小径ダイヤモンド電着工具による アルミナセラミックへの通し穴加工（第1報）*

— 工具形状と加工条件の検討 —

升田雅博** 大山 啓** 森 義典*** 半田伸一† 武知清孝† 小川 仁††

Through Hole Drilling of Alumina Ceramic with Electroplated Diamond Tool (1st Report)
— Investigation of Tool Geometry and Machining Conditions —

Masahiro MASUDA, Akira OYAMA, Yoshinori MORI, Shinichi HANDA, Kiyotaka TAKECHI and Hitoshi OGAWA

In through hole drilling of hard and brittle materials such as ceramics, glass etc., cracks occur at the exit surface. This paper deals with a miniature drilling of Al_2O_3 (1600HV) using an electroplated diamond tool. The main purpose of this research is to find out tool geometries and drilling conditions in which the exit cracks are very small and the tool life is very long. A tool with rectangle section and bowl end is effective on the chip removal and the control of fracture size. A method assisted by step feed, in addition, produces a numerous drilling number of 100th or more at a workpiece with a thickness of 3.4mm. The desirable drilling speed should be 50-100m/min and the preferable feed rate arrangement should be 5mm/min at the entrance while 1.5mm/min at the exit. When the tool end reaches the position about 40 μm from the exit surface, a hole passes through and large cracks occur around the hole. At the same time, the thrust force falls rapidly. As the tool end moves further, the hole diameter increases and the fracture size decreases. However, large cracks may occur rarely in the progressive process.

Key words : miniature drilling, alumina ceramic, electroplated diamond tool, tool geometry, drilling cycle

1. 緒 言

繊維用ノズルは、糸紡ぎの高速化に対応して耐摩耗性が要求されるために焼入れ鋼からアルミナセラミックに置き換わりつつある。しかし、硬脆材料であることが災いし、穴あけ加工のほとんどは仮焼結体の状態で行われている。加工能率や融通性を考えると本焼結された素材を直接機械加工できることが望ましい。セラミックのような硬脆材料を直接加工する方法として、超音波加工や超音波援用加工¹⁾²⁾が知られている。しかし、これらは送り速度が遅く、一般に低能率である。さらに、研削加工が考えられるが、小径砥石は使用中に破壊する恐れがある。最近、セラミック加工用ダイヤモンド電着工具が市販されているが³⁾、小径通し穴では出口部の欠けなどの面品位に対して満足いく工具は開発されていない。

本研究は、アルミナセラミックに 1mm の通し穴をあけることのできるダイヤモンド電着工具の可能性を検討した。穴出口部の欠けが大きければノズルとしての役目を果たさないから、研究の第一段階は、欠け幅を約 100 μm 以下に抑えることができ、かつ採算の取れる工具寿命を有する工具形状と加工方法・条件の決定である。欠け幅は穴あけ抵抗や切り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、円筒軸断面形状について、加工条件に関しては加工速度と送り速度について、欠け幅と穴あけ抵抗のスラスト成分の挙動から検討した。

* 原稿受付 平成 16 年 4 月 8 日

** 正 会 員 徳島大学工学部（徳島市南常三島町 2-1）

*** 学生会員 徳島大学大学院

† 阿波スピンドル(株)（徳島県麻植郡山川町天神 80）

†† 正 会 員 徳島県立工業技術センター（徳島市雑賀町西開 11-2）

Fig.1 Tool geometry and end form

Fig.2 Tool prepared planes to increase chip removal

2. 実験方法と条件

2.1 工具形状の調査と実験条件

検討したダイヤモンド電着軸付工具の基本寸法を図 1 に示す。

Fig.3 Drilling cycle used in the experiments

軸の材質は SK5（引抜きのまま）で、軸径約 0.85mm、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、工具直径が約 1.0mm になるようにした。工具形状については、軸が円筒のまま、先端が平形（CS）、円錐台形（CT）および半球形（CB）の 3 種類について比較した。次に、図 2（a）に示すように、軸を 0.05mm だけ 4 ヶ所そぎ落とした角丸四角形状とし、先端が平形と半球の 2 種類について調査した。最終的には図 2（b）に示す先端部も 2 ヶ所の平面部を設けた工具（RBP）を製作した。

