骨梁 X 線像の画像工学的研究

三 辺 正 人

神奈川歯科大学保存学教室第2講座

(指導：堀 俊雄教授)

神奈川歯科大学放射線学教室

(指導：東 与光教授)

(昭和62年3月20日受付)

Imaging Technological Study on Radiographic Structure of the Bone Trabeculae

Masato MINABE

Department of Periodontology, Kanagawa Dental College

(Director : Prof. Toshio HORI)

Department of Radiology, Kanagawa Dental College

(Director : Prof. Tomomitsu HIGASHI)

A dry block of human femur was decalcified by acid treatment and subjected to roentgenography by varying the X-ray projection angle. Standard dental radiographs were taken at given intervals to observe changes in the contrast and pattern of fine, rough, and network bone trabeculae. These changes in the bone trabeculae were analyzed by the RMS method (physical evaluation) and the detectability method (physiological evaluation). The abilities of these two methods to recognize the presence or absence of such changes were then compared. The difference in the representation of bone trabeculae between dental films (: Film) and dental xeroradiography (: Xero) was also investigated. With regard to changes in the contrast of bone trabeculae, the physiological evaluation method allowed easy recognition of such changes regardless of the kind of bone trabeculae, with higher detectability in Film than in Xero. Alternatively, it was difficult for the RMS method to recognize changes in fine bone

trabeculae, and variations in such bone trabeculae were different in Film and in Xero. The detectability of changes in the pattern of bone trabeculae was lower than that of changes in the contrast. The detectability of fine bone trabeculae tended to be higher in Xero than in Film. It was difficult for the RMS method to recognize changes in network bone trabeculae, variations in rough bone trabeculae in Film differed from those in Xero.

The neogenesis of the bone trabecula in the process of healing after extraction of a dog's mandibular molar was analyzed in the same manner as the above. The abilities of the two methods to recognize the granularity of the bone trabecula (i.e., changes in the roughness and fineness) were compared. The RMS method accurately revealed such changes in both Film and Xero. In contrast, it was found that the detectability method can recognize such changes more easily in Xero than in Film.

本論文の要旨は、第7回国際歯顎顔面放射線学会(1985年6月24日)、第14回日本歯科インプラント学会総会(1985年10月11日)、第28回秋季日本歯周病学会総会(1985年11月8日)において発表した。

Key words: Evaluation by the RMS method, Evaluation by the detectability method, Bone trabecular changes, Dental xeroradiography

要旨: ヒト大腿骨ブロックを酸処理により脱灰し、また、X線撮影時のX線入射角度を変化させた。そして、経時的に規格X線撮影を行い、細かい骨梁、粗な骨梁および網目状の3種類の骨梁コントラストおよびパターンの変化を起こした。そして、これらの骨梁変化を物理的評価法であるRMS評価法と視覚的評価法である検出能評価法を用いて解析し、骨梁変化の有無の認識能について比較した。また、Dental film (:Film)とDental Xeroradiography (:Xero.)の骨梁描出能の差異についても検討を行った。その結果は、視覚評価では骨梁の種類に関係なく骨梁変化の認識が容易であり、検出能はFilmがXero.に比べて高い傾向を示した。一方、RMS評価では、細かい骨梁の変化の認識が困難であり、FilmとXero.では、その変動に相違が認められた。骨梁のパターン変化においては、検出能は、コントラストの変化に比べて低く、Xero.はFilmに比べて、細かい骨梁において検出能が高い傾向を示した。一方、RMS評価では、網目状の骨梁変化の認識が困難であり、粗な骨梁において、FilmとXero.の変動に相違が認められた。

次に犬の抜歯窩治癒過程における骨梁の新生状態を、同一の評価法で解析した。評価は、骨梁の粒状すなわち粗密度の変化の認識能について比較検討した。その結果、RMS評価法は、骨梁の粗密の変化を、Film, Xero.共に正確に再現した。これに対して、検出能評価法では、Xero.がFilmに比べて骨梁の粗密の変化の認識が容易である事が解った。

索引用語: RMS 評価法, 検出能評価法, 骨梁変化, Dental Xeroradiography

緒 言

歯周疾患の診査、診断および治療後の経過観察を行なう際、X線診査は重要な役割を果たしている。従来、歯周疾患によって生じた骨変化を観察する際には、通常Dental filmを利用して、歯槽骨頂の高さの変化や骨塩量の増減などを、物理的あるいは視覚的な手段を用いて評価してきた。しかしながら、歯周疾患の治療後に、歯牙が咀嚼器官として機能しているか否かをX線学的に判定するには、骨梁の動態を観察し、定量評価することが必要であると考えられる。また、骨梁変化を追うためには、物理的にも視覚的にも、骨梁情報をより客観的に評価することのできる画像の利用が望まれる¹⁾。

そこで、著者は、新しい物理的骨梁診査法を考案し、その基礎的検討を行ってきた²⁻⁴⁾。この診査法による診断学的価値は、骨の再構築過程における骨梁動態を定性的かつ定量的に把握できることである。しかしながら、従来の骨梁の診査は、臨床上、視覚的に行なわれており、この方法が、このような主観的評価と比較してどのような有用性があるかについて明確にする必要がある。そこで、著者の研究では、骨梁を一種の粒状成分と考え、その粗密度を判定するためのRMS評価法と視覚的な評価方法による骨梁変化の認識の差異について検討を行った。この際、生体においては、3次元の広がりを持つ骨梁構造は、2次元的に画像上に描出されることから、骨

梁変化を骨梁の濃度すなわち、コントラストの変化と、骨梁の走行や形態すなわち、パターンの変化として定義した。そして、これらの変化を実験的に再現し、その骨梁変化の有無について比較検討を行なった。また、実際の生体における骨梁変化を再現するために、イヌの下顎後臼歯を抜去後の骨梁新生状態について、その骨梁の粗密度の変化を比較検討した。画像としては、通常用いられているDental film (以下Filmと略す)の他に、骨梁の診断に適しているといわれているDental Xeroradiography (以下Xero.と略す)を用いた。そして、検出系の相違による骨梁変化の認識能の差異についても検討を試みた。

材料および方法

A) 骨梁コントラストおよびパターン変化の評価について

① 実験材料の作成

10% 中性ホルマリン液に十分固定されたヒト大腿骨頭頸部を皮質骨を含めて切り出しX線撮影を行った。そして、X線写真上で骨梁形態や走行形態を視覚的に判断して、細かい骨梁、粗な骨梁、網目状の骨梁を有する3種類の骨ブロックを選び出し、厚さ1.5 mm 縦横20 mmにIsomet (BUEHLER®)を用いてトリミングした。そして、各ブロックごとに、X線写真上で10 mm 四方の関心領域を設定するために、直径1 mmの金属性のポイ

