

超音波加工を行ったアルミナ加工品の X 線 CT 測定

森田 陽亮^{*1)}

X-ray Computed Tomography Measurement of Alumina Machined by Ultrasonic-Assisted 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、超音波加工を利用することで高能率に加工できることが知られている。そこで本研究では、アルミナに対して超音波加工を利用してディンプル形状および深穴形状を加工した。さらに加工後の試料に対して X 線 CT 測定を行い、非破壊で加工形状の評価を行った。

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℃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)}。

また、加工品の仕上がりを観察し評価する手段として、産業用の X 線 CT が採用されることがある。X 線 CT を用いることによって観察対象の内部を非破壊で観察できるため、内部欠陥の確認や深穴加工、ねじ切り加工の非破壊検査などに特に有用である。

そこで本報では、アルミナを被削材として超音波加工および超音波振動を付与しない慣用加工を行い、その加工品を X 線 CT で測定した結果について報告する。

着ダイヤモンド工具 (株式会社アイゼン製, IMD-1.0) を使用した。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 12 $\mu\text{m-p}$ 、周波数は約 35000 Hz という結果を得た。ディンプル形状の加工において、ボール形状の先端部分は回転速度が極めて遅く加工面が荒れるので避けるべきである一方で、超音波振動は工具軸方向に付与されることから加工面に対して工具の傾斜角度を大きくすると超音波振動による振幅の加工面法線方向成分は小さくなってしまう³⁾。そこで加工時の傾斜角度が約 30°になるように CAM で加工パスを作成し、ディンプル形状を加工した。ディンプル形状の狙い値は直径 1.8 mm、深さ 0.25 mm とした。ディンプル形状の詳細な加工条件を表 1 左に示す。

深穴形状の加工では被削材を 5 mm 角断面の角柱に切り出し、その側面部分に貫通穴および深さ約 4 mm の止まり穴を加工した。工具は $\phi 1$ mm のダイヤコートドリル (ユニオンツール株式会社製, UDCMX 2100-100) を使用した。工具に超音波振動を付与した時の振幅および周波数を同様に測定し、全振幅は約 7 $\mu\text{m-p}$ 、周波数は約 35400 Hz という結果を得た。深穴形状の詳細な加工条件を表 1 右に示す。

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 50 mm 角、厚さ 5 mm の市販品のアルミナを用意し、平面研削盤で平面度が 10 μm 以内になるように前処理をした。加工実験は 5 軸マシン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、ディンプル形状および深穴形状の加工を行った。

ディンプル形状の加工では半径 1 mm のボール形状の電

表 1 ディンプル形状と深穴形状の加工条件

ディンプル加工条件		深穴加工条件	
使用工具	R1 ボール型電着ダイヤモンド	使用工具	$\phi 1$ ダイヤコートドリル
主軸回転数	12000 min^{-1}	主軸回転数	5000 min^{-1}
送り速度	600 mm/min	送り速度	7.5 mm/min
軸方向切込量	0.04 mm	ステップ	0.05 mm
径方向切込量	0.05 mm	-	-
切削油	水溶性	切削油	水溶性
超音波振動振幅	12 $\mu\text{m-p}$	超音波振動振幅	7 $\mu\text{m-p}$
超音波周波数	35000 Hz	超音波周波数	35400 Hz

^{*1)} デジタル技術支援科

2.2 X 線 CT 測定

ディンプル加工および深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 測定時の模式図を図 1 に、測定条件を表 2 に示す。

X 線管から照射された X 線は試料の厚みや密度によって減衰し、透過した X 線が検出器に到達して透過像が得られる。この状態で試料を 360° 回転し、撮影したすべての透過像を基に再構成することによって 3 次元の CT 像が得られる。X 線管から検出器までの距離（Source to Detector Distance, SDD）と X 線管から試料までの距離（Source to Object Distance, SOD）の比によって拡大率が決定し、SOD を小さくすると高分解能な像が得られる。逆に SOD を大きくすると試料の全体像を観察することができる。実際の操作では視野サイズ（Field of View, FOV）を指示することで分解能を決定する。分解能はボクセルと呼ばれる体積要素の最小単位を表す立方体の 1 辺の長さで表現される。ボクセルは 2 次元画像におけるピクセルを 3 次元に拡張したものである。

