

# 金型用ジルコニアセラミックスの機械加工

学生 K 指導教員：井原之敏

## Machining of Zirconia Ceramics Developed for Mold

Student K

### 1 緒言

近年、機械的・電氣的・化学的など、様々な性質に優れたファインセラミックスが金型用材料として注目を集めている。ファインセラミックスは原料粉末の種類によって性質が異なるが、耐摩耗性や常温・高温強度などの機械的性質が金属材料より優れているものが多く、産業分野では冷間・熱間金型用の材料としての利用が検討されている。一般にファインセラミックスの製造において、仮焼結段階から本焼結を行うと約40～50%の体積収縮を伴うため、金型を加工するような精密機械加工を仮焼結段階で行うことは難しいとされる。また、本焼結後のファインセラミックスの加工には研削や研磨加工が用いられるが、切削に比べて能率的ではないため、依然として、研削や研磨加工での形状や寸法の修正は難しいとされる。そこで、超音波援用加工、レーザ加工、放電加工など様々な加工方法が提案されているが、設備導入に際して高額な費用や加工環境を整える必要があるなど様々な問題があり、様々な機関において研究段階である。

本研究では、半導体用金型材料として利用が期待されているファインセラミックス材料についてマシニングセンタによる機械加工に着目した。本研究で採り上げる金型用ファインセラミックスは、ジルコニアセラミックスをベースに半導体金型に必要とされる靱性、衝撃性、離型性を向上させた新材料であるが、その素性は製造上の機密事項となっている。この新材料を用いた半導体金型のために、直径1mmで深さ3mm程度の位置決めピン用貫通穴の加工方法や、型彫り加工を能率的に行うための加工条件が確立されていない。そこで、新材料である金型用ジルコニアの機械加工において、加工条件パラメータを設定した様々な条件により加工を行った際に発生する切削力および研削力の測定や、加工形状の精度や表面粗さの測定を行うことにより、能率的な加工を行うための方法および条件の検討を行った。

### 2 ファインセラミックスの機械加工

本研究では、本焼結後の金型用ジルコニアを能率的に加工するための検討を行う。その比較対象として、数種類のファインセラミックス材料を採り上げた。

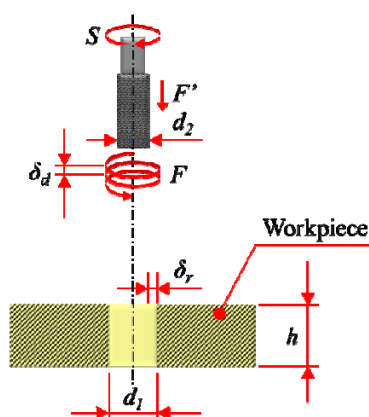
#### 2.1 ファインセラミックスの穴あけ加工

##### 2.1.1 ヘリカル研削加工<sup>1)</sup>

この加工方法は、加工穴の中心を基準に工具が螺旋軌道を描くため、ボーリング加工のように工具径よりも大

きな穴あけが行える。これより、工具径路は螺旋軌道になるため、穴あけ加工を行う上で懸念される工具軸方向に対する負荷は半径方向に分散される。

この方法により直径1mmの穴加工を行うためには、工具径は0.5mm以上かつ1mm以下でなければならない。図2.1にヘリカル研削加工の加工概略図を示す。



$d_1$	: 加工穴径	[mm]
$h$	: 加工穴深さ	[mm]
$d_2$	: 工具径	[mm]
$S$	: 工具回転数	[rpm]
$F$	: 送り速度	[mm/min]
$F'$	: 軸方向送り速度	[mm/min]
$\delta_r$	: 公転半径	[mm]
$\delta_d$	: 軸方向切込み量	[mm]

