

《特別企画》

20年後に向けての歯科医療 —近未来の歯科補綴装置のあり方—



大阪歯科大学歯科審美学室 教授
大阪歯科大学歯科技工士専門学校 校長

末 瀬 一 彦

●抄 録●

歯の変色や歯列不正、実質欠損あるいは歯の喪失に対して人工材料を用いて形態的、機能的、色彩的に回復するのが補綴装置の役割である。体の人工臓器を製作する場合、形態的・機能的な要因は重視されるが、歯科医療においては審美的配慮がことのほか重要視され、一般医科との大きな違いである。歯科医療ではこれまで金属修復物が多用されてきたが、近年多くの問題点が指摘され、その代替材料として多くの材料が開発され、すでに臨床応用されている。今回、近未来の補綴装置のあり方を論ずるにあたって、特にメタルレス修復への転換ならびに最近注目されているCAD/CAMシステムの最新情報と展望について解説する。近年普及のめざましいデジタル化によって、補綴装置製作におけるトレーサビリティが確保できるCAD/CAMシステムの導入は多くの利点があり、将来的には人の技能と機械加工のコラボレーションによって国民に安全、安心な歯科医療の提供が可能となる。

キーワード：CAD/CAMシステム、デジタルデンティストリー、メタルボンドクラウン、セラミックス、ジルコニア

I. はじめに

近年、少子高齢化に伴う疾病構造の変化、新規材料や機器の開発などによって歯科医療の変化はめざましく、20年後どころか、10年先の歯科医療の実態についても予測できないのが現状である。特に、デンタルIQの向上による若年者における齲蝕罹患率の激減、8020運動の推進による欠損歯数の減少、新規器材開発による補綴治療のオプションの増加などによって歯科治療の術式や内容が変化してきた。

20世紀に入り特に補綴治療は大きく変革してきた(図1)。その代表的なものとして、これまで金属板を加工した帯環金属冠から鑄造技術の導入によってロストワックス法が適用され、形態再現性や適合性に優れた修復物の製作が可能となり、鑄造機や関連材料など

精密鑄造	<ul style="list-style-type: none"> • 金合金を用いた修復 • 精度の高い形態再現・適合精度
メタルセラミッククラウン	<ul style="list-style-type: none"> • 金属の強度 • 陶材の審美性
光重合型コンポジットレジン	<ul style="list-style-type: none"> • 強度+色調再現 • 操作性・経済性
接着技術	<ul style="list-style-type: none"> • 金属・陶材への接着
オールセラミッククラウン	<ul style="list-style-type: none"> • 色調再現+生体親和性 • 高い審美性+強度
CAD/CAMシステム	<ul style="list-style-type: none"> • 生産性の向上+材料の均質化 • 品質管理+作業環境改善

図1 20世紀における歯科医療の革新
fig. 1 Innovation of the prosthetic dentistry in the 20th century

の開発も進められてきた。日本が世界に誇る保険診療においても金銀パラジウム合金が主流となり、口腔内には多くの「銀歯」が装着されてきた。しかし、金属色の欠点を回避するために、外観に触れるところはセラミックスの審美性、咬合力などの負荷がかかる部分はメタルで回復するというメタルセラミッククラウンの開発は、歯科医療界においても画期的な出来事で、その後製作法の変遷はあったものの、今なお審美修復としては安定的に供給されている。また一方では、高分子化学の開発は日本が中心となり、硬質レジンからハイブリッド型コンポジットレジンへ、また化学重合型から光重合型のコンポジットレジンの変遷は操作性を大きく変え、天然歯のエナメル質の物性に近づけるためにフィラーの微細化や配合率を高くすることによって高強度なコンポジットレジンが開発が進められてきた。一方、セラミックスの補綴材料としての歴史は古く、1800年代中盤からヨーロッパを中心にジャケットクラウンとして臨床応用されてきた。セラミックス特有の脆性から一時は歯冠修復材料としての価値を見失ったが、その後セラミックス自体の高強度化や製作技術の改善などによってセラミックスの特性が大きく変化してきた。このように審美修復治療にも多くの選択肢がラインアップされてきた(図2)。さらに、高分子材料やセラミックスが臨床応用されるにあたっては接着技術の革新は極めて大きく、高分子材料やセラミックス材料の弱点である「もろさ」をカバーするために歯質と一体化させる接着技術の開発は、歯科治療の発展に大きく貢献してきた。そして、精密鑄造が導入されて100年後の今、CAD/CAMテクノロジーが歯科医療を変革しようとしている。CAD/CAMテクノロジーは、1970年代から自動車産業を中心に発展し、歯科医療においてはチタンやジルコニアなど従来の鑄造システムでは扱えきれなかった素材の加工に適用されるようになってきた。補綴装置の製作加工法としてCAD/CAMシステムは歯科科技作業環境の改善など多くのメリットを有し、従来の鑄造システムを凌駕する製作システムの主流になりつつある。最近では医療保険制度の中にも「CAD・CAM冠」として導入され、さらには、口腔内スキャナーの開発に伴って、印象採得や作業模型などを要しないで補綴修復物が完成でき

