

部分床義歯のデジタル化に関する文献レビュー

笛木賢治^a, 稲用友佳^b, 高市敦士^b, 村上奈津子^b,
和田淳一郎^b, 新井祐貴^b, 上野剛史^b, 若林則幸^b

A systematic review of digital removable partial dentures

Kenji Fueki, DDS, PhD^a, Yuka Inamochi, DDS, PhD^b, Atsushi Takaichi, DDS, PhD^b,
Natsuko Murakami, DDS, PhD^b, Junichiro Wada, DDS, PhD^b, Yuki Arai, DDS, PhD^b,
Takeshi Ueno, DDS, PhD^b and Noriyuki Wakabayashi, DDS, PhD^b

抄録

部分床義歯のデジタル化の現状と実用化への課題を見いだすことを目的としてシステマチックレビューを行った。2019年には、作業用模型を用いずに全工程をデジタル技術で部分床義歯製作することが可能であった。しかし、フルデジタル・ワークフローでの製作は、Kennedy III / IV級の少数歯欠損症例に限られていた。デジタル印象採得と咬合採得には口腔内スキャナが使用されていた。CAD/CAM フレームワークについては、日本ではレーザー積層造形法での製作が実用化されている。口腔内スキャナの性能向上、フレームワークと義歯床の連結の精度と耐久性の向上、製作コストの削減が、今後の解決すべき課題といえる。

キーワード

部分床義歯, デジタルデンティストリー, 口腔内スキャナー, CAD/CAM, レーザー積層造形法

ABSTRACT

We performed a systematic review of the literature to comprehensively review the current status of digital workflow and the challenge in fabricating removable partial dentures. In 2019, RPDs can be fabricated with a fully digital workflow without a definitive cast. However, the indication for full-digital RPD is limited for cases with Kennedy Class III/IV partially edentulous arches with few missing teeth. Intra oral scanners were used for digital impression taking and maxillomandibular relationship recording. CAD/CAM framework fabricated using selective laser melting is commercially available in Japan. Future challenges for improvement in accuracy of intra oral scanners, accuracy and durability of connections between the framework and denture base, and for reduction of fabrication cost remain to be solved in digital removable partial dentures.

Key words:

Removable partial denture, Digital dentistry, Intra oral scanner, CAD/CAM, Selective laser melting

^a 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科咬合機能健康科学分野

^b 東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科生体補綴歯科学分野

^a Masticatory Function and Health Science, Graduate School of Medical and Dental Sciences, Tokyo Medical and Dental University

^b Advanced Prosthodontics, Graduate School of Medical and Dental Sciences, Tokyo Medical and Dental University

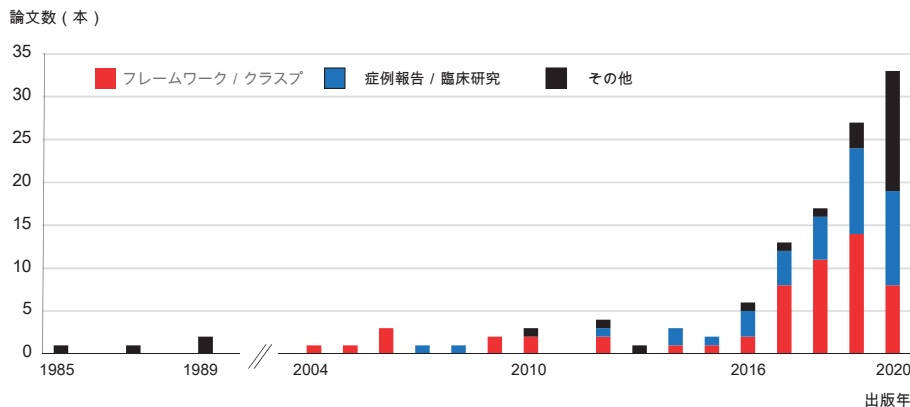


図1 部分床義歯のデジタル化に関する論文数の出版年次推移

I. 緒言

近年、歯科医療のさまざまな領域においてデジタル技術の適用が急速に進展している¹⁾。補綴歯科治療においては歯冠修復治療やインプラント治療における診断、インプラント埋入時の外科手術、口腔内スキャナを用いた支台歯の光学印象、computer-aided design and computer-assisted manufacturing (CAD/CAM) による修復物の設計と製作においてデジタル技術が一般的になっている²⁾。可撤性義歯による治療では、既にCAD/CAMによる全部床義歯の製作と部分床義歯 (removable partial denture: RPD) のフレームワークの製作で商用化がされている。

