

学位論文の全文に代えてその内容を要約したもの

愛知学院大学

| | |
|---|------------|
| 乙 第 号 | 論文提出者 相宮秀俊 |
| 論文題目 歯科用コーンビーム CT におけるボクセル値の安定性 についての検討 | |

11 ポイント

句読点は「、」と「。」を使用してください。

I. 緒言

歯科用コーンビーム CT 装置は、現在では広く一般歯科診療所に導入されている。歯科用コーンビーム CT 画像の寸法精度は高く¹⁾、加えて二分下顎管や副オトガイ孔などの微細な解剖学的構造を観察し得る特徴を有している²⁻⁴⁾ことから、歯科インプラント治療や埋伏歯、根尖病変などの診断に応用されている⁵⁻⁷⁾。

歯科インプラント術前画像診断においては、顎骨骨密度の測定も重要な事項である。歯科用コーンビーム CT から得られるボクセル値は、マルチスライス CT から得られる CT 値とは異なり、相対値である。献体を用いた研究において、直径 25cm の撮影領域を有する歯科用コーンビーム CT から得られるボクセル値は CT 値と高い相関(相関係数:0.92~0.95) がみられたと報告されている⁸⁾。また、下顎骨において直径 10cm の撮影領域を有する歯科用コーンビーム CT から得られるボクセル値とマルチスライス CT から得られる骨密度値との間には高い相関が観察され、歯科用コーンビーム CT のボクセル値から骨密度値を推定する方法が紹介されている⁹⁾。

このように歯科用コーンビーム CT でのボクセル値を定量的に評価するためには、歯科用コーンビーム CT の撮影領域内におけるボクセル値の安定性を検討しておく必要がある。

そこで、本研究では歯科用コーンビーム CT のボクセル値の安定性を評価するファントムを用いた実験的な手法を提案し、歯科用コーンビーム CT の専用機 2 機種と近年開発が目覚ましいパノラマ X 線撮影と歯科用コーンビーム CT が可能な複合機 1 機種でボクセル値の安定性を評価した。

II. 対象および方法

1. ファントム

被験体の材質として 3 種類、塩化ビニル、ポリオキシメチレン、ポリカーボネートを用いた。直径 16cm のアクリル容器を精製水で満たし、その切歯正中部、右側第一大臼歯部、左側第一大臼歯部に相当する 3 部位に同一の材質の被験体を設置し、ファントムとした。マルチスライス CT を用いた予備実験において、塩化ビニルは皮質骨、ポリオキシメチレンは海綿骨、ポリカーボネートは治癒過程の抜歯窩に近似した CT 値を示した。被験体は円柱状で、その大きさは直径 15mm、長さ 10cm とした。

2. 歯科用コーンビーム CT

歯科用コーンビーム CT 装置は、フラットパネルディテクタを採用している装置を用いた。専用機では 2 機種、Alphard VEGA (朝日レントゲン工業、京都、日本) と 3D eXami (カボデンタルシステムズジャパン、東京、日本) とした。また、パノラマ X 線撮影との複合機は AUGESOLIO ZCM (朝日レントゲン工業、京都、日本) を用いた。撮影条件は、Alphard VEGA では、通常の 360° 回転で、撮影領域の直径は I モードの直径 102mm、ボクセルの 1 辺は、0.2mm であった。管電圧と管電流は、製造業者の推奨値である 80kV、5mA に設定した。3D eXami では、オフセットスキャン (付録参照) を用い、撮影領域

の直径は 140mm、ボクセルの 1 辺は、0.25mm であった。管電圧と管電流は、製造業者の推奨値である 120kV、5mA に設定した。複合機の AUGE SOLIO ZCM では、撮影領域の直径は 2 種類、直径 97mm の通常の 360° 回転の I モードと直径 161mm のオフセットスキャンの A モードとし、ボクセルの 1 辺は I モードでは 0.19mm、A モードでは 0.31mm であった。管電圧と管電流は、製造業者の推奨値である 85kV、4mA に設定した。ファントムの歯科用コーンビーム CT 装置への設置においては、ファントムの底面は床と平行とし、水平的には正中部においてファントムの辺縁と撮影領域とが一致するようにした。歯科用コーンビーム CT は同一条件で 3 回撮影を繰り返し、軸位断面像を DICOM 形式で保存した。また、円柱状の被験体を設置しない精製水のみでの撮影も同様に行った。

