

令和 6 年 6 月 25 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：20K10068

研究課題名（和文）区画化型スキャンストラテジーを駆使した歯科補綴装置の高機能・長寿命化

研究課題名（英文）Research Aiming for High Functionality and Longevity of Dental Prostheses by applying island-scanning Strategy

研究代表者

高市 敦士（Takaichi, Atsushi）

東京医科歯科大学・東京医科歯科大学病院・講師

研究者番号：30707047

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）：粉末床溶融結合法であるSelective Laser Melting法（SLM）法を用いてブリッジを製作する際、新たに考案した支台装置毎に区画化をしてレーザー照射する方法（区画化法）による支台装置の適合性および残留応力への影響を評価した。その結果、4ユニットブリッジでは通法と比較し区画化法で良好な適合精度を示し、特にマージン部に関しては適合精度が有意に改善した。レーザースキャンベクトルが短くなる方向で残留応力の低下が認められ、区画化境界（クラウンとポンティックの連結部）においてはいずれのブリッジにおいても残留応力の減少が認められ区画化法の有用性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

SLM法は複雑形状の金属製歯科補綴装置製作の有望な製作手段であるが、大型の歯科補綴装置になるほど適合性が悪くなることが報告されており、その原因として造形中の残留応力の存在が指摘されてきた。今回新たに考案した方法では適合性を損なう原因となる残留応力の低減が図られ、結果としてブリッジのマージンの適合性が改善された。今回得られた結果より、SLM法を用いた歯科補綴装置製作の適応範囲が拡大され、CAD/CAM技術を用いた歯科補綴装置製作における質の標準化に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：When producing a fixed partial denture (FPD) using the Selective Laser Melting (SLM) method, a powder bed fusion process, a new method applying the island scan strategy was applied, and the effect of the new method on the adaptation of the FPDs and the residual stress were evaluated. As a result, in the case of a 4-unit FPDs, the new method showed good adaptation accuracy compared to the conventional method, particularly demonstrating a significant improvement in the margin area. A decrease in residual stress was observed in the direction where the laser scan vector became shorter, and a reduction in residual stress was observed at the partitioning boundary (the connection between the crown and pontic) in all bridges, suggesting the usefulness of the new developed method.

研究分野：歯科補綴

キーワード：粉末床溶融結合法 Selective laser melting スキャンストラテジー 残留応力 適合性 ブリッジ

1. 研究開始当初の背景

粉末床溶融結合法の Selective Laser Melting (SLM) 法は、高出力のレーザーを粉末材料に照射し溶融凝固させた薄い層を積み重ねることで 3 次元的な製品を製造する技術である。本技術により複雑な形状でも半自動的に直接製造が可能で歯科補綴装置製作に応用されている。歯科補綴装置が口腔内で長期的に機能を維持するには優れた高い適合性が求められる。SLM 法で製作した歯科補綴装置は従来の歯科鑄造法と比較して、単純なクラウン構造では適合精度が優れているという報告が認められる。しかしながら、ブリッジや義歯メタルフレームなどの複雑で大きな補綴装置では従来方法より劣っており、未だ臨床応用例が非常に少ないのが現状である。SLM 法では造形過程において金属粉末の溶融・凝固を繰り返すため、造形体に急激な温度勾配に起因した残留応力が発生し、変形が生じることが明らかになっている (図 1)。さらに造形体の変形は形状が大きくなる程顕著に現れるとされている。

