

DX 推進のための対応：義歯治療のデジタル化の現状と今後について

市川哲雄, 松田 岳, 石田雄一, 渡邊 恵

Current status and prospect on digitalization of removable denture treatment

Tetsuo Ichikawa, DDS, PhD, Takashi Matsuda, DDS, PhD,

Yuichi Ishida, DDS, PhD and Megumi Watanabe, DDS, PhD

抄 録

クラウンブリッジなどの固定性補綴装置の場合、印象採得から補綴装置製作までフルデジタル化が可能で、中間材料を使うことなく、所望の装置を製作できる。一方、義歯治療においては、技工操作のデジタル化は十分に可能であるが、義歯の印象採得、咬合採得のデジタル化は十分にできていないのが現状である。本稿では、印象採得、咬合採得、設計および人工歯排列、フレーム部分の製作、義歯のコンポーネントの統合、義歯の複製の観点から義歯治療のデジタル化の現状と今後について考察した。あわせて、補綴歯科治療における真の Digital Transformation, Smart Prosthodontics について言及した。

キーワード

デジタルデンチャー, デジタルトランスフォーメーション, CAD/CAM, 印象採得, 咬合採得

ABSTRACT

Full digital workflow from impression taking to the prosthesis fabrication is possible without the use of intermediate materials in the fabrication of fixed prosthesis. On the contrary, the digitalization of removable denture fabrication will be almost performed in the dental laboratory side, but the digitalization of impression taking and occlusal registration for removable denture treatment has not been fully realized. This article discussed current status and prospect on the digitalization of removable denture treatment from the following viewpoints: impression taking, occlusal registration, denture design and arranging teeth, framework fabrication, integration of denture components, and denture duplication. In addition, the genuinely significance of “Digital Transformation (DX)” and “Smart Prosthodontics” were also discussed.

Key words:

Digital denture, Digital transformation, CAD/CAM, Impression taking, Occlusal registration

I. はじめに

昨今の補綴装置製作におけるデジタル化の進歩は目を見張るものがある。特に、クラウンブリッジなどの固定性補綴装置の場合、印象採得から補綴装置製作までフルデジタル化が可能で、中間材料を使うことなく、所望の装置を製作できる¹⁾。一方、義歯治療はど

うであろうか。2013年時点でBidraらは、「患者の治療、歯科教育、研究、公衆衛生に影響を与えることができるコンピュータ支援義歯の臨床試験の必要性が差し迫っている。コンピュータ支援技術を使って全部床義歯を製造する技術は、将来に向けて計り知れない教育的、研究的、臨床的可能性を秘めている」とその論文の中で結論づけている²⁾。果たしてそうであろうか。技工操作からいえば、クラウンブリッジの製作が

表 1 商用化されているデジタルデンチャーシステムの特徴

治療回数	従来法	Avadent	Baltic	Dentca	Ivoclar
1回目	概形印象採得	最終印象 垂直的水平的顎間関係の決定 審美性や機能面の決定 必要に応じて試適	最終印象 垂直的・水平的顎間関係の決定	機能的最終印象 垂直的水平的顎間関係の決定 上唇までの長さとお切縁位置の決定 必要に応じて試適	概形印象採得 垂直的水平的顎間関係の概設定 咬合平面の設定 上唇の長さの測定
2回目	最終印象採得	義歯装着	義歯装着	義歯装着	最終印象
3回目	垂直的・水平的顎間関係の決定				垂直的・水平的顎間関係の決定 試適用義歯の装着 審美性と機能性の確認
4回目	ろう義歯試適				義歯装着
5回目	義歯装着				
義歯製作方法	ロストワックテクニク（填入あるいは射出成形）	ミリング義歯床に人工歯埋入，ミリング人工歯部と義歯床を統合，あるいは3Dプリント義歯	人工歯付きのレジンドディスクのミリング	人工歯以外の部分を3Dプリントし，その後人工歯を埋入	人工歯以外の部分をミリングで製作，その後人工歯を埋入

※本表は、文献4) 表1を参考に作成

デジタルで可能ならばそれほどの精度を必要としない義歯においても行えるであろうことは推察される。しかし現時点でも義歯の印象採得、咬合採得のデジタル化は十分にできていない現状であり、ここでの結論は物事の本質を捉えているかどうかという疑問が湧いてくる。

