

周波数フィルタを用いたX線画像の空間周波数解析法

北山 彰¹, 板谷 道信¹, 荒尾 信一¹
 天野 貴司¹, 林 明子¹, 山下 一也¹
 友光 達志², 曾根 照喜³, 福永 仁夫³

Space Frequency Analysis of a X-ray Image Using Frequency Filter

Akira KITAYAMA¹, Michinobu ITAYA¹, Shinichi ARAO¹,
 Takashi AMANO¹, Akiko HAYASHI¹, Kazuya YAMASHITA¹,
 Tatsushi TOMOMITSU², Teruki SONE³ and Masao FUKUNAGA³

キーワード: デジタル画像処理, 空間周波数解析, 空間周波数フィルタ, MNSE, 骨梁構造解析

概 要

空間周波数フィルタを用いたX線画像の空間周波数解析法を新しく考案し, その正確度と有効性について, 従来の1次モーメントを用いる方法と比較検討した。

その結果, 新しく考案した手法は, X線画像が有する空間周波数成分を1次モーメントを用いる解析法よりも正確に数値化することが可能であった。また, この手法によって算出された踵骨骨梁像の空間周波数成分値は 0.86 ± 0.10 cycle/mm ($n=16$)で, 骨量測定装置で取得された踵骨骨密度値との間に有意な正の相関性 ($r=0.678$, $P=0.0029$)を認め, この手法による骨梁構造の空間周波数解析の可能性が示された。

以上より, 周波数フィルタを用いたX線画像の空間周波数解析法は, X線画像の特徴量を抽出する方法として有用であると考えられた。

1. 緒 言

近年, デジタル画像技術の発展に伴い, 医療用X線画像の分野においてもコンピュータを用いた様々な画像処理が適用され, 目的に応じた画像強調や特徴量の抽出が盛んに行われている^{1~4)}。

X線画像の定量解析法に使用される画像処理技術には様々な手法があるが, その中の一手法としてX線フィルムに描出された像構造の細かさを写真濃度の繰り返しとして空間周波数領域で判定するパワースペクトルを用いた空間周波数解析法がある⁵⁾。

2次元X線画像をフーリエ変換することによって求められるパワースペクトルは, そのまま視覚的にX線画像の周波数成分の判定に用いられ, 空間周波数

フィルタの適用に使用される。そして, 元のX線画像の空間周波数成分を代表する値としては, 従来からパワースペクトルの1次モーメントがしばしば使用されている^{6,7)}。しかし, 1次モーメントはスペクトルの重心を表す数値であり, X線画像の粒状による高周波数成分や被写体厚の変化から生じるゆっくりとした写真濃度変化による低周波数成分など, X線画像に描出された像構造以外の要因によっても数値が大きく影響されるため, 1次モーメントをX線画像の空間周波数成分値と考えるには問題がある。

そこで我々は, X線画像に low pass および high pass 空間周波数フィルタ処理をフィルタ処理の閾値(カットオフ周波数)を変化させながら適用し, 原画像と処理後画像を比較することによってX線画像が有する空間周波数成分を解析する新しい手法(以下, 「閾値フィルタ法」と略す)を考案した。そして, この手法の正確度と有効性について従来の1次モーメントを算出する方法と比較検討したので報告する。

(平成12年9月7日受理)

¹川崎医療短期大学 放射線技術科, ²川崎医科大学附属病院 中央放射線部, ³川崎医科大学 核医学教室

¹Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

²Department of Radiology, Kawasaki Medical School Hospital

³Department of Nuclear Medicine, Kawasaki Medical School

2. 対象および方法

新しく考案した閾値フィルタ法の正確度の検討では、対象に解像力測定用X線テストチャートを使用し、テストチャートの空間周波数値と撮影されたX線画像から閾値フィルタ法によって求められた空間周波数成分値が一致するか否かを検討した。

他方、有効性の検討については、踵骨骨梁像の定量解析にこの手法を適用した。対象には骨粗鬆症と診断された6例を含む女性14例と男性2例の計16例（年齢24～61歳：平均 49.4 ± 10.7 歳，踵骨骨密度値 $0.154 \sim 0.603 \text{ g/cm}^2$ ：平均 $0.327 \pm 0.119 \text{ g/cm}^2$ ）の踵骨側面X線画像を使用し，得られた解析値と骨量測定装置（UXA-300, Aloka）で取得された骨密度値との相関性を検討した。

