



Title	QCTによる骨塩定量法における骨髄内脂肪の影響
Author(s)	池田, 俊昭; 桜井, 清子
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1994, 54(9), p. 886-896
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/18289
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

QCTによる骨塩定量法における骨髄内脂肪の影響

池田 俊昭 桜井 清子

北里大学医学部放射線医学教室

Influence of Bone Marrow Fat on the Determination of Bone Mineral Content by QCT

Toshiaki Ikeda and Kiyoko Sakurai

Single-energy quantitative CT (SEQCT) is thought to be suitable for long-term observation of changes in bone mineral content in individual patients. However, in patients with osteoporosis, an increase in bone marrow fat cannot be ignored. The relationship between bone marrow fat and bone mineral density (BMD) at different tube voltages of 80 kV and 120 kV was investigated using a set of solution phantoms that we devised, and was also studied in healthy volunteers. On the basis of the results obtained using the solution phantoms, the influence of bone marrow fat accounted for a decrease of 8.9 mg/cm³ in BMD value at 80 kV and of 10.8 mg/cm³ at 120 kV in the presence of 10 vol% fat. These findings suggested that the influence of fat was less at a lower tube voltage. The formulas used to estimate the true bone mineral and fat contents from the BMD values at low and high tube voltages were derived by eliminating the influence

of beam hardening. Using these formulas, we studied healthy volunteers, and found that the difference between the true BMD value and the BMD value calibrated for beam hardening averaged 17.8 mg/cm³ at 80 kV and 22.6 mg/cm³ at 120 kV. Moreover, the estimated concentration of bone marrow fat in the volunteers averaged 25.0 vol%. In conclusion, because SEQCT performed at a low tube voltage is less influenced by bone marrow fat, it should be selected for assessment of the clinical response to therapy and for studying sequential changes. However, in patients with a low bone mineral content indicated by SEQCT, it would be worthwhile trying to estimate both true mineral and fat contents in bone using the formulas obtained in this study in order to differentiate decrease in bone mineral from interference by bone marrow fat.

緒 言

従来、骨代謝異常の診断や治療効果判定のために、いろいろな骨塩定量法が試みられてきた。現在、行われている主な方法としては、X線を用いた Dual energy X-ray absorptio metry (DEXA)^{1,2)}と、Single energyあるいは Dual energy の Quantitative Computed Tomography (SEQCT あるいは DEQCT)³⁾⁻⁸⁾が挙げられる。

DEXA では管電圧の異なる二つの X 線を利用して軟部組織や脂肪組織の影響を取り除いており、測定誤差も少なく比較的短時間に全身あるいは

Research Code No. : 505.1

Key words : Quantitative CT,
Bone mineral density (BMD),
Bone marrow fat

Received Apr. 16, 1993; revision accepted Oct. 27, 1993

Department of Radiology, Kitasato University School of Medicine

は任意の部分の骨塩量をかなり高い精度で求めることができるが、被検体を透過してくるX線量を測定しているため、被検体の厚さの方向のX線吸収の総和しか求められず、骨皮質、骨海綿質の骨塩量をそれぞれ独立に測定することはできない。

一方、QCTでは、容易に脊椎の断面像を得ることができ、骨代謝の速さの異なる骨海綿質と骨皮質の骨塩量を別々に求めることができる。SEQ CTとDEQCTを比較すると、正確度(accuracy)においては骨髄内脂肪の影響が少ないDEQCTが優れているが、精度(precision)においては計算の簡単なSEQCTが優れている。したがって、特定患者の長期にわたる骨塩量変化の経過を観察する目的には、SEQCTが適していると考えられる⁹⁾。しかし、SEQCTでは骨髄内脂肪による骨塩量の過少評価が問題となり、特に骨粗鬆化の著しい症例では骨髄内脂肪の増加の影響は無視できない。

通常のCTは高管電圧(120-140kV)で、使用されるため、SEQCTも一般的には高管電圧で行われている。しかし、SEQCTでは骨髄内脂肪の影響は低管電圧(80kV)の方が少ないといわれている¹⁰⁾。そこで今回我々は、QCTを行ううえでの重要な因子の一つである骨髄内脂肪の影響に関して、自作の溶液ファントムならびに健常ボランティアによって管電圧との関係を検討した。

ファントムによる実験的検討

1. 対象

使用した溶液ファントムは、リン酸水素二カリウムの濃度を、0, 50, 100, 150, 200mg/mlとし、リン酸水素二カリウムの各濃度でエチルアルコール濃度が0, 8, 16, 24, 32vol%となるように調整した計25種類の水溶液である。これらの溶液を内径26mmのポリエチレン容器に入れ、これを腹部横断面の形をしたアクリル樹脂製の胴体ファントム(厚さ約4cm)の腰椎に相当する部分に挿入して測定した(Fig. 1)。使用したリン酸水素二カリウム、水、エチルアルコールは、それぞれX線に対する吸収が骨塩、軟部組織、脂

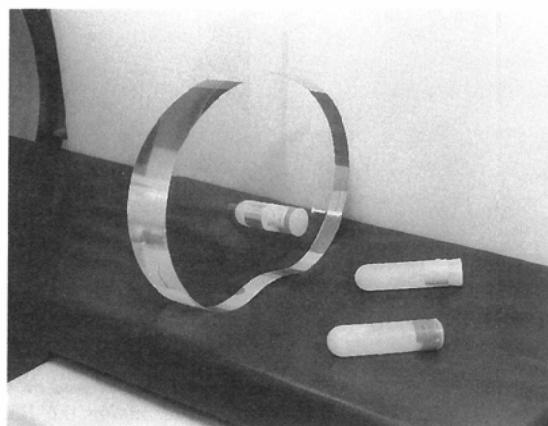


Fig. 1 Solution phantoms and the body phantom in which a solution phantom is set.

