神奈川歯学，57-1，5 ～ 16，2022

原　　著

キーワード
●三次元計測システム
●治療評価
●統合モデル
●フロッシュ

# 歯列模型および頭部 X 線規格写真から構築した新しい三次元デジタルモデルシステムと臨床評価

小林　大[1)]　小西弘晃[1)]　尾崎博弥[1)]
小林　優[2)]　不島健持*[,1)]

[1)]神奈川歯科大学大学院歯学研究科高度先進口腔医学講座歯科矯正学分野
[2)]神奈川歯科大学大学院歯学研究科顎顔面病態診断治療学講座口腔外科学分野

（受付：2022 年 2 月 28 日，受理：2022 年 4 月 12 日）

# Three-dimensional digital model new system from dental cast models and head films, and clinical assessment

Dai KOBAYASHI[1)], Hiroaki KONISHI[1)], Hiroya OZAKI[1)],
Masaru KOBAYASHI[2)] and Kenji FUSHIMA*[,1)]

[1)]Division of Orthodontics, Department of Highly Advanced Stomatology, Graduate School of Kanagawa Dental University, 3-31-6 Tsuruya-cho, Kanagawa-ku, Yokohama, Kanagawa 221-0835, Japan
[2)]Division of Oral and Maxillofacial Surgery, Department of Dentomaxillofacial Diagnosis and Treatment, Graduate School of Dentistry, Kanagawa Dental University, 82 Inaoka-cho, Yokosuka, Kanagawa 238-8580, Japan

**Abstract**

**This study aimed to establish three-dimensional digital model new system from dental cast models and head films and verify the accuracy of the system to assess three-dimensional bone and tooth movement using a reconstructed bone-tooth integrated model, in cases treated by maxillary protractive new appliance.**

**12 patients (8 female and 4 male children), aged 6 years and 10 months on average (4 years and 10 months to 9 years and 11 months), with anterior cross bite due to skeletal factors participated in this study. They were treated by maxillary protractive new appliance. At an initial and the end of treatment recording, the upper teeth were reconstructed with digital models of the upper casts from the 3D Scanner STL data, the virtual skull were reconstructed with head films. The teeth area of the virtual skull models were replaced with the corresponding teeth of the digital models. Consequently the bone-teeth integrated models were reconstructed. As a result, bone and tooth movement was analyzed three-dimensionally.**

**For the translation of the point A, anterior movement of the maxillary complex was 4.5mm on average on the global coordinate system. The rotation of the occlusal plane was 5.0°on average on the global coordinate system.**

**Through reconstructing a bone-teeth integrated model, a three-dimensional digital model new system for analyzing bone and teeth movement was established. It was demonstrated that the maxillary protractive new appliance acts on the bone and effects in improving skeletal disharmony. The efficacy of the clinical application was suggested.**

＊責任著者連絡先：神奈川歯科大学大学院歯学研究科高度先進口腔医学講座歯科矯正学分野
〒 221-0835　神奈川県横浜市神奈川区鶴屋町 3-31-6
不島健持
e-mail: fushima@kdu.ac.jp

## 緒　言

歯科矯正における診断や治療評価のため三次元画像工学の応用が進んでいるが，一般的には依然として側面の頭部X線規格写真（以下，セファロ）による二次元評価が主流である。三次元診断に利用されるComuputed Tomography（以下，CT）撮影は，こと小児に対しては不必要な被曝は可及的に避ける必要があり，標準診断としての三次元診断が停滞している理由の一つと考えられる[1)]。

Broadbentにより開発されたCephalostatは，矯正臨床の標準X線装置として普及しているセファロ撮影装置の原型であり[2,3)]，現在側面および正面のセファロは，それぞれ異なる方向から撮影された二次元画像として利用されているのが一般的であるが，本来は三次元分析システムとして開発された。その後もセファロを用いた三次元計測の試みは行われてきた[4–6)]が，Konishiら[7)]は同時に撮影した側面および正面のセファロを用い，顎顔面骨格および歯列の三次元計測を行い，予め構築した頭蓋顎骨の標準モデルの特徴点を実際の患者の計測点に一致させるよう変形移動することで，ワイヤーフレームによる個人三次元モデルの作製と正確度に関し報告した。さらにFushimaら[8)]は同三次元システムを利用し，各個人のセファロより作製した三次元ワイヤーフレームモデルを歯列の計測データの座標値と統合させることで，歯列顎骨統合モデルを作製し，顎矯正手術のシミュレーションに応用した。成人の顎変形症の診断にはCTを用いた三次元診断，シミュレーションが一般的であり[9)]，このようなセファロを利用した三次元システムは，一般検査で採得する資料，あるいは以前採得した既存の資料から構築できる。

また，成人症例の歯列三次元モデルを対象とした先行研究において，口蓋に設定した関心領域が経年的に非常に安定していることが確認され，口蓋関心領域を参照し個々の歯の三次元移動解析を試みている[10,11)]。

本研究では，これまで蓄積してきたこれらの三次元医科用画像技術を背景とし[7–11)]，矯正臨床で利用される最も一般的な資料であるセファロと歯列模型を用いた歯列顎骨の三次元統合モデルを構築し，治療前後の重ね合わせを行うことで三次元的な治療評価を行う，という新しいシステムの確立を試み，本システムの正確度と精度を検証した。

また，歯科矯正の臨床において，上顎骨の劣成長を伴う骨格性の前歯部反対咬合症例に対して上顎骨の前方成長を促進する目的で，上顎前方牽引装置が広く用いられてきた。しかしながら，上顎前方牽引装置を適用することで求める効果が得られるだけでなく，副作用として上顎骨の前上方回転と下顎骨の後下方回転など骨格性の変化が生じ，さらには上顎第一大臼歯の挺出や下顎前歯の舌側傾斜といった好ましくない歯槽性の変化を認めることが知られている[12–18)]。本研究では，成長期の前歯部反対咬合に対し，口腔内可撤式装置として新たに開発されたフロッシュ[19)]を適用している（図1）。フロッシュの顎骨および歯列に対する治療効果を三次元評価することで，治療評価に対する本システムの有用性を検証した。