ントを接着剤で貼りつけ、実験試料とした。

② 骨梁コントラストを変化させるための実験方法

3種類の骨ブロックを実験的に脱灰することにより、X線写真上に描出される骨梁コントラストを徐々に変化させた。すなわち、骨ブロックに付着している軟組織、骨髓を除去する目的でクロロホルム2に対してメタノール1の混合液による脱脂と8% NaOH水溶液による腐食操作を1日ずつ交互に1週間繰り返して骨梁のみを残した²⁸⁾。そして、骨ブロックの皮質骨周囲をwaxで被覆し、真空ポンプで骨ブロック中に水を吸引後、X線撮影を行った。そして、Film, Xero. 各々10枚ずつの基準画像を得た。その後1% HNO₃に5分間ずつ骨ブロックを浸漬することにより、骨梁を脱灰し、直ちに水洗後X線撮影を行った。このように一連の操作を繰り返し、10段階に骨ブロックを脱灰し、各段階について、Film, Xero. 各10枚ずつの画像を得た。

③ 骨梁パターンを変化させるための実験方法

実験試料は、骨梁コントラストを変化させるために用いた試料と同一の脱灰前の3種類の骨ブロックを用いた。撮影は、著者らが、ウィーナスpektrum法の規格再現性に関する研究について用いた方法に従った⁴⁾。つまり、平行法撮影を基準として、正放線撮影を満足させながら、角度10°まで1°毎に管球角度を変化させX線撮影を行った。

④ 撮影方法および条件

撮影は、Film および Xero. 用プレートと被写体、それにX線管球が常に同一の幾何学的配置になるように、X線撮影用固定台に設置して行った。Film およびプレートと被写体間距離は2.5 cm、被写体焦点間距離は40 cmに設定した。X線撮影装置は、Siemens Heliodent 70 (管電圧70 kVp、管電流7 mA)を使用し、Image receptorとしてFilmは、Kodak Ekta speed Film®を用い、Xero.はXerox 110 system® (Xerox社製)のセレン板帯電プレートを用いた。X線照射時間は、Film 0.4 sec. Xero. 0.32 sec. とした。なお、予備実験により、視覚的に骨梁を最も鮮明に描出していると思われる画像を得るための条件として、上記のような照射時間の決定を行った。現像処理は、Film については標準現像法を用いた。すなわち、現像はレンドール® 20°C、4分、定着はフジレンフィックス® 20°C、5分とし、電子恒温水槽を用いて行った。その後、30分流水下で水洗し、通風下で自然乾燥した。

図1 マイクロデントミーターによる走査方法
(A: 大腿骨ブロック B: 犬の抜歯窩)

⑤ 骨梁変化の評価方法

a) 物理的評価方法 (RMS 評価法) について

Film, Xero. 両画像について、あらかじめ設定した関心領域をRMS評価法を用いて解析した。すなわち、図1Aに示すように、金属ポイント部aを起始点として、マイクロデントミーター (サクラ PDM-5 BR) を用いて水平方向に10回繰り返して、金属ポイント部bまで、走査を行った。走査条件は、アパチャーサイズ幅70 μm、高さ1,000 μm、サンプリングインターバル0.02 mm、スキンスピード0.1 mm/sec. で行い、Filmは透過光で、Xero.は反射光で走査した。そして、得られた光強度分布情報をデジタルボルトメーター (ケスリー 195 システム DMM) でデジタル化し、その信号をマイクロコンピュータ (ヒューレイトパックカード 9816) でフーリエ変換処理を行い、空間周波数0.1~5 lp/mmのRMS値を求めた。なお、空間周波数域の設定は、著者らが骨変化に関して、視覚的評価とウィーナスpektrumの相関性について検討した結果、骨梁パターンの変化は、スペクトラム上で6 lp/mmまでの範囲において認められること⁶⁾、ならびに、5 lp/mmまでの領域の変化は、管電圧や濃度の影響を受けにくいこと³⁾などに基いた。

b) 視覚的評価方法 (検出能評価法) について

Film, Xero. の各々から得られた画像について、脱灰前の画像およびX線入射角度0°の時の画像を基準画像とした。そして、基準画像を含めて、各脱灰stepおよび角度毎に10枚ずつの画像をFilm, Xero. 別々に、ランダムにマウントした。この際、関心領域の大きさは、物理的評価法の場合と同一とし、それ以外の部位は黒紙でマスクした。したがって、3種類の骨ブロックについて、脱灰およびX線入射角度の変化を起こさせることにより得られた画像は、基準画像を含めてFilm, Xero. 各々330枚ずつであった。そして、基準画像に対して、マウントされた各画像を順次観察者に提示し、比較観察さ

せた。この際、観察距離および照度は一定となるようにし Film は透過光で、Xero. は反射光で観察させた。なお、観察者は、臨床経験 3 年から 9 年の歯周病学教室医局員で、臨床において Film ならびに Xero. の使用経験豊富な者 10 名を選んだ。

観察者には、事前に、骨梁変化の過程を示す画像を提示するとともに、本実験の意味、骨梁変化のある確率について予備知識を与えた。次に、観察者に提示された画像について、基準画像と比較して、骨梁の変化が有るか否かについて以下の 5 段階の判定基準に従って解答させた。すなわち、1：変化が有る、2：変化が有ると思う、3：わからない、4：変化が無いと思う、5：変化が無い、として、1 および 5 は観察者が自信を持って有るまたは無いと、断言できるものであることを説明し、さらにその両者の間で骨梁変化の程度により、3 段階に分けて判断させた。ついで、石垣ら⁷⁾の方法に従い、得られた結果から検出能曲線を作製した。すなわち、提示された画像に対するそれぞれの解答に対して、1：変化が有る……10 点、2：変化が有ると思う……7.5 点、3：わからない……5 点、4：変化が無いと思う……2.5 点、5：変化が無い……0 点の各点数を与えた。そして、観察者から得られた点数を Film, Xero. 各画像について、各脱灰 step、角度毎に合計した。したがって、骨梁変化を示す画像 10 枚に対して、すべてを「有る」と答えれば 100 点となり、すべてを「無い」と答えれば 0 点となる。この値を検出能と定義し、骨梁変化の視覚的評価の一方法とした。

⑥ RMS 評価法と検出能評価法の比較方法

Film と Xero. の各画像について、どの時点で骨梁変化を認識できるのかを、RMS 値と検出能を用いて比較検討した。すなわち、RMS 値においては、脱灰 step 0 または角度 0° の時の RMS 値と、各 step または各角度の時の RMS 値との間で、有意差検定 (T-test) を行い、最初に有意差 ($P < 0.05$) が認められた時の step および角度を求めた。なお、有意差検定は、関心領域について 4 回隔日的に測定を行った値について行った。また、検出能については、塩島の方法⁸⁾によって、検出能が 80% の時の step および角度を求めた。そして、それぞれの値を最小検出可能値と定義し、比較検討した。

