

セラミックスの小径穴あけ加工に関する研究

院生 C (M2) 学生 G (B4) 指導教員：井原之敏

Study on a Small Hole Open Process on Ceramics

Graduate student C, Undergraduate student G

1 緒 言

近年、セラミックスは耐摩耗性、耐熱性、耐食性などの優れた性質を利用して様々な場所で使用されている。例えば、高硬度で耐摩耗性に優れていることにより金型材料として使用する事が期待されている。このように、従来からのものとは異なる用途に対し、新たな性質を加えたファインセラミックスも多く開発されている。例えば、金型材料として使用するためには、靱性を向上させたものが開発されている。しかし新材料であるそれらは、その優れた性質や弱点である脆性のため、高能率・高精度な加工が難しい。

本研究では、半導体金型向けに開発されたジルコニアセラミックスについて、金属と同じ加工工程が必須となるが、そのうちの一つである小径穴あけ加工についての加工方法を検討した。

半導体金型においては、従来から 1mm 程度の穴直径であける工程があり、金属材料では特に問題がなく十分対応可能であるがセラミックス材料においては難しいとされている。そこで、新材料の被削材をマシニングセンタ上で、ダイヤモンド砥石を用いた穴あけ加工を試みた結果を報告する。

2 加工に必要とされる諸条件

2.1 材料

本研究で加工する被削材は、金型用に新たに開発された新材料でジルコニアセラミックスがベースとなっている。そのため、物性はジルコニアセラミックスと似ているが高密度であるため、従来のものより靱性、耐衝撃性、耐薬品性に優れ、熱収縮も鉄系の材料に近い特性を持っている。また新材料であるため研削条件・研削方法がまったく分からない状態である。

2.2 穴径³⁾

セラミックスなどの硬脆材料の加工法として超音波加工などがあり、その他にドリルによる加工、レーザーによる加工などによって行われる。

例としてコアドリルを用いた小径コアリング加工がある。この実験では、直径 2mm の穴を連続してどの程度加工できるかをアルミナとジルコニアセラミックスについて加工したものである。砥石には直径 2mm の電着ダイヤモンドを使用している。加工条件は主軸回転数 10000rpm、送り速度はジルコニアの場合 4mm/min、アルミナの場合 5mm/min で、深さはそれぞれ 3.5mm、4.1mm (0.5mm/step)である。加工した結果アルミナでは 91 個の穴を連続して加工し、入口のチッピングもなく良好に加工

できている。ジルコニアに関しては 48 個の穴を連続して加工し、アルミナに比べると研削抵抗は大きくなるが、工具端面には砥粒が残っており加工の継続は可能というものである。このように穴をあけるといっても、穴の大きさによって使用する工具や加工方法は違ってくる。今回小径の穴あけということで本研究では、軸付砥石を使用して直径 1mm、深さ 5mm の穴をあけることを目標とする。

2.3 加工法

セラミックスに単純に穴あけ加工を行っても工具に大きな負荷がかかり、工具の摩耗やワークの破損が伴う可能性がある。そのため、本研究では、穴径より細い砥石を使用して、主軸により砥石を回転させながら螺旋状に動かすヘリカル加工で実験を行った。この加工法を用いることで、一種類の工具でその工具径よりも大径である様々な穴の径が加工できる。さらにこの加工法を用いることにより、砥石径と同じ径の穴をあける場合よりは工具の負荷を軽減する事ができる。この他にヘリカル加工を行う利点として工具経路が螺旋を描くので、切削油が穴に入りやすく、研削屑を取り除きやすいなどがある。

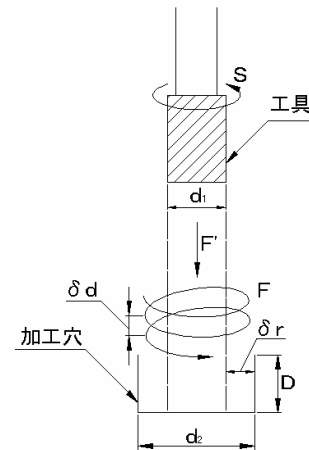


Fig.1 ヘリカル加工

S : 工具回転数 (rpm)

