

解説：保科正夫

このGasterenの論文は、円柱形のミニファントムを利用したコリメータ散乱係数の測定に関するものです。このようなファントムを使うことで、治療装置ヘッド内で発生した電子の測定値への寄与を抑えています。ミニファントムによるコリメータ散乱補正係数の測定については、Gasterenの発表後世界的に認められ、利用されることの多い手法となっております。

現在国内に入ってきている新しい治療計画システムでは、コリメータ散乱係数を必要としております。しかし、日本の「吸収線量の標準測定法」では、散乱係数の命名が諸外国と異なり独自の部分があり、近年の線量計算の考え方を取り入れた治療計画システムを利用する施設においては、まず用語にとまどい、続いてその測定において疑問が出てくるとというのが、一般的な現状と推察されます。そこで、先回は定義の紹介をし、今回はその具体的な測定法を紹介する。今回の論文はこれらのデータを取得する上で参考になるものと考えます。

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

J. J. M. van Gasteren, S. Heukelom, H. J. van Kleffens, R. van der Laarse, J. L. M. Venselaar and C. F. Westermann

Radiotherapy and Oncology, 20, 250-257, 1991

Summary 全散乱補正係数 S_{cp} をコリメータ散乱成分 S_c とファントム散乱成分 S_p に分けることは、標準的な治療の幾何学的条件と異なる状況におけるメガボルト光子ビームの線量計算で有用な概念であることが示された。臨床に応用できる S_c を求める方法を述べる。混入電子の飛程を越えた深さに配置した電離箱を、ビーム軸に一致した軸をもつ直径4cmの細い円筒形のポリスチレンファントム中に置いて測定を行った。 S_{cp} は完全な散乱のあるファントム中で測定する。そして、 S_p は S_{cp} と S_c から導く。信頼のもてる分離をするために、すなわち混入電子の影響を除外するために、 S_{cp} の測定は線質指標(QI)が $QI \leq 0.75$ までの光子ビームでは5cm深部、 $QI > 0.75$ では10cm深部で行った。これらの深さは、最近の線量測定プロトコルで示された勧告に従うものである。この方法の整合性については、 ^{60}Co から25MVまでの光子ビームエネルギーでブロックした一連の照射野の S_{cp} の計算値と測定値を比較することで確認した。その最大偏差は2%であった。この方法は、標的容積に特定の線量を投与するためのモニタ単位の値を計算する手順に簡単に組み込むことができる。

はじめに

全散乱補正係数 S_{cp} をコリメータ散乱に関係する部分 S_c とファントム散乱に関係する部分 S_p に分離することが、Holt等[8]によって示された。彼等の提案は別の著者により拡張された[11、13、

18、23、27]。 S_{cp} 、 S_c 、 S_p は線源軸間距離（source axis distance、SAD）にある基準深 d_{ref} で、通常 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の標準照射野サイズにおける値で規格化された、次式で示す相対的係数である。

$$S_{cp}(v_c, v_p, d_{ref}) = S_c(v_c, v_p, d_{ref}) \cdot S_p(v_c, v_p, d_{ref}) \quad (1)$$

パラメータ v_c と v_p は、それぞれコリメータ及びファントム表面で定義される照射サイズである。Holt等[8]は d_{ref} としてピーク線量深 d_{peak} を用いている。Bowley等[1]が定義した出力係数は、実質的には d_{peak} で測定した全散乱補正係数と同じである。Khan等[11]は d_{peak} で S_{cp} を測定するときの周辺条件をなくした。彼等の原理をこの論文でも使う。

S_c はファントム表面におけるモニタ単位当たりのコリメータ開度の関数である光子フルエンスの変化を反映している。したがって、 S_c にはモニタへの後方散乱[14、15]と加速器ヘッド内の照射される部分からの二次光子の影響が含まれる。 S_p は照射されたファントム材からの散乱による線量の寄与を考慮している。今までの S_c の測定はビルドアップキャップを装着した電離箱を用い空中で行われた[8、11、13、18、23、27]。潤定点で混入電子の飛程以上で測定するために十分な実効深を達成し、電線平衡を確保し、かつ小照射野を測定するために、アルミニウム、飼およびPTFEで作られたビルドアップキャップが使われてきた[2、3、7、12、16、20-22、24-26]。

