

神奈川歯科大学大学院歯学研究科  
2016年度 博士論文

歯列骨格統合モデルを用いた顔面非対称における  
デンタルコンペンセーションの三次元評価法  
Three-dimensional analysis of Dental Compensation in  
facial asymmetry cases using Dento-Skeletal model

2017年3月3日

萩原 俊一

Shunichi Hagiwara

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

不島健持教授 指導

## 論文内容要旨

顎変形症は、顎骨の形態や頭蓋に対する位置に問題があり、顔貌軟組織の審美障害や顎口腔機能障害を伴い不正咬合を呈している症例と定義される。顎変形症の特徴としてデンタルコンペンセーション（以下 DC）があげられる。DCとは顎変形に対する歯列の補償機構である。近年、顎変形の診断機器として Computed Tomography（以下 CT）が広く普及している。特に非対称を有する顎変形の診断には、従来の頭部 X 線企画写真（以下セファロ）による二次元的診断では不十分であり、CT など三次元的分析機器が不可欠である。また顎変形と歯列不正の間には密接な関係があることから、両者を同一の三次元空間座標系で分析できるシステムが必要である。一方、歯冠修復物により発生するメタルアーティファクトは、歯列歯槽部の画像を大きく乱し、CT 撮影の問題点の一つと認識されている。CT のメタルアーティファクトによる画質低下部への対応策の一つとして、歯列歯槽部を三次元スキャナー画像により置換し、歯列顎骨統合モデルを作製することが望まれる。本研究の目的は、①外科矯正治療の三次元診断、手術シミュレーションを可能にするシステム開発の一環として、CT の顎顔面骨格データと三次元スキャナーの歯列模型表面形状データを利用した歯列顎骨統合モデルを作製すること、②顔面非対称例を対象に、歯列顎骨統合モデルを三次元形態分析することで、顎骨と歯列の非対称を検討し、三次元的なデンタルコンペンセーションを解明することである。研究対象は神奈川歯科大学附属横浜研修センター・横浜クリニック矯正科にて顎変形症と診断された患者のうち、顔面非対称を呈する患者とした。研究資料は初診時の顎顔面頭蓋の CTDicom データと歯列模型を三次元スキャナーにて計測して得られた STL データを用い歯列顎骨統合モデルを作製し歯列顎骨の形態分析を行った。頭蓋基準において顔面非対称の骨格的特徴は顎、下顎枝に示された。顎偏位に伴い下顎枝は偏位側が短く、傾斜し、それに伴い下顎下縁弓は偏位側に三次元的に回転した。また、下顎局所基準において顎偏位に伴い下顎前歯歯列正中は非偏位側に偏位し下顎臼歯は偏位側が舌側傾斜し歯列弓の狭窄がみられた。頭蓋基準で上顎歯列は偏位側に偏位し非偏位側臼歯は舌側に傾斜し歯列弓の狭窄がみられた。これらのようなことは、顔面非対称症例において特徴的な歯列の不正と考えられ、これは顔面非対称症例におけるデンタルコンペンセーションと考えられた。以上のことから今回の研究結果により顎変形症の顔面非対称症例における側方偏位を骨格不正と歯列不正を明確に判断できた。また、歯列骨格統合モデルを作製することにより、その両者の関係性が明らかとなった。

## 論文審査要旨

学位申請論文である「歯列骨格統合モデルを用いた顔面非対称におけるデンタルコンペンセーションの三次元評価法」は、顎変形を伴う骨格性Ⅲ級症例の診断に応用するために顎顔面骨格データと歯列模型データを利用した新たな歯列顎骨統合モデルを開発し、この統合モデルを応用することで顔面非対称例のデンタルコンペンセーションの解明を行った研究である。外科矯正を伴う骨格性Ⅲ級症例の治療は、現状、極めて予知性が困難な治療法の1つであり、術前の適切な診断が必要不可欠と考えられていることから、臨床に大きく貢献することは明らかであり、大変意義ある研究目的である。本研究では、神奈川県立歯科大学横浜クリニック矯正科に来院した外科矯正患者23名（女性13名、男性10名；平均年齢25歳4ヵ月）の内、頭蓋矢状面に対しオトガイ正中Mentonが3mm以上側方偏位している患者を対象とした。研究方法は、プログラミングランゲージVisual C++により独自に開発した包括的三次元診断システムManMoSを用い、CTのDicomデータより顎顔面骨格CTモデルと、3DスキャナのSTLデータより歯列表面形状STLモデルを同一仮想空間上に再構築した。その後、CT\_Modelの歯列歯冠部を、メタルアーティファクトが認められない領域を参照し、STL\_Modelの対応領域とICP法により重ねあわせすることで、新たな歯列骨格統合モデルを開発した。その後、歯列骨格統合モデルを使用し歯列および骨格の三次元形態分析を行い、両者の相関性を調べた。その結果、本論文は、以下のような新規性が認められた。①臨床応用可能な歯列顎骨統合モデルの開発に成功し、正確な診断、シミュレーションを可能とした。②歯列顎骨統合モデルを用いることで、顎変形症の顔面非対称症例の三次元的なデンタルコンペンセーションを明確に判断できた。③顎変形症の顔面非対称症例は、顔面骨格の非対称が下顎骨の非対称に依存しており、歯槽基底としての下顎体部に認められる非対称は、下顎枝高径の成長の左右差により三次元的に回転偏位されていることを明らかにした。④新たに下顎局所座標系を利用することで、下顎歯列のデンタルコンペンセーションを的確に診断できた。本審査委員会は論文内容および関連事項に関して、口頭試問を行ったところ十分な回答が得られた。本研究は、顎変形を伴う骨格性Ⅲ級症例の治療において新しい診断法が確立され、また顎骨と歯列の成長とそれに伴うデンタルコンペンセーションに関する新たな知見が得られていることから、広く歯学の発展に寄与するとの結論に至った。そこで、本審査委員会は申請者が博士（臨床歯学）の学位に十分値するものと認めた。

2017年3月3日

主査：木本 克彦 教授  
副査：玉置 勝司 教授  
副査：榎 宏太郎 教授

## 【諸言】

顎変形症は、顎骨の形態や頭蓋に対する位置に問題があり、顔貌軟組織の審美障害や顎口腔機能障害を伴い不正咬合を呈している症例と定義<sup>1)</sup>され、外科医と矯正医の診療連携、すなわち外科矯正治療により対応する疾患である。

一般的に外科矯正治療では、先ず矯正治療から開始しある程度歯を配列したのち、およそ治療期間の中頃に顎骨骨切り術が施行され、手術後に再度矯正治療により個性正常咬合を確立する。顎骨骨切り術では、頭蓋に対する顎骨の位置と形態を改善し、同時に上下歯列の咬合関係の改善を求めるとともに顎骨を整位する。実際の顎骨整位は、骨切り部の骨癒合を速やかに進行させること、手術後早期より咬合を含めた顎機能を正常化させることなどに配慮するため、より緊密で安定した咬合関係になるよう位置付けることが多い。しかしながらこのような咬合重視の顎骨位置付けが、必ずしも下顎の前突や後退あるいは非対称といった顎変形を十分改善するとは限らない<sup>2-3)</sup>。

光造形モデルにより下顎枝矢状分割術（以下 SSR0）をシミュレーションした報告では、外科矯正治療における咬合重視の下顎骨位置付けの問題点が示された<sup>4-5)</sup>。すなわち顎骨骨切り術に際し、上顎歯列弓に対し下顎歯列弓を適正に咬合させるよう咬合重視で下顎骨を位置付けた結果、歯列弓を含む遠位骨片が非対称に位置付けられ、近位骨片との間に強い骨片干渉が示された。咬合の適正化を求めた顎矯正手術が顎変形の十分な改善に繋がっていない理由は、顎変形症の歯列形態として特徴的に認められるデンタルコンペンセーション（以下

DC) が十分に診断されていないことに起因すると考えられる。

デンタルコンペンセーション<sup>8)</sup>とは、顎変形に対する歯列の補償機構である。骨格性Ⅲ級症例で認められる、下顎前突に対応した下顎前歯歯軸の舌側傾斜や上顎前歯歯軸の唇側傾斜などが DC の例で、図 1 に治療例を提示する。本症例では、顎矯正手術として SSR0 が施行し上顎歯列に対し下顎歯列を後方移動しつつ、術前術後の矯正治療では下顎前歯の唇側傾斜（ディコンペンセーション）を行った。単に前歯の被蓋改善を目指すのではなく、診断により顎変形に対する DC を明確化し、矯正治療による歯の移動と手術による顎変形の改善をシミュレーションし実施することが、顎変形と咬合関係の両者の改善に極めて重要と考えられる<sup>6-13)</sup>。

提示した骨格性Ⅲ級症例では、その顎変形に正面観の非対称は認められず、骨切り術に伴う顎骨の整位は単純な下顎骨遠位骨片の後方移動で達成された。しかしながら外科矯正症例では、顔面の非対称を伴う症例が少なくない。Severt ら (1997)<sup>14)</sup> は、外科矯正患者の 34% に臨床的に明らかな顔面非対称が認められ、顔面の非対称は下顔面に向かうほど顕著であると報告した。Saito ら (2009)<sup>15)</sup> は外科矯正患者を対象にオトガイの側方偏位度を計測した結果、正常範囲を超える個体は全体の三分の二で、三分の一は 2S. D. を超える顕著な側方偏位を認めたと報告した。非対称を呈する顎変形症の診断は、従来行われてきた二次元の側面セファロ等の分析では不十分で、三次元的な形態診断が求められる。顔面非対称例では顎骨形態の非対称のみならず、上下歯列弓の非対称が認められ、DC も含まれると考えられる<sup>16)</sup>。

