

1. 側方電子平衡不成立領域における 4 MV X線ファントム散乱係数 (S_p) の検討

Symposium

奈良鉄造
青森県立中央病院

1. はじめに

高エネルギー光子の小照射野の出力測定においては、側方電子平衡の成立が問題となる。すでに発表した10MV X線^{1,2)}と同様に、今回、Fanoの原理に基づき、4MV X線に関する最小照射野の算出を試みた。

治療計画装置の中には、Khan³⁾の変換式を用い、深部量百分率(以下、PDD)から組織最大線量比(以下、TMR)を求めるものがある。この場合、ファントム散乱係数(以下、 S_p)が必要となる。ここでは、通常の方法による測定値から求めた S_p を側方電子平衡不成立の照射野に適用した場合の問題点とゼロ照射野のTMRについて言及する。

2. 側方電子平衡の成立条件

直線加速器は三菱電機株式会社製 ML-20MDX、治療計画装置はCMS社Focusを用いた。

側方電子平衡が成立する最小照射野の決定は、Fanoの原理に基づきFig.1に示す測定配置で行った。低密度ファントムとして、密度 0.226g/cm^3 のコルクを用いた。線源検出器間距離(SCD)は100cm、測定深は3, 5および7cmである。これらの深さの水等価深は、それぞれ0.678, 1.13および1.582cmである。照射野はSCD 100cmで、 $1\times 1\text{cm}^2$ から $20\times 20\text{cm}^2$ とした(以下の照射野は、すべてSCD 100cmでの大きさである)。測定

はCapintec社PR-05P指頭形電離箱(0.07cm^3)を用い、ビーム中心軸上で行った。

Fig.1aで、電離箱固有の壁厚(壁厚 0.22g/cm^2)による読み値 M_1 を得る。Fig.1bで、電離箱検出部分にアクリル製キャップ(厚さ 0.118g/cm^2)を付加した場合の読み値 M_2 を得る。 M_1/M_2 比を照射野の関数で表した(Fig.2)。

Fig.2によれば、水等価深 0.678cm (□印)では、 M_1/M_2 比がすべての照射野で1以下である。これは水等価深が浅いことによる前方電子平衡の崩れを示す。水等価深 1.13cm (○印)および 1.582cm (△印)では、照射野 $1.8\times 1.8\text{cm}^2$ 以下で M_1/M_2 比が1以下となり、側方電子平衡の崩れがある。

3. コリメータ散乱係数

コリメータ散乱係数(以下、 S_c)は、線源検出器間距離 300cmの空中で測定し、ビルドアップキャップを装着した電離箱による出力値の相対値として求めた。この場合、ビルドアップキャップを含めた検出器全体が照射野内に入らなければならない。基準照射野はアイソセンタで $10\times 10\text{cm}^2$ である。コリメータ角度は 0° と 90° である。

この測定にはPTW社 W23323指頭形電離箱(0.1cm^3)を用いた。ビルドアップキャップには鉛(厚さ 1.13g/cm^2)、アルミニウム(厚さ 0.97g/cm^2)およびアクリル(厚さ 0.99g/cm^2)を用いた。

ビルドアップキャップ材質とコリメータ角度の違いによる S_c の測定結果を、Table 1に示す。鉛キャップでの S_c は、他のキャップに比して小照射野で高い値となった。このような傾向は10MV X線でもみられた²⁾。アルミニウムとアクリルのキャップでは、 $10\times 10\text{cm}^2$ から $1\times 1\text{cm}^2$ までほぼ同じ値であった。これはKhan³⁾の結果と同じである。以後の測定では、検出器全体をアクリルに比して小型にできるアルミニウムキャップを用いた。

S_c の測定については、近年Gasteren⁴⁾がミニファントム法を提唱している。また、Frye⁵⁾は、4MV X線では従来のビルドアップキャップ法とミニファントム法が0.5%以内で一致すると報告している。

