## 依頼論文

## ◆企画:誌上シンポジウム「デジタル技術は補綴歯科治療をどこまで変えるか?」

# バーチャル咬合器の現状と未来

小川 匠, 井川知子, 木原琢也, 伊藤崇弘, 重本修伺

Current status and future perspective of virtual articulators

Takumi Ogawa, DDS, PhD, Tomoko Ikawa, DDS, PhD, Takuya Kihara, DT, PhD, Takahiro Ito, DDS, PhD and Shuji Shigemoto, DDS, PhD

#### 抄 録

近年ではデジタル技術の発展により、さまざまな CAD/CAM システムにおけるバーチャル咬合器が存在する. 従来の咬合器は、本来補綴学において間接法による生体に調和した補綴装置の製作に必要不可欠なものであり、これまで多くの咬合器が実用化されてきた. 本稿ではバーチャル咬合器を従来の咬合器の種類(平線咬合器、平均値咬合器、半調節性咬合器、全調節性咬合器)に当てはめることで、バーチャル咬合器の特徴とその可能性を探る. また、われわれが開発を進めている次世代バーチャル咬合器の構成(高精度三次元再構築画像、高精度顎運動測定器)とその有用性について述べる.

キーワード

咬合器, CAD/CAM システム, 下顎運動, 医用画像

# **ABSTRACT**

In recent years, it is possible to design prostheses using virtual articulators in CAD/CAM system. Conventional articulators are necessary for the fabrication of bio-harmonized prostheses with the indirect method in prosthodontics, and various ones have been developed. In this present report, we classified the virtual articulators based on conventional articulator classification (hinge articulator, average value articulator, semiadjustable articulator, fully adjustable articulator) to discuss the features and usefulness of the virtual articulators. Additionally, we introduce our own developed new-generation virtual articulator, which applied the high precision 3D reconstruction and jaw tracking technologies.

### Key words:

Articulator, CAD/CAM system, Mandibular movement, Medical image

### I. 緒 言

近年のデジタル技術の発展は歯科領域に大きな変革をもたらし、患者個々の形態や機能に調和した補綴装置の製作という多種目単一生産のものづくりである補綴治療においても CAD/CAM システムが導入され、臨床応用が行われている。これは従来法をデジタル化し

た補綴装置の製作方法により、さまざまな恩恵を享受しているからに他ならない。実際、CAD/CAMシステムの導入により、これまで加工が困難であったジルコニアを使用した補綴装置の製作が可能となり、強度が高く、審美に優れた補綴治療が可能となった。また、ブロックやディスクを加工機で切削するため、均質で機械的特性に優れることや、技工作業の効率化、手作業の削減が可能であることも利点として挙げられる。

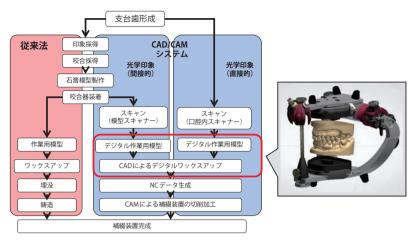


図1 CAD/CAMシステムを用いた補綴装置製作ワークフローとバーチャル咬合器の位置付け

一方で、すべてのワークフローがデジタル化できて いるわけではない。現時点では、デジタルワークフ ローはそれぞれ作業の段階においてさまざまな注意点 に対する工夫が必要であり、 最終的には歯科技工士・ 歯科医師による調整が必須である。また、天然歯との 色調や形態の調和、 陶材の築盛など熟練した歯科技 工士の知識や技術が重要であることに変わりはない. 却って、デジタル技術を補綴装置製作へ有効に利用で きる新しい技術や知識を有する歯科技工士が求められ ている. また、低価格と簡便性が求められる現代にお いても,生体の機能と形態に調和した補綴装置の製作, すなわち機能と形態の回復と維持を目的とした補綴治 療のエンドポイントは変わらず、補綴装置製作におけ る精度をいかに担保するのか、また複雑な症例に対し てどのように CAD/CAM システムを活用するのかな ど、今後の課題は多い