本実験で用いた工作機械は CNC ジグ研削盤（和井田製作所：JG-35CPX, FANUC-11M）で、主軸回転数は最高約 90000rpm まで変速できる。ただし、送り速度は 10mm/min が最低である。送り速度一定で主軸回転数を変化させた場合の出口部の欠け幅や穴あけ抵抗のスラスト力を観察して評価した。クーラントとしてソリュブルタイプの水溶性油剤を 1.07ℓ/min 注油した。

2.2 穴あけ固定サイクルと実験条件

切りくずの排出性をさらに向上させる目的で、穴あけ固定サイクルを利用した方式を検討した。工作機械は、高周波スピンドル（プレサイス製 SC1060-OA）を装備したグライディングセンター（大阪機工製 GC4）に変更した。その固定サイクルは、若干の予備試験の結果、図 3 に示すように加工開始から 4 サイクル間送り速度を 5mm/min、送り量 0.2mm/step とし、G83 コードを用いた。5 サイクル目から約 3.2mm までは送り速度は変えずに、送り方式を G73 コードに変更した。その後、加工終了まで G73 コードのままで、送り速度 1.5mm/min、送り量 0.015mm/step とした。主軸回転数は 10000rpm~80000rpm まで変化した。

本実験に使用した工具は RBP タイプである。ソリュブルタイプの油剤が使用され、2 ヶ所からそれぞれ 4ℓ/min ずつ注油した。

2.3 工作物と各種の測定

工作物は Al_2O_3 （硬さ 1600HV）で、長さ×幅×厚さはそれぞれ 14.4×6.0×3.4mm である。これをジグに取付け、工具動力計（キスラー社製 9257B）上に設定した。穴あけ加工時の抵抗はスラスト力のみ測定した。なお、トルクについても測定を試みたが、油剤の噴出力に左右されるほど極めて小さい値であった。

出口部の欠け幅は、観察を容易にするために出口側の面に青竹やマジックインキを塗布した状態で加工を行い、デジタル HD マイクロスコープ（キーエンス社製 VH-7000）で観察した。工具損傷状態は SEM で観察した。

3. 実験結果と考察

3.1 先端形状と加工現象

円筒軸で先端形状の異なる 3 種類の工具を用いて、送り速度 10mm/min 一定とし、主軸回転数を変えて穴あけ加工したときのスラスト力の変化と出口部の欠け幅を観察した。すべて穴あけ 1 回目の結果である。

Fig.4 Variation of thrust force and appearance at the exit when drilling Al_2O_3 using three kinds of tool end

3.1.1 平形（CS） 図 4（a）は主軸回転数 36000rpm でのスラスト力と出口部の欠けを示す。スラスト力は、加工の進行とともに増大し、貫通すると一瞬のうちに 0 になる。主軸回転数が大きくなれば、送り速度一定のため 1 回転当たりの送りの減少により、穴あけ初期の抵抗は小さくなる。しかし、結局は工具の進行とともに、接触領域の増大と切りくずの排出性が悪くなるために、極めて大きくなり、軸の折損などのトラブルが発生することもある。

出口部では全周にわたって欠けが発生している。CS 形状ではどの回転数においても 200μm 以上の幅をもつ大きな欠けが発生した。なお、入口側ではまったく見られなかった。

3.1.2 円錐台形（CT） 主軸回転数 21000rpm の結果を図 4（b）に示す。スラスト力は食い付き時に一瞬大きく、その後少しの間安定するが、1/3 付近から急上昇するとともにかなり変動している。36000rpm 以上の高速になると、食い付き時のスラスト力の一瞬の増大はなくなり、増加割合も比較的小さくなった。しかし、抵抗の変動幅が大きく、66000rpm では途中で工作物にクラックが生じるなど、加工状態は最も不安定であった。欠け幅もまたどの回転数においても図のように大きくなった。

3.1.3 半球形（CB） 36000rpm の結果を図 4（c）に示す。工具進行に伴うスラスト力の増大は、他の形状に比較すると、少し安定するが、それでも入口側と出口側で約 3 倍の違いがある。66000rpm では加工途中で工具が折損するなど、高速では使用できなかった。欠け幅は、他の先端形状に比較して著しく小さくなるものの、約 200μm の幅となり肉眼でははっきりと認識できる大きさである。この値は、現状の仮焼結体での面取りが約 150μm であることから不十分である。

