

Digital Prosthodontics の変遷と展望

宮崎 隆

Current Status and Future Perspective of Digital Prosthodontics

Takashi Miyazaki, DDS, PhD

抄録

近年デジタル技術が歯科医療にも急速に導入されている。補綴治療においても、補綴装置作製の歯科技工に CAD/CAM の手法が利用され、新しいガラスやジルコニア系のファインセラミックスの利用が可能になった。さらに、光学印象用の口腔内スキャナーが開発され、印象採得から模型作製、歯科技工の全工程にデジタルの応用が進められている。このような補綴治療へのデジタルの応用は、患者にとって、低侵襲治療、治療期間の短縮、治療効果の向上、適正な治療コストなどから医療サービスの向上に貢献すると期待される。

和文キーワード

デジタル技術, CAD/CAM, 光学印象, ジルコニア

I. はじめに

近年、コンピュータや電気・電子・情報工学を駆使したいわゆるデジタル技術さまざまな分野で急速に普及し、歯科医療現場でも、レントゲン機器をはじめとする診断機器、患者コミュニケーションツール、画像管理、レセコン、電子カルテ、予約システムなど多様なシステムが利用されている。

デジタル化の流れは、一般的な補綴処置にも新しい流れをもたらしている。従来の補綴治療では印象採得、咬合採得をして、模型を作製し、そこから専門の技工作業の工程を経て補綴装置の作製を行ってきた。いわゆる間接法の工程は、三次元形態情報を材料の表面で転写すること、材料の寸法変化を調整しながら最終的な鑄造体の適合性を得ており工程数が多いことから、材料間の誤差の積み重ねや修復物の形状により適合性に限界があり、術者の取り扱いや熟練度に左右される。一般産業界ではコンピュータを利用した設計と製作システム(CAD/CAM)が導入されて製造業の業務形態が刷新されたが、歯科技工にも CAD/CAM が導入され、補綴装置の作製方法や利用される材料に変革が生じつつある。さらに、

従来の印象採得に代わり、口腔内スキャナーを利用した光学印象が登場し、digital impression (光学印象)、から digital model を作製し、CAD/CAM の工程を経て補綴装置を作製する digital prosthodontics 化が期待されている (図1)¹⁾。

本稿においては、歯科用 CAD/CAM の歴史と現状を概説し、新素材の導入とともに digital prosthodontics の将来展望を述べたい。

II. digital prosthodontics (歯科用 CAD/CAM) の変遷

1946年にペンシルバニア大学ムーア校で開発された世界最初の電子計算機「ENIAC」が、いわゆるコンピュータと呼ばれるものの最初といわれているが、完成当初は主に軍用途としてミサイルの弾道計算に用いられていた。1950年代後半にはマサチューセッツ工科大学(MIT)でコンピュータを用いた図形処理システム(CAD)のプロジェクトが始まった。1960年代には自動車や飛行機の業界でCADシステムが開発され、1970年代には製作まで含めたCAD/CAMシステムが導入され、一般産業界にも順次普及が進められた。自動車業界