F : 工具送り速度 (mm/min)

F' : 軸方向速度 (mm/min)

 δr : 公転半径 (mm) δd : 軸方向切込量 (mm)

D : 加工穴深さ (mm)

 d_1 : 砥石直径 (mm) d_2 : 加工穴直径 (mm)

2.4 送り速度

加工能率は工具寿命とどれだけ加工時間を短くできるかが関係する。加工時間と工具寿命というのは、送り速度によって決まる。ここで送り速度 F というのは、ヘリカル加工で螺旋を描く工具の速度である。このことより、公転半径が大きくなると工具経路が長くなることから、軸方向速度は遅くなる。軸方向速度の大小は研削抵抗値に影響してくると考えられる。ヘリカル加工を行う場合の軸方向速度 F' は (直線軸の長さ/円弧の弧の長さ) \times 送り速度で求められるので

$$F' = (\delta d / 2 \pi \delta r) \times F \quad (式 2)$$

により導き出せる。

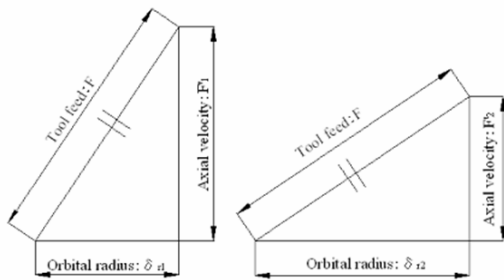


Fig.2 公転半径と軸方向速度の関係

今回は、小径の穴あけが目標だがその前に太めの工具で大きめの穴の加工を行った。具体的には、工具直径 3mm を使用し直径 3.4mm と 3.8mm の穴あけを加工した結果を紹介する。加工条件を Table 1 に示す。

Table 1 工具送り速度 F 変化

工具送り速度 F (mm/min)	30~240 (30 ずつ増加)	
公転半径 δr (mm)	0.2	0.4
工具径 d_f (mm)	$\phi 3.0$	
研削速度 V (m/min)	131.95	
工具回転数 S (rpm)	14000	
軸方向切込量 δd (mm/rev)	0.04	
加工穴深さ D (mm)	1.0	
砥粒径(μm)	149	
クーラント	エマルジョン (5~7%)	

この実験は工具送り速度 F が変化することにより、研削抵抗がどのように変化するか、またどの程度まで工具送り速度 F を大きくできるかを調べるために行った。

Fig. 3 のグラフは工具送り速度 F と半径、軸方向の研削抵抗値の関係を表したグラフである。このグラフからわかることとしては半径方向も軸方向も基本的に工具送り速度 F が速くなるほど研削抵抗値が大きくなっていく。つまり工具送り速度 F が大きくなるほど工具やワークにかかる負荷が大きくなる。

送り速度による軸方向の抵抗値に比べて半径方向の抵抗値はそれほど大きくないことから、当初は軸方向の抵抗値だけを着目することにした。

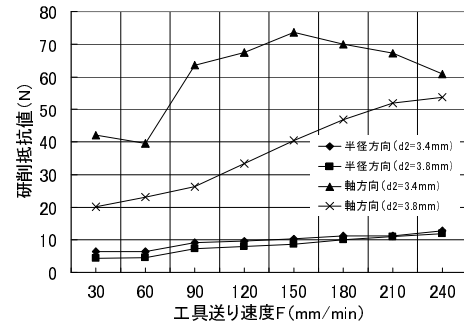


Fig. 3 工具送り速度 F と各軸抵抗値の関係

3 実験装置

小径の工具を使用する場合、高速回転が要求される。そのため、本来は主軸のサイズが小さく高速回転が可能なマシニングセンタを使用する必要がある。しかし、今回使用するマシニングセンタは主軸のサイズが大きいため最高回転数は 14000rpm である。そこで、工作機械の主軸回転数を内部のモーターによって約 10 倍にして出力することができる自己発電式増速スピンドルと、主軸を回転させずにエアーでスピンドルを高速回転させることができるエアタービンスピンドルを使用した。

