

学位論文の内容の要旨

論文提出者氏名	牟田 早織
論文審査担当者	主査 荒川 真一 副査 水口 俊介、 吉田 恵一
論文題目	Chairside fabrication of provisional crowns on FDM 3D-printed PVA model
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本研究の目的は、3Dプリンタにより作製されたポリビニルアルコール (PVA) 樹脂製の模型を使用して調製した暫間被覆冠の寸法精度を評価することである。口腔内スキャナーを用いてマスター支台歯模型をスキャン後、Standard Triangulated Language (STL) データを取得した。さらに、当該データを基に Fused Deposition Modeling (FDM) 方式 (熱溶解積層方式/材料押出堆積方式) 3Dプリンタを用いて、Polyvinyl Alcohol (PVA) 模型を作製した。また、従来の方法と比較するため、シリコン印象材を使用してマスター模型を印象採得し、超硬質石膏模型を作製した。これらの2種の支台歯模型上で光重合型コンポジットレジン (グラディア、ジーシー) または常温重合レジン (キュアグレース、トクヤマデンタル) を用いて暫間被覆冠を作製した。超硬質石膏模型および PVA 模型の表面精度とそれぞれの模型上にて作製された暫間被覆冠の内面の精度は、3D デジタル解析、またそれぞれの模型上にて作製された2種類の暫間被覆冠のマスター模型に対する精度はシリコンによる適合試験にて測定した。その結果、FDM 方式 3D プリンタを用いた PVA 樹脂模型上で作製した暫間被覆冠の適合精度は、マージン部で平均 70~95μm であり、臨床的に許容できる精度であった。FDM 方式 3D プリンタと PVA 樹脂 (生体適合性が高く水溶性の特性を持つ) を組み合わせ、短時間で支台歯模型の作製が可能であることが明らかになり、今後の臨床応用への可能性が示唆された。</p> <p><緒言></p> <p>デジタルデンティストリーの技術革新により、口腔内スキャナーによる光学印象採得が可能となっている。従来の間接法による歯冠修復物の作製には、印象採得と模型の製作および技工操作のため、複数回の通院が必要であった。しかし、歯科用 Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing (CAD/CAM) と切削加工機の開発により1回の来院で修復物を作製するいわゆるワンデートリートメントが可能となっている。また、口腔内スキャナーと Stereolithography (SLA) や Digital Light Processing (DLP) 方式のような光造形方式の 3D プリンタを用いた模型作製も臨床応用されているが、器材が高価であり、従来の印象採得による模型の製作と同等の時間を要する。一方、FDM 方式 3D プリンタはプリンター本体と材料であるフィラメントも安価であり、材料のロスも少なく、プリント時間も切削加工や光造形方</p>	

式の 3D プリンタと比較して短時間である。しかし、FDM 方式の 3D プリンタのフィラメントとして用いられる材料は Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)、Poly Lactic Acid (PLA)、Polypropylene (PP) などが主流であり、歯冠修復物を製作するための模型材料として適さない。そこで、本研究では、生体適合性が高く水溶性である PVA 樹脂と FDM 方式 3D プリンタを使用し、歯冠修復物を製作するための模型を製作し、さらにその模型上で作製した修復物の臨床応用への可能性を模索した。

<材料・方法>

光学印象採得には口腔内スキャナー (LAVATDS、3M) を、3D プリンタには FDM 方式 3D プリンタ (Value 3D MagiX MF-1000、ムトー) を、積層フィラメントには PVA フィラメント (PVA1.75mm、ムトー) を用いた。また、3D プリンタを制御する CAM ソフトとしてプロンターフェイス (ムトー)、積層条件設定ソフトとして Slic3r (フリーソフト) を用いた。さらにマスター模型としては既形成メラミン人工支台歯 (A55A-461、ニッシン) を用いた。

印象採得と模型製作：

従来法として、シリコーン印象材 (フュージョン II、ジーシー) を用いてマスター模型を印象採得し、超硬質石膏 (ニューフジロック、ジーシー) にて作業用模型を作製した。一方、マスター模型を口腔内スキャナーを用いて光学印象採得し、得られた STL データをもとに 3D プリンタを用いて PVA フィラメントにて積層し、PVA 模型を作製した。次に、作製した超硬質石膏模型支台歯と PVA 模型支台歯を口腔内スキャナー (LAVATDS、3M) にてスキャニングし、STL データを取得した。

