

〔原 著〕

歯列模型の三次元形状計測における
口蓋基準平面と顎顔面骨格形態との空間的位置関係

上地 潤, 林 一夫, 溝口 到

北海道医療大学歯学部歯科矯正学講座

(主任：溝口 到教授)

Spatial relationship between the palatal reference
plane and craniofacial skeleton in three-dimensional
measurements of dental casts

Jun UECHI, Kazuo HAYASHI and Itaru MIZOGUCHI

Department of Orthodontics, School of Dentistry,
Health Sciences University of Hokkaido

(Chief : Prof. Itaru MIZOGUCHI)

Abstract

To establish a novel method for orthodontic diagnosis, which integrates three-dimensional shape measurements of dental casts and morphological analysis of the craniofacial skeleton, we constructed a new reference plane, the palatal reference plane. Measurement accuracy of the palatal reference plane, and its spatial relationship to the skeletal framework of the craniofacial skeleton were evaluated using postero-anterior and lateral cephalometric radiographs and three-dimensional shape data of maxillary dental casts, which was transferred by an anatomical facebow.

The results were the followings:

1. The palatal reference plane (flat area of the hard palate) could be established by a fitting algorithm with the least squares method.
2. In postero-anterior cephalometric radiographs, the angular difference between the ANS-PNS plane and the palatal reference plane was 5.58 degrees (SD : 3.48). The difference between the A-PNS plane and the palatal reference plane was 2.19 degrees (SD : 1.43).
3. In lateral cephalometric radiographs, the angular difference in angle between the

第75回日本矯正歯科学会 (平成13年10月9日)

受付：平成13年3月31日

maxillary alveolus plane (J-J') and the palatal reference plane was 1.09 degrees (SD : 1.05).

4. In cases whose the palatal morphology was a smooth circular arc without prominent jugum in the palatal base, it was difficult to establish the reference plane.

These results indicate that the three-dimensional application of the palatal reference plane, as a reference structure, would provide orthodontic diagnosis with accurate and abundant three-dimensional data concerning malocclusions.

Key words : dental cast, three-dimensional measuring, palate, reference place

緒 言

矯正治療において、歯列模型から得られる情報は豊富であり、診断、治療計画の立案、治療結果の評価に関して重要な役割を担っている¹⁻⁴⁾。Simon⁵⁾は、咬合を顔面頭蓋との関係において診断しようという試みに対して、これらを三次元で把握するためフランクフルト平面、眼窩平面および正中矢状面の3平面を歯列模型上に再現した顎態模型を考案し、矯正診断の体系化を行った。また、治療計画の立案における抜歯、非抜歯の判断は、Jaraback⁶⁾、Tweed⁷⁾およびSteiner⁸⁾の分析などが行われ、これらに必要なtotal discrepancyの算出は、歯列模型および頭部X線規格写真から得られている。しかし、これらの歯列模型分析は、ノギスを用いた2点間の距離計測が主流であり、一次元あるいは二次元的な分析にとどまっていた。

しかし、近年、三次元形状計測装置の歯科臨床領域への応用が進み、より正確な模型情報の定量化が可能となった^{2,9)}。この三次元データの応用として、Motohashi¹⁰⁾らは模型の三次元形状情報からコンピューター上で外科矯正のシミュレーションを行い、Yamamoto³⁾らは、犬歯の遠心移動挙動の評価を行っている。その他の三次元情報の応用として、Koriotoh¹¹⁾らはスタビライゼーション型スプリントを三次元的に計測することによるブラキシズムの新しい解析方法の確立を試み、Mehle¹²⁾らはレジンの磨耗状

態を三次元的に明らかにした。また、顔面非対称症例の形態学的研究における骨格的な顎偏位と上下歯列弓形態との関係も歯列模型により評価され、Klami¹³⁾らは、lateral crossbiteと上顎口蓋形態の左右差との関係を明らかにした。

