

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K10029

研究課題名（和文）CAD/CAM冠の加工精度を向上させる切削加工条件の最適化

研究課題名（英文）Optimization of Cutting Conditions to Improve the Machining Accuracy of CAD/CAM Crowns

研究代表者

根本 怜奈（Nemoto, Reine）

東京医科歯科大学・東京医科歯科大学病院・助教

研究者番号：50706893

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究により、切削加工条件の一つであるステップオーバー量は、コンポジットレジンを用いたCAD/CAM冠の表面粗さを支配的に制御することが明らかとなり、ステップオーバー量を0.01～0.2mmの範囲で増加させた場合、曲げ強さへの影響は軽微であることが明らかとなった。また、加工条件の最適化により、D字型リテーナーを有する臼歯部ジルコニアRBFDPの作製と、それらを用いた際に、インレー型とL字型よりも脱離に抵抗できる可能性が示され、臨床応用に向けた基礎的知見を得る事ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

切削加工装置を用いて作製した補綴装置の利用は今後大幅に増加し、様々な症例に対応する必要がある。本研究で得られた知見は、微細加工可能な切削加工条件を明らかにし、複雑な形態を有する支台装置を作製することが可能となった。また、D字型リテーナーを有する臼歯部接着ブリッジの臨床応用により、長期に良好な予後が期待できる治療の選択肢を提示する上で極めて重要な意義をもち、今後の歯科補綴学および歯科保存学の発展に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the influence of step-over, a cutting parameter in CAD/CAM crown fabrication, on the surface roughness of composite resin crowns. The results demonstrated that step-over has a dominant effect on surface roughness, and increasing the step-over from 0.01 mm to 0.2 mm has a minimal impact on flexural strength. Furthermore, by optimizing the machining parameters, we successfully fabricated D-shaped zirconia RBFDPs with tooth-shaped retainers and demonstrated their superior resistance to dislodgement compared to inlay-type and L-shaped designs. These findings provide fundamental insights for the clinical application of CAD/CAM composite resin crowns and zirconia RBFDPs.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：CAD/CAM 加工条件 接着ブリッジ

1. 研究開始当初の背景

近年、歯科補綴装置を作製する際に使用する切削加工装置の発展は目覚ましく、歯科用ジルコニアやニケイ酸リチウムなどのセラミックスや、ハイブリッド型硬質レジン、PMMA など種々の材料の切削が可能となっている (Song et al., J Mech Behav Biomed Mater, 2016). 加工時には、歯科補綴装置の CAD データを基に、切削加工パスの設計が必要で、CAM ソフトを用いて、各加工パラメータを設定する。加工パラメータには、研削材の回転速度である切削速度、ツール、ステージの移動速度である送り速度、隣接する切削間を分離する XY 平面方向の距離であるステップオーバー、一刃での切削量である切込み深さ、切削方向などが挙げられる。

これら加工パラメータは、研削材および被削材により適正値が設定されており、その加工条件を基に、補綴装置が加工される。しかしながら、研削材は工業用途に設定されているため、その被削材は、ジルコニアはあるものの、グラファイトや銅・銅合金、硬質複合樹脂となっており、上記の歯科用材料に対する詳細な推奨切削条件は明らかとなっていない。一般的には、切削エネルギーが一定になる条件にて切削することにより、再現性の高い加工が可能になることが報告されていることから (Altintas et al., Appl Mech Rev, 2001), 材料毎の切削エネルギーの評価により、適切な加工パラメータの推定が可能と考えられる。

また、臼歯部一歯欠損に対する補綴治療として、外科的な侵襲を伴わずに歯冠形態を回復できるブリッジは、きわめて高い頻度で用いられる。しかし、全部被覆冠をリテーナーとして選択した場合、歯質削除量が多く、症例によっては支台歯の露髄を引き起こすリスクがある。一方、歯質の削除をエナメル質内に限定する接着ブリッジ(RBFDP) は、歯質を可及的に温存することにより、露髄を回避するとともに咬合接触状態を保持することが可能であることから、有用な治療法と考えられる。しかし、RBFDP の 5 年生存率は、全部被覆冠をリテーナーとした従来型のブリッジより低く、その原因が接着ブリッジのリテーナー脱離であることが報告されている。RBFDP が長期間口腔内で機能し、良好な予後を得るためには、脱離抵抗の高いリテーナーの設計や適応症例の選択が重要であると考えられる。