るシステムも構築され、CAD/CAMテクノロジーは加速度的に進展しつつある。

II. 金属修復の功罪

帯環金属冠や開面金冠が全盛期のころから口腔内には金属が多用され、特に鑄造修復が歯科医療に導入されて以来、口腔内には保険診療で使用されている金銀パラジウム合金はじめ、銀合金、Co-Cr合金、Ni-Cr合金、Tiなどが使用されてきた。これらの合金は全部鑄造冠や前装鑄造冠のフレーム材として用いられてきた。特に金銀パラジウム合金は金の価格変動に伴って、医療保険制度のなかでも金の含有量が5%→20%→12%と変遷してきたが、合金特有の弾性と靱性、操作性は歯冠修復材料として優れ、強度の必要な臨床症例に歯冠修復材料として多様されてきた。歯学教育分野においても、これまでは支台歯形成や修復物の構造設計などにおいては金合金を用いることを基本として教授されてきた。しかし、近年金属を使用した歯冠修復材料に関して多くの問題点が抽出されてきた。一つは金属材料と歯質との物理的性状の違いから、特に支台築造に金属材料を用いた場合、金属の剛性の強さから極めて薄くなった歯質に亀裂や破折が生じることである。これまで論じられてきた支台築造の原則は、接着性のな

現在の審美修復治療の種類

1. メタルを使用
 - 1) 硬質レジン前装鑄造冠
 - 2) 陶材焼き付け鑄造冠
 - 3) 金属箔焼き付けクラウン
 - 4) 電鑄クラウン
2. メタルを使用しない(メタルフリー)
 - 1) 硬質レジンジャケットクラウン
 - 2) ハイブリッド型コンポジットレジンクラウン
 - 3) アルミナスポーセレンジャケットクラウン
 - 4) ハイストレングスセラミッククラウン
 - 5) キャスタブルガラスセラミッククラウン
 - 6) プレッサブルガラスクラウン
 - 7) ガラス浸透型セラミッククラウン
 - 8) 切削加工型セラミッククラウン
 - 9) アルミナボンドセラミッククラウン
 - 10) ジルコニアボンドセラミッククラウン
 - 11) フルジルコニアクラウン

図2 現在臨床応用可能な審美的歯冠修復物
fig. 2 The present clinical applications for esthetic restoration

いリン酸亜鉛セメントを用いることを前提にした考えであった。また、金属イオンの溶出による歯質の変色、歯肉の着色である。メタルコアやメタルクラウンの組成中のZn、Snなどがイオン化し、当該の歯質やクラウンマージン部の歯肉に溶出し、黒変する。さらには、金属アレルギーの原因となり遅延型アレルギーとして口腔内だけでなく、全身症状が発症することも判明してきた。金属材料は当然審美的には好ましくなく患者も受け入れ難いところがあるが、保険診療での制約から我慢されていることもある。前装铸造冠のフレーム材料としても多用されるが、透光性がなく、製作過程においても金属を遮蔽する歯科技工の技術が要求される。また、最近では金やパラジウムの世界的高騰に伴い、医療保険への適用についても論議され、金属代替材料も模索されている。

