

腰椎骨密度測定法での患者被曝線量

—二重エネルギーX線吸収法 (QDR-4500) と腰椎一般撮影の比較—

飯田 忠行*¹ 藤井 茂久*² 砂屋敷 忠*¹
瀧川 厚*¹ 小山 矩*¹ 古賀 佑彦*³

*1 広島県立保健福祉短期大学放射線技術科学科

*2 藤田保健衛生大学衛生学部診療放射線技術学科

*3 藤田保健衛生大学医学部放射線医学教室

抄 録

骨密度測定から受ける患者の被曝線量を人体ファントムを使った方法で測定を行った。今回は腰椎骨密度測定で行われる2種類の手法 (DEXA法, 腰椎一般撮影) で熱ルミネセンス線量計 (TLD) を用いて, 臓器の吸収線量を測定し, 以前の研究から導かれた近似式と比較検討した。腰椎骨密度測定の照射野内において, 臓器の線量は実測値と計算値との差が10%未満の誤差であった。これは, 個々のTLDのばらつき±20%以内から考えて大きな誤差ではないと考えられる。骨密度測定方法および装置から受ける臓器の被曝線量は計算によっても求めることが出来るといえる。計算値の比較では, X線が背側から入射する装置よりも腹側から入射する装置および検査法の方が臓器の吸収線量が大きかった。その結果, 骨密度測定は骨折の危険性の高い閉経後の女性への適応があると考えられる。しかし, 若年者の骨密度のスクリーニング検査としては, 注意深く考えなければならない。骨密度測定方法の利点と被曝線量を被検者の年齢を加味した上で, どの方法および装置を用いるか選択する必要がある。

キーワード：二重エネルギーX線吸収法 (DEXA), 被曝線量, 臓器, TLD, 骨密度 (BMD)

1. 緒言

現在、日本の総人口において高齢者の占める割合が増大している。その高齢化社会に伴い、骨粗鬆症患者が急増している。骨粗鬆症は特に閉経後の女性の間で深刻な健康問題の一つとなっている。そして、日々の生活の中で体力が弱まると体内の骨密度は徐々に減少する¹⁾⁻³⁾。そのため、骨粗鬆症を発症し、骨折する危険性が増えてくる。

近年、骨密度を測定して骨粗鬆症の診断を行うためのさまざまな方法が開発されている。micro densitometry (MD) 法, dual energy X-ray absorptiometry (DEXA) 法, single energy X-ray absorptiometry (SXA) 法, quantitative CT(QCT) 法, peripheral QCT (pQCT) 法, quantitative ultrasound (QUS) 法などがあり、より精度の高い骨密度測定が日本全国で行われている。骨密度測定は閉経後の女性だけでなく幅広い年齢の男性と女性で行われ、骨の形成や代謝を測定すると同時に、太っているまたは痩せているという体質の評価にも使用される⁴⁾⁻⁷⁾。なかでも、DEXA方式は他の方式に比べて検査時間が比較的短くて再現性もよい。さらに、2次元的なX線画面上で計測範囲の指定が正確に設定でき、かつ広範囲の計測も可能である⁸⁾。そのため、多くの施設で集団検診に用いられている。しかし、この方法には放射線が用いられており、患者の放射線被曝の観点で考慮されていないのが現状である。そこで、本研究では、DEXA法を用いた骨密度測定装置において、腰椎骨密度測定での患者被曝線量を測定し、その測定値と計算値を比較検討した。

2. 使用機器

骨密度測定装置：QDR-4500, QDR-2000, QDR-1000
 [以上Hologic社製]
 EXP-5000, DPX-Alpha[以上Lunar社製]
 X線一般撮影装置：X線高電圧装置KXO-50F[TOSHIBA社製]
 X線管DRX-1603B[TOSHIBA社製]

