

依 頼 論 文

◆企画論文：補綴臨床における CAD/CAM ワークフローの現状と未来

補綴臨床における CAD/CAM ワークフローの現状と未来 CAD/CAM によって全部床義歯製作のワークフローはどう変わるのか

水口俊介, 金澤 学

CAD/CAM Technology will change the workflow of complete dentures

Shunsuke Minakuchi, DDS, PhD and Manabu Kanazawa, DDS, PhD

抄 録

全部床義歯製作の CAD/CAM 化によって、製作工程における情報伝達は数値データとなり、義歯形態の数値解析の可能性や製作過程での情報伝達エラーの減少、工程自体の簡素化、使用材料の進歩等が期待できる。また教育や臨床指導に適用すれば義歯の品質のボトムアップにもつながる。しかしながら CAD/CAM 化が極めて困難な部分、すなわちデンチャースペースの印象採得、顔面形態や軟組織の機能を考慮した義歯形態のシミュレーション、人工歯と義歯床との接着には問題が残る。今後の技術開発を期待したい。

和文キーワード

全部床義歯, CAD/CAM, デンチャースペースの印象, データベース化, CAD/CAM 用人工歯

I. 緒 言

全部床義歯を構成するものは人工歯と義歯床のみである。そしてその形態自体に義歯が必要とされる維持、安定といった機能的要素と審美性が含まれている。そのため、予備印象から研磨に至るまで多くのステップが必要となり、歯科医や歯科技工士はその過程で、実に多くの知識やセンスを義歯形態の中に盛り込まなければならない。製作工程における情報伝達手段は個人トレーによる印象、顎間関係の記録された咬合床、ろう義歯等であるが、無歯顎患者の上下顎堤間に広がる空間は大きいので、患者の形態情報の取り込みや義歯形態の決定に歯科医や歯科技工士の技量の差が大きく影響し、結果的に不十分な性能の義歯が製作されてしまう可能性がある。

近年の IT 技術の飛躍的な進歩の恩恵を受け、補綴物の制作に CAD/CAM が導入されるようになった。固定性補綴装置では口腔内での光学印象や CAD/CAM 技術による補綴装置のデザインと製作が実用化されている。有床義歯の領域では CAD/CAM 技術によるフレームの製作が実用化されつつあり、全部床義歯領域でも

海外では商業ベースのシステムが稼働している。義歯製作の CAD/CAM 化によって、従来法では解決できなかった多くの問題が解決される可能性がある。製作工程における情報伝達は数値データとなり、義歯形態の数値解析の可能性や製作過程での情報伝達エラーの減少、工程自体の簡素化、使用材料の進歩等が期待できる。さらにはこれらを臨床指導に適用すれば義歯の品質のボトムアップにもつながる。しかしながらいまだ乗り越えられない問題や CAD/CAM 化によって生じる新たな問題も見えてきた。本稿では全部床義歯製作の CAD/CAM 化によりどのようにワークフローが変化するのか、そしてそのなかで歯科医と歯科技工士がどのように関与してゆけばよいのかについて考えてみたい。

II. 全部床義歯製作 CAD/CAM 化のためのこれまでの研究

Maeda らは CAD/CAM による全部床義歯製作手法についての報告の中で、義歯の形態は上下顎一体型のトレーによりデンチャースペースの印象採得を行い、その印象の形態をデータ化し、そのなかに人工歯

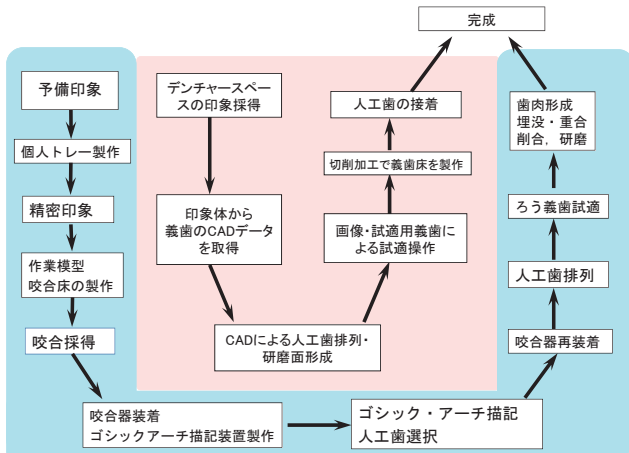


図1 外側のループは旧来のワークフロー，内側のループはCAD/CAM義歯のワークフローである。デンチャースペースの印象は印象採得と咬合採得に当たる。人工歯排列とろう義歯は咬合器上ではなくCADソフトウェア上で行われる。このフローの中にバーチャル咬合器を導入することも可能である。義歯床は埋没重合によらずアクリルブロックから切削加工により製作し、人工歯を接着する。

