The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	縦断的MRIデータを用いた下顎骨の成長に関する研究
Author(s)	前田, 純
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/69506
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

学位論文

縦断的MRIデータを用いた下顎骨の成長に関する研究

2018年3月

大阪大学大学院歯学研究科　口腔科学専攻

(顎顔面口腔矯正学教室)

前田　純

指導教員：山城　隆　教授(顎顔面口腔矯正学教室)

【緒言】

口腔顎顔面領域の発育発達様式を把握することは、矯正歯科、小児歯科、形成外科、および小児科等の診療において、適切な診断と治療を実施する上で重要な意味をもち、治療の必要性の是非を決め、治療方法とその開始時期に影響を与える[1-3]。患者のもつ個々の成長発育の潜在能力を把握し、成長発育を予測することができれば、その患者に最も適切なタイミングに治療介入が可能となるとの報告がある[3]。そのためには、混合集団の資料によって得られた横断的なデータに基づく平均値や基準値を用いるのではなく、症例毎の縦断的かつ定期的な資料によって得られるデータからの評価が必要であり、より正確な評価を実施するためには三次元的な検討が必須とされている[4, 5]。

これまでに、口腔顎顔面領域の発育発達様式を定量的に評価するために、定期的に印象採得し作成した歯列の石膏模型を用いた分析[6]、ご遺体の骨格標本（乾燥頭蓋骨）を用いた分析[7, 8]、および治療前後などに撮影した頭部エックス線規格写真(セファロ)を用いた検討が実施されてきた[9-15]。セファロを用いたもの以外の検討では対象の表面構造の評価にとどまっていたが、セファロでは内部構造の観察がある程度可能で、口腔顎顔面領域の診査・診断において非常に有用な画像検査法のひとつであり、セファロ分析は現在まで最も活用されてきた分析手段である[11-15]。しかしながら、セファロ分析によって得られた情報は二次元平面に投影された硬組織の構造を評価しているに過ぎず、対象となる実体の三次元的構造やその周囲の軟部組織は正確に把握することは不可能であった[16]。

口腔顎顔面領域の三次元モデルを作成したり観察したりすることができれば、その発育発達様式を三次元的に解析することが可能となる。そのため、二

方向もしくは三方向からエックス線を投射したセファロ画像を用いて、口腔顎顔面領域を三次元的に捉え成長発育様式を追究する縦断的検討が実施され、口腔顎顔面形態の発育発達の様相はある程度把握されるようになった[17-25]。しかしながら、投影された二次元画像を用いて三次元的空間の座標を正確に取得することは不可能であり、セファロ分析のために設定された点や基準平面を三次元的データに応用することは不適切であると考えられる。

ところで、コンピュータ断層撮影法(CT)を用いれば、得られたボリュームデータから口腔顎顔面領域を三次元的に解析することが可能となり、口腔顎顔面領域の三次元モデルを構築し、対象部位の距離、角度、面積、および体積を計測することは比較的容易となる。定期的かつ長期にわたる縦断的な CT 検査を数多くの症例に適用することができれば、二次元的なセファロ分析に代わって三次元的解析が可能となるとの報告がある[26-28]。しかしながら、電離放射線被曝を伴う CT 検査を定期的かつ長期にわたって実施することは倫理的に問題があり[29]、健康な被験者に CT 検査を適用することは許されない。このため、これまでの CT を用いた研究は、何らかの疾患や症候群を伴う患者を対象とした横断的研究が大多数を占め、縦断的な研究は非常に少ないのが現状である[30-39]。

人体の内部構造を含めた三次元構造を把握する別の画像検査法として、磁気共鳴画像検査法（MRI）が存在する。MRI は電離放射線被曝がないため、定期的かつ長期間にわたる縦断的な検討が可能であると考えられる。また、MRI は水素原子を画像化の対象とするため、水素原子を含む水や脂肪で構成された軟部組織間のコントラストが高く、軟部組織の構造を把握することに優れる[40, 41]。一方で、水素原子に乏しい硬組織の描出能が低いことが欠点で、特に、縫合や含気を有する骨を対象とする場合、正確な形態を捉えることは困難であり、

MRI を用いた研究は、口腔顎顔面領域の軟部組織や顎関節部など一部の領域を対象としたものがほとんどであった[40-42]。従って、MRI を用いた硬組織の研究は少数で[43-47]、口腔顎顔面領域の骨形態を抽出し、三次元モデルとして扱う研究は存在しない。ただし、電離放射線被曝などのリスクのあるエックス線検査に代わって三次元的なデータを取得できる MRI 検査は、他領域ではあるが硬組織研究の分野においても着目されつつある[48-50]。口腔顎顔面領域の成長は、本領域を構成する要素の成長の和と考えられる。各構成要素の成長はそれぞれの部位の長さや角度の変化と体積の変化とすることができると言われている[3]。

そこで、口腔顎顔面領域の発育発達様式の解明を最終目標とするなかで、本研究では、下顎骨を対象とし、縦断的 MRI データを用いて、その成長を下顎骨の体積の変化を主眼において検討することを目的とした。

【対象と方法】

対象

成長期の健常な小児を対象として撮像されたMRI画像データを使用した。

本研究にて解析を行った資料は、2010年より始まったデンマーク王国・コペンハーゲン大学（University of Copenhagen）を中心とした脳の発育発達様式の解明を目的とした大規模な縦断的研究[51)]により収集されたMRI画像データであった。デンマーク王国を含む北欧では小児期の脳腫瘍患者が多く、脳腫瘍の発生メカニズムを解明するために、当該研究が始まった。健常な北欧人の小児を対象とし、脳頭蓋部のMRIを定期的に撮影しているが、この画像データには同時に口腔顎顔面領域も画像化されているものが少なくなかった。そこで本データを口腔顎顔面領域の発育発達様式の解明に活用すべく、コペンハーゲン大学の研究機関および被験者の同意を得て、MRI画像データの解析を行った。被験者には、当初の目的と異なる目的の研究への画像データの流用について詳細に説明し、インフォームド・コンセントを得た被験者のデータを利用した。

被験者の誕生日とその後約6ヶ月毎に（1年間に2回）脳頭蓋部のMRI撮像を5年間以上実施したデータのうち、口腔顎顔面領域が画像化され、既にデータ収集が完了していた20症例を対象とした(図1)。各症例につき撮像時期の異なる10相（フェイズ）のMRI画像データが存在し、合計で200のMRIデータから構成された。

20症例の男女の内訳は、男児5名、女児15名、撮像開始時期は7歳から13歳であった。各症例のMRIデータに加えて、撮影時の年齢、身長、および体重のデータを獲得した。

MRI 装置および撮影方法

撮像は、コペンハーゲン大学附属ビドオウア（Hvidovre）病院放射線科にて行った。撮像装置は 3 テスラの超伝導型 MRI スキャナ Magnetom Trio (Siemens, Germany)を用い、受信コイルには 8 チャンネルの脳用コイル (Invivo, USA)を用いた。撮像シーケンスは、3D MPRAGE（magnetization prepared rapid acquisition with gradient echo）法[52]を用い、TR（time of repetition：繰り返し時間）を 5800 ms、TE（time of echo：エコー時間）を 5 ms、TI（time of inversion：反転時間）を 1300 ms、FA（flip angle：フリップ角）を 10 度、BW（band width：受信バンド幅）を 33.3k Hz とし、ターボファクターを 4 とした。撮像領域 256×256×192 mm に対し、マトリックスサイズを 256×256×192 とし、いわゆる 1 mm^3 のキュービックスキャン（立方体撮像）を行った。撮影した MRI データは DICOM（Digital imaging and communications in medicine）形式で保存した。

画像解析方法

得られた画像はもともと脳頭蓋部をターゲットとしたものであり、磁場中心を AC-PC line（anterior commissure- posterior commissure line：前交連-後交連線）とし、これに対して平行に撮像断面を設定していた。このため、今回検討対象とした下顎骨は磁場中心から離れるため信号強度が低かった。そこで、MRI コンソール付属のワークステーション上で信号強度補正ソフトウェア PURE（phased-array uniformity enhancement）（GE, USA）を用いて下顎骨附近の低信号領域の信号強度補正を行った。次に、検討画像をフランクフルト平面に平行にするため、医用画像解析ワークステーション Virtual Place（AZE, Japan)を用いてリスライスを実施した(図 2)。そして、三次元医用画像解析ソ

フトウェア Analyze（Mayo Clinic, USA）を用いて、下顎骨の外形をトレース（セグメンテーション）した(図 3)。下顎骨の骨皮質は水素原子に乏しく、MRI 画像では低信号となるため、周囲の高信号領域との境界を下顎骨の外形として、徒手にて 1 枚ずつセグメンテーションを実施した。セグメンテーションには液晶タブレット Cintiq 27QHD(Wacom, Japan)を使用した。

セグメンテーションの精度

MRI 画像での計測は、磁場の歪みがない限り、その精度は優れているとされているが[27]、セグメンテーションを徒手によって行ったため、予備実験としてそのセグメンテーションの精度を検討した。

まず、ヒト乾燥頭蓋骨の下顎骨を水ファントムに浸漬し、今回と同一条件で MRI 撮像した。下顎骨の真の体積として、アルキメデスの原理を用いて求めた。下顎骨の体積を、1 日以上の間隔をあけて本研究と同一の方法で徒手にて 6 回計測した。水は高信号を呈し、乾燥下顎骨は無信号となったが、その無信号領域をセグメンテーションした。計測値の標準偏差を求め、これを平均値で除したものを寸法誤差とした。

次に、観測者内の測定誤差を求めることを目的に、ある 1 症例の 1 フェイズの MRI 画像において、1 日以上の間隔をあけて下顎骨を繰り返し 10 回セグメンテーションし体積を求めた。下顎骨の体積の計測値の標準偏差を求め、これを平均値で除したものを測定誤差とした。

三次元モデルによる下顎骨形態の変化の検討

三次元モデルの下顎骨の形態変化を視覚的に検討するため、10 フェイズの三次元モデルの重ね合わせを行った。重ね合わせは、Kreiborg らの方法に準じて

行った。[39,53,54]

図 4 のごとく三次元構築し、サーフェススムージング化された 10 個の下顎骨のモデルを Kreiborg らの基準点を用いて重ね合わせることで、下顎骨の形態変化を視覚化した。三次元画像の作成（含サーフェススムージング）はオープンソースの RView を用いた。また重ね合わせによって得られた情報を元に経時的な成長ベクトルを視覚化した（図 5)。このベクトル表示画像と Enlow らが示した下顎骨の形態変化の模式図と[18]比較した。

下顎骨の体積測定

各症例のフェイズ毎に三次元モデルの体積を測定した。体積の測定には下顎骨のセグメンテーションの際に使用した画像解析ソフトウェア Analyze 内にある測定機能を使用した。

下顎骨の体積の経時的変化の横断的検討

年齢毎の下顎骨の体積を横断的に検討した。年齢によって対象数は異なるが、各年齢における下顎骨の体積の平均値を求めた（図 6)。

下顎骨の体積の変化の縦断的検討

症例毎に、下顎骨の体積と、年齢、身長、および体重との関連を検討した（図 7-26)。

また、各症例の下顎骨の体積の増加量と増加率を算出した。増加率は、最終回の下顎骨の体積を初回のもので除した（図 37，表 1-3、5)。

また、全症例、男児、女児における、下顎骨の体積と、年齢、身長、および体重との関連を検討した（図 27-36)。

統計学的検討

横断的検討において、下顎骨体積の年齢における差の検定にはKruskal-Wallis検定を用い、これらで有意となった対象において、多重比較のためTukeyのHSD検定を用いた。

縦断的検討において、各症例における下顎骨の体積と年齢、身長、および体重の関連を、最小自乗法を用いて直線回帰した。また、その際のピアソンの相関係数（Pearson’s correlation coefficient）を求めた。

統計ソフトウェアはSPSS（IBM、ver. 24）を用い、有意水準を5%とした。

【結果】

撮像と画像処理

１症例の撮像時間は 6 分 12 秒であった。

下顎骨は 82〜93 スライスに表れた。１スライス毎にセグメンテーションする時間は約 50 分を要し、１症例で 8 時間 20 分となった。

セグメンテーションの精度

アルキメデスの方法により、乾燥下顎骨の体積は 41282 mm^3 であった。6 回の MRI 計測による乾燥下顎骨の体積の平均値は 41663 mm^3、標準偏差は 314 mm^3 となり、寸法誤差は 7.54×10^{-4}、真の体積より 411 mm^3 大きかった（100.9%）。また、測定誤差は 2.97%であった。

三次元モデルによる下顎骨形態の変化の検討

三次元モデルを重ね合わせることにより、下顎骨は経時的に変化することが認められた。部位的には、下顎枝領域において大きな増加を認め、下顎体領域では下顎枝領域と比較して成長量は小さかった(図 5)。ベクトルは下顎骨の外表層では外側に向かい、内表層では内側に向かっており、Enlow らが提唱した下顎骨の骨添加・骨吸収と同様の傾向を認めた。しかし、Enlow らの検討では、下顎前歯部歯槽骨は骨吸収部位とされていたが、今回の三次元モデルでは下顎前歯部歯槽骨において骨吸収は認められず、骨添加を認めた。

下顎骨体積変化の横断的検討

下顎骨の体積は、表 1 で示すように 7 歳時（n=5）では 30761±982 mm^3、10 歳

時（n=18）では 36799±656 ㎣、13 歳時（n=15）では 40770±1007 ㎣と、加齢に伴ってその平均値は増加していた(表 2)。その増加量（約 5 年間）は表 2 で示すように、平均で 6530 ㎣（最大：1182 ㎣、最小：12365 ㎣）であった。また、その増加率は表 3 で示すように平均 18.6% （最大：39.4%、最小：2.9%）であった

年齢と下顎骨の体積の推移を図 6 に示す。7 歳より 12 歳まで増加傾向を呈し、12 歳以降では著明な増加は認められなかった。統計学的検討で、有意な差を認めたのは、7 歳とその他すべての年齢群、8 歳と 10 歳以降のすべての年齢群、9 歳と 11 歳以降のすべての年齢群、10 歳と 12 歳以降のすべての年齢群、11 歳と 12 歳以降のすべての年齢群の間であった。

各症例における下顎骨体積の縦断的検討

症例 1

性別：女児

撮影開始：7 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.7762

身長と体積の相関係数：0.8762

体重と体積の相関係数：0.7732

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：10218 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 7)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値より大きかった。相関係数は身長との相関が最も高値となり、体重との相関が低値となった。

症例 2

性別：女児

撮影開始：7 歳　撮影終了：12 歳

年齢と体積の相関係数：0.8311

身長と体積の相関係数：0.8512

体重と体積の相関係数：0.8607

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：3053 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めたが、その増加量は小さく、増大傾向も緩やかであった(図 8)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は体重との相関が高値となり、年齢との相関は低値となった。

症例 3

性別：女児

撮影開始：7 歳　撮影終了：13 歳

年齢と体積の相関係数：0.904

身長と体積の相関係数：0.836

体重と体積の相関係数：0.9198

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：4995 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 9)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は体重との相関が高値であり、身長との相関は低値であった。

症例 4

性別：男児

撮影開始：8 歳　撮影終了：13 歳

年齢と体積の相関係数：0.8084

身長と体積の相関係数：0.8871

体重と体積の相関係数：0.7937

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：5077 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 10)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は身長との相関が高値であり、体重との相関は低値であった。

症例 5

性別：女児

撮影開始：7 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.8245

身長と体積の相関係数：0.8501

体重と体積の相関係数：0.8836

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：5064 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 11)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は体重との相関が高値であり、年齢との相関は低値であった。

症例 6

性別：女児

撮影開始：8 歳　撮影終了：13 歳

年齢と体積の相関係数：0.6759

身長と体積の相関係数：0.7406

体重と体積の相関係数：0.7022

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：10354 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 12)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも大きかった。相関係数は身長との相関が最も高値となり、年齢との相関は低値となった。

症例 7

性別：男児

撮影開始：7 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.712

身長と体積の相関係数：0.7412

体重と体積の相関係数：0.6402

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：12241 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図13)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも大きかった。相関係数は身長との相関が最も高値となり、体重との相関は低値となった。

症例 8

性別：女児

撮影開始：9 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.5027

身長と体積の相関係数：0.7333

体重と体積の相関係数：0.5699

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：3198 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図14)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は身長との相関が最も高値となり、年齢との相関は低値となった。

症例 9

性別：男児

撮影開始：10 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.8084

身長と体積の相関係数：0.8871

体重と体積の相関係数：0.7937

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：2692 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 15)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は身長との相関が最も高値となり、体重との相関は低値となった。

症例 10

性別：男児

撮影開始：10 歳　撮影終了：15 歳

年齢と体積の相関係数：0.851

身長と体積の相関係数：0.9069

体重と体積の相関係数：0.8422

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：12613 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 16)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも大きかった。相関係数は身長との相関が最も高値となり、体重との相関は低値となった。

症例 11

性別：女児

撮影開始：10 歳　撮影終了：16 歳

年齢と体積の相関係数：0.8558

身長と体積の相関係数：0.7291

体重と体積の相関係数：0.7624

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：3732 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図17)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は年齢との相関が高値であり、身長との相関は低値となった。

症例 12

性別：女児

撮影開始：9 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.9172

身長と体積の相関係数：0.959

体重と体積の相関係数：0.8259

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：4782 ㎣

年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図18)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は身長との相関が高値であり、体重との相関は低値となった。

