



N. Sugita

## 本焼成ジルコニアセラミックスの 熱援用レーザー・切削加工

杉田 直彦\*

### 1. はじめに

ジルコニウムの酸化物であるジルコニアは、その機械的・電気特性から様々な応用が期待されている(図1, 表1)。例えば、生体適合性、耐摩耗性、化学安定性に優れていることから、歯科補綴物や人工大腿骨骨頭用材料として用いられている。また、酸素濃度センサや固体酸化物形燃料電池の電解質にも用いられているほか、近年はイオン伝導性から情報機器などへの応用も期待されている。ジルコニアは温度や水分に敏感な材料であり、1700℃以下で単斜晶、2370℃以下で正方晶、それ以上では立方晶とその結晶構造を変化させる。そのため、少量のイットリアを添加して安定化させた材料が一般に用いられる。

前記のように、この材料は高強度・高破壊靱性、熱的特性、化学安定性、イオン伝導性に特徴をもつユニークな材料である。しかしながら、その硬度・強度から非常に加工が難しい材料でもある。そのため、形状創成は焼結前の成形加工と焼結後の仕上げ加工が行われるのが通常である。仮焼結体は、黒板への書き込みに使用されるチョークのような質感であり、切削加工により所望の形状へ加工する。続く焼結においてバインダが蒸発

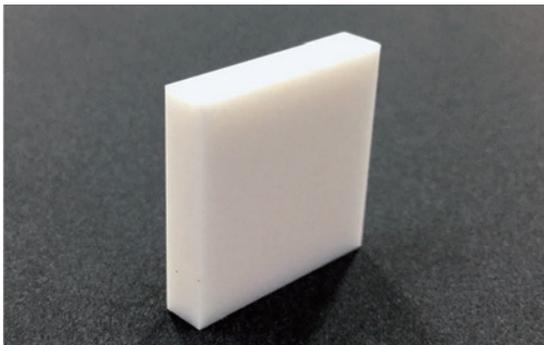


図1. イットリア添加正方晶ジルコニア (日本タングステン, NPZ-10)

表1. イットリア添加正方晶ジルコニアの特性 (日本タングステン, NPZ-10[1])

Density (g/cm <sup>3</sup> )	6.0
Hardness HV	1200
Hardness HRA	91.0
抗折力 (MPa)	1500
Young's ratio (GPa)	190
熱膨張率(×10 <sup>-6</sup> /K)	10.5
熱伝導率(W/m・K)	3
電気抵抗率(Ω・m)	>10 <sup>12</sup>
熱衝撃抵抗 ΔT(K)	300

\*東京大学大学院工学系研究科 教授

して体積が約25%収縮するため、研削や研磨などの加工により目標の形状へと仕上げる。このように、目的の形状を得るためには多く工程を経る必要がある現状から、筆者らは、最終焼結体に対する直接加工を試みている。本稿では、その成果の一端を紹介する。

### 2. 歯科材料としてのジルコニアと直接加工

ジルコニアをはじめとするセラミック製焼結体の歯科補綴物は、強度や寿命などの物性面や人体への安全性で優位性がある。現在は、ジルコニア粉末を仮焼き(充真率70%程度)したものを切削して歯科補綴物の形状にし(図2)、その後高温(1350℃程度)で焼成する方法が一般的である。最近では、焼結したジルコニア・ブロックに対して超音波を付与した工具による切削加工も行われている。製造における工程削減や短時間化を考慮すると、焼結したセラミックスに対する直接加工を実現することで、歯科医院や技工所のその場で歯冠を製造することが可能となる。つまり、歯を治療しているその場で補綴物を加工し、その日のうちに治療を完了することが期待される。