顎変形症症例では顎骨や歯列形態の非対称が少なくないことを考えると、外科矯正の診断は顎骨形態と歯列弓形態の両者を、同一座標系で三次元分析することが必要と考えられる<sup>17-21)</sup>。顎変形症の診断はこれまでセファロ分析に依るところが大きかったが、近年では Computed Tomography (CT) などを用いた三次元診断やシミュレーションが普及し始めており、三次元画像工学技術のさらなる臨床応用が求められている<sup>22-27)</sup>。CT から得られる三次元デジタル情報により、顎骨および歯列の三次元形態を高精度で診断できる一方、歯冠修復物、補綴物により発生するメタルアーティファクトは、歯列歯槽部の画像を大きく乱し、CT 撮影に付きまとう問題点の一つと認識されている。近年、三次元スキャナーを用いた歯列歯槽部の三次元画像の臨床応用が進んでいる。CT のメタルアーティファクトによる画質低下部への対応策の一つとして、歯列歯槽部を三次元スキャナー画像により置換し、三次元融合可視化モデルを作製することが考えられる。より明瞭な画像を得ることで、正確な診断、シミュレーションが可能になると考えられる。

本研究の目的は、①外科矯正治療の三次元診断、手術シミュレーションを可能にするシステム開発の一環として、CT の顎顔面骨格データと三次元スキャナーの歯列模型表面形状データを利用した歯列顎骨統合モデルを作製すること、②顔面非対称例を対象に、歯列顎骨統合モデルを三次元形態分析することで、顎骨と歯列の非対称を検討し、三次元的なデンタルコンペンセーションを解明することである。

## 【研究資料および方法】

研究対象は神奈川県立歯科大学附属横浜研修センター・横浜クリニック矯正歯科にて顎変形症と診断された患者のうち、顔面の非対称を呈する患者 23 名（女性：13 名 男性；10 名）で、平均年齢は 25 歳 4 ヶ月（50 歳 8 カ月～18 歳 2 カ月）であった。顔面非対称は下顔面の非対称、特に頤の側方偏位により特徴付けられる<sup>14-15)</sup> ことより、頭蓋正中矢状面に対しオトガイ正中 (Menton) が 3 mm 以上側方偏位していることを選択基準とした。研究資料は初診時の診断目的の一般検査において採得された顎顔面頭蓋の CT Dicom データと、歯列石膏模型を三次元スキャナーにて計測し得られた STL データとした。

### 1. 歯列顎骨統合モデルの作製 (図 2)

3D-CT(東芝メディカルシステムズ株式会社製 Alexion Advance Edition)を用い頭部の CT 撮影を行い、Dicom データを得た。歯列模型を 3D スキャナー C-Pro デンタルシステム (Panasonic 社) を用い計測し、STL データを得た。プログラミングランゲージ Visual C++ により独自に開発した包括的三次元診断システム ManMoS<sup>4, 21-22)</sup> を用い、Dicom データより顎顔面骨格モデル (以下、CT モデル) と、STL データより歯列表面形状モデル (以下、STL モデル) を同一仮想空間上に再構築した。

CT モデルの歯列歯冠部のうち Metal Artifact による画質低下が認められない領域を選択し、次いで STL モデルより対応領域を切り出した。切り出した STL モデルの対応領域を移動し、

顎顔面骨格モデル歯冠部の選択領域に重ね合わせた。重ね合わせには、特徴点を用いない局所的な位置合わせ法である Iterative Closest Point Alignment (ICP)法を用い、重ね合わせ移動のアフィン変換マトリックスを取得した (図3)。STL モデル全体をアフィン変換することで、CT モデルの歯列を STL モデルと置換し、歯列骨格統合モデルを作製した (図2)。

## 2. 基準系の設定

### 1) 頭蓋基準座標系の設定 (図4) ;

頭蓋に対する上下の顎骨および歯列の三次元的形態と対称性を評価する目的で、頭蓋基準座標系を設定した。

頭蓋モデルの眼窩領域を選択し、左右の眼窩および周囲骨の形態が鏡面像として最も適合するように正中矢状面を決定した。鼻骨前頭縫合と正中矢状面上の交点を Nasion とし、頭蓋座標系の原点とし設定した。また正中矢状面に直交する水平面は、原点を通り眼窩下点と外耳道上縁点それぞれの中点を結ぶ直線と平行になるよう設定した。原点を通り、矢状面および水平面と直交する平面を前頭面とした。

### 2) 下顎基準局所座標系の設定 (図5) ;

下顎骨を下方から観察すると、下顎下縁部はアーチ形状を呈しており下顎下縁弓と呼ばれる。下顎の非対称を呈する症例は、下顎下縁弓が対称になるよう改善することが望ましいと考えられる。頭蓋基準座標系において下顎下縁弓の対称性を評価する一方、この下顎下縁



弓を参照することで下顎の局所座標系を設定し、下顎歯列の対称性を評価した。

下顎モデル上でオトガイ正中 Menton を正中点とし、下顎下縁に沿って左右の Gonion を含む計 11 点を計測した。先行研究で歯列弓と歯槽基底弓の形態評価のため、近似曲線を求める方法を報告した。本研究でも同様の手法により、下顎下縁上の計測点を参照し最適近似曲線を求め、基準系の設定および評価に利用した。具体的手法を以下に示す。

- ① 下顎下縁上の 11 計測点を参照し、最適平面を下顎下縁平面とし設定した。
- ② 下顎下縁上の計測点を、下顎下縁平面上に投影した。
- ③ 下顎下縁平面上で、Menton を正中点とした 11 計測点の投影点を参照し、四次の最適近似曲線を下顎下縁弓として求めた。
- ④ 下顎下縁平面上で下顎下縁弓が Menton を原点とし対称に位置付けられるよう XY 平面を決定し、これと垂直になるよう Z 軸を設定することで、下顎の局所座標系を設定した。

### 3. 歯列骨格統合モデルを用いた計測項目

#### 1) 頭蓋基準座標系の計測項目 (図 6、図 7、図 8)

- (1) オトガイ偏位量；正中矢状平面から Menton の側方偏位量を MLD (mm) として求めた。
- (2) 歯列正中偏位量；上下顎の両側中切歯近心コンタクトポイントの中点を歯列正中点とし、正中矢状面に対する側方偏位量をそれぞれ上顎歯列正中偏位量 U-Mid (mm) と下顎歯列正中偏位量 L-Mid (mm) として求めた (+ ; 左方偏位)。

- (3) 正面咬合平面傾斜角；左右の上顎第一大臼歯中央窩を結ぶ直線が水平面と成す角度を U-FOP-global (deg.) として求めた。
- (4) 上顎歯列弓幅径の左右差；上顎第一大臼歯中央窩から正中矢状平面に下した垂線の足の長さを上顎歯列弓幅径とし両側で計測し、その左右差を UM1W-RL (mm) とし求めた (+ ; 左側がより大) 。
- (5) 下顎枝高径の左右差；下顎頭最上方点から Gonion 点までの距離を下顎枝高径とし計測し、その左右差を RamH-RL (mm) とし求めた (+ ; 左側が大) 。
- (6) 下顎枝傾斜角；咬合平面の高さで計測した下顎枝の前縁点と後縁点および下顎切痕最深点の三点からなる平面を、下顎枝平面として定義する。下顎枝平面の法線が正中矢状面と成す角を前頭面および水平面それぞれにおいて下顎枝前頭面傾斜角と下顎枝水平面傾斜角として算出し、それぞれの左右差を RamI-F-RL (deg.) と RamI-H-RL (deg.) とし求めた (+ ; 右側が大) 。
- (7) 下顎下縁弓の回転角；下顎下縁弓の前頭面における回転角、水平面における回転角を、それぞれ Roll (deg.) と Azimuth (deg.) とし求めた (+ ; 反時計回り回転) 。

## 2) 下顎基準局所座標系の計測項目 (図9)

- (1) 正面咬合平面傾斜角；左右の下顎第一大臼歯中央咬頭頂を結ぶ直線が、水平面と成す角度を L-FOP-local (deg.) として求めた。

- (2) 下顎中切歯の近遠心傾斜角；下顎中切歯切縁の近遠心点の midpoint と歯頸部の近遠心点の midpoint を結ぶ直線が、下顎基準局所座標正中基準面と成す角度を L1-I (deg.) を求めた (+ ; 左方傾斜)。
- (3) 歯列正中偏位量；下顎歯列正中心の正中矢状面に対する側方偏位量を、L-Mid-Local (mm) とし求めた (+ ; 左方偏位)。
- (4) 下顎歯列弓幅径の左右差；下顎第一大臼歯中央咬頭頂から正中矢状平面に下した垂線の足の長さを下顎歯列弓幅径とし両側で計測し、その左右差を LM1W-RL (mm) とし求めた (+ ; 左側がより大)。
- (5) 下顎第一大臼歯の咬合面展開角の左右差；下顎第一大臼歯の頬側中央咬頭頂と舌側近遠心咬頭頂の midpoint を結ぶ直線と下顎基準水平面との角度を咬合面展開角として算出し、その左右差を LM1-I-RL (deg.) とし求めた (+ ; 左側がより舌側傾斜)。

#### 4. 歯列骨格統合モデルの精度検定

歯列骨格統合モデルの作製、三次元形態分析に用いた分析システム全体の精度を検証する目的で、以下の検討を行った。

三次元スキャナーにて上顎歯列石膏模型を計測し、STL モデルを得た。精度検定の対象資料としアクリルボックス作製し、周囲に参照ブロックを配置し、中央に上顎歯列石膏模型を設置した (図 10a)。アクリルボックスを CT 撮影し、ManMoS により三次元構築した CT モデ