Ⅲ. 金属代替材料の出現

1) ハイブリッド型コンポジットレジンへの進化

「硬質レジン」というのは日本独自の呼び名で、「Hard resin」というのは海外の文献では見当たらない。わが国では従来からいわゆる硬質レジンがジャケットクラウンや前装铸造冠の前装材料として用いられてきたが、変色の出現や摩耗・咬耗が生じ、口腔内の過酷な環境下では長期間の使用に耐えられないことが臨床経験するところである。そこで、耐久性や研磨性に優れたナノフィラー配合型コンポジットレジン（0.1 μm 未満のナノフィラー）や有機複合フィラー配合型コンポジットレジン（10 μm 以上の有機複合フィラー）が開発され、保険診療適用のコンポジットレジンとして臨床応用されてきた。さらに、フィラー表面処理技術の向上に伴ってモノマーにナノフィラーを高密度に充填させた強化マトリックスを形成し、フィラーの含有率を90%以上まで向上させた「ハイブリッド型コンポジットレジン」（「ハイブリッドセラミックス」と呼ばれることもあるが、厳密にはセラミックスではなく、あくまでコンポジットレジンであり、ガラスフィラーの含有率がかなり多いことからセラミックスに近いということである）がメタルフリー修復の材料として用いられるようになってきた。圧縮強さ600MPa、曲げ強さ200MPaを示し、表面硬さ



図3 ファイバー補強されたハイブリッド型コンポジットレジンブリッジ

fig. 3 The hybrid type composite resin bridge reinforced with the fiber

190Hvは金合金に匹敵する値である。したがって、大白歯部のメタルフリークラウンとしても臨床応用が可能で、さらに、ファイバーを応用することによって高強度のフレーム構造を配し、小ユニットのファイバー補強型ブリッジへの対応も可能である（図3）。最近では、国内において色調再現性や操作性に優れたハイブリッド型コンポジットレジンの開発がさらに進み、保険診療への足掛かりとなる先進医療としても採用されている。一方海外では、ハイブリッド型コンポジットレジンパーマネント修復というよりはプロビジョナル修復としての価値にとどまり、その開発は遅れてきたが、近年CAD/CAMシステムの普及に伴って、切削加工材料として海外での開発が進み注目されている。VITA ENAMICは陶材を半焼結したブロックにレジンを含浸硬化させたもので、フィラーの含有率は88wt%、曲げ強さは150MPaである、LAVA Ultimateはレジンナノセラミックスとして、シリカとジルコニアフィラーの凝集フィラーを硬化させたもので、曲げ強さは220MPaである。日本の企業もフィラー含有のコンポジットレジンブロックやディスクを開発し、保険診療においてメタルの代替材料として適用されることまでできた。

2) セラミック材料の変遷

ポーセレン・ジャケットクラウンの歴史は铸造メタルクラウンよりも古く、数々の変遷を経て現在のオー

1. 金属への陶材焼き付け
熱膨張を増加させた陶材を合金表面の酸化膜に化学的に結合させる
2. 金属箔への陶材焼き付け
Au, Ptなどを含有する極めて薄い合金箔に陶材を焼き付ける
3. 陶材の分散強化
高強度、高靱性のセラミック結晶（アルミナ、マグネシアなど）をガラス層内に分散させる
4. ガラスの結晶化
非晶質のガラス中に結晶構造を析出させる
5. イオン交換による化学的強化
セラミック表面層のナトリウムイオンをカリウムイオンに置換する
6. エナメル質や象牙質への接着
シランカップリング剤やプライマーを介して歯質と一体化させる

