

インプラント補綴治療介入における CT シミュレーションの活用

細川 隆司

The Rationale of CT Data-based Simulation in Prosthetic Intervention with Dental Implants

Ryuji Hosokawa

抄 録

近年、CT 撮影を行い顎骨の三次元データを用いてコンピュータで術前解析を行い、狙い通りにインプラント手術が実施できるシステムが開発されたことにより、いわゆる MI（低侵襲）の概念を導入したインプラント治療が比較的安全確実にできるようになってきた。さらに、最近、CT の三次元データを用いて、三次元有限要素法モデルを構築し、生体力学的なシミュレーションを行うことにより、術前にインプラントの本数や配置を最適化することも可能になりつつある。そこで、本総説は、インプラント補綴治療介入における CT データを用いたシミュレーションの活用に関して、三次元情報を用いた術前診断について、その現状と未来への方向性を論じたものである。なお、本総説は、2011 年に広島で開かれた第 120 回日本補綴歯科学会学術大会において開催されたシンポジウムでの講演をまとめたものである。

和文キーワード

インプラント、CT シミュレーション、コンピュータ支援手術

I. はじめに

インプラント治療を行うにあたり、予測可能なトラブルをできるだけ回避するためには、術前診断、とくに画像診断は必須である¹⁾。インプラント埋入手術に必要な情報として、下顎管の走行状態、オトガイ孔の位置、上顎洞の状態、上顎洞底、鼻腔底の三次元的な把握が求められる。しかしながら、パノラマ X 線検査から得られる情報は二次元的な情報でしかなく、骨の幅径や断面形態の把握は不可能である。さらに、上顎洞底の隆起や隔壁などの複雑な形態、上顎洞粘膜の肥厚などもパノラマ X 線検査では詳細な把握は困難である。X 線 CT 検査（以下 CT）は顎骨の断面形態を三次元的に把握することができる有用な画像診断法としてインプラント治療に広く適用されるようになってきている。そこで本稿では、インプラント補綴治療介入の術前診断における CT の活用について、とくに補綴治療のシミュレーションに焦点をあてて述べる。

II. CT はなぜ有用か

CT によって得られる咬合面に平行な断層像であるアキシアル像（軸面断層像）だけでも、上顎洞の形態や上顎洞炎の存在など骨および軟組織の診断が可能であるが、多断面再構成画像（MPR 像）によりインプラントを埋入する部位の顎骨の断面形態、下顎管の位置、上顎洞の形態などが把握でき、骨の高径、幅径を画像上で計測することが可能となる。また、CT で得られたデータをもとにして、三次元画像を構築し顎骨形態を再現できる専用ソフトウェアにより、三次元的に理想的なインプラントの配置が術前診断時に計画できるようになった（図 1）。CT シミュレーションで可及的に骨移植を避ける治療計画が精緻に行えるようになったことは、患者の QOL の維持向上に大きな役割を果たしていると考えられる。さらに、皮質骨の断面像と三次元的な形態が把握できることで、インプラントの力学的安定を高いレベルで得ることができるようになった（図 2）。