肪組織に相当する物質である³⁾。

2. 方法

使用したX線CT装置はQuantex(横河製)であり、スライス厚は10mmとした。前述の溶液ファントムの中心がスキャン軸上に位置するよう胴体ファントムを設定し、BMD基準ファントムと同時に、管電圧80kV(管電流100mA)と、120kV(80mA)でそれぞれ4回ずつ撮像し、溶液ファントムのCT値から後に述べるような方法でBMD値を求めた。

使用したBMD基準ファントムの主体はカルシウム・ヒドロキシアパタイト($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ 、以後Ca-HAPと略す)を軟部組織等価の可撓性プラスチックに混合したものであり、Ca-HAPの濃度は0, 75, 150mg/cm³である。このプラスチック様の基準物質は、患者の体表面によくフィットし、しかも患者に負担のかからないように設計されたマットレスの中に埋め込まれている。

ここでいうBMD値とは、BMD基準ファントムのCa-HAP濃度と、そのCT値より求めた回帰直線により、目的とする骨塩量をCa-HAP相当量として算出するものである。

作製したファントムのBMD値を求めるとき、関心領域(ROI)として、Fig. 2の例に示すように、溶液ファントム横断像の中に直径20mmの円形領域を設定した。各溶液ファントムについて

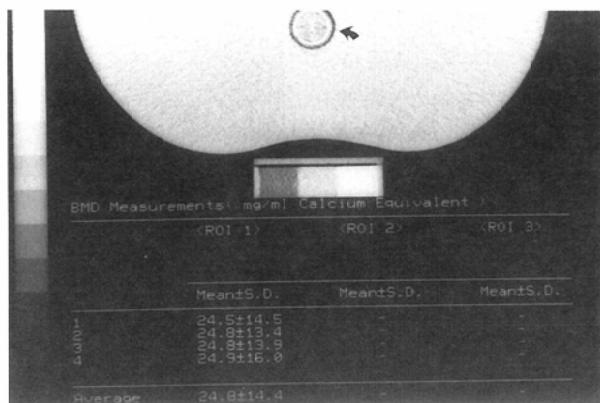


Fig. 2 A CT image for determining the BMD value of a solution phantom set in the body phantom: To measure BMD values, a circle of 20 mm in diameter was set inside the image of a solution phantom as the region of interest (ROI) (arrow). BMD values were obtained from 4 CT images and the mean value of them was calculated to get a measured BMD value.

CT画像を各4回撮像し、各ファントム横断像内に設定したROIの実測BMD値を求め、それをさらに平均してファントムの測定BMD値とした。

ビーム・ハードニング (beam hardening) あるいは装置の調整不足によるBMD値への影響を補正するためにQAファントムの測定を行った。QAファントムは前述の胴体ファントムと同形の腹部断面の形をしたアクリル樹脂製で、腰椎に相当する部分に円柱状のCa-HAP (Ca-HAP濃度

100mg/cm³)と可撓性プラスチックの混合物がはめ込まれている。

3. 測定結果

リン酸水素二カリウム濃度が150mg/ml、エチルアルコール濃度が32vol%の溶液、およびリン酸水素二カリウム濃度が200mg/ml、エチルアルコール濃度が16, 24, 32vol%の溶液ファントムでは、溶液が分離したため測定が行えなかった。

溶液ファントムごとに撮像した4画像での実測BMD値のバラツキを見てみると、80kVの場合

Table 1 Measured BMD values of the solution phantoms

		concentration of K ₂ HPO ₄ (mg/ml)				
		0	50	100	150	
concentration of ethyl alcohol (vol%)	0	MBMD* at 80 kv (mg/cm ³)	-5.4	45.0	93.0	142.1
	0	MBMD at 120 kV (mg/cm ³)	-3.4	48.7	98.6	148.5
8	8	MBMD at 80 kv (mg/cm ³)	-12.5	39.0	86.2	136.8
	8	MBMD at 120 kV (mg/cm ³)	-11.9	40.1	89.5	141.3
16	16	MBMD at 80 kv (mg/cm ³)	-19.7	32.8	80.7	127.9
	16	MBMD at 120 kV (mg/cm ³)	-21.3	32.2	82.8	131.3
24	24	MBMD at 80 kv (mg/cm ³)	-26.2	24.8	71.9	121.3
	24	MBMD at 120 kV (mg/cm ³)	-28.3	23.3	71.9	121.7
32	32	MBMD at 80 kv (mg/cm ³)	-33.0	16.6	64.9	×
	32	MBMD at 120 kV (mg/cm ³)	-37.0	14.4	61.2	×