本稿では、義歯治療のデジタル化の現状と今後について議論したい。

II. いわゆるデジタルデンチャー

現在商品化され「デジタルデンチャー」と言われるものは、その多くは無歯顎（全部床義歯）に対するものである³⁾。表1にデジタルデンチャーシステムと言われる全部床義歯治療システムを紹介する。

その過程は、咬合床や治療用義歯で印象採得、咬合採得された一体化したもの（ここでは印象採得・咬合採得体と呼ぶ）をデジタル化して、粘膜面形態とその対向関係をコンピュータ（PC）上で再現、CADで人工歯排列を行い、研磨面形態を含め最終の義歯の形態を設計し、CAMで具現化し、一部手作業を含めて、最終義歯を完成するものである⁴⁾。すなわち、チェアサイドでの印象採得、咬合採得は今までどおりで、技工室での作業の一部あるいは全部をデジタル化しているにすぎない。各メーカーは、印象採得、咬合採得のための専用の治具を提供し、この過程をより簡便にする工夫をしているが、この部分はデジタル化の本質ではない。

技工の部分でのクラウンブリッジと義歯との大きな違いは、クラウンブリッジの多くの場合単一の材料で対応が可能であるが、義歯の場合には義歯床と人工歯

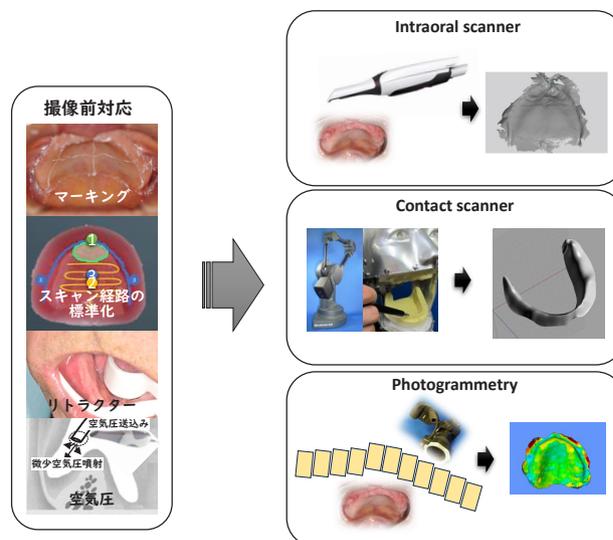


図1 チェアサイドでの無歯顎部分の印象採得のデジタル化

部で材料が異なり、更に支台装置や連結装置などのフレームワークを含めれば三つ以上のコンポーネントを組み合わせるという操作が必要となる。

III. 義歯治療の各ステップにおけるデジタル化の現状

1. 印象採得（図1）

部分無歯顎、無歯顎の印象採得のデジタル化に関しては、現状では、従来の方法で印象採得し、模型を製作し、それをデスクトップスキャナーなどでデジタル化することが多い。口腔内スキャナー（IOS）で直接口腔内の歯列、顎堤をデジタル化する場合にはいくつかの問題点を有する。一つは、IOSの撮像は、限られた範囲の画像を重ね合わせて歯列全体の画像を構築

