

三次元 MRI 画像を用いたセファロ分析の研究  
田井 尚子

Cephalometric assessment produced by 3-Dimensional magnetic resonance  
imaging of maxillo-facial structure

Hisako Tai

(平成 24 年 12 月 14 日受付)

岡山大学大学院医歯薬学総合研究科顎口腔再建外科学分野専攻  
(主任：飯田征二教授)

## 緒言

近年の放射線医療ならびにコンピュータ技術のめまぐるしい進歩により、放射線画像診断の領域の著しい発展が図られ、特に三次元コンピュータ断層撮影法(以下 3DCT)の開発は、多くの診療の現場において実態像が視覚化されたことから治療の面においても画期的な貢献をもたらした<sup>1,2)</sup>。複雑な顎顔面の形態評価を行う矯正歯科の領域においても、顎顔面骨の詳細な評価が可能となり、さらに、近年の診療室単位で使用できる歯科用のコーンビーム CT(以下、CBCT)の普及が、矯正歯科領域を含めた歯科領域での三次元評価の一般化に拍車をかけている。

当然のことながら、このような流れから矯正領域での 3DCT 画像を用いて、従来の頭部 X線規格写真(以下セファロ)と同様に顎顔面の形態を分析する報告はなされてきているが<sup>3)</sup>、いまだ体系的な方法は確立されていないのが現状である。その要因として、三次元的な計測点の設定の困難さのほか、放射線被曝の問題がある。とくに、成長期においてはその有益性については疑問があるところであり、いまだデータベース化が困難である。そのため、簡便かつ、十分なデータベースを有し、経年的変化の把握、評価が行え、顎顔面の成長、矯正治療における変化を分析するためには従来型二次元セファロは、最も安定した方法と考えられ、いまだに矯正歯科の分析の主流として君臨している。

一方、放射線被曝がなく三次元的に生体を観察する手法として、磁気共鳴撮像法(以下 MRI)がある。本画像検査法は軟組織の性状をも視覚的に描出と診断ができ、極めて多くの疾患や生体の変化に関わる情報が得られ、医療上欠くことできない検査法である。しかしながら、硬組織の描出が困難であることから、歯科領域での有用性については限られている。

そこで我々は、安全面を重視した立場で、硬組織の形態評価への MRI の応用の可能性を検討し、MRI データから硬組織情報を選択的に取り出す方法ならびに三次元的に硬組織画像を構築する手技を確立した<sup>4)</sup>。本方法での硬組織画像は、CT の様な明瞭な三次元像を作成することは困難であったが、構築像を二次元的に投影することにより、単純撮影レントゲン写真と同様な画像が作成でき、本画像において矯正歯科領域で成長評価を行う上で用いられているセファロ計測点のいくつかの計測点が描出は可能であるとの結論を得た<sup>4)</sup>。このことから、軟組織の性状や形態に関わる多くの情報を有する MRI データから、顎骨の成長評価を行うデータを抽出できる可能性が示唆され、さらには顎骨形態の検査法としての MRI の可能性が示唆された。

そこで、本研究では、MRI を顎骨の形態の検査方法として確立すべく、MRI から得られた硬組織像におけるセファロ測定点の描出手法の確立、ならびにそれら方法で得られたセファロ測定点の精度について検討した。また、微細な変化を示す成長期の患者に対しての有用性について検討を行った。

## 材料と方法

### 研究1： MRIの顎骨投影画像を用いたセファロ分析評価の精度

#### 研究対象

日本人成人6名（男性3名、女性3名、平均26歳4カ月）より得られた従来型側面セファロとMRIデータより得られた側面セファロ画像を用いた。

MRIの側面セファロ画像はMRI輪郭強調法で得られたsurface renderingに対して、Volume-Rugle (Medic Engineering、京都)、MicroAVS (Cybernet system(株)、東京)ソフトウェアにて作成した。セファロ計測点のプロテイングは5年以上のQuick Ceph Systems (Quick Ceph Systems, Inc. サンディエゴ、アメリカ)の使用経験を有する3名の矯正歯科医によって、マニュアル<sup>5)</sup>に従い行った。計測点間の角度計測と線計測は本ソフトウェアにより自動的に行った。同時期に撮影された従来の側面セファロに関しても、本ソフトウェアにより自動的に計測値を求め、両者を比較検討した。なお、本研究は、岡山大学疫学倫理委員会（承認番号#910）の承認を得ている。