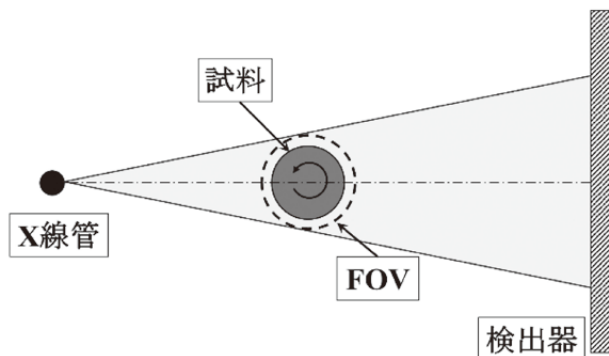


図 1 X 線 CT 測定時の上面からの模式図

表 2 X 線 CT 測定条件

管電圧	110 kV
管電流	36 μ A
ボクセルサイズ	7.2 μ m
測定時間	10 min

3. 結果と考察

3.1 ディンプル加工の X 線 CT 測定結果

図 2 にディンプル加工を行った試料の X 線 CT 測定結果を示す。X 線 CT 測定により加工した形状が高分解能で観察できていることがわかる。ディンプル部分を拡大すると、加工面に同心円状の加工痕がついていることがわかる。この加工痕は超音波加工・慣用加工いずれの試料でも観察されたことから、CAM によって作成した加工パスに原因があると考えられる。

得られた X 線 CT 画像は、CT 画像用の解析ソフトである VG STUDIO MAX（VOLUME GRAPHICS 社製、以下 VG

と表記する）を用いて解析し、加工後のディンプル形状の半径と深さを測定した。測定結果を表 3 に示す。表 3 から、超音波加工・慣用加工のいずれにおいても形成されたディンプル形状は設計値よりやや大きく、また超音波加工を行った方が慣用加工よりもやや大きな形状になっていることがわかる。

この X 線 CT 測定結果から得られた直径および深さの値の妥当性を確認するため、共焦点顕微鏡（レーザーテック株式会社製、OPTELCIS H1200）を用いて加工したディンプル形状の断面プロファイルを確認した。図 3、図 4 にそれぞれ超音波加工、慣用加工によって形成されたディンプル形状の断面プロファイルを示す。図 3、図 4 から求められる各ディンプルの直径と深さは、表 3 に示した X 線 CT 測定により求めた結果とよく一致する。このことから、X 線 CT 測定を用いたディンプル形状の寸法評価の妥当性が確認された。

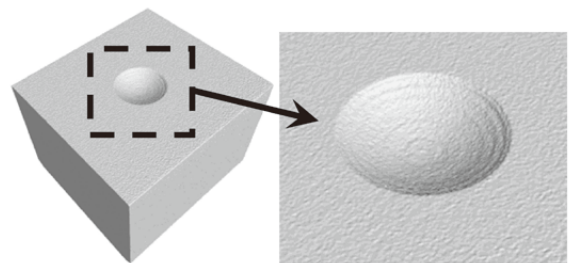


図 2 加工したディンプル形状の X 線 CT 測定結果

表 3 VG を用いて測定したディンプル形状の半径と深さ

	直径[mm]	深さ[mm]		直径[mm]	深さ[mm]
超音波加工 1	1.91	0.28	慣用加工 1	1.90	0.28
超音波加工 2	1.96	0.29	慣用加工 2	1.91	0.28
超音波加工 3	1.96	0.29	慣用加工 3	1.92	0.28
平均	1.94	0.29	平均	1.91	0.28

