

令和 5 年 6 月 25 日現在

機関番号：32710

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K10081

研究課題名(和文) 最適構造設計とレーザー焼結積層造形による補綴装置製作デジタルワークフローの展開

研究課題名(英文) Development of a digital workflow for fabrication of prosthetic devices using optimal structural design and laser sintering additive manufacturing

研究代表者

大久保 力廣(Ohkubo, Chikahiro)

鶴見大学・歯学部・教授

研究者番号：10223760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：可撤性有床義歯のフルデジタル製作を目指し、まずは義歯構成要素の中でも特に製作が困難なクラスプと義歯床に関して、臨床応用が可能となる加工条件と実際の維持力や適合精度を確認した。次に、高強度素材を用いた挙上副子と一般的な金属床パーシャルデンチャーのフルデジタル製作を試み、合理的な技工プロセスを探索しながら臨床応用の可能性を検証した。さらに本研究の最終目標であるフレームワークのトポロジー最適化に関しては、最もシンプルな加力計画の基に、CADとCAEを繰り返すことにより最適構造設計を行い、実際にCo-Cr合金粉末を用いてフレームワークを積層造形後、義歯として完成し口腔内に装着した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

義歯の製作をフルデジタルで製作するにあたり、個々の義歯構成要素をデジタル製作による基礎的研究を実施し、最適な製作方法を模索した。その結果、支台装置と義歯床のデジタル製作に関する研究成果を報告した。デジタル技術を用いた臨床応用に対しては、まず通法では製作困難なグラスファイバー強化型レジンを用いた咬合挙上副子のデジタル製作を行った。また、デジタルワークフローで製作したパーシャルデンチャーの装着とトポロジー最適化によりデジタル製作したオーバーデンチャーの装着を試みた。この結果より、ジェネラティブデザインとレーザー焼結積層造形を組み合わせたデジタルワークフローの臨床応用への道が開けた。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to develop the full digital fabrication method for removable dentures. Firstly, basic experiments were conducted on the processing accuracy of clasps and denture bases, which are difficulty fabrication in the denture components. The retentive force and fitting accuracy were confirmed. Next, full-digital fabrications of an occlusal splint using high-strength materials and a removable partial denture were attempted, and the possibility of clinical application was verified while exploring rational laboratory processes. As final goal of this study, the topology optimization of the framework, namely, the optimal structural design was performed by repeating CAD and CAE based on the simplest loading situation on the denture. After the framework was additively manufactured according to the topology 3D data using the Co-Cr alloy powder, overdenture was completed and delivered to the partially edentulous patient.

研究分野：歯科補綴学

キーワード：トポロジー最適化 3D形状データ CAD CAE CAM 積層造形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの義歯製作は術者の経験と勘による補強対策のみが行われていた。筆者らは義歯の理想構造を追求し、建築材料力学や橋梁構造を参考にフレームワークの立体的構築を提唱してきた(日補綴歯会誌 1989, 1992, 1996, *J Prosthet Dent* 1997, *J Oral Rehabil* 2001)。

しかし、製作法が鋳造に限定されていたため、二重構造、トラス構造、T字構造などの定型的な基本構造を応用するにとどまり、患者の口腔内条件をもとに数理計算に裏付けされた最適な構造設計には至らなかった(*Prosthodont Res Pract* 2003)。そこで、昨今の著しいデジタル技術革新を背景に、デジタルの特性を活かした義歯の適合精度と強度の向上を目指してきた(*J Prosthodont* 2018, *J Prosthet Dent* 2018)。他方、建築、工業界ではトポロジー最適化により、合理的かつ効率的な鉄筋、骨組みの設計から画期的な構造物の製作ができるようになってきた。歯科においても CAD/CAM 技術の導入によりレーザー焼結積層造形が試行されており、鋳造では不可能であった複雑な立体構造や中空構造も造形可能になり待望の最適構造設計への道が開けた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、補綴装置のフルデジタル製作システムの確立を目指し、まずは個々の義歯構成要素や簡単な補綴装置の製作を行うことである。最終的にはトポロジー最適化と口腔諸組織の3次元有限要素応力解析を導入し、ジェネラティブデザインとレーザー焼結積層造形を組み合わせたデジタルワークフローを構築することを目的とする。

ワークフローの内容は、口腔内の3D形状データを作成、CADによる義歯機能を優先したフレームワークの従来型基本設計と製作、実際にCAD/CAMで製作された補綴装置あるいは構成要素の検証、フレームワークのトポロジー最適化、最適化データをCAMに出力しレーザー焼結積層造形、トポロジー最適化された補綴装置の口腔内装着である。

