
Original Article

CBCT 画像による顎顔面形態の 3 次元的評価と セファロ分析との関連性についての研究

日浦 賢治¹⁾, 大門 茂²⁾, 山口 和憲¹⁾

キーワード：顎顔面形態の3次元評価, 側面頭部X線規格写真, 4面体の体積, 空間ベクトル

Three-dimensional Evaluation of the Facial Structures with the CBCT Images and its Association with Lateral Cephalometric Analysis

Kenji HIURA¹⁾, Shigeru DAIMON²⁾, Kazunori YAMAGUCHI¹⁾

Abstract : The reproducibility of 3D facial bone measurements was examined using CBCT images of a dry human skull model. In addition, CBCT images of 38 adult female patients diagnosed with jaw deformity and temporomandibular joint disorder were used to perform 3D facial bone measurements and were compared with the results of cephalometric analysis of the same subject group. Then, changes in craniofacial, facial cranial, and lower facial volumes due to orthognathic surgical treatment were examined in patients with Class II and Class III jaw deformities. Patient consent was obtained for this study.

1. Measurement points were set four times a day on CBCT images of human dry skulls, and another four times by the same orthodontist on different days. Using a method based on spatial vectors, the volumes of 5 tetrahedrons in the neurocranium, of 6 tetrahedrons in the facial cranium, and 8 tetrahedrons in the lower face were calculated. The reproducibility of the measurements was examined by two-way analysis of variance and intraclass correlation coefficient, which confirmed the reproducibility of the 3D measurements of the facial bones.
2. Subjects were classified into Class I group, Class II group and Class III group by the value of angle ANB of lateral roentgen cephalometric measurements. There was no significant difference in the volume of the neurocranium among three groups. The volume of the facial cranium in Class III group was tended to be smaller than Class I and Class II groups. The volume of the lower face in Class III group was significantly ($p < 0.05$) larger than Class II. Whereas the volume of the lower face in Class II group tended to have smaller than Class I.
3. The changes of the volume of the neurocranium, facial cranium and lower face by the orthognathic surgical treatment was examined in two cases with Class II and Class III skeletal deformity. They have coincided with the findings of facial photos, plaster models and lateral roentgen cephalograms. For the correction of the cant of occlusal plane by upward displacement of the posterior teeth could be indicated with the difference in the volume of right and left tetrahedrons.

¹⁾ 日浦矯正クリニック

²⁾ だいもん矯正歯科

¹⁾ Hiura Orthodontic Clinic

²⁾ Daimon Orthodontic Clinic

Since we can evaluate the volume of maxillofacial structures using the spatial vector coordinates of measurement points set on the 3D CBCT image, which allows us to evaluate more detailed 3D information by setting measurement points according to the purpose and significance.

緒 言

歯科矯正診断において顎顔面頭蓋の形態的分析には、頭部 X 線規格写真（セファロ）分析法が主に用いられている。この分析法は、1931年 Broadbent BH¹⁾、Hofrath H²⁾ により発表された、規格化された条件下で頭部を固定して撮影を行うもので、開発当初は頭蓋の経時的な成長発育変化を評価するのに用いられたが、頭蓋の形態的な特徴を把握するためにも利用されるようになり、人種の違いによる顎顔面頭蓋の特徴に関する研究にも応用されるようになった。さらに、様々な重ね合わせにより顎骨と歯の変化を個別に評価することで、矯正歯科治療の効果を判断する手段となることも示された³⁻⁷⁾。現在では、顎顔面の形態分析、成長評価、治療計画立案、治療経過、治療結果の評価に広く用いられ、歯科矯正学分野における研究、治療においてセファロ分析法は多大な功績を残してきた。しかし近年矯正歯科治療において、先天性異常や顔面非対称症など症例が多様化してきており、このような症例を扱う場合、2次元のセファロ分析法では立体的な顎顔面の形態把握、治療予測に限界が生じている。側面セファロと正面セファロの2次元情報を組み合わせ、3次元情報に変換する試みも報告されている⁸⁻¹⁶⁾が、臨床的には顎顔面形態は2次元的分析が主に用いられている。

近年、医科用の Computed tomography (CT) が開発され、デジタル化された3D画像が従来のレントゲン画像よりも高いコントラスト（分解能）^{17,18)} や高解像度¹⁹⁾ を有するため、医科における画像評価は2次元から3次元に移行し、生体構造が3次元的に評価されるようになった²⁰⁻²²⁾。しかし、被曝量とその画像の解像度などから歯科領域には応用がためらわれていた。ところが、放射線の被曝量を抑えた小照射野歯科用コーンビーム CT (CBCT) が開発され²³⁻²⁶⁾、歯内治療の診断²⁷⁾、こどもの歯の萌出障害や埋伏の診断や治療²⁸⁻³⁰⁾、インプラント治療³¹⁻³³⁾、顎関節症の診断や治療³⁴⁻⁴⁴⁾ に用いられるようになった。また、口蓋裂患者の二次骨移植の診断や移植された骨の評価⁴⁵⁻⁴⁸⁾ にも利用されている。歯科矯正領域においては、顎変形症患者において外科的矯正治療の術式の評価^{49,50)} や、狭窄する上顎骨に対する急速側方拡大の効果の評価⁵⁰⁻⁵³⁾ などに利用された報告がある。さらに、CBCT 画像をセファロに代わる顎顔面骨格の形態分析の資料として用いる試みもあるが、かつて人類学者や解剖学者が求めた顎顔面の骨格そのものの大きさや容積を評価するものではなく、気道や鼻腔などの空間の大

きさの計測および評価に留まっている⁵⁴⁻⁵⁷⁾。

本研究では、撮影した乾燥頭蓋の CBCT 画像を用い、計測点の3次元座標から顎顔面骨の体積を算出しその再現性を評価した。次に、顎変形症あるいは顎関節症患者の初診時の CBCT 画像を用い、側面セファロ分析によって分類した I 級群、II 級群、III 級群の脳頭蓋、顔面頭蓋、および下顔面の平均体積の比較を行った。さらに、顎変形症として外科的矯正治療をうけた患者二人の治療前後の顎顔面骨の体積を計測し、矯正歯科治療の評価に対する3次元計測の有用性と問題点を検討した。なお、この臨床研究は日本矯正歯科学会の臨床・疫学研究倫理審査委員会に申請し、承認を受けた（承認番号：2019-9）。

対象および方法

1. 研究対象者

矯正歯科クリニックを受診し、問診、口腔内診査、パノラマ X 線写真とセファロを撮影し、顎関節症あるいは顎変形症と判断して CBCT 撮影を行った患者のうち、研究の内容を説明し同意が得られた成人女性（38名 20歳～39歳）を対象とし、著しい顔面非対称症例（下顎の左右切除量の差が5 mm 以上の症例）、第一大臼歯欠損を伴う症例は除外した。

研究対象者は、側面セファロ分析項目の $\angle ANB$ の大きさにより I 級群 ($2^\circ \leq \angle ANB \leq 5^\circ$: 15名)、II 級群 ($5^\circ < \angle ANB$: 11名)、III 級群 ($\angle ANB < 2^\circ$: 11名) の3群に分類した。各群のセファロの分析結果と群間の比較（一元配置分散分析）を表1に示す。II 級群では、I 級群と比べて $\angle SNB$ が有意 ($p < 0.05$) に小さく下顎後退による顎関係を示した。また、I 級群と比較して U1 to SN は有意 ($p < 0.05$) に大きかったが、L1 to MP には有意差が認められなかった。以上のことから、II 級群は上顎中切歯の唇側傾斜と下顎後退による上顎前突症と診断した。一方、III 級群の $\angle SNA$ は I 級群および II 級群と比べて有意に ($p < 0.05$) 小さく、上顎骨の後退が認められた。また、 $\angle SNB$ は I 級群および II 級群と比べて有意に ($p < 0.05$) 大きく、下顎の前突傾向が認められた。さらに、III 級群の U1 to SN は I 級群や II 級群に比べて有意に ($p < 0.05$) 大きく、L1 to MP は有意に ($p < 0.05$) 小さく、上顎中切歯は唇側に下顎中切歯は舌側にそれぞれ傾斜しており、III 級の骨格関係を歯系で補償していた。以上から、III 級群は上顎の劣成長と下顎の過成長による骨格性下顎前突症と診断した。

表 1 被験者の側面頭部 X 線写真分析結果とその群間の比較

角度計測項目(°)	平均値 (°)			p		
	I級群	II級群	III級群	I級群 vs II級群	I級群 vs III級群	II級群 vs III級群
Facial A	78.3	82.9	90.2	0.4764	0.0874	0.001
Convexity	7.8	15.3	-4.5	0.001	0.001	0.001
A-B pl.	-5.3	-9.9	2.8	0.001	0.001	0.001
Y-axis	65.1	67.8	61	0.045	0.003	0.002
SNA	80.3	81.2	76.5	0.4853	0.04	0.045
SNB	76.6	74.2	81	0.0432	0.004	0.001
ANB	3.7	6.9	-2.1	0.001	0.001	0.001
FMA	31.2	34.5	27.3	0.1414	0.0548	0.008
Mp to SN	39.7	44	36.3	0.0318	0.1316	0.009
Ramus to FH	85	90.1	79.3	0.0183	0.003	0.001
Gonial A	127	124.4	128.9	0.3861	0.7415	0.3055
U1 to SN	103.9	113.4	121.6	0.0104	0.001	0.031
L1 to Mp	97.2	96	86.9	0.6321	0.001	0.003

