

セラミックスの微細穴あけ加工に関する研究

Study on Micro Drilling of Ceramic

小川 仁*, 日開野 輔*, 平岡忠志*, 升田雅博**, 大山 啓**, 森 義典**
半田伸一***, 武田実雄***, 武知清孝***, 元木栄二***Hitoshi Ogawa, Tasuku Higaino, Tadashi Hiraoka, Masahiro Masuda, Kei Oyama, Yoshinori Mori,
Shinichi Handa, Mituo Takeda, Kiyotaka Takechi, Eiji Motoki

抄録

硬脆材料であるアルミナ系セラミックスに対する、ダイヤモンド電着工具を用いた微細穴あけ加工について調査した。硬脆材料の加工では、使用する工具の寿命及び加工時出口部に生じる欠損の対策が問題となる。前者においては加工条件、工具形状を検討した結果、切削速度 100m/min 程度が最も切削抵抗が小さく、また、工具形状は円柱形状の先端を半球にし、円柱側面を 4 面カットし、さらに、工具内部に切削液の供給孔を設けたものにおいて長寿命化が可能となった。一方、後者では加工時の切削抵抗を調査することにより、欠け発生メカニズムが明らかとなった。欠けの生じる瞬間の加工条件を検討し、同時に工具に電着するダイヤモンドの粒子を選定した結果、極めて欠けの少ない、安定した加工が可能な条件が選定できた。

1 はじめに

セラミックの穴あけ加工のほとんどは仮焼結体で行われている。加工能率や加工工程を考えると本焼結された素材を直接研削や切削で成形できることが望ましい。本穴あけ加工は、(1)小径穴であり、(2)工作物が硬脆材料であるという二つの問題を持っている。(1)に関しては砥石が市販されておらず、十分な加工速度が得られないことであり、(2)の問題点は出口部の欠けの発生と短い工具寿命である。

本研究では上述の問題点に対応するために、高速加工機を利用したダイヤモンド電着工具での穴あけ加工の可能性を追求した。欠けの発生は穴あけ抵抗や切くずの排出性と相関があると考えられるので、工具に関しては、先端形状と軸形状について、加工条件に関しては、加工速度と送りについて、欠けの発生と加工抵抗のスラスト成分の挙動から検討した。次に、第 2 の課題である工具寿命については、サイクル加工を採用し、穴の貫通する直前で送りを小さくする加工方法を用いた。

2 実験方法

穴あけ工具として、軸の材質は SK5(引抜のまま)で、直径約 0.85mm の軸の先端から 5mm までの位置に粒度 #200 のダイヤモンドを電着して、工具直径が約 1.0mm になるようにした。

工具形状は図 1 に示す先端形状と図 2 に示す軸形状を変化させ調査した。用いた工具の形状及びシンボルマークを表 1 に示す。実験に使用した工作機械

は CNC ジグ研削盤で送り速度を 10mm/min とし、主軸回転数を変化させて、切削抵抗及び欠け発生について検討した。加工条件を表 2 に示す。

工作物は $Al_2O_3(1600HV)$ で、長さ×幅×厚さは 14.4×6.0×3.4mm である。これをジグに取付け、工具動力計上に設置した。

次に良好な結果を示した RBP 工具を用い、工作機械をグラインディングセンターに変更して、ステップ送り(固定サイクル)を導入して、工具寿命の延長をはかった。固定サイクルによる加工条件を表 3 に、加工方法を図 3 に示す。