一般的なセラミックスの硬度は約 HV2000 である。切削工具にはこの 4~5 倍である約 HV8000~10000 の硬さが必要である。この条件から、今回は電着ダイヤモンド砥石を使用し穴をあける。工具性能を Table 2 に示す。

Table 2 工具性能

工具	エフエスケー製ジグ研削用砥石		
砥粒	合成ダイヤモンド		
砥粒径(μm)	平均 62 μm		
砥石径(mm)	$\Phi 0.4$	$\Phi 0.6$	$\Phi 0.8$
砥石部の長さ(mm)	2	3	
シャンク径(mm)	$\Phi 3.0$		
結合剤	電着		

4 実験方法

加工の良否や工具の負荷などに対して最適な加工条件を得るために、加工中の研削抵抗を計測した。そのうえで、研削速度の影響、工具寿命、加工能率に着目した。研削速度の影響に関するものは工具回転数と工具径、加工穴直径に関するものは工具径と公転半径、工具寿命と加工能率に関するものは送り速度となる。そこで、実験ごとにいくつかのパラメーターを一定にした状態でこれらの条件を変化させ比較を行い、最適と考えられる加工条件を検討した。

実験では次のプログラムを元に実験条件に応じて、教

値を変更した。公転半径 δr はヘリカル補間の始点から中心までの距離と方向である I の部分を変更して行う。P はピッチで穴深さに対して n 回転する。Z は軸方向切込量 δd にピッチである n 回転を掛けることで決定する。

```
%
G90 G55
G00 X20.0 Y20.0
Z50.0
M19
M08
Z1.0
G91 G01 X0.2 F60
G03 I( $\delta r$ ) Z( $\delta d \times n$ ) P(n) F(f) ←変更箇所
G01 X-0.2 F60
G90 G00 Z50.0 M09
G91 G28 Z0
M30
%
```

5 実験条件

Table 3 に今回行った実験条件について示す。

Table 3 加工条件

工具回転数 S (rpm)	20000, 30000, 58000, 66000
砥石径 d_l (mm)	0.4, 0.6, 0.8
公転半径 δ_r (mm)	0.3, 0.2, 0.1
送り速度 F (mm/min)	20, 30, 40, 50, 60
研削速度 V (m/min)	37.7, 56.5, 72.9, 109.3, 124.4, 145.7
切込量 δ_d (mm/rev)	0.02

(1) 研削速度の影響

条件 1 として研削速度に関係する工具回転数と工具径を変化させて実験を行う。

(2) 工具径

加工穴直径はあけたい穴径に対して、どの工具を使用するかによって公転半径が決定する。よって、条件 2 として同じ加工穴径に対し、工具径を変更して加工を行った。

(3) 工具寿命, 加工能率

条件 3 として、送り速度を変化させて実験を行う。

6 実験結果と考察

Fig. 3 の結果から、高回転数を与えることにより、研削抵抗を小さくすることができる。小径の穴あけを行うに当たって、負荷を下げるためにより高い回転が要求される。そこで自己発電式増速スピンドルの最大出力が 30000rpm までなので、エアタービンスピンドルを使用して、更に高速回転を与え加工を行い、どの程度研削抵抗

に影響を与えるかを調べた。また、Fig. 3 から軸方向に比べ半径方向の抵抗値は低い値を示していることから軸方向の抵抗値が工具やワークの負荷に繋がると考え軸方向抵抗値に注目し加工を行った。