コリメータ角度による S_c の相違は、いずれのビルドアップキャップにおいても、

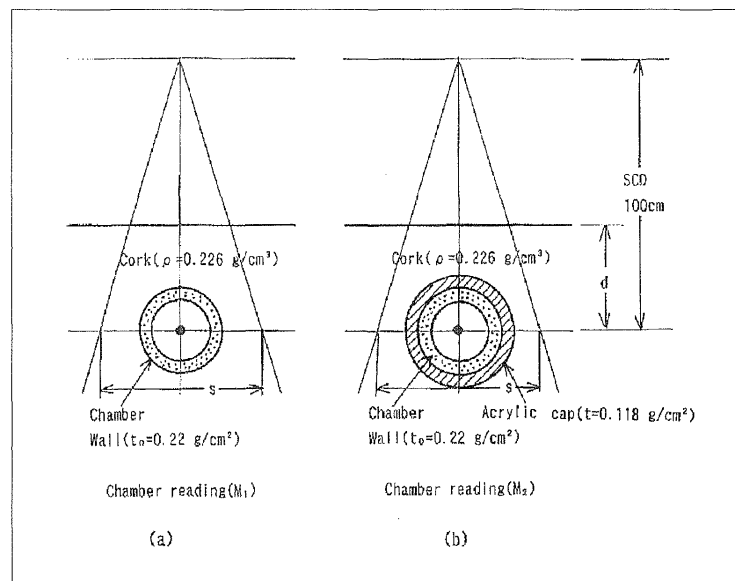


Fig. 1 Schematic diagram showing how to obtain chamber reading M_1 and M_2 in a cork phantom, respectively, without and with an acrylic cap. Both chamber readings are used for determining the minimum field size to establish lateral electronic equilibrium in the cork phantom and for correcting for the wall of the chamber placed in the cork phantom.

2×2cm²以下の照射野で生じた。この原因について、フィルム法により次のように確認した。水等価ファントムの5cm深部にX-Omat V(Kodak社製)フィルムをビーム軸に垂直に配置し、線量分布を調べた(Fig.3)。この装置のコリメータは、上絞りがモノブロック、下絞りがマルチリーフである。Fig.3から分かるように、コリメータ角度による分布の違いがみられる。このような分布の相違と検出器サイズの相対的關係が、 S_c の差として現れたことが伺われる。

4. 水等価ファントムでの全散乱係数

水等価ファントム中で、指頭形電離箱(0.07cm³)とScanditronix社p形シリコンダイオードの二種類の検出器により、全散乱係数(以下、 $S_{c,p}$)を測定した。線源検出器間距離は100cm、測定深は1cm、コリメータ角度は0°と90°である。

測定結果をTable 2に示す。いずれの検出器においても、照射野2×2cm²以下でコリメータ角度により $S_{c,p}$ に差が生じた。この差は、前節で述べた線量分布の相違によるものである。

照射野2×2cm²以下で、検出器による $S_{c,p}$ の差がみられた。このような小照射野では、側方電子平衡の崩れにより線量プロファイルの平坦領域が狭い。そこで、検出部が大きい場合には、線量の低い領域をも含めた部分の平均線量を測定する。さらに、照射される容積中の電離箱空洞容積が有意な量を占める場合には、電子平衡の崩れがさらに大きくなる。これらのことが、ダイオードと電離箱での $S_{c,p}$ の差をもたらした。よって、計算に用いた全散乱係数は、ダイオードの値を採用した。

