

硬脆材料精密加工のための UV レーザ・切削多軸複合加工システム

東京大学 大学院工学系研究科機械工学専攻

准教授 杉田 直彦

(平成 22 年度一般研究開発助成 AF-2010207)

キーワード: 部分安定化ジルコニア, 超精密加工, レーザ援用

1. 研究の目的と背景

イットリア安定化正方晶ジルコニア多結晶体 (Y-TZP) はアルミナ, 窒化シリコンと並びエンジニアリングセラミックスと称されている. エンジニアリングセラミックスは被削性が著しく低く, 難削材の頂点に君臨している. ZrO_2 及び添加剤である 3 %mol の Y_2O_3 から構成されており, 結晶粒径は 100 nm 程度である. Y-TZP は高硬度(1200 HV), 高靱性(8 MPa \cdot m^{1/2})を有しており, 特に靱性は他のセラミックスと比較し高い値を有している. また純粋な ZrO_2 は温度上昇に伴い大きく体積が変化し, 破損することが知られている. 添加剤としてのイットリアはこの体積変化を抑制し安定化するために加えられている.

1975 年に Y-TZP の変態強化機構が発見され, 脆性を克服した材料として, 研究・応用が進められた. 特にアルミナとの複合材料であるジルコニア強化アルミナセラミックス(TZP- Al_2O_3)はその優れた耐摩耗性と高靱性からこれまでセラミックス材料の適用が困難とされていたディーゼルエンジンの主材料として期待されるまでに至った. さらにその耐摩耗性, 化学的安定性, 生体親和性, 及び高強度から生体材料として近年注目されており, 特に人工義歯, 人工股関節用材料としての期待が高まっている[1].

一方でその高硬度, 高靱性という機械的特性から, Y-TZP は加工が困難な材料(難削材)として知られている. 難削材として Inconel 718 などの超耐熱合金(被削性指数 8)またはチタン合金(被削性指数 26)が広く知られているが, Y-TZP はそれらよりも被削性指数が低く, 最も加工が難しい材料のひとつといえる. そのため加工中に欠け, 割れが生じやすい.

一方, 現在の Y-TZP に対する一般的な加工法は大別して, 焼結前の加工及び焼結後の加工に分類できる. 前者では半焼結状態の Y-TZP を工作機械で目標形状に加工した後, 完全に焼結する. ただし, 焼結時に 25%程度の体積収縮が生じるため, 予めこの収縮を考慮して, マシニングセンタでの加工を行う必要がある. また後者では, 体積収縮を考慮せずに加工を行うこと

が可能であるが, その高強度故, 加工法はダイヤモンド工具を用いた研削, 研磨に限定される. 研削, 研磨は加工能率が切削加工と比較して著しく低い. またダイヤモンド工具は加工中に砥粒欠損や脱落を生じ工具寿命を迎える. そのため高い加工コストが問題とされており, 材料の加工コストを抑える試みは様々なされている.

従来より Y-TZP の被削性向上を目的とした研削・研磨に関する研究は多く行われてきた[2]. 一方, 切削加工を考えた場合, 研削よりも高い加工能率及び切刃軌跡の制御性を有するため, 任意の 3 次元形状の作成にもっとも適した加工法と考えられる. 近年, ジルコニア系セラミックスに対する切削加工法として熱援用切削加工法 (Thermally-assisted Machining, TAM) が提案され研究が進められている[3]. 熱援用切削加工法とは被削材になんらかの手段を用いて熱を加え, 温度が上昇し軟化した部位を工具により除去するという加工法である. 加熱による熱影響の被削材中への残留が問題とされるが, 適切な加工パラメータを選択することにより被削性を大幅に向上することが可能である. ただし微細加工を目的とした熱援用切削加工に関する研究は少数に留まっており, 今後の進展が期待される.

本研究では, 難削材である Y-TZP に対して, 精密切削加工を実現することを目的とする. 具体的には Y-TZP の被削性を向上させるため, 被削材加熱をしながら加工を行う TAM を提案する. 将来 3 次元自由形状の創成に適用されることを想定し, 旋削加工(Lathe), フライス加工(Milling), ドリル加工(Drilling)の 3 種の加工法に対応する熱援用切削加工法をそれぞれ提案する.