の配列位置を設定する手法を示した¹⁾。Burshらは咬合器に装着された模型を三次元的にスキャンし、データ化された上下の模型上で人工歯を排列する方法を紹介した²⁾。ここではコンピュータの中の配列から実際の咬合器上への排列への転写は特殊な器具を用いなければならない。咬合器上に移した後は通法と同様である。中野田は既製の人工歯を、解剖学的ランドマークを参照に無歯顎堤上で排列するための基準を有歯顎者と無歯顎者の模型計測データより算出し、その人工歯をCAMにより切削されたワックスの中に植立し、ろう義歯を製作する方法を提案した³⁾。Kanazawaらは人工歯を分離した床用レジンのみの部分をマシニングセンタにて削り出し、そこに人工歯を接着する手法を提案しその精度検証を行った⁴⁾。高精度のスキャナーや工作機械、操作性の良いソフトウェアによってこれらは実現可能となった。レーザー焼結による全部床の金属床フレームの製作も可能となった⁵⁾。さらにコンピュータ上で審美的要素を考慮し、顎位や排列位置を決定することを目的とした研究も見られるようになった。全部床義歯製作過程において試適という過程は不可欠であるが、排列や咬合高径を大きく改変しなければならないような時には手間がかかるため、これを簡略化する方法が必要である。村田ら⁶⁾は、上顎全部床義歯装着者について、その顔貌の三次元形状とテクスチャを採得・合成し、咬合高径を3 mm、6 mm 挙上下した場合や前歯列を ± 3 mm、6 mm 突出した状態の平均顔パターンを製作の後、その平均を動かすことで

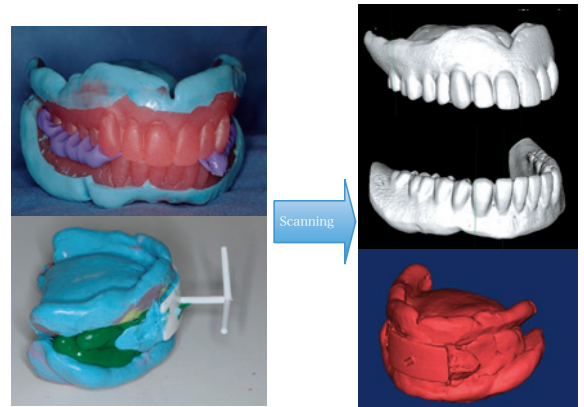


図2 デンチャースペースのデータ取得。顎間関係などを修正したコピーデンチャーや既成トレーを用いる。既成トレーには工夫が必要である。(文献(12)より改変引用)

形態変化を予測し、実際の形態と比較し、高精度で予測できることを報告した。これは、咬合高径の変更や排列位置の変更をコンピュータ上で行い、ディスプレイ上で患者自身が確認できるシステムに発展すると考えられる。

III. 全部床義歯製作CAD/CAM化の基本的なフロー

ここでは現在実用化可能と考えられるCAD/CAMによる製作の手順を概説する。まずデンチャースペースの印象採得である。義歯粘膜面の印象と顎間関係を同時に採得するわけであるが、この部分の技はデジタル化されておらず、旧来の咬座印象に類似した手法を用いるか、旧義歯の複製義歯を改良し印象として用いるかである。後述するが、この印象採得に関してはデジタル化に即した様々な工夫が提案されている。

採得したデンチャースペースの印象は光学スキャナーかCTによって3次元データ化する。精度的には光学スキャナーに軍配が上がるが、普及度の点ではコーンビームCTに軍配が上がる可能性がある。さらに複雑な形態のデンチャースペースの印象を一気に読み取れる光学スキャナーはなく、何らかの方法で分割し、それぞれをスキャンした後に座標を結合するという手法を取らなければならない。