**図1-a**　フロッシュ装置の適用例
フロッシュは可撤式機能的矯正装置であり，上顎骨の前後的な劣成長を伴う骨格性反対咬合症例に対し，上顎の成長促進を期待し臨床応用している。

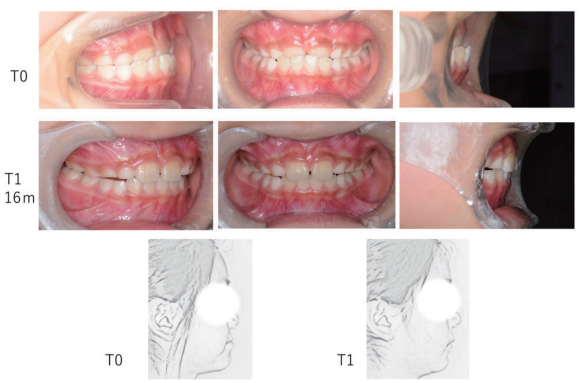



**図1-b**　フロッシュ装置の適用例
今回治療評価を行った研究対象の一例である。初診時の口腔内写真より，前歯部の被蓋が反対咬合で，大臼歯の咬合関係はターミナルプレーンがMesial Step Typeとなっていた。初診時の側面セファロ分析より，ANB角−1.5°，SNA角78.9°で上顎骨の劣成長を伴う骨格性反対咬合症例と診断された。約1か月で前歯部被蓋の改善を認め，16か月後に治療評価を行った。

## 対象および方法

### 1．研究資料

本研究では，神奈川歯科大学大学付属横浜クリニック外来患者のうち，上顎骨の劣成長を伴う骨格性反対

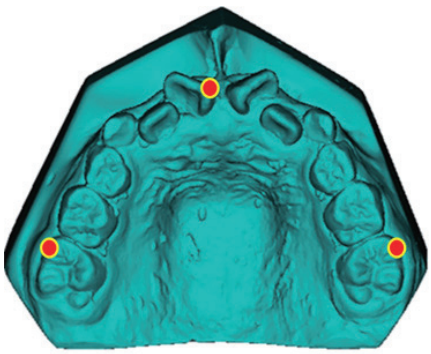


**図2**　口腔内参照点の設置
セファロ撮影と印象採得に先立ち，右側中切歯近心切縁および左右第一大臼歯の近心頬側咬頭頂に3か所，参照点として直径1.0 mmのチタン真球を接着固定した。



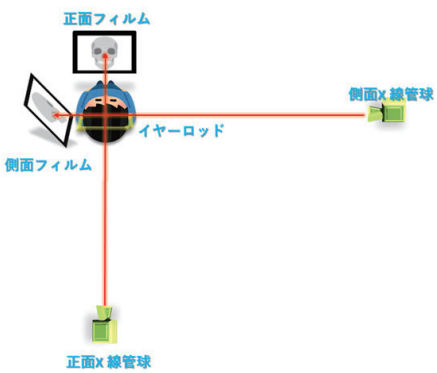




**図3**　正面および側面セファロの同時撮影
側面セファロは，管球から照射されるX線中心線が左右のイヤーロッドを通り，正面セファロはX線中心線が左右のイヤーロッドの中点位置を通るように，頭部X線撮影台は配置されている。

咬合と診断され，フロッシュのみ適用した患者12名（女児8名，男児4名）を連続抽出し，初診時（T0）および治療評価時（T1）の歯列石膏模型とセファロを研究資料として用いた。初診時の平均年齢は6歳10か月（4歳10か月～9歳11か月），装置の適用期間は平均14.4か月（5か月～27か月）であった。症例の選択基準は，混合歯列期までのうち，前歯部に3歯以上の反対咬合を呈し，骨格的要因を有するものとした。低年齢の症例においては，治療期間が前歯部の交換期である個体もあり，それらは前歯部の検討からは除外した。すべての患者に対して書面によるインフォームドコンセントを行った。この調査はヘルシンキ宣言に従って実施され，本研究の計画書は神奈川歯科大学研究倫理審査委員会の承認（No. 464）を得た。

**2. 研究方法**

正面と側面のセファロおよび歯列模型を利用し，三次元で骨格性および歯槽性の治療評価を行う以下のシステムを構築した。

1）頭蓋および口腔内参照点の設置

セファロ撮影および印象採得に先立ち，直径1.0 mmのチタン真球を，左右の眼窩下部に2か所，口腔内には右側中切歯近心切縁および左右第一大臼歯の近心頬側咬頭頂に3か所，参照点として接着固定した（図2）。

2）正面および側面セファロの同時撮影

セファロは頭部X線撮影台（CX-150W，朝日レントゲン工業株式会社，東京）により撮影した（図3）。患者の頭部をイヤーロッドにより固定し，FH平面が床と平行になるよう正面セファロおよび側面セファロを概ね同時に撮影した（時差約2秒）。規格通りに，側面セファロは管球から照射されるX線中心線が左右のイヤーロッドを貫くように，正面セファロはX線中心線が左右のイヤーロッドの中点位置を通るように，それぞれのセファロのX線中心線が直交するよう配置されている。

3）仮想空間における三次元セファロの構築と三次元計測（図4）

次いで，2台同時撮影の側面および正面セファロをそれぞれスキャナー（GT-X980，セイコーエプソン株式会社，長野）にて取り込み，プログラミング言語（Visual Basic 6.0，マイクロソフト社，U.S.A）にて独自開発した三次元セファロ分析ソフトウェア（以下，三次元セファロ）にて読み込み，以下の解析に利用した。

正面セファロおよび側面セファロのデジタル画像を，幾何学的に実体を再現するよう仮想空間上に再現した。被写体上の同一の解剖学的特徴点や設置した参照点は，正面セファロおよび側面セファロそれぞれのフィルム上に撮像される。理論上，両画像が仮想空間に正確に位置付けられている場合は，両画像上に撮像された点とそれぞれのX線管球を結んだ直線は，被写体内で交点を結ぶことになる。両セファロ画像を左右の眼窩下参照点（Orbita），側面セファロではイヤーロッド中心に，正面では左右イヤーロッドの外形，そ