3 つの先端形状の比較から、欠け幅は先端が平坦であるか、

Fig.5 Variation of thrust force and appearance at the exit for rectangular spindle form ($n=36000\text{rpm}$, $S=10\text{mm/min}$)

Fig.6 Relation between the number of drilling and fracture size

球面であるかによって著しく異なる。一方、穴あけ過程のスラスト力は全てのタイプで増加するとともに、出口に近づくほど変動する。スラスト力の増大は、工作物出口近傍での内部応力を大きくし、大きな欠けにつながると考えられる。スラスト力増大の原因は、工具の進行に伴う接触領域の拡大、切りくずの詰まり、ダイヤモンド粒子の摩耗などが考えられるので、次に切りくずの排出をよくする工具について検討した。

3.2 角丸四角形状軸の効果

切りくずを収容できる空間を作り出すために、図2(a)に示すように円筒面をそぎ落とした角丸四角形状の軸にした。切りくずの収容能力からは平面部を広くする方が有利である。しかし、コーナ部が狭くなり、加工に関与する砥粒数が少なくなるために砥粒摩耗は促進すると考えられる。ここでは直径0.85mmの外周から0.05mmそぎ落とした。この場合、粒度#200では、1コーナあたり2~3個の砥粒が並ぶ。なお、この実験では円錐台形状は除外した。

3.2.1 平形 (RS) 主軸回転数 36000rpm、送り速度 10mm/minとして穴あけ加工を行った結果を図5(a)に示す。角丸四角形状にすることによりスラスト力の増加割合は著しく低下した。しかし、欠け幅は400μm以下にはならなかった。

3.2.2 半球形 (RB) RS工具と同じ条件の結果を図5(b)に示す。図4(c)と比較すると、初期スラスト力だけでなく、工具移動に対するその増加率もまた低下している。そして、何よりも欠け幅は非常に小さくなっている。

Fig.7 Variation of thrust force in drilling at 30000rpm

Fig.8 Comparison of fracture between 8th and 10th drilling

以上の結果から、欠け幅を小さくするためには切りくずの排出性を向上させることが効果的であるといえる。しかし、平形での欠け幅の減少割合が小さかったことから、本質的な効果は、半球形状にあると考えられる。半球形状では、図4や図5の出口部のスラスト力の低下傾向から、平形のように一瞬に0になるのではなく、途中でわずかな段が生じる。すなわち、出口部ではわずかな切残しが存在していると推察できる。工具先端が出口部に近づく脆性破壊により穴があくが、工具直径より小さい範囲内であり、その後の工具進行で加工が進む結果、欠けの小さな穴になったと考えられる。

3.3 工具先端部に平面を設けた効果 (RBP)

切りくずの排出性をさらに高めるために、図2(b)に示したように半球形状の先端部にも平面部を設けた工具を製作し、主軸回転数 36000rpm、送り速度 10mm/minで加工したときの穴あけ回数に対する最大欠け幅の推移を図6に示す。RBタイプと比較して、RBPタイプでは若干のばらつきがあるものの200μm以下の欠け幅で15回穴をあけることができた。

3.4 固定サイクルを利用した効果

RBPタイプの工具を用い、送り速度が任意に選択できるグライディングセンターで、さらに切りくず排出性の高い穴あけ固定サイクルの効果調べた。典型的な例として、主軸回転数 30000rpmで加工したときの8回目と10回目のスラスト力の変化を図7に、出口の欠けの様子を図8に示す。

送り速度 5mm/minの領域は加工開始から加工サイクルIまでである。この領域でのスラスト力は、穴あけ開始直後を除くと図4と図5で示した連続送りのような増大は見られず、極めて小さな上昇に留まっている。むしろ8回目より10回目がわずかに大きい。II以降の送り速度は1.5mm/minであり、スラスト力は減少し、徐々に0に達する。IIIにおいてスラスト力が大きく減少するのは、後述するように穴が貫通した結果である。このとき大きな欠けが発生するが、穴径を含めた最大欠け直径はほとんどの場合工具径より小さい。従って、この時点で発生した欠け領域は工具進行とともに削り取られる。その後、IVのところで減少割合の大きいスラスト力の低下が再び見られる。8回目と10回目とを比較すると、スラスト力の小さい8回目でそ

