

Intercomparison of normalized head-scatter factor measurement techniques

Douglas M. D. Frye, Bhudatt R. Paliwal, Bruce R. Thomadsen, and Paul Jursinic

Med. Phys. 22 (2), 249-253, 1995

ABSTRACT 標準化したヘッド散乱係数を、ビーム軸と同軸の円柱状のミニファントムおよび純度の高いグラファイトキャップを用いて、4、6、10MVおよび24MVの光子ビームの4×4から40×40 cm²での照射野サイズで測定した。この二つの方法で求めた標準化したヘッド散乱係数は、4と6MVの光子ビームでは一致した。ミニファントム法では、ビルドアップキャップを用いた場合よりも10と24MVのビームの大照射野で、それぞれ1.5%と4.8%低い標準化したヘッド散乱係数となった。小さい照射野サイズでは、ミニファントム法はビルドアップキャップ法よりも大きな標準化されたヘッド散乱係数となった。磁場をかけた測定から、24MVにおいてビルドアップキャップで測定した電離のかなりの部分が混入した電子によるものであることが分かる。ミニファントムと磁場をかけたときの測定は、混入電子の寄与がないことが分かった。ミニファントム法は、組織最大線量比とファントム散乱係数の誤差、しいてはモニタ単位の計算の不正確に潜在的につながるこのような混入電子を除外している。

I. はじめに

ヘッド散乱係数(S_c)の決定は、組織最大線量比(tissue-maximum ratio、TMR)の線量測定において重要な測定である。コリメータ散乱係数とも呼ばれるヘッド散乱係数は、次式の関係から求められる。

$$S_c(r) = Q(r)/Q(r_0) \quad (1)$$

ここで、 $Q(r)$ は照射野サイズ r における組織等価物質でできた平衡微小質量中の空中で測定した電離である。また、 $Q(r_0)$ はコリメータ絞りを基準照射野サイズ r_0 にすること以外は同じ条件で測定した電離である。ヘッド散乱線は主に、照射野平坦化フィルタとコリメータ機構から生じる光子と電子から成る。精度の高いTMRにもとづいた線量計算は、 S_c の決定にかなり影響される。TMRの S_c への依存は次式に示す、 S_c 、全散乱係数(S_{cp})およびファントム散乱係数(S_p)の関係による。

$$S_p(r) = S_{cp}(r)/S_c(r) \quad (2)$$

深部量百分率からのTMRの決定、およびTMRからの散乱線最大線量比(scatter-maximum ratio、SMR)の決定は、次式のもとで S_p に依存する。

$$TMR(d, r_d) = \frac{P(d, r, f)}{100} \left(\frac{f+d}{f+t_0} \right)^2 \frac{S_p(r_0)}{S_p(r_d)} \quad (3)$$

ここで、 r 、 r_0 、 r_d はKhan¹が述べた f 、 $f+t_0$ 、 $f+d$ における照射野サイズである。

S_c 値の測定に含まれる誤差は、式(2)を介して求められるTMRの値に影響する。その他に、モニタ単位の計算では次式のように測定したファントム散乱係数が直接使われる。

$$MU = \frac{\dot{D}_0}{TMR(r_d, d) \cdot S_c(r_c) \cdot S_p(r_d) \cdot WF \cdot TF} \quad (4)$$

ここで、 MU はモニタ単位数、 \dot{D}_0 はアイソセンタにおけるモニタ単位当たりの線量である。 $TMR(r_d, d)$ 、 $S_c(r_c)$ はコリメータ設定が r_c におけるヘッド散乱係数、 $S_p(r_d)$ は式(1)から求めた照射野サイズで r_d におけるファントム散乱係数である。また、 WF はくさび係数、 TF はトレー係数である。不正確なモニタ単位の値は不適当な測定法で得た誤差のある S_c 値を用いた計算によって生じる。

ヘッド散乱係数の算出において、ビームと同軸の円柱状ミニファントムが何人かの研究者^{2,4}によって採用された。別の研究者^{5,7}はこれらの係数を求めるために、従来のビルドアップキャップを組成と厚