* MBMD: Measured BMD value

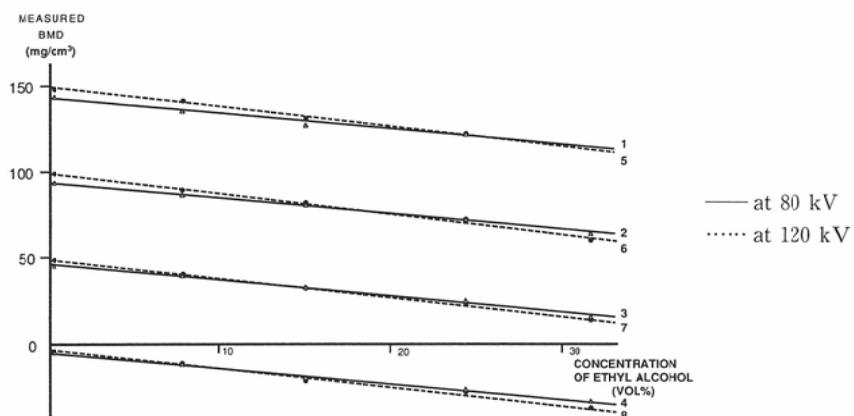


Fig. 3 The relationship between the measured BMD value and the concentration of ethyl alcohol at each tube voltage (1) K_2HPO_4 : 150 mg/ml at 80 kV, $Y = 142.72 - 0.89X$, $r = 0.9958$ (2) K_2HPO_4 : 100 mg/ml at 80 kV, $Y = 93.44 - 0.88X$, $r = 0.9976$ (3) K_2HPO_4 : 50 mg/ml at 80 kV, $Y = 45.84 - 0.89X$, $r = 0.9971$ (4) K_2HPO_4 : 0 mg/ml at 80 kV, $Y = -5.58 - 0.86X$, $r = 0.9998$ (5) K_2HPO_4 : 150 mg/ml at 120 kV, $Y = 149.26 - 1.13X$, $r = 0.9976$ (6) K_2HPO_4 : 100 mg/ml at 120 kV, $Y = 99.28 - 1.16X$, $r = 0.9964$ (7) K_2HPO_4 : 50 mg/ml at 120 kV, $Y = 48.82 - 1.07X$, $r = 0.9998$ (8) K_2HPO_4 : 0 mg/ml at 120 kV, $Y = -3.36 - 1.05X$, $r = 0.9992$

には平均 $0.6\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、120 kV では平均 $0.5\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、両者間に有意な差は認められず、再現性に問題はなかった。また、BMD 値を 1 画像ごとに見てみると、ROI 内での実測 BMD 値のバラツキは 80kV の場合には平均 $15.9\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、120kV の場合には平均 $10.3\text{mg}/\text{cm}^3$ であった。

Table 1 は各溶液ファントムの 80kV と 120kV における測定 BMD 値である。

Fig. 3 は各溶液ファントムの測定 BMD 値とエチルアルコール濃度との関係を示している。直線は 80kV および 120kV おのおのにおける回帰直線をリン酸水素二カリウムの各濃度別に示したものである。リン酸水素二カリウムの各濃度における回帰直線の傾きはほぼ一定で、その平均は 80kV の場合は、 -0.88 であり、120kV の場合には -1.10 であった。80kV での傾きが、120kV の傾きに比較して小さいことから、エチルアルコールの影響は、80kV の方が、120 kV に比較して少ないことが分かる。また、標準誤差はいずれの管電圧でもリン酸水素二カリウムの濃度に依存せず、80kV では $0.93\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、120kV で

は $0.89\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、両管電圧に有意な差は認められなかった。

Fig. 3 のグラフで問題となるのは、エチルアルコールが $0\text{vol}\%$ の場合でも、80kV と 120kV で測定 BMD 値が異なることである。これはビーム・ハードニングあるいは装置の調整不足による影響と考えられ、真の BMD 値を求めるためにはこの影響を排除する必要があると考えられる。

4. ビーム・ハードニングの影響を排除した線質補正 BMD 値の算出方法

今回使用した胴体ファントムと QA ファントムは、大きさも構成物質も同じであるから、ビーム・ハードニングによる影響は同じと考えられる。BMD 値が既知の QA ファントム (BMD 値 = $100\text{mg}/\text{cm}^3$) の 80kV, 120kV おのおのにおける測定 BMD 値は、 $93.2\text{mg}/\text{cm}^3$, $98.2\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、また水 (BMD 値 = $0\text{mg}/\text{cm}^3$) の 80kV, 120kV おのおのにおける測定 BMD 値は、 $-5.4\text{mg}/\text{cm}^3$, $-3.4\text{mg}/\text{cm}^3$ であるから、測定 BMD 値を Y 、ビーム・ハードニングの影響を排除した線質補正 BMD 値を Y' とすると、この両者の関係は 80kV, 120kV でそれぞれ下記の

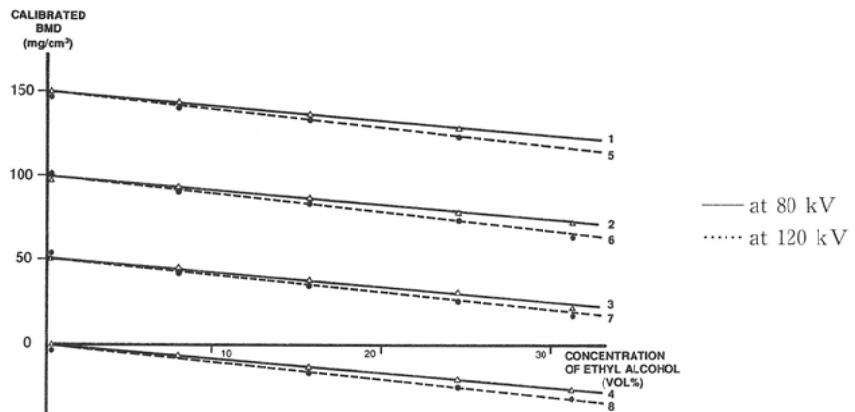


Fig. 4 The relationship between the calibrated BMD value and the concentration of ethyl alcohol at each tube voltage