2016年までに発表されたデジタル技術を用いた部分床義歯 (デジタル RPD) に関する総説では、主にフレームワークの製作方法と材料に焦点を当てている³⁻⁶⁾。しかしながら、部分床義歯のデジタルワークフローの臨床ステップ、義歯の製作方法と材料、臨床研究によるエビデンスを網羅的にまとめた総説は見受けられない。そこで、著者らは、2020年時点での部分床義歯のデジタル化に関するシステムチックレビューを実施して、Journal of Prosthodontic Research に発表した^{7,8)}。本論文では、このレビュー^{7,8)}に基づき部分床義歯のデジタル化の現状を整理し、今後解決すべき課題を考察する。

II. 方法

通法に従ってシステムチックレビューを実施した。プロトコルは、Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions Version 6⁹⁾ に準拠して作成し、International Prospective Register of System-

atic Review に登録した (CRD42020153206)。部分床義歯製作にデジタル技術を用いた論文すべてを対象とした。印象採得、咬合採得、設計、フレームワーク、人工歯排列、義歯床の製作方法、義歯材料の特性を評価した研究、デジタル RPD の臨床研究、症例報告、技術紹介を取り込み基準とした。総説と顎義歯を対象とした症例報告は除外した。文献検索は、オンラインデータベース (PubMed/MEDLINE, 医中誌 WeB) とハンドサーチで行った。検索期間は1980年以降とし、2020年12月31日に最終検索を行った。検索用語は、removable partial denture, digital, CAD/CAM, intraoral scanner などとした。言語は英語、日本語、中国語を対象とした。ヒットした論文のタイトル、抄録、本文から適格する論文を選別し、印象採得、咬合採得、設計、フレームワーク、人工歯排列、義歯床においては材料や方法に関する情報、臨床エビデンスにおいてはデジタル化の状況と臨床研究で得られた情報を抽出した。臨床研究のバイアスリスクは、Cochrane risk of bias tool¹⁰⁾ で評価した。フレームワークと義歯床用レジンの性質に関して論文中の記載情報から Review Manager 5 でメタ解析を行った。

III. 結果

1. 文献検索の結果

オンラインデータベースで2002件がヒットし、ハンドサーチで32論文を追加した。タイトルと抄録でスクリーニングを行い314論文に絞り込み、本文で適格性を確認して最終的に121論文を採択した。21論文でメタ解析を行った。採択された論文は、1980年代から数本ずつ報告がみられ、2016年以降に急速に増加した (図1)。デジタル化の研究はフレームワークとクラスプ、症例報告 (臨床研究を含む) が多かった。論文の

表 1 クラスプを支台装置とした部分床義歯の製作工程のデジタル化

筆頭著者 (出版年)	ワークフロー ^a					デジタル化の割合 (%)	作業用機型
	印象採得	咬合採得	設計	フレームワーク製作	人工歯排列と義歯床製作		
Oh KC (2020)	-	-	-	-	Dig & C	10	石膏
Piao X (2020)	C	C	C	C	Dig & C	10	-
Q Du (2020)	Dig	C	C	C	C	20	レジン
Q Du (2020)	Dig	C	C	C	C	20	レジン
Seitz S (2016)	Dig	Dig & C	C	C	-	30	-
Lee JW (2017)	C	-	Dig	Dig & C	C	30	-
Mansour M (2015)	Dig	Dig	C	C	C	40	レジン
Mansour M (2015)	Dig	Dig	C	C	C	40	レジン
Almufleh B (2018)	C	C	Dig	Dig	C	40	石膏
Harb IE (2019)	C	C	Dig	Dig	C	40	石膏
Wu J (2020)	C	C	Dig	Dig	C	40	レジン
Yan Z (2020)	C	C	Dig	Dig	Dig & C	50	レジン
Kattadiyil MT (2014)	Dig	Dig & C	Dig	Dig & C	C	60	レジン
Wu J (2017)	Dig	C	Dig	Dig	C	60	レジン
Nishiyama H (2019*)	C	C	Dig	Dig	Dig	60	レジン
Mendes TA (2019)	Dig	-	Dig	Dig	-	60	レジン
Carneiro Pereira AL (2019)	Dig	Dig	Dig	Dig & C	C	70	レジン
Hu F (2019)	Dig	Dig	Dig	Dig	C	80	レジン
Gintaute A (2020)	Dig	Dig	Dig	Dig	C	80	レジン
Al-Haj Husain N (2019*)	Dig	Dig	Dig	Dig	Dig	100	NA
Nishiyama H (2019*)	Dig	Dig	Dig	Dig	Dig	100	レジン
Hamanaka I (2018)	Dig	Dig	Dig	Dig	Dig	100	レジン
Virard F (2018)	Dig	Dig	Dig	Dig	Dig	100	レジン