金属製の RBFDP のリテーナーとして、インレー型、L 字型、D 字型フレームが利用されている。この中で、D 字型フレームが最も脱離抵抗性が高い設計とされている。一方、金属アレルギーの回避や審美的要求の高まりから、金属に代わり、歯科用ジルコニアを用いた RBFDP の需要が高まっている。歯科用ジルコニアでは切削加工が必須であり、D 字型フレームのような複雑な形態の加工は困難で、適合性についての報告は少ない。

2. 研究の目的

本研究では、CAD/CAM 用コンポジットレジン材料の最適な加工条件を提示する為、ステップオーバー量を変化させて加工した様々な表面性状を有する板状試料を作製し、それらの表面粗さと曲げ強度を評価した。さらに、小白歯冠の表面粗さを評価し、臨床状況における表面性状に対する加工条件の影響を検討した。

また、歯科用ジルコニアを用いて D 字型のリテーナーの RBFDP を作製すること、リテーナーのデザインがマージン部の適合性とブリッジの維持力に与える影響を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

3. 1. 切削加工条件の最適化

板状試験片作製用の CAD データ及びミリングパスを CAD ソフトウェア(CoCreate OneSpace Modeling)および CAM ソフトウェア(hyperDENT CLASSIC)を用いて作成した。ミリングパスは、一定のステージ送り速度(1500mm/min)及びスピンドル速度(25000rpm)の下、ステップオーバー量を 0.01 ~ 0.2 mm で変化させ、CAD/CAM 用レジックブロック(ESTELITE P BLOCK)を切削加工機(MD-350)とロングネックボールエンドミル(DF2XLBFR0050N120, DF2XLBFR0100N160)を用いて加工した。加工したブロックを低速切断機(Isomet)にて切断、全ての試料の加工面以外を #1000 及び 2000 の耐水研磨紙で研磨し(HQ0.01 ~ 0.2)、幅 4.0mm ± 0.05、厚み 1.2mm ± 0.05、長さ 15.0mm ± 0.05 になるよう調整した。なお、各群の切削加工の際には新品のボールエンドミルを用い、加工に伴うボールエンドミルの消耗の影響を排した。ポジティブコントロールとネガティブコントロールとして、加工面をアルミナサンドブラスト処理したもの(SB)と耐水研磨紙で鏡面研磨したものの(BP)を作製した。また、下顎第一小白歯モデルの CAD/CAM 冠試料をステップオーバー量は 0.005 ~ 0.2 mm で変化させ、ステージ送り速度、スピンドル速度は板状試験片と同様で設定し、作製した。得られた冠試料をダイヤモンドディスクにて咬合面、頬舌側面、近遠心面に分割した。

加工した板状試験片のカスプスパン及び加工面の算術平均高さ(Sa)、冠試料の咬合面、頬舌側面、近遠心面の冠内面算術平均高さ(Sa)をレーザー顕微鏡(LEXT OLS4100)を用いて対物レンズ倍率 × 20 で計測した。更に板状試験片に対し、ISO 6872:2015 に則り、外部支点間距離 12.0mm、クロスヘッドスピード 1.0mm/min の条件で、万能試験器(AUTOGRAPH AG-X)を用いて 3 点曲げ試験を実施した。

データは両試料の表面粗さおよび曲げ強さにおける全群間の有意差を検出する為に Dunnett's T3 ペアワイズ比較事後検定 ($p < 0.05$) を用いた一元配置分散分析によって統計処理を行った。さらに、板状試験片の曲げ強さに関する各群の 95%信頼区間を比較、ステップオーバー量と表面粗さ間、表面粗さと曲げ強さ間でピアソンの積率相関処理を行い、 r 値(相関係数)を算出した。

3.2. 複雑な形態を有する支台装置の加工

上顎右側第二小臼歯が欠損したモデルを用いて、上顎右側第一小臼歯および第一大臼歯の支台歯形成を行った。支台歯形態はインレー型、L字型、D字型の3種類とした。支台歯形成後にシリコン印象材で印象採得を行い、コバルトクロム合金を用いて、3種類のマスターモデルを鋳造、製作した。3D スキャナーでマスターモデルをスキャンし、CAD/CAM ソフトウェア (DentalCAD, Exocad GmbH, Darmstadt, Germany) を使用して RBFDP のフレームワークを設計した。その後、歯科用ジルコニアディスク (Noritake Katana Zirconia HTML PLUS®, Kuraray Noritake Dental Inc., Tokyo, Japan) を 5 軸ミリングマシン (MD-500, Canon Electronics Inc., Tokyo, Japan) でミリングし、メーカー指示通り焼結した ($n=10$)。