しかし、頭部X線規格写真と歯列模型を用いた形態的研究の多くにおいて、模型計測の基準は咬合平面である^{14,15)}。また、従来の分析方法では、セファロ分析から得られる情報と模型計測からの情報はそれぞれ独立したものであり、両者を統合する明確な分析方法は確立されていない。フェイスボウトランスファーによる歯列模型の咬合器へのセットアップは、頭蓋に対する上顎歯列の位置関係は反映されるものの^{16,17)}、上顎骨と歯および歯列との位置関係の評価には新たな基準の設定が必要となる。

本研究では、骨格的な情報、特に頭部X線規格写真分析における上顎骨基準平面と対応する歯列模型内での三次元的基準の確立を目的とし、側面および正面頭部X線規格写真の二次元データとフェイスボウトランスファーにより得られた上顎歯列模型の三次元形状データを用いて、歯列模型上に新しい基準平面を設定し、その精度および顎顔面骨格形態との空間的位置関係に関して検討した。

資料と方法

1. 資料

被験者は、北海道医療大学歯学部附属歯科衛

生士専門学校の学生の中からインフォームドコンセントを行い協力の得られたボランティアのうち、先天異常および歯数異常のない女子20名（平均年齢19歳6か月）を対象とした。計測の資料は、側面および正面頭部X線規格写真と上顎歯列模型を用いた。アルジネート印象材による印象採得後、硬石膏により作製された歯列模型は、各被験者でフェイスボウトランスファーを行い、アキシオスプリット（マトリックスホルダー+マトリックスマウンティングプレート）を介してSAM咬合器上にマウントされた。

2. セファロ計測

各被験者におけるX線規格写真は、フラットヘッド・スキャナー（GT-9000, EPSON）を介してコンピューターに取り込み、画像解析ソフト（NIH Image Ver.1.60）上で計測点を抽出した。すべての計測点は5回計測し、その平均値を採用した。

図1 aは、側面頭部X線規格写真の計測項目を示す。SAM咬合器におけるアキシオスオルビタル平面（AOP）はフェイスボウでのイヤールッドの中点を通るため、側面頭部X線写真上においても左右イヤールッドの中点とOrによる平面

をAOPとした。次に上顎基準平面としてANSとPNSを結ぶ口蓋平面、A点とPNSを結ぶ平面および咬合平面を設定し、AOPとの角度を計測した。

図1 bは、正面頭部X線規格写真の計測項目を示す。側面セファロと同様に左右イヤールッドの中点をAOPとした。次に、上顎基準平面として上顎歯槽基底部平面（J-J'）を設定しAOPとの角度を計測した。

3. 歯列模型計測

1) 三次元形状計測・解析システムの構成

各被験者から得られた上顎歯列模型の解析には、三次元形状計測・解析システムを用いた。本システムは、スリット光レーザーを用いた非接触三次元形状計測装置（VMS-150RD, UNISN）（図2 a）、データ合成用ポストプロセッサー（UNISN）、三次元解析用ソフトウェア（SURFACER Ver.10.0, Imageware）およびグラフィックワークステーション（Zx1, Intergraph）から構成される。

