

下顎骨の成長・発育に伴う骨梁構造のフラクタル次元解析

明海大学大学院歯学研究科歯学専攻

鈴木 優

(指導：奥村 泰彦 教授)

Fractal Analysis of Trabecular Bone Structure in the
Growth and Development of the Mandible

Yu SUZUKI

Meikai University Graduate School of Dentistry
(Mentor: Prof. Yasuhiko OKUMURA)

歯甲 第 310 号 2015 年 3 月 23 日

下顎骨の成長・発育に伴う骨梁構造のフラクタル次元解析

鈴木 優

明海大学大学院歯学研究科歯学専攻

(指導：奥村 泰彦教授)

要旨：形態の複雑さを数値化するフラクタル解析を用い，下顎骨の成長・発育による骨梁構造の解析を目的とした．研究にはヒト乾燥頭蓋骨（インド人）下顎骨を資料として使用した．下顎骨は Hellman の歯年齢 I A～V A の 10 ステージについて各 5 個体，計 50 個体を使用し，実験を行った．

エックス線撮影装置は，歯科用エックス線撮影装置を使用し実験を行った．撮影条件は管電圧 60 kV，管電流 7 mA，照射時間 0.63 秒，焦点・被写体間距離 250 mm で行った．画像はデジタルエックス線画像システム アルカナ，アレイ株式会社，東京）を使用し imaging plate（IP，ヨシダ，東京）で画像採取を行った．骨梁解析の対象とした部位は成人の場合は下顎第一大臼歯根尖部歯槽骨とし，幼児の場合は下顎角部とした．

得られた画像のフラクタル次元を解析し，各歯年齢における骨梁

の複雑性から下顎骨の成長・発育について評価をおこなった。その結果、骨梁構造にフラクタル性が存在することがわかった。成長・発育に伴って骨梁構造は複雑になりフラクタル次元は上昇し、輝度は下降する相反性を示していた。

索引用語：下顎骨の成長・発育，下顎骨骨梁構造，フラクタル次元

解析

Fractal analysis of trabecular bone structure in the growth and development of the mandible

Yu Suzuki
Meikai University Graduate School of Dentistry,
(Mentor: Prof. Yasuhiko Okumura)

Using the fractal analysis to quantify the complexity of the forms were studied for the purpose of analyzing the changes in trabecular structure with growth and development of the mandible.

The mandible of dried human skull (Indian) were used in the experiment.

Mandible uses Hellmans dental age, each 5 individual for the 10 stage of I A ~ V A, a total of 50 individuals, an experiment were conducted.

Dental x-ray imaging apparatus Dent NAVI (Yoshida, Tokyo) was used to imaging. X-ray imaging conditions were as follows, tube voltage 60 kV, tube current 7mA, projection time 0.63 seconds, focus-object distance 250 mm. Digital X-ray imaging system (Arcana, array Ltd., Tokyo) was used, the image data were collected with imaging plate (IP, Yoshida, Tokyo).

Region of interest that was the subject of trabecular bone analysis, first molar root apex area of alveolar bone at the

mandible in adults, in infants were angle of the mandible.

Analyzes the fractal dimension of the taken image, and was subjected to evaluation of growth and development of the mandible from the complexity of the trabecular bone in each dental age. As a results, trabecular structure were found to have a fractal. Trabecular structure according to growth and development fractal dimension becomes complex was increased, the brightness value also showed a reciprocity descending.

Key words: growth and development, trabecular bone, fractal dimension analysis

緒 言

骨のエックス線画像は、緻密骨(皮質骨)、海綿骨(骨梁)が複雑な構造パターンとして描出される。特に海綿骨構造はエックス線の入射方向に走行するいわゆる接線方向の骨梁構造が画像形成される。また骨梁の走向は、骨にかかる荷重の方向(力線方向)に抵抗するように成長する¹⁻³⁾。この骨梁パターンを観察することによりその骨に加わる荷重あるいは骨梁のミネラル量などの情報が画像診断の基礎として応用されている⁴⁾。

特に骨の形態的構造は、筋の付着部位などからの外力(荷重などの負荷)が刺激として骨の構造に影響を与える⁵⁾。

下顎骨骨梁構造のエックス線画像は複雑な網目状パターンを示すし、水平方向の骨梁像が顕著に表れる。下顎骨の研究は成長・発育や抜歯後の治癒過程における骨梁構造の再構築など多くの研究が行われている⁶⁻¹²⁾。しかし、これら従来の画像解析法(Betti 係数, Euler 数, Structure model index, Trabecular factor 等)によるパラメータは骨梁構造を全体的に解析することが困難である。

本研究は下顎骨骨梁を多数の微細構造の集合体としてとらえる、いわゆる巨視的視野から画像解析することを目的に、下顎骨骨梁部分

に広い region of interest(ROI)を設定し，ROI 内のエックス線画像解析法としてフラクタル理論を応用して骨梁構造の変化について解析を行った。

下顎骨骨梁構造評価は，エックス線画像診断を行う際に客観的な指標として日常行われている重要な項目である。骨梁状態の解析方法として，dual-energy x-ray absorptiometry(DXA)法や quantitative computed tomography(QCT)法などのエックス線の吸収係数を使用した骨塩量測定法^{13,14)}，あるいは解像力評価や相関法などの形態解析法が報告されている¹⁵⁻¹⁷⁾。

本研究はエックス線画像をフラクタル次元解析により，骨梁構造の変化あるいは差異を Hellman の歯齢を基準として成長・発育にともなう骨梁について，各歯齢下顎骨の画像解析を行ったので報告する。

材料と方法

1. 材料

1) 使用した下顎骨

研究にはヒト乾燥頭蓋骨(インド人)の下顎骨を資料として使用した。下顎骨は Hellman の歯年齢の 10 ステージ I A～VA について各 5 個体，計 50 個体を使用した。