さらに、切削点への冷却効果及び電着工具の目詰まりを防止するために図 4 に示すように、工具内に切削液の供給孔を設けたオイルホール工具を製作し、比較検討を行った。

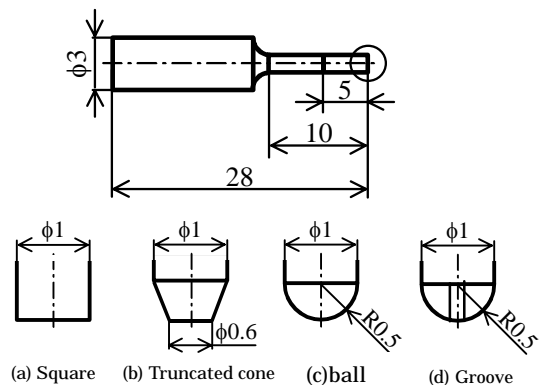


Fig.1 Tool geometry and end form

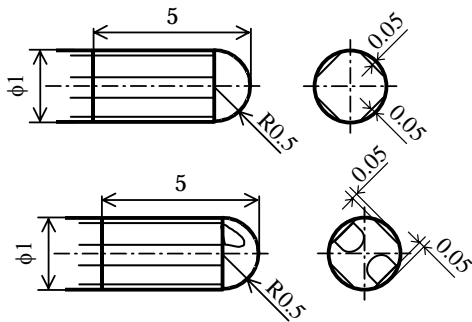


Fig.2 Tool geometry considered chip removal(ball)

Table 1 Tool form

Spindle form	Cylindrical type			
	End form	Truncated cone	Ball	Groove
Symbol	CS	CT	CB	CG

Spindle form	Rectangular type		
	End form	Ball	Ball plane
Symbol	RS	RB	RBP

Table 2 Processing conditions(CNC jig grinder)

Tool diameter	1mm
Workpiece	Al ₂ O ₃ (1600HV)
Spindle revolution	21000 ~ 78000rpm
Drilling speed	66 ~ 245m/min
Feed	10mm/min
Coolant	1.07l/min
Machine tool	CNC jig grinder

Table 3 Processing conditions(Grinding center)

Tool diameter	1mm
Workpiece	Al ₂ O ₃ (1600HV)
Spindle revolution	10000 ~ 80000rpm
Drilling speed	31 ~ 50m/min
Coolant	4l/min
Machine tool	Grinding center

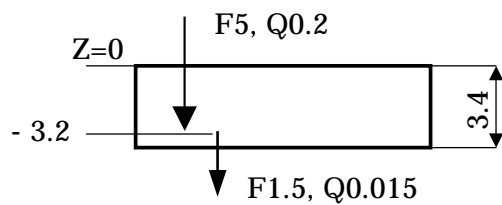


Fig.3 Processing cycle

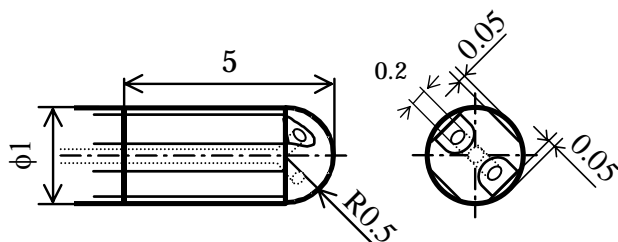


Fig.4 Oilhole tool

3 実験結果

3.1 先端形状と加工現象

軸が円筒で、先端がフラット(CS)、半球(CB)、円錐台(CT)の3種類の形状について調べた。どの形状でも回転数でも出口側に大きな欠けがほぼ全周にわたって発生した。これは、切りくずがほとんど排出されないためと考えられる。ただし、半球形状での欠けが他の2つよりは小さかった。

3.2 四角形状軸と加工現象

切りくずの排出性をよくするために軸を四角形状にし、先端がフラット(RS)、半球(RB)の形状を作成した。フラット形状では抵抗、欠けともに小さくなったが欠けは無くなることはなかった。半球形状の場合は36000rpmで加工したとき抵抗の増加割合が小さく、欠けのほとんどない加工ができた。欠けの様子を図5に示す。さらに先端半球部にも平面を設けると、工具寿命が延びた。

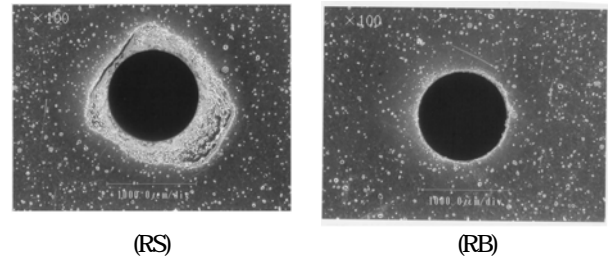


Fig.5 Appearance of the exit surface (n=48000rpm, f=10mm/min)

3.3 主軸回転数と加工現象

図6は全ての実験における出口側のスラスト力を示す。スラスト力が60Nを越えるものは工具が折損したものである。また表4は、工具形状と主軸回転数に対する1回穴あけ後の欠け幅の最大値を示す。×印は折損を示す。欠けは、円錐台形で大きく、半球形状で小さい。穴あけ抵抗や欠けの発生から判断して加工に適した工具の周速は113m/min ~ 151m/minである。