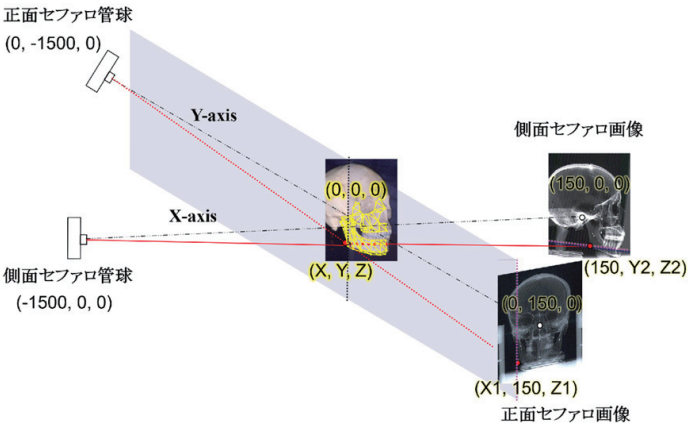



**図4**　三次元セファロの構築と三次元計測

正面および側面セファロ撮影の幾何学的配置を，仮想空間に再現した。左右イヤーロッドの中心を原点（0, 0, 0）とし，正面の管球が（0, −1500, 0）で正面フィルム面の中心を（0, 150, 0），側面の管球を（−1500, 0, 0）で側面フィルム面の中心を（150, 0, 0）とする座標系を設定し，三次元セファロを構築した（単位は mm）。
顎顔面頭蓋の任意点（X, Y, Z）は，正面セファロの画像上に（X1, 150, Z1）として，側面セファロの画像上に（150, Y2, Z2）として投影される。
それぞれの画像上の投影点とＸ線管球を結んだ二直線の交点が（X, Y, Z）として算出される。

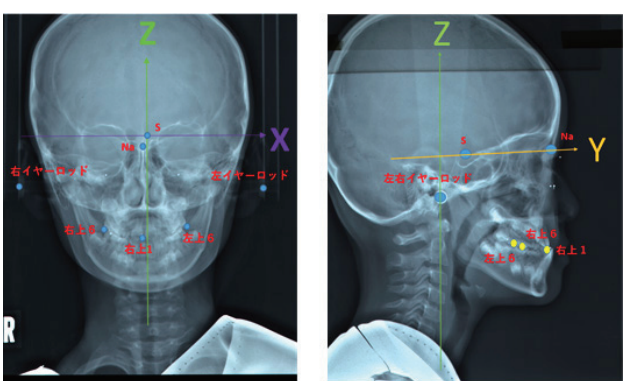



**図5**　頭蓋基準の全体座標系の設定

正中矢状面（YZ 平面）：左右のイヤーロッドの中点を通り，左右のイヤーロッドを結ぶ直線に垂直な平面
原点：正中矢状面上のトルコ鞍中心点（Sella）
Ｘ軸：原点を通り，正中矢状面に垂直な直線（右側が正符号）
Ｙ軸：正中矢状面上で抽出したトルコ鞍中心点（Sella）と鼻点（Nasion）を結ぶ直線（前方が正符号）
Ｚ軸：Ｘ軸，Ｙ軸に直交する直線（上方が正符号）
頭蓋基準の全体座標系において，歯列の参照３点を計測した。

の他の解剖学的特徴点を参照し，回転移動補正を行い，仮想空間上に三次元セファロを構築した。

正面および側面セファロ画像上で，同一の対応点を抽出し，全体座標系における被写体内の三次元座標を算出した。対応点をより正確に抽出するためソフトの補助機能として，正面セファロ上で抽出した計測点に対応する水平なガイドラインを側面セファロ上に，側面セファロ上の計測点に対応する垂直なガイドラインを正面セファロ上に描画する。両画像上における計測を数回繰り返し，最終座標を決定した。

4）頭蓋基準の全体座標系の設定

三次元セファロの座標系において，以下の基準点を参照し，全体座標系の設定をした（図 5）。

すなわち，左右のイヤーロッドの中点を通り，左右のイヤーロッドを結ぶ直線に垂直な平面を正中矢状面（YZ 平面）とし，正中矢状面上でトルコ鞍中心点（Sella）を抽出して原点とした。原点を通り，正中矢状面に垂直な直線を X 軸とした（右側が正符号）。同様に正中矢状面上で鼻点（Nasion）を抽出し，Sella と Nasion を結ぶ直線を Y 軸とし（前方が正符号），水平面（XY 平面）を設定した。X 軸，Y 軸に直交す

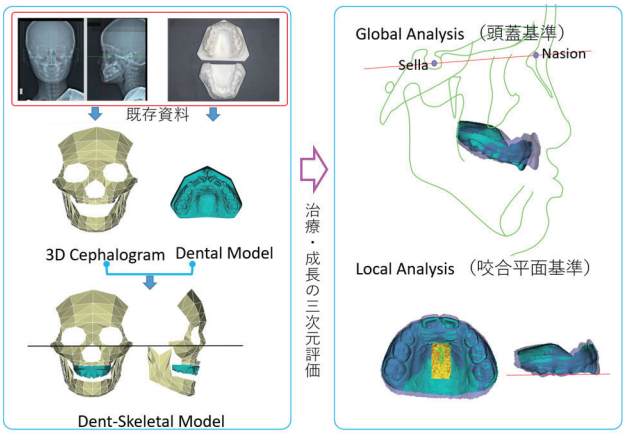



**図6**　歯列デジタルモデル三次元計測システムの構成
歯列デジタルモデル（DM）上で歯列の基準点3点を三次元計測し，三次元セファロで計測した対応点の座標を参照することで，DMを三次元セファロの頭蓋全体座標系に統合した。
本システムではDMの治療・成長の変化を，Global Analysisとして全体座標系において，Local Analysisとして局所座標系において評価した。

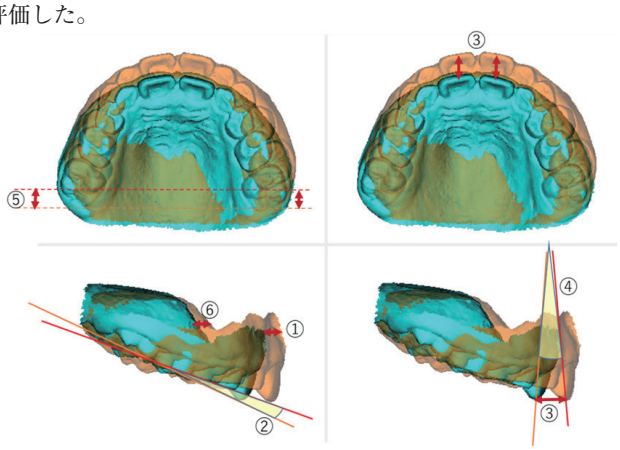



**図7**　全体座標系における治療評価（Global Analysis）
G-DM-0からG-DM-1への以下の6項目を計測し，全体座標系におけるフロッシュの治療効果を評価した。
①上顎歯槽基底部の前方限界点（A点）の前方移動（Y軸方向）
②上顎咬合平面角の変化（正中矢状面に投影）
③上顎中切歯切縁の前方移動（Y軸方向，左右の平均）
④上顎中切歯軸の傾斜（左右の平均）
⑤上顎第一大臼歯（遠心面）の前方移動（Y軸方向）
⑥口蓋代表点（左右の第三口蓋皺壁の最内側点を結んだ直線が正中口蓋縫線と交わる点）の前方移動（Y軸方向）