#### 撮影装置と撮影条件

撮影には、Cephalometric X-Ray (Panoura 12, ヨシダ(株)、東京)ならびにMRI (1.5T Magnetom Vision、シーメンス社、ドイツ)を用いた。

#### 撮影条件：

**セファロ：**患者の体位は座位で、頭位はフランクフルト平面と床面が平行になるように設定し、咬合位は咬頭嵌合位とし撮影をおこなった。なお、管電圧は90kV、管電流は10mA、撮影時間は1.0sとした。

**MRI：**患者の体位は水平位で、頭位はフランクフルト平面と床面が垂直になるように設定し、咬合位は咬頭嵌合位とし、メーカー規定に従って撮影をおこなった。コイルはHeadNeck-coil、シーケンスはMP-RAGE (Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo) を使用し、矢状断のT1強調像を撮像した。撮像条件は、repetition time を97ms、echo time を4.0ms、inversion time を300ms、flip angle を12 degrees、slice thickness を1.0mmとした。

### 研究1-1 MRI投影画像のセファロ計測点の同定

#### (1) 硬組織輪郭強調法による透視投影画像の作成

MRI輪郭強調法については、Taiら<sup>6)</sup>の方法に準じて、Volume-Rugleを使用して、各スライスの画像をPC上により硬組織と空気、硬組織と軟組織の境界の閾値をもとに、硬組織の輪郭描出をほぼ自動で行った。硬組織の外形が明瞭に出ている断面において、硬組織を抽出するための濃度帯を決め、この濃度帯で全断面を2値化し、硬組織領域のボクセルを単一色で塗りつぶした。

その後、立体像全体に対して6方向(上下右左前後)に1ボクセル分の収縮を行い、その収縮した像を全体の像から消去し(画像的な引き算)、表層の1ボクセル残した像、すなわ

ち最外形を抽出し、surface rendering を得た。この立体像から側方への透視投影が従来のセファロ準じ、外耳道を基準に仮想イヤードを想定し、150 cm 離れた位置から透過投影することで、投影画像を作成した。以下、硬組織強調セファロ画像とした。

## (2) 軟組織輪郭強調法による透視投影画像の作成

硬組織輪郭強調法では描出が困難であった計測点を明瞭にするため、軟組織側から硬組織の表面を描出する方法、すなわち軟組織輪郭強調法を開発し、この方法で作成した三次元像を投影したセファロ画像（軟組織強調セファロ画像）にて計測点の同定を行った。

軟組織輪郭強調法は、硬組織の周囲軟組織の輪郭を上記手法と同様に閾値を設定して、表層の1ボクセル分を描出し、その画像全体6方向に1ボクセル分拡大することにより、軟組織と接する硬組織表面の外郭を描出するものである。(図1)。なお、硬組織と異なり、骨周囲の軟組織像の閾値は、異なるため、一定の閾値で全ての骨周囲軟組織の画像を取り出すことは困難であることから、画像抽出時の閾値を変えることによる計測点の判別変化を評価した。

## セファロ計測点の視覚判定評価

各投影セファロ画像において同定されたセファロ計測点の明瞭度については、十分確認ができた場合を3点、計測点自体がそれ自体が十分な明瞭度を有していないが、その計測点を同定するためにしばしば参照される周囲の解剖学的な構造体が明確に確認可能で、十分に計測点を判別できる場合を2点、ある程度確認できたが疑わしい場合、すなわち周囲の解剖学的な構造体も不明瞭である場合を1点、判別できないと判断した場合を0点の4段階として数値化して評価を行った。

## 研究1-2 MRI セファロと従来型セファロの精度の検証

上述の画像すなわち硬組織強調セファロ画像ならびに軟組織強調セファロ画像の2つの画像で描出した全てのセファロ計測点を1つの画像に展開して作成した側面画像をMRIセファロ画像として以下の研究に供した。(図2)

## セファロのトレースおよび計測方法

セファロ計測点をマニュアルに従って、28点設定し(図3,表1)、日常臨床で分析に利用される角度計測(22項目)および線計測(10項目)について精度を比較した(表2)。6名の被験者の従来型およびMRI側面セファロに対して、それぞれ5回ずつPC上で計測計測を行い、合計30回ずつの計測値を得た。疲労によるエラーを可及的に減じるために、1日の分析を6名分の計測と定め、5日に分けて実施した。

