原 著

遠距離法と2つの飽和モデルによる小照射野の
コリメータ散乱係数 S_c の推定足立宏美・稲越英機¹⁾・早川岳英²⁾・井上富夫³⁾・笠原敏文³⁾
五十嵐智⁴⁾・早川英樹⁵⁾・棚邊哲史⁶⁾

新潟大学医学部保健学科医用放射線技術学講座(現 小牧市民病院放射線科)

1)新潟大学医学部保健学科医用放射線技術学講座

2)新潟大学医学部保健学科医用放射線技術学講座(現 新潟大学医歯学総合病院診療支援部放射線部門)

3)新潟大学医歯学総合病院診療支援部放射線部門

4)鶴岡市立荘内病院放射線科

5)新潟市民病院医療技術部放射線技術科

6)新潟大学医学部保健学科医用放射線技術学講座(現 北海道大学大学院医学研究科医科学専攻)

論文受付
2007年6月29日論文受理
2007年12月20日

Code No. 431

はじめに

現在、小病巣を対象とする三次元原体放射線治療や
定位放射線治療が盛んに実施されている。これらの治
療では従来よりも小照射野が使用されるため、小照射
野の正確なコリメータ散乱係数 S_c とファントム散乱係

数 S_p の決定が必要不可欠である。 S_c の測定は電離箱線
量計にミニファントムを装着して線源検出器間距離
(source-to-chamber distance: 以下, SCD)を定格治療
距離(nominal treatment distance: 以下, NTD)として
行うが、ミニファントム全体を含むことができない小

Estimation of Collimator Scatter Factor, S_c , of Small Field Sizes Using Long-SCD
Method and Two Saturation ModelsHiromi Adachi, Hideki Inakoshi,¹⁾ Takahide Hayakawa,²⁾ Tomio Inoue,³⁾ Toshifumi Kasahara,³⁾
Satoshi Igarashi,⁴⁾ Hideki Hayakawa,⁵⁾ and Satoshi Tanabe⁶⁾Department of Medical Radiation Technology, School of Health Sciences, Niigata University
(Currently, Department of Radiology, Komaki Citizen's Hospital)

1)Department of Medical Radiation Technology, School of Health Sciences, Niigata University

2)Department of Medical Radiation Technology, School of Health Sciences, Niigata University

(Currently, Section of Radiology, Department of Clinical Support, Niigata University Hospital)

3)Section of Radiology, Department of Clinical Support, Niigata University Hospital

4)Department of Radiology, Tsuruoka Municipal Shonai Hospital

5)Section of Radiological Technology, Department of Medical Technology, Niigata Citizen's Hospital

6)Department of Medical Radiation Technology, School of Health Sciences, Niigata University

(Currently, Specialty in Medical Sciences, Graduate School of Medicine, Hokkaido University)

Received June 29, 2007; Revision accepted Dec. 20, 2007; Code No. 431

Summary

To estimate the collimator scatter factor, S_c of small field sizes in which a mini-phantom cannot be
fully included at the nominal treatment distance (NTD=100 cm), we measured the in-air output of 4 MV
and 10 MV X-rays of a Varian's Clinac 2100 C/D using a mini-phantom at NTD and at a long source-to-
chamber distance (SCD=200 cm) with field-size defined at the isocenter down to 4.6×4.6cm² and 2.3×2.3cm²,
respectively. We then compared the fitted curve to the NTD dataset by a cumulative exponential distribu-
tion model with that by a cumulative Gaussian distribution (error function) model containing a zero-field
extrapolated term derived from the long SCD dataset. The results showed that the zero-field extensions of
two fitted curves coincided for a 4 MV X-ray, but a large discrepancy was seen between them for a 10 MV
X-ray. Therefore, the S_c of small field sizes not measurable using a mini-phantom at the NTD can be well
estimated by applying the cumulative exponential model to the NTD dataset in the case of a 4 MV X-ray
beam filtrated with a cone-shaped flattener. However, to estimate the S_c of such small field sizes in the case
of a 10 MV X-ray beam filtrated with a bell-shaped flattener, we consider it preferable to also measure in-
air output at a long SCD and to apply the cumulative Gaussian model as described here.

Key words: Collimator scatter factor, Small field size, Long SCD method, Saturation model,
Monitor backscatter

別刷資料請求先: 〒485-8520 愛知県小牧市常普請1丁目20番地
小牧市民病院放射線科 足立宏美 宛

Fig. 1 Geometric scheme of detector and accelerator head structures to measure in-air output at nominal treatment distance (SCD=100 cm) and at long source-to-chamber distance (SCD=200 cm).

