

超音波加工を利用したアルミナセラミックスへの小径穴加工

森田 陽亮^{*1)}

Small-Diameter Hole Machining in Alumina Ceramics

Using Ultrasonic Machining

MORITA Yosuke^{*1)}

硬脆材料であるアルミナは難削材として知られているが、優れた材料特性を有することから加工需要が増すことが想定される。そこで本研究ではアルミナへのねじ切り加工のための下穴を高精度に加工することを目的として、超音波加工を利用した小径穴加工を行い、加工穴の直径や工具に与える影響について調査した。

1. 緒言

アルミナ (Al_2O_3) はセラミックス材料の一種であり、 1000°C を超える高温環境でも使用可能であるという耐熱性、多くの酸やアルカリを含む薬品と反応しない化学的安定性、高い絶縁性および機械的強度といった優れた特性を持つため、電子部品や高温炉、半導体製造装置などの様々な製品で用いられている。しかしながら、アルミナは硬脆材料であるため割れやすく任意形状に加工するのが困難である。そこで硬脆材料の加工には超音波加工が利用されることがある。超音波加工では工具または被削材に超音波振動を付与し、断続的に衝撃力を加えながら加工することによって微小な脆性破壊を繰り返し、高能率な加工が実現できると言われている^{1) 2)}。

アルミナに対する加工需要の一つとしてねじ切り加工が挙げられ、高品質なねじ切り加工を行うためには下穴を高精度に加工する必要がある。マシニングセンタなどの回転工具で加工する場合は工具中心の回転速度が極めて遅くなることから、中実な工具で加工を行うとセラミックスの切屑が工具中心に滞留してしまい切削抵抗に悪影響を与えることがある。これを避けるために工具中心部を中空にしたコアドリルの使用が推奨されるが、小径穴加工においては工具を中空コア形状にすることが困難であり、工具の価格が上昇する傾向にある。そこで本研究では安価な小径中実形状の電着ダイヤモンド工具を使用し、超音波加工を行うことで高精度な小径穴加工を実現することを目指し実験を行った。加工後に X 線 CT を用いて穴径を測定した。

2. 実験方法

2.1 加工条件

本実験で使用する被削材として $\square 50\text{ mm}$ 、厚さ 5 mm の含有量 99.5% のアルミナを用意し、平面研削盤で平面度が

$10\text{ }\mu\text{m}$ 以内になるように前処理をした。加工実験は 5 軸マシニングセンタベースの超音波加工機 (DMG 森精機株式会社製, ULTRASONIC 20 linear) を用い、直径 2 mm 、深さ 4 mm の止まり穴加工を行った。加工には直径 1.2 mm の中実円筒形状の電着ダイヤモンド工具 (株式会社アイゼン製, IED-1.2) を使用し、ヘリカル加工を行った。工具に超音波振動を付与した時の振動振幅および周波数はレーザドップラ振動計 (ポリテックジャパン株式会社製, NLV-2500) を使用して無負荷状態で測定し、全振幅は約 $10\text{ }\mu\text{m-p}$ 、周波数は約 36500 Hz という結果を得た。用意した工具の端面および側面をマイクロスコープ (株式会社キーエンス製, VR-3200) を用いて観察した画像を図 1 に、加工条件を表 1 にそれぞれ示す。

同型式の工具を 4 本用意し、超音波加工および超音波振動を付与しない慣用加工でそれぞれ $N=2$ で加工実験を行った。また加工時の Z 軸のロード値を記録し、切削時の抵抗がどのように変化するかを確認した。さらに工具摩耗の様子を観察するため、5 穴加工するごとに工具の端面および側面の様子をマイクロスコープで観察した。実験は工具の折損や著しい摩耗または加工穴の異常が認められるまで続け、それぞれの工具で何穴目まで加工可能かを確認した。

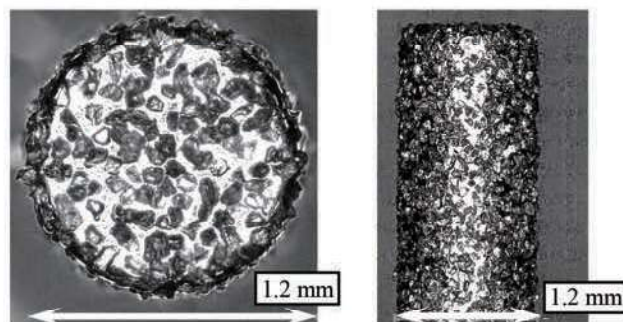


図 1 用意した工具の端面および側面の写真

^{*1)} デジタル技術支援科 (現: 機械・電気・情報グループ)

表 1 止まり穴加工の加工条件

主軸回転数	26500 min ⁻¹
送り速度	500 mm/min
ヘリカルピッチ	0.02 mm
工具突き出し量	13 mm
ダイヤモンド粒度	#200
切削油	水溶性
超音波振動振幅	10 μ m-p
超音波周波数	36500 Hz