^{60}Co と4MVのビームの場合、Khan等[11]はPMMAとアルミニウムのビルドアップキャップの測定結果がうまく合致することを見た。15MVまでのエネルギーに対してSpicka等[27]はPTFE製のビルドアップキャップで S_c を測定した。これ以上のエネルギーに関しては情報が無い。そこで、15MV以上のエネルギー領域まで S_c の測定を広げる必要がある。

我々の研究では、細いビーム軸と同軸の直径4 cmの円筒形のポリスチレンファントムによる S_c の測定について調べた。線質指標がそれぞれ ≤ 0.75 と > 0.75 のビームに対して、ピーク線量深[19]とは異なる5 cmと10 cmの基準深が提案されている。この方法には次のような利点がある。

- (1) 最近の線量測定プロトコルの勧告に従っている[6、19]。
- (2) 混入電子の影響を無視できる。
- (3) 臨床上意味のある深さでの測定情報が提供できる。
- (4) 照射野サイズによってピーク線量深が変動する問題が避けられる。
- (5) 水等価な材料からなる細いファントムを使うことで、これまで述べられてきた（例えば、Ref. 27）高原子番号のビルドアップキャップを用いることに付随する問題が避けられる。更に、細い円筒形という形状であるので、小照射野サイズにも応用できる。

この方法の整合性については、ブロックした照射野における S_{cp} の測定値と計算値を比較することで確認した[27]。

方法と器材

この論文で採用した方法は S_{cp} と S_c の測定値と等式(1)による S_p の計算にもとづいている。SADにおける照射野の S_{cp} 中のコリメータ成分 $S_c(v_c, d_{meas})$ は、ビーム軸を一致させた細い円筒形ポリスチ

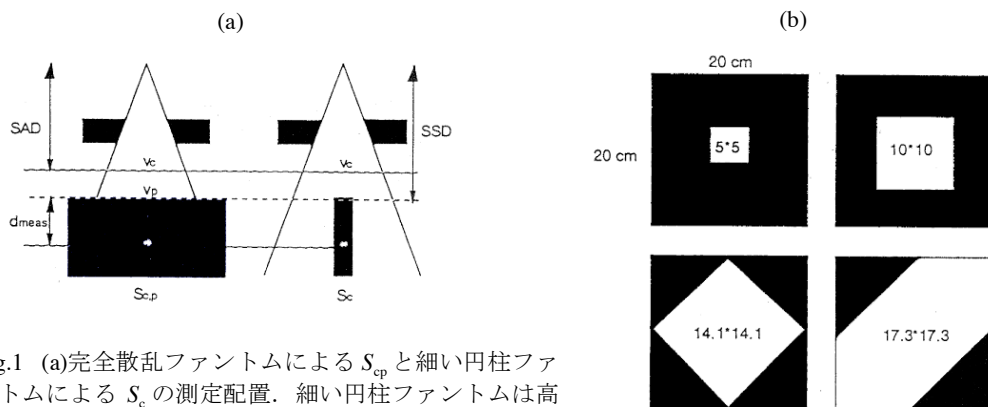


Fig.1 (a)完全散乱ファントムによる S_{cp} と細い円柱ファントムによる S_c の測定配置. 細い円柱ファントムは高さ 25 cm、直径 4 cm のポリスチレン製である. 電離箱は 5, 10, 15cm および 20cm の深さに配置される. (b) 遮蔽された照射野の位置関係. ファントム表面におけるオープン照射野サイズは $v_c=20 \times 20 \text{ cm}^2$ である. トレイ上のブロックにより照射野サイズは, $v_p=5^2, 10^2, 14.1^2$ および 17.3^2 cm^2 に縮小される.

レンファントムを用いて求める[5] (Fig.1a)。電離箱は混入電子の飛程を超えた深部 d_{meas} に配置する。線質指標(QI)が $QI \leq 0.75$ のビームでは $d_{\text{meas}}=5 \text{ cm}$ 、 $QI > 0.75$ のビームでは $d_{\text{meas}}=10 \text{ cm}$ を大半の場合に用いた。細い円筒形ファントムの直径 4 cm は、大半の光子ビームにおいて側方電子平衡を確保するものとして選んだ。しかし、25MV の光子ビームの場合、これは完全ではないが、ファントム中の電離箱に対する側方ファントム散乱線の寄与は、照射野サイズがファントム直径を超える限り照射野サイズにはほとんど独立であるので、重要とは考えられない。ビルドアップキャップの比較として、 ^{60}Co と 4MV のビームで沸定を行った。