照射野については測定できない。このため、SCDを延長した遠距離法の測定が行われる¹⁾。しかしSCDを延長すると、空中出力は距離の逆2乗則以上に減少する。これは、散乱線源である一次コリメータや平坦化フィルタが一次線源であるターゲットよりも検出器に近く位置するため、距離の逆2乗則の効果によって散乱線量が一次線量よりも多く減少するためと考えられている²⁾。また、SCDを延長すると、照射野サイズの拡大に伴う空中出力の変化がゆるやかになる。この現象について検討した報告は見当たらないが、次のように説明できる。すなわち、検出器側から絞り開口を通して見える散乱線源への視角が狭くなって(平坦化フィルタについてはFig. 1において、その底面に記した太線部分。一次コリメータについても考慮する必要がある)、照射野の拡大による散乱線量の増加がゆるやかになると考えられる。

われわれは散乱線量を(1)加速器ヘッド上流の一次コリメータと平坦化フィルタからの散乱線と、(2)下流の上下絞りからの散乱線に分け、それらの散乱線量を指数累積分布の飽和により表す2成分散乱モデルを提案した。このモデルを上下絞りにより作成した正方形照射野の空中出力測定値に適用すると、(1)は照射野の拡大によって急速な増加後にゆるやかに一定値へ移行する明らかな飽和曲線を、(2)はほぼ直線的な増加曲線を示す³⁾。このモデルはターゲットから散乱線源に入射する一次線の強度分布を考慮していないのだが、ビーム軸に垂直な平面における(1)の散乱線強度分布は一次コリメータと平坦化フィルタのいずれも指数分布であると仮定し、それらを合成した強度分布は指数分布に近いとみなしている。そのうち平坦化フィルタの方が散乱線発生量が多く、その設計はメーカ・

Fig. 2 Path-length through flattening filter for 10 MV X-ray of Varian's Clinac 2100 C/D along beam's fan line when viewed from a point at the isocenter plane.

機種によって異なると推測されるが、Varian社製 Clinac 2100Cシリーズでは4MV用は円錐形、10MV X線用はFig. 2に示すようにややベル形に近い形状である。このため、SCDを延長したときの小照射野での空中出力の変化は、4MVの場合指数累積分布のモデルでよく近似できそうだが、10MVの場合にはビーム中心軸近傍で散乱線強度分布の変化がより少ないガウス分布を想定し、その積分形であるガウス累積分布(誤差関数)で近似する方がよいのかもしれない。そこで、遠距離法とNTD法による空中出力測定値に対し指数累積分布の飽和モデルを適用して散乱線量の変化を解析した。その一方で、外挿において信頼性の高い遠距離法のゼロ照射野の推定値の項を含むガウス累積分

布の飽和モデルを適用して内挿により、NTD法で測定不可能な小照射野の S_c を推定した。そして、その両者のモデルの優劣を比較した。なお、照射野が極く小さくて(2×2cm²未満)、検出器側から見て絞りによってターゲットの一部が隠されるようになると一次線出力も急激に減少し⁴⁾、ゼロ照射野では出力がゼロになるが、そのような極小照射野の問題は扱わない。

1. 方法

1-1 空中出力の測定とコリメータ散乱係数の計算

新潟大学医歯学総合病院のVarian社製線形加速器Clinac 2100 C/Dの4MV X線(線質指標 $TPR_{20,10}=0.619$)と10MV X線($TPR_{20,10}=0.739$)について、Fig. 1に示すようにNTDであるSCD=100cmあるいは遠距離法としてSCD=200cmに検出器を設置し、上下絞りによる正方形照射野のサイズを変えて空中出力を測定した。平坦化フィルタは4MVの場合ビーム軸上で約15mmと薄く、頂点がやや鈍の円錐形、10MVの場合ビーム軸上で約43mmと厚く、ややベル形に近い(Fig. 2)。

まず、治療寝台や床からの散乱を避けるためにガントリを90°傾け、治療寝台上に放射線の吸収・散乱が少ない、高さ55cmの発泡スチロールを設置し、その上にミニファントム(東洋メディック社製、アクリル、直径4cm、測定深さ10cm)を装着したファーマ形線量計(PTW社製N30001型)を配置して電離箱長軸がビーム軸に一致するように固定した。次に、治療寝台を水平方向に移動して電離箱の幾何学的中心がNTD法ではSCD=100cmに、遠距離法ではさらに移動してSCD=200cmになるように固定した。なお、あらかじめシステムおよびケーブル効果が無視できることを確認するとともに、測定する最小照射野のときに光照射野と実照射野のずれがSCD=200cmにおいて3mmあることをフィルム法により確認し、そのずれを検出器配置の際に考慮した。

照射野の設定はMLCを開大させ、上下絞りのみによりNTDにおける正方形照射野の一辺の長さ L を、NTD法の場合4.6, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40cmの計15種類、遠距離法の場合2.3, 2.5, 2.8, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 6, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 25, 30, 35, 40cmの計19種類に変化させた。MU値は検出器の感度と加速器の出力負荷を考慮してNTD法では150MU、遠距離法では200MUに設定して照射した。

測定は、電位計(NE Technology社製 Ionex DoseMaster 2590A型)の印加電圧を、使用した線量計で常用する-250Vに設定し、連続した5回照射の平均をとり読み値 M_{raw} とし、これに温度気圧補正係数 κ_{TP} を乗じるとと

もに、NTD法では式(1)、遠距離法では式(2)によりMU値とSCDの違いを補正して測定値 $M(nC)$ とした。

$$\text{NTD法: } M = M_{raw} \cdot \kappa_{TP} \cdot \frac{100\text{MU}}{150\text{MU}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{遠距離法: } M = M_{raw} \cdot \kappa_{TP} \cdot \frac{100\text{MU}}{200\text{MU}} \cdot \left(\frac{200\text{MU}}{100\text{MU}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この2種類の補正を加えても、NTD法あるいは遠距離法、それぞれの場合における一次線量と散乱線量の構成比は変わらないはずである。