(1) K_2HPO_4 : 150 mg/ml at 80 kV, $Y = 149.61 - 0.90X$, $r = 0.9961$ (2) K_2HPO_4 : 100 mg/ml at 80 kV, $Y = 99.84 - 0.89X$, $r = 0.9976$

(3) K_2HPO_4 : 50 mg/ml at 80 kV, $Y = 51.78 - 0.90X$, $r = 0.9970$ (4) K_2HPO_4 : 0 mg/ml at 80 kV, $Y = -0.14 - 0.87X$, $r = 0.9999$

(5) K_2HPO_4 : 150 mg/ml at 120 kV, $Y = 149.63 - 1.11X$, $r = 0.9977$ (6) K_2HPO_4 : 100 mg/ml at 120 kV, $Y = 100.68 - 1.13X$, $r = 0.9964$

(7) K_2HPO_4 : 50 mg/ml at 120 kV, $Y = 51.18 - 1.05X$, $r = 0.9998$ (8) K_2HPO_4 : 0 mg/ml at 120 kV, $Y = -0.24 - 1.02X$, $r = 0.9992$

(1)(2)式で示される

$$Y'_{80} = 5.48 + 1.01 Y_{80} \quad \dots\dots(1)$$

$$Y'_{120} = 3.35 + 0.98 Y_{120} \quad \dots\dots(2)$$

Fig. 4 は各溶液ファントムの線質補正 BMD 値とエチルアルコール濃度との関係を示している。直線は 80kV および 120kV おのおのにおける線質補正 BMD 値の回帰直線をリン酸水素二カリウムの濃度別に示したものである。リン酸水素二カリウムの各濃度における回帰直線の傾きはほぼ一定で、その平均は 80kV の場合は、-0.89 であり、120kV の場合には-1.08 であった。すなわち、エチルアルコールが 10vol%増加すると BMD 値は 80kV の場合には $8.9\text{mg}/\text{cm}^3$ 低下し、120kV の場合には、 $10.8\text{mg}/\text{cm}^3$ 低下することになり、エチルアルコールの影響は 80kV の方が 120kV より少ないことを示している。

5. エチルアルコールの影響も排除した線質脂肪補正 BMD 値の算出方法

Fig. 4 の線質補正 BMD 値の回帰直線の傾きはリン酸水素二カリウムの濃度にかかわらず、80kV, 120kV 両管電圧では一定であることよ

り、リン酸水素二カリウムを U 、エチルアルコール濃度を A とすると、

$$Y'_{80} = U - 0.89A \quad \dots\dots(3)$$

$$Y'_{120} = U - 1.08A \quad \dots\dots(4)$$

の関係が成り立つ。(3)(4)式に(1)(2)式を代入すると、

$$U = 1.01 Y_{80} + 5.48 + 0.89A \quad \dots\dots(5)$$

$$U = 0.98 Y_{120} + 3.35 + 1.08A \quad \dots\dots(6)$$

この式よりエチルアルコールの影響を除去した線質脂肪補正 BMD 値 U 、およびこのときのエチルアルコール濃度 A が求められ、

$$U = 15.35 + 4.59 (1.24 Y_{80} - Y_{120}) \quad \dots\dots(7)$$

$$A = 11.20 + 5.15 (1.03 Y_{80} - Y_{120}) \quad \dots\dots(8)$$

となる。

Table 2 は、(7)(8)式より算出した線質脂肪補正 BMD 値と、このときのエチルアルコール濃度である。計算式により求めた線質脂肪補正 BMD 値の標準誤差は $3.28\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、良好な結果を示していた。また計算により算出したエチルアルコール濃度の標準誤差は 3.39vol\% であった。

人体の場合には、体格の違いによってビーム・

Table 2 Summary of BMDs of solution phantoms
Calculated BMD values without the effects of beam hardening and ethyl alcohol,
and calculated concentrations of ethyl alcohol.

			concentration of K_2HPO_4 (mg/ml)			
			0	50	100	150
concentration of ethyl alcohol (vol%)	0	BMD (mg/cm ³) concentration of ethyl alcohol (vol%)	0.1	50.0	99.3	148.8
	8	BMD (mg/cm ³) concentration of ethyl alcohol (vol%)	-1.6	55.1	99.0	151.5
	16	BMD (mg/cm ³) concentration of ethyl alcohol (vol%)	0.2	55.8	98.2	146.3
	24	BMD (mg/cm ³) concentration of ethyl alcohol (vol%)	-4.9	50.7	97.8	152.5
	32	BMD (mg/cm ³) concentration of ethyl alcohol (vol%)	-4.0	44.5	106.7	
			26.7	25.1	40.3	

ハードニングの影響は一定ではない。しかし、今回用いた胴体ファントムを標準体と考えてビーム・ハードニングの影響を補正することにより、80kVと120kVの管電圧で測定したBMD測定値から上記(7)(8)式を用いて、ビーム・ハードニングあるいは装置の調整不足による影響、および骨髓内脂肪による影響を排除した線質脂肪補正BMD値Uと骨髓内脂肪量Aが求められると考えた。

人体における検討

1. 対象

骨代謝異常がないと考えられる男性6例(47~68歳)、女性15例(41~69歳)のボランティアを対象とした。

2. 方 法

使用したX線CT装置はQuantex(横河製)であり、スライス厚は10mmである。検査法は、

初めに側面スカウト・ビューを撮影し、第三腰椎椎体中央の断面が撮像できるようにクレードルの位置およびガントリーの傾きを設定した後、BMD基準ファントムと同時に、管電圧80kV(100mA)と120kV(80mA)でそれぞれ2回ずつ撮像した。