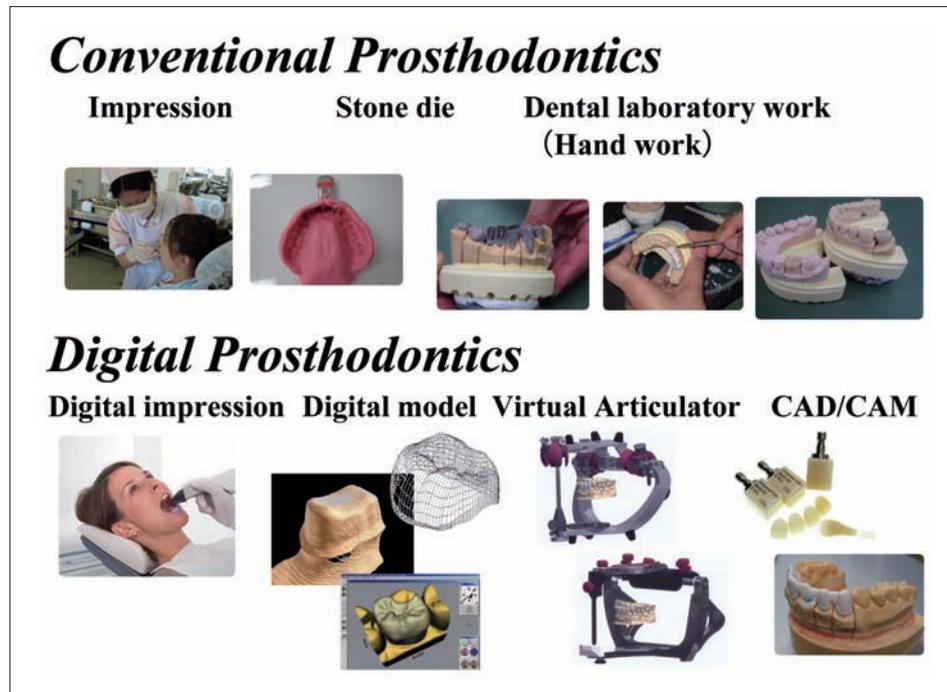


図 1 Image of the differences between analog and digital procedures of prosthodontics
従来の補綴治療と digital prosthodontics 手法における違い (イメージ)

では、従来手書きの線図で設計をして削り加工による直彫りで試作品を作製していたが、1990年代には本格的なバーチャル開発が行われるようになり、開発期間の短縮と開発コストの低減が実現された。このような一般産業界で実用化された CAD/CAM システムの導入は 1970 年代以降歯科補綴装置の作製にも期待されたが、実用化への道は平坦ではなかった。

一般産業界の製品が図面を製作のスタートとしたのに対し、歯科補綴装置は口腔内の支台歯や顎堤に適合させることが必須であるので、CAD の前提として対象の生体組織の形態情報の入手、すなわち計測が必要になる。また、一般産業界が少品種大量生産であったのに対し、歯科医療では個別の患者の症例に究極のテーラーメイドの装置を作製してきた歴史がある。そこで、この領域に CAD/CAM を導入するにあたっては、現状のシステムではできない付加価値が必要になる。それらには新素材の適用や品質の向上と保証、生産性の向上と医療サービスのさらなる向上があげられる。

歯科用 CAD/CAM 研究開発の歴史を表 1 に示す。一般産業界で CAD/CAM が注目された 1970 年代に、二人のパイオニアが歯冠修復物作製に CAD/CAM を検討した。Duret はクラウン・ブリッジの作製に、光学印象をスタートとする製作システムを提案したが、口腔内スキャナーの精度やコンピュータソフトの限界で実用化

に時間がかかった²⁾。一方、Mörmann はセラミックインレーに特化して実用化に成功した。対象が限られており、しかも咬合面形態の CAD ができないという制約はあったが、CAD/CAM 化のメリットである早期の機能回復や新材料の導入が臨床家に受け入れられ、このシステムは今日に至るまで歯科用 CAD/CAM を牽引してきた³⁾。

1980 年代以降、咬合面をコンピュータで設計してクラウン・ブリッジを作製することが、世界中の研究者や企業の目標になった⁴⁻¹²⁾。口腔内でクラウン支台歯のマーチンを精度良く光学印象するのは難しかったため、精密に再現された石膏模型を CAD/CAM のスタートとして、主に技工作業の効率化を目的に実用的な歯科用 CAD/CAM システムが開発された。歯科技工用 CAD/CAM システムは形態情報の入手のためのデジタイザー、CAD のコンピュータ、数値制御加工機 (CAM) から構成される。当初は 3 点の装置が分離しているものが開発され、小型の一体型装置も開発された。加工効率を向上させるために、デジタイザー (および CAD コンピュータ) を加工装置から分離し、ローカルネットワークで接続するものが登場した。