2) 撮影装置

規格撮影を行うために撮影装置を自作した(Fig 1)。光学ベンチ上にエックス線発生装置と下顎骨の保持台を設置し，規格撮影を行った。

エックス線発生装置は，歯科用エックス線撮影装置 Dent NAVI(ヨシダ，東京)を使用した。撮影条件は管電圧 60kV，管電流は 10mA，照射時間 0.63 秒，焦点・被写体間距離 250mm で行った。

画像形成には口内法デジタルエックス線画像システム，アルカナ(アレイ株式会社，東京，Fig 2)を使用した。デジタルセンサーはデジタル用 imaging plate(IP)は IP プラス(ヨシダ，東京)を用い，画像データを記録した。

2. 方法

画像撮影には IP を用い、小児から成人の下顎骨を Hellman の歯年齢ごとにエックス線撮影。撮影後の IP をアルカナにて画像再構成を行った。得られた画像に対して、98 pixel×98 pixel の ROI を設定しフラクタル解析を行った(Fig.3).

1)大臼歯根尖に隣接する歯槽骨解析

解析部位は、小児の場合、咬合圧が最も加わる小児の下顎角部、成人の下顎第一大臼歯根尖部歯槽骨に設定した。

2)小臼歯、大臼歯根尖部周囲歯槽骨の解析

Hellman の歯年齢 VA 期の同一顎骨内 5ヶ所の異なる部位にそれぞれ ROI を設定。骨梁構造の差をフラクタル次元解析した。設定部位は下顎第二小臼歯根尖部、第一大臼歯近心根尖部、第一大臼歯遠心根尖部、第二大臼歯近心根尖部、第二大臼歯遠心根尖部とした。

資料は VA 期の歯年齢の顎骨 10 個体を使用し平均値を用いた。

アルカナにて取得した画像に対し骨梁構造を抽出するため、背景トレンド(低周波数領域)の除去を行った(Fig4)。トレンド除去は平滑化フィルタ(11×11)法を使用した¹³⁾。

資料は、Hellman の各歯年齢につき 5 個体、計 50 個体とし、撮影の画像から骨梁構造の複雑さをマクロ的評価法であるフラクタル

次元解析ソフトを用いて解析を行った。

今回、画像からフラクタル次元解析を行うにあたり、グレースケール画像を使用した。フラクタル次元の算出には、代表的な方法である **Box counting** 法^{18,19)}を用いた。以下にフラクタル次元解析の手順を示す。

①ROI 内の一辺 d の正方形分割を行う。

②分割した 1 つのボックスの輝度 I を ROI の 4 隅で計測する。最大輝度を I_{\max} 、最小輝度を I_{\min} とする。

③輝度差 I_d を算出する。

$$I_d = I_{\max} - I_{\min}$$

④ボックスのカウント数になる $n(r)$ を次式から算出する。

$$n(r) = I_d/r + 1$$

⑤ROI 内でのボックスで $n(r)$ を求める。その平均値が $\overline{n(r)}$ であるとき

$$N(r) = \overline{n(r)} \cdot (S/r^2) \quad \dots S \text{ は ROI の面積}$$

①～⑤から得られた $N(r)$ をフラクタル次元とする。

得られたフラクタル次元から、Hellman の各歯年齢におけるフラクタル次元、輝度差について散布図の最小二乗近似直線(H)を求め解

析を行った。同時に相関係数についての評価を行った。

本研究では使用した資料の年齢が不明であることから、歯の萌出を基準とした Hellman の歯年齢で分類した。このため散布図の X 軸は実年齢ではなく歯年齢で表記した。

結 果

本研究において骨梁構造のフラクタル次元，輝度差および相関係数について解析を行った．その回帰直線から得られた結果を Fig 5 に示す．各歯年齢でバラつきがあるものの，約 1.86 次元～約 1.94 次元に分布していた．つまり非常に複雑な構造を示していた．フラクタル次元と歯年齢には著しい正の相関性は認められなかった ($r=0.2$)．回帰直線では緩やかな上昇傾向を示していた．

輝度差と各歯年齢との結果を Fig 6 に示す．フラクタル次元と同様、歯年齢の増加とともに相関性($r=-0.21$)は認められなかった．回帰直線で見ると緩やかな減弱傾向を示していた．

フラクタル次元の相関係数値は約-1 を示していた(Fig 7)．

また，同一顎骨内の 5 ヶ所にそれぞれ ROI を設定し，同様に解析を行った．フラクタル次元の結果を Fig 8 に示す．回帰直線は小臼歯部から大臼歯部へ移行するにしたがって下降する傾向であった．散布図より，第二小臼歯根尖部は 1.927 次元，第一大臼歯近心根尖部は 1.927 次元，第一大臼歯遠心根尖部は 1.924 次元，第二大臼歯近心根尖部は 1.944 次元，第二大臼歯遠心根尖部は 1.724 次元であり，第一大臼歯付近の数値がわずかに高い値であった．回帰直線の傾き

は負の相関を認めた($r=-0.66$).

輝度差を Fig 9 に示す. 散布図を見ると第二小臼歯部が 49.0, 第一大臼歯近心根尖部は 37.0, 第一大臼歯遠心根尖部は 29.0, 第二大臼歯近心根尖部は 63.0, 第二大臼歯遠心根尖部では 154.0 であり, 第一大臼歯付近の値が最も低く, 第二大臼歯遠心根尖部が最も高い値であった. 回帰直線では, 小臼歯部から大臼歯部に移るにつれて高い正の相関が認められた($r=0.74$).

相関係数を Fig 10 第二小臼歯根尖部, 第一大臼歯近心・遠心根尖部, 第二大臼歯近心根尖部では $-0.999 \sim -1$ の間にあり, 第二大臼歯遠心根尖部は -0.997 であった. いずれも強い負の相関を示していた.

