ノート

矩形照射野コリメータ散乱係数に対する
等価正方形評価法の検討奈良鉄造・岩崎 晃¹⁾・佐藤和彦
洞内美明・駒井史雄・福士英人論文受付
2001年3月2日論文受理
2002年2月21日

Code No. 852

青森県立中央病院放射線科
1) 弘前大学医学部保健学科

緒言

高エネルギー光子ビーム照射ではファントム内の吸収線量を一次線量と散乱線量とに分けて評価する場合がある。一次線量は線源から放出される光子と加速器ヘッドから寄与する成分を含めた実効一次線量とファントム内で散乱した散乱成分とにより求められる。実効一次および散乱線量の分析には全散乱係数(S_{cp})、コリメータ散乱係数(S_c)、ファントム散乱係数(S_p)を用いる方法がある(Holtら¹⁾、Khanら²⁾)。

コリメータ散乱係数(S_c)の測定では従来まではビルドアップキャップを用いる方法が一般的であったが、近年になってGasterenら³⁾によってミニファントムを用いる方法が提唱された。線質指標(QI)⁴⁾が $QI \leq 0.75$ (10MV以下のX線)の場合と $QI > 0.75$ (10MVを越えたX線)の場合とに対して、いずれもピーク深に比してより深い測定深(それぞれ5cmと10cm)が提案されている。この方法は混入電子の影響をなくすることができ、さらに臨床上意味のある深さでの測定情報が提供

Comments on Evaluation Method for Equivalent Square Fields to the Collimator Scatter Factors of Rectangular Fields

TETSUZO NARA, AKIRA IWASAKI¹⁾, KAZUHIKO SATO, YOSHIKI HORANAI,
FUMIO KOMAI, and HIDETO FUKUSHIDepartment of Radiology, Aomori Prefectural Center Hospital
1) Hirosaki University School of Health Sciences

Received March 2, 2001; Revision accepted Feb. 21, 2002; Code No. 852

Summary

In the measurement of 4 MV and 10 MV X-ray collimator scatter factors(S_c), the method of using an acrylic mini-phantom showed no significant differences between cases in which the chamber axis was either parallel or perpendicular to the beam axis. Chamber readings with an aluminum or acrylic build-up cap were not reflected by contaminant electrons when the chamber axis was parallel to the beam axis. On the basis of the data on 4 MV and 10 MV X-ray collimator S_c measured using an acrylic mini-phantom, we examined three methods of obtaining square fields equivalent to rectangular fields, and reached the following conclusions: (1) The A/P method was not accurate because it did not take into account the structure of the radiation head. (2) Regarding the geometrical weight factor(k) used in the field-mapping method, more accurate k values were obtained when using the geometrical places of the flattening filter(or the second source, taken from the concept of extra-focal radiation), the upper and lower collimators, and the chamber, rather than when using the geometrical places of the source, the upper and lower collimators, and the chamber. (3) The most accurate k values could, in general, be obtained when determined on the basis of measured S_c data.

Key words: Collimator scatter factor, Mini-phantom, Collimator exchange effect, Field mapping method別刷資料請求先: 〒030-8553 青森県青森市東造道2-1-1
青森県立中央病院放射線科 奈良鉄造 宛

できる利点がある。

中川ら⁵⁾はアクリル製ミニファントムとアクリル製ビルドアップキャップを用いて、X線ビーム軸に対する検出器挿入方向(平行および垂直)の依存性について報告している。コリメータ散乱係数(S_c)に関して、コリメータ(上下段コリメータ)の作る矩形照射野において短辺と長辺の差が大きい場合に上下段コリメータの開口度を逆にしたとき、X線出力が変化するコリメータ反転効果(collimator exchange effect)の起こることが知られている。中田⁶⁾や保科⁷⁾はコリメータ反転効果を効果的に検出する方法として、Kimら⁸⁾の照射野マッピング法を紹介している。この方法では検出器から線源側を見た場合の上下段コリメータで形成される矩形照射野を等価正方形照射野に変換する手順をとる。なお、電子線の可変コリメータに関して、森川⁹⁾がすでにこの方法を発表している。森川の式はKimらの式と同じ関数形になっていることに注目したい。

小照射野に対して検出器サイズの大きさが問題になることがある。この場合、電離箱軸をX線ビーム軸に対して平行にさせることがある。この論文では検出器のX線ビーム軸に対する挿入方向を再検討し、照射野マッピング法の精度を調べた。また照射野マッピング法で用いる k 値を最適に決める方法も提案する。

1. 理論的背景

1-1 全散乱係数(S_{cp})、コリメータ散乱係数(S_c)、ファントム散乱係数(S_p)