5. ファントム散乱係数

ファントム散乱係数は次式により求めた。

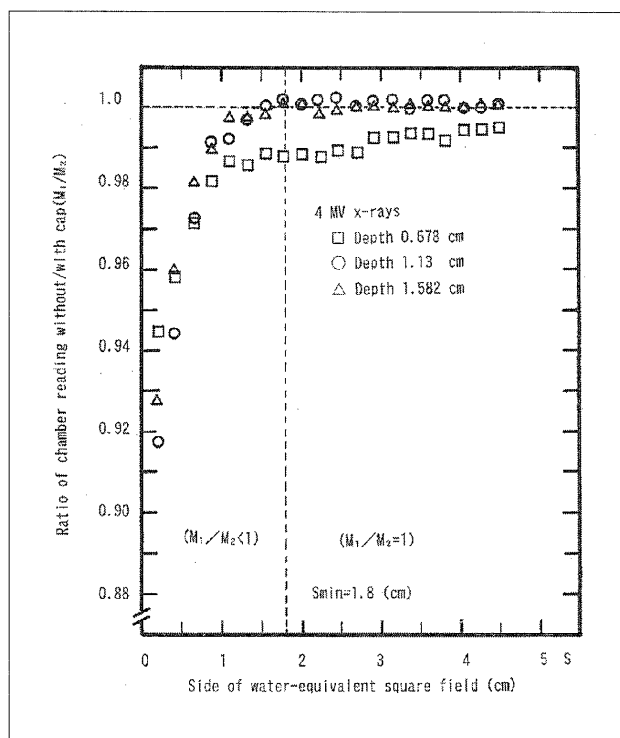


Fig. 2 Determination of the minimum square field size under lateral electronic equilibrium in a cork phantom ($\rho=0.226$ g/cm³) for 4 MV x-rays. The lateral electronic equilibrium establishes when $M_1/M_2=1$. For effective depths of 1.13 cm (○) and 1.582 cm (△), the minimum water-equivalent square field size is determined to be 1.8×1.8 cm².

$$S_p(s) = S_{c,p}(s) / S_c(s) \quad \dots\dots\dots (1)$$

5-1 水等価ファントムでのファントム散乱係数

測定から S_c と $S_{c,p}$ を用い、式(1)により計算した S_p をFig.4に○印で示す(基準照射野はアイソセンタで10×10cm²)。この図から分かるように、2×2cm²以下の照射野で S_p が1.0より大きな値となった。しかし、10×10cm²以下の照射野において $S_p \geq 1.0$ となることはなく、異常なことである。

Table 1 Effect of buildup cap thickness, materials and collimator angles on the 4 MV x-ray collimator scatter correction factors (S_c).

Beam	Source-to-chamber distance (cm)	Build-up cap thickness (g/cm ²)	Collimator angle	Side of square field (cm) defined at SCD 100 cm											
				1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2	3	4	5	6	8	10
4 MV	300	1.13 ^a	0°	0.536	0.615	0.694	0.766	0.821	0.857	0.948	0.965	0.976	0.982	0.994	1.0
			90°	0.576	0.689	0.783	0.862	0.904	0.927	0.957	0.968	0.978	0.984	0.996	1.0
		0.97 ^b	0°	0.506	0.605	0.689	0.755	0.809	0.853	0.941	0.961	0.972	0.981	0.991	1.0
			90°	0.513	0.629	0.731	0.812	0.873	0.910	0.949	0.960	0.972	0.980	0.992	1.0
		0.99 ^c	0°	0.509	0.609	0.687	0.761	0.811	0.849	0.942	0.961	0.974	0.982	0.992	1.0
			90°	0.514	0.628	0.727	0.820	0.872	0.903	0.946	0.963	0.972	0.980	0.990	1.0

a: Lead build-up cap b: Aluminum build-up cap c: Acrylic build-up cap
Detector: PTW W23323 0.1 cm³ thimble ionization chamber

5-2 コルクファントムによるファントム散乱係数

前方および側方電子平衡が崩れている場合、コルク内の線量を電離箱で正確に得るには、電離箱の壁厚の補正^{2,6)}が必要になる。その補正法についてFig.1により説明する。

アクリル製キャップの有無による電離箱の二つの読み

値を、 M_1 と M_2 とする。それぞれの読み値は、電離箱壁とキャップによる減弱を考慮すると、次式で表される。

$$M_1 = A \cdot \exp[B \cdot t_0] \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$M_2 = A \cdot \exp[B(t + t_0)] \quad \dots\dots\dots (3)$$