椎体骨海綿質のBMD値を求めるための関心領域(ROI)として、Fig.5の例に示すように、骨皮質の内側、栄養孔の前方の骨海綿質内にできるだけ大きな円形領域を設定した。CT画像の撮像を2回行い、同じ場所に同じ大きさのROIを設定してそれぞれの実測BMD値を求め、それを平均して測定BMD値とした。

3. 結 果

ボランティアごとに撮像した2画像での実測BMD値のバラツキを見てみると、80kVの場合には平均1.0mg/cm³であり、120kVでは平均1.1mg/cm³であり両者に有意な差は認められず、溶液ファントムに比較してややバラツキが大きい

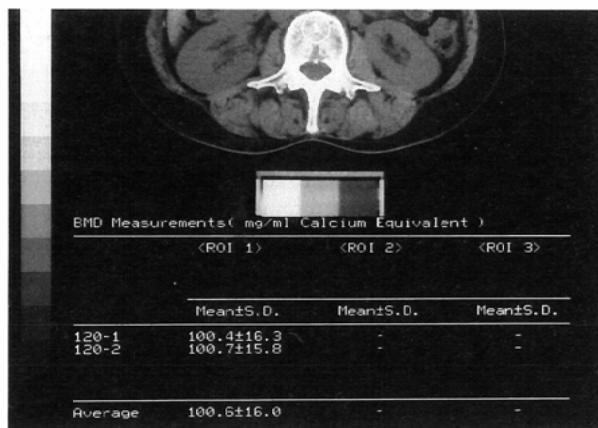


Fig. 5 Region of interest (ROI) for obtaining BMD values of the third lumbar vertebral body: A ROI was set as the largest possible circle in the anterior trabecular bone inside the vertebral body. The ROIs with the same size were set in the same place on two CT images, and the obtained BMD values were averaged to get a measured BMD value.

Table 3 Summary of BMDs of volunteers without impaired bone metabolism

No.	sex	age	MBMD ₈₀ (mg/cm ³)	MBMD ₁₂₀ (mg/cm ³)	CBMD ₈₀ (mg/cm ³)	CBMD ₁₂₀ (mg/cm ³)	True BMD (mg/cm ³)	Fat (vol%)	BMD- MBMD ₈₀ (mg/cm ³)	BMD- MBMD ₁₂₀ (mg/cm ³)	BMD- CBMD ₈₀ (mg/cm ³)	BMD- CBMD ₁₂₀ (mg/cm ³)
1	M	47	97.8	95.0	104.3	96.5	135.9	40.7	38.1	40.9	31.6	39.4
2	M	56	98.1	97.9	104.6	99.3	124.3	27.4	26.2	26.4	19.7	25.0
3	M	63	123.3	124.1	130.0	125.0	147.5	26.1	24.2	23.4	17.5	22.5
4	M	63	73.7	73.4	79.9	75.3	97.9	24.1	24.2	24.5	18.0	22.6
5	M	64	70.8	69.5	77.0	71.5	99.3	28.8	28.5	29.8	22.3	27.8
6	M	68	63.6	66.2	69.7	68.2	73.5	7.6	9.9	7.3	3.8	5.3
7	F	41	133.7	137.7	140.5	138.3	144.3	11.3	10.6	6.6	3.8	6.0
8	F	47	164.5	169.5	171.6	169.5	173.6	10.9	9.1	4.1	2.0	4.1
9	F	48	113.7	117.4	120.3	118.4	123.6	9.7	9.9	6.2	3.3	5.2
10	F	49	141.8	145.4	148.7	145.8	155.0	14.6	13.2	9.6	6.3	9.2
11	F	50	132.1	134.1	138.9	134.8	151.7	21.3	19.6	17.6	12.8	16.9
12	F	52	84.6	83.8	90.9	85.5	112.2	28.4	27.6	28.4	21.3	26.7
13	F	56	47.1	43.2	53.1	45.7	85.1	38.6	38.0	41.9	32.0	39.4
14	F	58	125.0	128.1	131.7	128.9	138.8	14.5	13.8	10.7	7.1	9.9
15	F	58	104.1	103.4	110.6	104.7	133.2	30.9	29.1	29.8	22.6	28.5
16	F	60	140.2	138.2	147.1	138.8	179.0	43.2	38.8	40.8	31.9	40.2
17	F	62	86.9	89.2	93.2	90.8	100.5	12.8	13.6	11.3	7.3	9.7
18	F	65	76.3	75.9	82.5	77.7	101.2	25.0	24.9	25.3	18.7	23.5
19	F	65	47.4	43.0	53.4	45.5	87.8	41.2	40.4	44.8	34.4	42.3
20	F	68	51.1	48.7	57.1	51.1	82.7	31.5	31.6	34.0	25.6	31.6
21	F	69	52.0	48.5	58.0	50.9	88.7	37.3	36.7	40.2	30.7	37.8
							MEAN	25.0	24.2	24.0	17.8	22.6
							SD	11.1	10.5	13.2	10.7	12.8

MBMD: Measured BMD value CBMD: BMD value calibrated for the beam hardening

ものの再現性にも問題はなかった。また実測BMD値を1画像ごとに見てみるとROI内でのBMD値のバラツキは80kVの場合には平均23.2mg/cm³であり、120kVの場合には平均22.5mg/cm³であった。両者とも溶液ファントムの結果に比較してバラツキが大きかったが、これは椎体が溶液ファントムのような均質体ではないためと考えられた。しかし両者の間には溶液ファントムのような有意な差は認められなかった。