全散乱係数(S_{cp})、コリメータ散乱係数(S_c)、ファントム散乱係数(S_p)の定義をKhan²⁾にしたがって以下に要約する。

水ファントム内でのX線ビーム軸上に基準深(d_r)を設定する[この基準深は任意でよいが、この論文ではピーク線量を示す深さ(ピーク深)を採用した]。まず基準深での吸収線量(D_r)を用いて全散乱係数(S_{cp})を次式で定義する。

$$S_{cp}(A) = D_r(d_r, A) / D_r(d_r, 10 \times 10) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 A は基準深での正方形または矩形照射野である(基準照射野は $10 \times 10 \text{ cm}^2$ にしてある)。吸収線量はX線出力に強く関係するので、X線出力の相対値を次式のコリメータ散乱係数(S_c)で評価する。

$$S_c(A) = D_{air}(A) / D_{air}(10 \times 10) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 D_{air} はミニファントムあるいはビルドアップキャップを用いて得られる空中線量である。ファントム散乱係数(S_p)は次式で定義する。

$$S_p(A) = S_{cp}(A) / S_c(A) \quad \cdots \cdots (3)$$

ファントム散乱係数 $S_p(A)$ は、基準深(d_r)において照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ のX線出力で得られる照射野 A での吸収線量と照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ での吸収線量の比を表すことになる($S_p(10 \times 10) = 1$)。この場合、側方電子平衡下での実効一次吸収線量は照射野(A)に関係せず一定であり、照射野(A)の変化によって生じるファントム散乱係数(S_p)の変化は散乱線量のみの違いになる。ただし、上記において少なくともX線ビーム軸(コリメータ回転軸)近傍では、入射X線スペクトルは照射野サイズによって変化しないものと仮定している。また基準深(d_r)では、混入電子の影響がないことが理想的である。

1-2 幾何学的加重係数(k)

Kimら⁸⁾は上下段コリメータの幾何学的配置により矩形照射野を等価正方形照射野に変換する方法を発表している。 Y_D および X_D をそれぞれ上段および下段コリメータ絞りで得られる検出器位置での矩形照射野辺とすると、検出器面での等価正方形照射野辺(S_D^q)は次式で表わされる(Fig. 1参照)。

$$S_D^q = ((1+k)X_D \cdot Y_D) / (k \cdot X_D + Y_D) \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで、 k は幾何学的加重係数で

$$k = (L_{1x} / L_{2x}) \cdot (L_{2y} / L_{1y}) \quad \cdots \cdots (5)$$

となる。ここで、 L_{1y} および L_{1x} は上段および下段コリメータ上端と線源面間距離、 L_{2y} および L_{2x} は上段および下段コリメータ上端と検出器面間距離である。

A/P法で等価正方形照射野を得る式は(4)式で $k=1$ とした場合であり、

$$S_D^q = (2X_D \cdot Y_D) / (X_D + Y_D) \quad \cdots \cdots (6)$$

となる。

2. 実験方法

実験には4MVおよび10MV X線が発生する三菱電機株式会社製直線電子加速装置(EXL-15DP)を使用した。上下段コリメータ(Y, X)のモニタ電離箱に与える影響は、この論文で取り扱っている項目に関しては付録Aに記述しているように一般に無視できる。

2-1 コリメータ散乱係数(S_c)の測定における検出器方向依存性

ミニファントムには4MVと10MV X線双方に対してアクリル製の円筒形ファントム(直径4cm, 高さ10cm, 測定深5cm)を使用した。ビルドアップキャップにはアクリル製キャップ(4MV X線用: 外径2.4cm, 厚さ0.99g/cm², 10MV X線用: 外径4.9cm, 厚さ2.48g)

cm²)とアルミ製キャップ(4MV X線用: 外径1.45 cm, 厚さ0.97g/cm², 10MV X線用: 外径2.73cm, 厚さ2.88g/cm²)を使用した。

検出器にはPTW社製モデルW23333の0.6cm³指頭型電離箱(電離容積0.61cm³×2.07cm)を使用し, その電位計にはIonex dose master 2590 (NE Technology)を用いた。なお, 線源検出器間距離(SCD)は100cmである。

ミニファントム(アクリル製)あるいはビルドアップキャップ(アルミ製およびアクリル製)を用いて, X線ビーム軸に対して検出器軸を(a)平行に置いた場合, (b)垂直に置いた場合の配置をFig. 2に表わす(なお, ミニファントム軸はX線ビーム軸に対して常に平行にしている)。

Fig. 1 Schematic diagram showing geometric relationship between the detector and the jaw collimators. Also shown are the field sizes projected on the source and detector planes.