B) イヌの抜歯窩治癒過程における骨梁変化の評価

① 撮影方法および条件

実験は、雑種成犬 5 頭を用い、下顎左右後臼歯抜歯後の治癒過程について、抜歯直後・抜歯後 2、4、6、8 週に規格撮影を行った。Film およびプレートと被写体

間距離は 2.5 cm、被写体焦点間距離は 42.5 cm に設定した。なお、X線撮影装置、Film およびプレートは (A) の実験で用いたと同一のものを使用した。X線照射時間は Film 0.6 sec., Xero. 0.4 sec. とし、現像処理は (A) の実験と同一の方法で行った。

② 骨梁変化の評価方法

a) 物理的評価方法 (RMS 評価法) について

Film, Xero. 両画像について、あらかじめ設定した関心領域について RMS 評価法を用いて解析を行った。走査方法は、図 1 B に示すように近心抜歯窩・遠心抜歯窩について、参照点である両隣在歯歯冠部のマーカー a ~ b を結んだ線より 5 mm 根尖寄りの位置から、歯軸方向に 10 mm の距離を 3 回繰り返して走査した。そして、経時的に撮影した抜歯窩 20 部位の画像について、4 回隔日的に RMS 測定を行い、その平均値と標準偏差を求めた。なお、RMS 測定は (A) の実験で行ったものと同一の方法および条件で行った。

b) 視覚的評価方法 (検出能評価法) について

Film, Xero. 各々の画像について、RMS 測定における走査部位と同一の領域 (高さ 10 mm、幅 3 mm) 以外を不透過性の黒紙でマスクした。そして、抜歯直後の画像を基準画像とし、それに対応する抜歯後 2、4、6 および 8 週の Film, Xero. の画像を別々にランダムにマウントした。そして (A) の実験と同一の手順で、同一の観察者 10 名に提示した。基準画像に対する各画像の骨梁変化については、次のような 5 段階の判定基準に従って解答させた。すなわち、1：非常に粗な変化、2：粗な変化、3：密な変化、4：非常に密な変化、5：変化無し、として得られた解答について、1……10 点、2……7.5 点、3……5 点、4……2.5 点、5……0 点の各点数を与えた。そして、各観察者ごとに得られた点数を合計し、その平均値と標準偏差を求めた。

結 果

A) 骨梁コントラストおよびパターン変化の評価について

① 骨梁コントラスト変化における RMS 評価法と検出能評価法の比較

図 2 a, b は、脱灰して骨梁のコントラストを変化させた時の画像を示す。図 2 a は Film、図 2 b は Xero. における、A は細かい骨梁を、B は粗な骨梁を、C は網目状の骨梁の脱灰前 (No. 0)、脱灰 5 段階目 (No. 5)、脱灰 10 段階目 (No. 10) の状態を示している。図 3 A~C

図 2a 骨梁コントラスト変化を示す画像
(D.F.; Film)

図 2b 骨梁コントラスト変化を示す画像
(D.X.; Xero.)

は、これらの画像を RMS 評価法により解析した結果を示す。横軸に脱灰 step, すなわち, 脱灰前 0 step から 10 step までを示し, 縦軸は空間周波数 0.1~5 lp/mm における RMS 値を示す。RMS (;Root Mean Square) とは, スペクトル曲線を, ある周波数域で積分した値の平方根, つまり, 特定周波数に注目した濃度の標準偏差値と定義されている³⁾。

図 3 A は, 細かい骨梁の変化を示す。RMS 値で表現される骨梁情報量の変動は, Film では step 4 まではやや上昇傾向を示し, 以後, 下降傾向を示した。一方, Xero. では step 8 まで上昇傾向を示し, 以後下降傾向を示した。また, 脱灰過程を通して, RMS の変動は, Xero. が有意に大きかった ($P<0.05$)。

図 3 B は, 粗な骨梁の変化を示す。RMS の変動は, 脱灰直後から減少し, その傾向は step 3 までは大きく, 以後小さくなり, step 8 から再び減少傾向を示した。脱灰前に対して Film は step 3 で, Xero. は step 2 で有意差が認められた ($P<0.05$)。また, 各 step における RMS 値は, step 4 と 6 を除いて Xero. の方が大きかった ($P<0.05$)。

図 3 C は網目状の骨梁変化を示す。RMS の変動は, step 3 までは, やや上昇傾向を示した後, 下降傾向を示した。また, Film, Xero. ともに脱灰前に対して step 3 では有意差が認められた ($P<0.05$)。RMS の変動は, Film, Xero. ともに同様な傾向を示し, step 4 を除いては, 有意差は認められなかった。

図 3 骨梁コントラスト変化における RMS 値の変動
(A: 細かい骨梁 B: 粗な骨梁 C: 網目状の骨梁)

図 4 A~C は、脱灰による骨梁変化を恒常法により判定した結果得られた検出能曲線を示す。横軸は脱灰過程を示し、縦軸は 10 名の観測者が各 step 10 枚ずつの画像について与えた点数の平均値を検出能として百分率であらわしている。骨梁の形態および走行の差異にかかわらず、検出能は、step 1 から 2 において急激に上昇した。そして、step 3 以降では、粗な骨梁では 100% 近い検出能を示したが、網目状の骨梁では多少変動が認められ

図 4 骨梁コントラスト変化における検出能の変動
(A: 細かい骨梁 B: 粗な骨梁 C: 網目状の骨梁)

た。検出能評価における film と Xero. の差異は全脱灰過程を通して、Film の方が Xero. より検出能が高い傾向を示した。特に、脱灰初期の step 1 においては、3 種類の骨梁とともに有意差が認められた ($P < 0.05$)。ま

表 1 骨梁コントラスト変化における検出能評価法と RMS 評価法の最小検出可能値

骨梁の分類 \ 評価法	Detectability*		RMS**	
	Film	Xero	Film	Xero
A: 細かい骨梁	1~2	1~2	4	1
B: 粗な骨梁	1~2	1~2	3	2
C: 網目状の骨梁	1~2	2	3	3

最小検出可能値

*Detectability が 80% の時の脱灰 step

**脱灰 step 0 と各 step の RMS において最初に有意差 ($P < 0.05$) が認められた時の脱灰 step

表 2 骨梁パターン変化における検出能評価法と RMS 評価法の最小検出可能値

骨梁の分類 \ 評価法	Detectability*		RMS**	
	Film	Xero	Film	Xero
A: 細かい骨梁	3°~4°	2°~3°	2°	1°
B: 粗な骨梁	2°~3°	2°~3°	3°	3°
C: 網目状の骨梁	2°~3°	2°~3°	1°	1°

最小検出可能値

*Detectability が 80% の時の角度

**角度 0° と各角度の RMS において最初に有意差 ($P < 0.05$) が認められた時の角度

図 5a 骨梁パターン変化を示す画像 (Film)

図 5b 骨梁パターン変化を示す画像 (Xero.)