そして S_c は、定義に従い次式により求めた。

$$S_c(L) = \frac{M(L)}{M(L=10\text{cm})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

1-2 指数累積分布モデルによる推定

測定値 M は、(1)ターゲットからの一次線量、(2)加速器ヘッド上流の一次コリメータと平坦化フィルタからの散乱線を合わせた量 M_{fil} 、(3)下流の上下絞りにからモニタ線量計への後方散乱によるモニタ線量計のカウンタアップへの寄与と検出器への前方散乱を合わせた量 M_{jaw} に分けて考えることができる。同一のMU値で照射したとき、モニタ線量計への後方散乱を考慮しなければ一次線の出力は照射野サイズ L に依らず一定であるが、 L の拡大によって M_{fil} は指数累積分布による飽和曲線を、 M_{jaw} はゆるやかな、ほぼ直線的な増加曲線を示す³⁾。ここでは M_{jaw} は簡単に、直線的に増加するとみなし、次のモデル式を採用した。

$$\begin{aligned} M(L) &= M_0 + M_{fil}(L) + M_{jaw}(L) \\ &= M_0 + m_{fil} \cdot [1 - \exp(-m_{fil2} \cdot L)] \\ &\quad + m_{jaw} \cdot L \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 M_0 はゼロ照射野のときの一次線量(外挿値)を表し、 L の拡大に伴うモニタ線量計への後方散乱の減少による一次線量および散乱線量の増加は M_{jaw} に含まれる。各パラメータはいずれも正の定数であり(以下、同様)、 m_{fil} はその飽和値の大きさを、 m_{fil2} は飽和への速度を決め、 m_{jaw} は一次項の大きさを決める。

一方 S_c については、定義により $L=10\text{cm}$ で S_c が1になるように式(4)を標準化した次のモデル式を用いた。

$$\begin{aligned} S_c(L) &= 1 + S_{fil}(L) + S_{jaw}(L) \\ &= 1 + s_{fil} \cdot [1 - \exp[-s_{fil2} \cdot (L - 10\text{cm})]] \\ &\quad + s_{jaw} \cdot (L - 10\text{cm}) \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここに、 s_{fil} は飽和値の大きさを、 s_{fil2} は飽和への速度を決め、 s_{jaw} は一次項の大きさを決めるパラメータである。なお、定数項1は L が10cmのときの一次線量と

散乱線量の両方を含み、一次線量の割合はゼロ照射野への外挿値 $S_c(L=0)$ となる。一方、 $S_{fil}(L)$ と $S_{jaw}(L)$ の両者は L が10cmよりも小さいか大きいかによって負と正の値をとり、散乱線量の割合が $L=10\text{cm}$ のときよりどれだけ少ないか大きいかが、その差分を表している。以下、このタイプのモデルを一次項が含まれるが簡単に、指数累積分布モデルと呼ぶ。

そして、式(1)と式(2)による M の値に対し式(4)を、式(3)による S_c に対し式(5)を、それぞれ最小2乗法によりフィットさせ、それらのパラメータ(回帰係数)を求めた。

1-3 ガウス累積分布モデルによる S_c の推定

まず、遠距離法の測定値 $M^{200\text{cm}}$ に対し、飽和項 M_{fil} はガウス累積分布、すなわち誤差関数で表し、 M_{jaw} は指数累積分布モデルと同じ一次項とする次のモデル式を最小2乗法によりフィットさせ、ゼロ照射野のときの一次線量 $M_0^{200\text{cm}}$ を推定した。

$$\begin{aligned} M^{200\text{cm}}(L) &= M_0^{200\text{cm}} + M_{fil}^{200\text{cm}}(L) + \hat{M}_{jaw}^{200\text{cm}}(L) \\ &= M_0^{200\text{cm}} + m_{fil}^{200\text{cm}} \cdot \text{erf}\left(\sqrt{m_{fil2}^{200\text{cm}}} \cdot L\right) \\ &\quad + \hat{m}_{jaw}^{200\text{cm}} \cdot L \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ただし、SCDが同じならばモデルによって飽和項が違っていても共通項 M_{jaw} は同じ値であると仮定し(以下、仮定1)、遠距離法の測定値 $M^{200\text{cm}}$ に対する式(4)による $\hat{M}_{jaw}^{200\text{cm}}$ を、つまりそのパラメータ推定値 $\hat{m}_{jaw}^{200\text{cm}}$ を流用した。また、 $m_{fil}^{200\text{cm}}$ はガウス累積分布の飽和値を、 $m_{fil2}^{200\text{cm}}$ は飽和速度を決めるパラメータである。