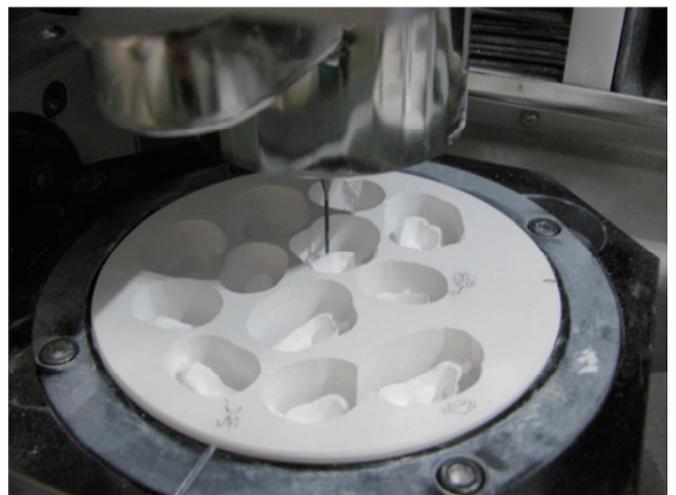


図2 仮焼ジルコニア切削の様子 ((株) ジーシー提供)

前述のように、ジルコニアは温度に敏感な材料であり、機械特性の温度依存性は図3のような。この測定結果から、この材料は、温度の上昇にしたがって、曲げ強さを減ずるとともに破壊靱性値も減ずる特徴を持つことが分かる。破壊靱性が低下することにより加工しやすくなる一方、脆性的な挙動も示すため、加工に適した温度が存在することが予測される。そこで

筆者らは、熱を利用した切削による精密加工を試みている。具体的には、高切削速度・高送り速度による切削温度の上昇を利用した高速ミーリングと、レーザによる局所加熱と切削との複合加工である(図4)。