^a C: 従来法, Dig: デジタル法

* 早期出版年

-: 記載なし; NA: 適用なし

表 2 コーヌステレスコープ義歯の製作工程のデジタル化

筆頭著者 (出版年)	欠損	材料 (製法) ^a		
		内冠	外冠	フレームワーク
Bär C (2008)	下顎 I 級	セラミック (M)	金合金 (EP)	-
Grösser J (2014)	上顎 III 級	ジルコニア (M)	ジルコニア (M)	ジルコニア (M)
Hahnel S (2018)	上顎 I 級	金属	PEEK (M)	PEEK (M)
Danielczak RA (2019)	下顎 I 級	Co-Cr 合金 (M)	Co-Cr 合金 (M)	Co-Cr 合金 (M)
Adali U (2019)	上顎 II 級	非貴金属 (M)	-	-
Schwindling FS (2017)	上下顎 I - III 級	ジルコニア (M)	金合金 (EP)	-

^a M: ミリング, EP: エレクトロフォーミング

-: 記載なし

筆頭著者の国籍は全 20 カ国に分布し, 中国 (n=23), 日本 (n=21), 米国 (n=16) の 3 カ国で全体の約半数を占め, ドイツ (n=12), 韓国 (n=10), 英国 (n=5) が続いた。

2. デジタルワークフローの状況

クラスプを支台装置としたデジタル RPD の製作工程のデジタル化の状況を表 1 に示す。2014 年に初めてデジタル RPD が症例報告された¹¹⁾。デジタル技術を用いた工程の割合には症例間で大きな差があるが, 全体的には印象採得とフレームワーク製作が先行し, 人工歯排列と義歯床製作が遅れている。2018 年

に全工程をデジタル技術で製作した症例が報告された^{12,13)}。ほとんどの症例で, 3D プリントで製作したレジン製の作業用模型でフレームワーク試適, 人工歯排列, 義歯床製作を行っていた。2019 年に作業用模型を用いずに義歯を製作した症例が報告された¹⁴⁾。

コーヌステレスコープ義歯に関しては, 内冠・外冠またはフレームワークの製作にデジタル技術を用いていた (表 2)。材料には金属, セラミック, ジルコニアが用いられていた。内冠はミリング法で製作され, 外冠はエレクトロフォーミングまたは, ミリング法でフレームワークと一体で製作されていた。

表 3 印象採得と咬合採得のデジタル化

筆頭著者 (出版年)	欠損型 (歯数)	アイヒナー分類	概形/最終印象 ^a	咬合採得 ^a	咬合床	IOS システム (製造元)
Hu F (2019)	上顎 I (6)	-	- / IOS	IOS	なし	TRIOS (3Shape, Copenhagen, Denmark)
Q Du (2020)	上顎 I (6)	B-3	- / IOS	NA	NA	CEREC (Sirona, -, Germany)
Al-Haj Husain N (2019)	下顎 I (8)	C-2	IOS/ IOS	IOS	あり	TRIOS 3 Basic (3Shape, Copenhagen, Denmark)
Lo Russo L (2020)	上顎 I (11)	C-2	IOS/ IOS	IOS	あり	TRIOS 3 color (3Shape, Copenhagen, Denmark)
Virard F (2018)	上顎 III (1)	A-2	- / IOS	IOS	なし	TRIOS 2 (3Shape, Copenhagen, Denmark)
Mansour M (2015)	上顎 III (2)	-	- / IOS	IOS	なし	LAVA.C.O.S. (3M ESPE, St. Paul, MN, USA)
Mansour M (2015)	下顎 III (4)	-	- / IOS	IOS	なし	LAVA.C.O.S. (3M ESPE, St. Paul, MN, USA)
Seitz S (2016)	下顎 III (2)	-	- / IOS	IOS	なし	True Definition (3M, Maplewood, MN, USA)
Carneiro Pereira AL (2019)	下顎 III (2)	A-3	- / IOS	IOS	なし	TRIOS (3Shape, Copenhagen, Denmark)
Nishiyama H (2019)	上顎 III (3)	B-3	- / IOS	IOS	なし	TRIOS 2 (3Shape, Copenhagen, Denmark)
Kattadiyil MT (2014)	上顎 III (4)	-	- / IOS	IOS	なし	Cadent iTero (Align Technology, San Jose, CA, USA)
Mendes TA (2019)	上顎 III (4)	B-1	IOS/ IOS	-	-	TRIOS (3 Shape, Copenhagen, Denmark)
Gintaute A (2020)	上顎 III (6)	B-1	IOS/ IOS	IOS	なし	Primescan (Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Germany)
Q Du (2020)	下顎 III (6)	B-3	- / IOS	NA	NA	CEREC (Sirona, -, Germany)
Wu J (2017)	上顎 III (8)	B-2	- / IOS	NA	NA	CEREC Omnicam (Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA)
Yan Z (2020)	下顎 III (8)	C-2	IOS/ NA	NA	NA	Panda2, (Frey Technology, Zhejiang, China)
Hamanaka I (2018)	下顎 IV (2)	-	- / IOS	IOS	なし	CEREC Omnicam (Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA)