次に、その推定値 $\hat{M}_0^{200\text{cm}}$ を含み、 $S_c^{100\text{cm}}$ を誤差関数で表す次のモデル式をNTD法の $S_c^{100\text{cm}}$ の値に対して最小2乗法によりフィットさせた。

$$\begin{aligned} S_c^{100\text{cm}}(L) &= \hat{S}_0^{100\text{cm}} + S_{fil}^{100\text{cm}}(L) + \hat{S}_{jaw}^{100\text{cm}}(L) \\ &= \hat{S}_0^{100\text{cm}} + s_{fil}^{100\text{cm}} \cdot \text{erf}\left(\sqrt{s_{fil2}^{100\text{cm}}} \cdot L\right) \\ &\quad + \hat{s}_{jaw}^{100\text{cm}} \cdot L \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

ただし、SCDが違っていても一次線量のゼロ照射野への外挿値は同じであると仮定し(以下、仮定2)、より小照射野まで測定した遠距離法のゼロ照射野への外挿推定値 $\hat{M}_0^{200\text{cm}}$ をNTD法の測定値 $M^{100\text{cm}}(L=10\text{cm})$ で除して S_c の形に変換し、その値を $\hat{S}_0^{100\text{cm}}$ として流用した。また、 $\hat{S}_{jaw}^{100\text{cm}}$ 、つまり $\hat{s}_{jaw}^{100\text{cm}}$ は、仮定1によりNTD法の $S_c^{100\text{cm}}$ の値に対する式(5)によるパラメータ推定値を流用したものであり、 $s_{fil}^{100\text{cm}}$ と $s_{fil2}^{100\text{cm}}$ はそれぞれ飽和項の大きさと速度を決めるパラメータである。以下、このタイプのモデルを一次項が含まれるが簡単に、ガウス累積分布モデルと呼ぶ。

そして、このように式(7)により求めたガウス累積分布モデルの S_c 近似曲線を、NTD法の $S_c^{100\text{cm}}$ の値に対する指数累積分布モデル式(5)による近似曲線と比較した。

2. 結果

2-1 指数累積分布モデルの適用

Table 1に、指数累積分布モデル式(4)と(5)によるパラメータ推定値と決定係数 R^2 の値を示す。そのフィットは、4MVの場合NTD法と遠距離法のいずれも良好だった($R^2 > 0.999$)。一方10MVの場合には、NTD法では良かったが、遠距離法では劣った(R^2 は M が0.99874、 S_c が0.99808)。

Fig. 3に、NTD法および遠距離法の M と、それらに対する式(4)による近似曲線を示す。 M の値はミニファントム中の透過力が大きい10MVの方が4MVより当然大きく、また L による M の変化は平坦化フィルタが厚く、したがって散乱線の発生量が多い10MVの方が4MVより当然大きかった。注目されるのは、いずれのエネルギーでも M の変化が遠距離法ではNTD法よりゆるやかで、特に L が小さいとき直線的なことである。そして、遠距離法とNTD法の近似曲線のゼロ照射野への外挿値 M_0 は、4MVの場合ほぼ一致したが、10MVの場合には違いが大きかった。

Fig. 4に、NTD法と遠距離法の M に対し式(4)により推定した一次コリメータと平坦化フィルタを合わせた散乱線量 M_{fil} とコリメータジョウからの散乱線量 M_{jaw} の変化を、それぞれ M_0 に対する比の形で示す。 M_{fil}/M_0 比曲線の飽和値は平坦化フィルタが厚い10MVの方が4MVより大きい。遠距離法ではNTD法より飽和速度が遅く、また飽和値が小さかった。一方、 M_{jaw}/M_0 比曲線の傾斜は、遠距離法ではNTD法より小さかった。それぞれの $M_{jaw}(L=40\text{cm})/M_0$ の値は、Table 1のパラメータ推定値を用いて計算すると、NTD法の場合4MVで0.052、10MVで0.055、遠距離法の場合は4MVで0.037、10MVで0.036であり、エネルギーによる違いはなかった。

2-2 ガウス累積分布モデルによる S_c の推定

ガウス累積分布モデル式(6)と(7)によるパラメータ推定値と R^2 の値は、Table 1に示した。そのフィットは、10MVの場合のNTD法で良かった($R^2 = 0.99936$)。が、それ以外は劣った($R^2 < 0.999$)。

Fig. 5に、遠距離法の M と、それに対するガウス累積分布モデル式(6)および指数累積分布モデル式(4)による近似曲線と比較して示す。いずれのエネルギーでも、ガウス累積分布モデルの近似曲線は $L=15\text{cm}$ 付近で測定値を上回る一方、 $L=35\text{cm}$ と 40cm では測定値を