さらにインターネットが普及したことにより、デジタイザーと加工センター間で国境を越えたネットワークを利用した新しい加工システムが登場した。最初に実用化

表 1 R & D history of the dental CAD/CAM system
 歯科用 CAD/CAM 研究開発の歴史

1971 年	Duret	CAD/CAM システムの考えを歯科に持ち込む
1979 年	Mörmann (Zurich Univ)	CEREC system の元になるプロジェクトの立ち上げ
1983 年	Duret (USC)	最初のプロトタイプを発表 →後に Sopa system として展開
1984 年	神奈川歯科大学藤田ら	タッチプローブと NC 加工機で CAD/CAM の可能性示す
1987 年	Rekow (Univ Minnesota)	Denti CAD system の発表 →後に BEGO 社システムのもとになる
1988 年	Siemens Dental 社	CEREC system の発表
1988 年	大阪大学歯学部木村ら	補綴物製作用 CAD/CAM システムの研究に着手
1989 年	Anderson (Univ Michigan)	放電加工を使ったチタンの CAD/CAM システム開発 →後に Procera system として展開
1990 年	DCS Dental AG 社	DCS Titan system の発表 →後に DCS PRECIDENT
1993 年	昭和大学歯学部宮崎ら	デジタルプロセス (株) と協同で全自動 CAD/CAM を発表 →後に DECSY として発売
1993 年	Nobel Biocare 社 (Procera system)	焼結アルミナを用いたコーピング製作法の発表
1993 年	北海道大学歯学部内山ら	(株) ニコン・(株) ジーシー・日立精工 (株) と通産省プロジェクト →後に GN-1 (GC) として発売
1998 年	DeguDent 社	Cercon system を発表 (ジルコニアの削加工)
2002 年	Nobel Biocare 社 (Procera system)	焼結ジルコニアを用いたコーピング製作法の発表

したのはプロセラシステムである¹³⁾。スウェーデン本国の加工センターで、歯科技工所から送信された模型のデータからフレームの設計をして、大規模設備を利用して高密度焼結体アルミナのフレームを作製し、注文した歯科技工所に配送する。技工の分業化ではあるが、これまでの歯科技工設備では利用ができなかったファインセラミックスを応用したことで、世界に普及した。2000年以降はファインセラミックスのなかでも高強度の高密度焼結体ジルコニアがオールセラミックスのフレームとして注目され、ネットワークと加工センター方式が適用されて、歯科技工の確固たる分野になった。CAD/CAM は世界中で急速に実用化されてきており¹⁴⁾、同様の流れは5年ほど前からわが国にも入ってきた^{15, 16)}。表2に現在わが国の臨床で使用可能な代表的な CAD/CAM システムを示す。

現在、世界で最も規模の大きい歯科展示が隔年で行われるケルンの IDS (国際歯科展示会) では、CAD/CAM 関連出展ブースが非常な勢いで増加しており (図2)、世界の歯科医療の流れが今後さらにデジタル化していくのは間違いない。わが国においては、歯科医療が保険に取り込まれているので、現状では CAD/CAM はインプラント治療や審美歯科治療の一部に導入されているのが現状であるが、今後は幅広い補綴治療への応用が期待さ

れる¹⁷⁾。

III. digital prosthodontics の展望と新材料の適用

近年の技術革新は、コンピュータ、CAD ソフト、加工機、ネットワーク技術だけでなく、光学技術にも及んでいる。従来の歯科技工用 CAD/CAM システムの模型を対象にしたデジタイザーでは、接触計測方式やポイントレーザやラインレーザを用いた方式が実用化されてきた。最近では、計測対象に規則的なパターン光を照射し、それをカメラで捉えて三次元形状を測定する方式が実用化され、従来よりも高速、高精度な計測が可能になった (図3)。さらに新しいタイプの口腔内スキャナーが開発され、光学印象の実用化が急速に進められている (表3)¹⁸⁾。

今後の digital prosthodontics では、digital impression (光学印象) から digital model を作製し、仮想咬合器に装着して、CAD/CAM の工程を経て補綴装置を作製する。光学印象には、①安全性 (印象採得に伴う感染の危険や患者の苦痛の低減)、②チェアタイムの軽減、③精度の向上、④経済性 (印象材の不要)、⑤情報量の増大などの利点が期待されるが、精度については今後の