図 6 骨梁パターン変化における RMS 値の変動
(A: 細かい骨梁 B: 粗な骨梁 C: 網目状の骨梁)

た、実際には、脱灰されていないにもかかわらず骨梁変化が「有る」と答えたいわゆる「偽陽性率」はグラフ上で、step 0 の時の検出値で示される。この値は、細かい骨梁の時が最も高く、Film は 29% であった。

表 1 は、どの程度脱灰が進んだ時に、確実にかつ容易に骨梁変化を認識できたかを示す最小検出可能値について示したものである。検出能 (; Detectability) は、骨

図 7 骨梁パターン変化における検出能の変動
(A: 細かい骨梁 B: 粗な骨梁 C: 網目状の骨梁)

梁の種類に関係なく、その値は一定しているのに対し、RMS では差異が認められた。また、検出能においては、Film と Xero. では差異は認められず、RMS においては、Xero. が Film に比べて早期に変化を認識する傾向

図 8a 犬の抜歯窩治癒過程を示す画像
(0: 抜歯直後, 4: 抜歯後4週, 8: 抜歯後8週)

図 8b 犬の抜歯窩治癒過程を示す画像
(0: 抜歯直後, 4: 抜歯後4週, 8: 抜歯後8週)

を示した。

② 骨梁パターン変化における RMS 評価法と検出能評価法の比較

図 5a, b に、X線の入射角度を変えることにより、骨梁のパターンを変化させた時の画像を示す。図 5a に Film, 図 5b に Xero. の各々 A: 細かい骨梁, B: 粗な骨梁, C: 網目状の骨梁について、X線入射角度 0° (No. 0), 5° (No. 5), および 10° (No. 10) の時の状態を示している。図 6A~C は、これらの画像を RMS 評価法により解析した結果を示す。図 6A は、細かい骨梁の変化を示したもので、RMS の変動は、Film, Xero. とともに角度 3° までは上昇傾向を示し、以後、下降傾向を示した。RMS 値は、Xero. が Film に比べて角度 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 6° の時に有意に大きかった ($P < 0.05$)。図 6B は、粗な骨梁の変化で、Xero. は角度 1° 以降下降傾向を示し、角度 8° 以降では、上昇傾向を示した。そして全ての角度において、Xero. が Film よりも RMS 値は大きかった ($P < 0.05$)。

図 6C は、網目状の骨梁変化を示したもので、RMS は、やや下降傾向を示すが、Film と Xero. 間で大きな差異は認められなかった。また、各角度における RMS 値は、Film の方が角度 5°, 9° で有意に大きかった ($P <$

0.05)。

図 7A~C に、3種類の骨梁パターンの変化についての検出能曲線を示す。骨梁の形態、走査の方向の相違にかかわらず、検出能は、角度 4° から 5° まで上昇傾向を示した。しかし、コントラスト変化に比較して、検出能は低い値を示した。一方、検出能評価における Film と Xero. の差異については、細かい骨梁の角度 1° と 2° の時に Xero. の方が検出能が高い他は差は認められなかった。また、偽陽性率は細かい骨梁の時に、Film 17.7%, Xero. 33.1% で有意差が認められた ($P < 0.05$)。

表 2 は、骨梁パターンを変化させた時の検出能と RMS の最小検出可能値を示す。検出能については、Film における細かい骨梁の値が大きいほかは、一定の値を示した。一方、RMS は、骨梁の種類により差異が認められた。また、検出能に比較して、RMS の方が早期に変化を認識できる傾向を示した。

B) イヌの抜歯窩治癒過程における骨梁変化の評価について

図 8a, b は、それぞれ抜歯窩治癒過程の規格写真で、上が Film, 下が Xero. の抜歯後 0, 4 および 8 週の画像を示す。図 9a, b は、図 8a の画像について評価した結果を示したものである。図 9a は RMS の変動曲線で、

図 9 抜歯窩治癒過程 (図 8a) における RMS 値 (a) と検出能 (b) の変動

縦軸が RMS 値, 横軸が抜歯後の経過期間を表わしている。ここで, RMS 値が上昇すれば, 骨梁が粗になったことを表わしている。RMS の変動は, Film, Xero. ともに抜歯後上昇傾向を示した。

図 9b は, 検出能曲線の変動を示しており, 縦軸が与えた点数の平均値, 横軸が抜歯後の経過時間を表わしている。変動傾向は, RMS と同様に Film, Xero. ともに上昇傾向を示した。すなわち, 抜歯窩内部骨梁は治癒に伴ない骨梁が密な状態から, 粗な状態に変ったことを示している。図 10a, b は, 図 8b の画像を評価した結果を示したものである。図 10a の RMS の変動は, Film, Xero. ともに一度上昇後, 下降傾向を示した。これに対し, 図 10b の検出能曲線においては, Xero. は RMS の変動と類似の変動傾向を示すが, Film は抜歯後 2 週目以降に逆の変動傾向を示した。

表 3 は, 抜歯窩 20 部位について解析した結果, 求められた RMS と検出能の変動傾向をまとめたものである。RMS の変動傾向は, 上昇傾向を示す増加型, いったん上昇後下降傾向を示す増加後減少型, そして変化の認められない不変型に分類された。この中で, 増加型が 20 部位中 14 部位と最も多く, Film と Xero. では全て類似の傾向を示した。検出能曲線の変動傾向は, Xero. では全て RMS の変動と類似の傾向が認められたが, Film

では, 増加型で 5 例, 増加後減少型で 1 例が RMS の変動とは異なる変動傾向を示した。

考 察

1. 骨梁の評価方法について

X線写真により, 歯周疾患における骨変化を観察するには, 歯槽骨頂の高さの変化や骨塩量の増減等の, いわゆる量的な把握が必要である。従来から, 骨の量的な変化の評価は, 視覚的にも比較的容易であり, 観察者間でのばらつきも少ないために疫学指数に利用されている^{9,10,11,12}。また, 物理学的手法を用いて, 骨頂の高さや, 骨塩量の増減を定量評価し, 歯周治療後の治癒過程について臨床所見との相関性を論じた報告も多い^{13~25}。これに対して, 骨梁の変化は, 最近様々な定量化の試みがなされている^{26~31}。そして, 骨梁動態を評価することは, 歯周疾患の診断, 経過観察において重要な意義を有することが示唆されている³²。しかしながら, 歯周治療において, X線学的に骨梁の変化を視覚的あるいは, 物理学的に定量定性評価した報告は非常に少ない^{9,33}。その理由として, 湯浅は²⁸, X線学的骨梁の解剖像が不明確なために正常と病的な像の絶対的比較ができないことを報告している。また, 骨梁はX線写真上でそれ自体の濃度