Fig. 1 に閾値フィルタ法の手順を示す。まず，対象のX線画像をフィルムデジタイザ（LD-4500, コニカ）にて標本化 0.1mm ，量子化8ビットでデジタル化し，パーソナルコンピュータ（Macintosh 7300/180, Apple）に取り込んだ。対象部位から 128×128 ピクセルの関心領域を切り出し，2次元ローリングボール法による背景トレンド処理を行い，高速フーリエ変換によって画像のパワースペクトルを求めた。次に，low pass および high pass フィルタ処理をそれぞれのフィルタ処理の閾値を変化させながら適用したのち，逆フーリエ変

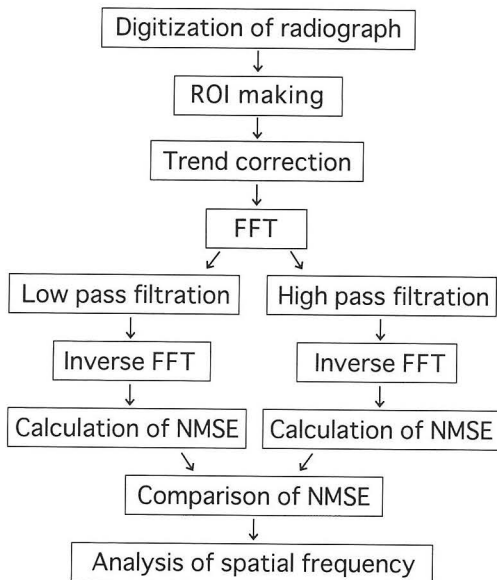
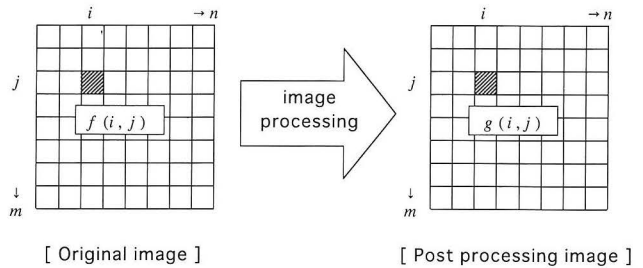


Fig. 1 Flow chart of the spatial frequency analysis of a x-ray image.

FFT : fast Fourier transform

NMSE : normalized mean square error



$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{f(i,j) - g(i,j)\}^2}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{f(i,j)\}^2}$$

Fig. 2 Calculation of NMSE (normalized mean square error).

換によって処理後画像を作成，原画像と処理後画像との違いを Fig. 2 に示す NMSE (normalized mean square error)⁸⁾によって数値化した。そして最後に，フィルタ処理の閾値に対する NMSE をグラフにプロットし，low pass および high pass フィルタ処理によって得られた両者のグラフの交点から対象のX線画像の空間周波数成分値を評価した。

なお，画像処理にはパブリックドメインソフト NIH Image (Ver. 1.61) を，NMSE の計算，グラフの作成には表計算ソフト Microsoft Excel (Ver. 5.0) を使用した。また，比較のためのパワースペクトルの1次モーメントについては水平方向の成分を次式で算出した。

$$\text{First moment} = \frac{\iint u \cdot PWS(u,v) du dv}{\iint PWS(u,v) du dv}$$

3. 結 果

正確度の検討のために，解像力測定用X線テストチャートを使用して作成したX線画像（空間周波数：1，2，3，4 cycles/mm）とそれぞれの画像から得られたパワースペクトル（最大周波数：5 cycles/mm）を Fig. 3 に示す。パワースペクトルにはチャートの空間周波数値付近にスペクトルのピークが認められた。Fig. 4 は空間周波数が2 cycles/mmのチャート像に low pass および high pass 空間周波数フィルタ処理を閾値を変化させながら実行したときのパワースペクトルおよびそのパワースペクトルから逆フーリエ変換によって得られた処理後画像である。low pass フィルタ適用時には，閾値が高くなるにしたがい，処理後画像は原画像と同等になり，逆に high pass フィルタ適用時には，閾値が高くなるほど，処理後画像は原画像から異なるものになった。Fig. 5 は，空間周波数が2 cycles/mmのチャ

