

コンボリューション法に用いる高エネルギーX線 一次及び散乱ドーズカーネルの開発

弘前大学大学院医学系研究科保健学専攻

笹森 真実、岩崎 晃、木村 重伸、清野 守央、駒井 史雄

I. 序論

放射線治療計画(radiotherapy treatment planning:RTP)システムにおいて、正確な線量分布図の作成は重要である。X線の線量計算は、不均質媒体の存在における組織線量補正に関して多くの方法が長年に亘って考えられてきた。線量計算法は、補正係数法からコンボリューション法やモンテカルロ法等のモデルベース法(コンボリューション法, モンテカルロ法)に変わりつつある^{1,2)}。補正係数法は最も単純な状況下での線量計算に用いられてきた。この方法は、まず全領域が水であると仮定して線量計算を行い、次に補正係数を導入して不均質組織内での線量を得る方法である³⁻⁵⁾。モデルベース法は、市販されている放射線治療計画(RTP)システムの一部に採用され、その計算精度のさらなる向上が図られている。

現在利用できる線量計算法においては、モンテカルロ法だけが不均質媒体内での光子や電子輸送の全過程を記述できる。モンテカルロ法の利点の一つは、各粒子(光子, 電子, 陽子)の輸送について詳細な情報が得られることから、医用加速器の光子やその相互作用で生じる各粒子のエネルギー分布, 角度分布又は線量分布などの詳細な分析に利用できることである⁶⁾。また、これらの情報は、線量測定や放射線治療計画(RTP)システムの基礎的・応用的研究において、治療ビームの重要な物理学的知識・情報を提供する。また、これらの情報の中には、実際の臨床現場では測定器のサイズなどの物理的な制約のために測定が困難なものがある。EGSnrcコード⁷⁾は各粒子の輸送に関する詳細な分析が可能で、医用加速器から発生する治療ビームの特性を理解する上で有用なコード系である。モンテカルロ法は組織の不均質性が線量分布に与える影響、並びに一次線量と散乱線量の分離などの複雑な放射線エネルギー輸送の問題を研究する上で非常に役立つ手法である⁸⁾。しかしながら、現段階ではモンテカルロ法を採用した放射線治療計画を遂行する場合、非常に長い時間を要する。モンテカルロ法による線量計算に関する長所及び短所についてはMohanら⁹⁾が論じている。

一方、X線ビームの照射による媒体内の任意点における線量は、一次及び散乱線量に分離できる。一次線量は、その任意点に到達する前に媒体と相互作用しない一次光子から直接的に与えられる線量である。散乱

線出力を算出する方法を開発した。

II. 方法

1. 理論

本法では、水衝突カーマ³⁾でもって空中 X 線出力を評価するものとする。また、照射野(A_0)は、ガントリヘッド内の上部及び下部に位置する対のジョウコリメータによるアイソセンタ面での矩形照射野とする(図 1)。

(1) 軸外コリメータ散乱係数(off-axis S_c)

照射野(A_0)において、軸外コリメータ散乱係数(off-axis S_c)を次のように定義する(図 1 参照)。

$$S_c(X_0, Y_0; A_0)_{\text{off-axis}} = H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; A_0) / H_{\text{jaw}}(0, 0; 10 \times 10) \quad (1)$$

ここで、(X_0, Y_0)は、アイソセンタ面において、アイソセンタを原点にした二次元直交座標を表す。 $P(X_0, Y_0)$ は計算点を表す。 $H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; A_0)$ は、照射野(A_0)での点 P における空中 X 線出力(相対値)を表す。 $H_{\text{jaw}}(0, 0; 10 \times 10)$ は、アイソセンタに関して対称な基準照射野($10 \times 10 \text{ cm}^2$)でのアイソセンタでの空中 X 線出力を表す。式(1)より、

$$S_c(0, 0; 10 \times 10)_{\text{off-axis}} = 1 \quad (2)$$

が得られる。つまり、式(1)は、アイソセンタにおいて、照射野 $A_0 = 10 \times 10 \text{ cm}^2$ での空中 X 線出力に正規化されている。 $H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; A_0)$ の計算は、Zhu ら⁴⁾ の概念を利用して、単位モニタユニット(MU)当たり、次のように改良した(図 1)。

$$H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; A_0) = (1 + a_1 \cdot C_0^{\text{eq}}) \times [1 \cdot G_T(X_0, Y_0) + a_2 \cdot G_F(X_0, Y_0)] \quad (3)$$

ここで、

$$G_T(X_0, Y_0) = \frac{1}{\pi(\lambda_T/2)^2} \int_{S_T} \exp[-R_T^2 / (\lambda_T/2)^2] dS_T, \quad (4)$$

$$G_F(X_0, Y_0) = \frac{1}{\pi(\lambda_F/2)^2} \int_{S_F} \exp[-R_F^2 / (\lambda_F/2)^2] dS_F \quad (5)$$

である。(Zhu らは、X 線ターゲットを点線源と見なしており、そこからの空中 X 線出力の計算には上記のようなガウス関数を用いないで、単に $G_T = 1$ と設定している)。ここで、空中 X 線出力を生成する線源は X 線ターゲット及びフラットニングフィルタのみと仮定している。図 1 において、 O_T は X

線ターゲットの中心に位置し、 O_F は O_T と点 P を結んだフラットニングフィルタ面上の点を示す。式(4)において、 S_T は、点 P からジョウコリメータを介して見えるX線ターゲット面での線源面積・形状を表す。 R_T は、 O_T からの面積素(dS_T)までの距離を表す。 $\lambda_T/2$ は、その面におけるX線ターゲット線源の実効半径を表す。 $S_T = \infty$ ($A_0 = \infty$)に対しては、式(4)の右辺は「1」となる。同様に、式(5)において、 S_F は、点 P からジョウコリメータを介して見えるフラットニングフィルタ面での線源面積・形状を表す。 R_F は、 O_F からの面積素(dS_F)までの距離を表す。 $\lambda_F/2$ は、その面におけるフラットニングフィルタ線源の実効半径を表す。 $S_F = \infty$ ($A_0 = \infty$)に対しては、式(15)の右辺は「1」となる。つまり、 a_2 は無射野において、X線ターゲットからの単位X線出力に対する、フラットニングフィルタからのX線出力を表す。(後述する実験結果から、 λ_T , λ_F , a_1 , a_2 の値は、与えられたエネルギーのX線に対して、実質的に計算点(X_0, Y_0)に依存しないことが得られている)。

高エネルギー直線加速装置におけるX線の投与線量の制御は、ジョウコリメータ上部に位置する透過形モニタ電離箱での電離量で行われている。有限射野では、透過形モニタ電離箱は、ジョウコリメータからの後方散乱(X線及び二次電子)の影響を受ける。この影響を考慮して、式(3)中には $(1 + a_1 \cdot C_0^{eq})$ の項目が入っている。ここで、 a_1 は定数、 C_0^{eq} はジョウコリメータ射野(A_0)の等価正方形射野の一辺を表す。

式(1)において、 $X_0 = 0$, $Y_0 = 0$ (つまり、アイソセンタ)とすると、この式は、通常のコリメータ散乱係数(S_c)を表す⁵⁾。つまり、

$$S_c(A_0) = H_{\text{jaw}}(0, 0; A_0) / H_{\text{jaw}}(0, 0; 10 \times 10) \quad (6)$$

である。また、式(1)を

$$S_c(X_0, Y_0; A_0)_{\text{off-axis}} = H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; A_0) / H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; 10 \times 10) \quad (7)$$

と変形すると(ただし、点(X_0, Y_0)は、基準射野($10 \times 10 \text{ cm}^2$)の中心に設定する)、これは、アイソセンタ以外でのコリメータ散乱係数(S_c)を表す。

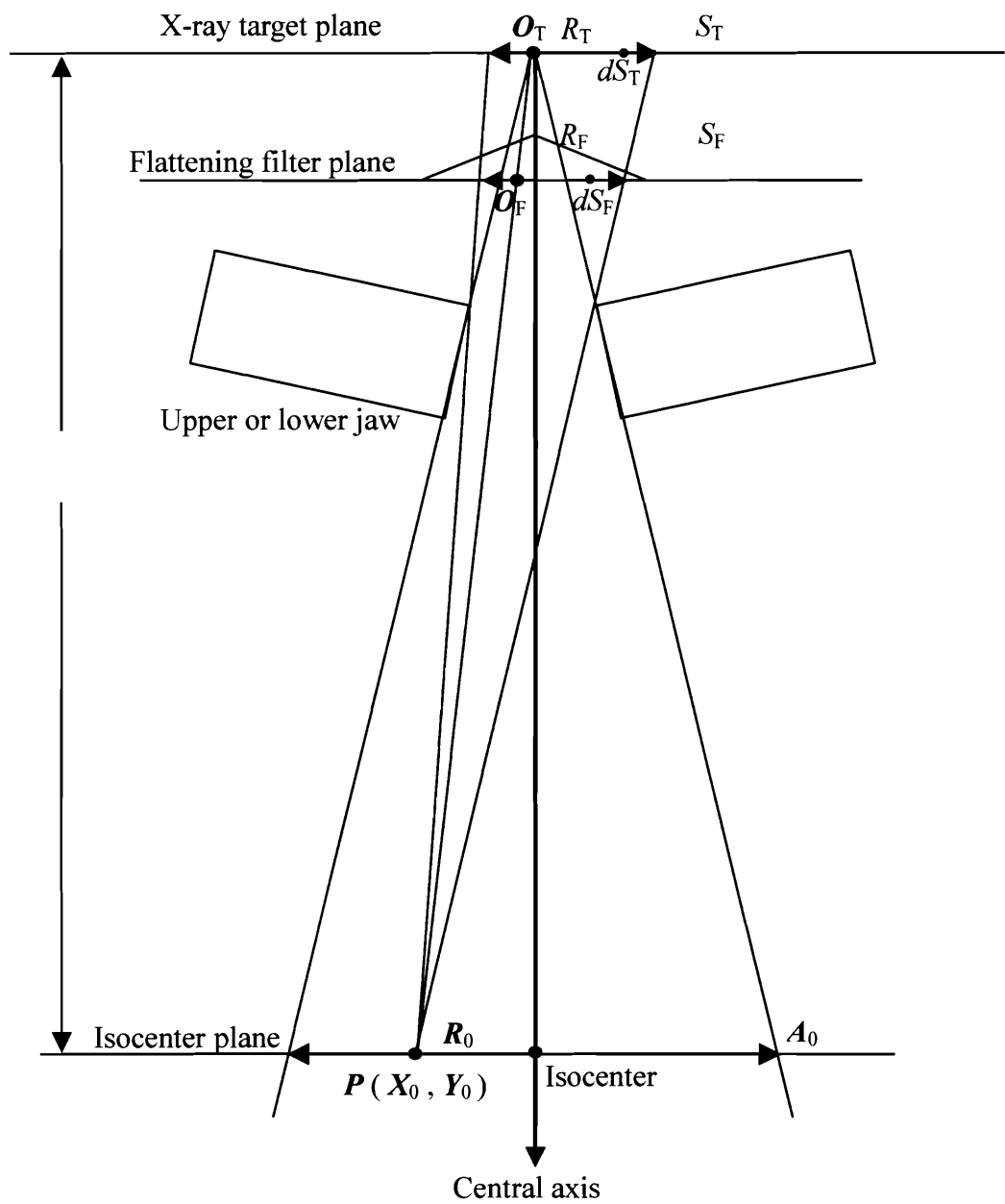


図1 空中X線出力を計算するための概略図. 空中X線出力は, アイソセンタ面上の任意の点 $P(X_0, Y_0)$ で計算されている.