加速器ヘッドからの二次放射線は、ファントム側壁に斜めにぶつかる。線量計の読み値に対するその影響は、照射野サイズと SSD に依存する。そこで、SSD と d_{meas} に対して S_c を測定し、その影響を調べた。 $S_{cp}(v_c, v_p, d_{\text{meas}})$ については、これまでと同様に完全な散乱のあるファントムで調定する。次に、ファントム散乱成分 $S_p(v_c, v_p, d_{\text{meas}})$ を等式(1)によって求める。

測定は幾つかの直線加速器からの何種類かの光子ビームで、 0.2 cm^3 もしくは 0.6 cm^3 の Farmer タイプ の電離箱を Keithley と Ionex の電位計を用いて行った (Table I)。測定値

Table I. この研究に用いた光子ビームの公称加速器エネルギー E と線質指標(QI)^a.

Number	Manufacturer ^b	Type	E (MV)	QI
1	AECL	Theratron	^{60}Co	
2	Philips		^{60}Co	
3	Philips		^{60}Co	
4	Varian	Clinac-4	4	0.616
5	ABB	Dynaray-4	4	0.614
6	Philips	SL75-10	6	0.650
7	Varian	Clinac-6	6	0.650
8	Philips	SL75-20	8	0.714
9	Philips	SL75-14	8	0.714
10	Philips	SL75-20	16	0.763
11	CGR	Saturne	18	0.758
12	CGR	Saturne	23	0.783
13	CGR	Sagittaire	25	0.783

a : $QI=I_{20}/I_{10}$. I_{20} と I_{10} は SDD 一定、照射野サイズ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の深さ 20cm と 10cm の水中で検出器中心における電離量[6,19]

b : AECL カナダ, CGR フランス, ABB スイス, Varian 米国, Philips オランダ.

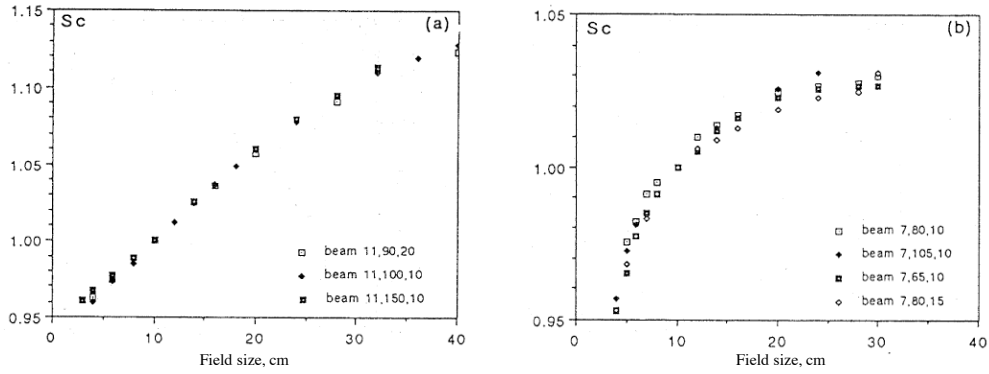


Fig.2 照射野サイズ $v_c=10 \times 10 \text{ cm}^2$ で規格化した細い円柱ファントムでの S_c を以下の二つの条件で測定.
(a): 18MV (Table I のビーム 11) の SSD 90、100 及び 150cm で深さ d_{meas} が 20、10 及び 10cm の組合せ (b):
4MV (Table I のビーム 7) の SSD 65、80 及び 105cm で深さ d_{meas} が 10 及び 15cm の組合せ.