同定された28点のセファロ計測点が正確に計測されているかどうか判断することを目的に、ソフト使用経験12年を有する別の矯正歯科医によって、全データの10%にあたる84個のデータについてランダムに選択し、両画像でのセファロ計測点の計測が正確に一致しているかを検討した。

なお、統計学的検討は、SPSSソフトウェア(version 16.0, SPSS, Chicago, III)を使用し、多重比較は、Tukey検定によって行った。(P < 0.05)

## 研究2 MRI セファロによる成長評価

### 対象

日本人混合歯列期患者3名（男性1名、女性2名、初診時平均年齢8歳7カ月）より得られたMRI セファロと同時期に撮影された従来型セファロを用い、初診時（A-stage）および18か月後（B-stage）のデータを検討した。

分析方法は、研究1に準じて各計測点の計測を行い、A-stage および B-stage で重ね合わせを行って比較するとともに、従来型セファロとMRI セファロ画像にて、それぞれの成長変化量を比較検討した。

## 結 果

### 研究1-1 MRI 投影画像のセファロ計測点の同定

軟組織強調セファロ画像と硬組織強調セファロ画像での計測点の同定判断結果を図4の示す。硬組織強調セファロ画像において、最も判定度が高い計測点は、Orであり次いでR1であった。歯牙に関する計測点については、明瞭に判定可能であった。前方の計測点のN、A-point、B-point、PM、Pogと後方の計測点P、Baの判定が困難であった。同様に、軟組織強調セファロ画像において、最も判定度が高い計測点は、Pogであり次いでB-pointであった。Ulcrown、Llcrownが判定可能であったが、それ以外の歯牙に関する計測点については、判定が困難であった（図4）。

### 軟組織輪郭強調画像作成時の閾値の違いによる計測点判別の変化

軟組織強調セファロ画像では軟組織によって覆われていない歯牙に関する計測点において認識することは困難であった。しかし、硬組織強調画像法によって認識困難であった前方ならびに後方の計測点に関しては、描出時の閾値を変化させることで、計測点の明瞭度が変化し、おのおのの計測点を同定し同一画面上に展開できた。また、それぞれの計測点の同定には至適閾値を有し、また、この閾値は症例の年齢や性別、軟組織の状態などにより影響をうけることが確認されたが、硬組織強調画像作成時の閾値操作に比して、計測点を明瞭化させる操作可能な閾値の範囲は広がった（図5）。

### 研究1-2 従来型セファロとMRI セファロの精度検証

硬組織強調法ならびに軟組織強調法によりすべてのセファロ計測点を1つの画面に展開したMRI セファロ画像と同時期に撮影した従来型セファロ画像おのおのにおいて、同定した計測点より線計測ならびに角度計測を行い、各計測値の精度の比較を行った。表3に角度計測の結果を示す。計測者1のOcclusal pl.-SN ( $P=0.0384$ )、計測者2のFacial Axis ( $P=0.0465$ )、Lower Facial height ( $P=0.0423$ )、計測者3のY-Axis ( $P=0.0492$ )の項目で、従来セファロとMRI セファロの値に有意差を認めしたが、他の62項目は有意差を認めなかつ

た。一方、表 4 に示す線計測では、計測者 2 で、ANS-Menton ( $P=0.0312$ )、計測者 3 で、Mandibular Length ( $P=0.0224$ )の項目で、従来セファロと MRI セファロの値に有意差を認めしたが、他の項目では有意差を認めなかった(表 3, 4)。

## 研究 2 MRI セファロによる成長評価

図 6 に従来型セファロならびに MRI セファロでの A-stage から B-stage 間のトレースを示す。両セファロによって上下顎前歯および上下顎大臼歯の萌出方向と萌出量、SN 平面の S 点を基準にした前下方向への成長方向と成長量において、両画像に同様の傾向が認められた。

