

ジルコニアのレーザー援用研削に関する研究

東京大学工学部機械工学科光石・杉田研究室 ○平岩和也 木崎通 田邊祥太 ◎杉田直彦 光石衛

硬脆材料の Y-TZP は難削材であり、高能率、高精度、低コストの加工法が求められている。そこで Y-TZP の高温での温度特性を利用したレーザー援用加工を用い、研削加工に組み合わせることを提案する。この論文ではレーザーを用いない Y-TZP の研削加工と、レーザー援用研削加工の両方を行い、研削力、表面粗さ、工具摩耗について比較した結果、適切な条件下でレーザー援用により加工能率を 2 倍にすることが可能と判明した。

1. 背景と目的

部分安定化ジルコニア(Y-TZP)は硬度、靱性、熱的特性、生体適合性、審美性の優れたジルコニアセラミックスであり、歯科クラウン材料や機械部品としての需要が高まっている。しかし、高硬度の硬脆材料であり、難削性が高いため既存の手法では高能率、高精度、低コストの加工が困難である。そのため本研究では、本焼結体の Y-TZP を高能率、高精度、低コストで加工する方法を実現することを目的とする。

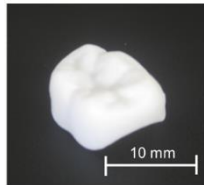


Fig. 1 人工歯冠

2. Y-TZP の材料特性を考慮したレーザー援用研削加工の提案

本研究では除去加工の一種である研削加工を利用する。研削加工の利点である、被削材に対する工具の硬度が 3 倍程度で済む点、切削加工と比較し、面粗度の良い加工が可能であるという点が研削加工を選択した理由として挙げられる。Y-TZP の高能率、高精度、低コスト加工を実現するため、本研究で用いる研削工具に対する要求として 1. 砥粒の材質が材料である Y-TZP と比較して 3 倍以上硬いこと、2. 安価であること、3. 研削としては高能率な加工が可能であること、の 3 点が挙げられる。本研究では上記を満たすダイヤモンド電着砥石を選択した。

また、Y-TZP の材料特性として、高温環境における機械強度の低下が挙げられる。この特性を利用することにより、高温環境下での Y-TZP の被削性向上が期待できる。レーザー援用切削加工法 (LAM: Laser Assisted Machining) では、レーザーを照射することで被削材を局所的に加熱し、その直後に軟化した部位を工具で除去する (Fig. 2)。加熱部は切削除去されるため、熱影響による材料の変質を最小限に抑えることができる。本研究では本焼結後の Y-TZP の高能率、高精度、低コスト加工の実現のため、ダイヤモンド電着砥石を用いた研削加工にレーザー援用加工法を組み合わせたレーザー援用研削加工法を提案する。

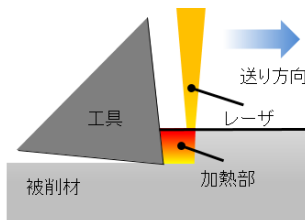


Fig. 2 レーザー援用加工法 (LAM)

3. レーザー援用加工法を用いた研削実験

3.1 実験方法

まずレーザー非援用時に研削加工条件が被削材に与える影響を調査するため、Table1 に示す研削条件を用い加工実験を行った。被削材は Fig.3 に示す Y-TZP、工具は Fig.4 に示す粒径 0.13 mm(#120)、0.08 mm(#200) のダイヤモンド電着砥石を使用し、Fig.3 に示す実験系を使用した。研削力、表面粗さ、工具摩耗を測定することにより各条件における被削性を評価した。

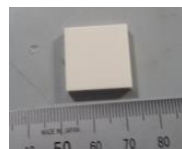


Fig.3 Y-TZP



Fig.4 ダイヤモンド電着砥石

次にレーザー援用による被削性改

善度合いを定量的に把握するための加工実験を実施した。Table1 に示した研削条件に加え、Table2 に示すレーザー照射条件を用いた。研削力、被削材の表面粗さ、工具摩耗を調査し、比較、考察を行った。

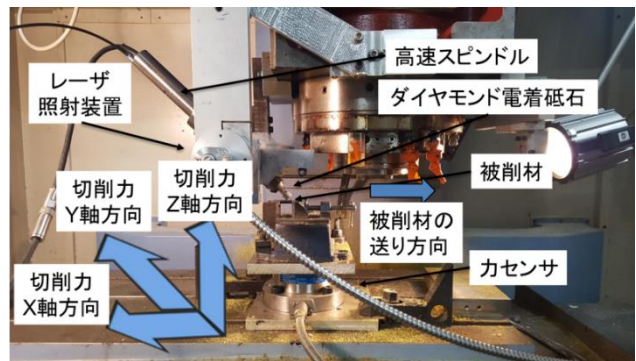


Fig. 5 実験系

Table1 研削条件

工具	ダイヤモンド電着砥石
工具回転数	18,000 rpm
工具径	12 mm
切り込み深さ	100 μ m
研削速度	66 m/min
被削材	Y-TZP
砥石の平均粒径	0.08 mm(#200), 0.13 mm(#120)
送り速度	500, 1000, 1500, 2000 mm/min