の低下割合が大きく、欠け幅も大きくなっている。すなわち、貫通後の遅い段階で起こるスラスト力の比較的大きな減少は、大きな欠け幅を残すといえる。

3.5 加工条件と穴あけ回数

固定サイクルの導入はスラスト力を安定させ、多少のばらつきが存在するものの欠け幅をさらに小さくした。ここでは、主軸回転数や送り速度をパラメータとして加工回数に対する最大

Fig.9 Relation between the number of drilling and fracture size in varying spindle revolution

Fig.10 Relation between the number of drilling and fracture size in varying feed speed

欠け幅の推移を調べた。図9は主軸回転数を、図10は送り速度のオーバーライドを変えて、工具折損または連続して大きな欠け幅が現れるまでの結果である。

欠け幅の推移を全体的に見ると、穴あけ回数に対して増加傾向を示す場合と、ばらつきがあるものの長い回数約100μm以下で推移した後、急激に増大する場合とがある。主軸回転数16000rpmと32000rpmが後者の場合で、16000rpmが最も安定し、32000rpmでは欠け幅のばらつきは大きかったものの16000rpmに比較して約2倍長持ちした。

オーバーライドを利用した送り速度に対する欠け幅の推移は、図10に示す主軸回転数16000rpmの結果から、50%で最も早くなり、100%と150%では欠け幅のばらつきで100%の場合がわずかに勝る程度である。32000rpmにおいても同じ傾向が見られた。50%で早くなることは真の加工距離が100%の2倍に増大したことによる砥粒の摩耗の結果と考えられる。

3.6 工具損傷状態

欠け幅の進展が速かった主軸回転数14000rpm(44m/min)の低速域と80000rpm(251m/min)の高速域、そして最も遅かった32000rpm(100m/min)での工具損傷状態を図11に示す。14000rpmでは穴あけ回数24回のために砥粒の摩耗は少ないが、工具先端に切りくずの付着が見られる。一方、80000rpmでは工具表面の凹凸がなくなるほど、先端近傍の砥粒の摩耗が激しいことがわかる。この原因として、同じ24回でも、送り速度が同じであるために真実加工距離が14000rpmの約5.7倍であるうえに、電着基盤であるNiの熱伝導率の悪さのために高速では工具温度を上昇させたと考えられる。104回の32000rpmでは砥粒の摩耗が進んでいるものの、工具全体にまだ凹凸が残っている。

これらの結果、約45m/minまでの低速領域では切りくずの付着のために工具先端付近の砥粒が作用しないこと、約150m/min以上の高速域では砥粒の摩耗が速くなるために穴あけ個数を延ばすことができなかったと考えられる。ところで、真実加工距離で考えると32000rpmの104回は、14000rpmの24回の約9.9倍で、80000rpmの24回の約1.7倍であることから切りくず排出性がいかに重要であるかがわかる。

3.7 欠け発生とスラスト力

穴が創成される過程は基本的には脆性破壊であり、出口部の欠けを避けることはできない。さらに欠け幅の進展は、主軸回転数、送りなどに大きく依存するが、かなり不規則である。この不規則性の原因と欠け発生の機構を考察するために、同一仕様でありながら、砥粒分布の異なる2個の工具AとBを用いて、32000rpmの主軸回転数で穴あけを途中で停止しながら、欠け幅の推移とスラスト力の変化を観察した。両工具の違いは、図12に示すように、工具先端(45°斜めから撮影している)で、工具先端は上端から少し下がったところになる)付近の砥粒分布において、B工具は、ダイヤモンド粒子の抜け落ちた跡が4ヶ

(a) 14000rpm (after 24th)

(b) 32000rpm (after 104th)

(c) 80000rpm (after 24th)