さを変えて用いている。ミニファントム測定法で用いている厚さは、従来のヘッド散乱線測定に用いられてきたビルドアップキャップとは本質的に異なる。ミニファントムの厚さが厚いのは、混入電子の消去、欧州の線量測定プロトコルでの合意、臨床に近い領域での情報の測定、照射野サイズに伴う d_{max} の変化に対する独立、および高原子番号のビルドアップキャップに付随する問題³の回避といった利点によるものである。今回の研究さ両方の手法で得た標準化ヘッド散乱係数を比較し、相違の原因を説明し、その違いが臨床に及ぼす度合を検討することにある。

II. 器材と方法

今回の研究で用いたミニファントムとビルドアップキャップをFig.1に示す。このミニファントムはRMI社のSolid WaterTMからなる。ビルドアップキャップは、Tableに示す平衡厚(d_{max})の壁を純度の高いグラファイトで作った⁸。ミニファントム測定では、Keithley model 602電位計とFluke model 8060Aデジタルマルチメータ(DMM)に接続した0.6cc PTW model N23333 Farmer形電離箱を採用した。ビルドアップキャップ測定では、Scanditronix model RK 0.12cc電離箱とPrecision Radiation Measurements (PRM) model SH1電位計を用いた。Scanditronix社の電離箱の代わりにビルドアップキャップに挿入したFamer形電離箱を用いた幾つかの照射野サイズ(7×7、10×10、15×15、20×20 cm²)での測定値は、電離箱の違いで有意に異なる結果ではなかった。いずれの電位計もNational Institute of Standard and Technology (NIST)の校正を受けた。電離箱はステム効果に関して調べた。ステム効果はNational Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) report 69で述べられているように、電離箱のステム部分を照射野の長軸に直角と平行に配置し、

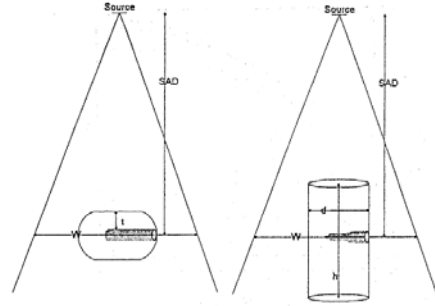


Fig.1 標準化したヘッド散乱係数測定の照射配置. ここで、 h はミニファントムの厚さ、 d はミニファントム直径、 t はビルドアップキャップ厚である。ミニファントムによるすべての測定で、測定深はミニファントムの厚さの半分とした。Scanditronix の RK 0.1 cc 電離箱をビルドアップキャップで用い、ミニファントムでは PTW N23333 0.6 cc Farmer 形電離箱を用いた。ビルドアップキャップで Farmer 形電離箱を用いた追加測定により、二つの電離箱によって得た結果に有意な相違はみられなかった。

矩形度の強い長方形照射野で、電離箱のステム部を照射し測定した。ステム効果測定はビルドアップ

Table. 評価したヘッド散乱測定におけるファントム厚.

光子ビームエネルギー	ミニファントム厚	ミニファントム直径	ビルドアップキャップ厚
MV	h (cm)	d (cm)	t (cm)
4	10	4	0.6
6	10	4	0.9
10	5, 20	4	1.3
24	8, 20	4	2.3

アップキャップをつけずに、あるいはミニファントムにより、線源電離箱間距離(source to chamber distance, SCD) 80 cm、照射野サイズ $5 \times 28 \text{ cm}^2$ でClinac 4で行った。ステム効果は検出されなかった。