フラクタル次元と輝度差の2つの散布図に注目すると, フラクタル次元の散布図では第一大臼歯付近の数値が高く, 逆に輝度差の散布図ではその部位の数値が低いことが分かった.

考 察

フラクタル次元解析はあるパターンの複雑さを表す指標となるものである。フラクタル理論は物理学の分野から展開し、近年医学、生物学において応用されるようになってきた。通常トポロジーとして得られる次元は $1 \cdot 2 \cdot 3$ と整数列を示すが、フラクタル次元は中間値をとることが可能である。評価図形のフラクタル次元は $1 \sim 2$ の間の値になり、 2 に近い値はより複雑な形態を示している。つまりフラクタル次元解析は形態の複雑性を数値化した解析法である²⁰⁾。

医科領域ではエックス線画像から足関節の骨折後の骨萎縮評価²¹⁾、腰椎骨折の予後についての評価²²⁾、閉経後の腰椎骨梁の解析²³⁾についてフラクタル性の検討が行われている。これらはいずれも、ヒト海綿骨の2次元あるいはCTなどを使用した3次元の微細構造の変化を研究し、臨床データとして骨組織形態から診断・治療分野への応用が検討されている。病的骨梁に対しフラクタル次元解析を行い、正常骨梁との比較により臨床上の差が生じることを応用し診断の一助としている。しかし、歯科領域では、本研究のようにヒト下顎骨海綿骨のエックス線画像から骨梁解析を行った報告は少ない^{24,25)}。

1. 大臼歯根尖部に隣接する歯槽骨解析

実験の結果、フラクタル次元は成長・発育が進むにつれて上昇する傾向にあり、輝度差は下降する傾向にあった。グレースケールから求めたフラクタル次元は、白黒像の含まれるボックス(一辺 d)を設定して、そのボックスに白い画像(不透過像)が入っているボックスをカウント($N(r)$)し算出を行う。つまり形状の複雑性を定量化する方法である。また、輝度レベルを計測し、1つのボックス内での輝度差つまり白と黒の差から骨質に対する解析も行った。輝度を計測すると最小が0(黒)、最大が255(白)で表示され、グレースケールは0(黒)から255(白)までの間の明るさとなる。この輝度が高い(白)ということとは、すなわち画像平面に対し垂直方向で高さがあることを意味する。一方、黒になるほど高さがないことになり、両者の輝度差が大きいう意味は、凹凸が大きく、骨の石灰化が高いということになる。したがって、骨梁構造は成長するに従って複雑化し輝度差が少なくなるということが分かった。成長・発育にともなって骨梁数は増加し、また骨梁そのものの太さも増加すると考えられる。骨梁が太く、また骨梁の数が多ければ骨強度は高いといえる。加えて解析対象とした部位は咬合力が最もかかる部位であるため、リモデリ

ングによる骨肥厚が関連する。下顎骨歯槽骨部以外にも足を構成する骨のうち、距骨と踵骨の骨梁構造を研究対象とした研究²¹⁾において、高身長かつ大柄な体格の被験者であるほど距骨に大きな荷重がかかり、海綿骨の骨梁は力学的負荷により緻密な構造になる傾向が認められたとしている。一方、踵骨には距骨に比べて体重が分散されて作用するために体格との相関傾向は認められなかったとしている。骨強度は骨塩量減少に加え骨質、つまり海綿骨の三次元構築などに影響される。単純で規則正しく配列した構造よりも、複雑に配列した構造の物質ほど力学的に抵抗力が大きくなる²⁶⁾。また、大小さまざまな大きさの構造が複雑に配列された状態は自己相似性のスケールが広がっていることになり、フラクタル次元も上昇するものと思われる。したがってエックス線画像から下顎骨の骨梁構造を解析すると成長に伴い複雑化し、力学的にも強固になることがわかった。このことから、骨強度を解析する場合、骨梁構造も関与することを考慮すると、骨密度のみでの計測は不十分と考えられる。

2. 小臼歯、大臼歯根尖部周囲歯槽骨の解析

フラクタル次元と輝度差の比較から、フラクタル次元において第一大臼歯付近の値が高く、逆に輝度差では同部位の値が低いことが

分かった。また、相関係数が常にマイナスの値を示していることから、フラクタル次元と輝度差は相反するものであるということが分かった。撮影部位および解析部位を下顎第一大臼歯に設定した理由は下顎骨において同部位が咬合力という最も負荷がかかる部分であり、成長・発育による骨梁構造の変化に、物理的応力による骨リモデリングの理論を応用するために最適と考えられるためである。前述した通り、フラクタル次元は物質の構造が複雑になるほど上昇するものであり、輝度差はエックス線透過部分と不透過部分の差が大きいほど上昇する。つまり同一顎骨内では、第一大臼歯根尖部付近の骨梁が最も複雑でコントラストの少ない構造をしていると考えられる。さらに輝度差が少ないということは、この部分の骨梁は密な構造をしていることを意味しているものと考えられる。

脳梗塞片麻痺患者の場合、麻痺側(患側)の骨塩量が著しく低下する例が多く見られることから、骨強度及び骨塩量を一定に維持するためには力学的負荷をかけ続けることが必須であると報告されている¹⁷⁾。この様に力学的刺激が骨の構造に変化を与えることから、下顎骨の外部刺激あるいはそれに伴う発育様式を骨梁構造解析から研究することは意味があるものと考えられる。したがって、下顎第一大

臼歯部の歯槽骨が最も咬合圧による外部負荷がかかる部分であるため、海綿骨の骨梁構造の再構築つまりリモデリングの意味からも、このような結果になったものと考えられる。

また、ヒトが成人した後、さらに加齢変化(老化現象)を経ると、その骨梁構造は体積骨密度の減少にともなう海綿骨のエックス線透過性の上昇、骨梁間隙の増加によるフラクタル次元低下、構造の複雑性の減少による輝度差の上昇の変化が考えられる¹⁸⁾。つまり、本研究による結果から骨梁構造のフラクタル次元から骨の複雑性が Hellman の歯年齢と正の相関をもち、また骨塩量と骨梁の輝度差が負の相関をもつことがわかった。

