資 料

橈骨骨密度測定における被ばく線量測定

—— 走査ビーム線量測定 ——

山口一郎^{*1}, 大久保誠^{*2}, 緒方裕光^{*1}, 出雲義朗^{*1}, 加藤 朗^{*3}

(2001 年 7 月 2 日受理)

(2001 年 8 月 20 日再受理)

Radiation Dose in Radius Bone Mineral Density Measurements Using Dual Energy X-ray Absorptiometry

—Dosimetric Method on Scan Beam—

Ichiro YAMAGUCHI,^{*1} Makoto OHKUBO,^{*2} Hiromitsu OGATA,^{*1} Yoshiro IZUMO^{*1} and Akira KATO^{*3}

Effective doses in radius bone mineral density measurements using dual energy X-ray absorptiometry (DEXA) were assessed with entrance beam intensity and X-ray absorption rate in organs. The X-ray entrance beam intensity was calculated from an energy fluence rate, and we demonstrated how to assess beam intensity by using thermoluminescent dosimeters (TLDs). The entrance beam energies were calculated from X-ray beam intensity in regard to beam sizes, scan areas, and scan times. The X-ray absorption rates were calculated by using X-ray absorption curves at bone mineral density measurements. The average tissue doses were determined by using reference female and men. Skin entrance intensity was 4×10^{-4} [J/(m²·s)]. Skin entrance energies were $1-2 \times 10^{-3}$ [J] in proportion to wrist width. The effective dose was approximately 5 nSv.

KEY WORDS : radiation dose, radius, bone mineral density measurement, dosimetric method, scan beam, beam intensity

I 緒 言

近年, 社会の高齢化に伴い骨粗しょう症への関心が高まっている。このため, 骨密度測定装置の普及とともに人々の密度検査の機会も増大している。骨密度の測定法

として, 現在最も多用されているのは, 2 種の印加電圧により発生させた X 線の細いビームを測定部位の前腕部, とりわけ橈骨に照射しながら走査させ, 両エネルギー X 線の吸収差に基づく方法, すなわち, 橈骨 Dual energy X-ray absorptiometry (DEXA: 二重エネルギー

^{*1} 国立公衆衛生院放射線衛生学部; 東京都港区白金台 4-6-1 (〒108-8638)

Department of Radiological Health, National Institute of Public Health; 4-6-1, Shirokanedai, Minato-ku, Tokyo 108-8638, Japan.

^{*2} 東京都港区みなと保健所保健予防課; 東京都港区三田 1-4-10 (〒108-0073)

Community Health Service Section, Minato Public Health Center; 1-4-10, Mita, Minato-ku, Tokyo 108-0073, Japan.

^{*3} 千代田テクノル; 東京都文京区湯島 1-7-12 (〒108-8638)

Chiyoda Technol Corporation; 1-7-12, Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo 108-8638, Japan.

— X線吸収法) 法である。橈骨 DEXA 法における被ばく線量は、実効線量で $35 \mu\text{Sv}$ 以下とされるが、医療機関における骨塩定量装置数は、平成 5 年から平成 11 年で 723 台から 9,381 台に増加し、1 週間あたりの検査件数も同じく 6,807 件から 78,975 件と多く増加傾向にあること¹⁾、さらに、このうち比較的若年者の測定機会も増加しているなどから、本検査による国民被ばく線量への寄与も今後増大する傾向にある。

しかし、従来の被ばく線量は、1) 実効エネルギーを計測し、その入射皮膚表面の空気吸収線量から評価する方法²⁾や、2) ファントムの各臓器に TLD 素子を挿入し測定する方法³⁾により評価されている。これらの方法では、骨における直接的な吸収線量は評価されておらず、また、照射された軟組織及び骨など臓器の不均等被ばくが考慮されていない。また、標的臓器の照射割合を考慮し骨密度測定における実効線量評価を試みた報告^{4,5)}では、ファントムへの TLD の埋め込みやスラブファントムを用い表面線量に対する深部線量の割合を求めて、吸収線量を評価しており、個々の患者に対し適用できる方法ではない。

そこで、本報では、これらの問題を解明するため、まず、走査ビームの線量測定法としてエネルギーフルエンスと照射面積を用いた X 線の入射強度測定を検討した。次に、骨密度測定時に測定される臓器を透過した X 線の減弱割合を利用し、等価線量及び実効線量を算定した。