症例 13

性別：女児

撮影開始：12 歳　撮影終了：18 歳

年齢と体積の相関係数：0.7749

身長と体積の相関係数：0.8617

体重と体積の相関係数：0.9035

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：3253 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めるが極めて緩やかであった(図 19)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は体重との相関が高値であり、年齢との相関は低値となった。

症例 14

性別：女児

撮影開始：10 歳　撮影終了：15 歳

年齢と体積の相関係数：0.9497

身長と体積の相関係数：0.9456

体重と体積の相関係数：0.9603

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：8550 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 20)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも大きかった。相関係数は体重との相関が高値であり、身長との相関は低値となった。

症例 15

性別：女児

撮影開始：10 歳　撮影終了：14 歳

年齢と体積の相関係数：0.8553

身長と体積の相関係数：0.8842

体重と体積の相関係数：0.8461

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：5515 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 21)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも小さかった。相関係数は身長との相関が高値であり、体重との相関は低値であった。

症例 16

性別：女児

撮影開始：12 歳　撮影終了：17 歳

年齢と体積の相関係数：0.1491

身長と体積の相関係数：0.0354

体重と体積の相関係数：0.1051

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：-143 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向をほとんど認めなかった(図 22)。下顎骨の体積は撮影開始期から終了まで著明な変化を認めず、体積の増加はほとんど起きていなかった。相関係数は年齢との相関が高値であり、身長との相関は低値であったが、年齢・身長・体重の相関係数はいずれも極めて低値であった。

症例 17

性別：女

撮影開始 12 歳　撮影終了：16 歳

年齢と体積の相関係数：0.0573

身長と体積の相関係数：0.0177

体重と体積の相関係数：0.0593

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：-1095 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向をほとんど認めなかった(図 23)。身体成長は撮影開始時期から終了までほとんど変化していなかった。下顎骨の体積増加はほとんど起きていなかった。相関係数は体重との相関が高値であり、身長との相関は低値であったが、年齢・身長・体重の相関係数はいずれも極めて低値であった。

症例 18

性別：男児

撮影開始：8 歳　撮影終了：13 歳

年齢と体積の相関係数：0.7663

身長と体積の相関係数：0.7968

体重と体積の相関係数：0.843

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：8026 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 24)。下顎骨の体積の増加量は横断的検討で得た平均値よりも大きかった。相関係数は体重との相関が高値であり、年齢との相関は低値であった。

症例 19

性別：女児

撮影開始：8 歳　撮影終了：13 歳

年齢と体積の相関係数：0.0015

身長と体積の相関係数：0.0009

体重と体積の相関係数：0.0014

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：-449 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認められなかった(図 25)。下顎骨の体積増大傾向は認められず、体積に変化はなかった。相関係数はいずれとの相関も極めて低値であった。

症例 20

性別：女児

撮影開始：8 歳　撮影終了：13 歳

年齢と体積の相関係数：0.8863

身長と体積の相関係数：0.8778

体重と体積の相関係数：0.7837

撮影開始から撮影終了までの下顎骨の体積増加量：9076 ㎣

　年齢・身長・体重のいずれに対しても下顎骨の体積は増大傾向を認めた(図 26)。下顎骨の体積増加量は横断的検討で得た平均値よりも大きかった。相関係数は年齢との相関が高値であり、体重との相関は低値であった。

年齢と体積の総合的相関関係

図 27 は全症例の年齢と下顎骨の体積の相関関係を 1 つにまとめたものである。多くの個体の下顎骨の体積は前述のごとく加齢に従い体積が増大する傾向を認めたが、一部においては増大せず変化していなかったものも確認された。図 28, 29 は男女別にまとめたものであり、表 3 で示すように下顎骨の体積増加は女児よりも男児の方が大きい傾向を示した。

身長と体積の総合的相関関係

図 30 に全症例の身長と下顎骨の体積の相関関係をまとめた。年齢と下顎骨の体積の相関と同様に、加齢に従い体積が増大する傾向を認めた。図 31, 32 で示すように男女別でも同様に下顎骨の体積増加は女児よりも男児の方が大きい傾向を示した。

体重と体積の総合的相関関係

図 33 に全症例の体重と下顎骨の体積の相関関係をまとめた。体重も、年齢や身長と同様に加齢に従い下顎骨の体積が増大する傾向を認めた。しかしながら年齢や身長と比較してその増大傾向は症例によって異なり、分布にばらつきが認められた。

下顎骨の体積変化と年齢・身長・体重の間の相関係数

図 36 に、各症例の下顎骨の体積変化と年齢、身長、および体重との間の相関係数を示す。20 症例中 14 症例（70%）において、全ての相関係数は 0.7 より大きい値であった。それ以外の 6 症例について、相関係数は 0.7 以下であり、一部は極めて低い値を示した。

【考察】

本研究の対象に関して

本研究は健常な北欧人小児を対象とした。これまでの三次元的解析を行った多くの研究において対象としていたのは何らかの疾患・疾病に罹患している症例であったが、本研究では健常な症例を対象とすることで、正常な発育発達の分析を行うことができると考えた。

ただし、被験者数は20名で、対象数を増やしてさらなる検討が必要であるとも考えられた。

撮像と画像処理

1症例の撮像時間は6分12秒と、通常の口腔顎顔面領域におけるMRI検査における撮像時間[41, 42]より長くなった。コペンハーゲン大学での研究対象は脳であり、脳の解剖学的な特徴、すなわち白質、灰白質、および脳脊髄液の間に組織間コントラストをつけながら、三次元撮像するために、3D-MPRAGE法を適用したからであると考えられた。MPRAGE法の最大の特長は、軟部組織間コントラストが高いことで、3D法を併用することで三次元表示をし、多断面再構築法を適用して水平断から矢状断や冠状断の表示も可能となる。ただし、撮像時間が長いことが欠点で、小児において頭部の固定が不十分でモーションアーチファクトが出現している症例もあった。

頭部を撮像範囲とし、頭尾的に192 mmの長さをカバーした。1スライスの厚さを1 mmとしたことで192スライスの撮像となった。このうち、下顎骨は82～93スライスに表れた。1スライスが1 mmであることから、下顎骨の頭尾的な大きさは、82～93 mm程度と考えられた。また、3症例において、下顎骨が

撮像範囲から逸脱していたものが認められたが、頭尾的に 192 mm を越えたためと考えた。

1 症例のセグメンテーション時間は、8 時間 20 分とかなりの時間を要した。上記のさらなる検討を実施する為には、自動検出を用いて効率化を図る必要があると考える。しかしながら、軟部組織からの硬組織の検出が容易な CT とは異なり、現在の MRI において AI を用いた硬組織の自動検出機能は低く、今後の開発に期待するものである。

セグメンテーションの精度に関して

MRI 画像を用いた乾燥下顎骨の体積はアルキメデスの原理により求めた乾燥下顎骨の体積とほぼ同じで、これまでの報告[27]と一致していた。その誤差の増加率は 0.9%であったことから、下顎骨の真の体積とセグメンテーションにより測定された体積との誤差は１%程度に収まるものであり、MRI 計測の精度は高いと考えた。

セグメンテーションの正確性と再現性について検討した結果、測定誤差は３%程度であったことから、計測には約 3%の誤差が生じていることを念頭に置く必要があると考えた。

下顎骨の発育発達様式の視覚化に関して

下顎骨の三次元モデルの重ね合わせについては、CT 撮影によって得られた画像データをもとに作成された三次元モデルの重ね合わせを実施していた研究[39]を参照して同様に重ね合わせを実施した。この重ね合わせはセファロにおいて使用される二次元的な画像上での下顎骨の重ね合わせの基準を三次元的に解釈したものであり[53,54]、本研究で構築した三次元モデルの条件においても有効で

あると考えた。重ね合わせによって下顎骨の各部位の形態変化のベクトルが明示化され、下顎骨の経年的な形態変化と発達が認められたことから、体積も経年的に増加していくことが予想された。

形態変化のベクトルを Enlow らが考察した下顎骨の形態変化様式[18]と比較した。構築した三次元モデルの重ね合わせのベクトルにおいて下顎骨は外側に向かって骨が添加され、内側面の大部分において骨吸収が行われていた。これは Enlow らが提唱した骨のリモデリングによる下顎骨の発達形態様式[17]とほぼ同じ挙動であったが、下顎前歯部歯槽骨において Enlow らの示した挙動と異なるベクトルが出現した。構築した三次元モデルにおいて下顎前歯部歯槽骨では骨吸収ではなく、僅かな骨添加を示したことから実際の下顎骨上では Enlow らの考案した下顎骨の発達形態と異なる部位もあると考えた。ただし今回の検討では、1 症例のみの三次元モデルを作成したにすぎず、今後症例を重ねてさらなる検討を要すると考えた。

下顎骨の体積変化に関する横断的検討

年齢に対する下顎骨の体積の推移は、7 歳から 12 歳まで増加し、12 歳以降では著明な増加は認められなくなった。下顎骨の体積は、思春期にあたる第二次成長期において著明な増加を示し、成長期のピークに達した後に変化が少なくなるという一般的な身体成長発育パターンのうちスキャモンの発育曲線における一般型と酷似した推移を辿ることが示唆された[55]。しかしながら、これらはあくまで横断的な検討であった。

下顎骨体積変化に対する年齢・身長・体重の相関関係

各症例の下顎骨の体積変化と年齢、身長、および体重との相関係数を求めた

ところ、20 症例中 14 症例（70%）は 0.7 よりも大きい値を示し、下顎骨の体積変化と年齢・身長・体重との間に高い相関があることが示唆された。しかしながら、他の 6 症例については相関係数が 0.7 以下であり、３症例においては極めて低い値を示した。各症例に関しては後述する。

下顎骨の体積に変化に関する縦断的検討

全症例における横断的検討結果と相関関係を踏まえた上で、症例毎の身体成長と下顎骨体積変化に関する分析を行った。

症例 1

年齢に対して下顎骨の体積は増加し、特に増加量は 9 歳から 10 歳にかけて大きく変化していた。年齢に対する身長と体重の増加傾向を鑑みるに成長のピークには至っていなかったと考えられるが、体積は 11 歳まで大きく増加し、11 歳以降は著明な変化は認められなかったことから下顎骨体積変化のピークを越えたと考えた。

症例 2

年齢に対する身長と体重の増加傾向を鑑みるに成長のピークには至っていなかったと考えられるが、身長は 10 歳以降急激に成長していたことから成長スパートの開始には至っていたが、ピークは越えていなかったと考えた。

症例 3

身長・体重・体積の増加傾向は撮影終了まで継続しており、身体成長のピークには至っていなかったと考えた。体重は 10 歳以降に急激な増加を認めたが、身長と体積には著明な変化は認められなかった。

症例 4

身長・体重・体積の増加傾向は撮影終了まで継続しており、身体成長のピークには至っていなかったと考えた。

症例 5

身長・体重の増加傾向は撮影終了まで継続しており、身体成長のピークには至っていなかったと考えた。しかしながら体積は 11 歳を境として増加傾向が低下しており、下顎骨体積変化のピークを越えたと考えた。

症例 6

身長は 8.5 歳以降に著明な増大傾向を示していたのに対し、体積は 10 歳以降に著明な増大傾向を示していた。身長・体重・体積の増加傾向は撮影終了まで継続しており、身体成長のピークには至っていなかったと考えた。

症例 7

年齢に対する身長と体重の増加傾向を鑑みるに成長のピークには至っていなかったと考えた。体積は 7 歳から 8 歳にかけて急激に増大し、その後は増大傾向が低下したが、12 歳以降に再び急激な増大を認めた。

症例 8

下顎骨の体積は 12 歳以降著明な増大を認めなかったことから、12 歳が増大のピークであったと考えた。一方で身長は 13 歳以降大きく変化していないことから、身体成長のピークが 13 歳であったと考えた。

症例 9

年齢に対する身長の増加傾向は 14 歳以降著明な変化が認められなくなっており、成長のピークに達したと考えられるが、体重は増加し続けていた。体積は 11 歳まで著明な増加傾向を認めたが、11 歳以降の変化量は少なかった。

症例 10

身体成長は 14 歳以降増大傾向が緩やかになり、成長ピークを迎えたと考えた。体積の増大傾向は 13 歳以降緩やかになっていたことから体積変化のピークを越えたと考えた。

症例 11

身体成長は 13 歳以降著明な増加傾向を認めなかったことから成長のピークに達したと考えた。体積の増大傾向は 12 歳頃にピークに達したと考えた。

症例 12

身体成長は 13 歳以降著明な増加傾向を認めなかったことから成長のピークに達したと考えられた。体積の増大傾向は 13 歳以降著明な変化を認めなかったことから、身体成長とほぼ同時期に体積変化のピークを越えたと考えた。

症例 13

身体成長は 14 歳以降著明な増加傾向を認めなかったことから成長のピークに達したと考えられた。体積の増大傾向は 14 歳以降著明な変化を認めなかったことから、身体成長とほぼ同時期に体積変化のピークを越えたと考えた。

症例 14

身体成長は13歳以降著明な変化を認めなかった為、成長のピークに達したと考えられるが体重は13歳以降も増大傾向を認めた。体積も13歳以降著明な変化はなくなり、身体成長のピークとほぼ同時期に体積変化のピークを越えたと考えた。

症例15

身体成長は14歳以降著明な増加傾向を認めなかったことから成長のピークに達したと考えられる。体積の増大傾向は11歳まで急激に増大し、その後緩やかに増えながら13歳以降その変化はほぼなくなっていたことから下顎骨の成長もピークを越えたと考えた。

症例16

下顎骨の体積と、年齢、身長、および体重との相関係数が0.2未満となった。対象とした5年間で、身長は16 cm、体重は23 kg増加したものの、下顎骨の体積には増加をほとんど認めなかった。身体成長は15歳以降著明な変化がなくなり、身体成長のピークに達したと考えた。しかしながら体積は撮影開始期から終了まで著明な変化を認めず、体積の増加はほとんど起きていなかった。

本症例では、撮影を開始した12歳時点で、下顎骨の成長は既に完了したものと考えた。

症例17

下顎骨の体積と、年齢、身長、および体重との相関係数が0.2未満となった。対象とした5年間で、身長は3 cm、体重は10 kgに達しず、身体成長の程

度がかなり小さい個体と考えられた。同時に、下顎骨の体積には増加をほとんど認めなかった。

本症例では、撮影を開始した 12.2 歳時点で、下顎骨を含む身体の成長は既に完了したものと考えた。

症例 18

身体成長は 12 歳以降著明な変化がなかった為、成長のピークに達したと考えた。体積は 10 歳以降急激な増加傾向を認め、撮影終了まで変化は続いており、今後もさらに増大すると予想された。

症例 19

下顎骨の体積と、年齢、身長、および体重との相関係数が 0.01 未満となった。対象とした 5 年間で、身長は 27 cm、体重は 18 kg 増加したものの、下顎骨の体積には増加をほとんど認めなかった。本症例では、撮影を開始した 8.5 歳時点で、下顎骨の成長のピークは既に終了していると考えざるを得なかった。

症例 20

身体成長は 13 歳以降著明な変化がなくなり、身体成長のピークに達したと考えた。体積は 11 歳以降著明な変化がなくなっており、体積変化のピークを越えたと考えた。

各症例の分析を行った結果、撮影期間中明らかに二次成長期における急激な身体成長のピークを越えていたと考えられるのは 20 症例の内、12 症例であっ

た。12 症例の内、9 症例は身体成長のピークと同時かその直前に体積変化のピークを迎えており、身体成長と体積変化は同期していることを示唆していると考えた。しかし症例 16 では身体成長は順調に実行されていたにも拘らず、体積変化がほとんど起こっていなかった。症例 18 は身体成長のピーク後も下顎骨の体積増加傾向は続いていた。症例 17 に関しては身体成長ならびに下顎骨の体積変化が撮影期間を通してほとんど変化していなかったことから、症例 17 は身体成長および下顎骨体積変化のピーク以降に撮影されたと考えた。

身体成長のピークに達していないと考えられた残り 8 症例の内、7 症例については体積の増加傾向を認め、身体成長と同様にそのピークを認められなかった。これらの症例は今回の撮影期間以降も成長を続け、後年に身体成長のピークを迎えたものと考えた。症例 19 に関して身体成長は順調に行われていたが、症例 16 と同様に体積変化はほとんど起きておらず、身体成長と下顎骨の体積の相関関係は極めて低い結果となった。

また下顎骨の体積が増加した症例内においても、体積の増加量・増加率は一様ではなく、撮影終了までの増加量が 1000 ㎣以下を示すものや、10000 ㎣以上を示すものなど幅広い変化量を示していた(図 37)。

縦断的検討において認められた逸脱した挙動を示した体積変化について

本研究では疾患・疾病に罹患していない健常な小児を対象として MRI を撮影した。しかし何らかの疾患・疾病に罹患しておらずとも顎骨は身体成長に伴い、上顎前突・下顎前突・顎偏位等の平均的な顎顔面の形態から逸脱した顎骨形態異常が出現する。

症例 5、症例 16、症例 19 の結果では身体成長期であるにもかかわらず、下顎骨の体積に変化が生じていなかった、ないしは下顎骨の体積変化のピークを

早期に迎えたことから、将来的な下顎骨の過小化の可能性が示唆されると考えた。

症例 18 では下顎骨の体積増加傾向が継続していたことから将来的に下顎骨の過大化の可能性が示唆されたと考えた。

以上の結果から身体の成長発育と下顎骨の体積変化には高い相関関係が示唆されたが、症例毎に発育発達の時期や傾向は異なっていた。診断や治療介入を行う上では、患者個々の発育発達様式を正確に把握した上で、それぞれに適切な手段・介入時期を見極めなければならないと考えた。