表2 Dental CAD/CAM systems in the world (especially available to use in Japan)
世界の歯科用 CAD/CAM システム (特に日本で利用されているもの)

システム名 (企業名)	計測機	加工機	対象修復物				対象材料					中央加工方式
			In	Veneer	Cr	Br	Re	Ti	Po	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	
Everest (KaVo electrotechnical work GmbH)	自社開発	自社開発	○	○	○	○		○	○		○	○
Lava (3M ESPE Dental AG)	自社開発	自社開発			○	○		○	○		○	○
Procera (Nobel Biocare Germany GmbH)	自社開発	自社開発		○	○	○		○	○	○	○	○
Cercon smart ceramics (DeguDent GmbH)	自社開発	自社開発			○	○					○	可能
CEREC AC (Sirona Dental of system GmbH)	自社開発	自社開発	○	○	○	○			○			可能
Hint-ELs system (Hint-ELs DentaCAD systems)	自社開発	自社開発	○		○	○	○	○	○		○	?
Aadva system (株)ジーシー)	自社開発	自社開発	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
C-Pro system (パナソニックヘルスケア(株))	OEM	自社開発			○	○					nano-Compsite	○
Katana (株)ノリタケデンタルサプライ)	OEM	OEM			○	○					○	○
ZENO [®] Tec System (Wieland)	OEM	OEM			○	○					○	○

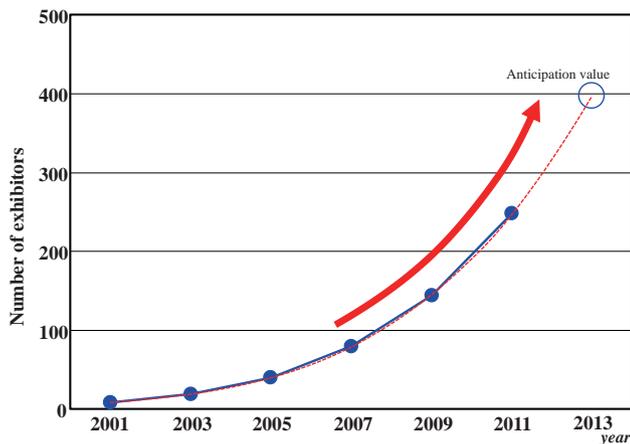


図2 Transition of the number of CAD/CAM-related exhibitors attending the International Dental Show IDS における CAD/CAM 関係出展ブース数推移



図3 Pattern light projection to digitizing (Hint-ELs hiScan)
計測対象にパターン光を投影するもの (写真は Hint-ELs hiScan)

検証が必要である。同様に模型をデジタル化することにより、安全性、情報量の増大、精度の向上等が期待される。また、必要なときに石膏以外の材料で模型を作製できることも利点になる。

近い将来に、歯科医院での光学印象がスタートになって、院内の CAD/CAM システムの利用と歯科技工所を介したネットワークの CAD/CAM がさらに効率良く利用できる時代がくると期待される (図4)。これにより、

表 3 Today's commercially available and unveiled intra-oral scanners
現在公表されている口腔内計測システム

口腔内カメラ	会社	計測方法	光源	画像タイプ	コーティング	院内加工	出力形式
CEREC [®] AC-Bluecam	Sirona Dental System GmbH (DE)	アクティブ三角測量と共焦点法	青色可視光	複数画像重ね合わせ	酸化チタンパウダー	可能	専用
iTero	Cadent Ltd (IL)	平行共焦点法	赤色レーザー	複数画像重ね合わせ	必要なし	不可	専用と STL
E4D	D4D Technologies, LLC (USA)	光干渉断層法と共焦点法	赤色レーザー	複数画像重ね合わせ	ほとんど必要なし	可能	専用
Lava [™] C.O.S.	3M ESPE (USA)	3台のカメラでアクティブ波形サンプリング	青色可視パルス光	10分以内のビデオ像	酸化チタンパウダー	不可	専用
3D Progress (Zfx IntraScan, Cyrtina [®] Intra Oral Scanner)	MHT S.P.A. (Italy)-MHT Optic Research AG (CH)	共焦点法とモアレ断層撮影	非公開	複数画像のリアルタイム合成	ほとんど必要なし	不可	STL
TRIOS [®]	3shape A/S (Denmark)	共焦点法	非公開	複数画像重ね合わせ	非公開	不可	非公開
directScan	Hint-ELs GmbH, Germany	立体鏡とライン投影	非公開	複数画像重ね合わせ	非公開	不可	STL
Bluescan-I [™]	a.tron3D [™] GmbH, Austria	2台のカメラによるステレオ撮影と構造化光投影法	青色可視光	複数画像重ね合わせ	必要なし	不可	STL