(2) 線源軸外線量比 (OCR_{source})

与えられた照射野 (A_0) において, 空中水衝突カーマで評価した水軸外線量比 (OCR_{water}) を次のように定義する (図1).

$$\text{OCR}_{\text{water}}(X_0, Y_0; A_0) = K_{\text{water}}(X_0, Y_0; A_0) / K_{\text{water}}(0, 0; A_0) \quad (8)$$

ここで、 $K_{\text{water}}(X_0, Y_0; A_0)$ は点 (X_0, Y_0) における空中水衝突カーマである。

無限照射野における水軸外線量比($\text{OCR}_{\text{water}}$)は、式(3)の H_{jaw} を利用すると次式のように求めることができる。

$$\text{OCR}_{\text{water}}(X_0, Y_0; \infty) = \text{OCR}_{\text{water}}(X_0, Y_0; A_0) \times \frac{H_{\text{jaw}}(0, 0; A_0)}{H_{\text{jaw}}(X_0, Y_0; A_0)} \quad (9)$$

ただし、照射野(A_0)の中心点はアイソセンタ $(0, 0)$ と一致させることが必要である。この計算点において、 H_{jaw} は最高値を示す。

照射野が比較的大きい場合、その中央部での空中 X 線出力分布は、一般にアイソセンタに関して対称である。無限照射野における水軸外線量比($\text{OCR}_{\text{water}}$)を軸外距離だけの関数と仮定して、 $R_0 = (X_0^2 + Y_0^2)^{1/2}$ を用いて、

$$\text{OCR}_{\text{source}}(R_0) = \text{OCR}_{\text{water}}(R_0) = \text{OCR}_{\text{water}}(X_0, Y_0; \infty) \quad (10)$$

とおく。この場合、 $\text{OCR}_{\text{source}}(0)=1$ (最小値)となる。フラットニングフィルタの形状は、水中の所定の深さでの等線量分布がビーム軸に垂直になるように、周辺部に向かうにつれ、その厚さを薄くしている。その結果、周辺に向かうにつれ軟線成分の X 線量が相対的に増加し、その X 線強度が軸外距離と共に増加するようになる。

(3) キャップ軸外線量比(OCR_{cap})

水衝突カーマで評価した水軸外線量比($\text{OCR}_{\text{water}}$)の算出は、ビルドアップキャップ付きの指頭形電離箱による測定に基づいて行うことにする。通常、指頭形電離箱固有の壁厚は非常に薄いので、ここでは、指頭形電離箱の測定値は、壁による影響を受けないと仮定する。さらに、ここでは、キャップ厚の影響をも受けないと仮定する。よって、測定値はビルドアップキャップの材質を反映した衝突カーマ (キャップ衝突カーマ) となる。

一般に、X 線のスペクトルは軸外距離(R_0)だけの関数になっている。ここで、 $F(R_0)$ を軸外距離 R_0 における全エネルギーフルエンス、 $\Psi_0(R_0; E_i)$ を軸外距離 R_0 でのエネルギービン E_i 、エネルギービン幅 ΔE_i ($i = 1 \sim i_{\text{max}}$) に対するエネルギーフルエンスを表す。ただし、

$$\sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i = 1 \quad (11)$$

と正規化する。よって、キャップ軸外線量比(OCR_{cap})は、次のように表される。

$$OCR_{cap}(R_0) = \frac{F(R_0) \times \sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}}{F(0) \times \sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}} \quad (12)$$

ここで、 $[\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}$ は、光子エネルギー E_i に対するキャップ媒体の質量エネルギー吸収係数を表す。他方、この X 線スペクトルを用いると、式(10)の水軸外線量比(OCR_{water})は、

$$OCR_{water}(R_0) = \frac{F(R_0) \times \sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}}{F(0) \times \sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}} \quad (13)$$

と表すことができる。ここで、 $[\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}$ は、光子エネルギー E_i に対する水の質量エネルギー吸収係数を表す。

従って、式(12)及び(13)より、

$$OCR_{water}(R_0) = OCR_{cap}(R_0) \times \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}}{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}} \times \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}}{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}} \quad (14a)$$

となる。つまり、水軸外線量比(OCR_{water})は測定可能なキャップ軸外線量比(OCR_{cap})から導出できる。なお、有限照射野(A_0)及び測定点(X_0, Y_0)に対しては、

$$OCR_{water}(X_0, Y_0; A_0) = OCR_{cap}(X_0, Y_0; A_0) \times \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}}{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{cap}} \times \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}}{\sum_{i=1}^{i_{max}} \Psi_0(0; E_i) \Delta E_i [\mu_{en}(E_i) / \rho]_{water}} \quad (14b)$$

となる。ここで、 $R_0 = (X_0^2 + Y_0^2)^{1/2}$ である。

(4) 空中 X 線出力係数 (OPF_{in-air})

上記の軸外コリメータ散乱係数(off-axis S_c)及び線源軸外線量比(OCR_{source})を用いると、与えられた照射野(A_0)において、任意の点(X_0, Y_0)での空中 X 線出力(OP_{in-air})は、

$$OPF_{in-air}(X_0, Y_0; A_0) = S_c(X_0, Y_0; A_0)_{off-axis} \times OCR_{source}(R_0) \quad (15)$$

となる。ここで、 $R_0 = (X_0^2 + Y_0^2)^{1/2}$ である(図1)。これを空中X線出力係数(OPF_{in-air})と呼ぶことにする。 $A_0 = 10 \times 10 \text{ cm}^2$ に対しては、アイソセンタ($X_0 = 0, Y_0 = 0; R_0 = 0$)において、空中X線出力係数(OPF_{in-air})は、

$$OPF_{in-air}(0,0;A_0 = 10 \times 10) = 1 \quad (16)$$

となる。

2. 測定

実験には、4及び10 MV X線を放出できる高エネルギー直線加速装置 EXL-15DP(三菱電機株式会社製)を用いた。

(1) コリメータ散乱係数(S_c)

直線加速装置のガントリヘッド内からは、混入電子^{6,8,9}が放出している。精度の高いコリメータ散乱係数(S_c)を測定する場合、この混入電子が測定値に入らないようにしなければならない。最近では、コリメータ散乱係数(S_c)を測定する場合、アクリル製ビルドアップキャップ(一般に市販のキャップの厚さは、混入電子を完全に遮るほどになっていない)ではなく、アクリル製ミニファントムを使用している施設が多い^{6,7,10,11}。アクリル製ミニファントムを用いたコリメータ散乱係数(S_c)の測定法は、Van Gasterenら⁷)によって報告された測定法を参考にした。

式(6)及び(7)のコリメータ散乱係数(S_c)の測定には、指頭形電離箱(0.6 cm^3)にそれぞれアクリル製ミニファントム($2 \text{ cm } \phi$ 又は $4 \text{ cm } \phi$)及び鉛製キャップを装着させて行った。線源検出器間距離(SCD)は、 100 cm 一定とした。図2に示すように、アクリル製ミニファントム(4, 10 MV X線用)では、(a)高さ 10 cm 、直径 4 cm の円柱形ファントム、(b)高さ 10 cm 、直径 2 cm の円柱形ファントムとした。次に、鉛製キャップにおいては、(c)10 MV X線用として、高さ 5.2 cm 、直径 1.33 cm の鉛製キャップを使用した。(d)4 MV X線用として、高さ 2.3 cm 、直径 1.1 cm の鉛製キャップを使用した。混入電子を十分に除去できる鉛厚さを考慮し、4 MV X線に対してはキャップ厚(0.12 g/cm^2)、10 MV X線に対してはキャップ厚(0.31 g/cm^2)にした。

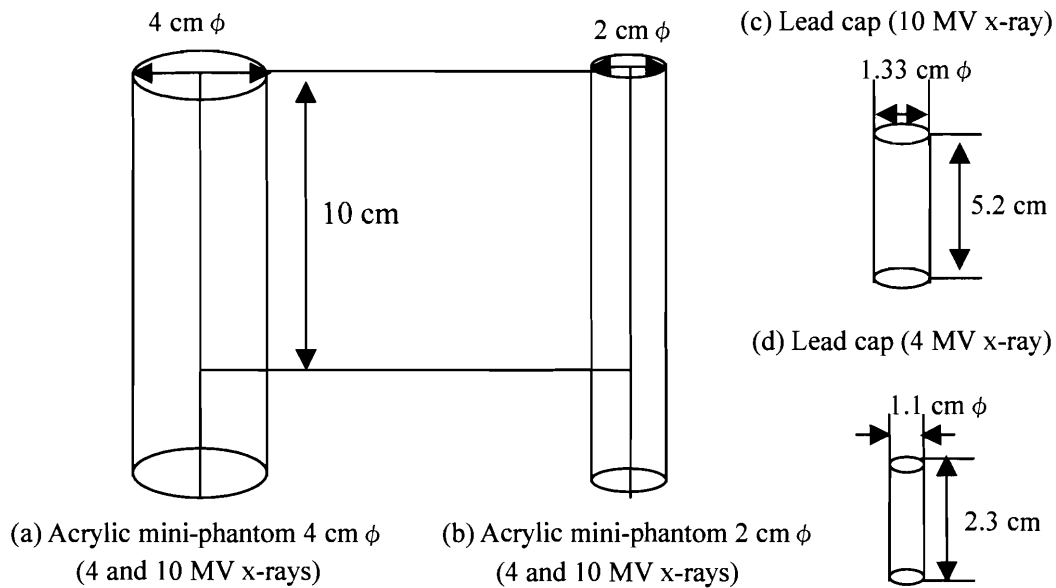


図2 アクリル製ミニファントム4及び10 MV X線用(a) 4 cm ϕ 並びに(b) 2 cm ϕ の形状、並びに鉛製キャップ10 MV用(c) 1.33 cm ϕ 及び4 MV用(d) 1.1 cm ϕ の形状。

アイソセンタにおけるコリメータ散乱係数(S_c)^{8,9,12,13}の測定配置を図3に示す。照射野(A_0)は、 $A_0=0 \times 0 \text{ cm}^2 \sim 40 \times 40 \text{ cm}^2$ と変化させた。ただし、アクリル製ミニファントム4及び2 cm ϕ を用いたとき、妥当な測定値が得られる最小照射野(A_0)は、それぞれ $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 及び $2 \times 2 \text{ cm}^2$ にした。なぜなら、線源検出器間距離(SCD)100 cmで測定した時、各々のアクリル製ミニファントムにおいて、その最小照射野以下では不確かな値を示す^{5,8,9}ことになるためである。鉛製キャップを用いたとき、同様な理由で最小照射野(A_0)は、 $1.4 \times 1.4 \text{ cm}^2$ にした。

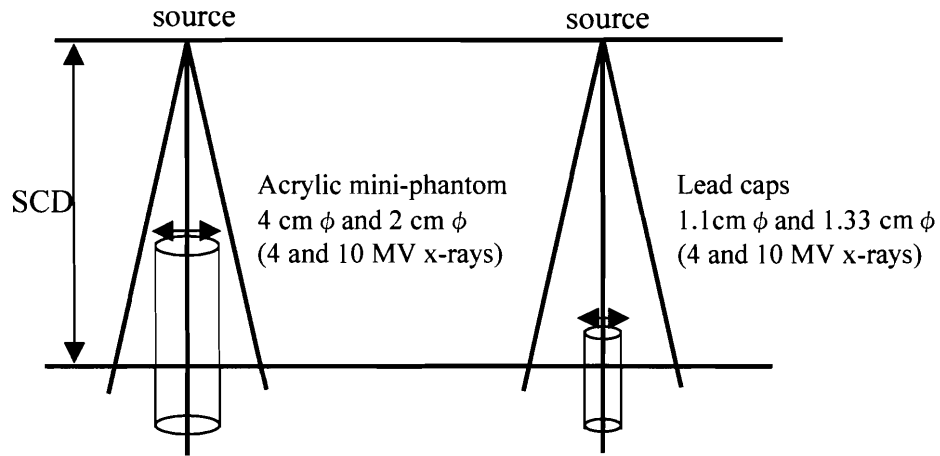


図3 アイソセンタにおけるコリメータ散乱係数(S_c)の測定配置(4及び10 MV X線).