^a IOS: 口腔内スキャナ

-: 記載なし; NA: 適用なし

3. 臨床研究

クラスプを支台装置としたデジタル RPD を実際に患者で評価した臨床研究が 2 つあった^{15,16)}。ラピッドプロタイピングによりフレームワークのレジンパターンを製作した義歯の構成要素と支台歯との適合度は臨床的に許容される範囲であった¹⁵⁾。ランダム化比較研究において、レーザー積層造形法 (Selective laser melting: SLM) で Co-Cr 合金のフレームワークを製作した義歯の患者満足度は、従来法で製作した義歯よりも高かった¹⁶⁾。本研究のバイアスリスクはすべての評価で低リスクであった。

デジタル技術を用いたコーヌステレスコープ義歯のランダム化比較研究では、ジルコニアで内冠を製作した義歯の口腔関連 QoL, 患者満足度, 3 年後の生存率は Co-Cr 合金と比べて統計的有意差は無かった^{17,18)}。本研究の選択バイアスと症例減少バイアスは低リスク, 実行バイアスとアウトカム評価でのバイアスは高リスク, 選択的アウトカム報告によるバイアスはプロトコルを事前に登録し公開されていないため不明であった。

4. 印象採得と咬合採得

クラスプを支台装置としたデジタル RPD の製作で, 印象採得または咬合採得に口腔内スキャナ (intra oral scanner: IOS) を使用した症例は 17 床あった (表 3)。1~3 歯の少数歯欠損症例が半数程度で, 多数歯欠損症例は少数であった。欠損型別では, Kennedy III 級と IV 級が全体の 3/4 を占めており, 残りの 1/4

は Kennedy I 級であった。部分歯列欠損での IOS の精確度 (Accuracy) (真度と精度の総称) を検証した研究は, 全て模型実験であった¹⁹⁻²³⁾。研究によって結果に差があるが, 真度 (Trueness: 真の値からの偏差) は従来印象に近いレベルだが, 精度 (Precision: 繰り返し測定の一貫性) は従来法よりもやや劣っていた。精確度向上のために顎堤にランドマークを付与する¹⁹⁾, スキャナヘッドを大きくすることが有効であった²⁰⁾。一方, 2020 年の報告では, 先行研究より精確度が高かった²³⁾。

咬合採得では, 咬合時の頬側面観を IOS で撮像し, この画像とデジタル印象採得した上下顎のデジタルデータ (デジタル模型) を専用のソフトウェア上で重ね合わせて位置決め (バーチャルマウント) していた。欠損型と欠損歯数によって 2 パターンがあり, 咬合床がなくても残存歯で中心咬合位が決定される Kennedy III 級が主流であった。もう一つは, 遊離端欠損症例で, 咬合床を介して中心咬合位を設定し, この時の頬側面観を IOS でスキャンしてバーチャルマウントした後に, ソフトウェア上で咬合床を削除していた²⁴⁾。

咬合採得の精確度に関連する研究では, 健常歯列, 部分歯列欠損の上下顎模型をそれぞれ咬合器装着した状態で, IOS を用いて印象採得とデジタル咬合採得およびバーチャルマウントして, この時の上下顎の標点間距離を比較した²⁵⁾。その結果, 白歯部の 1 歯欠損では健常歯列と同程度の上下顎の標点間距離の差であったのに対して, 白歯部の欠損歯数の増加に伴いへ差分