今回使用した骨密度測定装置は、すべてDEXA方式である。同じDEXA方式でも、連続スペクトルであるX線を、二つの異なるエネルギーに単色化する方法は各々異なっている。Hologic社では、3種のFilterを用いQDR-1000とQDR-2000はアクリル、ハイドロキシアパタイト、Filterを用い、QDR-4500はアクリル、アルミニウム(Al)、Filterを用いている。そして、X線管電圧を6 msecの高速で100kVと140kVに切り替えることで6種類の異なったX線エネルギーを発生させている。また、LUNAR社では、X線をKエッジフィルターで濾過する方式を用いている⁹⁾。そして、Hologic社の同じQDRシリーズでもQDR-1000はペンシルビームで、QDR-2000, QDR-4500はファンビームである。各機種には4種類程度の検査条件が準備されており、それ以外の任意の設定は出来ない。表1に各々機種における腰椎1検査あたりの「標準」撮影条件及び腰椎正面X線撮影の条件を示す。Hologic社QDRシリーズ機種は検査テーブルの下側にX線管、上側に検出器がある。Lunar社のDPX-AlphaはQDR-1000と同様のスキャン方法を行なうが、EXP-5000は検査テーブルの下側に検出器、上側にX線管がある。各々どの装置も検査時にはX線管と検出器が連動し被検者の身体に沿って動きながらスキャンを行なう。こうして撮像したスキャノグラムを用いて検査領域を決め、計算によって骨密度を算出する。

3. 実験方法

3.1 線量測定

本学の骨密度測定装置QDR-4500を用いて、腰椎骨密度測定1検査あたりの被曝線量を測定した。ファントムは女性を模した放射線治療用人体ファントム(京都科学社製)、線量測定は熱ルミネッセンス線量計(TLD)を使用した。TLD測定システムは、極光2500で検出素子の成分はMg₂SiO₄(MSO, KYOKKO社製)で2mmΦ×12mmのガラス封入型のTLD、そして、リーダーはTLD READER 2500(KYOKKO社製)を使用した。このTLDを外径4mmΦ×14mmのプラスチックケースに入れ使用した。このケースは紫外線や汚れを防ぐ目的のものである。

線量測定は腰椎骨密度測定で照射野内に入る臓器[腰

表1 腰椎骨密度測定一検査あたりの撮影条件

	管電圧(kV)	管電流(mA)	撮影時間(s)	mAs
QDR-4500	140/100	4.0	80	320
QDR-2000	140/70	2.0	121	242
QDR-1000	140/70	2.0	201	402*
EXP-5000	134	5.0	14.9	74.5
DPX-Alpha	76	0.75	480	360*
腰椎一般撮影	80	400	0.05	20**

*:ペンシルビーム

**: $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 照射野1回曝射

椎、脊髄、肝臓、肺（内側）、食道（下部）、胃]位置と照射野外の散乱線を受ける臓器[膀胱、乳房、結腸、肝臓（外側）、肺（上中部）、卵巣、甲状腺]位置にTLDを埋め込んで行った。これらの臓器は、ICRP1990年勧告で組織荷重係数が高いとされている¹⁰⁾。また、スキャンモードは、通常の臨床で用いる腰椎の標準モードとした。線量値のばらつきを少なくするために腰椎スキャンを5回行い、1回あたりの平均線量を計算によって求めた。

TLDリーダーの表示が線量当量 (Sv) であるため、(1)式で臓器の吸収線量Dを計算した¹¹⁾。

$$D = M \cdot X \cdot f_c \cdot 10^{-2} \dots (1)$$

ここで、D：吸収線量 [Gy]、M：補正後（バックグラウンド）の線量当量 [Sv]（リーダーの表示値）、X：Sv-R変換値 [R/Sv]、 f_c ：R-rad換算係数である。Sv-R変換値Xは、QDR-4500でTLDとイオンチェンバ(DOSE MASTER, IONEX社製)を同時曝射し、校正して得た値27.3 [R/Sv]である。そして、R-rad換算係数は 9×10^{-3} とした¹²⁾。