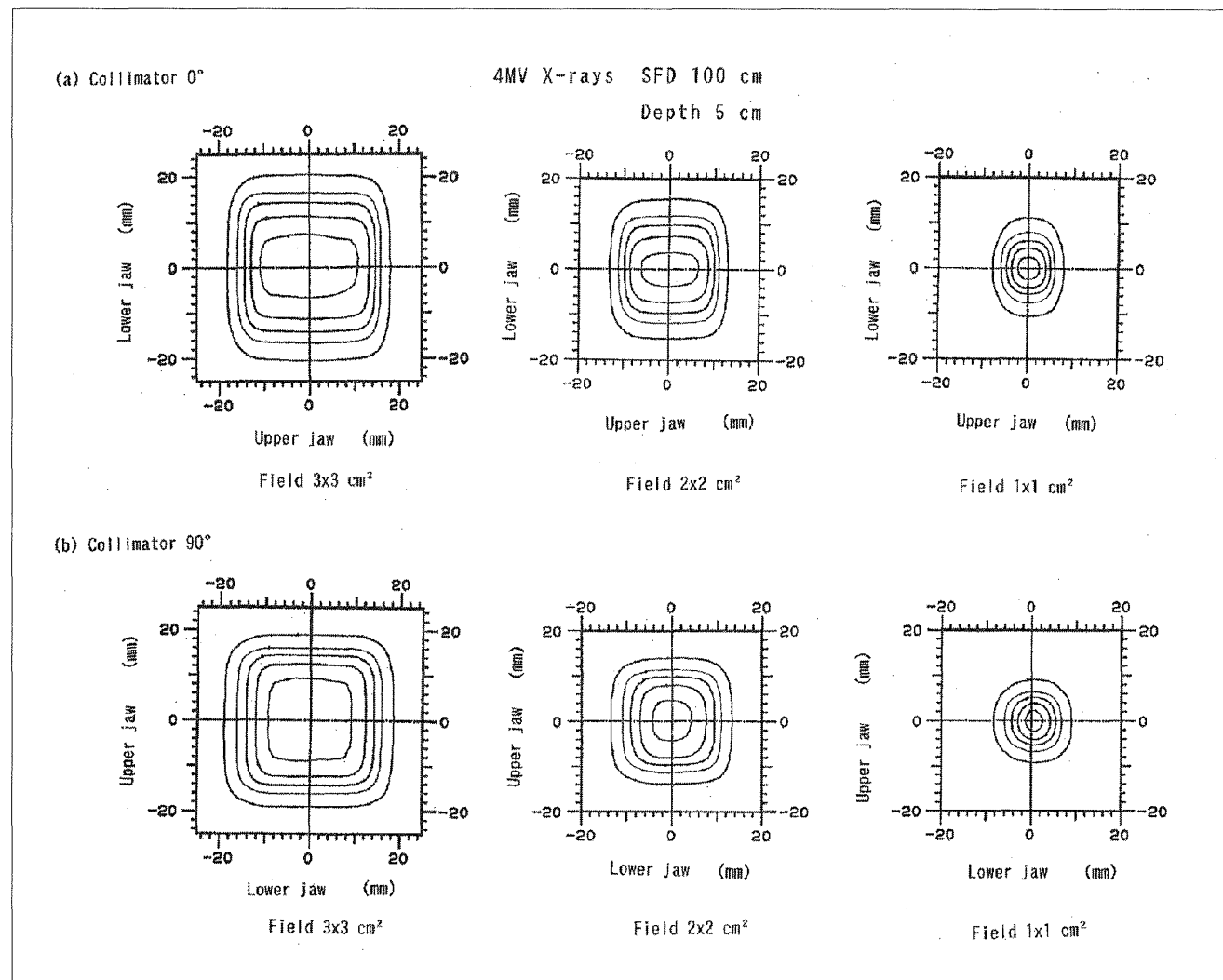


Fig. 3 Two sets of 4 MV x-ray dose distributions measured using film at depth 5 cm in a water equivalent phantom. The field at a source-film distance of 100 cm are 1×1, 2×2 and 3×3 cm². (a) is for a collimator angle of 0° and (b) for a collimator angle of 90°.

Table 2 Effect of two detectors and two collimator angles on the 4 MV x-ray total scatter correction factor ($S_{c,p}$).