Table 1 Estimated parameters

Model	Energy	SCD*	Estimated Parameter				R^2	Shown in Fig.
Cumulative Exponential, Eq. [†] (4): $M(L) = M_0 + m_{fil1} \cdot [1 - \exp(-m_{fil2} \cdot L)] + m_{jaw} \cdot L$								
			M_0	m_{fil1}	m_{fil2}	m_{jaw}		
4 MV	100 cm		10.143497486	1.257977614	0.266724833	0.013190426	0.99979	Figs. 3 and 4
	200 cm		10.218072806	1.080593127	0.182124780	0.009562566	0.99929	Figs. 3 and 4
10 MV	100 cm		12.292592264	2.107095910	0.222843371	0.016770555	0.99985	Figs. 3 and 4
	200 cm		12.714468008	1.649580489	0.129051750	0.011522421	0.99874	Figs. 3 and 4
Cumulative Exponential, Eq. [†] (5): $S_c(L) = 1 + s_{fil1} \cdot \{1 - \exp[-s_{fil2}(L - 10 \text{ cm})]\} + s_{jaw} \cdot (L - 10 \text{ cm})$								
			$[S_c(L=0)]$	s_{fil1}	s_{fil2}	s_{jaw}		
4 MV	100 cm		[0.888961]	0.007787640	0.262297091	0.001153951	0.99977	Fig. 6
	200 cm		[0.908623]	0.015123774	0.186942658	0.000842955	0.99919	Fig. 5
10 MV	100 cm		[0.855880]	0.015687276	0.224507935	0.001170122	0.99985	Fig. 6
	200 cm		[0.900335]	0.028174482	0.144125120	0.000877478	0.99808	Fig. 5
Cumulative Gaussian, Eq. [†] (6): $M^{200\text{cm}}(L) = M_0^{200\text{cm}} + m_{fil1}^{200\text{cm}} \cdot \text{erf}(\sqrt{m_{fil2}^{200\text{cm}}} \cdot L) + \hat{m}_{jaw}^{200\text{cm}} \cdot L$								
			$M_0^{200\text{cm}}$	$m_{fil1}^{200\text{cm}}$	$m_{fil2}^{200\text{cm}}$	$(\hat{m}_{jaw}^{200\text{cm}})$		
4 MV	200 cm		10.371934472	0.908121320	0.010201545	(0.009562566)	0.99878	Fig. 5
10 MV	200 cm		12.888512933	1.426710034	0.005784185	(0.011522421)	0.99830	Fig. 5
Cumulative Gaussian, Eq. [†] (7): $S_c^{100\text{cm}}(L) = \hat{S}_0^{100\text{cm}} + s_{fil1}^{100\text{cm}} \cdot \text{erf}(\sqrt{s_{fil2}^{100\text{cm}}} \cdot L) + \hat{s}_{jaw}^{100\text{cm}} \cdot L$								
			$(\hat{S}_0^{100\text{cm}})$	$s_{fil1}^{100\text{cm}}$	$s_{fil2}^{100\text{cm}}$	$(\hat{s}_{jaw}^{100\text{cm}})$		
4 MV	100 cm		(0.906320733)	0.088812040	0.019120347	(0.001153951)	0.99674	Fig. 6
10 MV	100 cm		(0.898655203)	0.104411211	0.011209667	(0.001170122)	0.99936	Fig. 6

*SCD: source-to-chamber distance. †Eq.: Equation.

The estimated parameters, $(\hat{m}_{jaw}^{200\text{cm}})$ and $(\hat{S}_{jaw}^{100\text{cm}})$, were derived by fitting the cumulative exponential Eqs. (4) and (5) to the datasets of SCD=200 cm and of SCD=100 cm, respectively, and were used as predetermined parameters for fitting the cumulative Gaussian Eqs. (6) and (7) to corresponding SCD datasets.

The estimate $(\hat{S}_0^{100\text{cm}})$ was derived from dividing the estimate $\hat{M}_0^{200\text{cm}}$ by measured $M^{100\text{cm}}(L=10\text{cm})$, and was used as another predetermined parameter for fitting the cumulative Gaussian Eq. (7) to SCD=100 cm dataset.

The value $[S_c(L=0)]$ was calculated by Eq. (5) using the derived parameters and is shown only for comparison.

Fig. 3 Measured values, M , at SCD=100 cm and SCD=200 cm, and their curves calculated by fitted cumulative exponential Eq. (4) (CumExpon).

Left: 4 MV X-ray, right: 10 MV X-ray.

Fig. 4 Change in ratio of scatter components from accelerator head structures, upstream M_{fil} and downstream M_{jaw} , to zero-field primary dose M_0 , which were calculated by fitted cumulative exponential Eq. (4) to SCD=100 cm and SCD=200 cm datasets, respectively. Left: 4 MV X-ray, right: 10 MV X-ray.

Fig. 5 Measured value, M , at SCD=200 cm and its curve calculated by fitted cumulative exponential Eq. (4) (CumExpon) or by fitted cumulative Gaussian Eq. (6) (CumGauss). Left: 4 MV X-ray, right: 10 MV X-ray.

下回るといわずれがみられた。そのため、このモデルのフィットは4MVの場合指数累積分布モデルより劣るが、両者の近似曲線のゼロ照射野方向への延長線はほぼ一致していた。一方10MVの場合にはその測定値からのずれがあるにもかかわらず、小照射野の範囲に限ればグラフ上ガウス累積分布モデルの方が優れており、両者のフィットは同等であった(R^2 は0.99830と0.99808)。そして、両者の近似曲線のゼロ照射野方向への延長線が乖離していた。

