

ジルコニアの高速切削に関する研究

東京大学工学部機械工学科 ○湯浅勇貴, 藤井達也, 伊藤佑介, 木崎通, ◎杉田直彦, 光石衛

ジルコニアの中でも Y-TZP は高硬度, 高靱性を有しており, さらにその審美性から人口歯冠をはじめとした生体材料としての期待が高まっている。しかし, その強度の高さ故に, 能率の低い研削加工が Y-TZP の主な現行加工法となっている。よって, Y-TZP の高精度, 高能率な加工法が必要とされている。本研究では Y-TZP の高速切削加工実験を通して, 高切削速度によって生じる切削熱を利用した切削加工が有効であることを確認した。

1. 序論

近年, 機械的, 熱的特性の優れたジルコニアセラミックスが, 機械部品や歯科クラウン (Fig.1) などの材料として期待されている。その中でも Y-TZP (イットリア安定化正方晶ジルコニア多結晶体) は量産化され, その審美性と生体適合性から生体材料として注目されている。この Y-TZP は硬脆性材料であるため, 被削性の高い仮焼結状態で加工した後, 焼結をおこなない, 最後に仕上げ加工をおこなうという流れで加工されている。しかし, この加工法は, プロセスが多く低能率であること, および焼結時の大規模収縮による精度低下が生じるという課題が存在する。これらの課題を解決するために, 高能率な除去加工法である切削加工によって本焼結後の Y-TZP を加工する研究がおこなわれている。その 1 つにレーザ援用加工法

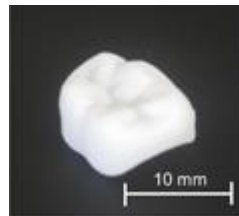


Fig. 1 Dental crown made of zirconia ceramic.

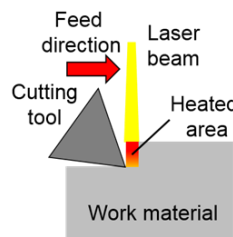


Fig. 2 Schematic diagram of Laser-assisted Machining (LAM).

(Laser-assisted Machining, LAM) がある (Fig.2)。これは, 加工部にレーザを照射することで Y-TZP を軟化させて, 切削をおこなうというものである。しかし工具摩耗が抑制しきれていない, レーザ照射条件をはじめとする加工条件の決定が困難であるという課題があり, 未だに研究段階である。よって, 本研究では Y-TZP の切削における工具摩耗を抑制した高精度・高能率な加工の実現を目的とした高速切削加工を提案する。具体的には, 人工歯冠の仕上げ加工を想定し, 精度は表面粗さ Ra1.0 μm 以下, 能率は除去体積量 0.3 mm³/min 以上, 工具寿命は工具逃げ面摩耗幅 5.0 $\mu\text{m}/\text{mm}$ 以下を目標とする。なお, 本稿の内容について, 登壇者は実験を実施し, 実験結果の解析は共著者とともにおこなった。

2. 高速切削加工の提案

Y-TZP の高能率な切削加工をおこなうために, 本研究では高速切削を提案する。これは, 切削速度の上昇に伴い切削温度は増加する傾向があること [2] および, Y-TZP は温度上昇に伴い機械強度が低下し被削性が向上することを利用する手法である。しかし, 切削速度が高ければ高いほど被削性が向上するわけではない。工具摩耗は凝着・機械的摩耗・熱的摩耗の総和として生じるため, たとえば, 金属切削における切削速度と工具逃げ面摩耗速度の関

係は Fig.3 のような複雑な関係となり, 最適な切削速度が存在するといわれている。しかし, セラミックスである Y-TZP において切削速度と工具逃げ面摩耗速度の関係はどのようになるか不明である。よって, 本研究では Y-TZP の切削加工において, 切削速度が被削性に与える影響を加工実験によって調査する。

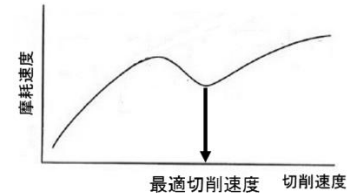


Fig. 3 Relation between cutting speed and speed of tool wear. (made from Fig. 3 in [2])

3. 切削条件評価実験

3.1 実験目的

Y-TZP の切削加工における切削速度の影響は未だ検証されていない。よって, 本研究で提案する高速切削の有効性を検証するために, 超硬エンドミルを用いた加工において切削速度が工具逃げ面摩耗および加工面性状に与える影響を実験的に調査することを目的とする。