Table2 レーザ照射条件

レーザー出力	なし, 40 W, 60 W
スポット径	約1.5 mm
周波数	100 Hz
工具・スポット間距離	3 mm
レーザー角度	45°
レーザー照射口・被削材間距離	84 mm

3.2.1 研削力

データのノイズを取り除くため、ローパスフィルタで処理した結果の最大値をその加工条件での研削力とした。粒径 0.13 mm の加工での研削力の変化を右の Fig.6 に示す。レーザー出力 40 W、送り速度 2000 mm/min と、レーザー出力なし、送り速度 1500 mm/min での研削力は概ね等しくなった。これはレーザーを援用することにより、加工抵抗を増やすことなく加工能率を増加させられることを意味している。一方、Fig.7 に示した粒径 0.08 mm での加工実験結果においてレーザーを援用することによる研削力の低下は観察されなかった。

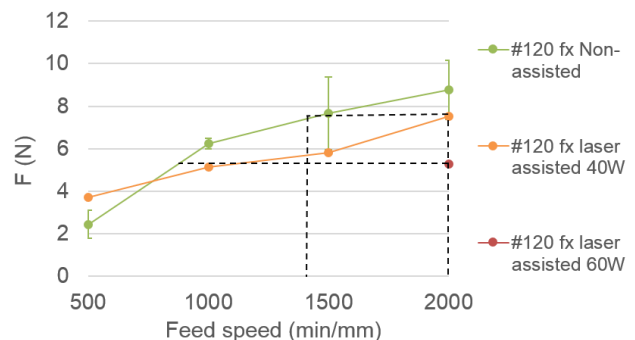


Fig. 6 研削力の変化 粒径 0.13 mm (#120)

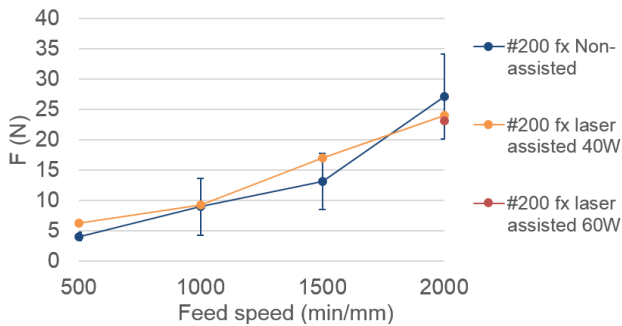


Fig. 7 研削力の変化 粒径 0.08 mm (#200)

3.2.2 被削材の表面粗さ

被削材の加工溝の始端、中間、終端のそれぞれの表面粗さの平均をその加工条件での被削材の表面粗さとした。粒径 0.13 mm の表面粗さの変化は右の Fig.8 のようになった。レーザ非援用時においては粒径 0.13 mm, 0.08 mm いずれの場合も送り速度 1000 mm/min までの速度の加工でのみ Ra1.5 μ m の要求を満たす。一方、レーザ出力 40 W の条件下で送り速度 2000 mm/min における加工でも Ra1.5 μ m 以下という条件は満たすことが可能であることが判明した。レーザを援用することにより被削材を軟化、被削性を向上させることで表面粗さを悪化させずに加工能率を 2 倍にできることが実証されたといえる。また Fig.9 が粒径 0.08 mm の工具を用いた場合での表面粗さの変化である。40 W のレーザを用いた加工において送り速度 2000 mm/min で急激に工具摩耗量が減少することが判明した。これはレーザスポットの送り速度を上げることで、被削材上における単位面積当たりの入熱量が低下し工具へ伝導する熱量も低下し、工具の熱的損傷が抑制されたためであると考えられる。

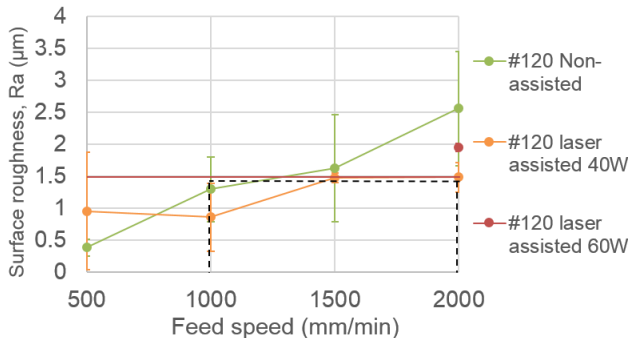


Fig. 8 表面粗さの変化 粒径 0.13 mm (#120)