アイソセンタ以外のコリメータ散乱係数(S_c)の測定配置を図4に示す(この配置図は、保科¹⁴⁾が考案した測定法を参考にした)。ただし、式(7)における X_0 及び Y_0 については、 $X_0 = R_0$ (軸外距離)、 $Y_0 = 0$ と設定した。図4において、 $a = 100 \text{ cm}$ 、 $L + l = 100 \text{ cm}$ であり、 θ はガントリの回転角を表す。これらの間には、

$$\sin \theta = a / X_0 \quad (17)$$

$$\cos \theta = a / L \quad (18)$$

の関係がある。式(17)及び(18)を用いることで、治療台の下げ幅はアイソセンタからの距離 $l = 100 - L$ (cm)になる。軸外距離 $R_0 = 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 \text{ cm}$ と変化させた場合、ガントリの回転角は、それぞれ $\theta = 1.43, 2.87, 4.31, 5.74, 7.18, 8.63^\circ$ となる。治療台の下げ幅(l)は、それぞれ $l = 0.031, 0.125, 0.282, 0.501, 0.784, 1.132 \text{ cm}$ となる。よって、線源検出器間距離(SCD)は100 cm一定となる。照射野(A_0)は、(i)軸外距離 $R_0 = 2.5 \text{ cm}$ のとき、 $A_0 = 0 \times 0 \text{ cm}^2$ から $35 \times 35 \text{ cm}^2$ まで、(ii)軸外距離 $R_0 = 5 \text{ cm}$ のとき、 $A_0 = 0 \times 0 \text{ cm}^2$ から $30 \times 30 \text{ cm}^2$ まで、(iii)軸外距離 $R_0 = 7.5 \text{ cm}$ のとき、 $A_0 = 0 \times 0 \text{ cm}^2$ から $25 \times 25 \text{ cm}^2$ まで、(iv)軸外距離 $R_0 = 10 \text{ cm}$ のとき、 $A_0 = 0 \times 0 \text{ cm}^2$ から $20 \times 20 \text{ cm}^2$ まで、(v)軸外距離 $R_0 = 12.5 \text{ cm}$ のとき、 $A_0 = 0 \times 0 \text{ cm}^2$ から $15 \times 15 \text{ cm}^2$ まで、(vi)軸外距離 $R_0 = 15 \text{ cm}$ のとき、 $A_0 = 0 \times 0 \text{ cm}^2$ から $10 \times 10 \text{ cm}^2$ までそれぞれ変化させ測定した。

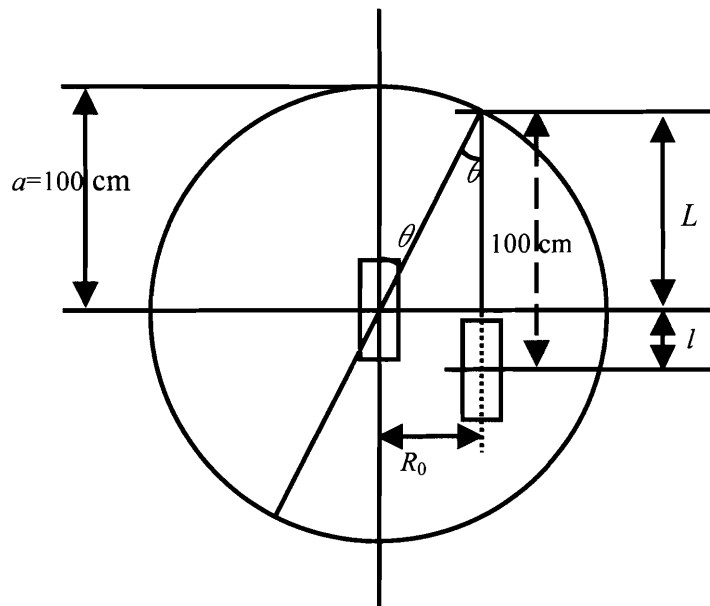


図4 アイソセンタ以外のコリメータ散乱係数(S_c)の測定配置図. a は線源回転軸間距離($a=100$ cm), R_0 は軸外距離, θ はガントリ回転角度(アクリル製ミニファントム 4 cm ϕ , 2 cm ϕ , 鉛キャップ 1.1 cm ϕ , 1.33 cm ϕ).

(2) キャップ軸外線量比 (OCR_{cap})

キャップ軸外線量比 (OCR_{cap})の測定では, 4 及び 10 MV X線のそれぞれに対して, アクリル製, アルミ製, 鉛製のビルドアップキャップを使用した. キャップの構造を図5に示す. ここで, (a)は 4 MV用アクリル製ビルドアップキャップ, (b)は 10 MV用アクリル製ビルドアップキャップ, (c)は 4 MV用アルミ製ビルドアップキャップ, (d)は 10 MV用アルミ製ビルドアップキャップ, (e)は 4 MV用鉛製キャップ, (f)は 10 MV用鉛製キャップをそれぞれ表す. これらのキャップにおいては, 測定値に混入電子が入らない厚さにした (4 MV X線に対する厚さは 1.4 g/cm², 10 MV X線に対する厚さは 3.5 g/cm²). 測定配置を図6に示す. 照射野(A_0)を最大照射野 40×40 cm², 線源検出器間距離(SCD)を 100 cm とした. 空中測定範囲は, $X_0 = -22 \sim 22$ cm ($Y_0 = 0$ cm) とした.

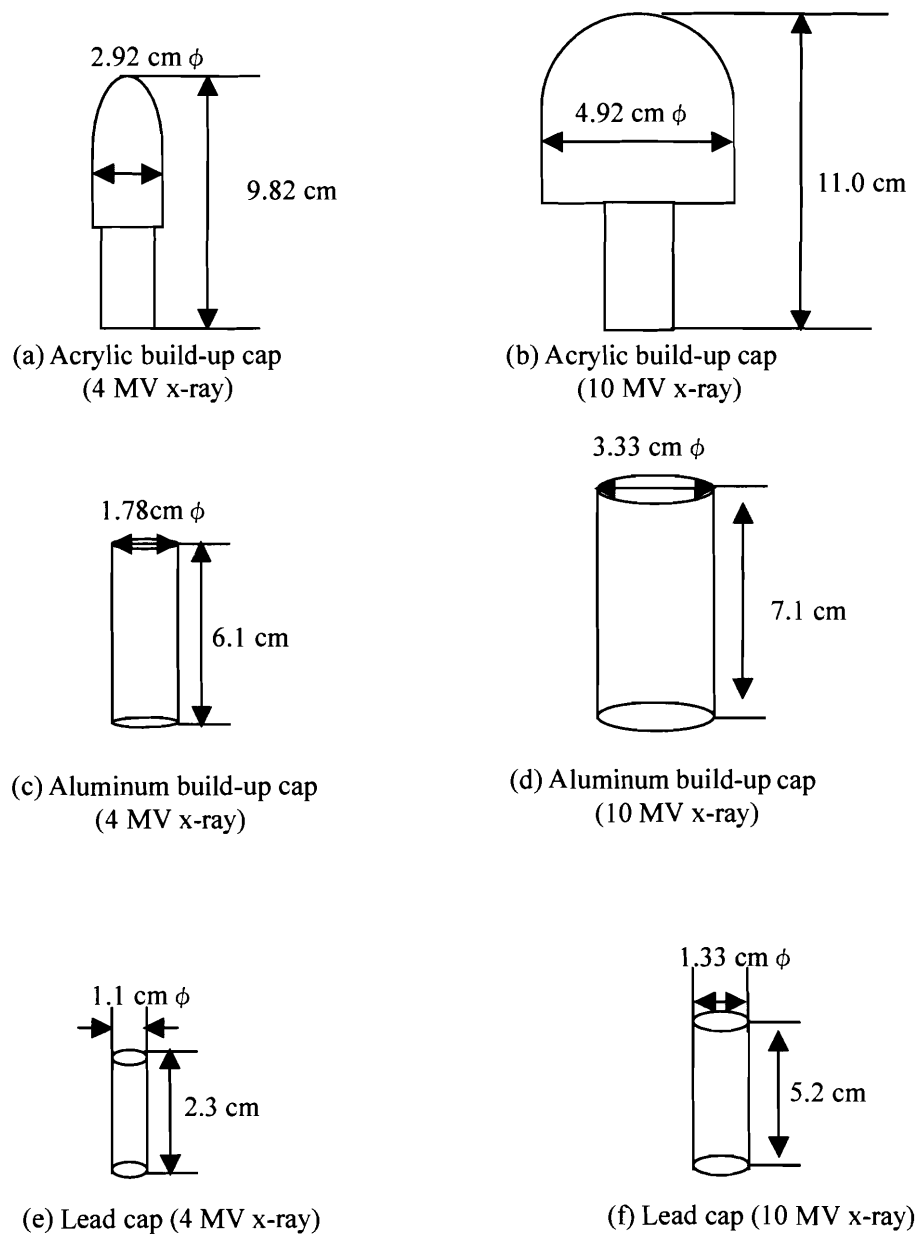


図5 軸外線量比(OCR)で測定した3種類のキャップ形状.
 アクリル製ビルドアップキャップ(4及び10 MV X線用)とアルミ製ビルドアップキャップ(4及び10 MV X線用), 鉛製キャップ(4 MV X線用: 1.1 cm ϕ , 10 MV X線用: 1.33 cm ϕ)

(a) アイソセンタにおける測定法 (b) 軸外における測定法

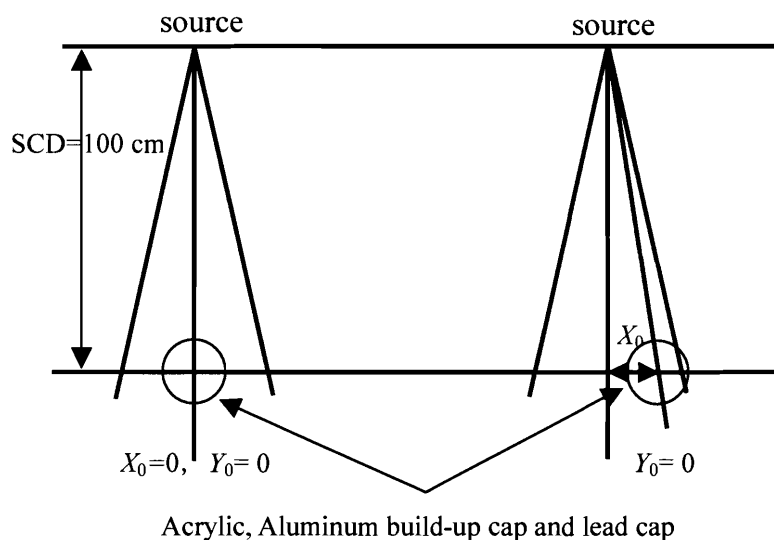


図6 (a)アイソセンタにおける OCR の測定法 (b)軸外距離における OCR の測定法
(a), (b)共に線源検出器間距離 SCD=100 cm.

(3) X線スペクトル

4及び10MV X線スペクトルの再構築法は、文献15及び16に従った。この方法では、低原子番号の減弱体を用いて推定したX線スペクトル(10個程度のエネルギービン)は、鉛などの高原子番号の減弱体を用いて測定及び計算した透過率曲線間での比較によって、高原子番号の減弱体における減弱精度も確認するという手法を採用している。図7は、アクリル及び鉛減弱体の透過率測定の配置を示す。アクリル減弱体の厚さは0～30cmと鉛減弱体の厚さは0～3cmとした。

軸外距離における透過率測定

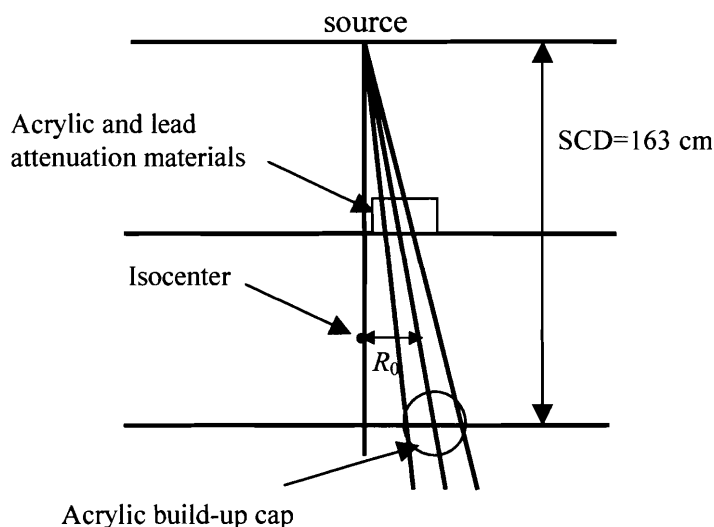


図7 4及び10 MV X線に対するアクリル及び鉛の透過率測定(それぞれ4及び10 MV X線用アクリル製ビルドアップキャップを用い,照射野は約 $1.6 \times 1.6 \text{ cm}^2$ とした).

