コリメータ散乱係数(S_c)およびファントム散乱係数(S_p)を用いた 10MV X線不整形照射野線量評価法

奈良鉄造・岩崎 晃¹⁾・佐藤和彦・駒井史雄・福士英人・洞内美明

論文受付
2003年1月9日

論文受理
2003年9月5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

近年、外部放射線治療における医療用直線加速器にはアイソセンタ位置において5mm幅の多分割絞り(multi-leaf collimator, MLC)が標準装備されたものが臨床応用されている。それにより、計画標的体積(planning target volume, PTV)にはほぼ一致した照射野設定ができ、危険臓器や正常組織を避けた照射が一般に可能となった。線量評価点もガントリー回転中心軸(アイソセンタ)とは限らず、不整形照射野内での任意の点で評価しなければならないことも生ずる。ファントム中のある点での線量を評価する際に、それを一次

成分と散乱成分とに分けて行う方法がある。この場合、Khanら¹⁾の提唱したコリメータ散乱係数(S_c)およびファントム散乱係数(S_p)を用いることで、照射ヘッドからの実効一次線量とファントム内で生ずる散乱線量とを分離して線量計算を行うことが可能となった。

最近の線量計算²⁾は、次のとおりである。種々の照射野について、基準点出力係数(output factor, OPF)および深部量百分率(PDD)が知られていれば、基準照射野(10×10cm²)に対する校正点吸収線量を実測することにより任意の照射野および深さに対する吸収線量の計算が一般に可能である。しかし、複雑なMLC不

Method of Estimating 10 MV X-Ray Irregular Field Dose Using the Collimator Scatter Factor(S_c) and Phantom Scatter Factor(S_p)

TETSUZO NARA, AKIRA IWASAKI,¹⁾ KAZUHIKO SATO, FUMIO KOMAI, HIDETO FUKUSHI, and YOSHIKI HORANAI

Department of Radiology, Aomori Prefectural Center Hospital

1)Hiroaki University School of Health Sciences

Received Jan. 9, 2003; Revision accepted Sept. 5, 2003; Code No. 852

Summary

It has been found that in general 10 MV X-ray dose calculation can be made accurately for multi-leaf collimator irregular fields by using the total scatter factor(S_{cp}), collimator scatter factor(S_c), and phantom scatter factor(S_p) proposed by Khan et al. With respect to the collimator scatter factor(S_c), we used the field-mapping method of Kim et al. to obtain equivalent square fields of irregular fields (the collimator reverse effect can be accurately dissolved using the field-mapping method). Even for extremely small multi-leaf fields compared with the main collimator opening, X-ray output calculations could be made accurately by introducing the small segment correction(SSC) factor. With respect to the phantom scatter factor(S_p), highly accurate calculations could be made for irregular field irradiation by applying an F_{MLC} (MLC radiation leakage) factor to the equivalent square field (in cases in which the ratio of the multi-leaf equivalent square field side to the main collimator equivalent square field side is less than 0.6). However, it has been found that highly accurate dose calculations can, in general, be performed when the main collimator is limited just at the opening determined by the multi-leaf collimator field.

Key words: Collimator scatter factor (S_c), Phantom scatter factor (S_p), Small segment correction factor (SSC), Multi-leaf collimator (MLC)

別刷資料請求先: 〒030-8553

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

整形照射野を使用する場合、主コリメータがMLC最大開度まで閉じていない場合およびコリメータ反転効果^{3, 4)}を考慮しない空中出力係数を用いる場合には、まだ線量計算精度に問題がある。

今回、われわれはコリメータ散乱係数(S_c)およびファントム散乱係数(S_p)を個別に用いて、上記の問題点を解決できる不整形照射野線量を評価する方法を開発したので以下に報告する。

1. 理論的背景

1-1 不整形照射野に対するSSC係数の算出法

主コリメータ照射野に比べて、MLCによって作られた不整形照射野が極端に小さい場合には、Jacksonら⁵⁾のSSC係数(small segment correction, SSC)を導入してMLC照射野からのX線出力〔散乱係数(S_c)〕を算出する方法がある。次にSSC係数の算出法を述べる。下段コリメータ、MLCおよびアイソセンタの幾何学的関係から決まる幾何係数(G)を次式で定義する(Fig. 1)。

$$G = \frac{A \times (C - B)}{B \times (C - A)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A は線源から下段コリメータの上縁までの距離、 B は線源からMLCの中間までの距離、 C は線源からアイソセンタまでの距離である。

次にSSCの補正係数は、上記の幾何係数(G)を用い、次式で定義される。

$$SSC = \frac{S_c(S_{MLC}^{eq})}{S_c(S_{coll}^{eq} \times G)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 S_{MLC}^{eq} は不整形照射野の等価正方形照射野辺であり、 S_{coll}^{eq} は主コリメータ照射野の等価正方形照射野辺である。式(2)より求められるSSCが1を超える場合はSSC=1とする。式(2)はMLCからの散乱X線の影響を考慮していない(高エネルギーX線の散乱は一般にビーム進行方向に強く現れる)。

不整形照射野のコリメータ散乱係数(S_c)を求める計算式は次式となる。

$$S_c(\text{Coll} + \text{MLC}) = S_c(S_{coll}^{eq}) \times SSC \quad \dots\dots\dots (3)$$

この具体的な計算例を付録に記す。

この論文では S_{coll}^{eq} は、Kimの照射野マッピング法で求めた等価正方形照射野辺を用いた。 S_{MLC}^{eq} の値を求めるのに、JacksonらはA/P法を採用しているが、複雑なMLC不整形照射野では必ずしも正確な等価正方形照射野辺を求められない場合もある。 S_{MLC}^{eq} には、われわれはファントム散乱係数(S_p)を用いたClarkson積分法を適応させた。この方法を1-2に記述する。

Fig. 1 Schematic diagram used to obtain the geometrical factor (G) for an irregular field. Also shown is the geometric relationship between the lower collimator and the multi-leaf collimator.