にはステム効果を補正した。等式(1)の有効性を検証するために、次のような実験を行った。 $v_c=20 \times 20 \text{ cm}^2$ のオープン照射野を、 $v_p=5 \times 5 \text{ cm}^2$ 、 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、 $14.1 \times 14.1 \text{ cm}^2$ および $17.3 \times 17.3 \text{ cm}^2$ に等価な照射野サイズとなるファントム表面での照射野サイズとなるようにブロックした (Fig.1b 参照)。これらの照射野における S_{cp} 値を等式(1)により計算し、測定値と比較した。

結果と検討

◇ 細い円筒形ファントムによる S_c の測定値に対する SSD と d_{meas} の影響

細い円筒形ファントムによる S_c の測定値に対する SSD と d_{meas} の影響を、18MV ビーム (Table I, No.11) で調べた。SSD=100 cm で $d_{\text{meas}}=10 \text{ cm}$ 、SSD=90 cm で $d_{\text{meas}}=20 \text{ cm}$ 、SSD=150 cm で $d_{\text{meas}}=10 \text{ cm}$ で得た結果を、SAD において照射野サイズの関数で表わす (Fig.2a)。同様の実験を Clinac-4 直線加速器 (Table I, No.4) の 4MV で SSD=65、80、105 cm、ファントム深部 10 cm と 15 cm で行った (Fig.2b)。

これらの実験より、次のことが結論される。

- (1) S_c は SSD にはほとんど独立である。
- (2) d_{meas} が混入電子の飛程以上であれば、 S_c は d_{meas} には依存しない。
- (3) S_c は v_c のみの関数であり、したがって $S_c(v_c, v_p, d_{\text{meas}})$ は $S_c(v_c)$ と書ける。
- (4) S_c はファントムの側壁への斜め入射には影響されない。

等式(1)は次のように書くことができる。

$$S_p(v_c, v_p, d_{\text{meas}}) = \frac{S_{\text{cp}}(v_c, v_p, d_{\text{meas}})}{S_c(v_c)} \quad (2)$$

◇ 幾つかの光子ビームの S_{cp} 、 S_c 、 S_p の決定

^{60}Co から25MVまでのエネルギーの幾つかの光子ビームにおいて、完全散乱ファントムで S_{cp} を測定した(Fig.3a、4a、5a、6a、7a)。 S_c は細い円筒形ファントムで測定した(Fig.3b、3b、4b、5b、6b、7b)。CGR加速器のビームの S_{cp} と S_c の曲線は他の装置に比して変化が大きい。これはKaseとSvensson[10]及びLuxtonとAstrahan[17]によっても観測された。

比較のために、 S_c については二つの ^{60}Co ビーム(No.1と2)と4MVビーム(No.4)で、水等価ビルドアップキャップを装着して空中でも測定した。細い円筒形ファントムとビルドアップキャップによる測定値は、約0.5%の実験誤差以内で同じ結果となった。

S_p を S_{cp} と S_c の徐算から導き、それをFig.3c、4c、5c、6c、7cに示す。Fig.3-6は、装置は異なるが、公称エネルギーが同じビームで、異なる S_{cp} 値となる。この違いは S_p 曲線が一致しているの、コリメータの影響であることは明らかである。Fig.7より、他の加速器と比較したときのCGR加速器の S_{cp} 曲線の強い傾きは、モニタへの後方散乱[18]を含んだコリメータの影響[10、11]によるものであると結論される。任意の深さの線量の計算

については、推奨の項を参照されたい。

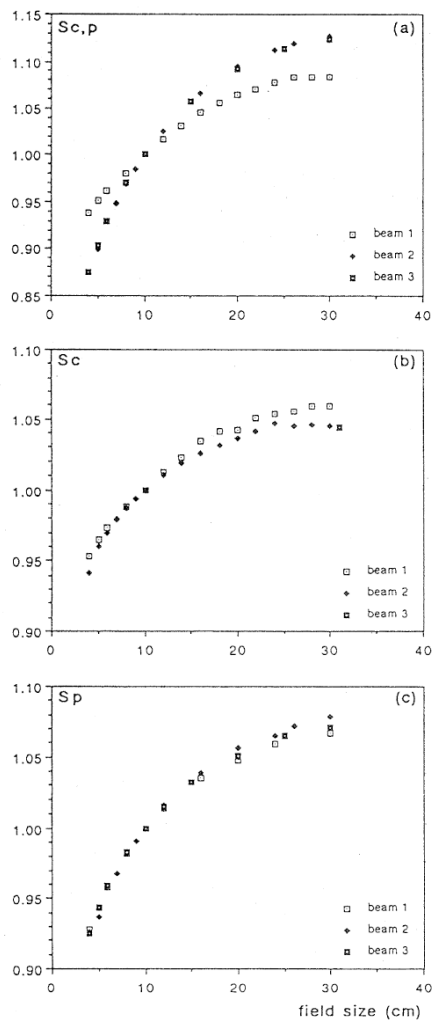


Fig.3 ^{60}Co ビーム(Table I のビーム 1-3)の S_{cp} , S_c 及び S_p . 深さは $d_{\text{meas}}=5\text{cm}$.