る直線をZ軸とし（上方が正符号），前頭面（XZ平面）を設定した。

設定した全体座標系において，歯列の基準3点（前歯および左右臼歯の参照点）を計測した。

5）歯列デジタルモデルの構築

上顎歯列を参照球が付いた状態で印象採得して，歯列石膏模型を作製した。歯列石膏模型を，3Dスキャナー（C-Proデンタルシステム D800-3SP，パナソニック株式会社，大阪）を用いて三次元計測した。プログラミング言語（Visual C++，マイクロソフト社）により独自に開発した包括的三次元画像解析ソフトウェアにて歯列デジタルモデル（以下，DM）を構築し，初診時および治療評価時のモデルをそれぞれDM-0，DM-1とした。

6）歯列デジタルモデルの全体座標系への統合

DM上で歯列の基準点3点を三次元計測し，三次元セファロで計測した対応点の座標を参照することで，DMを三次元セファロの全体座標系に統合した（図6）。DM-0およびDM-1の両者に対し上記の操作を行い，頭蓋基準の全体座標系においてそれぞれG-DM-0，G-DM-1として構築した。

7）全体座標系における治療評価（Global Analysis）

G-DM-0からG-DM-1への以下の変化を計測し，全体座標系におけるフロッシュの治療効果を評価した

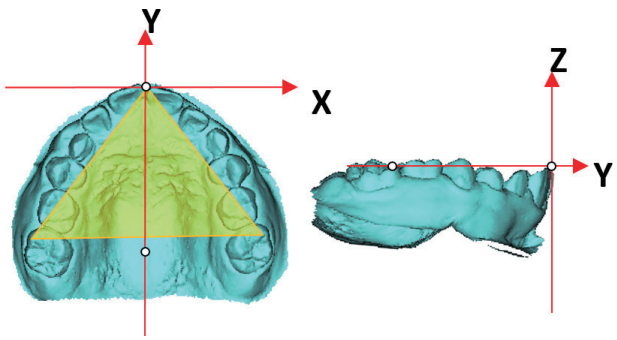



**図8**　咬合平面基準の局所座標系の設定

左右の第一大臼歯近心頬側咬頭頂および左右の中切歯切縁の近心点の中点の三点を含む平面をXY平面とし，第一大臼歯近心頬側咬頭頂の中点を原点とし，左右の第一大臼歯近心頬側咬頭頂を結ぶ直線をX軸とした（右側が正符号）。XY平面内で，原点を通りX軸に垂直な直線をY軸とした（前方が正符号）。X軸，Y軸に直交する直線をZ軸とした（上方が正符号）。

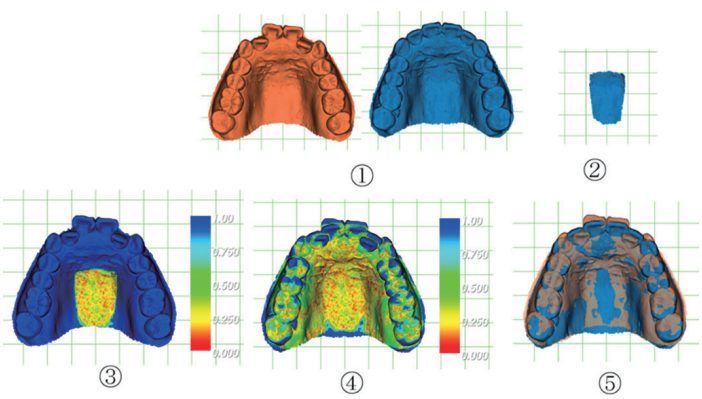



**図9**　ICP法による口蓋関心領域の重ね合わせ方法

第三横口蓋ヒダより後方の硬口蓋水平領域を口蓋関心領域とし重ね合わせを行った。
①：STL-T0とSTL-T1
②：STL-T1より切り出した口蓋関心領域
③：STL-T0の対応領域とICP法により局所的重ね合わせを行った。
④：STL-T0とSTL-T1の適合状況をカラーマッピングにより描画した。
⑤：STL-T0とSTL-T1の重ね合わせ描画

（図 7）。

①上顎歯槽基底部の前方限界点（A 点）の前方移動（Y 軸方向）

②上顎咬合平面角の変化（正中矢状面に投影）

③上顎中切歯切縁の前方移動（Y 軸方向，左右の平均）

④上顎中切歯軸の傾斜（左右の平均）

⑤上顎第一大臼歯（遠心面）の前方移動（Y 軸方向）

⑥口蓋代表点（左右の第三口蓋皺壁の最内側点を結んだ直線が正中口蓋縫線と交わる点）の前方移動（Y 軸方向）

8）咬合平面基準の局所座標系の設定（図 8）

初診時の DM を用いて，咬合平面基準の局所座標系を以下により決定した。DM-0 上で左右の上顎中切歯切縁の近心点と上顎第一大臼歯近心頬側咬頭頂を計測した。左右の第一大臼歯近心頬側咬頭頂および左右の中切歯切縁の近心点の中点の三点を含む平面を XY 平面とし，左右の第一大臼歯近心頬側咬頭頂の中点を原点とし，左右の第一大臼歯近心頬側咬頭頂を結ぶ直線を X 軸とした（右側が正符号）。XY 平面内で原点を通り X 軸に垂直な直線を Y 軸とした（前方が正符号）。X 軸，あるいは Y 軸に直交する直線を Z 軸とした（上方が正符号）。

咬合平面基準の局所座標系における初診時の DM を L-DM-0 とした。

9）咬合平面基準の局所座標系における治療評価（Local Analysis）

DM-1 を以下の手法により L-DM-0 に重ね合わせることで L-DM-1 を設定し，局所座標系における治療評価を行った。歯列デジタルモデルを用いた先行研

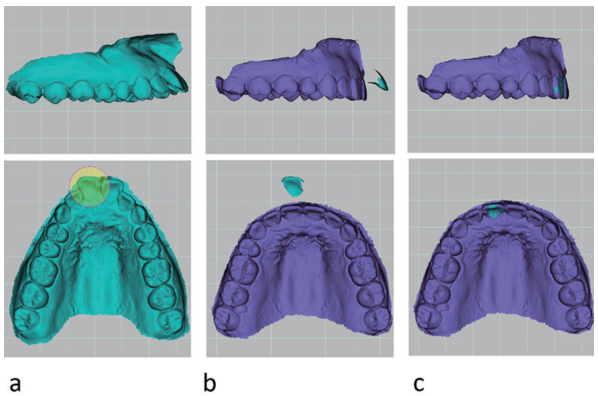



**図10**　ICP法による高精度な歯の移動評価法
G-DM-0（またはL-DM-0）上で対象歯の歯冠部（a）を抽出した後（b），G-DM-1（またはL-DM-1）上の同名歯の対応領域にICP法による重ね合わせを行い（c），歯の三次元移動マトリックスを取得した。