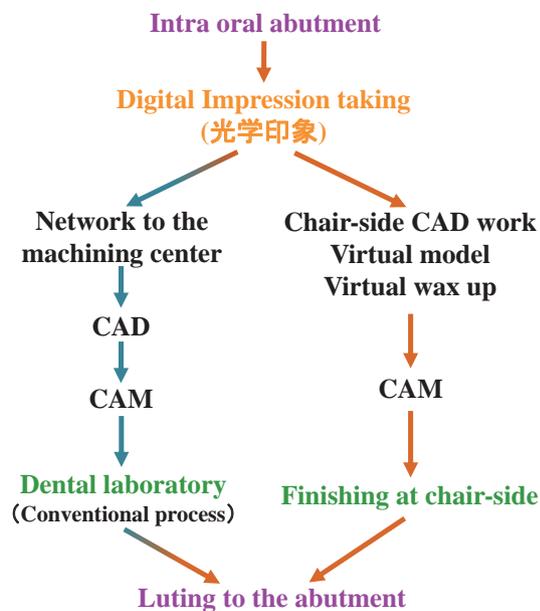


図 4 An optical impression taking is soon expected to be the starting procedure of the chair-side CAD/CAM system, ora network CAD/CAM system through the dental laboratory to increase efficiency. 近い将来に、歯科医院での光学印象がスタートになって、院内の CAD/CAM システムの利用と歯科技工所を介したネットワークの CAD/CAM がさらに効率よく利用できる時代がくると期待される

検査、診断、患者説明、処置、歯科技工、診療録管理まで一連の digital dentistry が完成する。

材料に対する安全性や審美性の要求が高まり、患者の希望する修復物は金属からセラミックスにシフトしつつある。しかし、残念なことに従来のポーセレンやその改良品は素材としての耐久性が十分ではなく、製作工程が煩雑で術者の経験と力量に依存し生産能率が低く、それが患者のチャージにも反映せざるをえなかった。CAD/CAM の導入により、新しいセラミック材料を効率良く利用できるようになった。

図 5 に代表的な歯科用セラミックスの曲げ強さと破壊靱性値を示す。従来のポーセレンは曲げ強さが 100 MPa、破壊靱性値が 1 MPa m^{1/2} 前後であるが、分散強化、ガラス浸透強化、高密度焼結体化により、新素材の曲げ強さと破壊靱性値が向上した。特にジルコニア系材料の強度が非常に大きい。

金属焼付ポーセレン修復をオールセラミックス修復にするためには、現在のポーセレンよりも強度が大きく同等の審美性を有する材料を利用する方法と、金属の代わりに高強度セラミックスのフレームを作製して従来のポーセレンを前装する方法の 2 通りがある。前者には強化ガラス（結晶分散ガラス）が利用されるが単冠に限