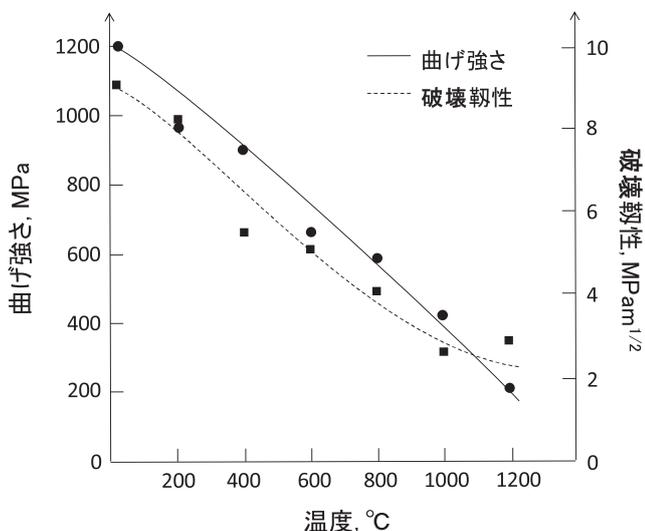


図3. イットリア添加正方晶ジルコニアの温度依存特性

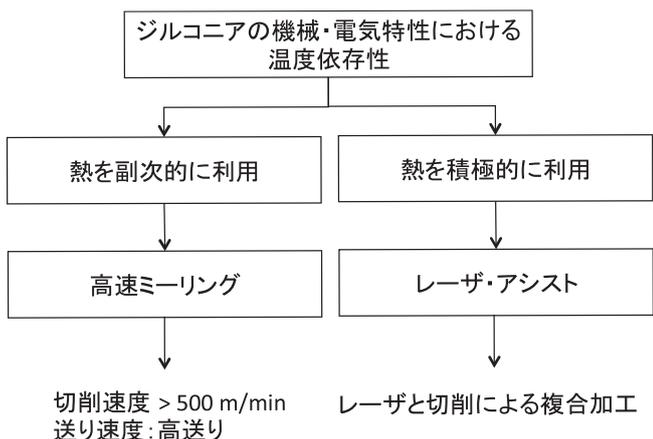


図4. ジルコニアの温度依存性を利用した加工戦略

### 3. 高速ミーリングによるジルコニア焼結体の直接加工

高速ミーリングの有効性を評価することを目的とし、切削速度を変化させ加工実験を行った。高切削速度を実現するために最大回転数 150,000 rpm のエアタービンスピンドル(ナカニシ株式会社, HTS1501S-HSKE32)を使用し、低切削速度における加工実験には最大回転数 10,000 rpm の電動スピンドル(NSK株式会社, PSA50-135N)を使用した。150,000 rpm のスピンドルを用いた実験装置の概観を図5に示す。工具は送り方向へ45°傾斜させた。被削材には20 mm×20 mm×4 mmの寸法を有するイットリア添加正方晶ジルコニア(Y-TZP)(日本タングステン株式会社, NPZ-10)、切削工具には径2 mm、TiAlNコーティングの2枚刃超硬ボールエンドミル(三菱マテリアル株式会社, MS2SBR0100S04)を使用した。切込み0.1 mm、長さ20

mmの溝加工を行った。条件を変えた際に一刃当たりの切り取り厚さを一定に保つために各条件において異なる送り速度で実験を行った。加工後の溝の表面粗さはレーザ顕微鏡(キーンズ株式会社, VK-9510)で3次元形状を取得し測定した。

加工結果を図6に示す。切削速度が上昇することによってY-TZPが脆性的に加工され、良好な加工面が得られた。この結果は高切削速度においてY-TZPの強化機構が抑制され、破壊靱性値が低下したことを示している。高切削速度における切削抵抗の減少も強化機構の消失に伴う破壊靱性値の低下によって説明できる。つまり高速ミーリングによる切削温度の上昇により脆性的な精密加工が可能となることを示している。また、低切削速度においては機械的な摩耗が支配的になることが知られており、切削速度11 m/minにおける大規模な摩耗は切削温度が低く被削材の硬度が低下せず機械的な摩耗が大きく促進したと考えられる。

以上のように、高切削速度・高送り速度において良好な加工面を得ることが可能であった。今後は最適な加工条件の検討を行う。

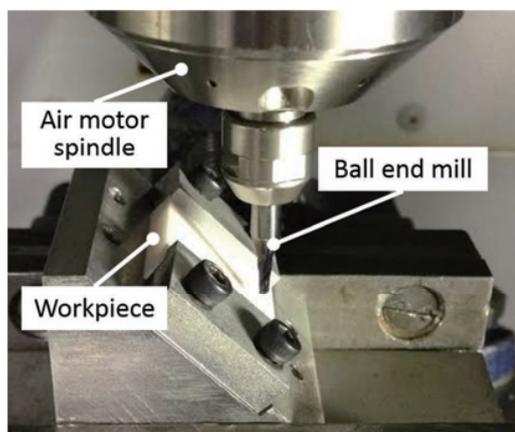
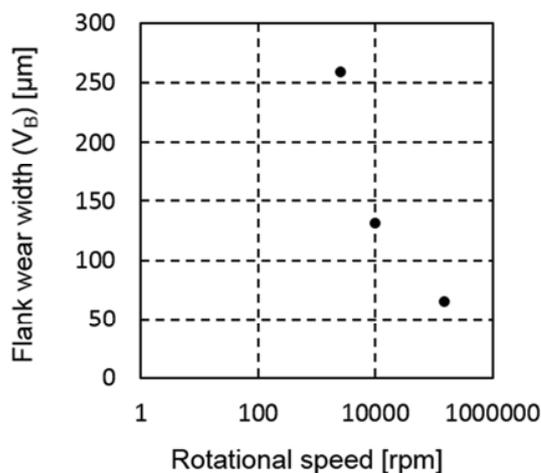
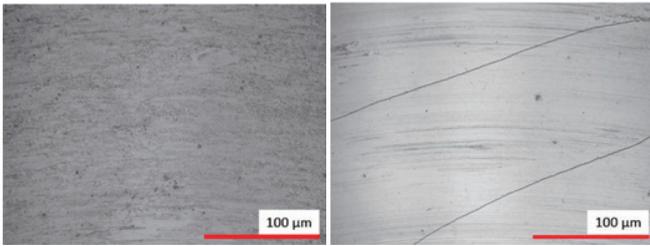


図5. ジルコニアの高速ミーリング



(a) 工具磨耗における切削速度の影響



(b) 仕上げ面における送り速度の影響 (左 200 mm/min, 右 500 mm/min)