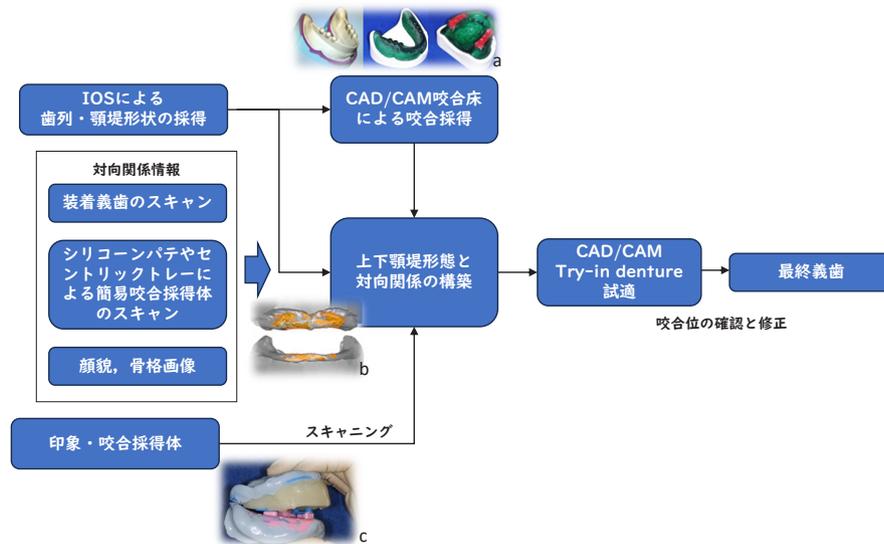


図2 咬合採得のデジタル化

- 下顎臼歯部には3つの半球を持つ咬合堤, 上顎臼歯部にはそれに対応するワックスダムをもつ咬合床型の個人トレー. 印象採得とタッピングでの咬合採得を容易にする^{2,8,11)} 参照.
- シリコンパテによる簡易咬合採得体に一致させた(黄色部分)上下顎の対向関係.
- 改良した既製トレー(ジーシー社)による印象・咬合採得.

(ステッチング) するため, 義歯のように関心領域が両側性の場合には重ね合わせの誤差が大きくなり, フレームワークの適合度に問題が起きる可能性が高くなる. さらに歯列と違って, 顎堤粘膜は形状が単純であるため, 画像の重ね合わせは歯列と比べて難しいとされる. ただし, 無歯顎においては従来法と比べて印象精度は問題ないという報告もある^{5,6)}. さらに, IOSによる印象は無圧印象であり, 義歯の印象とされる選択的加圧印象ではない. しかし無歯顎の場合には, 無圧印象(最小加圧印象)のほうが適切であるという意見もあり^{7,8)}, 臨床上是好都合であるかもしれない. 一方, 部分無歯顎の遊離端部は加圧印象が基本であり, この場合はCAD上で補正をする必要がある.

IOSの印象採得のもう一つの問題は義歯床縁部分であり, この部分は筋形成として術者(+患者)がまさしく作る場所である. 特に下顎の舌側床縁は, 従来法でもその設定は難しく^{7,9)}, 現状のIOSではある程度の概形印象は可能であろうが, 精密印象は今後の課題であろう. 解決策としては, IOSによる印象経路の標準化, 口唇, 頬, 舌を圧排するリトラクターの開発, 口腔内のマーキング, 空気圧等でのデンチャースペースの確保, Artificial Intelligence (AI) による形状推定などが考えられる.

概形印象程度ならば, IOS以外にも我々が以前報告したような, 三次元デジタルタイザーで顎堤を素早くトレーシングする方法や, 通常のカメラによって顎

堤の画像を何枚も撮像し, Photogrammetry によって顎堤形状を再構築する方法でも十分対応可能である^{10,11)}.

2. 咬合採得 (図2)

現在の咬頭嵌合位が適切で咬合支持歯が相当数あれば, あるいは旧義歯があればそれを調整して, 咬合せた状態をIOSで記録することによって, 咬合関係をPC上に再現できる. 一方, 無歯顎やアイヒナーのC1のような対向関係が喪失している場合や咬合支持歯が少ない場合などは, 咬頭嵌合位での対向関係を記録できない. その場合には咬合床が必要となる. または, シリコンパテ¹²⁾ や Ivoclar のセントリックトレーのような中間媒体を用いて, 仮咬合採得に相当する上下顎の対向関係を記録し, その後デジタルで製作した Try-in denture 試適時に中心咬合位を再採得, あるいはそれを調整することによって, 最終義歯に適切な中心咬合位を付与できる. 我々は, デジタルで概形印象を採得後, そのデータを用いて最終印象と咬合採得が容易になる個人トレーを提案した¹¹⁾.

将来的には, 顎堤形状, CTによる骨形状, 顔面形状などの形態データと下顎運動などの機能データの重ね合わせなどによって, 咬合床などの中間媒体を必要とせずに中心咬合位の対向関係をPC上で再現できることになろう.