2. 方法

CBCT 画像は、KaVo 3D eXam (KaVo Dental, Biberach, Germany) を用いて撮影した。撮影条件は、ボリウムサイズ直径 23 cm × 高さ 17 cm, ボクセルサイズ 0.30 mm, スキャン時間 17.4 秒, 120 kVp, 5 mA とした。撮影時の顎位への影響を考慮し、研究対象者は座位でチェンレストを外した状態で頭部をヘッドストラップで固定し、目を閉じ軽く咬んだ状態で撮影を行った。

1) CBCT 画像を用いた顎顔面骨の体積の評価法

(1) 基準平面と座標軸の設定

CBCT 画像は、3次元座標の集合体として示される。したがって、必要な計測点を 4 点設定すると、その 4 点が形成する四面体の体積を算出することができる。この四面体を幾つも合成していくことで、立体(顎顔面骨)の体積を評価した。計測点の座標を決定するためには、基準となる平面とその方向(ベクトル)を決める必要がある。本研究では 2次元分析法と対比するために、セファロ分析法に用いられている計測点を CBCT 画像上に設定し Simon の三平面を作成した(図 1)。第一は左右の耳点と左側の眼点を通る FH 平面、第二は FH 平面に垂直で左側の眼点を通る眼窩平面、さらに第三は FH 平面と眼窩平面に垂直で N 点を通る正中矢状平面とした。この 3 平面を元に N 点を原点とする座標系を設定した。X 軸は FH 平面と眼窩平面が交わる交線、Y 軸は FH 平面と正中矢状平面が交わる交線、Z 軸は眼窩平面と正中矢状平面が交わる交線とし、原点から左方向、後方向および下方向を正の値に設定した(図 1)。

(2) 計測点の設定

CBCT 画像上にセファロ分析に用いる計測点に該当する点を以下の通りに設定した(図 2)。1) N: 前頭鼻骨縫合部の前方限界点, 2) OrR: 右側眼窩下縁最下点, 3) OrL: 左側眼窩下縁最下点, 4) PoR: 右側外

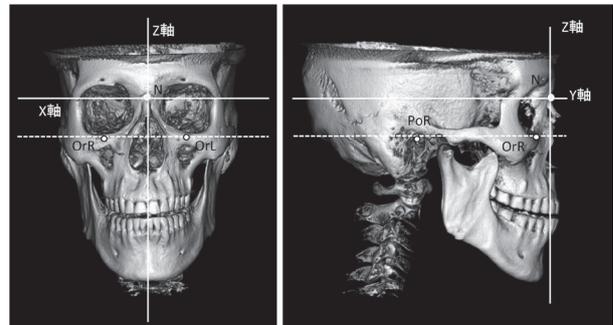


図 1 CBCT 画像に設定した基準平面

CBCT 画像上の画像上に左右の耳点 (Po) と眼点 (Or), および正中の N 点を設定して Simon の 3 つの平面を作成した。原点から左方向、後方向および下方向を正の値に設定した。

耳道上縁, 5) PoL: 左側外耳道上縁, 6) ANS: 前鼻棘の先端, 7) A: 矢状面像で ANS と Pr の間の切歯骨上の最深点であり、軸上面像で切歯骨上の最前点, 8) Pr: 矢状面像で上顎左右中切歯間の歯槽突起の最前方部であり、軸上面像で上顎左右中切歯間の歯槽突起の最深点, 9) U6R: 上顎右側第一大臼歯の頬面溝と Cement-Enamel Junction (CEJ) が交わる点, 10) U6L: 上顎左側第一大臼歯の頬面溝と CEJ が交わる点, 11) CoL: 矢状面像で左側下顎頭の最上点であり、前頭面像で左側下顎頭の最上点, 12) CoR: 矢状面像で右側下顎頭の最上点であり、前頭面像で右側下顎頭の最上点, 13) GoR: 矢状面像で右側下顎骨体下縁と右側下顎枝後縁が互いに移行する部分の最外側点であり、前頭面像で右側下顎骨体下縁と右側下顎枝後縁とが互いに移行する部分の最下点, 14) GoL: 矢状面像で左側下顎骨体下縁と左側下顎枝後縁が互いに移行する部分の最外側点であり、前頭面像で左側下顎骨体下縁と左側下顎枝後縁とが互いに移行

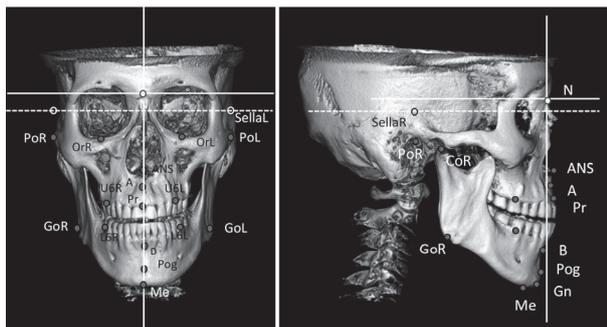


図2 CBCT画像に設定した計測点

する部分の最下点, 15) L6R: 下顎右側第一大臼歯の頬面溝とCEJが交わる点, 16) L6L: 下顎左側第一大臼歯の頬面溝とCEJが交わる点, 17) B: Pogと下顎左右中切歯間の歯槽突起の最前方部であり, 軸上面像にて下顎左右中切歯間の歯槽突起の最深点, 18) Me: 矢状面像で下顎骨結合部の最下点であり, 前頭面像で下顎骨結合部の最深点(最凹点), 19) Pog: 矢状面像で下顎オトガイ隆起の最前方点とした。次に, 脳頭蓋の幅径を表す作図上の計測点として, SellaのY軸座標値とZ軸座標値, およびPoのX座標値を利用し, 右側Po(PoR)のX座標値を用いた点を20) SellaRとし, 左側Po(PoL)のX座標値を用いた点を21) SellaLとした。

(3) CBCT画像上の4つの計測点から作られる四面体の設定

Nを含み, 左右の眼点(OrR, OrL)と左右の耳点(PoR, PoL)より上方部を脳頭蓋とし, 左右の眼点(OrR, OrL), 耳点(PoR, PoL), および上顎第一大臼歯(U6R, U6L)と正中部のA点とPrが形成する立体構造を顔面頭蓋, 左右の下顎頭(CoR, CoL), 顎角部(GoR, GoL), 下顎第一大臼歯(L6R, L6L)と正中部のB点とMeが形成する立体構造を下顔面とし, CBCT画像に設定した21個の計測点をもとに, 19個の四面体(四面体)を設定した。

脳頭蓋には, OrRを頂点とした四面体U1と四面体U2, OrLを頂点とした四面体U3, およびPoRを頂点とした四面体U4と四面体U5の5個を設定した(表2, 図3)。顔面頭蓋には, ANSを頂点とした四面体U6と四面体U7, Aを頂点とした四面体U8, Prを頂点とした四面体U9, PoRを頂点とした四面体U10, およびU6Rを頂点とした四面体U11(U6R-PoL-U6L-Pr)の6個(表2, 図3)を設定した。下顔面にはBを頂点とした四面体L1, 四面体L2, 四面体L3, GoLを頂点とした四面体L4, Bを頂点とした四面体L5, Meを頂点とした四面体L6と四面体L7, およびBを頂点とした四面体L8の8個の四面体を設定した(表2, 図4)。脳頭蓋と顔面頭蓋, および下顔面に設定した四面体の体積を合算

表2 脳頭蓋, 顔面頭蓋および下顔面に設定した四面体とその頂点と底面

	四面体	頂点	底面
脳頭蓋	U1	OrR	SellaR-SellaL-N
	U2	OrR	SellaL-OrL-N
	U3	OrL	SellaR-PoL-SellaL
	U4	PoR	PoL-OrL-SellaR
	U5	PoR	OrL-OrR-SellaR
顔面頭蓋	U6	ANS	OrR-PoL-OrL
	U7	ANS	PoR-PoL-OrR
	U8	A	PoR-PoL-ANS
	U9	Pr	PoR-PoL-A
	U10	PoR	PoL-U6R-Pr
	U11	U6R	PoL-U6L-Pr
下顔面	L1	B	CoR-L6R-CoL
	L2	B	L6R-L6L-CoL
	L3	B	CoR-GoR-L6R
	L4	GoL	L6L-CoL-B
	L5	B	GoR-GoL-Me
	L6	Me	CoR-CoL-GoR
	L7	Me	CoR-CoL-GoL
	L8	B	CoR-CoL-Me

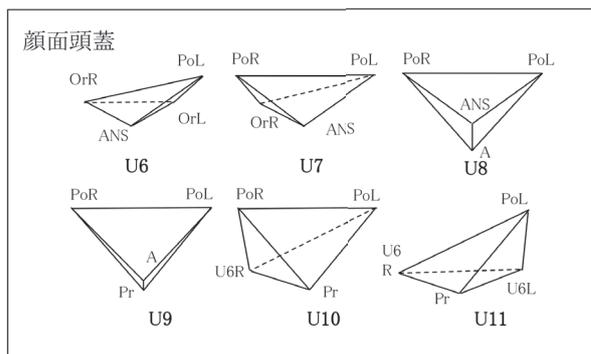
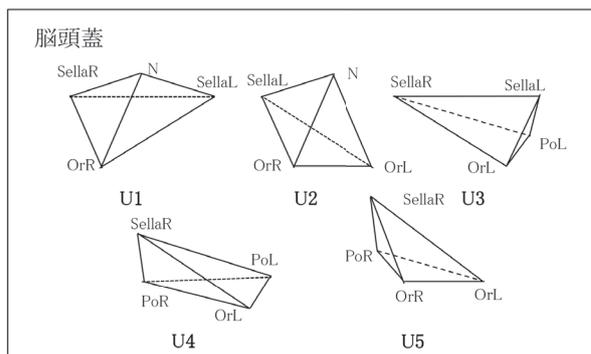