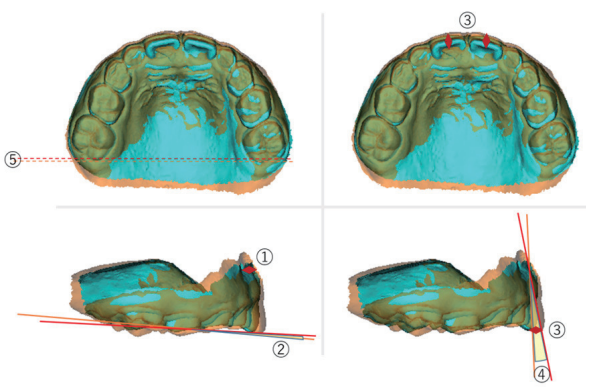



**図11**　咬合平面基準の局所座標系における治療評価（Local Analysis）
L-DM-0からL-DM-1への以下の5つの変化を計測し，局所座標系におけるフロッシュの治療評価を行った。
①上顎歯槽基底部の前方限界点（A点）の前方移動（Y軸方向）
②上顎咬合平面角の変化（正中矢状面に投影）
③上顎中切歯切縁の前方移動（Y軸方向，左右の平均）
④上顎中切歯軸の傾斜（左右の平均）
⑤上顎第一大臼歯（遠心面）の前方移動（Y軸方向）

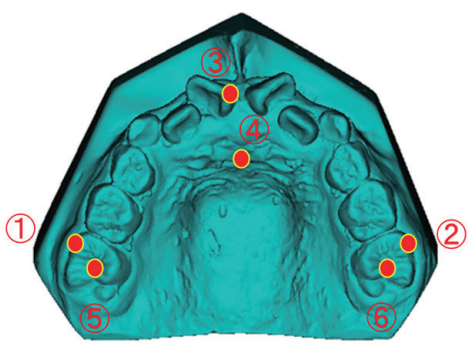



**図12**　三次元計測システムの正確度と精度の検証
デジタルモデル上で，上顎右側中切歯近心切縁，左右の第一大臼歯の近心頬側咬頭頂および中央窩，正中口蓋縫合前方の計6点を設定し，デジタルモデル上での距離計測の正確性を判断する目的で，5症例のデジタルモデルを対象に，中切歯と左右第一大臼歯に設定した3点間の距離計測を行い，ノギスによる実測値と比較した。

究[10,11]により，成人矯正治療を行った長期観察症例において，口蓋第三皺壁と後方の硬口蓋水平領域が経年的に非常に安定していることが示されたことより，口蓋参照領域 Palatal Region of Interest（以下，PROI）として成人症例の歯の移動評価に利用している。本研究においても，DM-1 の PROI を L-DM-0 の対応する PROI に，特徴点を用いない局所的位置合わせ手法である ICP 法[20,21]により重ね合わせ，L-DM-1 として設定した（図 9）。

また，中切歯および第一大臼歯に関して全体座標系および局所座標系のそれぞれにおいて設定した歯の三次元移動は，ICP 法による局所的重ね合わせを利用した高精度な手法で評価した。G-DM-0 上で対象歯の歯冠部を抽出した後，G-DM-1 上の同名歯の対応領域に ICP 法による重ね合わせを行い，歯の三次元移動マトリックスを取得した（図 10）。移動マトリックスより，矢状面における中切歯の傾斜変化量，切縁点の前方移動量，また第一大臼歯遠心面の前方移動量を算出した。

咬合平面基準の局所座標系において全体座標系と同じ評価項目に関して L-DM-0 から L-DM-1 への変化を計測し，フロッシュの治療効果を評価した（図 11）。

10）正確度および精度の検証

DM 上で，上顎右側中切歯近心切縁，左右の第一大臼歯の近心頬側咬頭頂および中央窩，正中口蓋縫合前方の計 6 点を設定し（図 12），以下の計測を行った。DM 上での距離計測の正確度を判断する目的で，5 症

**表1**　歯列デジタルモデル上での距離計測の正確度

| Estimation of Random Error (n=5) | | |
|---|---|---|
| Linear Distance | SE | Coefficient of Reliability (%) |
| ③–⑤ | 0.06 | 99.8 |
| ⑤–⑥ | 0.05 | 99.9 |
| ③–⑥ | 0.11 | 99.1 |

例のDMを対象に中切歯と左右第一大臼歯に設定した3点間の距離計測を行い，ノギスによる実測値と比較した。本システムに内在する誤差のすべてを含む計測誤差を以下の方法により求めた。

また，精度の検証について，本システムを用い三次元分析を行った患者資料のうち，無作為に選択した20症例を対象とした。症例ごとに仮想空間における三次元セファロの構築，三次元セファロ計測，全体座標系の決定，DMの構築および全体座標系への統合という操作を2回繰り返し，最終モデル上で設定した6か所の計測点を繰り返し計測した。2回の計測は，1か月間の間隔を空けて行った。距離計測値と実測値，1回目と2回目の各計測点のX，Y，Z座標値の標準誤差（SE）を次に示すDahlbergの公式[22]を用い求めた。

Standard Error (SE) =Σd2/2n（d: 計測値の差，n: 症例数）

信頼度係数（Coefficient of Reliability）はHoustonの公式[23]を用い計算した。

11）臨床応用

超弾性チタン合金ワイヤー（GUMMETALワイヤー®，JM Ortho，東京）を用いたフロッシュ[19]は可撤式の機能的顎矯正装置として近年開発された装置であり，上顎骨の前後的な劣成長を伴う骨格性反対咬合症例に対して上顎の成長促進を期待し適用した（図1）。

システムの臨床応用として，治療前後のDMの三次元的形態変化を，全体座標系および局所座標系において評価し，フロッシュの治療効果を検討した。統計処理は，Wilcoxonの符号付順位検定を用いて行い，有意水準を1% 未満とし，統計分析には分析ソフト（SPSS Statics version 25, IBM社，U.S.A）を用いた。