2) 測定原理

測定原理は、半導体レーザー（波長670nm, 出力3mW）およびポリゴンミラーで構成される

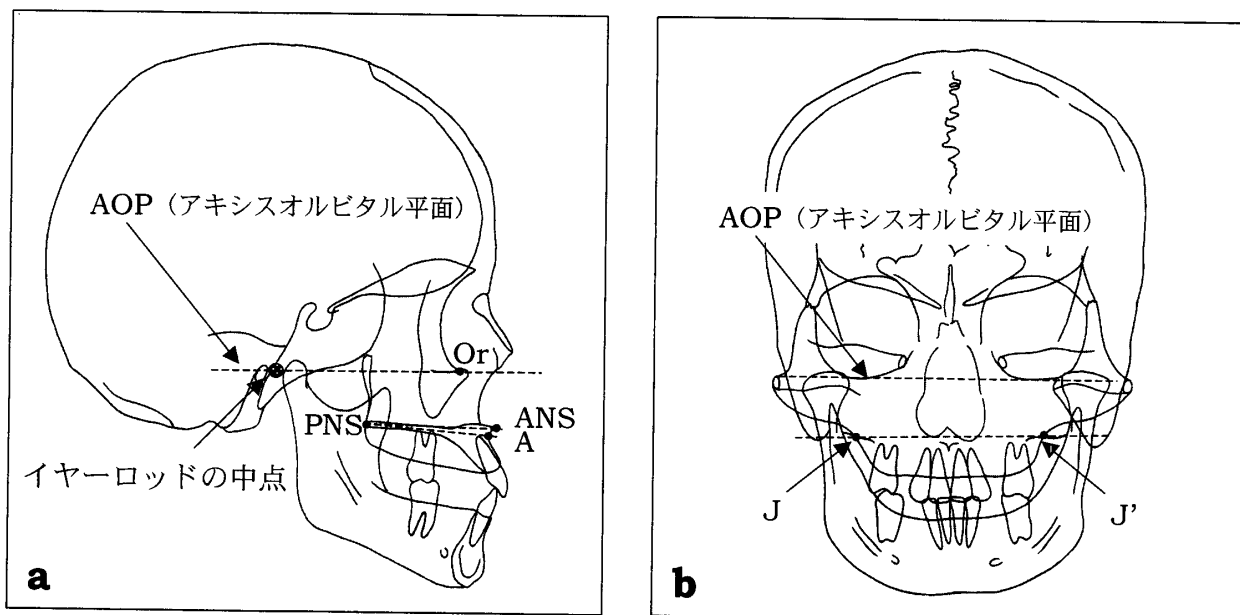


図1 本研究で用いた計測項目 a: 側面頭部X線規格写真 b: 正面頭部X線規格写真

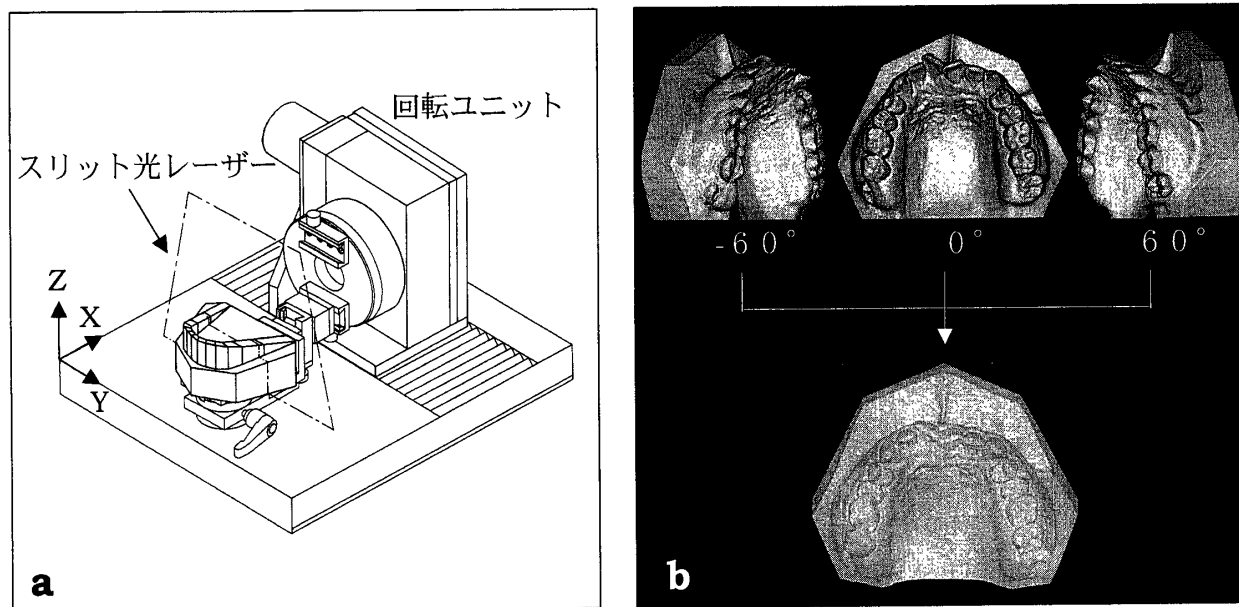


図2 a:本研究で用いた非接触三次元形状計測装置 b:三次元歯列模型形状

光源ユニットからのスリット光レーザーを歯列模型に投影し、その像を2台のCCDカメラ（水平：768画素×垂直：494画素）上に結像させる光切断法である。このスリット光レーザーのCCDカメラ上での位置は、測定部位のZ方向（咬合面に垂直な方向）の位置に対応するから歯列模型をX軸方向（近遠心方向）、Y軸方向（頬舌的方向）にそれぞれ走査し、その位置をデータ合成用ポストプロセッサに取り込むことにより三次元歯列模型形状を得た。なお、アンダーカット部などに生じる不可視領域は、咬合平面に垂直な方向、左右60°の方向の計3方向から計測し、これらをデータ合成用ポストプロセッサで1つの連続した点群データに統合することにより削減された（図2b）。

3) 測定条件

測定条件は、X軸、Y軸方向の測定ピッチをそれぞれ0.25mmに設定した。Y軸方向については、光源がスリット光レーザーで一定の測定幅をもつことから、測定幅を各40.0mmに設定し、2回に分割計測した。また、Z軸方向は、CCDカメラの解像度に影響されることから、0.001mm単位で出力された。なお、模型はマグネットを用いたアキシオスプリットにより位置

付けられ、計測器におけるX-Y平面がAOPと正確に一致するように設定した。

4. 新しい基準平面の構築

三次元形状計測装置で計測し、解析用ソフトウェアに取り込んだ三次元模型像上の全点は、それぞれの近傍点から計算される曲率データを持っているのでその曲率差による模型分割を行った。この操作により平坦な領域と凹凸のある領域を任意に分割することが可能となる。また、曲率閾値の設定後、硬口蓋底部の平坦領域を抽出し、最小二乗法を用いたフィッティング

