約 1/2 と小さい。この理由は壁に垂直方向の y 分力の大きさが小さいことによるもので、その結果工具および壁の変形量が小さくなったためである。また、加工誤差は下面から 5 mm まで増加する傾向を示しているが、これは上向き切削による切削面積が下面から 5 mm までの間に増加し、その後上面まで一定となるが、切

削力もそのように変化するためである。また、●印と○印の差が壁の変形量を意味しており、上面で最も大きくなっている。図9に示した下向き切削の結果と比較すると、上向き切削の場合二軸加工によって減少した加工誤差の差は大きくないが、比率で比較すると、上面で44%(裏面)および56%(表面)と大きく改善されている。

図9および10により提案した二軸加工法の有効性が明らかにされている。そこで次に通常の一軸加工用工具ホルダを用い、図9および10と同条件により通常の一軸加工実験を行い、その比較を試みた。図11は y 分力が大きい下向き切削による結果を示しており、シャンク径が等しい直径13mmの工具による結果(●印)も併記している。図11より加工誤差は図9の結果と同様で、両面とも削り残しによる正の誤差を示すとともに、裏面(左側)の誤差が表面(右側)の誤差に比べて大きい。また、工具剛性が小さい直径13mmの場合、42mmの工具に比べて加工誤差が大きくなっており、工具先端で仕上げられる下面近傍で両者の差は大きい。

図9および11より加工誤差の平均値 E および標準偏差 σ を直径42mmの場合で比較すると、裏面においては $E=14.4$ および $\sigma=4.1\mu\text{m}$ (試作装置による一軸加工)に対して $E=17.4$ および $\sigma=7.2\mu\text{m}$ (通常一軸加工)、表面において $E=8.5$ および $\sigma=2.3\mu\text{m}$ (試作装置による一軸加工)に対して $E=11.7$ および $\sigma=4.8\mu\text{m}$ (通常一軸加工)であり、ともに約3 μm 試作装置による平均値と標準偏差が小さい。直径13mmの工具による通常一軸加工の結果と比較すると差はさらに大きくなるため、試作装置は通常の一軸加工用工具ホルダに比べて剛性が逆に高かったことを示している。

なお、図11には示していないが、直径42mmの工具に関しては y 分力の小さい上向き切削による比較実験を行っている。図10の結果と平均値および標準偏差により比較すると、裏面において $E=7.3$ および $\sigma=1.4\mu\text{m}$ (試作装置による一軸加工)に対して $E=$

9.8および $\sigma=4.8\mu\text{m}$ (通常一軸加工)、表面において $E=2.8$ および $\sigma=1.1\mu\text{m}$ (試作装置による一軸加工)に対して $E=7.9$ および $\sigma=2.3\mu\text{m}$ (通常一軸加工)であり、図11と同様に試作装置の剛性が高かったことを示している。

5. 結 論

(1) 薄壁形状の高精度・高能率加工を目的として、二軸加工法を提案するとともに、そのような加工が実現できる装置および工具を試作した。

(2) 二軸加工による切削力は、壁と直角方向の y 分力はほぼ相殺されるが、 x および z 分力は一軸加工に比べて倍増した。

(3) 加工誤差は両切削方式とも工具に作用する y 分力が壁から遠ざける方向に働き、削り残しによる正の誤差を生じる。

(4) 二軸加工による加工誤差は一軸加工における工作物の変形がなくなるため小さくなり、最大値は下向き切削において40~53%、上向き切削において44~56%に改善された。

(5) 試作した二軸加工用装置において、2軸の剛性に差があるため裏面と表面で加工誤差に差が生じている。しかし、試作装置は通常の一軸加工用工具ホルダに比べて剛性は高く、加工誤差の平均値は前者が後者に比べて2.6~5.1 μm 小さかった。

本研究は平成7年度科学研究費補助金[一般研究(C)]を受けて行われたものであり、二軸加工装置の製作は小堀鐵工株式会社、工具の製作はオーエスジー株式会社のご協力をいただいた。また、実験およびデータの整理は学部生竹下篤史君の熱心な協力を得ており、付記して深甚の謝意を表す。

文 献

- (1) 藤井義也・岩部洋育, 精密工学会誌, 52-2(1986), 273-278.
- (2) Budak, E. and Altintas, Y., *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 35-3(1994), 459-476.
- (3) 岩部洋育・島田智晴・横山和宏, 機論, 63-605, C(1997), 239-246.