

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32665

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17191

研究課題名（和文）光造形技術を応用した新規ノンメタル乳歯冠の研究開発

研究課題名（英文）Development of novel non-metal restorations for primary teeth by using vat photopolymerization.

研究代表者

岩崎 太郎（IWASAKI, Taro）

日本大学・歯学部・助教

研究者番号：60778281

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：近年、3Dプリントを活用した付加製造技術が歯科分野に広く応用されている。本研究では、液槽光重合法で造形された試料に対して各種材料試験（硬さ試験および3点曲げ試験）を行い、積層ピッチや積層方向などの造形条件が機械的性質に及ぼす影響について評価した。また、これらの造形条件が立方体試料や支台歯形態の試料の寸法精度に及ぼす影響についても評価を行った。

本研究から、造形条件は試料の機械的性質に影響を及ぼすことが示された。さらに、立方体試料の寸法誤差には積層ピッチや積層方向が影響し、積層ピッチの違いは支台歯のフィニッシュライン形態に影響を及ぼすことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、液槽光重合法における造形条件（積層ピッチや積層方向）が造形物の機械的性質や寸法精度に及ぼす影響について評価、検討を行った。その結果、液槽光重合法ではその用途に応じて積層ピッチや積層方向の最適な設定が必要であること、また、寸法誤差は造形条件や造形部位に影響を受けることが明らかとなった。これらの知見は、デジタル技術を応用した新規補綴装置開発の一助となると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Additive manufacturing technology as new applications for the dental fields has expanded rapidly in recent years. The purpose of this research was to investigate the effects of printing parameters, including layer thicknesses and printing orientations, on the mechanical properties of vat photopolymerization-based additively manufactured parts by hardness tests using a dynamic ultra-micro hardness tester, and three-point bending test using a universal testing machine. In addition, the effects of these parameters (layer thicknesses and printing orientations) on the accuracy of the parts were examined. The results showed that printing parameters affected the dynamic hardness, indentation elastic modulus, flexural strength, and flexural modulus. The layer thicknesses affected the shrinkage and expansion of the 3D printed cubic parts. Moreover, differences in layer thickness affected the morphology of the 3D printed abutment teeth, especially in the finish line.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：光造形法 CAD/CAM 歯科材料 補綴装置 機械的性質 適合

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乳臼歯部の歯冠修復処置には、即日修復が可能な乳歯用既製金属冠（以下、乳歯冠）が多く用いられている。特に臼歯部の失活歯や広範囲に実質欠損のある生活歯への歯冠修復には第一選択の治療法である。一方で、乳歯冠は金属材料であるため審美性が低いという欠点を持つ。今日、歯科治療を受ける小児患者とその保護者は、金属による歯冠修復を希望しないことも多く、審美性の高い新規ノンメタル乳歯冠の研究開発は急務の課題であるが、乳歯冠開発に向けた研究報告は少ない。

近年、歯科臨床では目覚ましいデジタル化の進展があり、現在では歯科用 3D プリンター（以下、3D プリンター）によってレジン系材料を層状に付着させ、三次元的に義歯床やプロビジョナルレストレーション等を製作する付加造形法が実用化されつつある。そこで本研究ではこの 3D プリンター技術に着目し、本技術を応用したレジン系材料による補綴装置製作のシステムを構築し、口腔内で十分に機能し適合性にも優れた新規ノンメタル乳歯冠を開発することを考えた（図 1）。

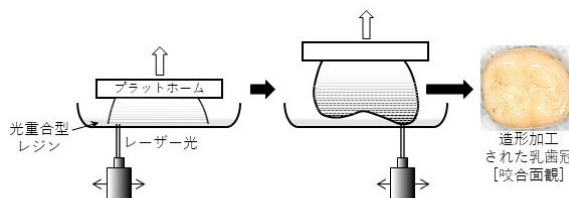


図1 歯科用3Dプリンターを応用した乳歯冠の製作イメージ

2. 研究の目的

本研究では、3D プリンターにより造形されたレジン硬化体の機械的・化学的性質を明らかにする。そして、口腔内を想定した数値シミュレーションによる歯冠デザインの最適化や、実際に造形加工した乳歯冠の支台歯との適合性について評価・検討を行う。さらには、デジタル技術により製作された補綴装置における支台歯テーパ角およびセメントスペースの設定値がその適合に及ぼす影響を評価することである。