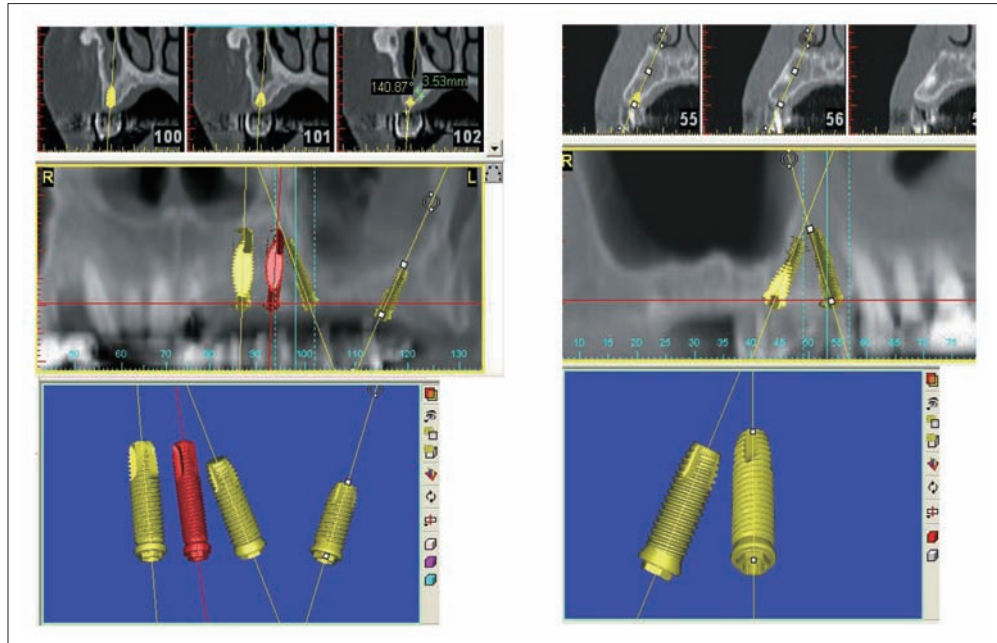


図1 CTシミュレーションによりインプラントを傾斜させて埋入し、骨移植を避けてインプラント補綴治療を行うことができる。この画像では、上顎洞を避けてインプラントを傾斜埋入し、短縮歯列の上部構造を計画した症例を示している。

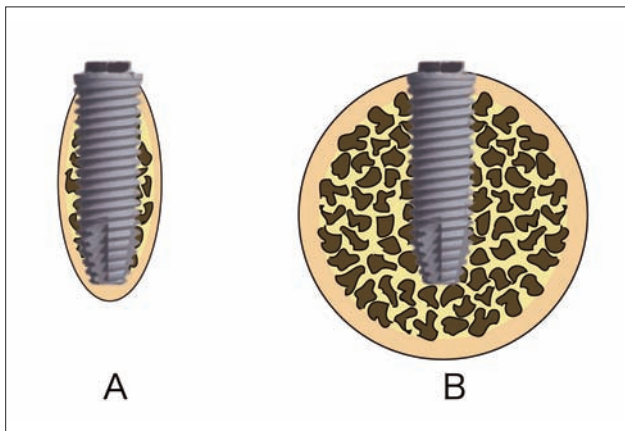


図2 CTシミュレーションにより骨形態が三次元的に把握できる。骨の高さや幅が少ない方(A)が皮質骨でインプラントを支えることができるため、高さや幅が大きな部位(B)よりも力学的に有利となる場合もある。

また、CT撮影によりCT値(Hounsfield値)を計測することができる。CT値は組織のX線透過率を相対値として表した値であり、骨組織においては骨塩量を反映するため骨質を評価するのに一定の有効性があるとされている。Misch²⁾はCT値を4段階(D1: >1250 HU, D2: 850-1250 HU, D3: 350-850 HU, D4: 150-350 HU)に評価・分類し、臨床上有効な指標の一つとされている。このMischの骨質分類は埋入窩形成時のドリルの感触をもとにした主観的なものであるのに加

え、理論上はCT値が物質のかたさを表しているわけではないため信頼性には多少の問題を含んでいる。しかし、臨床上の指針としてインプラントの初期固定を予測する術前の骨質判定には有効と考えられる。また近年、医用CT(ヘリカルスキャンCT)のほかに歯科用コンビームCTが販売され注目を集めている。歯科用コンビームCTはヘリカルCTに比べ比較的高い解像度と寸法精度が得られ、被爆量が少ないという利点がある。一方で、前述のCTの画像構築方法がヘリカルスキャンCTと全く異なり、正確なCT値が得られないため骨質評価の信頼性に欠けるという問題点があることを知っておく必要がある。

III. CTシミュレーションの意義と問題点

CTを撮影したデータは国際標準フォーマットであるDICOM形式のファイルとして出力可能である。このことから、このDICOMファイルに対応したインプラント用診断用ソフトが多数開発され、ヘリカルCTや歯科用コンビームCTで得られたデータをもとにして、三次元CT画像や三次元造形モデルで顎骨を再現できるようになった。これらのソフトウェアを使用すると、インプラント埋入予定部位の骨高径と幅径を簡単に計測できるだけでなく、骨質などもある程度把握できるため、理想的なインプラントの埋入位置を計画し、シミュ

レートすることができる。この CT シミュレーションが可能になったことで、傾斜埋入などのグラフトレスサージェリーやフラップレス手術といった低侵襲の手術計画が的確に行えるようになってきた。