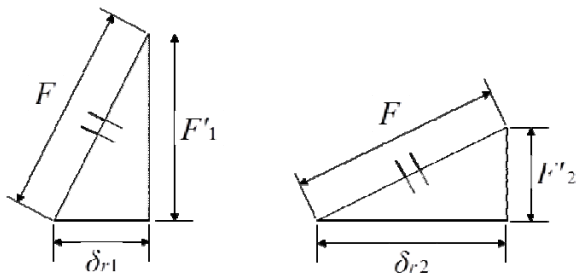
図2.1 ヘリカル研削加工概略図

公転半径  $\delta_r$  [mm] とは、工具中心の軌跡が螺旋を描く時の工具中心と、螺旋軌道の中心間の距離である。これは加工穴径と工具径によって決定する。

$$\delta_r = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (1)$$

例えば、直径0.8mmの工具により直径1mmの穴加工を行う場合の公転半径は、式(1)より0.1mmとなる。また、加工能率は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は送り速度や切込量によって決まる。ここで送り速度  $F$  は、螺旋軌道で移動する工具の速度で、NCプログラム上で決定される。このことから、図2.2に示すように、工具送り速度  $F$  が一定で公転半径  $\delta_r$

が大きくなると工具経路は長くなり、軸方向速度  $F'$  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思われる。



$F$ : 指令送り速度  
 $F'_i$ : 軸方向送り速度 ( $i=1, 2$ )  
 $\delta_{r_i}$ : 公転半径 ( $i=1, 2$ )

図 2.2 公転半径と軸方向速度の関係

### 2.1.2 硬脆材料用ドリルによる加工<sup>2)</sup>

フライス盤やボール盤など汎用の工作機械を用いて穴あけ加工を行う場合、切りくずの排出を促すため、人の手で加工部に切削油を供給しながら送りハンドルを回して切り込んでいく。ある程度切り込むと送りハンドルを「停める」または「引き戻す」といった、ステップを踏ませるような動作を行うことで切りくずの排出や加工熱の上昇を抑制している。この一連の加工を NC 工作機械で行うとなると、「停める」「引き戻す」というようなステップ動作を NC プログラムにより自動的に行わなければならない。NC 工作機械による穴あけ加工において、前述したようなステップ動作を数値制御によって自動的に行う加工方法を「ステップ加工」と呼ぶ。図 2.3 にステップ加工の概略図を示す。

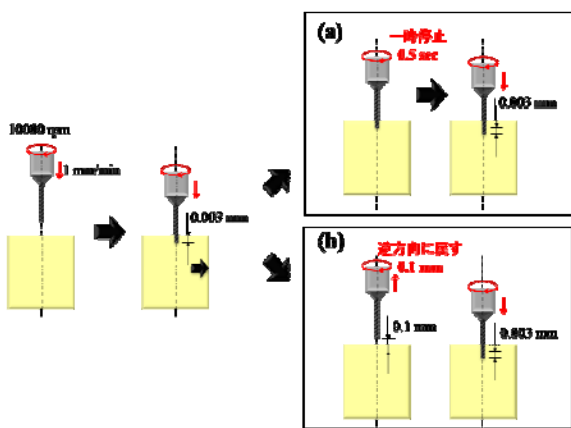


図 2.3 ステップドリル加工

### 2.2 軸付き砥石による平面研削加工

本研究では半導体用の金型における能率的な加工を行うことを目的としているため、実際の金型の加工において小径工具での加工が必要となる。加工する形状や寸法

によってスクエア型・ボール型などあらゆる形状の砥石を用いた金型の内面部分の加工が必要とされる。しかし、どのような形状の加工を行うにしても研削加工は微細加工であるため、切削加工に比べて加工時間が非常に長くなることが予想される。

本研究では金型用ジルコニアの彫り込み加工において、能率的な研削加工を行うという部分に着目した。彫り込み加工であるため、工具の端面および側面を使用した加工になると考えられるが、軸付き砥石の側面のみを使用した基礎的な平面加工による能率の追及を試みた。図 2.4 に加工概略図を示す。

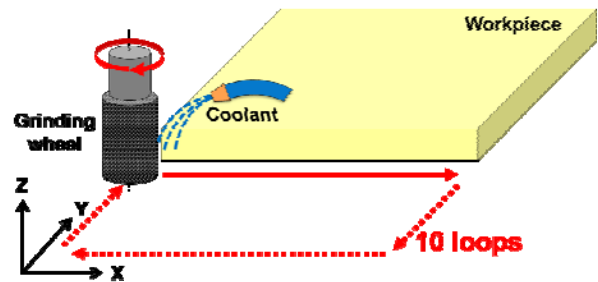


図 2.4 軸付き砥石による平面研削加工

## 3 穴あけ加工実験

### 3.1 ヘリカル研削加工

本実験の目的は、金型用材料として開発されたジルコニアベースの新材料（以下、金型用ジルコニア）を加工する上で、位置決めピン用の直径 1mm、深さ 3mm 程度の高精度な小径貫通穴を高効率に加工するための方法および条件の検討を行うことである。金型用ジルコニアの穴あけ加工において方法および条件が確立されていないため、数種類の加工方法を実施し、加工能率および精度の比較を行った。