ボランティア21人の80kVと120kVにおける測定BMD値はTable 3の4, 5列目に示したごとくである。またTable 3の6, 7列目に示した値はビーム・ハードニングの影響を排除した線質補正BMD値である。

また、(7)(8)式を用いて求めた線質脂肪補正BMD値と脂肪量をTable 4の8, 9列目に示した。Table 3の10, 11列目は線質脂肪補正BMD値と測定BMD値との差である。この差は80kVの場合には平均24.2mg/cm³、120kVの場合には平均24.0mg/cm³であり、両者間に有意差は認められなかった。

また、Table 3の12, 13列目は線質脂肪補正BMD値と線質補正BMD値との差である。この差は80kVの場合には平均17.8mg/cm³、120kVの場合には平均22.6mg/cm³であり、80kVの方が少なかった。線質脂肪補正BMD値と測定BMD値との間では80kV, 120kV両管電圧間で平均値に差が認められなかっただが、これは測定BMD値ではビーム・ハードニングあるいは装置の調整不足による影響と骨髄内脂肪の影響がともに関与しているためと考えられる。線質脂肪補正BMD値とビーム・ハードニングあるいは装置の調整不足による影響を排除した線質補正BMD値との差は、80kVの方が120kVに比較して少なく、ファントム実験の場合と同様に80kVの方が骨髄内脂肪の影響が少ないことを示している。

Fig. 6は線質脂肪補正BMD値と測定BMD値の差と骨髄内脂肪量の関係を80kV, 120kVおののおので検討したものである。回帰直線の傾きは80kVで0.94, 120kVで1.17であり、両回帰直線は骨髄内脂肪量が26.4 vol%のところで交差し

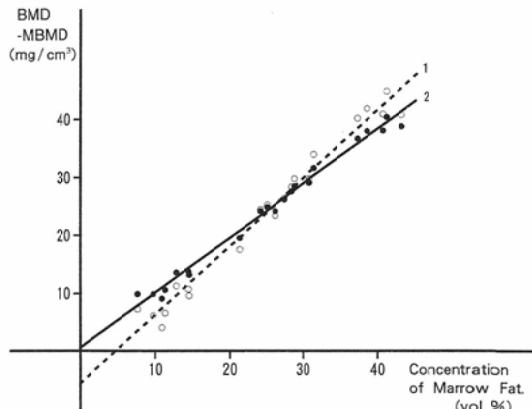


Fig. 6 The relationship between the difference of the true BMD value from the measured BMD value and the concentration of bone marrow fat at each tube voltage
 (1) at 120 kV, $Y = -5.41 + 1.17X$, $r = 0.9877$ (.....)
 (2) at 80 kV, $Y = 0.67 + 0.94X$, $r = 0.9942$ (—)●

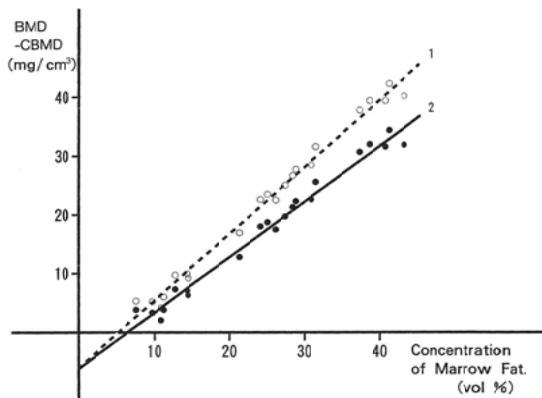


Fig. 7 The relationship between the difference of the true BMD value from the calibrated BMD value and the concentration of bone marrow fat at each tube voltage
 (1) at 120 kV, $Y = -6.03 + 1.14X$, $r = 0.9937$ (.....)
 (2) at 80 kV, $Y = -6.07 + 0.95X$, $r = 0.9908$ (—)●

ている。すなわち、骨髄内脂肪量が26.4 vol%以下の場合にはビーム・ハードニングの影響が大きく、線質脂肪補正BMD値と測定BMD値の差は120kVの方が少ないが、骨髄内脂肪量が26.4 vol%以上になると骨髄内脂肪の影響は大きく、線質脂肪補正BMD値と測定BMD値の差は80kVの方が少なくなる。

Fig. 7は線質脂肪補正BMD値と線質補正

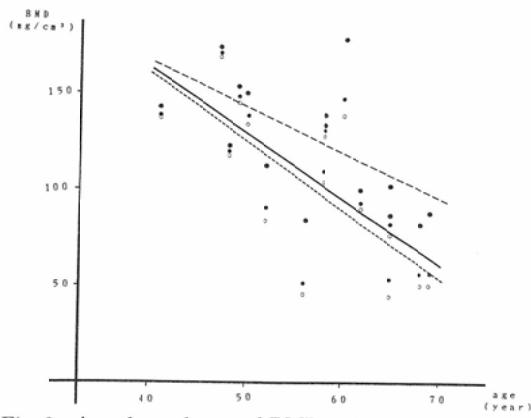


Fig. 8 Age dependency of BMD in female

- (1) Calibrated BMD at 120 kV, $Y=303.9-3.6X$, $r=0.72$
 (.....)○
 (2) Calibrated BMD at 80 kV, $Y=298.9-3.4X$, $r=0.72$
 (—)●
 (3) True BMD, $Y=261.6-2.4X$, $r=0.63$ (---)★