暫間被覆冠作製：

暫間被覆冠の製作には、歯冠形態の違いによる実験結果のばらつきを少なくするために、支台歯形成前のメラミン歯咬合面形態を透明シリコーンラバー印象材 (メモジル 2、クルツァー) にて印象採得して歯冠形態のコアを作製した。

超硬質石膏および PVA の模型支台歯にレジン分離材 (アクロセップ、ジーシー) を塗布し、歯冠形態のコアの内面に常温重合レジンまたは光重合型コンポジットレジンを充填後、模型支台歯に圧接した。暫間被覆冠硬化後、超硬質石膏模型では慎重に技工用バーで石膏を削除し、PVA 模型はスターラーを用いて水中で PVA を溶解させて暫間被覆冠を得た。

評価方法：

作業用模型の寸法精度は、超硬質石膏模型支台歯と PVA 模型支台歯の STL データの重ね合わせにより評価した。また、暫間被覆冠内面の寸法精度の評価は、2 種類の模型にて製作した常温重合レジン製暫間被覆冠内面の STL データ、または、2 種類の模型にて製作した光重合型コンポジットレジン製暫間被覆冠内面の STL データの重ね合わせにより評価した。さらに、適合試験は、マスター模型に暫間被覆冠をシリコーンにて適合させ、その厚みを評価した。また、さらに、PVA 模型表面の表面粗さも計測し、レジン分離材塗布前後で比較した。

1. STLデータの重ね合わせによる解析

1.1 作業用模型の精度

マスター模型（既形成メラミン人工歯）と比較模型（PVA模型と超硬質石膏模型）のSTLデータを口腔内スキャナー(LAVA TDS)を用いて取得し、CADソフト（アーテックスタジオ 11 プロフェッショナル、アーテック）にて最適な位置を選択して重ね合わせ、二乗平方根（RMS）差を算出し比較した。

1.2 暫間被覆冠内面の精度

PVA模型と超硬質石膏模型上で作製された暫間被覆冠内面のSTLデータを口腔内スキャナー(LAVA TDS)にて取得し、CADソフト（アーテックスタジオ 11 プロフェッショナル、アーテック）にて最適な位置を選択して重ね合わせ二乗平方根（Root Mean Square : RMS）差を算出し解析した。

2. 支台歯への適合試験

暫間被覆冠の適合性評価のため、白色と黒色の2種類のシリコーンゴム印象材（フィットチェッカー、バイトチェッカー、ジーシー）を暫間被覆冠内面に填入後、模型に圧接しシリコーンブロックを作製した。ブロックは頬舌的に切断し、4つの基準点：P1) マージンから150 μ m、P2) P1と変曲点の中間点、P3) 変曲点と咬頭頂の中間点、P4) 咬頭頂と中心窩の中間点の白色のシリコーンの画像を光学顕微鏡（SMZ1000, Nikon）にて取得し、画像解析ソフトウェアにて4つの基準点の厚さを測定した。計測は3回行い、平均値をその基準点の代表値とした。

3. PVA模型の表面粗さ

PVA樹脂はサポート材として用いられるため、表面が粗造となり模型を積層する材料としては適さないとされているそこで、3Dプリンタを用い板状のPVA試験片を作製し、レジン分離材（アクロセップ、ジーシー）を模型表面の粗さを共焦点レーザー走査顕微鏡（CLSM）を用いて計測し、塗布前後で比較した。

4. 統計解析

データは Shapiro-Wilk test にて正規性を確認後、模型と暫間被覆冠内面の重ね合わせでデータ（n=10）には t 検定を、シリコーンによる適合試験データ（n=10）とレジン分離材塗布前後の模型表面の粗さデータ（n=5）には、Bonferroni の方法により危険率を補正した Wilcoxon rank sum test と Wilcoxon signed rank test および Dunn's test を用いて、危険率 5%にて検定した。分析ソフトは統計ソフトウェア(SPSS ver 22.0 for Windows, IBM)を用いた。