2. 部分安定化ジルコニアの温度特性

本研究では, Y-TZP の温度依存性が大きなことに着目し, この特性を利用することで新たな加工方法が提案できると考えた. それに先立って, 本実験を通して使用する Y-TZP の温度依存性を確認するため機械的強度の温度依存性評価試験を行った. 物質の高温特性は一般的に

データが少ない。またセラミックスのように製造工程や添加物の分量によって大きく性質が変わるものは、加工結果と強度の関係性を評価する場合、個々にデータを出しておく必要がある。さらに、本実験で対象とする Y-TZP が非常に温度への依存性が高いことは前章で述べたとおりである。したがって、高温における曲げ強さと破壊靱性値を測定した。

供試材はジルコニア系セラミックス NPZ-10(日本タンゲステン)を使用した。供試材の形状は曲げ強さでは JISR1604 ファインセラミックスの高温曲げ強さ試験方法にのっとり。また、破壊靱性値は高温の破壊靱性値の測定方法が JIS に定められていないため、高温でのファインセラミックスの高温破壊靱性値測定方法として開発された SEVNB 法にのっとり形状とした。Fig. 1 は曲げ強さ試験片の写真である。破壊靱性値の測定では、この形状に V ノッチ加工を施した。

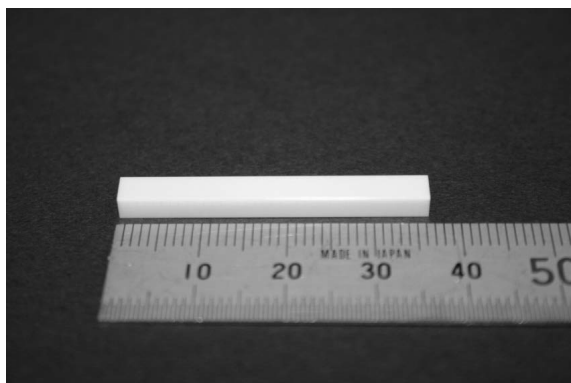


Fig.1 Sample specimen for bending strength measurement

Fig.2 に示すように、曲げ強さは常温において 1200 MPa 程度だが、1200 °Cにおいて 200 MPa 程度に減少した。破壊靱性値は常温で 9 MPa·m^{1/2} 程度だが、1200°Cでは 3 MPa·m^{1/2} に減少した。靱性値の急低下は、高温環境下における相変態による変態強化機構の消失を示している。また、破壊靱性値が 1200 °Cで上昇しているが、これは 1200°C付近から粒成長するためである。

曲げ強度では、1200 °Cの試験において試験片がクリープ変形となった。そのためグラフでの数値は破壊時の最大荷重ではなく、クリープ変形中の最大荷重を記している。よって、厳密には本来の曲げ強さではない。これは、1200 °Cという高温域に入って、PSZ によく見られる特性である、超塑性の一端が出始めたためである。

以上から、Y-TZP は高温に加熱することにより曲げ強さ及び破壊靱性値が低下することが示された。特に常温では他の高強度セラミックスより高い破壊靱性値を有するが 1200 °C程度まで昇温することにより常温時の 1/4 以