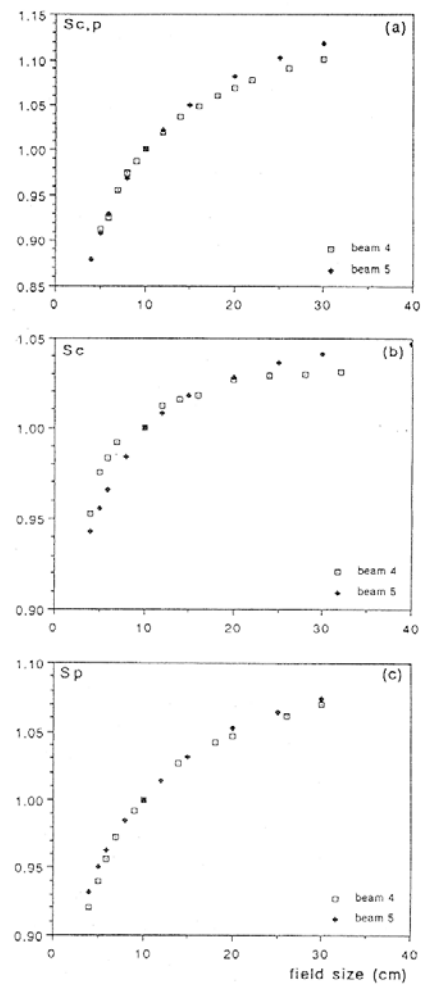


Fig.4 4MV(Table I のビーム 4 と 5)の S_{cp} , S_c 及び S_p . 深さは $d_{\text{meas}}=5\text{cm}$.

Fig.5 6MV(Table I のビーム 6 と 7) S_{cp} , S_c 及び S_p . 深さは $d_{meas}=5\text{cm}$.

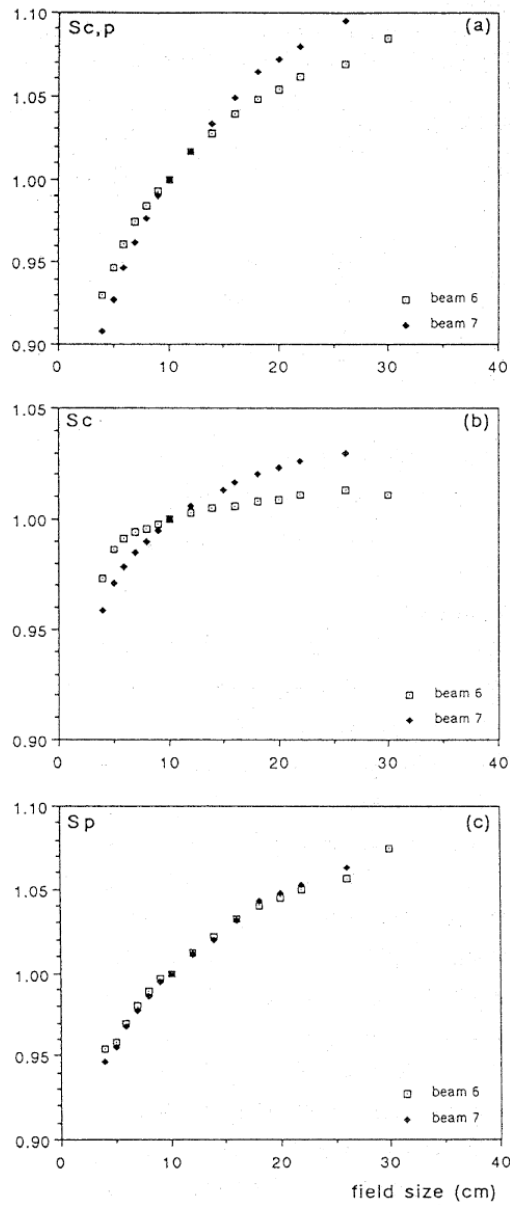
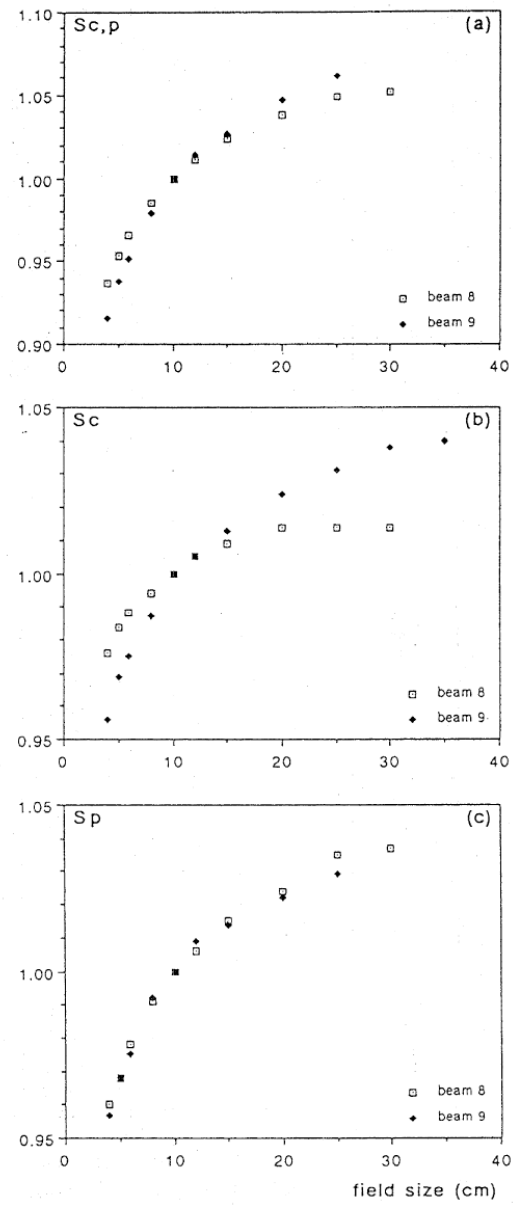


