

10MV X-ray における miniphantom の外径による コリメータ散乱係数の変化

中野渡 優志¹⁾、奈良 鉄造²⁾、高木 雅文²⁾、真里谷 靖^{1),3)}

要旨：放射線治療計画での線量計算は複雑化している。小照射野は其中でも重要な対象のひとつである。本研究では、線量計算のパラメータであるコリメータ散乱係数(S_c)に及ぼす照射野サイズと miniphantom (MP) の外径の組み合わせによる影響を検討することを目的とした。直線加速器を用い、X 線エネルギー 10MV で 400 MU を照射し、線源検出器間距離は 1,000 mm にて一定とした。正方形照射野の辺を 8~100 mm の 11 段階、MP の外径は 10~40 mm の 4 段階とし、各々の組み合わせによる S_c を測定した。結果として、MP の外径より照射野サイズが小さい場合に測定された S_c は減少傾向を示すことが分かった。その原因としては照射野内に MP 全体が含まれるか否か、さらに各々の場合の 2 次電子発生量の違いが重要であることが示唆された。

キーワード：コリメータ散乱係数，小照射野，電子平衡

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of collimator scatter factor measured by using several kinds of miniphantom in 10MV X-ray

Yushi NAKANOWATARI¹⁾, Tetsuzo NARA²⁾, Masafumi TAKAGI²⁾, Yasushi MARIYA^{1),3)} *

Abstract: Dose calculation has become complicated in the field of radiation treatment planning. Narrow radiation field is very important in this field. The aim of this study was to investigate the influence of combination of the size of radiation field and the external diameter of miniphantom (MP) on the value of collimator scatter factor (S_c), using 10MV X-ray delivered by linear accelerator. The source-chamber distance was fixed to be 1,000 mm. The center of MP was located in correspondence with the axis of the radiation beam. Irradiation of 400 MU was delivered with the dose rate of 400 MU/min. We measured S_c by using a combination of the 4 sizes of MPs with external diameters ranging from 10 mm to 40 mm and 11 sizes of square radiation fields ranging from $8 \times 8 \text{ mm}^2$ to $100 \times 100 \text{ mm}^2$. Consequently, the measured values of S_c were lower when the size of the radiation field was smaller than the external diameter of MP. Whether the whole volume of MP was included within the radiation field or not appeared critical for our results, and it was suggested that the differed amount of secondary electron might play a crucial role for it.

Key words: Collimator scatter factor; Narrow radiation field; Electron equilibrium

¹⁾ Hirosaki University Graduate school of Health Sciences
²⁾ Department of Radiology, Hirosaki Central Hospital
³⁾ Department of Radiology/Radiation Oncology, Mutsu General Hospital
*Corresponding Author: Yasushi Mariya
1-2-8 Kogawa-machi, Mutsu, Aomori 035-8601, Japan (y_mariya@hospital-mutsu.or.jp)
Received for publication, August 5, 2016
Accepted for publication, October 5, 2016

¹⁾ 弘前大学大学院保健学研究科
²⁾ 弘前中央病院放射線科
³⁾ むつ総合病院放射線科
*責任著者：真里谷靖
(y_mariya@hospital-mutsu.or.jp)
〒035-8601 青森県むつ市小川町一丁目 2 番 8 号
TEL: 0175-22-2111 FAX: 0175-22-4439
平成 28 年 8 月 5 日受付
平成 28 年 10 月 5 日受理

