原 著

X線画像コントラストによる
踵骨骨密度測定に関する基礎的検討

溝口直洋・稲津 博・尾花 寛・西林直行・小柏 進

中央医療技術専門学校診療放射線学科

論文受付
2010年3月12日論文受理
2010年8月6日

Code No. 881

緒 言

骨粗鬆症は骨組織の骨量が広範囲にわたり減少する疾患である。骨粗鬆症は高齢者の骨折の原因疾患として知られていて、生活の質を著しく低下させる原因になる。平成18年度の報告では、わが国の骨粗鬆症患者数は約780～1100万人と推定されている¹⁾。このため骨密度(bone mineral density; BMD)の計測は骨粗鬆症の診療において重要である。

現在、BMDの定量法としてX線画像の写真濃度を利用したマイクロデンシトメトリー(microdensitometry; MD)法、CT装置を利用した定量的CT(quantitative computed tomography; QCT)法、2種類の異なるエネ

ルギーのX線を利用した2重エネルギーX線吸収測定(dual-energy absorptiometry; DXA)法などが知られている²⁾。これらのなかで、MD法を除いた他の測定法は専用の装置が必要である。一般撮影装置を用いたものとしてはMD法のほかに、コンピューテッドラジオグラフィ(computed radiography; CR)を用いた骨密度とX線画像コントラストの関係に着目した研究が報告されている³⁾。しかし、この近藤の研究の主目的はX線画像コントラストと画像描出能の観点からの患者被曝線量の低減であり、BMDの計測ではない。

そこで、対数変換した骨画像の被写体コントラストが骨周囲の軟部組織の厚さの影響を受けないことに

Basic Study for the Measurement of the Bone Mineral Density of the Calcaneus by Using the Radiographic Contrast

Tadahiro Mizoguchi, Hiroshi Inatsu, Hiroshi Obana, Naoyuki Nishibayashi, and Susumu Ogashiwa

Department of Radiology, Chuoh College of Medical Technology

Received March 12, 2010; Revision accepted August 6, 2010; Code No. 881

Summary

We performed a fundamental study for the measurement of the bone mineral density (BMD) of the calcaneus by using the radiographic contrast (RC). The RC of the bone radiography is proportional to the product of the thickness of the bone H_b , the gradient of the image detector system and the difference of the linear attenuation coefficient between the bone and the soft tissue. Therefore, the radiographic contrast per unit bone thickness (RC/H_b) can be used as a good measure of the BMD. Though the linearity of RC/H_b is maintained for x-rays with the monochromatic energy spectrum, the energy spectrum of the x-rays employed in clinical examinations is continuous. The relationship between RC/H_b value and BMD value was examined by two kinds of added filter (Al with 5 mm and 15 mm thickness) and two kinds of bone phantoms (the phantom with 1 cm and 4 cm thickness, which is made by a bone equivalent material). The experimental results obtained from the 1 cm bone phantom indicated an approximately linear relationship. However, the experimental results obtained from the 4 cm bone phantom indicated a non-linear relationship due to the beam hardening. Therefore, the estimation of the calcaneus BMD value in clinical practice is performed by using the relationship between RC/H_b and BMD values obtained from experimental results for the bone phantom with 4 cm thickness.

Key words: bone mineral density, radiographic contrast, subject contrast別刷資料請求先: 〒124-0012 東京都葛飾区立石 3-5-12
中央医療技術専門学校 稲津 博 宛

着目して、専用の装置を使用しないで汎用の CR 装置と一般撮影システムを用いて簡便に踵骨の BMD を測定する手法(X 線画像コントラスト法)を提案する。合わせて、連続 X 線スペクトルによる BMD 測定値への影響などについて基礎的な検討を行ったので報告する。

1. 理 論

人体構造として、厚さおよび線減弱係数がそれぞれ H_t と μ_t の軟部組織のなかに、厚さおよび線減弱係数がそれぞれ H_b と μ_b の骨が埋もれているような被写体を考える。Fig. 1 に仮定した被写体構造を示す。