ルを得た。歯列骨格統合モデルの作製と同様の方法で、CT モデルの歯列部を STL モデルと置換し、統合モデルを作製した (図 1 0 b)。統合モデル上で計測座標系を設定し、任意に設定した歯列上の解剖的特徴点と参照ブロックの点間を計 30 ヶ所計測した。内訳は、X 軸、Y 軸、Z 軸に概ね平行な計測部位の、それぞれ 10 ヶ所であった。同一術者による距離計測を二回繰り返し、一回目と二回目の計測誤差を求めた。また一回目の計測データを、アクリルボックス上で計測した同一部位の実測値と比較し、本システムにおける計測と実測との誤差を求めた。

計測誤差の算出には、次に示す Dahlberg の公式 (1940)<sup>28)</sup> を用いた。

$$\text{Standard Error (SE)} = \sqrt{\sum d^2 / 2n} \quad (d: \text{計測値の差、} n: \text{症例数})$$

信頼度係数は Houston の公式 (1983)<sup>29)</sup> を用い計算した。

## 5. 統計解析

SPSS 21.0 を用い、顎骨と歯列の各計測項目間の回帰分析を行い相関係数の有意性を検討した。

### 【結果】

#### 1. システム全体の精度

30 か所の距離計測を行った結果、X 軸、Y 軸、Z 軸方向に計測誤差は少なく一回目、二回目の計測誤差は平均は 0.23(0.01~0.82)mm 標準偏差 0.20mm となり Standard Error は 0.22mm 信頼度係数 99.9%であった。計測値と実測値の差は平均 0.62mm で、標準偏差は 0.46 mm だった。Wilcoxon の符号付順位和検定の結果、両計測値に有意差は認められなかった。

(表 1)

## 2. 研究対象の形態的特徴

図 11a は、研究対象の形態的特徴を知る目的で、側面観において前頭面に対するオトガイの前後的偏位量を計測した結果である。平均値は 2.71 mm で -12.26 mm ~ 19.18 mm に分布していた。正常範囲を参照すると下顎の後退を示す骨格性Ⅱ級の症例も含まれているものの、約 12 はオトガイの前突を示す骨格性Ⅲ級症例であった。一方図 11b は、研究対象症例の正面観の対称性をオトガイの側方偏位量 MLD で評価したものである。顎変形症患者の中より MLD3.0 mm 以上のものが選択されたことが示され、平均 7.32mm で 3.40 ~ 15.27 mm と広く分布していた。

## 3. 頭蓋基準座標系の分析

歯列骨格統合モデルの頭蓋基準座標系において、オトガイの側方偏位量 MLD を基準に下顎骨の対称性を検討した (表 2)。

RamH-RL と MLD の関わりを検討すると、相関係数 $-0.88$  と高い有意な相関が示された ( $P < 0.01$ )。すなわち、下顎枝高径はオトガイの偏位側で反対側と比べ相対的に短小であった。また正中矢状面に対する下顎枝の傾斜角を前頭面と水平面について計測すると、RamI-F-RL は平均  $2.22$  度 ( $-8.82 \sim 11.09$  度+; 左方傾斜が大きい)、RamI-H-RL の平均値は  $0.97$ deg. ( $-6.9$ deg.  $\sim 9.88$ deg.) で、MLD との有意に高い相関が示された ( $p < 0.01$ )。すなわち、下顎枝平面はオトガイの偏位側が反対側と比べ、正面ではより下外方へ、水平面では前外方へ回転していることが示された (図 1 2)。

下顎基準局所座標系として設定した下顎下縁弓の、頭蓋基準における対称性を検討した。下顎下縁弓の前頭面および水平面における回転角 Roll と Azimuth は MLB と有意に高い相関を示し ( $p < 0.01$ )、それぞれ  $0.86$  と  $0.91$  であった (図 1 3)。このことはオトガイの偏位側に向かい下顎下縁弓が、前頭面では上方へと傾斜し、水平面において左方偏位では時計回り右方偏位では反時計回りに回転していたことを意味する。

頭蓋基準座標系において歯列弓の対称性を、オトガイの側方偏位量を基準に検討した (図 1 4)。L-Mid は MLD と  $r=0.95$  と高い相関を示し ( $p < 0.01$ )、下顎骨正中の偏位に伴い下顎歯列正中が偏位していることが示された。一方 U-Mid も MLD と  $r=0.57$  と中等度の有意な相関を示し、上顎歯列正中が下顎骨正中の側方偏位に追従し偏位していることが示された。

上顎歯列弓の非対称は臼歯部の幅径の左右差として認められ、UM1W-RL は MLD と有意に高い正の相関を示し ( $p < 0.01$ )、相関係数は  $r=0.79$  であった。すなわち、上顎臼歯部の幅径は

オトガイの側方偏位に伴い、偏位側と比べ反対側で狭窄していた。

正面咬合平面はオトガイの偏位方向に向かい上方傾斜しており、 $r=0.81$  と有意に高い相関を認めた ( $p < 0.01$ )。また下顎枝高径の左右差や下顎下縁弓の回転と深く関わっており、U-FOP-global は RamH-RL および Roll とそれぞれ  $r=0.81$ 、 $r=0.73$  と高い相関を示した ( $p < 0.01$ )。

#### 4. 下顎基準局所座標系の分析

下顎基準局所座標系における下顎歯列の対称性と、頭蓋基準における MLD との関わりを検討した (表 3)。

下顎基準局所座標系において、L-FOP-local は MLD と  $r=0.39$  で、頤の側方偏位との正面咬合平面の傾きに関係は示されなかった ( $p > 0.05$ )。一方 L1-I および L-Mid-local は MLD とそれぞれ  $r=-0.67$ 、 $r=-0.82$  と高い負の相関を示した ( $p < 0.01$ ) (図 1 5)。すなわち下顎中切歯の歯軸は下顎骨に対しオトガイの側方偏位とは反対方向に傾斜しており、それに伴い歯列正中が反対方向に偏位していた。

下顎基準局所座標系における歯列の非対称は、臼歯部の幅径の左右差として示された。

LM1W-RL と LM1-I-RL は MLD と高い負の相関を示し、相関係数は  $r=-0.78$  と  $r=0.60$  であった ( $p < 0.01$ ) (図 1 6)。このことは下顎基準局所座標系で見た下顎歯列弓幅径はオトガイの偏位側で狭窄していること、そしてオトガイ偏位側の大白歯が反対側と比べ舌側傾斜してい

ることを示していた。

## 【考察】

以前より我々は、複合現実感を伴う外科矯正手術シミュレーションシステム ManMoS を開発し、臨床応用してきた。ManMoS を用い骨切り術による顎変形の改善とそれに伴う咬合関係の変化をシミュレーションし、得られる三次元情報を矯正歯科医と外科医が共有することで、適確で安全な顎変形症治療が可能となる。

今回新たに歯列骨格統合モデルを作製し、従来の ManMoS に組み込んだ。ManMoS に融合可視化モデルを組み込むことで、これまで以上に手術シミュレーションの精度を高め、矯正歯科医と外科医のコミュニケーションツールとして有効に機能することと考えられる。三次元融合可視化モデルを用い顎骨と歯列の詳細な三次元分析を行うことは、臨床応用だけでなく、顎変形症患者における歯列、骨格の三次元的な変位の局在とその傾向を明確にし、顎変形症の診断と治療における極めて重要な基礎データを提供すると考えられる。

歯列骨格統合モデルについて；

今回の歯列骨格統合モデルの精度検定により、歯列骨格統合モデルが三次元形態の計測に、臨床上十分な精度を有していると考えられる。

本研究では、CT モデル上に歯列 STL モデルを ICP 法により重ね合わせることで、歯列骨格統合モデルを得た。CT により得られる三次元情報は、顎変形症の診断およびシミュレーシ



ョンに有益な情報を提供し、外科矯正治療において欠かせないものとなっている。しかしながら歯列に金属の修復補綴物が多い症例では、metal artifact による画質の低下が認められる。歯列を含めた顔面骨格の三次元診断をするためには、CT metal artifact への対応が求められることより、CT モデルの歯列部を STL モデルにより置換した。理論上は、metal artifact が少なく参照領域が広いほど高精度で置換できると考えられる。実際に参照領域の広さと置換精度との関わりを検討した結果(未発表データ)、前歯部のみ参照領域とした場合は臼歯部も含む場合と比較し、置換精度が劣ることが示唆されている。しかしながら、臨床的には前歯部と小臼歯部に数カ所 metal artifact がない参照領域があれば、十分な精度で歯列の置換が可能と考えられる。

分析座標系について；

対称性の診断では、分析座標系の設定が基本的に重要である。

頭蓋基準座標系として眼窩領域を参照し、左右をミラーリングさせ近似することで正中基準面を設定した。顔貌軟組織の対称性と正中基準との関わりを検討した報告<sup>27)</sup>では、瞳孔間線の参照が対称性の判断に重要であることが示された。実際の臨床での分析に際しては、正中基準面を決定後、顎関節や頬骨弓など左右の構造物、あるいは正中口蓋縫合や大後頭孔といった正中の構造物などが対称に位置付けられているかを確認して、その妥当性を判断している。我々は全ての顎変形症の診断に ManMoS を利用しており、今回の眼窩領域の参照は、