3.2 実験方法

高速切削をおこなうために, 切削速度を決定する工具回転数と工具径を変えて実験をおこなった。工具を回転させるスピンドルは最大回転数 50,000 rpm の電動スピンドル (株式会社ナカニシ, HES500-BT30) と, 回転数 150,000 rpm (固定) のエアタービンスピンドル (株式会社ナカニシ, HTS1501S-HSKE32) を用いた。それぞれのスピンドルを 5 軸マシニングセンタ (株式会社 岩間工業所, MM300R-5BT) および 3 軸マシニングセンタ (DMG 森精機株式会社, NV1500DCG) に送り方向へ 45° 傾斜させて取り付けた。実験装置の概観を Fig. 4 (a), (b) に示す。さらに, 工具は径 2 mm および 6 mm の TiAlN コーティング 2 枚刃超鋼ボールエンドミル (三菱マテリアル 株式会社, MS2SB) (Fig. 4 (d)) を用いることで, 広範囲の切削速度域における実験を可能にした。実験系概要を Fig. 4(c) に示す。被削材は Y-TZP ブロック (日本タングステン株式会社, NPZ-10) である。寸法は 20 mm \times 20 mm \times 4 mm とした (Fig. 4 (d))。また, 加工中の被削材の温度は, 被削材表面に放射率 0.94 の黒体塗料 (タスコジャパン株式会社, THI-1B) を塗布し, サーモグラフィ (日本アビオニクス株式会社, InfREC R500) を用いて測定した。加工後の溝深さ, 表面性状, 工具逃げ面の状態の計測及び観察には, レーザ顕微鏡 (株式会社キーエンス, VK-9510) を使用した。なお, 加工条件は Table 1 のとおりである。一刃あたりの切り取り厚さを一定にするため, 各条件において異なる送り速度を設定した。

Table 1 Experimental conditions

Feed per edge [μm]		0.35										
Tool diameter [mm]		2					6					
Depth of cut [μm]		100										
Rotation speed ($\times 10^4$) [rpm]		1	2	3	4	5	15	1	2	3	4	5
Cutting speed [m/min]		44	89	133	178	222	666	133	267	400	533	666

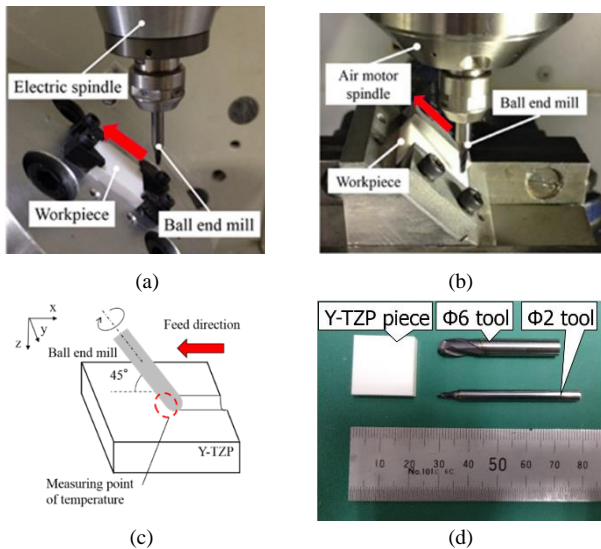


Fig. 4 (a) Experimental setup with electric spindle that rotates at speeds up to 50,000 rpm, (b) experimental setup with air motor spindle that rotates at 150,000 rpm, (c) schematic diagram of the machining, (d) workpiece and cutting tools ($\Phi 2$ and $\Phi 6$ mm).

4. 実験結果

4.1 加工温度

Fig. 5 に切削速度と最大切削温度の関係を示す。工具径 2 mm の工具による溝加工では、切削速度の上昇に伴い加工温度も上昇した。径 6 mm では、切削速度 400 m/min までは切削速度と加工温度は概ね比例し、それ以降では 400 m/min における温度より小さい温度でほぼ一定となった。また、切削速度が等しい場合は、工具径 6 mm より径 2 mm の工具による加工のほうが切削温度は大きくなっている。これは、径 6 mm の工具のほうが体積が大きく熱容量も大きいため、温度上昇量が小さいことが原因であると考えられる。

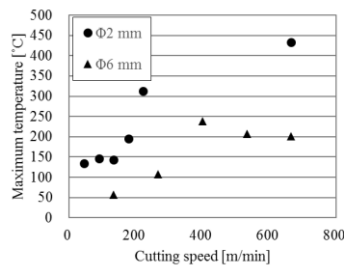


Fig. 5 Relation between cutting speed and maximum cutting temperature.