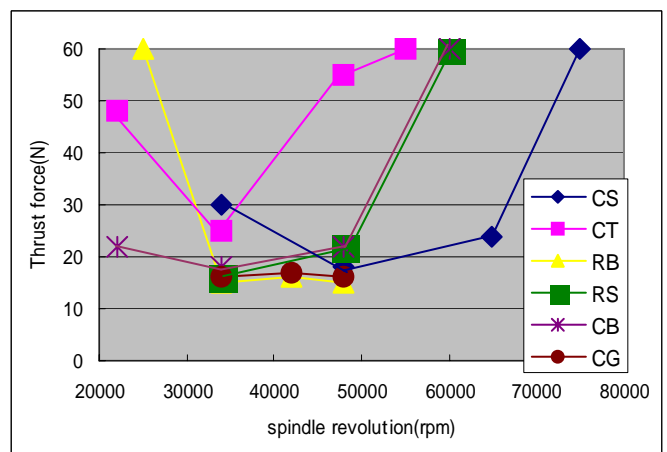


Fig.6 Relation between machining conditions and thrust force

Table 4 Relation between machining conditions and fracture size (μm)

Symbol	Spindle revolution (rpm)				
	21000	36000	42000	48000	66000
CS		650		200	400
RS		200		430	×
CT	600	200		1500	×
CB	180	200		200	×
RB		70	60	70	
CG		80	130	70	

3.4 固定サイクルを利用した効果

3.4.1 固定サイクルの導入と欠けの推移

欠けの最も小さいRBP 工具を用い、主軸回転数を変えて加工した場合の出口部に発生する欠け幅の最大値の推移を、工具折損または大きな欠け幅が数回繰り返されるまで加工したときの結果を図 7 に示す。32000rpm で工具寿命が 100 回以上となり最長で、16000rpm のとき欠け幅のばらつきが最も安定している。図 8 に欠け幅の最も大きかった 8000rpm と最も小さかった 32000rpm での加工後の工具の摩耗状態を示す。

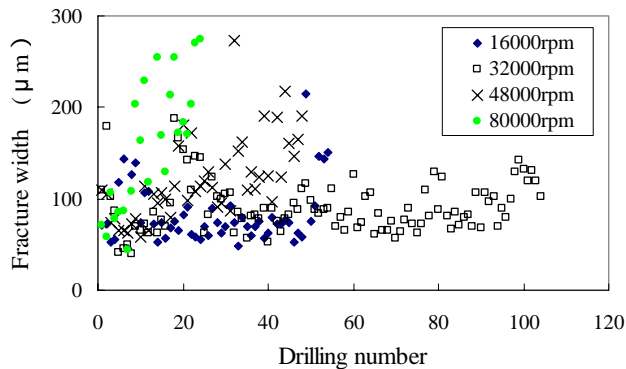
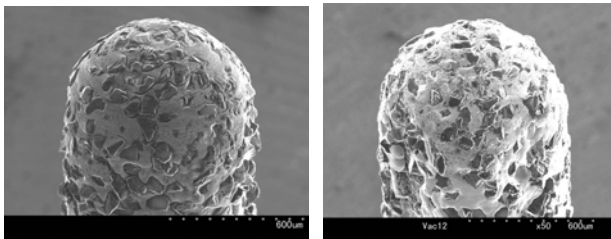


Fig.7 Relation between the number of drilling and fracture size



8000rpm 32000rpm
Fig.8 SEM micrograph of tool failure

3.4.2 スラスト力の変化と欠けの発生

穴あけ工程におけるスラスト力の変化を図 9 に示す。図において縦軸がスラスト力、横軸が加工時間の推移を示す。サイクル加工を用いており、の範囲は荒加工（送り 5mm/min, 1 ステップ量 0.2mm）であり、以降は仕上げ加工（送り 1.5mm/min, 1 ステップ量 0.015mm）としている。スラスト力は荒加工では一定の増加傾向を示し、その後、仕上げ工程で減少過程に移行する。仕上げ工程においてか