3. 研究の方法

(1) 光造形法で製作された歯科用樹脂造形物の機械的特性および精度の評価

使用材料

本研究で用いた実験試料の 3D データは、CAD ソフトウェア (Solid works 2014, SolidWorks) にて作成し、バイナリ形式の STL ファイルで保存した。造形条件 (積層ピッチ, 積層方向) の設定は、3D プリント用ソフトウェア (PreForm 3.25.0, Formlabs) 上で行った。サポートの設定は密度 1, 接点サイズ 0.7 mm とした。積層ピッチは 25 μm , 50 μm および 100 μm の 3 条件とした。試料の造形に用いた AM 装置は、SLA 方式 3D プリンター (Form 3B+, Formlabs) で、XY 軸解像度は 25 μm である。造形材料にはウレタンジメタクリレートを主成分とする光硬化性樹脂 (Model V2, Formlabs) を用い、PreForm 3.25.0 上で最適化された設定の光照射時間などで各試料の造形を行った。造形後は製造者指示に従い、専用の洗浄機 (Form wash, Formlabs) と有機溶剤 (イソプロピルアルコール) による造形物表面に残留する未硬化樹脂の除去、さらに光重合器 (Form cure, Formlabs) を用いた二次硬化処理 (60 , 1 h) からなる後工程を行った。

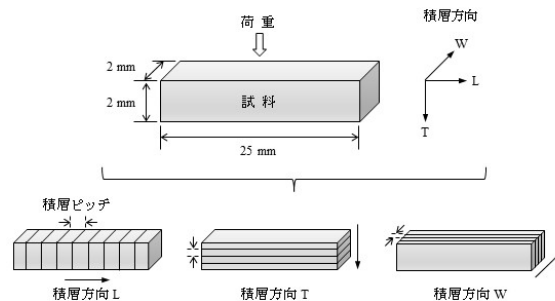


図2 試料と積層方向

材料試験

各試験に用いる試料 (25 × 2 × 2 mm) (図 2) はそれぞれの造形条件で製作を行った。サポート部を除去し、37 精製水中に 24 時間保管後試料とした (n = 11)。

1) ダイナミック硬さおよび押し込み弾性係数の測定

ダイナミック超微小硬度計 (DUH-211, 島津) を用いてダイナミック硬さ試験を行い、ダイナミック硬さおよび押し込み弾性係数を算出した。試料表面に Berkovich 圧子を押し込むことで負荷 - 除荷試験を行い、得られた荷重 - 押し込み深さ曲線から、塑性変形量 (hp) と弾性変形量 (he), それらの総和である全変形量 (ht = hp + he) を算出した。測定条件は、試験力 196.10 mN, 最小試験力 0.20 mN, 負荷速度 1.0 mN/秒, 負荷保持時間 15 秒, 除荷保持時間 15 秒とした。ダイナミック硬さ (DH) および押し込み弾性係数 (E) は次式を用いてそれぞれ算出した。なお、積層方向 L と積層方向 W の試験面は層状で同一であるため、積層方向 L と積層方向 T に対して試験を行った。

2) 曲げ強さおよび曲げ弾性係数の測定

試料の幅および厚さをデジタルノギス (Digimatic Caliper, Mitutoyo) を用いて測定した。各試料につき 3 点ずつ測定しその平均値を測定値とした。3 点曲げ試験は万能試験機 (TG-5kN, ミ

ネベアミツミ)を用いて行い、測定条件は、支点間距離 20 mm, クロスヘッドスピード 1 mm/min とした。試験で得られた最大荷重値から曲げ強さを、また得られた荷重 - 変位曲線の初期の傾きから曲げ弾性係数を算出した。

3) 試料表面の観察

各造形条件で造形された試料に対して Au-Pd 合金蒸着処理をイオンコーター (IB-5, エイコー) にて行い、その後加速電圧 15.0 kV の条件で走査電子顕微鏡 (S-3400N, 日立ハイテクノロジーズ) による試料の表面観察を行った。