Beam	Source-to-chamber distance (cm)	Detector	Collimator angle	Side of square field (cm) defined at SCD 100 cm											
				1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2	3	4	5	6	8	10
4 MV	100	Thimble	0°	0.494	0.611	0.711	0.776	0.822	0.853	0.921	0.944	0.956	0.970	0.986	1.0
			90°	0.534	0.662	0.757	0.813	0.856	0.878	0.925	0.944	0.960	0.968	0.987	1.0
		Diode	0°	0.618	0.701	0.761	0.805	0.836	0.866	0.920	0.940	0.955			1.0
			90°	0.689	0.786	0.838	0.868	0.883	0.895	0.925	0.941	0.954			1.0

Depth: 1 cm

Detector: Capintec PR-05P 0.07cm³ thimble ionization chamber (0.4 cmφ × 0.55 cm)

Scanditronix p-type silicon diode (0.15 cmφ × 0.55 cm)

ここで、 t_0 は電離箱固有の壁厚で 0.22g/cm^2 、 t はアクリルキャップの厚さで 0.118g/cm^2 である。また、 A と B は定数であり、 A は、電離箱に壁がない場合の読み値となる。 A の値は、式(2)と(3)より次式となる。

$$A = \exp \left[\log M_1 + \left(\frac{t_0}{t} \right) \cdot \log \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $A=M_c$ 、また照射野 $10 \times 10\text{cm}^2$ での水ファントム深 $\rho d\text{cm}$ での読み値を $M_w(\rho d, 10)$ とおくと、水等価ファントムに換算した S_p は次式により得られる。

$$S_p(\rho s) = \frac{M_c(\rho d, s)/S_c(s)}{M_w(\rho d, 10)/S_c(10)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 ρ はコルクの密度(0.226g/cm^3)、 d と s はコルクファントム内での、それぞれ測定深と正方形照射野の一辺の長さである。また、定義より、 $S_c(10)=1.0$ である。

この方法で求めた基準深 1cm での S_p をFig.4に示す。図中の△印は、三つの深さ(水等価深に換算して、 1.13 、 1.582 と 2.034cm)から外挿により求めた。Focusに入力した S_p は、この基準深での S_p である。ここで求めた S_p を外挿することで、ゼロ照射野の S_p を求めた。その値は 0.80 であった。

6. Focusによる組織最大線量比

Focusでは、Khanらの提案した式³⁾を用い、PDDからTMRを求める。Fig.5に上記の方法で求めたTMR(○印)と固体ファントムによる実測TMR(+印)を示す。Khanの変換式は側方電子平衡の成立が前提であるが、式(5)による S_p を用いた場合には、Fig.5から明らかに両者の間に良好な一致がみられた。ただし、ゼロ照射野のTMRは、Focusの計算値と側方電子平衡不成立領域のTMRの外挿値で差が生じた。この差は 10MV X線ほど大きなものではない²⁾。

7. まとめ

Fanoの原理に基づき、 4MV X線において側方電子平衡が成立する最小照射野を求めた。また、側方電子平衡不成立の小照射野のファントム散乱係数について検討し、次の結果を得た。

- 1) ビーム中心軸上で側方電子平衡が成立する最小照射野は、水中において $1.8 \times 1.8\text{cm}^2$ である。
- 2) 今回用いた加速器では $2 \times 2\text{cm}^2$ 以下の照射野で、コリメータ角度依存がみられた。
- 3) 側方電子平衡の成立領域と不成立領域からのゼロ照射野の外挿TMR値には差がみられた。