得られたデータはCADソフト上に表示され、その中に含まれる指標に従い人工歯が排列される。この時、個々の人工歯を対合歯と咬合させた状態で前歯部群や臼歯部群にブロック化し排列し、アーチや個々の歯の微調整を行うなどの操作の改良により時間は短縮される。また、顎堤、顔貌などの顎態データとともに人工歯排列をデータベース化すれば先人の臨床知識や経験をその中に取り込むことができ、排列の品質も向上す

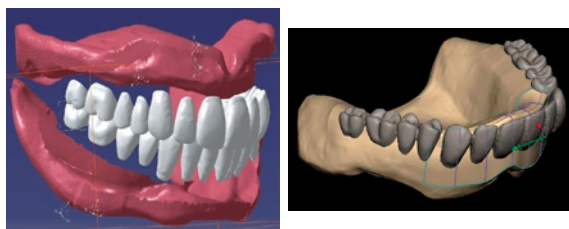


図3 3次元CADソフトを用いて人工歯排列と歯肉形成を行う。

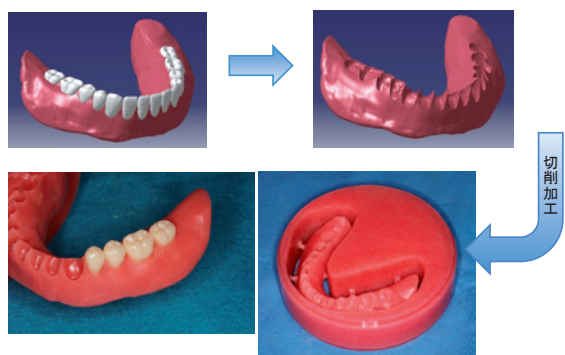
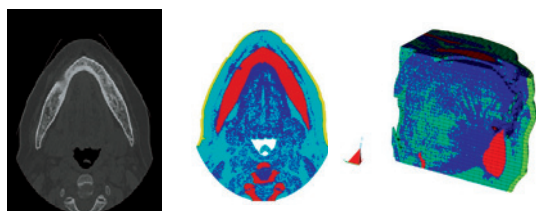


図4 義歯データから人工歯の部分を外し、床部分を切削加工し人工歯を接着する。(文献(12)より改変引用)



シミュレーションモデル

図5 CT画像から顎骨、舌、顎舌骨筋の粒子モデルを作成。(文献(13)より改変引用)

と考えられる。

ろう義歯試適に関しては、現在商業ベースで実施されている2つのシステム(DENTCA, Ava-Dent)ともに臨床ステップを設定していないようである。試適を省くことで診療回数を減じることができるが、これには議論が残るところである。

人工歯の位置や研磨面形態が確定した後、義歯データから人工歯部分を取り外し、義歯床部分(商用レジンで形成される部分)のみのデータとする。この義歯床部分をマシニングセンタで削り出す。従来のロストワックス法ではないため重合度の高いレジンや、まったく新しい材料を使用することができる。削りだした義歯床に人工歯を接着する。この時の人工歯の浮き上がりや位置変化の問題や接着剤の問題などに加え、CAD/CAMに使用する人工歯に関しては議論すべきと

ころが残っていると考える。

IV. デンチャースペースの印象とシミュレーション

全部床義歯製作CAD/CAM化の中で最も重要な部分であるが、旧義歯の性能や形態に問題が少ないのであれば、旧義歯や旧義歯の複製義歯を個人トレーおよび咬合床とするのが妥当である⁴⁾。適切な旧義歯がない場合は、咬合採得と印象採得を同時にできる既成トレーや従来の咬座印象の手法を用いる。

1. 既成トレーを用いる方法

既成トレーを用いる方法の問題点とはトレーを的確に顎堤に適合させるのが難しく、熟練を要するという点である。まず、上顎唇側側の印象材の厚みを調整しリップサポートをコントロールするのが困難である。トレーが短い場合、上顎唇側側縁がほとんどトレーの裏打ちがなくシリコン印象材のみになったり、逆にトレーがあるために薄くできないことが多い。したがってその後続く仮想咬合平面の設定や咬合高径の設定にエラーがはいりやすくなる。つまり、唇側が分厚い上顎咬合床で、正確なリップサポートと咬合高径の策定をせよ、という状況になってしまう。次に義歯後縁部についてである。既成トレーの適合の状況により、臼後隆起部と上顎結節部が当たってしまい、所定の咬合高径まで閉口できなくなってしまうことがある。この問題を解決するためにDENTCAでは、印象採得後に第2大臼歯相当部で印象体を離断したもので咬合採得を行う方法を取っている。Ava-Dentでは、印象採得と咬合採得は別のトレーで行い、それぞれの印象体を3Dデータ化するが、咬合採得用のトレーは後縁が短くなっており上記のエラーが出にくくなっている。ただ、上下顎の印象データと咬合採得用トレーで採得した顎間関係記録とを、顎堤を介して連結するため、ここでエラーが生じる可能性が大である。