II 方法及び材料

1. 骨密度測定装置

ALOKA 社製 DCS-600EX を用いた。その管電圧は 35 kV 及び 70 kV (切替周期 15 ms 連続)、また、照射及び測定部位は、前腕部の遠位 1/3 における橈骨、照射野は $2 \text{ mm}\phi$ (ビーム径)、走査速度は検診で通常使われるプロファイルスキャンでは 4 mm/s であり、この速度は照射部位では一定である。本装置では、2 種の異なる X 線エネルギー分布 (管電圧切替) をそれぞれ単色化する方法として、フィルターを用いている。この方法では、完全な単色化は達成されないが、それぞれを単色ビームとみなして検討した。それぞれの単色ビームのエネルギーはカタログ値⁶⁾の約 26 keV、約 53 keV を用いた。X 線は回転するフィルタ (アルミニウム及び銅) を通過し被験者に照射される。X 線のフルエンス率は、それぞれのエネルギーのビームについて、 $5.8 \times 10^4 / (\text{s} \cdot \text{mm}^2)$ (CV 10%) とされている⁶⁾。X 線管と検出器は連動し走査を行う。また、検出された X 線の吸収が大きく変化する部位を骨端とし、骨幅を求めている。

2. 入射表面 X 線強度及び入射エネルギーの算出

入射 X 線の強度は、その定義から入射表面のエネルギーフルエンス率に等しい。26 keV と 53 keV の光子のそれぞれ半数がフィルターでカットされ、残りが均等に入射されるとすると、その入射強度は、 $3.7 \times 10^{-4} [\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ となる。

被検者の腕に入射した X 線の総エネルギーは入射強度を腕における照射中の走査時間、走査面積で積分して得た。

3. TLD 素子による入射表面線量の測定による入射表面 X 線強度の算出

測定結果は、1 cm 線量当量で表示されるため、照射野の大きさ及び後方散乱により補正した後、照射線量に換算する必要がある。得られた照射線量を照射時間で割ると、照射線量率 (R/s) が得られる。次に、この照射線量率から空気中の空気吸収線量率 (D_a) へ W 値を用い換算した後、入射 X 線の強度 (X 線エネルギーフルエンス率) I_0 ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) を式 (1) により求めることができる。それぞれの換算は、式 (1) を用いることができる。

$$I_0 = \frac{D_a (\text{J}/\text{kg} \cdot \text{s})}{\mu_{\text{air}} (\text{m}^2/\text{kg})} \quad (1)$$

ここで、 μ_{air} は空気の質量減弱係数である。

ビームは細く素子はその一部しか照射されない。そこで、素子全体への入射エネルギーの評価はその微小エネルギーを dJ (J) として、次式 (2) より求めることができる。

$$dJ = I_0 \cdot dW \cdot I_b \cdot dt \quad (2)$$

ここで、 dW : 走査方向移動微分距離、 dt : 微分照射時間、 I_b : ビーム走査の幅である。

4. 骨及び軟組織における X 線の吸収割合の算出

骨及び軟組織における X 線の吸収割合は、骨密度測定装置により走査距離ごとの X 線減弱曲線を出力させ (Fig. 1)、それぞれのエネルギーの X 線に対する、軟組織のみ及び軟組織と骨の両方が存在する領域における減弱割合を求め算出した。すなわち、エネルギー E_1 の X 線による軟組織の吸収エネルギー J_{1w} (J) を、下記 (3) 式から算出した。

$$J_{1w} = I_{01} \times \int \left((1 - e^{\eta_1}) > \eta_{n1} \right) dL \quad (3)$$

ここで、 η_{n1} は、エネルギー E_1 の X 線に対する軟組織における吸収割合であり、式は η_1 が η_{n1} より大な領域について積分することを示す。また、組織中で減弱した X 線のすべてがそこで吸収されたとした。

一方、骨への吸収エネルギー J_{1b} (J) は、

$$J_{1b} = I_{01} \times \int \left((e^{\eta_{n1}} - e^{\eta_1}) > \eta_{n1} \right) dL \quad (4)$$

Fig. 1 X-ray absorption curve (model).