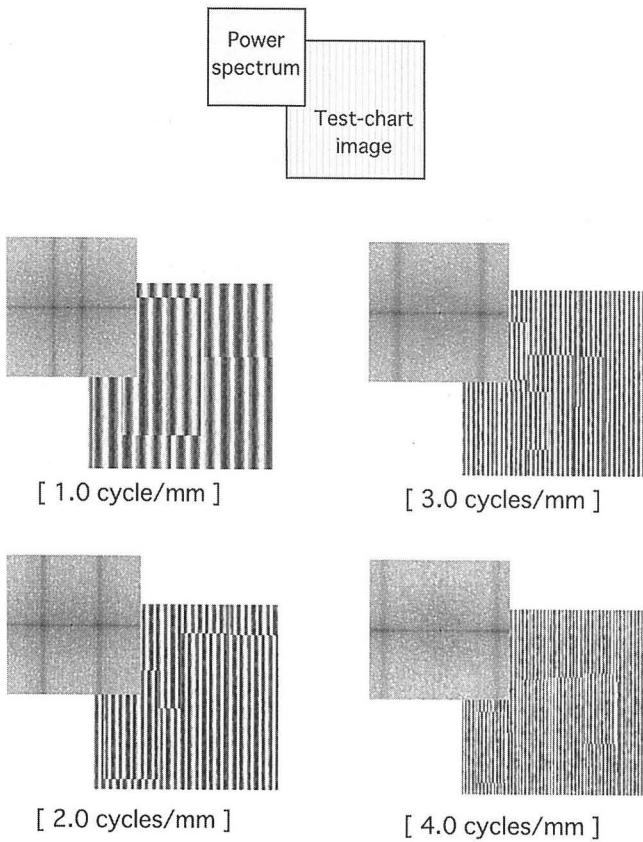


Fig. 3 Images obtained by a x-ray test-chart for measuring resolution and those power spectra. The maximum spatial frequency of the power spectra is 5 cycles/mm.

ート画像とその処理後画像から算出した NMSE を周波数フィルタ処理の閾値に対しプロットしたグラフである。画像の周波数成分が少ない周波数領域、つまり、フィルタ処理の閾値を変化させても画像があまり変化しない周波数領域ではグラフの傾きは小さく、一方、画像に含まれる周波数成分が多い周波数領域ではグラフの傾きは大きくなった。そして、この low pass および high pass フィルタ処理の両グラフの交点からこのチャート像の空間周波数成分値を2.018cycles/mmであると評価した。

Table 1 は、閾値フィルタ法によって求めた各チャート像の空間周波数成分値と、同じ対象のパワースペクトルから算出した1次モーメントの比較を示す。1次モーメントを用いる解析法では、解析結果がチャートの空間周波数の違いを結果の大小として示すもののその変動幅は小さく、他方、我々が考案した手法では、算出した空間周波数成分値とチャートの空間周波数値がよく一致した。

次に Fig. 6 と Fig. 7 に閾値フィルタ法を踵骨側面 X線画像に適用した1例を示す。Fig. 6 は踵骨画像に写し出された骨梁像に low pass および high pass フィルタ処理をフィルタ処理の閾値を変化させながら適用したときのパワースペクトルと処理後画像である。