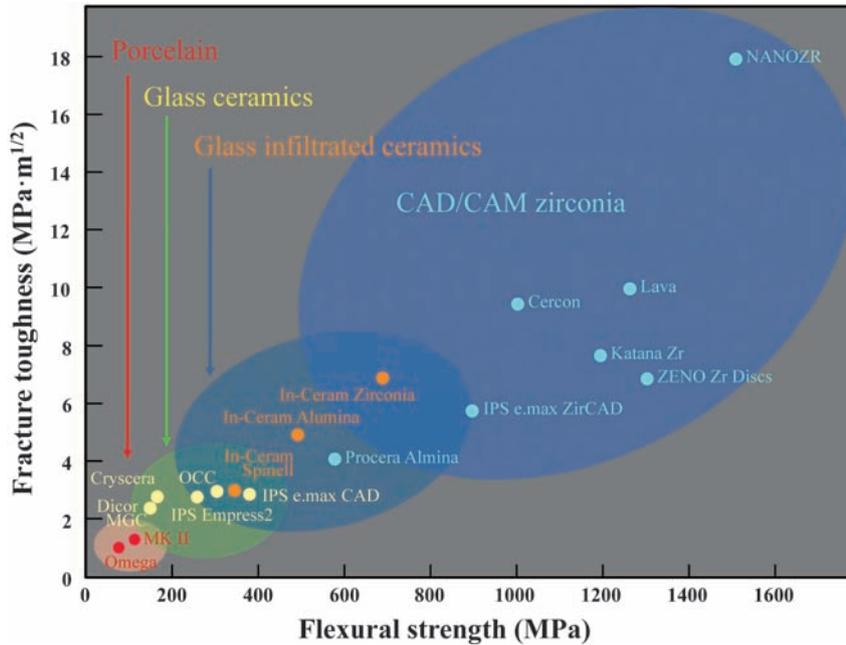


図5 Fracture toughness and flexural strength of the representative dental ceramics
代表的な歯科用セラミックスの曲げ強さと破壊靱性値

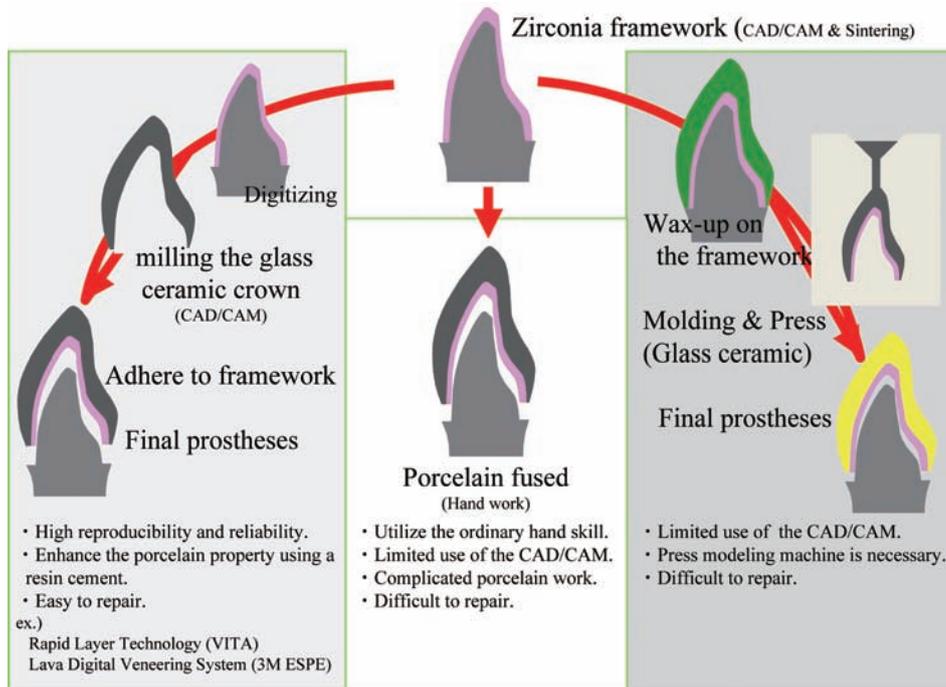


図6 Hybrid fabrication methods for zirconia prostheses
ジルコニアフレームを利用したハイブリッド補綴物の製作法

定される。後者には当初ガラス浸透セラミックスやアルミナ高密度焼結体が利用されたが、近年さらに強度が大きいジルコニア高密度焼結体が実用化され、ブリッジやインプラント上部構造のフレームに利用されている。これらの新しいセラミックスを利用するために CAD/

CAM が利用される。

CAD/CAM 装置でブロックから削り出すガラス（ポーセレン）クラウンは、従来の粉末築成・焼成による形態再現に比べて非常に効率が良い。ブロックは粉末築成・焼成体と比べると内部欠陥を含まず、適合性も安定す

