

臨床講座

顎変形症に対する三次元診断と手術シミュレーション

代 田 達 夫

Three-dimensional Treatment Planning and Surgical Simulation for Orthognathic Surgery

Tatsuo SHIROTA

Department of Oral and Maxillofacial Surgery, Showa University School of Dentistry

臨床のポイント

CT画像解析ソフトウェアの普及に伴って、顎変形症に対するコンピュータ画面上での三次元診断や手術シミュレーションが可能となっているが、画面上でのシミュレーションで骨片移動時の骨干渉の部位ならびに骨片の変位量などを全て正確に診断することは困難である。したがって、顎矯正手術では、頭部骨格模型を用いたモデルサージャリーによる、より実践的な手術シミュレーションが必要である。われわれは、矯正歯科学講座の協力を得てCTの撮像データと歯列模型のスキャンデータとを画像解析ソフト上で組み合わせ、歯列情報を癒合させた三次元頭部骨格モデルを作製して手術シミュレーションを行っている。この方法の利点は高い精度で歯列の位置を頭部骨格模型上に再現でき、また、咬合関係を主体とした顎矯正手術のシミュレーションができることである。今回はわれわれが行っている三次元モデルを用いた術前診断と治療について代表症例を供覧しながら紹介する。

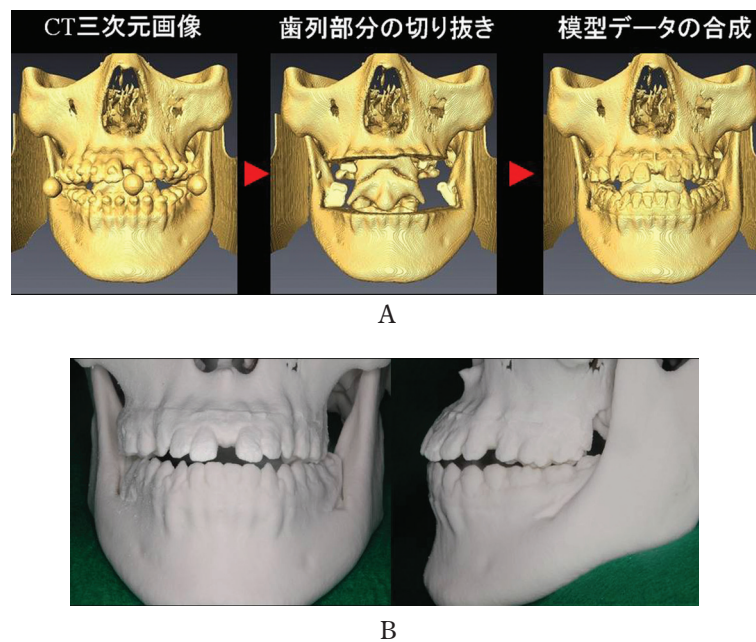


図1 A. 頭部のCT撮像データをDICOM形式で出力し、術直前に作製した歯列模型のスキャンデータと画像解析ソフト上で組み合わせ、三次元画像を構築した(本学矯正歯科学講座 浅間雄介先生ご提供). B. 頭部CT撮像データと歯列模型の μ CTによるスキャンデータの統合データから歯列形態の情報を含んだ頭部骨格三次元実体モデルを作製した.

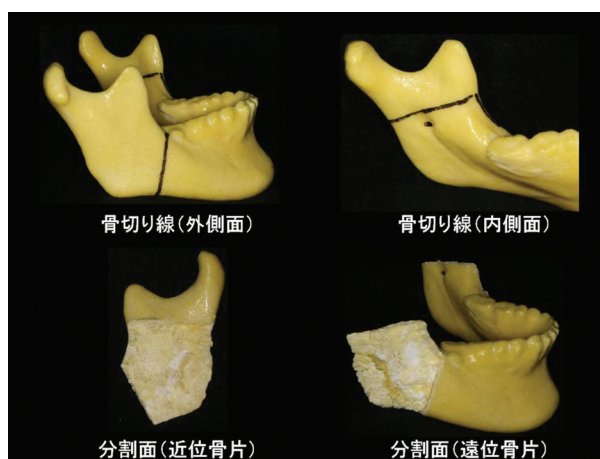


図2 Obwegeser-Dal Pont 法による下顎枝矢状分割術のモデルサージャリー.