BMD 値の差と骨髓内脂肪量の関係を 80kV, 120kV おのおので検討したものである。回帰直線の傾きは 80kV で 0.95, 120kV で 1.14 であった。両回帰直線は骨髓内脂肪量が 0vol% のときに交差し、ビーム・ハードニングの影響はほぼ排除されていると考えられる。しかし、線質脂肪補正 BMD 値と線質補正 BMD 値の差は $-6.0 \text{mg}/\text{cm}^3$ となっており、ファントム実験の場合の $0 \text{mg}/\text{cm}^3$ とは異なっていた。これは標準体をアクリル樹脂製の胴体ファントムとしたことに起因すると考えられた。

Fig. 8 は女性 15 例における年齢と BMD 値の回帰直線を、80kV, 120kV おのおのにおける線質補正 BMD 値および線質脂肪補正 BMD 値に対して求めたものである。線質補正 BMD 値の回帰直線は 80kV のとき $Y=298.9-3.4X$, 120kV のとき $Y=303.9-3.6X$ であり、線質脂肪補正 BMD 値の回帰直線は $Y=261.6-2.4X$ であった。線質補正 BMD 値では 80kV の回帰直線の傾きは 120kV の回帰直線の傾きより小さく、このことは 80kV の方が骨髓内脂肪の影響が少ないことを意味していると考える。また、線質脂肪補正 BMD 値の回帰直線の傾きが線質補正 BMD 値の回帰直線の傾きより小さいという事実は、年齢とともに骨髓内の脂肪量が増加していることを反映

したものと推測される。年齢と骨髓内脂肪量の回帰直線を求めてみると $Y=-26.7+0.91X$ となり年齢とともに骨髓内脂肪量は増加していた。

考 察

最初にも述べたが、QCT では、容易に脊椎骨の断面像を得ることができ、骨代謝の速さの異なる骨海綿質と骨皮質の骨塩量を別々に求めることができるという利点を有するが、ビーム・ハードニングなどの技術的な原因による誤差⁹⁾や、SEQCT では骨髓内の脂肪の影響もあり、定量には問題があるといわれている。技術的な誤差は、スキャン時の被検体の位置設定および閑心領域の設定の標準化など^{11),12)}により改善されつつある。もう 1 つの問題点である骨髓内脂肪の BMD 値への影響であるが、今回行った溶液ファントムによる実験では、脂肪量（エチルアルコール濃度）が 10vol% 増加すると、線質補正 BMD 値は 80kV の場合には $8.9 \text{mg}/\text{cm}^3$, 120kV の場合には $10.8 \text{mg}/\text{cm}^3$ 低下し、無視できない値であった。

今回の実験では溶液ファントム 19 種類を用いたが、リン酸水素二カリウムの各濃度における、エチルアルコールの影響が一定であることを考えると、まず水ファントムと QA ファントムの測定 BMD 値よりビーム・ハードニングの影響を排除するための(1)(2)式の係数を算出し、さらに水ファントムおよび 1 種類の特定濃度のエチルアルコール溶液ファントムの測定 BMD 値を(1)(2)式で補正した線質補正 BMD 値を用いて、線質脂肪補正 BMD 値を算出するための(3)(4)式の係数を求めることができる。すなわち、水ファントム、QA ファントム、1 種類のエチルアルコール溶液ファントムの 3 種類のファントムで、簡単に線質脂肪補正 BMD 値と骨髓内脂肪量が算出できる。エチルアルコール溶液ファントムの濃度は、骨髓内脂肪量の平均が約 25vol% であることを考えると、25vol% が適当と考える。

骨塩定量法における骨髓内脂肪の影響に関する研究はこれまでにもいくつか報告されている。Rohloff らの QCT と DPA (Dual Photon Ab-

sorptiometry) とを比較した研究では、QCT では脂肪の影響が大きく、 $100\text{mg}/\text{cm}^3$ の脂肪量で $10\text{mg}/\text{cm}^3$ の骨塩量の補正が必要であると報告している¹³⁾。また、Laval-Jeantet らは摘出椎体を用い、化学分析により Ca 含量、脂肪量を測定したものと、SEQCT および DEQCT の骨塩量測定値を比較している。それによると SEQCT の場合、脂肪による誤差は高齢者では 15-29%となり、また椎体内的骨髓脂肪は均一に分布しているのではなく中心部より周辺部に多く、椎体間でも異なると報告している¹⁴⁾。

Genant は骨髓内脂肪が 80kV ではリン酸カリウム相当で $21-31\text{mg}/\text{cm}^3$ になると報告している¹⁵⁾。また清水の MRI を用いて骨髓内脂肪量を測定した報告では、骨髓内脂肪量による影響は骨塩量として $27\text{mg}/\text{cm}^3$ に相当すると報告している¹⁶⁾。今回の健常ボランティア 21 人より得られた線質脂肪補正 BMD 値と線質補正 BMD 値との差が 80kV の場合には平均 $17.8\text{mg}/\text{cm}^3$ 、120kV の場合には平均 $22.6\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、その変化量は骨髓内脂肪量 10vol%当たり、80kV では $9.5\text{mg}/\text{cm}^3$ 、120kV では $11.4\text{mg}/\text{cm}^3$ という結果であり、上記の報告とほぼ一致するものである。