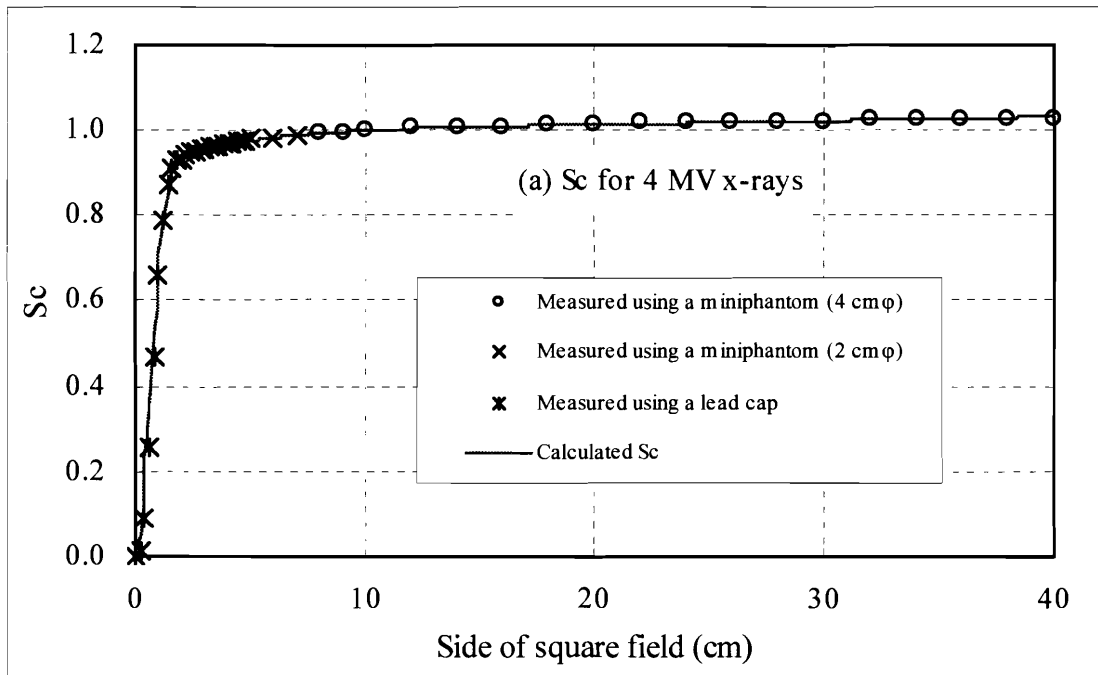
X線透過率の測定では,指頭形電離箱(0.6 cm^3)にそれぞれ4及び10 MV X線用アクリル製ビルドアップキャップを装着して行った.線源検出器間距離(SCD)は163 cmとした.小照射野(約 $1.6 \times 1.6 \text{ cm}^2$)を用いて行ったので,市販のアクリル製ビルドアップキャップを使用しても,X線透過率の測定値には混入電子の影響は見られない.減弱体からの散乱X線を極力さけるために照射野を小さくし,減弱体・検出器間距離を十分大きく取って測定を行った.4及び10 MV X線に対して,アイソセンタでの軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 19.5 \text{ cm}$ でのX線透過率データを取得した.

Ⅲ. 結果

1. アイソセンタにおけるコリメータ散乱係数(S_c)

式(6)によるアイソセンタにおけるコリメータ散乱係数(S_c)の結果を図8に示す.(a)は4 MV X線,(b)は10 MV X線のコリメータ散乱係数(S_c)を示す.ここで,プロットされた○印($A_0=7 \times 7 \text{ cm}^2 \sim 40 \times 40 \text{ cm}^2$)は,アクリル製ミニファントム $4 \text{ cm} \phi$ を用いた測定値である.×印($A_0=2 \times 2 \text{ cm}^2 \sim 6 \times 6 \text{ cm}^2$)は,アクリル製ミニファントム $2 \text{ cm} \phi$ を用いた測定値である.

*印($A_0 = 1.4 \times 1.4 \text{ cm}^2 \sim 5 \times 5 \text{ cm}^2$)は、鉛製キャップを用いた測定値である。これらの測定データを基に、式(3)~(5)に入る $\lambda_T, \lambda_F, a_1, a_2$ 値は、4 MV X線に対して $\lambda_T = 0.394 \text{ cm}, \lambda_F = 2.354 \text{ cm}, a_1 = 0.000910 \text{ cm}^{-1}, a_2 = 0.0506$ が得られ、10 MV X線に対して $\lambda_T = 0.368 \text{ cm}, \lambda_F = 3.335 \text{ cm}, a_1 = 0.000573 \text{ cm}^{-1}, a_2 = 0.0621$ が得られた。図8に、これらの2組の値を基に計算したコリメータ散乱係数(S_c)を実線で示す。4及び10 MV X線のコリメータ散乱係数(S_c)の実線は、それぞれの測定値に精度良く一致している。



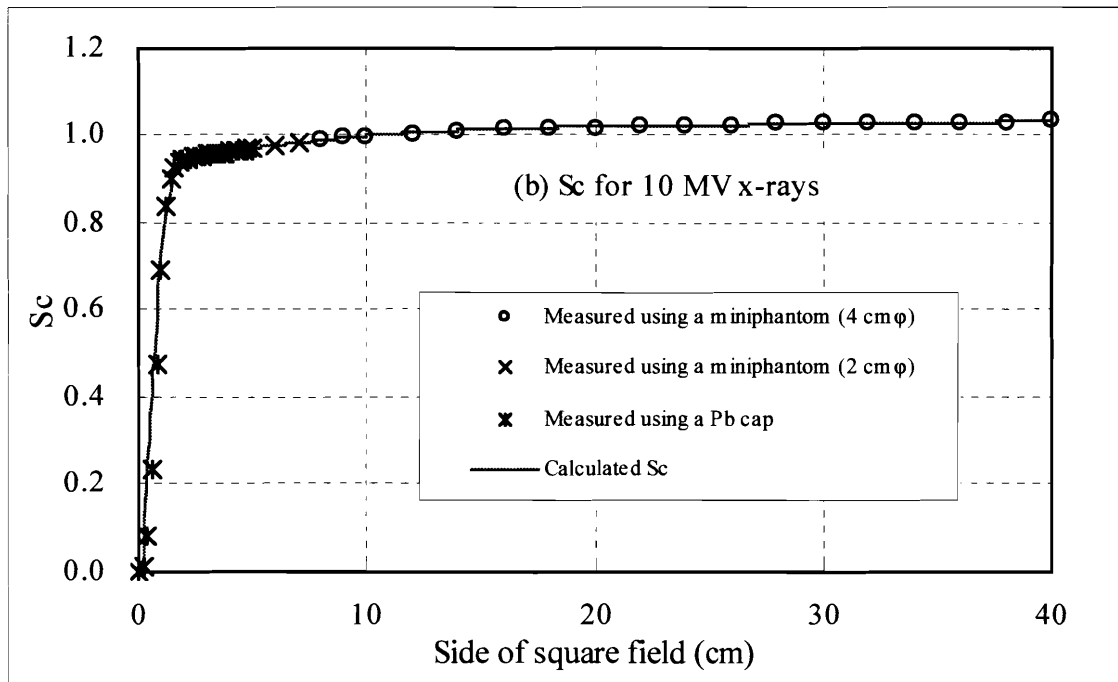


図 8 アイソセンタにおける(a) 4 MV 及び(b) 10 MV X 線のコリメータ散乱係数(S_c).
縦軸: コリメータ散乱係数(S_c), 横軸: 正方形照射野一辺 (cm).

2. アイソセンタ以外でのコリメータ散乱係数(S_c)

以下に示す表 1-6 は, 4 及び 10 MV X 線の各照射野に関し, アクリル製ミニファントム 4 及び 2 cm ϕ , 鉛製キャップのそれぞれに対して, アイソセンタ以外での測定コリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタにおけるそれに対する相対偏差を示す. 以下に示す結果により, アイソセンタでのコリメータ散乱係数(S_c)とアイソセンタ以外での S_c は, 実質的に一致することが理解される.

(1) アクリル製ミニファントム 4 cm ϕ

表 1 に, 4 MV X 線に対して, アクリル製ミニファントム 4 cm ϕ を使用した場合の結果を示す. 照射野(A_0)は, $4 \times 4 \text{ cm}^2 \sim 40 \times 40 \text{ cm}^2$ である. 第 1 列目は, 正方形照射野辺の長さを示す. 第 2 列目は, アイソセンタ($R_0 = 0 \text{ cm}$)での S_c データ, 第 3 ~ 5 列目には, 軸外距離 $R_0 = 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 \text{ cm}$ でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタにおけるそれに対する相対偏差をそれぞれ示す. 表 2 は, 同様に 10 MV X 線に関する結果を示す.

表 1 において, 照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以上では, 照射野 $30 \times 30 \text{ cm}^2$, 軸外距離 $R_0 = 5 \text{ cm}$ で,

最大 0.56 %の相対偏差を示し、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以下では、照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 15 \text{ cm}$ で、最大 1.18 %の相対偏差を示した。また、表 2 において、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以上では、照射野 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 10 \text{ cm}$ で、最大 0.25 %の相対偏差を示し、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以下では、照射野 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 12.5 \text{ cm}$ 及び照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2 \sim 5 \times 5 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 15 \text{ cm}$ の場合、1.0 %を超える相対偏差を示した。照射野 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 15 \text{ cm}$ で、最大 1.33 %の相対偏差を示した。

表 1 4MV X線における軸外距離 $R_0 = 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 \text{ cm}$ でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタでのそれとの比較(アクリル製ミニファントム $4 \text{ cm } \phi$)。

Jaw-collimator square field (cm)	Off-axis distance(= R_0) (cm)						
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
	S_c value	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%
40	1.0282						
38	1.0281						
36	1.0274						
34	1.0260	0.34					
32	1.0246	0.35					
30	1.0231	0.30	0.56				
28	1.0218	0.30	0.46				
26	1.0206	0.24	0.37				
24	1.0190	0.26	0.34	0.34			
22	1.0172	0.21	0.22	0.29			
20	1.0153	0.10	0.19	0.31	0.08		
18	1.0129	0.17	0.10	0.28	0.08		
16	1.0106	0.12	0.12	0.18	0.02		
14	1.0084	0.09	0.08	0.10	-0.04	0.18	
12	1.0046	0.01	0.09	0.10	-0.04	0.08	
10	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9960	-0.07	0.14	0.10	0.12	0.13	0.08
8	0.9921	0.05	0.13	0.12	0.13	0.22	0.18
7	0.9870	0.04	0.13	0.16	0.21	0.38	0.34
6	0.9813	-0.01	0.11	0.14	0.28	0.46	0.56
5	0.9734	0.02	0.15	0.22	0.31	0.64	0.84
4.8	0.9711	0.06	0.21	0.24	0.37	0.75	0.96
4.6	0.9682	0.12	0.27	0.40	0.43	0.85	1.07
4.4	0.9660	0.03	0.20	0.45	0.47	0.92	1.10
4.2	0.9624	0.10	0.25	0.43	0.54	0.98	1.15
4	0.9580	0.13	0.27	0.43	0.53	1.03	1.18

表2 10 MV X線における軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cm でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタでのそれとの比較(アクリル製ミニファントム 4 cm ϕ).

Jaw-collimator square field (cm)	Off-axis distance(= R_0) (cm)						
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
40	1.0320						
38	1.0316						
36	1.0311						
34	1.0309	0.12					
32	1.0299	0.08					
30	1.0286	0.08	0.11				
28	1.0273	0.03	0.06				
26	1.0254	0.05	0.07				
24	1.0233	0.05	0.10	0.19			
22	1.0211	0.06	0.11	0.18			
20	1.0186	0.10	0.16	0.19	0.25		
18	1.0160	0.06	0.14	0.15	0.24		
16	1.0133	0.08	0.10	0.12	0.14		
14	1.0100	0.07	0.09	0.04	0.09	0.11	
12	1.0058	0.07	0.06	-0.01	0.00	0.07	
10	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9952	0.09	0.11	0.06	0.11	0.21	0.22
8	0.9908	0.08	0.03	0.09	0.14	0.25	0.36
7	0.9852	0.05	0.11	0.14	0.26	0.41	0.56
6	0.9789	0.06	0.12	0.16	0.38	0.57	0.76
5	0.9716	0.03	0.16	0.21	0.50	0.77	1.11
4.8	0.9698	0.07	0.09	0.22	0.54	0.85	1.16
4.6	0.9682	-0.02	0.08	0.21	0.54	0.85	1.19
4.4	0.9664	-0.04	0.09	0.19	0.55	0.87	1.25
4.2	0.9638	0.01	0.11	0.21	0.60	0.92	1.31
4	0.9603	-0.03	0.10	0.19	0.61	1.01	1.33

(2) アクリル製ミニファントム 2 cm ϕ

表3に、4 MV X線に対して、アクリル製ミニファントム 2 cm ϕ を使用した場合の結果を示す。照射野(A_0)は、 2×2 cm² ~ 40×40 cm² である。第1列目は、正方形照射野一辺を示す。第2列目は、アイソセンタ($R_0=0$ cm)での S_c データ、第3~5列目には、軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cm でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタにおけるそれに対する相対偏差を示す。表4は、同様に 10 MV X線に関する結果を示す。

表3において、照射野 10×10 cm² 以上では、照射野 32×32 cm²、軸外距離 $R_0=2.5$ cm で、最大 0.33 %の相対偏差を示し、照射野 10×10 cm² 以下では、照射野 2×2 cm²、軸外距離 $R_0=2.5$ cm で、最大 0.71 %の相対偏差を示す。また、表4において、照射野 10×10 cm² 以上で

は、照射野 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 7.5 \text{ cm}$ で、最大 0.16% の相対偏差を示し、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以下では、照射野 $3.4 \times 3.4 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0 = 12.5 \text{ cm}$ で、最大 1.06% の相対偏差を示した。軸外距離 $R_0 = 15 \text{ cm}$ で照射野 $5.0 \times 5.0 \text{ cm}^2$ 以下の照射野では、 1.0% を超える相対偏差が頻繁にあり、最大 1.73% の相対偏差を示した。

表3 4 MV X線における軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cm でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタでのそれとの比較(アクリル製ミニファントム $2\text{ cm } \phi$).