多くの診断において最も信頼できる方法と考えている。

下顎基準局所座標系について；

我々は顔面非対称例の診断を通し、顔面非対称は下顎骨側方偏位など下顎骨の非対称を主徴とし、下顎骨の非対称は下顎枝の非対称によると考えている。すなわち下顎枝の垂直的成長の左右差の結果として、歯列弓を含む下顎骨体部が三次元的に偏位していると考えられる。したがって、下顎骨の非対称の改善には顎矯正手術により下顎枝の非対称を改善することが重要であり、歯槽基底としての下顎骨体部を頭蓋に対し整位することが必要と考えている。今回設定した下顎下縁弓は歯槽基底としての下顎骨体部の形態を反映しており、下顎下縁弓を参照した基準設定は、下顎骨の非対称が主に下顎枝部にあり下顎下縁弓には顕著な非対称は認められないとの前提に立っている。下顎骨の手術に際し、頭蓋基準座標系により三次元的に偏位した下顎下縁弓を適確に診断すること、下顎下縁弓が整位されたとした場合に示される下顎歯列の非対称を明確化できる下顎基準局所座標系を設定し診断することが必要と考えられる顔面非対称例の下顎骨形態を肉眼的に観察した結果からも、下顎歯列の歯槽基底としての下顎骨体部には顕著な非対称は認められなかった。今後、下顎骨における非対称の局在をより客観的に三次元評価し下顎基準局所座標系としての下顎下縁弓の妥当性、意義に関して更なる検討を加えたいと考えている。

分析結果について；

顎変形症患者においての顔面非対称は、オトガイの側方的偏位により特徴づけられた。

オトガイの側方偏位は下顎枝高径の左右差と深く関わっており、片側の下顎枝の過成長（オトガイ偏位の反対側）あるいは劣成長（オトガイ偏位側）により下顎体部（下顎下縁弓相当）が三次元的に偏位し発現していると考察された。

下顎歯列正中はオトガイの側方偏位に伴い同方向へ偏位していることが頭蓋基準座標系により示された。一方下顎基準局所座標系では、下顎歯列正中はオトガイ偏位とは反対方向に偏位していた。頭蓋基準座標系で認められた歯列正中の側方偏位は顎変形により発現したものであり手手術で改善される非対称と考えられる。下顎基準局所座標系で認められた歯列正中の反対方向の偏位はデンタルコンペンセーションであり歯列矯正により改善すべき非対称と考えられる。

歯列弓幅径に関し、上顎は頭蓋座標系で、下顎は下顎基準局所座標系で検討した。オトガイの側方偏位に伴い下顎の歯列弓は偏位側で、上顎の歯列弓は反対側で狭窄が認められ、デンタルコンペンセーションと考えられた。また上顎歯列の非対称の一部は、上顎骨の下顎非対称に対する骨格的補償機構であると考察された。

今回のような歯列骨格統合モデルをコミュニケーションツールとして用い、外科医と矯正医が詳細な診断情報を共有できることは、外科矯正治療の発展に極めて有益であると考えられた。

## 【結論】

1. 歯列顎骨統合モデルを三次元形態分析することで、顎変形症の顔面非対称症例における顎骨と歯列の非対称を検討し、三次元的なデンタルコンペンセーションを解明し明確に判断できた。
2. 作製された歯列骨格統合モデルにより明瞭な画像を得ることで、正確な診断、シミュレーションが可能となった。
3. 三次元分析で示された歯列および骨格形態の結果より、顔面骨格の非対称が下顎骨の非対称により特徴付けられ、歯槽基底としての下顎体部に認められる非対称は下顎枝高径の成長の左右差により三次元的に回転偏位させられたものと解釈できた。
4. 下顎下縁弓を参照に設定した下顎基準局所座標系を利用することで、下顎歯列のデンタルコンペンセーションを適確に診断することができた。
5. 頭蓋基準座標系における上顎歯列の非対称、下顎基準局所座標系における下顎歯列の非対称は、矯正治療で改善すべきデンタルコンペンセーションと考えられる。

## 利益相反

本研究に関連して、申告すべき利益相反はない

神奈川歯科大学研究倫理審査委員会；承認番号：337号

## 文献

- 1) Proffit, Turvey TA. Contemporary treatment of dentofacial deformity. vol 1. Mosby  
St. Louis:574-644,
- 2) 梅森美嘉子, 菅原準二, 三谷英夫. 顎変形症治療アトラス. 医歯薬出版:71-98, 2001
- 3) 中村康宏, 橋本賢二, 上田吉生, 松下文彦, 鈴木浩之, 田中英俊, 竹内啓人, 福田廣志. 顎変形症の分類 (診断表記法) 橋本試案の評価. 日本顎変形症学会雑誌 4(1):37-41, 1994.
- 4) Fushima K, Kobayashi M, Konishi H, Minagichi K, Fukuchi T. Real-time orthognathic surgical simulation using a mandibular motion tracking system. Comput Aided Surg 12(2):91-104, 2007.
- 5) 不島健持, 小林 優, 久保田英朗, 佐藤貞雄. CT 三次元実体モデルおよび歯列模型三次元分析システムの併用による下顎骨切り術のシミュレーション. 日口診誌 13 (2) : 275-283, 2000.
- 6) Proffit WR, Sarver DM. Contemporary Treatment of Dentofacial Deformity. 1st Ed. Mosby. :172-244, 2003.
- 7) Proffit WR, White RP. Combining surgery and orthodontics Who does What When? In Proffit WR Contemporary Treatment of Dentofacial Deformity. 1st Ed. Mosby, St. Louis:245-267, 2003.

- 8) Kuitert R, et al. Dentoalveolar compensation in subjects with vertical skeletal dysplasia. *Am J Orthod Dentofacial Ortho*:649–657, 2006.
- 9) Beckmann, et al. Changes in alveolar morphology during open bite treatment and prediction of treatment result. *Eur J Orthod*. 24:391–406, 2002.
- 10) Knösel M, et al. A method for defining targets in contemporary incisor inclination correction. *Eur J Orthod*. 30: 374–380, 2008.
- 11) Ishikawa H, Nakamura S, Iwasaki H, Kitazawa S, Tsukada H, Sato Y. Dentoalveolar compensation related to variations in sagittal jaw relationships. *The Angle Orthodontist* . Vol. 69 . No. 6:534–538, 1999.
- 12) Fushima K, Odaira Y, Saito N, Tsurumi F, Sato S. Dental asymmetry in facial asymmetry. *Bull Kanagawa Dent Col*. 26:15–2, 1998.
- 13) Bell WH, Jacobs JD. Mandibular excess with vertical maxillary excess or deficiency. W. B. Saunders. Philadelphia:107–152, 1985.
- 14) Severt TR, Proffit WR. The prevalence of facial asymmetry in the dentofacial deformities population at the University of North Carolina. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg*. 12(3) :171–176, 1997.
- 15) Saito N, Kobayashi M, Fushima K. Skeletal and dental asymmetry in orthognathic case in Japan. *Bull Kanagawa Dent Col*. 37:19–30, 2009.

- 16) Tsurumi F, Takagi H, Fushima K. A multivariate analysis for classification of craniofacial morphology in facial asymmetry. Bull Kanagawa Dent Col. 28:15-27, 2000.
- 17) Fushima K, et al. Significant of the cant of the posterior occlusal plane in class II division 1 malocclusions. European Journal of Orthodontics 18:27-40, 1996.
- 18) Fushima K, Akimoto S, Takamoto K, Kamei T, Sato S, Suzuki Y. Morphological feature and incidence of TMJ disorders in mandibular lateral displacement cases. J Jpn Orthod Soc. 48:322-328, 1989.
- 19) Hall HD. Facial asymmetry In Bell WH Surgical correction of dentofacial deformities New Concepts. Vol. III 1st Ed:153-168, 1985.
- 20) Proffit WR, White RP. Combining surgery and orthodontics Who does What When? In Proffit WR Contemporary Treatment of Dentofacial Deformity. 1st Ed. Mosby, St. Louis:245-267, 2003.
- 21) Minaguchi K, Fushima K, Kobayashi M. Measurement error in a newly developed mandibular motion tracking system. Bull Kanagawa Dent Col. 35: 129-137, 2007.
- 22) Fushima K, Kobayashi M. Mixed surgical simulation for orthognathic surgery. Maxillofacial Plastic and Reconstructive Surgery. 38:13, 2016.

- 23) 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. 日本顎変形症学会雑誌. 23 No. 1:15-24, 2013.
- 24) Arnett GW, Tamborello JA, Rathbone JA. Temporomandibular joint ramifications of orthognathic surgery In Bell WH (ed) Modern practice in orthognathic and reconstructive surgery vol 1. WB Saunders:522-593, 1992.
- 25) 布留川創, 本橋信義, 黒田敬之, 誉田栄一, 佐々木武仁. 顎矯正手術のコンピューターシミュレーションのための三次元情報統合システム. 日本顎変形症学会雑誌. 10 No. 3:281-289, 2000.
- 26) 三條恵介, 大塚雄一郎, 品川令, 富田至保, 箕田碧, 長谷川尚哉, 須田直人. 精度の高い歯列画像を有する三次元顎顔面頭蓋画像の再構成. 日本顎変形症学会雑誌. 25 No. 3:207-217, 2015.
- 27) 西山眞名民, 不島健持, 佐藤貞雄. 骨格性下顎前突 症患者的顔面非対称に関する検討-主観的評価と客観的評価との関連性. 日本顎変形症雑誌. 15:8-20, 2005.
- 28) Dahlberg A. Statistical methods for medical and biological students. Interscience NewYork:1940.
- 29) W. J. B. Houston, F. D. S. R. C. S. The analysis of errors in orthodontic measurements. Am J Ortho London:382-390, 1983.