ただし、CT シミュレーションには問題点もある。第一の問題は、口腔内の歯科用金属によるアーティファクトである。患者の口腔内には、多くの場合金属製の補綴装置が装着されており、この金属による X 線の乱反射が画像の乱れを招く。この解決方法については、さまざまな取り組みがなされるようになってきているが、X 線を用いる限り完全な解決は難しい。もう一つの問題は、上部構造の治療計画に関するものである。一般的なインプラント治療の流れは、図 3 に示すようにデンタルやパノラマ X 線写真を用いた初期画像診断を行い、欠損補綴治療における一般的な局所および全身的な診察を行うことから始まる。インプラントによる欠損補綴治療が望ましいと判断された場合、最終上部構造をイメージした診断用ワックスアップなどをもとにした、いわゆるセットアップ模型を作製し、その形状情報が CT 像に反映されるように造影性のある材料で診断用ステントを作製する。これを口腔内に装着して CT 撮影を行い、シミュレーションソフトウェアで解析を行うと画像上にセットアップした最終上部構造のイメージが映るための確な術前診断に基づくインプラントの埋入位置や方向の決定、インプラント体の選択が可能になる。すなわち、トップダウントリートメントとしての理想的な治療計画立案のワークフローである。しかし、ここで、もし何らかの問題が生じ最終上部構造の形態を変更した方が望ましいと考えられた場合、その対応には困難が付きまとう。たとえば、大白歯 2 本連続欠損の症例において大白歯 2 本の形態で最終上部構造を計画していたが、第 2 小臼歯相当部の骨吸収が大きく、骨移植を選択するより小臼歯 3 本の形態として遠心に 2 本埋入し近心に延長したカンチレバブリッジとして上部構造を再設計することを考えてみた場合、まず、セットアップ模型からの再製作が望まれる。しかし、セットアップ模型を作り直したとしても、CT 上で再度シミュレーションする場合にその形状情報を取り込むには、もう一度、新しい診断用ステントを用いて CT 撮影を行う必要がある。このように、上部構造の設計変更が生じたとき、あるいは設計を変更したシミュレーションを行いたい場合、その都度セットアップをやり直し、診断用ステントを再作製して CT を再撮影するのが最も良い方法であるが、実際にはきわめて困難である。放射線被爆のことを考えると、頻回の CT 撮影は絶対に避けなければならない、現実には、最初の 1 回の CT 撮影で対応せざるを得ない

初期画像診断 (デンタル+パントモ)

↓
スタディモデルによるセットアップ

↓
診断用ステント作成→CT 撮影

↓
CT による診断 〈治療計画変更の可能性あり〉

↓
インプラント治療計画説明、同意

↓
外科用ステント作製

↓
手術→プロビジョナル→補綴

図 3 CT シミュレーションを用いたインプラント治療の一般的なワークフロー

ことが多い。ただ、これでは、上部構造の形状やシミュレーションしたインプラントの埋入位置が外科用ステントに正確に反映されないという大きな問題が生じてしまう。できるだけ正確で修正不要なセットアップを行うのが CT シミュレーションにとって重要課題と言えるが、一方で、CT を撮る前に正確にインプラントの埋入位置を決めるのは不可能に近い。なぜなら、インプラントの埋入位置は CT シミュレーションによって、はじめて正確に決められるからである。この永遠のパラドックスを解決することが、CT シミュレーションの急務であると言えよう。

IV. 次世代の CT シミュレーション

前述の問題点を解決するため、さまざまな取り組みがなされ始めている。金属アーティファクトに関しては、大きく分けて二つの方法で解決が図られようとしている。一つは口腔内のマッピング情報と模型を利用する「モデルベース法」、もう一つは CT データからバーチャルプランニングを行う「コンピューターベース法」である。「モデルベース法」は CT 撮影用ステントに位置合わせ用マーカーを付け、患者の口腔内に装着して CT 撮影を行い、マーカー付きの CT 撮影用ステントを歯列石膏模型に装着し三次元形状計測器で正確に計測し、そのマーカーを位置合わせの基準にして CT 画像と合成するという方法である (図 4)。一方、「コンピューターベース法」は造影性のあるマーカーを設置した診断用ステント (ラジオグラフィックガイド) を装着した撮影と、ラジオグラフィックガイドのみの CT スキャンを 2 回 (ダブルスキャンニングテクニック) 行うことで、二つの