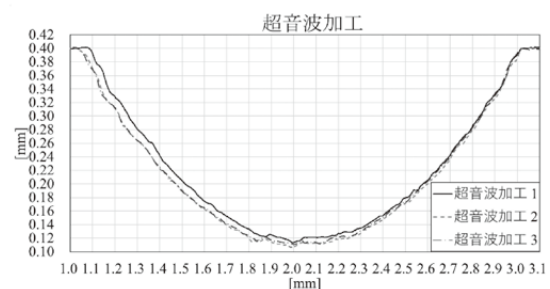


図 3 超音波加工したディンプルの断面プロファイル

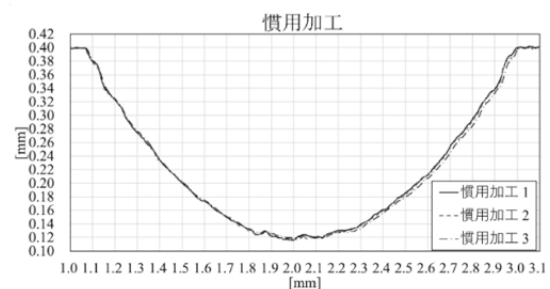


図 4 慣用加工したディンプルの断面プロファイル

3.2 深穴加工の X 線 CT 測定結果

図 5 に超音波加工，慣用加工でそれぞれ深穴加工を行った試料の X 線 CT 測定結果を示す．また加工した深穴の中心軸を通る断面を図 5 中の A 方向，B 方向から見た断面図をそれぞれ図 6，図 7 に示す．これらの図を見ると止まり穴についてはいずれの加工においても亀裂などは確認されず，問題なく加工ができていることがわかる．一方で貫通穴については図 7 に矢印で示したドリルの出口側において割れが発生していることが確認できる．さらに超音波加工と慣用加工を比較すると，超音波加工を行った方が出口側における割れがより大きくなっている．これは，加工中の超音波振動により被削材のチッピングが促進されたためと考えられる．図 7 の超音波加工における 2 個の貫通穴および慣用加工における右側の貫通穴に対して VG を用いた解析を行い，出口付近の割れにより欠落した部分の体積を計算した結果，超音波加工に対してはそれぞれ 1.52 mm^3 ， 1.45 mm^3 であり，慣用加工に対しては 0.68 mm^3 であった．

また VG の解析により深穴内部の円筒面の評価を行った．VG では円筒面上の任意の点を用いて最小二乗法で算出した仮想円筒を測定面に対してフィッティングし，さらにその仮想円筒と実際の測定面との偏差を出力できる．そのため偏差の最大値と最小値の差から円筒度を算出することができる．この手順で加工した深穴に対して円筒度を算出しその平均値を求めた結果，超音波加工，慣用加工いずれにおいても $20.0 \mu\text{m}$ であった．

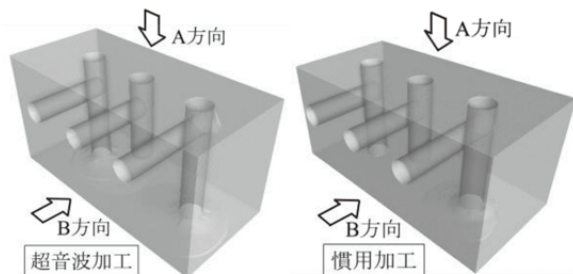


図 5 深穴加工を行った試料の X 線 CT 測定結果

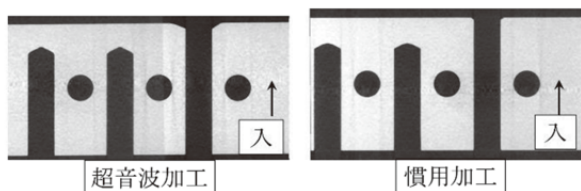


図 6 A 方向から見た深穴加工の断面図

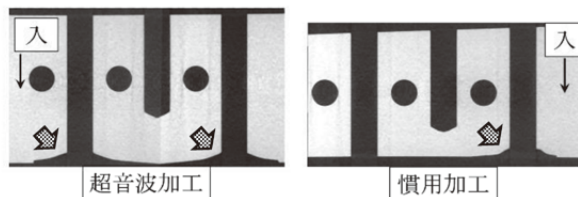


図 7 B 方向から見た深穴加工の断面図

4. 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，慣用加工でディンプル形状および深穴形状の加工を行った．加工後の試料に対して X 線 CT 測定を行い，加工によって形成された形状を評価し，超音波加工と慣用加工と比較した．その主な結果は，次のとおりである．

- (1) 加工したディンプル形状を X 線 CT 測定すると超音波加工，慣用加工のいずれにおいても同心円状の加工痕が観察された．またディンプル形状の直径および深さを測定するといずれも設計値よりやや大きく，さらに超音波加工の方が慣用加工より大きな値となった．
- (2) X 線 CT 測定によって得られたディンプル形状の直径および深さの値は共焦点顕微鏡によって得られた断面プロファイルから求めた値とよく一致した．
- (3) 加工した深穴形状を X 線 CT 測定すると非破壊で止まり穴の亀裂の有無が確認できた．また貫通穴に対してはドリルの出口側で割れが発生している様子が確認できた．さらに VG を用いた解析で割れにより欠落した部分の体積を計算すると，超音波加工のほうが慣用加工より出口側の割れは大きいことが確認された．
- (4) 加工した深穴形状の内面の円筒部分に対して円筒度の評価を行うと，その平均値は超音波加工，慣用加工いずれにおいても $20.0 \mu\text{m}$ で同等だった．なお分解能に相当するボクセルサイズが $7.2 \mu\text{m}$ であることから今回の測定値が検出限界に近いことに注意する必要がある．

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，磯部浩己，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) 森田陽亮，奈良県産業振興総合センター研究報告，No.49，pp.1-4 (2023)．