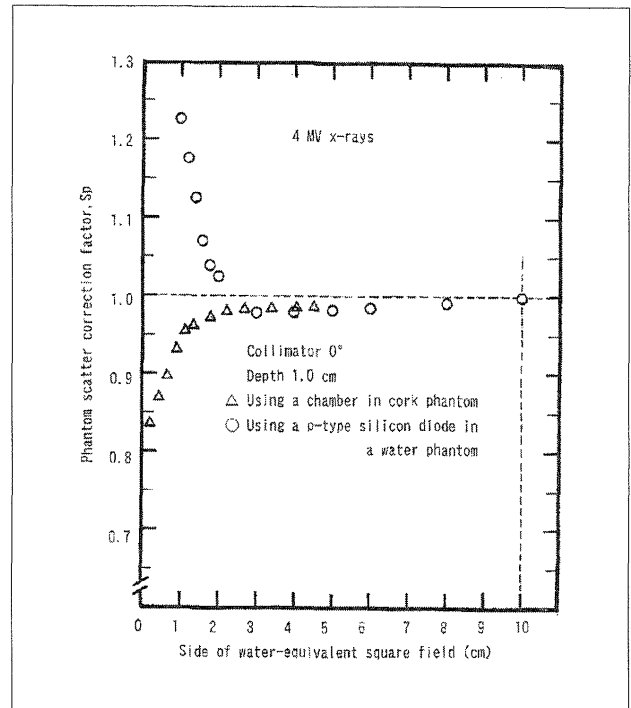


Fig. 4 Two sets of 4MV x-ray phantom scatter correction factors (S_p) with water-equivalent square field side, obtained at an effective depth of 1cm . (Δ) data are measured using a chamber within a cork phantom ($\rho=0.226\text{g/cm}^3$). ($\circ$) data are measured using a p-type silicon diode in a water phantom.

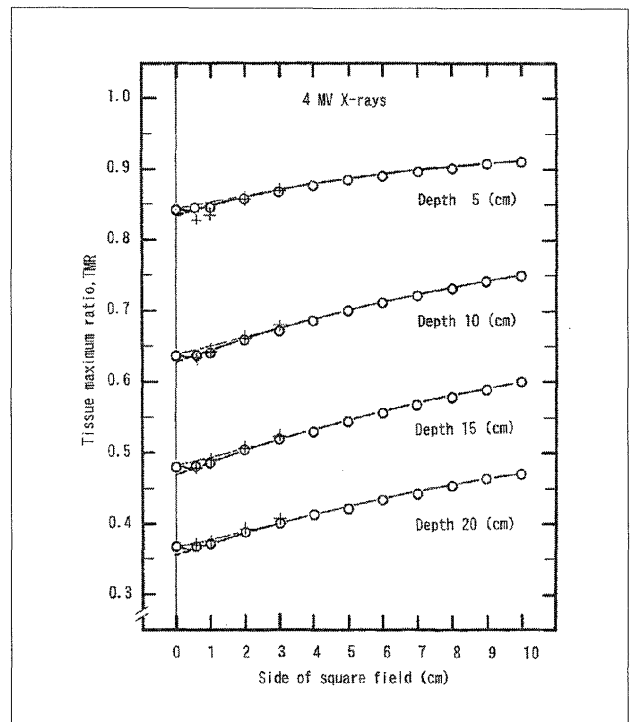


Fig. 5 Two sets of 4MV x-ray tissue-maximum ratios (TMR) in water with square field side at depths of 5 , 10 , 15 and 20cm at a SCD of 100cm . One ($\circ$) is obtained using the PDD data at square fields of $3 \times 3\text{cm}^2$ and more. Still another (+) is directly measured TMR data at square fields of 0.6×0.6 – $3 \times 3\text{cm}^2$. As may be seen from the diagram, two different zero-area TMRs can be obtained by extrapolation at each depth.

参考文献

- 1) Iwasaki A: 10 MV x-rays SMRs obtained using zero-area S_p correction factors derived by means of the Bjärngard-petti method. Phys. Med. Biol., 41 (4), 625-636, (1996).
- 2) 奈良鉄造, 洞内美明, 小山帝任, 他: 10MV X線照射における側方電子平衡不成立領域でのファントム散乱補正係数. 日放技学誌, 54 (3), 16-22, (1998).
- 3) Khan FM, Sewchand W, Lee J, et al.: Revision of tissue-maximum ratio and scatter-maximum ratio concepts for cobalt 60 and higher energy x-ray beams. Med. Phys., 7 (3), 230-237 (1980).
- 4) Van Gasteren JJM, Heukelom S, Van Kleffens HJ, et al.: The determination of phantom and collimator scatter components of the output of megavoltage photon beams: measurement of the collimator scatter part with a beam-coaxial narrow cylindrical phantom. Radiother. Oncol., 20, 250-257, (1991).
- 5) Frye DMD, Paliwal BR, Thomadsen BR, et al.: Inter-comparison of normalized head-scatter factor measurement techniques. Med. Phys., 22 (2), 249-253, (1995).
- 6) 奈良鉄造: 2 種類の指頭型電離箱による胸部ファントム内の吸収線量測定. 日放技学誌, 45 (12), 1812-1818, (1989).