3. 研究の方法

(1) デジタル製作したクラスプの検証

試料の製作

支台歯模型を3Dスキャナーにてスキャン後、3次元形状データからCADソフトを用いてエーカースクラスプを設計し、STLデータを作成した。クラスプデザインは上部にレストを設け、鉤先端のアンダーカットを0.25mm、鉤腕の長さを12.0mmとし近遠心幅径1/2からアンダーカット領域を走行するように設計した。材料には純チタン2種(CP2)、純チタン4種(CP4)、Ti-6Al-4V、多軸鍛造純チタン(Multi Direction Forging: MDF)を使用して切削加工にてクラスプ形状に加工した。

非破壊検査

実験前に完成したクラスプ試料をX線115kV、70mの放射線検査装置にて内部構造を観察した。得られた画像は画像処理ソフトウェアにて処理した。

表面粗さの測定

非接触三次元測定装置(NH-3N)を用いてクラスプ内面の10か所を想定し平均値を求めた。測定ピッチは5 μ m、測定距離は2mm、カットオフ値は0.8 μ mの条件下で表面粗さを測定した。

適合試験

適合性はクラスプとステンレス金型の間隙をシリコン印象材を用いて記録する方法を採用した。適合状態を2種類のシリコンラバー印象材を用いて、鉤尖、鉤肩、レストの3か所を切断し断面のクラスプと金型の間隙を万能投影機(V-16E)にて測定した。

維持力の測定

万能型引張試験機(EZ-S-200N)を用いてクロスヘッドスピード50mm/minにて引張試験を行った。また、繰り返し脱着試験装置(JM100-T)を用いてクロスヘッドスピード950mm/minにて、クラスプの着脱を10,000回まで繰り返し、1,000回ごとに維持力を測定し、維持力の変化を観察した。

(2) 3Dプリンターにより積層造形したレジン床義歯の精度検証

試料の製作

試料は上顎無歯顎石膏模型上で常温重合レジンを用いて基礎床を製作した。基礎床の粘膜面と研磨面をスキャンし、これらのSTLデータをCADソフトウェアで合成して仮想義歯床の形状データを作成した。基礎床の粘膜面を3Dプリンターのステージが平行となるように設計したものを0 $^{\circ}$ とし、造形角度を45 $^{\circ}$ ずつ変化させ、135 $^{\circ}$ まで8条件の設計を行った(図1)。義歯床試料は紫外線重合型義歯床用液体樹脂(DENTCA Denture Base II, DENTCA Inc.)を使用し、SLA方式を採用した3Dプリンタ(ZENITH U, OPT)とForm 2とDLP方式のcaraの3台のプリンタを使用して造形した。

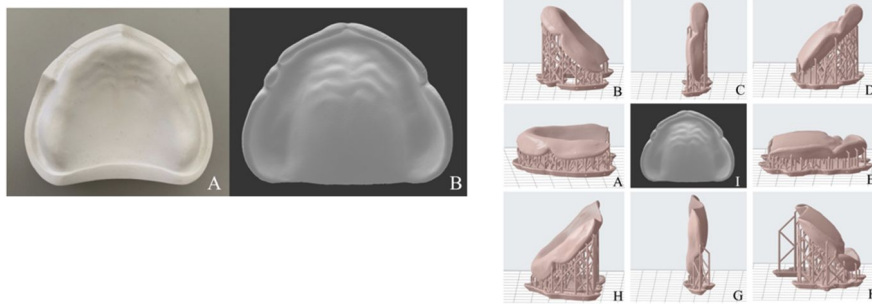


図1 造形角度を変化させ積層造形した基礎床試料

適合試験

完成した資料の粘膜面をラボスキャナー（R700, 3shape）にてスキャンし、得られた STL データを画像マッチングソフト（Geomagic design X, 3Dsystem）にて解析し、石膏の粘膜面とコンピュータ上で重ね合わせ、算出された差分を真度と適合性として評価した。

(3) デジタルワークフローの臨床応用

巨大舌にデジタル製作した咬合挙上副子

舌の肥大化により上下顎に咬合接触が存在せず、咀嚼困難を主訴とするアミロイドーシス患者に対し、グラスファイバー強化型レジン（トリニアディスク，松風）をミリング加工して上下顎咬合挙上副子を製作した。前回と同様に常温重合レジンに咬合面に築盛して咬合接触を付与し、咬合挙上副子を完成させた（図2）。

光学印象とCAD/CAMを用いて咬合挙上副子を製作し、咀嚼機能の改善を図った。



図2 上下顎のCAD/CAM製咬合挙上副子と口腔内装着状態

デジタルワークフローで製作したパーシャルデンチャー

フレームワークは3Dデータをもとに、チタン合金（Ti-6Al-4V Grade5, AP&C, Montreal, Canada）を用いて Selective Laser Melting（SLM）法による積層造形（Conceptreser M2, GE, Boston, MA, USA）により製作した（図3）。