この被写体に一様強度 E_0 の単色 X 線を入射したときを考える。このとき、軟部組織部分を透過した X 線の強度 E_1 と骨部分を透過した X 線の強度 E_2 は減弱の指数関数の法則から、つぎの式で与えられる。

$$E_1 = E_0 e^{-\mu_t H_t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$E_2 = E_0 e^{-\mu_t (H_t - H_b) - \mu_b H_b} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)および(2)を対数変換して被写体コントラスト(SC)を求めるとつぎのようになる^{4~6)}。

$$SC = \log_{10} E_1 - \log_{10} E_2 = H_b (\mu_b - \mu_t) \log_{10} e \quad \dots\dots\dots (3)$$

骨部分の X 線画像コントラスト(RC)は CR 装置を使用した撮影ではイメージングプレート(imaging plate; IP)の階調度(G)の影響を受け、つぎのように表される。

$$RC = G H_b (\mu_b - \mu_t) \log_{10} e \quad \dots\dots\dots (4)$$

したがって、骨の単位厚さ当たりの X 線画像コントラスト(RC/ H_b)はつぎのようになる。

$$RC/H_b = G (\mu_b - \mu_t) \log_{10} e \quad \dots\dots\dots (5)$$

式(4)から、RC は骨の周囲に存在する軟部組織の厚さに無関係で、骨と軟部組織の線減弱係数の差($\mu_b - \mu_t$)と階調度 G および骨の厚さ(H_b)の積である⁷⁾。式(5)から分かるように、RC/ H_b は骨の厚さに依存しない。また、骨の線減弱係数(μ_b)は骨のミネラル成分の密度の関数であるから、BMD のよい測度となる。

前述の理論は新しいものではなく、digital subtraction angiography(DSA)などサブトラクションに広く応用されている。

2. 測定部位

今回の実験では BMD の測定部位を踵骨で行うことを想定している。踵骨を選択した理由はつぎのとおりである。第 1 に、踵骨はその 90~95% が海綿骨で構成されていて、骨量の変動を早期に把握できる。また、荷重骨であるから同じ荷重骨である大腿骨頸部や腰椎の骨密度との相関が高いといわれている⁸⁾。

Fig. 1 Schematic diagram of structure of subject in bone radiography. E_0 is input X-ray intensity. E_1 and E_2 are output X-ray intensity of tissue region and output X-ray intensity of bone region, respectively. μ_b and μ_t are linear attenuation coefficient of bone and soft tissue. H_b and H_t are thickness of bone and soft tissue, respectively.

第 2 に、踵骨は立方体状の骨である。このため、踵骨側面像上に関心領域(region of interest; ROI)を設定したとき、ROI 内の骨の厚さが比較的均一になり易いため設定が容易である。また、踵骨の厚さを軸方向撮影によって測定できるためである。

具体的には、まず踵骨の側面および軸方向の 2 方向撮影を行う。得られた側方向画像上の骨と軟部組織部分に 1×1 cm 程度の ROI を設定してピクセル値から SC を求め、G を乗算して RC を求める。この値を軸方向撮影から求めた踵骨の ROI 設定部分の厚さ(H_b)で除して RC/ H_b 値を求める。踵骨の BMD はファントム実験で求めた RC/ H_b 値対 BMD の関係から求める。

3. 実験方法

3-1 デジタル特性曲線

使用する IP の階調度を調べるためにデジタル特性曲線を作成した。特性曲線はインバータ方式 X 線発生装置(島津 UD150L-40E/F)を使用し、20 段の Al ステップを用いてブーツストラップ法で作成した。ブーツストラップ法を用いたのは、他の方法と比べて曝射回数が少なくアルミ階段を準備すれば比較的簡単にデジタル特性曲線を求めることができるためである。撮影距離は 177 cm、管電圧 50 kV、5 mm の Al フィルタを付加し、 $\log_{10} E$ の値を 0.1 だけ変化させた。照射後の IP を CR 装置(Konica Minolta 社製 Regius190)で