表 5 では 従来型セファロならびに MRI セファロでの A-stage から B-stage 間の成長変化の角度変化量の結果を示す。計測者 1 での Lower Facial Height ( $P=0.0391$ )、Total Facial Height ( $P=0.0408$ )、計測者 2 での Occlusal pl. - SN ( $P=0.0434$ )、計測者 3 の Interincisor Angle ( $P=0.0417$ )の項目で、従来型セファロと MRI セファロの値に有意差を認めしたが、他の 62 項目は有意差を認めなかった。表 6 では A-stage から B-stage 間の成長変化の線計測変化量の結果を示す。計測者 2 の Midfacial Length ( $P=0.0219$ )、計測者 3 の ANS-Menton ( $P=0.0428$ )の項目で、従来セファロと MRI セファロの値に有意差を認めしたが、他の 28 項目は有意差を認めなかった。

研究 1-2 同様に、咬合平面の設定に関係する計測項目、ANS に関係する計測項目で有意差を認めしたが、計測者間でばらつきがあり、有意差に関する特徴や傾向を認めることはできなかった。

## 考 察

歯列のみならず顎顔面骨の成長の治療を担う矯正歯科分野の診断では、画像上で顎骨の特徴点の抽出が最も重要な行程である。この画像診断については、1931年にBroadbentとHofrath<sup>7, 8)</sup>によって提唱された、撮影条件を規格化し、再現性を持たせたセファロが基本であり、特徴点の設定や分析法について今まで極めて多くの報告がなされている。

一方、硬組織の疾患のみならず形態を細部まで評価できるCTの開発と普及、さらには、三次元構築手技が開発されたことにより、矯正学の分野においても、これまでの二次元データからの類推による評価とは異なり、実体化された3DCT画像からの分析が可能となってきた。特に、省スペース化がはかられたCBCTの開発により、歯科分野において三次元的評価が広く普及した。しかしながら、CTによる顎骨の形態分析に関しては、その高い精度にも関わらず、いくつかの問題点も論じられている<sup>9)</sup>。特に被曝線量の多さは決して無視できるものではなく、また、三次元的に計測点の定義が難しいこと、関連ソフトの扱いが熟練を要するなどの問題を抱えており、セファロと異なり十分なデータベースの構築ならびにそれによる基準値の設定などが困難であることから、外科症例などでの手術方法の検討に

は広く使われるものの、成長を評価する方法としては、いまだ一般化するには至っていない。それ故、安価で、操作性に優れ、十分なデータベースを有する従来型セファロは、いまだに矯正歯科の基本とされ、<sup>9-13)</sup>いかなる画像検査手技においても、このデータベースが評価の基準となっている。

一方、3DCTの矯正的診断の応用については、三次元での空間的計測を行う手法のほかに、画像を側方へ投影して二次元画像として描画し、その画像で同定した計測点の精度ならびに再現性について従来型セファロのデータとを比較した研究がなされている<sup>9,14-17)</sup>。耳孔内へ挿入されたイヤードを基準軸として規格化して撮影し、撮影時に投影方向に誤差が生じる可能性がある従来型のセファロと、仮想で耳孔内に基本軸を想定してプログラム化し投影した二次元のセファロ画像、すなわち解析者自身での人為的エラーが生じうる両画像を比較することにより、双方の解析時の誤差を比較するものである<sup>14)</sup>。Olmezらは、CBCTより二次元に投影して作成された二次元セファロ（以下CBCTセファロ）は従来型セファロの29計測項目における平均誤差はすべて2mm未満であったことを示し、CBCTセファロの高い寸法精度を報告している<sup>9)</sup>。同様に、Cavalcantiら<sup>15)</sup>、Lopesら<sup>16)</sup>、Bassamら<sup>17)</sup>は、CBCTセファロの再現性と寸法精度の正確さから二次元データベースの蓄積に対するCBCTの有用性を示している。しかしながら、近年の技術の進歩により被曝量の大幅な軽減が図られたとはいえ、評価には頻回の放射線被曝は避けられないのが現状であり、成長期に安易に適応するのは可及的に避けるべきであると考えらる。