図4 セラミッククラウンの強化方法

fig. 4 Progress of the mechanical strength of the ceramics for dentistry

1. 従来型焼成法
2. 鋳造法
3. ヒートプレス法
4. スリップキャスト
5. エレクトロフォーミング法
6. CAD/CAM システム

図6 オールセラミッククラウンの製作法

fig. 6 The problem lists of the metal bonded crown

ルセラミッククラウンへ引き継がれている。セラミックスは引張り強さが弱く、表面の欠陥はクラック伝播し、0.1%の変形で破壊する。したがって、セラミック材料が歯冠修復に用いられるためには、金属への焼き付け、陶材の分散強化、ガラスの結晶化、接着による歯質との一体化などの強化法が行われてきた（図4）。しかし最近ではメタルボンドクラウンに関する問題点、特にメタルの存在がクローズアップされ（図5）、セラミックス単体のオールセラミッククラウンが復活してきた。セラミックスは結晶構造によってアルミナ系、ジルコニア系、二ケイ酸リチウムガラス系、リン酸カルシウムガラス系、アルカリアミノシリケート系、アルミノシリケート系、リユースイト結晶化ガラス系などに分類される。またセラミックスがメタルフリークラウンとして普及するにあたって各種製作方法も考案されてきた（図6）。セラミックスの曲げ強度

- * 製作の者の技能によって形態、色調、適合性が左右される
- * 限局されたスペースのなかで歯頸部付近の色調再現に限界がある
- * 限局されたスペースのなかで色調再現を行うためオーバーカウンターになる
- * メタルカラーの透過によって歯頸部付近の明度が低下する
- * メタルイオンの溶出によって歯肉辺縁部に炎症やブラックマージンが出現する
- * メタルフレーム製作のための鋳造作業が複雑である
- * メタルフレームの存在によって光を遮蔽し、天然歯のような透明感がない
- * ポーセレン中のリユースイトや表面の微細な気泡によって対合歯を摩擦させる
- * メタルフレームの金属イオンによって金属アレルギーを生じることがある

図5 メタルボンドクラウンの問題点

fig. 5 The method of strengthening a ceramic crown

と破壊靱性値の関係において従来の築盛・焼成型セラミックスに比較して最近の高密度焼結体であるジルコニアは格段に向上している（図7）。ジルコニアはこれまで生体材料としての優位性は認められてきたが、精密な加工方法が見当たらず歯科医療に導入されてこなかった。しかし、CAD/CAMシステムの導入によって切削加工が可能となり、今最も注目されている歯冠修復材料である。ジルコニアは切削工具の損耗や機械の剛性、加工効率などを考慮してイットリア部分安定化ジルコニア結晶体を切削後、最終的に専用炉で高温焼結して高密度焼結体を製作する方法が主流である。また、ジルコニアはクラウンやブリッジのフレーム材料として応用され、切削加工後ポーセレンを築盛焼成して審美的歯冠修復物を製作する方法が一般的であるが、最近では、高強度、高透光性のジルコニアの開発によってジルコニア単体でフルカウントウアのクラウンやブリッジを製作することも可能である。

IV. CAD/CAMテクノロジーの導入

現在行われている歯冠修復物の製作手法は図8の左側に示すとおりである。すなわち支台歯形成された口腔内を印象採得し、作業模型上で歯科技工士が機能的な形態を考慮して蠟型採得を行い、埋没、鋳造を行ってメタルに置換する精密鋳造法、あるいはセラミックスやコンポジットレジン作業模型上に直接築盛、焼

成、重合を行って形態と色調を再現する。このような間接作業による補綴修復物の製作は、形態、色調再現に対する設計の自由度が大きく、患者のチェアタイムの制約や苦痛を伴わないで技工作業を行うことができること、歯科医師の支台歯形態の不備もある程度カバーされることなどの利点がある反面、歯科技工士の技能によって補綴修復物の精度や品質が大きく異なる

り、材料自体が高品質であっても鋳造や焼成、重合過程を経ることによってその性能を十分に発揮できないこともあり、常に安定的に供給できない欠点がある。

近年、コンピュータの普及によって歯科医療にも大きな変革が生じ、コンピュータ支援によるデジタル化によって安全、安心、信頼できる歯科医療を国民に提供できるようになってきた。とりわけCAD/CAMテ