図 6. 高速ミーリングによる加工特性

## 4. レーザ・アシストによるジルコニア焼結体の熱援用加工

### 4.1 UV レーザ援用加工法

熱源としてレーザを用い、レーザ加工と同時に切削加工を行うレーザ援用切削加工を提案している(図7)。このプロセスでは、レーザ加工系と切削加工系の加工現象や加工条件が複雑になる。レーザ援用加工は、レーザ光が切削工具に先行し、局所加熱とアブレーションによる一部加工を行う。温度が上昇している残領域を切削工具にて仕上げるため、レーザと工具の距離や、レーザによる熱影響層の予測などを数値解析などの検討が必要となる。

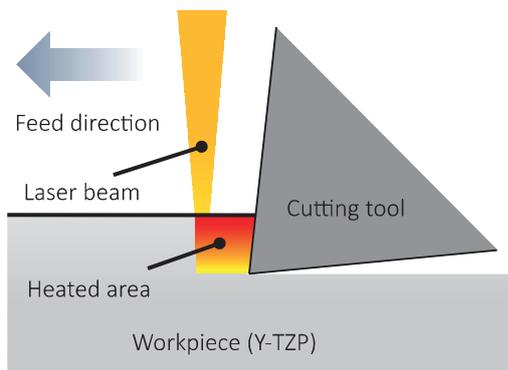


図 7. レーザ援用切削加工

UV レーザを用いた実験系 (UV-LAM) を図 8 に示す。UV レーザビームは、発振器 (AVIA-3000, Coherent, Inc.) によって生成され、光学系を通して工作物上に照射される。カメラが実装されており、工作物上の状態がモニタリングできるようになっている。工作物は、Y-TZP ブロック (日本タングステン, NPZ-10) であり、動力計 (9601A, Kistler Instrumente AG) 上に固定されている。工作物の寸法は、20×20×4 mm である。2種類の工具が用意され、一つは、ノーズ半径が 0.2 mm の CBN 工具である。もう一つは、ノーズ半径 0.03 mm の TiC コーティングされた工具である。工作物と動力計は、XY ステージ上に固定され、工具は、Z ステージ上に固定される。

この実験の目的は、UV-LAM の Y-TZP に対する有効性を評価することであり、従来方法と比較する。工具とレーザの距離は、シミュレーション結果から 20 μm とした。

溝加工が行われた後、表面におけるクラック状態、表面粗さ、溝形状を測定した。また、断面を SEM で観察し、内部方向へ

のクラック進展を観察した。動力計によって 500 Hz のサンプリング周波数で加工中の切削抵抗を測定し、比切削抵抗を計算した。切削領域は、図 9 に示される。また、領域の面積は、式(1)で表される。

$$A = \frac{\alpha \pi R^2}{2\pi} - \frac{R^2}{2} \sin \alpha \quad (1)$$

ここで、 $A$  は切削面積であり、 $\alpha$  は  $\alpha = 2 \cos^{-1} \left[ \frac{(R-d)}{R} \right]$  で表される値である。 $R$  はノーズ半径であり、 $d$  は加工深さである。比切削抵抗は、式(2)を用いて計算される。