一方、三次元的に組織形態の評価をおこなえる画像検査方法としてMRI検査が挙げられる。CTとは異なり、主に軟組織の性状評価に用いられる本検査方法は、硬組織の形態評価に用いるのは一般的ではない。しかしながら、被曝がないことから、生体組織にとっては非侵襲的な検査方法といえ、本検査により硬組織の形態をCT同様に評価が可能であれば、矯正学分野にとって、咀嚼筋や周囲軟組織の状態を評価できることも含めて理想的な検査方法といえる。このような観点からMRI画像から硬組織像を描出する研究は、すでによくつか報告されている。Nas̃elら<sup>18)</sup>、Ikedaら<sup>19)</sup>やEggersら<sup>20)</sup>は下顎神経の位置に関して、MRI断面画像を用いて評価し、CTと同程度の正確さを有していることを報告している。また、Cevidanesら<sup>21,22)</sup>は領域抽出法を用いたソフトウェアを用いて、下顎枝部の表面を立体構築し、形態の詳細な評価に用いた研究を報告している。また、Gotoら<sup>23)</sup>は、乾燥ヒト下顎骨をMRIで撮影し、下顎骨の皮質骨ならびに海綿骨の硬組織の状態を描出し、下顎骨表面の寸法精度が良好であったと報告している。しかしながら、これらの報告は局所的な形態分析に主眼がおかれ、顎顔面全体での形態的評価にはいたっていなかった。そこで我々は、顎顔面骨の形態評価としてのMRIの可能性を検討すべく、輪郭強調法を用いることで、MRIデータからの三次元的画像構築が可能であることを示した。さらに重ね合わせ手法を用いた三次元的な骨格の代表的な特徴点の再現精度がCBCTデータを使用した場合と同程度であることを明らかとした<sup>4,24)</sup>。しかしながら、硬組織を明瞭化させることを主眼としたCTとは異なり、軟組織の情報より硬組織の情報のみを取り出し、最表層の輪郭を視覚化させ

る本手法では、厚みの少ない上顎洞前壁や薄い皮質骨などでは、表層の輪郭が表と裏で重なることから、そういった部位では描出することができず、CT 像のように実体像として活用するのは困難であった。しかしながら、二次元的に投影した画像に関しては骨の重なりなどから、輪郭形成が行われることが可能であることを確認し、MRI 画像の二次元的評価手段としての可能性を考えるにいたった。そこで、本研究では、硬組織輪郭強調法による硬組織像を二次元的に投影した画像上でセファロ計測点の描出の可否について検討おこなった。その結果、歯牙の描出を主眼に置いた硬組織輪郭強調法では顎骨の前方部と後方部では、二次元化しても顎骨の特徴点の明瞭化させることは困難であった。そこで、骨の表層情報の抽出を、骨の特徴的閾値を設定して最表層を抽出する方法ではなく、硬組織と接する軟組織の辺縁を描出して、その外側の外郭ラインを描出して硬組織の最外郭ラインとして描出する軟組織輪郭強調法を併用する方法を考案し、特徴点の描出の可否について検討した。その結果、硬組織輪郭強調法では描出が困難であった特徴点の描出が可能となり、硬組織軟組織の両強調法を一つの画像に描出することで、セファロ分析に必要なすべての計測点を備えた二次元画像（MRI セファロ画像）を得ることができた。

なお、研究結果に示すように、様々な信号が含まれる MRI 画像では、硬組織と接する軟組織も様々な信号強度を示している。すなわち、軟組織の輪郭を明らかとするには、それぞれの組織に適した閾値に合わせる必要があり、それぞれの計測点を描出するには、それぞれの点の周囲軟組織に合わせた閾値設定が必要である。したがって、比較的固定した閾値の設定で行えた硬組織輪郭強調法とは異なり、各点を明瞭化させるには至適閾値を考えた上での処理が必要となった。当然、軟組織の性状は性別や年齢などでも影響を受けるため、症例に応じた操作を要求されたが、今回のシステムでは各操作で抽出した計測点をすべて保存できることから、決して煩雑ではなく、むしろ、閾値を変えながら最も明瞭な点を描出した上で抽出点の保存を行えることから、その計測点の信頼性はむしろ高いと言える。

臨床応用を行う上でもっとも問題となるのは上述した再現性のほか、精度があげられる。これらは微細な変化を観察し、治療法の変更を行う上で極めて重要な要素である。そこで、作成された MRI セファロ画像での計測値と同時期に撮影した、通常の側方セファロでの計測値の比較を行った。セファロ分析においては、現在は、計測点間の距離計測や角度については PC ソフトにより行われるため、人為的計測誤差は生じない。しかしながら、計測点の描出工程には、経験年数や環境により、計測者間に誤差が生じる。当然、画像自体の明瞭度や主観などが関与することから、MRI セファロ画像においても同様の影響がでるものと推察された。このような計測点の抽出工程における誤差については、常に、矯正学の分野では討論されてきている。