2-2 コリメータ反転効果

コリメータ反転効果に関しては面積周囲長比法(A/P法)と照射野マッピング法で行った。ただし, 照射野マッピング法においては, (a)線源/上下段コリメータ/検出器の位置関係から幾何学的荷重係数(k)を求める場合について, (b)平坦化フィルタ/上下段コリメータ/検出器の位置関係から幾何学的荷重係数(k)を求める場合について, (c)コリメータ散乱係数(S_c)の測定データに基づいて幾何学的加重係数(k)を求める場合についてそれぞれコリメータ反転効果精度を調べた。

Kimらの方法による幾何学的加重係数の k 値は式(5)により, $k=1.543$ となる($L_{1x}=336.67$ mm, $L_{2x}=663.33$ mm, $L_{1y}=247.55$ mm, $L_{2y}=752.425$ mm)。コリメータ反転効果に関する測定ではミニファントム(アクリル製)を用いて, X線ビーム軸と検出器軸とを平行にさせて行った。この場合の検出器位置における矩形照射野辺は上下段コリメータによりそれぞれ5~40cmにした。

3. 結果および考察

3-1 検出器の方向依存性

4MV X線に対しては, ミニファントム(アクリル製), アルミ製ビルドアップキャップおよびアクリル製ビルドアップキャップを用いて, X線ビーム軸に対して検出器軸が(a)平行および(b)垂直に置かれた場合(Fig. 2参照)の正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)をそれぞれTable 1(a), (b)に示す。

Table 1(a)に示すように, 検出器軸をX線ビーム軸に対して平行に置いた場合, ミニファントム使用に対するアクリル製ビルドアップキャップ使用での相対誤差は0%から+0.5%に収まっている。またミニファントム使用に対するアルミ製ビルドアップキャップ使用での相対誤差は-0.1%から+0.3%に収まっている。

Table 1(b)に示すように, 検出器軸をX線ビーム軸に対して垂直に置いた場合, ミニファントム使用に対するアクリル製ビルドアップキャップ使用での相対誤差は-0.4%から+0.9%収まっている。またミニファントム使用に対するアルミ製ビルドアップキャップ使用での相対誤差は0%から+0.6%に収まっている。

ミニファントム使用では, 検出器軸をX線ビーム軸に対して平行および垂直に置いた場合でもその間に有意な差が見られなかった。これにより, ミニファントム使用では混入電子による影響がなくなることが理解される。

アルミ製およびアクリル製ビルドアップ使用に関しては, 検出器軸をX線ビーム軸に対して平行に置く場合より, 垂直に置く場合の方が 10×10 cm²以上で全体的に少し大きい値を示すことが理解される。この現象は混入電子による影響³⁾と思われる。

Fryeら¹⁰⁾によると, ビルドアップキャップとミニファントムによる測定結果では, 4MV X線でその差は0.5%以内で一致している。混入電子の影響の程度はビルドアップキャップのわずかな厚さの変化, 照射ヘッド内部構造の違いによって大きく左右されることが理解される。なお, Khanら²⁾は4MV X線に対して, Plexiglas製とアルミ製ビルドアップキャップによる測定結果には有意な差がないと報告している。

Table 2(a), (b)は, 10MV X線に対するコリメータ散乱係数(S_c)を表す。ミニファントム使用では4MV X線の場合と同様に検出器軸をX線ビーム軸に対して, (a)平行および(b)垂直に置いた場合(Fig. 2参照)ともほとんど同じ結果になった。検出器軸をX線ビーム軸に対して平行に配置した場合, ミニファントム使用とアルミ製・アクリル製ビルドアップキャップ使用間で有意な差はなかった。しかし, 検出器軸をX線ビーム軸に対して垂直に配置した場合, ミニファントム使

Table 1 Sets of 4MV X-ray collimator scatter factors (S_c) obtained using an acrylic mini-phantom, an aluminum build-up cap, and an acrylic build-up cap. The chamber axis is (a) parallel and (b) perpendicular to the beam axis.

(a) Parallel

	Side of square field (cm) at SCD 100cm															
	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
Mini	0.975	0.981	0.987	0.992	0.996	1.000	1.004	1.008	1.009	1.012	1.013	1.016	1.019	1.021	1.024	1.026
Al	0.975	0.982	0.987	0.991	0.996	1.000	1.005	1.007	1.009	1.011	1.014	1.016	1.020	1.024	1.026	1.027
Acry	0.976	0.983	0.989	0.994	0.997	1.000	1.005	1.008	1.010	1.013	1.015	1.019	1.023	1.025	1.025	1.027

(b) Perpendicular

	Side of square field (cm) at SCD 100cm															
	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
Mini	0.975	0.981	0.988	0.993	0.996	1.000	1.004	1.008	1.011	1.012	1.014	1.019	1.021	1.023	1.024	1.025
Al	0.975	0.981	0.989	0.993	0.997	1.000	1.005	1.009	1.013	1.015	1.017	1.022	1.026	1.028	1.030	1.031
Acry	0.971	0.979	0.986	0.991	0.996	1.000	1.005	1.009	1.012	1.015	1.018	1.023	1.026	1.030	1.032	1.034

Mini:Mini-phantom ($h=10\text{cm}$), Al:Aluminum build-up cap, Acry:Acrylic build-up cap

Detector:PTW W23333 0.6cm³ thimble ionization chamber

Table 2 Sets of 10 MV X-ray collimator scatter factors (S_c) obtained using an acrylic mini-phantom, an aluminum build-up cap, and an acrylic build-up cap. The chamber axis is (a) parallel and (b) perpendicular to the beam axis.