現在、市販されている CAD/CAM システムは多岐にわたり、バーチャル咬合器もさまざまである。その性能を十分に理解し、臨床応用するには、これまで培ってきた従来法における補綴装置製作法を再考し、デジタルとアナログを相互に比較することが重要と思われる。本稿ではそのデジタルワークフローの中でも特に生体に調和した補綴装置の製作に大きく影響するバーチャル咬合器に焦点を当てる。さらに、現在、われわれが取り組んでいる次世代 CAD/CAM システムにおけるバーチャル咬合器の概要とその有用性について紹介する。

### Ⅱ.バーチャル咬合器の現状

#### 1 咬合器の目的

咬合器は、歯科補綴学において間接法による補綴装

置の製作に必須の機器である。生体の機能に適した補 綴装置の製作を目的としているため、その機構は生体 の下顎位および下顎運動を再現できるように設計され ている<sup>1)</sup>. 加えて、補綴装置の製作だけでなく、診断、 治療計画の立案、治療の評価などにも利用される。

咬合器が生体の下顎運動を正確に再現するには,詳細な生体の下顎運動の理解が必要であり,咬合器の開発は生体の下顎運動を測定して運動モデルを探索する下顎運動研究の歴史ともいえる。そのため,複雑な機構を持つ咬合器が存在しているが,生体の下顎運動を完全に再現することは困難である。日常臨床においては,必ずしも複雑な機構を有する咬合器が必要であるとは限らず,症例によって使い分けられているが,バーチャル咬合器については,従来の咬合器のように種類やその下顎運動の再現性についてあまり理解されていないのが現状であると思われる。

# 2. バーチャル咬合器の定義

バーチャル咬合器とは、一般に従来法の咬合器をデジタル化したものをいい、具体的には CAD/CAM システムや口腔内スキャナーにおいて咬合器の役割を担う CAD ソフトウェアの機能を示している。CAD ソフトウェアは CAD/CAM システムのデジタルワークフローにおけるスキャンから設計を担うソフトウェアであり、その一部がバーチャル咬合器である(図 1)、CAD ソフトウェアはシステムに付随するものと独立したものが市販されているが、本邦においては独自のデータ形式を用いたクローズなものが多いことから、本稿では CAD ソフトウェアは主にシステムに付随する CAD ソフトウェアを扱う.

CAD/CAM システムは口腔内スキャナーにより石 膏模型を介さず歯列形態のデジタルデータを採得する

表 1 従来の咬合器に準じたバーチャル咬合器の分類

平線咬合器 平均值咬合器 半調節性咬合器 全調節性咬合器 従来咬合器 バーチャル 咬合器の一 CEREC (Sirona) Ceramill 次世代VR咬合器 S-WAVE(松風) KATANA(クラレ TRIOS (3Shape) (Amanngirrbach) iTero (Align Plane System ノリタ 対応する ケデンタル) (Zirkonzahn) Technology) システム i500(ヨシダ ARCUS digma II (KaVo) CEREC (Sirona) (Dental Wings) CARES (Straumann) (3shape)

直接法と通法通り印象材により印象採得を行い,石膏 模型を製作,スキャンすることでデジタルデータを取 得する間接法に大別される.どちらの方法も上下の歯 列データをスキャン後,咬合状態の頬側面をスキャン することで上下の歯列データが咬頭嵌合位に位置づけ られる.スキャナーで咬合採得を行うことで,従来の 咬合採得にあたる作業が完了し,咬頭嵌合位が再現さ れる.

バーチャル咬合器においても、ソフト上で咬頭嵌合位に位置づけられた上下歯列を側方や前方へ運動させることが可能なものがある。この咬合器への位置づけ方や側方運動の再現方法によって、バーチャル咬合器としての性能が異なる。

補綴装置の生体の適合精度は、補綴装置の製作過程における作業すべての誤差が含まれているが、特に咬合器の種類に大きく影響を受けることは周知の事実である。したがって、デジタル化された補綴装置の製作を実現する CAD/CAM システムにおいても同様にバーチャル咬合器の果たす役割は大きい。そこで、現状のバーチャル咬合器を従来の咬合器に準じて分類し、その CAD/CAM システムの特徴について記述する。

バーチャル咬合器は従来の咬合器と、根本的に異なる部分がある。従来の石膏模型では起こり得ないが、デジタルデータではその性質上、歯列モデルのデジタルデータが重なり噛み込み像として観察されることを考慮しておく必要がある。また、従来の咬合器であれば、上弓と下弓が独立しているため、咬合面を観察する際やタッピング様の動きをさせる際に、開閉することが可能であるが、バーチャル咬合器のほとんどは最初に咬頭嵌合位に位置づけた後、歯列データの表示、非表示を切り替えて咬合面を観察、設計を行うため、

タッピングなど開閉する動きは行えない.