図3 CBCT画像の脳頭蓋および顔面頭蓋に設定した三角錐の計測点

CBCT画像に設定した計測点をもとに脳頭蓋に5個, 顔面頭蓋に6個の三角錐を設定して容積を算出した。

して脳頭蓋と顔面頭蓋, および下顔面の体積とし, 顔面頭蓋に対する下顔面の体積の比率(上下比率)を算出した。

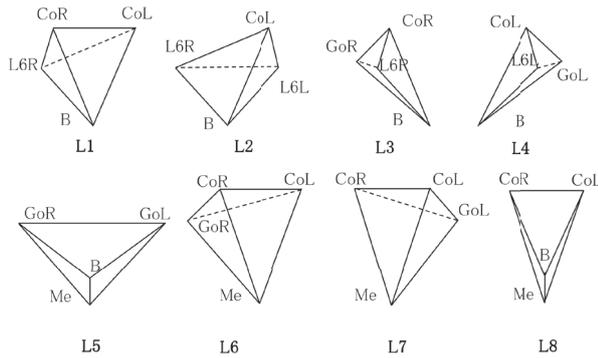
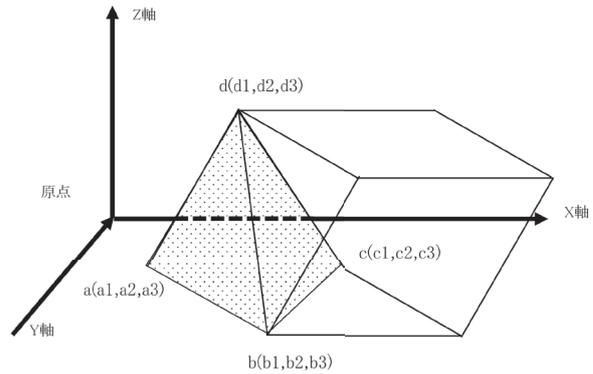


図 4 CBCT 画像の下顔面に設定した三角錐の計測点
CBCT 画像に設定した計測点をもとに下顔面に
8 個の三角錐を設定して容積を算出した。



$$\text{体積}(V) = D = (b_1 - a_1)(c_2 - a_2)(d_3 - a_3) + (d_1 - a_1)(b_2 - a_2)(c_3 - a_3) + (c_1 - a_1)(d_2 - a_2)(b_3 - a_3) - (d_1 - a_1)(c_2 - a_2)(b_3 - a_3) - (b_1 - a_1)(d_2 - a_2)(c_3 - a_3) - (c_1 - a_1)(b_2 - a_2)(d_3 - a_3)$$

図 5 3次元座標上の三角錐の各頂点の座標値と
その体積の算出

(4) 四面体の体積算出方法

各四面体の頂点 a, 頂点 b, 頂点 c, および頂点 d の座標を (a_1, a_2, a_3) , (b_1, b_2, b_3) , (c_1, c_2, c_3) および (d_1, d_2, d_3) とすると, ベクトル ab とベクトル ac の外積とベクトル ad の内積はベクトル ab, ac, ad が張る平行六面体の体積になり, 四面体 abcd の体積は平行六面体の体積の 1/6 になる (図 5)。

$$V_p = (b_1 - a_1)(c_2 - a_2)(d_3 - a_3) + (d_1 - a_1)(b_2 - a_2)(c_3 - a_3) + (c_1 - a_1)(d_2 - a_2)(b_3 - a_3) - (d_1 - a_1)(c_2 - a_2)(b_3 - a_3) - (b_1 - a_1)(d_2 - a_2)(c_3 - a_3) - (c_1 - a_1)(b_2 - a_2)(d_3 - a_3)$$

2) 検討項目

(1) 乾燥頭蓋骨を用いた顎顔面骨の 3 次元解析の 再現性の検討

術者 (S.D.) が, 乾燥頭蓋骨を撮影した CBCT 画像上に計測点をプロットし, 15 分以上間隔をあけて 1 日 4 回, さらに別の日にも同様にプロットした。各 8 回 CBCT 画像上にプロットした計測点を用い, 脳頭蓋に 5 個, 顔面頭蓋に 6 個, 下顔面では 8 個の四面体を設定し, それぞれの四面体の体積と合算した脳頭蓋, 顔面頭蓋, および下顔面の体積を算出し二元配置分散分析法を用いてその再現性を検討した。さらに, 各体積の級内相関係数 (Intraclass correlation coefficient : ICC)⁵⁸⁾ を SPSS software package version 27.0 (IBM, Armonk, NY, USA) を用いて算出し, 計測点の信頼性を評価した。

(2) 顎関節症あるいは顎変形症患者の CBCT 画像を用いた顎顔面骨の 3 次元的体積評価

側面セファロ分析項目の $\angle ANB$ の大きさにより分類した 3 群の脳頭蓋, 顔面頭蓋, および下顔面の容積の平均値の比較を一元配置分散分析を用いて行った。さらに, p 値に関係する要因として 2 群間の平均値の差, 標準偏差, 症例数が報告されていることから⁵⁹⁾, 有意差が認められた項目に対し EZR (version 1.61)⁶⁰⁾ を用い必要

なサンプルサイズ (症例数) を検証した。

(3) 顎変形症患者の CBCT 画像を用いた術前後の 顎顔面骨の体積評価

Ⅱ 級とⅢ 級の顎変形症患者 (2 症例) に対し外科的矯正手術を行い, 治療前後の顎顔面骨の体積変化を算出し, 2 次元の変化 (側面セファロ) との比較を行った。

結 果

1. 上顔面および下顔面の体積の算出とその再現性

乾燥頭蓋骨を撮影した CBCT 画像上にプロットした 21 個の計測点を用い, 脳頭蓋に 5 個, 顔面頭蓋に 6 個, および下顔面 8 個設定した四面体, およびそれぞれを合算した脳頭蓋, 顔面頭蓋および下顔面の体積を算出し, その再現性を二元配置分散分析法にて検討した。その結果, いずれの体積においても, 群内と群間に有意な差は認められなかった (表 3)。さらに, 脳頭蓋, 顔面頭蓋および下顔面の 1 日目の ICC (1, 4) はそれぞれ 0.995, 0.994, 0.999, 2 日間の ICC (1, 8) はそれぞれ 0.995, 0.991, 0.996 であった。

2. 側面セファロ分析で分類した各群の脳頭蓋, 顔面頭蓋, および下顔面の体積の比較

脳頭蓋の体積は, I 級群で 109,638 mm³, II 級群で 107,448 mm³, III 級群で 107,450 mm³ であり, 各群間に有意な差は認められなかった (表 4)。顔面頭蓋では III 級群の ANS や A 点, および Pr などが関連する 4 面体 (U7, U9, U10) の体積が I 級群あるいは II 級群の同 4 面体の体積と比べて小さい傾向が認められた。顔面頭蓋の総体積では, I 級群で 111,532 mm³, II 級群で 111,165 mm³, III 級群で 103,513 mm³ で III 級群の体積が II 級群よりも小さく検出力が不足しているものの有意差 ($p < 0.05$) が

表3 ヒト乾燥頭蓋骨を用いた顎顔面骨の体積計測 (mm³) の再現性

		1-1	1-2	1-3	1-4	平均	標準偏差	2-1	2-2	2-3	2-4	平均	標準偏差	p
N-OrR-SeR-SeL	U1	33948	35882	36654	35655	35534.8	988.1	29395	33948	35557	35882	33695.5	3814.4	0.182
N-OrR-SeL-OrL	U2	19071	21101	20232	21221	20406.3	860.2	16219	19071	21398	21101	19447.3	3293.6	0.1641
SeL-OrL-SeR-PoL	U3	27319	29170	28566	28517	28393.0	671.3	33847	27319	29225	29170	29890.3	3635.6	0.3378
SeR-PoR-PoL-OrL	U4	33699	29046	33090	33191	32256.5	1867.9	35580	33699	35929	29046	33563.5	3968.4	0.7189
SeR-PoR-OrL-OrR	U5	19845	18717	19837	19717	19529.0	471.5	19698	19845	22018	18717	20069.5	2431.4	0.8587
脳頭蓋	計	133882	133916	138379	138301	136119.5	2220.7	134739	133882	144127	133916	136666.0	5547.1	0.6486
OrL-ANS-OrR-PoL	U6	21362	23069	21994	21794	22054.8	628.6	22209	21362	22016	23069	22164	5477.9	0.2695
OrR-ANS-PoR-PoL	U7	36202	34983	36058	35958	35800.3	479.7	38244	36202	37421	34983	36712.5	1250.7	0.3672
ANS-A-PoR-PoL	U8	15026	13515	12619	13504	13666.0	865.3	9685	15623	12679	13515	12875.5	3470.7	0.07
A-Pr-PoR-PoL	U9	16701	23073	20648	19964	20096.5	2275.5	16313	16701	20322	23073	19102.25	2930.7	0.2198
Pr-PoR-PoL-U6R	U10	25693	25490	25047	23890	25030.0	698.4	28841	25693	22389	25490	25603.25	2305.7	0.2166
Pr-U6R-PoL-U6L	U11	13695	12260	13108	13180	13060.8	514.8	17775	13695	13134	12260	14216	2142	0.9834
顔面頭蓋	計	262561	266306	267475	266591	265733.3	1881.5	267806	263158	272088	266306	267339.5	4257.8	0.516
B-CoR-L6R-CoL	L1	6302	6035	6250	6150	6184.3	102.0	4085	6302	7263	4935	5396.25	1530	0.6505
B-L6R-L6L-CoL	L2	4944	4436	5073	5473	4981.5	370.5	5519	4944	6051	5436	5237.5	778	0.8874
B-CoR-GoR-L6R	L3	8159	9918	9097	9055	9057.3	622.4	7432	8159	8183	9918	8423	917	0.2047
GoL-L6L-CoL-B	L4	11580	11358	11640	11980	11639.5	222.9	8435	11580	10346	11358	10429.75	1465	0.4091
B-GoR-GoL-Me	L5	18074	19329	18651	18413	18616.8	459.5	12253	18074	16011	19329	16416.75	2757	0.2191
CoR-CoL-GoR-Me	L6	67620	66808	63533	63039	65250.0	1992.5	66871	67620	71458	66808	68189.25	1923	0.1982
CoR-CoL-GoL-Me	L7	64353	61476	61047	60047	61730.8	1600.3	62244	64353	64095	61476	63042	1608	0.4314
B-CoR-CoL-Me	L8	28214	29401	28293	27293	28300.3	747.3	20079	28214	26418	29401	26028	3775	0.0663
下顔面	計	209246	206661	202623	202050	205145.0	2960.4	186918	209246	209825	206661	203162.5	9543	0.8262

