

## 論文の内容の要旨

論文題目 ジルコニアセラミックスの熱援用切削加工法に関する研究

氏 名 木崎 通

第1章において、材料加工技術全般、歯科補綴物材料としてのイットリア安定化正方晶ジルコニア多結晶体(Y-TZP)および熱援用切削加工技術の概要を述べ、さらに本研究の目的も示した。近年付加加工、除去加工および機上計測技術の発展が著しく、それらを統合する流れが加速している。しかし加工技術が発展しても未だ著しく加工が困難な材料が存在しており、そのひとつにY-TZPがある。Y-TZPの主な応用分野は歯科である。Y-TZPは歯科補綴物に最も適した材料として用いられている。これはY-TZPが高硬度、高靱性、化学的安定性および自然歯に近い色調を有しているためである。現在の主な製造方法は加圧成型後のグリーンな材料を切削加工により加工した後、最終焼結するというものである。しかし最終焼結時に約20%の体積収縮が生じるため、切削時に予め収縮量を予測して一回り大きな形状を切削する必要がある。このため製品の形状精度保持が困難である。また焼結には通常7時間以上かかり、長いプロセス時間も問題とされている。一方最終焼結後のY-TZPが加工可能となれば上記問題は解決されるが、難削材であるため現状では困難である。最終焼結体に対するダイヤモンド砥石を用いた研削加工も行われるが、著しい工具摩耗によって形状精度が悪化することが知られている。

上記問題を解決可能なY-TZP最終焼結体の加工法として熱援用切削加工法が挙げられる。熱援用切削加工法とは、材料を加熱して機械強度を低下させた部位を切削工具で除去するという方法である。特にY-TZPは高温環境下で破壊靱性値が大幅に低下することが知られており、熱援用切削加工の適用は効果的であることが期待された。

本研究における目的は歯科補綴物加工時に材料として用いられるY-TZPの最終焼結体に対して、高精度・高能率・低コストでの加工を実現することである。具体的には熱援用切削加工法としてレーザ援用切削加工法(LAM)と工具加熱加工法をそれぞれ提案した。LAMはレーザを照射して加熱した部位を切削加工により除去する加工方法である。また工具加熱加工法とは誘導加熱で工具を加熱して加工する方法である。ミリング・旋削に適用可能な方法としてLAMを、ドリル加工に適用可能な方法として工具加熱加工法を提案した。また最終焼結体に対する加工の要求を表面粗さに関して算術平均粗さで1  $\mu\text{m}$ 程度、材料除去率を5.1  $\text{mm}^3/\text{min}$ 以上とした。

第2章において本研究で対象とする被削材であるY-TZPについて説明した。Y-TZPは先に述べたように歯科補綴物材料として理想的である。これは高い機械強度によるが、常温においてY-TZPには応力誘起変態強化機構と呼ばれる機構が存在し破壊靱性値が高く保たれている。しかし強化機構は400  $^{\circ}\text{C}$

以上において消失し、靱性が急激に低下する。このことからY-TZPの被削性が高温時に改善することが期待され、熱援用切削加工法が効果的であると考えた。熱を援用した最終焼結体の加工法が実現すれば、多くの問題を含む現行の加工法を代替する可能性がある。

第3章において本研究で提案する熱援用切削加工法の概要およびそれぞれの関連研究について述べた。LAMの関連研究はさまざま存在するが、その多くが金属またはガラス質を含むセラミックスに対してLAMを適用しており、材料の延性を促進させて被削性向上を実現している。一方本研究におけるLAMでは材料の破壊靱性値の低下を主に利用している点が他と異なっている。また従来確立されてこなかったLAMにおける加工条件の決定法を本研究では提案している。一方、工具加熱加工法に関するほとんど関連研究では旋削やミリング加工にのみ適用されており、ドリル加工へは適用されていない。さらに高強度セラミックスへ適用しているという点も本研究の特徴である。

第4章ではY-TZPに熱援用切削加工法を適用する際に必要な被削材温度と被削性間の関係を定量的に把握するために行った加工実験について述べた。Y-TZPブロックをあらかじめ決められた温度にヒータを用いて加熱し、直径2 mmの超硬エンドミルを用いて直線溝加工を実施した。この時被削材温度だけでなく他切削条件が被削性に与える影響を把握するため、中央複合計画を用いて実験を計画した。被削材温度はヒータを用いて26 °C, 238 °C, 450 °Cの3段階に変化させた。最高温度を450 °Cとしたのは400 °C以上で強化機構が消失し、破壊靱性値が大きく低下するためである。実験の結果、被削材温度は切削抵抗および工具摩耗量に大きな影響を与えていることが判明し、温度上昇に伴う切削抵抗・工具摩耗量の低下が確認された。一方表面性状に関して、温度上昇に伴う加工溝側壁の割れ拡大が観察された。これは高温における破壊靱性値低下が原因であると考えられ、加熱することにより脆性破壊が促進されている様子が示されている。一方底面の表面粗さは悪化しなかった。以上からY-TZPの熱援用切削加工法は、材料の破壊靱性値の低下を利用して加工後の表面粗さを悪化させることなく被削性を改善する方法であることが判明した。さらに後にLAM条件決定法で使用するための実験式を得た。またY-TZPの熱援用切削加工法において、加工後の表面粗さは要求値の算術平均粗さ1  $\mu\text{m}$ に近い値となっており、熱援用切削加工法において表面粗さの要求を満足可能であることが示された。