1-2 Clarkson積分法による等価照射野の決定

不整形照射野に対する等価照射野の決定は、両照射野における散乱線量が一致することが必要である。この場合、一次線量は互いに一致するという前提に立っている。不整形照射野の散乱線量を直接的に考慮して等価照射野を決める方法として、下記のものが報告されている。

- (1) ファントム散乱係数(S_p)を用いる方法⁶⁾
- (2) 散乱最大線量比(scatter-maximum ratio, SMR)を用いる方法^{7, 8)}
- (3) 散乱係数(一次線量に対する散乱線量の比)と幾何学的変数を用いる方法⁹⁾

今回、われわれは、Venselaarら⁶⁾によるファントム散乱係数(S_p)を用いる方法を採用した。この場合、円形照射野ファントム散乱係数(S_p)を用いたClarkson積分法によって、不整形照射野に対する等価正方形照射野辺の長さを以下のように求めた(Fig. 2)。

$$S_p = \frac{1}{2\pi} \sum_i S_p(r_i) \Delta\theta_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\sum_i \Delta\theta_i = 2\pi$ 、 $S_p(r_i)$ は半径 r_i のファントム散乱係数(S_p)である。等価正方形照射野は上式のファントム散乱係数(S_p)と同じ値を有する大きさの正方形照射野とする。

1-3 線量の計算

STD法における照射で、主コリメータとMLCとで決まる照射野($A_{\text{coll}+\text{MLC}}$)のビーム中心軸上の水中で深さ(d)での線量は次式で求めた。

$$D(d, A_{\text{coll}+\text{MLC}}) = D(d_r, 10 \times 10) \times S_c(\text{Coll} + \text{MLC}) \times S_p(S_{MLC}^{eq} \times F_{MLC}) \times \text{TPR}(d, S_{MLC}^{eq} \times F_{MLC}) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $D(d_r, 10 \times 10)$ は照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、基準深 d_r での線量である。 $S_c(\text{Coll+MLC})$ は主コリメータとMLCとで決まるコリメータ散乱係数(S_c)である。 S_{MLC}^{eq} はMLCの等価正方形照射野辺である。 F_{MLC} はMLCからの散乱、透過線量を考慮した補正係数(MLC洩洩補正係数)であり、設定した主コリメータ正方形照射野辺に対するMLC正方形照射野辺の比の関数で定義する(F_{MLC} は後述するFig. 5から得られる)。

TPR($d, S_{MLC}^{eq} \cdot F_{MLC}$)は深さ d 、等価正方形照射野辺($S_{MLC}^{eq} \cdot F_{MLC}$)の組織ファントム線量比(TPR)である。なお、ファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(TPR)の基準深は d_r である。

2. 実験方法

2-1 X線発生装置

実験には三菱電機株式会社製医療用直線加速装置(EXL-15DP)からの10MV X線を用いた。絞リ機構は主コリメータ(上下段コリメータ)と多分割絞リ(MLC)からなる。なお、MLCはアイソセンタ位置で5mm幅40対、その両側に1cm幅10対からなる。

2-2 MLCがかかわるコリメータ散乱係数(S_c)、全散乱係数(S_{cp})およびファントム散乱係数(S_p)

2-2-1 コリメータ散乱係数(S_c)とSSC係数

主コリメータ照射野を 6×6 、 8×8 、 10×10 および $16 \times 16 \text{ cm}^2$ に設定し、それぞれの内側にMLCで正方形照射野を作り、SSC係数とコリメータ散乱係数(S_c)の計算および測定を行った。これらのコリメータ散乱係数(S_c)の計算には、式(1)より求めた幾何係数 $G=0.6554$ ($A=33.9 \text{ cm}$ 、 $B=43.9 \text{ cm}$ 、 $C=100 \text{ cm}$)と式(2)より求めたSSC係数を用いた。ただし、主コリメータのみによって作られる照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ によるコリメータ散乱係数(S_c)を基準とした。

MLC照射野のコリメータ散乱係数(S_c)の測定は、次のように行った。

- (I) 検出器には、PTW社製 0.6 cm^3 指頭形電離箱(6.1mm $\phi \times 20.7 \text{ mm}$)を用い、X線ビーム軸に対して検出軸を平行に配置した。電位計にはNE-Technology社製Ionex dosemaster 2590を用いた。
- (II) 正方形照射野 1 $\times 1 \text{ cm}^2$ から4 $\times 4 \text{ cm}^2$ までは、アルミ製ビルドアップキャップ(外径2.73cm、厚さ2.88g/ cm^2)を用い、線源電離箱間距離(SCD)300cmで測定した。
- (III) 正方形照射野 5 $\times 5 \text{ cm}^2$ から16 $\times 16 \text{ cm}^2$ まではアクリル製ミニファントム(断面積4 cm^2 、長さ10cm、測定深5cm)を用い、線源電離箱間距離(SCD)100cmで測定した。

Fig. 2 Diagram showing how to obtain the equivalent square field side using the Clarkson integration method.

2-2-2 全散乱係数(S_{cp})とファントム散乱係数(S_p)

全散乱係数(S_{cp})は、2-2-1と同じ組み合わせの主コリメータ照射野とMLC照射野を用いた。測定は、混入電子の影響がない水中深5cmを基準深(d_r)とし、次のように行った。

- (I) 正方形照射野 1 $\times 1 \text{ cm}^2$ ではScanditronix社製P-Si type 半導体検出器(0.6mm $\phi \times 0.5 \text{ mm}$)を用いた(SCD 100cm)。
- (II) 正方形照射野 2 $\times 2 \text{ cm}^2$ から16 $\times 16 \text{ cm}^2$ まではPTW社製 0.015 cm^3 指頭形電離箱(2mm $\phi \times 5 \text{ mm}$)を用いた(SCD 100cm)。
- (III) 指頭形電離箱および半導体検出器の電位計には、NE-Technology社製Ionex dosemaster 2590およびScanditronex社製DPD-3をそれぞれ用いた。

ただし、主コリメータのみによって作られる照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ による全散乱係数(S_{cp})を基準とした。ファントム散乱係数(S_p)は、2-2-1と同じ組み合わせの主コリメータ照射野とMLC照射野に対して、実測した全散乱係数(S_{cp})とコリメータ散乱係数(S_c)を用いて次式により求めた。

$$S_p(A_{\text{coll+MLC}}) = \frac{S_{cp}(A_{\text{coll+MLC}})}{S_c(A_{\text{coll+MLC}})} \quad \dots\dots\dots (6)$$

2-3 MLC洩漏線量の測定

10 $\times 10 \text{ cm}^2$ の主コリメータ照射野をMLCで全閉した場合のタフウォータファントム内での線量分布で、MLC洩漏線量を評価した。深さ5cmにフィルム(Kodak社製XV2)をX線ビーム軸に対して垂直に置き照射した。なお、線源フィルム間距離(SFD)は100cmとし、濃度計にはCMS社製DynaScanを用いた。

2-4 off-axis distanceの変化に対する線量測定

主コリメータ照射野を10 $\times 10 \text{ cm}^2$ 一定にし、その内

側にMLC照射野 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ を作り、MLC照射野の中心位置をアイソセンタより $0 \sim 3 \text{ cm}$ (off-axis distance, OAD) 変位させた。この場合、全散乱係数(S_{cp})に対しては、それぞれのOADにおいてタフウォータファントム 5 cm 深での線量(主コリメータ照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$)を基準とし、MLC照射野中心での線量を測定した。コリメータ散乱係数(S_c)に対しては、それぞれのOADにおいて空中線量(主コリメータ照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$)を基準とし、MLC照射野中心での空中線量を測定した。