図 10 抜歯窩治癒過程 (図 8 b) における RMS 値 (a) と検出能 (b) の変動

が変化するとともに、その走行、形態がある面積をもって複雑に変化するため、視覚的にその相対的变化の特徴を捉えることが困難であり、また、適切な物理的評価手段の確立にも障壁となってきたと考えられる。骨梁は視覚的にその大きさ、数、走行状態により分類されている。医科領域では、Osteoporosis の診断に上記のパラメーターを用いた分類が使用され、病理組織変化との高い相関性が認められている³⁴⁾。一方、歯科領域では、上條が、解剖学的に、骨梁の数、配列の規則性といった観点から骨梁を分類している³⁵⁾。しかしながら、歯周疾患の診断においては、症状の進行や治癒と、X線学的に観察され

骨梁の形状や走行との相関性を明確にすることは困難と考えられる。そして、現在まで Worth³⁶⁾ が、歯周疾患の初期病変の診断のX線学的判定項目として、歯槽頂部骨梁の粗造化の有無を挙げているにすぎない。一方、骨梁の物理的評価法については、骨形態計測法を用いて、軟X線像やマイクロラジオグラム像における骨梁の面積や周径などの骨梁の密度計測法や、高速フーリエ変換 (F.F.T.) 解析法による骨梁の配向を解析する試みがなされている³⁰⁾。なかでも、X線写真よりマイクロデンシトメーターやビデオカメラで骨梁画像を入力し、F.F.T. 解析により、スペクトラムおよび周波数解析を行う方法は、主に、医科領域において臨床に応用されるようにな

表 3 抜歯窩治癒過程 (20 部位) における RMS 値と検出能の変動傾向

評価法 パターン分類	Detectability		RMS	
	Film	Xero	Film	Xero
増加型	9	14	14	14
増加後減少型	3	4	4	4
不変型	2	2	2	2

ってきた³¹⁾。渡辺らは、骨破壊のX線診断は、皮質骨部では、比較的容易であるが、海綿骨部における破壊の早期診断は困難であることを指摘し、周波数分析器を用いて、X線写真の粒状の周波数成分から、像としての周波数成分を分離することを試みている²⁷⁾。佐藤らは³¹⁾、2次元 F.F.T. による骨梁解析を試みており、得られたスペクトラムの和とパターンで、X線写真の客観的評価を行うとともに、従来の視覚的評価による骨梁分類との比

較検討を行っている。また、最近ではマイクロデンシトメトリー法を利用した中手骨骨塩密度分布測定法に加えて、海綿骨骨梁密度定量化の試みも行なわれている³⁷⁾。しかしながら、歯周治療においては、X線学的骨梁解析の試みは少なく、マイクロデンシトメーターを使用し、骨梁幅や骨梁の数の測定を行った湯浅²⁸⁾の報告や、外傷性咬合のX線学的評価法に、マイクロデンシトメーターや間接拡大などの手法を用い、骨梁の粗造化、緻密化の程度を観察している浦井³³⁾などの報告があるにすぎず、骨梁の変化を定量定性的に評価した報告はない。そこで、著者らは、第1に、臨床に簡便に応用できる物理的骨梁定量評価法を確立する。第2に、物理的に評価された値が、視覚的に認識される骨梁の変化とどのような関係にあるのかを知ることを目的として本研究を行った。そして、最終的には、歯周疾患の進行および治療に伴う骨梁変化を、物理的および視覚的な総合的画像評価の立場から捉えれば、骨梁診断の明確な基準を設定することができるものと考えている。

骨梁の物理学的定量評価法については、本来、画質の粒状性評価に利用されているウィナースペクトラム法³⁸⁾を応用し、骨梁の大きさ、数を定量定性的に捉えるための基礎的検討を行ってきた^{2~4)}。本研究は、それらの報告をもとに、X線写真上の骨梁変化を、RMS評価法と検出能評価法で解析し、その関連性について検討を行った。また、骨梁診断に有効であると報告されているXero.³⁹⁾についても、X線フィルムとの骨梁情報量の差異について比較検討を行った。なお、本実験では、骨梁変化の中で、その密度変化すなわち、骨梁が粗造であるか、あるいは、緻密であるかの量的変化について把握するためにRMS評価法を用いた。

骨梁の物理的評価と視覚的評価の関連性を比較する場合、①骨梁の経時的変化を捉えるための視覚的な骨梁の形状、数、走行に関する分類が確立していない。②視覚的評価は、本来、鮮鋭度、コントラスト、粒状性により構成される全体的画質を観察するものであり、粒状性のみに絞った定量評価が困難である。③視覚的には、2次元画像として認識される骨梁変化を、物理的評価では、一次元走査により得られた骨梁画像の変化として表現している。以上の理由から、*in vitro* における比較は、骨梁の変化を定量的に比較するのではなく、変化の有無がどの時点で生ずるのかという点に関して行った。そして、視覚的評価には、骨梁の変化とその視覚的主観量の関係を数的に評価するため、検出能評価法を用いた。一方、*in vivo* の実験では、骨梁の新生状態を比較的短期間に

明瞭に観察のできる抜歯窩の治癒過程について *in vitro* と同一の方法で評価、比較を行った。この際、*in vitro* では、骨梁の変化の認識点、すなわち、質的变化について評価したのに対し、*in vivo* では、経時的な骨梁の変化が明らかであることや、抜歯直後は、関心領域が均一な透過性を示しており、視覚的に骨梁新生過程における骨梁形態を認識しやすいことから、視覚的評価もRMS評価と同一の粒状性に関する判定基準に基づき、定量的に評価した⁴⁰⁾。この判定基準は、RMS粒状性と、視覚評価を関連づけた米田らの方法⁴¹⁾を参考にした。これらのことにより、RMS評価と視覚評価の相対的な比較を直接的に行なうことが可能となった。