標準化したヘッド散乱係数(S_c)は、Varian Clinac 4、2100Cおよび2500の加速器で4、6、10、24MVの光子ビームにより測定した。照射の配置をFig.1に示す。各照射野サイズにおいて、200モニタ単位当たりの電荷を累積した。線量測定系あるいは加速器系の系統誤差を調べるために、一定の期間を置いて、先に測定した照射野サイズの電荷測定を繰り返した。系統的誤差は検出されなかった。データは $4 \times 4 \text{ cm}^2$ と $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の間の整数の正方形照射野サイズで求めた。そして、各装置の最大照射野サイズ(Clinac4では $32 \times 32 \text{ cm}^2$ 、2100Cと2500では $40 \times 40 \text{ cm}^2$)までは偶数の整数の正方形照射野サイズごとにデータを得た。測定に用いたミニファントムの全厚(h)とビルドアップキャップの壁厚を、TableとFig.1に示す。測定はvan Gasteren³が示した厚さと直径のミニファントムで行ったが、10MV($d_{\text{max}}=2.5 \text{ cm}$)と24MV($d_{\text{max}}=4 \text{ cm}$)の測定では、最大線量深の2倍の厚さ($h=2d_{\text{max}}$)でも行った。ミニファントムによるすべての測定において、測定深はファントム厚の2分の1とした。

10MVと24MVのエネルギーでは、標準化ヘッド散乱係数の測定に対する混入電子の影響についても調べた。種々のSCDにおける種々の照射野サイズセ、ビルドアップ法による電荷測定を行った。ビーム中心軸に対して直角にかけた磁場を通る放射線ビームにおいて、種々のSCDで $10 \times 10 \text{ cm}^2$ での電荷測定値をビルドアップキャップとミニファントムで得た。永久磁石と電磁石を組み合わせた磁石を用いた。磁場強度を下げるために、電磁石を永久磁石と対極するようにした。永久磁石を電磁石で補助することで1446Gの磁場強変を得た。磁石はビームの中心軸に対して磁石の極が平行となるように、ヘッドのアクセサリトレイホルダーに合うように作った。磁石の極間隔の条件により、照射野サイズはアイソセンタで最大 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ に制約された。1446Gの磁場は24MVの光子ビームによる混入電子のすべてを掃引することが分かっている⁹。ビルドアップキャップとミニファントムを用いた電荷測定値は、0から1446Gの磁場強度で24MVの光子ビームで得た。

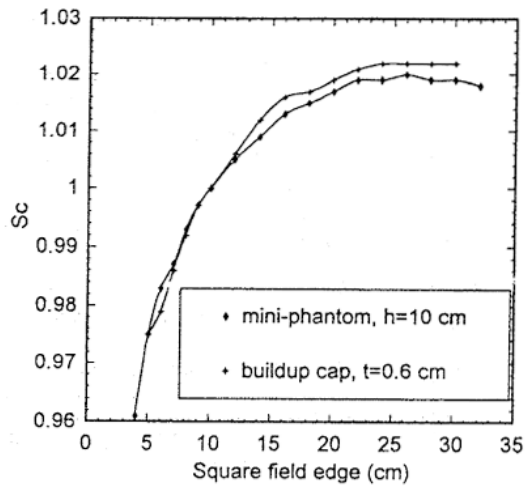


Fig.2 4 MV 光子ビームのヘッド散乱係数.

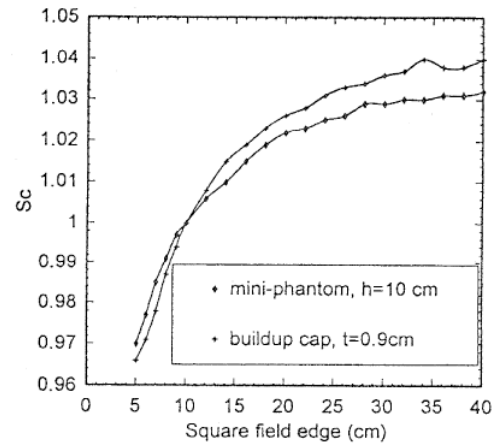


Fig.3 6 MV 光子ビームのヘッド散乱係数.