一方で、バーチャル咬合器と従来の咬合器は共通部分も多く、バーチャル咬合器を従来の咬合器の分類に当てはめることができる(表 1).

### 3. バーチャル咬合器の種類

# 1) 平線咬合器に準じた咬合器

平線咬合器は咬頭嵌合位を再現する簡易型の咬合器である。したがって、前述した上下歯列のスキャンおよび咬合状態の頬側面のスキャンを行って、上下歯列が位置づけられた状態といえる。このバーチャル咬合器は口腔内スキャナーに付随したシステムに多い傾向がある。インレーや少数歯の被覆冠を製作するのに用いられることから、口腔内スキャナーで歯列の一部を採得する。従来の咬合器ではユニティ咬合器や局部咬合器などがあり、上下の咬頭嵌合位を再現し、下顎運動は蝶番回転運動のみが行える。バーチャル咬合器においては従来の咬合器のように開閉しないため咬頭嵌合位の再現のみで下顎運動は再現できない。

### 2) 平均値咬合器に準じた咬合器

平均値咬合器は顆頭点と歯列弓との位置関係が平均値に設定された咬合器である. 咬合器装着は咬合平面板をボンウィル三角の一辺が約100 mm, バルクウィル角が約20度になるよう設置する. この咬合器は特に健常者(形態的および機能的)に対し,近似した運動を再現できるように設定されたものである. (前方)矢状顆路角は約30度に設定されており,側方運動に対する調節機能はない. これに対応するバーチャル咬合器は主に表1に示す7つであり,ほとんど3Shape社製のCADソフトウェアを採用している.

バーチャル咬合器における咬合器装着は,スキャン された上下歯列を咬頭嵌合位に位置づけた後,咬合平



図 2 半調節性咬合器の機能を持つバーチャル咬合器 (a: Amanngirrbach 社, b: Zirkonzahn 社, c: KaVo 社)

面板の役割を果たすプレーンに沿って上下歯列を位置づける方法である。つまり、従来の平均値咬合器の咬合器装着を同様の咬合器装着を行う。咬合器の種類はさまざまな種類をリストから選択することで変更できる。しかし、ここで選択できる咬合器の多くは、外観が半調節性咬合器であり、顆路の運動(非作業側顆路および矢状顆路)が調整可能となっているため、あたかも半調節性咬合器と同一の機能を持つと誤解しやすい。前述の通り、上下歯列の位置関係は平均値咬合器と同様であるため、半調節性咬合器としての機能はなく、この場合の顆路の調節は意味を持たない。このタイプのバーチャル咬合器を使用する際には顆路に平均値を入力して、平均値咬合器として使用するのが妥当である。

# 3) 半調節性咬合器

半調節性咬合器はフェイスボウにより頭蓋に対する 歯列の位置関係を再現し、チェックバイトにより矢状 顆路角と非作業側の側方矢状顆路角を患者個々に設定 できる。その調節機構はさまざまであり、多くの半調 節性咬合器が存在する。しかし、バーチャル咬合器に おいては、半調節性咬合器と同様な機能を持つものは 少なく、現在国内で市販されているものは3種類で ある(図2)。

アマンギルバッハ社のバーチャル咬合器は、従来通りフェイスボウとチェックバイトを採得し、それぞれ咬合器に上下石膏模型を咬合器装着後、顆路の調整を行なう。そして、この石膏模型を咬合器ごとスキャンすることで、咬合器に装着した上下歯列の位置関係がバーチャル咬合器にトランスファーされる。さらに、

顆路を咬合器と同様の数値に設定することで、半調節 性咬合器として使用可能となる。また、ほとんど同様 のシステムであるが、ジルコンザーン社のバーチャ ル咬合器は特にフェイスボウ採得を顔貌スキャナー (フェイスハンター) にてデジタルで行うシステムが ある。