2. 実験結果について

実験的脱灰による骨梁変化を解析した結果、RMSの変動は、骨梁の種類により大きく異った。理論的には、脱灰により小さな骨梁は消失し、大きな骨梁も骨塩を溶出させながら、その辺縁形態が粗造になることが予想される。すなわち、RMSの変動は、脱灰の進行とともに、減少傾向を示すものと考えられる。粗な骨梁の場合、骨梁の走行が、走査方向と垂直に走り、骨梁変化を最も大きく捉え得ると考えられ、実際に、本実験においても脱灰直後よりRMSの変動は減少傾向を示した。それに対して、細かい骨梁の場合は、RMSの変動は小さい傾向を示した。これは、細かな骨梁が3次元的に重なり、全体として、緻密骨様の変化すなわち、Broad area contrastとして、表現されたために、骨梁変化として認識されにくいものと考えられた。網目状の骨梁は、粗な骨梁と細かい骨梁の中間の変化を示した。すなわち、脱灰途中までの変動傾向は小さく、脱灰途中から減少傾向を示した。これは、脱灰初期においては、骨梁の辺縁形態の変化が主で、後期において、骨梁全体の濃度が変化する傾向を示したために辺縁形態変化は、走査方向に水平な骨梁の存在により、認識されにくかったものと考えられる。また、FilmとXero.のRMSの変動は、粗な骨梁、網目状の骨梁では、ほぼ同様な変化を示したが、細かい骨梁においては、Xero.は、脱灰進行に伴ない、かえって、RMS値が増加する傾向を示した。これは、脱灰が骨ブロックの表層から開始されるために深層の骨梁成分がEdge効果により強調され骨梁の変化を認識しにくくしたこと、および脱灰により骨梁が一部消失し、画像全体が不均一になったために粒状性が悪くなったことなどが原因と考えられる。また、画像が有する骨梁情報量は、Xero.がFilmよりも多いことが解かった。

検出能曲線の変化は、骨梁の種類による大きな差異は

なく、いずれの場合も脱灰開始から上昇し、以後ほぼ100%に近い値を示した。これは評価基準が変化の有無という明確な基準であることが主原因と考えられるが、加えて、物理的評価とは異り、人間の視覚は、骨梁の種類が変化しても、それなりに比較する基準をかねて評価する能力を有するものと考えられた。

Film と Xero. における検出能については、Film が Xero. よりも高い傾向を示した。この理由としては、骨梁辺縁部の脱灰によるボケ像は、Xero. においては、その Edge 効果により強調され、コントラストの差として認識しにくいと考えられる。このことは、逆に Film では、診断のための適正濃度域を越えた骨梁でも、Xero. においては視覚的にその認識が容易であるとも考えられる。撮影時の X 線入射角度を変化させた場合の骨梁パターンの変化については、RMS の変動は、細かい骨梁と粗な骨梁では大きく、網目状の骨梁では小さい傾向を示した。理論的には、3 次元的に一樣に骨梁が分布している方が 2 次元的配列を示す骨梁分布よりも角度の変化による影響は受けにくいと考えられる。本研究では、骨梁の 3 次元的構成は確認しなかったが、画像から判断して、細かい骨梁と粗な骨梁は、X 線入射角度方向に対して直角方向の骨梁成分が多いのに対して、網目状の骨梁は、直角方向と水平方向の 2 方向の骨梁成分から成り立っており、骨梁の変化が生じにくかったと考えられる。また、Film と Xero. の RMS の変動は、ほぼ同様の傾向を示した。しかし、粗な骨梁においては、角度 4° までにおいて、その変動傾向に相違が認められた理由については不明である。検出能曲線の変化は、骨梁コントラスト変化の場合に比べて、その検出能は低く、骨梁の種類により影響を受ける傾向が認められた。すなわち、粗な骨梁、網目状の骨梁、細かい骨梁の順に検出能は低下した。これについては、3 次元的骨梁の重なりによる変化は、コントラストや鮮鋭度などの直接的な影響が少なく、視覚的に粒状の変化のみを識別する場合には、細かい変化ほど認識しにくいこと、また、網目状の骨梁における 2 方向成分の骨梁走向のうちの、1 方向のみの変化を明確に認識し得たことなどが理由として考えられる。Film と Xero. の検出能の相違については、細かい骨梁では、Xero. が Film に比べて検出能が高く、粗な骨梁、網目状の骨梁では、差異は認められなかった。しかし、細かい骨梁においては、検出能曲線の偽陽性率が Xero. は Film に比べて有意に高いことなどから、細かい骨梁では Xero. の方が雑音を信号として誤認する危険性の高いことが示唆された。

次に、骨梁変化を検出能と RMS の最小検出可能値で評価した結果について検討を行った。脱灰による骨梁コントラスト変化については、① 検出能は、RMS に比べて最小検出可能値が小さい傾向を示し、特に網目状の骨梁においては、その差が明らかであった。② 細かい骨梁においては、RMS 評価による骨梁変化の認識は、困難性を伴う、などの点が明らかになった。① については、視覚評価が、脱灰により生ずる粒状、コントラスト、鮮鋭度の変化を総合的に評価しているためと考えられる。また、脱灰による骨梁変化が関心領域全体に均一に生じた場合は、視覚的に認識されやすいことも原因の一つと考えられる。さらに、RMS 評価においては、走査方法が一次走査であることが、2 次元方向に配列する網目状の骨梁の解析には不利であると考えられる。② については、Film では、細かな骨梁が 3 次元的に重なり、画像上には、緻密骨様の変化として認識されること、また、Xero. では、深層の骨梁成分が強調されたことや、脱灰により、緻密骨様成分が骨梁成分として認識されやすくなったことなどが理由として考えられる。いずれにせよ、RMS 評価だけでは、骨梁変化の認識に限界があることは明らかであり、周波数成分の解析や 2 次元方向の走査が必要であることが示唆された。

X 線入射角度の変化による骨梁変化としては、① 細かい骨梁においては、RMS が検出能に比べて早期に骨梁変化を認識する傾向にあった。② 網目状の骨梁においては、RMS 評価による骨梁認識能は低いにもかかわらず、最小検出可能値では、検出能に比べて早期に骨梁変化を認識した、などの点が明らかとなった。① については、骨梁の脱灰の場合とは異なり、コントラストや鮮鋭度の影響は小さいものと考えられた。また、一方向の骨梁走行変化であることから、視覚的には、全体的な骨梁の変化を捉えることが困難であると考えられる。② については、RMS 評価の最小検出可能値の定義に問題があると考えられる。これに関して高木⁴²⁾は、基準画像と X 線入射角度を変化させた時の画像間の骨梁パターンの相異を定量的に評価するために、相互相関係数を求めて比較している。しかしながら、肉眼による骨梁パターンの認識と物理量の相関性の不一致の理由については不明としており、今後検討を要する問題と考えられる。

イス抜歯窩治癒過程における骨梁変化については、RMS 評価により、増加型、増加後減少型、不変型の 3 型に分類された。そして、増加型が 20 部位中 14 部位と最も多かった。この変化は、抜歯窩の治癒に伴ない、骨梁が微細な構造から、太くて粗な骨梁構造に変化した、