本実験では、図 2.1 に基づき、工具径、回転数、送り速度などの加工条件パラメータを設定し、様々な条件により加工を行うことにより最適な加工条件の検討を行った。

#### 3.1.1 貫通穴を加工する上での問題点とその改善

貫通穴を加工し、加工開始面の直径と加工終了面の直径寸法の測定を行ったところ、両加工面の直径の差が 0.1mm ほど見受けられた。これより加工穴の形状はテーパ形状になっているのではないかと考えた。そこで、貫通後に 0.2mm 多く加工を行うことによるテーパ形状の改善案を提案し、両加工面の直径寸法差を低減することを試みた。その結果、両加工面の直径寸法差が 1/3 程度に抑制されたことに加え、目標値の 1mm に近づけることが可能となった。

#### 3.1.2 新材料における最適加工条件の検討<sup>3)</sup>

図 2.1 に基づき加工条件パラメータを設定した。表 3.1

に加工条件パラメータを示す。

表 3.1 加工条件パラメータ

$d_2$ [mm]	工具径
$\delta_r$ [mm]	公転速度
$S$ [rpm]	回転数
$F$ [mm/min]	指令送り速度
$\delta_d$ [mm/rev]	1 公転あたりの軸方向切込み量

表 3.1 に示した加工条件パラメータを用いて、様々な条件での加工実験を行ったことにより得られた結果から、加工終了面における穴の輪郭周辺に割れ<sup>4)</sup>が発生していたことや、加工開始面の寸法が 1mm よりも数十から数百  $\mu\text{m}$  大きくなるということが見受けられた。それらを考慮した上で、最適と考えられる加工条件を表 3.2 に示す。

表 3.2 最適加工条件

加工穴径	[mm]	1.0		
工具径	[mm]	0.8		
公転半径	[mm]	0.1		
研削速度	[m/min]	165.9		
回転数	[rpm]	66000		
送り速度	[mm/min]	100		
1 公転あたりの軸方向切込み量	[ $\mu\text{m}/\text{rev}$ ]	3	4	5
加工穴深さ	[mm]	2.8		
砥石粒度		#230		

この条件により、金型用ジルコニア以外の材料も含めて加工を行うことで、金型用ジルコニアの加工能率の検討および、他材料との加工性の比較を行った。

これより以下に結果を示すが、ここでは軸方向切込み量  $3\mu\text{m}$  の条件における結果のみ記載する。図 3.1 (a) に加工穴数に対する半径方向研削力の推移を、図 3.1 (b) に軸方向研削力を示す。

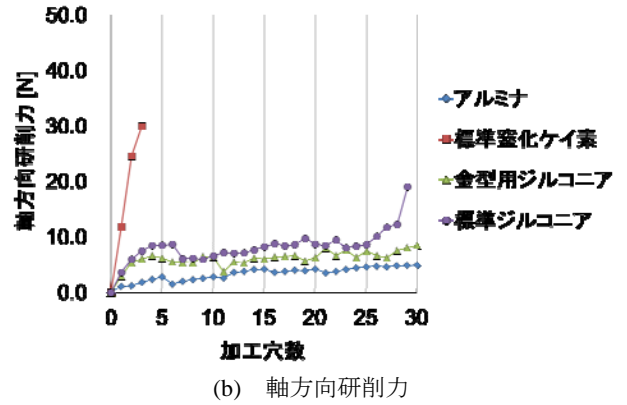
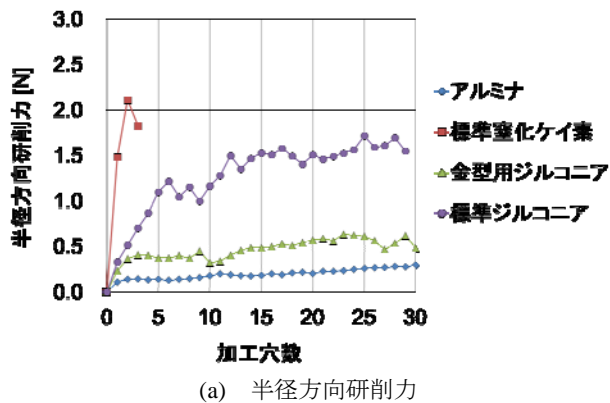