Jaw-collimator square field (cm)	Off-axis distance(= R_0) (cm)						
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
	S_c value	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%
40	1.0352						
38	1.0344						
36	1.0333						
35	1.0328	0.25					
34	1.0324	0.24					
32	1.0299	0.33					
30	1.0287	0.26	0.21				
28	1.0262	0.28	0.32				
26	1.0244	0.19	0.24				
25	1.0246	0.08	0.07	-0.13			
24	1.0235	-0.02	0.12	-0.10			
22	1.0213	-0.10	0.04	-0.11			
20	1.0185	0.01	0.06	-0.10	0.05		
18	1.0169	-0.10	-0.08	-0.21	-0.04		
16	1.0146	-0.12	-0.15	-0.26	-0.13		
15	1.0125	-0.29	-0.12	-0.21	-0.05	-0.21	
14	1.0100	-0.04	-0.03	-0.13	-0.02	-0.16	
12	1.0048	0.09	0.08	0.06	0.02	-0.04	
10	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9957	0.05	0.08	0.10	0.22	0.15	0.23
8	0.9916	0.08	0.10	0.01	0.31	0.25	0.38
7	0.9887	-0.01	-0.05	-0.10	0.15	0.15	0.26
6	0.9844	-0.12	-0.17	-0.12	0.06	0.08	0.28
5	0.9791	-0.41	-0.28	-0.26	-0.06	0.01	0.39
4.8	0.9769	-0.28	-0.25	-0.13	0.03	0.04	0.57
4.6	0.9757	-0.28	-0.32	-0.22	0.05	0.05	0.56
4.4	0.9734	-0.20	-0.23	-0.19	0.13	0.10	0.72
4.2	0.9719	-0.20	-0.24	-0.19	0.13	0.04	0.69
4	0.9692	-0.10	-0.20	-0.11	0.27	0.11	0.64
3.8	0.9661	0.05	-0.04	0.10	0.44	0.29	0.70
3.6	0.9644	-0.11	-0.09	0.04	0.41	0.30	0.64
3.4	0.9624	-0.09	-0.13	0.09	0.41	0.34	0.66
3.2	0.9603	-0.04	-0.10	0.06	0.48	0.38	0.63
3	0.9581	-0.05	-0.11	0.01	0.47	0.37	0.58
2.8	0.9556	-0.01	-0.12	-0.01	0.42	0.33	0.64
2.6	0.9526	0.18	-0.16	0.16	0.46	0.24	0.70
2.4	0.9493	0.17	-0.27	0.08	0.42	0.04	0.48
2.2	0.9422	0.31	-0.07	0.16	0.36	-0.23	0.20
2	0.9285	0.71	0.15	0.41	0.62	-0.63	-0.04

表4 10 MV X線における軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cm でのコリメータ散乱係数 (S_c) のアイソセンタでのそれとの比較(アクリル製ミニファントム $2\text{ cm } \phi$).

Jaw-collimator square field (cm)	Off-axis distance(= R_0) (cm)						
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
	S_c value	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%
40	1.0391						
38	1.0382						
36	1.0370						
34	1.0357	0.12					
32	1.0341	0.08					
30	1.0327	0.06	0.03				
28	1.0308	0.06	0.07				
26	1.0288	0.03	0.04				
24	1.0265	0.03	0.04	0.08			
22	1.0241	-0.01	0.04	0.12			
20	1.0214	-0.01	0.01	0.16	0.01		
18	1.0187	-0.01	0.01	0.12	-0.02		
16	1.0152	0.00	0.01	0.08	-0.01		
14	1.0114	0.02	0.00	-0.05	0.01	-0.01	
12	1.0069	0.00	-0.06	-0.11	-0.07	-0.12	
10	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9962	-0.02	0.01	0.07	-0.08	-0.09	0.06
8	0.9909	0.01	0.07	0.11	0.01	0.16	0.24
7	0.9851	0.05	0.07	0.15	0.17	0.31	0.41
6	0.9790	-0.05	0.02	0.12	0.25	0.37	0.67
5	0.9712	0.00	0.07	0.22	0.35	0.57	1.05
4.8	0.9690	0.06	0.13	0.26	0.41	0.68	1.20
4.6	0.9672	0.04	0.16	0.37	0.48	0.79	1.24
4.4	0.9662	-0.05	0.10	0.36	0.43	0.79	1.21
4.2	0.9639	0.02	0.13	0.43	0.55	0.87	1.37
4	0.9624	-0.02	0.09	0.35	0.59	0.84	1.46
3.8	0.9606	-0.04	0.12	0.33	0.58	0.87	1.50
3.6	0.9589	-0.02	0.10	0.96	0.60	0.94	1.57
3.4	0.9563	0.04	0.16	0.37	0.67	1.06	1.62
3.2	0.9550	-0.02	0.10	0.35	0.61	0.95	1.62
3	0.9534	-0.10	0.06	0.35	0.62	0.90	1.68
2.8	0.9509	-0.04	0.08	0.41	0.65	0.86	1.73
2.6	0.9479	-0.05	0.15	0.36	0.68	0.87	1.67
2.4	0.9442	-0.07	0.05	0.34	0.59	0.60	1.40
2.2	0.9372	-0.07	0.14	0.43	0.65	0.06	1.03
2	0.9227	0.06	0.24	0.61	0.74	-0.64	0.48

(3) 鉛製キャップ

表 5 に、4 MV X 線に対して、鉛製キャップを使用した場合の結果を示す。照射野(A_0)は、 $1.4 \times 1.4 \text{ cm}^2 \sim 40 \times 40 \text{ cm}^2$ である。第 1 列目は、正方形照射野一辺を示す。第 2 列目は、アイソセンタ($R_0=0 \text{ cm}$)での S_c データ、第 3～5 列目には、軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15 \text{ cm}$ でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタにおけるそれに対する相対偏差を示す。表 6 は、同様に 10 MV X 線に関する結果を示す。

表 5 において、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以上では、照射野 $24 \times 24 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0=5 \text{ cm}$ で、最大 1.35 %の相対偏差を示し、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以下では、軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 15 \text{ cm}$ の場合、1.0 %を超える相対偏差が現れた。照射野 $2.2 \times 2.2 \text{ cm}^2$ 、軸外距離 $R_0=15 \text{ cm}$ で、最大 1.75 %の相対偏差を示した。また、表 6 において、照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以上では、軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 15 \text{ cm}$ の場合、1.0 %を超える相対偏差は存在しなかった。照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以下では、軸外距離 $R_0=12.5, 15 \text{ cm}$ で頻繁に 1.0 %を超える相対偏差が見られた。

表 1-6 の結果から鉛製キャップを使用した場合、4 及び 10 MV X 線いずれに対しても、アクリル製ミニファントム 4 及び $2 \text{ cm } \phi$ を使用した場合と比較すると、軸外距離が大きくなるにつれ相対偏差が大きくなった。

表5 4 MV X線における軸外距離 $R_0 = 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cmでのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタでのそれとの比較(鉛製キャップ 1.1 cm ϕ).

Jaw collimator square field (cm^2)	Off-axis distance(= R_0) (cm)						
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
	S_c value	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%
40	1.0268						
38	1.0227						
36	1.0191						
35	1.0196	0.95					
34	1.0196	0.95					
32	1.0187	1.04					
30	1.0196	0.99	1.25				
28	1.0200	0.64	1.25				
26	1.0178	0.55	0.95				
25	1.0155	0.91	1.26	0.13			
24	1.0151	0.86	1.35	0.18			
22	1.0151	0.60	1.13	0.18			
20	1.0142	0.51	0.99	0.13	0.25		
18	1.0133	0.52	0.65	0.13	0.16		
16	1.0113	0.31	0.41	-0.08	0.23		
15	1.0082	0.62	0.67	-0.08	0.41	-0.02	
14	1.0061	0.78	0.87	0.07	0.13	0.13	
12	1.0025	0.42	0.97	0.02	0.10	0.28	
10	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9976	0.10	-0.14	-0.95	0.02	-0.18	-0.18
8	0.9940	0.28	0.00	-0.96	0.16	-0.17	0.09
7	0.9869	0.47	0.18	-0.42	0.13	0.19	0.44
6	0.9788	0.51	0.51	0.07	0.59	0.67	0.80
5	0.9721	0.42	0.56	0.10	0.79	0.92	1.02
4.8	0.9707	0.47	0.47	0.29	0.73	0.88	1.03
4.6	0.9698	0.38	0.52	0.48	0.66	0.78	0.86
4.4	0.9689	0.24	0.47	0.52	0.71	0.74	1.00
4.2	0.9667	0.31	0.52	0.80	0.67	0.77	0.97
4	0.9633	0.68	0.92	0.92	0.89	1.10	1.15
3.8	0.9611	0.73	1.01	0.68	0.98	1.04	1.21
3.6	0.9595	0.61	0.85	0.56	0.83	0.89	1.38
3.4	0.9575	0.54	0.88	0.63	0.53	0.74	1.42
3.2	0.9548	0.61	1.02	1.14	0.68	1.09	1.52
3	0.9537	0.33	0.91	0.84	0.66	1.01	1.38
2.8	0.9523	0.23	0.91	0.55	0.76	0.78	1.35
2.6	0.9510	0.33	0.73	0.21	0.39	0.61	1.18
2.4	0.9474	0.52	1.01	0.50	0.35	0.85	1.39
2.2	0.9416	0.61	1.31	0.97	0.69	1.25	1.75
2	0.9384	0.23	1.22	0.77	0.75	1.03	1.51
1.8	0.9299	0.04	0.75	0.42	0.49	0.88	1.35
1.6	0.9124	-0.51	-0.37	0.24	-0.24	0.82	1.36
1.4	0.8717	-1.44	-1.55	0.04	-0.76	1.01	1.33

表 6 10 MV X線における軸外距離 $R_0=2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15$ cm でのコリメータ散乱係数(S_c)のアイソセンタでのそれとの比較(鉛製キャップ 1.33 cm ϕ).