そこで、今回の研究では、CBCT から二次元化して作られた CBCT セファロと従来型セファロと比較し精度の検討を判定した過去の研究方法に準じて、MRI セファロ画像で抽出した計測点の誤差について、寸法精度を用いて検証した。計測点同定における系統的誤差の判定



については、van Vlijmen ら<sup>25,26)</sup>、Metin Nura ら<sup>27)</sup>、の報告に示されているように、単独計測者による計測値の分析が提唱されており、それに従い個人における数値のばらつきの検証については、1人の計測者がデータを判断した。その結果、2週間を空けた2回の計測値の信頼性評価指数である  $\kappa$  値は 0.78 という実質的に一致しているとみなされる高い値であった。また、無作為に抽出された5項目の2週間のインターバルをあげ3回計測し評価した級内相関係数、 $ICC(1,3) \cong 0.979$  でありばらつきは少なく、再現性の高いものであった。

さらに、計測者を5年以上の分析ソフト使用経験を有する3名とし、計測者間での系統的誤差を判定した結果、いずれの値も Olmez<sup>9)</sup>らが判断した平均誤差はすべて 2mm 未満について条件を満たしていた。また、過去の報告に示されているように、角度計測であれば  $\pm 1^\circ$  は臨床的に影響が少ないとする判断基準<sup>28,29)</sup>を満たしていた。

これらの結果は、臨床的には、今回作成した MRI セファロでの計測点は、すでに臨床上信頼性が得られている 3DCT 画像より作成されたセファロと同様の精度を有していることを示すものである。

以上の結果から MRI セファロ画像での描出点はセファロ写真上でのそれと同程度の精度での抽出されており、二次元的ではあるが MRI データを用いて矯正治療での硬組織形態評価が可能であることが示された。このことは、従来の軟組織の性状評価に主眼をおいた検査法である MRI の新たな可能性が示されたものであるとともに、非侵襲的な顎骨形態評価方法の開発の一助になるものと考えられた。

外科矯正後の後戻りや仮骨延長後の後戻りに対しての筋の位置的あるいは形態変化などの影響<sup>30,31,32)</sup>、筋機能療法<sup>33,34)</sup>や機能的顎矯正装置<sup>35,36)</sup>の治療結果の評価など矯正治療において顎骨周囲の筋肉や軟組織の評価の重要性は広く強調されている。しかしながら、これら軟組織の評価方法の未確立から、その可能性を示唆しながらも硬組織の形態的評価以外に客観的評価が行えないのも事実である。したがって軟組織の性状を解析する唯一の画像診断方法である MRI を用いた治療前後の評価や多くのデータの蓄積は、今後の筋肉を中心とした矯正学的な顎骨成長評価の流れに寄与するものとも考えられる

## 結 論

複数の閾値を用いた輪郭強調法を用いることにより MRI から顎骨の形態評価を行う上で必要な全て計測点を描出した側方セファロ投影像を作成することが可能であり、その精度も従来型セファロと同程度の精度であった。また、成長期の評価においても十分な精度を有していた。以上の結果より、顔面骨形態の評価および顔面領域の MRI データの有用性が示され、矯正歯科における臨床活用に関して新たな可能性が示された。顔面の成長発育を全体的に評価できる MRI は、安全性を含め、臨床上有用な検査方法であることが示された。