$$f = \frac{F}{A} \quad (2)$$

ここで、 $f$  は比切削抵抗であり、 $F$  は主分力である。

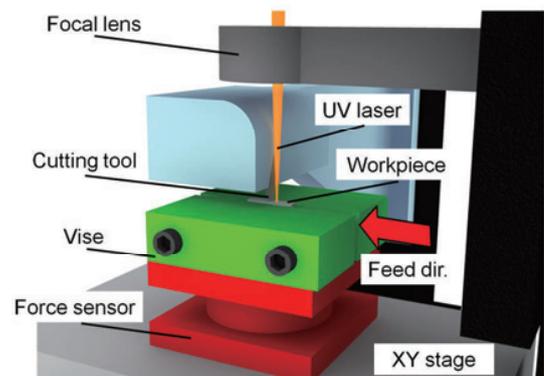


図 8. UV レーザ援用切削加工の実験系

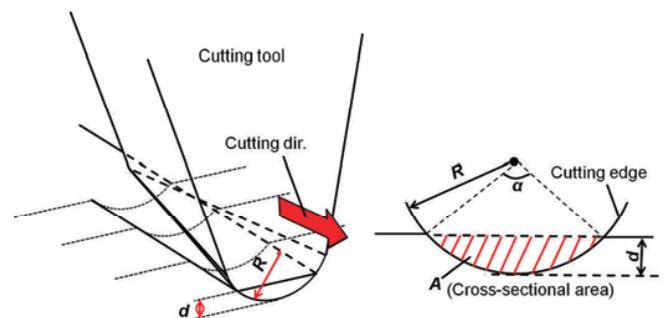


図 9. 加工断面図

### 4.2 加工表面

図 10 に、加工後のクラック数を従来手法と UV-LAM で比較した結果を示す。また、図 11 に加工後の工作物表面を示す。大規模クラックは、100 μm の溝幅に対して半分以上の長さを持つものと定義した。この実験では、送り速度を 300 mm/min とし、大規模クラックの数をカウントした。加工後の表面からも明らかに、UV-LAM の適用により、クラックの発生が抑制されることが分かる。

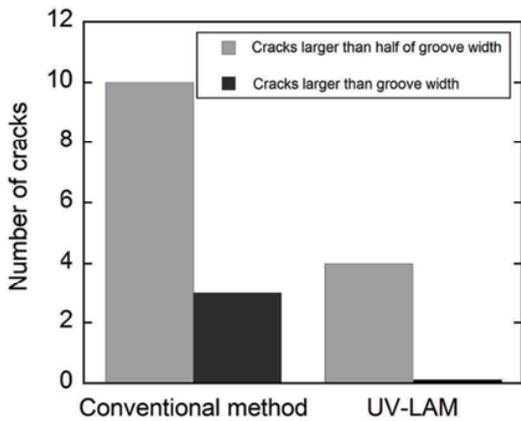


図 10. 大規模クラックの数

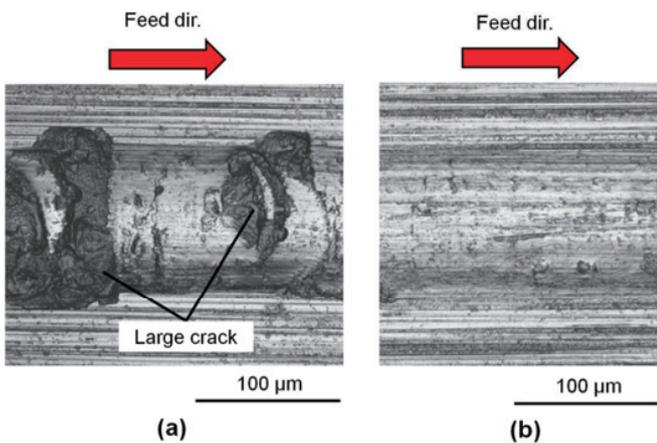


図 11. 加工溝性状 (a) 従来加工 (b) UV-LAM.

図 12 は、加工後に測定した溝部の表面粗さを示す。200  $\mu\text{m}$  の長さで粗さの変動を測定し、大規模クラックの存在しない部分を選択した。その結果、予想に反して、従来手法の方が良好な表面粗さであった。図 13 は、断面の SEM 写真である。UV-LAM の加工後には、溝の底面に微小クラックが見られ、表面粗さに影響していると考えられる。