2. 個人トレーを準備する場合

通法どおり予備印象採得を行い、研究用模型上で個人トレーを制作する方法と、近年普及してきた口腔内スキャナーを利用する方法が考えられる⁷⁾。口腔内で印象材を用いる場合はBPSシステムのように予備印象採得時に大まかな顎間記録が可能のようにしておけば、製作するトレーにゴシックアーチ描記装置を組み込んでおくことで顎間関係記録も正確に取得できる。

口腔内スキャナーは近年急激に普及してきたが、いずれ粘膜の印象もその守備範囲に入ってくると考えられる。粘膜の印象を正確に取得するためにはセンサの改良やセンサ部の小型化、画像処理のアルゴリズムの改変が必要であるが、将来、可動粘膜と不動粘膜の境

試適用義歯マスターデータの作成

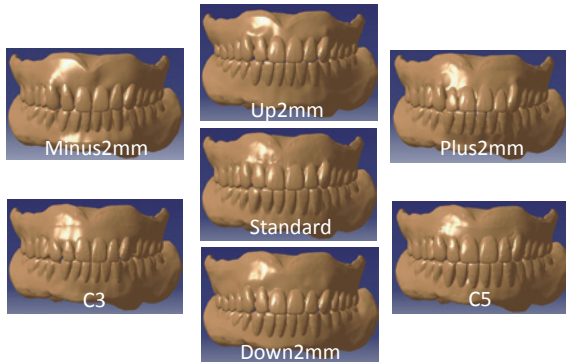


図6 CAD/CAM を用いた義歯作製においては、チェアサイドにて排列を修正できないため、予め数通りの形態を作製しておく必要がある。試適用義歯マスターデータを基本データとし7種の試適用義歯データを作成した。(文献(14)より改変引用)



図7 1個のろう義歯から、咬合高径と前歯の排列位置を変化させた7種の試適用義歯データを作成し、紫外線硬化性樹脂にて造形後、歯冠用硬質レジンをを用いて着色した。(文献(14)より改変引用)

界などは検出可能になるのではないかと考えている。

ただ理想的には、CTやMRI画像からデンチャースペースのモデルを構築し、周囲組織の機能をシミュレートしそれに合致したトレーやパイロットデンチャーを製作することである。全部床義歯の形態は義歯周囲軟組織との機能的協調の結果であるという観点から、X線映画法や圧センサ、写真、ビデオ機器による機能時の義歯周囲軟組織の挙動の解析が行われた⁸⁻¹¹⁾。すなわち数値的なニュートラルゾーンテクニックやフレンジテクニックを念頭に置いたものであったが、当時のIT技術のレベルに起因するものではあるが、義歯周囲軟組織の挙動から義歯の具体的な形態を導きだしている研究はない。この部をCAD/CAM化することが真のCAD/CAM化であると考え、現在、非線形

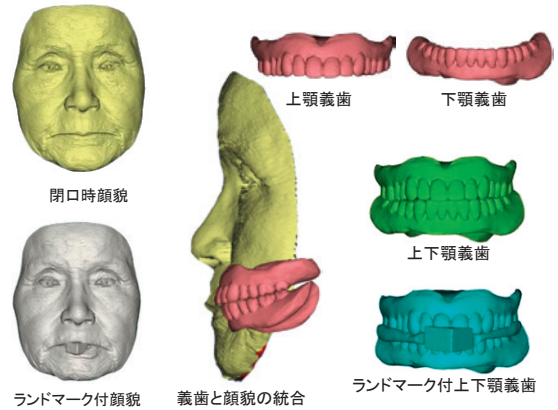


図8 上下顎義歯装着時の閉口状態の顔貌とランドマーク装置介入状態の顔貌を顔面用光学スキャナで撮影し、義歯は、上顎義歯、下顎義歯、上下顎義歯とランドマーク装置を介在させた上下顎義歯をCBCTにより撮影しSTLデータとした。ランドマーク装置を介して上下それぞれの義歯と顔貌を統合した。(文献(15)より改変引用)