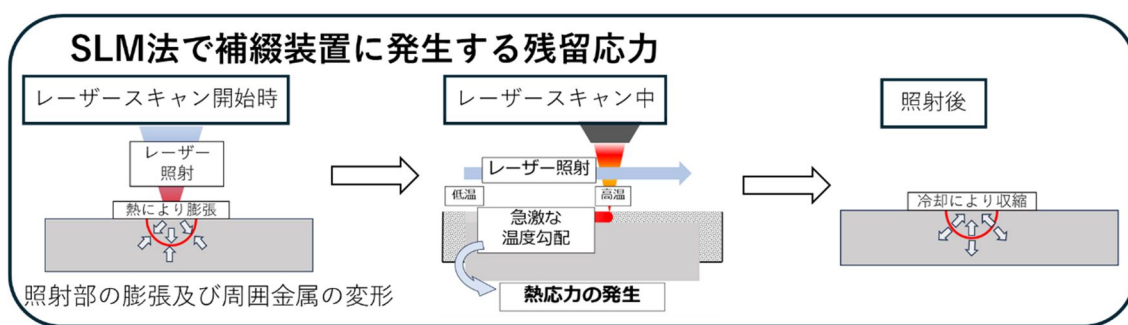


図 1. SLM 法における残留応力の発生機序

そのため変形の生じやすい大型の歯科補綴装置の適合性の向上には、造形中の残留応力を低減する方策が有効であると考えられる。残留応力を低減する方策として各層毎にレーザーの走査方向を変える方法やレーザー走査距離を短くすることが有効であることが報告されている。歯科補綴装置製作においてはメーカー推奨条件で行われており、歯科補綴装置特有の設計に特化した戦略的レーザー走査法の究明と高機能・長寿命化への試みは見受けられない。

2. 研究の目的

本研究では、新たに考案した補綴装置の構造レベルで区画化するレーザー走査法を用いて、残留応力の低減および歯科補綴装置の適合性への影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

下顎右側第一小白歯 (44) と下顎右側第一大臼歯 (46) を支台歯とした 3 ユニットブリッジおよび下顎右側犬歯 (43) と 46 を支台歯とした 4 ユニットブリッジを想定して試料を製作した。形成後の支台歯模型を顎模型に装着した状態でデジタルスキャナを用いて模型の STL データを作成した。次に CAD ソフト (EXOCAD, EXOCAD 社) を用いてブリッジフレームワークの設計を行い、Co-Cr 粉末 (MP-1, EOS 社) を SLM 装置 (EOSINT M270, EOS) に供し製作した。区画化法では、3 ユニットブリッジ試料はブリッジを 44, 45, 46 の 3 区画に、4 ユニットブリッジ試料では 43, 44 と 45, 46 の 3 区画にそれぞれ区別しレーザー走査を区画ごとに行い造形した (図 2)。各区画のレーザー走査は、ポンティック区画を先に行い続いて 44, 46 の順に走査させた。また各区画境界部で、0.2mm ずつレーザー走査

領域を重ねることにより各区画が一体かつ連結部の強度が十分になるようにした。ブリッジ製作後、アルゴン雰囲気下で、650度で30分、その後1150度で1時間の熱処理を行った。熱処理後は空气中に放冷し室温まで冷却した。区画化せずに各層一

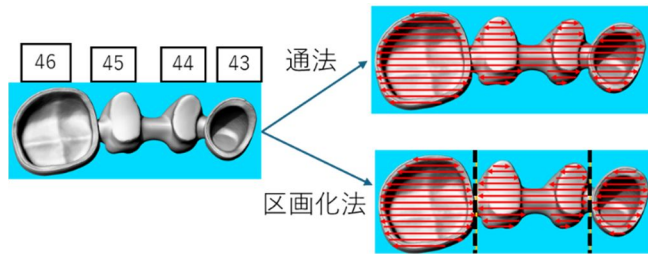


図2．区画化法のレーザー走査イメージ図

面をレーザー走査させる方法で造形する従来法を対照群として設定した。実際に製作したブリッジ試料を図3に示す。

ブリッジの適合性はブリッジと顎模型に装着した支台歯模型との間隙量を適合診査材(フィットチェッカーアドバンス,GC社)の厚みで評価した。顎模型に装着した支台歯模型に50Nを加え、5分間圧接させ、硬化させた後に、適合診査材の内部に色の異なるシリコン材料(エグザミクスファインインジェクションタイプ,GC社)を流し入れ、適合診査材を補強した。その後、適合診査材を切断し、共焦点レーザー顕微鏡(CLSM)を用いて適合診査材の厚みの測定を行った。測定箇所は、近心マージン(MM)、近心軸面(MA)、遠心マージン(DM)、遠心軸面(DA)及び咬合面(O)の5箇所とした(図4)。得られた結果はMann-WhitneyのU検定を用いて統計解析を行った。(a = 0.05)