(a) Parallel

	Side of square field (cm) at SCD 100cm															
	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
Mini	0.968	0.978	0.984	0.990	0.997	1.000	1.007	1.011	1.015	1.018	1.020	1.026	1.029	1.032	1.035	1.036
Al	0.968	0.978	0.985	0.991	0.996	1.000	1.006	1.011	1.016	1.018	1.021	1.027	1.029	1.033	1.035	1.036
Acry	0.963	0.977	0.984	0.989	0.995	1.000	1.008	1.013	1.017	1.021	1.024	1.028	1.034	1.036	1.039	1.040

(b) Perpendicular

	Side of square field (cm) at SCD 100cm															
	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
Mini	0.968	0.976	0.984	0.990	0.996	1.000	1.007	1.012	1.016	1.019	1.022	1.028	1.031	1.033	1.037	1.038
Al	0.963	0.972	0.982	0.989	0.996	1.000	1.009	1.013	1.020	1.023	1.027	1.029	1.037	1.041	1.043	1.046
Acry	0.962	0.973	0.982	0.990	0.996	1.000	1.010	1.016	1.021	1.025	1.029	1.035	1.039	1.042	1.044	1.045

Mini:Mini-phantom ($h=10\text{cm}$), Al:Aluminum build-up cap, Acry:Acrylic build-up cap

Detector:PTW W23333 0.6cm³ thimble ionization chamber

Fig. 2 Irradiation geometries for the measurement of collimator scatter factors (S_c) using a mini-phantom and build-up cap.

(a) The chamber axis is parallel and (b) perpendicular to the beam axis.

用とアルミ製・アクリル製ビルドアップキャップ使用間で最大0.9%の差が生じた。これはアルミ製・アクリル製ビルドアップキャップの使用においては、線源側からみてX線ビーム軸に対して検出器軸を平行あるいは垂直に置いた場合とでは、ビルドアップキャップの形状が変わり、それによって混入電子³⁾による影響の違いが反映されたものと推測する。

保科⁷⁾の結果では10MV X線の場合、正方形照射野20×20 cm²を超えると、ミニファントム使用とビルドアップキャップ使用間において1%以上の差を検出している。この現象は照射ヘッド内からの混入電子の影響がビルドアップキャップを用いた場合に反映されていると結論し、混入電子の影響を受けないミニファントム使用の利点を強調している。われわれの測定結果では1%以上を超えることはなかった。混入電子による影響の程度は照射ヘッドの構造に大きく依存することに注目しなければならない。

中川ら⁵⁾は⁶⁰Coγ線、6MV X線および15MV X線照射において、ミニファントム使用ではX線ビーム軸に対して検出器軸の挿入方向の違いによるコリメータ散乱係数(S_c)への影響は無視できると報告している。われわれの結果でもX線エネルギー4MV、10MV X線でこのことが確認された。

3-2 コリメータ反転効果

コリメータ反転効果に関する測定はすべてミニファントム(アクリル製)を用いて、検出器軸をX線ビーム軸に対して平行に配置して行った。Table 3, 4はそれぞれ4MV、10MV X線に対する矩形照射野コリメータ散乱係数(S_c)を表わす。

等価正方形への変換はA/P法と照射野マッピング法で行った。なお、照射野マッピング法では上下段コリメータなどの幾何学的配置より決めた k 値(幾何学的荷重係数)を用いる方法と k 値を実測した矩形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に基づいて決定する方法とを採用した。

4MVおよび10MV X線に関して、Table 3, 4での矩形照射野コリメータ散乱係数(S_c)をA/P法((6)式)によって変換した等価正方形照射野をそれぞれFig. 3(a)およびFig. 3(b)に示す。黒三角(▲)は正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)の測定値を示す。実線はそれらを正方形照射野辺に関して五次多項式で表わしたものである。

4MV X線の場合、実線で示した正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は-0.59%から+1.17%に分布している。他方、10MV X線の場合、実線の正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して等価照射野

変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は-1.23%から+1.35%に分布している。いずれの場合でもかなり大きな誤差になっている。

線源、絞り機構および検出器の幾何学的位置関係から求めた照射野マッピング法による結果は、4MVおよび10MV X線に関してそれぞれFig. 4(a)およびFig. 4, (b)に表す。 k 値には前述の $k=1.543$ を用いている。4MV X線の場合には実線で示した正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して、等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は-0.32%から+0.62%に分布している。他方、10MV X線の場合には、実線で示した正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は-0.61%から+0.81%に分布している。

保科⁷⁾はコリメータ反転効果による影響をKimら⁸⁾の照射野マッピングでは確実に解消し切れないと報告しているが、このことはわれわれの結果と一致する。KimらがX線照射に対して理論的考察で得た(4)式はすでに1993年にVadashとBjängard¹¹⁾により経験的に得られている。この場合 k 値を次のように設定した。