4) 造形物の精度

各積層ピッチ (25 μm , 50 μm および 100 μm) で造形した図 2 に示すような立方体試料の幅 (x), 奥行き (y), 積層方向 (z) における寸法測定は、3 点曲げ試験で使用したデジタルノギスを用いて行い、設定値 (10 mm) に対する造形物の寸法誤差 (%) を算出した (n=5)。ここで寸法誤差とは、デジタルノギスで測定した実測値と設定値の差を、設定値で除した値の百分率である。次に、CAD/CAM 冠用の支台歯形態に準じた支台歯モデル (ソース CAD モデル) について、上記と同じく各積層ピッチで造形した。なお、支台歯の形態は、フィニッシュラインを全周 1.0 mm のディープシャンファー形態、軸面高さ 5 mm, 支台歯テーパ角 6° に設定した。造形した支台歯モデルは口腔外スキャナー (D2000, 3Shape) を用いてスキャニングを行い、それぞれ STL データを取得した。取得した STL データとソース CAD モデルを CAD ソフトウェア (Ansys spaceclaim, Ansys) 上に重ね合わせを行い、両者の差分を計測した (n=6)。

5) 統計解析

実験により得られた値は、正規性および等分散性を検定し、二元配置分散分析を行った。さらに検定結果を元に、Scheffé の多重比較検定を行った ($p < 0.05$)。

(2) 支台歯テーパ角とセメントスペースの設定値が補綴装置の適合におよぼす影響

支台歯の製作

上顎右側中切歯に対して、CAD/CAM (Computer aided design/computer aided manufacturing) 用コンポジットレジンブロックを用いた CAD/CAM 冠を装着することを想定し、フィニッシュラインを全周 1.2 mm のディープシャンファー形態および支台歯高径 8 mm に設計したチタン製支台歯模型を製作した (Tokyo giken)。支台歯は、テーパ角 4 度、12 度および 20 度 (以下、それぞれ DG4, DG12 および DG20) の 3 群に分類した (図 3)。

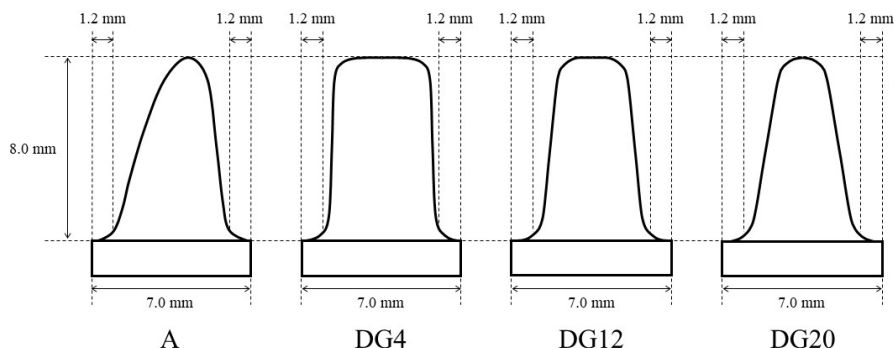


図 3 支台歯形態の模式図

CAD/CAM 冠の製作

CAD/CAM システム (Katana system, Kuraray noritake dental) の手順に従い、前歯部 CAD/CAM 冠を設計および製作した。各 CAD/CAM 冠は上顎右側中切歯を想定して幅径 8 mm, 高径 10 mm に設計した。セメントスペースは、10 μm , 50 μm および 90 μm (以下、それぞれ CS10, CS50 および CS90) の 3 群に設定した。設計した STL データに基づき、CAD/CAM 用コンポジットレジンブロック (Katana avencia N, Kuraray noritake dental) の切削加工を行い、前歯部 CAD/CAM 冠を製作した。製作された CAD/CAM 冠は、支台歯テーパ角 (DG4, DG12 および DG20) とセメントスペース (CS10, CS50 および CS90) の組み合わせによって計 9 群に分類し、各群の試料数はそれぞれ 11 個とした。

内面間隙量の測定

CAD/CAM 冠と支台歯間の内面間隙量の測定は、シリコンレプリカ法を用いた。歯科適合試験用材料 (Fit checker advanced, GC) を CAD/CAM 冠内面に塗布し、固定用ジグと定荷重試験機 (Ohba keiki) を用いて 5 N の圧力で CAD/CAM 冠を支台歯に固定した。歯科適合試験用材料硬化後、支台歯から CAD/CAM 冠と歯科適合試験用材料を一体として撤去した。続いて、それらの複合体内部に歯科汎用アクリル系レジン (Fixspeed, GC) を填入した。歯科汎用アクリル系レジン硬化後、歯科適合試験用材料および歯科汎用アクリル系レジンを一体として、CAD/CAM 冠内面から撤去した。一体となったものを歯科印象トレー用レジン (Tray resin, Shofu) を用いて包埋し、低速精密切断機 (IsoMet low-speed saw, Buehler) を用いて、矢状面で切断した。