本実験においては正常な下顎骨を使用したがる、病的影響により骨梁構造の極端な変化はフラクタル次元および輝度差に影響を与え、統計的に有意差が生じることが考えられる。したがって、フラクタル次元解析により骨の各種疾患の画像診断の一助になると考えられる。今後病的な骨梁構造とのフラクタル次元解析あるいは相関性を検討していくとともに診断への適応を検討していきたい。

結 論

今回下顎骨骨梁部のフラクタル理論の応用により，以下の結論を得た．

骨梁構造にフラクタル性が存在すること，つまり自己相似性が存在することがわかった。骨梁構造は成長の過程で複雑になり，強度も上昇するため，フラクタル次元値は加齢にともなって上昇する傾向にあるということがわかった。また，成人した後，老化にともなって骨密度が減少し，骨梁間隙が増加した結果フラクタル次元値は低下した。このことにより強度の低下や骨粗鬆症との関連が示唆された。本研究の結果から，病的骨梁構造のエックス線画像のフラクタル次元解析により診断に有効なことが示された。

謝 辞

稿を終わるにあたり，本研究に御理解，御校閲を賜りました明海大学大学院歯学研究科再生再建医療系歯科放射線学奥村泰彦教授に深甚なる謝意を表します．

また，御指導，御校閲を賜りました機能発達医療系小児歯科学渡部 茂教授，再生再建医療系歯科補綴学藤澤正紀教授，機能系口腔生理学村本和世教授に深く感謝の意を表します．さらに，御援助いただきました再生再建医療系歯科放射線学高橋伸年准教授をはじめ歯科放射線学の先生方に厚く御礼申し上げます．

引用文献

- 1) Dalen N , and Lamke , B. : Grading of osteoporosis by skeletal roentgenology and bone scanning. *Auta Radiol Diagn* **15**, 177-186, 1974
- 2) 上条雅彦 : 頭頸部の骨学 (頭蓋). In : 口腔解剖学, 上条雅彦, アナトーム社, 東京, pp23, 1977
- 3) Yasuhiko OKUMURA , Norihisa OKADA , Yoshihiro NAKAZATO, Hidehiko YAMADA, Nobutoshi TAKAHASHI, Seishi HOKARI and Tamuro MASUDA : Roentgenographic Study on the Trabecular Pattern of Alveolar Bone. *Jpn J Oral Diag/Oral Med* **4**, 261-266, 1991
- 4) 尾川浩一 : 画像解析法 —フラクタル次元と骨梁構造—. *THE BONE* **10**, 61-65, 1996
- 5) 須田立雄 : 骨は生きている. In : 骨の科学. 須田立雄, 小澤英浩, 高橋栄明, 第 1 版, 医歯薬出版, 東京, pp8-9, 1993
- 6) 野田和稔 : 根尖病巣の X 線写真による定量的観察に関する基礎的研究. *口腔病会誌* **44**, 236-252, 1977

- 7) 山田英彦, 田村俊晶, 黒田 勝, 柏戸信美, 小山宏樹, 丹羽克味,
金井良雄 : 光学的フーリエ変換による口内法 X 線写真の画像解
析. 城西歯大紀 **9**, 231-236, 1980
- 8) 石塚 理一郎 : 2次元フーリエ変換による下顎骨歯槽部骨梁像の
定量的評価. 日大口腔科学 **7**, 149-159, 1981
- 9) 高木 仁 : 口内法 X 線撮影における X 線入射角度の骨梁パター
ンにおよぼす影響について. 歯放線 **24**, 48-62, 1984
- 10) 牛田正行, 内藤宗孝, 石垣 伸, 西村 章, 塩島 勝, 菊池 厚 :
根尖部骨欠損像の検出能 —Dental Xeroradiography と従来の
Dental Film との比較—. 歯放線 **25**, 239-249, 1985
- 11) 佐藤優子, 鈴木はる江 : 骨の構造と働き. In : 骨の加齢—基
礎から臨床まで—. 佐藤昭夫, 林 泰史, 白木正孝, 第1版, 藤
田企画出版, 埼玉, pp1-17, 1987
- 12) 渡辺 康, 丹羽克味 : 口内法 X 線写真における顎骨骨梁構造
の経年変化. 歯放線 **28**, 422-436, 1988.
- 13) 北山 彰, 板谷道信, 友光達志, 荒尾信一, 天野貴司, 林 明
子, 曾根照喜, 福永仁夫, 山下一也 : 骨梁の画像解析. 日放技
学誌 **56**, 460-471, 2000

- 14) 小林公一, 坂本 信, 田邊裕治, 大森 豪, 古賀良生 : 単純 X 線像を用いた人工膝関節近傍における海綿骨の評価. 日臨バイオメカ会誌 **26**, 41–46, 2005
- 15) 中里義博, 奥村泰彦, 岡田典久, 増田 屯, 若月信彦 : ヒト下顎骨骨梁構造と口内法 X 線像の画像形成に関する研究. 日口診誌 **5**, 1992
- 16) Ramadan, A-B E and Mitchell D F : Aroentgenographic study of experimental bone destruction. Oral Surg Oral Med Oral Pathol **15**, 934–943, 1962
- 17) Shoha RR Dowson J and Richards A G : Radiographic interpretation of experimentally produced bony lesions. Oral Surg Oral Med Oral Pathol **38**, 294–303, 1974
- 18) 森 啓弥 : PTH 間歇投与による骨 geometry および骨微細構造の変化 運動負荷との比較検討. 川崎医会誌 **36**, 23–33, 2010
- 19) 友光達志, 三村浩朗, 村瀬研也, 玉田 勉, 曾根照喜, 福永仁夫 : 骨梁構造のフラクタル解析 一画像のスライス厚とピクセルサイズの検討一. Jpn soc radiol technol 819–825, 2005
- 20) Mandelbrot B : The Fractal Geometry of Nature. Freeman