3. 歯科用コーンビーム CT 画像の計測

3次元画像構築ソフトウェア (OsiriX 画像ソフトウェア、ver3.9)¹⁰⁾を用いて、円柱状の被験体および精製水のボクセル値を計測した。軸位断面画像のスライス厚は、Alphard VEGA と 3D eXam i では 1.0mm、AUGE SOLIO ZCM の I モードでは 0.95mm、AUGE SOLIO ZCM の A モードでは 0.94mm に調整し、円形の関心領域 (Region of interest、ROI) を上下的に 5 つのレベルに設定した。それらは、撮影領域の中央レベル (C)、上端から 10mm 下方レベル (A)、下端から 10mm 上方レベル (E) とした。残りの 2 つのレベルは、A と C の中間レベル (B) と C と E の中間レベル (D) とした。ROI の大きさは、Alphard VEGA と AUGE SOLIO ZCM の I モードおよび A モードでは 0.85cm² に設定した。また、3D eXam i では 0.87cm² に設定した。各々の計測は同一箇所でも 3 回繰り返した。各円柱状の被験体および精製水、各部位、各レベルのボクセル値は 3 回の歯科用コーンビーム CT と 3 回の計測を平均した。また、切歯正中部のレベル C でのボクセル値を基準として、各部位や各レベルでのボクセル値の差を計算し、さらにその差の絶対値の平均を求めた。

4. 統計学的分析

3種類の被験体と精製水、3部位 (切歯正中部、右側臼歯部、左側臼歯部) および 5 つのレベル (A~E) におけるボクセル値を比較した。統計処理はマン・ホイットニーの U 検定を用いて、有意水準は $p < 0.05$ とした。

III. 結果

各々の被験体のボクセル値は、装置や撮影モード、また設置部位において異なっていた。また、全ての装置および撮影モードにおいて右側臼歯部と左側臼歯部の値は近似していた。

1. Alphard VEGA 装置の I モード

ボクセル値の平均は、塩化ビニルで 1057、ポリオキシメチレンで 293、ポリカーボネートで 137、精製水で 102 であり、各々の部位での SD の範囲は 10~15 であった。3種類の被験体および精製水のボクセル値には有意差を認めた。切歯正中部におけるボクセル値は、右側臼歯部および左側臼歯部のボクセル値より有意に大きかった。右側臼歯部と左側臼歯部でのボクセル値に有意差はみられなかった。撮影領域のレベルにおいては、レベル A のボクセル値はレベル C と比較して有意に小さく、またレベル B と比較して小さい傾向 ($P=0.0524$) がみられた。また、レベル D はレベル C および E と比較して小さ

い傾向 ($P=0.0505$, $P=0.0522$) がみられた。また、差の平均 (SD) は、塩化ビニルでは 75 (49)、ポリオキシメチレンでは 24 (16)、ポリカーボネートでは 18 (11)、精製水では 18 (11) であった。

2. 3DeXam i 装置のオフセットスキャン

ボクセル値の平均は、塩化ビニルで 554、ポリオキシメチレンで 48、ポリカーボネートで -127、精製水で -202 であり、各々の部位での SD の範囲は 5~22 であった。3種類の被験体および精製水のボクセル値には有意差を認めた。切歯正中部におけるボクセル値は、右側臼歯部および左側臼歯部のボクセル値より有意に大きかった。右側臼歯部と左側臼歯部でのボクセル値に有意差はみられなかった。撮影領域のレベルにおいては、ボクセル値に有意差はみられなかった。また、差の平均 (SD) は、塩化ビニルでは 72 (48)、ポリオキシメチレンでは 49 (33)、ポリカーボネートでは 43 (29)、精製水では 40 (29) であった。

3. AUGE SOLIO ZCM 装置の I モード

ボクセル値の平均は、塩化ビニルで 797、ポリオキシメチレンで 200、ポリカーボネートで 76、精製水で 47 であった。3種類の被験体および精製水のボクセル値には有意差を認めた。切歯正中部におけるボクセル値は、右側臼歯部および左側臼歯部のボクセル値より有意に大きかった。右側臼歯部と左側臼歯部でのボクセル値に有意差はみられなかった。撮影領域のレベルにおいては、レベル A は、レベル B、C、および D と比較して大きい傾向 ($P=0.0504\sim0.0516$) がみられた。また、差の平均 (SD) は、塩化ビニルでは 75 (47)、ポリオキシメチレンでは 26 (16)、ポリカーボネートでは 16 (10)、精製水では 16 (10) であった。