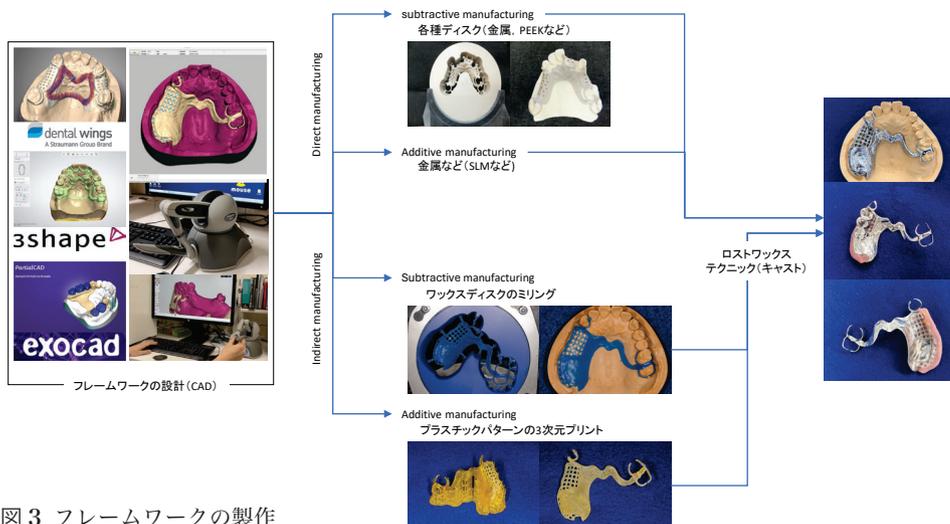


図3 フレームワークの製作



図4 10年以上前に、フレームワークのプラスチックパターンを三次元プリントし、それをキャストで製作した症例。問題なく10年以上経過している。

3. フレームワーク部分の製作

フレームワーク部分の製作のデジタル化の流れを図3に示す。歯列、顎堤データから専用のCADソフトを使って、フレームワークのデザインを決定する。そのフレームワークデザインを直接ミリングや三次元プリンタで製作する方法と、ワックスパターンやプラスチックパターンを製作し、そのパターンをキャストして最終フレームワークを製作する方法とがある。

使用可能材料には、ミリング法ではチタン合金やCo-Cr合金などの金属、ジルコニア、ポリエーテルエーテルケトン (PEEK)、ポリカーボネート樹脂、アクリル樹脂などが用意されている。三次元プリントでは、レジン系以外にも Selective Laser Sintering

(SLS), Selective Laser Melting (SLM), ミリングとSLMのハイブリッド法などの金属積層法も実用化されており、今後積層造形法が主流になっていくであろう¹³⁻¹⁶⁾。

図4に10年以上前にフレームワークを三次元プリントしたプラスチックパターンのキャストで製作した部分床義歯症例を示す。当時でも受容できる精度であった。しかし、CADデータを具現化し最終的な装置の適合精度を得るためには、CAM機器の条件設定に大きく影響されるようで、CAD⇒CAMのシステム設定にさまざまなノウハウが存在することを理解すべきである。

4. 設計および人工歯排列

歯列、顎堤形態とその対向関係のデータを元にCADソフトウェアによって床外形、フレームデザイン、人工歯排列、研磨面形態の設計が行われる。現在は、モニターを見ながら三次元マウスを使いながら補綴歯科医、歯科技工士が設計している。一部は自動的に設計線が生成されるようになっているが、将来的にはすべての設計が自動化されるようになるであろう¹⁷⁾。

咬合採得が適切に行われていれば、人工歯排列をモニター上で行っても、排列位置の基準はその咬合堤に示されているわけで、問題なく行われるはずである。しかし、人工歯排列に必要な生体情報を必ずしも十分に咬合堤に記録しているとは限らない。補綴歯科医、歯科技工士は、咬合堤に記録された情報と咬合器上で得られる情報から、人工歯の排列位置や研磨面形態を決定し適切な咬合様式を付与しており、そのようなこ