一連の矩形照射野(X_D, Y_D)に対して、あらかじめコリメータ散乱係数(S_c)を実測して置く。なお、正方形照射野で得たコリメータ散乱係数(S_c)を別にグラフ化しておく。次にある k 値を用い(4)式によりある一つの矩形照射野(X_D, Y_D)に対して得た等価正方形照射野(S_D^e)に対する S_c 値をグラフ化したコリメータ散乱係数(S_c)データより求める。この S_c 値と実測 S_c 値との差の絶対値を求める。このことを一連の矩形照射野(X_D, Y_D)について行い差の絶対値の和をつくる。最適な k 値はその和が最小な場合であるとした。

われわれは上記において「差の自乗和」を使用した。この場合の方が全体的により小さな正負の最大相対誤差が得られることが判明したからである。

この方法で求めた幾何学的荷重係数(k)は4MV X線では $k=2.103$ となり、10MV X線では $k=2.280$ となった。これらの k 値を4MV および10MV X線のコリメータ散乱係数(S_c) (Table 3, 4)に適用した場合の結果をそれぞれFig. 5(a)およびFig. 5(b)に表す。

4MV X線の場合には、実線で示した正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は-0.31%から+0.46%に分布している。他方、10MV X線の場合には、実線の正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は-0.23%から+0.41%に分布している。前述の二つの方法(A/P法, $k=1.543$ を使用した照射野マッピング法)に比べてかなり高い精度が得られた。

照射ヘッド内の構造物(一次コリメータ, 上下段コ

Table 3 4MV X-ray collimator scatter factors (S_c) measured using the mini-phantom method for rectangular fields produced by the upper and lower collimators.

Upper jaw (cm)	Lower jaw (cm)															
	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
5	0.975	0.977	0.978	0.980	0.980	0.981	0.982	0.982	0.983	0.983	0.983	0.983	0.983	0.984	0.984	0.984
6	0.978	0.981	0.983	0.984	0.985	0.986	0.988	0.989	0.989	0.989	0.990	0.990	0.989	0.990	0.990	0.990
7	0.982	0.985	0.987	0.989	0.990	0.992	0.992	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.994	0.995	0.995
8	0.984	0.988	0.991	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998
9	0.987	0.991	0.993	0.994	0.996	0.997	0.998	0.999	0.999	0.999	1.000	1.000	1.001	1.001	1.002	1.002
10	0.989	0.992	0.995	0.997	0.998	1.000	1.000	1.002	1.002	1.002	1.002	1.002	1.003	1.004	1.004	1.005
12	0.991	0.996	0.998	1.000	1.001	1.003	1.004	1.004	1.005	1.005	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009	1.010
14	0.994	0.998	1.001	1.002	1.004	1.005	1.006	1.008	1.007	1.009	1.008	1.008	1.009	1.009	1.010	1.014
16	0.995	0.999	1.002	1.003	1.004	1.006	1.007	1.009	1.009	1.010	1.010	1.011	1.012	1.013	1.014	1.015
18	0.996	1.000	1.003	1.004	1.006	1.007	1.010	1.011	1.011	1.012	1.012	1.012	1.013	1.013	1.015	1.017
20	0.996	1.000	1.003	1.005	1.007	1.008	1.010	1.012	1.012	1.013	1.013	1.015	1.014	1.017	1.018	1.019
24	0.998	1.001	1.004	1.006	1.008	1.009	1.011	1.013	1.014	1.014	1.015	1.016	1.017	1.017	1.021	1.021
28	0.998	1.002	1.005	1.007	1.009	1.011	1.013	1.014	1.015	1.016	1.016	1.017	1.019	1.020	1.022	1.023
32	0.999	1.003	1.007	1.008	1.011	1.012	1.014	1.016	1.016	1.017	1.018	1.018	1.020	1.021	1.023	1.024
36	1.000	1.004	1.007	1.010	1.012	1.014	1.016	1.017	1.018	1.018	1.019	1.020	1.021	1.023	1.024	1.025
40	1.001	1.005	1.009	1.011	1.013	1.015	1.017	1.018	1.019	1.019	1.020	1.021	1.022	1.024	1.025	1.026

Detector:PTW W23333 0.6cm³ thimble ionization chamberTable 4 10 MV X-ray collimator scatter factors (S_c) measured using the mini-phantom method for rectangular fields produced by the upper and lower collimators.