3.2 線量比較

一般に被検体に照射されたX線の線量は、照射野内では体内の軟部組織により指数関数的に減少する。そこ

で、Mix-Dpを用いた線量測定¹³⁾より、ファントムの深さと線量との関係の近似式を求めた（表2）。3.1の項で腰椎骨密度測定照射野内に入る臓器に埋め込んだTLDの皮膚表面からの距離を測定し、その距離(x)を表2の近似式に代入し、臓器線量計算値(y)とした。骨密度測定装置QDR-4500における腰椎1検査あたりの患者が受ける線量の計算値と実測値を比較した。また、他の4装置および腰椎一般撮影についても同様の方法で、計算値を求め比較した。

4. 結果および考察

図1にMix-Dpによる線量測定の結果を示し、それより求めたファントム深さと線量との関係の近似式を表2に示す。また、表3に各装置・検査法におけるMix-Dp半価層より求めたAl半価層、実効エネルギーを示す。表2より減弱係数において、骨密度測定方法間で異なり、腰椎一般撮影が他の骨密度測定装置4機種より大きな値を示した。また、骨密度測定装置間でも異なり、QDR-4500とEXP-5000の2機種、QDR-2000、QDR-1000、DPX-Alphaの3機種ではそれぞれほぼ同じ減弱係数を示し、後者の方が前者より大きくなった。このことは、表3のAl半価層から求めた実効エネルギーか

表2 ファントム深さ (x) と線量 (y) との関係の近似式

QDR - 4500	QDR - 2000	QDR - 1000	DPX - Alpha	EXP - 5000	腰椎一般撮影
近似式 $y = 0.294 e^{-0.1058x}$	$y = 0.13 e^{-0.1715x}$	$y = 0.0375 e^{-0.16x}$	$y = 0.0058 e^{-0.142x}$	$y = 0.6231 e^{-0.1075x}$	$y = 1.4723 e^{-0.1766x}$