<結果>

模型の重ね合わせの結果、マスター模型と超硬質石膏模型の RMS 値の差は平均 120 \pm 40 μ m であったのに対し、マスター模型と比較して、PVA 模型では咬頭頂部で小さく、軸壁で大きく、

RMS 値の差は平均 $310\pm 50\mu\text{m}$ であり、超硬質石膏模型と比較して有意に大きかった ($p<0.05$)。また、石膏模型または PVA 模型上で作製された、常温重合レジンまたは光重合レジンの暫間被覆冠内面の重ね合わせの結果、常温重合レジンの RMS 値の差は $240\pm 30\mu\text{m}$ 、光重合型コンポジットレジンでは $250\pm 40\mu\text{m}$ 示し、両者に有意差は認められなかった ($p>0.05$)。

マスター模型に対する暫間被覆冠の適合試験の結果、PVA 模型にて製作した暫間被覆冠のシリコーンの各計測部位 (P1~P4) の厚みは、平均約 $70\mu\text{m}$ から約 $95\mu\text{m}$ であり、超硬質石膏模型を用いて製作した暫間被覆冠では平均約 $25\mu\text{m}$ から約 $60\mu\text{m}$ であった。計測部位の違いによる計測材料間の比較では P1 (辺縁部) から P3 (軸方向) では、PVA 模型を用いて製作した暫間被覆冠に比べ、超硬質石膏模型で製作した暫間被覆冠のシリコーンの厚みが有意に薄かった ($p<0.05$)。しかし、P4 (咬合面) では PVA 模型と超硬質石膏模型を用いて製作した暫間被覆冠の適合精度には有意差は認められなかった ($p>0.05$)。また、すべての計測点でシリコーンの厚みは約 $100\mu\text{m}$ 以下だった。

PVA 試料の表面粗さ (Sa) は、レジン分離材塗布前後でそれぞれ $5.6\pm 0.72\mu\text{m}$ 、 $3.25\pm 0.68\mu\text{m}$ であり、塗布後有意に減少した ($p<0.05$)。

<考察>

マスター模型との模型寸法精度の比較では、超硬質石膏模型と比較して PVA 模型では RMS 値が平均 $200\mu\text{m}$ 劣っていることが明らかとなった。暫間被覆冠内面の寸法精度は、常温重合レジン暫間被覆冠とコンポジットレジン暫間被覆冠の内面の RMS 値には有意差が認められなかったことから、修復材料の違いは寸法精度に影響しないと考えられる。一方、シリコーンラバーによる適合試験結果では、PVA 模型にて製作した暫間被覆冠の適合精度は平均 $100\mu\text{m}$ 以下であり、臨床的許容範囲であると考えられる。これは、レジン分離材の塗布により PVA 模型の表面が滑沢になったことが要因であると考えられる。本研究結果から、FDM 方式 3D プリンタを用いて、診療室にて安価に短時間(この研究ではおよそ 60 分)で生体適合性を有した特殊材料を用い暫間被覆冠の作製が可能であることが示唆された。

<結論>

1. FDM 方式 3D プリンタを用いて PVA 支台歯模型が作製可能となり当該模型上で暫間被覆冠の作製が可能であった。
2. 製作した暫間被覆冠の適合精度は、マージン部で $70\sim 95\mu\text{m}$ であり、臨床的に許容できる精度であった。
3. FDM 方式 3D プリンタと生体適合性が高く水溶性である PVA フィラメントにて様々な模型が短時間で作製できる可能性が示唆された。