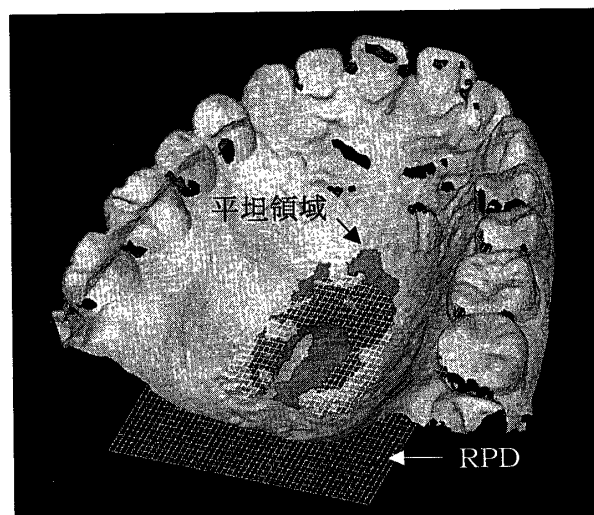


図3 平坦領域の抽出とRPD（模型基準平面）の設定

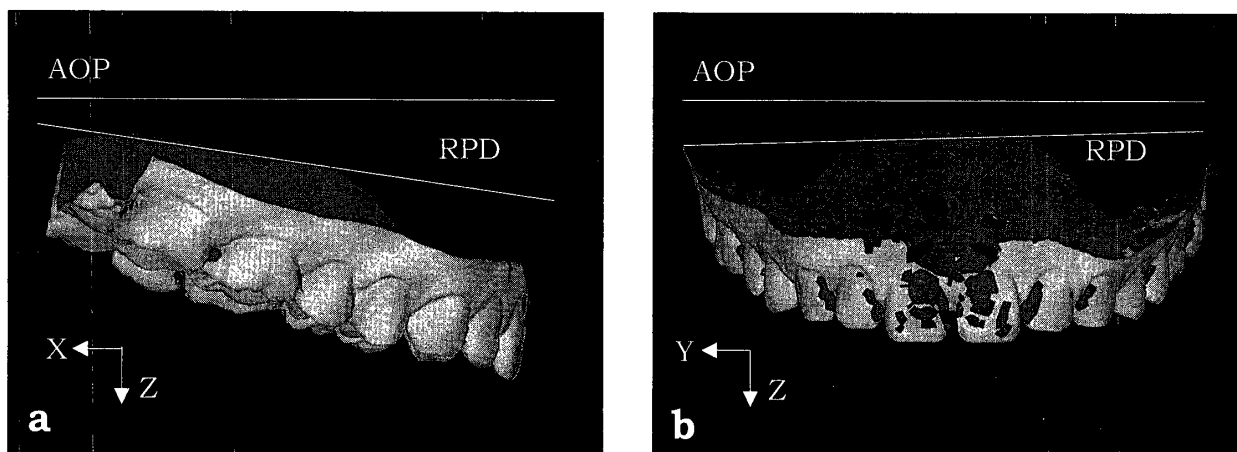


図4 RPD (模型基準平面) とAOP (アキスオビタル平面) a: X-Z面観 b: X-Z面観

アルゴリズムにより基準平面を当てはめた (図3). この平面を上顎模型計測における基準平面 (Reference Plane of Dental Cast: RPD) と仮定し解析を行った. 次に, 側面および正面頭部X線規格写真での上顎基準平面と対応させるため, X-Z面観 (側面と対応) とY-Z面観 (正面と対応) におけるRPDとAOPとの角度を計測した (図4a, b).

5. 基準平面の解析

解析に先立ち, SAM咬合器に模型をマウントする際のテクニカルエラーを最小にする目的で, 側面頭部X線規格写真から得られた咬合平面と三次元模型分析におけるX-Z面観から得られた咬合平面との角度差からRPDの角度補正を行った. 次に, 以下の項目について解析を行った.

1) 側面および正面頭部X線規格写真での上顎基準平面とRPDとの角度差を解析 (差の平均値と標準偏差) した.

2) RPDの構築に影響を与えると思われる因子の抽出を目的として, 1) の結果から, 被験者20名を角度差の平均値より大きい群10名と小さい群10名の2群に分け, 矢状面と前頭面における両群の口蓋形態を比較 (両群の平均口蓋形態の算出と解析) した.

なお, 平均口蓋形態はRPDを基底面とし, 矢

状面では切歯乳頭から左右第一大臼歯遠心面を結ぶ線までの形態とし, また, 前頭面では左右第一大臼歯近遠心的中点を結ぶ線上の形態とした. 各群における点群はX軸とY軸同一点上において0.2mmステップで再分割しZ値の平均として算出した.

結 果

表1は, 側面および正面頭部X線規格写真における上顎基準平面とRPD (X-Z面観とY-Z面観) との角度差の平均値, 標準偏差および誤差範囲を示す. 側面頭部X線規格写真において, ANS-PNS平面とRPDとの角度差の平均は 5.58° , SDは3.48であり, A-PNS平面とRPDとの角度差の平均は 2.19° , SDは1.43であった. 正面頭部X線規格写真において, 口蓋歯槽基底面 (J-J') とRPDとの角度差の平均は 1.09° , SDは1.05であった.

表1 側面および正面頭部X線規格写真における上顎基準平面とRPD (X-Z面観とY-Z面観) との角度差の平均値, 標準偏差および誤差範囲 (mm)

側面	Mean	SD	Range
ANS-PNS	5.58	3.48	0.52-10.52
A-PNS	2.19	1.43	0.67-3.95
正面			
J-J'	1.09	1.05	0.08-6.95

図5は矢状面における角度差の大きい群と小さい群における平均口蓋形態を示す。2群へ分類はA-PNS平面での結果をもとに行った。図6は前頭面における角度差の大きい群と小さい群における平均口蓋形態を示す。両断面において、口蓋底部中央部にわずかな隆起の存在が確認できた。

考 察

1. 方法について

本研究に用いられた三次元形状計測システムとほぼ同様のシステムはすでに多くの研究者により報告され^{9,18)}, その計測精度も検証されている。今回は、校正用平板を計測し、統計的に $\pm 3\sigma$ の範囲にあるデータをすべて使って最もフィットする平面式を最小二乗法により算出後、計測データと算出された平面の最大誤差の算出を行った結果、 $\pm 0.05\text{mm}$ であり十分な精度を有していることが確認できた。