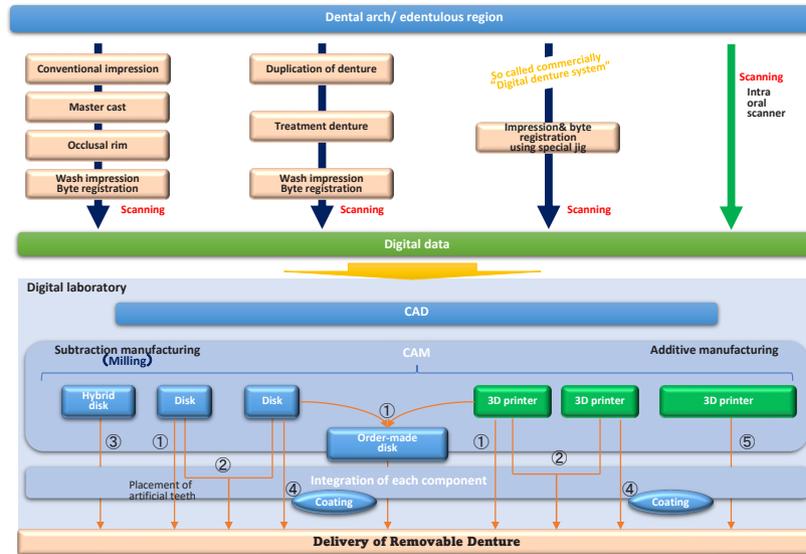


図5 全部床義歯の製作過程のデジタル化。

①～⑤は本文中の番号の説明に相当する部分である。

とのできる熟練した補綴歯科医、歯科技工士は少なくなっているという。このようなノウハウが、モニター上の人工歯排列に移行できるかが今後の課題で、それには、まずは各種解剖学的な基準線や基準面をモニター上に自動的に表示でき、それに従って人工歯排列を含めた義歯形態の設計を行うことのできるCADソフトの開発が必要であろう。

5. 義歯のコンポーネントの統合

部分床義歯の場合には、フレームワーク、人工歯部、義歯床部の三つのコンポーネントに分かれ、全部床義歯も少なくとも人工歯部、義歯床部の二つのコンポーネントに分かれる。CADで設計された複数のコンポーネントを、どうCAMにおいて具現化するかであるが、全部床義歯の場合、以下の方法が考えられる(図5)。

- ① 既製の人工歯を使う場合、既製の人工歯が埋入できる義歯床部をCAD/CAMで製作し、その後、人の手で人工歯を埋入、接着させる。あるいは人工歯部の咬合面のインデックスをまず製作し、人工歯をそれに埋入させたあとに、粘膜色のレジンを流し込み、オーダーメイドのレジンドディスクを製作、そのディスクをミリングし、義歯を完成する¹⁸⁾。
- ② 人工歯部、義歯床部をそれぞれのディスクを用いてミリングあるいは三次元プリンタで製作し、その後、人の手で一体化する。
- ③ 歯冠色と義歯床部が一体となったディスクで、歯頸線ラインをこの2色が接する界面に合わせてミリングし、義歯を完成する。

④ 歯冠色で義歯全体をCAD/CAMで製作し、その後、義歯床唇面にNu:le coat (Yamakin, 高知)などの粘膜色のコーティング材を塗布する¹⁹⁾。

⑤ 三次元プリンタで異種材料を一度に積層する。

部分床義歯の場合にも、全部床義歯と同じような過程を組み合わせて、その過程の一部あるいは全部をデジタル化できる。たとえば、人工歯の咬合面とフレームワークのインデックスをまず製作し、人工歯とフレームワークをそのインデックスに設置した後に、粘膜色のレジンを流し込み、オーダーメイドのディスクを製作、そのディスクをミリングし、義歯を完成する²⁰⁾。

6. 義歯の複製

従来の複製義歯は複製フラスクに装着義歯を埋没し、その後義歯の部分にレジンを填入することで製作してきた。我々は早い時期に、汎用のハンディスキャナーで義歯のスキャンを行う方法を提案し、さらに、治療用義歯として使う場合には、汎用の安価な三次元プリンタでも十分対応できることも報告した²¹⁻²³⁾。医療機器、医療材料として承認されたものが容易に手に入るようになれば、日々の診療だけでなく、訪問診療でも簡単に複製義歯が製作できるようになるであろう。

IV. 補綴歯科における

真の Digital Transformation とは (図6)