and Company, NY, 1983

- 21) 伊東昌子, 高尾正一郎, 上谷雅孝: 加齢現象と骨. *Radiology Frontier* 8, 201–207, 2004
- 22) Buckland–Wright JC, Lynch LA, Rymen J, Fogelman I: Fractal signature analysis of macroradiographs measures trabecular organization in lumbar vertebrae of postmenopausal women. *Calcif Tissue Int* 54, 106–112, 1994
- 23) 稲垣幸司, 坂野雅洋, 山本弦太, 石原裕一, 野口俊英, 森田一三, 中垣晴男, 三木隆己, 中 弘志, 田口 明, 谷本啓二, Elizabeth A Krall: 閉経後骨粗鬆症患者の口腔内所見と骨粗鬆症治療に伴う口腔への影響. *Osteoporosis Japan* 15, 249–255, 2007
- 24) 伊丹宏之: 口内法 X 線写真を用いた海綿骨の定量的骨質評価法に関する研究. *広大歯誌* 32, 17–29, 2000
- 25) 永井伸郎: 口内法 X 線写真を用いた海綿骨の力学的特性の推定に関する実験的研究. *広大歯誌* 36, 37–51, 2004
- 26) 馬場玲子, 江面 晃: 実験的骨粗鬆症における雄ラットの下顎骨に関する研究. *日歯保存誌* 53, 396–406, 2010

付 図

Fig の説明

- Fig 1 Experimental apparatus for standardized x-ray projection
- Fig 2 Digital radiographic system
IP imagereader arcana
- Fig 3 Flow chart of fractal dimensional analysis of mandibular bone trabeculae
- Fig 4 98pixel × 98pixel ROI was defined on the CR images
- Fig 5 Fractal dimension analysis of Hellman's dental ages
- Fig 6 Luminance value analysis of Hellman's dental ages
- Fig 7 Correlation coefficient analysis of Hellman's dental ages
- Fig 8 Fractal dimension analysis of According to the part
- Fig 9 Luminance value analysis of According to the part
- Fig 10 Correlation coefficient analysis of According to the part

Fig.1
鈴木 優

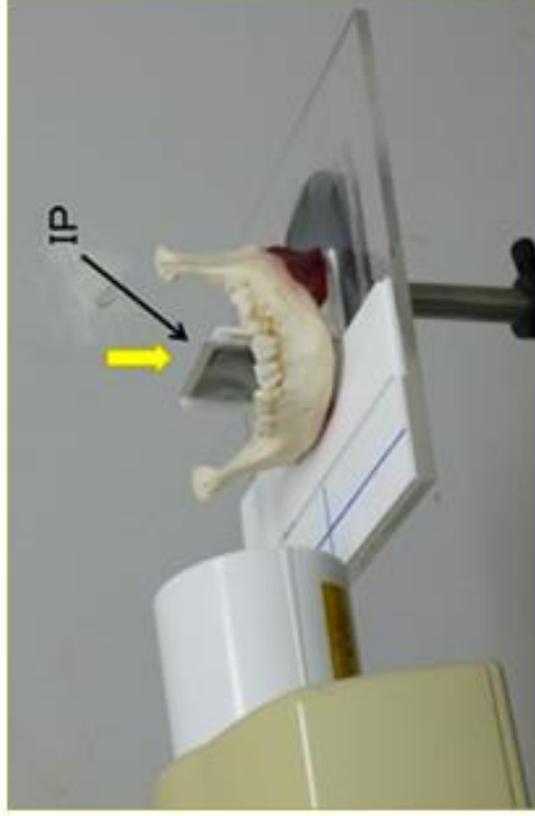
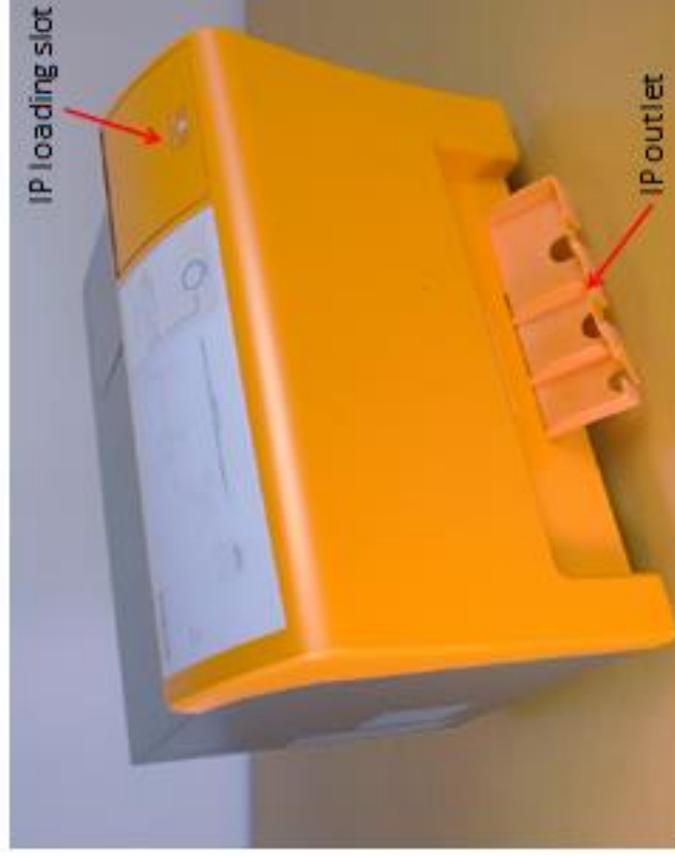