2. 結果について

本研究における三次元模型計測の新しい基準平面は、側面頭部X線規格写真ではA-PNS平面と、また正面頭部X線規格写真では上顎歯槽底部平面(J-J')と対応しており(表1)、Baumrind¹⁹⁾らが報告した頭部X線規格写真分析における測定誤差 3° 以内の範囲内であった。

また、Ellis²⁰⁾らはフェイスボウトランスファーによる上顎歯列の咬合器へのセットアップの誤差は、 6.8° (SD: 3.5°)であったと報告した。これと比較して本研究で示された基準平面の計測基準としての精度は、高いものと考えられる。しかし、正面解析では側面と比較して幾分データ間にばらつきが認められた。これは側面における解析が咬合平面によって補正されているのに対し正面ではそのような補正を行わなかったためと考えられる。しかし、フェイスボウトランスファーにおけるイヤーロッド中心の回転誤差は側面においてその影響が大きいので²⁰⁾, 臨床的には側面の補正のみで十分であると考えられる。

平均口蓋形態の解析では、矢状面および前頭面における角度差の大きい群と小さい群との間に明確な形態差が認められた(図5, 6)。角度差の大きい群では歯頸部もしくは切歯乳頭から口蓋底にむかって緩やかに円弧を描くのに対し、角度差の小さい群では口蓋底部に隆起を認めた。よって、角度差の小さい群では変曲点付近の曲率差が明確であったため、平坦領域の抽出が正確に行われたと考えられる。従って、口蓋形態に隆起のない症例でRPDを設定する場合は多少注意が必要であり、セファロ所見などからその正当性を検証すべきである。