2-5 MLC不整形照射野の形状と評価点

13種類の主コリメータ・MLC照射野の組み合わせを作った。それらの形状と評価点をFig. 3に示す。

3. 結果

3-1 MLCがかかわるコリメータ散乱係数(S_c)およびSSC係数

MLC照射野使用におけるコリメータ散乱係数(S_c)、SSC係数の測定結果および計算結果をTable 1(a), (b)およびTable 2(a), (b)に示す。Table 1(a)では、主コリメータ照射野が $6 \times 6 \text{ cm}^2$ であり、MLC照射野の変化は $1 \times 1 \text{ cm}^2$ から $6 \times 6 \text{ cm}^2$ までである。Table 1(b)では、主コリメータ照射野が $8 \times 8 \text{ cm}^2$ であり、MLC照射野の変化は $1 \times 1 \text{ cm}^2$ から $8 \times 8 \text{ cm}^2$ までである。Table 2(a)では、主コリメータ照射野が $10 \times 10 \text{ cm}^2$ であり、MLC照射野の変化は $1 \times 1 \text{ cm}^2$ から $10 \times 10 \text{ cm}^2$ までである。Table 2(b)では、主コリメータ照射野が $16 \times 16 \text{ cm}^2$ であり、MLC照射野の変化は $1 \times 1 \text{ cm}^2$ から $16 \times 16 \text{ cm}^2$ までである。

Table 1(a), (b)およびTable 2(a), (b)それぞれにおいてMLC照射野が $1 \times 1 \text{ cm}^2$ である場合、測定値に対する計算値の相対誤差はSSC係数では平均 -2.9% であり、コリメータ散乱係数(S_c)では平均 -3.0% である。他のMLC照射野の場合は、両係数とも約 $\pm 1\%$ 以下の相対誤差になっている。

次に、主コリメータ正方形照射野辺に対するMLC正方形照射野辺の比とSSC係数(計算値)の関係を調べた。その結果をFig. 4に示す。実線で示した近似曲線が主コリメータ正方形照射野辺に対するMLC正方形照射野辺の比(横軸)が約 0.64 でSSC係数 1 となる。

3-2 MLC漏洩補正係数(F_{MLC})の算出

主コリメータ照射野 $6 \times 6 \text{ cm}^2$, $8 \times 8 \text{ cm}^2$, $10 \times 10 \text{ cm}^2$, $16 \times 16 \text{ cm}^2$ のそれぞれに対して、内側のMLC照射野を変化させて、コリメータ散乱係数(S_c)、全散乱係数(S_{cp})およびファントム散乱係数(S_p)の値を求めた。その結果をTable 3(a), (b)およびTable 4(a), (b)に示

す。それぞれの表の第1項目はMLC照射野である。第2項目は全散乱係数(S_{cp})である。第3項目はコリメータ散乱係数(S_c)である。第4項目はファントム散乱係数(S_p)である。第5項目は第4項目のファントム散乱係数(S_p)を呈する主コリメータ正方形照射野辺[実効正方形照射野辺(effective square field side)]である。第6項目はMLC正方形照射野辺に対する実効正方形照射野辺の比を表す。

Fig. 5は第6項目の結果を用いて作った F_{MLC} (式(5)参照)を表す。ここで、深さ 2.5 cm ($\blacktriangle$), 5 cm ($\square$), 10 cm ($\circ$), 15 cm ($+$)での主コリメータ照射野は 6×6 , 8×8 , 10×10 および $16 \times 16 \text{ cm}^2$ である。実線は深さ 5 , 10 および 15 cm での平均値を直線で近似したものである(深さ 2.5 cm での値は、混入電子の影響のため、他の深さでの値に対して全体的に大きく離散しているので、近似直線を作る場合に除外した)。

3-3 MLC漏洩線量

タフウォータファントム深 5 cm におけるMLC漏洩線量分布(フィルム法)をFig. 6に示す。主コリメータ照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ において、MLCを全閉した状態でMLC片軸に対して直角な方向での分布である。ただし、MLCを全開にした場合の照射野中心における線量を 100% とした。コリメータ回転中心軸から正側3と4番目のMLC間が他のMLC間に比べて漏洩が相対的に大きくなっている。平均して約 4.5% の漏洩線量となっている。このようにMLCは主コリメータのような高い遮蔽能力はない。

3-4 off-axis distance(OAD)の変化に対する線量計算精度

主コリメータ正方形照射野の内側に作られたMLC照射野($4 \times 4 \text{ cm}^2$)の中心がコリメータ回転中心軸より変位した場合、コリメータ散乱係数(S_c)、ファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(TPR)に関する計算結果をFig. 7とTable 5に示す(この変位方向での平坦度は良好である)。コリメータ散乱係数(S_c)に関しては、SSC係数を用いない場合と用いた場合の測定値に対して、計算値の平均相対誤差はそれぞれ約 2.2% および約 0.22% である。ファントム散乱係数(S_p)に関しては、 F_{MLC} 補正係数を用いない場合と用いた場合の測定値に対して、計算値の平均相対誤差はそれぞれ約 2.2% および約 0.93% である。組織ファントム線量比(深さ 15 cm)に関しては、 F_{MLC} 補正係数を用いない場合と用いた場合の測定値に対して、計算値の平均相対誤差はそれぞれ約 0.3% および約 0.6% である。OADが 2 cm まではこれらの平均相対誤差は比較的小さい。このことは、ビーム中心軸上での組織ファント

Fig. 3 Shapes of irregular fields A-M and points of dose evaluation.

Table 1 Small segment corrections (SSC's) for 10 MV X-ray irregular fields and the accuracy of the calculated collimator scatter factors (S_c 's) with main collimator openings of (a) 6×6 cm² and (b) 8×8 cm².

(a)						
MLC	SSC			S_c		
field size (cm ²)	Calculated	Measured	%Devi ^{*1)}	Calculated	Measured	%Devi ^{*2)}
6×6	1 (1.0162)	1	0.00	0.9777	0.9788	-0.11
5×5	1 (1.0080)	1.0003	-0.03	0.9777	0.9790	-0.13
4×4	1 (1.0005)	0.9981	0.19	0.9777	0.9769	0.08
3×3	0.9928	0.9915	0.13	0.9706	0.9705	0.01
2×2	0.9843	0.9808	0.36	0.9623	0.9600	0.24
1×1	0.9369	0.9639	-2.80	0.9159	0.9434	-2.91

(b)						
MLC	SSC			S_c		
field size (cm ²)	Calculated	Measured	%Devi ^{*1)}	Calculated	Measured	%Devi ^{*2)}
8×8	1 (1.0166)	1	0.00	0.9907	0.9892	0.15
7×7	1 (1.0103)	1.0002	-0.02	0.9907	0.9894	0.13
6×6	1 (1.0032)	1.0000	0.00	0.9907	0.9892	0.15
5×5	0.9951	0.9973	-0.22	0.9859	0.9865	-0.06
4×4	0.9877	0.9907	-0.30	0.9785	0.9800	-0.15
3×3	0.9801	0.9811	-0.10	0.9710	0.9706	0.04
2×2	0.9745	0.9696	0.51	0.9655	0.9591	0.67
1×1	0.9249	0.9523	-2.88	0.9163	0.9420	-2.73

*1) Relative deviations (%) of calculated SSC's from the measurements.