る。しかも従来のポーセレンに使用するアドオンやステイニングが併用できるので、歯科技工士が簡単に修正や仕上げをすることができる。さらに臨床家が接着処理と接着性レジンセメントを利用して合着すると、臼歯部単冠に十分な耐久性を有する。

一般的にジルコニアという名称が使われるが、正式にはイットリアを固溶して正方晶に安定化したジルコニアの高密度焼結体 (TPZ: イットリア安定化正方晶ジルコニア) が、現在世界中で、ブリッジやインプラント上部構造体のフレームとして応用されている。一方、セリアを固溶して正方晶に安定化したジルコニアとアルミナの複合材料で、ジルコニアとアルミナ結晶内にナノサイズのアルミナとジルコニアを配合して強化した材料がわが国で開発され、臨床応用が始まった。この材料はイットリア系ジルコニアの3倍の破壊靱性値を有し、現在利用できる歯科用セラミックスのなかで最も強度の大きい材料である。イットリア系ジルコニアは、口腔内環境下で低温劣化を被る危険性が指摘されているが、本材料は低温劣化が生じないので、サポート形状についても0.3 mmの厚さで、従来の金属焼付けポーセレン修復の金属フレームと同じように設計できると期待されている。現状ではフレームの作製にCAD/CAMが利用されても、前装のポーセレンは従来の手作業による粉末築成と焼成で完成される。今後は、前装体についてもCAD/CAMで作製し、技工室であらかじめフレームと接着して一体化して完成するシステムも注目されている(図6)^{19, 20)}。

IV. まとめ

digital prosthodontics のメリットをあげると以下のようになる。

(1) 従来の間接法では不可能であったデータの保存や再利用、画像や構造解析を基にした修復物の設計、データの転送による歯科技工のネットワーク化が可能になる。

(2) 安全性や強度、審美性に優れた新素材の利用が可能になり、しかも工場で管理されたブロックを出発点にすることにより、内部欠陥のない品質の安定化が可能になる。

(3) 術者の経験や勘に頼っていた修復物の適合性を安定的に再現することが可能になる。

(4) 治療や歯科技工の作業工程が省力化され、作業環境の改善が可能になる。

一方、課題もある。

(1) 従来の手作業に比較してCAD/CAMは融通が利かない。

(2) 計測装置や加工装置の精度が最終修復物の適合

性に影響する(必ずしも従来の最高レベルには到達しない)。

(3) 支台歯形成の自動化は現状で難しいので、CAD/CAMは手作業との協働にならざるをえない。

(4) 現状では顎口腔の機能時の情報をCAD/CAMに反映するのが難しい。

しかし、材料や技術、装置の進歩が急速に進められているので、これらの課題が克服されて、CAD/CAMを中心とするdigital prosthodonticsがますます普及していくことは時間の問題である。digital prosthodonticsは、患者にとって最終的には低侵襲治療、治療期間の短縮、治療効果の向上、適正な治療コストなどの面から、医療サービスの向上に貢献すると期待される。