III. 結果

10×10 cm²の照射野サイズで標準化した測定したヘッド散乱係数を、Fig.2-5に示す。図中のデータ点はスプライン曲線で結んだ。Fig.2と3の結果より、4MVと6MVの光子ビームにおけるビルドアップキャップ法とミニファントム法で得たヘッド散乱係数には有意な差(0.5%)はないことが分かる。10MVの結果(Fig.4)では、ビルドアップキャップと平衡厚のミニファントム($h=2d_{\max}=5$ cm)で求めたヘッド散乱係数と厚いミニファントム($h=20$ cm)で求めた係数との間では、15×15 cm²と40×40 cm²の間の照射野サイズで1%から1.5%の差を示した。24MVで得たヘッド散乱係数(Fig.5)は、ビルドアップキャップとミニファントムの結果の間でかなりの差(4.8%)がある。二つの測定法の間の相対的關係が、標準化した点(10×10 cm²)以下で照射野サイズに対して逆転していることも注目される。最大線量深の2倍の厚さ($h=2d_{\max}=8$ cm)のミニファントムによる24MVのヘッド散乱係数の測定値は、ビルドアップキャップによる測定値と有意な差(0.5%)がなかった。

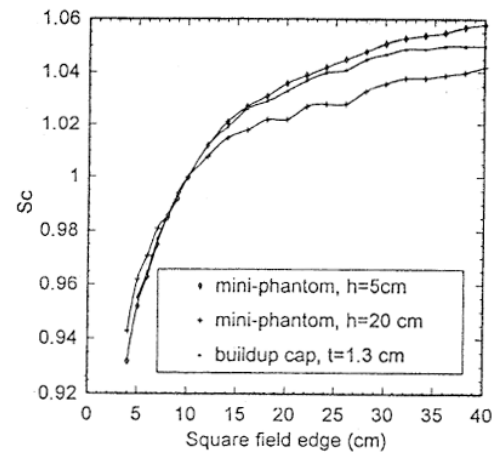


Fig.4 10 MV 光子ビームのヘッド散乱係数.

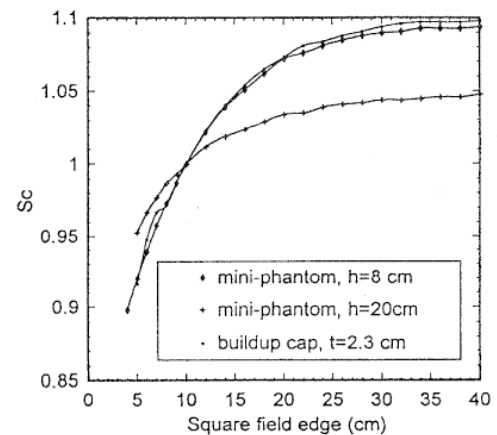


Fig.5 24 MV 光子ビームのヘッド散乱係数.

24MV光子ビームにおける混入電子の影響は、Fig.6に図示する結果から判断した。この図の結果は、SCD 100 cmにおける読み値で標準化した。ここで調べたSCDにおける0から1446Gの間で常に存在する差より、混入する電子の大半はここで調べたSCDを超えた空中での飛程をもつことが示唆される。この実験は厚いミニファントム($h=20$ cm)でも繰り返した。ビームからの混入電子を掃引するために1446Gの磁場を用いても、厚いミニファントムで収集された電荷には変化がみられなかった。

IV. 検討

24MV光子ビームを掃引するための磁場を用いた測定より、治療装置のヘッドから発生する電子は、ビルドアップキャップによる測定値とvan Gasteren等³が述べた厚いミニファントムによる測定値との