Fig.2
鈴木 優



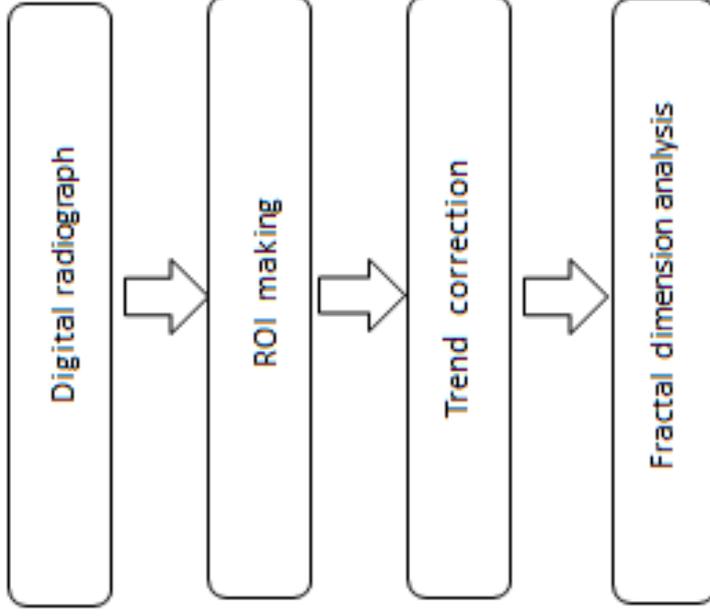


Fig 3
鈴木 優

Fig4
鈴木 優

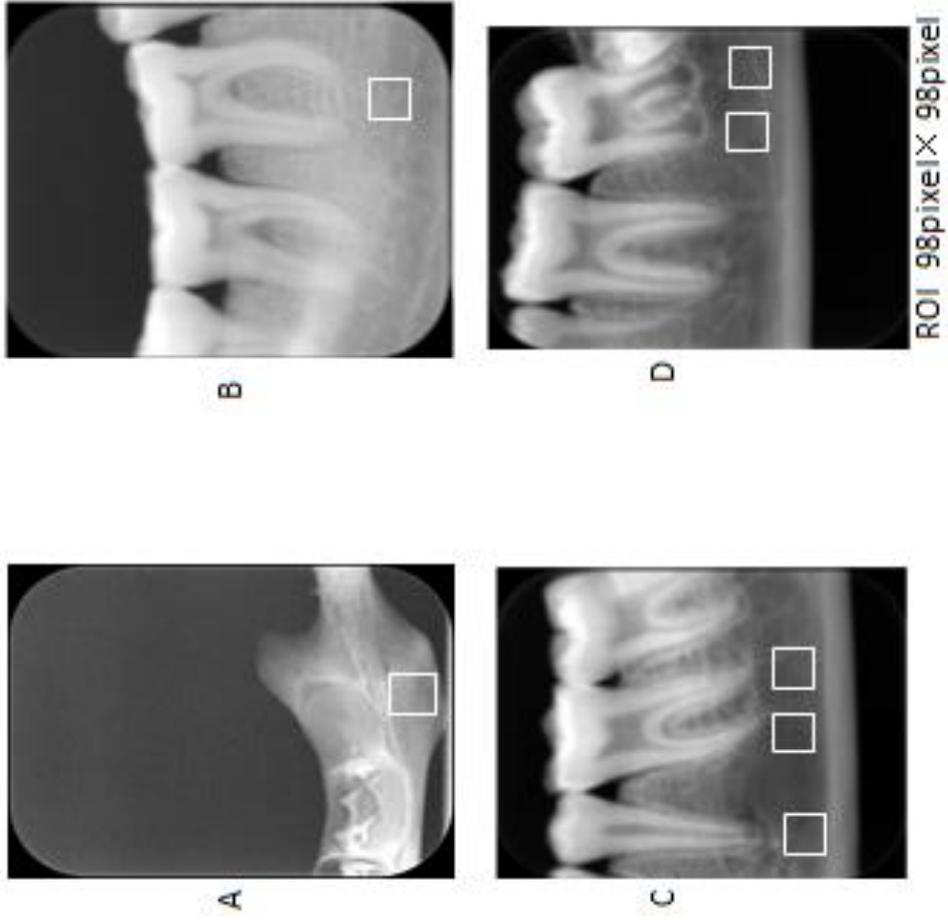