【結論】

MRI 画像データによる三次元モデルの構築を行い、その体積変化の推移に対する年齢・身長・体重の相関を検討した結果以下の結論を得た。

1. 下顎骨の体積は、年齢、身長、および体重の増加とともに、増加を確認した。7 歳時では平均 30761 ㎣、13 歳時では平均 40770 ㎣と増加し、各症例における下顎骨体積の増加量は平均 6530 mm3、増加率は平均 18.6%であった。
2. 各症例での増加量と増加率のバリエーションは大きかった。横断的検討で認められた傾向は、各症例において必ずしも認められなかった。
3. 各症例で、下顎骨の体積と、年齢、身長、および体重との相関係数を求めたが、その多くに高い値を示した。しかし一部の症例において相関係数が極めて低い値を示したものがあった。
4. 各人それぞれの下顎骨の体積変化傾向から将来的な形態異常の予測が可能となりえることが示唆された。

以上より、下顎骨を対象とした治療を行う際には、年齢とともに、身長の増加量や増加率を把握し、治療の開始時期を考慮する必要があることが示唆された。

【謝辞】

本研究を遂行するにあたり、指導教員である顎顔面口腔矯正学教室、山城隆教授には常に懇切丁寧なご指導ご高配を賜りました。ここに心より感謝申し上げます。

また、本研究を実施するにあたってMRIデータをご供出下さいましたコペンハーゲン大学三次元頭蓋顔面画像研究所の所長であるSven Kreiborg教授（大阪大学招へい教授）に心より御礼申し上げます。そして、R-Viewを用いたデータの三次元化とベクトル表示について、コペンハーゲン大学附属病院頭蓋顔面ユニットの主任研究員であるTron Darvann博士にご指導を頂戴しました。この場をお借りして、厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究に協力していただいた顎顔面口腔矯正学教室の教室員の皆様に深く感謝いたします。

【文献】

1) 根津　浩，永田賢司（1984）：歯科矯正学　バイオプログレッシブ診断学．第五版，ロッキーマウンテンモリタ　東京
2) 根津　浩，永田賢司（1990）：歯科矯正学　バイオプログレッシブの臨床．第一版，ロッキーマウンテンモリタ　東京
3) Donald H. Enlow, Mark G. Hans (2016)：Essentials of FACIAL GROWTH, 顎顔面成長発育の基礎．第二版，クインテッセンス出版株式会社　東京
4) Vannier MW, Marsh JL (1996)：Three-dimensional imaging, surgical planning, and image-guided surgery. Radiol Clin North Am, 34:545-563.
5) Kau CH1, Richmond S, Palomo JM, Hans MG (2005) :Three-dimensional cone beam computerized tomography in orthodontics. J Orthod, Dec;32(4):282-93.
6) 大坪淳造（1957）：日本人成人正常咬合者の歯冠幅径と歯列弓及びBasal Archとの関係について．日矯歯誌，16:36~46.
7) Kim YH, Sato K, Mitani H, Shimizu Y, Kikuchi M (2003)：Asymmetry of the sphenoid bone and its suitability as a reference for analyzing craniofacial asymmetry. Am J Orthod Dentofacial Orthop, Dec;124(6):656-62.
8) Hans MG, Enlow DH, Noachtar R (1995) Age-related differences in mandibular ramus growth: a histologic study. Angle Orthod, 65(5):335-40.
ヒト骨格標本、下顎枝のリモデリング評価
9) 日本小児科学会（1995）：日本人小児の頭部Ｘ線規格写真基準値に関する研究．　小児歯科学雑誌，33：659~696.
10) 坂本敏彦（1959）：日本人顔面頭蓋の成長に関する研究―SELLA TURCICAを基準として―．日矯歯誌，18：1~17.
11) 坂本敏彦，三浦不二夫，飯塚哲夫（1963）：頭部エックス線規格写真法による日本人顔面頭蓋の成長に関する研究―実測長分析、成長率分析、実測長百分率分析成績―．口病誌，30：169~182.
12) 飯塚哲夫（1958）：頭部Ｘ線規格写真法による日本人小児の顔の成長に関する研究．口病誌，25:260~272.
13) 飯塚哲夫，石川富士郎（1957）：頭部Ｘ線規格写真による症例分析法の基準値について―日本人成人男女正常咬合群―．　日矯歯誌，16：4~12.
14) Broadbent BH (1931)：A new x-ray technique and its application to orthodontia. Angle Orthod, 1:45-66.
15) Mito T1, Sato K, Mitani H (2002)：Cervical vertebral bone age in girls. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2002 Oct;122(4):380-5.

16) Baumrind S, Miller D, Molthen R (1976) : The reliability of head film measurements. 3. Tracing superimposition. Am J Orthod. Dec;70(6):617-44.
17) Enlow DH (1984) : The "V" principle. Am J Orthod. Jan;85(1):96.
18) Enlow DH, Harris D (1964) : A study of the postnatal growth of the human mandible. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 50:25-50
19) Enlow, D. H., and S. Bang (1965) : Growth and remodeling of the human maxilla. Am. J. Orthod, 51:446.
20) Enlow, D. H., T. Kuroda, and A. B. Lewis (1971a) : The morphological and morphogenetic basis for craniofacial form and pattern. Angle Orthod., 41:161.
21) Enlow, D. H (1962b) : A study of the postnatal growth and remodeling of bone. Am. J. Anat., 110: 79.
22) Bjork A, Skieller V (1983) : Normal and abnormal growth of the mandible. A synthesis of longitudinal cephalometric implant studies over a period of 25 years. Eur J Orthod, 5:1-46
23) Bjork A (1963) : Variations in the growth pattern of the human mandible: longitudinal study by the implant method. J Dent Res, 42:400-411
24) Bjork, A., and V. Skieller (1977) : Growth of the maxilla in three demensions as revealed radiographically by the implant method. Br. J. Orthod., 4:53.
25) Bjork, A (1968) : The use of metallic implants in the study of facial growth in children: Method and application. Am. J. Phys. Anthropol, 29:243.
26) Pittayapat P, Bornstein MM, Imada TS, Coucke W, Lambrichts I, Jacobs R (2014, 2015) : Accuracy of linear measurements using three imaging modalities: two lateral cephalograms and one 3D model from CBCT data. Eur J Orthod, Apr;37(2):202-8. doi: 10.1093/ejo/cju036. Epub, Aug 26.
27) Moshiri M, Scarfe WC, Hilgers ML, Scheetz JP, Silveira AM, Farman AG () 2007 : Accuracy of linear measurements from imaging plate and lateral cephalometric images derived from cone-beam computed tomography. Am J Orthod Dentofacial Orthop, Oct;132(4):550-60.
28) Cavalcanti MG1, Rocha SS, Vannier MW (2004) : Craniofacial measurements based on 3D-CT volume rendering: implications for clinical applications. Dentomaxillofac Radiol. May;33(3):170-6.
29) Oz U, Orhan K, Abe N (2011) : Comparison of linear and angular measurements using two-dimensional conventional methods and three-dimensional cone beam CT images reconstructed from a volumetric rendering program in vivo. Dentomaxillofac Radiol, Dec;40(8):492-500. doi: 10.1259/dmfr/15644321.
30) Zumpano MP, Carson BS, Marsh JL, Vanderkolk CA, Richtsmeier JT (1999) : Three-

dimensional morphological analysis of isolated metopic synostosis. Anat Rec, 256:177-188.

31) Katayama K, Yamaguchi T, Sugiura M, Haga S, Maki K (2013,2014) : Evaluation of mandibular volume using cone-beam computed tomography and correlation with cephalometric values. Angle Orthod. 2014 Mar;84(2):337-42. doi: 10.2319/012913-87.1. Epub 2013 Aug 28.

32) Kreiborg S, Marsh JL, Cohen MM, Jr, Liversage M, Pedersen H, Skovby F (1993) : Comparative three-dimensional analysis of CT-scans of the calvaria and cranial base in Apert and Crouzon syndromes. J Cranio-Max-Fac Surg, 21:181-188.

33) Wink JD, Bastidas N, Bartlett SP (2013) : Analysis of the long-term growth of the mandible in Apert syndrome. J Craniofac Surg, Jul;24(4):1408-10. doi: 10.1097/SCS.0b013e31828dcf09.

34) Alkhadra T. Saudi Dent J (2017) : Mandibular alveolar bone volume in patients with different vertical facial dimensions. 2017 Oct;29(4):140-143. doi: 10.1016/j.sdentj.2017.07.002. Epub 2017 Aug 2.

35) Hilger KB, Larsen P, Kreiborg S, Darvann TA, Marsh JL (2003) : Active shape analysis of mandibular growth. In: Ellis RE, Peters TM, editors. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI). Berlin: Springer Uerlag; 2003. pp. 902-909.

36) Kreiborg S, Larsen P, Schleidt DT, Darvann TA, Hermann NV, Dobrzeniecki AB (2001) : New technologies for assessment of craniofacial growth. In: Kuijpers-Jagtman A-M, Leunisse M, editors. Orthodontics at the Turn of the Century. Nijmegen: Nederlandse Vereniging voor Orthodontische Studie, pp. 181-188.

37) Andresen PR, Bookstein FL, Conradsen K, Ersbøll BK, Marsh JL, Kreiborg S (2000) : Surface-bounded growth modelling applied to human mandibles. IEEE Trans Med Imaging, 19:1053-1063.

38) Bro-Nielsen M, Gramkow C, Kreiborg S (1997) : Non-rigid registration using bone growth model. In: Troccaz J, Grimson E, Mösges R, editors. Lecture Notes in Computer Science 1205. Berlin: Springer, pp. 3-12.

39) Krarup S1, Darvann TA, Larsen P, Marsh JL, Kreiborg S (2005) : Three-dimensional analysis of mandibular growth and tooth eruption. J Anat, Nov;207(5):669-82.

40) Yoo E, Murakami S, Takada K, Fuchihata H, Sakuda M. (1996) : Tongue volume in human female adults with mandibular prognathism. J Dent Res. 75: 1957-62.

41) Murakami S, Fuchihata H, Yoon S, Furukawa S, Kawai T, Kishino M. (1999) : Usefulness of fat-suppressed Gd-enhanced MR imaging of tongue cancer. Oral

Radiol. 15: 19-26.
42) Murakami S, Takahashi A, Nishiyama H, Fujishita M, Fuchihata H. (1993): Magnetic resonance evaluation of the temporomandibular joint disc position and configuration. Dentomaxillofac Radiol. 22: 205-7.
43) Sgouros S1, Natarajan K, Hockley AD, Goldin JH, Wake M (1999) : Skull base growth in childhood. Pediatr Neurosurg, Nov;31(5):259-68.
44) Cevidanes LH, Franco AA, Gerig G, Proffit WR, Slice DE, Enlow DH, Lederman HM, Amorim L, Scanavini MA, Vigorito JW (2005) : Comparison of relative mandibular growth vectors with high-resolution 3-dimensional imaging. Am J Orthod Dentofacial Orthop, Jul;128(1):27-34.
45) Flügge T, Hövener JB, Ludwig U, Eisenbeiss AK, Spittau B, Hennig J, Schmelzeisen R, Nelson K (2016) : Magnetic resonance imaging of intraoral hard and soft tissues using an intraoral coil and FLASH sequences. Eur Radiol. 2016 Dec;26(12):4616-4623. Epub 2016 Feb 24.
46) Cevidanes LH, Franco AA, Gerig G, Proffit WR, Slice DE, Enlow DH, Yamashita HK, Kim YJ, Scanavini MA, Vigorito JW (2005) : Assessment of mandibular growth and response to orthopedic treatment with 3-dimensional magnetic resonance images. Am J Orthod Dentofacial Orthop, Jul;128(1):16-26.
47) Taha MA, Manske SL, Kristensen E, Taiani JT, Krawetz R, Wu Y, Ponjevic D, Matyas JR, Boyd SK, Rancourt DE, Dunn JF (2013) : Assessment of the efficacy of MRI for detection of changes in bone morphology in a mouse model of bone injury. J Magn Reson Imaging, Jul;38(1):231-7.
48) Ludwig U, Eisenbeiss AK, Scheifele C, Nelson K, Bock M, Hennig J, von Elverfeldt D, Herdt O, Flügge T, Hövener JB (2016) : Dental MRI using wireless intraoral coils.
Sci Rep. 2016 Mar 29;6:23301. doi: 10.1038/srep23301.
49) Markic G, Müller L, Patcas R, Roos M, Lochbühler N, Peltomäki T, Karlo CA, Ullrich O, Kellenberger CJ (2014, 2015) : Assessing the length of the mandibular ramus and the condylar process: a comparison of OPG, CBCT, CT, MRI, and lateral cephalometric measurements. Eur J Orthod. 2015 Feb;37(1):13-21. doi: 10.1093/ejo/cju008. Epub 2014 Aug 25.
50) Tai K, Park JH, Hayashi K, Yanagi Y, Asaumi JI, Iida S, Shin JW (2011) : Preliminary study evaluating the accuracy of MRI images on CBCT images in the field of orthodontics. J Clin Pediatr Dent, Winter;36(2):211-8.
51) Knudsen GM, Jensen PS, Erritzoe D, Baare W, Ettrup A, Fisher PM, et. al. (2016) : The Center for Integrated Molecular Brain Imaging (Cimbi) database.

Neuroimage 124: 1213-9.
52) Williams LA1, DeVito TJ, Winter JD, Orr TN, Thompson RT, Gelman N. (2007) : Optimization of 3D MP-RAGE for neonatal brain imaging at 3.0 T. Magn Reson Imaging. 25: 1162-70.
53) Björk A (1969) : Prediction of mandibular growth rotation. Am J Orthod, 55:585-599.
54) Björk A, Skieller V. (1983) : Normal and abnormal growth of the mandible. A synthesis of longitudinal cephalometric implant studies over a period of 25 years. Eur J Orthod, 5:1-46.
55) Scammon, R, E. (1930). The measurement of the body in childhood, In Harris, J, A., Jackson., C, M., Paterson, D, G. and Scammon, R, E.(Eds). The Measurement of Man, Univ. of Minnesota Press, Minneapolis.

【図の説明】

図 1　成長期にあたる健常な北欧人小児 20 症例の撮影年齢

図 2　MRI 画像データ補正過程

図 3　下顎骨のセグメンテーション過程

図 4　セグメンテーションしたスライスを重ね合わせ作成した下顎骨の三次元モデル例

図 5　下顎骨の成長ベクトル表示

図 6　加齢における下顎骨体積の推移(横断的検討)

図 7-26　症例毎の下顎骨体積変化と身体成長

図 27　全症例の年齢と体積の相関関係

図 28,29　男女別の年齢と体積の相関関係

図 30　全症例の身長と体積の相関関係

図 31,32　男女別の身長と体積の相関関係

図 33　全症例の体重と体積の相関関係

図 34,35　男女別の体重と体積の相関関係

図 36　各症例の下顎骨体積変化に対する年齢・身長・体重の相関係数

図 37　各症例の下顎骨体積増加量および増加率

表１　下顎骨の体積の増加量

表２　下顎骨の体積の平均増加量および最大・最小増加量

表３　下顎骨の体積の平均増加率および最大・最小増加率

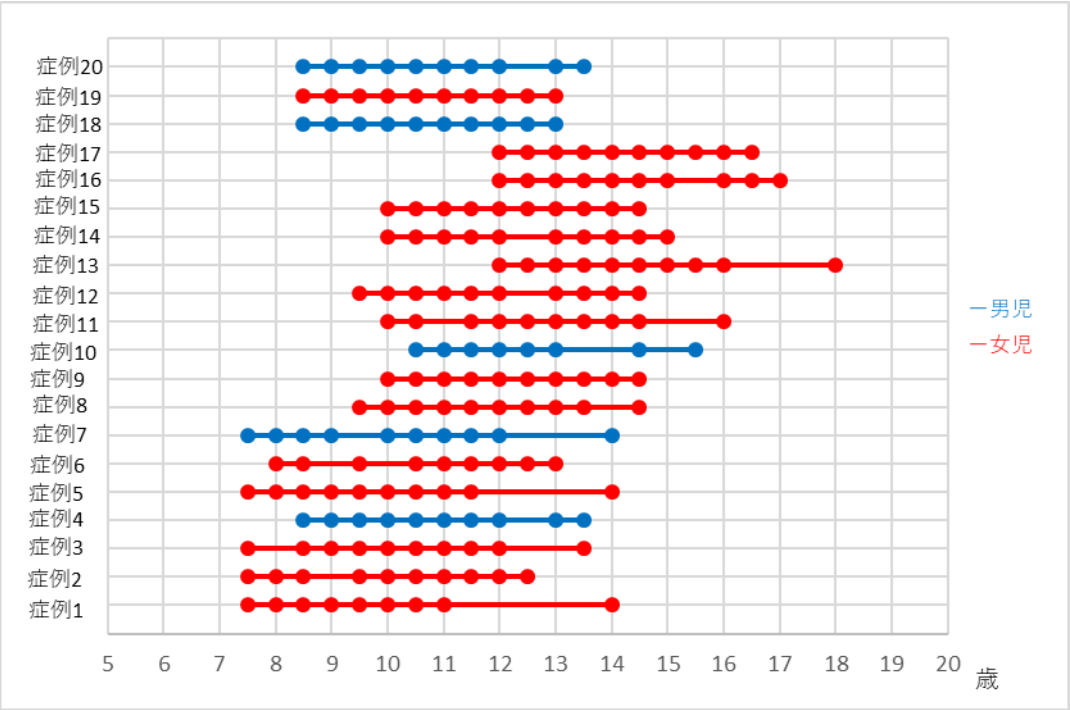
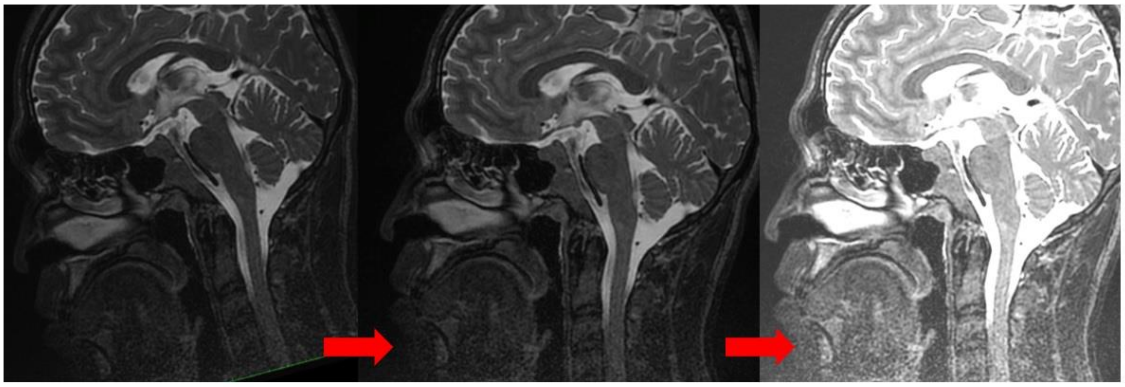