## 結　果

### 1. 計測誤差

DM上の距離的計測値を実測値と比較した結果，標準誤差は0.11 mm以下で，信頼度係数は99.1% 以上であった（表1）。仮想空間における三次元セファロの構築，頭蓋基準への歯列デジタルモデルを統合したのち，DM上で任意点の座標取得という一連の過程を，繰り返し行った結果，X，Y，Z座標値の標準誤差は0.07 mm以下で，信頼度係数は99.1% 以上であった（表2）。

**表2**　次元計測システムの精度

| Estimation of Random Error (n=20) | | | |
|---|---|---|---|
| Point No. | Coordinates | SE | Coefficient of Reliability (%) |
| ① | X | 0.04 | 99.6 |
| | Y | 0.05 | 99.9 |
| | Z | 0.03 | 99.9 |
| ② | X | 0.04 | 99.6 |
| | Y | 0.06 | 99.9 |
| | Z | 0.03 | 99.9 |
| ③ | X | 0.04 | 99.7 |
| | Y | 0.04 | 99.9 |
| | Z | 0.04 | 99.9 |
| ④ | X | 0.05 | 99.4 |
| | Y | 0.05 | 99.9 |
| | Z | 0.05 | 99.7 |
| ⑤ | X | 0.05 | 99.4 |
| | Y | 0.06 | 99.9 |
| | Z | 0.04 | 99.9 |
| ⑥ | X | 0.06 | 99.1 |
| | Y | 0.07 | 99.8 |
| | Z | 0.04 | 99.9 |

### 2. フロッシュ適用症例

図1は，治療評価を行った研究対象の一例である。初診時の口腔内写真より，前歯部の被蓋が反対咬合で大臼歯の咬合関係はターミナルプレーンがMesial Step Typeとなっていた。初診時の側面セファロ分析より，ANB角 −1.5°，SNA角78.9° で上顎骨の劣成長を伴う骨格性反対咬合症例と診断された。約1か月間で前歯部被蓋の改善を認め，16か月後に治療評価を行った。

頭蓋基準の全体座標系と咬合平面を基準の局所座標系で治療効果を評価した結果，本症例における前歯部の被蓋改善位は，上顎全体の反時計回りの回転を伴う前方移動という顎整形効果が関わっており，一方，前歯の唇側傾斜といった歯槽性の変化も関わっていたと考えられた。

### 3. 全体座標系と局所座標系におけるフロッシュの治療効果の評価

全体座標系と局所座標系におけるフロッシュの治療効果の評価を表3に示した。全体座標系におけるグローバルな変化として，A点の前方移動量が平均4.7 mm（1.5 mm ～ 8.6 mm），口蓋点の前方移動量が平均4.3 mm（1.6 mm ～ 9.5 mm），咬合平面角の変化

**表3**　全体座標系と局所座標系におけるフロッシュの治療効果の評価

| Global Assesment | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 変化量（T1-T0） | | | |
| | Min | Max | Average | Wilcoxon signed-rank |
| A点の前方移動量（mm） | 1.5 | 8.6 | 4.7 | ** |
| 咬合平面角の変化量（°） | −1.6 | 9.0 | 4.9 | ** |
| UI切縁前方移動量（mm） | 1.4 | 12.0 | 6.0 | ** |
| UI唇側傾斜（°） | 0.1 | 15.9 | 7.3 | ** |
| MI前方移動量（mm） | 1.3 | 9.1 | 4.7 | ** |
| 口蓋点の前方部移動量（mm） | 1.6 | 9.5 | 4.3 | ** |

| Local Assesment | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 変化量（T1-T0） | | | |
| | Min | Max | Average | Wilcoxon signed-rank |
| A点の前方移動量（mm） | 0.6 | 3.7 | 1.9 | ns |
| 咬合平面角の変化量（°） | −3.3 | 8.0 | 2.0 | ns |
| UI切縁前方移動量（mm） | 0.3 | 3.7 | 2.0 | ** |
| UI唇側傾斜（°） | 0.8 | 13.4 | 5.2 | ** |
| MI前方移動量（mm） | −1.1 | 1.4 | 0.3 | ns |

は平均4.9°（−1.6°～9.0°）反時計回りに回転していた。歯槽性には中切歯の切縁が平均6.0 mm（1.4 mm～12.0 mm）前方へ移動し，反時計回りに平均7.3°（0.1°～15.9°）回転し唇側傾斜が認められ，第一大臼歯は平均4.7 mm（1.3 mm～9.1 mm）前方へ移動していた。全体座標系における評価項目のすべてにおいて，治療後の値は初診時と比較して有意な変化であることが確認された（p<0.01）。

初診時のDMで決定した咬合平面基準の局所座標系において，顎整形効果を除外した評価を行うと，A点の前方移動量が平均1.9 mm（0.6 mm～3.7 mm），第一大臼歯の近心移動量は平均0.3 mm（−1.1 mm～1.4 mm），咬合平面角の変化は平均2.0°（−3.8°～8.0°）反時計回りに回転していたが，治療前後で有意差は示されなかった（p<0.01）。中切歯切縁の前方移動量は平均2.0 mm（0.3 mm～3.7 mm）で平均5.2°（0.8°～13.4°）唇側へと傾斜しており，治療前後で有意差が認められた（p<0.01）。各値は左右の歯の計測値の平均とした。

## 考　察

本研究の目的は，同時に撮影した正面および側面のセファロ画像と歯列模型を用いて，歯列顎骨の三次元統合モデルを構築するという新しいシステムの確立を試み，本システムの正確度と精度を検証することであった。

**1．セファロを用いた三次元計測について**

Broadbentにより開発されたCephalostatは，矯正臨床の標準X線装置として普及しているセファロ撮影装置の原型であり，本来は三次元分析システムとして開発された[2,3]。しかし，現在の側面および正面セファロは，それぞれ異なる方向から撮影された二次元画像として利用され，正面セファロの使用頻度は極めて低く，側面セファロのみの診断および評価が一般的となっている。このことは，非対称症例に対する診断や治療法の確立が矯正治療の中でも特に遅れていることと直結しており，また，外科的矯正治療の治療計画立案に際しても側面セファロのみを用いた二次元的な評価が標準的となっていることにも関連していると考えられる。今回開発したプログラムにより，過去の資料を用いた三次元診断が可能となることで，今後，二次元的な評価では成し得なかった顎骨と歯列の成長変化やさまざまな装置の治療効果の判定に既存資料が有効活用でき，ひいては前述の問題解決にも寄与し得ると考えられる。また，一般集団から集められたデータによる基準値を，各世代や性別や人種ごとに更新し続けることが矯正診断には求められ，時代のニーズとして三次元化が求められているが，CTを用いて一般集団から三次元的な基準値を測定することは倫理的に不可能である。今回，開発したプログラムにより，従来通りのセファロから三次元的な基準値を測定することが可能となり，矯正歯科分野の発展に貢献し得ることが期待される。