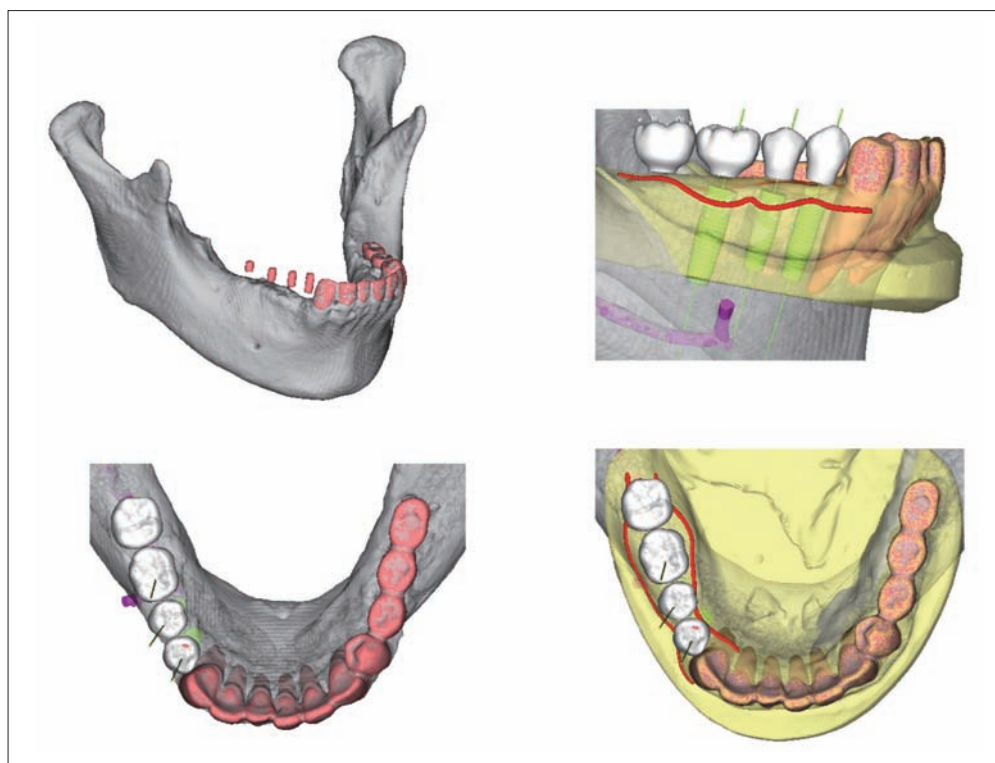


図4 モデルベース法によるシミュレーションの例 (BioNa®)。研究用模型の三次元情報を重ねることによりアーティファクトを排除して治療計画を立てることができる。

データをソフトウェア上で3Dイメージに再構築し、インプラントの埋入シミュレーションを行う方法である。いずれにせよ、アーティファクトのある画像の三次元情報とアーティファクトのない三次元情報を位置合わせして合成する方法であり、操作は若干煩雑にはなるが、確実な診査診断には有用なものと考えられ、多くのシミュレーションシステムで対応可能になってきている。

もう一つの問題点である、セットアップの修正をどのようにCTシミュレーションに反映させるかということについてもさまざまな取り組みが始まっている。実際にセットアップされた歯冠形態を修正して治療計画を変更する場合、新たなセットアップをスキャンして三次元情報を得た後、CTから得た顎骨の三次元データに前述の『モデルベース法』等で反映させる必要がある。しかし、実際には模型の再スキャンが必要など非常に煩雑な手順になり、重ね合わせの三次元的な位置誤差も問題になる。こういったセットアップ修正への対応に関して、模型上でセットアップを行わず、コンピュータの三次元画像上で完全バーチャルの補綴装置シミュレーションを行う試みが最近実用化され始めている(図5)。研究用模型上でのセットアップを完全バーチャル(仮想)化する