*2) Relative deviations (%) of calculated S_c 's for the MLC fields from the measurements.

Table 2 Small segment corrections (SSC's) for 10 MV X-ray irregular fields and the accuracy of the calculated collimator scatter factors (S_c 's) with main collimator openings of (a) 10×10 cm² and (b) 16×16 cm².

(a)						
MLC	SSC			S_c		
field size (cm ²)	Calculated	Measured	%Devi ^{*1)}	Calculated	Measured	%Devi ^{*2)}
10×10	1 (1.0189)	1	0.00	1	1	0.00
9×9	1 (1.0147)	0.9998	0.02	1	0.9998	0.02
8×8	1 (1.0094)	0.9991	0.09	1	0.9991	0.09
7×7	1 (1.0031)	0.9976	0.24	1	0.9976	0.24
6×6	0.9961	0.9955	0.06	0.9961	0.9955	0.06
5×5	0.9881	0.9898	-0.17	0.9881	0.9898	-0.17
4×4	0.9807	0.9813	-0.06	0.9807	0.9813	-0.06
3×3	0.9732	0.9721	0.11	0.9732	0.9721	0.11
2×2	0.9648	0.9617	0.32	0.9648	0.9617	0.32
1×1	0.9119	0.9396	-2.95	0.9119	0.9396	-2.95

(b)						
MLC	SSC			S_c		
field size (cm ²)	Calculated	Measured	%Devi ^{*1)}	Calculated	Measured	%Devi ^{*2)}
16×16	1 (1.0132)	1	0.00	1.0148	1.0158	-0.10
14×14	1 (1.0097)	1.0002	-0.02	1.0148	1.0161	-0.13
12×12	1 (1.0049)	0.9998	0.02	1.0148	1.0157	-0.09
10×10	0.9984	0.9981	0.03	1.0132	1.0139	-0.07
8×8	0.9891	0.9939	-0.48	1.0038	1.0097	-0.58
6×6	0.9761	0.9849	-0.89	0.9905	1.0006	-1.01
4×4	0.9610	0.9717	-1.10	0.9753	0.9871	-1.20
2×2	0.9454	0.9506	-0.55	0.9594	0.9657	-0.65
1×1	0.8999	0.9310	-3.34	0.9131	0.9457	-3.45
4×12	0.9761	0.9808	-0.48	0.9905	0.9974	-0.69
2×12	0.9663	0.9641	0.23	0.9806	0.9805	0.01

*1) Relative deviations (%) of calculated SSC's from the measurements.

*2) Relative deviations (%) of calculated S_c 's for the MLC fields from the measurements.

Fig. 4 Diagram showing how the SSC factor varies with the ratio of the MLC square field side to the main collimator square field side.

Table 3 Data on S_{cp} 's (depth 5 cm), S_c , S_p (depth 5 cm), and ESFS (effective square field side) as functions of MLC field main collimator openings of (a) 6×6 cm² and (b) 8×8 cm². Values in parentheses indicate the ratio of ESFS/MLC square field side.

(a)					
MLC field size (cm ²)	S_{cp}	S_c	S_p	ESFS	ESFS/MLC
6×6	0.9551	0.9788	0.9758	5.66	(0.944)
5×5	0.9490	0.9790	0.9694	4.95	(0.991)
4×4	0.9379	0.9769	0.9601	4.27	(1.068)
3×3	0.9173	0.9705	0.9452	3.31	(1.102)
2×2	0.8615	0.9600	0.8974	2.51	(1.257)
1×1	0.7334	0.9434	0.7774	1.22	(1.223)
(b)					
MLC field size (cm ²)	S_{cp}	S_c	S_p	ESFS	ESFS/MLC
8×8	0.9797	0.9892	0.9904	8.02	(1.002)
7×7	0.9763	0.9894	0.9868	7.33	(1.046)
6×6	0.9705	0.9892	0.9811	6.40	(1.067)
5×5	0.9617	0.9865	0.9749	5.55	(1.109)
4×4	0.9472	0.9800	0.9665	4.71	(1.177)
3×3	0.9217	0.9706	0.9496	3.39	(1.129)
2×2	0.8642	0.9591	0.9011	2.59	(1.284)
1×1	0.7360	0.9420	0.7813	1.25	(1.253)

ム線量比(TPR)およびファントム散乱係数(S_p)データはOAD 2cmまでは比較的高い計算精度が保持されている。

3-5 不整形照射野の等価正方形照射野辺

Fig. 3での主コリメータ照射野の等価正方形照射野辺はKimの照射野マッピング法で求め、MLC照射野の等価正方形照射野辺は S_p -Clarkson積分法を適用して求めた。それらの結果をTable 6に示す。ここで、不整形照射野(A)では、主コリメータ照射野が5×5cm²でMLCが少しこの照射野辺縁に入り込んでいる。 S_p -Clarkson積分法で求めたMLC照射野の等価正方形照射野辺は4.58cmである。

不整形照射野(B)では、主コリメータ照射野が14.2×14.2cm²で、この内側に作ったMLC照射野(菱形)が10×10cm²である。 S_p -Clarkson積分法で求めた等価正方形照射野辺は9.84cm(≈10cm)である。

不整形照射野(C)においては上部コリメータ開度は20cmであり、不整形照射野(D)においては上部コリメータ開度は6cmである。Kimの照射野マッピング法を適用したコリメータ散乱係数(S_c)で評価した等価正方形照射野辺は、不整形照射野(C)の場合は11.23cmであり、不整形照射野(D)の場合は7.83cmであり、両者はかなり異なる。 S_p -Clarkson積分法で求めたMLC照射野の等価正方形照射野辺は、不整形照射野(C)の場合は8.68cmであり、不整形照射野(D)の場合は8.74cm

Table 4 Data on S_{cp} 's (depth 5 cm), S_c, S_p (depth 5 cm), and ESFS (effective square field side) as function of MLC field main collimator openings of (a) $10 \times 10 \text{ cm}^2$ and (b) $16 \times 16 \text{ cm}^2$. Values in parentheses indicate the ratio of ESFS/MLC square field side.