Jaw-collimator square field (cm)	Off-axis distance(= R_0) (cm)						
	0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
	S_c value	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%	Dev%
40	1.0318						
38	1.0316						
36	1.0309						
35	1.0289	0.26					
34	1.0283	0.07					
32	1.0273	-0.03					
30	1.0272	0.03	0.23				
28	1.0267	0.05	-0.08				
26	1.0242	0.16	0.14				
25	1.0227	0.04	0.38	0.40			
24	1.0219	-0.05	0.37	0.49			
22	1.0196	0.13	0.17	0.30			
20	1.0169	0.27	0.18	0.22	-0.08		
18	1.0154	0.22	0.28	0.23	-0.10		
16	1.0135	-0.07	0.15	0.25	-0.14		
15	1.0131	-0.19	-0.12	0.16	-0.26	0.01	
14	1.0109	-0.09	-0.09	0.20	-0.30	-0.10	
12	1.0060	0.15	0.08	0.13	-0.25	-0.33	
10	1.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.9976	-0.24	0.12	-0.06	-0.25	-0.22	-0.12
8	0.9931	-0.14	0.20	0.13	-0.23	-0.03	0.26
7	0.9864	0.14	0.31	0.41	-0.20	0.32	0.67
6	0.9786	0.40	0.30	0.55	0.19	0.58	1.03
5	0.9718	0.27	0.33	0.42	0.44	0.54	1.21
4.8	0.9712	-0.05	0.34	0.47	0.45	0.68	1.01
4.6	0.9696	-0.04	0.35	0.57	0.35	0.79	1.10
4.4	0.9684	0.03	0.44	0.33	0.20	0.82	1.08
4.2	0.9658	0.24	0.39	0.52	0.41	0.99	1.30
4	0.9648	0.27	0.17	0.57	0.31	0.73	1.36
3.8	0.9637	0.04	0.14	0.48	0.35	0.78	1.33
3.6	0.9612	-0.05	0.34	0.56	0.51	0.91	1.45
3.4	0.9597	-0.01	0.44	0.64	0.33	0.97	1.44
3.2	0.9583	0.07	0.49	0.67	0.31	1.04	1.54
3	0.9566	0.12	0.53	0.51	0.49	0.96	1.55
2.8	0.9552	0.12	0.39	0.35	0.45	0.83	1.61
2.6	0.9516	0.11	0.45	0.66	0.50	1.05	1.84
2.4	0.9496	0.07	0.40	0.80	0.48	1.09	1.82
2.2	0.9483	0.12	0.39	0.76	0.46	1.06	1.83
2	0.9462	0.10	0.08	0.55	0.48	1.08	1.66
1.8	0.9417	-0.31	-0.97	0.25	0.20	1.02	1.70
1.6	0.9290	-0.96	-0.63	0.32	-0.30	0.74	1.43
1.4	0.8991	-1.35	-1.24	0.75	-0.61	0.94	1.41

3. キャップ軸外線量比(OCR_{cap})

4 及び 10 MV X 線において、それぞれアクリル製、アルミ製、鉛製のビルドアップキャップ(図 5(a)~(f)) で測定したキャップ軸外線量比(OCR_{cap})を図 9 及び 10 に示す($X_0 = -22 \sim 22$ cm, $Y_0 = -0$ cm). ここで、キャップ軸外線量比(OCR_{cap})は、アイソセンタ($X_0 = 0, Y_0 = 0$)で正規化されている. 赤印はアクリル製ビルドアップキャップ、青印はアルミ製ビルドアップキャップ、灰印は鉛製キャップによる測定データを表している.

線源軸外線量比(OCR_{source})を導くにあたり、我々は、アクリル製ビルドアップキャップのキャップ軸外線量比(OCR_{cap})を用いた. よって、ここでは、アルミ製及び鉛製キャップによる OCR_{cap} 測定値のアクリル製ビルドアップキャップによる OCR_{cap} 測定値に対する相対偏差を示す.

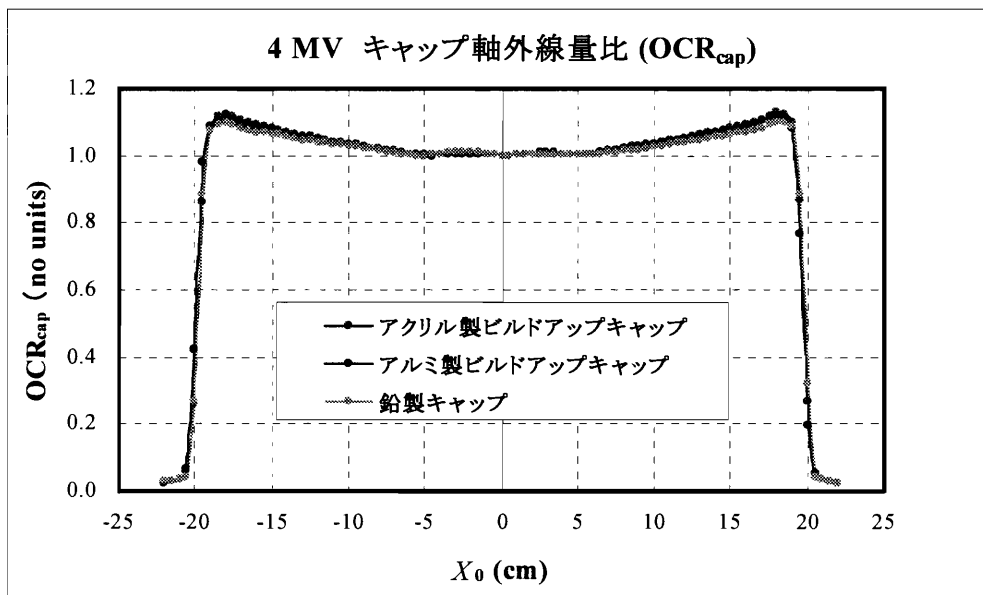


図 9 4 MV X 線(40×40 cm²)におけるキャップ軸外線量比(OCR_{cap})のアクリル製、アルミ製、鉛製ビルドアップキャップでの比較.

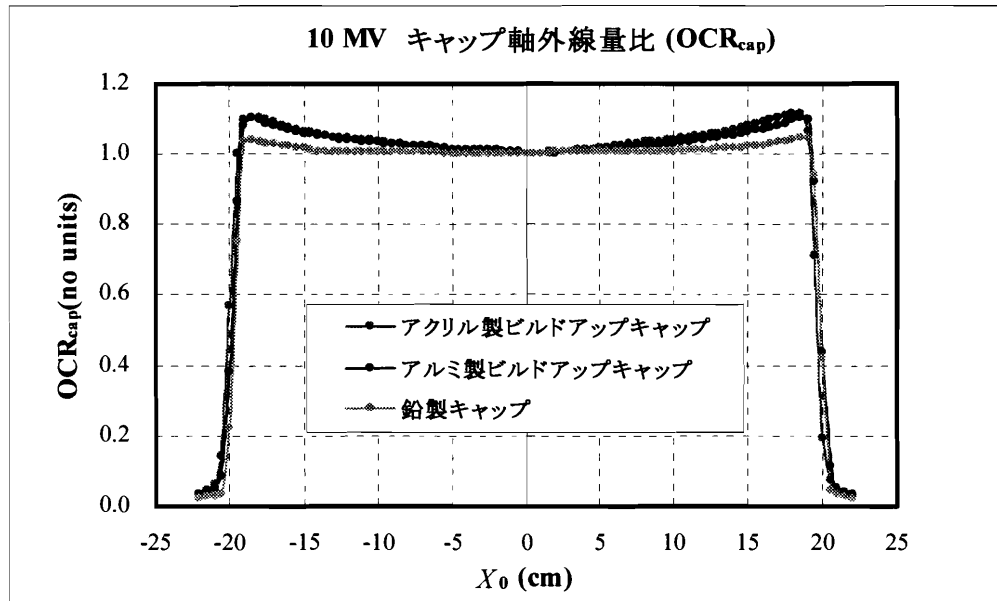


図 10 10 MV X 線(40×40 cm²)におけるキャップ軸外線量比(OCR_{cap})のアクリル製, アルミ製, 鉛製ビルドアップキャップでの比較.

図 9 において, アクリル製ビルドアップキャップによる測定値に対するアルミ製ビルドアップキャップによる測定値の相対偏差は, $X_0 = 18, 15, 10, 5$ cm のときそれぞれ-0.74 %, -0.44 %, -0.39 %, -0.05 % となった. 同様に, $X_0 = -18, -15, -10, -5$ cm のときそれぞれ-1.18 %, -0.89 %, -0.56 %, -0.29 % の相対偏差が生じた. 照射野辺あたりの領域を省くと相対偏差は, 1.0 % 以下になった. 中心軸に近づくほど相対偏差は小さくなった. 次に, アクリル製ビルドアップキャップによる測定値に対する鉛製キャップによる測定値の相対偏差は, $X_0 = 18, 15, 10, 5$ cm のときそれぞれ-2.29 %, -1.76 %, -0.99 %, -0.12 % となった. 同様に, $X_0 = -18, -15, -10, -5$ cm のときそれぞれ-2.23 %, -1.42 %, -0.58 %, -0.20 % の相対偏差が生じた. アルミ製ビルドアップキャップを使用した場合の相対偏差は, 僅かに大きくなった. しかし, 中心軸に近づくほどその相対偏差は小さくなることが理解できる.

図 10 において, アクリル製ビルドアップキャップによる測定値に対するアルミ製ビルドアップキャップによる測定値の相対偏差は, $X_0 = 18, 15, 10, 5$ cm のときそれぞれ-1.74 %, -1.53 %, -1.22 %, -0.83 % となった. $X_0 = -18, -15, -10, -5$ cm のときそれぞれ-0.35 %, -0.67 %, -0.27 %, -0.39 % の相対偏差が生じた. 測定範囲($X_0 = -22 \sim 22$ cm)では, $X_0 = -18$ cm と $X_0 = 18, 15, 10$ cm を除いて, 1.0 % 以下の相対偏差であった. 4 MV X 線 (図 9) の場合と同様に中心軸に近づくほど相対偏差は小さくなった. 次に, アクリル製ビルドアップキャップによる

測定値に対する鉛製キャップによる測定値の相対偏差は、 $X_0 = 18, 15, 10, 5$ cm のときそれぞれ-6.64 %, -5.26 %, -3.34 %, -1.09 %となった。 $X_0 = -18, -15, -10, -5$ cm のときそれぞれ-5.94 %, -4.63 %, -2.95 %, -0.95 %の相対偏差が生じた。アルミ製ビルドアップキャップを使用した場合と同様に、中心軸に近づくほど相対偏差は小さくなった。

4. X線スペクトル

4 及び 10 MV X線スペクトルの結果をそれぞれ図 11 及び 12 に示す。図の縦軸は、光子フルエンスの対数で表されている。この場合、軸外距離と X線スペクトルの関係が比較的明瞭になる。なお、エネルギーフルエンス(Ψ_0)と光子フルエンス(Φ_0)は、

$$\Phi_0(R_0; E_i) = \Psi_0(R_0; E_i) \Delta E_i / E_i \quad (19)$$

の関係となる。図 11 及び 12 に示す光子フルエンスは、

$$\sum_{i=1}^{i_{\max}} \Phi_0(R_0; E_i) = 1 \quad (20)$$

と正規化されている。

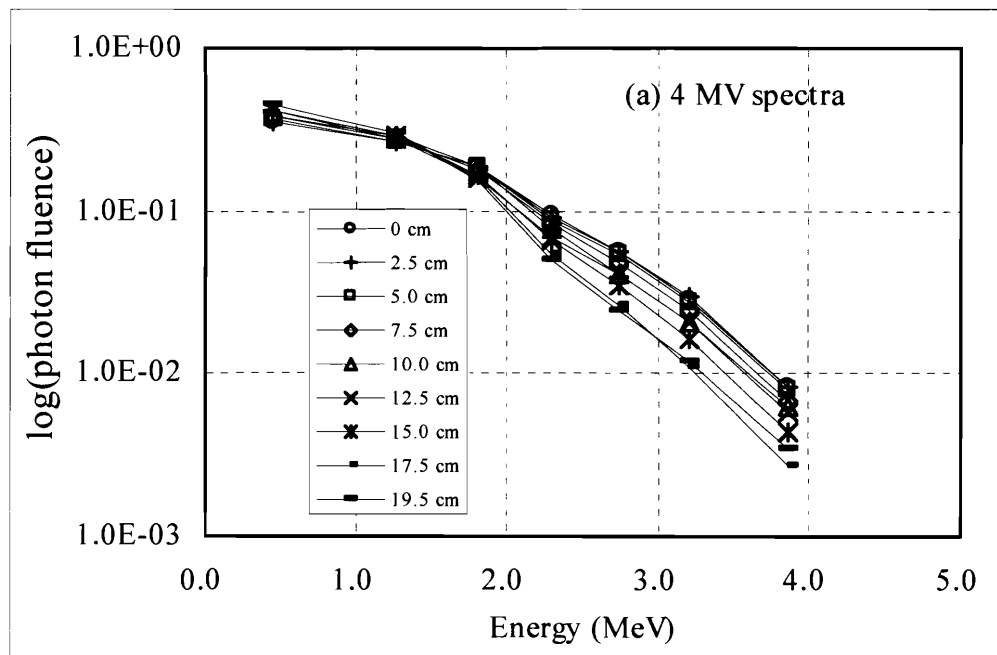


図 11 4 MV X線光子フルエンススペクトル(軸外距離 $R_0 = 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 19.5$ cm).縦軸: $\log(\text{photon fluence})$, 横軸: エネルギー(MeV).