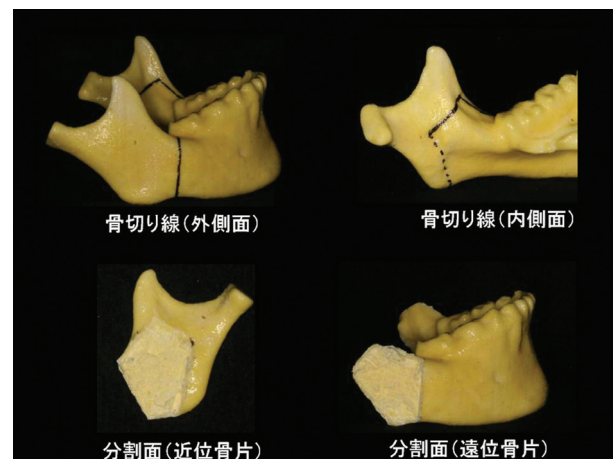


図3 Short lingual cut 法による下顎枝矢状分割術のモデルサージャリー.

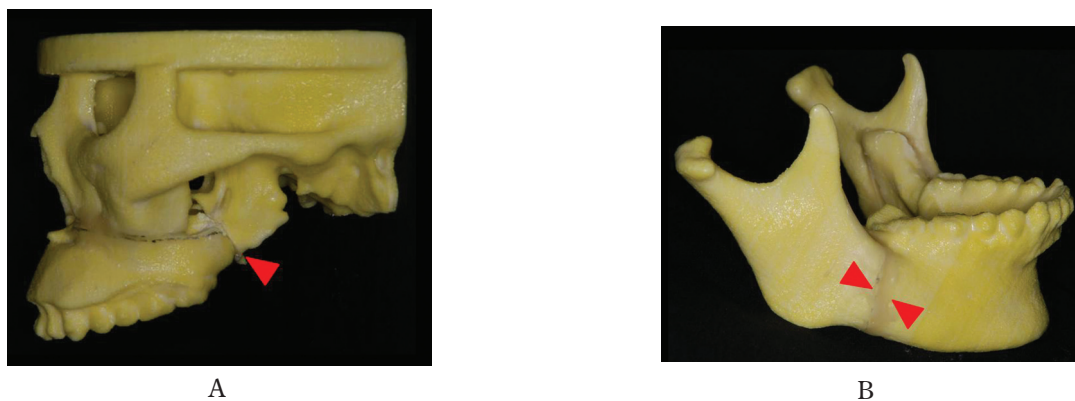


図4 塩積層造形モデルを用いた上下顎骨形成術のシミュレーション. A. Le Fort I 型骨切り術により上顎を移動させたところ, 左側上顎後縁が翼状突起と干渉するため, 上顎の移動に際しては上顎後縁ならびに翼状突起下端部の十分な削合が必要であることが確認できた (▲印). B. 一方, 下顎は移動に伴って右側第一大臼歯部で約 3 mm 前方に移動することが確認できた.