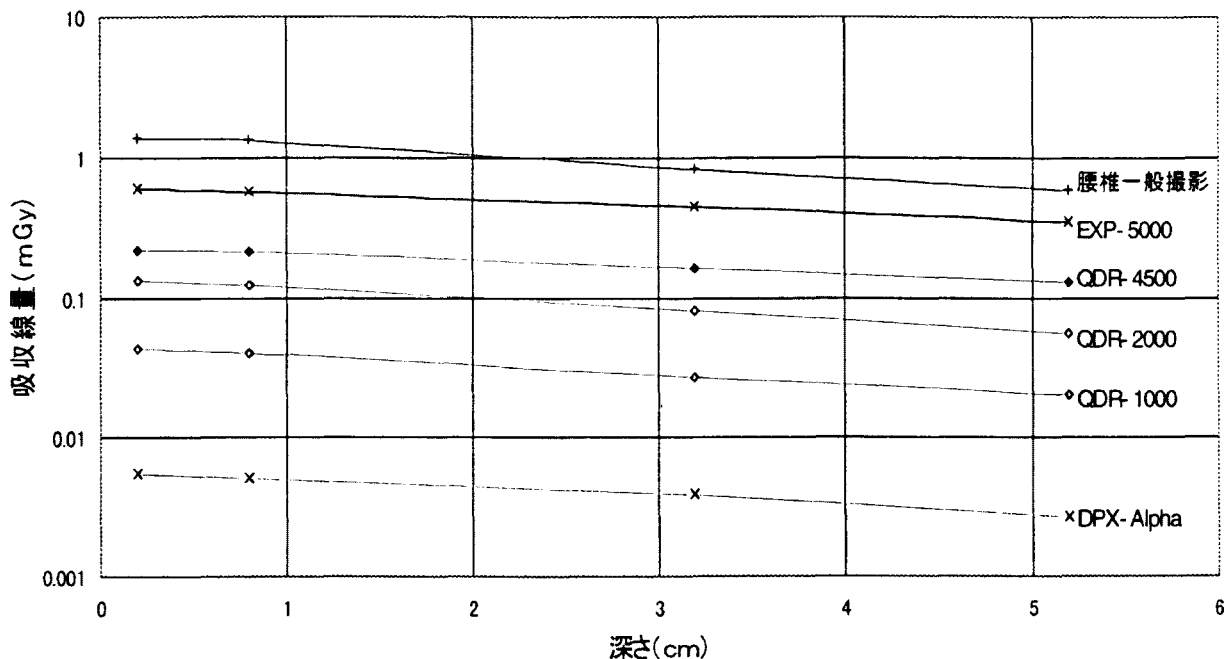


図1 各装置におけるファントム内深さと吸収線量との関係

らも同様の結果が得られた。

よって、腰椎一般撮影の線質が最も低く、ついでQDR-2000, QDR-1000, DPX-Alphaの3機種が低く, QDR-4500とEXP-5000の2機種が線質の高いX線を使用していると推察される。また, QDR-4500とEXP-5000の2機種, QDR-2000, QDR-1000, DPX-Alphaの3機種では, それぞれほぼ同等な線質を用いていると考えられる。

表4にQDR-4500における, 一回の検査あたり各臓器が受ける線量測定値とその照射野内の計算値の比較を示す。照射野外の線量測定で, 照射野から4cm程度離れている肺や乳房で100μSv~200μSvの値を示し, 膀胱, 結腸, 卵巣では数十μSv, 甲状腺ではTLDの検出レベル以下であった。照射野からの距離が5cm未満の臓器では, QDR-4500が高い線質を用いているため散乱線の影響が大きいと考えられる。しかし, それ以上の距離であるとほとんど散乱線の影響を受けないと考えられる。また, 照射野内の臓器に関しては, 肝臓, 肺, 胃では実測値の方が計算値から10%より小さな値となった。腰椎では約35%~45%, 食道では約45%, 実測値の方が計算値より低い値を示した。腰椎, 食道で, 低い値となったのは骨によると考えられる。骨の密度は軟骨で1.10g/cm³, 緻密骨で1.85g/cm³であり, 全軟部組織の密度1.00g/cm³の約1.5倍である。そして, 透過するX線は密度に反比例する⁸⁾。腰椎で実測値が低い値を示したのは, 骨による吸収であると考えられる。また, 食道においても脊椎と重ねる位置にTLDを埋め込んだため, 低い線量を示したと考えられる。腰椎骨密度測定の照射野内において, 脊椎と重ねる臓器の線量が実測値と計算値で10%未満の誤差であったことより, 個々のTLDのばらつき±20%以内¹⁴⁾から考えても, 大きな誤差ではないと考えられる。これらから臓器の線量は計算によって推測することが可能と考えられる。

QDR-4500で行った臓器線量測定(3.1)表2の関数を適用して, 表4にそれぞれの骨密度測定方法および装置から受ける臓器の線量を示す。

ファントムの体厚は20cmとし, 各臓器の腹側・背側からの距離を測定し, それをファントムと線量との関係の近似式に代入し線量を求めた。X線が被検体の背側から入射する骨密度測定装置(QDR-4500, QDR-2000, QDR-1000, DPX-Alpha)では背側からの距離, 腹側からの骨密度測定方法(EXP-5000, 腰椎一般撮影)では腹側からの距離を代入した。骨による吸収は骨の密度を軟骨1.10g/cm³緻密骨1.85g/cm³の平均値1.50g/cm³として全軟部組織の密度1.00g/cm³の1.5倍とし, それによる吸収補正が必要と考えられる。よって, 骨髄線量は脊椎の中心での線量とし, 骨による吸収補正を行って計算した。また, X線が腹側から入射する検査法の場合では, 食道下部は脊椎と重ならないため骨による補正は行わなかった。X線が背側から入射する装置ではQDR-4500がどの臓器でも最も高い吸収線量を示した。骨髄線量は, QDR-4500, EXP-5000, そして, 腰椎一般撮影で約0.75mGyとほぼ同じ数値であった。また, 食道下部では, EXP-5000がQDR-4500の約5倍, 腰椎一般撮影ではその約7倍であった。そして, 肝臓においても, EXP-5000が約2倍であり, 腰椎一般撮影が約2.5倍であった。よって, 今回調べた検査法では, 入射するX線が背側の装置より腹側から入射する装置および検査法の方が臓器の吸収線量が多い結果となった。