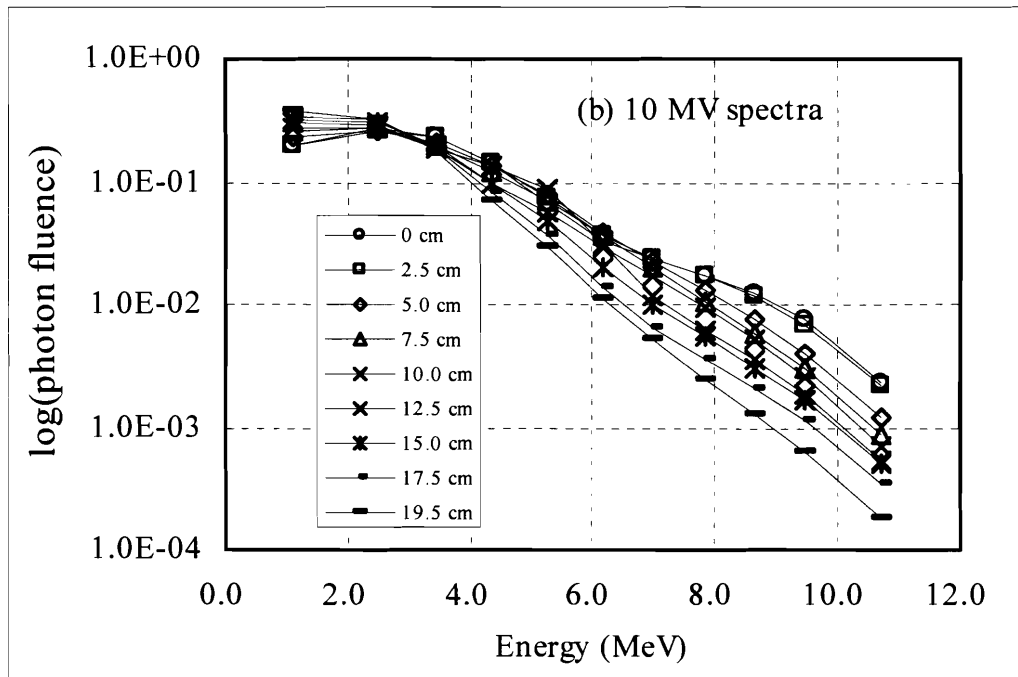


図 12 10 MV X線光子フルエンススペクトル曲線(軸外距離 $R_0=0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 19.5$ cm). 縦軸: $\log(\text{photon fluence})$, 横軸: エネルギー(MeV).

5. 線源軸外線量比($\text{OCR}_{\text{source}}$)

4 及び 10 MV X線のそれぞれに対して, 図 13(a), (b)には, 式(12)による照射野($A_0 = 40 \times 40 \text{ cm}^2$)におけるアクリル製ビルドアップキャップによるキャップ軸外線量比(OCR_{cap}), 式(14b)による照射野($A_0 = 40 \times 40 \text{ cm}^2$)における水軸外線量比($\text{OCR}_{\text{water}}$), 式(14a)による無限照射野における線源軸外線量比($\text{OCR}_{\text{source}}$)をそれぞれ軸外距離の関数で表す. なお, 式(9)の H_{jaw} 関数の計算は, 式(3)~(5)に入る $\lambda_T, \lambda_F, a_1, a_2$ の値は与えられたエネルギーの X線に対して, 実質的に計算点(X_0, Y_0)に依存しないという仮定のもとで行われた(結果の 2. を参照).

なお, 図 13(a)及び(b)において, 黒印は, キャップ軸外線量比(OCR_{cap})を表し, 白印は, 水軸外線量比($\text{OCR}_{\text{water}}$)を表し, 実線は, 線源軸外線量比($\text{OCR}_{\text{source}}$)を表している.

4 及び 10 MV X線のそれぞれにおいて, $R_0 = 0 \sim 16$ cm 間では, キャップ軸外線量比(OCR_{cap}), 水軸外線量比($\text{OCR}_{\text{water}}$), 線源軸外線量比($\text{OCR}_{\text{source}}$)は, 互いに一致している. 無限照射野において, 線源軸外線量比($\text{OCR}_{\text{source}}$)は, $R_0 = 16 \sim 20$ cm 間で急激に増加しているのが分かる.

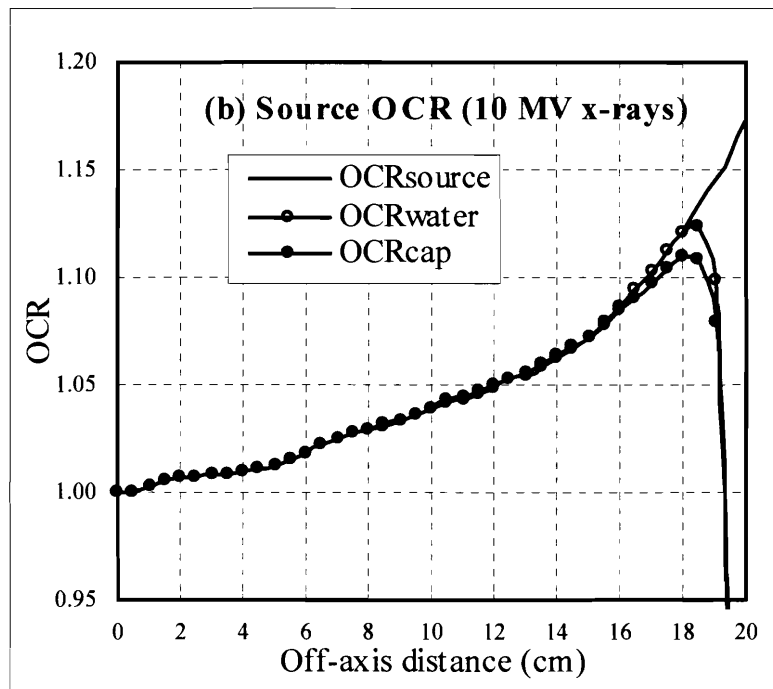
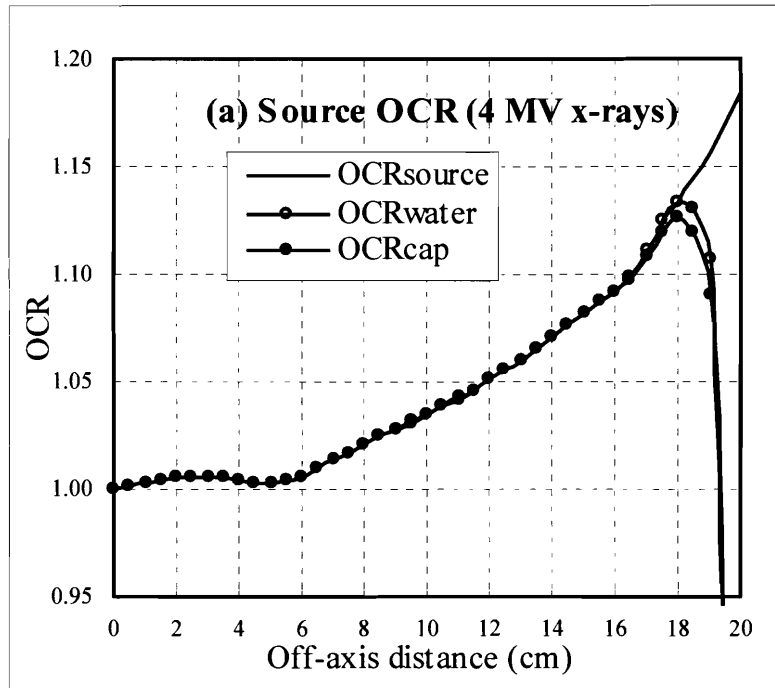


図 13 キャップと水及び線源軸外線量比(OCR)の比較.

横軸: 軸外距離($R_0 = X_0$), 縦軸: 軸外線量比(OCR).

(a) 4 MV X線の線源軸外線量比(式(14a)): ○水軸外線量比(式(14b)), ●キャップ軸外線量比(式(12)).

(b) 10 MV X線の線源軸外線量比(式(14a)): ○水軸外線量比(式(14b)), ●キャップ軸外線量比(式(12)).

6. 空中 X 線出力係数(OPF_{in-air})

式(15)における空中 X 線出力係数(OPF_{in-air})は、あらゆる照射野(A_0)での任意の測定点(X_0, Y_0)に適用できる. 図 14 に示す非対称照射野 $14 \times 12 \text{ cm}^2$ において、4 及び 10 MV X 線の空中 X 線出力分布は、式(15)を用いて計算した. 図 15, 16 は、それぞれ 4 及び 10 MV X 線の空中 X 線出力分布を示す. ただし、分布の範囲は、 $X_0 = -2 \text{ cm} \sim 12 \text{ cm}$ ($Y_0 = 0 \text{ cm}$) である. ここで、赤の実線は、関係する式において $\lambda_T = 0.394 \text{ cm}$ (4 MV), $\lambda_T = 0.368 \text{ cm}$ (10 MV) とした. 黒の実線は、X 線ターゲットを点線源とみなした場合で、関係する式において $\lambda_T = 0 \text{ cm}$ とした. この 2 組の分布は、4 及び 10 MV X 線共に、 $X_0 = -1 \sim 11 \text{ cm}$ の部分では、ほとんど重なり合っている. また、照射野辺縁 $X_0 = -3 \sim -1 \text{ cm}$, $X_0 = 11 \sim 13 \text{ cm}$ の部分で極端に違う分布が表現されていることが理解できる.

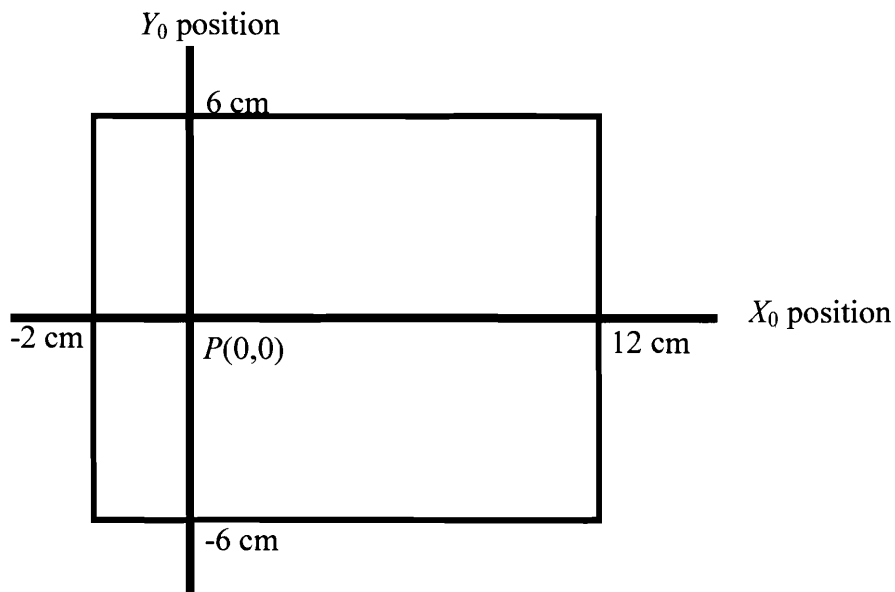


図 14 空中 X 線出力における照射野($14 \times 12 \text{ cm}^2$).

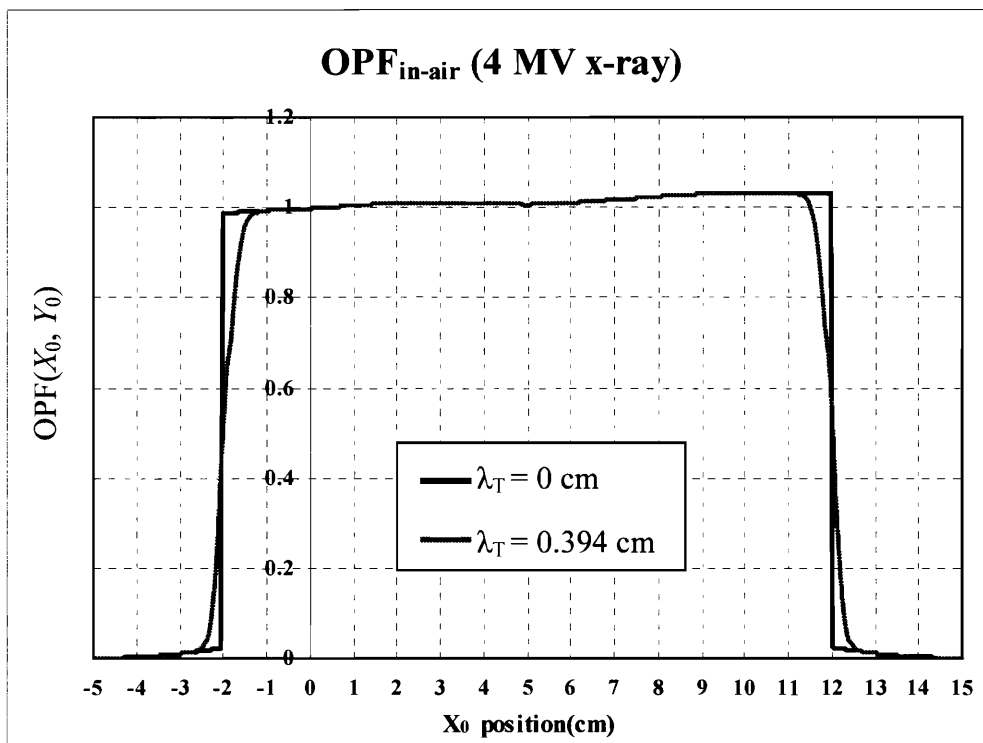


図 15 4 MV X線における空中 X線出力分布(14×12 cm²). 縦軸: 空中 X線出力係数, 横軸: 軸外距離($R_0 = X_0$ cm), $\lambda_T/2$: X線ターゲットの実効半径.