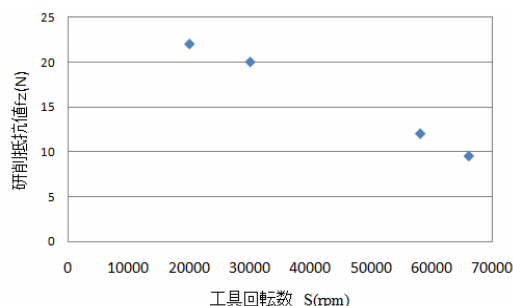


Fig. 5 工具回転数と研削抵抗値の関係

条件 1 の実験結果として主軸回転数 S と軸方向の研削抵抗値の関係を Fig. 5 に示す。

回転数を上げれば、抵抗値は小さくなった。このことから、基本的に回転数を上げることにより、工具やワークへの負荷が下がり、抵抗値は低くなることがわかった。工具回転数が大きすぎると研削液が吹き飛ばされてかからないこともあるようなので、今後、最大工具回転数を調べる必要があると思われる。

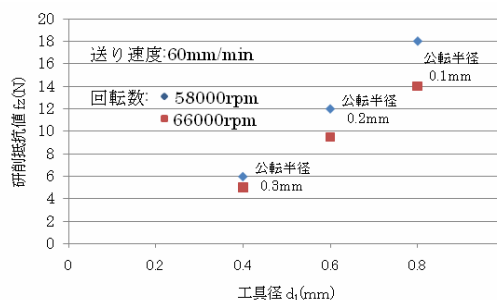


Fig. 6 同穴直径と抵抗値の関係

条件 2 の実験結果として、工具径と軸方向の研削抵抗値の関係を Fig. 6 に示す。

工具径が大きくなるにつれ研削抵抗値が上がっているのが確認できる。これは、細い工具を使うことにより公転半径が小さくなることで、軸方向の速度が速くなる。また、切り粉がうまく排出されない、切削液が穴に入りにくいといった現象が生じるためと考えられる。これにより、研削抵抗値が上昇したと考えられる。

このことから、細い工具を使用して加工を行うのが良いと考えられる。しかし公転半径の増加は、加工時間の増加につながる。また工具径 $\phi 0.4$ mm で 1mm の穴を開ける場合、工具が折れることが多かった。これは、真ん中に芯が残り、砥石の側面が全て当たる条件で行ったことで工具の負荷が大きくなったと考えられる。従って、1mm の穴を開ける場合、直径 0.6mm の工具を使用して公転半径は 0.2mm で加工を行うのがよいと考えられる。

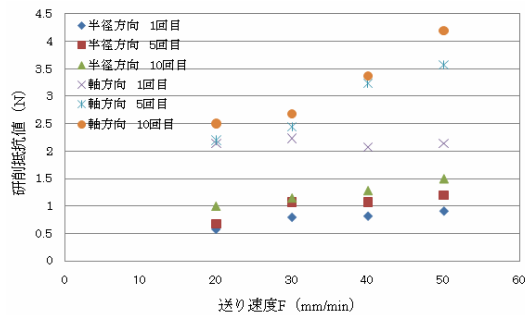


Fig. 7 送り速度変化

条件3の実験結果として、回数1回目、5回目、10回目の半径方向と軸方向の研削抵抗と送り速度の関係をFig.7に示す。送り速度を速くなるにつれ、研削抵抗値が増加しているのが確認できる。これは送り速度を速くすることで、単位時間当たりの加工量が増えることにより研削抵抗値が大きくなったと考えられる。

また、送り速度は速くすればするほど加工時間は短くなり生産性は上がるが、その分工具寿命は短くなる。

更に、送り速度を速くすることにより、加工穴が小さくなることが判明した。これは、細い工具を使用していることで工具がたわんでいると考え半径方向の抵抗値から計算を行った。

たわみの計算は、たわみの基礎式⁶⁾から

$$\sigma = PL^3/3EI \quad (\text{式 2})$$

で行った。ここで、 σ :たわみ量 (mm)、 P :荷重 (N)、 L :突出し量 (mm)、 E :縦弾性係数 (N/mm²)、 I :断面二次モーメント (mm⁴)である。