表4 人工歯と義歯床のデジタル化

筆頭著者 (出版年)	CAD ソフト (製造元)		義歯床		人工歯		接着材料 ^a
	義歯床	人工歯	材料	製作法	材料	製作法	
Takahashi Y (2017)	Freeform (Geomagic, Morrisville, NC, USA)	Freeform (Geomagic, Morrisville, NC, USA)	ポリエステル樹脂	ミリング	アクリル樹脂	ミリング	SB
Hamanaka I (2018)	Geomagic Freeform Plus (3D Systems Inc, Rock Hill, SC, USA)	inLab SW 15.1 (Dentsply Sirona, Charlotte, NC, USA) Geomagic Freeform Plus (3D Systems Inc, Rock Hill, SC, USA)	ポリエステル樹脂	ミリング	ジルコニア	ミリング	SB
Ye H (2018)	Geomagic Studio 2012 (Geomagic, Morrisville, NC, USA)	Dental System 2015 (3Shape, Copenhagen, Denmark)	PEEK	ミリング	PEEK	ミリング	適用なし (モノリシック構造)
Virard F (2018)	Freeform (3D Systems Inc, Rock Hill, SC, USA)	DentalCAD (exocad GmbH, Darmstadt, Germany)	アクリル樹脂	ミリング	アクリル樹脂	ミリング	PB
Al-Haj Husain N (2020)	記載なし	記載なし	アクリル樹脂	ミリング	アクリル樹脂	ミリング	PB
Nishiyama H (2020)	Freeform (3D Systems Inc, Santa Clara, CA, USA)	Dental System D-810 (3Shape, Copenhagen, Denmark)	アクリル樹脂	3Dプリント	コンポジットレジン	ミリング	SB

^a SB: Super-Bond (Sun Medical, Shiga, Japan), PB: Probond (Ivoclar Vivadent, Saint-Jorioz, France)

が増加した。

5. 設計とフレームワーク

義歯の設計について人工知能を用いたデジタル化・自動化が試みられている。最初の報告は大阪大学で開発されたエキスパートシステムで、義歯の設計ルール、口腔情報と、過去の症例設計をデータベース化して人工知能を構築した²⁶⁾。本プログラムでは、臨床情報として残存歯、欠損部顎堤、歯周組織の状態、咬合状態を入力すると、支台歯が自動で設定され、義歯の2次元設計が出力される。類似した人工知能が、1980～90年代に英国、フランスとドイツ、近年では中国²⁷⁾で開発されている。

フレームワークの設計線のデジタルモデル上の描記については、専用のCADソフト(3Shape Dental System[®], 3shape, exocad[®], exocad)が商用化されている。CAMによるフレームワーク製作に関しては多くの報告があり(表1)、Co-Cr合金、純チタン、チタン合金をSLM法で製作する方法が主流である。日本では、Co-Cr合金を用いたSLM法が認可され実用化されている。これに加え、ジルコニア、ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)、ポリエステル樹脂などの非金属材料をミリング法で製作する方法が報告されている。SLM法で製作したCo-Cr合金やTi-6Al-4V合金の機械的性質は造形方向により異なる(異方性)が認められ、造形方向に対して90度の角度で製作したエーカークラスプでは従来法と比較して優れた耐久性を示した。メタ解析の結果(詳細は文献⁸⁾を

参照)、SLM法で製作したフレームワークの表面性状は造形方向の影響を受ける。表面性状についてSLM法は鋳造法よりも劣り、適合については必ずしも鋳造法よりも優れていなかった。ただし、SLM法とミリング法と組み合わせるハイブリッド加工の表面性状は、鋳造法よりも優れていた。また、SLM法で製作したクラスプの繰り返し着脱による維持力の減少率は鋳造法よりも小さかった²⁸⁻³²⁾。

6. 義歯床と人工歯

症例報告では、義歯床にはディスク状のアクリル樹脂(PMMA)、ポリエステル樹脂、PEEKをミリング法で製作する方法、またはPMMAを光造形法で製作する方法が用いられていた。人工歯については、PMMAディスク、コンポジットレジン、ジルコニア、PEEKをミリング法で製作していた。最終工程で、人工歯と義歯床を接着レジンで連結していた(表4)。メタ解析の結果、機械的特性と理工学的性質の多くの点で、CAD/CAM用のPMMAディスクは加熱重合型PMMAよりも優れていた(詳細は文献⁸⁾を参照)。具体的には、PMMAディスクは、加熱重合型と比べ、曲げ弾性率、硬さ、衝撃強さが優れていた。一方、曲げ強さについては、PMMAディスクが高い傾向を認めたが、一部では劣っているものがあった。破壊靱性については、材料と研究によってバリエーションが大きく一般的な傾向は認められなかった。理工学的性質については、表面性状、残留モノマー、カンジダ付着、色調安定性について、PMMAディスクが優れていた。