切断して得られたシリコンレプリカ試料から、内面間隙量はレーザー走査顕微鏡 (1LM21W,

Lasertec)を用いて拡大率 100 倍で測定した。測定点は、辺縁部 2 点 (A および I)、軸面部 6 点 (B~D および F~H) および切縁部 1 点 (E) の計 9 点に設定した。辺縁部の測定点は、ディープシャンファアの中央に設定した (A および I)。軸面部の測定点は、軸面をそれぞれ均等に 3 分割した計 6 点に設定した (B~D および F~H)。切縁部は切縁の中央を測定点とした (E)。各試料において、各測定点近傍の任意な点を 10 か所測定し、合計 90 点の測定を行った。その 10 点の平均値を、各測定点の値とした。各試料における辺縁部の内面間隙量は 2 点 (A および I)、軸面部の内面間隙量は 6 点 (B~D および F~H) のそれぞれの平均値、および切縁部の内面間隙量は 1 点 (E) の値で決定した。

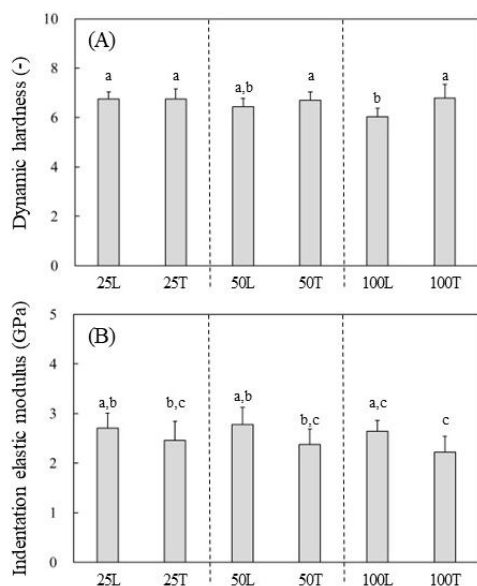
統計学的検討

得られたデータに対して Shapiro-Wilk 検定を用いて正規性を、Levene 検定にて等分散性を評価した。正規性および等分散性が得られなかったため、ノンパラメトリック検定を行った。Kruskal-Wallis 検定および Steel-Dwass 検定 (Kyplot 6.0, Kyens Lab) を用いて、支台歯テーパー角とセメントスペースそれぞれについて評価を行った ($p < 0.05$)。

4. 研究成果

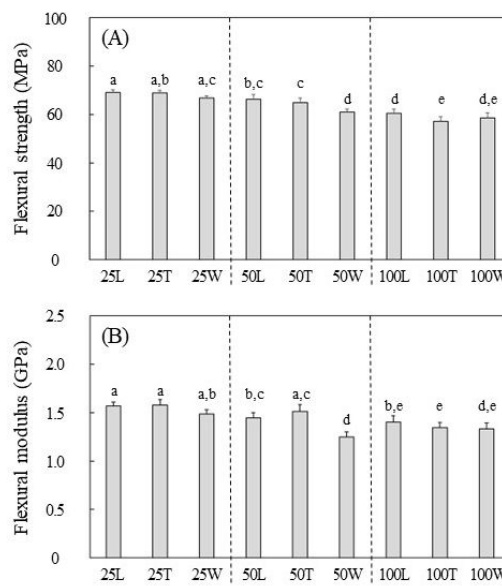
(1) 光造形法で製作された歯科用樹脂造形物の機械的特性および精度の評価

積層ピッチが増加するとダイナミック硬さは減少する傾向を示し、100L で有意に低い値を示した (図 4)。また、各積層方向 (L, T および W) の曲げ強さおよび曲げ弾性係数は積層ピッチの増加によって有意に低くなる傾向を示したことから (図 5)、大きな積層ピッチで造形された造形物ほど低い機械的性質を示すことが考えられた。造形条件 (積層ピッチや積層方向) が異なる造形物の機械的性質の結果より造形物の異方性を確認した。このことから液槽光重合法による造形物の製作にはその用途に応じて積層ピッチや積層方向の設定を考える必要があることが示唆された。



The same lowercase letters in each column indicate no significant difference ($p > 0.05$).