荷重は測定された半径方向の抵抗値、突出し量は8mm、縦弾性係数には630kN/mm²を代入した。これは、今回使用した工具は超硬軸の台金を使用している。超硬のヤング率は、鉄の約3倍ということからである。断面二次モーメントは、断面形状が円なので $\pi d^4/64$ とした。

式2から、抵抗値が3Nと仮定したときの時のたわみ量を算出するとたわみ量は0.128mmとなる。

ここで、実際に穴径を計測したところ約0.67mmであった。そして、その時の半径方向の抵抗値3.62Nを代入し、計算するとたわみ量は約0.15mmとなった。このことから、穴径が小さくなっているのは、工具がたわんでいることが主な原因であるといえる。

送り速度を速くすると、抵抗値が上がるので、たわみも大きくなり穴径に影響してくると思われる。

しかし、送り速度は遅すぎると、加工時間がより長くなる為、工具の摩耗と、加工時間を考慮する必要がある。

今回、送り速度50mm/min以上で加工を行った結果、10回目には工具の摩耗が進み、抵抗値が大きくなるため40mm/minまでで加工を行うのが良いとする。

7 貫通穴

今までの実験では、最適な条件を見つける上で、時間の短縮ということもあり穴深さは1mmで行っていた。本研究では、直径1mm穴深さ5mm程度の貫通穴をあける事を目標としていることから、今までの実験条件を考慮の上、工具は0.6mmを使用し、回転数は66000rpm、送り速度40mm/min、軸方向切込量0.006mm/revで加工を行った。

この結果、貫通穴をあけることはできた。軸方向速度が0.191mm/minなので加工時間は約28分となった。

1本の工具を使用し連続で5回行ったが、5回目に工具が損傷して加工を行うことができなかった。工具の寿命を延ばすためには、送り速度や切込量を下げてもよいが今回の実験で約28分かかっていることから、効率よく加工を行うためには、工具の形状などの変更を行うなどの方法を考える必要がある。

8 結 言

- (1) 工具回転数 S は高回転数を与えることにより、研削抵抗を非常に小さくすることができる。
- (2) ヘリカル加工で加工する場合、目標の加工穴直径を定めた場合、その穴径に対する工具径の選択をし、公転半径が決定する。直径1mmの穴をあける場合、工具径0.6mmの工具を使用し公転半径0.2mmで行うのが良い。
- (3) 送り速度、切込量を大きくすれば、砥粒の摩耗が早くなり抵抗値が上昇する。砥粒が摩耗すると切れ味が下がり、工具がたわむことから穴径が小さくなる。
- (4) 貫通穴をあけるにあたって、直径1mm、穴深さ5mm程度の穴をあけることはできた。しかし、穴深さが深くなっている分、工具の寿命が早くなり加工は困難になる。

参考文献

- 1) 愛恭輔, 大石健司, セラミックスの切削・研削加工, 海文堂出版株式会社, (1990-11)
- 2) 海野邦昭, ファインセラミックスの高効率機械加工, 日刊工業新聞社, (1986-5)
- 3) 垣野義明, 喜田義宏, 中川平三郎: グライディングセンタその構造と機能, 日刊工業新聞社, (1993-11)
- 4) 溝渕啓, 小川仁: ダイヤモンド電着工具によるガラス基板への通り穴加工時の加工精度と加工能率, 砥粒加工学会誌, Vol.54, No3(2010-3), pp145-150
- 5) 中川平三郎, 小川圭二, 佐賀一樹: セラミックスのヘリカルボーリング加工用電着ダイヤモンド工具の開発(第1報): 工具底面形状と切れ刃干渉状態, 砥粒加工学会誌, Vol.51, No11(2007-11), pp662-667
- 6) 富田佳宏ほか, 材料の力学, 株式会社朝倉書店, (2001-9)