## 付図説明

### 表 1

歯列骨格統合モデル、三次元形態分析に用いた分析システム全体の精度検定結果

30 か所の距離計測では計測誤差、Standard Error、信頼度係数を求めた。

計測値と実測値の差は Wilcoxon の符号付順位和検定を用い有意差を求めた

### 表 2

頭蓋基準の分析-

オトガイの側方偏位量 MLD を基準に下顎骨の対称性を検討し相関係数を求めた。

### 表 3

下顎局所基準の分析-

下顎下縁弓基準系における下顎歯列の対称性と、頭蓋基準における MLD との関わりを検討し

相関係数を求めた。

頭蓋基準の分析-

歯列骨格統合モデルの頭蓋基準系において、オトガイの側方偏位量 MLD を基準に下顎骨の対称性を検討し相関係数を求めた。

## 図 1

骨格性Ⅲ級治療例 側面頭部 X 線規格写真および口腔内所見

### a. 初診時初見

標準テンプレート（黄色線）を参照すると、下顎骨の前突に対し下顎前歯が強く舌側傾斜しており、Ⅲ級のデンタルコンペンセーションとして認識される。

### b. 動的治療終了時初見

下顎骨の前突の改善と下顎前歯の唇側傾斜（デコンペンセーション）が達成された。

## 図 2

歯列顎骨統合モデルの作製

CT モデルの歯列を STL モデルと置換し、歯列骨格統合モデルを作製した。

歯列部の置換には、特徴点を用いない局所的な位置合わせ法である ICP 法を用いた。

## 図 3

Metal Artifact への対応

a. 上顎咬合面写真所見：歯冠修復物が多い症例

b. 同症例の CT モデル：Metal Artifact により歯列部の画質が大きく損なわれている。前歯部の一部の画質低下が見られない領域を抽出した。

c. STL モデル：CT モデルより抽出した領域の対応部位を、STL モデル上で参照。

d. ICP 法により、CT モデルの歯列を STL モデルと置換した。

#### 図 4

頭蓋基準座標系の設定；

頭蓋モデルの眼窩領域を選択し、左右の眼窩および周囲骨の形態が鏡面像として最も適合するように正中矢状面を決定した。鼻骨前頭縫合と正中矢状面上の交点を Nasion とし、頭蓋座標系の原点とし設定した。また正中矢状面に直交する水平面は、原点を通り眼窩下点と外耳道上縁点それぞれの中点を結ぶ直線と平行になるよう設定した。原点を通り、矢状面および水平面と直交する平面を前頭面とした。

#### 図 5

下顎基準局所座標系の設定；

下顎下縁上の 11 計測点を参照し、最適平面を下顎下縁平面とし設定した。下顎下縁上の計測点を、下顎下縁平面上に投影した。下顎下縁平面上で、Menton を正中点とした 11 計測点の投影点を参照し、四次の最適近似曲線を下顎下縁弓として求めた。下顎下縁平面上で下顎下縁弓が Menton を原点とし対称に位置付けられるよう XY 平面を決定し、これと垂直になるよう Z 軸を設定することで、下顎の局所座標系を設定した。

図 6

頭蓋基準座標系の計測項目；

- ① MLD (mm) : 正中矢状平面から Menton の側方偏位量
- ② U-Mid (mm) : 上顎歯列正中偏位量
- ③ L-Mid (mm) : 下顎歯列正中偏位量
- ④ U-FOP-global (deg.) : 正面咬合平面傾斜角
- ⑤ UM1W-RL (mm) : 上顎歯列弓幅径の左右差

図 7

頭蓋基準座標系の計測項目；

- a. RamH-RL: 下顎枝高径の左右差
- b. RamI-F-RL (deg.) : 前頭面下顎枝傾斜角
- RamI-H-RL (deg.) : 水平面下顎枝傾斜角

図 8

- a. Roll (deg.) : 前頭面下顎下縁弓の回転角
- b. Azimuth (deg.) : 横断面下顎下縁弓の回転角

図 9

下顎基準局所座標系の計測項目；

- a. ①L-FOP-local (deg.) : 正面咬合平面傾斜角
- ②L1-I (deg.) : 下顎中切歯の近遠心傾斜角
- ③L-Mid-Local (mm) : 歯列正中偏位量
- b. ④LM1W-RL (mm) : 下顎歯列弓幅径の左右差
- c. ⑤LM1-I-RL (deg.) : 下顎第一大臼歯の咬合面展開角の左右差

図 10

- a. 周囲に参照ブロックを配置し、中央に上顎歯列石膏模型を設置したアクリルボックス
- X 軸、Y 軸、Z 軸を設定し計測
- b. アクリルボックスを CT 撮影を行い、ManMoS により三次元構築し、CT モデルの歯列部を STL モデルと置換した統合モデル

図 11

- a. 側面観において前頭面に対するオトガイの前后的偏位量
- b. 正面観の対称性をオトガイの側方偏位量(MLD)

図 12

下顎枝の対称性

- a. 下顎枝高径の左右差：オトガイの側方偏位（MLD）が大きいほどオトガイ偏位側の下顎枝が反対側よりも短小となっていた。
- b. 下顎枝傾斜角の左右差：MLD が大きいほど、偏位側の下顎枝平面は下外方および前外方回転を示した。

図 13

下顎下縁弓の回転角

頭蓋基準座標系において前頭面、水平面においてオトガイ偏位側に向かい偏位側に回転していた。

図 14

頭蓋基準座標系における歯系の対称性分析

- a. 正面咬合平面の傾斜角

FOP はオトガイの偏位側に向かい上方傾斜していた。

- b. 上下歯列正中の側方偏位量

U-Mid, L-Mid はオトガイの偏位側と同側に偏位していた。

## 図 15

下顎基準局所座標系における下顎前歯の対称性

### a. MLD と L1-Mid-local の相関関係

下顎基準局所座標系ではオトガイ偏位側に向かい反対側に偏位していた

### b. MLD と L1-I の相関関係

下顎基準局所座標系ではオトガイ偏位側に向かい反対側に下顎前歯が傾斜していた。

## 図 16

下顎基準局所座標系における大白歯幅径の対称性

### a. LM1W-RL と MLD の相関関係

下顎基準局所座標系ではオトガイ偏位側の大臼歯部幅径が狭窄していることが示された

### b. LM1-I-RL と MLD の相関関係

下顎基準局所座標系ではオトガイ偏位側の大臼歯が舌側傾斜していることが示された

表 1

Measurement	1回目と2回目の計測(diff-average)	SE	信頼度係数(%)
X軸(n=10)	0.20	0.10	99.98
Y軸(n=10)	0.31	0.11	99.52
Z軸(n=10)	0.19	0.08	99.98
All(n=30)	0.23	0.22	99.98

Measurement	計測値と実測値の(diff-average)	SE	信頼度係数(%)
X軸(n=10)	0.53	0.25	99.93
Y軸(n=10)	0.49	0.27	99.18
Z軸(n=10)	0.87	0.40	99.79
All(n=30)	0.63	0.54	99.96



表 2

	MLD	RamH-RL	Raml-F-RL	Raml-H-RL	Azimuth	Roll
MLD	1					
RamH-RL	-0.88 ***	1				
Raml-F-RL	0.84 ***	-0.70 ***	1			
Raml-H-RL	0.86 ***	-0.77 ***	0.89 ***	1		
Azimuth	0.91 ***	-0.88 ***	0.85 ***	0.82 ***	1	
Roll	0.86 ***	-0.8 ***	0.58 **	0.70 ***	0.71 ***	1

\*: P<0.05

\*\* : P<0.01

\*\*\* : P<0.001

表 3

	MLD	L- FOP- local	L-Mid-local	L1-I	LM1-RL	LM1-I-RL
MLD	1					
L-FOP-local	-0.39	1				
L-Mid-local	0.82 ** *	0.3	1			
L1-I	0.66 ** *	-0.09	-0.67 ***	1		
LM1-RL	0.78 ** *	-0.39	-0.82 ***	0.67 ***	1	
LM1-I-RL	0.6 **	-0.01	-0.51 *	0.53 **	0.65 ***	1