Fig.6 8MV(Table I のビーム 8 と 9) S_{cp} , S_c 及び S_p . 深さは $d_{meas}=5\text{cm}$.



◇ブロックされた照射野の S_{cp}

Table IIに示すビームにおけるブロックされた照射野の S_{cp} の測定値と計算値の比較では、良好な一致が得られた。 $S_{cp,calc}/S_{cp,meas}$ の値は全体で $0.995 \pm 0.007(1SD)$ となった。観測された最大偏差は、 ^{60}Co の一つの装置で2.0%であった。

大半の場合で基準SSDを用いた。他のSSD値におけるこの方法の有効性を確認するために、No.7のビーム(Table I)においてSSD 80 cmと120 cmで計算と測定を行った。計算では、SSD 100 cmで測定した S_c と S_p の値を用いた。ここでも、1.3%以内の良好な一致がみられ、調べたSSDの範囲内

Table II. 18MV Saturne 光子ビームの部分遮蔽された照射野と等価なコリメータで規定される照射野の S_{cp} の測定値と計算値の比較. 照射野形状は Fig.1 参照.

部分遮蔽照射野の v_p (cm ²) ただし、 v_c =20×20cm ²	S_{cp}		
測定値	式(1)からの 計算値	等価コリメータ照射野 ($v_c=v_p$) で の測定値	
5×5	0.992	0.997	0.914
10×10	1.070	1.060	1.000
14.1×14.1	1.098	1.087	1.051
17.3×17.3	1.104	1.102	1.092

で $S_p(v_c, v_p, d_{\text{meas}})$ の SSD への独立性が予想されたように確認できた。したがって、 $S_p(v_c, v_p, d_{\text{meas}})$ は $S_p(v_p, d_{\text{meas}})$ と書くことができる。

S_{cp} が等式(1)によって正しく分離されないとする、また S_c と S_p の両方に一つの照射野サイズだけで考えたときの誤差の例として、Saturn 18MV ビームの結果を、等式(1)から導いた S_{cp} の値と共に Table II に示す。この表から分かるように、ブロックが増えるほど差が大きくなる。