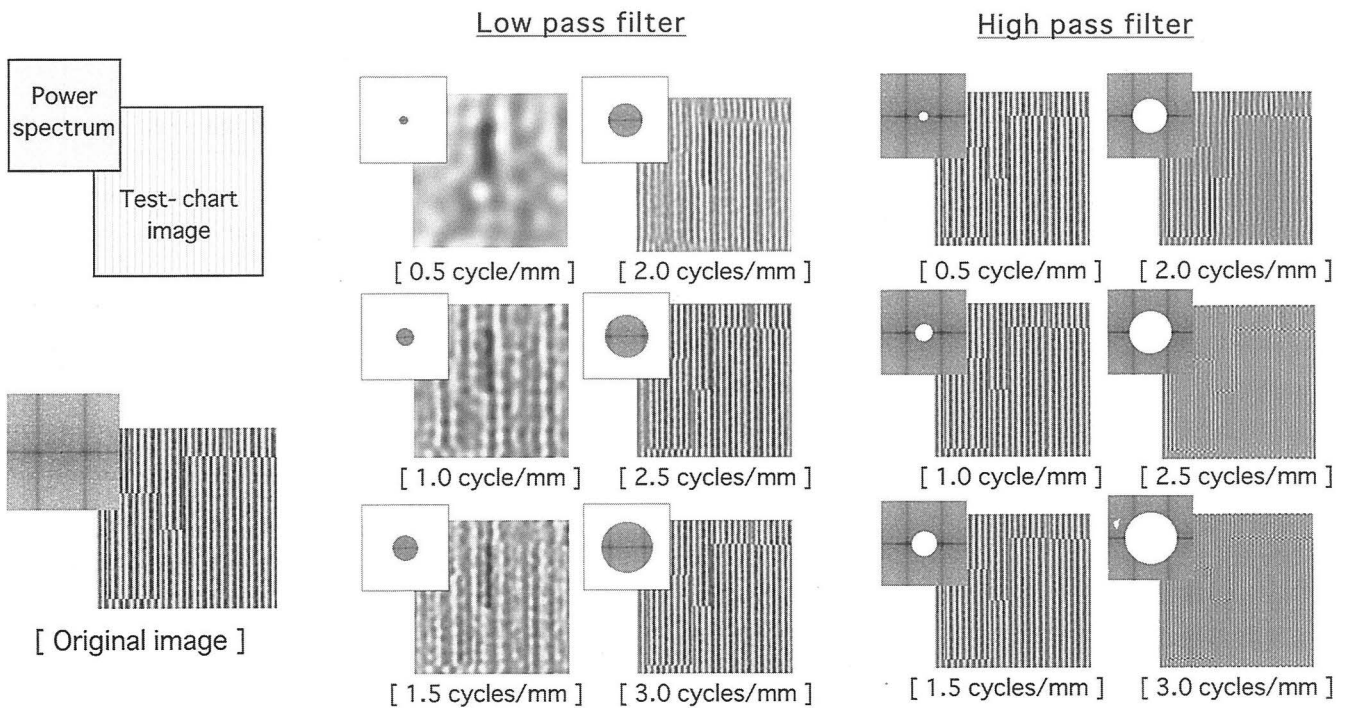


Fig. 4 X-ray test-chart images and those power spectra after low-pass and high-pass filter processing at various cutoff frequency levels.

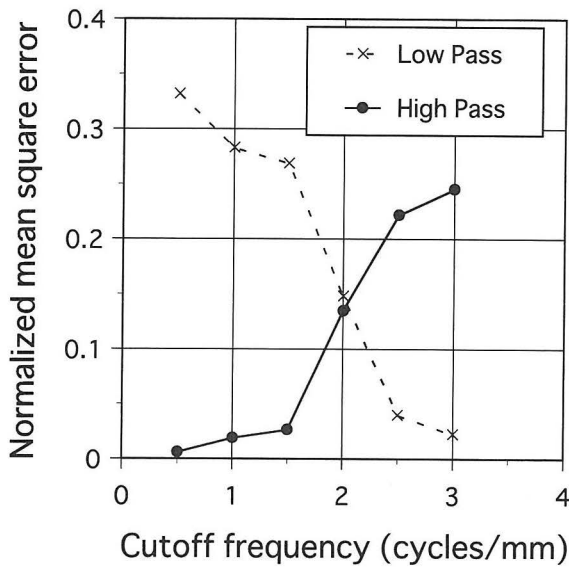


Fig. 5 Relationship between the cutoff frequency levels and the NMSE using a x-ray test-chart that spatial frequency was 2 cycles/mm. Low-pass filter processing (dotted line), high-pass filter processing (solid line). Spatial frequency component of the x-ray test-chart image was 2.018 cycles/mm estimated from an intersection point of the two lines.