\*: P<0.05    \*\*: P<0.01    \*\*\*: P<0.001

图 1

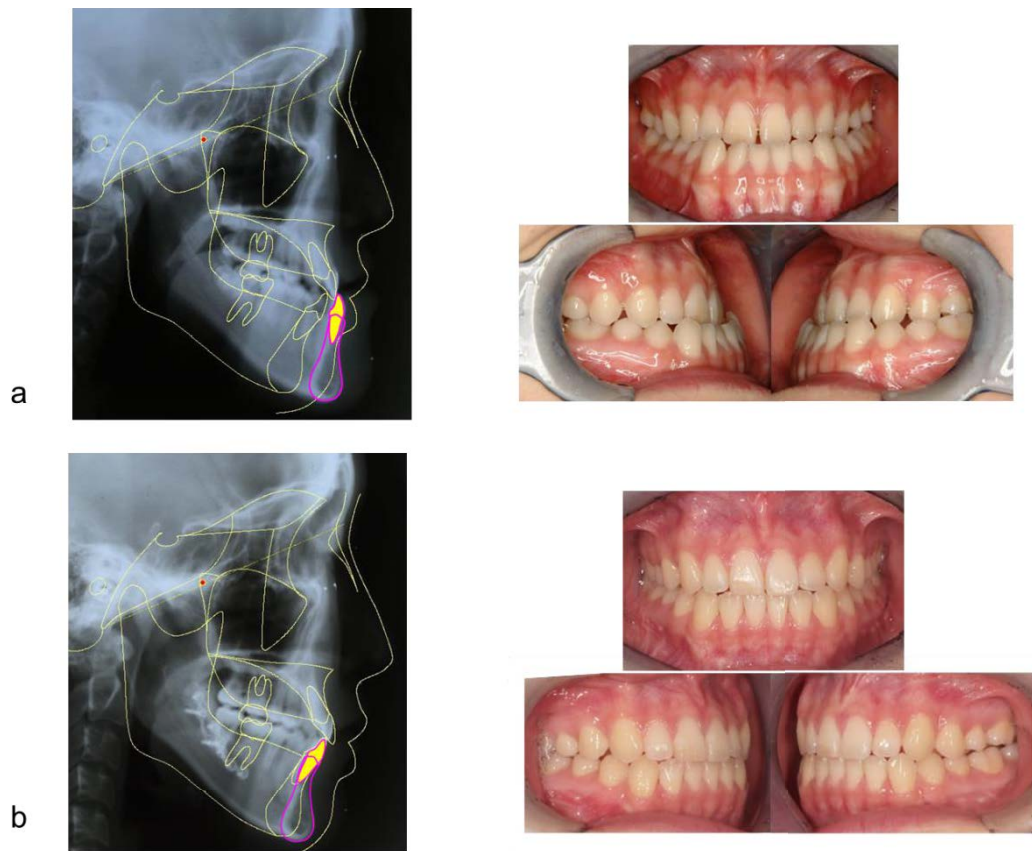


图 2

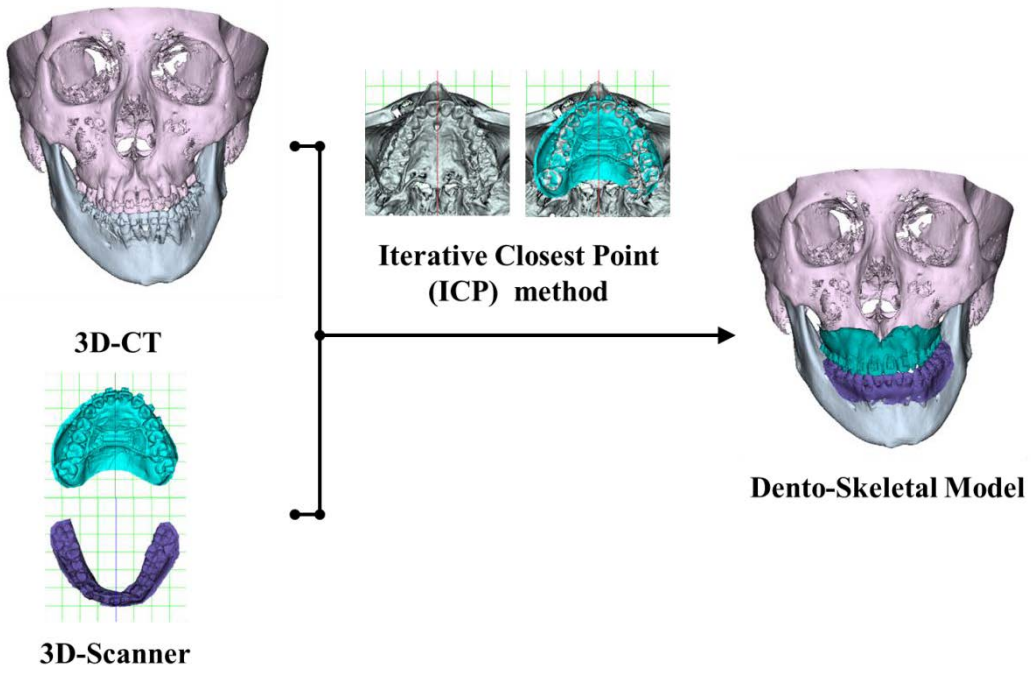
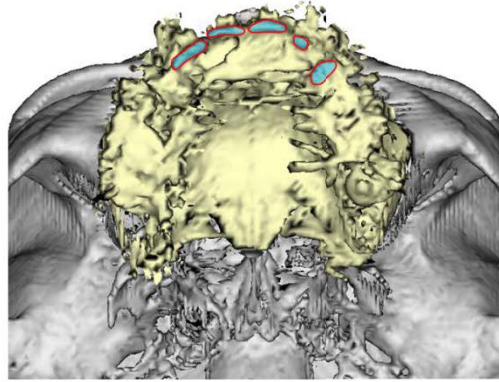


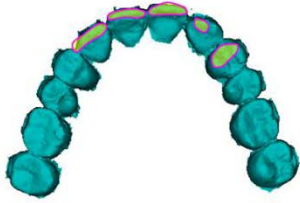
图 3



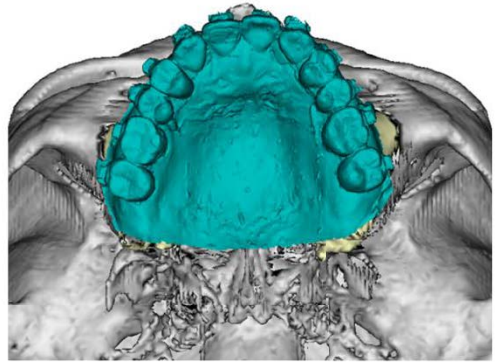
a



b



c



d

图 4

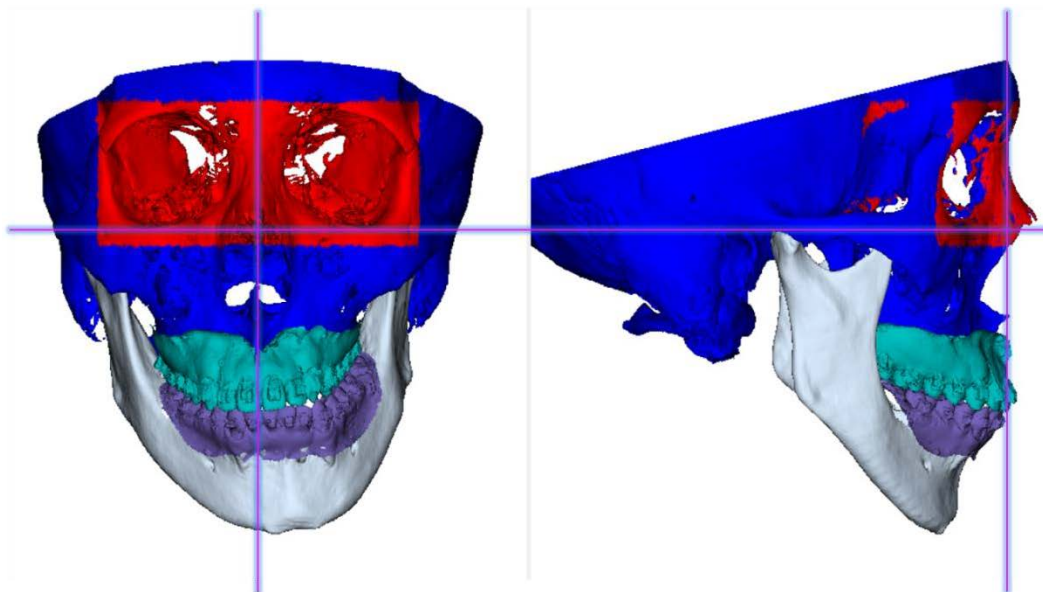


图 5

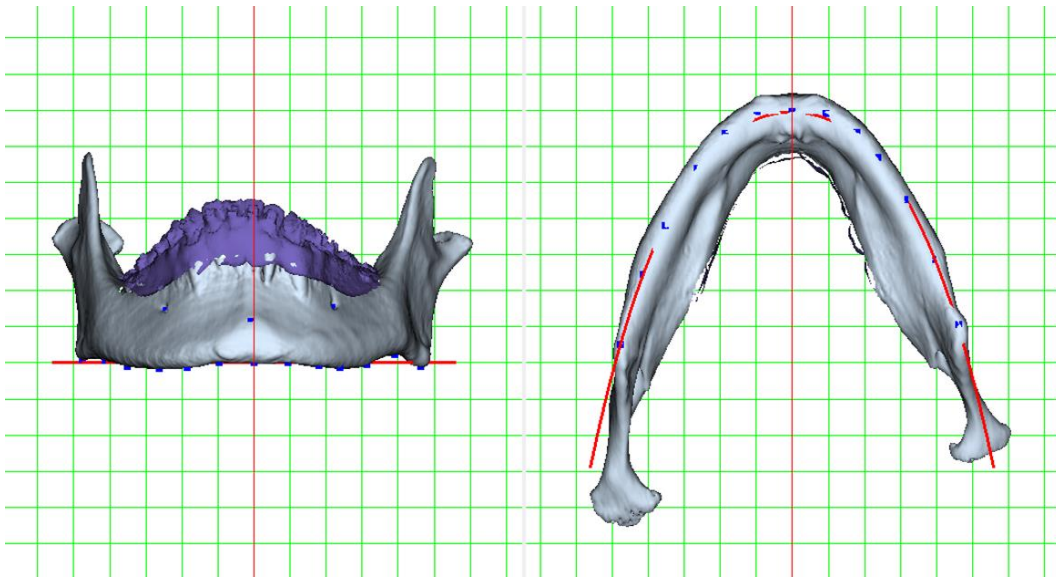


图 6

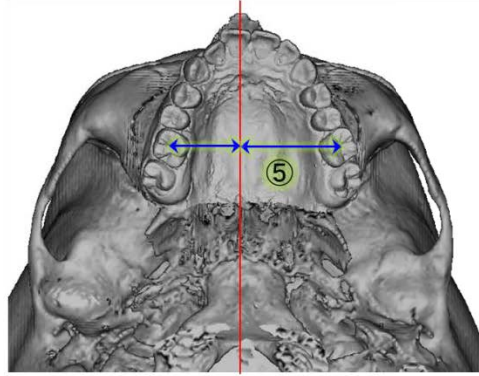
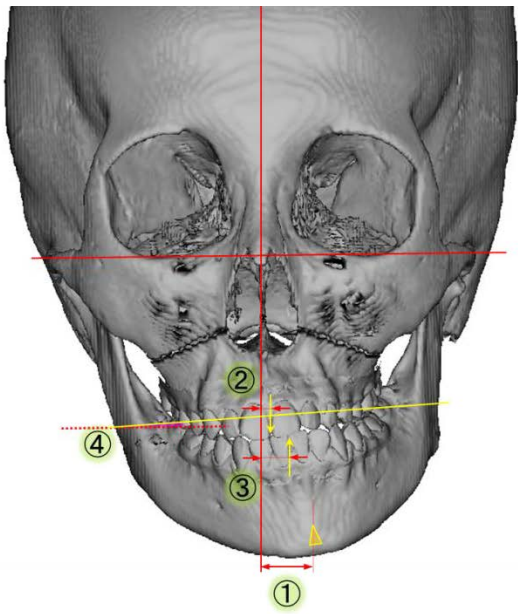