Fig 5
鈴木 優

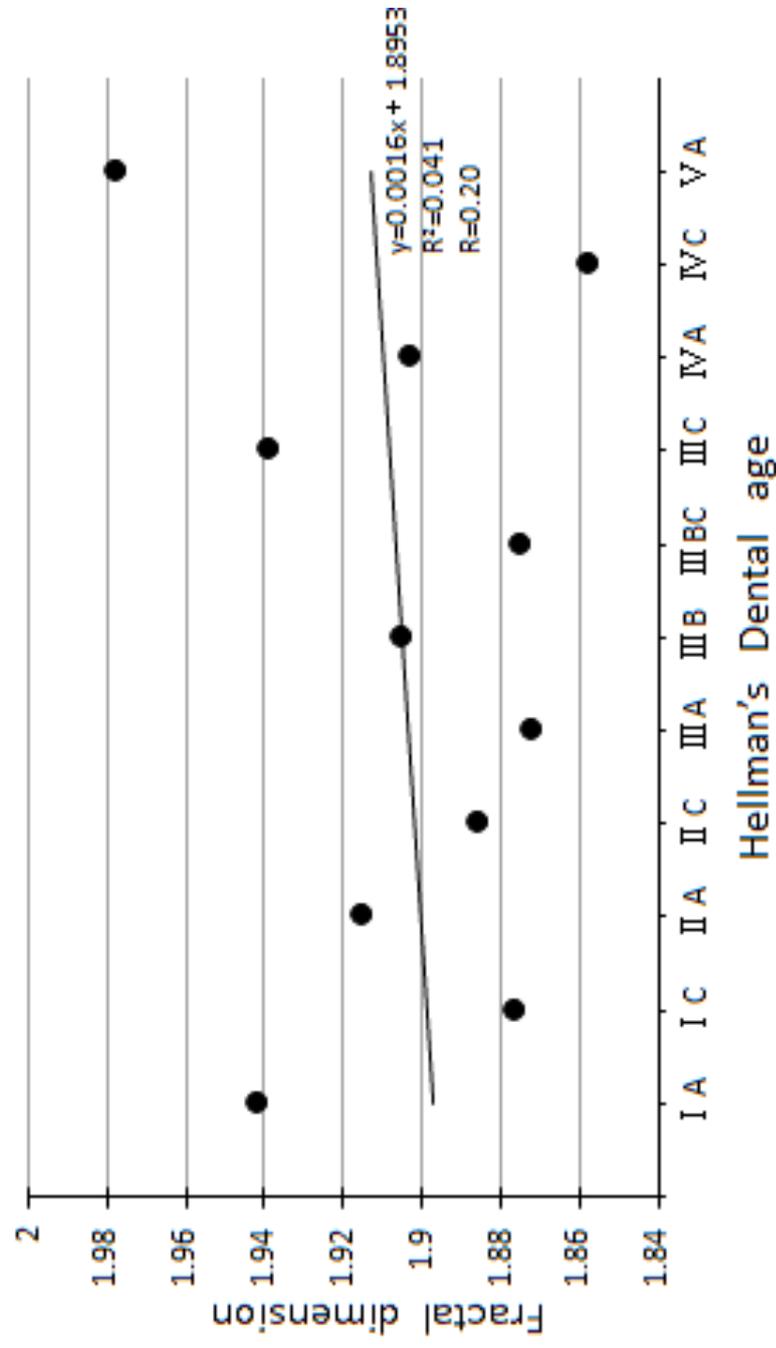


Fig7
鈴木 優

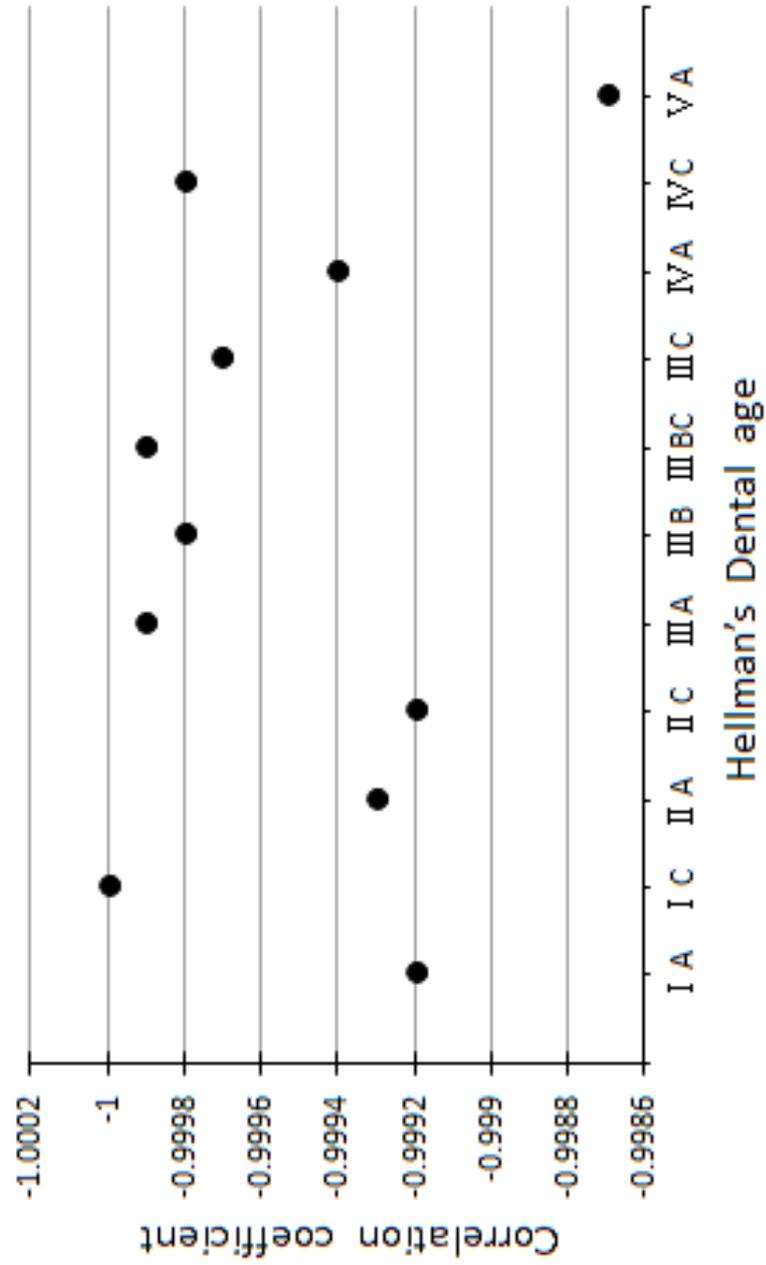


Fig 8