2.2 X線CT測定

止まり穴加工を行った試料に対して、X線CT装置（株式会社リガク製、CTlab HX130）を用いて観察を行った。X線CT測定時の測定条件表2に示す。得られたCT像から加工した穴の直径値を測定した。

表 2 X線CT測定条件

管電圧	130 kV
管電流	61 μ A
ボクセルサイズ	8.9 μ m
測定時間	17 min

3. 結果

3.1 各工具の加工穴数の結果

表3に穴加工を行った各工具の加工穴数を示す。なお、超音波加工を行った工具をそれぞれ超音波加工1、超音波加工2と記載し、慣用加工を行った工具についても同様に記載している。また各工具の加工実験を終了した理由についても併せて記載した。ここで慣用加工2の穴径異常とは、加工穴径が目標値である2 mmから大きく乖離したことを意味している。この結果から、超音波加工を行った方が慣用加工と比べてより少ない加工穴数で折損や摩耗が発生する傾向にあることが分かった。

表 3 各工具の加工穴数と実験終了理由

超音波加工1	25穴目	工具摩耗
超音波加工2	14穴目	工具折損
慣用加工1	80穴目	工具折損
慣用加工2	70穴目	穴径異常

3.2 加工後の工具端面のマイクロ스코プ画像

図2に10穴目加工後の各工具端面のマイクロ스코プ画像を示す。この画像から、超音波加工を行った工具の端面では砥粒の目詰まりが確認できない一方で、慣用加工を行った工具ではアルミナが付着しており目詰まりしている様子が確認された。このことから超音波加工の方が端面の目詰まりを抑制できる傾向にあることが分かった。

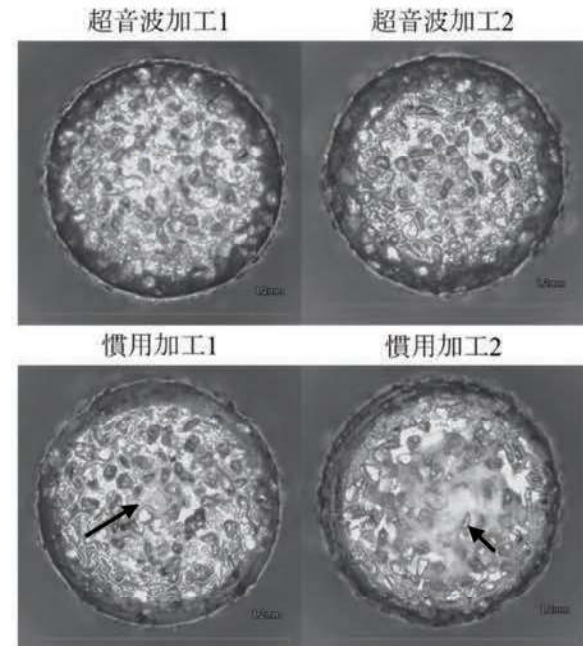


図 2 10穴目加工後の端面のマイクロ스코プ画像

3.3 加工時のZ軸ロード値の変化

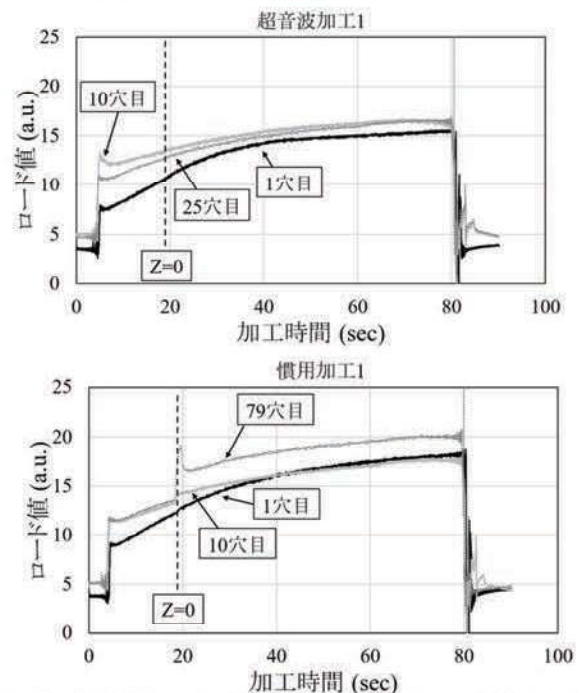


図 3 超音波加工1、慣用加工1のZ軸ロード値の変化

図3に超音波加工1、慣用加工1のZ軸ロード値の変化を示す。横軸は加工時間で、1穴あたりの加工開始から加工終了までの時間を示している。なお、アルミナ表面をZ=0としてヘリカル加工動作をZ=1からZ=4の間で行っており、図にZ=0と示した時点で工具とアルミナが接触している。また慣用加工1に関しては最終加工穴である80穴目の加工途中で工具が折損したことから、その前の79穴目の結果を示している。これを見ると、慣用加工1では加工