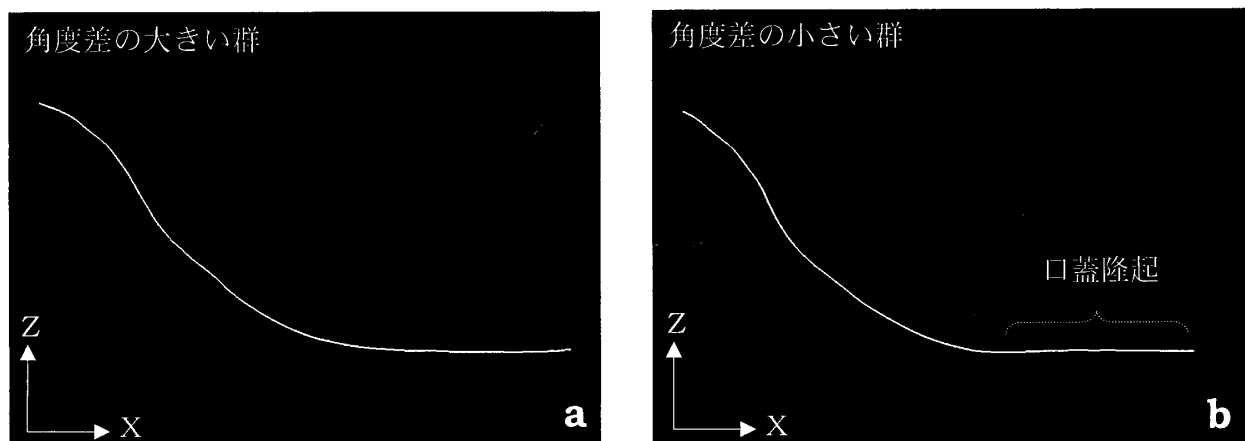


図5 平均口蓋形態の解析(X-Z面観) a: 角度差の大きい群 b: 角度差の小さい群

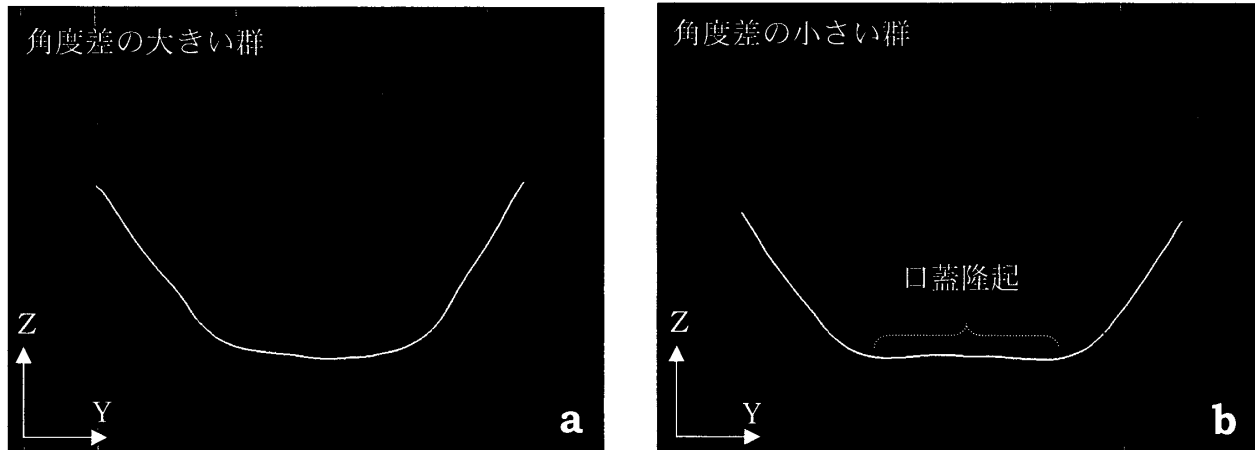


図6 平均口蓋形態の解析 (Z-Y面観) a: 角度差の大きい群 b: 角度差の小さい群

3. 矯正診断における意義

これまで、不正咬合の診断および治療計画の立案に際して、歯列と歯槽部の大きさや形状について歯列模型を用いた解析は数多く報告されてきている。しかしそのほとんどが、咬合平面もしくはフェイスボウトランスファーを基準とした計測である。その場合に生じる問題点として、咬合平面基準では、咬頭頂の抽出が模型の設定角度に影響を受けて変化し、これにより咬頭頂で規定される平面も変化すること、フェイスボウトランスファー基準では、術者の違いによるテクニカルエラーが大きく、また、頭蓋に対する上顎骨の相対的位置が記録された模型であるために上顎骨内での歯の位置計測には咬合平面などの別の計測基準を必要とされることなどがあげられ、再現性に乏しい。本研究では、歯列模型の口蓋形態を用いて新しい基準平面の設定法を考案し、これを側面および正面頭部X線規格写真からの上顎基準平面と対応させている。本分析法は、RPDの設定を自動で行うことができることから、術者の違いによるテクニカルエラーを最小限に抑えることができるだけでなく、RPDを基準に三次元座標を規定することで上顎歯列模型上の歯や口蓋縫合などの解剖学的部位の三次元的位置を詳細かつ再現性をもって捉えることが可能である。また、

Yamamoto³⁾らは、治療前後の口蓋形態の変化を口蓋データの深さの差で評価し、治療後の歯の周囲の口蓋データを除いて0.05mmから0.13mmしか変化しなかったことを報告し、口蓋の最深部から5.0mm以内を重ね合わせの基準として犬歯の遠心移動挙動の評価を行っている。本研究におけるRPDは、硬口蓋底部の平坦領域を抽出し構築していることから、Yamamotoらの条件を十分満たしていると考えられる。これらのことから、治療前後のRPDを重ね合わせることで上顎の個々の歯の移動挙動や外科矯正治療時において上顎骨切り術を行った際の頭蓋に対する上顎骨の位置変化を三次元で捉えることが可能となるであろう。更にこれらの解析は、今後のみならず過去に採得された模型から新しい情報を引き出すことが可能であり、顎偏位などの形態的研究にも有効に活用されると考えられる。

Simon⁵⁾による顎態模型解析が報告されて以来、歯科矯正学における模型解析は、歯科臨床および研究において非常に重要なものとなっている。そして、三次元形状計測装置の出現によって、より多くの精密なデータが得られるようになり、歯列模型の三次元解析は今後ますます重要な役割を持つことが考えられる^{21,22)}。また、本研究で確立された模型の単独解析からの骨格的