図3 積層造形により製作したチタン合金フレームワーク

フレームワークを口腔内に試適後、オルタードキャスト法により欠損部粘膜面の咬合圧印象を行った。

人工歯排列後、スキャナーを用い義歯床部の3Dデータを製作した。PMMAディスクを切削加工し、ミリング法により義歯床部を製作し、義歯床ソケット部に常温重合レジンで人工歯を接着した。

完成した義歯を口腔内に装着した、適合試験を行い良好な適合状態が得られた（図4）。



図4 新義歯装着時の口腔内とフレームワークの適合状態

トポロジー最適化により構造設計したオーバードンチャー

上顎6歯支台のオーバードンチャーに対して、支台歯を支点としてモーメントを拘束し、人工歯すべてに等分布で咬合力が作用する加力計画を設定し、CADとCAEを繰り返すことにより、フレームワークのトポロジー最適化を行った(図5)。得られたSTLデータからCo-Cr粉末を用いてフレームワークを積層造形し、完成させた(図6)。

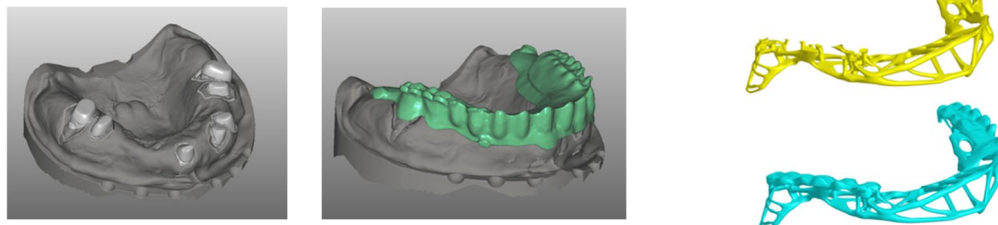


図5 従来型フレームワークデータを基にしたトポロジー最適化の予備的設計
(患者の固有データをまったく含まないシミュレーション原理)



図6 トポロジー最適化を行ったフレームワークを有するオーバードンチャー

4. 研究成果

(1) デジタル製作したクラスプの検証

非破壊検査

マイクロCTによるクラスプ資料の内部構造の観察では、鋳造法によるクラスプには内部気泡が見られたが、切削加工では内部気泡は認められなかった。

表面粗さの測定

切削加工したクラスプ表面は鋳造と比較して有意に低い表面荒さを示した($p < 0.05$)。

適合試験

レスト部では良好な適合性を示した($p < 0.05$)。繰り返し着脱試験後では着脱前と比較して鉤腕、鉤尖部で適合が低下する傾向を認めたことから、鉤腕の変形が生じていることが推測された。

維持力の測定

初期維持力の結果ではTi-6Al-4Vが最も高い維持力を示し、ついで純チタン4種(CP4)、多軸鍛造純チタン(Multi Direction Forging:MDF)の順であったが、有意差は認められなかった($p > 0.05$)。一方、切削加工純チタン2種(CP2)、鋳造純チタン2種(CP2)は有意に低い維持力を示した($p < 0.05$)。維持力の経時的変化では、10,000回着脱後にすべての条件で維持力は低下する傾向が認められたが、Ti-6Al-4V、純チタン4種(CP4)、多軸鍛造純チタンでは6.5~9.0Nの維持力を示した。

(2) 3Dプリンターにより積層造形したレジン床義歯の精度検証

加工法の中ではミリングが最も高い真度と適合性を示し($p < 0.05$)、従来法と3Dプリンティングでは真度に大きな差はないものの、3Dプリンティングの方が適合精度は良好であった。8つの造形角度に関して分析した結果、義歯床全体では、45°と225°が最も優れた真度を示し、0°と180°の真度は有意に劣っていた($p < 0.05$)(図7)。口蓋部では義歯床全体の結果と同様に225°と45°が最も優れた真度を示したが、

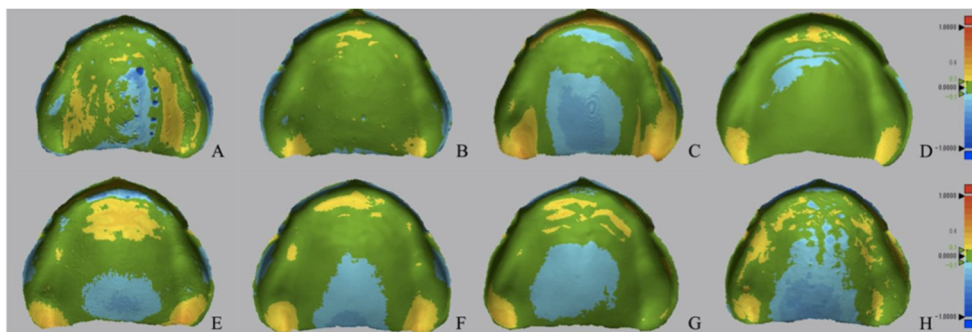


図7 造形角度45°と225°が最も優れた真度と適合精度を示した。

(3) デジタルワークフローの臨床応用

巨大舌にデジタル製作した咬合挙上副子

CAD/CAM により製作した咬合挙上副子の適合状態は非常に良好で、ミリング加工の高い精度が確認できた。今後も舌の肥大化と残存歯の変位、咬合挙上副子の適合や咬合接触について、引き続き長期における経過を観察する所存である。