はじめに

近年、外部放射線治療は通院で実施可能ながん治療法として広く受け入れられるようになったが、実際に患者に照射を行うまでの業務プロセスは複雑かつ時間を要するものであり、事前に電離箱線量計や固体水等価ファントムなどを用いて実測することで投与線量精度を担保するという重要な過程が必要な高精度の治療技術も多く存在する。そのひとつとして、脳腫瘍などに対する定位放射線治療が国内の治療施設で広く用いられている。しかし、定位放射線治療は小照射野を含む照射技術が必要とし、通常用いられる照射野に比較して吸収線量の精度はより高いレベルのものが要求される。これに関して、線量計算に関する多くの業績で知られる Khan ら¹⁾ は tissue maximum ratio (TMR)、phantom scatter factor (S_p) および scatter maximum ratio (SMR) といった様々なパラメータを用いて X 線の 1 次成分と散乱成分とを分離して計算する手法を提案した。しかしこの手法では、コリメータを全閉するゼロ照射野での TMR や S_p が想定されている。ゼロ照射野やこれに近似する小照射野に対する知見はこれまで検討が加えられてはいるものの²⁾、現状ではなお不明瞭な点が多い。

通常小照射野は通常 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 以下の照射野サイズと定義され、stereotactic irradiation (STI) や intensity modulated radiation therapy (IMRT) を行う上でその使用が必要となる。小照射野では、線量計算において jaw collimator 開度に依存した出力変動を認めるが、変動を補正する係数としてコリメータ散乱係数 (S_c) がある。 S_c の算出においては、その測定にあたりアクリル製円柱状 miniphantom (MP) を用いた手法が Gastren ら³⁾ によって提案され、MP を用いた照射野サイズの変化に伴う S_c の変化について報告がなされている^{4),5),6)}。しかし、現時点でもなお十分に確立されてはいない小照射野を実際に使用する場合、線量計算の精度を担保するためには S_c をはじめとするパラメータを精度よく適用することが重要であり、誤ったパラメータを適用することは精度が十分に担保されない線量を患者に投与す

ることにつながる可能性がある。そこで今回、複数の異なる外径を持つ MP を用いた測定により、小照射野を中心とした照射野サイズの変化と S_c の変化の関連について検討した。また同じ外径を持つ MP について、検出器の電離容積の異なる 2 つの指頭型電離箱線量計を用い同様の照射野設定で S_c 測定を行った場合に、電離容積の違いが S_c に及ぼす影響についても検討を加え、これらの結果を報告した。

方法

直線加速器は CLINAC-iX (Varian, USA) で、10 MV X 線を用いた。検出器は 2 種類の指頭型電離箱線量計、電位計は Ramtec smart (TOYO MEDIC) を用いた。照射条件は、線量率 400 MU/min にて 400 MU の照射とした。

照射野サイズは、線源検出器間距離 (source-chamber distance: SCD) が 1,000 mm となる X 線ビームに平行な平面上で決定されるが、今回の実験で使用した照射野サイズはこの平面上で最小 $8 \times 8 \text{ mm}^2$ から最大 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ までの小照射野を含む照射野サイズとした。その際の正方形照射野の辺は 8, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80 および 100 mm の 11 段階とした。ある照射野サイズ (X) における指頭型電離箱線量計から得られる測定値を $M(x)$ 、照射野サイズ $100 \times 100 \text{ mm}^2$ における測定値を $M_{(100)}$ と定義すると、ある照射野サイズにおけるコリメータ散乱係数 $S_c(x)$ は次式 1) により得られ⁷⁾、各照射野サイズについてこれを適用した。

$$S_c(x) = M(x) / M_{(100)} \dots 1)$$

なお使用した指頭型電離箱線量計の測定精度および照射装置の出力精度に関しては、日々の装置点検の段階で測定誤差が 1% を下回っており、日常診療の許容範囲内であることが確認されている。

(1) MP の外径の変化に伴う S_c の変化

測定時の機器配置概略を Fig. 1 に示す。検出器は 0.016 cm^3 指頭型電離箱線量計 (PTW 社製

TN31016, Germany) を用いた。アクリル製 MP に挿入した検出器を X 線ビームに対して平行に配置後、測定深を MP 先端から 100 mm とし S_c の測定を行った。照射野サイズは前述の 11 段階とし

た。測定に用いた MP の外径は 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm の 4 種類であり、11 段階の正方形照射野、4 段階の MP の外径各々の組み合わせによる S_c の変化を解析した。