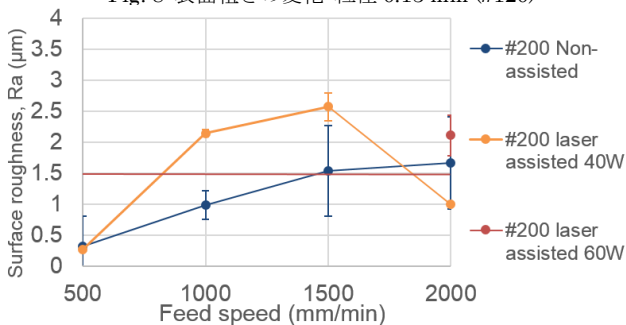


Fig. 9 表面粗さの変化 粒径 0.08 mm (#200)

3.2.3 工具摩耗

工具摩耗を評価する目的で電子顕微鏡(SEM)を用いた観察を実施した。粒径 0.13 mm の工具表面の様子を Fig.10 に、粒径 0.08 mm の工具表面の様子を Fig.11 にそれぞれ示した。Fig.10, Fig.11 いずれも左側の画像がレーザ非援用かつ送り速度 1000 mm/min, 右側の画像がレーザ出力 40 W かつ送り速度 2000 mm/min における加工で使用した工具である。粒径 0.13 mm の工具を比較すると、レーザを援用することで送り速度が 2 倍に増加させても砥粒の脱落量が変わらず、工具摩耗に差がないことがわかる。一方、

粒径 0.08 mm での加工ではレーザ援用により砥粒の脱落が増加し、工具摩耗が悪化したことが観察できる。粒径 0.08 mm の砥粒は 0.13 mm の砥粒に比べ小さいので熱容量が小さく、レーザによって加熱された被削材からの熱伝導による温度上昇幅が大きく、損傷したと考えられる。

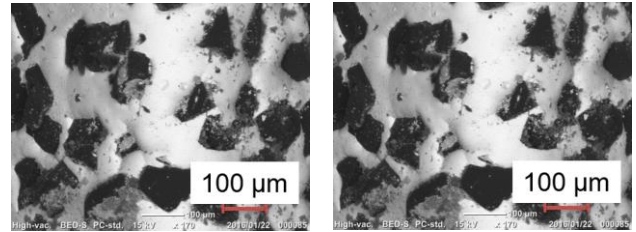


Fig. 10 工具摩耗の比較 粒径 0.13 mm (#120)

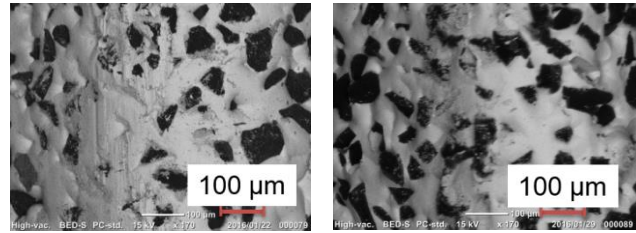


Fig. 11 工具摩耗の比較 粒径 0.08 mm (#200)

3.3 考察

レーザ非援用時の加工における研削パラメータの最適条件は粒径 0.13 mm, 送り速度 1000 mm/min であることが判明した。これは Ra1.5 μ m 以下という要求を満たす加工条件のうち最も効率が高く、研削力も粒径 0.08 mm での加工より小さいからである。この結果とレーザ援用研削加工実験の結果と比較を行うと粒径 0.08 mm での加工では被削材の軟化による被削性向上より工具の熱的損傷による被削性低下の影響が大きく、レーザ援用の有用性は見られなかった。一方、粒径 0.08 mm の工具を用いた加工においてレーザを援用することにより被削材を軟化、被削性を向上させ、加工能率を 2 倍にしたため、提案手法は有効であると判明した。

4. 考察および今後の展望

適切な加工条件下で被削材の軟化を促すレーザ援用研削加工法は有効であり、研削加工の加工能率を向上させる。今後は研削条件、レーザ照射条件のパラメータを追加し、更なる最適化を行う。また熱影響層の厚さ、熱影響層の被削材の強度、特性への影響の考察を行い、最終的には溝加工に留まらず 3 次元加工への応用へと適用し、実用化を目指す。

5. 結論

- 研削加工と LAM を組み合わせた Y-TZP のレーザ援用研削加工法を提案した。
- Y-TZP のレーザ非援用時の研削加工に最適な粒径、送り速度を粒径 0.13 mm, 1000 mm/min と決定した。
- 粒径 0.13 mm, レーザ出力 40 W の条件下で送り速度 2000 mm/min での加工を可能にし、レーザ非援用時に比べ加工能率を 2 倍にすることが可能と実証し、提案手法の有用性を実証した。

参考文献

- [1] Frank E. Pfeifferkorn, Yung C. Shin, Yinggang Tian, "Laser-Assisted Machining of Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia", *ASME*, Vol.128, 2004, pp.42-51.
- [2] Tony Johnson, David G. Patrick, Christopher W. stones, David G. Wildgoose, Duncan J. Wood, "Basic of Dental Technology", 2010, Wiley-Blackwell, pp.127-132.
- [3] 手塚信一, 吉川昌範, "YAG レーザ照射によるセラミックスの表面変質", 精密工学会誌, Vol.56, No.02, 1990, pp.317-322.