第5章では、LAMにおける加工条件決定法を提案し、実際にLAM条件を決定した。章前半において温度分布シミュレーションについて述べた。レーザ照射時の被削材中温度分布はLAMにおける加工特性に大きく影響すると考えられる。そのため有限要素法を用いた、レーザ照射時の被削材中温度分布シミュレーションを構築した。またシミュレーション結果を評価するためレーザ照射装置を開発した。同条件で実施したシミュレーション結果とサーモグラフィによる実測結果を比較した結果、構築したシミュレーションを用いることによりレーザ照射時の温度を正確に予測可能であることが示された。比較は材料の表面温度で実施したが、両者が合致したため内部温度も正確に予測可能であるとみなした。さらに本章で構築したシミュレーションと第4章で得た実験式を組み合わせ、さらに二次計画法および遺伝的アルゴリズムを用いる事により、加工に適したLAM条件を決定できることを示した。”LAM条件”は一組の切

削条件と一組のレーザ照射条件から構成されている。切削条件は“工具回転数”，“送り速度”，“切り込み深さ”および“工具直径”である。一方レーザ照射条件は“出力”，“スポット径”および“工具・スポット間距離”である。提案するLAM条件決定法では工具直径，送り速度を予めオペレータが入力する。これをもとに加工に適したLAM条件が決定される。本方法を用いて一セットの“加工に適したLAM条件”を実際に決定した。

5.5節以降においてY-TZPに対するLAM実験結果および考察を示し，LAMがY-TZPの加工法として有効であることを示した。5.5節および5.6節でLAM条件を変化させて，条件が加工特性に与える影響を実験的に把握・考察した。5.7節では5.4節で決定したLAM条件を用いてLAMを実施した。提案したLAM条件決定法の妥当性を示し，さらにY-TZPの被削性が改善できることを実証した。本実験において，加工時のスラスト力最大値はレーザ非援用時に221.7 Nであったのに対し，援用時には108.0 Nとなり51.3%減少した。また工具摩耗も大幅に減少した。

LAMにおける問題として材料の割れが挙げられる。LAM時の被削材上にしばしば割れが発生した。これは材料の両端で発生しており，被削材両端においてレーザ照射を行わなければ抑制可能であることを示した。なお，本研究におけるLAM実験では主に送り速度20 mm/min，切り込み深さ0.3 mm，工具直径2 mmとした。これは加工能率が12 mm<sup>3</sup>/minということになり，1.2節で示した要求値である5.1 mm<sup>3</sup>/minを満足することができている。

第6章において工具加熱加工法に関する実験を実施し，その有効性を実証した。前半において旋削工具を用いて実施した直線溝加工実験について述べた。工具を加熱することにより溝表面性状の改善，比切削抵抗の低下，工具摩耗の減少が確認された。後半において，工具加熱加工法をドリル加工に適用した。加工には，摩擦による過剰な昇温防止と切り屑排出性向上を目的としてペッキング動作を採用した。Y-TZPに貫通穴を作成した結果，加工時のスラスト力ピーク値が工具を加熱することにより大幅に低下し，工具先端部の摩耗量も低下することが示された。一方工具と被削材が接触した瞬間はスラスト力の差が大きくなるものの，ピークを過ぎると両者の差は縮小した。この原因として，ドリル加工においては加工がある程度進行すると逃げ面で発生する摩擦熱など切削中に発生する熱で工具および被削材が加熱されることが挙げられる。温度が十分上昇すれば，誘導加熱による工具加熱の優位性が薄れると考えられる。また工具摩耗も工具と被削材が接触した瞬間に大きく進行すると考えられ，あらかじめ工具を加熱しておくことでピークスラスト力が減少し，工具摩耗が抑制されたと考えられる。

第7章において今後の展望を述べた。LAMおよび工具加熱加工法について本研究で得られた結果に加えてさらに必要となる事柄について指摘した。

本研究では最終焼結されたY-TZPの除去加工を高精度・高能率・低コストで実施可能な新たな加工法としてLAMおよび工具加熱加工法を提案し，その有効性を実証した。またY-TZPの熱援用切削加工において表面粗さが1 μm程度となることが示され(第4章)，LAMにおいては加工能率が目標値である5.1 mm<sup>3</sup>/min以上で加工可能であることが示された(第5章)。本研究結果を元にして，実用化を視野に

入れた研究がさらに発展することが望まれる.