表 5 部分床義歯のデジタル化の現状と今後の課題

ステップ	器材・装置・製造法	実用化	課題
印象採得	口腔内スキャナ	中間欠損 (III, IV 級) では実用レベル	<ul style="list-style-type: none"> 遊離端欠損 (I, II 級) 症例 多数歯欠損症例 顎粘膜の被圧変位の補正 義歯床辺縁の自動設定
咬合採得	口腔内スキャナ	ほぼ実用レベル	<ul style="list-style-type: none"> 咬合床が必要な症例 精確度 (Accuracy) の検証
義歯設計	人工知能, CAD ソフト	AI による設計立案が技術的に可能 CAD は実用化	<ul style="list-style-type: none"> 3D 自動描記 義歯床外形の描記
フレームワーク	レーザー積層造形法 (+ミリング)	材料と装置は実用化レベル	<ul style="list-style-type: none"> 適合度 (表面粗さ) の向上 異方性の解消 (熱処理) サポート構造の最適化 製作コスト低減
人工歯・義歯床	ミリング, 3D プリント	材料と装置は実用化レベル	<ul style="list-style-type: none"> 義歯床とフレームの連結精度 義歯床と人工歯の接着の耐久性

IV. 考 察

部分床義歯の設計とフレームワーク製作のデジタル化に関する基礎研究は 1980 年代から行われていた。しかし、症例報告も含めて論文発表が急速に増加し始めたのは 2016 年以降である。このことは 2010 年代に入ってからデジタル RPD の研究が活発になってきたことを示唆している。実際に、米国とカナダおよびヨーロッパ諸国だけでなく、アジアと中東など非英語圏の国からの報告も多かった。これは、部分床義歯のデジタル化は世界中で広く注目されていることを示している。

印象採得のデジタル化の利点としては、概形印象と最終印象を同日で実施可能であること、デジタル模型上でサベイングできるため研究用模型が不要であること、チェアサイドで、即時に、前処置の確認と印象の修正が可能であること、短時間でスキャンが可能であること、即時義歯、開口障害、嘔吐反射の症例での患者負担の軽減に有用であることが挙げられる。咬合採得については、印象と同日に咬合採得が可能であること、症例によっては咬合床が不要であることが挙げられる。臨床上のメリットとしては、チェアタイムと診療回数の短縮、臨床・技工材料の削減、患者と術者の負担の削減が考えられる。一方で、IOS による印象採得は比較的少数歯欠損の Kennedy III 級と IV 級が多く、これは IOS の性能がボトルネックとなっていると考えられる。今後は、遊離端欠損や多数歯欠損の III 級と IV 級の印象採得への適用が課題といえる。さらに、遊離端欠損では、顎粘膜の被圧変位をデジタル模型に反

映するための補正方法の確立、義歯床辺縁の決定が必要である。咬合採得に関しては、多数歯欠損で咬合床が必要なケースでの方法の確立が課題である。多数歯欠損症例での咬合採得の精確度の検証が必要である。

フレームワーク設計のデジタル化の利点として、設計の質の担保 (均てん化)、正確なサベイングと設計線の記入、技工所との正確な情報共有が挙げられる。これらの利点により義歯の質の向上と臨床教育への活用も期待される。一方、今後の課題としては、多次元の臨床情報に基づく義歯設計の自動化と、CAD ソフトと統合してデジタル模型上に直接 3 次元で設計線を描記するシステムの開発が挙げられる。フレームワーク製作のデジタル化の利点として、中間技工材料の削減とラボワークの軽減、非金属材料を含む多様な材料が使用可能であること、SLM 法は鋳造法よりも機械的強度に優れることが挙げられる。今後の技術的な課題は、適合度の向上、異方性の解消のための熱処理条件の設定、サポート構造の最適化である。さらに、広く一般に普及するための大きな課題として、製造コストの削減が挙げられる。

人工歯排列におけるデジタル化の利点は、人工歯の形状をカスタム化できることである。義歯床に関しては、義歯床用 PMMA ディスクの機械的・理工学的性質が加熱重合型レジンよりも優れていることが利点として挙げられる。これらの利点は、PMMA ディスクが工業的に加圧・加熱重合させたもので高い重合率が得られるためと考えられる。今後の技術的な課題として、義歯床とフレームワークを実体の作業用模型を介さずに高精度で連結するための技術開発である。義歯床とフレームの位置精度の検証、接着強さと耐久性の