Table 1 Elemental ratio of hydroxyapatite used in this experiment

BMD [g/cm ³]	H [wt%]	C	N	O	P	Ca
1.09	8.04	68.94	4.40	15.95	0.85	1.83
1.12	7.68	65.80	4.20	17.11	1.65	3.56
1.15	7.34	62.84	4.01	18.20	2.41	5.20
1.18	7.02	60.02	3.83	19.24	3.13	6.75

Fig. 2 Geometrical arrangement of a bone phantom. A cylinder made with bone mineral equivalent materials (hydroxyapatite) was used for the bone. As a soft tissue, water was used. (a) is top view of the bone phantom. (b) and (c) are side views.

a | b | c

読みとって RAW データを取り出した。このとき、CR 装置の基本 look-up-table (LUT) はリニアに設定した。RAW データのピクセル値は画像処理ソフトウェア (ImageJ) を用いて 7×7 mm の ROI を設定し、3 回の測定値を平均した。ただし、ピクセル値は CR 装置内の対数アンプによって対数変換されている^{9,10)}。

3-2 ファントムによる RC の測定

3-2-1 ファントム構成

骨ファントムとして、ハイドロキシアパタイト [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$: 京都科学社製] のロッドを使用した。ロッドの直径は 1.3 cm、高さは 1 cm と 4 cm である。本実験では踵骨の骨密度測定を想定しているため、成人男子 2 名の踵骨幅を参考にして骨ファントムの高さを 4 cm とした。また、1 cm 高さの骨ファントムを実験に加えた理由はつぎのとおりである。高さが 4 cm 骨ファントムと比較して X 線の骨透過距離が短く、もしビームハードニングが骨部分の透過によって生じるのならば、その影響が少ないと考えられること。また、高さが 1 cm であるため、 RC/H_b が式 (4) から直接求まり、基準値として利用できると考えたからである。ただし、後述するように周囲の軟部組織 (水) によるビームハードニングの影響を 2 種類の骨ファン

トムで同等にするため水部分の高さは両ファントムとも 5 cm と等しくした。Table 1 に骨ファントムの組成とハイドロキシアパタイトの密度を示す。

軟部組織は水とした。Fig. 2a に上方から見た 4 種類のロッドの配置図を示す。

水容器の中に 4 種類のロッドを容器の中心からロッドの中心までの距離が 1.5 cm となるよう配置した (Fig. 2a)。骨ファントムの高さが 4 cm のとき、ロッドの高さより 1 cm 高くなるように水で満たした (Fig. 2b)。ファントムの高さが 1 cm のとき、ロッドの高さより 4 cm 高くなるように水で満たした (Fig. 2c)。4 cm 骨ファントムにおいて、水を 1 cm 高くした理由は踵骨の両側に 0.5 cm の軟部組織の存在を想定している。

3-2-2 X線照射および測定条件

RC と BMD の関係を調べるために、付加フィルタなし、5 mm の Al 付加フィルタ、および 15 mm の Al 付加フィルタを付加したときについて Fig. 2b, c に示すそれぞれのファントムを撮影した。Fig. 2a の骨ファントムの配置中心 O と一致するように中心 X 線を照射した。照射野は 4 種類の骨ファントムの周辺濃度が均一になるように 10×10 cm の正方形とした。これは骨ファントムの周辺の散乱 X 線を均一な分布にするためである。撮影条件は管電圧 50 kV、管電流 100

mA および撮影距離 177 cm を固定した。付加フィルタを使用しないときの撮影時間を、ロッドの高さが 1 cm のときは 200 ms, 4 cm のときは 630 ms とした。5 mm の Al 付加フィルタを使用したときの撮影時間を、ロッドの高さが 1 cm のときは 800 ms, 4 cm のときは 1.0 s とした。15 mm の Al 付加フィルタを使用したときの撮影時間を、ロッドの高さが 1 cm のときは 1.0 s, 4 cm のときは 3.2 s とした。管電圧の 50 kV は通常の踵骨撮影を参考にして決めた。また、フィルタ使用時の撮影時間はピクセル値がデジタル特性曲線の範囲内におさまるように設定した。再現性を確認するために、同一ファントムをそれぞれ 5 回撮影し、平均をとった。