図 3.1 加工穴数に伴う研削力の推移

窒化ケイ素の加工では、4 穴目の加工途中で研削力が急上昇したため、加工を終了した。工具を観察すると、ダイヤモンド砥粒が脱落したというより溶けた、あるいは炭化したというような状態になっていた。原因は破壊靱性値が高いことに伴う研削力の増大により起こった、異常な工具摩耗であると考えられる。

標準ジルコニアの加工では、研削力が新材料よりも高くなった。また、アルミナは最も靱性が低いため研削力は最も小さくなった。全体的に、軸方向研削力が大きく表れているものは、半径方向研削力も大きく表れる傾向となっていた。

ここで図 3.2 (a) に加工開始面の直径寸法を、図 3.2 (b) に加工終了面の直径寸法を示す。

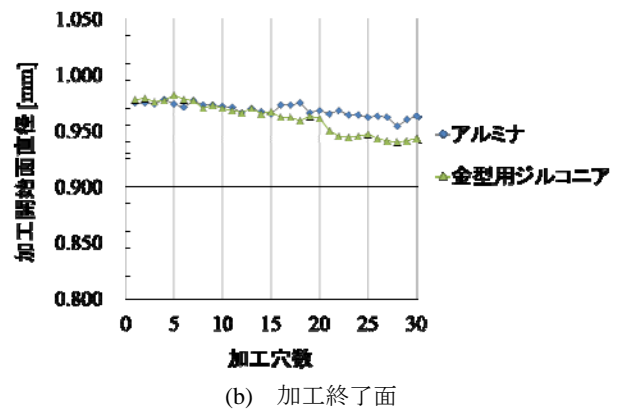
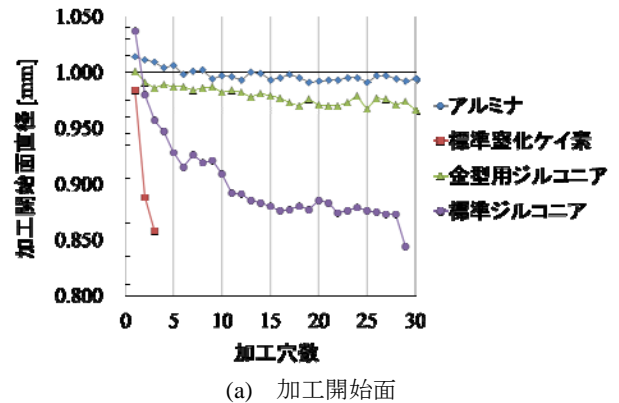
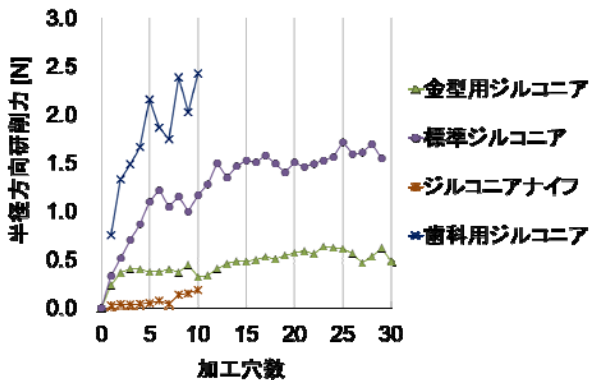