ら及びから の範囲でスラスト力が急激に減少する。この現象は工具が軸方向に送られる再にも出口部に欠けが発生したと考えられる。

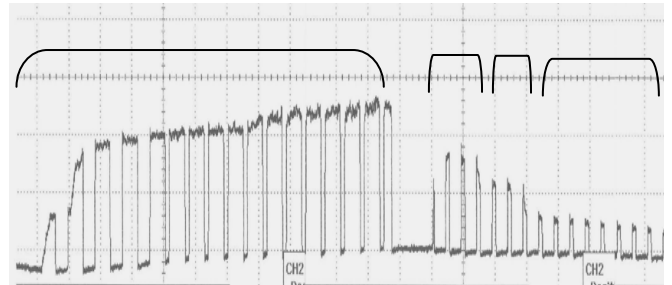
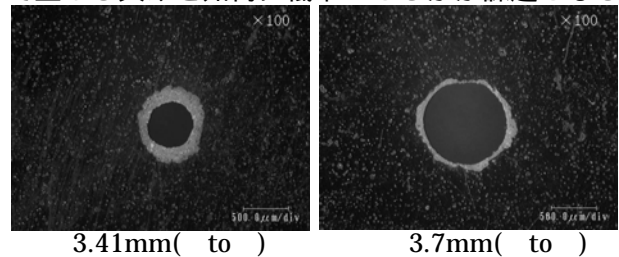


Fig.9 Variation of thrust force (Spindle revolution 16000rpm)

図 10 は から の減少が生じた場合の出口部の欠けである。欠け幅は工具径 1mm 以下であり、この工程で生じた欠けは、工具が軸方向に送られることにより消滅する。また、から 工程でのスラスト力の減少では、工具先端は工作物厚さを超えており、欠け幅は 1mm を超えている。つまり、この工程で生じる欠けを如何に低下させるかが課題となる。



3.41mm(to) 3.7mm(to)
Fig.10 Drilling depth and fracture size

3.4.3 欠け幅のばらつき

欠け幅のはらつきを考察するために、同一仕様の工具 A, B により工具移動に対するスラスト力、穴径および穴を含む欠けの直径を観察した。図 11 はから に至る過程のスラスト力の減少割合を示す。また図 12 は工具先端の移動距離に対する穴直径と欠け幅の最大直径である。穴直径は両工具ともほぼ同じであるが、スラスト力の減少割合と欠け直径は B 工具が大きい。すなわち、スラスト力とその減少割合の大きいほど欠けは大きく、それはまた砥粒の電着状態によって変化する。

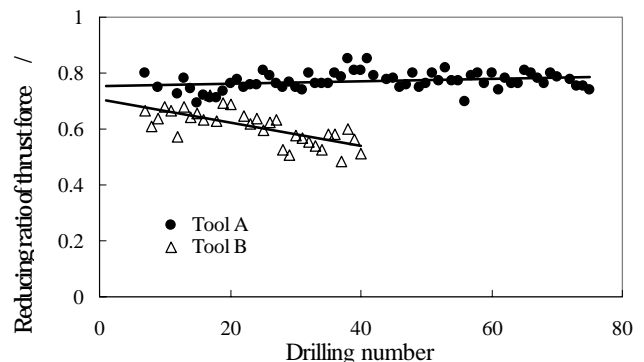


Fig.11 Comparison of reducing ratio of thrust force / between tool A and B (Spindle revolution 32000rpm)

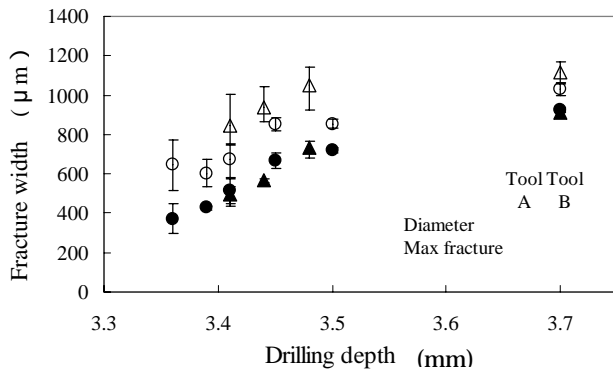


Fig.12 Comparison of hole diameter and fracture size between tool A and B (Spindle revolution 32000rpm)