## 謝辞

稿を終えるにあたり、終始御懇篤なる御指導と御校閲を賜りました岡山大学大学院医歯薬学総合研究科顎口腔再建外科学分野 飯田征二教授に深甚なる謝意を表します。また、本研究の遂行にあたり、貴重な御援助と御助言をいただきました岡山大学大学院医歯薬学総合研究科歯科放射線学分野 浅海淳一教授、岡山大学病院歯科放射線・口腔診断科 柳文修講師ならびに MRI の撮影・データ解析に協力いただいた岡山大学病院中央放射線部の林邦夫技師に心からの謝意を表します。また、様々な面で多くの貴重な御援助と御助言をいただきました岡山大学大学院医歯薬学総合研究科顎口腔再建外科学分野の先生方に深くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Halazonetis DJ. From 2-dimensional cephalograms to 3-dimensional computed tomography scans. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005;127:627-637.
- 2) Park SH, Yu HS, Kim KD, Lee KJ, Baik HS. A proposal for a new analysis of craniofacial morphology by 3-dimensional computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;129:623-634.
- 3) Haffner, CL, Pessa, JE, Zadoo, VP., Garza, JR.: A technique for three-dimensional cephalometric analysis as an aid in evaluating changes in the craniofacial skeleton. *Angle Orthod.*, **69**, 345-348, 1999.
- 4) 田井規能：磁気共鳴撮像法を用いた顎顔面骨形態の計測法に関する研究，岡山歯学会雑誌，**31**，1-17，2012.
- 5) Blaseio G. Quick Ceph user manual. San Diego: Quick Ceph;2004.
- 6) 田井規能，金尾晃，Jae Hyun Park，飯田征二．矯正歯科におけるマルチモダリティの可能性．In：伊藤学而，中島榮一郎（編）．臨床家のための矯正 YEAR BOOK' 12．東京：クインテッセンス出版，2012；55-59.
- 7) Broadbent, B.: A new x-ray technique and its application to orthodontia. The introduction to cephalometric radiology. *Angle Orthod.*, **1**, 45-66, 1931..
- 8) Hofrath, H.: Die Bedeutung der Routgenfern und Abstandsaufnahme für die Diagnostik der Kieferanomalien. *Fortschr. Orthod.*, **1**, 232-258, 1931.
- 9) Olmez, H., Gorgulu, S., Akin, E., Bengi, AO., Tekdemir, I., Ors, F.: Measurement accuracy of a computer-assisted three-dimensional analysis and a conventional two-dimensional method. *Angle Orthod.*, **81**, 375-382, 2011.
- 10) Kocadereli, I., Telli, AE.: Evaluation of Ricketts' long-range growth prediction in Turkish children. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, **115**, 515-520, 1999.
- 11) Springate, SD., Jones, AG.: The validity of two methods of mandibular superimposition: A comparison with tantalum implants. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, **113**, 263-270, 1998.

- 12) Ricketts, RM.: New perspective on orientation and their benefits to clinical orthodontics—part II. *Am J Orthod.*, **46**, 26-36, 1976.
- 13) Ricketts, RM.: A principle of racial growth of the mandible. *Am J Orthod.*, **42**, 368-386, 1972.
- 14) Macri, V., Athanasiou, AE.: Sources of error in lateral cephalometry. In: Athanasiou AE, ed. *Orthodontic Cephalometry*. London, UK: Mosby-Wolfe; 1997:125–160.
- 15) Cavalcanti MG, Rocha SS, Vannier MW. Craniofacial measurements based on 3D-CT volume rendering: implications for clinical applications. *Dentomaxillofac Radiol.* 2004; **33**:170–176.
- 16) Lopes P, Moreira CR, Perrella A, Antunes JL, Cavalcanti MG. 3-D volume rendering maxillofacial analysis of angular measurements by multislice CT. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2008;**105**:224–230.
- 17) Bassam H, Paul S, Gerard S. Accuracy of three-dimensional measurements obtained from cone beam computed tomography surface-rendered images for cephalometric analysis: influence of patient scanning position. *Eur J Orthod.* 2009; **31**:129–134.
- 18) Nas̄el, CJO., Pretterklieber, M., Gahleitner, A., Czerny, C., Breitenhofer, M., Imhof, H.: Osteometry of the Mandible Performed Using Dental MR Imaging. *AJNR Am J Neuroradiol.*, **20**, 1221–1227, 1999.
- 19) Ikeda, K., Ho, KC., Nowicki, BH., Haughton, VM.: Multiplanar MR and Anatomic Study of the Mandibular Canal. *AJNR Am J Neuroradiol.*, **17**, 579–584, 1996.
- 20) Eggers, G., Rieker, M., Fiebach, J., Kress, B., Dickhaus, H., Hassfeld, S.: Geometric accuracy of magnetic resonance imaging of the mandibular nerve. *Dentomaxillofac Radiol.*, **34**, 285–291, 2005.
- 21) Cevidanes, LHS., Franco, AA., Gerig, G., Proffit, WR., Slice, DE., Enlow, DH., Yamashita, HK., Kim, YJ., Scanavini, MA., Vigorito, JW.: Assessment of mandibular growth and response to orthopedic treatment with 3-dimensional magnetic resonance images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, **128**, 16-26, 2005.
- 22) Cevidanes, LHS., Franco, AA., Gerig, G., Proffit, WR., Slice, DE., Enlow, DH., Lederman, HM., Amorim, L., Scanavini, MA., Vigorito, JW.: Comparison of relative mandibular growth vectors with high-resolution 3-dimensional imaging. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, **128**, 27-34, 2005.
- 23) Goto, TK., Nishida, S., Nakamura, Y., Tokumori, K., Nakamura, Y., Kobayashi, K., Yoshida, Y., Yoshiura, K.: The accuracy of 3-dimensional magnetic resonance 3D vbe images of the mandible: an in vitro comparison of magnetic resonance imaging and computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.*, **103**, 550-559, 2007.