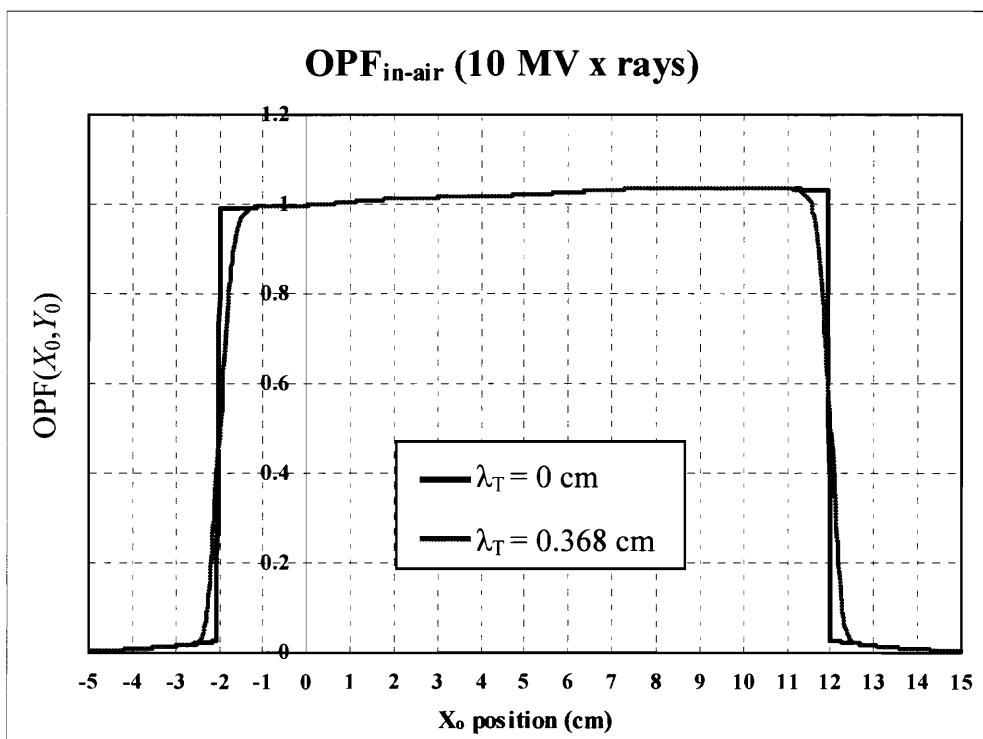


図 16 10 MV X線における空中 X線出力分布(14×12 cm²). 縦軸: 空中 X線出力係数, 横軸: 軸外距離($R_0 = X_0$ cm), $\lambda_T/2$: X線ターゲットの実効半径.

IV. 考 察

線源軸外線量比(OCR_{source})に関しては、この論文では示さなかったが、式(14a)を用いると、アクリル及びアルミ製ビルドアップキャップによるキャップ軸外線量比(OCR_{cap})は、互いにほぼ同じ線源軸外線量比(OCR_{source})データを導くが、鉛製キャップのキャップ軸外線量比(OCR_{cap})は、それらと大きく異なる線源軸外線量比(OCR_{source})データを導くことが知られた。このことは、軟組織等価物質で構成された指頭形電離箱では、鉛製キャップの装着により、中心電極、電離箱壁、鉛製キャップ間で電子平衡が大きく崩れて、電離箱空洞内においてブラッグ・グレイの空洞原理が成立しないことに起因すると推測される。しかし、固定点におけるコリメータ散乱係数(S_c)の測定では、軸外距離と共に変化する線質がほとんど影響しないので、鉛などの高原子番号媒体で作成されたビルドアップキャップは、与えられた X 線に対して比較的小さなサイズになるので、特に小照射野での測定には有用である。

図 8(a)及び(b)に示すように、小照射野でのコリメータ散乱係数(S_c)が 4 及び 10 MV X 線では異なる。しかし、大照射野でのコリメータ散乱係数(S_c)は、両 X 線でほぼ同様な曲線になる。4 及び 10 MV X 線における X 線ターゲットを点線源($\lambda_T=0$)とした場合のコリメータ散乱係数(S_c)曲線は、大照射野でのコリメータ散乱係数(S_c)曲線をそれぞれ零照射野に外挿した曲線とほぼ同じになる。

表 1, 3, 5 (4 MV X 線) 及び表 2, 4, 6 (10 MV X 線) に表しているアイソセンタでのコリメータ散乱係数(S_c)データが、アイソセンタ以外でのデータと実質的に同じになることは、X 線ターゲット面及びフラットニングフィルタ面上での線源から等方的に X 線を放出するためである。しかし、その空中 X 線出力(OP_{in-air})は、線源軸外線量比(OCR_{source})曲線(図 13(a), (b))より、一般に軸外距離と共に増加していることが理解される。他方、フラットニングフィルタの形状により、X 線の線質は軸外距離と共に軟化する。これら 2 つの特性の組み合わせにより、大きな照射野において、水中でのある特定の深さでの線量分布がアイソセンタを通過するビーム軸に対して直角になるように、フラットニングフィルタに細工が施されている。

Zhu ら⁴⁾は、空中 X 線出力(OP_{in-air})を計算するにあたり、線源軸外線量比(OCR_{source})に似た概念を導入していないので、空中 X 線出力の計算精度は、本法に比して高くない。

図 15 及び 16 に示す通り、X 線ターゲットを点線源とした場合とそうでない場合とでは、

照射野辺縁で、空中 X 線出力(OP_{in-air})が大きく異なる。このことは、コンボリューション法による媒体内での線量分布の計算にも当然波及すると考えられる。

引用文献

- 1) Iwasaki A: A convolution method for calculating 10-MV x-ray primary and scatter dose including electron contamination dose. *Med Phys*, 19:907-915, 1992.
- 2) 金子 勝太郎 : 治療計画－新しい計算アルゴリズムの活用に向けて－. *日放技学誌*, 57(4) : 388-392, 2000.
- 3) 荒木 不次男 : 空気の電離量から分かる人体の吸収線量. *日放技学誌*, 61(10):1365-1372, 2005.
- 4) Zhu TC, Bjärngård BE: Head scatter off-axis for megavoltage x rays. *Med Phys*, 30:533-543, 2003.
- 5) Khan FM, Sewchand W, Lee J : Revision of tissue-maximum ratio and scatter-maximum ratio concepts for cobalt 60 and higher energy x-ray beams. *Med Phys*, 7:230-237, 1980.
- 6) Johon HE, Cunningham JR : *The physics of radiology*, Charles C. Thomas, USA, 1983.
- 7) Van Gasteren JJM, Heukeloma S, Van Kleffens HJ : The determination of phantom and collimator scatter components of the output of mega voltage photon beams : measurement of the collimator scatter part with a beam-coaxial narrow cylindrical phantom. *Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*, 20:250-257, 1991.
- 8) 中川 政幸, 田中 学, 岡田 孝 : ミニファントムを用いたヘッド散乱係数の測定法の評価. *日放技学誌*, 56(9) : 1155-1161, 2000.
- 9) 佐藤 智春 : スキャンビーム方式の加速装置におけるヘッド散乱係数の評価. *日放技学誌*, 59(7) : 848-856, 2003.
- 10) Jaffray DA, Battista JJ, Fenster A : X-ray sources of medical linear accelerators : Focal and extra-focal radiation. *Med Phys*, 20:1417-1427, 1993.
- 11) Frye DMD, Paliwal BR, Thomadsen BR : Intercomparison of normalized head-scatter factor measurement techniques. *Med Phys*, 22:249-253, 1995.

- 12) 奈良 鉄造, 岩崎 晃, 佐藤 和彦 : コリメータ散乱係数(S_c)及びファントム散乱係数(S_p)を用いた 10 MV X 線不整形照射野線量評価法. 日放技学誌, 60(1) : 87-100, 2004.
- 13) 奈良 鉄造, 岩崎 晃, 駒井 史雄 : コリメータ散乱係数(S_c)及びファントム散乱係数(S_p)を用いた 4 MV X 線不整形照射野線量評価法. 日放技学誌, 60(11) : 1592-1603, 2004.
- 14) 保科 正夫: (光子ビームの軸外線量比測定). 臨床放射線技術実験ハンドブック下巻. (日本放射線技術学会編) . 166-172, 通商産業研究社, 東京, 1996.
- 15) Iwasaki A, Kubota M, Hirota J *et al.*: Characteristic features of a high-energy x-ray spectra estimation method based on the Waggener iterative perturbation principle. Med. Phys, **33**: 4056–4063, 2006.
- 16) Waggener RG, Blough MM, Terry JA, Chen D, Lee DE, Zhang S, McDavid WD : X-ray spectra estimation using attenuation measurements from 25 kVp to 18 MV. Med Phys, 26:1269-1278, 1999.

英文要旨

A Method for Calculating In-air X-ray Output using Off-axis Collimator Scatter Factor and Source Off-center Ratio

Hirosaki University Graduate School of Health Sciences

Fumio Komai, Akira Iwasaki, Shigenobu Kimura, Morio Seino, Makoto Sasamori

In advanced radiation treatments, radiation treatment planning (RTP) systems are indispensable to perform accurate dose calculation and patient positioning. It is, however, difficult to understand these dose calculation algorithms in detail, since the calculation algorithms like convolution and Monte Carlo methods used in recent commercial RTP systems are not opened to clinical users. Thereby, investigation of the calculation accuracy is impossible on these algorithms. In fact, inaccurate dose calculations are performed when maybe exceeding the scope of suitable application.

Iwasaki et al. have developed a convolution method in which a primary and a scatter dose kernel are

convolved with a distribution of the primary x-ray intensity in media. The primary x-ray intensity is obtained using in-air x-ray output. Zhu and Bjärngard developed a method of calculating in-air x-ray outputs, adopting a two-dimensional Gaussian function to the shape of a flattening filter viewed through a jaw collimator.

However, this method, in general, cannot evaluate the in-air x-ray output accurately. This is because it does not use an accurate output distribution at an infinite irradiation field, and because the in-air x-ray output calculation near the field border is not accurate utilizing a point source for the x-ray target. Therefore, we developed a new dose calculation algorithm that is adaptable to any size of irradiation fields by introducing an off-axis collimator scatter factor (off-axis S_c) and a source off-center ratio (source OCR).

In this calculation algorithm, the in-air x-ray output at an arbitrary point at an irradiation field is expressed as a product of the off-axis S_c and the source OCR functions. The off-axis S_c defined as the ratio of the in-air x-ray output at an arbitrary calculation point at an arbitrary irradiation field to that at the isocenter at a standard irradiation field $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Here, it is supposed that the in-air x-ray output at any calculation point at the infinite irradiation field is constant. Moreover, in our calculation of the in-air x-ray output, both the x-ray target and the flattening filter are supposed to have finite sizes, and for each a two-dimensional Gaussian function as proposed by Zhu and Bjärngard is utilized. On the other hand, the source OCR is defined as the ratio of the in-air x-ray output at an arbitrary calculation point to that at the isocenter using an infinite irradiation field. The in-air x-ray output for an infinite irradiation field is reproduced using in-air x-ray output data at a maximum irradiation field, taking into account the off-axis x-ray spectrum distribution. The irradiation experiments were performed using 4 and 10 MV x-rays produced by a high-energy linear accelerator. As a result, it has been found for each of the 4 and 10 MV x-ray beams that the off-axis S_c changes greatly around the irradiation field border, depending on the fact that the x-ray target is assumed a point source or a source of a finite size, and that the source OCR increases with the off-axis distance depending on the shape of the flattening filter.