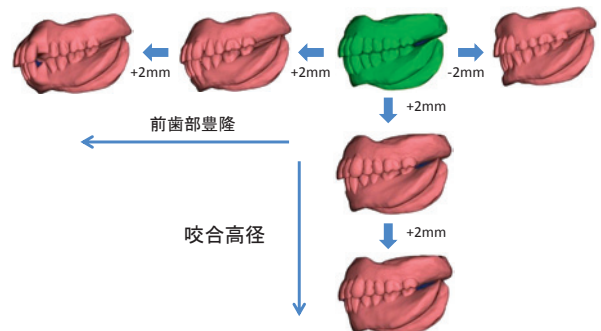


図9 試適用義歯データ作成。(文献(15)より改変引用) 試適用データからRPにより試適用義歯を製作し、装着した時の顔貌とシミュレーション後の顔貌を比較し、シミュレーション法の検討を行った。

かつ大変形を扱うことのできる数値解析手法によりデンチャースペースのモデル構築とシミュレーションを試みているが臨床応用はまだ遠い¹³⁾。

V. 人工歯排列と試適

人工歯排列は、現段階ではデンチャースペースの印象に記録された排列のガイドやパイロットデンチャーの排列に準じて行われる。CADソフト上で排列するのは誰でもできるわけではなく、人工歯排列の能力を有する歯科技工士や歯科医でなければかなり手間がかかるものであるが、顎堤・顔貌・歯列をデータベース化することによって、それまでの臨床経験の蓄積を数値として活用でき、排列の手間やスピードは改善されることが考えられる。これまで顎堤と歯列の関係を検索した

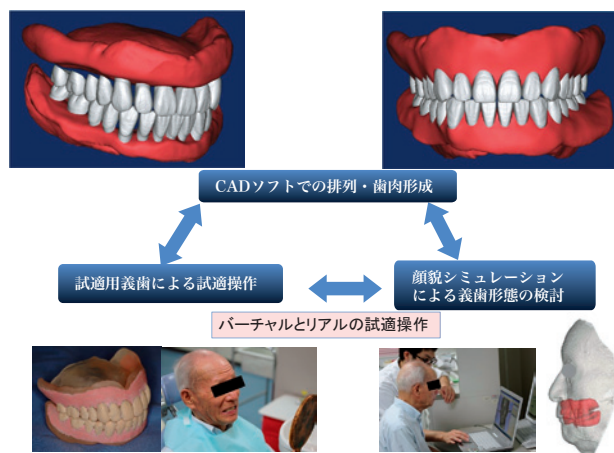


図 10 義歯デザイン、義歯試適および顔貌シミュレーションの関係。(文献 (16) より改変引用)

研究は比較的多くみられるが、顔貌との関係も含め解析した研究はみられない。デジタル化された情報からは多くの有効な数値を導きやすく解析の質は格段に進歩すると考えられる。

CAD/CAM においては、試適という操作は完全にコンピュータ上で行われるべきものと思われがちである。しかしながら実際に患者の口腔に試適用義歯を装着し、同意を得るシステムも必要ではないかと考えられた。

Inokoshi ら¹⁴⁾ は、光硬化型の Rapid Prototyping を用いて咬合高径、リップサポート、人工歯のサイズを変えた 7 種類の試適用義歯を製作し試適操作を行い (RP 法)、従来のろう義歯を用いた試適操作との違いを検討した。その結果、患者からの評価では、審美性、完成義歯の予測可能性、快適性、安定性、全体的な満足度いずれにおいても有意な差は認められなかった。歯科医師からの評価では、審美性・適合性に関して従来法は RP 法に比べ有意に得点が高く、チェアタイムに関しては、RP 法は従来法に比べ有意に得点が高かった。近年 3D プリンターの進歩は目覚ましく、試適用の義歯は比較的簡単に作れる可能性が出ている。ただ完成義歯に要求される審美性や耐久性、長時間口腔内に装着可能な安全性を満足するような 3D プリンタ用の材料はまだない。