图 7

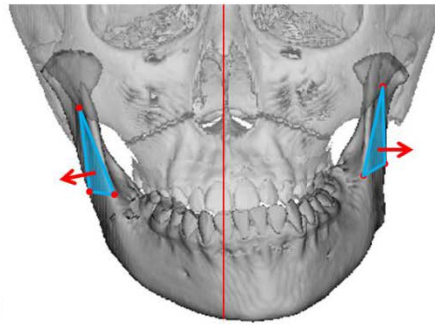
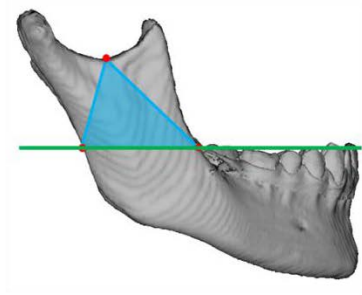
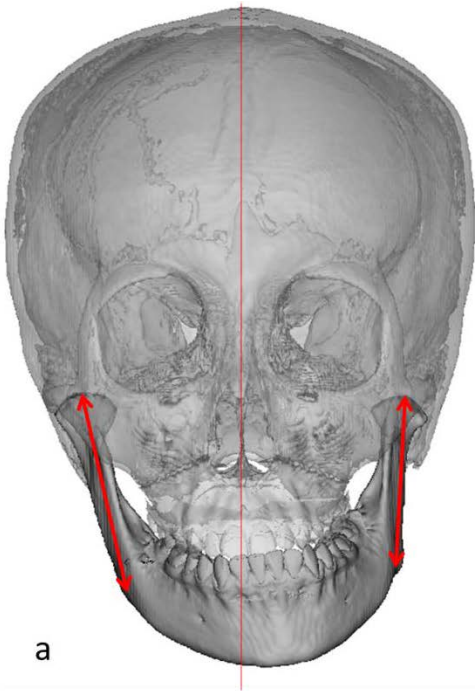
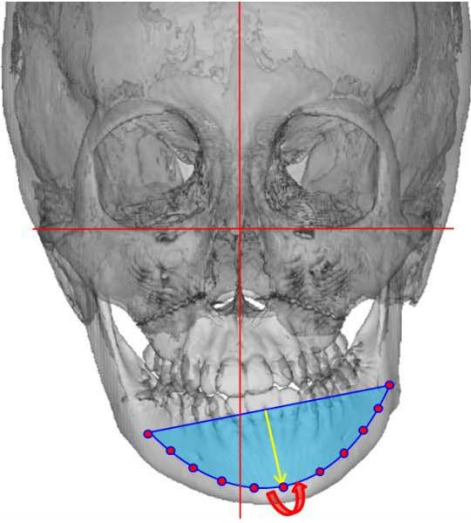
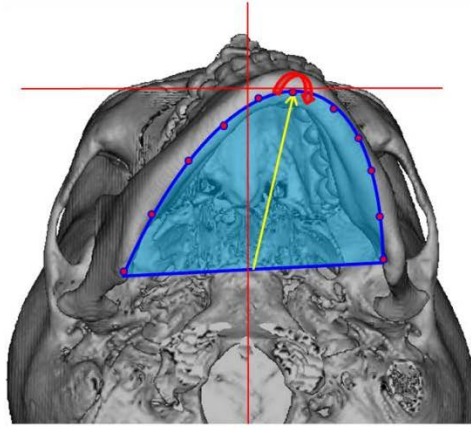


图 8



a



b

图 9

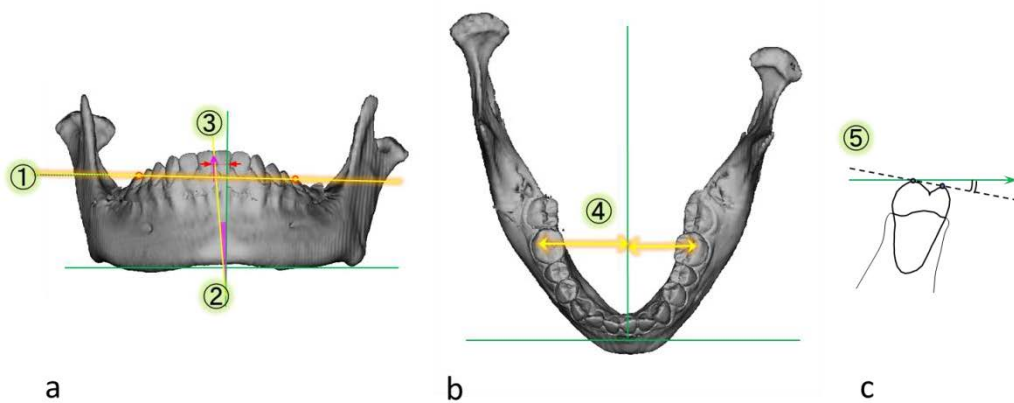
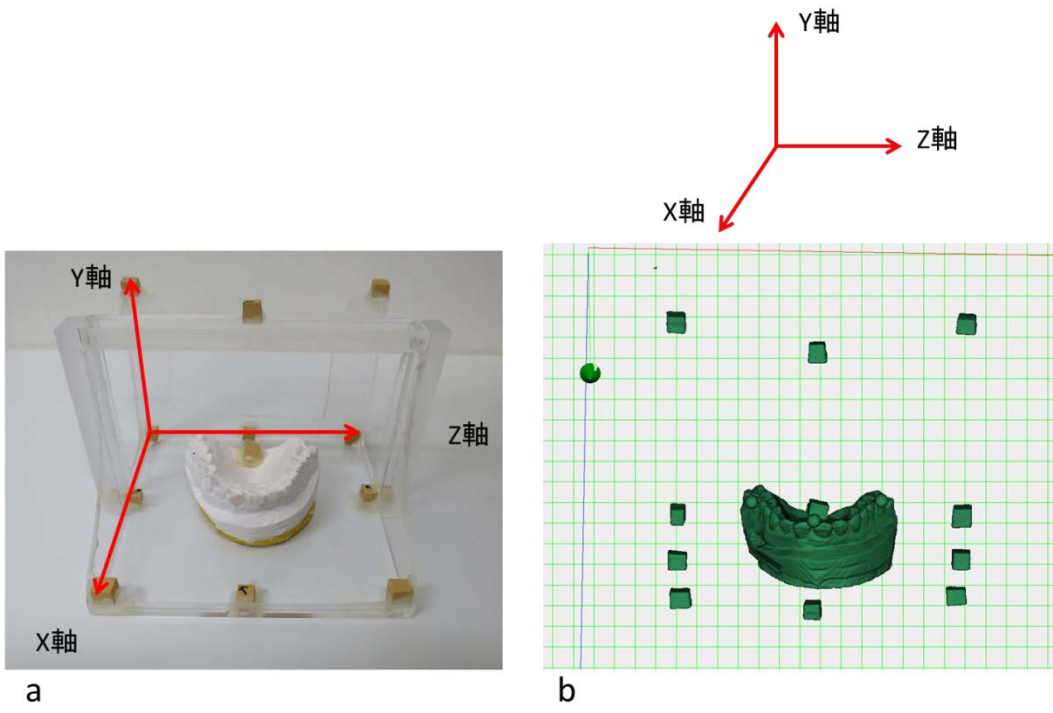
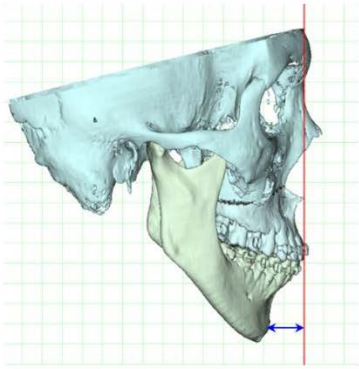
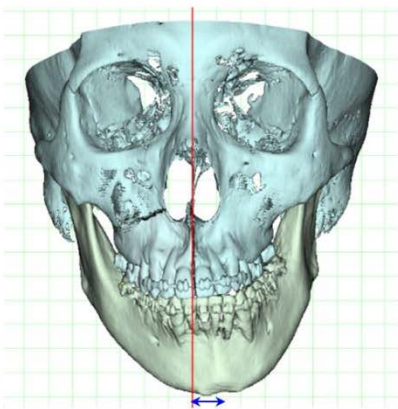
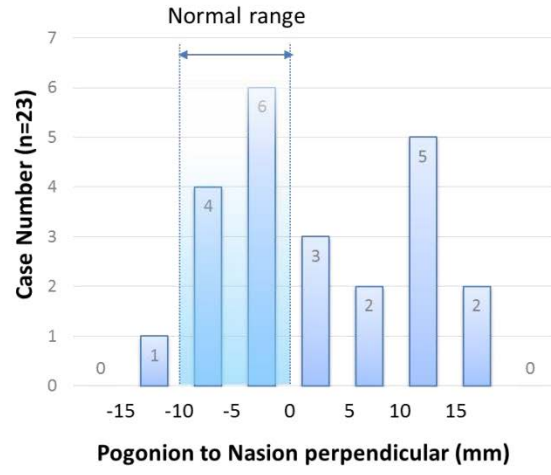