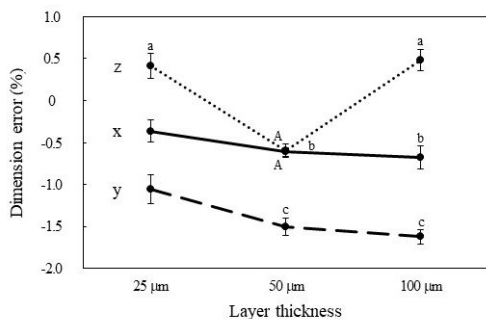
図4 ダイナミック硬さ (A) および押し込み弾性係数 (B)



The same lowercase letters in each column indicate no significant difference ($p > 0.05$).

図5 曲げ強さ (A) および曲げ弾性係数 (B)

立方体の造形物では、x, y 方向はいずれの積層ピッチにおいても設定値に比較し収縮した一方、z 方向は積層ピッチ 25 μm, 100 μm で寸法誤差が正の値を示した (図 6)。支台歯形態の造



x: width, y: depth, z: height
Same lowercase letters indicate no significant differences among samples that are the same orientations but different layer thicknesses at $p > 0.05$. Same uppercase letters indicate no significant differences among samples that are the same layer thicknesses but orientations at $p > 0.05$.

図6 各種層ピッチにおける試料の寸法誤差

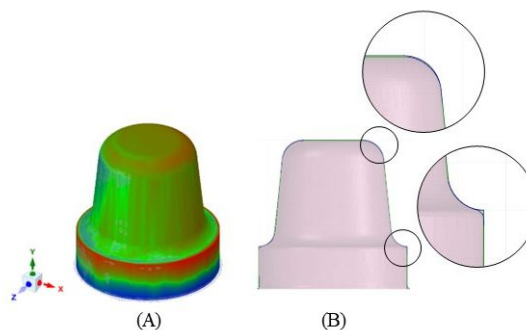


図7 STLデータとソースCADモデルの重ね合わせ(A)とその断面図(B)

形物では、特にフィニッシュライン形態に影響があり、積層ピッチ 100 μm で変形が最も大きかった (図 7)。すなわち、寸法の誤差は造形条件やその部位に影響を受けることが示唆された。

(2) 支台歯テーパ角とセメントスペースの設定値が補綴装置の適合におよぼす影響

すべてのセメントスペース群 (CS10, CS50 および CS90) において支台歯テーパ角が増加するに従って、辺縁部の内面間隙量は有意に小さい値を示した (表 1)。この結果から、支台歯テーパ角が前歯部 CAD/CAM 冠の辺縁部の適合に影響を及ぼすことが示唆された。軸面部ではすべての支台歯テーパ角において、設定したセメントスペースが増加するに従って、内面間隙量は大きい値を示した (表 2)。

表1 Marginal gap values (μm)

Total convergence angles	Cement space settings		
	CS10	CS50	CS90
	median (IQR)	median (IQR)	median (IQR)
DG4	154.0 ^{A,a} (148.0-169.7)	129.3 ^{B,a} (122.9-133.4)	84.3 ^{C,a} (78.8-92.9)
DG12	147.4 ^{A,b} (140.0-165.6)	122.8 ^{B,b} (111.0-130.9)	78.6 ^{C,b} (74.7-87.3)
DG20	141.1 ^{A,c} (136.3-148.6)	114.4 ^{B,c} (102.6-124.2)	75.2 ^{C,c} (72.2-78.8)

Data are listed as median and IQR (interquartile range) values.
 Within a row, median values with different uppercase superscript letters differed significantly ($P < 0.05$). Within a column, median values with different lowercase superscript letters differed significantly ($P < 0.05$).
 Total convergence angles: DG4, 4 degrees; DG12, 12 degrees; and DG20, 20 degrees.
 Cement space settings: CS10, 10 μm; CS50, 50 μm; and CS90, 90 μm

表2 Internal gap values (μm)