Katase ら¹⁵⁾ は、上記の試適用義歯を入れた時の顔面形態と顔貌シミュレーションの誤差について検討した。顔面形態と義歯の 3D データを統合するためのランドマークを設定したジグを製作し、義歯装着時の閉口状態の顔貌と、ランドマーク介在状態の義歯を装着した顔貌を撮影しデータ化した。さらに上顎義歯、下顎義歯、咬合させた状態の上下顎義歯とランドマーク

装置を介在させた上下顎義歯を CBCT により撮影し、ランドマークを介してデータ上記顔貌データと統合した。これらにより閉口状態の顔のなかに上下顎義歯が入った 3D データを作成した。試適用義歯は猪越の方法に準じ、咬合高径とリップサポートを変化させた 6 種類の試適用義歯を製作した。これらの義歯を装着した状態の顔面形態とシミュレーション結果との誤差を検討した結果、リップサポートおよび高径の変化によるシミュレーションは実際の顔面形態と 0.2~0.4 mm の差異しかみられず、極めて高精度にシミュレーションが可能であることが判明した。顔面計測の光学スキャナーが進歩し、形態データと色やテクスチャーデータを統合できるようなシステムが一般化すれば、実際の試適用義歯は必要なくなる可能性もある。さらに軟組織のシミュレーションによって、義歯形態の変化に合わせて連続的に顔貌変化を表現することができるようになることが望ましい。人工歯排列位置や研磨面形態を含む義歯データと顔貌データが統合されたデータベースが充実すれば、より顔貌にマッチした義歯形態の決定が正確かつ容易となるであろう。

VI. 義歯床の切削と人工歯の接着

現在の人工歯は硬質レジンを含んだ多層構造、透明感を表現できる審美性、安定した咬頭嵌合と咬合様式を実現できる咬合面形態を有している。これと同様なものを義歯床から連続した材料で作ることはまだ不可能であり、歯科補綴学の叡智が多く含まれている人工歯を活用しない手はないと考えられる。義歯床に人工歯の規定面と male-female の関係となる形態を切削し、そこに人工歯をはめ込み接着させる手法が現在では妥当と考えている。この手法に則るとすると、CAD/CAM 義歯用の人工歯とは、咬合面や基底面の形状や歯頸線の位置、咬合接触点、歯列の形態の情報を含んだ CAD データとしての人工歯と、そのデータと同型の実物がペアになったものと考えべきであろう。

既成人工歯を義歯床と接着させる方法では、義歯床と人工歯の間にはある程度の遊びが必要であるが、それが大きすぎると所定の位置にはめ込むことはできない。精密な義歯床—人工歯関係のために様々な基底面のデザインとオフセット値 (遊びの値) が検討されている¹⁷⁾。しかしながら人工歯と義歯床の境界は材料学的には弱点となるため、何とか連続体として製作できる技術が望まれる。

VII. CAD/CAM 化の意義と未来

臨床および技工操作の省力化や、重合法に依存しな

い新しい材料の適用がまず CAD/CAM 化の意義として考えられる。しかしながら、最大の意義とは、各ステップの情報伝達が数値になるということであろう。このことはいったん義歯の形状をデータ化してしまえば、いつでも義歯が提供できるということである。阪神大震災では、災害発生が明け方であったため、義歯を外した状態で被災した高齢者が多く、義歯製作の支援要求が強かったと聞く。東日本大震災では多くの歯科医院が津波のために閉院を余儀なくされたため義歯に関する対応がなかなかできなかったと聞く。大災害の対応のため国民の医療情報が集約され複数の場所に保存されるプロジェクトが進行しているそうである。義歯のデータも医療情報の一部として保存され、活用できる状況になるとよい。

教育に及ぼす影響も大きい。全部床義歯には周囲軟組織との機能的協調、適切な顔面形態の回復を考慮した義歯形態を付与することが重要であり、上下顎堤間の自由度の大きい空間の中に口腔機能や顔面形態に合致するように設定しなければならない。したがって、同一の書籍や手法に則ったとしても、現実には義歯の形態・品質は術者間で非常にばらつきが大きい。デジタル化の意義とは、義歯形態決定のための顎堤や顔貌などのさまざまな基準を数値データとして提供し、シミュレーション技術により最適形状を推定・検証するという手法が可能となるということである。この方法が確立すると、患者—術者—IT がお互いに協力し合うような、マン—マシンシステムとしての義歯製作支援システムを製作でき、義歯の品質のボトムアップが期待できる。またこれをシミュレーション教育に適用すれば学生教育用患者の減少を補ってくれるバーチャル患者や、在宅での全部床義歯製作になどの遠隔歯科医療に大きく貢献することとなる。また近年、歯科補綴学の卒前教育の時間を削減させざるを得ない状況になりつつあるが、ワークフローの中での歯科医師と歯科技工士の分業を数値データを介して明確かつ確実にし、それぞれの教育を重点的かつ効率的にして、教育の時間的コストを削減できると考えられる。さらに、今後無歯顎補綴の需要が増加する国々における日本の臨床技術の供与に貢献できるのではないかと期待している。