図表の説明

- Fig. 1 概要図はそれぞれアクリル製キャップがない場合とある場合の, コルクファントム中の電離箱読み値 M_1 , M_2 を得る方法を示す. 両方の電離箱読み値はコルクファントム中にて側方電子平衡が成立する最小照射野の決定と電離箱壁厚補正のために使用される.
- Fig. 2 4 MV X線によるコルクファントム ($\rho=0.226\text{g/cm}^3$) 中で側方電子平衡が成立する最小照射野の決定. $M_1/M_2=1$ のとき, 側方電子平衡が成立する. 各々の実効深 1.13cm (○), 1.582cm (△) で最小水等価正方形照射野は $1.8 \times 1.8\text{cm}^2$ である.
- Fig. 3 4 MV X線による水等価ファントム深 5cm における等線量分布図. 線源フィルム間距離 100cm, 照射野 1×1 , 2×2 , $3 \times 3\text{cm}^2$ である. (a) がコリメータ角度 0 度, (b) がコリメータ角度 90 度を示している.
- Fig. 4 基準深 1cm での 2 組の 4 MV X線のファントム散乱補正係数 (S_p). (△) はコルクファントム ($\rho=0.226\text{g/cm}^3$) 内の電離箱測定値による. (○) は水等価ファントム内の p 形シリコンダイオード測定値による.
- Fig. 5 SCD 100cm で深さ 5, 10, 15, 20cm での 2 種類の 4 MV X線水中組織最大線量比 (TMR) を正方形照射野辺の長さに対して示す. (○) は正方形照射野 $3 \times 3\text{cm}^2$ 以上の PDD を用いて得られた. (+) は直接測定した正方形照射野 $0.6 \times 0.6 \sim 3 \times 3\text{cm}^2$ の TMR を示す. 図から分かるように, 各深さで外挿で得られる照射野ゼロの TMR には異なる 2 種類が存在する.

Table 1 4 MV X線のコリメータ散乱補正係数 (S_c) に作用するビルドアップキャップの厚さと材質およびコリメータ角度の効果.

Table 2 4 MV X線の全散乱補正係数 ($S_{c,p}$) に作用する 2 種類の検出器とコリメータ角度の効果.

2. ナロー・ビームの線量評価

Symposium

後藤紳一
長崎大学医学部附属病院

1. はじめに

ナロー・ビームはその線束がアイソセンタにおいて 1~3cm と小さく, 至適線量算出のための線量評価^{1,2)} が難しい. 最も問題となる点は, 側方電子平衡が成立しなくなることである. このため, 線束より小さな検出器を用いて測定を行う必要がある. また, 治療計画に必要なデータは, 組織最大線量比 (tissue maximum ratio: TMR) と軸外線量比 (off center ratio: OCR) および全散乱補正係数 (total scatter factor: $S_{c,p}$) である.

2. 対象と方法

ライナック (Clinac2100C, Varian 社製) から得られる 10MV X線のナロー・ビームの測定を行った. ナロー・ビームはライナックの上下絞りを $5 \times 5\text{cm}^2$ に固定し, 円筒型コリメータ (CBI system, Fischer 社製) によりサイズを変化させて測定した. 測定に用いた検出器

は, レディーパックの写真フィルム (XV-2, Kodak 社製), ダイヤモンド検出器³⁾ (M60003, PTW 社製), p 型シリコン検出器 (EDD-5, Scanditronix 社製), マイクロチャンバ¹⁾ (FDC-9.4UC, フジテック社製) を用いた.

ダイヤモンド検出器の検出部は円形の天然ダイヤモンドで, $0.28 \pm 0.01\text{mm}$ の厚さで 3.0mm 径の円筒型であった. 使用するとに約 500cGy の事前照射を行い検出器のレスポンスを安定させた.

p 型シリコン検出器は 0.5mm 厚のシリコンのダブルチップからなり, 長径は 1.5mm であった. 検出部は水等価計算で, 4.5mm の厚さとなるビルドアップ材により覆われた. マイクロチャンバの径と長さは外径で $3.2\text{mm} \phi \times 2.9\text{mm}$ であった. すべての検出器は基準線量計 (M30001, PTW 社製) を用い, 基準照射野 ($10 \times 10\text{cm}^2$) での TMR によるレスポンスを事前に調べ相互比較