論文審査の要旨および担当者

報 告 番 号	甲 第 6022 号	牟 田 早 織
論文審査担当者	主 査 荒 川 真 一 副 査 水 口 俊 介、 吉 田 恵 一	
論 文 題 目	Chairside fabrication of provisional crowns on FDM 3D-printed PVA model	
<p>(論文審査の要旨)</p> <p>近年、デジタルデンティストリーの技術革新に伴い、歯科分野においても 3D プリンタの応用が進められているが、現在臨床応用されている口腔内スキャナーと SLA や DLP 方式のような光造形方式の 3D プリンタを用いた模型の作製は、器材が高価であり、従来の印象採得と模型製作と同等の時間を要する。一方、Fused Deposition Modeling (熱溶解積層方式/材料押出堆積方式; 以下 FDM) 3D プリンタは、プリンタ本体も材料であるフィラメントも安価であり、材料の無駄も少なく、プリント時間も切削加工や光造形方式の 3D プリンタと比較して短時間である。しかし、FDM 方式の 3D プリンタのフィラメントに用いられる材料は ABS、PLA、PP などが主流であり、歯冠修復物を製作するための模型材料として適さない。</p> <p>このような背景のもと、申請者は、上記の特徴を持つ FDM 方式 3D プリンタから歯科模型を再現し、この歯科模型上で作製された暫間被覆冠の内部適合性を評価し、臨床応用への可能性を模索した。歯科模型を作製するフィラメントとして、3D プリンタのサポートフィラメントとして用いられるポリビニルアルコール (Polyvinylalcohol: PVA) を用いたことは新しい試みである。PVA フィラメントは複雑な構造を形成する支持フィラメントとして一般的に使用されている高分子材料であり、複数の曲線と溝を持つナノ構造オブジェクトの設計に使用でき、かつ、生体適合性と水溶性のため医学分野でもすでに使用されている。本研究では、PVA フィラメントを用いて FDM 方式 3D プリンタから歯科模型を初めて作製することに成功したことは評価に値する。</p> <p>歯科模型と暫間被覆冠それぞれの 3D デジタル重ね合わせ画像解析とシリコーン印象材による暫間被覆冠内面適合性試験を行い、さらに模型と暫間被覆冠への分離材の影響もレーザー顕微鏡 (CLSM) にて表面性状測定した。従来の印象法と超硬質石膏模型による方法を比較対象としたこと、2 種類の加工法の異なる暫間被覆冠材料で評価したことも適切な計画といえる。得られたデータに対する統計学的解析も適切であり、十分な情報と知識を背景に周到な準備の下に本研究が計画、遂行されたと考えられる。</p> <p>得られた結果は以下の通りである。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 既形成メラミン支台歯マスター模型との重ね合わせ評価の結果、超硬質石膏模型の二乗平方根 (Root Mean Square : RMS) 値の差は、PVA 模型は咬頭頂部でマスター模型より小さく、軸壁で大きく、超硬質石膏模型と比較して有意に大きな値を示した。 		

2. 2種の模型材料上で作製された暫間被覆冠の内面重ね合わせの結果、その RMS 値の差は常温重合レジンと光重合型コンポジットレジンのいずれも同程度で、両者に有意差は認められなかった。
3. 暫間被覆冠の内部適合試験の結果、PVA 模型にて製作した暫間被覆冠のシリコーンの厚みは各計測部位において、超硬質石膏模型を用いて製作した暫間被覆冠の場合よりも大きい値を示した。
4. 辺縁部から軸方向の適合精度は、PVA 模型を用いて製作した暫間被覆冠と比較して、超硬質石膏模型を用いて製作した暫間被覆冠の方が優れていた。咬合面では、いずれの模型でも暫間被覆冠の適合精度には有意差は認められなかった。また、すべての計測点で内部適合性を示すシリコーンの厚みは約 100 μ m 以下であった。
5. PVA 試料の表面粗さ (Sa) は、レジン分離材塗布により有意に減少した。

本研究により、FDM 方式 3D プリンターを用いて PVA 模型が作製可能となり、その模型上で製作した暫間被覆冠の適合精度は、従来の石膏模型には劣るものの、臨床的に許容できる程度であることが明らかとなった。今後は、マージン部の適合度を向上させるべく改良を期待したい。FDM 方式 3D プリンターと生体適合性が高く水溶性である PVA フィラメントによる方法で作成した歯型模型をもとに暫間被覆冠作製までの一連の過程をおよそ約 60 分で完成できることが示された。

本研究で得られた結果は臨床的に非常に有益な知見であり、今後の歯科保存学、歯科材料学に寄与するものと考えられる。

したがって、本論文は博士（歯学）の学位請求論文として十分価値あるものと認められた。