下に低下することが示された。本結果から、高温時に Y-TZP の被削性が向上することが示唆された。

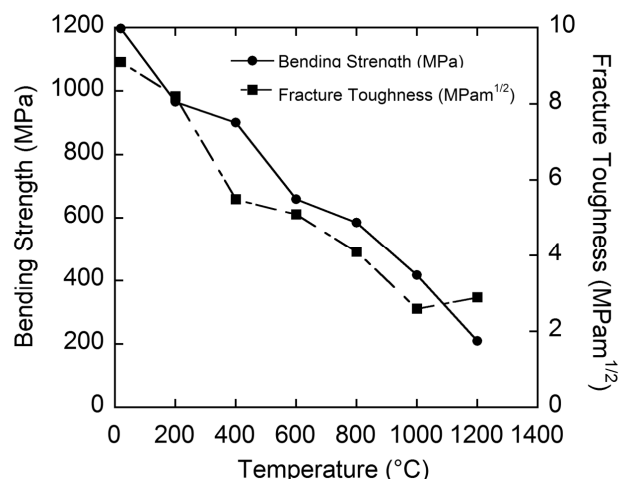


Fig. 2 Bending strength and fracture toughness under various temperatures

3. 紫外線レーザー援用精密切削加工法の提案

前述のように、常温においては、難削性が非常に高いが昇温することにより被削性が向上し、切削加工が可能となると考えた。被削材が昇温することにより、切削抵抗に関しては横弾性係数の低下、表面性状に関しては切削モードが延性モードに近づくことによるクラック抑制及び表面粗さ向上、工具寿命に関しては被削材の硬度低下に伴う工具摩耗・欠損の抑制及び寿命延長が期待される。そこで被削材を除去部のみを局所的に加熱しながら加工する、

Fig.3 に UV-LAM の概念図を示す。UV レーザは集光レンズを通過し、工具切れ刃から距離 d 離れた場所に照射される。この工具先端・レーザスポット間距離 d は加工温度を決定する重要なパラメータであり、本研究では d を決定するために被削材中温度分布シミュレーションを実施した。直径約 10 μm に収束されたレーザが被削材を局所的に加熱する。昇温し被削性が向上した部位を切削工具で除去する。

UV-LAM ではレーザスポットを工具の送り方向に常時配置する必要がある。そのため工具の軌跡制御とは別にレーザスポット位置を制御する機構が必要となる。また旋削及びフライス加工においてはレーザスポットを工具送り方向に配置することが可能であるが、ドリル加工においては困難である。これは加工中にドリル先端部が穴中に隠れるためである。UV-LAM のドリル加工へ適用するための設計解として、ドリル中心部、軸方向に貫通穴を作製しレーザを加工穴中へ導くことが考えられるが、ドリル剛性の低下及びチゼルまたはシンニングを除去することによる被削材への食い付き性悪化が問題と考えられる。そこで本研究において提案する UV-LAM は将来的には旋削

加工及びフライス加工に適用することを目標とする。

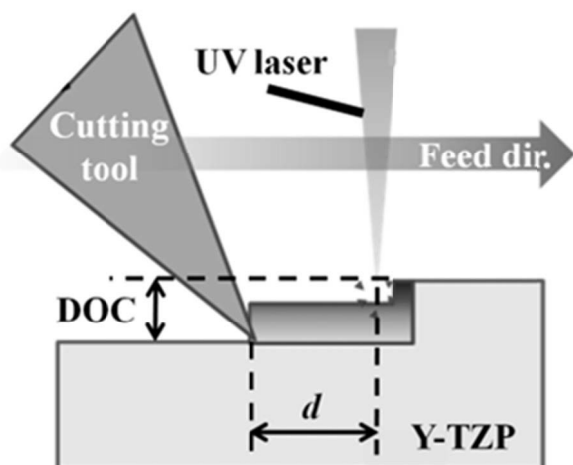


Fig.3 Schematic diagram of UV-LAM

4. 評価実験結果

本実験の目的は、UV レーザを援用することにより、Y-TZP の被削性を向上させ、切削加工適用の可能性を示すことである。具体的には、レーザを援用しない従来方法及び UV-LAM それぞれにおいて Y-TZP 表面に微細溝を切削加工で生成し、切削中の切削抵抗、加工溝底面の表面性状、工具の切れ刃性状に関する調査、考察を行い提案方法の優位性を示す。