図 1　成長期にあたる健常な北欧人小児 20 症例の撮影年齢



AC-PC lineを中心にした元画像　　フランクフルト平面と平行化　　信号強度補正実施

図 2　MRI 画像データ補正過程

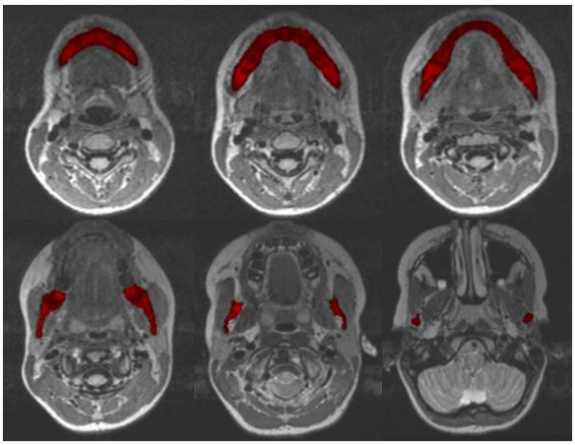


図３　下顎骨のセグメンテーション過程

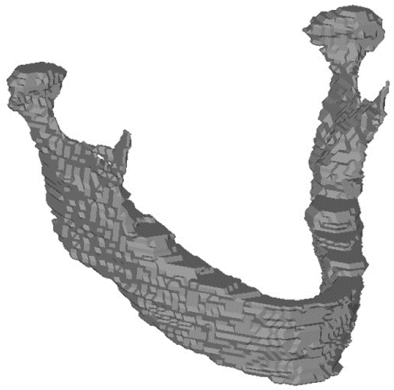
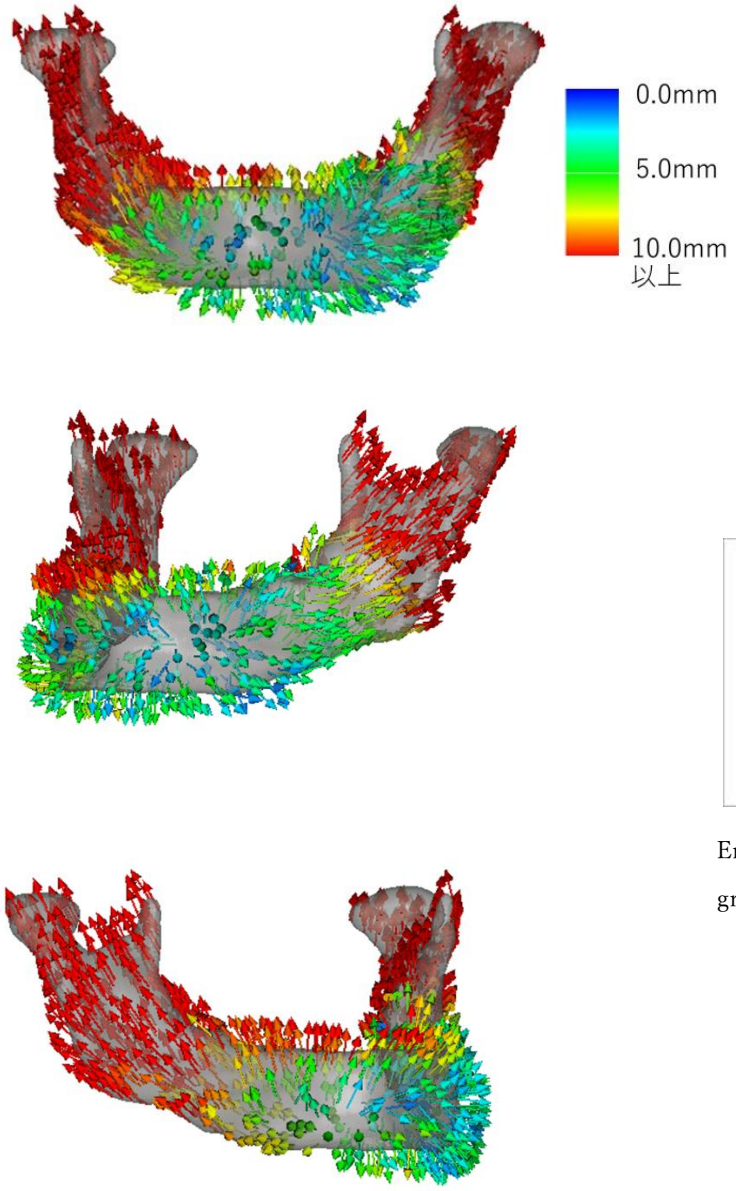


図４　セグメンテーションしたスライスを重ね合わせ作成した下顎骨の

三次元モデル例



Enlow. D.h. : A study of the postnatal growth of the human mandible　1964

図５　下顎骨の成長ベクトル表示

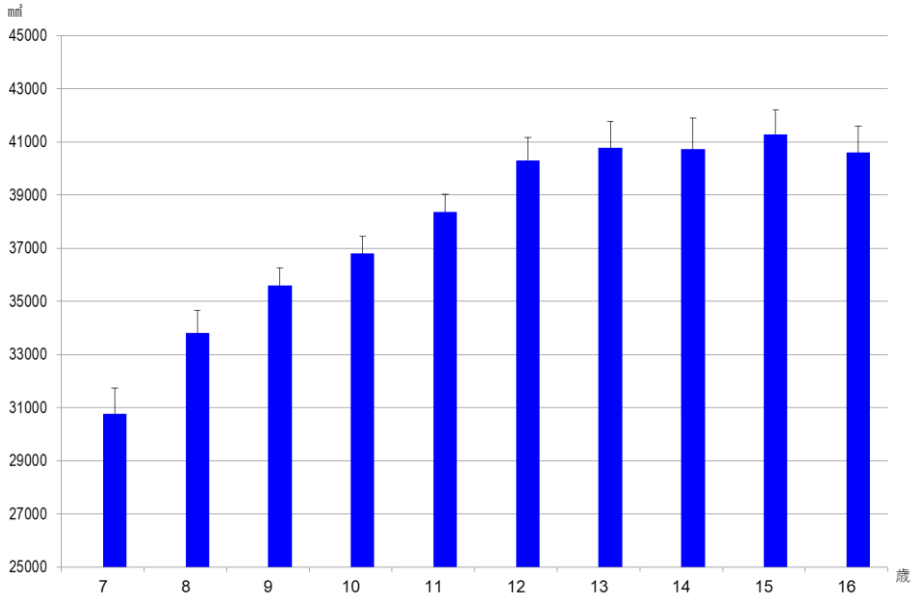
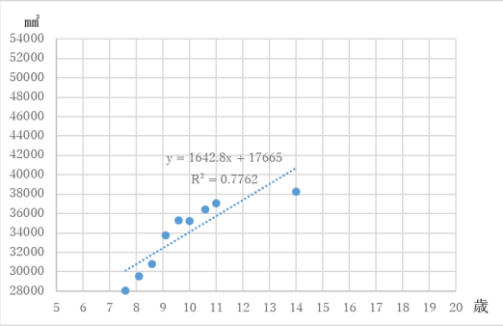


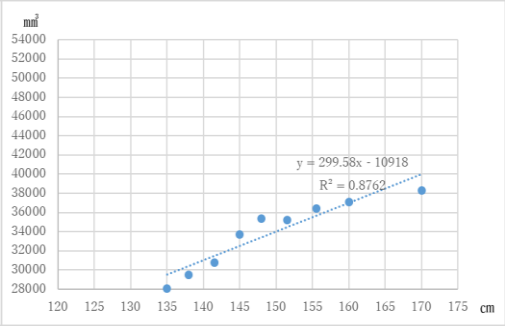
図 6　加齢における下顎骨体積の推移(横断的検討)

7 歳より 12 歳まで増加傾向を呈し、12 歳以降では著明な増加は認められなかった。統計学的検討で、有意な差を認めたのは、7 歳とその他すべての年齢群、8 歳と 10 歳以降のすべての年齢群、9 歳と 11 歳以降のすべての年齢群、10 歳と 12 歳以降のすべての年齢群、11 歳と 12 歳以降のすべての年齢群の間であった。

