

歯科におけるCAD-CAMの概括情報

Francois Duret

Summarized by Shigeo Kishi

長年にわたる研究の結果、歯科界においてCAD-CAMが臨床応用できるようになった。本文は歯科の臨床技術に焦点を合わせたものであり科学的考察はさておき、歯科医はこれにて同方式の応用を学ぶことが出来る。

通常、鑄造歯冠修復物を作製するには一連の精密な工程を踏む必要がある。支台形成あるいは窩洞形成を行ったのち、どんな場合でも隣接歯列および対合歯列を弾性印象材にて印象採得せねばならない。この印象から石膏模型を作り、その歯形上でクラウン或いはインレーのワックスアップが行われる。即ち、鑄造修復物は「ロストワックス法」で作製するということである。

これまで300年間も行われてきたこの鑄造修復法が少しずつ改善されているとしても、支台や窩洞の原型の印象採得からインレーやクラウンの完成に至るまでに、使用される一連の材料（印象材や石膏）を手作業で正確にステップを踏む事は非常に難しく、最終段階で失敗となる事もあり得る。つまり従来の鑄造修復法では、コンピュータやロボット等のすばらしい先進技術を利用していないのである。このような理由から1971年にCAD-CAM技術を歯科業界へ紹介する事となった。

研究当初は、臨床的というよりは実験的・理論的傾向が強かった。これらの優れた研究の成果についても多少言及してあるが、その原理よりもむしろ臨床的応用を強調して本文を書いたつもりである。初期の研究者の間では、クラウン・インレー・ポンテックを作る際、技工士が使う石膏模型の複製を切削加工したり、写真を一枚撮影した上でインレーの内面のみを削りだすという事などを行ったグループもいた。その後の5年間はCAD-CAMについての消息はほとんど聞かれなかった。歯科用CAD-CAMの試作品は、1983年ガランシエルの学会（フランス）で発表されたが見学者の目の前で技工士を使わずに作製されたクラウンが、初めて患者の口腔内にセットされたのは1985年の事である。

1985年はCAD-CAMによる歯科医療にとっては決定的な年であったとはいえ、依然として前途は多難にみえた。歯科医院で初めて実用性のある1号機を備えたところ、その操作に2時間もかかった技術者もいたという。しかしながらフランスの学会での実演によって、その14年前に確立された原理が立証されたのである。

ミネソタ大学では、3次元像を得るために写真測量法を応用していたが、それ以前の第2・第3段階では、当方で確立していた理論上の歯の原理を使っていた。本文中には、フランスですでに歯科医院などで利用されているDuret博士により発明された装置について述べてある。

【歯科医院に必要な器械】

患者の口腔内から形成歯の印象を採り石膏模型を作製すれば、オプティキャスト部による光学印象の準備は完了する。

電子光学法が応用され、光学的な印象が行われる（すなわち必要とする3次元的情報）。

この方法はホログラフィー（自筆法）とモアレ（波紋模様）を組み合わせたもので、光による量的データをカメラで数値に置換えし、これをコンピュータに送信するというものである。結果として、獲得したデータはコンピュータに蓄積される。ひとつの光学印象に含まれる変数のすべて（3歯で100万値以上）を測定する事は不可能である為、歯科医は視覚表象に頼らざるをえなかった。光学印象と従来の印象法の唯一の相違点は、前者が物理的模型の代わりに数値を使うところにある。石膏模型や歯型はこうしてコンピュータディスクの様に情報を貯えられるメモリ装置と同じ物になる。

CAD装置（ハード及びソフトウェア）では暗号化した情報を使って、術者は歯型をモニター上に映像化したり、補綴物を設計したりすることができる。

この段階は、ロストワックス法では石膏模型から蠟型を作る作業に相当する。スクリーン上に表示しながらクラウンやインレーの表面を修正する事は、歯型にワックスを盛ったり、歯型からワックスを削除したりする事に相当する。本工程の最後の段階ではロストワックス法に代わり、既製専用材料のブロックからの切削加工が行われる。従来どおりの材料も使えるがこの技術によって、新しい歯科用材料の開発を促す事になるであろう。