表4 側面頭骨 X 線写真分析によりグループ分けした3群間の体積 (mm³) の比較

		I級	II級	III級	P		
					II vs III	I vs II	I vs III
N-OrR-SeR-SeL	U1	29465	28763	28366	0.2166	0.66	0.089
N-OrR-SeL-OrL	U2	17185	16404	17617	0.056	0.43	0.19
SeL-OrL-SeR-PoL	U3	24323	23561	21780	0.238	0.69	0.14
SeR-PoR-PoL-OrL	U4	24249	24902	25210	0.096	0.71	0.432
SeR-PoR-OrL-OrR	U5	14416	13818	14477	0.056	0.56	0.424
脳頭蓋	計	109638	107448	107450	0.238	0.69	0.14
OrL-ANS-OrR-PoL	U6	20520	20766	20153	0.5333	0.82	0.91
OrR-ANS-PoR-PoL	U7	36150	36063	33965	0.065	0.95	0.052
ANS-A-PoR-PoL	U8	13471	12988	13398	0.512	0.83	0.88
A-Pr-PoR-PoL	U9	12818	14582	12080	0.0512	0.42	0.603
Pr-PoR-PoL-U6R	U10	19593	18083	15422	0.425	0.39	0.048
Pr-U6R-PoL-U6L	U11	8980	8683	8495	0.5724	0.78	0.336
顔面頭蓋	計	111532	111165	103513	0.0482	0.368	0.0532
B-CoR-L6R-CoL	L1	5854	10439	4484	0.1054	0.1	0.658
B-L6R-L6L-CoL	L2	2758	4959	11327	0.94	0.11	0.0215
B-CoR-GoR-L6R	L3	7442	6741	6929	0.4007	0.41	0.78
GoL-L6L-CoL-B	L4	7334	6990	7106	0.624	0.62	0.822
B-GoR-GoL-Me	L5	12181	11279	16043	0.614	0.49	0.2522
CoR-CoL-GoR-Me	L6	50068	38880	51023	0.126	0.017	0.94
CoR-CoL-GoL-Me	L7	50771	40302	43953	0.014	0.014	0.022
B-CoR-CoL-Me	L8	19157	18378	24951	0.0534	0.602	0.0193
下顔面	計	155565	137968	165816	0.0398	0.0415	0.052
	上下比率	1.3948	1.2411	1.6019			

認められた (表4)。一方、下顔面では、II級群のB点やMeに加えてCoやGoに参与する4面体 (L2, L6, L7, L8) の体積がI級群あるいはIII級群の同4面体の体積と比べて小さい傾向が認められ、4面体L7の体積はIII級群に比べて有意 ($p < 0.05$) に小さかった。また、III級群の同じ4面体の体積がI級群と比べて大きい傾向が認められた。下顔面の総体積では、I級群で155,565 mm³、II級群で137,968 mm³、III級群で165,816 mm³でII級群の体積はIII級群よりも有意 ($p < 0.05$) に小さく、I級群に比べても小さい傾向が認められた。また、III級

群の体積はI級群やII級群よりも大きい傾向が認められた (表4)。さらに、顔面頭蓋の体積に対する下顔面の体積比率はII級群 (1.2411)、I級群 (1.3948)、III級群 (1.6019) の順に大きくなっていった (表4)。

統計学的に有意な差を示した項目について、必要十分な症例数を計算したところ、顔面頭蓋におけるII級群とIII級群の総体積の比較に必要な症例数は26症例、下顔面におけるII級群とIII級群、I級群とII級群およびI級群とIII級群の総体積の比較に必要な症例数は、それぞれ11症例、76症例、24症例であった。

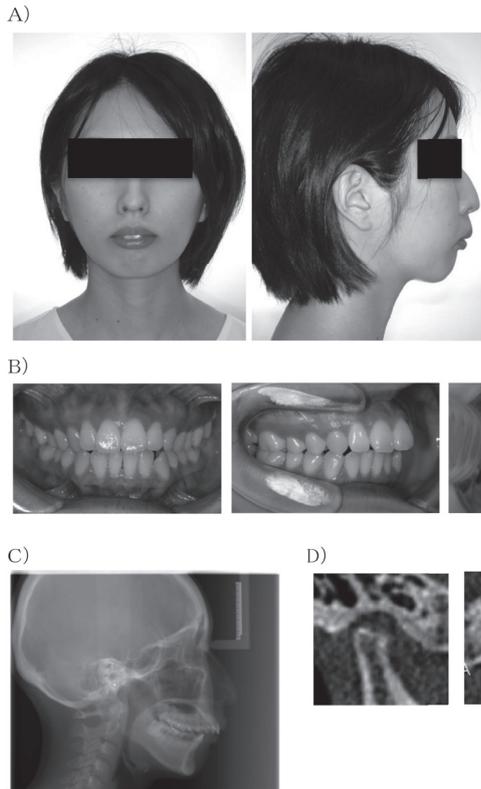


図6 初診時資料(症例1)
A) 顔貌写真
B) 口腔内写真
C) 側面セファロ
D) CBCT 画像

3. 顎変形症として外科的矯正治療を受けた患者の術前後の顎顔面の体積変化

上下顎同時移動術を受けた顎変形症患者(2症例)の治療前後の顎顔面骨の体積変化を算出し、2次元結果との比較を行った。

「症例1」

初診時年齢が28歳4ヶ月の女性で、スマイル時の上顎前歯部歯肉の過度な露出と上顎前突を主訴に来院した。側貌は凸型で、前歯部被蓋関係は $\text{overjet} +12.0 \text{ mm}$, $\text{overbite} +0.5 \text{ mm}$, 大臼歯関係は両側とも Angle II 級であった(図6)。側面セファロ分析では、日本人成人女性の標準と比べて Facial angle と $\angle \text{SNB}$ が小さく、下顎の後退が認められたが、U1 to SN と U1 to FH および L1 to MP は標準値であった(表5)。正面セファロ分析では、大臼歯において咬合平面が 1.5° 左上がりに傾斜し、オトガイの左方偏位が認められた。CBCT 所見より、右側顎関節に flattening, 左側に osteophyte が認められ(図6)、下顎後退による上顎前突症と診断された。

治療方針として、上下切歯の歯軸傾斜は標準値内でデンタルコンペンセーションの改善が必要ないことから、術前矯正治療は上下顎共に非抜歯で行い、上下顎移動

表5 症例1の側面セファロ分析結果

angular measurement (°)	mean	before	after
Facial angle	84.8	81.8	84.9
convexity	7.6	15.5	5.4
A-B plane	-4.8	-13.8	-7.6
SNA	82.3	80.4	79.3
SNB	78.9	72.5	75.2
ANB	3.4	7.9	4.1
FMA	28.8	34.6	24.7
MP to SN	40.2	43.2	33.0
Ramus to FH	83.3	99.2	95.6
Gonial A	131.0	115.4	109.2
U1 to SN	104.5	105.0	102.2
L1 to MP	96.3	97.8	104.6