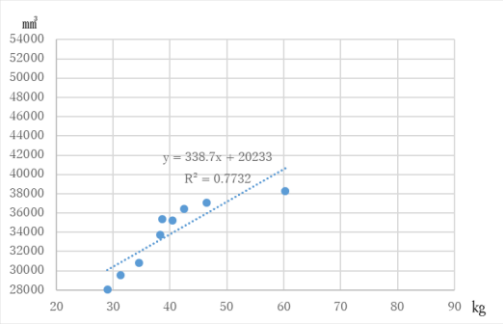
症例 1



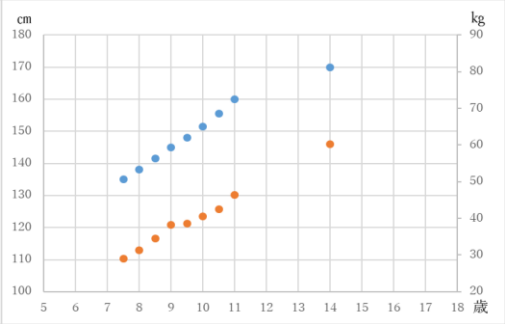
年齢に対する体積



身長に対する体積



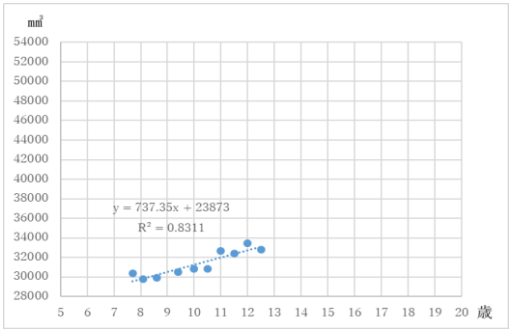
体重に対する体積



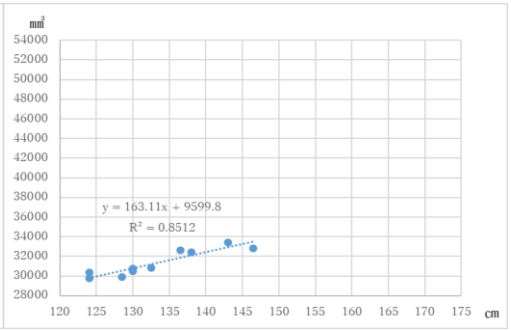
身長と体重の推移

図 7　症例 1 の下顎骨体積変化と身体成長

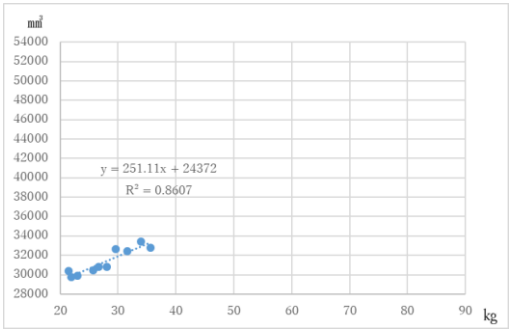
症例 2



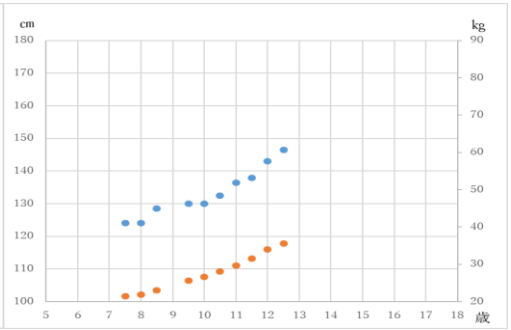
年齢に対する体積



身長に対する体積



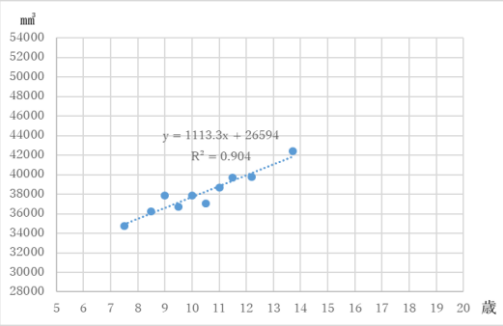
体重に対する体積



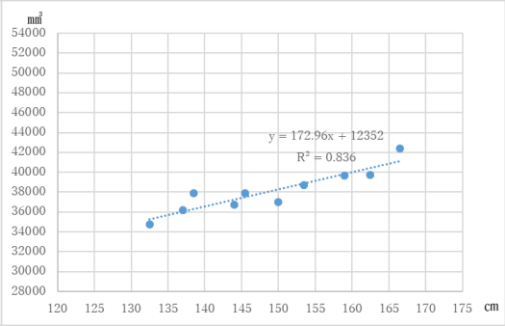
身長と体重の推移

図 8　症例 2 の下顎骨体積変化と身体成長

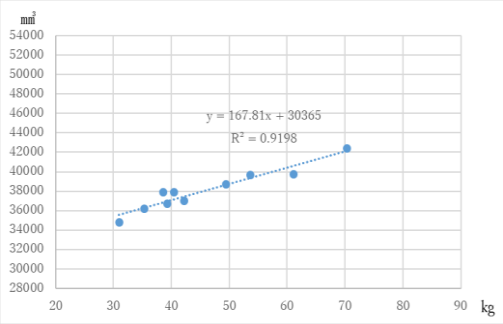
症例３



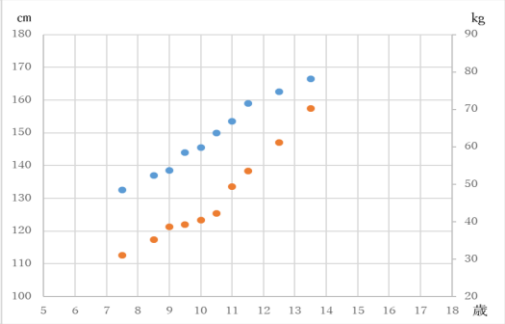
年齢に対する体積



身長に対する体積



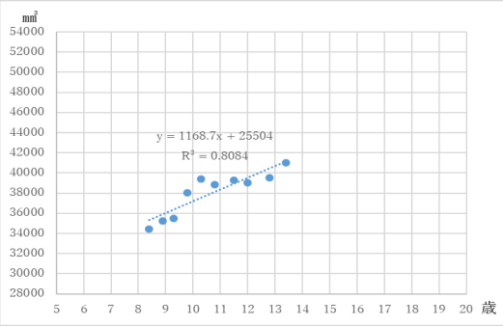
体重に対する体積



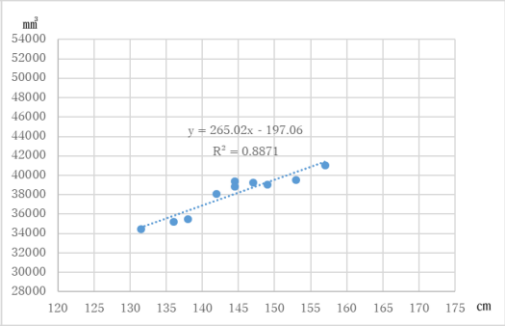
身長と体重の推移

図９　症例３の下顎骨体積変化と身体成長

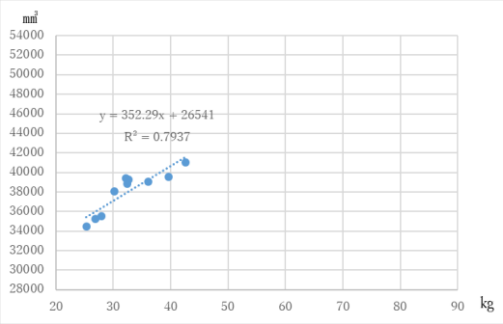
症例 4



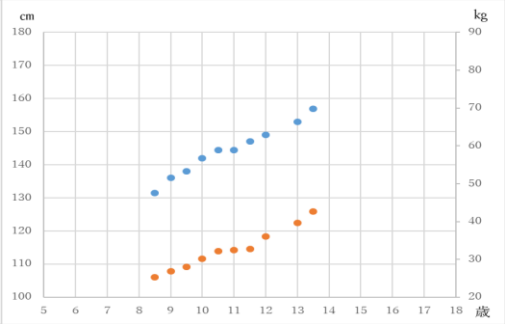
年齢に対する体積



身長に対する体積



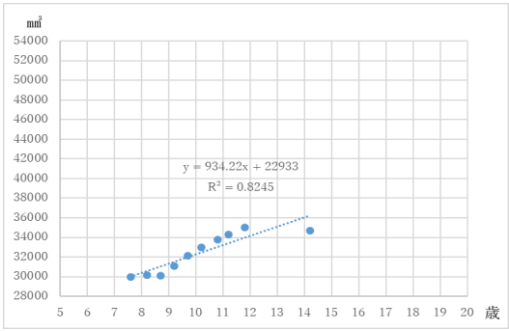
体重に対する体積



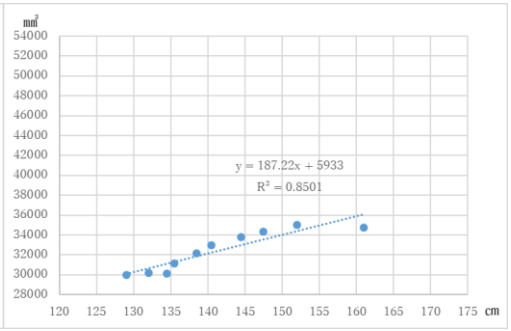
身長と体重の推移

図 10　症例 4 の下顎骨体積変化と身体成長

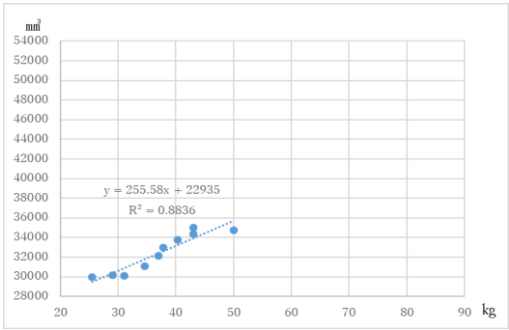
症例 5



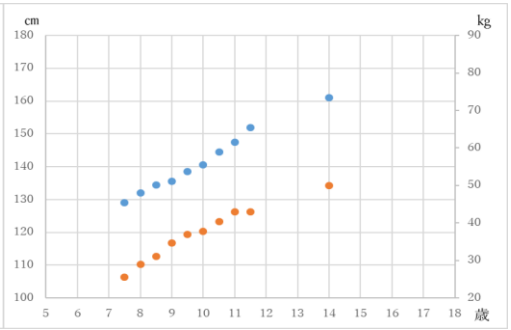
年齢に対する体積



身長に対する体積



体重に対する体積

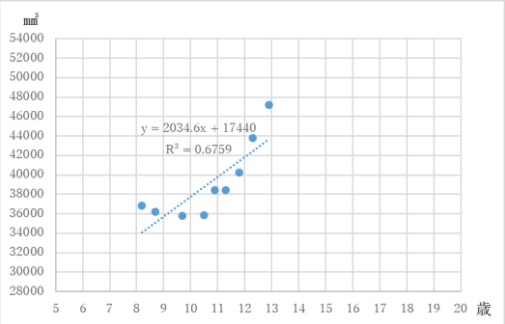


身長と体重の推移

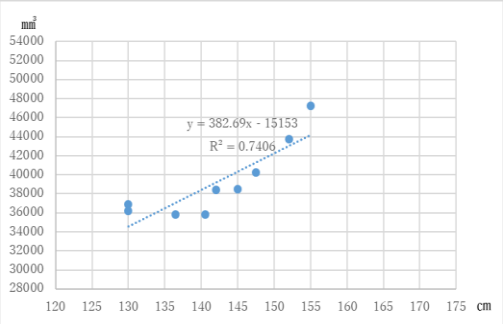
図 11　症例 5 の下顎骨体積変化と身体成長

症例 6

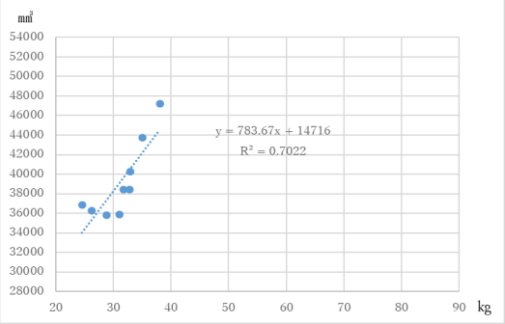
症例 6



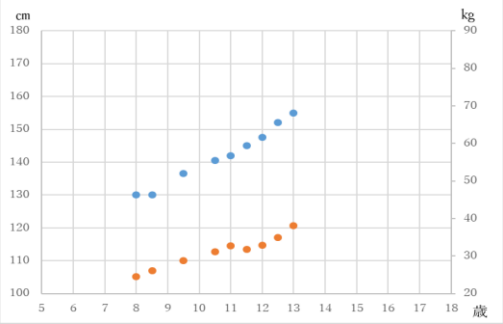
年齢に対する体積



身長に対する体積



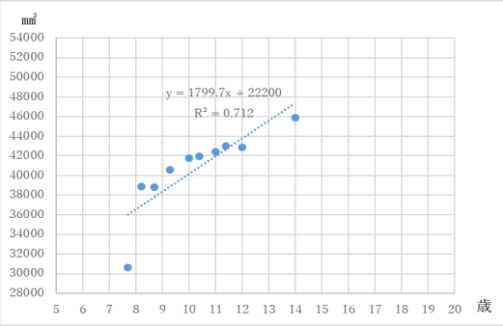
体重に対する体積



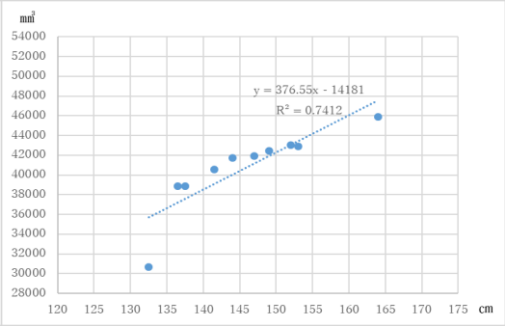
身長と体重の推移

図 12　症例 6 の下顎骨体積変化と身体成長

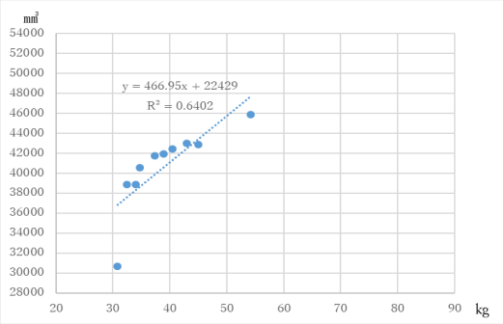