Table 1 Comparison of spatial frequency, as estimated by new method with x-ray test-chart images using spatial frequency filter processing, and first moments of the horizontal axis calculated from those power spectra.

Spatial frequency (cycles/mm)		
Test-chart	New method	First moment
1.0	1.036	2.441
2.0	2.018	2.478
3.0	2.997	2.529
4.0	4.065	2.561

Fig. 7 は処理後画像と原画像から算出した NMSE をフィルタ処理の閾値に対しプロットしたものである。この例では、両曲線の交点からこの画像の空間周波数成分値を0.869cycle/mmであると評価した。なお、今回計測を行った踵骨X線画像16例から得られた踵骨骨梁像の空間周波数成分値の平均値は 0.86 ± 0.10 cycle/mmであった。

Fig. 8 に閾値フィルタ法で求めた16例の踵骨骨梁像の空間周波数成分値と骨量測定装置から得たそれぞれの踵骨骨密度値との相関を示す。また、Fig. 9 に同症例の踵骨骨梁像のパワースペクトルから算出した1次モーメントと踵骨骨密度値との相関を示す。1次モー

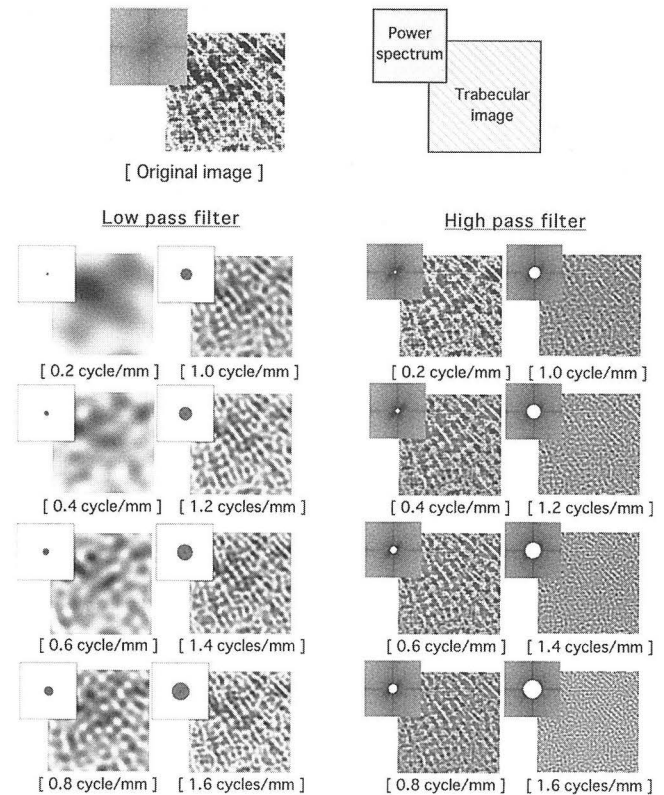


Fig. 6 Calcaneal trabecular images and those power spectra after low-pass and high-pass filter processing at various cutoff frequency levels.

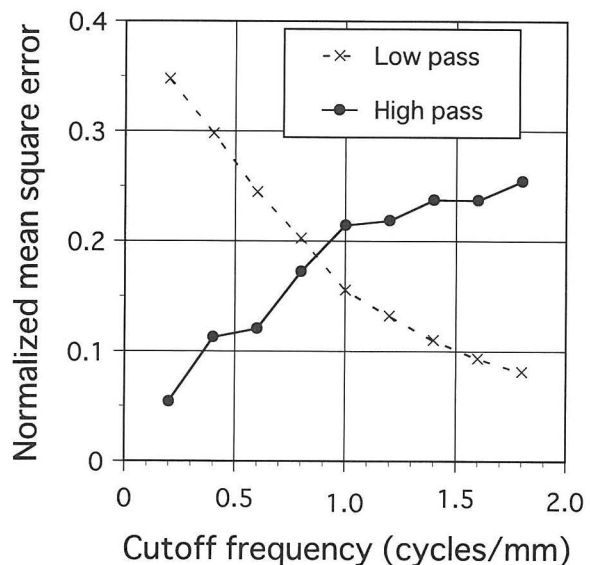


Fig. 7 Relationship between the cutoff frequency levels and the NMSE using a calcaneal trabecular image. Low-pass filter processing (dotted line), high-pass filter processing (solid line). Spatial frequency component of the calcaneal trabecular image was 0.869 cycle/mm estimated from an intersection point of the two lines.