また、今回のボランティアによる結果で注目すべき点は、80kV を用いた SEQCT にて測定 BMD 値が $70\text{mg}/\text{cm}^3$ 以下の低値を示した 5 症例のうち、4 症例では(8)式より算出した骨髓内脂肪量が 30vol%以上であり、(7)式より算出した線質脂肪補正 BMD 値は $85\text{mg}/\text{cm}^3$ 前後の値を示したが、残りの 1 症例では線質脂肪補正 BMD 値は $73.5\text{mg}/\text{cm}^3$ であり、骨髓内脂肪量は約 8vol%にすぎなかったことである。測定 BMD 値が低値を示しても、これが骨髓内脂肪によるものか骨塩量の低下によるものかは SEQCT では鑑別できない。骨代謝異常を起こす疾患では、種々の原因で骨髓内脂肪量が変化している可能性が考えられるだけに、病的骨折の可能性などを考えるうえでは DEQCT が有用と考えられる。しかし、通常の DEQCT はその計算の複雑さのため精度が悪く、治療効果判定など経時的变化の観察を必要とする場合にはむしろ計算の簡単な SEQCT が適して

いる。

したがって、臨床の場に置いてはビーム・ハーデニングの影響は(1)(2)式より容易に排除できるが骨髓内脂肪の影響は SEQCT では排除できないので、骨髓内脂肪の影響が少ない低管電圧による SEQCT を第一に行い、BMD 値が低値を示した場合には、それが骨塩量の低下によるものか骨髓内脂肪によるものかを判定するために、今回我々が検討した方法を利用するのがよいと考える。

まとめ

1. 液溶液ファントムの測定結果では、骨髓内脂肪の影響は BMD 値に換算すると、脂肪量 10vol%当たり 80kV では $8.9\text{mg}/\text{cm}^3$ 、120kV では $10.8\text{mg}/\text{cm}^3$ であった。

2. 水ファントム、QA ファントム、25vol%のエチルアルコール溶液ファントム、以上 3 種類のファントムを用いて簡便に線質脂肪補正 BMD 値と脂肪量を算出できることが分かった。

3. ボランティアの測定結果では、線質脂肪補正 BMD 値と測定 BMD 値の差は 80kV の場合には平均 $24.2\text{mg}/\text{cm}^3$ 、120kV の場合には平均 $24.0\text{mg}/\text{cm}^3$ であって、両者間に有意差はなかった。

4. 線質脂肪補正 BMD 値と線質補正 BMD 値の差は骨髓内脂肪の影響と考えられ、80kV の場合には平均 $17.8\text{mg}/\text{cm}^3$ 、120kV の場合には平均 $22.6\text{mg}/\text{cm}^3$ あり、SEQCT では低管電圧(80kV)の方が有利と考えられた。

5. 骨髓内脂肪量は加齢とともに増加する傾向が認められた。

稿を終えるに臨み、ご指導を、ご校閲を賜わりました松林隆教授に深謝致します。また多大な協力をいただいた立平親入北里大学病院 CT 室係長、相沢真技師を始め CT 室の技師の皆様に深謝致します。

文 献

- 串田一博 他: Quantitative Digital Radiography による骨塩量の測定、映像情報メディカル 21: 955-958, 1989
- 福永仁夫、友光達志、森田陸司: DEXA 法、臨床

- 放射線 35 : 41-48, 1990
- 3) Genant HK, Boyd D: Quantitative bone mineral analysis using dual energy computed tomography. Invest Radiol 12 : 545-551, 1977
 - 4) Cann CE, Genant HK: Precise measurement of vertebral mineral content using computed tomography. J Comput Assist Tomogr. 4: 493-500, 1980
 - 5) Edward LN, Frieda F, James VA: Bone mineral Assessment: New Dual Energy CT Approach. Radiol 168: 223-228, 1988
 - 6) 伊藤昌子, 林邦明, 山田直之: Dual Energy Quantitative CT (DEQCT) を用いた Bone Mineral Density (BMD) 測定法の実験的, 臨床的検討. 日本医学会誌 49 : 999-1008, 1989
 - 7) Sakurai K, Marumo F, Iwanami S, et al: Quantitative Computed Tomographic Evaluation of Femoral Bone Mineral Content in Renal Osteodystrophy Compared with Radial Photon Absorptiometry. Inves Radiol. 12: 375-382, 1989
 - 8) 桜井清子, 塚本雄介, 松林隆, 他: QCT 法による皮質骨の脱灰化評価のためのパラメーター腎性骨異常症と健常者の比較一. 腎と骨代謝 5 : 229-235, 1992
 - 9) 桜井清子: CT による骨塩定量の精度と問題点. 腎と骨代謝 1 : 167-174, 1988
 - 10) Gluer CC, Genant HK: Impact of Marrow Fat on Accuracy of Quantitative CT. J Comput Assist Tomogr. 13 : 1023-1035, 1989
 - 11) Willi AK, Ernst K, Christoph S: Vertebral Bone Mineral Analysis: An Integrated Approach with CT. Radiol. 164: 419-423, 1987
 - 12) 小山和行, 桜井清子, 福永仁夫, 他: QCT 法: 意義と臨床応用上の実験. 日本骨代謝会誌 9 : 108-136, 1991
 - 13) Rohloff R, Hitzler H, Arndt W, et al: Influence of fat content of bone marrow on bone mineral measurement by CT and photon absorptiometry in trabecular bones. In: second Workshop on Bone and Soft Tissue Densitometry Using Computed Tomography. J Comput Assist Tomogr 6 : 212-213, 1982
 - 14) Laval-Jeantet AM, Roger B, Bouysse S, et al: Influence of vertebral fat content on quantitative CT density. Radiol. 159 : 463-466, 1986
 - 15) Genant HK: Osteoporosis: Assessment by quantitative computed tomography. Orthop. Clin. North Am. 16 : 557-568, 1985
 - 16) 清水弘之: Computed Tomography ファントム同時撮影による骨塩量の基礎的研究. 日整会誌 62 : 1199-1210, 1988