つまり、抜歯窩内に骨梁が新生されたことを示している。そして RMS 評価による骨梁の粗密度の判定は、視覚的な粗密度の判定と類似の傾向を示すことが解った。このことから、実際の骨梁解析における RMS 評価法の有用性が示唆されたものと考えられる。また RMS 評価法においては、Film, Xero. とともに一致した変動傾向を示したが、検出能評価法においては、Film が増加型で 5 例、増加後減少型で 1 例が Xero. と異った変動傾向を示した。これに関して、骨梁診断に優れた画像は、物理学的にも視覚的にも、そこに含まれる骨梁情報をより客観的に定量評価し得る画像であると考えられている。すなわち、今回の結果では Xero. が Film に比べて、物理的評価と生理的評価の一致率が高いことから、評価診断には、Xero. が有用であることが示唆された。

総括および結論

著者は、ヒトの大腿骨ブロックを経時的に脱灰して X 線撮影を行った。そして、得られた Film と Xero. の画像を物理的評価法 (RMS 評価法) と視覚的評価法 (検出能評価法) で評価を行った。また、脱灰する前のヒトの大腿骨ブロックを用い、入射角度を変化させて X 線撮影を行った。そして Film と Xero. の面像を上記と同じ 2 つの法で評価した。一方、イヌ下顎後臼歯を抜去して、抜歯窩の骨梁の新生状態を、Film と Xero. の面像を用いて評価を行った。

その結果、以下の成績を得た。

A) 骨梁のコントラスト変化について

①; RMS 評価法により、ヒトの脱灰した大腿骨ブロックの骨梁のコントラスト変化を解析した。その結果、RMS 値は、粗な骨梁では脱灰直後より、また、網目状の骨梁では脱灰途中より減少傾向を示した。しかし、細かい骨梁では、RMS 値の著明な変動は認められなかった。一方、視覚的評価法による検出能は、骨梁の種類にかかわらず、脱灰初期より骨梁変化の有無をよく認識した。

②; 骨梁コントラスト変化における最小検出可能値に関しては、検出能評価法が RMS 評価法に比べて早期に骨梁の変化を認識する傾向を示した。また、RMS 評価法による細かい骨梁コントラスト変化の認識は困難であった。

③; Film と Xero. の骨梁コントラスト変化における RMS の変動は、粗な骨梁および網目状の骨梁では、ほぼ同様な傾向を示したが、細かい骨梁においては相違が

認められた。これに対し、視覚的評価法による検出能は、Film が Xero. に比べて高い傾向を示した。

B) 骨梁のパターン変化について

①; RMS 評価法により、骨梁パターンの変化を解析した。その結果、RMS 値は細かい骨梁と粗な骨梁では、大きな変動を示した。しかし、網目状の骨梁では著しい変動は認められなかった。一方、視覚的評価法による検出能は、さきの脱灰したヒト大腿骨の骨梁のコントラスト変化に比べて低く、粗な骨梁、網目状の骨梁、細かい骨梁の順に検出能は低下した。

②; 骨梁のパターン変化における最小検出可能値に関しては、細かい骨梁では、RMS 評価法が検出能評価法に比べて早期に骨梁変化を認識する傾向を示した。

③; Film と Xero. の骨梁のパターン変化に対する RMS の変動は、ほぼ同様の傾向を示した。しかし、粗な骨梁では、角度 4° までにその変動傾向に差異が認められた。これに対し、視覚的評価法による検出能は、粗な骨梁、網目状の骨梁では差異は認められなかったが、細かい骨梁においては、Xero. が Film に比べて高い傾向を示した。

C) 抜歯窩の骨梁の新生状態について

①; RMS 評価法により、イヌ抜歯窩の治癒過程における骨梁の新生状態を解析した。その結果、RMS が上昇傾向を示す増加型、一方上昇した後、下降傾向を示す増加後減少型、そして変化の認められない不変型に分類された。この中で増加型が 20 部位中 14 部位と最も多かった。

②; RMS 評価法によるイヌ抜歯窩の治癒過程における骨梁の粗密度の判定は、視覚的な判定と同様な傾向を示した。また、RMS 評価法では、Film と Xero. の判定は一致した傾向を示したが、検出能評価法においては、Film が増加型で 5 例、増加後減少型で 1 例が Xero. と異なった変動を示した。

以上の成績より、RMS 評価法は、骨梁の動態を客観的に定量化する事が可能であり、歯周疾患の診査、診断において、特に、骨の再構築過程を把握するための有効な手段となり得ることが示唆された。また、評価基準を明確にすれば、骨梁の変化を視覚的にも正確に定量評価できることが解かった。さらに、骨梁の診断には、物理的にも視覚的にも骨梁を客観的に評価することのできる Dental Xeroradiography の利用が有効であることが解かった。

謝 辞

稿を終えるにあたり、御教示と御校閲を頂きました、当教室 堀 俊雄教授ならびに放射線学教室 東 与光教授に謹んで感謝の意を表します。さらに、貴重なる御教授ならびに御助言を頂きました、本学保存学教室 長田 保教授ならびに口腔外科学教室 志村介三教授に深く感謝致します。また、終始御指導と御助言を頂きました、放射線学教室 鹿島 勇助教授、閑野政則技師長に心から御礼を申し上げるとともに、本研究の実施にあたりお世話になりました、放射線学教室ならびに保存学教室第二講座の皆様にも深く謝意を表します。