このCAD-CAM装置は三つの部分から構成されている。まず一つは光学印象を行う為の部分で、歯型を本装置内へ入力させるために使われる装置である。この装置にはレーザー光源が装備されており、オプティキャストと呼ばれている。次はCAD部であるが、これには必要なハード並びにソフトウェアがすべて装備されているので、術者は光学印象から電子模型を作り、これをモニターへ投影し補綴物の設計に応用する事ができる。このCAD装置はアクセス咬合器と呼ばれる専用の咬合器につながっており、この咬合器が下顎の動的咬合状態に関するデータを提供する。三番目のCAM装置は、4軸能力の機械刃（カッター）を備え本機により従来からの材料あるいは、専用材料から自動的に補綴物を削り出す事ができる。

【クラウンの調整】

クラウンの調整には一連の簡単で正確なステップが含まれるが、これはその他の歯冠修復物にもあてはまる。

【支台形成】

CAD-CAMクラウンの為の支台形成には、ショルダータイプの形成が適する。補綴物の寿命を最大限に延ばす為には、歯質の削除方法やクラウンの保持・安定に関しては、従来からの法則が依然として踏襲されている。しかし歯間距離が短い場合には、隣接面の軸面のテーパを極端に垂直かつ平行にするのは避けたほうが賢明であり、溝の深い咬合面形成は同様に避けるべきである。というのはCAD-CAM装置を使用して光学印象を行っている間、これらの影がモニターに投影されるからである。支台形成には歯科医の卓抜な技術による滑沢な面やフィニッシングラインの形成が必要である。

【印象面の調整と光学印象】

歯肉溝部が明視できるようにするには、これまでの印象採得にも必要とされているように印象する形成面から切削片・水分・血液・唾液等をきれいに除去しなければならない。たとえば光源やその他の技法が改良されて歯肉溝からの浸出液を透過させたり、形成歯を選択的にキャッチする事が出来るにせよ、上記のことは守られるべきであろう。さらに従来法による歯の乾燥や歯肉圧排を行うことが望ましい。支台形成が歯肉縁下1mm以上の場合には、歯肉圧排は当然行う必要がある。

弾性印象材で印象採得したら、即硬性の石膏を注ぐ。石膏が硬化したら、これをオブティキャストの制御テーブル上に装備された特殊吸磁装置内へ入れる。この段階で模型には、形成歯付近にレーザー光学印象に必要な基準点として3個の基準球がつく。オブティキャストテーブルを使用することで、技工士や歯科医師は正確に石膏模型の位置の修正を行うことができる。これは先に述べたコンピュータに必要な最適映像を得るためである。得られた映像はすべてコンピュータのメモリーに蓄積される。全映像はモニターに表示される。接触面・咬頭頂・溝部や上下顎の咬頭頂の配列といった特徴的な部分を識別する事ができる。

使いやすいマウスやタブレット入力装置によりモニター上に識別状況を示すことができる。非常に興味深い操作法の一つにマージン部のトレースがある。スクリーン上の形成歯の映像に沿って連続した点を定め、これによって石膏模型上を芯の尖った鉛筆でなぞるように線を引くことができる。しかし従来のマーキング用の鉛筆では、幅がおよそ70ミクロンもある線を引いてしまう。本段階完了後、コンピュータは自動的に歯型の3次元形状を計算し、これをCAD装置へ送り、クラウンのコンピュータ模型を設計し造形する。

【クラウンの設計】

CADによる設計は、医学界にて使用されている磁力映像またはスキャナを超えたCAD-CAM法の卓越性を明快に示すという点で興味深い操作といえる。

3次元の医学用映像といっても観察像の分野でのものである。1973年という早い時期においては、このような像はあまり関心を惹かず、CAD-CAMの医学分野での応用力も観察像にとってかわるような物が設計できる程度と注釈されていた。歯科用CAD-CAMにおいては最初の対象（形成歯）の最終の対象（補綴物）との間には格段の相違がある。