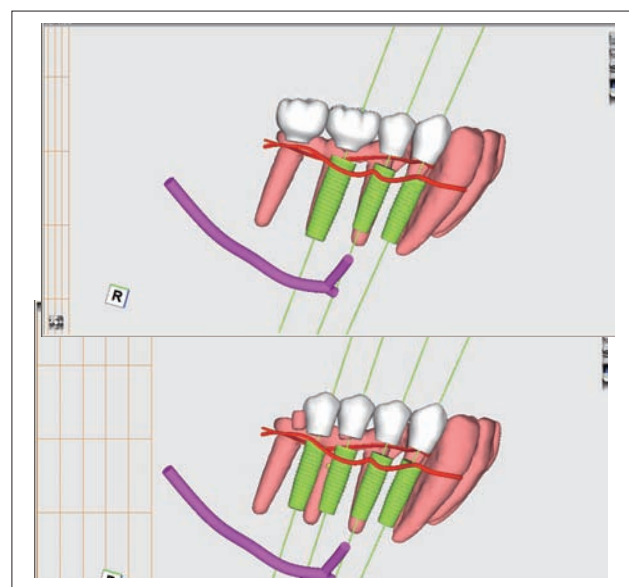


図5 完全なバーチャルシミュレーションにより、セットアップ模型が不要になる。大白歯形態での治療計画(上)と小白歯形態での治療計画(下)を比較検討して、最適な補綴設計を選択し治療に反映できる。

ることの利点は大きい。CTデータをもとに何度でもインプラントの配置や上部構造の形態を修正し最適化で

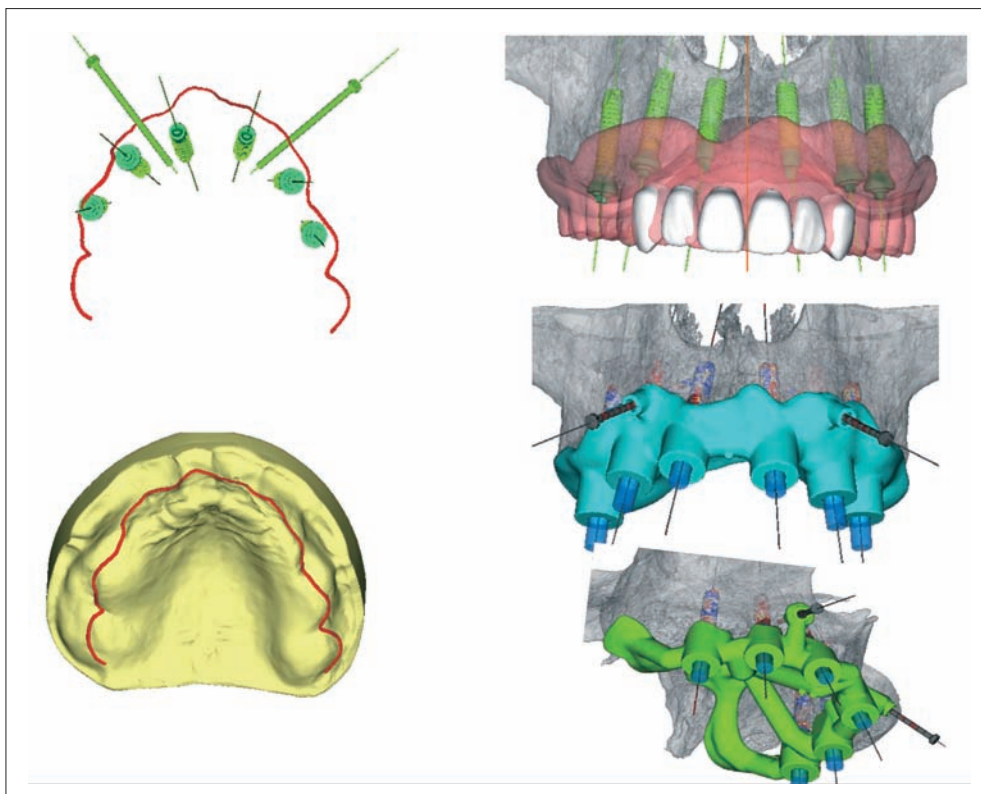


図6 CTシミュレーションソフトウェアBioNa[®]を用いたバーチャルシミュレーションの例(図6~10)。モデルベース法により口腔内の形状を正確にCT画像に重ね合わせる。その際に、角化歯肉と遊離歯肉の境界線(左図の赤線)も表示させることができる。右図は外科用ステント(BoneNavi[®]システム)の形状設計。