図3．製作した3ユニットブリッジ試料外観

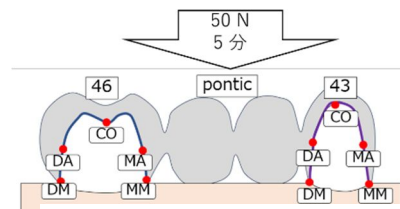


図4．適合試験測定概略図

また、残留応力測定のため造形をブリッジの歯冠軸方向中央付近でかつブリッジの長軸(近遠心方向)に対して垂直にレーザー走査がされる位置で中断し、試料上部に平面を有する試料を製作した。残留応力測定では、ブリッジ上部の平面でブリッジ長軸に平行な方向(X軸)と垂直な方向(Y軸)でXRD法を用いて測定した(図5)。

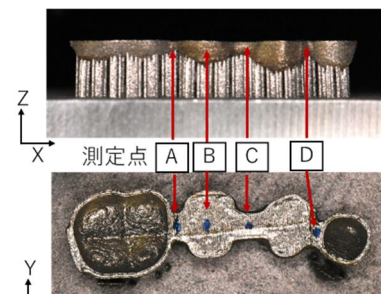


図5 残留応力測定概略図

4．研究成果

適合試験において、3ユニットブリッジでは区画化法と通法ではいずれの測定点においても有意差は認められなかった(図5)。

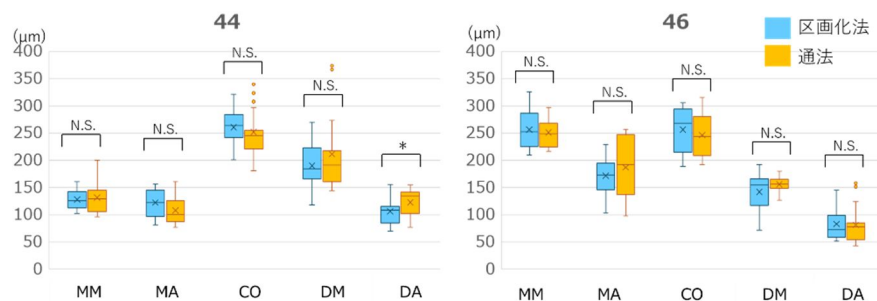


図5．3ユニットブリッジの適合試験結果

4 ユニットブリ

ッジでは複数の測定部位で区画化法の方が通法より有意に優れた適合精度を示し、特にマ

ージン部に関してはMM及びDMで43, 46ともに適合精度が有意に改善した(図6)。

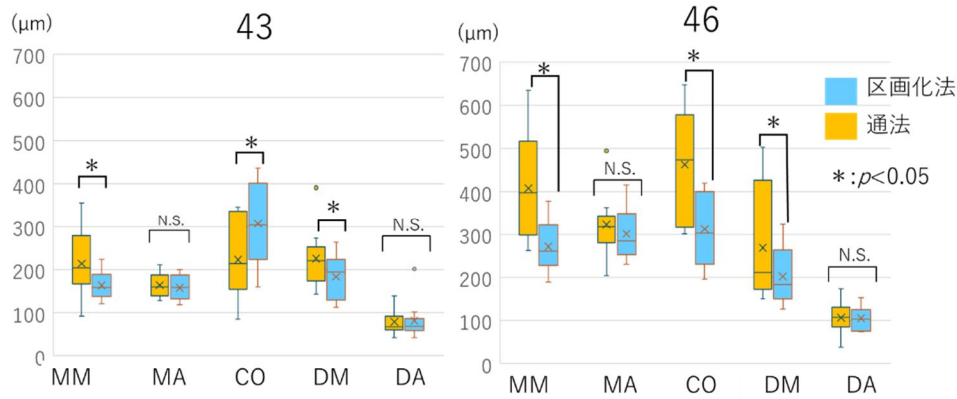


図6 . 4ユニットブリッジの適合試験結果

残留応力測定の結果, 3ユニットブリッジにおいては区画化法では, スキャンベクトル長さが短くなる X 方向で残留応力の低減が認められた. 4ユニットブリッジでは, X 軸方向及び Y 軸方向において区画化法の方が残留応力の低減を認める部位もある一方, 通法の方が残留応力の低減している部位も認められ, 一定の傾向を認められなかった(図8). ブリッジの変形の様子を確認するためにベストフィット法で造形したブリッジのデジタルデータと設計データを比較した. その結果, 通法では区画化法と比較して長軸に沿った大きな反り変形が生じていることが確認された. そのため 4 ユニットブリッジの通法で残留応力が低い測定値を示した理由として, 過大な熱応力により造形中に変形が生じ内部の残留応力が部分的に解放された可能性が考えられた.