症例 7



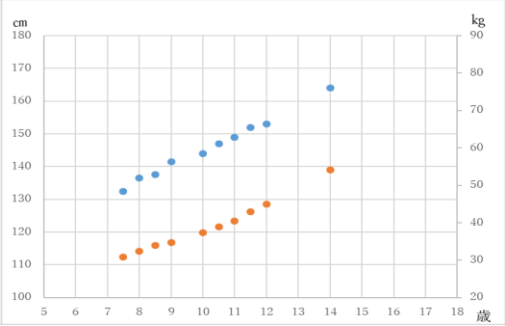
年齢に対する体積



身長に対する体積



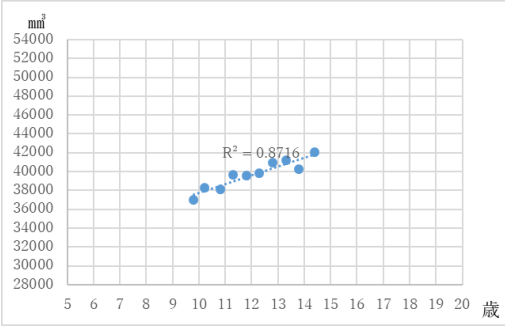
体重に対する体積



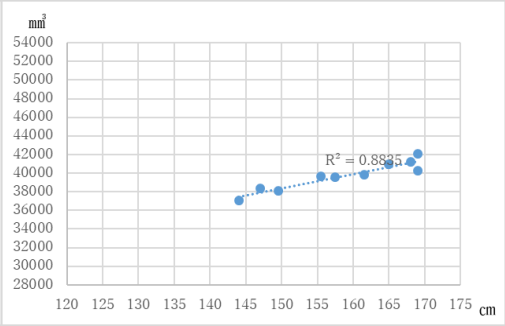
身長と体重の推移

図 13　症例 7 の下顎骨体積変化と身体成長

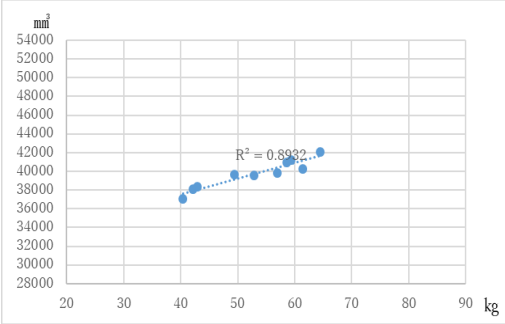
症例 8



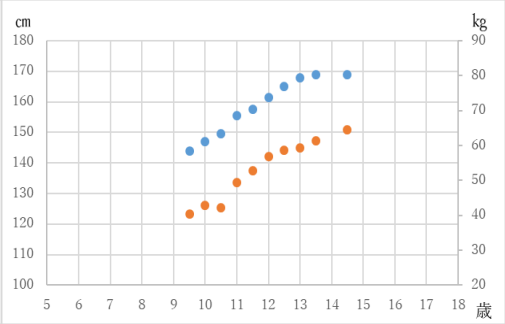
年齢に対する体積



身長に対する体積



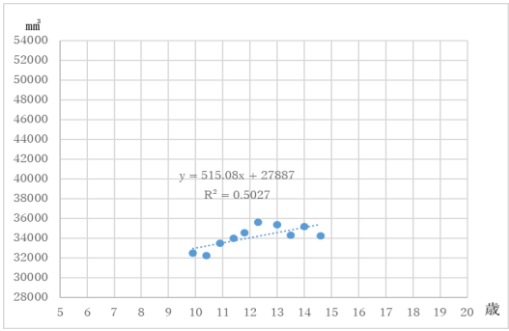
体重に対する体積



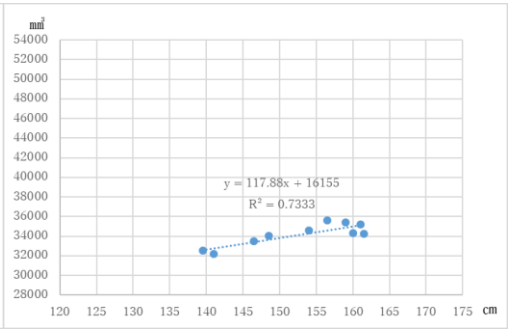
身長と体重の推移

図 14　症例 8 の下顎骨体積変化と身体成長

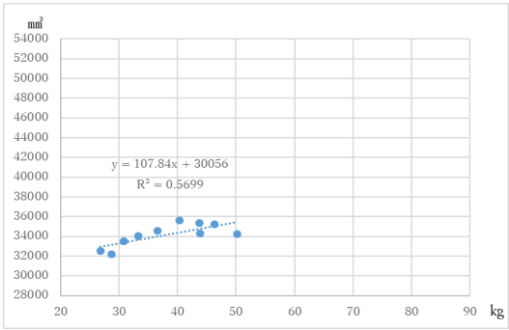
症例 9



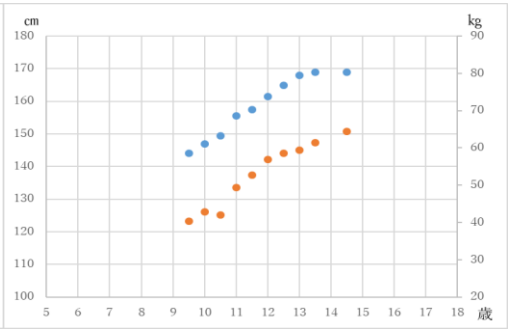
年齢に対する体積



身長に対する体積



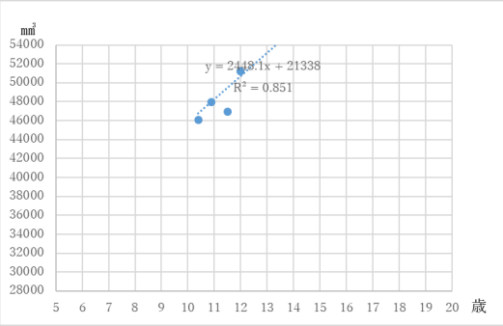
体重に対する体積



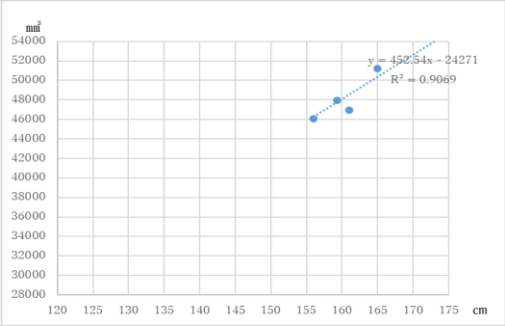
身長と体重の推移

図 15　症例 9 の下顎骨体積変化と身体成長

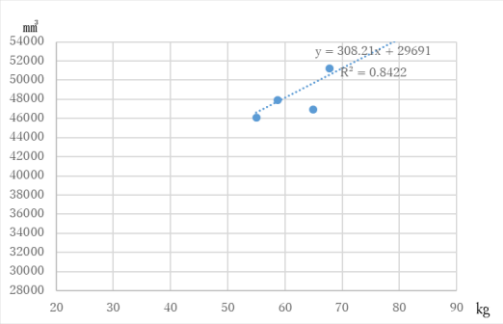
症例 10



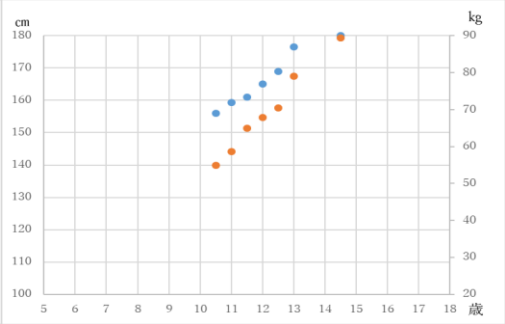
年齢に対する体積



身長に対する体積



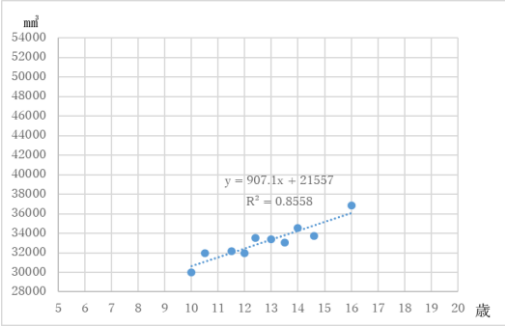
体重に対する体積



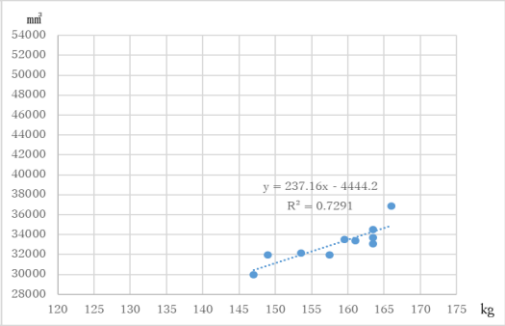
身長と体重の推移

図 16　症例 10 の下顎骨体積変化と身体成長

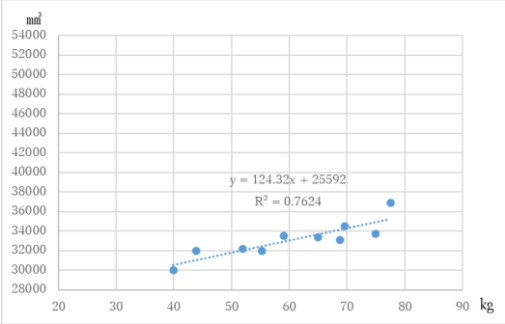
症例 11



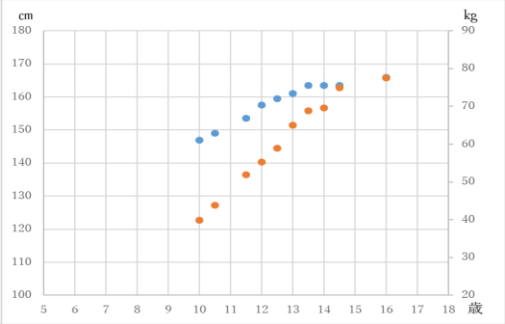
年齢に対する体積



身長に対する体積



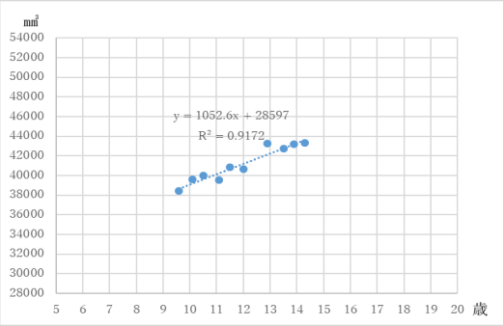
体重に対する体積



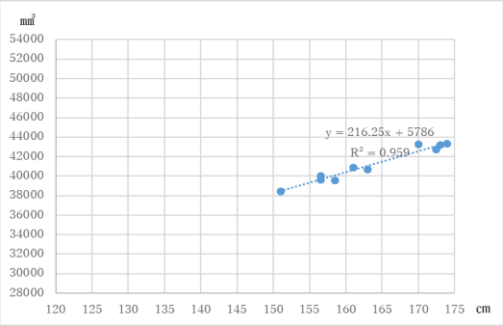
身長と体重の推移

図 17　症例 11 の下顎骨体積変化と身体成長

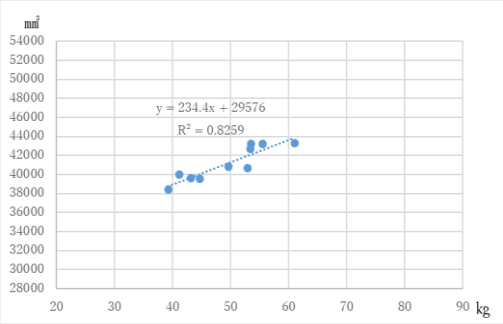
症例 12



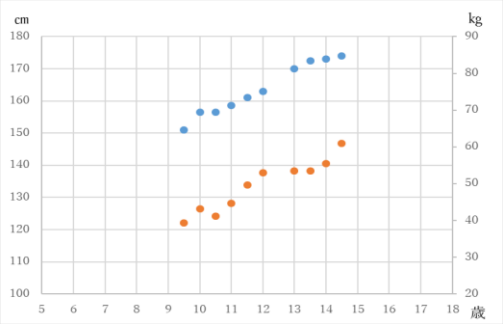
年齢に対する体積



身長に対する体積



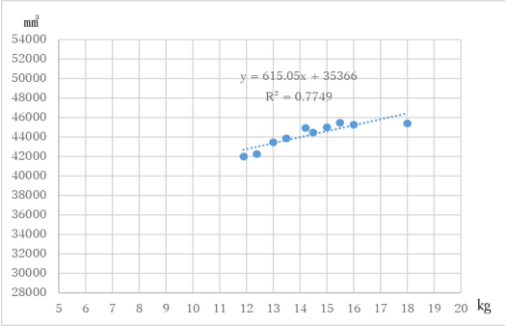
体重に対する体積



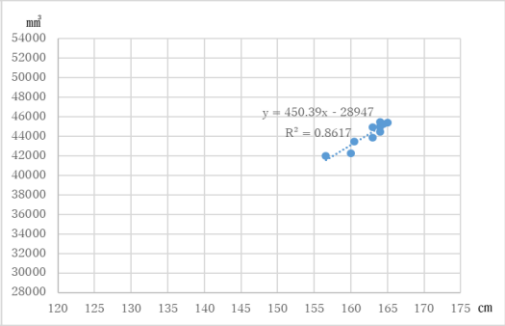
身長と体重の推移

図 18　症例 12 の下顎骨体積変化と身体成長

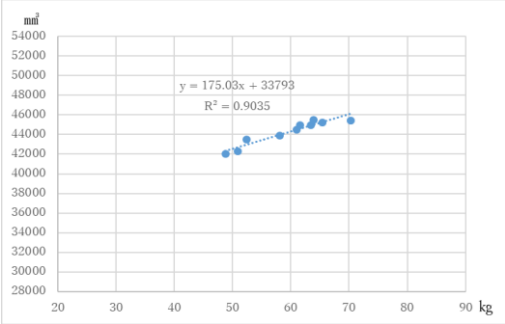
症例 13



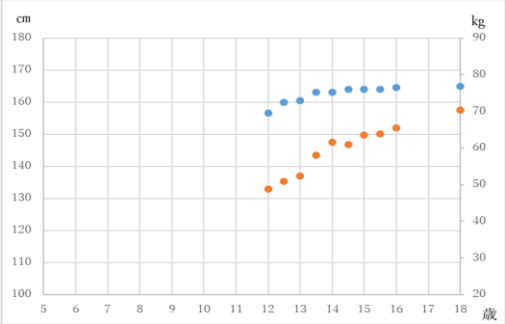