マージン部の適合性の評価にはシリコンレプリカテクニックを用いた。ジルコニアフレームワークの接着面にブラックシリコンを塗布し、手指圧にてマスター模型に圧接した。硬化後、フレームワークとともにブラックシリコンを支台歯から撤去し、ブラックシリコンの上にホワイトシリコンで裏打ちした。シリコンレプリカをマスターモデルから撤去し、頬舌側および近遠心側方向に切断し、各フレームワークの 8 カ所のブラックシリコンの厚みを測定して、平均値をリテーナーマージンと窩洞とのギャップとした。

次に、マスターモデルとフレームワークの表面処理を行った後、接着性レジンセメント (Panavia V5®, Kuraray Noritake Dental Inc.) を用いて合着した。セメント硬化後、全ての試験片をサーマルサイクル ($5 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$, 6,000 回) と動的負荷 (50 N, 240,000 回) による加速劣化試験を実施した。その後、万能実験機 (Autograph AGS-H, Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) を用いてクロスヘッドスピード 2 mm/min で歯軸方向に引張試験を行い、ブリッジ脱離時の最大引張強さを計測した。走査型電子顕微鏡 (JSM-7900F, JEOL Ltd., Tokyo, Japan) で表面構造を観察してフレームワークの破損パターンの分類を行った。統計解析には、一元配置分散分析を用い、適合性の多重比較には Dunnett の T3 検定を、引張強度の多重比較には Bonferroni 法を用いた。なお、有意水準は 0.05 とした。

4. 研究成果

4.1. 切削加工条件の最適化

板状試験片をレーザー顕微鏡にて観察したところ、すべての試料において加工によるパー接触痕が認められ、カスプスパンは全群 設定されたステップオーバー量と同程度であった。また、BP は研磨紙の接触痕、SB はアルミナ粒子の均一な広がりが見られた。Sa は BP が最小、SB が最大の値、HQ はステップオーバー量が大きい程表面粗さが粗くなった。3 点曲げ強さは BP が最大、SB が最小の値を示したが、各試料間に統計学的な有意差は認められなかった。

次に、ステップオーバー量と表面粗さ、表面粗さと曲げ強さの、Pearson の積率相関係数を求めたところ、ステップオーバー量と表面粗さ間には高い正の相関が、表面粗さと曲げ強さ間には負の相関が認められた。表面粗さと曲げ強さの関係を各群の 95%信頼区間を比較して分析すると、BP、HQ ($HQ_0.01 \sim 0.2$)、SB の順で高い値を示した。また、HQ 群全てが SB の 95%信頼区間下限よりも高い値を示した。

冠試料の加工時間を求めたところ、加工機の推奨条件 ($HQ_0.05$) での加工には 12 分 20 秒を要し、ステップオーバー量が小さい程加工時間は長くなった。冠内面の咬合面、頬舌側面及び近遠心面の Sa を測定した結果、咬合面は頬舌側面及び近遠心面よりも高く、その順に減少した。咬合面及び頬舌側面はステップオーバー量の増加に伴い増加したが、近遠心面は約 $0.3 \mu\text{m}$ で一定となった。

レーザー顕微鏡にて観察されたカスプスパンは切削工具の動きの精度を示し、設定したステップオーバー量と比較したところ、一致した。このことは、本研究で使用した加工機のボールエンドミルの動作が精密に制御されていることを示している。本研究で得られた表面粗さは、ステップオーバー量の増加に伴い増加した。理論表面粗さ (R_z) はステップオーバー量から算出可能であり、CAD/CAM 用コンポジットレジンの表面粗さの傾向は過去の報告の傾向と一致した。しかしながら、計測値は理論値と一致せず、工具振動等の影響が原因と考えられる。