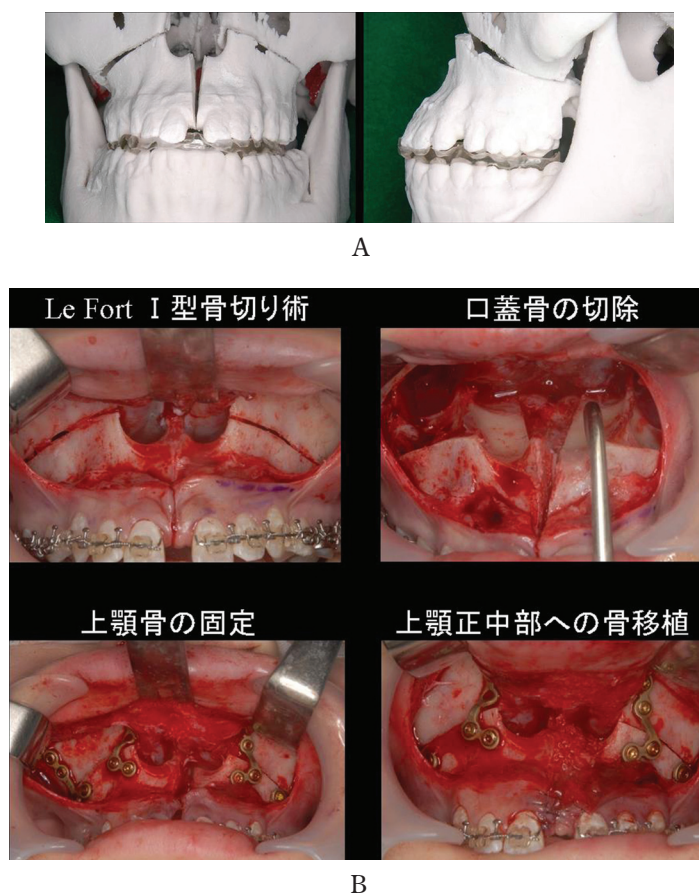


図5 A. 上顎歯列弓幅径縮小術について, 石膏積層造形モデルを用いた手術シミュレーションを行ったところ, 上顎歯列を移動させると, 鼻腔正中部でくさび状の骨欠損が生じ, さらに移動させた上顎骨の後縁が翼状突起と干渉するため, 上顎骨は前鼻棘で約 4 mm 前方に移動することが予測できた. B. 実際に手術を行ったところ, 上顎歯列弓幅径の縮小に伴う上顎骨の形態変化は模擬手術の予想とほぼ同様であった. そこで, 梨状口前縁に生じた楔状欠損に対しては, 切除した口蓋骨をボーンミルで粉碎して移植した.

1. はじめに

最近, CT 画像解析ソフトウェアの普及に伴って, 顎変形症に対するコンピュータ画面上での三次元診断や手術シミュレーションが可能となり, その有用性に関する報告が多くなされている¹⁻³⁾. しかし, 重度の骨格性不正咬合に対しては, コンピュータ画面上でのシミュレーションのみで骨片移動時に見られる骨干渉の部位ならびに程度や骨片の変位量などを正確に診断することは困難である. したがって, 顎骨の変形が著しく, 移動骨片が3次元的に複雑な動態を示すような, いわゆる重度骨格性不正咬合に対する顎矯正手術においては, 三次元頭部骨格モデルを用いたモデルサージャリーによる, より実践的な手術シミュレーションが必要であるとされてきた⁴⁾. しかし, 従来の三次元頭部骨格モデルでは, ブラケット等によりアーチファクトが発生し, 歯の形態を再現することが不可能であった^{5, 6)}. そのため歯列形態の情報を模型上に再現することは困難であった. 通常, 顎矯正手術では咬合関係を指標として顎骨の移動を図るため, 咬合関係が再現されていない三次元頭部骨格モデルを用いての手術シミュレーションは有用性に乏しく, 汎用に至っていない. そこで, このような問題を解決するために, CT の撮像データを DICOM 形式で出力し, 術直前に作製した歯列模型のスキューデータと画像解析ソフト上で組み合わせ, 歯列の情報を含めた三次元頭部骨格モデルを用いて手術前にモデルサージャリーを行っている.

本稿では, われわれが行っている歯列情報を癒合させた三次元頭部骨格モデルによる術前診断と治療について代表症例を供覧しながら紹介する.