骨密度測定装置においては, 機種が新しくなるほど被曝線量が増えている。検査時間を短縮し, 被検者へ

表3 骨密度測定方法および装置のMix-Dp半価層、アルミニウム半価層、実効エネルギーの比較

	半価層(cm)		実効エネルギー(keV)
	Mix-Dp	Al	
QDR-4500	6.5	0.75	51.2
QDR-2000	3.93	0.46	39.8
QDR-1000	4.45	0.52	42.5
QDR-1000	4.05	0.47	40.5
EXP-5000	6.2	0.72	50
DPX-Alpha	5.05	0.58	45
腰椎一般撮影	—	0.35	35

表4 骨密度測定方法および装置から受ける臓器の被曝線量

臓器	TLDの位置(cm)		線量当量(mSv)*	吸収線量(mGy)**	臓器線量計算値(補正後の計算値)(mGy)				
	照射野から距離	背面からの距離(腹側)			QDR-4500	QDR-2000	QDR-1000	DPX-Alpha	EXP-5000
膀胱	9.5	16.5	0.011	0.003	—	—	—	—	—
骨髄	—	7.5[12.5]	0.307	0.075	0.133[0.089]	0.037[0.024]	0.012[0.008]	0.002[0.001]	0.164[0.109]
乳房	3.5	18	0.022	0.005	—	—	—	—	—
結腸	6.5	7.5	0.001	—	—	—	—	—	—
肝臓上部	—	10[10]	0.505	0.124	0.102	0.023	0.008	0.001	0.213
肝臓下部	—	10[10]	0.431	0.106	0.102	0.023	0.008	0.001	0.213
肺上部	16.5	9	0.007	0.002	—	—	—	—	—
肺中部	6	10.5	0.036	0.009	—	—	—	—	—
肺下部	—	6[14]	0.572	0.141	0.155	0.047	0.014	0.003	0.138
食道上部	3.5	12.5	0.056	0.014	—	—	—	—	—
食道中部	1	12.5	0.091	0.023	—	—	—	—	—
食道下部	—	12[8]	0.183	0.045	0.082[0.055]	0.017[0.011]	0.006[0.004]	0.001[0.001]	0.264
卵巣	9.5	13.5	0.016	0.004	—	—	—	—	—
皮膚表面	—	—	1.200	0.294	0.294	0.130	0.004	0.006	0.623
皮下	—	1[19]	1.080	0.266	0.264	0.110	0.032	0.005	0.081
胃	—	15.5[4.5]	0.209	0.052	0.057	0.009	0.003	0.001	0.384
甲状腺	20.2	12.5	—	—	—	—	—	—	—

* QDR-4500での実測値(リーダー表示値-B.G.)
** 線量当量実測値から求めた吸収線量(式1)

の負担軽減や、また、検査効率の向上を図り、かつ、骨密度測定の精度・再現性の向上を図る必要のため管電流の増加傾向にある。この管電流の増加が被曝線量を増大させていると考えられる。骨密度測定は骨折の危険性の高い閉経後の女性への適応ではあるものの、被曝の問題から若年者の骨密度のスクリーニング検査として、腹側からX線が入射する検査方法は注意深く考えなければならない。骨密度測定方法の利点と被曝線量を被検者の年齢を加味した上で、どの方法および装置を用いるか考える必要があると考えられる。

5. 結 論

骨密度測定方法および装置から受ける臓器の被曝線量を均質ファントムの測定平均から計算によって求めることが出来た。その結果、骨密度測定は骨折の危険性の高い閉経後の女性での測定は良いと考えられる。しかし、若年者の骨密度のスクリーニング検査としては、注意する必要がある。骨密度測定方法の利点と被曝線量を被検者の年齢を考慮した上で、どの方法および装置を用いるかの選択が必要である。