補綴学の法則がソフトウェアに統合されているので、単なる再生という段階を超える事は可能である。これによって人工知能と呼ばれる創造の一形式が1970年初頭に定義づけられ歯科用として応用されるに至った。クラウンの設計には4つの段階がある。すなわちクラウン内部の設計・クラウンの頬側・舌側部・隣接部の設計・咬合面の形成・クラウンの形態の修正である。

【クラウン内部の設計】

光学印象は高度に拡大された写真に見られるように、無数の写真構成子（ピクセルと呼ばれる）によって決定される。同時にこれらの構成子は表面のモザイク様画像を形成する。一部の構成子のみがクラウンの設計に役立つのであるが、術者にモニター上で形成歯やマージン部を含む完全な模型が見えるようにする事が望ましい。モニター上の模型は石膏模型のように、さまざまな角度から見る事ができる。

頬側画像・舌側画像・透視画像は即座にモニター上に表示する事ができる。この透視画像の内、軸側投象による画像は理解しやすいので広く使用されている。印象やマージン部について間違いや不完全な点が発見された時には修正することができる。4点中の1点の表示で十分である。隠された線や面は、本装置から自動的に消去されてしまうので、石膏模型の場合と同様に作業を進める事ができる。表示が適正となされたときは、理想的セメント層の厚みをインプットし、マージン部がなぞられるとクラウンの内部が自動的に描かれる。

（マージン部のセメント層の厚さは0とする）

【頬側面・舌側面・隣接面部の設計】

設計されるべきクラウンは、まずコンピュータに蓄積された理論上の歯牙形態のメモリバンクから取り出される。特別なプログラムにより、この理論上の歯の美的観点から判断した豊隆を与える。

このプログラムではまず、形成歯に適合する歯冠形態に修正を施す。すなわち頬側と舌側の湾曲・溝部及び咬頭頂の配列・歯列上の接触点も考慮しつつ行う。術者はさらに修正を施す事ができる。例えば舌側面または頬側面の形状を変えたり、隣接歯間に空隙をつくることもできる。理想的なクラウンの形状を描くために、外形線はすべて動かす事ができる。

歯の形態に関するソフトを使用すれば、著名な解剖学者により認められた解剖学的形態を得る事ができる。コンピュータの校訂能力によって、歯科医は解剖学を思い通りに利用する事ができる。解剖学に基づいた理想的な歯冠形態と患者固有のメモリーを結合させ、歯冠形態を変化させていくと結果としてカスタムメイドの物となる。この作業は、ワックスパターンの調整と対比できる。つまり技工士は経験及び記憶上で把握している歯の形状を応用し、それを物理的模型上に彫刻する事が出来るからである。

【咬合面の形成】

本作業については別項で説明したい。動的な分析を展開せずに簡単に述べることにする。

「築成」という用語は、技工室で使われる「ワックスアップ」の技法に酷似していることを強調するために使用している。咬合面は対合歯の溝や咬頭に応じて大雑把に成形され、ルンディーンのワックスアップ技法、あるいは隣接歯に応じ形づくられる。選択は術者の意志で行う。対合歯の中心咬合位に相当する部分に形成歯の中心咬合位を築成するため、まず対合歯列に一致させた理論上の歯列の基準点を中心咬合位として術者に提供する。これらの点は咬頭と窩・溝または咬頭と辺縁隆線での咬合を行わせるため、自由に動かす事ができる。

さらに機能的な咬合をさせるか、ナソロジックな咬合をさせるかの選択によって、咬合状態を決定する事ができる。（つまりCentric Freedomか三点接触とする）

このCAD装置には決められたコンセプトは組み込まれておらず、術者に設計上の選択が委

ねられている。これら上記の要素が決定すれば、コンピュータプログラムはルンディーンの技法に基づいて対合歯に対する咬頭や溝を映像化する事ができる。

【クラウン形態の修正】

形態が満足すべきものでない時、術者は点を動かすか豊隆を減らすことによって形態を修正する事ができる。また、咬頭の高さを増すことも出来るし、（結果として生ずる咬合の問題については注意を要する）歯間空隙をつくることもできる。いずれにせよ、どの点を動かすべきか位置はどこに設定すべきかを指示できれば十分である。審美歯科学の規則を遵守しているかぎり、本ソフトウェアにて歯の形状を変化させることは可能である。この作業については専用の互換性のあるプログラムが開発されているのでコンピュータの経験は必要ではない。この操作はロストワックス法でのワックスアップにたとえられる。隣接歯も対合歯も同時に表示でき、これらがモニター上に映像化されるということは非常に便利である。