3-2-3 解析方法

得られた画像から、水と各ロッド部分のピクセル値を 3-1 と同様の方法で取り出した。骨部分のピクセル値は、1 枚の画像の各ファントムに対して直径 0.9 cm の円形の ROI を設定して 5 回測定の実値とした。また、軟部組織のピクセル値は 1 枚の画像において、直径 1.4 cm の円形の ROI を設定し任意の 7 カ所の平均値とした。取り出した骨および軟部組織部のピクセル値の差から SC を求めた。求めた SC と G の積から RC を求め、高さが 1 cm の骨ファントムの RC-BMD 曲線を作成した。さらに、高さが 4 cm の骨ファントムから単位骨高さ当たりのコントラスト RC/H_b を求めた。通常、BMD の単位は 2 次元の画像であるため g/cm^2 であるが、既知の BMD と X 線画像コントラストの対応関係であるため、本論文では g/cm^3 を使用した。

4. 実験結果

4-1 デジタル特性曲線

デジタル特性曲線の測定結果を Fig. 3 に示す。ピクセル値は相対露光量の対数値に対して直線になった。G は 1100 となった。CR を用いた BMD の定量は系が線形であるため相対露光量の対数値 ($\log_{10} E$) への変換が不要で、ピクセル値がそのまま使用できる。したがって、CR 装置を用いた BMD の測定は G が X 線強度の関数として変化する増感紙-フィルム系より簡単である。

4-2 X 線画像コントラスト RC と BMD の関係

Fig. 4a に、骨ファントムの高さが 1 cm における付加フィルタなし、5 mm の Al および 15 mm の Al 付加フィルタを装着したときの RC/H_b -BMD 曲線を示す。この曲線において、 H_b は 1 cm であるから結果として RC-BMD 曲線になっている。Fig. 4b に、高さが 4 cm の骨ファントムから求めた付加フィルタなし、5 mm の Al および 15 mm の Al 付加フィルタを装着したと

Fig. 3 The digital characteristic curve of a CR system used in this experiment.

きの RC/H_b ($RC/4$)-BMD 曲線を示す。BMD の増加とともにコントラストが増加した。ファントムの高さが 1 cm のときは RC が BMD に対して線形に増加するが、ファントムの高さが 4 cm のときは BMD が高い領域で RC の線形性がくずれた。付加フィルタの厚みを大きくすると、RC の BMD に対する増加率が小さくなりコントラストが低下した。

4-3 付加フィルタの違いによる RC/H_b 値と BMD の関係

Fig. 5 に付加フィルタなし、および付加フィルタごとにまとめた RC/H_b -BMD 曲線を示す。Fig. 5a は付加フィルタなしの曲線である。Fig. 5b と c はそれぞれ 5 mm の Al 付加フィルタを使用および 15 mm の Al 付加フィルタを使用したときの曲線である。Fig. 5a, b および c において、 $RC/4$ cm の値は BMD $1.12 g/cm^3$ までは、ほぼ $RC/1$ cm の値と一致した。しかし、BMD が $1.12 g/cm^3$ より増加すると、 $RC/4$ cm の値の増加率が小さくなり $RC/1$ cm の値とずれが生じた。

5. 考 察

5-1 RC-BMD 曲線とフィルタの影響

Fig. 4a および b から、BMD の増加とともに RC/H_b も増加していることがわかる。したがって、 RC/H_b の値から BMD 値が推定できると考える。また、付加フィルタを使用すると RC/H_b -BMD 曲線の傾きが小さくなる。すなわち、付加フィルタの厚みが増すと RC が低下する。RC 低下の原因はつぎのように考えられる。付加フィルタの厚みが増加すると連続 X 線の実効エネルギーが高くなり μ_b と μ_t が低下する。さらに、 $\mu_b - \mu_t$ の値も線質の硬化とともに減少する¹¹⁾。この両方の効果によって RC が減少したと考えられる。

ファントムの高さが 1 cm のとき、 RC/H_b は H_b が 1 であるから式(4)で求まる。したがって、BMD 値の等しい

Fig. 4 Relationship between RC/ H_b value and BMD value obtained from bone phantoms of thickness of 1 cm and 4 cm.