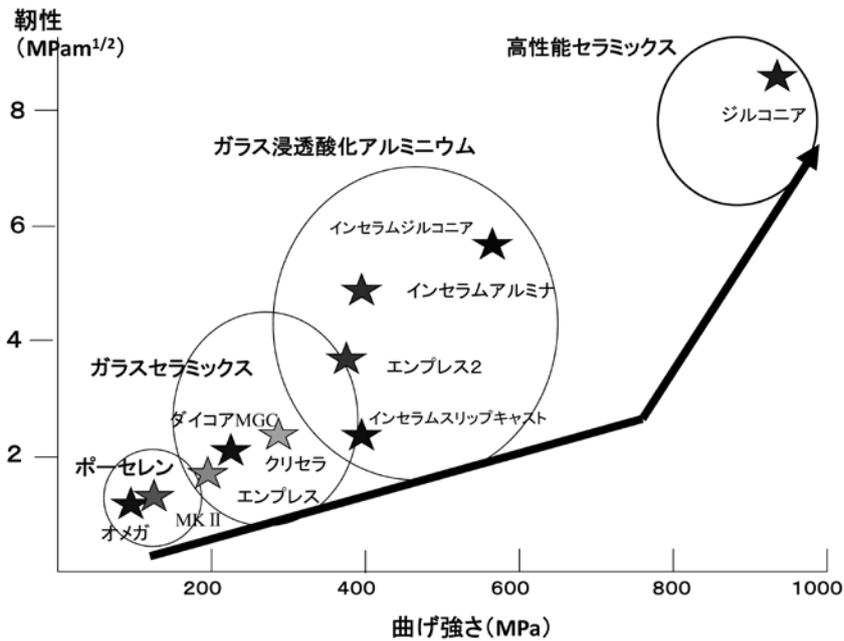


図7 歯科用セラミックスの機械的強度の進展
fig. 7 The manufacture methods of all ceramic crown

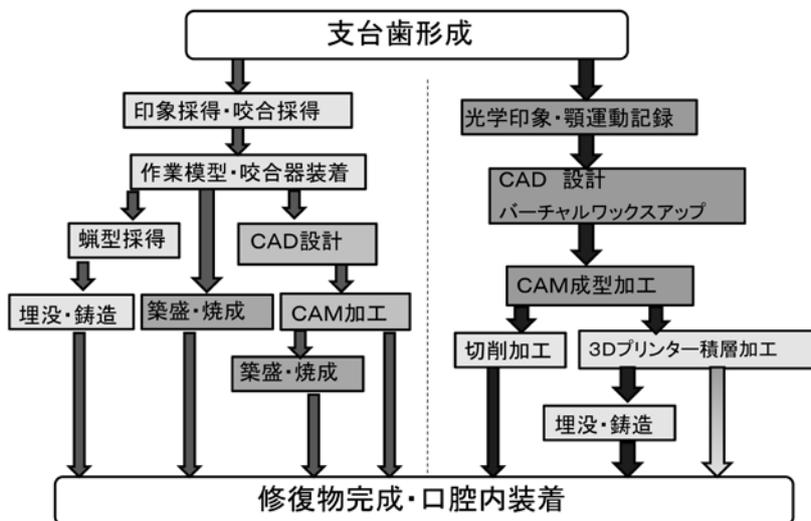


図8 歯冠修復物製作プロセスの現状と将来
fig. 8 The present condition and the future of a crown restoration thing manufacture process