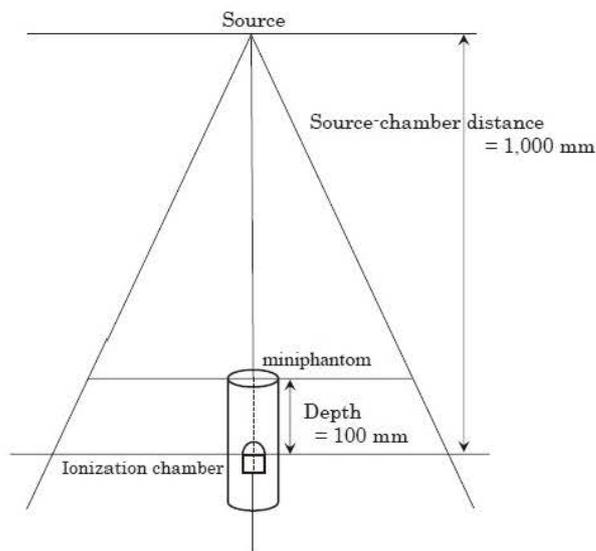


Fig.1 Scheme of measurement of S_c values using miniphantom.

Ionization chamber inserted vertically to the center of miniphantom (MP) located in correspondence with the axis of radiation beam. The source-chamber distance was fixed to be 1000 mm and the depth in MP was fixed to be 100 mm.

Table1 Measured values of S_c according to the combination of radiation field of 11 sizes and miniphantom of 4 sizes.

*Miniphantom was not wholly irradiated.

Side of radiation fields [mm]	External diameter of miniphantoms [mm]			
	10	20	30	40
8	0.804 *	0.583 *	0.597 *	0.530 *
10	0.885 *	0.697 *	0.692 *	0.637 *
15	0.918	0.860 *	0.820 *	0.782 *
20	0.925	0.923 *	0.886 *	0.855 *
25	0.929	0.936	0.921 *	0.893 *
30	0.934	0.941	0.940 *	0.921 *
40	0.946	0.950	0.954	0.954 *
50	0.956	0.962	0.964	0.964
60	0.971	0.973	0.974	0.975
80	0.987	0.990	0.990	0.989
100	1.000	1.000	1.000	1.000

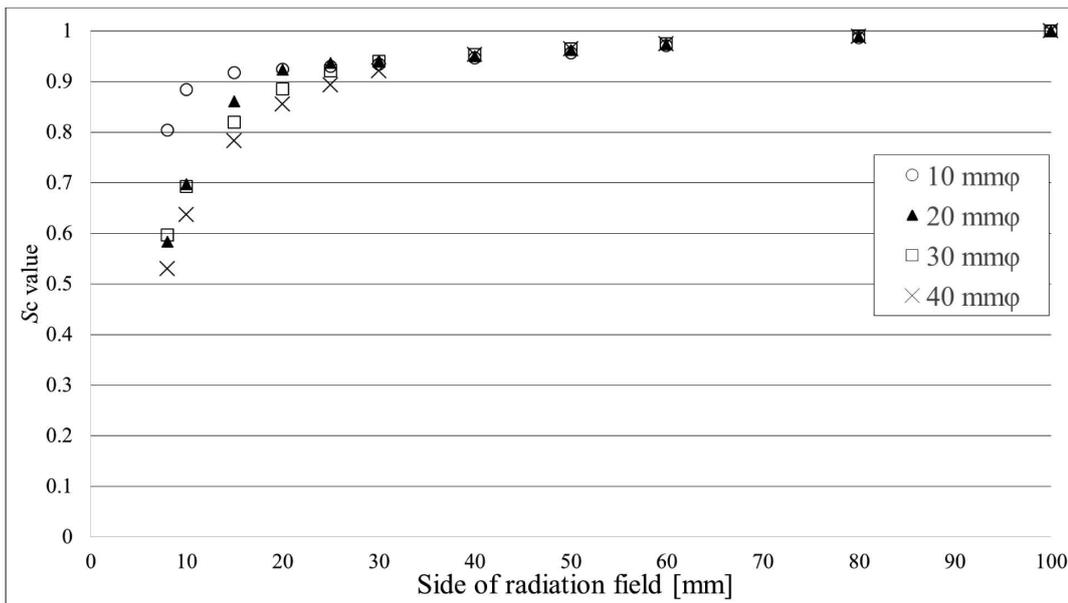


Fig.2 Measured values of S_c according to the combination of radiation field of 11 sizes and miniphantom of 4 sizes.