文 献

- 1) 山下一也：X線撮影系の画質特性と総合評価。映像情報，9：39-44，1977.
- 2) 三辺正人，田村利之，菅谷 彰，福田忠彰，鹿島勇一，堀 俊雄：歯周疾患における画像工学的定量定性評価に関する研究。第1報 骨移植材への応用について。日歯周誌，25：71-77，1984.
- 3) 三辺正人，児玉利朗，菅谷 彰，田村利之，古郷辰二，友松栄子，大石俊一，鹿島勇一，菊池一好，堀俊 雄：歯周疾患における画像工学的定量定性評価に関する研究。第2報，Wiener spectrum の管電圧および濃度依存性について。日歯周誌，27：394-399，1985.
- 4) 三辺正人，田村利之，児玉利朗，菅谷 彰，古郷辰二，友松栄子，斉藤康裕，鹿島勇一，堀 俊雄：歯周疾患における画像工学的定量定性評価に関する研究。第3報 Microdensitometer の走査 Aperture size X線入射角度の Wiener spectrum のおよぼす影響について。日歯周誌，27：837-845，1985.
- 5) 亀田典章：海綿骨梁の定量形態学的研究。一剖検材料による生理的，病的骨喪失の比較検討一。日整会誌，58：693-702，1984.
- 6) 三辺正人，福田忠彰，早瀬一雄，鹿島勇一，堀 俊雄：歯周疾患における画像工学的定量定性評価に関する研究。第4報 骨変化に関する視覚評価と Wiener spectrum の相関性について。神歯学，18：123，1983.
- 7) 石垣 伸，牛田正行，西行 章，塩島 勝，菊池厚：根尖部X線透過像における骨欠損の大きさと検出能との関係。歯放，24：381-388，1984.
- 8) 塩島 勝：X線透過像における写真コントラストと検出能の関係。愛院大歯誌，16：87-102，1978.
- 9) Bjorn, H., Halling, A. and Thyberg, H. : Radiographic assessment of marginal bone loss. Odontol Revy., 20 : 165-179, 1969.
- 10) Suomi, J.D., West, T.D., Chang, J.J. and McClendon, B.J. : The effect of controlled oral hygiene procedures on the progression of periodontal disease in adults. Radiographic findings. J. Periodontol., 42 : 562-564, 1971.
- 11) Russel, A.L. : The periodontal index. J. Periodontol., 37 : 585, 1967.
- 12) Dunning, J.M. : Gingival-bone conut. A method for epidemiological study of periodontal disease. J. Dent. Res., 39 : 506, 1960.
- 13) Stoner, J.E. : An investigation into the accuracy of measurements made on radiographs of the alveolar crests of dried mandibles. J. Periodontol., 43 : 699-701, 1972.
- 14) Rosling, B., Hollender, L., Nyman, S. and Olsson, G. : A radiographic method for assessing changes in alveolar bone height following periodontal therapy. J. Clin. Periodontol., 2 : 211-217, 1975.
- 15) 石原彰恭，松尾良平，大杉光修，芳賀健輔，石川烈，木下四郎：歯周外科処置後の経過の臨床的研究一特に規格レントゲン写真による歯槽骨の変化を中心として一。日歯周誌，21：85-92，1979.
- 16) Albandar, J.M., Rise, J., Gjermo, P. and Johansen, J.R. : Radiographic quantification of alveolar bone level changes. A 2-year longitudinal study in man. J Clin. Periodontol., 13 : 195-200, 1986.
- 17) Ortman, L.F., Mchenry, K. and Hausman, E. : Relationship between alveolar bone measured by 125 I absorptiometry with analysis of standardized radiographs. 2. Bjoren Technique. J. Periodontol., 53 : 311-314, 1982.
- 18) 折笠広樹：歯周処置後の経過観察に関する研究。（とくに臨床所見と歯槽骨の変化を中心に）。日歯周誌，22：216-229，1980.
- 19) 川崎 仁：口内法における個体X線規格撮影とその歯周疾患治療への応用。一とくに高度の歯槽骨破壊をもつものの治療後の歯槽骨の変化について一。口病誌，34：164-180，1957.

- 20) Owing, J.R. and Jrand Fritz, M.E. : A technique employing metallic implants for the evaluation of periodontol surgery. *J. Periodontol.*, 40 : 661, 1969.
- 21) Plotnic, I.J., Beresin, V.E. and Simkins, A.B. : A techique for standardized serial dental radiographs. *J. Periodontol.*, 42 : 297, 1971.
- 22) 松江一郎, 清水欽也, 加藤安宏, 増田良男 : 齒槽骨外科手術の自動解析のアプローチ. *日歯周誌*, 15 : 48-54, 1973.
- 23) Ainamo, J. and Tammisalo, E.H. : Comparison of radiographic and clinical signs of early periodontal disease. *Scand. J. Dent. Res.*, 81 : 548-552, 1973.
- 24) Mann, J., Pettigrew, J., Beideman, R., Green, P. and Ship, I. : Investigation of the relationship between clinically detected loss of attachment and radiographic changes in early periodontal disease. *J. Clin. Periodontol.*, 12 : 247-253, 1985.
- 25) 鈴木裕平 : X線透過度よりみた歯石除去後の歯槽骨変化. *日歯周誌*, 25 : 667-687, 1983.
- 26) 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線写真の面像解析. *城歯大紀要*, 9 : 231-236, 1980.
- 27) 渡辺長盛, 鈴木正吾 : 骨破壊のX線学的研究. 第1報 骨梁X線像の基礎的研究. *日医放会誌*, 34 : 525-534, 1974.
- 28) 湯浅太郎 : 歯槽骨骨梁の放射線学的研究. 一歯周疾患診断への基礎的研究一. *歯学*, 60 : 149-161, 1972.
- 29) 宮永 豊, 福林 徹, 立石哲也, 白崎芳夫 : 骨梁構造の定量解析, 高橋栄明編, 骨形態計測, 第1版, 医歯薬出版, 東京, 1981, 59-67.
- 30) 井上 望, 木神田喜三郎, 山下文治, 平井恒夫, 片山伝生 : フーリエ解析による骨梁配向の定量化, 山本吉蔵編, 骨形態計測 (Vol. 5) 第1版, 西村書店, 東京, 1985, 112-120.
- 31) 佐藤強志, 岩下洋一郎, 大重三千代, 野井倉武憲 : 面像解析によるX線像の評価(第3報) — 2次元 FFT による ROD の Alfarol 投与後の比較 —. *歯放*, 24 : 145, 1984.
- 32) 須賀昭一 : 歯槽骨を考える. 歯槽骨その構造, 機能と反応. *歯界展望*, 61 : 840-852, 1983.
- 33) 浦井照彦 : 実験的外傷性咬合による歯周組織の変化に関するX線学的研究. *日歯周誌*, 15 : 31-66, 1973.
- 34) 井上哲朗 : 骨粗鬆症のX線診断, 協和企画通信, 東京, 1983, 9-16.
- 35) 上篠恒彦 : 口腔解剖学1 骨学, 第2版, アナトーム社, 東京, 1980, 224.
- 36) Worth, H.M. : Principles and practice of oral radiologic interpretation, Year Book Medical Publishers Inc, Chicago, III. 1963.
- 37) 小口茂樹, 白須敏夫, 田川 宏, 山下源太郎 : 踵骨X線写真による骨梁密度の解析. 第4回日本骨代謝学会抄録集 : 101, 1986.
- 38) Kurt Rossman : Spatial foudtuations of X-ray quanta and the recording of radiographic mottle. *Radiology*, 90 : 863, 1963.
- 39) 鹿島勇一, Gratt, B.M. and White, S.C. : 新しい上質面像形成 system. *歯界展望*, 61 : 215-222, 1983 .
- 40) 三辺正人, 児玉利朗, 友松栄子, 田村利之, 小池基之, 松原正明, 安田裕昭, 菊池一好, 斉藤康祐, 鹿島勇一, 堀 俊雄 : 顎骨骨梁の定量評価について. 一Dental Film と Dental Xeroradiography の比較検討一. *インプラント誌*, 7 : 5-13, 1986.
- 41) 米田和夫, 人見佳夫, 川瀬滋人, 伊藤春海, 鳥塚爾 : FCR (Fuji Computed Radiography) system の画質評価. *映像情報*, 17 : 927-932, 1985.
- 42) 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*, 24 : 48-62, 1984.