(a)					
MLC field size (cm^2)	S_{cp}	S_c	S_p	ESFS	ESFS/MLC
10×10	0.9993	1	0.9993	9.92	(0.992)
9×9	0.9966	0.9998	0.9968	9.36	(1.039)
8×8	0.9918	0.9991	0.9927	8.46	(1.057)
7×7	0.9867	0.9976	0.9891	7.76	(1.108)
6×6	0.9794	0.9955	0.9838	6.83	(1.139)
5×5	0.9688	0.9898	0.9788	6.07	(1.215)
4×4	0.9517	0.9813	0.9698	5.00	(1.250)
3×3	0.9247	0.9721	0.9512	3.42	(1.140)
2×2	0.8678	0.9617	0.9024	2.59	(1.294)
1×1	0.7392	0.9396	0.7867	1.30	(1.296)

(b)					
MLC field size (cm^2)	S_{cp}	S_c	S_p	ESFS	ESFS/MLC
16×16	1.0333	1.0159	1.0171	15.85	(0.991)
14×14	1.0316	1.0161	1.0153	14.72	(1.051)
12×12	1.0264	1.0157	1.0105	12.80	(1.066)
10×10	1.0185	1.0139	1.0045	10.84	(1.084)
8×8	1.0077	1.0097	0.9980	9.33	(1.167)
6×6	0.9899	1.0006	0.9893	7.67	(1.278)
4×4	0.9591	0.9871	0.9716	5.13	(1.282)
2×2	0.8733	0.9657	0.9043	2.63	(1.315)
1×1	0.7441	0.9458	0.7867	1.30	(1.296)

Fig. 5 Correction factors for the 10 MV X-ray phantom scatter factor expressed as a function of the ratio of the main collimator square field side to the MLC square field side. Triangles are for a depth of 2.5 cm, squares for a depth of 5 cm, circles for a depth of 10 cm, and crossed marks for a depth of 15 cm.

Fig. 6 Dose distribution yielded by 10 MV X-rays leaking from the MLC (the main collimator field is $10 \times 10 \text{ cm}^2$ and the depth is 5 cm in water).

であり、両者はほぼ一致する。

不整形照射野(G)では、主コリメータ照射野 $14 \times 8 \text{ cm}^2$ に対して、Kimの照射野マッピング法を適用したコリメータ散乱係数(S_c)で評価した等価正方形照射野辺は 9.34 cm であり、 S_p -Clarkson積分法で求めたMLC照射野の等価照射野辺は 6.45 cm である。

非対称不整形照射野(H)では、コリメータ回転中心軸が遮られ、線量評価点がX軸上 3 cm 変位している。

主コリメータ照射野が $6 \times 10 \text{ cm}^2$ であり、Kimのマッピング法を適用したコリメータ散乱係数(S_c)による等価正方形照射野辺は 8.18 cm である。 S_p -Clarkson積分法で求めたMLC照射野の等価正方形照射野辺は 4.53 cm である。

不整形照射野(I)では、主コリメータ照射野が $10 \times 10 \text{ cm}^2$ であり、MLC照射野を S_p -Clarkson積分法で求めた等価正方形照射野辺は 2.07 cm である。

不整形照射野(J-M)では、線量評価点はコリメータ回転中心軸より、X軸上でそれぞれ 1 cm 変位してい

Fig. 7 Diagram showing irregular field shapes, off-axis distances (OADs), and dose evaluation points.

Table 5 Accuracy of 10 MV X-ray S_c , S_p , and TPR(10, 15 cm depths) values calculated for an MLC field of 4×4 cm² with a main collimator opening of 10×10 cm² as a function of OAD.

(a) Without SSC and F_{MLC} corrections.

(b) With SSC and F_{MLC} corrections.

OAD (cm)	S_c			S_p			TPR (10cm)			TPR (15cm)		
	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi
0	1	0.9781	2.24	0.9542	0.9741	-2.04	0.8483	0.8531	-0.56	0.7152	0.7201	-0.68
1	1	0.9786	2.19	0.9542	0.9747	-2.10	0.8483	0.8519	-0.42	0.7152	0.7171	-0.26
2	1	0.9790	2.15	0.9542	0.9758	-2.21	0.8483	0.8506	-0.27	0.7152	0.7153	-0.01
3	1	0.9786	2.19	0.9542	0.9779	-2.42	0.8483	0.8496	-0.15	0.7152	0.7135	0.24
Mean			2.19			2.20			0.35			0.30

(b)

OAD (cm)	S_c			S_p			TPR (10cm)			TPR (15cm)		
	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi
0	0.9807	0.9781	0.27	0.9663	0.9741	-0.80	0.8536	0.8531	0.06	0.7209	0.7201	0.11
1	0.9807	0.9786	0.21	0.9663	0.9736	-0.75	0.8536	0.8519	0.20	0.7209	0.7171	0.53
2	0.9807	0.9790	0.17	0.9663	0.9758	-0.97	0.8536	0.8506	0.35	0.7209	0.7153	0.78
3	0.9807	0.9786	0.21	0.9663	0.9779	-1.19	0.8536	0.8496	0.47	0.7209	0.7135	1.04
Mean			0.22			0.93			0.27			0.62

る。不整形照射野(J)では、主コリメータ照射野が10×10cm²である。 S_p -Clarkson積分法で求めたMLC等価正方形照射野辺は4.07cmとなる。不整形照射野(K)では、主コリメータ照射野が12×12cm²である。不整形照射野(I)では、主コリメータ照射野が10×10cm²である。不整形照射野(M)では、主コリメータ照射野が6×8cm²である。不整形照射野(K-M)では、それぞれに対してMLC照射野は同じであり、 S_p -Clarkson積分法で

求めたMLC等価正方形照射野辺は3.55cmとなる。

3-6 不整形照射野のSSC係数

Fig. 3(a)-(m)に表した不整形照射野(A-M)におけるSSC係数をTable 7に示す。Fig. 3(a)-(g)の不整形照射野はSSC係数 ≥ 1 の値をとり、Fig. 3(k)-(m)の不整形照射野はSSC係数 < 1 の値をとる。

Table 6 Equivalent square field sizes obtained using the mapping method for main collimator fields and those obtained using the S_p -Clarkson method for MLC fields.

Irreg. Field	A	B	C	D	E	F	G
Main Colli F.S. (cm ²)	5×5	14.2×14.2	6×20	20×6	20×20	20×20	14×8
Field Mapping (cm)	5	14.2	11.23	7.83	20	20	9.34
S_p -Clarkson (cm)	4.58	9.84	8.68	8.74	14.98	15.15	6.45

Irreg. Field	H	I	J	K	L	M
Main Colli F.S. (cm ²)	6×10	10×10	10×10	12×12	10×10	6×8
Field Mapping (cm)	8.18	10	10	12	10	7.2
S_p -Clarkson (cm)	4.53	2.07	4.07	3.55	3.55	3.55

3-7 MLC不整形照射野での線量評価

コリメータ散乱係数(S_c)の測定値はコリメータ回転中心軸より変位している場合、アルミ製ビルドアップキャップ使用でX線ビームに対して垂直に配置した場合の値である。ファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(TPR)の基準深は5cmとし、検討した深さは10cmと15cmである。

3-7-1 SSC係数=1の場合

Fig. 3(a)-(g)に示す不整形照射野(A-G)に対する等価正方形照射野辺を適用したコリメータ散乱係数(S_c)、ファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(TPR)の計算値を実測値とともにTable 8(a), (b)に示す。Table 8(a)は F_{MLC} 補正係数=1と仮定した場合である(SSC係数=1)。Table 8(b)は、Fig. 5の実線から得た F_{MLC} 補正係数を用いた場合である(SSC係数=1)。

Fig. 3(a)-(g)での不整形照射野(A-G)に関しては、コリメータ散乱係数(S_c)の平均誤差は0.22%である。Table 8(a)に示すように、 F_{MLC} 補正係数=1と仮定した場合の計算では、ファントム散乱係数(S_p)の平均誤差は0.25%、深さ10cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.1%、深さ15cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.18%となる。Table 8(b)に示すように、Fig. 5の実線からの F_{MLC} 補正係数を用いた場合では、ファントム散乱係数(S_p)の平均誤差は0.27%、深さ10cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.23%、深さ15cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.52%となる。ファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(TPR)を F_{MLC} 補正係数で補正しない方が全般的にわずかであるが計算精度は高い。しかし、個々のデータではFig. 5の実線からの F_{MLC} 補正係数を用いた場合の方が計算精度も高くなる場合もある。

3-7-2 SSC係数<1の場合

Fig. 3(h)-(m)に示す不整形照射野(H-M)に対する等

Table 7 Relationship between the SSC factor and the ratio of MLC square field side/main collimator square field side for irregular fields A-M.