から求めた。

5. 等価線量 (equivalent dose)

定義 ($H_T = \sum_R W_R \cdot \Delta_{T,R}$) に基づき, X 線ビームにより骨及び軟組織に与えられたエネルギーを臓器質量で除算して得た。腕に入射した光子のうち, 骨に入射する光子数は, 骨幅で補正した。臓器質量は ICRP 報告値⁹⁾ 及び田中の報告値⁹⁾ を用い, 標準人の値をそれぞれの被検者の年齢を考慮し, さらに, 体重で調整した。 W_R は ICRP 報告書 60⁹⁾ の値を用いた。

6. 実効線量

定義 ($E = \sum W_T \cdot H_T$) に基づき算出した。 W_T は ICRP 報告書 60 の値を用いた。なお, 等価線量及び実効線量の算出にあたり, 骨及び軟組織における X 線の減弱割合は協力が得られた港区みなと保健所の職員及び筆者らの骨密度測定時のデータを用いた。データ提供者の年齢は 31~54 歳で, 女性 5 人男性 7 人の計 12 人である。

III 結果及び考察

1. 被ばく線量

被検者の腕に入射する X 線エネルギーは, 腕の幅と走査回数に依存する。橈骨遠位 1/3 における腕の幅を w [mm] とすると, 1 回片道走査時間は, $w/4$ [s] となる。また, 照射野面積が π [mm²] なので, 腕への入射エネルギーは, $3.7 \times 10^{-4} [\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \times w\pi/4 [\text{mm}^2 \cdot \text{s}] \times 10^{-6}$ となる。このため, 腕の幅が 50 mm の場合には, 1.4×10^{-8} [J] と推定された。

これらのエネルギーのうち, 骨密度や腕の厚さにもよるが, 5~10% が骨で吸収され, 70~80% が軟組織で吸収

されていた。被検者毎に腕の幅で補正した入射エネルギー及び X 線エネルギーの吸収量に基づき骨及び軟組織の等価線量及び実効線量を算出した結果を **Table 1** に示す。表は, 各被検者について年齢, 性別, 骨密度, 骨幅及び皮膚表面への入射エネルギーを併記し, 骨密度の高い順に並べた。

骨及び軟組織の等価線量は, それぞれ 10~20 nSv, 50~80 nSv であった。また, 実効線量は, 概略 5 nSv であった。本法により求めた値は, 従来値 ($H_{\text{cm}}: \leq 35 \mu\text{Sv}$) より著しく低かった。本法の骨密度と被ばく線量の関係から, 従来より精度の高い集団線量の評価も可能である。また, 今回の被ばく線量推定では, X 線を単色ビームと見なした。本装置により発生する X 線は, 比較的単色化されているとされるので, この近似による誤差の影響はさほど大きいとは考えられないが, 低エネルギー成分は吸収されやすい。また, 腕を透過中に, X 線スペクトルは変化する。このため, 被ばく線量推定値に誤差が生じる。また, 腕に入射した X 線の強度と検出器に入射した X 線の強度の差が, 吸収線量に寄与したと仮定したが, 散乱された X 線がすべてそのエネルギーを腕に与えるものではない。さらに, その被ばく線量評価にあたっては, 散乱線による他臓器の被ばくも無視できないと考えられた。

2. X 線ビーム走査被ばく線量の測定

X 線診断における被験者の被ばく線量の指標として, 一般的に被験者人体表面の線量が用いられている。ブロードな照射と異なり細いビームによる走査では, どのように線量を評価すべきかが課題となる。本報で用いた方

Table 1 Entrance beam energies and Effective doses.

Age	Sex	BMD (g/cm ²)	BW (cm)	Entrance beam energy (10 ⁻⁸ J)	Absorption rate in bone (%)	Absorption rate in soft tissue (%)	Average tissue dose at bone (10 ⁻¹⁰ Sv)	Average tissue dose at soft tissue (10 ⁻¹⁰ Sv)	Effective dose (nSv)
44	F	0.626	1.2	1.4	5.4%	71%	1.1	6.5	5
54	F	0.652	1.1	1.2	8.2%	71%	2.4	7.9	7
46	F	0.663	1.2	1.3	7.0%	72%	1.6	7.2	6
38	F	0.676	1.3	1.5	9.2%	70%	2.0	6.3	6
38	F	0.710	1.4	1.6	7.5%	74%	1.5	6.1	5
43	F	0.712	1.3	1.5	3.3%	76%	0.7	7.1	4
52	M	0.716	1.3	1.5	9.3%	73%	2.1	6.6	6
47	M	0.718	1.3	1.5	7.9%	74%	1.4	5.8	5
41	M	0.725	1.2	1.3	11%	67%	2.0	5.1	5
51	M	0.777	1.3	1.5	6.6%	76%	1.2	6.2	5
39	M	0.789	1.3	1.5	7.5%	74%	1.3	5.2	4
31	M	0.826	1.6	1.9	5.0%	77%	1.0	5.9	4
46	M	0.838	1.5	1.7	6.4%	77%	1.4	7.6	6

Table 2 Organs weight assumptions.