4. AUGE SOLIO ZCM 装置の A モード

ボクセル値の平均は、塩化ビニルで 1178、ポリオキシメチレンで 311、ポリカーボネートで 132、精製水で 92 であった。3種類の被験体および精製水のボクセル値には有意差を認めた。切歯正中部におけるボクセル値は、右側臼歯部および左側臼歯部のボクセル値より有意に大きかった。右側臼歯部と左側臼歯部でのボクセル値に有意差はみられなかった。また、撮影領域のレベルにおいても有意差はみられなかった。また、図 10 に示すように差の平均 (SD) は、塩化ビニルでは 141 (91)、ポリオキシメチレンでは 66 (42)、ポリカーボネートでは 52 (33)、精製水では 55 (36) であった。

IV. 考察

歯科用コーンビーム CT は、マルチスライス CT と比較して、画像診断においていくつかの有利な点がある。第一として、歯科用コーンビーム CT の実効線量は狭い撮影領域が選択される場合には比較的少ない。第二として、歯科用コーンビーム CT 装置は省スペースに設置可能である。第三として、歯科用コーンビーム CT の解像度は高く、微細な解剖学的構造が観察可能である¹⁻³⁾。また、歯科インプラント治療の画像診断において、顎骨骨密度の計測は重要な項目であり、そのためにはボクセル値の信頼性が必要となる。本研究では、歯科用コーンビーム CT の専用機 2 機種とパノラマ X 線撮影との複合機 1 機種でのボクセル値の安定性を評価した。複合機では、異なる撮影機構での 2 種類の撮

影領域の直径で評価した。撮影機構として、Alphard VEGA と AUGE SOLIO ZCM の I モードでは通常の 360° 回転が採用されている。また、3D eXam i と AUGE SOLIO ZCM の A モードでは撮影領域の直径を拡大するためにオフセットスキャンが採用されている。

歯科用コーンビーム CT では歯や皮質骨、海綿骨のような硬組織を対象として観察が行われる。そこで、本研究では、精製水を含む 4 種類の材料でのボクセル値を検討した。円柱状の被験体を水平的に切歯正中部、左右側臼歯部の合わせて 3 部位に設置した。

精製水を含む 4 種類の材料のボクセル値は、Alphard VEGA、3D eXam i、AUGE SOLIO ZCM の I モードおよび A モードすべてにおいて有意差がみられた。この結果は、歯科用コーンビーム CT において 4 種類の材料を識別することが可能なことを示している。

塩化ビニルのボクセル値の平均は、Alphard VEGA で 1057、3D eXam i で 554、AUGE SOLIO ZCM の I モードで 797、AUGE SOLIO ZCM の A モード 1178 であった。また、ポリオキシメチレンのボクセル値の平均は、それぞれ 293、48、200、311 であり、ポリカーボネートはそれぞれ 137、-127、76、132、精製水はそれぞれ 102、-202、47、92 であった。装置や同一機種であっても使用する撮影モードにより、計測されるボクセル値は大きく異なっていた。これらの結果は、ボクセル値そのものを定量的に評価することができないことを示している。部位において、Alphard VEGA、3D eXam i、AUGE SOLIO ZCM の I モードおよび A モードすべてで切歯正中部のボクセル値は左右側臼歯部と比較して有意に大きい値であった。左側と右側臼歯部のボクセル値の間には有意差はみられなかった。切歯正中部でボクセル値が大きくなる理由としては、切歯正中部と左右側臼歯部とは水容器表面からの距離が異なることにより、ビームハードニング効果に差が生じるためと考えられた。イメージ増倍管を用いた歯科用コーンビーム CT において、前方や側方にハーレーションアーチファクトが報告されている。この事にはビームハードニング効果に関係していると考えられており¹¹⁾、今回の事象と同様なことが指摘されている。