結論

照射野サイズに依存した全散乱補正係数 S_{cp} を、コリメータの設定値に依存する成分 S_c とファントム散乱成分 S_p に分離することは、散乱補正係数の計算において妥当な方法である。この方法は特に、ファントム表面におけるコリメータ設定と照射野サイズが異なる場合(例えば、標準外の SSD、ブロックした照射野、組織欠損)に有用である。ビーム軸と同軸の細い円筒形ファントムによる S_c の測定の信頼性は、⁶⁰Co から 25MV のエネルギーの光子ビームで、幾つかのブロックされた照射野における S_{cp} の測定値と計算値の一致によって示された。 S_c と S_p は共に SSD に独立である。 S_c はコリメータ設定値のみの、また S_p はファントム表面における照射野サイズのみの関数である。 S_c は混入電子の飛程以上の深さであれば、深さに独立である。

CGR 加速器における照射野サイズによる S_{cp} の顕著な増加は、主にコリメータの影響によるものである。コリメータの影響は、また公称エネルギーは同じであるが、種々の加速器のビームの S_{cp} の相違として反映される。我々は、線質指標(QI)が $QI \leq 0.75$ と $QI > 0.75$ のそれぞれのビームに対して、5 cm と 10 cm で測定した散乱補正係数を適用することを勧める。これらの深さは、最近公表された線量測定プロトコルと一致する。

推奨

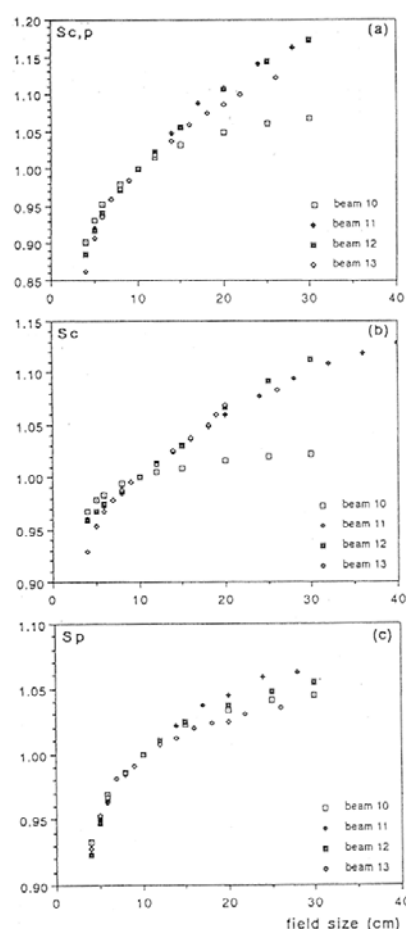


Fig.7 16MV (Table I のビーム 10-13) S_{cp} , S_c 及び S_p . 深さは $d_{\text{meas}}=5\text{cm}$.

この論文では、基準深におけるメガボルト光子ビームの出力のファントム散乱成分とコリメータ散乱成分を求める手順を示している。モニタ単位 N_{mu} の計算において、基準深の線量をピーク吸収線量および標的容積内の特定の点の線量と関連づける必要がある。基準深 d_{ref} における S_c と S_p を使った中心軸上の任意の深部 d における吸収線量 D の計算は、次式を用いて行うことができる。

$$D(v_c, v_p, d) = D(v_c = 10^2, v_p = 10^2, d_{\text{ref}}) \cdot S_{\text{cp}}(v_c, v_p, d_{\text{ref}}) \frac{PDD(v_p, d)}{PDD(v_p, d_{\text{ref}})} \quad (\text{A-1})$$

ここで、

$$S_{\text{cp}}(v_c, v_p, d_{\text{ref}}) = S_c(v_c) \cdot S_p(v_p, d_{\text{ref}}) \quad (\text{A-2})$$

である。實際上、ブロックされた照射野の深部量百分率曲線は、一次のオーダの近似で等価オープン照射野のそれと同じであると仮定できる。したがって、PDD値は v_p にのみ依存する。そこで、すでにある深部量データを使うことができる。しかし、等式(A-1)は正確には、混入電子の飛程よりも深い d で有効である。線量へのこれらの電子の寄与による変更を加えるには、混入電子の飛程よりも浅い d で、対象としている照射野におけるPDDを測定する必要がある。

公称SSDで、照射野サイズ (v_c, v_p) の深部 d において、ある標的吸収線量 $D(v_c, v_p, d)$ を投与するためのモニタ単位数 N_{mu} は、次のように与えられる。

$$N_{\text{mu}} = 100D(v_c, v_p, d) \frac{PDD(v_p, d_{\text{ref}})}{S_c(v_c) \cdot S_p(v_p, d_{\text{ref}}) \cdot PDD(v_p, d) \cdot PDD(10^2, d)} \quad (\text{A-3})$$