3.5 オイルホール工具と加工現象

工具円筒軸を4面カットし、先端部を2面カットしたRBP工具を用い、固定サイクルを導入することにより、工具寿命が延びる。しかし、切削長に比例しスラスト力は増加し、工作物出口部に欠けを発生させる。スラスト力の増加はダイヤモンドの摩耗及び切りくずの目詰まりによるものであり、切削液の潤滑性及びダイヤモンドの冷却性を向上させるため、オイルホール工具を用いて調査した。図13に工作物出口部に欠けが生じ、工具寿命となった工具のSEM像を示す。RBP工具では75穴で工具寿命となり、ダイヤモンドの摩耗が著しい。一方、オイルホール工具では170穴を越える加工が行え、ダイヤモンドの摩耗も前者に比べ少ない。また、目詰まりもなく、工具損傷は摩耗に支配されていると考えられる。

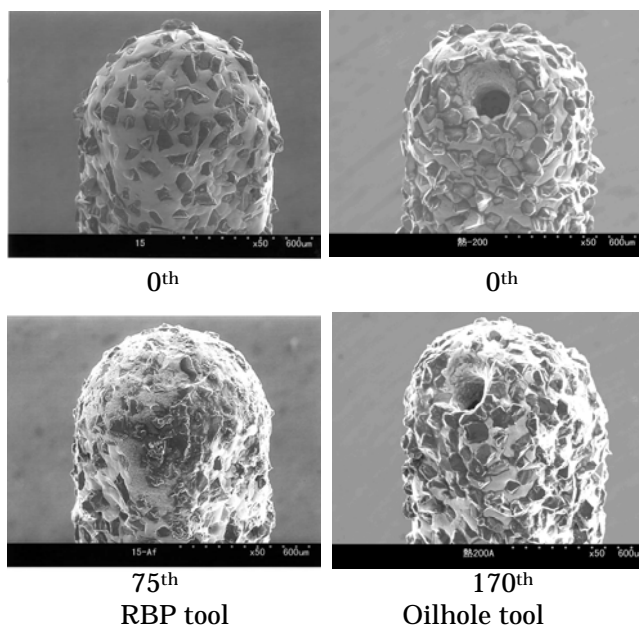


Fig.13 SEM micrograph of tool failure

4 考察

工具損傷状態から、電着工具では先端部近傍の摩耗が著しい。先端部に切りくず溜りとなる平面部を設け、また、オイルホール工具により工具冷却と切りくずの排出性を向上させることにより、スラスト力は低下し、工具寿命が延びる。また、ステップ送りの導入は切りくず詰りを防止させる。

しかし、加工後の工作物出口部に生じる欠け幅の推移は工具によって変動し、工具先端の砥粒分布の状態に作用される。これは、工具径に対し電着に使用したダイヤモンドが200と比較的大きいため、工具形状が安定していないことによる。この問題の解決には(1)砥粒の粒径を小さくし均一化を図る、(2)荒加工と仕上げ加工の2工程とし、荒加工で所定の径より小さい工具で加工する、以上の2つが考えられる。(1)においては工具の目詰まりや耐摩耗性が課題となり、実用化には(2)の手法が妥当であると考えられる。

5 結言

アルミナセラミックに欠けの小さな状態で通し穴の加工のできるシステムを構築する目的で、工具形状、加工方法を検討した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 切りくず排出のために工具の先端形状を半球にし、軸を四角形状にすると欠けの小さい加工ができる。
- (2) 固定サイクルの導入は、工具進行に伴うスラスト力の増大を抑制し、工具寿命が延びる。
- (3) 主軸回転数 16000 ~ 32000rpm(工具周速度 50 ~ 101m/min)の範囲で使用回数は長くなった。ただし、欠け幅の進展状態は一定でなく、ばらつきが存在した。
- (4) 工具先端が出口側表面より 0.04mm 内側に達したときにクラックが入り、穴があいた。穴の周りには欠けが必ず存在し、その欠け幅は工具によって変化した。
- (5) 工具内にオイル供給孔を設けたオイルホール工具により長寿命化が可能となる。

参考文献

- 1) 神 雅彦, 村川正夫:「ステップ振動ドリル加工法による難削材の穴あけ」, 精密工学会誌, 66, 8(2000)1286.
- 2) 江頭 快:「硬ぜい材料の微細工具による切削加工」, 精密工学会誌, 67, 1(2001)157.
- 3) 切削油剤研究会:「穴加工皆伝」, (1994)