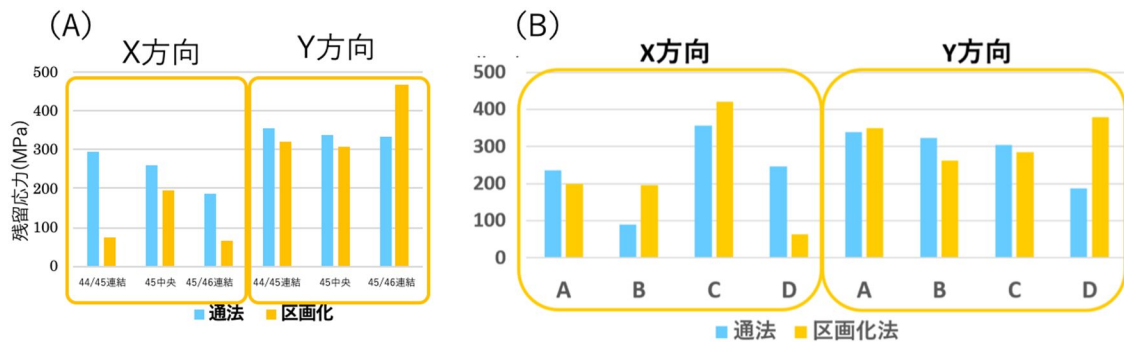


図6 . 残留応力測定の結果 . (A) 3ユニットブリッジ (B) 4ユニットブリッジ

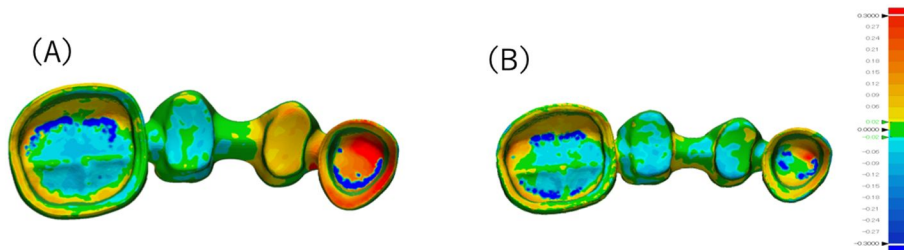


図7 . 4ユニットブリッジの3D比較 . (A) 通法 (B) 区画法 .

以上の結果より区画化法は SLM 法の造形後の残留応力を低減し, 大型の歯科補綴装置の適合精度を改善するのに有効である可能性が示唆された.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Mohamed Amr, Takaichi Atsushi, Kajima Yuka, Hanawa Takao, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 36
2. 論文標題 Reusing the Co-Cr-Mo support structures of selective laser melted parts: Evaluation of mechanical properties and microstructures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sustainable Materials and Technologies	6. 最初と最後の頁 e00608 ~ e00608
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susmat.2023.e00608	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 Mohamed Amr, Takaichi Atsushi, Kajima Yuka, Takahashi Hidekazu, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 15
2. 論文標題 Physical Properties of Additively Manufactured Tooth-Colored Material Attached to Denture Base-Colored Material in a Printed Monolithic Unit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Polymers	6. 最初と最後の頁 2134 ~ 2134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/polym15092134	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 Kajima Yuka, Takaichi Atsushi, Linn Htata Hein, Hanawa Takao, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 856
2. 論文標題 Recrystallization behavior of selective laser melted Co-Cr-Mo alloys with several heat treatment times	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 143998 ~ 143998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.msea.2022.143998	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 Mohamed Amr, Takaichi Atsushi, Kajima Yuka, Takahashi Hidekazu, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 -
2. 論文標題 Bond strength of CAD/CAM denture teeth to a denture base resin in a milled monolithic unit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	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) 10.2186/jpr.JPR_D_22_00190	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 Wai Cho Hla Htoot, Takaichi Atsushi, Kajima Yuka, Htat Hein Linn, Kittikundecha Nuttaphon, Hanawa Takao, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Effect of Post-Heat Treatment Cooling Conditions on Microstructures and Fatigue Properties of Cobalt Chromium Molybdenum Alloy Fabricated through Selective Laser Melting	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1005 ~ 1005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met11071005	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