図 10

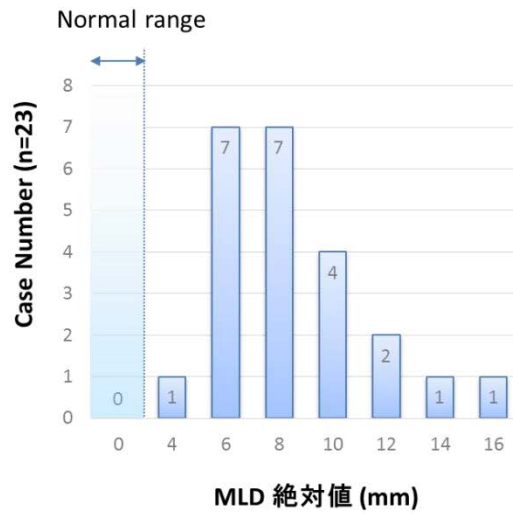


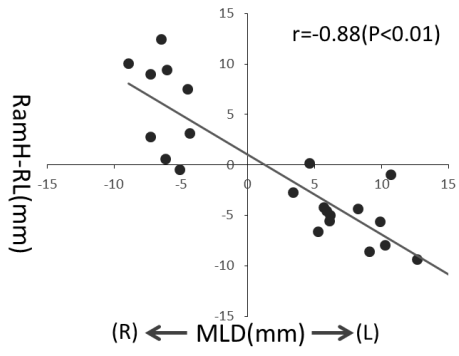


a

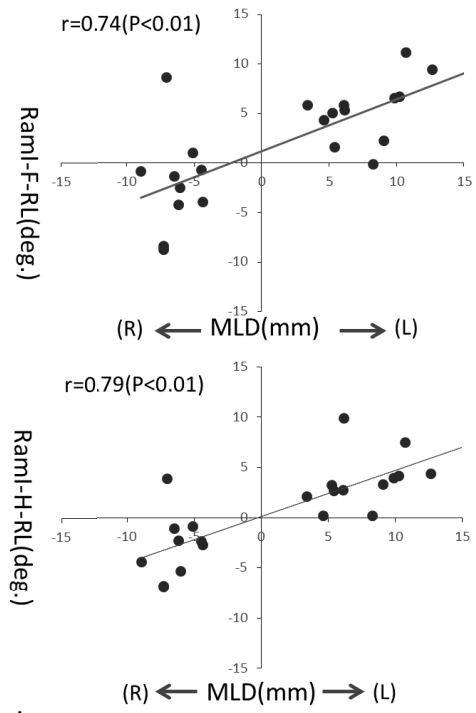


b



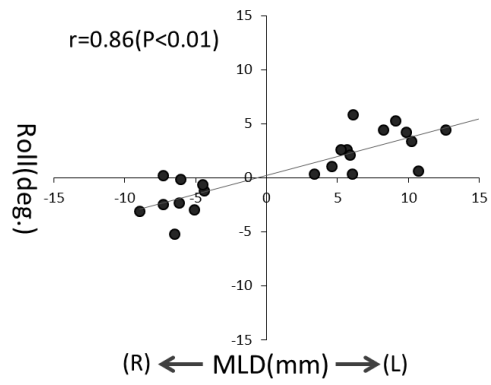
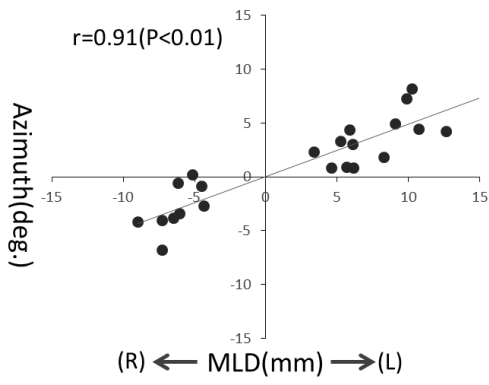


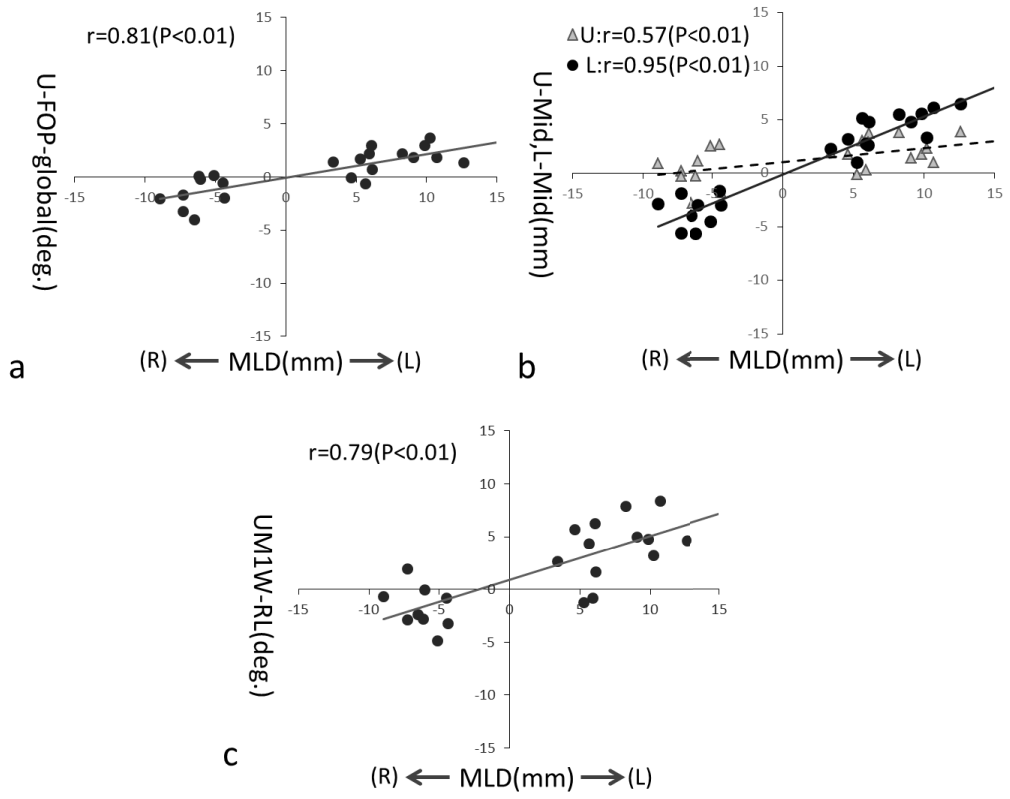
a



b

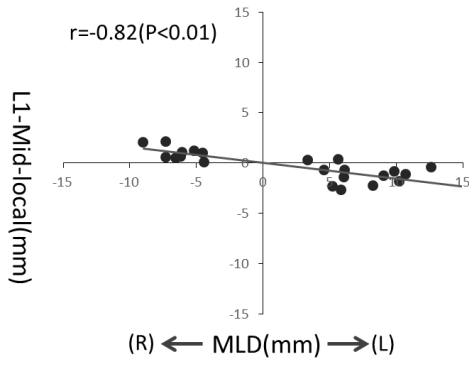
☒ 13



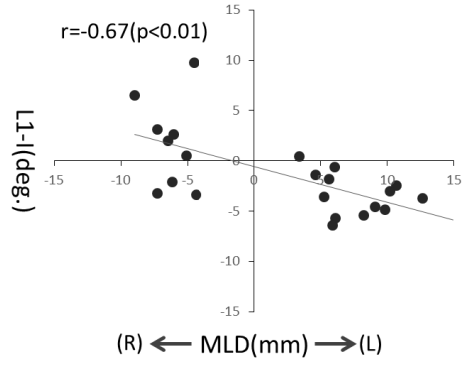




☒ 15

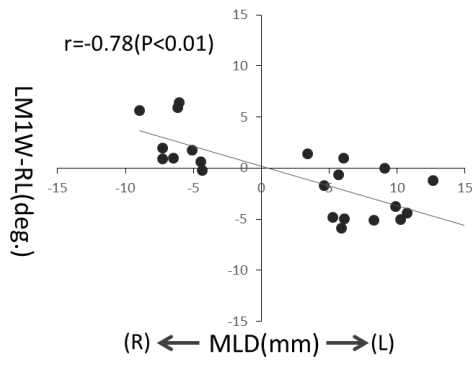


a

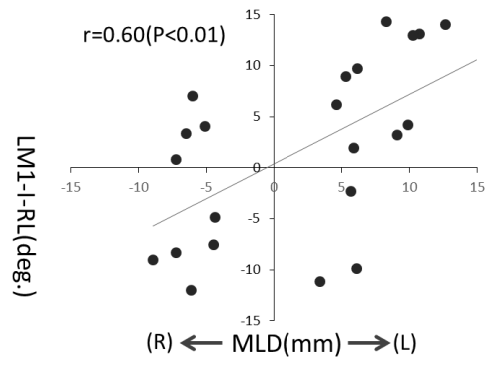


b

☒ 16



a



b