カボ社のバーチャル咬合器は超音波を用いた顎運動測定器(アルクスディグマII)にて下顎運動を記録し、咬合器の顆路に設定すべき数値を算出することで、チェックバイトをデジタルで行うシステムを採用している。ただし、現在はカボのCADソフトウェアは販売されていないため、他のソフトウェア内のプロター咬合器(カボ社)を使用することでバーチャル咬合器として使用可能となっている。

また、この下顎運動測定器では顎運動を記録後、運動軌跡の表示、平均的顆頭間軸、蝶番運動軸、全運動軸の算出、複数の顎位の比較などが可能とされている。全運動軸は下顎運動解析やその再現に非常に有用であるが、このシステムにおける全運動軸の算出には河野ら<sup>2)</sup>が対象とした矢状面内限界運動路ではなく、前方滑走及び習慣性開口運動を使用している。矢状面内限界運動に比べ、患者が容易に動かせる運動であるため、特にヨーロッパでは機能軸として使用されることが多い。しかし、いわゆる全運動軸とは異なった算出方法を用いているため、臨床で用いる場合には慎重に検討する必要がある。このバーチャル咬合器は顎運動データを一部使用しているものの、顎運動データを用いて咬合器を動かすことは不可能であり、半調節性咬合器に即したものである。

### 4) 全調節性咬合器

全調節性咬合器は、両側の矢状顆路傾斜および非作 業側の側方顆路の調節機構に加えて、作業側の側方顆 路および作業側側方顆路傾斜の調節機構や顆頭間距離 の調節機構を備えている咬合器である. これは, 咬合 器開発の歴史において下顎運動の測定から得られた顆 頭の小さな運動まで再現しようとした咬合器である。 特に、作業側の動きや顆頭間距離は補綴装置の咬合 面形態に影響を及ぼすことが報告3)されていることか ら、半調節性咬合器以上に調節機構を増やし、下顎運 動を正確に再現することで、生体に調和した補綴装置 の製作を目的としている。特に、変形性関節症による 作業側下顎頭の易可動性が下顎運動を複雑にしている 事実は臨床において実感するところである. しかし, 従来の全調節性咬合器は調整機構が複雑になり、顎運 動測定器の精度や測定点の選択部位、作業側顆路調節 機構の調節範囲などの問題から必ずしも、精度良く生

金属アーチファクト低減後

体の運動を再現しているとは言い難い。また、下顎運動データをそのまま咬合器上で再現する自由運動咬合器のような下顎運動再現装置<sup>4,5)</sup>が開発されているが、特殊な機器が必要となり一般臨床には普及していないのが現状である

一方, バーチャル咬合器はデジタルである顎運動 データとの相性が非常によく, スキャンした上下歯列 モデルを顎運動データで動かすことによって、完全な 全調節性咬合器となりうる。CAD/CAMシステムに よるデジタルデンティストリーの発展がこれまで先人 たちが行ってきた咬合器の歴史に大きなパラダイムシ フトをもたらす足がかりとなると思われる。現在、全 調節性咬合器に相当するバーチャル咬合器は市販され ていない そこでわれわれは従来の CAD/CAM シス テムに CT による高精度三次元再構築画像と高精度下 顎運動データを統合することで, より生体に調和した 補綴装置の製作を目指す次世代 CAD/CAM システム 6) の開発に取り組んでいる。このシステムの主要構成要 素であるバーチャル咬合器は患者個々の下顎運動を極 めて正確に再現できるだけでなく、CT による顎関節 を含む顎顔面形態データと顎運動データを統合するこ とで、患者個々の下顎骨の運動として観察可能である.

# III. バーチャル咬合器の未来 (次世代バーチャル咬合器)

#### 1 顎運動データの活用

# 1) 医用画像情報(高精度三次元再構築画像)

現在、バーチャル咬合器に使用されている形態情報は歯列データのみであるが、技術的にはさまざまな医用画像情報が活用可能である。とくに顎顔面頭蓋部のCTデータは顎関節の解剖構造、顆頭の形態、下顎骨の大きさなど重要なデータとなる。一方、CT画像から三次元再構築画像を得るためのセグメンテーションなどの画像処理作業が煩雑であること、歯や歯列に対する解像度が十分でないこと、金属によるアーチファクト(障害陰影)が多いことなどの要因により、CAD/CAMシステムへの利用が敬遠されがちである。