文 献

- 1) Maeda Y, Minoura M, Tsutsumi S, Okada M, and Nokubi T. A CAD/CAM System for Removable Denture. Part I: Fabrication of Complete Dentures. *Int J Prosthodont* 1994; 7: 17-21.
- 2) Busch M and Kordass B. Concept and Development

of Computerized Positioning of Prosthetic Teeth or Complete Dentures. *Int J Computerized Dent* 2006; 9: 113-120, 2006.

- 3) 中野田紳一. CAD に利用可能な全部床義歯人工歯弓構築法に関する研究. *広大歯誌* 2006; 38: 1-21.
- 4) Kanazawa M, Inokoshi M, Minakuchi S, Ohbayashi N. Trial of a CAD/CAM system for fabricating complete dentures. *Dent Mater J* 2011; 30: 93-96.
- 5) Kanazawa M, Iwaki M, Minakuchi S, Nomura N. Fabrication of titanium alloy frameworks for complete dentures by selective laser melting. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 1441-1447.
- 6) 村田雅代, 永尾 寛, 佐藤 裕, 吉田有里, 市川哲雄. 補綴治療による顔貌の三次元的変化の予測. *補綴誌* 2008; 52, 117 回特別号: 97.
- 7) 中村敏成, 金澤 学, 山本信太, 荒木田俊夫, 半田和之, 水口俊介. 口腔内スキャナーを用いた印象採得から作製したトレーによる印象咬合採得. 第 6 回デジタル歯科学会抄録 2015; 35.
- 8) 安斎 隆. X 線映画法による咀嚼ならびに嚥下時の口腔底のうごきについて. *補綴誌* 1978; 22: 819-843.
- 9) 中澤 潤. 下顎義歯舌側床縁における口腔底の圧. *補綴誌* 1986; 30: 135-154.
- 10) 水口俊介, 近藤修司, 関田俊明, 平野恭吉, 鈴木哲也, 小林賢一ほか. 有歯顎者と全部床義歯装着者における口唇の動き—上顎前歯と口唇の三次元的位置関係の変化—. *補綴誌* 1994; 38: 485-494.
- 11) 平野恭吉. 有歯顎者における咀嚼時口唇の動き. *補綴誌* 1995; 39: 1142-1153.
- 12) 水口俊介, 金澤 学. CAD/CAM による全部床義歯製作の未来. *DENTAL DIAMOND*. 2014 39(16): 64-72.
- 13) 平山大輔, 水口俊介, 金澤 学, 呂 学龍, 酒井 譲. SPH 法による口腔内モデル解析. 第 25 回計算力学講演会論文集, #1407, 神戸, 10 月 7 日, 2012.
- 14) Inokoshi M, Kanazawa M, Minakuchi S. Evaluation of a complete denture trial method applying rapid prototyping. *Dent Mater J* 2012; 31: 40-46.
- 15) Katase H, Kanazawa M, Inokoshi M, Minakuchi S. Face simulation system for complete dentures by rapid prototyping. *J Prosthet Dent* 2013; 109: 353-360.
- 16) 金澤 学, 水口俊介. 【CAD/CAM 新時代の幕開け】CAD/CAM 技術を応用した全部床義歯製作法. *補綴臨床* 2013; 46(2): 149-159.
- 17) Yamamoto S, Kanazawa M, Iwaki M, Jokanovic A, Minakuchi S. Effects of offset values for artificial teeth positions in CAD/CAM complete denture. *Comput Biol Med* 2014; 52: 1-7.

著者連絡先: 水口 俊介

〒113-8549 東京都文京区湯島 1-5-45 東京医科歯科大学大学院高齢者歯科学分野
Tel: 03-5803-5582
Fax: 03-5803-5586
E-mail: s.minakuchi.gerd@tmd.ac.jp