**2．DMを用いた三次元計測について**

今回の研究では，既存資料の有効活用という観点に重きをおき，歯列模型を資料とし三次元スキャナー計測により構築したDMを利用した。一方，現在普及し始めている口腔内スキャナーは，従来の印象材や石膏の膨張収縮など物性的な誤差や手技的なエラーが少ないとされている。本研究のシステムにおいても，今後はより患者負担が少なく，精密なデータ採得のため，口腔内スキャナーによるデジタル情報の利用を進めたいと考えている。

**3．ICP法について**

PROIを用いた治療前後の模型の重ね合わせ，および歯の移動評価のため，特徴点を利用せず，局所的重ね合わせを行うICP法を用いた[20,21]。ICP法は2つのデータ群をある程度近づけた状態で，一方の物体の構成点それぞれに対して相手の物体の最も近い点を探索し対応点とし，対応点との二乗誤差が最小となるよう回転と平行移動を行う。2つのデータ群が近付いた後，再び同様の処理を行う。したがって，対応点を探す処理と2つのデータ群を近付ける処理を繰り返すことで高精度の重ね合わせが可能と考察された。

歯の移動評価にICP法を用いることにより，以下の

利点が確認された。中切歯や大臼歯の前方移動量を評価するため，通常の分析法では治療前後のそれぞれのデジタルモデル上で計測点を設定し，その移動量を評価する。今回のICP法を用いた計測法では，治療前のモデルでのみ計測点を設定し，ICP法により治療前の歯冠を治療後のものに重ね合わせ，三次元移動マトリックスを取得，治療前の歯冠の計測点を三次元アフィン変換することで治療後の歯冠に正確に再現した。この操作により，治療前後それぞれのモデル上で抽出する計測誤差を排除可能となり，高精度な移動評価が可能となったと考察された。同様に中切歯の唇側傾斜も，歯軸等の計測項目を設定することなく三次元移動マトリックスより矢状面の角度変化として算出したことより，高精度な計測が可能であったと考えられる。

**4. PROI を用いた局所座標系の評価について**

先行研究において，初診時と動的治療終了後で初診より 5 年以上経過時の歯列模型を比較して口蓋形態の経年的安定性を検討した結果，PROI は矯正治療を経ても長期間にわたり非常に安定性が高いことが示された[10,11]。矯正用インプラントを参照した研究においても，PROI が治療前後の重ね合わせに有用であることが報告されており[24]，側面セファロにおける移動評価と比較検討した研究では口蓋が信頼度の高い重ね合わせの参照領域であるとした[25]。本研究も同様に，フロッシュ適用前後のデジタルモデルを PROI で重ね合わせ，歯の移動解析に利用した。PROI による重ね合わせが成人症例では有効と考えられるが，成長期の症例への適用の妥当性が検証されているわけではない。今回，フロッシュの適用期間が平均 14.4 か月で PROI に大きな変化は認められないと考え，対象症例の PROI の差分が小さく，良好に重ね合っていたことより，PROI の利用は妥当と判断した。

**5. 正確度および精度の検証について**

本研究で検討した新しい三次元分析システムは，三次元セファロ仮想空間の全体座標系に DM を統合することで構築される。計測の精度を検証する場合，実際の測定結果が正しいかを判断する正確度（Accuracy）と，計測値のバラツキを評価する精度（Precision）の両者を評価する必要がある。

正確度の評価のために DM 上の距離計測値を実測値と比較した結果，標準誤差は 0.11 mm 以下で，正確な計測が算出されたと判断された。一方，精度の評価のため，三次元セファロで決定した全体座標系に DM を位置付ける作業を各症例 2 回行い，設定した計測点の座標値を繰り返し取得した。その結果，繰り返し計測の X，Y，Z それぞれの座標値の標準誤差は 0.07 mm 以下で，信頼度係数は 99.1% 以上と，十分な精度を有していた。以上より，本システムは三次元計測システムとして臨床応用可能であると考えられた。

**6. 研究対象について**

成長期の前歯部反対咬合症例に対して，古くは Chin Cap が下顎骨の成長抑制の目的で用いられてきたが，その顎整形効果に否定的な見解もあり[26]，上顎の前方発育を促進する目的で上顎前方牽引装置が広く適用されている[12–18]。今回検討した新しいフロッシュも歯槽性の効果よりは上顎の前方発育を促進することを期待して使用している[19]。本研究では新しい矯正装置の適用に当たり，今後の使用法やデザインなどの改変の指針を得るため，治療効果を概括的に把握することを目的として混合歯列期までの症例で，前歯部に 3 歯以上の反対咬合を呈し，骨格的要因を有するものとした。成長期の症例を対象に矯正装置の効果を知るためには，性別や適用年齢を統一し，対象として同様な症例に対する未治療群を設定し比較検討することが望ましいと考えられ[18]，今後症例を蓄積しより詳細な検討を継続する予定である。

**7. フロッシュ顎整形効果について**

頭蓋基準の全体座標系における A 点および口蓋点の前方移動量は，平均 4.5 mm 程度であった。一方，咬合平面は平均約 5.0° 反時計回りに回転していた。局所座標系における咬合平面の変化が 2.0° であったことより，上顎複合体の回転変化は 3.0° 程度と推察される。Sar C ら[27] の研究では，自然成長による咬合平面の変化は報告されておらず，これらの治療変化は，フロッシュによる顎整形効果としての骨格性の変化と考えられる。また，上顎骨，下顎骨ともに頭蓋に対し前下方へ成長することより，成長期の治療評価を行う際には自然成長を考慮する必要がある。Sar C ら[27] の研究では A 点は 0.05 mm/ 月の自然成長が報告されており，今回の平均治療期間 14.4 か月を乗じると，その量は 0.7 mm である。この自然成長量を考慮しても，フロッシュにより上顎骨の 3.8 mm 程度の前方誘導が認められ，骨格的な不調和の改善に効果を示したと考えられる。フロッシュは上顎骨の成長促進という従来の上顎前方牽引装置の代替え装置として適用を試みている。上顎前方牽引装置に関して側面セファロ分析で認められた A 点の前方移動量は 2.0 mm から 3.0 mm 程度との報告がある[28]。したがって，フロッシュは上顎前方牽引装置に匹敵する上顎骨の前方発育促進効果を発揮すると考えられた。上顎前方牽引装置の顎整形効果の副作用として，上顎骨全体の反時計回りの回転が起こることが指摘されている[12–18]。フロッシュにおいても同様の上顎骨の回転が生じたことより，装置デザインの改良をすることが今後の臨床課題と考えられた。