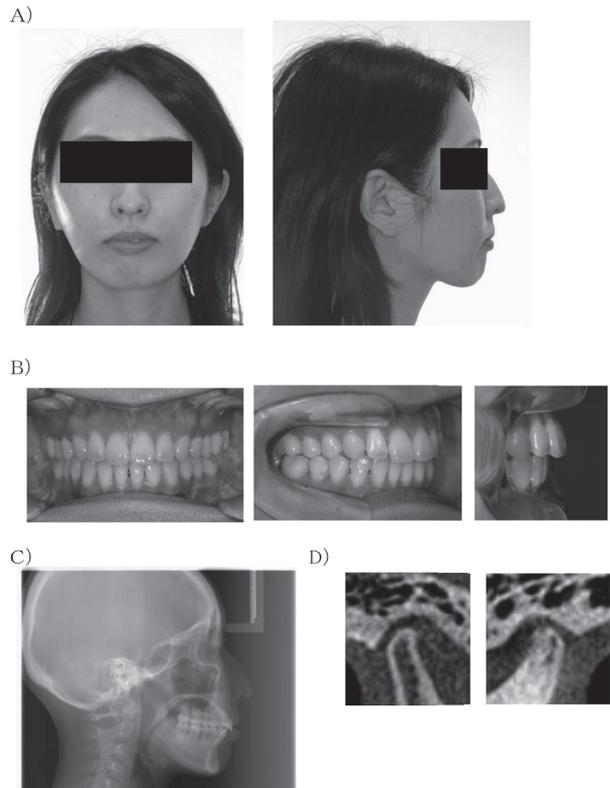


図7 動処終了時資料(症例1)
A) 顔貌写真
B) 口腔内写真
C) 側面セファロ
D) CBCT 画像

術によって overjet および臼歯関係の改善を図ることとした。手術方法として上顎は Le Fort I 型骨きりにより、上顎右側第一大臼歯と犬歯において上方へ 4.0 mm , 後方へ 2.0 mm , 上顎左側第一大臼歯と犬歯では上方へ 2.5 mm , 後方へ 2.0 mm の移動を行うことで咬合面の傾斜の修正と上顎骨の上方および後方移動を行った。さらに、下顎は両側下顎枝矢状分割術(Bi-SSRO)によって右側 6.5 mm , 左側 8.5 mm の前方移動を図った。

術後の側貌は直線型で、前歯部被蓋関係は $\text{overjet} +3.5 \text{ mm}$, $\text{overbite} +2.0 \text{ mm}$, 大臼歯の咬合関係はほぼ I 級に

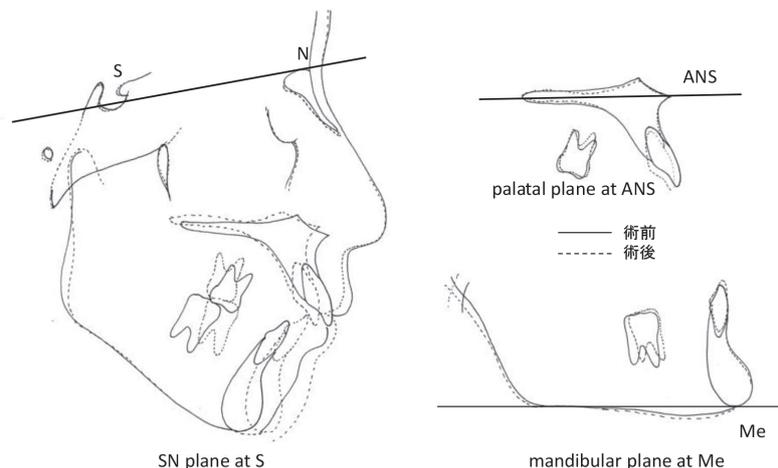


図8 術前後の側面セファロのトレースの重ね合わせ (症例1)

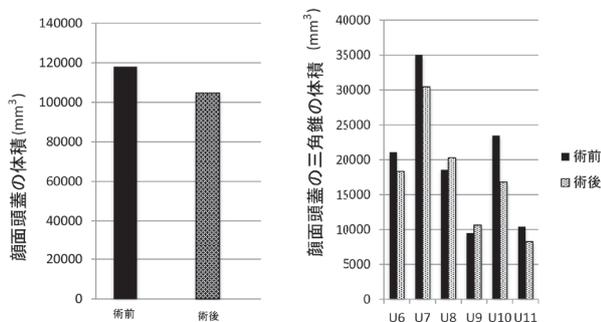


図9 術前後の顎顔面骨の体積変化 (症例1)

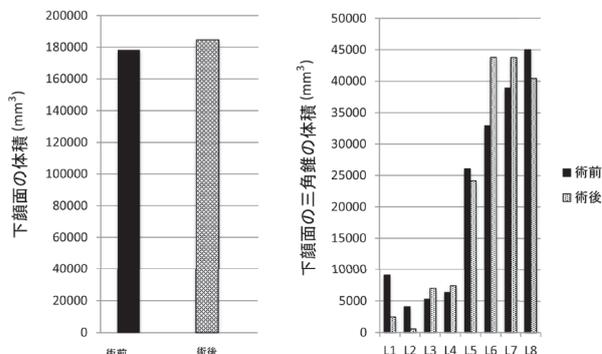


図10 術前後の下顔面の体積変化 (症例1)

改善した (図7)。治療前後の側面セファロのトレースの重ね合わせでは、下顎の著明な前方移動と上顎の後上方への移動が確認された (図8)。側面セファロ分析では Facial angle が 81.8° から 84.9° に、 \angle SNB が 72.5° から 75.2° に、A-B plane angle が -13.8° から -7.6° に増加し、Convexity は 15.5° から 5.4° 、 \angle ANB は 7.9° から 4.1° に減少した (表5)。

CBCT 画像を用いた体積分析において、顔面頭蓋の総体積は $118,070 \text{ mm}^3$ から $104,807 \text{ mm}^3$ にやや減少したが (図9)、下顔面は $171,097 \text{ mm}^3$ から $192,104 \text{ mm}^3$ に大きく増加していた (図10)。ANS と Pr に挟まれた四面体 (U8, U9) の体積にほとんど変化は認めなかったが、顔面頭蓋の体積の減少には ANS が関係する四面体 (U6, U7) と Pr が関係する四面体 (U10, U11) の体積が減少していた。さらに、左右上顎第一大臼歯の移動量を示す項目、U10 と U11 の術後の体積減少に違いがあり U10 の変化量が大きかった (図9)。下顔面の体積増加の要因は、Bi-SSRO によるオトガイ部の前方移動によって Me が関係する四面体 L6 と L7 の体積の増加にあった (図10)。

「症例2」

初診時年齢が17歳4ヶ月の女子で、スマイル時の上顎前歯部歯肉の過度な露出とオトガイ部の突出、および受け口を主訴に来院した。側貌は凹型で、前歯部被蓋関係は、overjet -7.5 mm 、overbite -1.0 mm 、大臼歯関係は両側とも Angle III 級であった (図11)。側面セファロ分析では、日本人成人女性の標準と比べて Facial angle と \angle SNB が大きく下顎骨の前方位が認められ、 \angle SNA は標準的な値を示した。U1 to SN と U1 to FH が大きく上顎切歯が唇側に傾斜し、L1 to MP は小さく下顎切歯は舌側に傾斜して、骨格系の位置異常を歯系で補償していた (表6)。正面セファロ分析では、大臼歯部において咬合平面が 1.0 mm 左上がり、オトガイの僅かな右方偏位が認められた。CBCT 所見において顎関節に特記事項は認められず、下顎骨の過成長による骨格性下顎前突と診断された。

治療方針として、術前矯正治療は上下顎共に非抜歯で行うこととした。上顎切歯の唇側傾斜や下顎切歯の舌側傾斜などのデンタルコンペンセーションの改善を目的

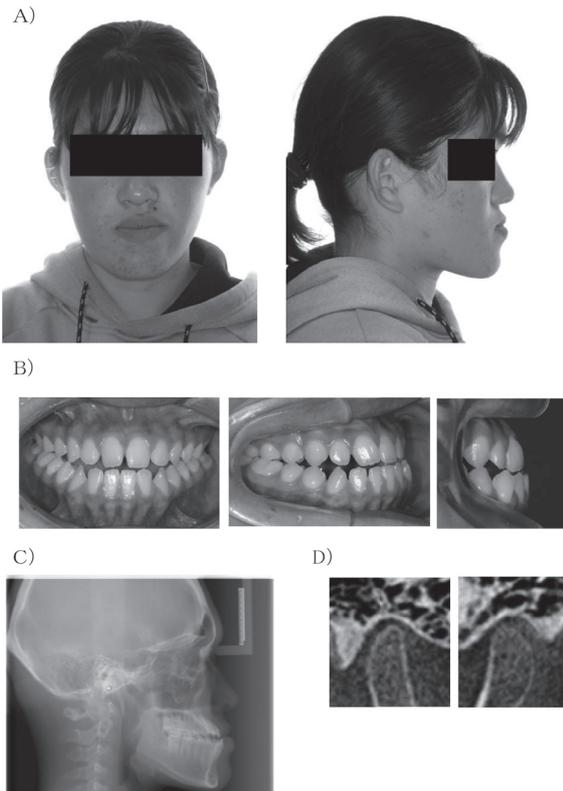


図11 初診時資料 (症例2)

- A) 顔貌写真
- B) 口腔内写真
- C) 側面セファロ
- D) CBCT 画像

に、上顎歯列弓側方拡大により獲得した空隙を利用して上顎切歯の舌側傾斜移動、下顎前歯の唇側傾斜移動を行った。手術方法として上顎は Le Fort I 型骨きりにより、ANS を基準に上顎右側第一大臼歯を上方へ3.5 mm、上顎左側第一大臼歯では上方へ2.5 mm の移動と上顎前歯軸の改善およびカントの修正を行った。さらに、下顎は Bi-SSRO により右側8.0 mm、左側9.0 mm の後方移動を図った。

術後の側貌は直線型に改善し、前歯部被蓋関係は overjet +3.0 mm, overbite +2.0 mm, 大臼歯の咬合関係はほぼ I 級に改善した (図12)。側面セファロの治療前後のトレースの重ね合わせでは、下顎の著明な後方移動と上顎の時計回転による後上方への移動が確認された (図13)。側面セファロ分析では、Facial angle は 93.4° から 85.9° に、∠SNB は 86.9° から 79.3° に減少し、Convexity は -9.4° から -3.5° に、∠ANB は -4.2° から -1° にそれぞれ増加した (表6)。