2. 頭部骨格モデルの作成方法

モデル作製に必要な, 顎骨と口腔内石膏模型の画像データの統合作業は昭和大学歯科病院矯正歯科が担当し, その方法については既に浅間ら⁷⁾が報告しているので, 本稿では概略を説明する. 即ち, CT 撮影直前に前歯部と左右臼歯部の3か所にセラミックボールを付与したりファレンスプリントを作製し, このプリントを装着した状態で患者の顎顔面の CT 撮影を行う. CT 撮影と同日に口腔内の印象採得を行って作製した石膏歯列模型にリファレンスプリントを装着させた状態で μ CT を撮影し, データを DICOM 形式にて保存する. 次に, 頭部骨格と歯列模型の撮像データから三次元画像を作製し, 重ね合わせのリファレンスであるセラミックボールを基準にして両者の画像を重ね合わせし, これらのデータを頭部骨格の撮像データとして統合する. この統合データを用いることで, 歯列形態の情報を含んだ頭部骨格三次元実体モデルの作製が可能となる (図 1).

3. 頭部骨格三次元実体モデルの特徴

頭部骨格と歯列の撮像データを統合した統合画像データは, 通常の CT の撮像データと同様に積層造形することで頭部骨格三次元実体モデルを作製することが可能である. 現在, このモデル作製に使用されている主な素材は, 光硬化型樹脂, 石膏および塩であり, モデルの精度は積層条件や積層する素材の粉末粒子の大きさなどによって影響を受ける. 以下にこれらの素材で作成された三次元実体モデルの特徴を述べる.

1) 樹脂製光造形モデル

樹脂製光造形モデルは, 高い精度で顎骨等の形態が再現され, また, モデルの物理的強度も優れていること, さらに模型の材質が透明であるため模型の内部まで確認することが可能である等の特徴を有している. したがって, この模型を用いることで例えば頬骨インプラントなど比較的困難なインプラント手術のシミュレーションを行ったり, あるいはそのシミュレーションの結果を基にサージカルステントの作製などが可能である. しかし, 模型の作製に係わるコストは高い.

2) 石膏積層造形モデル

三次元プリンターを用い, DICOM データから石膏系パウダーとスプレー式接着剤を用いて短時間に三次元模型を作製することが可能であり, 作製費用も比較的安価であることから各種工業製品の造形装置としても使用されている. この三次元プリンターで作製した頭部骨格三次元実体モデルは, 顎顔面骨の形態的のみならず歯列の咬合面の解剖形態も比較的正確に再現されており, 顎矯正手術の際に移動骨片を位置決めするサージカルスプリントをモデル上で作製することも可能である. また, この模型の特徴として回転切削機具による形成や切離が容易で, 顎矯正手術の模擬手術が可能なが挙げられる. 一方, この模型の欠点としては患者の骨が薄い場合には模型の物理的強度が低いこと破損しやすいこと, 水に触れると溶解したり変形を来すことなどが挙げられる.

3) 塩積層造形モデル

粉体積層造形装置を用い, 均質な粒径に揃えた塩化ナトリウムの粉体を使用して積層造形モデルを作製する. このモデルでは積層が終了して硬化剤で表面処理を行う際に, 硬化剤のモデル内への浸潤度を調節することで, 骨格モデルに皮質骨と海綿骨に近い硬さをそれぞれ再現することが可能である. そのため, 実際の手術に近い感覚で手術シミュレーションを行うことが可能である. しかし, 塩化ナトリウムの粒径が $30\ \mu\text{m}$ と比較的大きいこと, さらにモデルの表面を覆う硬化剤の膜が比較的厚いことから歯列の咬合面形態の再現性が低い.

4. 頭部骨格三次元実体モデルを用いた手術シミュレーションの実際

1) 下顎枝矢状分割法のシミュレーションによる術式の検討

下顎枝矢状分割法は、下顎枝を内外的に分割することで、歯列弓を含む遠位骨片を移動させる術式である。本法では解剖学的な特徴、手術操作の安全性などから様々な骨切り線が試行されてきた。そこで、本法における標準的な術式である Obwegeser-Dal Pont 法と、その変法で下顎枝内側での骨切り線を下顎小舌後方の下顎孔付近でとどめた short lingual cut 法について、塩漬層造形モデルを用いて手術シミュレーションを行い、それぞれの術式における問題点を検討した。なお、塩漬層造形モデルは、当院で CT 撮影した後に頭部骨格と歯列模型とを癒合処理を行った画像データを基に作製した。なお、モデルの作製はソニーイーエムシーエス(株)に依頼した。