近年ではパソコンの処理能力やネットワーク環境の向上から大量データの取得,情報の共有が容易となり AI による深層学習による研究が盛んになってきている。深層学習は、学習データを入力することで特徴をつかみ、法則化(モデル化)し、未知のデータが入力された際にも学習に基づいて判断や推定が可能な技術である。そこで、われわれは CT データの金属アーチファクトを低減させた後、手動によりセグメンテーションを行った 36 症例を学習データとして、深層学

#### 金属アーチファクト低減前

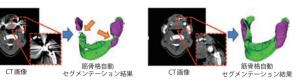


図3 深層学習による筋骨格の自動セグメンテーション



咬頭嵌合位の咬合接触像

動的な咬合接触像

図4 咬合接触の可視化(次世代バーチャル咬合器)

習にて自動化を行うことで簡便に CT 画像から患者個々の形態データを生成する自動セグメンテーションの試みでを行っている。深層学習による自動セグメンテーションにより上下顎骨、歯列、左右咬筋の障害陰影が改善されている(図 3)。今後はこのような AI 技術を用いた画像処理を行うことにより、 CT データだけでなくさまざまな医療情報をバーチャル咬合器に組み込むことが可能になる。

### 2) 高精度下顎運動測定装置

下顎運動測定装置は徳島大学と共同で開発した磁気ベクトル方式の顎運動測定器®を用いている。上顎歯列に設置する3軸コイルに3軸交流磁場を発生させ、その磁場の変化を下顎に設置する3軸センサで受信し、センサの位置と姿勢を6自由度で算出する方式である。センサは小さく高精度であり、センサの位置分解能として咬頭嵌合位付近では10 μm 程度、相対誤差は0.3%で非常に精度が高い。

下顎が運動するときには、下顎頭の回転と滑走が同時に生じるため、ある点を中心とした回転運動を行っており、運動に伴う回転と滑走の割合が絶えず変化し、回転中心も移動している。したがって、立体の運動を正確に測定するには6自由度顎運動測定装置が必要となる。特に生体に調和した補綴装置の製作を行うには、顎関節および咬頭嵌合位付近での高精度測定が要求される

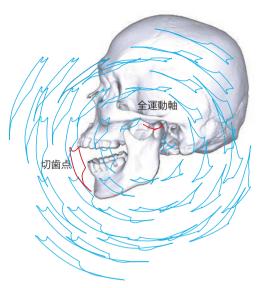


図5 全運動軸(矢状面内のすべての運動に対応して記録される 上下的に幅が最小となる運動範囲を示す点)

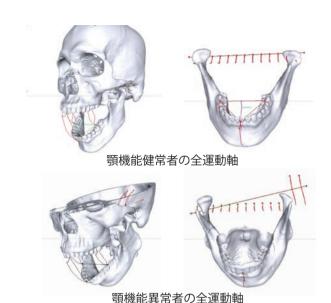


図 6 次世代バーチャル咬合器にて算出した全運動軸







図7 中央部分の全運動軸が顆頭間軸から外れている症例 (顎機能異常者)

3) 顎機能評価および補綴装置の設計に活用する全 運動軸の算出

高精度三次元形態データと下顎運動測定データを同一座標系で統合することで、咬頭嵌合位における咬合接触や下顎運動時の動的な咬合接触像が観察可能となる(図 4). これは咬合器に具現すべき顎間関係と下顎運動の正確な再現性が実現可能となった次世代のバーチャル咬合器といえる. また、形態と運動データが同時に表示可能となったことで、顎機能評価や補綴装置の設計に活用できる運動論的基準軸が利用できる.

運動論的基準軸の代表である全運動軸は、矢状面内のすべての運動に対応して記録される上下的に幅が最小となる運動範囲を示す点である(図 5). つまり、回転と移動を同時に行っている複雑な下顎頭の運動の回転要素を除外し、移動要素だけによる単純な運動路として表現している。それゆえ咬合器の運動軸として設定することで、咬合高径を変化させた場合にも下顎の運動を精度よく再現できる臨床上有用な運動軸である。下顎頭は、回転しながら移動するため、測定点の

位置により測定される運動経路が著しく異なるが、全 運動軸は運動論的に根拠のある顆頭の代表点として、 使用できる。また、この運動軸は顎機能健常者では算 出されるが、顎機能異常者では算出されない場合があ ることから、顎機能検査としても利用可能である。