## 結　論

本研究の目的は，同時に撮影した正面および側面のセファロ画像と歯列石膏模型を用いて，歯列顎骨の三次元統合モデルを構築するという新しいシステムの確立を試み，本システムの精度を検証することであった。またシステムの臨床応用の有用性を確認する目的で，新しい顎矯正装置フロッシュの治療効果評価し以下の結果を得た。

1. 正面および側面のセファロ画像より仮想空間に三次元セファロを構築し，設定した全体座標系にDMの統合し統合することで，DMを用いた三次元計測システムを確立した。

2. 本システムは，正確度，精度とも良好な結果が示され，歯列デジタルモデルの新しい三次元画像評価方法として充分に臨床応用可能と判断された。

3. 臨床応用として，新しい顎矯正装置フロッシュの治療効果を，本システムを用いた頭蓋基準のDMの治療変化と，PROIを参照した咬合平面基準のDMの治療変化を評価することで検討した。その結果，フロッシュによる前歯部被蓋の改善には，上顎骨全体の前方移動と上顎前歯の唇側傾斜が関わっていることが示された。全体座標系と局所座標系を設定することで，不正咬合の治療効果を骨格性と歯槽性に鑑別し評価することが可能であった。

4. 本システムは，セファロと歯列模型という矯正診断の一般検査資料を利用しており，不正咬合の診断，治療評価への有効活用が期待されると考察された。

## 利益相反

本論文において開示すべき利益相反はありません。

## 文　献


1. Grayson BH, Cutting C, Bookstein FL *et al.*: The three-dimensional cephalogram; Theory, technique, and clinical application. *Am J Orthod. Dentofacial Orthop.* **94**: 327–337, 1988.
2. Broadbent BH: A new X-ray technique and its application to orthodontia. *Angle Orthd.* **1**: 1–45, 1931.
3. Broadbent BH: Golden WH: Boltonstandards of dentofacial developmental growth, St. Louis. The C. V. Mosby Co. press, 1975.
4. Savara BS: A method of measuring facial bone growth in three dimensions. *Hum Biol.* 37: 245–255, 1965.
5. Baumried S, Moffitt FH, Curry S: The geometry of three-dimensional measurement from paired coplanar X-ray images. *Am J Orthod.* **84**: 313–322, 1983.
6. Rune B, Sarnas KV, Selvic G *et al.*: Roentgen steremetry in the study of craniofacial anomalies-the state of the art in Sweden. *Br J Orthod.* 13: 151–157, 1986.
7. Konishi H, Fushima K, Kobayashi M *et al.*: Three-dimensional reconstraction of craniofacial structure utilizing conventional x-ray cephalograms. *Bull Kanagawa Dent Col.* **35**: 139–149, 2007.
8. Fushima K, Kobayashi M, Konishi H: Real-time orthognathic surgical simulation using a mandibular motion tracking system. *Comput Aided Surg.* **12**(2): 91–104, 2007.
9. Fushima K, Kobayashi M: Mixed surgical simulation for othognathic surgery. *Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery.* **38**: 13, 2016.
10. Kobayashi D, Fushima K, Kobayashi M: Long-term stability of palatal region of interest in adult orthodontic patients. Congress of European Orthodontic Society, Stockholm, 2016.
11. 不島健持，小林　優，井野　智：大規模災害時における歯列実体模型三次元情報のバックアップ管理体制の構築および口蓋形態による個人識別の検討．神奈川歯学．**50**-特，179–184，2015.
12. Hideshi I, Shuichi M, Yutaka T *et al.*: Treatment effect of combined maxillary protraction and chincap appliance in severe skeletal Class III cases. *Am J Orthod Dentfac Orthop.* **92**: 304–312, 1987.
13. Ikue Y, Hideshi I, Nobuhito Y *et al.*: Post treatment changes after maxillary protraction appliance and their factors. 北海道矯正歯科学会誌．**25**(1)：1–12, 2002.
14. Ishii N, Deguchi T, Hunt NP: Craniofacial differences between Japanese and British Caucasian females with a skeletal Class III malocclusion. *Eur J Orthod. Oct.* **24**(5): 493–499, 2002.
15. Tuba T, Alaadin K, Sema Y: Facemask therapy with and without expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop. Oct.* **132**(4): 467–474, 2007.
16. Gregory A, Vaughn, Brian M *et al.*: The effects of maxillary protraction therapy with or without rapid palatal expansion: A prospective, randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* **128**: 299–309, 2005.
17. Hyoung SB: Clinical results of the maxillary protraction in Korean children. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* **108**: 583–592, 1995.
18. Patricia VW, James A, McNamara Jr, Tiziano B *et al.*: Long-term effects of Class III treatment with rapid maxillary expansion and facemask therapy followed by fixed appliances. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* **123**: 306–320, 2003.
19. 長谷川　信：GUMMETAL矯正歯科治療．第1版．東京：クインテッセンス出版：70–75，2015.
20. 真川　純，池内克史：Free-form Deformationと局所的位置合わせを用いた三次元形状解析．*CVIM.* **31**：

261–268, 2007.
21. Besl P, Mckay N: A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. **14**: 239–256, 1992.
22. Dahlberg G: Statistical methods for medical and biological students. Br *Med J*. **14**: 358–359, 1940.
23. Houston W: The analysis of errors in orthodontic measurements. *Am J Orthod*. **83**: 382–390, 1983.
24. Yoshida I, Ishii H, Yamaguchi N *et al*.: Long − term follow up of combined maxillary protraction appliance and chincap treatment. *Higashi Nippon Dent J*. **15**: 149–162, 1996.
25. Jang I, Tanaka M, Koga Y *et al*.: A novel method for the assessment of three-dimensional tooth movement during orthodontic treatment. *Angle Orthod*. **79**: 447–453, 2009.
26. Choi JI, Cha BK, Jost-Brinkmann PG *et al*.: Validity of palatal superimposition of 3-dimensional digital models in cases treated with rapid maxillary expansion and maxillary protraction headgear. *Korean J Orthod*. **42**: 235–241, 2012.
27. Sar C, Arman-Özçırpıcı A, Uçkan S: Comparative evaluation of maxillary protraction with or without skeletal anchorage. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. *May*. **139**(5): 636–649, 2011.
28. Mermigos J, Full CA, Andreasen G: Protraction of the maxillofacial complex. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. **98**: 47–55, 1990.