As radiation field became smaller, S_c value became lower in the range of narrow radiation field. In addition, S_c value tended to become lower when external diameter of miniphantom was smaller.

(2) 指頭型電離箱線量計の電離容積の違いによる S_c の変化

指頭型電離箱線量計の電離容積の違いが測定結果に及ぼす影響を検証するために、外径30 mmのMPを用いて電離容積の異なる2種類の指頭型電離箱線量計を挿入して測定を行った。検出器は0.016 cm³ 指頭型電離箱線量計および0.6 cm³ 指頭型電離箱線量計 (PTW社製 TN30013) を用いた。測定中心における両指頭型電離箱線量計の外径は、0.6 cm³ 指頭型電離箱線量計では7.3 mm、0.016 cm³ 指頭型電離箱線量計では4.3 mmと異なっていたため、側壁厚が異なるそれぞれの形状に合致したMPを選択した。測定時の機器配置はFig. 1と同様であり、照射野サイズは前述の11段階とした。

結果

(1) MPの外径の変化に伴う S_c の変化

0.016 cm³ 指頭型電離箱線量計を用いて測定した照射野サイズ変化に伴うMPの外径ごとの S_c の変化、および奈良ら⁶⁾の方法により求められる小照射野における S_c の実測データを示す (Table. 1, Fig. 2)。照射野サイズ 40 × 40 mm² 以上の条

件では、いずれのMPの外径における S_c であっても良好な一致を示した。照射野サイズ 40 × 40 mm² 未満の条件では、いずれのMPの外径における S_c であっても減少する傾向を示した。また S_c の減少はMPの外径によってそれぞれ異なる傾向を示した。即ち、MPの外径より狭い照射野の辺を設定した際には、MPの外径より広い照射野を設定した際の S_c と比較し、明らかに減少傾向の増大を示した。さらにMPの外径が縮小するにつれ、MPの外径より狭い照射野の辺を設定した際の S_c の減少は、より急峻なものとなった。

(2) 指頭型電離箱線量計の電離容積の違いによる S_c の変化

指頭型電離箱線量計の電離容積の違いによる S_c の変化を検討した (Table. 2, Fig. 3)。何れの照射条件においても0.016 cm³ 指頭型電離箱線量計および0.6 cm³ 指頭型電離箱線量計を用いて測定した S_c は同様の傾向を示した。しかし、照射野の辺が15 mm以下では両者の測定結果に差異が目立ち、0.016 cm³ 指頭型電離箱線量計を用いて測定された S_c が大きくなる傾向を示した。この傾向は8 mmで最大となった。

Table 2 Measured values of S_c according to a combination of radiation field of 11 sizes and ionization chamber of 2 types.

The size of external diameter of miniphantom was fixed to be 30 mm.

*Miniphantom was not wholly irradiated.

Side of radiation fields [mm]	Chamber (vented sensitive volume)	
	TN30016 (0.6 cc)	TN31013 (0.016 cc)
8	0.439 *	0.597 *
10	0.588 *	0.692 *
15	0.784 *	0.820 *
20	0.872 *	0.886 *
25	0.917 *	0.921 *
30	0.939 *	0.940 *
40	0.953	0.954
50	0.963	0.964
60	0.972	0.975
80	0.989	0.990
100	1.000	1.000