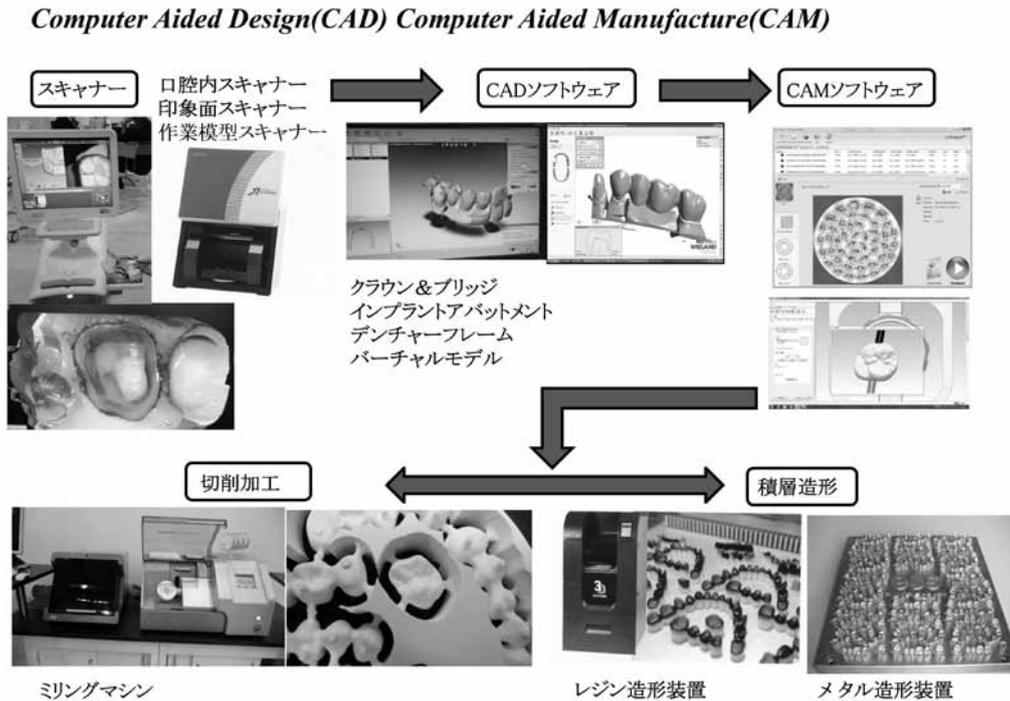


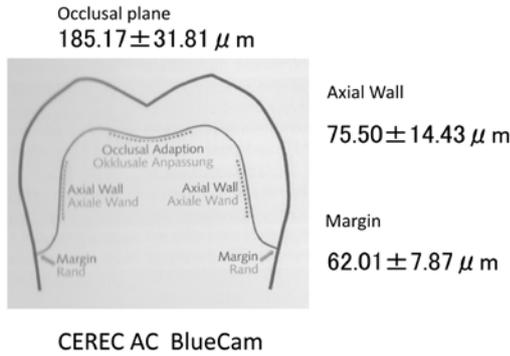
fig. 9 The component of a CAD/CAM system

クノロジーは補綴修復物製作において、生産性の向上、安定した安全な材料供給、作業環境の改善、情報の保存と迅速な伝達、構造設計に対する信頼性などの利点があるとともに、最近特に注目されている補綴装置のトレーサビリティの確保ができることは、より安全な歯科医療を遂行するためには極めて重要な特徴である。

現在、歯冠修復物の製作は間接作業によって行われ、石膏歯型をスキャニング（計測）し、CADで補綴装置の設計（コンピュータを用いて修復物のデザイン）を行い、CAMにデータ送信して機械加工を行う方法である。最終的には、歯科技工士によって適合性や咬合調整、色調再現などが行われて完成する。一方、すでに一部では臨床応用されているが、口腔内の支台歯や対合歯列などを直接口腔内カメラでスキャニングし、コンピュータの画面上で三次元画像としてリアリティーに補綴装置の形態設計を行う（CAD、バーチャルワークスアップ）。CADにおいては個々の患者の顎運動要素や色調を加味し、さらに口腔内で壊れないような構造設計を行う。設計された構造体のデータはCAMに送信され、機械的切削加工や3Dプ

リンター方式による積層造形によって補綴装置やその原型（フレーム）が完成される（図9）。このようにCAD/CAMシステムはスキャニング（計測）、CAD（構造設計）、CAM（機械加工）の3分野に大別されるが、これまでは1つのシステムとしてすべてのプロセスを行ってきたが（クローズドシステム）、これからは術者がそれぞれの分野を選択構築し、使い分けしていく時代である（オープンシステム）。このようなネットワークシステムを利用すれば、使用材料の選択も拡大する。