Irregular field	MLC/Coll	SSC	Calculated (SSC)
A	0.917	1	(1.0102)
B	0.693	1	(1.0024)
C	0.773	1	(1.0072)
D	1.115	1	(1.0242)
E	0.749	1	(1.0033)
F	0.758	1	(1.0035)
G	0.691	1	(1.0022)
H	0.554	0.9942	(0.9942)
I	0.207	0.9660	(0.9660)
J	0.407	0.9809	(0.9809)
K	0.296	0.9693	(0.9693)
L	0.355	0.9769	(0.9769)
M	0.493	0.9912	(0.9912)

価正方形照射野辺を適用したコリメータ散乱係数(S_c)、ファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(TPR)の計算値を実測値とともに結果をTable 9(a), (b)に示す。

Table 9(a)は、SSC係数=1および F_{MLC} 補正係数=1と仮定した場合である。コリメータ散乱係数(S_c)の平均誤差は1.98%、ファントム散乱係数(S_p)の平均誤差は2.04%、深さ10cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.57%、深さ15cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は1.01%である。

Table 9(b)は、計算に基づいたSSC係数およびFig. 5の実線からの F_{MLC} 補正係数を用いた場合である。コリメータ散乱係数(S_c)の平均誤差は0.25%、ファントム散乱係数(S_p)の平均誤差は0.61%、深さ10cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.18%、深さ15cmでの組織ファントム線量比(TPR)の平均誤差は0.2%である。計算に基づいたSSC係数およびFig. 5の実線からの F_{MLC} 補正係数を用いた場合の方が計算精度は高い。

Table 8 Accuracy of S_c , S_p , and TPR (10, 15 cm depths) values calculated for 10 MV X-ray irregular fields A-G.
(a) Without SSC and F_{MLC} corrections.
(b) With SSC and F_{MLC} corrections.

Irreg. Field	S_c			S_p			TPR (10cm)			TPR (15cm)		
	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi
A	0.9698	0.9697	0.01	0.9653	0.9627	0.27	0.8529	0.8526	0.04	0.7180	0.7202	-0.31
B	1.0120	1.0121	-0.01	0.9993	1.0015	-0.22	0.8764	0.8778	-0.16	0.7572	0.7576	-0.05
C	1.0043	1.0010	0.33	0.9940	0.9970	-0.30	0.8726	0.8712	0.16	0.7508	0.7470	0.51
D	0.9891	0.9849	0.43	0.9943	0.9965	-0.22	0.8727	0.8730	-0.03	0.7511	0.7516	-0.07
E	1.0206	1.0206	0.00	1.0162	1.0159	0.03	0.8893	0.8886	0.08	0.7787	0.7775	0.15
F	1.0206	1.0190	0.16	1.0167	1.0176	-0.09	0.8911	0.8896	0.17	0.7793	0.7799	-0.08
G	0.9967	0.9904	0.64	0.9815	0.9877	-0.63	0.8635	0.8629	0.07	0.7356	0.7350	0.08
Mean			0.22			0.25			0.10			0.18

Irreg. Field	S_c			S_p			TPR (10cm)			TPR (15cm)		
	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi
A	0.9698	0.9697	0.01	0.9655	0.9627	0.29	0.8530	0.8526	0.05	0.7181	0.7202	-0.29
B	1.0120	1.0121	-0.01	1.0025	1.0015	0.10	0.8788	0.8778	0.11	0.7612	0.7576	0.48
C	1.0043	1.0010	0.33	0.9962	0.9970	-0.08	0.8742	0.8712	0.34	0.7534	0.7470	0.86
D	0.9891	0.9849	0.43	0.9913	0.9965	-0.52	0.8706	0.8730	-0.27	0.7474	0.7516	-0.56
E	1.0206	1.0206	0.00	1.0195	1.0159	0.35	0.8911	0.8886	0.28	0.7817	0.7775	0.54
F	1.0206	1.0190	0.16	1.0199	1.0176	0.23	0.8914	0.8896	0.20	0.7822	0.7799	0.29
G	0.9967	0.9904	0.64	0.9848	0.9877	-0.29	0.8659	0.8629	0.35	0.7396	0.7350	0.63
Mean			0.22			0.27			0.23			0.52

Table 9 Accuracy of S_c , S_p , and TPR (10, 15 cm depths) values calculated for 10 MV X-ray irregular fields H-M.
(a) Without SSC and F_{MLC} corrections.
(b) With SSC and F_{MLC} corrections.

Irreg. Field	S_c			S_p			TPR (10cm)			TPR (15cm)		
	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi
H	0.9910	0.9819	0.93	0.9649	0.9755	-1.09	0.8526	0.8543	-0.20	0.7175	0.7232	-0.79
I	1.0000	0.9673	3.38	0.8670	0.9227	-6.04	0.8357	0.8390	-0.39	0.6959	0.7041	-1.16
J	1.0000	0.9796	2.08	0.9584	0.9689	-1.08	0.8493	0.8526	-0.39	0.7120	0.7208	-1.22
K	1.0065	0.9831	2.38	0.9464	0.9650	-1.93	0.8451	0.8554	-1.20	0.7129	0.7245	-1.60
L	1.0000	0.9783	2.22	0.9464	0.9575	-1.16	0.8451	0.8508	-0.67	0.7129	0.7184	-0.77
M	0.9855	0.9766	0.91	0.9464	0.9556	-0.96	0.8451	0.8497	-0.54	0.7129	0.7168	-0.54
Mean			1.98			2.04			0.57			1.01

Irreg. Field	S_c			S_p			TPR (10cm)			TPR (15cm)		
	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi	Calculated	Measured	%Devi
H	0.9852	0.9819	0.34	0.9694	0.9755	-0.63	0.8564	0.8543	0.25	0.7238	0.7232	0.08
I	0.9660	0.9673	-0.13	0.9049	0.9227	-1.93	0.8383	0.8390	-0.08	0.7026	0.7041	-0.21
J	0.9809	0.9796	0.13	0.9675	0.9689	-0.14	0.8545	0.8526	0.22	0.7207	0.7208	-0.01
K	0.9757	0.9831	-0.75	0.9624	0.9650	-0.27	0.8512	0.8554	-0.49	0.7209	0.7245	-0.50
L	0.9769	0.9783	-0.14	0.9615	0.9575	0.42	0.8508	0.8508	0.00	0.7202	0.7184	0.25
M	0.9768	0.9766	0.02	0.9581	0.9556	0.26	0.8492	0.8497	-0.06	0.718	0.7168	0.17
Mean			0.25			0.61			0.18			0.20

Table 10 SSC factor of irregular field with MLC (A-M), using A/P method, and collimator scatter factor (S_c).