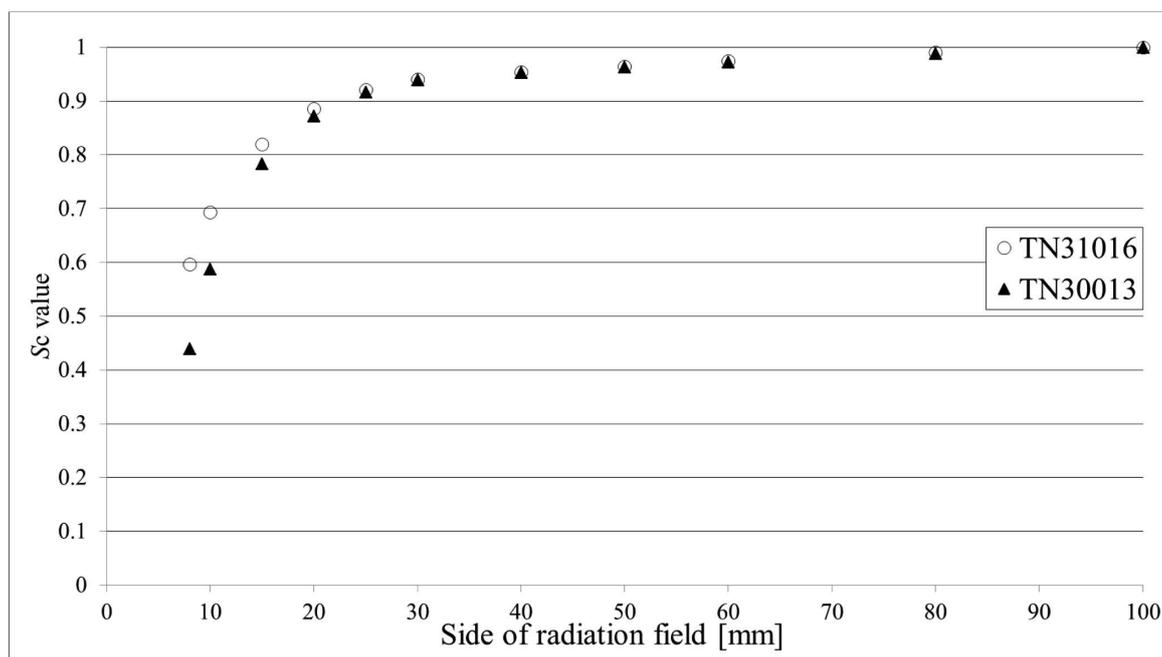


Fig.3 Measured values of S_c according to the combination of radiation field of 11 sizes and ionization chamber of 2 types.

As radiation field became smaller, S_c value became lower in the range of the narrow radiation field.

The size of external diameter of miniphantom was fixed to be 30 mm.

考察

今回の結果で注目すべき点は、MPの外径以下

の照射野サイズで測定を行う場合に S_c が予想以上に減少を示したことであった。これについては中

川ら⁷⁾も同様の結果を報告しているが、その原因については以下のようなものを挙げる事が出来る。一つは、2次電子の存在である。Khanらは S_c 測定において、MPを用いる測定を行う際には、測定値が相対的光子フルエンスを全て反映するならば、照射野にMPが十分に含まれていることが前提であるとしている。言い換えると、MPが均一に照射されることが重要となる。このためには、指頭型電離箱線量計に装着するビルドアップキャップやMPを小型にした S_c の測定が有効である。また彼らはSCDを1,000 mmより長く設定することにより、コリメータ開度はそのまま、検出器に対して照射野サイズを十分に広くとることが可能な拡大照射法も有効であるとしている。