Body weight (kg)	Body weight of reference (kg)	Bone weight of reference (kg)	Soft tissue weight of reference (kg)	Bone weight (kg)	Soft tissue weight (kg)
60	64	7	16	7	15
47	67	6	16	4	11
55	66	7	16	6	13
60	62	7	17	7	16
70	62	7	17	8	19
65	64	7	16	7	16
56	75	9	22	7	16
65	76	10	23	9	20
56	76	10	24	7	18
65	76	10	22	9	19
63	76	10	25	8	21
68	76	10	27	9	24
72	66	7	16	8	17

法を使うと、ブロード照射の場合も含め、被験者人体へ入射する X 線ビームのエネルギーフルエンスとビーム径やその走査に関する照射野の位置と大きさや照射時間を考慮すると実効線量に関係した評価ができる。さらに、走査に沿って、被験者からの出射ビームのエネルギーフルエンスを測定することにより、各臓器に着目した吸収線量を求められる。

本報では、各臓器における X 線の吸収割合を検出器の走査による計数値の変化から求めた。一方、骨の密度は人体により変わるが、骨の質量減衰係数は、骨粗鬆症の人を含め個人によらず一定であると仮定すると、エネルギーサブトラクションを利用し、骨の厚さと骨密度が得られ、各臓器に吸収されたエネルギーを計算することもできる。

患者被ばく線量のモニタリングは、我が国では、一部を除きほとんど行われていない現状にある。本法を用いることにより、患者毎の各臓器の吸収線量に着目した被ばく線量測定が、より容易に行なえる可能性がある。

IV 結 論

DEXA 法による橈骨骨密度測定における被検者の被ばく線量を、腕に入射する X 線エネルギーと骨および軟組織における X 線吸収割合から算定した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 検者の腕に入射する X 線のエネルギーは 1.4×10^{-8} [J] 程度で腕の幅に比例する。
- (2) 被検者の腕に入射したエネルギーのうち骨及び軟組織で吸収される割合は、骨密度及び臓器の厚さによって異なるが、概略 5~10%, 70~80% であった。
- (3) 骨及び軟組織の等価線量は、10~20 nSv, 50~80 nSv であった。また、実効線量は、概略 5 nSv であった。

骨密度測定装置は、東京都港区みなと保健所のものを使用した。また本研究では、同保健所の職員の骨密度測定データを使用した。

骨密度測定装置の測定原理などについては、株式会社アロカ田部井俊明氏よりご教示いただいた。

田中義一郎氏のレポートは、放射線医学総合研究所企画室から便宜を得て入手した。

参 考 文 献

- 1) 厚生省大臣官房統計情報部；医療施設調査 (1993,

1999)。

- 2) 飯田忠行, 砂屋敷忠, 滝川 厚, 澤田昭三, 小山 矩, 田村典子, 藤井茂久, 古賀佑彦；骨密度測定における被曝線量測定, *RADIOISOTOPES*, **48**, 577-583 (1999)。
- 3) 草間朋子, 藪内絵利子, 甲斐倫明, 別所遊子；放射線被曝を伴う骨量測定法による患者・被検者の線量測定, *医学のあゆみ*, **170**, 293-294 (1994)。
- 4) E. BEZAKOVA, P.J. COLLINS and A.H. BEDDOE；Absorbed dose measurements in dual energy X-ray absorptiometry (DXA), *Br. J. Radiol.*, **70**, 172-179 (1997)。
- 5) C.F. NJEH, S.B. SAMAT, A. NIGHTINGALE, E.A. McNEIL and C.M. BOIVIN；Radiation dose and *in vitro* precision in paediatric bone mineral density measurement using dual X-ray absorptiometry, *Br. J. Radiol.*, **70**, 719-727 (1997)。
- 6) アロカ株式会社；骨塩量測定装置 DCS-600EX シリーズ技術資料 (1997)。
- 7) ICRP；ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man (1975)。
- 8) 田中義一郎；Reference Japanese (Vol. 1), Anatomical data, Safety Analysis Report, NIRS-M-85 (1992)。
- 9) ICRP；ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (1990)。