切歯正中部のレベル C でのボクセル値を基準とした塩化ビニルでの差の平均は、Alphard VEGA で 73、3D eXam i で 72、AUGE SOLIO ZCM の I モードで 75 および A モード 141 であった。また、ポリオキシメチレン、ポリカーボネートおよび精製水の差の平均は、Alphard VEGA で 18~24、3D eXam i で 40~49、AUGE SOLIO ZCM の I モードで 16~26、AUGE SOLIO ZCM の A モード 52~66 であった。塩化ビニルでの差の平均は、AUGE SOLIO ZCM の A モードで大きかった。また、ポリオキシメチレン、ポリカーボネートおよび精製水の差の平均は、3D eXam i や AUGE SOLIO ZCM の A モードで大きかった。Katsumata ら¹²⁾は、360° 回転を用いた実験的な計測結果に基づいて広い撮影領域の歯科用コーンビーム CT ではボクセル値はより安定すると報告している。今回の条件では、3D eXam i や AUGE SOLIO ZCM の A モード撮影範囲が広い。それら両者ではオフセットスキャンが採用されており、この事がボクセル値の安定性に影響を与えていると考えられた。さらに、AUGE SOLIO ZCM の A モードでの差の平均は、他の結果と比較しても大きな値であり、パノラマ X 線撮影との複合機であるために、装置の基本的な構造や X 線束の上下的な角度なども関係している可能性が考えられた。

今までに歯科用コーンビーム CT から得られたボクセル値は歯科インプラント埋入時のトルク値やインプラント安定指数 (Implant Stability Quotient、ISQ 値) などとの

関係が種々検討されている¹³⁻¹⁷⁾。Fuster-Torres ら¹³⁾は、歯科用コーンビーム CT から得られたボクセル値と ISQ 値との相関関係を検討し、上顎前歯部で高い相関係数 (0.740) が得られたと報告している。また、Akoglan M ら¹⁷⁾は、歯科用コーンビーム CT を用いて歯科インプラント埋入時期の違い、つまり抜歯即時埋入、早期埋入、や通常埋入において荷重前後での骨密度の変化量を算出し、早期埋入術式は他の術式と比較してより骨密度の増加が認められたと報告している。Naitoh ら¹⁸⁾は下顎骨海綿骨において回帰直線を用いて推定した骨密度値には平均で $38\text{mg}/\text{cm}^3\text{HA}$ の誤差が認められ、ボクセル値を定量的に評価する場合にはこのような誤差を考慮しなければならない、と指摘している。また、今回の研究結果において、ボクセル値は切歯正中部と臼歯部との間で有意差が認められた。ボクセル値を用いた研究を行う場合には、対象部位を分けて分析する必要があるだろう。

今回の研究から使用する装置や撮影モードによりボクセル値そのものやその安定性が異なることが明らかとなった。特に、歯科インプラント画像診断のようにボクセル値を計測する必要がある場合には、前もって使用する装置の特性を熟知しておくことが重要である。また、ボクセル値は検出器の劣化などにより経年的に変化することも考えられる。そこで、皮質骨や海綿骨の X 線吸収を考慮した歯科用コーンビーム装置の品質管理に用いるためのファントムの開発が望まれている。さらには、今回示されたように前歯部と臼歯部とではビームハードニング効果の現れ方が異なっている。ビームハードニング効果を考慮した画像再構成アルゴリズムの開発も待たれる。

V. 結論

歯科用コーンビーム CT におけるボクセル値の安定性を実験的に評価するためのファントムを提案した。また、それを用いて、歯科用コーンビーム CT の専用機およびパノラマ X 線撮影との複合機でのボクセル値を検討したところ、使用する装置や撮影モードにより計測されるボクセル値は大きく異なっていた。また、ボクセル値の差の平均は、使用する装置や撮影モードにより異なっていた。

歯科インプラント治療において、歯科用コーンビーム CT のボクセル値を評価する場合には装置や撮影モードの特性を熟知していなければならない。

文献

- 1) Naitoh M, Katsumata A, Mitsuya S, Kamemoto H, Ariji E: Measurement of mandibles with microfocus X-ray computerized tomography and compact computerized tomography for dental use. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 19 : 239-246, 2004.
- 2) Naitoh M, Hiraiwa Y, Aimiya H, Ariji E: Observation of bifid mandibular canal using cone-beam computed tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 24 : 155-159, 2009.
- 3) Naitoh M, Hiraiwa Y, Aimiya H, Gotoh K, Ariji E: Accessory mental foramen assessment using cone-beam computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 107 : 289-294, 2009.