1. 著者名 Htat Hein Linn, Takaichi Atsushi, Kajima Yuka, Kittikundecha Nuttaphon, Kamijo Shingo, Hanawa Takao, Wakabayashi Noriyuki	4. 巻 68
2. 論文標題 Influence of stress-relieving heat treatments on the efficacy of Co-Cr-Mo-W alloy copings fabricated using selective laser melting	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Prosthodontic Research	6. 最初と最後の頁 310 ~ 318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2186/jpr.jpr_d_22_00283	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

1. 著者名 THANT San Win, TAKAICHI Atsushi, KAJIMA Yuka, MOHAMED Amr, NOZAKI Kosuke, TAKAHASHI Hidekazu, CHEN Peng, HANAWA Takao, WAKABAYASHI Noriyuki	4. 巻 42
2. 論文標題 Effect of ultraviolet irradiation treatment on shear bond strength between polymethyl methacrylate and cobalt-chromium-molybdenum alloy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Dental Materials Journal	6. 最初と最後の頁 748 ~ 755
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4012/dmj.2023-058	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23件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 小林 義夫, 加嶋 祐佳, 高市 敦士, 若林 則幸.
2. 発表標題 金属積層造形によるブリッジ製作における 区画化型スキャンストラテジーの適合性への影響.
3. 学会等名 国際・産学連携インヴァースイノベーション 材料創出 (DEJI2MA) プロジェクト 公開討論会
4. 発表年 2023年 ~ 2024年

1. 発表者名 Qu Wenrui, Takaichi Atsushi, Kajima Yuka, Kamiyo Shingo, Wakabayashi Noriyuki.
2. 発表標題 Effect of build orientation on trueness and adaptation of maxillary complete denture frameworks fabricated by selective laser melting.
3. 学会等名 令和 5 年度 日本歯科理工学会近畿・中四国地方会セミナー
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Qu W, Kajima Y, Takaichi A, Wakabayashi N.
2. 発表標題 Preliminary research on the trueness of complete denture framework fabricated with contactless support by selective laser melting.
3. 学会等名 81回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Yoshio Kobayashi, Yuka Kajima, Atsushi Takaichi, and Noriyuki Wakabayashi.
2. 発表標題 The effect of scanning strategies on the fitness accuracy and residual stress of SLM-fabricated 3-unit fixed dental prostheses.
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Design & Engineering by Joint Inverse Innovation for Materials Architecture (DEJI2MA-3) (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Atsushi Takaichi, Yuka Kajima, San Win Thant, Noriyuki Wakabayashi.
2. 発表標題 Effect of ultraviolet treatment on shear bond strength between polymethyl methacrylate and cobalt-chromium-molybdenum alloy fabricated by selective laser melting.
3. 学会等名 Ninth International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Yuka Kajima, Atsushi Takaichi, Hein Linn Htat, Noriyuki Wakabayashi
2. 発表標題 Effect of beam spot size on the microstructural and mechanical properties of selective laser melted Co-Cr-Mo alloys.
3. 学会等名 Ninth International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 小林 義夫, 加嶋 祐佳, 高市 敦士, 若林 則幸.
2. 発表標題 金属積層造形によるブリッジ製作における 区画化型スキャンストラテジーの適合性への影響.
3. 学会等名 国際・産学連携インヴァースイノベーション 材料創出 (DEJ12MA) プロジェクト 公開討論会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 小林義夫, 高市敦士, 加嶋祐佳, 若林則幸.
2. 発表標題 金属積層造形における区画化型スキャン戦略のブリッジの適合性への影響.
3. 学会等名 第 82 回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 高市 敦士
2. 発表標題 金属積層造形を用いた歯科補綴装置製作時の加工方法の工夫
3. 学会等名 金属光造形複合加工医療機器フォーラム 第19回シンポジウム
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Atsushi Takaichi, Yuka Kajima, San Win Thant, Noriyuki Wakabayashi
2. 発表標題 Effect of ultraviolet treatment on shear bond strength between polymethyl methacrylate and cobalt-chromium-molybdenum alloy fabricated by selective laser melting
3. 学会等名 Ninth International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Yuka Kajima, Atsushi Takaichi, Hein Linn Htat, Noriyuki Wakabayashi.
2. 発表標題 Effect of beam spot size on the microstructural and mechanical properties of selective laser melted Co-Cr-Mo alloys.
3. 学会等名 Ninth International Conference on Mechanics of Biomaterials and Tissues (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Yoshio Kobayashi, Yuka Kajima, Atsushi Takaichi, and Noriyuki Wakabayashi.
2. 発表標題 The effect of scanning strategies on the fitness accuracy and residual stress of SLM-fabricated 3-unit fixed dental prostheses.
3. 学会等名 The 3rd International Symposium on Design & Engineering by Joint Inverse Innovation for Materials Architecture (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 加嶋祐佳, 高市敦士, ヘインリンテツ, 埴隆夫, 若林則幸
2. 発表標題 レーザー積層造形法により製作したCoCrMo合金の再結晶現象におよぼす熱処理時間の影響.
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～2023年