デジタル化に関連して、デジタルトランスフォーメーション Digital Transformation (DX) という用語

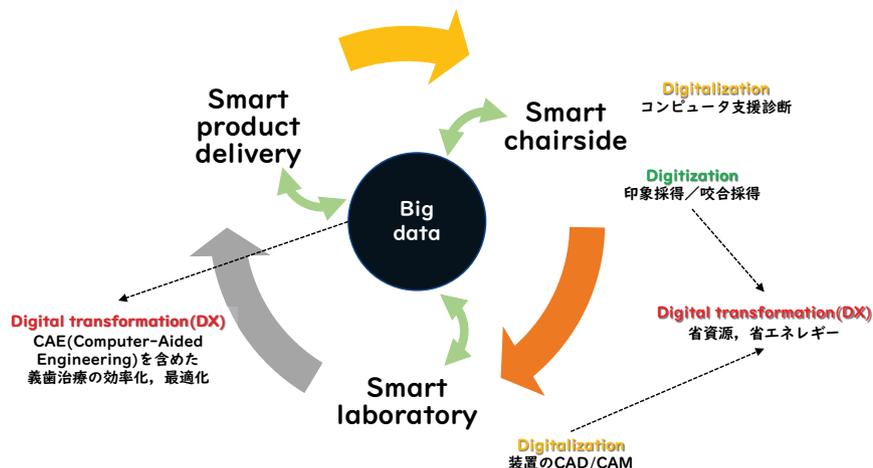


図 6 真の Smart Prosthodontics とは

が補綴歯科領域でもよく使われる。デジタル化には三段階ある。第一段階が、口腔の形態情報、機能情報をデジタル化するのがデジタイゼーション Digitization であり、第二段階が、その数値データを用いてさまざまな診療過程、たとえば、CAD/CAM でクラウン、ブリッジ、義歯を製作することが Digitalization である。第三段階が、その Digitalization を有機的に結合し、補綴治療全体を効率化し、社会的に影響を与えるような変革を DX と呼ぶ。補綴歯科治療における DX は、治療データ、技工データを数値化、保存し、ビッグデータとし、データ基盤型補綴歯科治療を構築し、それをもとにより良い補綴歯科治療の環境、循環を作り上げるのが DX となるであろう。その結果、治療時間、治療材料が非常に少なくなり、省資源、省エネルギーになり、脱炭素、カーボンニュートラルに貢献することをいうのであろう。まさにこのことを Smart prosthodontics と呼んでほしい²⁴⁾。

V. おわりに

義歯治療のデジタル化は、技工部分は可能な状態になっており、今後は印象採得、咬合採得などのチェアサイドでの治療を含めたデジタル化が進むであろう。はじめにで紹介した Bidra らが指摘した精度、有効性を確認する臨床試験は、義歯治療全体のデジタル化において必要になろう。あわせてその中で指摘された「教育的、研究的、臨床的可能性を秘めている点」についても、義歯治療のデジタル化は義歯治療の暗黙知のところを形式知（客観知）にすることの可能性を秘めていると考える。その一方で、義歯治療の多くがよりブラックボックス化することも考えられ、ChatGPT の登

場により最近注目を集めているプロンプトエンジニア（AI が高品質なコンテンツを生み出せるように指示を出すエンジニアのこと）ならぬ「プロンプトプロソドニティスト」が生まれるかもしれない。

謝 辞

当教室の歯科技工のデジタル化にご指導いただいた大阪歯科大学の樋口鎮央先生、日頃当教室の研究にご協力、ご支援いただいている本学病院の鴨居浩平歯科技工士に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 田中晋平, 馬場 一美. 補綴歯科治療のデジタル化の現状と未来. 日補綴会誌 2017 ; 9 : 38-45.
- 2) Bidra AS, Taylor TD, Agar JR. Computer-aided technology for fabricating complete dentures: systematic review of historical background, current status, and future perspectives. J Prosthet Dent 2013; 109: 361-6.
- 3) Baba NZ, Goodacre BJ, Goodacre CJ, Müller F, Wagner S. CAD/CAM complete denture systems and physical properties: A review of the literature. J Prosthodont 2021; 30: 113-24.
- 4) Carlo P, Brugger R. Digital removable complete denture—an overview. Current Oral Health Reports 2021; 8: 117-31.
- 5) Chebib N, Kalberer N, Srinivasan M, Maniewicz S, Perneger T, Müller F. Edentulous jaw impression techniques: An in vivo comparison of trueness. J Prosthet Dent 2019; 121: 623-30.
- 6) Russo LL, Caradonna G, Troiano G, Salamini A, Guida L, Ciavarella D. Three-dimensional differences between intraoral scans and conventional impressions of edentulous jaws: A clinical study. J Prosthet Dent 2020; 123: 264-8.
- 7) 鈴木哲也, 大木明子. 全部床義歯補綴の床形態に関する統一見解. 日補綴会誌 2016 ; 8 : 18-23.