われわれのシステムでは全運動軸をソフトウェアにて自動で算出可能であり、顆頭間軸上の13点における全運動軸点および三次元近似直線を求められる。つまり、独立して算出されたそれぞれの点が直線上に存在するかを判定することから、顎運動検査として適した方法であるといえる。次世代 CAD/CAM システムによるバーチャル咬合器にて算出した全運動軸の一例を図6に示す。顎機能健常者(図6上)では全運動軸点が下顎頭付近に軸状に並んでいる。顎機能異常者(図6下)では全運動軸点がばらつき、軸状に分布せず、下顎頭から逸脱している。また、全運動軸点が左右の下顎頭付近に存在する症例においても、中央部分の全運動軸点が大きく顆頭間軸から外れている症例を多く経験している。図7のように、左右の下顎頭付近の全運動軸点を結ぶと一見、顎機能健常者に思え

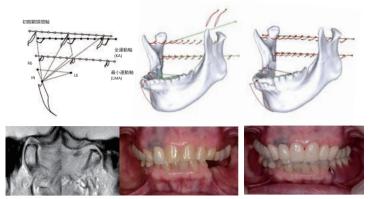


図8 最小運動軸を基準に咬合再構成を行った症例 (左:術前,右:プロビジョナル装着時)

るが、中間部分の全運動軸点はばらつき、顎機能異常者であることが分かる.

4) 顎機能異常者においても顎機能評価および補綴 装置の設計に活用できる新たな運動論的基準軸(最小 運動軸:Least Motion Axis; LMA)

全運動軸が臨床的に重要な運動軸であることは周知 の通りであるが、顎機能異常者では算出されないこと があり、 顎機能異常者においても基準となる運動軸と して最小運動軸10)を用いている。全運動軸と同様に 自動で算出可能であり、顎機能異常者でも軸として算 出されること、健常者では全運動軸と最小運動軸はほ ぼ平行な軸11)であり、最小運動軸は咬合平面の延長 線上に算出される12)ことが明らかとなっていること から、顎機能異常者の基準となる可能性が示されてい る. 全運動軸が算出されない変形性関節症患者に対 し、最小運動軸を基準に咬合再構成を行い、全運動 軸が算出された症例を図8に示す。治療中に次世代 CAD/CAM システムによるバーチャル咬合器にて顎 運動解析を行ったところ全運動軸が顎関節付近に収束 し、最小運動軸と平行な直線が観察できている。この ように、次世代バーチャル咬合器を用いることで、形 熊だけでなく下顎運動情報を用いた顎機能評価が可能 であり、より詳細な評価が可能である.

### 2. 形態と機能の評価

歯科補綴学において咬合器が重要視されるのには補 綴装置の製作だけでなく、診断や治療計画の立案に必 要であるのに他ならない。咬合位、咬合平面、咬合高 径、中でも咬合平面の設定は形態的、機能的回復に非 常に重要である。咬合平面はしばしば歯周疾患や顎機 能障害と関連する咬合異常の影響を受けるため、咬合 平面を評価することは補綴治療のための診断や治療計 画の立案に必須である。特に全顎的な補綴治療を行う

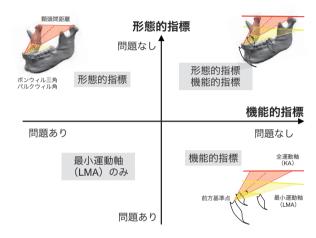


図 9 顎機能健常者および顎機能異常者において基準となる 形態的・機能的指標の関係

場合,適切な咬合平面を新たに設定するため,咬合平面と関連する形態的 (解剖学的),機能的 (運動論的)な指標について考慮する必要がある.これまでにも多くの指標が提案されてきているが,近年ではデジタルデンティストリーの発展に伴い二次元情報として取り扱われていたこれらの指標がデジタル画像やデジタル機器を活用することで三次元情報として再検証されている.次世代バーチャル咬合器を用いることで,形態と機能を検査・診断でき,かつ CAD/CAM システムで利用できる定量的な指標が得られると考えている.