CBCT 画像を用いた体積分析において、顔面頭蓋の総体積は 123,875 mm³ から 112,195 mm³ にやや減少し、下顔面は 254,052 mm³ から 189,125 mm³ に大きく減少していた。顔面頭蓋の体積の減少には、Pr と上顎両側第一

表6 症例2の側面セファロ分析結果

angular measurement (°)	mean	before	after
Facial angle	84.8	94.3	85.9
convexity	7.6	-9.4	-3.5
A-B plane	-4.8	5.8	0.9
SNA	82.3	82.7	78.3
SNB	78.9	86.9	79.3
ANB	3.4	-4.2	-1.0
FMA	28.8	26.5	28.8
MP to SN	40.2	32.6	34.7
Ramus to FH	83.3	79.7	81.4
Gonial A	131.0	126.8	127.4
U1 to SN	104.5	124.5	113.6
L1 to MP	96.3	84.5	90.3

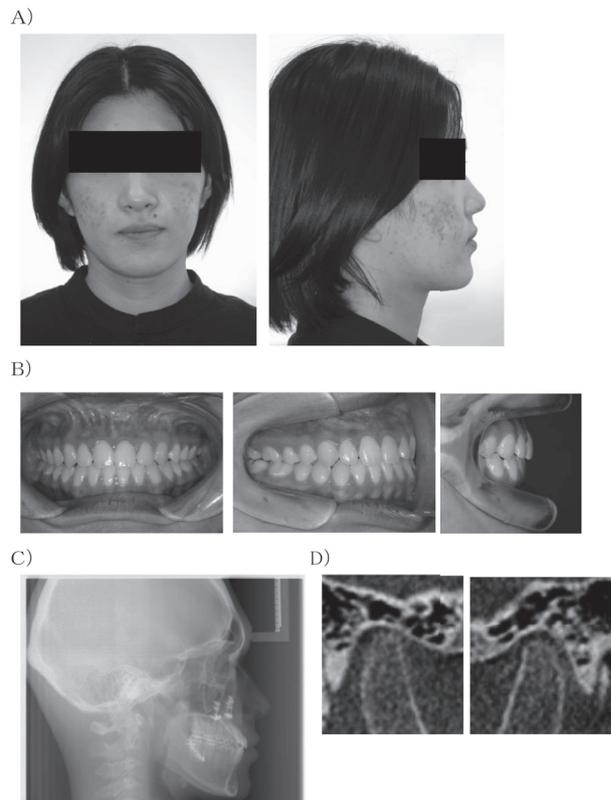


図12 動処終了時資料 (症例2)

- A) 顔貌写真
- B) 口腔内写真
- C) 側面セファロ
- D) CBCT 画像

大臼歯の位置が関係する四面体 (U10, U11) の減少が関与していた。さらに、左右上顎第一大臼歯の移動量を示す項目、U10 と U11 の術後の体積減少に違いがあり U10 の変化量が大きかった。一方、それ以外の顔面頭蓋の四面体 (U6, U7, U8, U9) の体積にほとんど変化は認めなかった (図14)。下顔面の体積減少には、B および左右上顎第一大臼歯が関与する四面体 (L3, L4)、Me が関係する四面体 (L6, L7, L8) の体積の減少が関与し

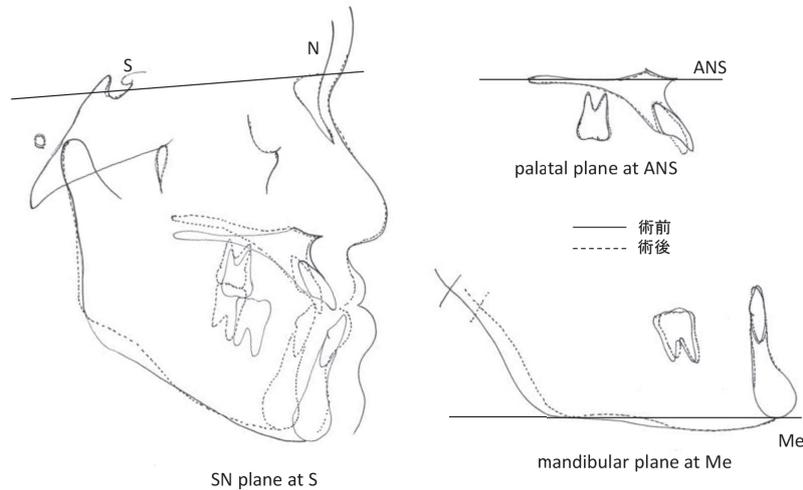


図13 術前後の側面セファロのトレースの重ね合わせ（症例2）

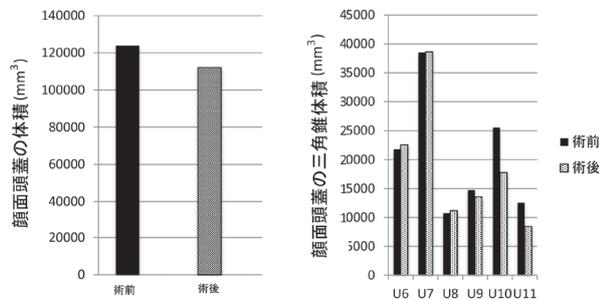


図14 術前後の顔面頭蓋の体積変化（症例2）

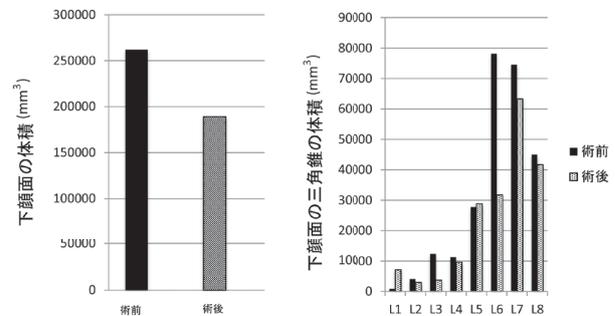


図15 術前後の下顔面の体積変化（症例2）

ていた（図15）。

考 察

頭蓋骨の大きさや形の評価は、いろいろな目的や意味を持って行われてきた歴史がある。様々な環境の中で生活する人種や集団の頭蓋骨は、大きさや形の類似性や相違点などの多様性を示し、遺伝などの内的要因と自然環境や社会環境などの外的要因が関与している⁶¹⁾。人類学や解剖学では、ノグスやものさしなどを用いて直接生体の決められた長さや角度を計測し、顎顔面骨格の特徴を評価していた⁶²⁾。さらに、3次元の顎顔面骨格を長さや角度だけの平面的な計測でだけでなく、頭蓋骨に設定した計測点の3次元座標値を求めたモアレ法、有限要素法や因子分析、主成分分析などの手法が行われているが¹¹⁻¹³⁾、実際の体積は求められていない。一方、歯科矯正学分野ではセファロ分析法の導入と発展によって、生体の顎顔面の成長変化を縦断的に評価できるようになった⁶³⁻⁶⁵⁾。診断と治療においても、2次元の側面セファロ分析を用い \angle SNAの大きさで上顎の成長抑制（ヘッドギアの使用）あるいは前方成長促進（前方牽引装

置の使用）を、 \angle SNBの大きさで下顎骨の前方成長促進（FKOや咬合斜面板などの使用）や下顎骨の成長抑制（チンキャップの使用）などの治療方針や方法を評価してきた⁵⁻⁷⁾。このような中、放射線の被曝量を抑えた小照射野歯科用コーンビームCT（CBCT）が開発され、歯科領域にも用いられるようになった。CBCT画像を用いて顎顔面の3次元の大きさを縦断的に評価することの歯科矯正学的意義を考えると、(1)乳歯から永久歯への歯の交換の3次元の観察ができる。(2)成長期の患者の顎顔面骨に対するチンキャップ、ヘッドギア、前方牽引装置、上顎急速拡大装置、機能的顎矯正装置などの整形外科的効果を体積変化で評価できる。(3)顎変形症や顎関節症に対する外科的矯正治療による形態変化を体積変化で評価し、外科的矯正治療の術式の評価ができる等が考えられる。しかし、2012年に発表されたEuropean Commission⁶⁶⁾のガイドラインに沿った日本医学放射線学会では、放射線の被曝量のための指標として、感受性の高い子供に対する縦断的な資料の作成にはALARA (As Low As Reasonably Achievable)の原則で小児CTの診断参考レベル (diagnostic reference level: DRL) が示さ

れている⁶⁶⁻⁷⁰⁾。日本歯科放射線学会では、CBCTの臨床利用指針を報告している⁷¹⁾。日本矯正歯科学会でもCT撮影の目的と意義を考慮して、顎変形症や顎関節症の診断と治療、埋伏歯の診断や治療に関する撮影に限定している。本研究では、日本矯正歯科学会の臨床・疫学研究倫理審査委員会の指導に従い、研究対象者として顎変形症や顎関節症の疑いのあった患者の診断や治療法を立案するために採取したCBCT画像を3次元横断的資料として用い、矯正歯科臨床における3次元分析の有用性を検討した。