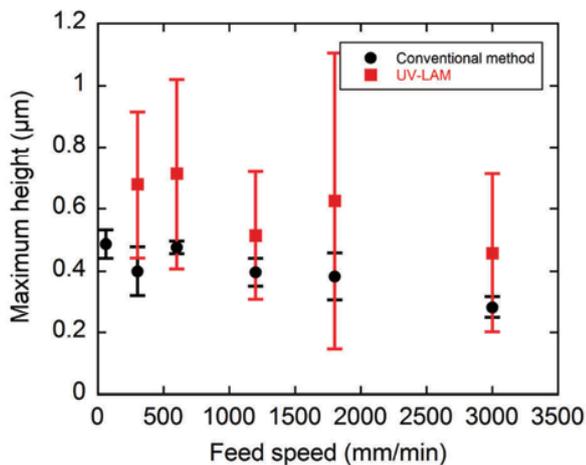


図 12. 溝部の表面粗さ

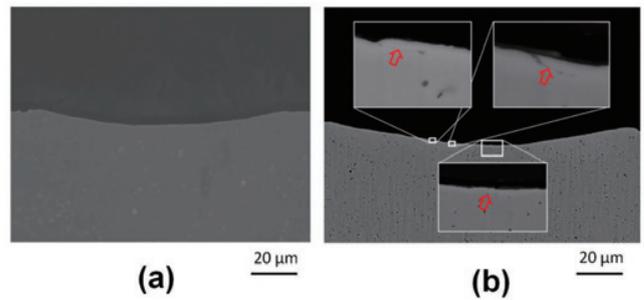


図 13. 断面 SEM 写真 (a) 従来加工法 (b) UV-LAM.

### 4.3 比切削抵抗

ノーズ半径 0.03 mm の工具、送り速度 300 mm/min の実験条件で加工を行った場合の比切削抵抗を図 14 に示す。UV-LAM を用いることにより、比切削抵抗が約 35% 低減されている。この結果から、UV-LAM により加工能率を向上させることが可能となること分かる。

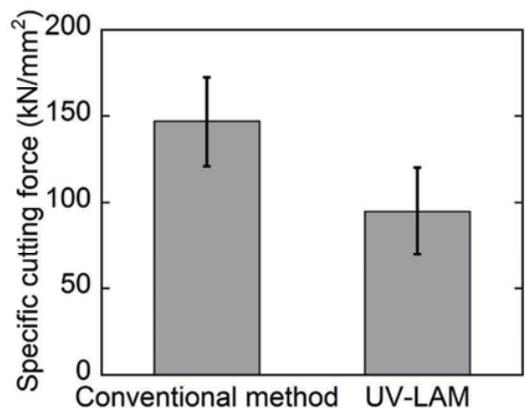


図 14. 比切削抵抗

### 4.4 考察

溝加工後の工作物表面を観察した結果から、UV-LAM を用いることで大規模クラックの発生を抑制することが可能であった。しかしながら、断面の顕微鏡観察により、溝部底面に多くのマイクロ・クラックが観察され、表面粗さを劣化させていることも分かった。工具とレーザは、20  $\mu\text{m}$  の距離をもって設置され、レーザの熱により、工具刃先周辺の温度は約 600  $^{\circ}\text{C}$  となる。Y-TZP は、高温下においてその破壊靱性を減じ、マイクロ・クラックも生成される。工具によって、そのマイクロ・クラックが取り除かれる必要があるが、残存した場合、表面粗さを劣化させる要因となっていると考えられる。比切削抵抗は UV-LAM によって、約 35% 減じた。これは、レーザの加熱によって工作物の被削性が向上したからと考えられる。より高精度な加工を目指すためには、熱影響領域に合った形状の工具を用意する必要がある。また、図 12 に示したように、UV-LAM ではチップングが観察されなかった。このように、被削性の向上により、工具寿命の延長も期待される。

## 5. おわりに

ジルコニアは、さまざまな分野で注目されている材料であり、複雑な形状が容易に加工可能にすることで新たな産業基盤が期待される。医療・歯科分野の加工は複雑形状や難削材加工が多く、複合加工機および小型多軸制御工作機械の需要が高まっており、新しい加工プロセスと次世代工作機械の組み合わせは市場的・社会的に魅力的な分野である。

## References (see Instructions to Authors)

[1]

[http://www.nittan.co.jp/products/ceramicsmaterial\\_002\\_004.html](http://www.nittan.co.jp/products/ceramicsmaterial_002_004.html)