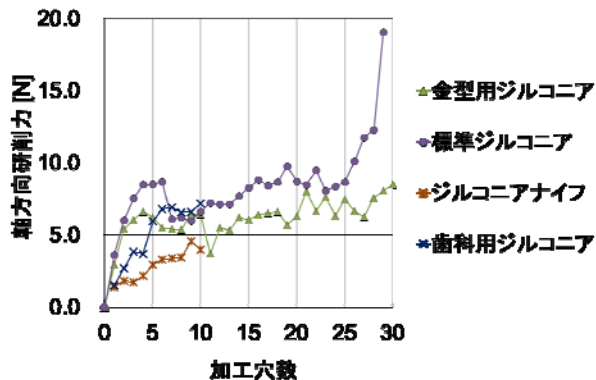
図 3.2 加工穴数に伴う穴径の推移

研削力が大きくなっている材料ほど、加工穴径の減少も著しい。加工穴径が減少しているということは工具が摩耗していると考えられる。これより、研削力の増加に伴い工具摩耗の影響が大きくなると考えられる。ここで、ワークピースのサイズの都合上、金型用ジルコニアの貫通穴加工との比較を行えたのはアルミナのみである。

また、表 3.1 の条件を用いて一般的と考えられる他のジルコニア材料に対しても加工を行った。図 3.3 (a) に加工穴数に対する半径方向研削力の推移を、図 3.3 (b) に軸方向研削力を示し、図 3.4 (a) に加工開始面の直径寸法を、図 3.4 (b) に加工終了面の直径寸法を示す。

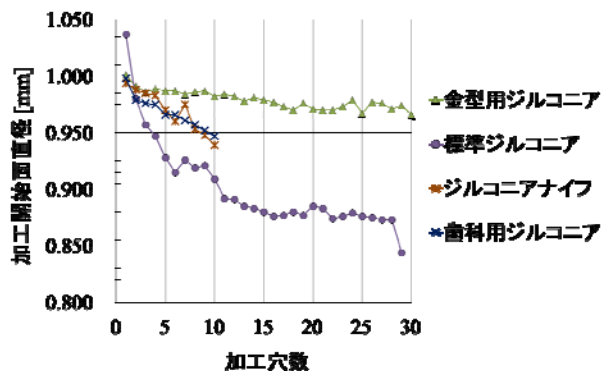


(a) 半径方向研削力

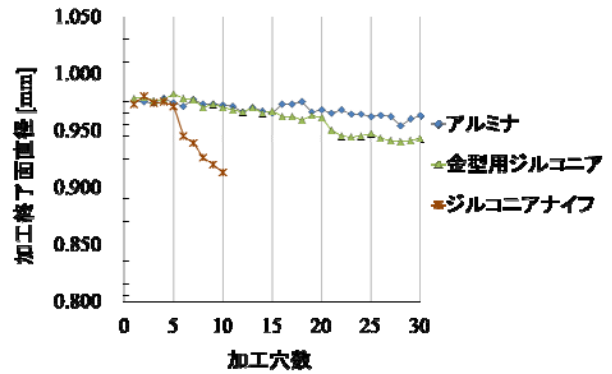


(b) 軸方向研削力

図 3.3 ジルコニア系材料を加工した際の研削力



(a) 加工開始面の直径寸法



(b) 加工終了面の直径寸法

図 3.4 ジルコニア系材料を加工した際の加工穴径

ここでは新たにジルコニアナイフおよび歯科用ジルコニアの加工を行った。両材料の加工において、10 穴目加工時点での軸研削力は、金型用ジルコニアを加工した際の軸方向研削力より大きくなっており、加工開始面直径の減少幅も大きくなっていった。これより、金型用ジルコニアに比べて、金型用ジルコニア以外の材料の方が被削性は悪いということが考えられる。

また、加工時間と能率について、軸方向切込み量が  $5\mu\text{m}/\text{rev}$  の場合、3 分 31 秒、 $4\mu\text{m}/\text{rev}$  の場合、4 分 24 秒で、 $3\mu\text{m}/\text{rev}$  の場合、5 分 52 秒となり、当初目標としていた加工時間での加工が可能となった。

### 3.2 ドリルによるステップ穴あけ加工

ヘリカル加工では研削による加工を行ってきたが、金型用ジルコニアは人靱性が高いとされるため、硬脆材料用ダイヤモンドコーティングドリルを用いた切削による穴あけ加工を提案した。加工方法としては、2.2.1 で述べたようなステップ穴あけ加工を採用した。貫通穴の加工を目的としたため、ワークピースのサイズの都合により、金型用ジルコニアとアルミナにのみ加工を行った。