Fig.11 Tool failure patterns at various drilling speeds

Fig.12 SEM micrographs of tool A and B

Fig.13 Comparison of hole diameter and fracture size between tool A and B

所ほど観察されるなど A 工具よりわずかに粗である。

図 13 は、工作物表面からの工具移動量に対する穴の最大直径と穴を含む最大欠け直径の平均値を工具 A と B で比較している。送り停止は工具先端が 3.34mm の深さまで進んだ位置から始めた。5 回繰り返したが、この位置では穴は貫通しなかった。次に、3.36mm の位置で送りを停止した。工作物厚さより 0.04mm 内側に位置するにもかかわらず 35 回の実験すべてで穴が貫通した。工具先端の移動量をさらに大きくするに従い穴径は当然ながら大きくなるが、欠け幅そのものは減少する。両工具で穴径はほぼ同じであるが、欠け幅は工具 B で大きいことがわかる。

次に、工具 A の穴あけ回数に対するスラスト力の変化を図 14 に示す。測定値は、図 7 に示した I、II および III の結果である。穴あけ回数に伴う II と III の増加の程度は I の増加に比べて極めて小さい。このことが工具移動量に対して穴径や欠け幅の変化を小さくしたと考えられる。工具 B はどの部分でも工具 A より大きく、変動割合も大きかった。図 15 は、穴の貫通する前後の II と III の比を示したものである。工具 A は約 0.75 で、穴あけ回数に対しても一定である。工具 B は約 0.7 から次第に減少し、穴あけ回数 40 回では約 0.5 にまで低下している。すなわち、それだけ大きな欠けが発生したことを意味する。

工具によってスラスト力や欠け幅に差が現れた原因は、図 12 に示すように、電着砥粒の分布状態が異なる結果と考えられる。加工に関与する砥粒数が減少することは、研削加工における連続切れ刃間隔⁴⁾を大きくし、砥粒の最大切込み深さを大きくする。その結果、砥粒への抵抗が増大し、摩耗や脱落を促進する。この連続切れ刃間隔が 1 個の砥粒に作用する抵抗への重みは、加工速度や送り速度と同じである。ただし、主軸回転数や送り速度を変化させた実験では砥粒分布の極端に粗な工具は用いなかったため、工具によって傾向が変わることはないと考えられる。今後粒度や砥粒含有率の影響を検討し、ばらつきを小さくすることも考えなければならない。

Fig.14 Relation between the number of drilling and thrust force

Fig.15 Comparison of reducing ratio of thrust force III/II between tool A and B

4. 結 言

アルミナセラミックに欠けの小さな状態で小径穴あけ加工を行うために、ダイヤモンド電着工具の可能性を工具形状や加工条件から検討するとともに、欠け発生過程を考察した。

- (1) 先端を半球形状にし、切りくず排出のために軸と半球部に平面を設けた工具は欠けの小さな状態で加工できる。
- (2) 穴あけ固定サイクルの導入は、工具の進行に伴う抵抗の増大を抑制し、穴あけ回数を大幅に増大する。
- (3) 切りくずの付着がなく、粒子の損耗の激しくない工具周速 50~100 m/min（主軸回転数 16000~32000rpm）の範囲で長い回数使用できる。ただし、欠け幅の進展状態は一定でなく、ばらつきが存在する。送り速度を小さくし過ぎると穴あけ回数は減少する。
- (4) 工具先端が工作物出口側の面から約 40μm 内側に達したとき穴が貫通した。穴の周りには欠けが必ず存在し、その欠け直径は一般に工具直径より小さいので、その後の工具進行で徐々に残りの領域を削り取ることになる。しかし、この過程でまれに比較的大きな欠けが発生することがあり、これが最終的に大きな欠け幅として残る。
- (5) 穴があいた瞬間やその後の過程で欠けが発生したときスラスト力は大きく低下する。
- (6) 欠け幅やスラスト力は工具先端領域の砥粒の分布状態によって変動する。

参 考 文 献

- 1) 隈部淳一郎、神 雅彦、西尾彰文：重量振動切削によるセラミックスの精密穴加工、精密工学会誌、55、2（1989）366。
- 2) 生産技術実用化便覧、工業調査会（2000）1232。
- 3) 水戸工業：電着ダイヤモンドツールによるセラミックス加工の現状、機械と工具、7（2003）、61。
- 4) 例えば、臼井英治：切削・研削加工学下、共立出版（1971）25。