Irregular field	SSC	Calculated (SSC)	S_c	%Devi	Measured S_c
A	1	(1.0098)	0.9698	0.01	0.9697
B	0.9890	(0.9890)	1.0009	-1.11	1.0121
C	1	(1.0154)	0.9951	-0.59	1.0010
D	1	(1.0151)	0.9951	1.04	0.9849
E	0.9985	(0.9985)	1.0191	-0.15	1.0206
F	0.9985	(0.9985)	1.0191	0.01	1.0190
G	0.9837	(0.9837)	0.9837	-0.68	0.9904
H	0.9923	(0.9923)	0.9796	-0.23	0.9819
I	0.9639	(0.9639)	0.9639	-0.35	0.9673
J	0.9737	(0.9737)	0.9737	-0.60	0.9796
K	0.9653	(0.9653)	0.9716	-1.17	0.9831
L	0.9729	(0.9729)	0.9729	-0.55	0.9783
M	0.9884	(0.9884)	0.9723	-0.44	0.9766

4. 考 察

小照射野でのコリメータ散乱係数(S_c)測定では、ミニファントム(4cm ϕ)を用いると、それが照射野内に完全に入らないことがある。この場合には、直径のより小さなミニファントムの使用、線源からの測定距離を長くすることや金属製ビルドアップキャップを用いることがある。Table 1(a), (b)およびTable 2(a), (b)では、照射野2 $\times$ 2cm²未満のX線ナロービームでのコリメータ散乱係数(S_c)は線源検出間距離(SCD)300cmでアルミ製ビルドアップキャップ(2.7cm ϕ)を用いて測定した。このような測定条件下でも、半影効果によりビルドアップキャップ全体が均一に照射されていない可能性がある。このことが表値に示されるように、SSC係数に関する計算結果の誤差に反映されているかも知れない。主コリメータ照射野1 $\times$ 1cm²でのコリメータ散乱係数(S_c)では、アクリル製ミニ・ファントム(1cm ϕ , SCD140cm)とアルミ製ビルドアップキャップ(2.7cm ϕ , SCD300cm)の相違は非常に小さい(約0.5%)。われわれの測定では照射室の大きさなどの制約があり、さらに長い線源検出間距離を取れなかったために、半影効果の影響を完全に排除できなかったのが大きな理由と思われる。

式(2)のMLC照射野の等価正方形照射野辺(S_{MLC}^{eq})を求めるのに、JacksonらはA/P法を用いているが、われわれは S_p -Clarkson積分法を採用した。Fig. 3(e), (g), (h)および(m)の不整形照射野において、A/P法によるSSC係数から求めたコリメータ散乱係数(S_c)と実測によるそれとを比較すると、Fig. 3(e)では-0.2%, Fig. 3(g)では-0.7%, Fig. 3(h)では-0.2%およびFig. 3(m)では-0.4%の相違となる(Table 10)。両者には有意差がみられない。しかしながら、 S_{MLC}^{eq} は式(5)にも用いられている(この式ではファントム内での線

量計算を行っている)。よって、この場合は一般にA/P法より S_p -Clarkson積分法が優れている。

不整形照射野のコリメータ散乱係数(S_c)を評価する方法として、主コリメータ等価正方形照射野辺に対するMLC等価正方形照射野辺の比が約0.64以上の場合、SSC係数は1以上になる(Fig. 4)。主コリメータ正方形照射野内にMLC正方形照射野が辺の長さで約6割入り込んでもコリメータ散乱係数(S_c)の値は主コリメータ開度のみのデータをそのまま用いることができることになる。主コリメータ等価正方形照射野辺に対するMLC等価正方形照射野辺の比が約0.64未満ではSSC係数は1より小さくなる(Fig. 4)。この場合、主コリメータ照射野に比べて、MLC照射野が極端に小さいので主コリメータ開度のみによるコリメータ散乱係数(S_c)をそのまま用いることはできない。主コリメータ開度のみのコリメータ散乱係数(S_c)にJacksonらのSSC係数(1-1参照)で補正することにより、MLC付きのコリメータ散乱係数(S_c)の計算精度は向上する。

Fig. 3(e), (g), (h), (m)の不整形照射野について、A/P法による等価正方形照射野辺(S_{MLC}^{eq})を用いて得たファントム散乱係数(S_p)および組織ファントム線量比(深さ15cm)を実測値と比較すると、Fig. 3(e)ではそれぞれ-0.7%, -1.0%, Fig. 3(g)ではそれぞれ-2.4%, -2.4%, Fig. 3(h)ではそれぞれ-2.2%, -1.2%, Fig. 3(m)ではそれぞれ-2.9%, -1.3%と大きな相違となっている。われわれが採用した S_p -Clarkson積分法の方がTable 8(a), Table 9(a)に示すように、より計算精度が高いことが分かる。

Table 8(b), Table 9(b)より、次のことが理解できる。ファントム散乱係数(S_p)においては、MLC照射野を S_p -Clarkson積分法で等価正方形照射野辺を求め、これと主コリメータ等価正方形照射野辺との比を関数にした F_{MLC}

補正係数(Fig. 5)で補正することにより、線量計算精度は向上する。 F_{MLC} 補正係数はMLCの物理的特性(X線の透過、リーフ間の洩れ、リーフ先端からの散乱など)による線量の影響を考慮した係数である。また、組織ファントム線量比にもわずかであるが上記の影響が反映されている。これらのことを如実に表しているのが、Fig. 3(k), (l)および(m)での不整形照射野であり、これにみられるように、主コリメータ開度をMLCの作る照射野ちょうどまで閉じる方が計算精度は高い。

今回の S_p -Clarkson積分法での実験結果からは、主コリメータ等価正方形照射野辺に対するMLC等価正方形照射野辺の比が約0.6以下の場合、 F_{MLC} 補正係数を適応すると高精度の線量計算が可能となることが分かった。

われわれが使用している放射線治療計画装置(Focus)では、Khanの提唱している全散乱係数(S_{cp})およびファントム散乱係数(S_p)を入力しなければならない。Clarkson積分法を用いて不整形照射野を等価正方形照射野に換算する場合、散乱最大線量比(SMR)を利用することもできるが、ファントム散乱係数(S_p)を利用することも可能である。

矩形照射野のX線ビームが患者の皮膚面からはみでている領域をMLC不整形照射野で覆うことは、場合によってはX線出力の低下を招く恐れがある。このようなMLC使用は避けるべきである。