CAD/CAM 用セラミックス材料の曲げ強さは、表面粗さ増加に伴い低下すると報告されており、本研究結果も表面粗さの増加に伴い、曲げ強さが低下する傾向を示した。しかしながら、各群間に統計学的な有意差は認められなかった。また、各群の曲げ強さの 95%信頼区間を比較した結果、最も表面粗さが小さく、理想的な物性を示す鏡面研磨群と、最も表面粗さが粗く、臨床現場に供されるサンドブラスト処理群の曲げ強さの範囲内であった。すなわち、本研究で作製した種々の表面粗さを有する試料の曲げ強さは、全て臨床応用可能な範囲であり、切削加工法による曲げ強さへの影響は軽微である事が示唆された。

次に、ステップオーバー量の小臼歯冠の表面粗さに対する影響を検討する為、種々の条件にて切削加工した冠試料の表面粗さを評価した。板上試験片と同様に、ステップオーバー量減少に伴い表面粗さは減少したが、計測部位により異なる傾向を示した。加工物表面に対するボールエンドミルの傾斜角の増加に伴い、切削力とボールエンドミルの変位が増加することにより、加工面

の再現性に影響することが報告されている。歯冠補綴装置のように加工部位によりボールエンドミルの傾斜角が絶えず変化するような場合、本研究結果のように表面粗さの理論的な再現が困難になることが想定され、複雑な歯冠形態を再現する際に適した加工条件の設定が必要であることが示唆される。

また、表面粗さの傾向は板状試験片と冠試料とで異なっていたが、冠試料の表面粗さは種々の表面粗さを有する板状試験片の範囲内であった。すなわち、様々な条件で加工された冠においても十分な曲げ強さを有していることが示唆される。

以上より、滑沢な加工面はステップオーバー量を低下させる事で得られ、それにより冠表面の手研磨に要する時間を短縮されることが可能となる。しかしながら、ステップオーバー量を低下させる事で加工時間が大幅に長くなる為、求められる表面形状を得る為に最適な加工条件を選択する必要がある。また、加工条件は曲げ強さに及ぼす影響は軽微で、本研究で設定した条件は臨床的に許容できる事が示唆された。

4. 2. 複雑な形態を有する支台装置の加工

インレー型、L字型、D字型のマージン部のギャップの平均値±標準偏差は、それぞれ $59.8 \pm 7.5 \mu\text{m}$ 、 $63.5 \pm 6.1 \mu\text{m}$ 、 $110.2 \pm 16.8 \mu\text{m}$ であった。D字型のギャップは、インレー型およびL字型よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。

インレー型、L字型、D字型の引張強度の平均値±標準偏差は、それぞれ $221.8 \pm 118.0\text{N}$ と $156.4 \pm 85.8\text{N}$ 、 $433.8 \pm 230.1\text{N}$ であった。D字型の引張強度はインレー型とL字型よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。

引張試験後の破折様相および SEM による破断面の評価では、インレー型の全試料でセメント層の凝集破壊を伴う脱離が認められた。L字型では、10 試料中 8 試料がリテーナーウィングのコネクター付近で破折を示した。D字型 RBFDP では、10 試料中 9 試料で脱離 (8 試料で凝集破壊、1 試料で接着破壊) が生じ、1 試料で小白歯部での破折が認められた。

本研究の結果から、ジルコニア臼歯部 RBFDP の D字型の適合性は、インレー型とL字型より劣るが、維持力は優れていることが明らかとなった。このことは、良好な RBFDP の長期予後を得るためには、D字型リテーナーが適しているが、適合性には改善の余地があることを示唆している。

二次齧蝕と歯周病の予防のため、間接法により作製した補綴装置のマージンには良好な適合性が求められる。歯科用ジルコニアを用いて作製した補綴装置に関するシステムティックレビューの結果、マージン部のギャップは $48 \sim 141 \mu\text{m}$ であることが報告されている。本研究で作製したすべてのデザインのギャップの平均値はこの範囲内であったことから、適合性の点からは臨床応用が可能であることを示している。しかし、D字型のマージン部のギャップはインレー型およびL字型の約 2 倍であり、特に咬頭頂を取り囲む領域では最大で $198 \mu\text{m}$ であった。D字型リテーナーは内側性窩洞および外側性窩洞から構成されており、焼結中のジルコニアの収縮をコントロールするのが困難であるためと考えられる。最適な支台歯形成とリテーナーのデザインのさらなる検討が必要と考えられる。