鈴木 優

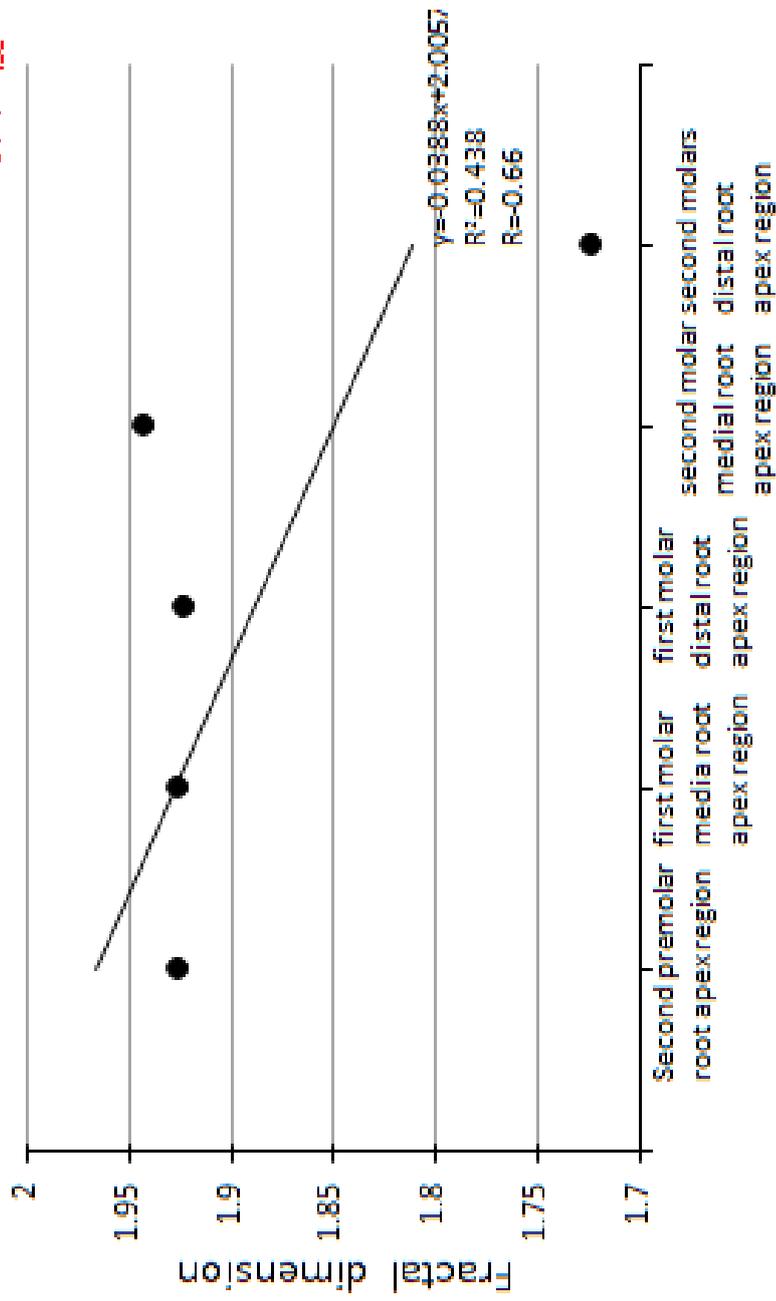


Fig9
鈴木 優

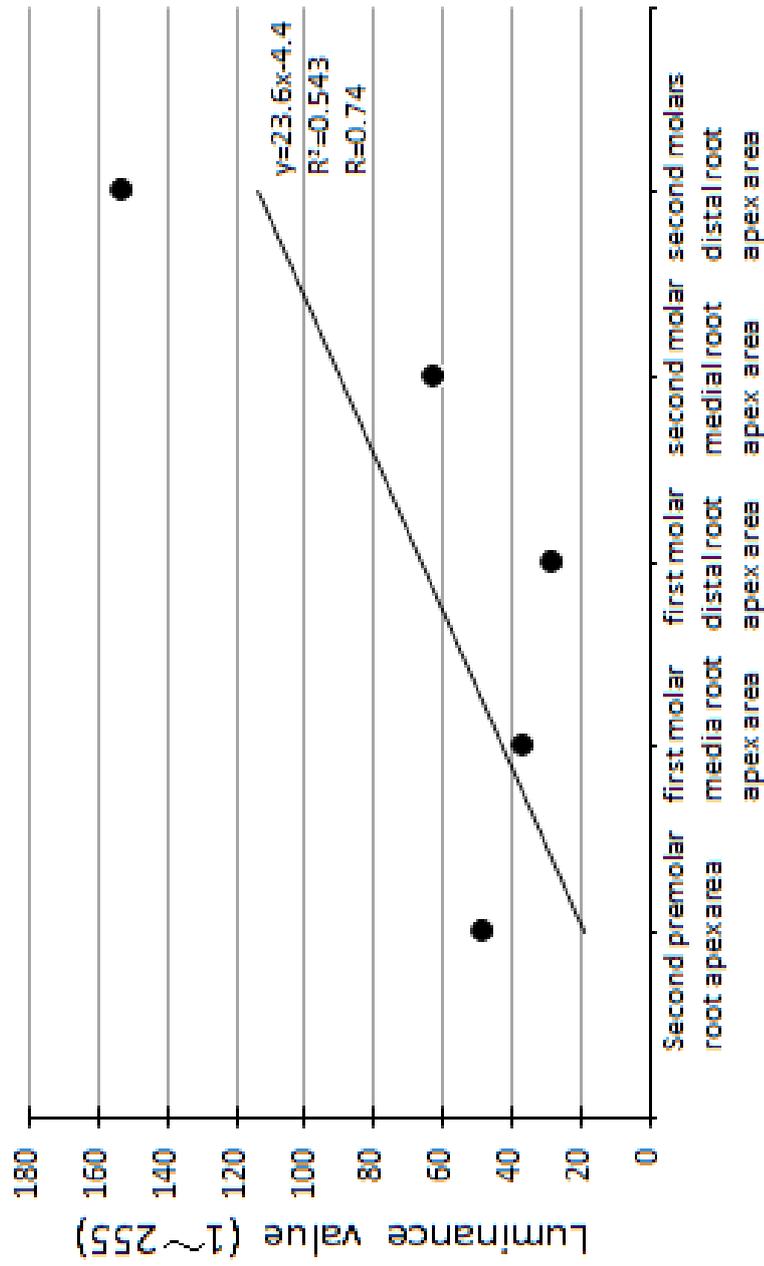


Fig.10
鈴木 優