文 献

- 1) Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J* 2009; 28: 44-56.
- 2) Duret F. Toward a new symbolism in the fabrication of prosthetic design. *Cah Prothese* 1985; 13: 65-71.
- 3) Mormann WH, Brandestini M, Lutz F, Barbakow F. Chair side computer-aided direct ceramic inlays. *Quintessence Int* 1989; 20: 329-339.
- 4) Van der Zel JM. Ceramic-fused-to-metal restorations with a new CAD/CAM system. *Quintessence Int* 1993; 24: 769-778.
- 5) Andersson M, Oden A. A new all-ceramic crown: a dense-sintered, high purity alumina coping with porcelain. *Acta Odontol Scand* 1993; 51: 59-64.
- 6) 青木英夫, 藤田忠寛, 仁科匡生. CADシステム及びNC加工による歯科技工のオートメーション化—コンピュータ歯科技工の世界—。歯科技工 1986; 14: 1491-1498.
- 7) Tsutsumi S, Fukuda S, Tani Y. 3-D Image Measurements of Teeth and Alveolar Ridge. *J Dent Res* 1989; 68(Suppl): 924.
- 8) 木村 博, 莊村泰治, 渡辺隆司. 歯形状の三次元計測(第1報) 高精度レーザー変位計による計測. 歯材器 1988; 7: 552-557.
- 9) 疋田一洋, 内山洋一. 歯冠形態の三次元計測と復元(CAD/CAM)に関する研究. 補綴歯 1989; 33(S 82): 142.
- 10) 川中正雄. 歯科用CAD/CAMシステムの開発に関する研究. 阪大歯学誌 1990; 35: 206-239.
- 11) 川畑直嗣. 有床義歯におけるCAD/CAMの利用—臼歯部人工歯排列と咬合面の複製—. 日本歯科人工知能研究会雑誌 1991; 1: 16-19.
- 12) 宮崎 隆, 堀田康弘, 鈴木 暎, 宮治俊幸, 高橋英和, 古屋良一, 他. 放電加工を利用したCAD/CAMシステムの開発に関する基礎的研究(第1報) 歯冠形状の計測とコンピュータグラフィックス及びCAD操作について. 昭歯誌 1991; 11: 65-69.

- 13) Hegenbarth EA. Procera aluminum oxide ceramics: A new way to achieve stability, precision, and esthetics in all-ceramic restorations QDT 1996; 21: 17-30.
- 14) Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. BrDent J 2008; 204: 505-511.
- 15) 伴 清治. オールセラミックスの歯科材料学. オールセラミックレストレーション. 歯科技工別冊 2005 ; 32-43.
- 16) オールセラミックスの可能性を開くジルコニア工学的特徴. 最新 CAD/CAM レストレーション. 補綴臨床別冊 2008 ; 26-34.
- 17) Strub JR, Rekow ED, Witkowski S. Computer-aided design and fabrication of dental restorations-Current systems and future possibilities. JADA 2006; 137: 1289-1296.
- 18) Logozzo S, Franceschini G, Kilpelä A, Caponi M, Governi L, Blois L. A Comparative Analysis Of Intraoral 3 d Digital Scanners For Restorative Dentistry. The Internet Journal of Medical Technology. 2011;5: on-line.
(http://www.ispub.com/journal/the_internet_journal_of_medical_technology/volume_5_number_1_50/article/a-comparative-analysis-of-intraoral-3-d-digital-scanners-for-restorative-dentistry.html)
- 19) Beuer F, Schweiger J, Eichberger M, Kappert HF, Gernet W, Edelhoff D. High-strength CAD/CAM-fabricated veneering material sintered to zirconia copings—a new fabrication mode for all-ceramic restorations. Dent Mater 2009; 25: 121-128.
- 20) Kuriyama S, Terui Y, Higuchi D, Goto D, Hotta Y, Manabe A, Miyazaki T. Novel fabrication method of zirconia restorations: Bonding strength of machinable ceramics to zirconia with resin cements. Dent Mater J 2011; 30: 419-424.

著者連絡先：宮崎 隆

〒142-8555 東京都品川区旗の台 1-5-8

Tel: 03-3784-8178

Fax: 03-3784-8179

E-mail: miyazaki@dent.showa-u.ac.jp

Current Status and Future Perspective of Digital Prosthodontics

Takashi Miyazaki, DDS, PhD

Department of Oral Biomaterials and Technology, Showa University School of Dentistry

Ann Jpn Prosthodont Soc 4: 123-131, 2012

ABSTRACT

Recently, digital technologies have been widely available in dentistry. Especially, CAD/CAM has now become available in the field of dental laboratory technology to fabricate prostheses with glass ceramics and zirconia based fine ceramics. Moreover, the development of oral scanners for digital impression taking has made a series of digital prosthodontics practical, starting as it did from impression taking and moving into model preparation and laboratory work. Digital prosthodontics is expected to attract patients as a result of low intervention, reduction of treating time, improvement of clinical outcome, and reduction also of medical costs.

Key words

digital technology, CAD/CAM, digital impression taking, zirconia