検証も必要である。

デジタル技術を用いて製作した部分床義歯には、臨床上多くのメリットがあると考えられるが、これを実証した臨床研究は極めて限られている。今後は臨床研究を推進して、部分床義歯のデジタル化が患者にもたらすメリットと限界を明らかにする必要がある。その際、義歯の耐久性、義歯と治療プロセスに対する患者評価だけでなく、チェアタイムと通院回数、費用対効果、ラボワークのコストなど多面的に評価することが重要である。

V. 結 論

部分床義歯のデジタル化の現状と実用化への課題の総括を表5に示す。2019年に、一部の症例において作業用模型を使用することなく全工程をデジタル技術で部分床義歯製作することが可能になった。しかし、部分床義歯治療を対象とする欠損歯列は多様であり、現時点で全工程をデジタル技術で製作が可能な症例の範囲は限られている。IOSの性能向上、フレームワークと義歯床の連結の精度と耐久性の向上が技術的な課題である。さらに、一般に普及するためには、コスト削減が大きな課題である。

利益相反開示

本論文の内容に関して、著者に開示すべき利益相反関係にある企業などはありません。

文 献

- 1) Radi M, Carl FD. *Clinical Applications of Digital Dental Technology*. Ames: John Wiley & Sons; 2015.
- 2) Tamimi F, Hirayama H. *Digital Restorative Dentistry*. Switzerland AG: Springer Nature; 2019.
- 3) Williams RJ, Bibb R, Eggbeer D. CAD/CAM-fabricated removable partial-denture alloy frameworks. *Pract Proced Aesthet Dent* 2008; 20: 349-351.
- 4) Lang LA, Tulunoglu I. A critically appraised topic review of computer-aided design/computer-aided machining of removable partial denture frameworks. *Dent Clin North Am* 2014; 58: 247-255.
- 5) Lima JM, Anami LC, Araujo RM, Pavanelli CA. Removable partial dentures: use of rapid prototyping. *J Prosthodont* 2014; 23: 588-591.
- 6) Bilgin MS, Baytaroglu EN, Erdem A, Dilber E. A review of computer-aided design/computer-aided manufacture techniques for removable denture fabrication. *Eur J Dent* 2016; 10: 286-291.
- 7) Fueki K, Inamochi Y, Wada J, Arai Y, Takaichi A, Murakami N, Ueno T, Wakabayashi N. A systematic review of digital removable partial dentures. Part I: Clinical evidence, digital impression, and maxillo-mandibular relationship record. *J Prosthodont Res* 2021; in press.
- 8) Takaichi A, Fueki K, Murakami N, Ueno T, Inamochi Y, Wada J, Arai Y, Wakabayashi N. A systematic review of digital removable partial dentures. Part II: CAD/CAM framework, artificial teeth, and denture base. *J Prosthodont Res* 2021; in press.
- 9) *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions* Version 6, 2019. <https://training.cochrane.org/handbook/current> [accessed 1 August 2019]
- 10) A revised Cochrane risk-of-bias tool for randomized trials. <https://methods.cochrane.org/bias/resources/rob-2-revised-cochrane-risk-bias-tool-randomized-trials> [accessed 1 August 2019]
- 11) Kattadiyil MT, Mursic Z, AlRumaih H, Goodacre CJ. Intraoral scanning of hard and soft tissues for partial removable dental prosthesis fabrication. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 444-448.
- 12) Hamanaka I, Isshi K, Takahashi Y. Fabrication of a nonmetal clasp denture supported by an intraoral scanner and CAD-CAM. *J Prosthet Dent* 2018; 120: 9-12.
- 13) Virard F, Venet L, Richert R, Pfeffer D, Viguié G et al. Manufacturing of an immediate removable partial denture with an intraoral scanner and CAD-CAM technology: a case report. *BMC Oral Health* 2018; 18: 120.
- 14) Al-Haj Husain N, Özcan M, Schimmel M, Abou-Ayash S. A digital cast-free clinical workflow for oral rehabilitation with removable partial dentures: A dental technique. *J Prosthet Dent* 2020; 123: 680-685.
- 15) Lee JW, Park JM, Park EJ, Heo SJ, Koak JY et al. Accuracy of a digital removable partial denture fabricated by casting a rapid prototyped pattern: A clinical study. *J Prosthet Dent* 2017; 118: 468-474.
- 16) Almuflleh B, Emami E, Alageel O, de Melo F, Seng F et al. Patient satisfaction with laser-sintered removable partial dentures: A crossover pilot clinical trial. *J Prosthet Dent* 2018; 119: 560-567.e1.
- 17) Schwindling FS, Lehmann F, Terebesi S, Corcodel N, Zenthöfer A et al. Electroplated telescopic retainers with zirconia primary crowns: 3-year results from a randomized clinical trial. *Clin Oral Investig* 2017; 21: 2653-2660.
- 18) Schwindling FS, Deisenhofer UK, Séché AC, Lehmann F, Rammelsberg P et al. Randomized trial investigating zirconia electroplated telescopic retainers: quality of life outcomes. *Clin Oral Investig* 2017; 21: 1157-1163.
- 19) Kim JE, Amelya A, Shin Y, Shim JS. Accuracy of intraoral digital impressions using an artificial landmark. *J Prosthet Dent* 2017; 117: 755-761.
- 20) Hayama H, Fueki K, Wadachi J, Wakabayashi N. Trueness and precision of digital impressions obtained using an intraoral scanner with different head size in the partially edentulous mandible. *J Prosthodont Res* 2018; 62: 347-352.