今後、この方法を4MV X線に対して拡張したいと考えている。

5. 結 論

不整形照射野において、主コリメータ照射野に比べ

て、MLC照射野が小さい場合の線量評価は、コリメータ散乱係数(S_c)とファントム散乱係数(S_p)を用いることにより計算精度が向上した。MLC照射野が相対的に非常に小さい場合には、コリメータ散乱係数(S_c)の評価にSSC係数を導入することにより精度は高くなった。また、ファントム散乱係数(S_p)を用いたClarkson積分法で求めた等価正方形照射野にMLC漏洩補正係数(F_{MLC})を導入することにより、計算精度が向上した。

付録 SSC係数の計算例

式(5)の不整形照射野のコリメータ散乱係数 S_c (Coll+MLC)の計算をFig. 3(e)および(m)に表した照射野の場合について記する。

(I) Fig. 3(e)では、SSC係数 ≥ 1 の場合である。式(1)より、 $G=0.655$ となる。 $S_{MLC}^{eq}=14.98\text{cm}$ より、 $S_c(S_{MLC}^{eq})=1.0131$ となる。 $S_{coll}^{eq}=20\text{cm}$ であるから $S_c(S_{coll}^{eq} \times G)=1.0098$ となる。よって、式(2)により、 $SSC=1.0131/1.0098=1.0033$ となるので、 $SSC=1$ と設定する。よって、 $S_c(S_{coll}^{eq})=1.0206$ であるから、式(3)により $S_c(\text{Coll+MLC})=1.0206 \times 1=1.0206$ となる。

(II) Fig. 3(m)では、SSC係数 < 1 の場合である。式(1)より、 $G=0.655$ である。 $S_{MLC}^{eq}=3.55\text{cm}$ より、 $S_c(S_{MLC}^{eq})=0.9589$ となる。 $S_{coll}^{eq}=7.19\text{cm}$ であるから $S_c(S_{coll}^{eq} \times G)=0.9675$ となる。よって式(2)により、 $SSC=0.9589/0.9675=0.9912$ となる。よって、 $S_c(S_{coll}^{eq})=0.9855$ であるから、式(3)により $S_c(\text{Coll+MLC})=0.9855 \times 0.9912=0.9768$ となる。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 日本医学物理学会編：外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法01)。通商産業研究社、(2002)。
- 3) Yu MK, Murray B, and Sloboda R: Parametrization of head-scatter factors for rectangular fields using an equivalent square formalism. Med Phys, 22, 1329-1332, (1995).
- 4) 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).
- 5) Jackson DD, Colleen LH, and Dennis DV: Small MLC segment monitor units for IMRT. CMS Japan user group materials, (2001).
- 6) Venselaar JLM, Heukelom S, Jager HN, et al.: Is there a need for a revised table of equivalent square fields for the determination of phantom scatter correction factors? Phys Med Biol, 42, 2369-2381, (1997).
- 7) Clarkson JR: A note on depth dose in fields of irregular shape. Brit J Radiol, 14, 265, (1941).
- 8) Cunningham JR: Scatter-air ratio. Phys Med Biol, 17, 42-51, (1972).
- 9) Bjärngard BE: Separation of primary and scatter components of measured photon beam data. Phys Med Biol, 34, 1939-1945, (1989).

図表の説明

- Fig. 1 不整形照射野の幾何係数(G)を求める幾何学的配置図
下段コリメータとMLC間の幾何学的関係も表している。
- Fig. 2 Clarkson積分法による等価正方形照射野辺を求める図
- Fig. 3 不整形照射野(A-M)の形状と線量評価点を示す図
- Fig. 4 主コリメータ正方形照射野辺に対するMLC正方形照射野辺の比とSSC係数の関係を示す図
- Fig. 5 主コリメータ正方形照射野辺に対するMLC正方形照射野辺の比との関数で表した10MV X線ファントム散乱係数(S_p)に対する補正係数
三角印が深さ2.5cm, 四角印が深さ5cm, 丸印が深さ10cmおよび+印が深さ15cmでの値を示す。
- Fig. 6 MLCからの漏洩10MV X線による線量分布(主コリメータ照射野は $10 \times 10 \text{cm}^2$ で深さはタフウォータファントム中5cmである)。
- Fig. 7 不整形照射野の形状, off-axis distance(OAD)の大きさ, 線量評価点を示す図
- Table 1 10MV X線における不整形照射野のsmall segment correction(SSC)係数とコリメータ散乱係数(S_c)の計算精度。主コリメータ照射野(a) $6 \times 6 \text{cm}^2$, (b) $8 \times 8 \text{cm}^2$ 。
- Table 2 10MV X線における不整形照射野のsmall segment correction(SSC)係数とコリメータ散乱係数(S_c)の計算精度。主コリメータ照射野(a) $10 \times 10 \text{cm}^2$, (b) $16 \times 16 \text{cm}^2$ 。
- Table 3 10MV X線の主コリメータ照射野一定でMLC照射野の S_{cp} (深さ5cm), S_c , S_p (深さ5cm), ESFS, ESFS/MLC。主コリメータ照射野(a) $6 \times 6 \text{cm}^2$, (b) $8 \times 8 \text{cm}^2$ 。
- Table 4 10MV X線の主コリメータ照射野一定でMLC照射野の S_{cp} (深さ5cm), S_c , S_p (深さ5cm), ESFS, ESFS/MLC。主コリメータ照射野(a) $10 \times 10 \text{cm}^2$, (b) $16 \times 16 \text{cm}^2$ 。
- Table 5 10MV X線において主コリメータ照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$, MLC照射野 $4 \times 4 \text{cm}^2$ に対して, OADを変えた場合の計算精度(S_c , S_p , TPR(深さ10cm, 15cm))。
(a)SSC係数と F_{MLC} 補正係数による補正がない場合, (b)SSC係数と F_{MLC} 補正係数による補正がある場合。
- Table 6 主コリメータ照射野に対して照射野マッピング法で求めた等価正方形照射野辺ならびにMLC照射野に対して S_p を用いたクラクソン積分法で求めた等価正方形照射野辺。
- Table 7 SSC係数と主コリメータ正方形照射野辺に対するMLC正方形照射野辺の比との関係[不整形照射野(A-M)]。
- Table 8 10MV X線における不整形照射野(A-G)の計算精度(S_c , S_p , TPR(深さ10, 15cm))。
(a)SSC係数と F_{MLC} 補正係数による補正がない場合, (b)SSC係数と F_{MLC} 補正係数による補正がある場合。
- Table 9 10MV X線における不整形照射野(H-M)の計算精度(S_c , S_p , TPR(深さ10, 15cm))。
(a)SSC係数と F_{MLC} 補正係数による補正がない場合, (b)SSC係数と F_{MLC} 補正係数による補正がある場合。
- Table 10 A/P法によるMLC不整形照射野(A-M)のSSC係数とコリメータ散乱係数(S_c)