4.1 実験方法

Fig. 4 に UV-LAM の実験装置を示す。UV レーザは Coherent, Inc AVIA-3000 により発生させた。AVIA-3000 は Nd:YAG レーザであり、赤外領域の 1064nm の波長を有する基本波の 3 次高調波である波長 355 nm のレーザーを生成する。集光レンズを通し、レーザーを被削材上に収束させた。被削材の上方にビデオカメラを設置し、加工部周辺の拡大画像を取得した。このビデオカメラはレーザーの集束に用いた集光レンズと同じレンズを利用し撮影した。これは実験系が単純化可能という利点もあるが、レーザーのデフォーカスを変化させると、ビデオカメラで撮影した画像の焦点もずれるという問題も生じる。ビデオ画像は主に工具先端・レーザースポット間距離を調整する時に利用した。被削材は Y-TZP ブロック(Nippon Tungsten Co. NPZ-10)を利用した。寸法は 20 mm×20 mm×4 mm である。被削材は 3 成分力センサ(Kistler instrumente AG.)上に固定し、切削力の測定を可能とした。力センサは力センサアンプ及びデータロガーを介して PC に接続されている。切削工具の材料として、高温環境下での機械強度低下が少ない立方晶窒化ホウ素(Cubic Boron Nitride, CBN)を採用した。工具のコーナー半径は 0.2 mm である。被削材及び力セ

ンサはリニアモータにより駆動される X, Y ステージに、切削工具は Z ステージにそれぞれ固定されている。

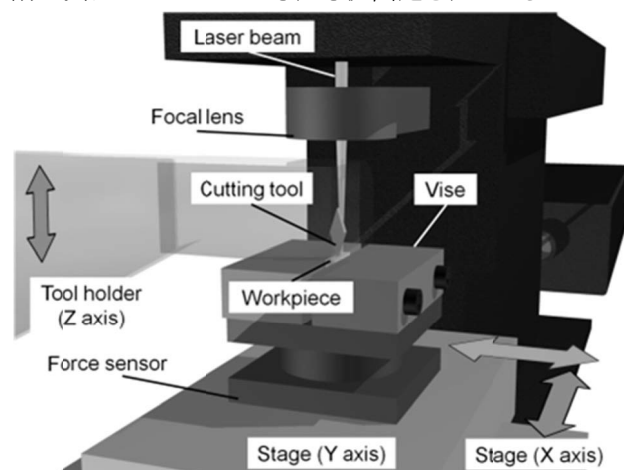


Fig. 4 Experimental setup

Table 1 に加工パラメータを示す。

Table 1 UV-LAM machining parameters

UV-LAM Parameters	
Depth of cut (μm)	5-15
Feed speed (mm/min)	60-3000
Cutting distance (mm)	20
Laser wavelength (nm)	355
Laser repetition rate (kHz)	5
Laser pulse width (ns)	40
Laser power (W)	0.15
Distance between tool edge and laser spot (μm)	20

4.2 比切削抵抗

コーナー半径 0.2 mm を有する CBN 工具で加工を行った場合の比切削抵抗を Fig.5 に示す。これは送り速度 300 mm/min で加工時の結果である。本結果が示すように、切り込み深さ 5 - 15 μm の範囲で比切削抵抗に明確な差が見られなかった。さらに Fig. 6 に切り込み深さと比切削抵抗の関係を示す。従来方法及び UV-LAM とともに切り込み深さが小さくなると比切削抵抗が増加する傾向が見られたが、両方法間に差は見られなかった。コーナー半径の差異により、同じ切り込み深さにおける切削でも溝幅に差が生じる。コーナー半径が大きな切削工具ほど加工溝幅は大きくなるため、加工時に溝周辺部の昇温が不十分となる可能性がある。コーナー半径 0.2 mm の工具を用いた場合に比切削抵抗に大きな差が見られなかったのは、レーザによる加熱領域と比較して工具幅が大きかったことが原因であると考えられる。