Upper jaw (cm)	Lower jaw (cm)															
	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	24	28	32	36	40
5	0.968	0.972	0.974	0.975	0.976	0.977	0.978	0.979	0.980	0.981	0.981	0.982	0.982	0.983	0.983	0.983
6	0.973	0.978	0.980	0.981	0.983	0.984	0.986	0.985	0.986	0.987	0.986	0.989	0.989	0.990	0.990	0.989
7	0.977	0.983	0.984	0.985	0.988	0.989	0.991	0.991	0.992	0.992	0.992	0.994	0.995	0.995	0.996	0.995
8	0.981	0.986	0.988	0.990	0.993	0.993	0.995	0.995	0.997	0.997	0.997	0.998	0.999	0.999	1.000	1.000
9	0.984	0.990	0.992	0.992	0.997	0.997	0.999	0.999	1.000	1.000	1.001	1.002	1.004	1.003	1.004	1.004
10	0.987	0.992	0.995	0.995	1.000	1.000	1.002	1.003	1.004	1.003	1.004	1.005	1.008	1.007	1.008	1.008
12	0.991	0.996	0.999	1.000	1.003	1.005	1.007	1.007	1.009	1.008	1.009	1.011	1.013	1.013	1.014	1.013
14	0.993	0.999	1.002	1.003	1.007	1.008	1.011	1.011	1.012	1.012	1.013	1.015	1.017	1.017	1.018	1.018
16	0.996	1.002	1.004	1.006	1.009	1.009	1.013	1.014	1.015	1.015	1.016	1.018	1.020	1.020	1.021	1.021
18	0.997	1.003	1.006	1.007	1.010	1.012	1.015	1.016	1.017	1.018	1.019	1.021	1.022	1.022	1.024	1.023
20	0.999	1.004	1.008	1.009	1.012	1.014	1.017	1.018	1.018	1.019	1.020	1.023	1.024	1.024	1.026	1.025
24	1.001	1.007	1.010	1.011	1.014	1.016	1.019	1.020	1.020	1.021	1.023	1.026	1.027	1.027	1.029	1.029
28	1.003	1.008	1.012	1.013	1.016	1.018	1.021	1.022	1.023	1.024	1.025	1.028	1.029	1.029	1.031	1.031
32	1.005	1.009	1.013	1.016	1.018	1.020	1.023	1.025	1.026	1.027	1.029	1.030	1.032	1.031	1.033	1.032
36	1.006	1.012	1.015	1.018	1.019	1.022	1.025	1.026	1.027	1.028	1.030	1.033	1.034	1.033	1.034	1.034
40	1.008	1.014	1.016	1.020	1.021	1.023	1.026	1.028	1.030	1.031	1.032	1.033	1.035	1.035	1.036	1.036

Detector:PTW W23333 0.6cm³ thimble ionization chamber

Fig. 3 Sets of (a) 4MV and (b) 10MV X-ray collimator scatter factors (S_c) for equivalent square fields obtained using the A/P method ($k=1$). Black triangles are for square fields (the solid curve was drawn using a polynomial expression created using the S_c data). The other sets of symbols are for rectangular fields, where the X jaw is fixed for each set.

a | b

Fig. 4 Sets of (a) 4MV and (b) 10MV X-ray collimator scatter factors (S_c) for equivalent square fields produced using the field mapping method ($k=1.543$) proposed by Kim. Black triangles are for square fields (the solid curve was drawn using a polynomial expression created using the S_c data). The other sets of symbols are for rectangular fields, where the X jaw is fixed for each set.

a | b

Fig. 5 Sets of (a) 4MV and (b) 10MV X-ray collimator scatter factors (S_c) for equivalent square fields obtained using the field mapping method with the most suitable k -values ($k=2.103$ for 4 MV X-rays and $k=2.280$ for 10 MV X-rays). Black triangles are for square fields (the solid curve was drawn using a polynomial expression created using the S_c data). The other sets of symbols are for rectangular fields, where the X jaw is fixed for each set.

a | b

Fig. 6 Sets of (a) 4 MV and (b) 10 MV X-ray collimator scatter factors (S_c) for equivalent square fields produced using the field mapping method proposed by Kim, where $k=1.990$, derived using the concept of extra-focal radiation. Black triangles are for square fields (the solid curve was drawn using a polynomial expression created using the S_c data). The other sets of symbols are for rectangular fields, where the X jaw is fixed for each set.

a | b

リメータ、平坦化フィルタなど)から散乱線が放出される。最近はこの散乱線をExtra-focal radiation¹²⁾と呼んでいる。散乱線が最も多く放出するのが平坦化フィルタなので、これを第2線源とする考え方が有る。平坦化フィルタ/上下段コリメータ/検出器の幾何学的位置関係から求めた k 値は $k=1.990$ になる (Fig. 1参照)。この値は、コリメータ散乱係数(S_c)測定データに基づいて決めた k 値(4MV X線では $k=2.103$, 10MV X線では $k=2.280$)に近いことが判る。このことは、平坦化フィルタを第2線源とする考え方が妥当であることが理解される。

k 値に $k=1.990$ を用いた計算結果 (Fig. 6(a), (b)参照) では、実線の正方形照射野コリメータ散乱係数(S_c)に対して 4MV X線での等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は -0.29% から 0.44% に分布し、10MV X線での等価照射野変換後のコリメータ散乱係数(S_c)の相対誤差は -0.33% から 0.46% に分布している。4MV X線に関しては、 $k=1.990$ (平坦化フィルタ位置を用いた照射野マッピング法)を用いた場合の方が $k=2.103$ (S_c 測定データに基づいて決めた値)を用いた場合より、相対誤差の最小値、最大値だけを比較すると、わずかであるが計算精度が高くなる結果になった。