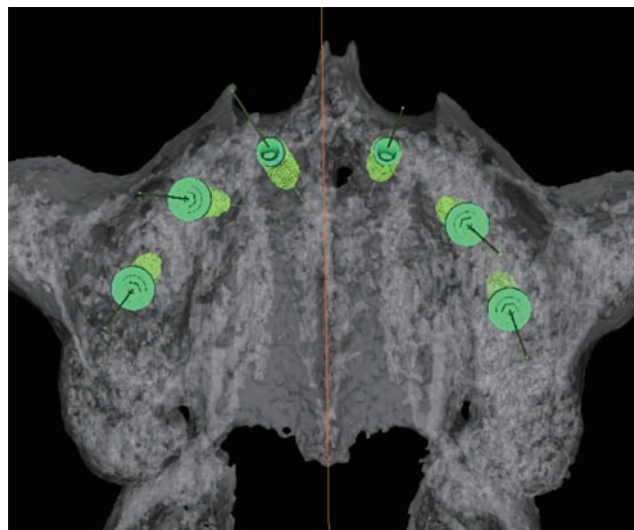


図7 インプラント配置の三次元表示(BioNa[®])

き、その位置情報を正確に把握できるため、位置情報の誤差が限りなく少ない外科用ステント(サージカルガイド)の作製が可能になる。たとえば、旧義歯をコピーした診断用ステントを用いてCT撮影した場合、旧義歯自体の人工歯排列を変えることは容易ではないが、バイ

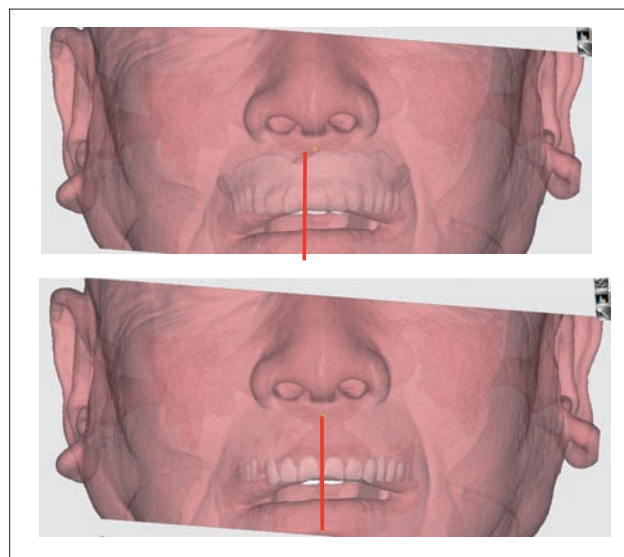


図8 上顎旧義歯の人工歯排列をコンピュータ上で修正しながら上部構造のセットアップを実施(BioNa[®])。上図の上顎歯列の正中を下図のように修正した。

オニック社(大阪, 日本)のBioNa[®]というシステムでは図6~10に示すように、完全バーチャルでセットアップ可能なため、排列をコンピュータ上で修正し、それ



図 9 バーチャルセットアップをもとにした上部構造の設計



図 10 図 9 で設計した上部構造を作製し、インプラント手術直後に装着、即時荷重を行った。CT シミュレーションでの設計通りの上部構造が装着されている。

に従って外科用ステントを作製し、さらにプロビジョナルの上部構造まで CAD/CAM で作製できる。これらの機能は、現在多くのシミュレーションシステムでは対応できていないが、インプラント治療におけるトップダウントリートメントを確実に実施するためには、石膏模型やワックスアップなしのシミュレーション機能は必須のものとなっていく可能性が高い。