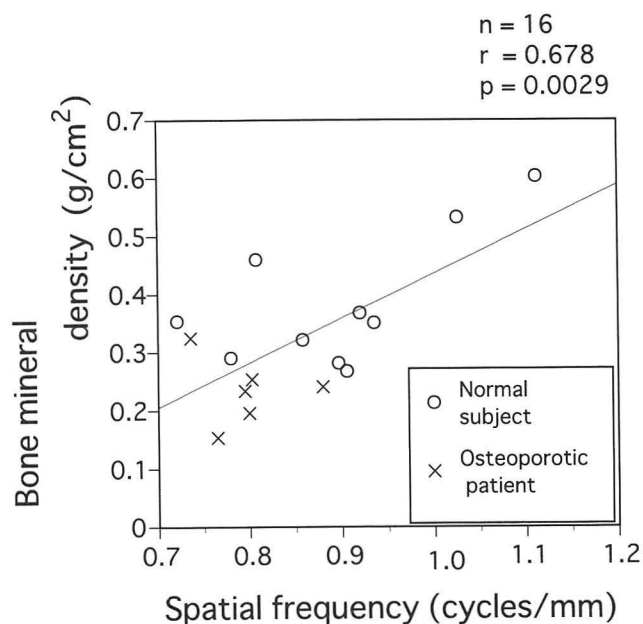


Fig. 8 Relationship between the spatial frequency of calcaneal trabecular images estimated by new method and the bone mass indices obtained by bone mineral analyzer. Normal subject (○), osteoporotic patient (×).

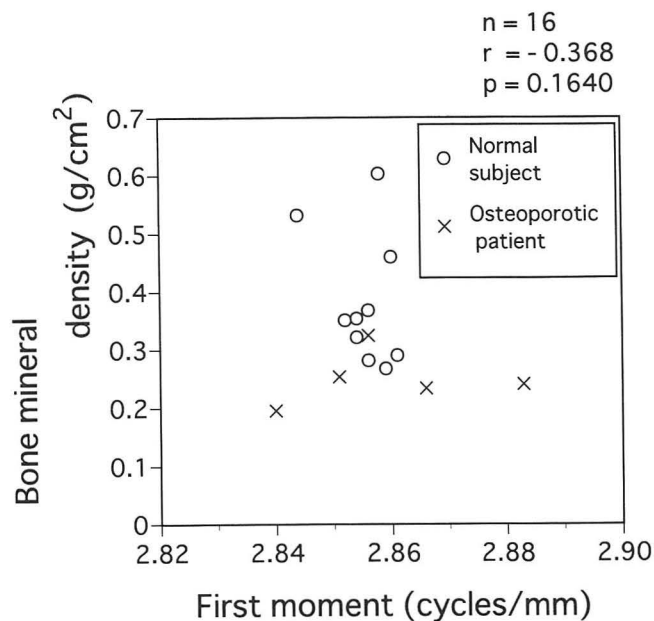


Fig. 9 Relationship between the first moments calculated from power spectra of calcaneal trabecular images and the bone mass indices obtained by bone mineral analyzer. Normal subject (○), osteoporotic patient (×).

メントと踵骨骨密度値との間には相関性は認められなかったが、閾値フィルタ法で得た空間周波数成分値と踵骨骨密度値との間には有意な正の相関性が認められた ($r=0.678$, $p=0.0029$).