デジタルワークフローで製作したパーシャルデンチャー

光学印象と CAD/CAM を適用したパーシャルデンチャーの支台装置、連結装置、義歯床の適合性は良好であり、咬合力と咬合バランスも良好であり、患者も高い満足を示した（図 8）。



図 8 新義歯装着時の適合試験と術後の機能評価

トポロジー最適化によりデジタル製作したオーバーデンチャー

充実型フレームワークおよびトポロジー最適化を行った義歯を 2 床製作し、患者に提供したところ、患者はトポロジー最適化の義歯を使用し続けている（図 9）。



図 9 患者が選択し使用し続けているトポロジー最適化義歯

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yoshidome K, Torii M, Kawamura N, Shimpo H, Ohkubo C.	4. 巻 64
2. 論文標題 Trueness and fitting accuracy of maxillary 3D printed complete dentures.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	6. 最初と最後の頁 559-564
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2186/jpr.JPR_D_20_00240	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 -

1. 著者名 Maruo R, Shimpo H, Kimoto K, Hayakawa T, Miura H, Ohkubo C.	4. 巻 41
2. 論文標題 Fitness accuracy and retentive forces of milled titanium clasp.	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Dental Materials Journal	6. 最初と最後の頁 414-420-
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.4012/dmj.2021-285	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 -

1. 著者名 Suzuki Y, Harada N, Maruo R, Imaizumi N, Muto R, Shimpo H, Kurihara D, Ohkubo C.	4. 巻 31
2. 論文標題 A clinical case of implant overdenture with magnetic attachment using CAD/CAM technology	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of the Japanese Society of Magnetic Applications in Dentistry	6. 最初と最後の頁 27-31
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉留五喜, 武山丈徹, 高山洋彰, 渡邊健一, 河村 昇, 大久保力廣
2. 発表標題 巨大舌にデジタル製作した咬合挙上副子を適応した1症例
3. 学会等名 一般社団法人日本デジタル歯科学会第12回学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉留五喜, 武山丈徹, 高山洋彰, 渡邊健一, 河村 昇, 川井善之, 大久保力廣
2. 発表標題 CAD/CAM咬合挙上副子を適用した巨大舌(アミロイドーシス)の1症例
3. 学会等名 公益社団法人日本補綴歯科学会第130回記念学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸尾亮太, 鳥居麻菜, 新保秀仁, 大久保力廣
2. 発表標題 切削加工により製作したチタンクラスプの適合性と維持力
3. 学会等名 公益社団法人日本補綴歯科学会第130回記念学術大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸尾亮太, 新保秀仁, 木本克彦, 大久保力廣
2. 発表標題 切削加工により製作したチタンクラスプの適合性と維持力
3. 学会等名 令和3年度公益社団法人日本補綴歯科学会西関東支部・東関東支部合同学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 丸尾亮太, 新保秀仁, 大久保力廣
2. 発表標題 切削加工により製作したチタンクラスプの適合性と維持力
3. 学会等名 一般社団法人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 鈴木恭典, 原田直彦, 武山丈徹, 新保秀仁, 栗原大介, 大久保力廣
2. 発表標題 新しいデジタルワークフローで製作したパーシャルデンチャーの1症例
3. 学会等名 一般社団法人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 大久保力廣
2. 発表標題 積層造形技術の歯科分野への応用 金属光造形による補綴装置の現状と将来展望
3. 学会等名 金属光造形複合加工医療機器フォーラム 10周年記念シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大久保力廣
2. 発表標題 デジタルデンチャーの現状と未来
3. 学会等名 一般社団法人日本臨床歯科CAD/CAM学会第8回学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2022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	新保 秀仁 (Simpo Hidemasa) (40514401)	鶴見大学・歯学部・学内講師 (32710)	

6. 研究組織（つづき）

	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	鈴木 恭典 (Suzuki YAsunori) (70257335)	鶴見大学・歯学部・准教授 (32710)	
研究分担者	栗原 大介 (Kurihara Daisuke) (70535773)	鶴見大学・歯学部・学内講師 (32710)	

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