V. おわりに

21 世紀に入った現在、インプラント治療に求められるアウトカムは患者の QOL の向上であることが明確になり、大がかりな骨増生外科手術の回避や治療期間のさ

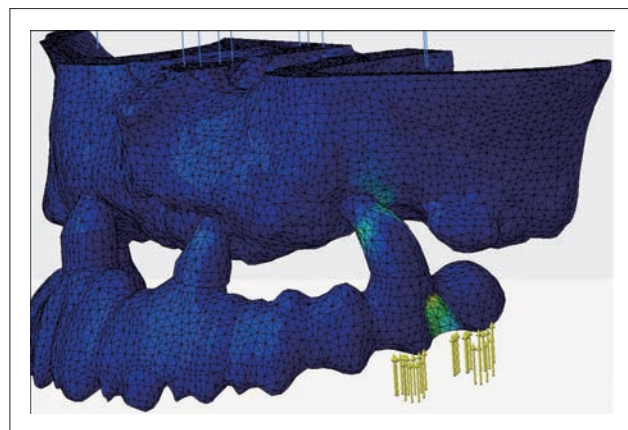


図 11 CT シミュレーションによる力学解析の例。三次元データをもとにして有限要素法モデルを作製すると術前に症例に応じた力学解析が可能になる。

次世代CTシミュレーション

- 理想的な補綴装置の完全バーチャル設計
- 生体力学的解析によるリスク診断／設計支援
- 硬組織だけでなく軟組織を考慮した術式検討
- フレキシブルな手術支援
- 補綴装置のCAD/CAM作製までシームレス対応

図 12 次世代の CT シミュレーションが目指す方向性

らなる短縮が求められるようになってきた。この流れのなかで、今後は、インプラント治療における CT シミュレーションは大きく進化していくものと思われる。特に本稿で前述した理想的な補綴装置の完全バーチャル設計だけでなく、まだ実験段階ではあるが CT による三次元情報をもとにした生体力学的解析によるリスク診断/設計支援³⁾が可能になれば、オーバーロードでの予後不良を可及的に防ぐことが可能になる(図 11)。また、硬組織だけでなく軟組織を考慮した術式検討が行えるような対応に加え、補綴装置の CAD/CAM 作製までシームレスに対応できるような CT シミュレーションシステムが次世代のグローバルスタンダードになる可能性が高いと思われる。

次世代の CT シミュレーションシステムに求められるものを図 12 にまとめてみた。ただ、どのように優れたシミュレーションシステムができて、最終的に補綴設計を行い治療計画を立てるのは歯科医師であり、患者個々の QOL の最大化には補綴専門医の高度な医療判断が不可欠であることは言うまでもない。CT シミュレーションは治療計画立案の自動化を目指すものではなく、あくまで治療の最適化を支援するシステムであることを忘れてはならない。

文 献

- 1) Ekfeldt A, Christiansson U, Eriksson T, Linden U, Lundqvist S, Rundcrantz T, et al. A retrospective analysis of factors associated with multiple implant failures in maxillae. Clin Oral Implants Res 2001; 12: 462-7.
- 2) Misch CE. Density of bone: Effect on surgical approach, and healing. In: Contemporary Implant Dentistry. Misch CE ed. St Louis: Mosby-Year Book: 371-84.
- 3) Kimura K, Fukase Y, Makino M, Masaki C, Nakamoto T, and Hosokawa R. Three-dimensional finite element analysis of fixed complete-arch prostheses supported by 4 immediate-loaded implants in the completely edentulous maxilla using clinical computerized tomography data. J Oral Implantol 2011; 37 (sp 1) : 96-105.

著者連絡先：細川 隆司
〒803-8580
福岡県北九州市小倉北区真鶴 2-6-1
Tel: 093-592-3260
Fax: 093-592-3230
E-mail: hosokawa@kyu-dent.ac.jp

The Rationale of CT Data-based Simulation in Prosthetic Intervention with Dental Implants

Ryuji Hosokawa

Division of Oral Reconstruction and Rehabilitation, Department of Oral Functional Reconstruction,
Science of Oral Functions, Kyushu Dental College

Ann Jpn Prosthodont Soc 4: 140-147, 2012

ABSTRACT

Recently, simulation software has been developed to import X-ray CT data for reconstruction into 3-dimensional images. Using these images, we have been able to perform reliable and safe minimally invasive implant treatment, such as inclined or short implant placement and/or flapless surgery. Moreover, the 3-dimensional finite element analysis based on CT data will be useful for preoperative simulations corresponding to individual cases. The purposes of this review are to discuss the importance of 3-D simulation using CT data for implant longevity and to providing possible solutions to manage complications related to parafunctions. This paper summarizes the lecture presented at the JPS 2011 meeting in Hiroshima.

Key words

dental implant, CT data-based simulation, computer-assisted surgery