間の差のかなりの部分($10 \times 10 \text{ cm}^2$ で3.9%)を占めていることが分かる。Thomadsen等は以前に、このような高エネルギー光子ビームにおける混入電子が最大線量深の最も深い点以上に到達することを示した¹⁰。BiggsとLing、BiggsとRussel、およびLing、SchellとRustgiも、このようなビームにおいて表面から最大線量深までの線量のかなりの部分が混入電子によるものであることを示した¹¹⁻¹³。 d_{max} の2倍の厚さのミニファントムを用いたときにみられるミニファントムとビルドアップキャップの結果の一致は、この知見を支持する。アイソセンタにおける S_c の照射野サイズに依存した電子混入成分を示すことは、今回使用した磁石の庵間隔の制約からできなかったが、Thomadsen等は以前に、24MV光子ビームで線源検出器間距離205.5 cmにおいて、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ および $35 \times 35 \text{ cm}^2$ の照射野の最大線量深における電離に対して混入電子が0.4%、5.3%および10%寄与することをみた¹⁰。van Gasterenが示したように、最も高いエネルギーの光子ビームの S_c の測定に厚いミニファントムを使うと、このような混入電子が除外されることが分かる。しかし、これを用いなければ最大線量深で混入電子が存在する。この結果より、24MV光子ビームにおいては、厚いミニファントムがTMR線量測定で採用する S_c 測定に用いる適当な道具ではないということを示している。

最も高いエネルギーの光子ビームにおけるヘッド散乱線中の混入電子の割合が照射野サイズ依存性をもつことは、我々の知見と合う。厚いミニファントムは、式(1)中の標準化する照射野サイズの電離を低くする。小さい照射野サイズでは、このような混入電子による影響が少ないとすると、標準値が低くなるので、電離の比率であるヘッド散乱係数は、ここで報告した測定で示し

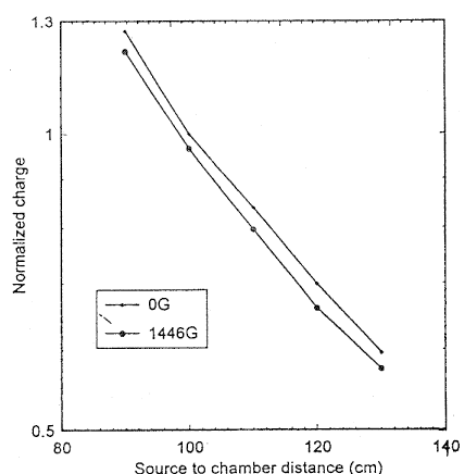


Fig.6 磁場 0 と 1446 G における線源電離箱間距離に対する標準化した電荷量. 24 MV 光子ビーム, グラファイト製ビルドアップキャップ (壁厚 2.3 cm), 照射野サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$. 結果は磁場 0 の線源電離箱間距離 100 cm に対して標準化した。

たように、小さい照射野サイズにおいて大きくなる。混入電子寄与がかなりある大きな照射野サイズでは、混入電子の除去により、式(1)の比率の分母以上に分子がかなり小さくなると予想される。そこで、ここで報告した測定値でみられたように、 S_e は小さくなる。

ここで報告した測定の結果から、高エネルギーの光子ビームのTMR測定は用いるヘッド散乱係数の測定法にかなり影響を受けることが分かる。ファントム散乱係数とTMR値の決定は、式(2)-(4)で述べた関係を通して影響を受ける。厚いミニファントムを用いた測定で得られたヘッド散乱係数を用いると、ファントム散乱係数は過大評価(小照射野サイズ)、もしくは過小評価(大照射野サイズ)となる。式(3)から導かれるTMRは、このような誤差の影響を直接受ける。大きい照射野サイズのファントム散乱係数 $S_p(r_d)$ の過大評価は、式(3)の標準照射野サイズのファントム散乱係 $S_p(t_0)$ よりも非常におおきくなり、大照射野サイズにおいて過小に評価したTMRを生み出すであろう。