4. 考 察

X線テストチャートを使用した正確度の検討では、テストチャートの空間周波数値とそのX線画像から閾値フィルタ法で求めた結果とがよく一致した。ただし、この新しい解析法で求めた空間周波数成分値が、実際のテストチャートの空間周波数値よりもわずかに大きく評価される傾向が認められたことについては、撮影時の幾何学的配置に伴うX線画像の拡大が原因であると考え。また、閾値フィルタ法では、従来から用いられている1次モーメント法よりも解析結果の変動幅が大きく、X線画像の変化に対する解析値の反応が高いことがうかがえた。1次モーメントの反応がX線画像の変化に対し低かった原因については、X線画像の感光系は一般に被曝軽減のために高感度系であるために粒状が悪く、粒状の周波数成分がパワースペクトルに影響を与え、その結果、解析値の変動が小さくなったと考える。以上より、X線画像に描出された像構造の空間周波数成分の解析には、1次モーメント法よりも我々が考案した閾値フィルタ法のほうが適当である

と考える。

踵骨骨梁像を対象にした有効性の検討では、1次モーメントと踵骨骨密度値の間には相関性が認められなかったのに対し、閾値フィルタ法では、解析値と骨密度値との間に有意な正の相関性が認められた。したがって、周波数フィルタを用いる空間周波数成分解析法を骨梁像の画像解析に適用することで、X線画像を用いた骨梁構造の空間周波数解析の可能性が示唆された。なお、同じX線画像を解析したにもかかわらず、1次モーメントが閾値フィルタ法で得た空間周波数成分値よりも高い解析値になった原因については、閾値フィルタ法ではX線画像上にもっとも明瞭に描出されている像構造の空間周波数成分値が算出されるのに対し、1次モーメント法は、X線画像の粒状や被写体の厚さに起因する写真濃度の変化など、像構造以外の要因にも解析値が影響されるため、その中でも成分割合の大きなX線画像の粒状による高周波成分の影響で解析値が高値となったと考える。

5. 結 語

周波数フィルタを用いたX線画像の空間周波数解析法を新しく考案し、その正確度と有効性について検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 閾値フィルタ法は、X線画像が有する空間周波数

成分を正確に数値化することが可能であった。

- (2) 骨梁が十分に描出されたX線画像では、閾値フィルタ法によって骨梁の空間周波数成分の解析が可能であった。
- (3) 踵骨骨梁像を閾値フィルタ法によって解析した結果、踵骨骨梁の空間周波数成分値は 0.86 ± 0.10 cycle/mm ($n=16$) であった。
- (4) 閾値フィルタ法から求められた踵骨骨梁像の空間周波数成分値と骨量測定装置で取得した踵骨骨密度値との間には正の相関性 ($r=0.678$, $P=0.0029$) が認められ、X線画像が有する空間周波数成分と骨密度との関係が深いことが示された。

6. 文 献

- 1) 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(3): 460-471, 2000.
- 2) Chinander MR, Giger ML, Martell JM, Favus MJ: Computerized Analysis of Radiographic Bone Patterns: Effect of Imaging Conditions on Performance, Med. Phys. 27(1): 75-85, 2000.
- 3) 中山良平, 内山良一, 廿日出勇, 山本皓二, 渡辺良二, 難波 清, 北川覚也, 竹田 寛: マンモグラムにおける微細石灰化クラスタの良悪性鑑別システムの開発, 日放技学誌, 56(3): 391-397, 2000.
- 4) 真田 茂, 小林 健, 吉田めぐみ, 松井武司, 高島 力: 胸部X線エネルギーサブトラクション画像を対象とした時間的差分法による微細病巣陰影の強調, 日放技学誌, 56(3): 428-435, 2000.
- 5) 田中 弘: 画像処理応用技術, 東京: 工業調査会, pp 63-78, 1989.
- 6) Ishida T, Takigawa A, Yamashita K: Spectral Analysis of Trabecular Patterns, IMECO TC7 Int'l Symp. on AIMaC'91: 199-204, 1991.
- 7) Caligiuri P, Giger ML, Favus MJ, Jia H, Doi K, Dixon LB: Computerized Radiographic Analysis of Osteoporosis, Radiology, 186(2): 471-474, 1993.
- 8) 松尾 悟, 小水 満, 木田哲生, 野間和夫, 橋本恵次, 大西英雄, 増田一孝: X線画像のもつ周波数成分の分析, 日放技学誌, 53(11): 1665-1672, 1997.