本研究では引張試験の実施前に、サーマルサイクルと繰り返し加重による加速劣化試験を行った。口腔内に装着された補綴装置と合着セメントは、温度変化や咬合力による繰り返し荷重に暴露され、劣化する。本研究では 1 年間の臨床使用を想定した条件として、サーマルサイクル ($5 \sim 55^\circ\text{C}$) 6,000 回および 50 N、240,000 回の繰り返し荷重を実施した。臨床ではポンティックに対合歯とのコンタクトを付与しないこと推奨されているが、本研究では最も過酷な負荷を想定し、荷重点はポンティック中央とした。しかしながら、本条件下では、加速劣化試験中にフレームの明らかな破折や脱離は観察されなかった。

本研究ではD字型リテーナーの引張強度が最大で、次いで、インレー型、L字型であった。この結果は、先行研究で報告されている金属製 RBFDP と同様であり、本研究によりジルコニアにおいてもD字型が最も脱離に抵抗できるデザインであることが明らかとなった。一方、L字型は最も低い脱離抵抗を示し、大白歯コネクターの近位で破折した。これは過去の有限要素解析による研究で、応力がコネクターに集中する結果と一致している。本実験モデルでは、繰り返し荷重によりL字型のコネクター付近に応力が集中することでフレームが変形して、セメント層の崩壊とクラックが発生し、引張試験時にフレームのコネクター付近で破折して接着面積が減少したため、RBFDP の脱離に至ったと考えられる。

本研究は、臨床条件を想定して行ったが、以下の制約に留意する必要がある。加速劣化試験と引張試験の支台歯に Co-Cr 合金を使用したため、天然歯の破壊パターンや応力伝達を再現していない。また in vitro 実験と生体内での挙動の不一致を克服するための解決策として、応力分布推定に有用な有限要素解析を使用すること、生体の機械的特性と構造をシミュレーションする in vitro 実験方法の確立等が考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yin Yue, Nozaki Kosuke, Nemoto Reina, Saleh Omnia, Oishi Yayoi, Matsumura Mayuko, Komada Wataru, Miura Hiroyuki, Fueki Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Marginal fit and retention force of zirconia resin-bonded fixed dental prostheses in the posterior region with different designs	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Dental Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jds.2023.12.010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大石弥生, 根本怜奈, 駒田亘, 野崎浩佑, 笛木賢治
2. 発表標題 歯槽骨吸収症例におけるカンチレバー型接着ブリッジと歯周組織の応力解析
3. 学会等名 日本補綴歯科学会第132回学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 殷悦, 根本怜奈, 駒田亘, 野崎浩佑, 笛木賢治
2. 発表標題 歯科用ジルコニアを用いたD字型臼歯部接着ブリッジの適合性
3. 学会等名 日本補綴歯科学会第132回学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野崎浩佑, 松村茉由子, 谷中 航, 三浦宏之, 山下仁大, 若林則幸
2. 発表標題 切削抵抗の減少によるクラウンの内面適合の向上
3. 学会等名 第79回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松村茉由子, 野崎浩佑, 谷中航, Omnia Saleh, 宮坂宗永, 松村光明, 三浦宏之, 笛木賢治
2. 発表標題 CAD/CAM冠用コンポジットレジンブロックの切削抵抗に対する機械特性と加工条件の影響
3. 学会等名 日本デジタル歯科学会第13回学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松村茉由子, 野崎浩佑, 谷中 航, 進千春, Omnia Saleh, 瀧田美奈, 根本怜奈, 松 村光明, 三浦宏之 .
2. 発表標題 5軸制御によるCAD/CAM冠用レジンブロックの加工精度の向上 .
3. 学会等名 日 本補綴歯科学会第129回学術大会 .
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎浩佑, 谷中航, 松村茉由子, 進千春, 松村光明, 三浦宏之 .
2. 発表標題 CAD/CAM冠の適合性 を向上させる送り速度の最適化 .
3. 学会等名 日本デジタル歯科学会第11回学術大会 .
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野崎浩佑, 谷中航, 松村茉由子, 進千春, 山下仁大, 松村光明, 三浦宏之 .
2. 発表標題 送り 速度の最適化による CAD/CAM 冠の内面適合性向上 .
3. 学会等名 第75回日本歯科理 工学会学術講演会 .
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	野崎 浩佑 (Nozaki Kosuke) (00507767)	東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・講師 (12602)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------