最も高いエネルギーの光子ビームのモニタ単位の計算もまた、ヘッド散乱係数の測定法の選択に左右されるはずである。モニタ単位の計算は、式(4)の関係により測定したヘッド散乱係数に直接依存する。オープン照射野の場合には、積である $S_e S_p$ はオープン照射野で測定した全散乱係数 S_q となるので、この問題は避けられる。しかし、適度にブロックされた照射野の場合、モニタ単位の計算においてミニファントムで測定したヘッド散乱係数を用いると、コリメータによる照射野サイズとブロックの程度に依存した誤差につながる。例えば、照射野サイズが標準照射野サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ よりも大きいときには、ブロックされた照射野サイズはコリメータ設定よりも必然的に小さいので、ミニファントム法で過小評価されるヘッド散乱係数は過大評価されたファントム散乱係数では完全には補償されない。したがって、モニタ単位の過大評価に結び付く。モニタ単位の計算に用いるTMRを式(3)から導くとすると、前段で述べたようにモニタ単位の過大評価が組み合わさる。 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ より小さい照射野サイズの場合、状況は逆転し、モニタ単位数の過小評価となる。

まとめると、上記で述べた測定から、van Gasteren等³が述べたヘッド散乱係数を測定するミニファントム法は24MV光子照射野のTMR測定に誤差を招くことが分かる。1446Gの電磁石による測定から、24MV光子ビームにおける最大線量深での従来のビルドアップキャップ法により通常に測定した全電准のかなりの部分は混入電子によるものであることが分かる。また、これらの電子の寄与はvan Gasteren等³が述べたミニファントムの厚さで除去されることが分かる。

Thomadsen等によるこれまでの研究から、ヘッド散乱線中の電子混入成分に照射野サイズ依存があることが分かる¹⁰。我々の測定結果より、このような高エネルギーの光子ビームの場合、線量測定の標準化深での二次荷電粒子の状況にヘッド散乱線測定の手法が合っていなければ誤差を生むことが示される。

参考文献

1. F. M. Khan, W. Sewchand, J. Lee, and J. F. Williamson, "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.
2. M. Tatcher and B. E. Bjärngard, "Head-scatter factors in rectangular photon fields," *Med. Phys.* 20, 205-206, 1993.
3. J. J. M. van Gasteren, S. Heukelom, H. J. van Kleffens, R. van der Laarse, J. L. M. Venselaar, and C. F. Westermann, "The determination of phantom and collimator scatter components of the output of megavoltage photon beams: Measurement of the collimator scatter part with a beam coaxial narrow cylindrical phantom," *Radiother. Oncol.* 20, 250-257, 1991.
4. G. EKrithivas and S. N. Rao, "Dosimetry of 24-MV x rays from a linear accelerator," *Med. Phys.* 14, 274-281, 1987.
5. E. R. Kase and G. X. Svensson, "Head-scatter data for several linear accelerators (4-18 MV)," *Med. Phys.* 13, 530-532, 1986.
6. G. Luxton and M. A. Astrahan, "Output factor constituents of high energy photon beam," *Med. Phys.* 15, 88-91, 1988.
7. P. B. Dunscombe and J. M. Nieminen, "On the field size dependence of relative output from a linear accelerator," *Med. Phys.* 19, 1441-1444, 1992.
8. B. R. Thomadsen, "The use of tissue-air ratio with high energy photon fields," Dissertation, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, May, 1989.
9. P. A. Jursinic and T. R. Mackie, "Characteristics of secondary electrons produced by 6-, 10-, and 24-MV photon beams," (submitted to *Medical Physics*).
10. B. R. Thomadsen, S. Kubsad, B. R. Paliwal, S. Shababi, and T. R. Mackie, "On the cause of the variation in tissue-maximum-ratio values with source to detector distance," *Med. Phys.* 20, 723-727, 1993.
11. P. J. Biggs and M. D. Russel, "An investigation into the presence of secondary electrons in megavoltage photon beams," *Phys. Med. Biol.* 28, 1033-1043, 1983.
12. P. J. Biggs and C. C. Ling, "Electrons as the cause of the observed d_{\max} shift with fields size in high energy photon beams," *Med. Phys.* 6, 291-295, 1979.
13. C. C. Ling, M. C. Schell, and S. N. Rustgi, "Magnetic analysis of the radiation component of a 10-MV photon beam," *Med. Phys.* 9, 20-26, 1982.