Obwegeser-Dal Pont 法のシミュレーションでは、実際の手術と同様に下顎骨の塩漬層造形モデルの下顎孔約 5mm 上方を下顎の咬合平面にほぼ平行となるように、下顎枝前縁から後縁までの皮質骨相当部に切れ込みを入れる。次いで、第二大臼歯遠心部からほぼ垂直に下顎下縁最下点に至るまでもモデル上の皮質骨相当部に切れ込みを入れ、内外側の骨切り線を外斜線や内側で連結する。実際の手術と同様に、先に形成した切れ込みから外側皮質骨内側に沿うようにオステオトームを進めながら下顎枝を分割した。近位骨片と遠位骨片に分割されたそれぞれの骨片を観察した結果、遠位骨片の下顎枝後方部では骨片が薄くなるため、分割の際に同部に力が加わると比較的容易に異常骨折をきたす可能性があると考えられる(図 2)。

一方、下顎内側での骨切り線を下顎孔付近に止める、いわゆる short lingual cut 法で下顎骨の塩漬層造形モデルを分割したところ、下顎枝は下顎孔の後方部から内側翼突筋附着部にかけて分割され、内側翼突筋は近位骨片に付着することが確認できた。本法で下顎を後方に移動させた場合には、遠位骨片の後端が近位骨片に付着している内側翼突筋と干渉する可能性が高く、そのため近位骨片から内側翼突筋を剥離して、遠位骨片の後縁に対する干渉を解除する必要があることが確認できた(図 3)。

2) 上下顎骨形成術におけるシミュレーション

症例は 25 歳の女性で、顔面非対称を伴った骨格性顎変形症である。術前矯正治療終了後セファログラムならびに歯列模型を用いて術前評価を行ったところ、上下顎全体の右側変位とそれに伴う上下歯列正中の左側への偏位が認められた。そこで、Le Fort I 型骨切り術と下顎枝矢状分割法を適用することとした。上顎骨は咬合平面

の高さに左右差を認めたため、左側を 5 mm 上方移動させ、歯列弓の位置を修正するために水平方向へ回転させることとした。また、下顎は上顎に合わせて移動させることとした。

本症例では塩漬層造形モデルを用い、術前計画に基づいてモデルサージャリーを行った。モデルサージャリーは実際の手術と同様に咬合器上で作製された上顎ならびに下顎の位置決めに個別のサージカルスプリントを用い、それぞれの位置決めを行った。その結果、上顎の骨切り断端は左側で 3 mm 上方へ移動するのに伴って、右側は約 2 mm 下方に移動することが確認できた。また、左側上顎を上方に移動させる際に左側上顎後縁が翼状突起と干渉するため、上顎の移動に際しては上顎後縁ならびに翼状突起下端部の十分な削合が必要であることが確認できた。一方、下顎は移動に伴って左側第一大臼歯部で約 5 mm 後方に、また右側第一大臼歯部で約 2 mm 前方に移動することが確認できた(図 4)。

3) 上顎歯列弓幅径縮小術の手術シミュレーション

症例は 20 歳の女性で上顎歯列弓幅径の過大を伴った骨格性下顎前突症である。術前矯正治療終了後セファログラムならびに歯列模型を用いて術前評価を行ったところ、上顎歯列弓の幅径が下顎歯列弓に比べて広がっていたため、上顎に対しては Le Fort I 型骨切り術を行って上顎を正中中部で分割し、左右第 1 大臼歯間の幅径を 5 mm 縮小し、その後下顎を下顎枝矢状分割法で後方へ 7 mm 移動させることが必要と診断した。石膏積層造形モデルは、頭部骨格と歯列模型とを癒合処理を行った画像データを使用し、粉末積層造形装置(Spectrum Z 510, 3Dsystem, Rock Hill)を用いて作製した。