顎機能健常者では形態的な指標と機能的な指標はほぼ一致するのに対し、顎機能異常者では形態的な指標と機能的な指標は異なることが多い。顎機能異常者においてもどちらかのみに問題がある場合には、もう一方の指標をもとに咬合平面を決定することが可能であるが、両方ともに問題がある場合には試行錯誤的に咬合平面を決定するしか方法がないことになる。次世代バーチャル咬合器では顎機能異常者においても算出可

能な最小運動軸が求められるため、これをもとに咬合平面の決定が行える(図 9)。したがって、形態的、機能的どちらか、または両方に問題があるのかを検査・診断し、 顎機能を回復するにはどの指標を用いればよいかを評価することにより、 CAD/CAM システム上で全顎的な補綴治療が可能となる。

# IV. おわりに

CAD/CAM システムを始めとしたデジタルデンティストリーの利点を最大限活かすには、従来法との比較の中から何がデジタル化され、どのようなことが新たに可能となったのかを理解することが第一歩となる。バーチャル咬合器は従来の咬合器の単なるデジタル化にとどまらず、これまで培ってきた補綴治療の精度を維持したうえで形態および機能の可視化から定量的な治療を行える次世代の咬合器となりうるものである。デジタルの恩恵は一人ひとりの患者に対する治療に加え、それが定量的なデータとして蓄積し、ビッグデータとなったとき、より最適な補綴治療を提供できる可能性を秘めている。本稿が少しでもデジタルデンティストリーの進むべき道標となれば幸いである。

# 利益相反

本論文の内容に関して、著者に開示すべき利益相反関係 にある企業などはない。

#### 文 献

- 長谷川茂男,坂東永一監修。臨床咬合学辞典。東京:医歯薬出版;1997,448.
- 2) 河野正司. 下顎の矢状面内運動に対応する顆頭運動の研究, 第二報, マルチフラッシュ装置による矢状面運動の解析. 補綴誌 1968; 12:350-380.
- 3) 渡辺文秀, 棧 淑行, 五十嵐孝義, 顆頭間距離, 五十嵐孝

- 義,田村勝美編,月刊歯科技工別冊 図解咬合の基礎 知識、東京:医歯薬出版;1984,40-43.
- 4) Nishigawa K, Satsuma K, Shigemoto S et al. Development of a novel articulator that reproduced jaw movement with six-degree-of-freedom. Med Eng Phys 2007; 29: 615-619.
- 5) 井川知子, 重田優子, 平林里大ほか. 新しい概念に基づいた新型咬合器の開発. 口腔リハビリ誌 2015;28:11-20.
- 6) 伊藤崇弘, 重本修伺, 伊藤光彦ほか. CT 画像と顎運動情報を用いた VR 咬合器の開発. 日本医用画像工学会大会予稿集 38 回 2019; 609-614.
- 7) 森谷友香, Fatemeh Abdolali, 阪本充輝ほか. 顎口腔 領域の CT 画像における金属アーチファクト低減を用い た筋骨格セグメンテーション 金属アーチファクトのシ ミュレーションによる精度検証. 日本医用画像工学会大 会予稿集 38 回 2019; 630-637.
- 8) 石川輝明. 三軸コイルを用いたチェアサイド用6自由度 顎運動測定器の開発と応用. 四国歯誌 2006;19:55-66.
- Shigemoto S, Bando N, Nishigawa K et al. Effect of an exclusion range of jaw movement data from the intercuspal position on the estimation of the kinematic axis point. Medical Engineering and Physics 2014; 36: 1162-1167.
- 10) Hirai S, Shigemoto S, Shigeta Y et al. Relationship between the mandibular movements and deformation of the coronoid process and the condyle. J Jpn Assoc Oral Rehabil 2016; 29: 35-40.
- 11) 伊藤崇弘, 重本修伺, 井川知子ほか. 下顎運動情報を用いた運動論的基準軸の空間的特徴の検討. 顎機能誌 2017; 23:132-133.
- 12) Ito T, Shigemoto S, Shigeta Y et al. Proposal of quantitative method for determining occlusal plane. J Jpn Soc. Stomatognath. Funct 2019; 26: 1-7.

著者連絡先:小川 匠

〒 230-8501 横浜市鶴見区鶴見 2-1-3 Tel: 045-581-1001 (EXT 8411)

Fax: 045-573-9599

E-mail: ogawa-t@tsurumi-u.ac.jp