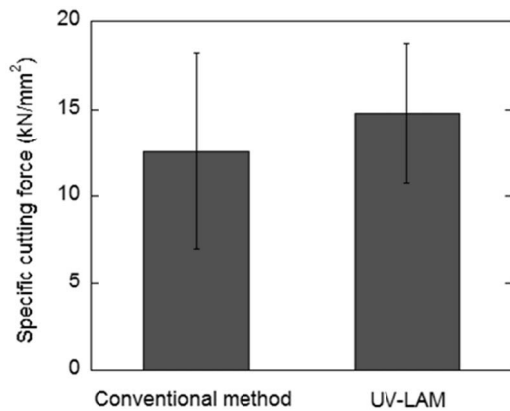


Fig.5 Specific cutting force during cutting

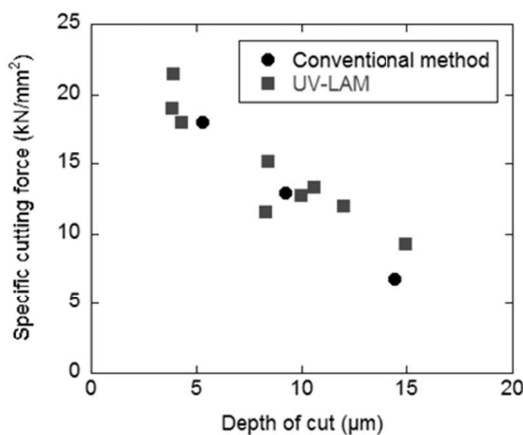


Fig.6 Relation between depth of cut and specific cutting force during cutting

4.2 表面性状

レーザを援用しない従来方法及び、UV-LAM で加工後の加工溝写真を Fig.7 に示す。従来方法による加工溝上に大規模クラックが生じている。大規模クラック数をそれぞれの溝上で計数し、比較した結果を Fig.8 に示す。Fig. 8 から UV レーザを援用することにより、大規模クラック数が 14 から 3 へ減少することが示された。ここでは大規模クラックは加工溝幅の半分より大きな幅を有するクラックと定義している。UV レーザを援用することにより大規模クラックの発生が抑制され、表面性状が改善することが示された。

従来方法においては断面画像に微細クラックが観察されなかったのに対し、UV-LAM 後においては微細クラックが観察された。また微細クラックは加工溝の中央付近に存在していることが確認された。UV-LAM 後の表面粗さ増大は、この微細クラックの発生が原因と考えられる。Y-TZP は高温環境下で破壊靱性値が急低下することが知られており、微細クラックの発生原因は加熱による温度上昇と関連していると考えられる。

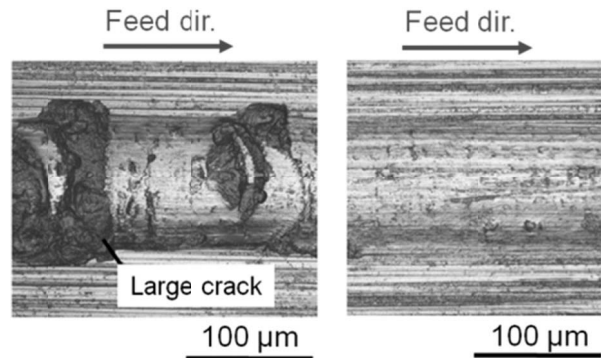


Fig.7 Surface of cut groove

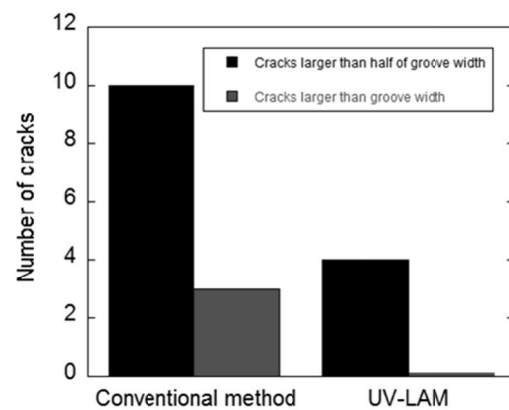


Fig.8 Large cracks number comparison

5. おわりに

Y-TZP に対する切削加工実現を目的として、熱援用切削加工法の提案、評価を行った。具体的には工作機械への搭載を考慮し、UV-LAM 法を提案した。提案手法において、大規模クラック数、比切削抵抗、工具欠損が抑制され、被削性が向上することが示された。

参考文献

- [1] Basu, B., "Toughening of yttria-stabilised tetragonal zirconia ceramics", *International Materials Reviews*, Vol. 50(4), (2005), pp. 239-256.
- [2] Han Huang, "Machining characteristics and surface integrity of yttria stabilized tetragonal zirconia in high speed deep grinding", *Materials Science and Engineering*, Vol. A345, pp. 155-163, 2003.
- [3] S.Sun, M.Brandt, M.S.Dargusch, "Thermally enhanced machining of hard-to-machine materials-A review", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, pp. 663-680, 2010.