年齢に対する体積



身長に対する体積



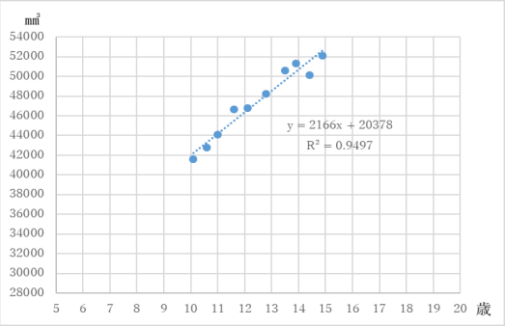
体重に対する体積



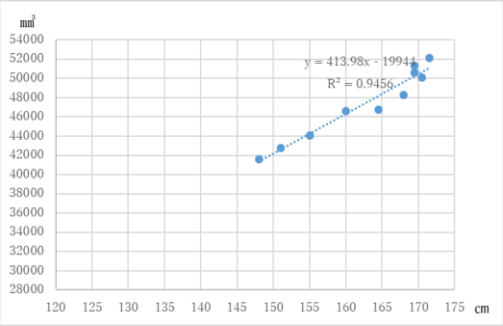
身長と体重の推移

図 19　症例 13 の下顎骨体積変化と身体成長

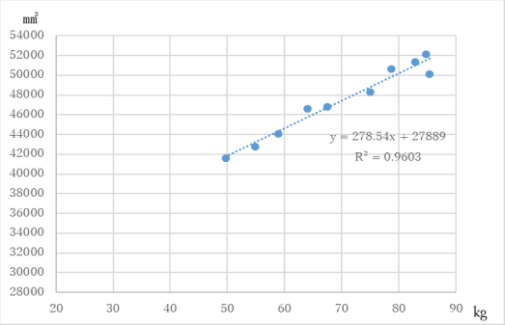
症例 14



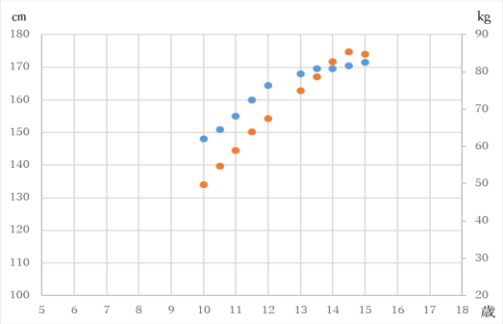
年齢に対する体積



身長に対する体積



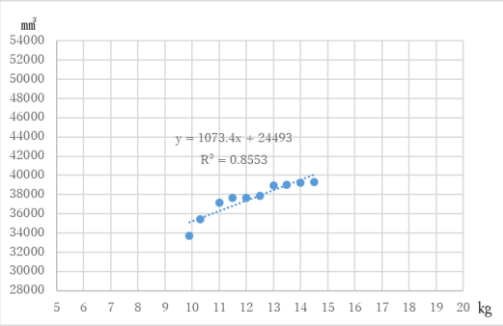
体重に対する体積



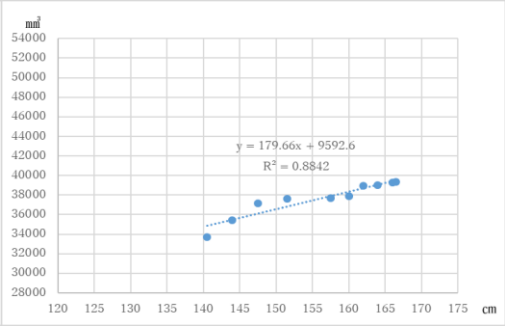
身長と体重の推移

図 20　症例 14 の下顎骨体積変化と身体成長

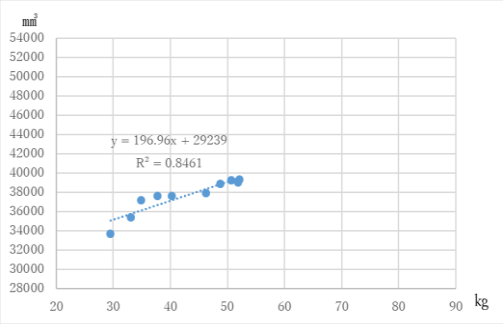
症例 15



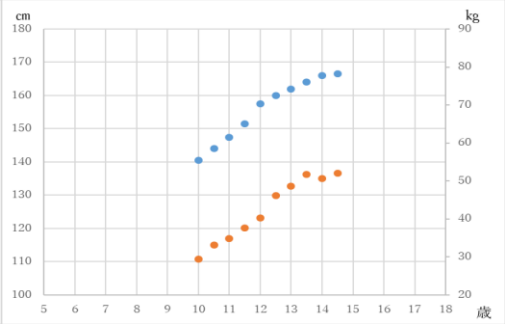
年齢に対する体積



身長に対する体積



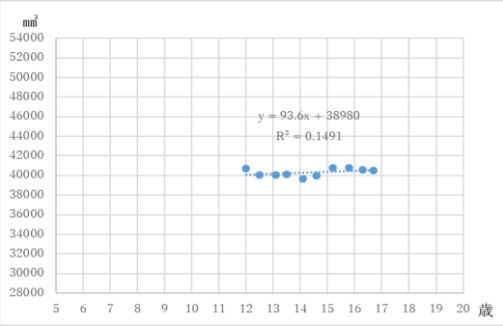
体重に対する体積



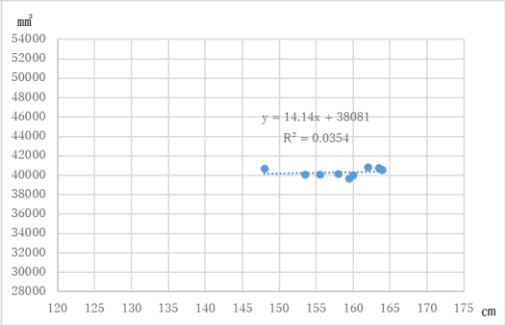
身長と体重の推移

図 21　症例 15 の下顎骨体積変化と身体成長

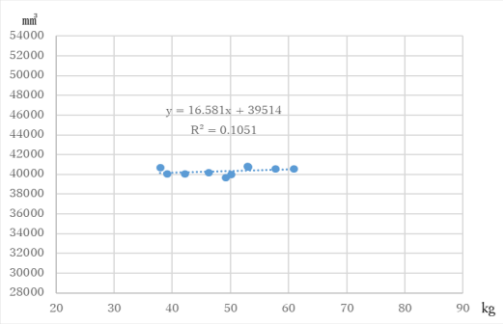
症例 16



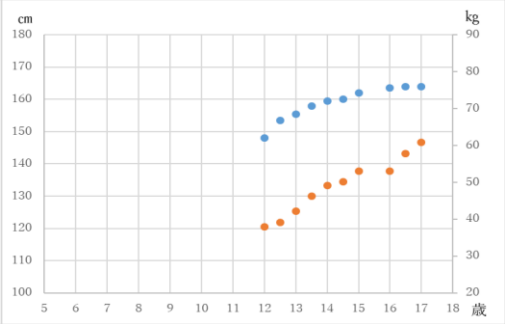
年齢に対する体積



身長に対する体積



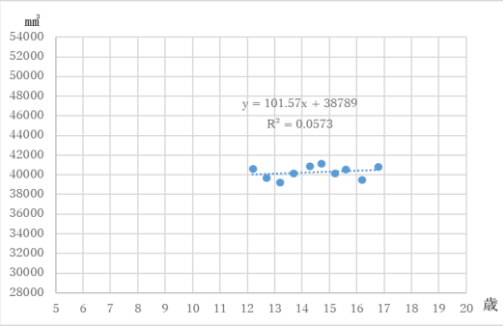
体重に対する体積



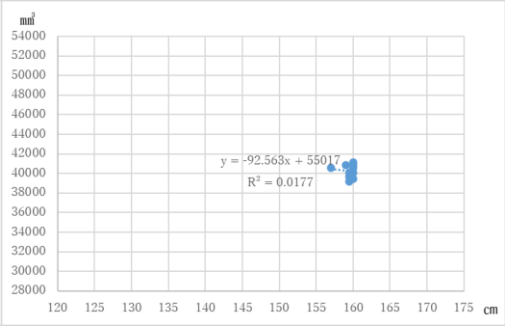
身長と体重の推移

図 22　症例 16 の下顎骨体積変化と身体成長

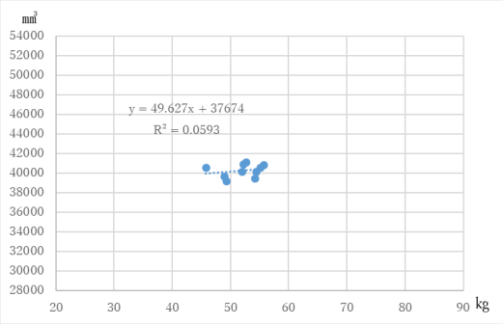
症例 17



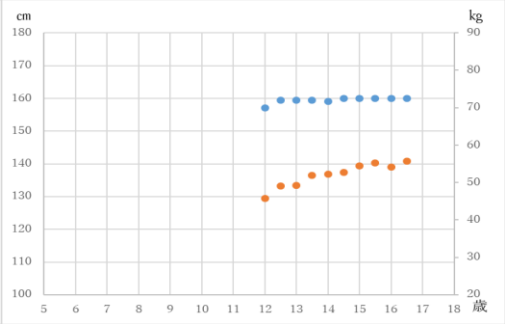
年齢に対する体積



身長に対する体積



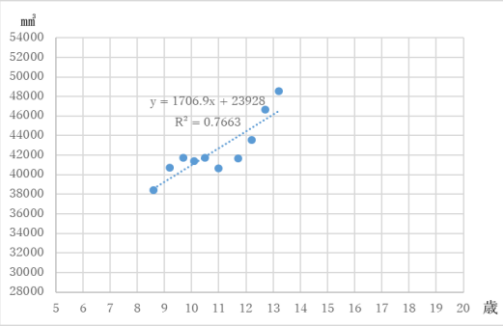
体重に対する体積



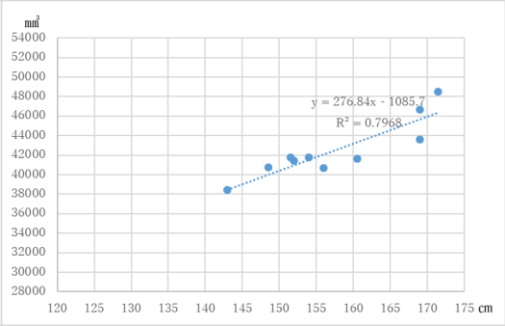
身長と体重の推移

図 23　症例 17 の下顎骨体積変化と身体成長

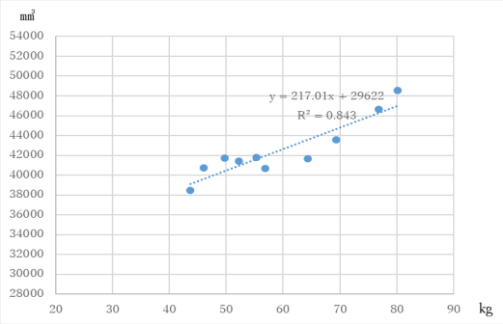
症例 18



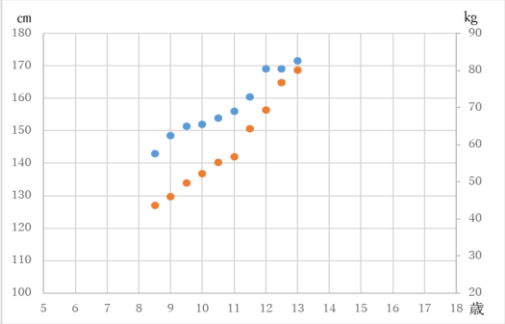
年齢に対する体積



身長に対する体積



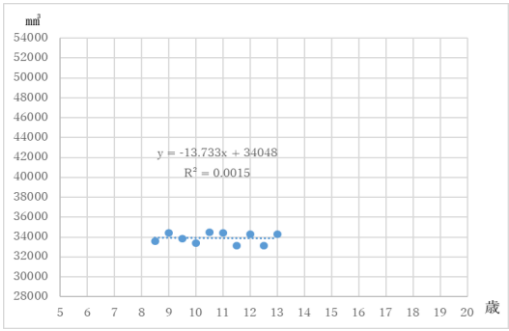
体重に対する体積



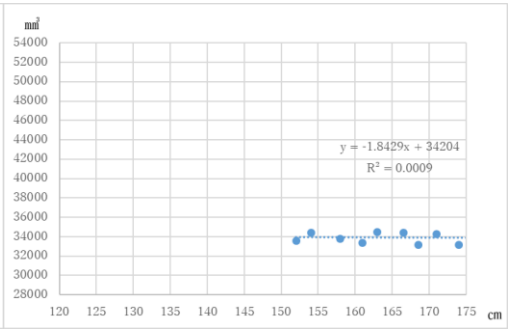
身長と体重の推移

図 24　症例 18 の下顎骨体積変化と身体成長

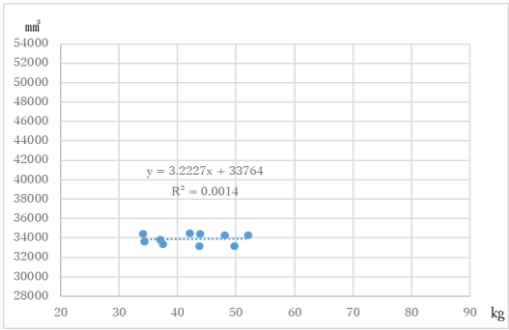
症例 19



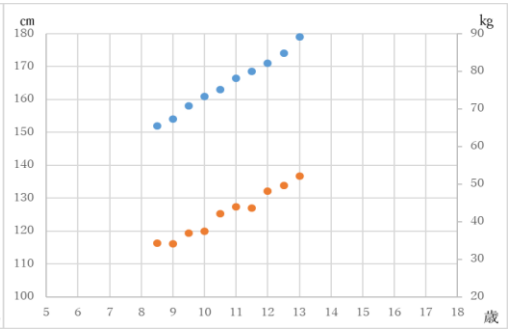
年齢に対する体積