- 24) Tai, K., Park, JH., Hayashi, K., Yanagi, Y., Asaumi, JI., Iida, S., Shin, JW.: Preliminary Study Evaluating the Accuracy of MRI Images on CBCT Images in the Field of Orthodontics. *J Clin Pediatric Dent.*, **34**, 361-368, 2010.
- 25) van Vlijmen, OJ., Berge, SJ., Bronkhorst, EM., Swennen, GR., Katsaros, C., Kuijpers-Jagtman, AM.: A comparison of frontal radiographs obtained from cone beam CT scans and conventional frontal radiographs of human skulls. *Int J Oral Maxillofac Surg.*, **38**, 773-778, 2009.
- 26) van Vlijmen, OJ., Maal, TJ., Berge, SJ., Bronkhorst, EM., Katsaros, C., Kuijpers-Jagtman, AM.: A comparison between twodimensional and three-dimensional cephalometry on frontal radiographs and on cone beam computed tomography scans of human skulls. *Eur J Oral Sci.*, **117**, 300-305, 2009.
- 27) Nur, M., Saadettin, KS., Bayram, M., Celikoglu, M., Kilkis, D., Sezgin, OS.: Conventional frontal radiographs compared with frontal radiographs obtained from cone beam computed tomography. *Angle Orthod.*, **82**, 579-584, 2012.
- 28) Richardson, A.: A comparison of traditional and computerized methods of cephalometric analysis. *Eur J Orthod.*, **3**, 15-20, 1981.
- 29) Liu, J., Chen, Y., Cheng, K.: Accuracy of computerized automatic identification of cephalometric landmarks. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, **118**, 535-540, 2000.
- 30) Park, JH., Tai, K., Hotokezaka, H., Yanagi, Y., Ikeda, K.: Class III occlusion with missing maxillary first molars and facial asymmetry treated with intraoral vertical ramus osteotomy: 7-year follow-up. *Orthodontics. Art Practice Dentofacial Enhancement.*, **13**, 2-13, 2012.
- 31) Tai, K., Park, JH., Ikeda, K., Nishiyama, A., Sato, Y.: Severe facial asymmetry and unilateral lingual crossbite treated with orthodontics and two-jaw surgery: 5-years follow-up. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*, **142**, 509-23, 2012.
- 32) Tai, K., Park, JH., Sato, Y.: Class III Malocclusion with Missing Maxillary Central Incisor and Facial Asymmetry Treated with Orthodontics and Intraoral Vertical Ramus Osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg.*, **23**, 39-44, 2012.
- 33) Gross, AM., Kellum, GD., Hale, ST., Messer, SC., Benson, BA., Sisakun, SL., Bishop, FW.: Myofunctional and dentofacial relationships in second grade children. *Angle Orthod.*, **60**, 247-253, 1990.
- 34) Tallgren, A., Christiansen, RL., Ash Jr, MM., Miller, RL.: Effects of a myofunctional appliance on orofacial muscle activity and structures. *Angle Orthod.*, **68**, 249-258, 1998.
- 35) Ibitayo, AO., Pangrazio-Kulbersh, V., Berger, J., Bayirli, B.: Dentoskeletal effects of functional appliances vs bimaxillary surgery in hyperdivergent Class II patients. *Angle Orthod.*, **81**, 304-311, 2011.
- 36) Patel, HP., Moseley, HC., Noar, JH.: Cephalometric Determinants of Successful Functional

Appliance Therapy. *Angle Orthod.*, **72**, 410-417, 2002.