本症例に対しては上顎歯列弓幅径縮小術について、石膏積層造形モデルを用いた手術シミュレーションを行い、術中に起こり得る問題点について検討した。まず、上顎の骨格モデルに対し、通法の Le Fort I 型骨切り術と同様に上顎部分を切断した。その後、切断した上顎部分のモデルを正中中部で分割し、左右第 1 大臼歯間の幅径が 5 mm 縮小出来るように三角形にモデルの口蓋部分を削合した。そして、実際の手術で使用する上顎位置決め用スプリントを使用して、左右に分割された上顎模型の位置決めを行いワックスにて頭部骨格モデルに固定した。

その結果、上顎歯列を移動させると、鼻腔正中中部でくさび状の骨欠損が生じ、さらに移動させた上顎骨の後縁が翼状突起と干渉するため、上顎骨は前鼻棘で約 4 mm 前方に移動することが予測できた(図 5A)。実際に手術を行ったところ、上顎歯列弓幅径の縮小に伴う上顎骨の形態変化は模擬手術の予想とほぼ同様であった。そこ

で、梨状口前縁に生じた楔状欠損に対しては、切除した口蓋骨をボーンミルで粉碎して移植した。一方、上顎の前方への移動に対しては、骨片間で干渉を起こしている上顎結節および翼状突起を一部削除したことにより、上顎の前方への移動を抑制した（図 5B）。

5. まとめ

顎変形症の診断・治療には CT の撮像データを利用したコンピュータ支援手術が普及しつつあるが、顎顔面骨格の三次元的な形態評価が主な役割であり、顎矯正手術への有用性は十分ではなかった。なぜならば、顎矯正手術における骨片の移動は上下顎の咬合関係を基準に行うにもかかわらず、CT を撮影した際に、矯正装置や補綴物に対するメタルアーチファクトが生じ、歯列の精密な撮像データを得ることが困難であったためである。今回紹介した歯列情報癒合させた頭部骨格モデルの特長は高い精度で口腔内模型の歯列の位置を実体模型上に再現でき、さらに実際に手術で使用するスプリントを用いてモデルサージャリーが可能のため、従来のモデルサージャリーでは不可能であった咬合関係を主体とした顎矯正手術のシミュレーションができることである。そのため、このモデルを用いたシミュレーションは、手術時の骨片の移動量、移動方向、あるいは移動時の骨片間の干渉部位・程度、および術後の三次元的な骨格形態などの問題点を予測する上で有用である。したがって、本法は顎変形症治療における術前の診断、治療計画の立案および術式決定に有用であると考えられる。

文 献

- 1) Uechi J, Okayama M, Shibata T, Muguruma T, Hayashi K, Endo K, Mizoguchi I: A novel method for the 3-dimensional simulation of orthognathic surgery by using a multimodal image-fusion technique. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, **130**: 786-798, 2006
- 2) Swennen GRJ, Mollemans W, Clercq CD, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F, Neyt N, Casselman J, Schutyser F: A cone-beam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J Craniofac Sug*, **20**: 297-307, 2009
- 3) Dai J, Wang X, Hu G, Shen SG: A new method to move mandible to intercuspal in virtual three-dimensional orthognathic surgery by integrating primary occlusion model. *J Oral Maxillofac Surg*, **70**: e484-e489, 2012
- 4) Winder J, Bibb R: Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery. *J Oral Maxillofac Surg*, **63**: 1006-1015, 2005
- 5) Fuhrmann RAW, Froberg U, Diedrich PR: Treatment prediction with three-dimensional computer tomographic skull models. *Dentofacial Orthopedics*, **106**: 156-160, 1994
- 6) O'Neil M, Khambay B, Moos KF, Barbenel J, Walker F, Ayoub A: Validation of a new method for bulding a three-dimensional physical model of the skull and dentition. *Br J Oral Maxillofac Surg*, **50**: 49054, 2012
- 7) 浅間雄介, 代田達夫, 中納治久, 山口徹太郎, 新谷 悟, 槇宏太郎: 三次元歯列画像と顔面骨格画像の統合による実体石膏モデルを用いた手術シミュレーションの有用性. *日顎変形誌*, **23**: 15-24, 2013