4. 結 論

コリメータ散乱係数(S_c)の測定に関しては、ミニファントム(アクリル製)を利用した場合、電離箱軸をX線ビーム軸に対して平行および垂直配置にして求めた S_c データ間に有意な差は認められなかった。アルミまたはアクリル製ビルドアップキャップを用いた場合には、電離箱軸をX線ビーム軸に対して平行配置にする

と、混入電子の影響を抑える効果があると推測された。

4MVおよび10MV X線のコリメータ散乱係数(S_c)に関して、矩形照射野を等価正方形照射野に変換する3方法を考察し、次の結論が得られた。

- (1) 照射ヘッドの内部構造を考慮しなければならない場合にはA/P法は必ずしも精度の優れた方法ではない。
- (2) 照射野マッピング法で、extra-focal radiationの概念で捉えた第2線源(平坦化フィルタ)の位置関係から求めた幾何学的荷重係数(k)は精度の高い結果を導く。
- (3) 照射野マッピング法で、幾何学的荷重係数(k)をコリメータ散乱係数(S_c)の測定データに基づいて決めると、概して最も高い結果を導く。

付録A：上下段コリメータがモニタ電離箱へ与える影響

Duzenliら¹³⁾の提案したピンホール法を用いて、上下段コリメータからの後方散乱がモニタ電離箱に与える影響の度合いを調べた⁶⁾。その実験配置をFig. 7に表す。この実験配置ではおもに線源および平坦化フィルタからのX線出力の測定を目標にしているので、上下段コリメータからの後方散乱がモニタ電離箱へ与えるの影響の度合いが判明する。

4MVおよび10MV X線に対するコリメータ散乱係数(S_c)の結果をFig. 8(a)およびFig. 8(b)に示す。ただし、これらのデータは放射線検出器位置で $40 \times 40 \text{ cm}^2$ の正方形照射野を作るコリメータ開度で得られるコリメータ散乱係数(S_c)を基準にして作った。これにより4MV および10MV X線双方に対して次のことが判明

Fig. 7 Schematic diagram (pinhole method) used for evaluating the effect of backscatter from the upper and lower collimators (Y and X) on the monitor chamber.

Fig. 8 (a) 4 MV and (b) 10 MV X-ray collimator scatter factors (S_c) with both or each of the upper and lower collimators (Y and X) being variable, obtained using the pinhole method. Black triangles represent data obtained with $Y_D=40$ cm (constant) and X_D variable. Black squares were obtained with $X_D=40$ cm (constant) and Y_D variable. White circles were obtained with $Y_D=X_D$ variable (the solid curve was drawn using a polynomial expression created using the S_c data).

a | b

した。

- (1) 下段コリメータ(X)による照射野辺を $X_D=40$ cm一定にしたデータ(■印)は正方形照射野データ(○印)と殆ど一致する。
- (2) 上段コリメータ(Y)による照射野辺を $Y_D=40$ cm一定にしたデータ(▲印)は下段コリメータ(X)による照射野辺の変化に対してほとんど影響を受けない。

照射野辺 4cmにおいて▲印の値は■印の値に比して、4MV X線の場合約1.9%、10MV X線の場合約1.7%それぞれ高い。このことは照射野辺 4cmにおいて

は上段コリメータ(Y)は、4MV X線の場合約1.9%だけ、10MV X線の場合約1.7%だけそれぞれモニタ電離箱へ余分に影響を及ぼすことが理解される。10×10 cm²の照射野を規準とするコリメータ散乱係数(S_c)では、4MVおよび10MV X線照射双方において、モニタ電離箱は最大約1%だけ上段コリメータ(Y)によって影響を受けていることになる。このことはモニタユニット(MU)線量計の上下段コリメータによる影響は最大1%となるが、通常使用する照射野30×30 cm²以下では±0.5%となる。よって、上下段コリメータがモニタ電離箱に与える影響は一般に無視できる。