- 4) Naitoh M, Nakahara K, Suenaga Y, Gotoh K, Kondo S, Ariji E: Comparison between cone-beam and multislice computed tomography depicting mandibular neurovascular canal structures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 109 : e25-31, 2010.
- 5) 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 (委員長: 林孝文): インプラントの画像診断ガイドライン第2版. *Minds* ガイドラインライブラリ (<http://minds.jcqh.or.jp/n/med/4/med0060/G0000166/0001>), 2018.8.22 接続
- 6) 中山美和, 内藤宗孝, 有地榮一郎: 口腔外科領域における歯科用コーンビームCTの有用性. 福田仁一, 瀬戸暁一, 栗田賢一, 木村博人, 山根源之, 野間弘康, 朝波惣一郎編, *口腔外科ハンドマニュアル'12*. クインテッセンス出版 (東京), 180-186, 2012.
- 7) 中田和彦, 柴田直樹, 内藤宗孝: 歯内療法における歯科用CBCTの活用. *日本歯科評論*, 78 (通巻904) : 33-68, 2018.
- 8) Araryarachkul P, Caruso J, Gantes B, Schulz E, Riggs M., Dus I, Yamada JM, Crigger M: Bone density assessments of dental implant sites: 2. Quantitative cone-beam computerized tomography. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 20: 416-424, 2005.
- 9) Naitoh M, Hirukawa A, Katsumata A, Ariji E: Evaluation of voxel values in mandibular cancellous bone: relationship between cone-beam computed tomography and multislice helical computed tomography. *Clin Oral Impl Res*, 20 : 503-506, 2009.
- 10) Rosset A, Spadola L, Ratib O: OsiriX: An open-source software for navigating in multidimensional DICOM images. *J Digit Imag*, 17 : 205-216, 2004.
- 11) Katsumata A, Hirukawa A, Noujeim M, Okumura S, Naitoh M, Fujishita M, Ariji E, Langlais RP: Image artifact in dental cone-beam CT. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 101 : 652-657, 2006.
- 12) Katsumata A, Hirukawa A, Okumura S, Naitoh M, Fujishita M, Ariji E, Langlais RP: Relationship between density variability and imaging volume size in cone-beam computerized tomographic scanning of the maxillofacial region: an in vitro study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 107 : 420-425, 2009.
- 13) Fuster-Torres MA, Penarrocha-Diago M, Penarrocha-Oltra D, Penarrocha-Diago M: Relationships between bone density values from cone beam computed tomography, maximum insertion torque, and resonance frequency analysis at implant placement: a pilot study. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 26 : 1051-1056, 2011.
- 14) Tatli U, Salimov F, Kurkcu M, Akoglan M, Kurtoglu C: Does cone beam computed tomography-derived bone density give predictable data about stability changes of immediately loaded implants?: A 1-year resonance frequency

- follow-up study. J Craniofac Sur : e293-299, 2014.
- 15) Hasan I, Dominiak M, Blaszczynzyn A, Bourauel C, Gedrange T, Heinemann F: Radiographic evaluation of bone density around immediately loaded implants. Ann Anat, 199 : 52-57, 2015.
- 16) Sennerby L, Anderson P, Paglini L, Giani C, Moretti G, Molinari M, Motroni A: Evaluation of a novel cone beam computed tomography scanner for bone density examinations in preoperative 3D reconstructions and correlation with primary implant stability. Clin Implant Dent Relat Res, 17 : 844-853, 2015.
- 17) Akoglan M, Tatli U, Kurtoglu C, Salimov F, Kurkcu M: Effects of different loading protocols on the secondary stability and per-implant bone density of single implants in the posterior maxilla. Clin Implant Dent Relat Res, 19 : 624-631, 2017.
- 18) Naitoh M, Hirukawa A, Katsumata A, Aiji E. Prospective study to estimate mandibular cancellous bone density using large-volume cone-beam computed tomography. Clin Oral Impl Res, 21 : 1309-1313, 2010.

付録

歯科用コーンビーム CT での通常の 360° スキャンとオフセットスキャン

歯科用コーンビーム CT において通常の 360° スキャンでは面積の広い検出器を用いた時、広い撮影領域が得られる。しかしながら、面積の広い検出器は高価であり、歯科用コーンビーム CT 装置の価格はより高額となる。そこで、面積の狭い検出器を用いて、広い撮影領域を確保するための技術的な方法がオフセットスキャンである。最初の X 線管と検出器の関係において、撮影領域の半分の斜線部が X 線束の照射野に入っている。その状態から X 線管と検出器が 180° 回転した状態では、先ほどとは反対側の撮影領域の半分以上が X 線束に入っている。X 線管と検出器が 360° 回転することにより、撮影領域すべてに X 線が照射される。