1. 発表者名 高市敦士, サンウインタン, モハメドアムール, 加嶋祐佳, 蘆田茉希, 埴 隆夫, 若林則幸.
2. 発表標題 UV照射によるCo-Cr-Mo合金と義歯床用レジンの接着強化.
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~2023年

1. 発表者名 高市 敦士
2. 発表標題 Selective laser melting法による歯科補綴装置製作の現在
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~2023年

1. 発表者名 高市 敦士
2. 発表標題 CAD/CAM技術を応用した人工歯・義歯床の製作.
3. 学会等名 日本補綴歯科学会第131回学術大会(招待講演)
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 ヘイン リンテツ, 高市敦士, 加嶋祐佳, 若林則幸, 埴 隆夫.
2. 発表標題 SLM 法で製作したCo-Cr-Mo 合金の熱処理による再結晶化.
3. 学会等名 国際・産学連携インヴァーسیون材料創出プロジェクト 公開討論会
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 Kajima Y, Takaichi A, Hanawa T, Wakabayashi N.
2. 発表標題 Effect of several heat treatment times on the microstructure and mechanical behavior of selective laser melted Co-Cr-Mo alloys
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on Design & Engineering by Joint Inverse Innovation for Materials Architecture (DEJI2MA) (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Hein Linn Htat, Kajima Yuka, Takaichi Atsushi, Hla Htoot Wai Cho, Kamijo Shingo, Hanawa Takao, Wakabayashi Noriyuki.
2. 発表標題 レーザー積層造形法により製作したCo-Cr-Mo-W 合金の熱処理温度が陶材焼付強度に与える影響.
3. 学会等名 第77回 日本歯科理工学会春期学術講演会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 モハメドアムール, 高市敦士, 加嶋祐佳, ヘインリンテツ, サンウインタン, 若林則幸.
2. 発表標題 レーザー積層造形法のCo-Cr-Mo製サポートの再利用—機械的性質と組織の評価—.
3. 学会等名 日本補綴歯科学会 東京支部第25回学術大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 サンウインタン, 高市敦士, 加嶋祐佳, モハメドアムール, 若林則幸
2. 発表標題 紫外線照射の義歯床用レジンとCo-Cr合金の接着強度への影響.
3. 学会等名 日本補綴歯科学会 東京支部第25回学術大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 秋山 洋, 金澤 学, 岩城麻衣子, 羽田多麻木, 副田弓夏, 大竹涼介, 村上奈津子, 高市敦士, 若林則幸, 水口俊介.
2. 発表標題 カスタムプレートを用いたフルデジタル部分床義歯製作方法の開発.
3. 学会等名 日本補綴歯科学会第130回記念学術大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 ラトウエイチョー, 加嶋祐佳, 高市敦士, ヘインリンテツ, 若林則幸
2. 発表標題 レーザー積層造形法で製作したCo-Cr-Mo合金への熱処理の冷却条件が組織と機械的性質へ与える影響
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>研究者データベース https://reins.tmd.ac.jp/html/100011368_ja.html 生体補綴歯科学分野HP https://www.tmd.ac.jp/pro/</p>

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
研究協力者	加嶋 祐佳 (Kajima Yuka)		

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
研究協力者	リンテツ ヘイン (Linn Htat Hein)		
研究協力者	小林 義夫 (Koabayashi Yoshio)		

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