奈良ら⁶⁾は最小照射野サイズ $10 \times 10 \text{ mm}^2$ から $40 \times 40 \text{ mm}^2$ に至る小照射野における S_c を、アルミ製ビルドアップキャップ(外径27.3 mm, 厚さ2.88 g/cm²)の装着とSCD=3,000 mmとする拡大照射法を併用した実測により測定した。 $50 \times 50 \text{ mm}^2$ から $100 \times 100 \text{ mm}^2$ の照射野サイズに関してはアクリル製ミニファントム(MP径40 mm, 長さ100 mm, depth 50 mm), SCD=1,000 mmの条件で測定し報告している。彼らによる S_c 測定の結果の中でMPを用いた測定時のみわずかにMPが照射野外にはみ出す例が数例あったが、その他の設定照射野においてはアクリル製ビルドアップキャップおよびMPは全て照射野内に含まれていた。これはKhanらによる S_c 測定時の理想条件をおおむね満たすものであり、適切な S_c 測定がなされたと考えられる。Fig. 2にみるように今回われわれの複数のMP外径サイズを用いた結果と比較すると、MP外径10 mm時の測定結果が奈良らの報告した結果に最も近く、同じMP外径における今回の測定結果とは $10 \times 10 \text{ mm}^2$ の照射野サイズにおいて6.2%という差異が最大であった。この差異は照射野の拡大につれて減少した。われわれの結果におけるMP外径10 mm時の測定結果は、Khanらが示した S_c 測定の結果を満たして測定された結果に近似していたことから、照射野内にMPを含むことの重要性が改めて確認できたものと考えられる。照射野サイズの縮小に伴いMPの一部が照射

野外にはみ出す場合には、MPとX線との相互作用により生じる2次電子の相対的な発生量減少が相対線量を表す S_c の減少に寄与することが推測された。今後、十分な測定回数およびさらに詳細に照射野を設定することで、検討を続けていきたい。

一方、直線加速器を用いた測定において照射ヘッド由来の混入電子の影響を無視することはできない。ビルドアップキャップやMPを用いる利点の一つにヘッド由来の混入電子の除去が挙げられる。それは10MV X線を用いた場合の線量最大深(dmax)における混入電子による線量寄与は、JursinicとMackie⁸⁾の報告によると5%にのぼり、無視できない値となることからその重要性が示唆される。そこでMPを用いて混入電子の除去を期待する場合、MP外径を十分に厚くすることが必要とされるが、前述のとおりMP外径を厚くすることは小照射野における測定の妨げとなる。しかしながら混入電子の発生量はjaw collimator開度の縮小に伴い減少することが明らかである。よって小照射野における測定値に対しては混入電子の影響は比較的小さいと推定されるが、その詳細は不明でありさらなる検討を要する。今後は、小照射野における最適なMP外径の選択を含む詳細な S_c の検討のため、モンテカルロシミュレーションを用いて2次電子や混入電子の影響を検討するなど、理論面からの詳細なアプローチも重要になると考える。

まとめ

MPを用いた S_c 測定では、MPをすべて含む照射野サイズで測定を行うことの必要性を確認する結果となった。MP外径の縮小に伴う2次電子や混入電子の影響について、さらに詳細な検討を行うことを考えている。

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 energy x-ray beams. Med Phys, 7(3): 230-237, 1980.
- 2) 大谷浩樹, 斉藤秀敏, 入船寅二: 定位放射線

照射における小照射野線量評価の散乱補正係数.

J Jpn Health Sci , 8(2) : 105-110 , 2005 .

3) J J M van Gasteren, S Heukeloma, H J van Kleffens, et al: 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. Radiotherapy and Oncology, 20: 250-257, 1991.

4) X Allen Li, M Soubra, J Szanto, L H Gerig: Lateral electron equilibrium and electron contamination in measurements of head-scatter factors using miniphantoms and brass caps. Med Phys, 22(7):1167-1170, 1995.

5) 佐藤智春, 石田寿城, 萬篤憲, 他: ミニファントムおよびビルドアップキャップによるヘッド散乱係数の評価. J Jpn Soc Ther Radial Oncol, 15 : 263-269 , 2003 .

6) 奈良鉄造, 岩崎晃, 他: 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. 日放技学誌, 60 : 87-100, 2004 .

7) 中川政幸, 中田学, 岡田孝, 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, 54 : 1155-1161 , 2000 .

8) Jursnic PA, Mackie TR: Characteristics of secondary electrons produced by 6, 10 and 24 MV x-ray beams. Phys Med Biol, 41: 1499-1509, 1996