CAD/CAMシステムに適用される材料の開発も顕著で、従来の歯科技工操作では扱えなかった生体にやさしい素材も数多く扱えるようになってきた。CAMによる加工方法は一般的に切削加工が中心であるが、最近は作業模型やレジンパターン、頭蓋顎模型などの複雑な形状を再現する方法として工業界で普及している3Dプリンター方式による積層造形法も応用されてきた。歯冠修復用の切削加工材料としては、ジルコニア、アルミナ、リチウムニケイ酸ガラスセラミック、リユースサイト系ガラスセラミック、コンポジットレジン、PMMA系レジン、ワックス、金属（Co-Cr, Ti）



K.T. Cook, D.J.Fasbinder : Accuracy of CAD/CAM Crown Fit with infrared and LED Cameras Int J Comput Dent, 15(4) 315 - 325, 2013.

図10 CAD/CAMシステムで製作されたクラウンの適合精度
fig. 10 Adaptation of the ceramic crown manufactured by the CAD/CAM system

などがある。CAD/CAMシステムで製作されたクラウンの適合精度に関するEBMはまだ十分とは言えないが、これまでの報告からすれば従来の铸造冠に匹敵する精度が得られている (図10)。

V. 欠損補綴におけるCAD/CAMシステムの適用

欠損補綴治療として、インプラントは確実に治療オプションの一つとして定着してきたが、近年歯科医療のデジタル化によって以前にも増して安全、確実な治療へと変革してきた。すなわちCTデータをもとにコンピュータ支援によってサージカルテンプレートを製作し、それを使用して正確な位置に、短時間でインプラントを埋入する侵襲の少ないガイドドサージェリーを行い、ヒーリングスクリューの上面に刻入されたインプラント情報をスキャンするだけで、審美的、機能的な上部構造の製作をCAD/CAMシステムで完成するところまで進展している。まさに、デジタル化によってインプラント治療は飛躍的に安心、安全な治療術式を確立してきた。さらにこれからのインプラント治療に必要なことは、天然歯と共存する適応症の診断と客観的な評価法、骨質や骨量の局所的改善、軟組織のマネジメントなどが挙げられる。顎顔面外科補綴領域においては、すでにCBCTと連動させて術前術後の予測モデルを積層造形で製作したり、欠損部に必要な骨の形態のシミュレーションを行い自家骨や

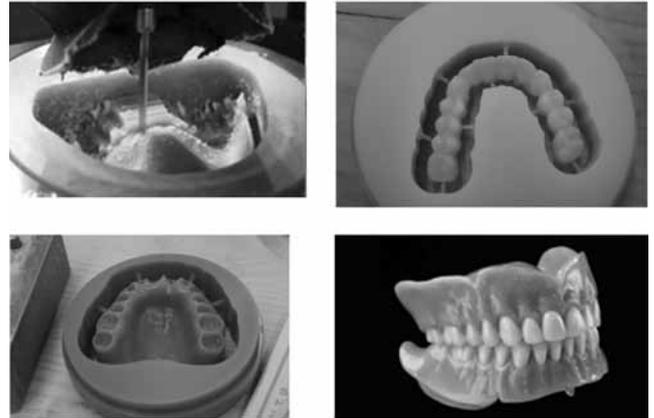


図11 CAD/CAMシステムで製作された全部床義歯
fig. 11 Complete denture manufactured by the CAD/CAM system

人工骨形成に役立っている。

一方、これからの高齢社会では急速に有床義歯装着患者が増加することが考えられるが、多数歯欠損補綴分野におけるCAD/CAMシステムの適用が遅れている。現在、有床義歯製作過程において、機能印象された作業模型をスキャンし、CADで設計したレジン床を切削加工あるいは3Dプリンターで積層造形したのち、別に製作した人工歯を接着することによって義歯を完成することも試みられている (図11)。また、上顎総義歯のプレート部分や部分床義歯の設計、フレーム部分などにジルコニアが用いられている (図12)。しかし部分床義歯では維持装置であるクラスプの材料的特性から現在では金属以外に適切な素材がな