1. 顎顔面骨の体積を求める方法について

3次元座標空間に存在する4点で形成される四面体の体積は、4点の3次元座標値(x, y, z)から求めることができる。その前提として3次元座標の基本となる平面を決定する必要があり、本研究ではCBCT画像空間にNasionを原点とし、人類学的な頭蓋骨の計測やセファロ分析に用いられるFH平面、眼窩平面、正中矢状平面のジモンの3平面を設定した。2次元分析との関連性を検討するために、側面セファロ分析で用いられている計測点を顎顔面骨を撮影したCBCT画像に設定した。セファロ分析の計測点は原則正中部の点であり、左右にある点は中点として用いられている⁵⁻⁷⁾が、本研究では左右にある計測点はそのまま左右の点として用いた。市原の報告⁷²⁾を参考に15分以上の間隔をあけてCBCT画像上に計測点を1日4回、さらに別の日にも同様に4回プロットし、5個の四面体で構成する脳頭蓋、6個の四面体で構成する顔面頭蓋、および8個の四面体で構成する下顔面のそれぞれの体積を計8回算出し、日内変動と日間変動から再現性の検査を行った。その結果、脳頭蓋、顔面頭蓋および下顔面の体積の算出の再現性を確認することができた。さらに、脳頭蓋、顔面頭蓋および下顔面の1日目(日内変動の検証)のICC(1, 4)および2日間(日間変動の検証)のICC(1, 8)は全ての検討項目で0.95以上であることから、計測点のプロットの信頼性が確認され、本分析方法の有用性が示唆された。

2. 側面セファロ分析で分類された被験者の顎顔面骨の体積の比較について

被験者を側面セファロ分析の上下顎の前後的关系を表す $\angle ANB$ によって三つの群に分類し、各群の脳頭蓋、顔面頭蓋および下顔面の体積の比較を行った。側面セファロ分析ではⅡ級群は下顎が後退した骨格性の上顎前突で、Ⅲ級群は上顎の劣成長と下顎の過成長による骨格性の下顎前突であった。脳頭蓋の体積比較では、各群間に有意な差は認められなかった。各群の顔面頭蓋と下顔面の体積を比較すると、Ⅱ級群の下顔面の体積が最も小さく、Ⅲ級群では顔面頭蓋の体積が最も小さく、下顔面の体積が最も大きくなっており、2次元の側面セファロ分析の結果に一致していた。さらに、顔面頭蓋と下顔面

を構成する四面体の体積を検討した結果、Ⅲ級群の顔面頭蓋の体積が小さいのはANSやA点、あるいはPrなどが関連する四面体の体積が小さいことが原因として考えられ、Ⅱ級群の下顔面の体積が小さいことやⅢ級群の下顔面の体積が大きいことの要因はB点やMeが関与する四面体の大きさが関与することが示された。側面セファロ分析において正中部に設定されたA点やB点、Me、Prなどの前後的位置が顎顔面骨の体積評価の重要な要因であることが分かった。

一方、下顔面では、Ⅱ級群のB点やMeに加えてCoやGoに関与する四面体(L2, L6, L7, L8)の体積が有意($p < 0.05$)に小さく、Ⅲ級群の同じ四面体の体積が有意($p < 0.05$)に大きかった。このことは、顔面頭蓋の体積の大きさは、正中部の計測点の前後的位置と上下の位置の影響を受け、下顔面の体積は正中部の計測点ではなく、左右にある計測点の影響を受けやすいことが示された。

$\angle ANB$ の大きさにより分類した3群の脳頭蓋、顔面頭蓋、および下顔面の体積の比較を一元配置分散分析を用い行い有意差を示す項目が認められた。p値に関係する要因として2群間の平均値の差や標準偏差、あるいは症例数が考えられることから、有意差が認められた項目に対し検出力分析をおこない必要な症例数を算出した。その結果、Ⅱ級群とⅢ級群の下顔面総体積の比較に必要な症例数は満たしていたが、その他有意差の認められたいずれの群間の比較においても検出力を高めるには症例数を増やす必要があることが示された。

3. 顎変形症患者の術前術後の顔面の容積変化について

CBCT画像を用いた3D評価の意義や目的の一つに、外科的矯正治療の診断や治療効果の評価が挙げられる。本研究では、2症例の顎変形症患者の術前術後の顎顔面骨の体積変化について報告した。

今回の2症例では、顔面頭蓋や下顔面の体積の術前後の変化は、顔面写真、歯列模型、および側面セファロ分析などの評価に一致し、顔面頭蓋や下顔面の全体の体積は手術による顎の前後の移動によって増減していた。さらに、カントの修正を目的に行った左右の上顎第一大臼歯における上方移動量の差は、U10とU11の術前・術後の体積減少量の違いとして表現できる可能性が考えられた。従来の評価は主観的であり平面的な評価であったが、顔面頭蓋や下顔面を小さく区分して体積を評価することで、変化を客観的にかつ立体的に表現することが可能になり、左右差や上下差などの外科術式の詳細を評価できる可能性が示された。さらに、外科的矯正治療に留まらず、顎顔面骨の成長変化や整形外科的な治療に対する変化移動など具体的な目的に対応した再現性のある計測点を設定することができれば、顎顔面骨の3次元評価の意義は高まるものと期待される。

結 論

側面セファロ分析が果たしてきた役割と同じく、CBCT画像の3次元デジタルデータを用いて顎顔面の大きさを客観的に立体的に表現できる可能性が示された。また、外科矯正治療術前および術後の縦断的データをもとに、顎顔面の体積変化を正確にかつ再現性良く表現できる計測点を設定する必要があると考えられた。しかし、CBCT画像が矯正歯科診療にもたらす恩恵については顎変形症や顎関節症に限られほとんど報告されていない。CBCT撮影時の患者への被曝量を減少する要因が幾つか挙げられているが、さらに装置の発展により患者への被曝量を減少することができれば、若年者の縦断的資料の採取が可能になり、CBCT画像のもたらす意義はさらに拡大できると期待できる。

文 献

- Broadbent BH: A new X-ray technique and its application to orthodontia. *Angle Orthod* 1, 45-66 (1931)
- Hofrath H: Die bedeutung der roentgenfern der kiefer anomalien. *Fortschr Orthod* 1, 232-258 (1931)
- Wylie WL and Elsasser WS: Undistorted vertical projections of the head from lateral and postero-anterior roentgenograms. *Am J Roentgenol* 60, 414-417 (1940)
- Krogman WM: Catalyst in growth research. *Am J Orthod* 37, 679-681 (1951)
- Downs WB: Variations in facial relationship. *Am J Orthod* 34, 813-840 (1948)
- Steiner CC: Cephalometrics for you and me. *Am J Orthod* 39, 729-755 (1953)
- Ricketts RM, Bench R, Gugino C, Hilgers J and Schulhof R: Visual treatment objective or V.T.O. Bioprogressive therapy. Denver, Colo. Rocky Mountain Orthodontics, 35-54 (1979)
- 巻島美幸, 荻原直道: 幾何学的形態測定学を用いた縄文人頭蓋骨の3次元形態解析. *Anthropological Science* 117, 11-21 (2009)
- Savara BS: A method for measuring facial bone growth in three dimensions. *Hum Biol* 37, 245-255 (1965)
- 滝本和男, 河田照茂: 歯列弓, 顎, 顔面頭蓋の立体的観察法. *日矯歯誌* 21, 1-6 (1962)
- 河合 幹, 山本 忠, 阿部本晴, 立松 充, 下郷和雄, 池畑正宏, 根本辰朗, 滝 義孝: モアレ等高線による顔面形態の立体的計測法のシステム化について. *日本口腔外科学会雑誌* 21, 419-426 (1972)
- 古田美子, 桜田元樹, 中西久美子: インド人下顎骨の形態学的観察 その1. *歯学* 69, 16-33 (1981)
- 藤崎年英, 小林亘彦, 高木晴雄, 湊 謙正: 電子計測機によるモアレ画像のデータ処理について. 第4回モアレ研究会論文集, モアレ研究会 83-84 (1978)
- 金沢英作: 頭蓋骨計測点3次元座標値の主成分分析. *人類学誌* 88, 209-228 (1980)
- 田中 礼, 林 孝文: 顎顔面形態の3次元計測法の提案. *日骨形態雑誌* 17, 7-14 (2007)
- Benfer RA: Morphometric analysis of cartesian coordinates of the human skull. *Am J Phy Anthrop* 42, 371-381 (1975)
- Carl R Crawford and Kevin F: Computed tomography scanning with simultaneous patient translation. *Med Phys* 17, 967-982 (1990)
- Willi A Kalender: Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology* 176, 181-183 (1990)
- Taguchi K and Aradate H: Algorithm for image reconstruction in multi-slice helical CT. *Med Phys* 25, 550-561 (1998)
- Schaller S, Flohr T, Klingenberg K, Krause J, Fuchs T and Kalender WA: Spiral interpolation algorithm for multislice spiral CT. I. Theory. *IEEE Transactions on Medical Imaging* 1(99), 822-834 (2000)
- Ambrose J and Hounsfield G: Computerized transverse axial tomography. *Br J Radiol* 46, 148-149 (1973)
- Toyofuku F, Konishi K and Kanda S: Fuluoroscopic computes tomography : an attempt at 3-D imaging of teeth and jaw bone. *Oral Radiol* 2, 9-13 (1986)
- Arai Y, Tammsalo E, Iwai K, Hashimoto K and Shinoda K: Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofac Radiol* 28, 245-248 (1999)
- Ludlow JB and Walker C: Assessment of phantom dosimetry and image quality of iCAT FLX cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 144, 802-817 (2013)
- 勝又明敏: 歯科用CBCT画像情報の標準化. *歯科放射線* 55, 22-25 (2015)
- 岡野友宏: 歯科用コーンビームCTその基本と臨床. *歯科学報* 119, 169-178 (2019)
- Cotton TP, Geisler TM, Holden DT, Schwartz SA and Schindler WG: Endodontic applications of cone-beam volumetric tomography. *J Endod* 33, 1121-1132 (2007)
- Bedoya MM and Park JH: A review of the diagnosis and management of impacted maxillary canines. *J Am Dent Assoc* 140, 1485-1493 (2009)
- Liu D, Zhang W, Zhang z, Wu Y and Ma X: Three-dimensional evaluations of supernumerary teeth using cone-beam computed tomography for 487 cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 103, 403-411 (2007)
- Liu D, Zhang W, Zhang z, Wu Y and Ma X: Localization of impacted maxillary canines and observation of