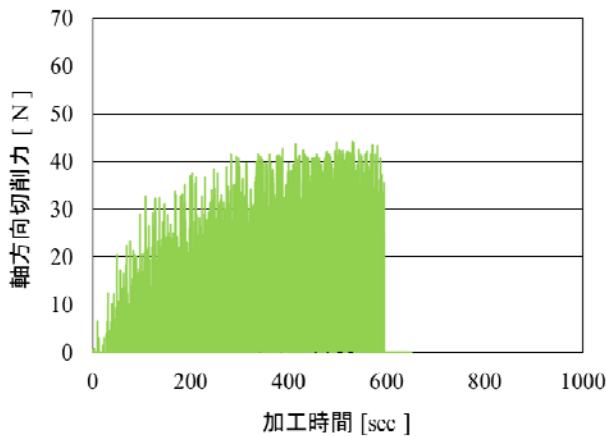
#### 3.2.1 1 穴目の加工

1 穴目の加工として図 2.3 (a) に示している加工方法により加工を行った。表 3.3 に加工条件を示す。

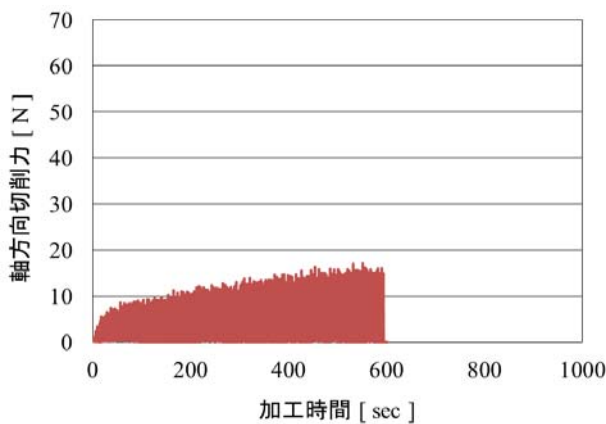
表 3.3 1 穴目の加工条件

工具径	[mm]	$\phi 1.0$
工具切削速度	[m/min]	31.4
工具回転数	[rpm]	10000
工具送り速度	[mm/min]	1
1 ステップあたりの軸方向切込み量	$[\mu\text{m}/\text{rev}]$	3
停止時間	[sec]	0.5

図 3.5 (a) に金型用ジルコニアを加工した際の切削力を、図 3.5 (b) にアルミナを加工した際の切削力を示す。



(a) 金型用ジルコニア



(b) アルミナ

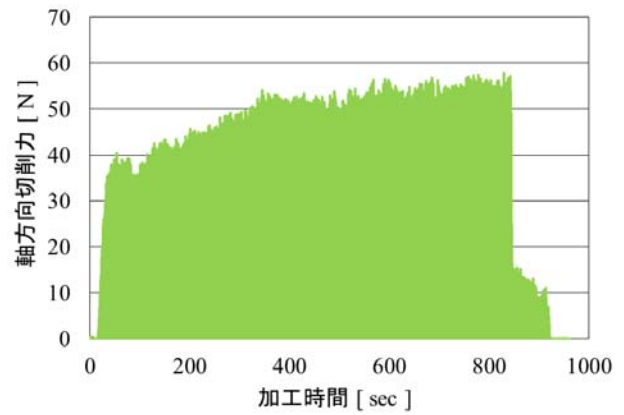
図 3.5 軸方向切削力

両材料とも加工進行に伴い切削力の上昇が見られる。特に金型用ジルコニアにおいてはアルミナ加工時の2倍以上の切削力が発生していた。理由として、アルミナより金型用ジルコニアの方が粘り強く、靱性が高いためであると考えられる。また、加工終了面の穴の輪郭の周りに割れが確認された。