文 献

- 1) Cummings, S. R. Are patients with hip fracture more osteoporotic: Review of the evidence. *Am. J. Med.*, 78 : 487-494, 1985
- 2) Cummings, S. R., Black, D. M. et al. The study of osteoporotic fractures reserch group: Appendicular bone density and age predict hip fracture in women. *J. Am. Med. Assoc.*, 263 : 665-668, 1990
- 3) Hui, S. L., Slemenda, C. W. et al. Baseline measurement of bone mass predicts fracture in white women. *Ann. Intern. Med.*, 111 : 355-361, 1989
- 4) Pepler, W. W., Mazess, R. B. Total bone mineral and lean body by dual-photon absorptiometry. *Clacif. Tissue Int.*, 33 : 353-359, 1981
- 5) Gotfreden, A., Jensen, J. et al. Measurement of lean body mass and total body fat using dual photon absorptiometry. *Metabolism*, 53 : 88-93, 1986
- 6) Mazess, R. B., Barden, H. S. et al. Dual-energy x-ray absorptiometry for total-body and regional bone-mineral and soft-tissue composition. *Am. J. Clin. Nutr.*, 51 : 1106-1112, 1990
- 7) Heymsfield, S. B., Wang, J. et al. Dual-photon absorptiometry : Comparison of bone mineral and soft tissue mass measurements in vivo with established methods. *Am. J. Clin. Nutr.*, 49 : 1283-1289, 1989
- 8) 田中仁, 斎藤勲, ほか. 医用放射線技術実験臨床編 第3版. 東京, 共立出版, '341-388, 1996
- 9) 川勝充. DEXA法による骨塩量測定の問題. 日本放射線技術学会雑誌, 53 : 489-493, 1996
- 10) 折戸武郎, 森川薫ほか. 放射線安全管理学医用放射線科学講座第4巻. 東京, 医歯薬出版, 1-40, 1998
- 11) Kyokko TLD technical data. 東京, 化成オプトニクス, 7-48, 1995
- 12) 丸山隆司, 岩井一男ほか. X線診断による臓器・組織線量, 実効線量および集団実効線量. *Radioisotopes*, 45 : 761-773, 1996
- 13) 飯田忠行, 砂屋敷忠ほか. 骨密度測定における被曝線量測定. *Radioisotopes*, 48 : 577-583, 1999
- 14) 日本放射線技師会. 診療放射線データブック 改訂増補版. 東京, マグプロス出版, 340-354, 1984

Comparison of the amount of absorbed dose using the DEXA for lumbar spine bone mineral density measurement

Tadayuki Iida^{*1} Shigehisa Fujii^{*2} Tadashi Sunayashiki^{*1}
Atsushi Takigawa^{*1} Tadashi Koyama^{*1} Sukehiko Koga^{*3}

- *1 Department of Radiological Sciences and Technology, Hiroshima Prefectural College of Health and Welfare
- *2 Fujita Health University School of Health Sciences
- *3 Department of Radiology, Fujita Health University

Abstract

Patient dose in bone mineral density examinations was measured using a body phantom. In this study, the organ absorbed dose from two different methods of lumbar bone mineral densitometry, dual energy x-ray absorptiometry (DEXA) and lumbar vertebral radiography, was measured using a thermo-luminescence dosimeter (TLD). Measured values were compared with the approximations derived from our previous study. Differences between the measured and calculated values was less than 10% in the estimated field area. This error seems adequately small, considering that fluctuation of measured values with TLD is within $\pm 20\%$. Consequently, the organ absorbed dose can be obtained with calculation, even if the method or device is different. In the comparison of calculated values, the organ absorbed dose for the method or device in which x-rays enter the human body in the dorso-ventral projection was greater than in the ventro-dorsal projection. Bone mineral density measurement is generally applied to females after menopause, who are in risk of bone fracture. However, application to young generation screening should be considered carefully. The method and the device must be carefully chosen, considering each merit, patient dose and patient age.

Key words : dual-energy X-ray absorptiometry(DEXA), absorbed dose, organ, TLD, bone mineral density(BMD).