身長に対する体積



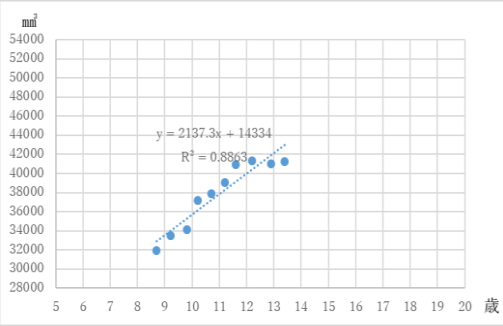
体重に対する体積



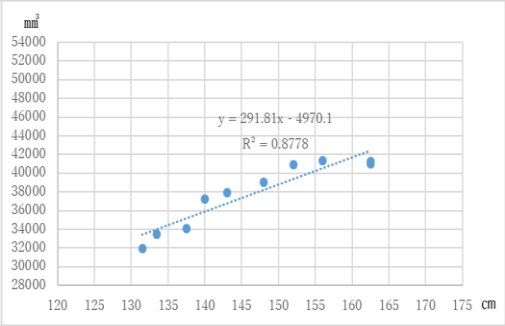
身長と体重の推移

図 25　症例 19 の下顎骨体積変化と身体成長

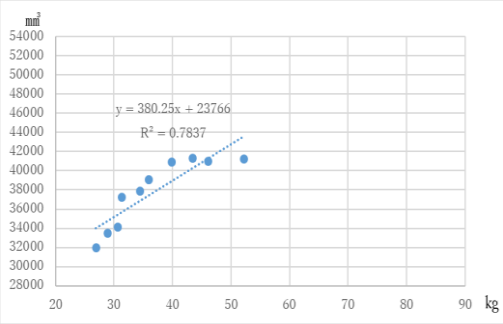
症例 20



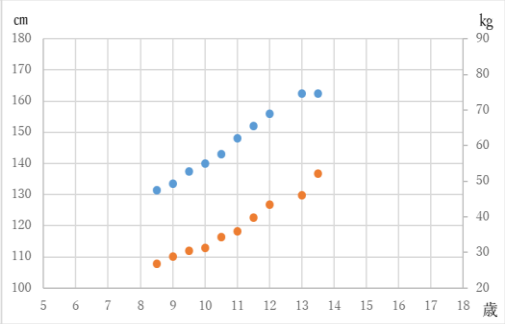
年齢に対する体積



身長に対する体積



体重に対する体積



身長と体重の推移

図 26　症例 20 の下顎骨体積変化と身体成長

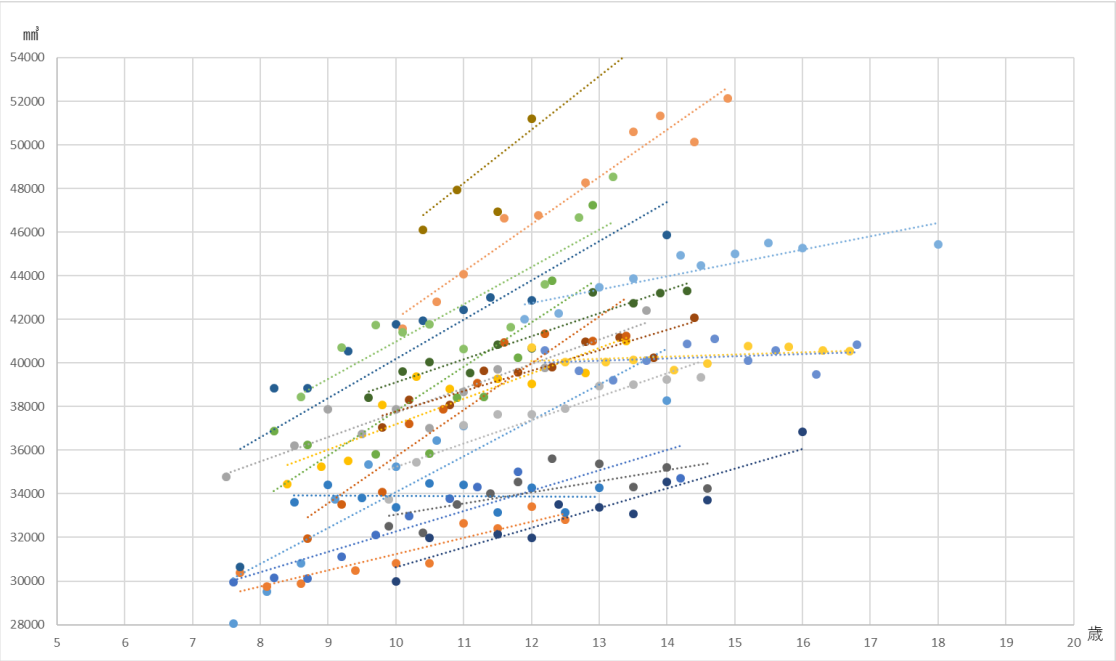


図 27　全症例の年齢と体積の相関関係

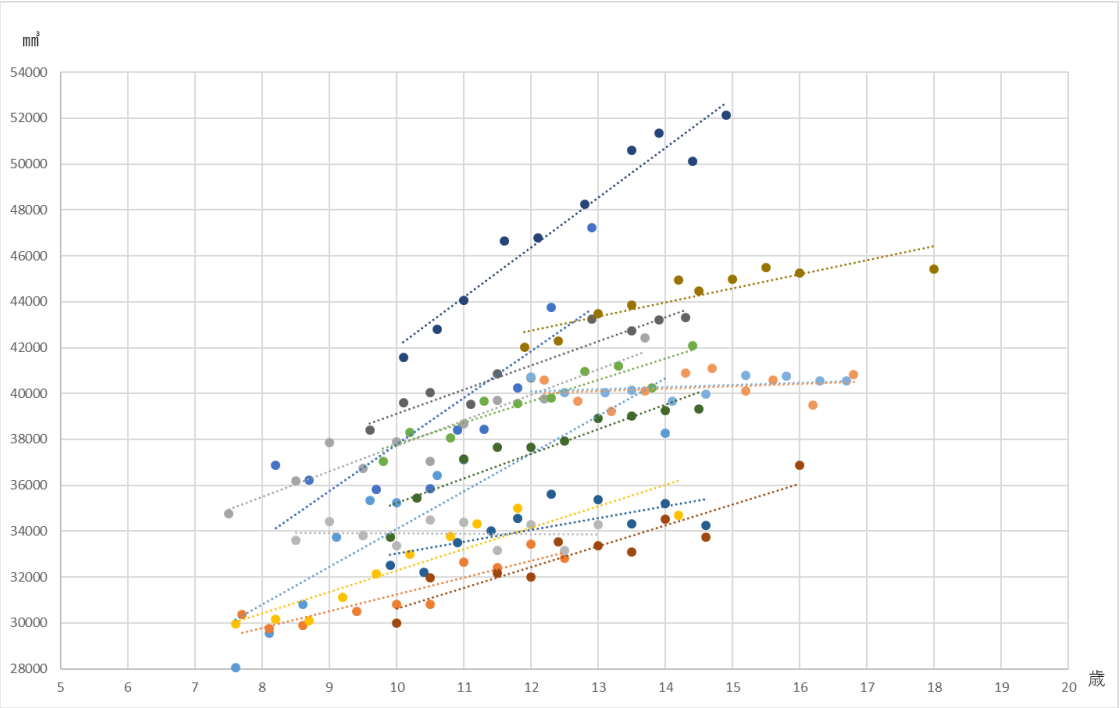


図 28　女児における年齢と体積の相関関係

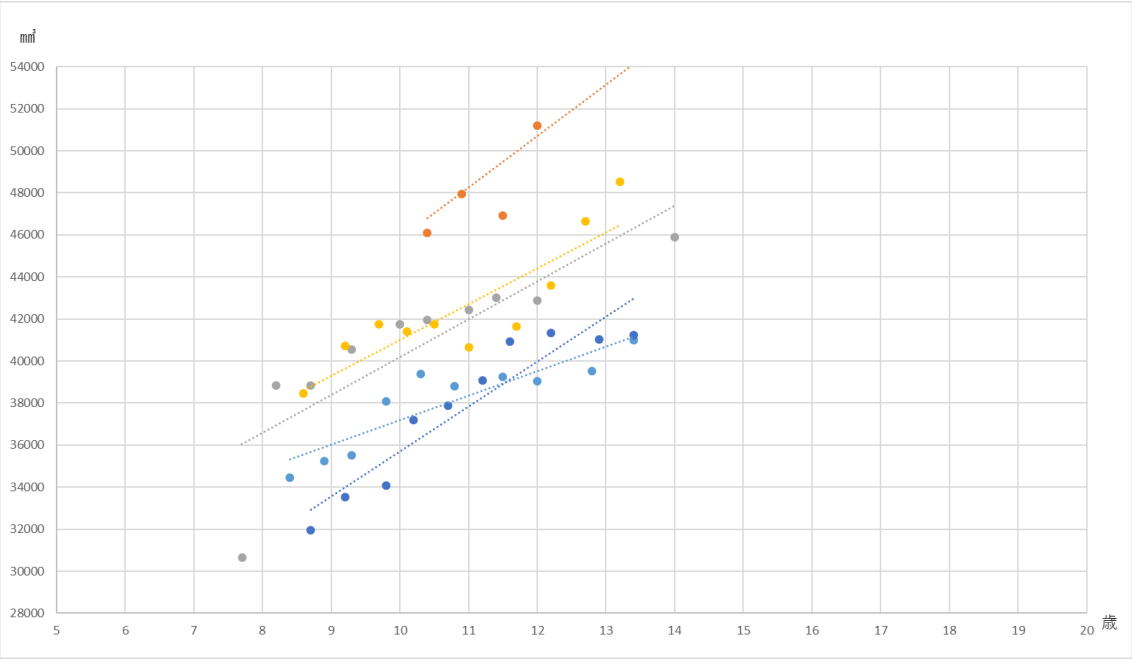


図 29　男児における年齢と体積の相関関係

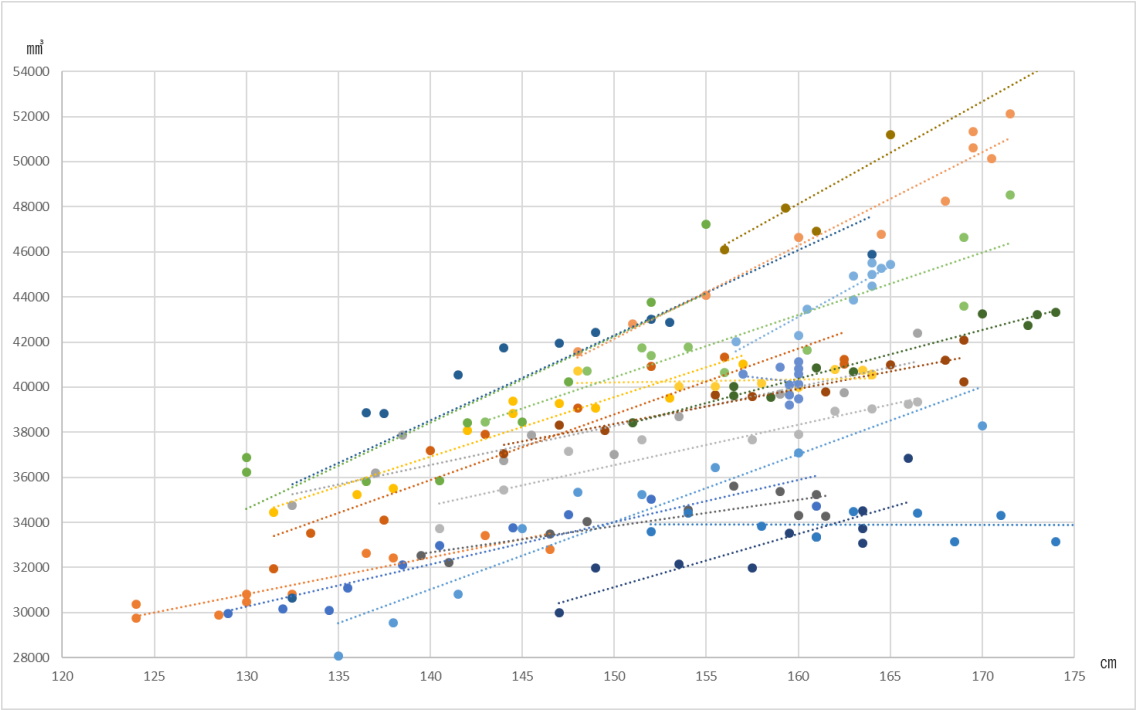


図 30　全症例の身長と体積の相関関係

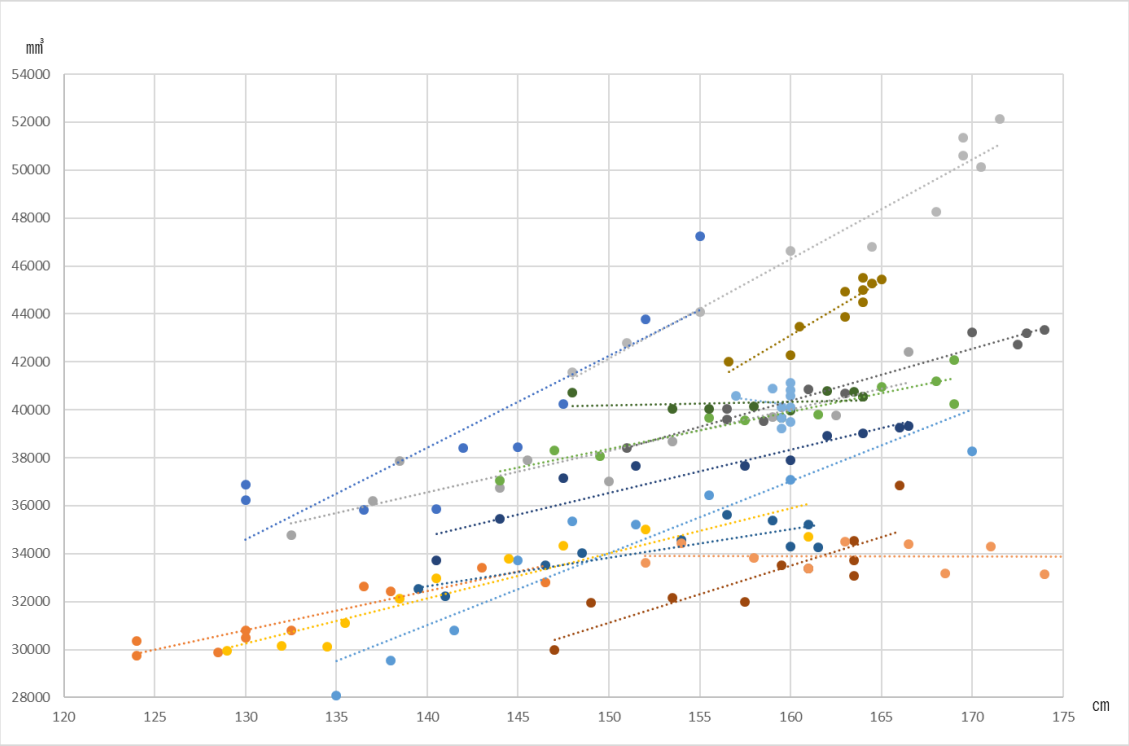


図 31　女児における身長と体積の相関関係

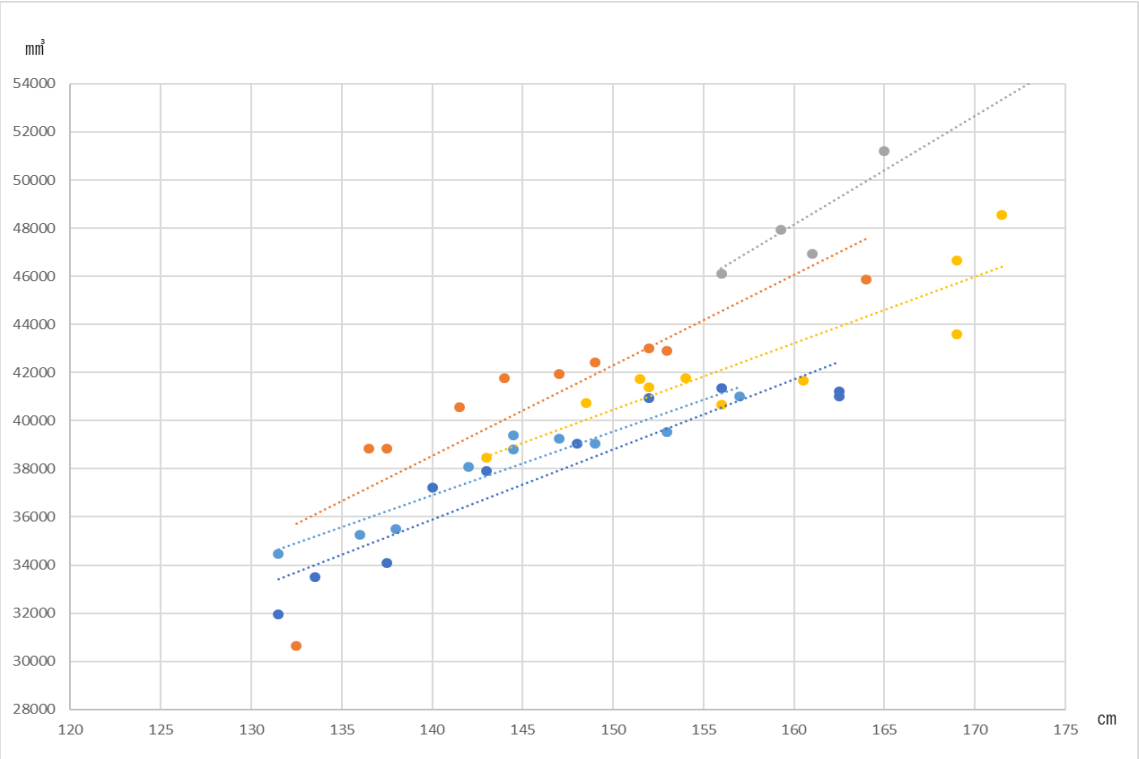


図 32　男児における身長と体積の相関関係

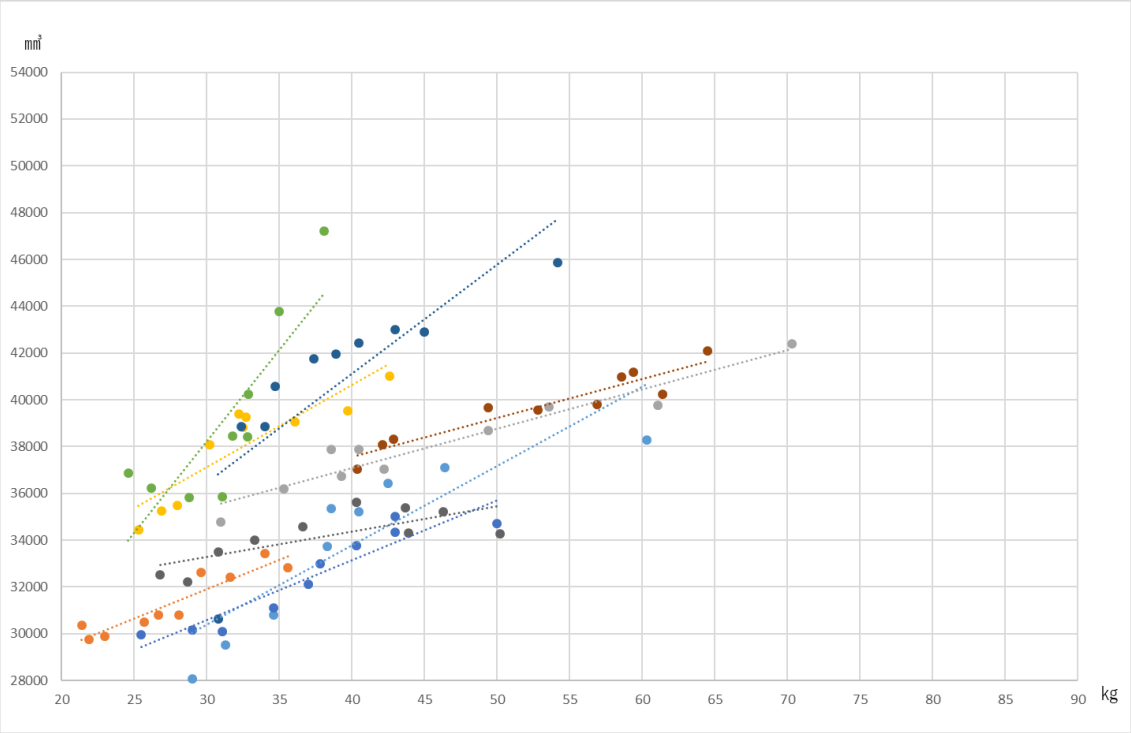


図 33　全症例の体重と体積の相関関係

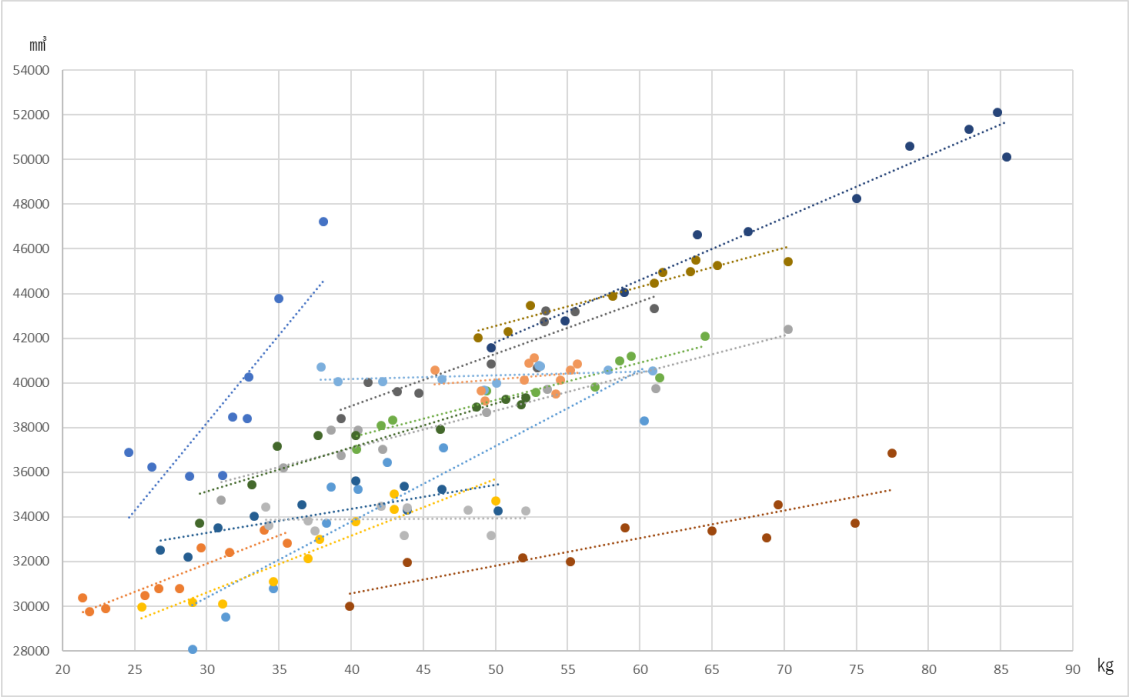


図 34　女児における体重と体積の相関関係

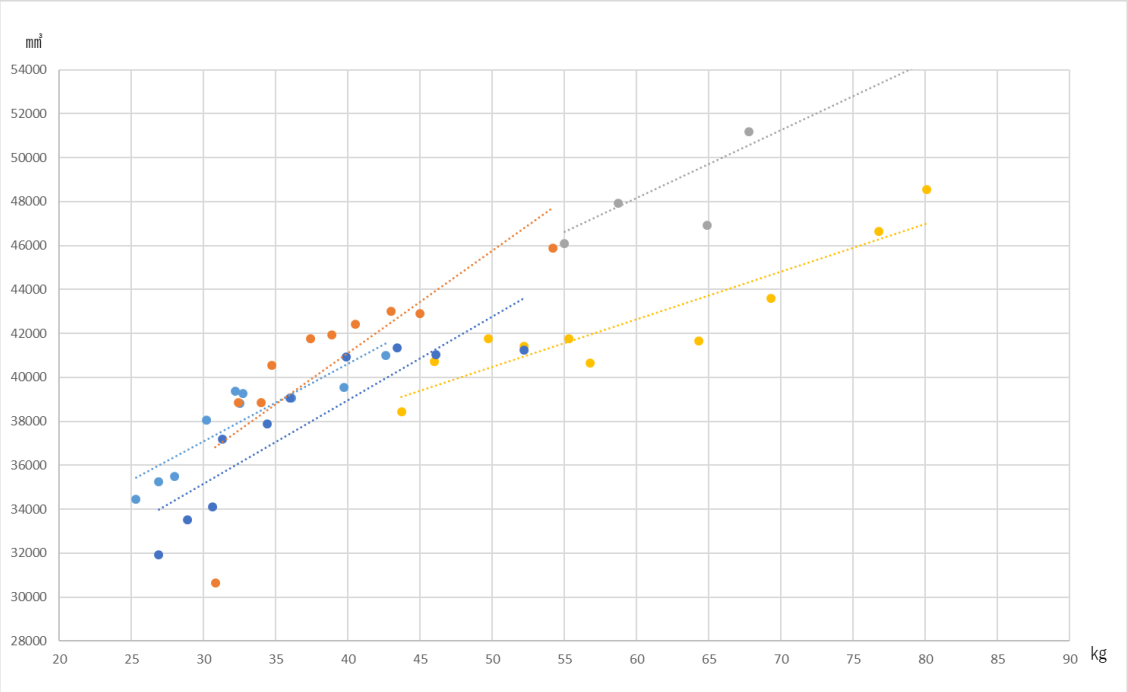


図 35　男児における体重と体積の相関関係

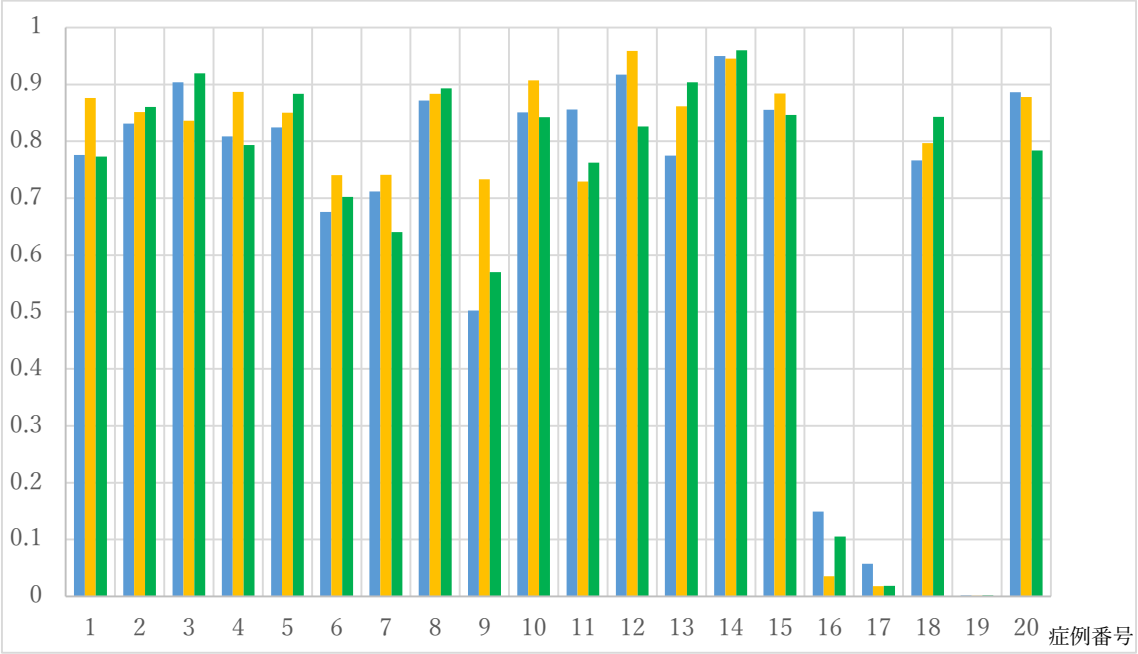
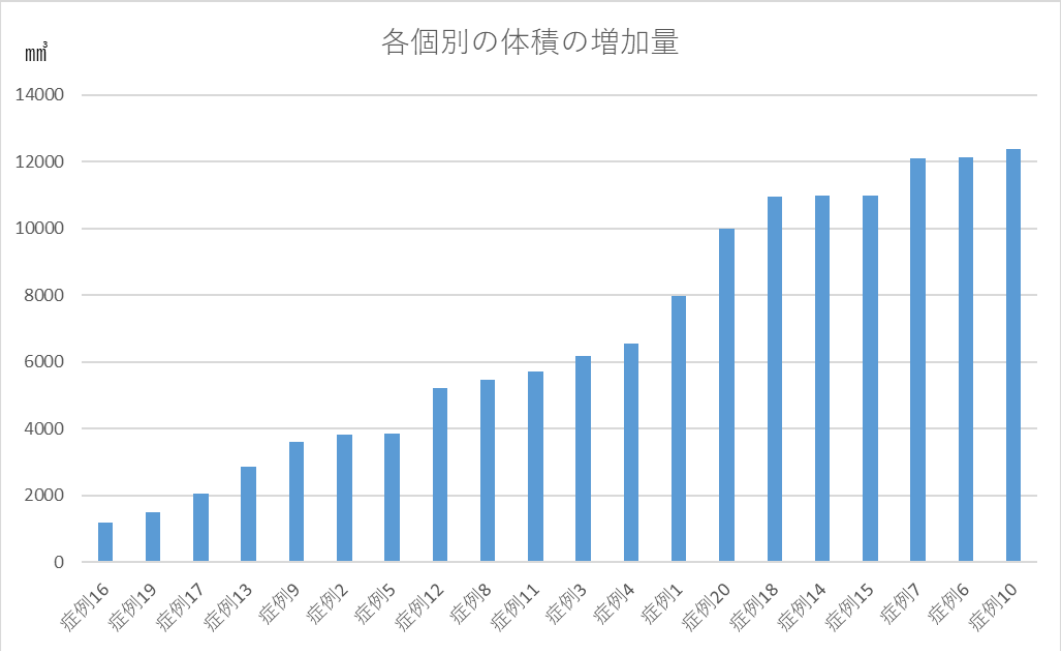


図 36　各症例の下顎骨体積変化に対する年齢・身長・体重の相関係数

青：年齢に対する体積変化の相関係数

黄：身長に対する体積変化の相関係数

緑：体重に対する体積変化の相関係数



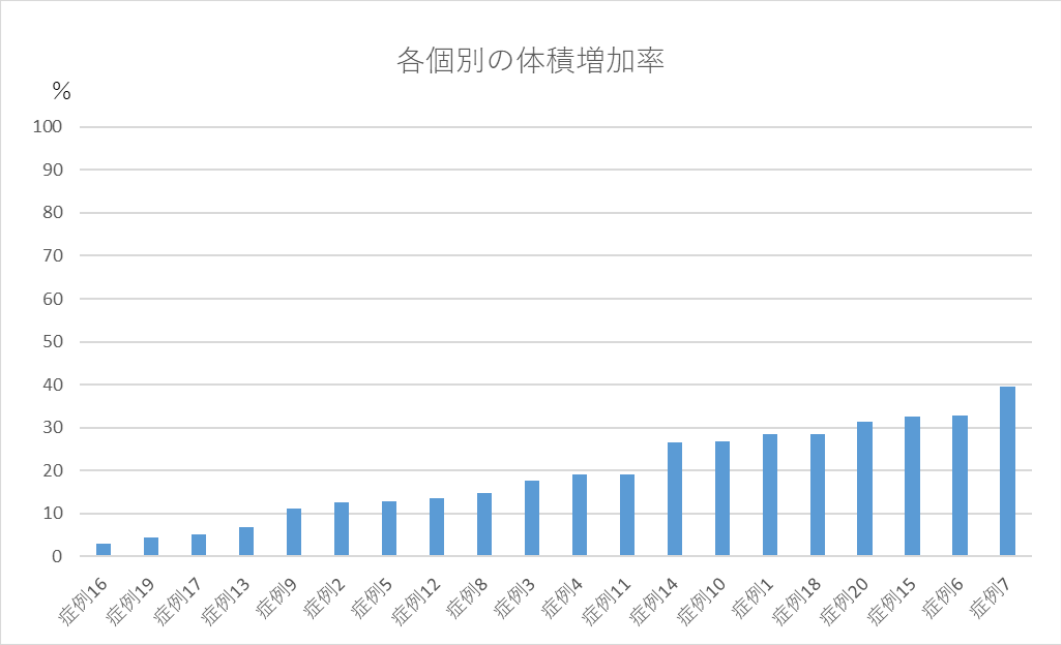


図 37　各症例の下顎骨体積増加量および増加率

7 歳時（n ＝ 5）	30761 ± 982 mm^3
10 歳時（n ＝18）	36799 ± 656 mm^3
13 歳時（n ＝15）	40770 ± 1007 mm^3

表 1　下顎骨の体積の増加量

	全症例	男児	女児
平均増加量	6530 mm^3	10395 mm^3	5569 mm^3
最大増加量	12365 mm^3	12365 mm^3	12126 mm^3
最小増加量	1182mm^3	6555 mm^3	1182 mm^3

表２　下顎骨の体積の平均増加量および最大・最小増加量

	全症例	男児	女児
平均増加率	18.6%	29.0%	15.4%
最大増加率	39.4%	39.4%	32.9%
最小増加率	2.9%	19.0%	2.9%

表３　下顎骨の体積の平均増加率および最大・最小増加率