- 8) 市川哲雄, 北村清一郎. 総義歯を用いた無歯顎治療—口腔解剖学の視点から. 東京: クイッテッセンス出版; 2005.
 - 9) Matsuda T, Goto T, Ichikawa T et al. Digital assessment of preliminary impression accuracy for edentulous jaws: Comparisons of 3-dimensional surfaces between study and working casts. *J Prosthodont Res* 2016; 60: 206-12.
 - 10) Matsuda T, Goto T, Kurahashi K, Kashiwabara T, Ichikawa T. Development of a digital impression procedure using photogrammetry for complete denture fabrication. *Int J Comput Dent* 2016; 19: 193-202.
 - 11) Matsuda T, Goto T, Ichikawa T et al. Part-digitizing system of impression and interocclusal record for complete denture fabrication. *J Prosthodont Res* 2016; 25: 503-9.
 - 12) 金澤 学, 岩城麻衣子, 荒木田俊夫, 水口俊介. CAD/CAM 技術を応用した全部床義歯. *日補綴会誌* 2017; 9: 236-41.
 - 13) 笹木賢治, 稲用友佳, 高市敦士, 村上奈津子, 和田淳一郎, 新井祐貴, 上野剛史, 若林則幸. 部分床義歯のデジタル化に関する文献レビュー. *日補綴会誌* 2022; 14: 17-24.
 - 14) 樋口鎮央. CAD/CAM デンチャーの最前線. *歯科技工* 2017; 45: 958-69.
 - 15) Ichikawa T, Matsuda T, Ishida Y et al. Use of a polyetheretherketone clasp retainer for removable partial denture: A case report. *Dent J (Basel)* 2019; 7: 4.
 - 16) Yunizar MF, Watanabe M, Ichikawa T. Current development status of additive manufacturing technologies for fabricating removable partial denture frameworks: a literature review. *Int J Comput Dent* 2022; 25: 57-70.
 - 17) Liu L, Watanabe M, Ichikawa T. Robotics in dentistry: A narrative review. *Dent J (Basel)* 2023; 11: 62.
 - 18) Soeda Y, Komagamine Y, Kanazawa M, Hada T, Iwaki M, Minakuchi S. Trueness and precision of artificial teeth in CAD-CAM milled complete dentures from custom disks with a milled recess. *J Prosthet Dent* 2022; S0022-3913(22)00642-4. Online ahead of print.
 - 19) 瓜生博伺. 超高齢社会における 3D テクノロジーを活用したデュプリケートデンチャーの有用性. *歯科技工* 2023; 51: 854-63.
 - 20) Akiyama Y, Kanazawa M, Iwaki M, Hada T, Soeda Y, Otake R et al. Fabrication of milled removable partial dentures using a custom plate with prefabricated artificial teeth. *J Prosthodont Res* 2023; 67: 647-51.
 - 21) Kurahashi K, Matsuda T, Ichikawa T et al. Duplication of complete dentures using general-purpose handheld optical scanner and 3-dimensional printer: Introduction and clinical considerations. *J Prosthodont Res* 2017; 61: 81-6.
 - 22) 倉橋宏輔, 松田 岳, 市川哲雄ほか. 汎用デジタル機器を用いて製作した複製義歯: 材料特性と臨床評価. *日補綴会誌* 2017; 9: 357-64.
 - 23) Matsuda T, Goto T, Ichikawa T et al. Geometric assessment of imaging methods for complete denture form: Comparisons among cone-beam computed tomography, desktop dental scanning, and handheld optical scanning. *J Prosthodont Res* 2020; 64: 485-9.
 - 24) 市川哲雄. 歯科の基盤を支え, 創る補綴の矜持. *日補綴会誌* 2017; 9: 159-62.
-
- 著者連絡先: 市川 哲雄
〒770-8504 徳島市蔵本町 3-18-15
徳島大学大学院医歯薬学研究部口腔顎顔面補綴学分野
Tel: 088-633-7346
Fax: 088-633-7461
E-mail: ichi@tokushima-u.ac.jp