【クラウンの切削加工】

クラウンの切削加工はロボットが行う。このロボットとは超小型フライス盤で、4軸切削装置・冷却装置・自動工具交換機能が付いている。固定性歯冠修復物はすべてホルダーに取り付けた10個のカッターで削切加工される。本機は削切加工の機械プログラムにより自動的に稼働する。サイクル始動前に、カッターの状態が自動で点検される。切削を始める前に材料の一塊を本機内に装着し始動ボタンを押す。工程は自動でクラウンを研磨着色仕上げのみを残すまでに仕上げられ、その精度は世界的に著名な歯科大学の許容基準に入っている。関連の操作は二部から構成されており、一つはカッター走路（ストローク）の計算、もう一つは切削加工である。

【カッター走路の計算】

各カッター（切削器具：ダイヤモンドポイント）は基本的には円筒型もしくは球型で、材料を徐々に修復物の形状に削りだしていく。ソフトウェアによりこのカッターの走路・送りスピード・回転スピード等を計算し、円滑で効率のよい作業を行う。また、ソフトウェアはカッターの動きだけでなく冷却機・カッターの交換・磨耗の点検等も行ふ。カッターの可動部を駆動する電気的信号についても指令を下す。

【切削加工】

この部分の作動は、前述の工程に続いて自動で行う。予め製作時の誤差を考慮に入れて表面の加工が終了すると、材料はクラウンの最大周線に一致した角柱（プリズム状）に荒削りされる。引続き数種類のカッターを使用して正確な咬合面を作る。このように実物のような咬合面が仕上がる。カッターの走路は3次元的に計算される。咬合面が完成すると、材料は自動的に回転して歯冠の内部及び基部の切削加工に移る。まず内部の切削が開始され、窩縁部で材料の最大量の限界点まで残すようにする。窩縁部より下の頬側・下側・隣接面外側部は最後に切削加工する。精密カッターは窩縁の仕上げに使用される。これは窩縁部は特に精度を要する箇所だからである。切削中、水は冷却用のみならず切削片除去の為にも使用される。

【着色】

CAD-CAMによるクラウン作製の最後の工程として研磨がある。研磨後には着色を行う。着色の原理は25年前に確立されていたが、最近になってダイコアクラウン用としてデンツプライ社が再紹介された。

【ディスカッション】

最先進の科学コンセプトを駆使するCAD-CAM技術によって、歯科界に大きな進歩が出現する可能性が見えるようだ。例えば、ユーザーに馴染み深い装置の精度などについての実際上の質問に答える必要は一切無いと言ってよい。臨床経験から見ると、直観による確信とは逆に無数の点があるからといって、これは正確さの証左にはならないということが言える。対象に対する全般的な正確さというものは、異なった視点が相関的にからんでくると著しく低下する。この現象は小さな対象を高解像度の立体鏡の像として捉える時に現れる。他面多数点の所為で生ずる限界を、視点を増やす事によって補正する事ができる。(相関関係が正しいとすれば)

これら2つの素因を作用させる事によって、殆どの歯科医院や試験所で通常得られているよりも更に高い正確さが得られる。(調整歯は200,000~400,000点で決まる)再成歯の品質は、40ミクロン以上の精度を要するということではない。更に、CAD-CAM使用中の精度は、滑らかな曲線や切削中のカッターの位置などの為に5ミクロンを超える事はない。従って正確さの点については注意を払い、この正確さと解像度とを混同してはならない。

【結論】

歯科界でのCAD-CAMの紹介は、大学での臨床業務や研究の在り方に影響をおよぼすであろう。CAD-CAMの計り知れない可能性を考える時、目を見張るものがある。