- adjacent incisor resorption with cone-beam computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 105, 91-98 (2008)
- 31) Harris D, Buser D, Dula K, Gröndahl K, Jacobs R, Lekholm U, Nakielny R, van Steenberghe D and van der Stelt P: E.A.O. Guidelines for the use of diagnostic imaging in implant dentistry. *Clin Oral Implants Res* 13, 566-570 (2002)
- 32) 歯科用コーンビームCTの臨床利用指針(案). NPO 法人日本歯科放射線学会診療ガイドライン委員会編 第1版 2017年9月29日 1-46 (2017)
- 33) インプラント画像診断ガイドライン・第2版 NPO 法人日本歯科放射線学会・歯科放射線診療ガイドライン委員会 (2007)
- 34) Hussain AM, Packota G, Major PW and Flores-Mir C: Role of different imaging modalities in assessment of temporomandibular joint erosions and osteophytes: a systematic review. *Dentomaxillofac Radiol* 37, 63-71 (2008)
- 35) Alkhader M, Kuribayashi A, Ohbayashi N, Nakamura S and Kurabayashi T: Usefulness of cone beam computed tomography in temporomandibular joints with soft tissue pathology. *Dentomaxillofac Radiol* 39, 343-348 (2010)
- 36) Hintze H, Wiese M and Wenzel A: Cone beam CT and conventional tomography for the detection of morphological temporomandibular joint changes: *Dentomaxillofac Radiol* 36, 192-197 (2007)
- 37) Honda K, Larheim TA, Maruhashi K, Matsumoto K and Iwai K: Osseous abnormalities of the mandibular condyle: diagnostic reliability of cone beam computed tomography compared with helical computed tomography based on an autopsy material. *Dentomaxillofac Radiol* 35, 152-157 (2006)
- 38) Honey OB, Scarfe WC, Hilgers MJ, Klueber K, Silveira AM, Haskell BS and Farman AG: Accuracy of cone-beam computed tomography imaging of the temporomandibular joint: comparisons with panoramic radiology and linear tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 132, 429-438 (2007)
- 39) Barghan S, Merrill R and Tetradis S: Cone beam computed tomography imaging in the evaluation of the temporomandibular joint *J Calif Dent Assoc* 38, 33-39 (2010)
- 40) Hilgers ML, Scarfe WC, Scheetz JP and Farman AG. Accuracy of linear temporomandibular joint measurements with cone beam computed tomography and digital cephalometric radiography: *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 128, 803-811 (2005)
- 41) Ahmad M, Hollender L, Anderson Q, Kartha K, Ohrbach R, Truelove EL, John MT and Schiffman EL: Research diagnostic criteria for temporomandibular disorders (RDC/ TMD): development of image analysis criteria and examiner reliability for image analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 107, 844-860 (2009)
- 42) Barghan S, Tetradis S and Mallya S: Application of cone beam computed tomography for assessment of the temporomandibular joints. *Aust Dent J* 57, 109-118 (2012)
- 43) Krishnamoorthy B, Mamatha N and Kumar VA: TMJ imaging by CBCT : Current scenario. *Ann Maxillofac Surg* 3, 80-83 (2013)
- 44) Matsumoto K, Ishizuka T, Yamada H, Yonehara Y, Arai Y and Honda K : Clinical use of three-dimensional models of the temporomandibular joint established by rapid prototyping based on cone-beam computed tomography imaging data. *Oral Radiol* 30, 38-45 (2014)
- 45) Hamada Y, Kondoh T, Noguchi K, Iino M, Ishii H, Mishima A, Kobayashi K and Seto K: Application of limited cone beam computed tomography to clinical assessment of alveolar bone grafting: a preliminary report. *Cleft palate Craniofac J* 42, 128-137 (2005)
- 46) Oberoi S, Chigurupati R, Gill P, Hoffman WY and Vargervik K: Volumetric assessment of secondary alveolar bone grafting using cone beam computed tomography. *Cleft Palate Craniofac J* 46, 503-511 (2009)
- 47) Kawakami S, Hiura K, Yokozeki M, Seike T, Nakanishi H and Moriyama K: Prognostic implications of nasal cavity and cleft morphology in secondary bone grafting. *Cleft Palate Craniofac J* 39(6), 575-581 (2002)
- 48) Kawakami S, Hiura K, Yokozeki M, Takahashi T, Seike T, Nakanishi H and Moriyama K: Longitudinal evaluation of secondary bone grafting into the alveolar cleft. *Cleft Palate Craniofac J* 40(6), 569-576 (2003)
- 49) Caloss R, Atkins K and Stella JP: Three-dimensional imaging for virtual assessment and treatment simulation in orthognathic surgery. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am* 19, 287-309 (2007)
- 50) Papat H, Richmond Snd Drage NA: New developments in three-dimensional planning for orthognathic surgery. *J Orthod* 37, 62-71 (2010)
- 51) Christie KF, Boucher N and Chung C-H: Effects of bonded rapid palatal expansion on the transverse dimensions of the maxilla: a cone-beam computed tomography study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 137, 79-85 (2010)
- 52) Garrett BJ, Caruso JM, Rungcharassaeng K, Farrage JR, Kim JS and Taylor GD: Skeletal effects to the maxilla after rapid maxillary expansion assessed with cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*

- 134, 8-9 (2008)
- 53) Rungcharassaeng K, Caruso JM, Kan JY, Kim J and Taylor G: Factors affecting buccal bone changes of maxillary posterior teeth after rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 132, 428. e1-8 (2007)
- 54) 高井貞浩, 田中 礼, 小林正治, 小田陽平, 林 孝文, 齋藤 力: 顎変形症患者における咽頭気道形態の三次元 CT 評価. *日顎変形誌* 21, 215-224 (2011)
- 55) Aboudara CA, Hatcher D, Nielsen IL and Miller A: A three-dimensional evaluation of the upper airway in adolescents. *Orthodontics & Craniofacial Research* 6 Suppl 1, 173-175 (2003)
- 56) El H, Palomo JM: Airway volume for different dentofacial skeletal patterns. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 139, e511-521 (2011)
- 57) El H, Palomo JM: Three-dimensional evaluation of upper airway following rapid maxillary expansion. *Angle Orthod* 84, 265-273 (2014)
- 58) 谷 浩明: 評価の信頼性. *理学療法科学* 12(3), 113-120 (1997)
- 59) 井関隆太: 実験心理学における例数設計の周辺. *基礎心理学研究* 37(2), 180-187 (2019)
- 60) Yoneda Y: Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZ' for medical statistics. *Bone Marrow Transplant* 48(3), 452-458 (2013)
- 61) Moss ML: The primary role of functional matrices in facial growth. *Am J Orthod* 55, 566-577 (1969)
- 62) 足立和隆: 人類学からみた計る. *理学療法科学* 11(3), 145-151 (1996)
- 63) Brodie AG: On the growth pattern of the human head from the third month to the eighth year of life. *Am J Anat* 68, 209-234 (1941)
- 64) Nanda RS: The Rates of Growth of Several Facial Components Measured from Serial Cephalometric Roentgenograms. *Am J Orthod* 41, 658-673 (1955)
- 65) Hans MG, Palomo JM and Valiathan M: History of imaging in orthodontics from Broadbent to cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 148, 914-921 (2015)
- 66) European Commission: Radiation Protection 172. *Evidence Based Guidelines on Cone Beam CT for Dental and Maxillofacial Radiology*. Luxemburg : Office for Official Publications of European Communities (2012) (http://ec.europa.eu/energy/nuclear/radiation_protection/doc/publication/172.pdf)
- 67) Roberts JA, Drage NA, Davies J and Thomas DW: Effective dose from cone beam CT examinations in dentistry. *Br J Radiol* 82, 35-40 (2009)
- 68) Lofthag-Hansen S, Thilander-Klang A and Gröndahl K: Evaluation of subjective image quality in relation to diagnostic task for cone beam computed tomography with different fields of view. *Eur J Radiol* 80, 483-488 (2011)
- 69) Pauwels R, Beinsberger J, Collaert B, Theodorakou C, Rogers J, Walker A, Cockmartin L, Bosmans H, Jacobs R, Bogaerts R and Horner K: The SEDENTEXCT Project Consortium. Effective dose range for dental cone beam computed tomography scanners. *Eur J Radiol* 81, 267-271 (2012)
- 70) Ludlow JB, Timothy R, Walker C, Hunter R, Benavides E, Samuelson DB and Scheske MJ: Effective dose of dental CBCT -a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units. *Dentomaxillofac Radiol* 44(1), 20140197 (2015)
- 71) Japanese Society for Oral and Maxillofacial Radiology: Clinical guidelines for dental cone-beam computed tomography. *Oral Radiol.* 34(2), 89-104 (2018)
- 72) 市原清志: 臨床化学検査の分解能の比較評価法. *臨床化学* 27, 21-49 (1998)