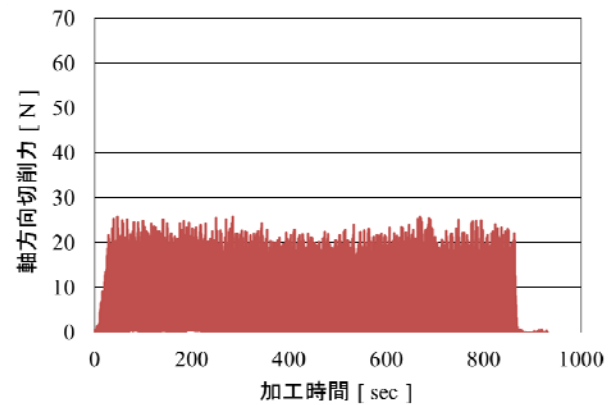
### 3.2.2 2穴目の加工

1穴目の加工では、切り込んでから一時停止する動作を繰り返すことによりステップ穴あけ加工を行った。2穴目の加工では切りくずの排出性を改善するため、切り込んでから引き上げる、いわゆる工具をバックステップさせる動作を繰り返すことによりステップ穴あけ加工を行った。図 2.3 (b) に示している加工方法により加工を行った。加工条件は表 3.1 を基にして、停止時間を設ける代わりに、引き上げるバックステップ量として  $10\mu\text{m}$  と設定した。その他の条件は同様である。

図 3.6 (a) に金型用ジルコニアを加工した際の切削力を、図 3.6 (b) にアルミナを加工した際の切削力を示す。



(a) 金型用ジルコニア



(b) アルミナ

図 3.6 2穴目の軸方向切削力

アルミナの加工において、1穴目のような切削力の上昇は無く安定した加工が行なえている。それに対し、金型用ジルコニアの加工においては、切削力が加工進行とともに上昇を続けていた。加工後の工具を確認すると、工具先端のエッジ部は欠損しており、コーティングが剥がれていた。これより、図 3.6 (a) における切削力の上昇は、工具先端が欠損するまでの摩耗による影響であると考えられる。なお、アルミナについては3穴目以降の加工も続行可能であった。また、加工時間について、1穴目は9分54秒、2穴目は13分50秒であった。

## 4 軸付き砥石の側面による平面研削加工

2.2 で述べたが、ここでは金型用ジルコニアを金型として使うため加工を行う際の、能率的な型彫り加工を行うための条件の検討を目的としている。使用する研削砥石が大きければ切込み量も大きくできるが、本実験で使用する研削砥石は  $3\text{mm}$  程度と小径であるため、製造される金型のサイズを踏まえた上で除去能率の検討を行った。一方向送り（下向き研削）により、1回の加工実験における加工パス数を10パスと設定した。この加工パス数10回という数は、設定した半径方向切込み量を10回切り込む、つまり半径方向切込み量を  $5\mu\text{m}$  と設定したならば、 $5\mu\text{m} \times 10 = 50\mu\text{m}$  の加工を行ったという解釈になる。



加工条件から能率の追及を行うため、加工条件パラメータを設定した。表 4.1 に加工条件パラメータを示す。

表 4.1 加工条件パラメータ

$S$ [rpm]	工具回転数
$F$ [mm/min]	送り速度
$t$ [ $\mu\text{m}$ ]	切込み量

表 4.1 に示した加工条件パラメータの中で、送り速度および回転数をパラメータとして様々な条件により実験を行って得た結果から検討した加工条件を表 4.2 に示す。

表 4.2 半径方向切込み量を変化させた加工条件

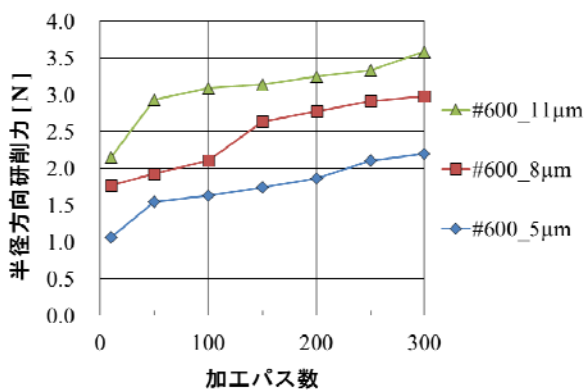
工具径 [mm]	$\phi 3.0$		
研削幅 [mm]	27.5		
工作物厚さ [mm]	1.8		
工具研削速度 [m/min]	659.7		
工具回転数 [rpm]	70000		
工具送り速度 [mm/min]	5000		
半径方向切込み量 [ $\mu\text{m}/\text{rev}$ ]	5	8	11
砥石粒度	# 600		