穴数が増えるにつれて工具がアルミナと接触した瞬間のロード値が大きく上昇する傾向にある一方で、超音波加工では加工穴数が増えてもロード値が大きく変化していないことが分かった。この傾向は超音波加工 2、慣用加工 2 でもそれぞれ同様であった。

3.4 各工具の加工穴径の変化

図 4 に X 線 CT 測定で得られた各工具での加工穴の直径を示す。これを見ると、いずれの工具においても加工穴数が増えるにつれて加工穴の直径が小さくなっていく傾向が見られる。しかしながら、20 穴加工時点での加工穴の直径が超音波加工 1 では 1.954 mm であるのに対して、慣用加工 1、2 ではそれぞれ 1.830 mm、1.870 mm となっており、超音波加工の方が慣用加工と比べて目標値からの誤差が小さくなる傾向にあることが分かった。

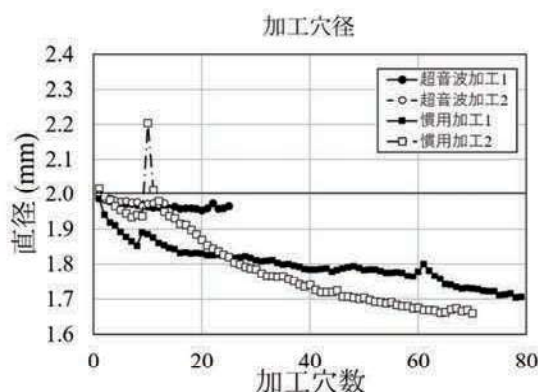


図 4 X 線 CT 測定で得られた各工具での加工穴の直径

4. 考察

図 4 から、加工穴数が増えるにつれて加工穴の直径が小さくなる結果が得られた。この原因は加工穴数が増えることで砥粒の摩耗や脱落、目詰まりが進行し切れ味が落ちることで加工抵抗が増加し、ヘリカル加工の際に工具が穴の中心方向に向かって倒れているためと考えられる。ダイヤモンド砥石の摩耗進行に伴い砥粒先端に摩耗平坦面が形成され、これが加工抵抗および消費エネルギーを増大させた結果、特に剛性の低い小径工具では工具倒れや寸法精度低下の主要因となることが知られている³⁾。

また超音波加工の方が慣用加工と比較して加工穴の直径の誤差が小さくなっているが、これは工具が超音波振動しながら加工することにより工具端面へのアルミナの付着や目詰まりが抑制され、加工抵抗の増加が抑えられたためと考えられる。この推測は図 2、図 3 の結果からも示唆されている。

一方、超音波加工の方が少ない加工穴数で工具の摩耗や折損が発生しており、工具寿命が短くなる結果となった。工具端面は超音波振動により常に瞬間的な衝撃負荷が作用

し続ける状態であり、このことが工具寿命に悪影響を及ぼした可能性が考えられる。

5. 結言

セラミックス材料であるアルミナを被削材として超音波加工、慣用加工で穴加工を行った。加工中のロード値の記録、加工後の工具端面のマイクロスコープ観察、X 線 CT を用いた加工穴の直径の測定を行い、結果を超音波加工と慣用加工で比較した。これにより以下のことが分かった。

- (1) 加工穴の直径は超音波加工、慣用加工のいずれにおいても加工穴数が増えるにつれて目標値より小さくなる傾向が見られた。ただし超音波加工より慣用加工の方がより少ない加工穴数で大きな誤差が発生した。
- (2) マイクロスコープ観察結果から超音波加工を行った方が工具端面の目詰まりが抑制される傾向にあることが確認できた。
- (3) 加工中のロード値の記録から超音波加工を行った方が工具とアルミナが接触した際のロード値の上昇が抑えられており、超音波加工により加工抵抗が低減している可能性が示唆された。
- (4) 工具寿命に関しては超音波加工を行った方が短くなる傾向が確認された。

謝辞

本研究の加工実験の実施にあたり使用した超音波加工機 ULTRASONIC 20 linear は、DMG 森精機株式会社と奈良県との包括協定の一環として締結された使用貸借契約に基づき、貸与されたものです。ご協力を賜りました DMG 森精機株式会社の森雅彦 代表取締役社長をはじめ、関係部署の皆様にご感謝の意を表します。

本研究で使用した X 線 CT 装置は公益財団法人 JKA の「機械振興補助事業」により導入、設置したものである。



参考文献

- 1) 島崎琢也, 久曾神煌, 磯部浩巳, 原圭祐, 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.45-46 (2008)
- 2) 片平智博, 島田慶太, 周天豊, 閻紀旺, 厨川常元, 砥粒加工学会誌, Vol.56, No.2, pp.108-111 (2012).
- 3) T W. Hwang, Christopher J. Evans, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.122, No.1, pp.32-41 (2000)