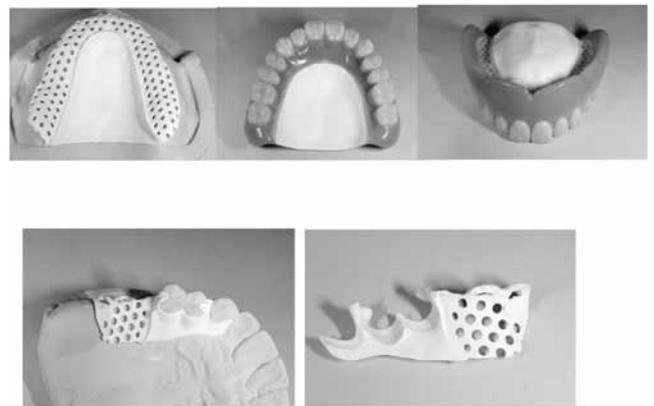


図12 完全焼結型ジルコニアを用いた義歯床
fig. 12 The denture base using full sintering type zirconia

く、CADで設計されたデザイン通り、屈曲専用CAMで加工し、口腔内でレジン床と接合する方法しかない。将来的には、高齢者にとっても安全な口腔内スキャナーでデジタル印象を行い、CAD/CAMシステムで製作された義歯床を口腔内でライニングすることによって機能的な有床義歯が完成されるようにしたい。そのためにも、有床義歯の製作に関わる材料開発が待たれる。さらに、これまで経験的な技術で行われてきた筋圧形成や加圧印象もCBCTのデータを活かすことによって粘膜の厚みを計測し、デジタル化によって数値化が可能となる。

VI. CAD/CAMシステムの展望

国際的にも歯科医療においてデジタル化が進むなかで、CAD/CAMシステムは黎明期から普及期そして安定期に入りつつある。今春から医療保険制度の中にも「CAD・CAM冠」が導入され、安定的供給のできるCAD/CAMシステムの一面が評価されてきた。一

方では、口腔内スキャナーが進化し、高精度小型軽量化、スプレース、3次元カラー画像表示さらにはシェードテイキングも同時に行えるようになってきた。また、顔面計測によってより審美的な補綴装置の設計や顎運動機能装置やCT画像との融合によって診査・診断から最終補綴装置の製作に至るまでの一連のプロセスがすべてデジタル化される日も遠くはない。将来的には、印象材、模型材が不要となり、経済的、効率的、衛生的な修復物の製作が可能となる。さらに、医療面接から修復物のメンテナンスまでデジタル化が進むことによって歯科医師、歯科衛生士、歯科技工士間のデジタルデータの情報共有が可能となり、まさにチームアプローチが円滑に行われるようになる。このようにデジタルワークフローへの変換によって、国民に対してより安全で安心、信頼できる歯科医療を提供することが可能となり、国民の健康の保持増進に貢献するためにデジタル技術は大きな役割を担う。

Dental Health Care Towards in 20 Years

—Dental Prosthetic Devices for the Near Future—

Osaka Dental University Department of Esthetic Dentistry

Kazuhiko SUESE, D.D.S., Ph.D., F.I.C.D

In recent years, problems with metal dental prostheses, which were common in the past, have been pointed out, and various types of alternative material have been developed and used in clinical settings. This study discusses prosthetic devices for the near future, including updated information on the shift to non-metal prostheses in recent years and CAD/CAM systems, which have been attracting attention, as well as their prospects. The adoption of CAD/CAM systems, which is attributed to the recent technological advances, has improved production traceability of dental prosthetic devices, in addition to many other advantages. In the future, collaboration between human skills and mechanical processing is expected to provide people with safer and more reliable dental health care.

Key words : CAD/CAM System, Digital Dentistry, Metal Bond Crown, Ceramics, Zirconia