Fig. 6に、NTD法の S_c 値と、それに対するガウス累積分布モデル式(7)および指数累積分布モデル式(5)に

よる近似曲線を比較して示す。ガウス累積分布モデルの近似曲線の S_c 値からのずれが、4MVの場合 $L=12$ cm付近で、10MVの場合 $L=15$ cm付近で認められた。そのため4MVの場合、このモデルのフィットは指数累積分布より劣るが、両者の近似曲線のゼロ照射野方向への延長線はゼロ近くまではほぼ一致していた。一方10MVの場合にはそのずれがあるにもかかわらず、このモデルのフィット($R^2=0.99936$)は指数累積分布モデルのそれ($R^2=0.99985$)に近く、しかもこのモデルの近似曲線のゼロ照射野方向への延長線から指数累積分布モデルのそれが大きく乖離していた。

Fig. 6 Collimator scatter factor, S_c , at SCD=100 cm and its curve calculated by fitted cumulative exponential Eq.(5) (CumExpon) or by fitted cumulative Gaussian Eq.(7) (CumGauss).
Left: 4 MV X-ray, right: 10 MV X-ray.

3. 考 察

遠距離法とNTD法の測定値 M を比較したFig. 3を見ると、4MVと10MVの両エネルギーとも、 M の値は遠距離法の方が小さく、かつ照射野サイズ L による変化がゆるやかで、特に L が小さいところでは直線的であった。この理由はFig. 4に示したように、SCDの延長によって、加速器ヘッド上流の一次コリメータと平坦化フィルタからの散乱線量 M_{in} が減少するため、また検出器側からその散乱線源への視角が狭小化して飽和速度が遅くなるためと考えられる。

それと同様に、下流の上下絞りからの散乱線量 M_{jaw} も遠距離法で減少しているが、 L は遠距離法でもアイソセンタで定義しているのでモニタ線量計への後方散乱の寄与は同じだから、その M_{jaw} の減少は絞りから直接検出器に達する成分の減少によると考えられる。そして、SCDが同じならば両方のモデルに共通する M_{jaw} の大きさは同じはずであり、これを仮定1として指数累積分布モデルのパラメータ推定値 $\hat{m}_{jaw}$ と $\hat{s}_{jaw}$ をそれと同じSCDのときのガウス累積分布モデルに流用した。また、一次線量のゼロ照射野への外挿値 M_0 はSCDが違ってても本来同じはずだが、その推定にはより小照射野まで測定されており、かつ M_{in} 曲線の変化がゆるやかで、したがって小照射野で M 曲線がより直線的な遠距離法の方が信頼性が高いと考えられる。そこで、これを仮定2としてガウス累積分布モデルによる遠距離法の推定 $\hat{M}_0^{200cm}$ をNTD法のときの値として流用し、本来の定義であるSCD=100cmにおいてミニファントムで測定不可能な小照射野(本実験では $L < 4.6cm$)の S_c を推定した。

その推定の途中結果であるFig. 5と最終結果のFig. 6

Fig. 7 Comparison of cumulative exponential, cumulative Gaussian, and squared cumulative Gaussian functions.

The cumulative exponential and cumulative Gaussian functions are plotted using the value of derived parameters, m_{in}^{200cm} and m_{jaw}^{200cm} , by fitting Eq.(4) and Eq.(6) to the dataset of SCD=200 cm for 10 MV X-rays, respectively. The latter curve increases almost linearly longer and thereafter reaches saturation more sharply than the former one.

The squared cumulative Gaussian function is plotted such that it coincides with the crossing point of the above two curves. This curve shows a sigmoid shape, increasing gradually at the initial portion and reaching saturation more sharply than the cumulative Gaussian curve.

を見ると、いずれのエネルギーでもガウス累積分布モデルの近似曲線は $L=15cm$ 付近で測定値を上回っている。この理由はFig. 7に示すように、ガウス累積分布曲線は直線的な増加が長く続き、その後の飽和への移

行が急であるためと考えられる。すなわち実際には、 M_{fi} には平坦化フィルタ以外に、それより散乱線源のサイズが小さい一次コリメータからの成分が存在する⁵⁾ため、それらを合成した散乱線源による M_{fi} の増加は L が小さくても鈍化が始まる[文献3)のFig. 3を参照]。また、矩形の絞り開口を通して見える円形の散乱線源の面積はその散乱線源辺縁の一部が見えるようになると増加率が減少するため、 M_{fi} の増加がさらに鈍化する[文献3)のFig. 4を参照]。これらの効果により、飽和に近い照射野の M_{fi} にはガウス累積分布よりも飽和への移行がゆるやかな指数累積分布のモデルの方が適すると考えられる。そして4MV X線の場合、指数累積分布モデルによる近似曲線のゼロ照射野への延長線はガウス累積分布モデルのそれとほぼ一致していた。また、指数累積分布モデルの M_0 はNTD法と遠距離法で違いが少なかった($10.143-10.218 = -0.075$: Table 1とFig. 3を参照)。したがって、平坦化フィルタが円錐形の4MV X線の場合には、NTDでミニファントムにより測定不可能な小照射野の S_c の推定にはNTD法でだけ測定し、指数累積分布モデルを適用してよいと考える。一方10MV X線の場合には、小照射野の範囲に限るとガウス累積分布モデルの方がフィットが良好と評価でき、その S_c 近似曲線のゼロ照射野への延長線から指数累積分布モデルのそれが乖離していた。したがって、平坦化フィルタがややバル形に近い10MV X線の場合に同様な小照射野の S_c を推定するには、遠距離法でも測定して本法のようにガウス累積分布モデルを適用するのがよいと考える。