な基準となりうる平面の抽出は、全ての歯列模型の価値を高め、より正確で豊富な情報を矯正臨床に与えるものと考えられる。

文 献

1. Andrews LF : Straight wire., The Concept and Appliance, San Diego, 1989, 25-33.
2. Yamamoto K, Toshimitsu A, Mikami T, et al. : Optical measurement of dental cast profile and application to analysis of three-dimensional tooth movement in orthodontics., *Frontiers Med Biol Eng*, 1 : 119-130, 1989.
3. Yamamoto K, Hayashi S, Nishikawa H, et al. : Measurement of dental cast profile and three-dimensional tooth movement during orthodontic treatment., *IEEE Trans Biomed Eng*, 38 : 360-365, 1991.
4. Iwasaki LR, Haack JE, Nickel JC, et al. : Human tooth movement in response to continuous stress of low magnitude. , *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 117 : 175-183, 2000.
5. Simon PW : Fundamental principles of a systematic diagnosis of dental anomalies., The Stratford Co., Boston, 1926, translated by Lischer, B.E. from "Grundzuge einer systematischen Diagnostik der Gebiss-anomalien", Berlin, 1922.
6. Jarabak JR: Technique and treatment with light-wire edgewise appliances. 2nd ed. , The C. V. Mosby Co., St.Louis, 1972.
7. Tweed CH : The Frankfort-Mandibular Incisor Angle (FMIA. in orthodontic diagnosis. -treatment planning and prognosis-, *Angle Orthod* 24 : 121-169, 1954.
8. Steiner CC : The use of cephalometrics as an aid to planning and assessing orthodontics treatment., *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 46 : 721-735, 1960.
9. Kuroda T, Motohashi N, Tominaga R, et al. : Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning., *Am J Orthod Dentofac Orthop*, 110 : 365-369, 1996.
10. Motohashi N, Kuroda T : A 3D computer-aided design system applied to diagnosis and treatment planning in orthodontics and orthognathic surgery., *Eur J Orthod*, 21 : 263-274, 1999.
11. Koriotoh TWP, Bohlig KG, Anderson GC : Digital assessment of occlusal wear patterns on occlusal stabilization splints : A pilot study., *J Prostet Dent*, 80 : 209-213, 1998.
12. Mehl A, Gloger W, Kunzelmann KH, et al. : A new optical 3-D device for the detection of wear., *J Dent Res*, 76 : 1799-807, 1997.
13. Klami O, Horowitz SL : An analysis of the relationship between posterior dental cross-bite and vertical palatal asymmetry., *Am J Orthod*, 76 : 51-58, 1979.
14. Alavi DG, BeGole EA, Schneider BJ : Facial and dental arch asymmetries in ClassIIsubdivision malocclusion., *Am J Orthod*, 93 : 38-46, 1988.
15. de Araujo TM, Wilhelm RS, Almeida MA : Skeletal and dental arch asymmetry in individuals with normal dental occlusion., *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg*, 9 : 111-118, 1994.
16. Palik JF, Nelson DR, White JT : Accuracy of an earpiece face-bow. , *J Prosthet Dent*, 53 : 800-804, 1985.
17. Choi DG, Bowley JF, Marx DB, et al. : Reliability of an ear-bow arbitrary face-bow transfer instrument., *J Prosthet Dent*, 82 : 150-156, 1999.
18. Motegi N, Tsutsumi S, Okumura H, et al. : Morphologic changes in the perioral soft tissues in patients with mandibular hyperplasia using a laser system for three-dimensional surface measurement., *Int J Oral Maxillofac Surg*, 28 : 15-20, 1999.
19. Baumrind S, Frantz RC : The reliability of head film measurements. , *Am J Orthod*, 60 : 111-127, 1971.
20. Ellis E 3rd, Tharanon W, Gambrell K : Accuracy of face-bow transfer : effect on surgical prediction and postsurgical result., *J Oral Maxillofac Surg*, 50 : 562-567, 1992.
21. Commer P, Bourauel C, Maier K, et al. : Construction and testing of a computer-based intraoral laser scanner for determining tooth positions., *Med Eng Phys*, 22 : 625-35, 2000.
22. Sohamura T, Kojima T, Wakabayashi K : Use of an ultrahigh-speed laser scanner for constructing three-dimensional shapes of dentition and occlusion., *J Prosthet Dent*, 84 : 345-52, 2000.