4.2 加工溝表面性状

Fig. 6 に切削速度と溝底の表面粗さ Ra の関係を示す。なお、青い点は切削距離 15 mm において溝深さが大きく減少したことを表す。Fig. 6 より、溝切削が成功したものについて、工具径 2 mm の工具で加工した溝の表面粗さには大きな違いはないが、径 6 mm では切削速度の上昇に伴い表面性状が悪化した。工具径 2 mm で切削した溝の表面性状が切削速度によって大きな変化がみられない理由としては、切削速度 89 m/min 以上では Y-TZP の強度が十分に低下する温度で加工がおこなわれていたことが考えられる。また、工具径 6 mm の実験において径 2 mm の工具で切削した溝よりも表面性状が悪化している原因としては、径 6 mm の工具のほうが体積が大きく熱容量も大きいため、加工時の温度が十分に上昇せず Y-TZP の強度低下が十分に生じなかったことが考えられる。

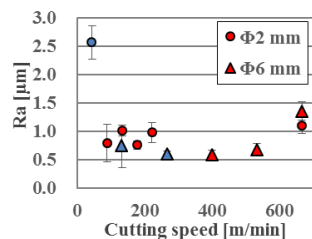


Fig. 6 Relation between cutting speed and surface roughness.

4.3 工具摩耗

Fig. 7 に切削速度と使用した工具の逃げ面摩耗幅の関係を示す。なお、Fig. 6 と同様に青い点は切削距離 15 mm において溝深さが大きく減少したことを表す。工具径 2 mm の場合、切削速度 222 m/min までは切削速度の上昇に伴い逃げ面摩耗幅が増加したが、切削速度

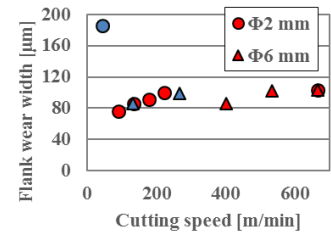


Fig. 7 Relation between cutting speed and flank wear width.

666 m/min では摩耗幅が増加しなかった。工具径 6 mm の場合は切削速度 400~666 m/min において切削速度の上昇に伴い逃げ面摩耗幅が増加した。Fig. 3 と Fig. 7 を比較すると、工具径 2 mm について、切削速度 222 m/min 付近までの領域は Fig. 3 において切削速度と工具摩耗量が比例する低速域であると考えられ、666 m/min は工具摩耗量が極小となる切削速度を超えた領域に入っていると考えられる。また、工具径 6 mm については、Fig. 7 上の点は Fig. 3 における最適切削速度周辺の点であると考えられる。

5. 考察

Fig. 8 に切削温度と溝表面の算術平均粗さ(Ra)の関係を示す。このグラフより、表面粗さが最小となる加工温度が 250 °C 付近であることがわかる。しかし、それ以降の温度では表面粗さが悪化しており、温度の上昇とともに Y-TZP の機械的強度が低下することに矛盾する。そこで、切削温度と工具逃げ面摩耗幅の関係に着目する(Fig. 9)。Fig. 9 より、加工温度 250 °C 程度において極小に近い工具逃げ面摩耗幅となり、それ以降の温度では摩耗幅が増大していることが確認できる。これらの事実から、Y-TZP の強度低下と工具の耐熱温度のバランスが最も良く取れている加工温度が、本実験においては 250 °C 程度であったと考えられる。

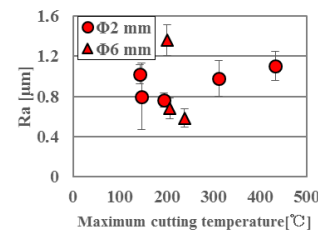


Fig. 8 Relation between maximum cutting temperature and surface roughness.

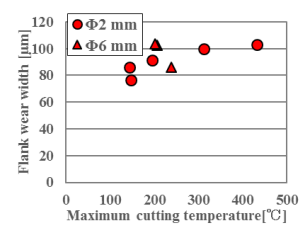


Fig. 9 Relation between maximum cutting temperature and flank wear width.

6. 結論

本研究では、Y-TZP の高精度・高効率および工具摩耗を抑制した切削加工を実現することを目的として、切削速度の上昇に伴う切削温度の増加、Y-TZP の温度上昇における機械強度の低下を利用する高速切削を提案した。提案した加工方法について、実験を通して、Y-TZP の強度低下と工具の耐熱温度が両立する加工温度となる切削速度において切削加工をおこなうことで、目標とする加工が可能であることを確認した。

参考文献

- [1] Kizaki, T., Ogasahara, T., Sugita, N., & Mitsuishi, M. Ultraviolet-laser-assisted precision cutting of yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(2), 267–275, 2014.
- [2] 帯川利之 “切削加工の高速化, 超高速化” 生産研究 59(6), 3-8, 2007.