The H_t of both phantoms used in the experiments is 5 cm.

(a) bone phantom of 1 cm thickness.

(b) bone phantom of 4 cm thickness.

Water height is 5 cm in (a) and (b).

Fig. 5 Relationship between RC/ H_b value and BMD value classified according to added filter thickness.

(a) Without added filter.

(b) 5 mm thickness aluminum added filter.

(c) 15 mm thickness aluminum added filter.

Water height is 5 cm in (a), (b) and (c).

骨ファントムの RC は骨ファントムの高さに比例する。つまり、1 cm の骨ファントムから求めた RC ($RC_{1\text{cm}}$) の値と 4 cm 骨ファントムから求めた RC/ H_b (すなわち、 $RC_{4\text{cm}}/4$) の値は一致するはずである。しかし、Fig. 5 のすべての図からわかるように、両者の値は BMD 値

が高くなるほど一致しない。一方、BMD 値の低い領域における両者の値はほぼ一致する。すなわち、付加フィルタの有無にかかわらず $RC_{1\text{cm}}$ と BMD 関係は線形である。しかし、 $RC_{4\text{cm}}/4$ と BMD の関係は BMD の高い領域で線形性が失われる。つまり、骨部分の

X線透過距離が長いほど、またBMD値が高いほど $\mu_b - \mu_t$ の値が低下してRCが減少する。 $\mu_b - \mu_t$ 値の変化はX線質の変化に依存すること。また、付加フィルタの厚さが厚くなるとRC/H_b値低下の度合いは少なくなる。この二つの理由によって、前述のRC/H_bの低下はビームハードニングに起因すると考えられる。

5-2 散乱X線による影響

一般に、RCは式(4)に示す因子のほかに散乱X線の影響を受ける。今回の実験において、散乱X線は広いバックグラウンドに一樣に分布していると考えられる。このような状態における散乱X線のRCに対する影響は直接X線含有率に依存し、広い範囲で一定値である¹²⁾。したがって、RC/H_bの直線性のずれが散乱X線に起因するのであればすべてのBMDの骨ファントムに均等に作用するので、高BMD値に偏ったRC/H_bの低下は発生しないはずである。

5-3 BMD値の推定

5-1の考察から、RC/H_bとBMD値の関係はビームハードニングによる影響が避けられないことがわかる。この影響は付加フィルタを厚くし、X線エネルギーバンド幅を狭くすれば減少する。しかし、付加フィルタを過度に厚くすると、実効エネルギーが高くなりRC/H_b値が減少する。このため、RC/H_b値対BMD値曲線の傾きが小さくなり、BMD値推定の誤差が増加する原因になる。また、付加フィルタを厚くすると、実験方法の撮影条件に示したようにIPに到達するX線量が著しく減少する。IPに到達するX線量の減少は量子モトルの増加をもたらす、ピクセル値変動の増大につながる。この変動は測定されるRC/H_b値の精度を低下させる。また、精度の低下を防止するためmAs値を上昇させるとX線管に余分な負荷を掛けることになる。

雑音増加、RCの低下およびX線管への負荷などから考えて、5 mm厚さ程度のAl付加フィルタの使用が適当と考えられる。この程度の付加フィルタではビームハードニングの影響を含んでいるので、必ずファントムを用いてRC/H_b対BMD値曲線を作成し、この曲線からBMD値を推定すべきであると考えられる。

6. 結 論

汎用のCR装置と一般撮影システムを用いて、RC/H_bとBMDの関係から踵骨のBMDを推定する手法を提案した。BMD値が高くなるとRCが増加するので、RC/H_bからBMDを推定できることを示した。骨ファントムの高さが1 cmのときは連続X線を使用してもRC/H_b対BMDの関係を示す曲線は線形であった。