- 21) Lee JH, Yun JH, Han JS, Yeo IL, Yoon HI. Repeatability of Intraoral Scanners for Complete Arch Scan of Partially Edentulous Dentitions: An In Vitro Study. *J Clin Med* 2019; 8:1187.
- 22) Tasaka A, Uekubo Y, Mitsui T, Kasahara T, Takanashi T et al. Applying intraoral scanner to residual ridge in edentulous regions: in vitro evaluation of inter-operator validity to confirm trueness. *BMC Oral Health* 2019; 19: 264.
- 23) Schimmel M, Akino N, Srinivasan M, Wittneben JG, Yilmaz B, Abou-Ayash S. Accuracy of intraoral scanning in completely and partially edentulous maxillary and mandibular jaws: an in vitro analysis. *Clin Oral Investig* 2021; 25: 1839-1847.
- 24) Lo Russo L, Caradonna G, Salamini A, Guida L. A single procedure for the registration of maxillo-mandibular relationships and alignment of intraoral scans of edentulous maxillary and mandibular arches. *J Prosthodont Res* 2020; 64: 55-59.
- 25) Ren S, Morton D, Lin WS. Accuracy of virtual inter-occlusal records for partially edentulous patients. *J Prosthet Dent* 2020; 123: 860-865.
- 26) Maeda Y, Tsutumi S, Minoura M, Okada M, Nokubi T, Okuno Y. An expert system for designing removable partial dentures. Preliminary report. *J Osaka Univ Dent Sch* 1985; 25: 79-84.
- 27) Chen Q, Wu J, Li S, Lyu P, Wang Y, Li M. An ontology-driven, case-based clinical decision support model for removable partial denture design. *Sci Rep* 2016; 14: 27855.
- 28) Nakata T, Shimpo H, Ohkubo C. Clasp fabrication using one-process molding by repeated laser sintering and high-speed milling. *J Prosthodont Res* 2017; 61: 276-282.
- 29) Torii M, Nakata T, Takahashi K, Kawamura N, Shimpo H, Ohkubo C. Fitness and retentive force of cobalt-chromium alloy clasps fabricated with repeated laser sintering and milling. *J Prosthodont Res* 2018; 62: 342-346.
- 30) Schweiger J, Güth JF, Erdelt KJ, Edelhoff D, Schubert O. Internal porosities, retentive force, and survival of cobalt-chromium alloy clasps fabricated by selective laser-sintering. *J Prosthodont Res* 2020; 64: 210-216.
- 31) Mutschler M, Schweitzer F, Spintzyk S, Geis-Gerstorfer J, Huettig F. Retention Forces of Prosthetic Clasps over a Simulated Wearing Period of Six Years In-Vitro: Direct Metal Laser Melting Versus Dental Casting. *Materials (Basel)* 2020; 25: 5339.
- 32) Takahashi K, Torii M, Nakata T, Kawamura N, Shimpo H, Ohkubo C. Fitness accuracy and retentive forces of additive manufactured titanium clasp. *J Prosthodont Res* 2020; 64: 468-477.

著者連絡先： 笹木 賢治

〒 113-8510 東京都文京区湯島 1-5-45
東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科
Tel & Fax: 03-5803-5514
E-mail: kunfu.rpro@tmd.ac.jp