Total convergence angles	Cement space settings		
	CS10	CS50	CS90
	median (IQR)	median (IQR)	median (IQR)
Axial area			
DG4	56.3 ^{A,a} (51.2-63.0)	80.2 ^{B,a} (64.1-95.0)	101.2 ^{C,a} (97.6-108.4)
DG12	58.5 ^{A,a} (46.6-69.8)	84.0 ^{B,a} (69.8-99.8)	98.5 ^{C,b} (95.8-103.4)
DG20	85.0 ^{A,b} (66.4-94.3)	96.1 ^{B,b} (76.6-109.4)	103.3 ^{C,a} (97.3-108.2)
Incisal area			
DG4	236.2 ^{A,a} (217.5-266.4)	225.9 ^{A,a} (206.2-247.5)	260.1 ^{A,a} (196.4-279.3)
DG12	273.6 ^{A,b} (260.3-290.0)	207.7 ^{B,a} (183.2-254.6)	231.2 ^{B,a} (196.1-257.3)
DG20	259.2 ^{A,a,b} (242.9-276.7)	242.9 ^{A,B,a} (215.2-257.9)	224.2 ^{B,a} (206.7-246.8)

Data are listed as median and IQR (interquartile range) values.
 Within a row, median values with different uppercase superscript letters differed significantly ($P < 0.05$). Within a column, median values with different lowercase superscript letters differed significantly ($P < 0.05$).
 Total convergence angles: DG4, 4 degrees; DG12, 12 degrees; and DG20, 20 degrees.
 Cement space settings: CS10, 10 μm; CS50, 50 μm; and CS90, 90 μm

CAD ソフトウェア上でのセメントスペースの設定値 (10 μm, 50 μm および 90 μm) と得られた内面間隙量を比較すると、これらの差は CS10 で約 50 μm, CS50 で約 30 μm および CS90 で約 10 μm となり、支台歯テーパ角にかかわらず、セメントスペースが増加するに従って、小さい値を示した。すなわち、セメントスペースの設定値が増加するに従って、その設定値に近似する内面間隙量が得られた。CS90 群では、すべての支台歯テーパ角で辺縁部の内面間隙量は 120 μm 以下を示した。辺縁部の適合において、CS90 群で支台歯テーパ角 (4 度, 12 度および 20 度) にかかわらず、臨床応用可能であることが示唆された。CS10 および CS50 群では、すべての支台歯テーパ角において、軸面部の内面間隙量は 56.3 ~ 96.1 μm の範囲であった。また、CS90 群における軸面部の内面間隙量も、支台歯テーパ角にかかわらず臨床的に許容される範囲であった。以上より、支台歯テーパ角およびセメントスペースの設定値は、前歯部 CAD/CAM 冠の適合に影響を及ぼすこと、軸面部ではセメントスペースの設定値が大きいほど、その設定値に近似する内面間隙量を示すこと、辺縁部の適合の観点から、セメントスペースの設定値は 90 μm が適していることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keigo Ito, Taro Iwasaki, Jin Kitani, Junichi Honda, Kei Kubochi, Futoshi Komine	4. 巻 66
2. 論文標題 Influence of different convergence angles of abutment teeth and cement spaces on internal adaptation of anterior CAD-CAM fixed dental prostheses	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of oral science	6. 最初と最後の頁 55-59
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2334/josnusd.23-0321.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岩崎太郎, 北川剛至, 永田俊介, 谷本安浩	4. 巻 42
2. 論文標題 4.液槽光重合法における造形条件が歯科用樹脂造形物の機械的性質および寸法精度に及ぼす影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本歯科理工学会誌	6. 最初と最後の頁 179-187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 岩崎太郎, 永田俊介, 高橋治好, 吉田浩輝, 谷本安浩
2. 発表標題 3Dプリンティング技術を応用したデンタルマテリアルの基礎的検討 - 液槽光重合法における造形条件がその機械的性質に及ぼす影響 -
3. 学会等名 第22回日本大学口腔科学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taro Iwasaki, Shunsuke Nagata, Haruyoshi Takahashi, Yasuhiro Tanimoto
2. 発表標題 Effect of printing parameters on flexural properties of dental resin printed by vat photopolymerization
3. 学会等名 International Dental Materials Congress 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川剛至, 岩崎太郎, 高橋治好, 谷本安浩
2. 発表標題 光造形法における造形条件が造形物の寸法精度に及ぼす影響
3. 学会等名 第81回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------