骨ファントムの高さを4 cmにすると、RC/H_b対BMDの関係を示す曲線は非線形になった。特に、高BMD領域でRC/H_bの値が低下した。この低下は付加フィルタを厚くすると減少した。したがって、非線形化の原因はビームハードニングによるものといえる。ビームハードニングが無視できるような付加フィルタの使用は、X線管に対する負荷の増加およびRCの低下につながり臨床利用を考慮すると有効ではない。そのため、5 mm厚さ程度のアルミニウム付加フィルタを使用し、4 cm程度の骨ファントムから求めたRC/H_b対BMDの関係を示す曲線を用いてBMDを推定する方法が有効であると示唆された。

謝 辞

この研究に際し、貴重な助言をいただいた中央医療技術専門学校の寺西幸光先生、加藤真一先生をはじめとする諸先生方に深く感謝いたします。また、英文のご高閲をいただいた熊本大学 桂川茂彦教授に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 骨粗鬆症の予防と治療ガイドライン作成委員会 編集。I 骨粗鬆症の定義・疫学および成因。骨粗鬆症の予防と治療ガイドライン 2006 年版。東京：ライフサイエンス出版。
- 2) 高田政彦。骨粗鬆症診療における骨量測定の意義と役割－MD 法手指骨測定とDXA 大腿骨測定について－。日骨形態誌 1999; 9(3): 69-72。
- 3) 近藤裕二。骨密度を考慮した最適な撮影条件の検討－骨密度と画像コントラストの関係－。日放技学誌 2003; 59(8): 944-950。
- 4) 立入 弘、稲田清成 監修。第 9 章 医療画像情報学。診療放射線技術(上巻)。南江堂、東京、2009: 331-332。
- 5) 内田 勝 監修。3 章。基礎放射線画像工学。オーム社、東京、1998: 114-116。
- 6) 桂川茂彦 編集。4 画像の評価。医用画像情報学。南山堂、東京、2006: 56-59。
- 7) 内田 勝、金森仁志、稲津 博 編著。第 13 章。放射線画像情報工学(II)日本放射線技術学会編 1980。通商産業研究社、東京、1980: 378-380。
- 8) 片桐浩史。単一エネルギー X 線吸収法による踵骨の骨量動態に関する研究。日整会誌 1994; 68(12): 1044-1055。
- 9) 小寺吉衛。医用画像のデジタル化の特徴。日放技学誌 2005; 61(5): 661。
- 10) 國友博史。デジタル画像データと物理測定の基礎。日放技学誌 2009; 65(8): 1087。
- 11) 前越 久 監修。放射線医療技術叢書(11)光子減弱係数データブック。京都：日本放射線技術学会、1995。
- 12) 土井邦雄。被写体散乱線の写真効果のレスポンス関数。放射線像の研究、第 1 巻、1964。

図表の説明

- Fig. 1 骨 X 線撮影における被写体構造の略図
 E_0 , E_1 および E_2 はそれぞれ入射, 軟部組織部分を透過および骨部分を透過した X 線強度である. μ_b と μ_t はそれぞれ骨と軟部組織の線減弱係数, H_b と H_t はそれぞれ骨と軟部組織の厚みである.
- Fig. 2 骨ファントムの幾何学的配置図
骨は骨塩等価物質(ハイドロキシアパタイト)で作った円柱を使用した. 軟部組織として, 水を使用した. (a)は上面から見た骨ファントム. (b), (c)は側面図.
- Fig. 3 実験に用いた CR システムのデジタル特性曲線
- Fig. 4 RC/H_b と BMD の関係
(a)1 cm 骨ファントム
(b)4 cm 骨ファントム
(a)および(b)において, 水の高さ(H_t)は 5 cm である.
- Fig. 5 付加フィルタの厚み別に分類した RC/H_b 値と BMD 値の関係
(a)付加フィルタなし
(b)5 mm 厚さのアルミニウム付加フィルタ
(c)15 mm 厚さのアルミニウム付加フィルタ
(a), (b)および(c)において, 水の高さ(H_t)は 5 cm である.
- Table 1 実験に用いたハイドロキシアパタイトの元素組成比