散乱線強度分布を表すのにガウス分布が欧米で用いられるが、これはわが国よりエネルギーの高いX線が多く使用されるためと推測される。しかし、 S_c の変化を推定するために、ガウス累積分布ではなく、その2乗によっている^{6,7)}。Zhuら⁷⁾は、直径2.5cmのミニファントムを装着した小型電離箱線量計を用いてNTDにおいて $L=3\text{cm}$ から40cmまで8~11種類の照射野について測定した S_c に対し、 $S_c(L)=(1+b_1 \cdot L) \cdot [1+b_2 \cdot \text{erf}(L/b_3)] \cdot H_0$ とするモデルをフィットさせている。ここに、丸括弧の項はモニタ線量計への後方散乱の寄与を、角括弧の項はそれ以外の散乱線として平坦化フィルタからの散乱線の寄与を表し、 H_0 は $S_c(L)$ を $L=10\text{cm}$ で標準化するための定数である。その結果、多数の機種について良いフィットが得られたと報告している。彼らとわれわれのモデルの間には、その両者の項の組み合わせに乗算と加算の違いがあるが、しかしこれは基準となる照射野を $L=10\text{cm}$ とするか、外挿ゼロ照射野とするかによるもので、測定照射野の範囲内の散乱線量の変化の見積もりに実用上違いはないと考える。それより重要な違いは $\text{erf}(L)^2$ と $\text{erf}(L)$ のいずれを用い

るかにあると考える。なぜならFig. 7に示したように、 $\text{erf}(L)^2$ は最初に漸増部分があるS字状曲線を呈するからである。Zhuらは、その最初の部分に‘parabola’状の漸増があるので $\text{erf}(L)^2$ を採用したと述べている。しかし彼らの図において、 S_c の測定値の変化は最小照射野 $L=3\text{cm}$ まで直線的であり、そのparabola部分が最小照射野の測定値を上回っているように見うけられる。われわれは L を二次元量として扱い $\text{erf}(L)$ を用いたが、Fig. 3に示したように、遠距離法により $L=2.3\text{cm}$ までの小照射野について詳しく測定しても、10MV X線の場合にも直線的な変化しか認められなかった。

絞りからの散乱線量 M_{jaw} の大部分を占めるモニタ線量計への後方散乱(低エネルギー光子と、特に電子)の影響は、電子線ビームと共用するために金属カバーがないモニタ線量計を装備するVarian社製の二重エネルギーX線の機種では他の線形加速器より大きいことが知られている。その影響の大きさは特別な実験条件で行うtelescope法⁸⁾、特別な計器を接続してターゲットのパルス数⁹⁾やその電離量¹⁰⁾の計測により測定され、あるいはモンテカルロ法により推定¹¹⁾されており、モニタ線量計への後方散乱線量の一次線量に対する割合は本実験に使用した加速器と同型のClinac 2100Cで2~3%と報告されている。その値に較べると、前述したZhuらのClinac 2100 CSでの値(6MVで0.055, 10MVで0.060と計算される)やわれわれのNTD法の $M_{\text{jaw}}(L=40\text{cm})/M_0$ 比の値(4MVで0.052, 10MVで0.055)はかなり高い。われわれの2成分散乱モデルでは前述したように、直線的増加成分を絞りから直接検出器に達する散乱線とモニタ線量計への後方散乱を想定している。しかし文献3)に記したように、その直線的増加成分として“分離できた成分が加速器ヘッドのいずれの構成部品によるかは(測定結果から)特定できない”。例えば、Varian社製線形加速器ではビーム周辺部まで線質硬化を図るために平坦化フィルタに一定の厚みが加えられており¹²⁾(Fig. 2)、それからの散乱線の一部が直線的増加成分として分離されているのかもしれない。しかしその由来がいずれの構成部品であっても、直接検出器に達する直線的増加成分は、SCDの延長によって大きく減少すると考えられる。一方絞りからモニタ線量計への散乱線の寄与は、本研究ではSCDを延長しても照射野は同じアイソセンタにおいて表示しているので、その照射野サイズが同じならば変わらないはずである。したがって遠距離法では M_{jaw} のほとんどがモニタ線量計への後方散乱の寄与と考えられ、その M_{jaw}/M_0 比の値は4MVで0.037, 10MVで0.036であり、上記の特別な条件や計測による報告値に近かった。

4. まとめ

Clinac 2100 C/Dの4MVと10MVのX線について遠距離法とNTD法で空中出力を測定し、2つのタイプの飽和モデルを適用して本来のNTDの S_c を推定した。いずれのエネルギーでも、NTD法の測定値には指数累積分布モデルが良くフィットし、NTDにおいてミニファントムで測定可能な照射野の S_c の推定にはこのモデルが優れると考えられる。また、平坦化フィルタが円錐形の4MV X線の場合、指数累積分布モデルによるゼロ照射野の出力推定値はSCDによる違いが少なく、ガウス累積分布モデルのそれもほぼ一致した。したがってこの場合には、ミニファントムで測定不可能な小照射野