半径方向切込み量をパラメータとし、各切込み量で加工挙動にどのような影響が表れるのか検討すると共に、半導体金型の型彫り加工を行う上での能率の検討をおこなった。図 4.1 (a) に切込み量別の半径方向研削力を、図 4.1 (b) に表面粗さを示す。

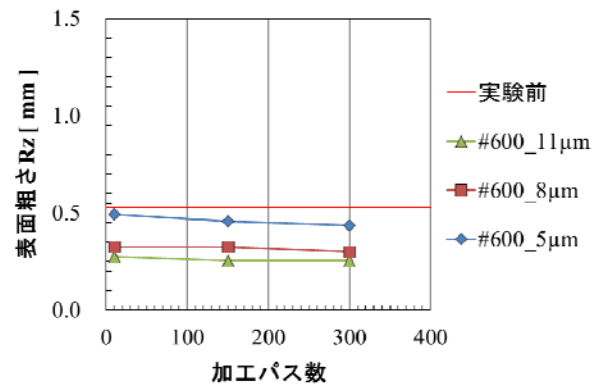
研削力について、切込み量が大きくなるにつれて研削力も大きくなっている。

表面粗さについて、すべての条件において加工前の表面粗さよりも改善されていることがわかる。

これまでの結果より、軸付き砥石による側面研削加工実験において、切込み深さの合計は、半径方向切込み量が  $5\mu\text{m}$  の条件で  $1.5\text{mm}$ 、 $8\mu\text{m}$  の条件で  $2.4\text{mm}$ 、 $11\mu\text{m}$  の条件で  $3\text{mm}$  以上となり、総研削幅は各条件において  $8\text{m}$  以上の加工を行うことが可能であった。



(a) 半径方向研削力



(b) 表面粗さ Rz

図 4.1 切込み量の変化に伴う加工挙動

## 5 結言

本研究では、金型用ジルコニアセラミックスに対して穴あけ加工、平面研削加工を行った結果、以下のような成果を得た。

- 1) ヘリカル研削加工において、加工穴がテーパ形状になっていることを明らかにし、加工開始面および終了面の直径の差を  $1/3$  程度に低減できた。また、以前まで 1 穴あたりの加工に 10 分以上かかっていたが、1 穴あたり 3~6 分程度で加工が可能となった。
- 2) ステップ穴あけ加工において、カタログに記載されているジルコニア加工用の推奨条件を用いたが、金型用ジルコニアは 1 穴を加工し、2 穴目の加工途中で工具が折損した。そのため、金型用ジルコニアに対して一般的な加工条件は適用できないことがわかった。
- 3) 穴あけ加工において、超音波砥粒加工は、加工精度は伴わないが能率は最も良好であった。これより、高精度かつ高効率な穴あけ加工を行う場合、超音波砥粒加工により荒加工を行った後にヘリカル研削加工により仕上げ加工を行うなど、2 つ以上の加工方法を組み合わせ、1 つの加工プロセスとして行う必要がある。
- 4) 軸付き砥石による側面研削加工実験において、能率的な加工条件の検討を行った。その結果、切込み深さの合計は  $3\text{mm}$  以上で、総研削幅は  $8\text{m}$  以上の加工を行うことが可能であった。

## 参考文献

- 1) 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, No 3 (2010-3), pp145-150
- 2) 村田和久, ダイヤモンドコーティングドリルによる硬脆材料への穴あけ加工, 砥粒加工学会誌, Vol.58, No. 2 (2014-2), pp75-78
- 3) 中川平三郎, 小川圭二, 佐賀一樹: セラミックスのヘリカルポ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, No. 11 (2007-11), pp662-667
- 4) 小川圭二, 中川平三郎, 門谷憲太: セラミックスのヘリカルポーリング加工時の欠け発生メカニズム, 砥粒加工学会誌, Vol.56, No.1 (2012-1), pp44-49