参考文献

- 1) Holt JG, Laughlin JS and Moroney JP: The extension of the concept of tissue-air ratios (TAR) to high-energy x-ray beams. *Radiology*, 96, 437-446, (1970).
- 2) Khan FM, Sewchand W, Lee J, et al.: Revision of tissue-maximum ratio and scatter-maximum ratio concepts for cobalt 60 and Higher x-rays beams. *Med. Phys.*, 7(3), 230-237, (1980).
- 3) Van Gasteren JJM, Heukeloma S, Van Kleffens HJ, et al.: 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. *Radiotherapy and Oncology*, 20, 250-257, (1991).
- 4) IAEA: Absorbed dose determination in phantom and electron beams. IAEA Technical Reports Series 277. pp. 27-29, (1987).
- 5) 中川政幸, 中田 学, 矢野慎輔, 他: 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), 1155-1162, (2000).
- 6) 中田 学: 第54回総会学術大会シンポジウムII. 放射線治療における出力測定の物理的問題. *日放技学誌*, 55(3), 247-250, (1999).
- 7) 保科正夫: 直線加速器での線量計算におけるX線の出力線量の評価. *日放技学誌*, 56(4), 559-571, (2000).
- 8) Kim S, Zhu TC and Palta JR: An equivalent square field formula for determining head scatter factors of rectangular fields. *Med. Phys.*, 24, 1770-1774, (1997).
- 9) 森川賀根雄: 治療用電子ビームの特性—長方形照射野のビームラメーター. *日放技師会雑誌*, 40(7), 854-863, (1993).
- 10) Frye DMD, Paliwal BR, Thomadsen BR, et al.: Inter - comparison of normalized head - scatter factor measurement techniques. *Med. Phys.*, 22(2), 249-253, (1995).
- 11) Vadash P and Bjärngard BE: An equivalent - square formula for head - scatter factors. *Med. Phys.*, 20(3), 733-734, (1993).
- 12) Yu MK and Sloboda R: Analytical representation of head scatter factors for shaped photon beams using a two-component x-ray source model. *Med. Phys.*, 23(6), 973-987, (1996).
- 13) Duzenli C, McCleam B and Field C: Backscatter into the beam monitor chamber: Implication for dosimetry of asymmetric collimators. *Med. Phys.*, 20(2), 363-367, (1993).

図表の説明

- Fig. 1 上下段コリメータ絞りによる線源面への逆投影面積の違いを示す模式図。
- Fig. 2 ミニファントムおよびビルドアップキャップを用いてコリメータ散乱係数(S_c)を測定する幾何学的配置図。検出器軸はX線ビーム軸に対して(a)平行, (b)垂直。
- Fig. 3 A/P法で補正した等価正方形照射野に対するコリメータ散乱係数(S_c)。黒三角(▲)印は正方形照射野に対する値(実線はそれらを多項式で表したもの)。ほかの記号は下段コリメータを固定し, それぞれ上段コリメータを矩形照射野。(a)4MV X線, (b)10MV X線。
- Fig. 4 Kimの照射野マッピング法で補正した等価正方形照射野に対するコリメータ散乱係数(S_c)。黒三角(▲)印は正方形照射野に対する値(実線はそれらを多項式で表したもの)。ほかの記号は下段コリメータを固定し, それぞれ上段コリメータを矩形照射野。(a)4MV X線, (b)10MV X線。
- Fig. 5 照射野マッピング法でk値に最適な値を採用した場合の等価正方形照射野の算出。黒三角(▲)印は正方形照射野に対する値(実線はそれらを多項式で表したもの)。ほかの記号は下段コリメータを固定し, それぞれ上段コリメータを矩形照射野。(a)4MV X線, (b)10MV X線。
- Fig. 6 Kimの照射野マッピング法において, extra-focal radiationの概念を用いて得たk値で補正した等価正方形照射野に対するコリメータ散乱係数(S_c)。黒三角(▲)印は正方形照射野に対する値(実線はそれらを多項式で表したもの)。ほかの記号は下段コリメータを固定し, それぞれ上段コリメータを矩形照射野。(a)4MV X線, (b)10MV X線。
- Fig. 7 上下段コリメータ(Y, X)からの後方散乱がモニタ電離箱に与える影響を測定するための配置図(ピンホール法)。
- Fig. 8 ピンホール法において, 上段コリメータ(Y), 下段コリメータ(X)の双方または一方を変えた場合のコリメータ散乱係数(S_c)。黒三角(▲)印は $Y_D=40\text{cm}$ (一定), X_D =可変。黒四角(■)は $X_D=40\text{cm}$ (一定), Y_D =可変。白丸(○)は $Y_D=X_D$ =可変(実線はそれらを多項式で表したもの)。(a)4MV X線, (b)10MV X線。
- Table 1 ミニファントム(アクリル製), アルミ製ビルドアップキャップ, アクリル製ビルドアップキャップを用いて得られた4MV X線のコリメータ散乱係数(S_c)。線量計軸はX線ビーム軸に対して(a)平行, (b)垂直。
- Table 2 ミニファントム(アクリル製), アルミ製ビルドアップキャップ, アクリル製ビルドアップキャップを用いて得られた10MV X線のコリメータ散乱係数(S_c)。線量計軸はX線ビーム軸に対して(a)平行, (b)垂直。
- Table 3 ミニファントム法による4MV X線の上下段コリメータを変化させた場合のコリメータ散乱係数(S_c)。
- Table 4 ミニファントム法による10MV X線の上下段コリメータを変化させた場合のコリメータ散乱係数(S_c)。