の S_c はNTDでだけ測定して指数累積分布モデルにより推定してよいと考える。一方平坦化フィルタがややベル形に近い10MV X線の場合には、ガウス累積分布モデルの方が小照射野の測定に重点を置いた遠距離法の測定値に対しフィットが優れ、その近似曲線のゼロ照射野方向への延長線から指数累積分布モデルのそれが乖離していた。したがってこの場合には、同様な小照射野の S_c は遠距離法でも測定し、本法のようにガウス累積分布モデルにより推定するのがよいと考える。

なお、本研究は筆頭著者の卒業研究を少し整理し、加筆したものである。

参考文献

- 1) Zhu TC, and Bjärngard BE: The head-scatter factor for small field sizes. *Med Phys*, 21 (1), 65-68, (1994).
- 2) Thatcher M, and Bjärngard BE: Head-scatter factors and effective x-ray source positions in a 25-MV linear accelerator. *Med Phys*, 19 (3), 685-686, (1992).
- 3) 山田昌法, 稲越英機, 早川岳英, 他: 飽和モデルによるコリメータ散乱係数 S_c の近似. *日放技学誌*, 62 (12), 1675-1681, (2006).
- 4) Zhu TC, and Bjärngard BE: The fraction of photons undergoing head scatter in x-ray beams. *Phys Med Biol*, 40 (6), 1127-1134, (1995).
- 5) Chaney EL, Cullip TJ, and Gabriel TA: A Monte Carlo study of accelerator head scatter. *Med Phys*, 21 (9), 1383-1390, (1994).
- 6) Dunscombe PB, and Nieminen JM: On the field-size dependence of relative output from a linear accelerator. *Med Phys*, 19 (6), 1441-1444, (1992).
- 7) Zhu TC, Bjärngard BE, Xiao Y, et al.: Modeling the output ratio in air for megavoltage photon beams. *Med Phys*, 28 (6), 925-937, (2001).
- 8) Kubo H: Telescopic measurements of backscattered radiation from secondary collimator jaws to a beam monitor chamber using a pair of slits. *Med Phys*, 16 (2), 295-298, (1989).
- 9) Duzenli C, McClean B, and Field C: Backscatter into the beam monitor chamber: implications for dosimetry of asymmetric collimators. *Med Phys*, 20 (2 Pt 1), 363-367, (1993).
- 10) Verhaegen F, Symonds-Taylor R, Liu HH, et al.: Backscatter towards the monitor ion chamber in high-energy photon and electron beams: charge integration versus Monte Carlo simulation. *Phys Med Biol*, 45 (11), 3159-3170, (2000).
- 11) Liu HH, Mackie TR, and McCullough EC: Modeling photon output caused by backscattered radiation into the monitor chamber from collimator jaws using a Monte Carlo technique. *Med Phys*, 27 (4), 737-744, (2000).
- 12) Mohan R, Chui C, and Lidofsky L: Energy and angular distribution of photons from medical linear accelerators. *Med Phys*, 12 (5), 592-597, (1985).

図表の説明

- Fig. 1 NTD法(SCD=100cm)と遠距離法(SCD=200cm)により空中出力を測定するための検出器と加速器ヘッド内構造物の位置関係
- Fig. 2 アイソセンタ平面の点から見たとき、Varian社製線形加速器Clinac 2100C/Dの10MV X線用平坦化フィルタ中の、ビームファンライン上の通過長
- Fig. 3 SCD=100cmとSCD=200cmの測定値 M と、それらに対する指数累積分布モデル式(4)による近似曲線(CumExpon)
左：4MV X線，右：10MV X線
- Fig. 4 SCD=100cmとSCD=200cmの測定値 M に対し指数累積分布モデルの近似式(4)により計算した、一次線のゼロ照射野への外挿線量 M_0 に対する加速器ヘッド上流の構造物からの散乱線量 M_{hl} と下流の構造物からの散乱線量 M_{jaw} の比の変化
左：4MV X線，右：10MV X線
- Fig. 5 SCD=200cmの測定値 M と、それに対する指数累積分布モデル式(4)あるいはガウス累積分布モデル式(6)による近似曲線(CumExponあるいはCumGauss)
左：4MV X線，右：10MV X線
- Fig. 6 SCD=100cmのコリメータ散乱係数 S_c と、それに対する指数累積分布モデル式(5)あるいはガウス累積分布モデル式(7)による近似曲線(CumExponあるいはCumGauss)
左：4 MV X線，右：10 MV X線
- Fig. 7 指数累積関数と、ガウス累積関数およびその2乗関数の比較
指数累積関数とガウス累積関数は10MV X線のSCD=200cmのデータセットに対し、それぞれ式(4)と式(6)のモデルで推定した m_{100}^{200cm} と m_{200}^{200cm} の値を用いてプロットした。後者の曲線は最初の直線的な増加が前者の曲線よりも長く続いた後、より急速に飽和へ移行する。ガウス累積の2乗関数はその両者の曲線の交点を通してプロットした。この曲線はS字状を呈し、最初に漸増部分があり、また飽和前の湾曲がガウス累積関数の曲線よりも強い。
- Table 1 パラメータ推定値