ここで、100モニタ単位は基準照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ の d_{peak} で1Gyを与える。等式(A-3)をピーク線量で S_p を定義したときの式と比較すると、例えばKhan等[11]が応用したように、ここでは S_p/d_{ref} で定義されているので、そのことより $PDD(v_p, d_{\text{ref}})/PDD(10^2, d_{\text{ref}})$ が含まれることになる。現在使われているモニタ単位の計算の手順にこのような比較的簡単な変更を加えることで、メガボルトビームの出力をコリメータとファントムによる散乱成分に分けた新たな手慣を導入することが楽になるだろう。

参考文献

- (1) 1Bew, D. E., Bradshaw, A. L., Greene, D., Haybittle, J. L. and Secretan, L. F. Central axis depth dose data for use in radiotherapy, Br. J. Radiol. Suppl. No. 17, 1983.
- (2) Biggs, P. J. and Ling, C. C. Electrons as the cause of the observed d_{max} shift with field size in higher energy photon beams, Med. Phys. 6, 291-295, 1979.
- (3) Biggs, P. J. and Russell, M. D. An investigation into the presence of secondary electrons in megavoltage photon beams, Phys. Med. Biol. 28, 1033-1043, 1983.
- (4) W. and Bielajew, A. F. The dependence of mass energy absorption coefficient ratios on beam size and depth in a phantom, Med. Phys. 13, 496-502, 1986.

- (5) Drouard, J. Rosenwald, J. C. and Simonian, M. Generation of primary and scatter tables for computer computations in high energy photon beams. Abstract 5th ESTRO meeting, Baden Baden, 1986.
- (6) Dnutreix, A. The French dosimetry protocol. *Radiother. Oncol.* 4, 301-304, 1985.
- (7) Evans, D. E. X-ray and γ -ray interactions. In: *Radiation Dosimetry*, Vol. pp93-155, Editor: F. E. Attix and W. C. Roesch, Academic Press, New York, 1968.
- (8) Holt, J. G. Laughlin, J. S. and Morony, J. P. The extension of the concept of tissue-air-ratios (TAR) to high x-ray beams. *Radiology* 96, 437-446, 1970.
- (9) Huang, P. Chu, J. and Bjärngard, B. E. The effect of collimator backscatter radiation on photon output of linear accelerators, *Med. Phys.* 14, 268-269, 1987.
- (10) Kase, E. R. and Svensson, G. K. Head scatter data for several linear accelerators (4-18 MV), *Med. Phys.* 13, 530-532, 1986.
- (11) Khan, F. M. Sewchand, W. Lee, J. and Williamson J. E. 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.
- (12) Krithivas, G. and Rao, S. N. A study of characteristics of radiation contaminants within a clinically useful photon beam, *Med. Phys.* 12, 764-768, 1985.
- (13) Krithivas, G. and Rao, S. N. Dosimetry of 24 MV x-rays from accelerator, *Med. Phys.* 14, 274-281, 1987.
- (14) Kubo. H. Telescopic measurements of backscatter radiation from secondary collimator jaws to a beam monitor chamber using a pair of slits. *Med. Phys.* 16, 295-298, 1989.
- (15) Kubo. H. and Lo, E. E. Measurement of backscattered radiation from Therac-20 collimator and trimmer jaws into the beam monitor chamber, *Med. Phys.* 16, 292-294, 1989.
- (16) Ling C. C. Shell M. C. and Rustgi S. N. Magnetic analysis of the radiation componets of a 10 MV photon beam, *Med. Phys.* 9, 20-26, 1982.
- (17) Luxton G. and Astrahan M. A. Characteristics of the high-energy photon beam of a 25 MV accelerator, *Med. Phys.* 15, 82-87, 1988.
- (18) Luxton G. and Astrahan M. A. Output factor constituents of a high-energy photon beam, *Med. Phys.* 15, 88-91, 1988.
- (19) Mijnheer B. J. Aalbers A. H. Visser A. G. and Wittkamper F. H. Consistency and simplicity in the determination of absorbed dose to water in high-energy photon beams: a new code of practice, *Radiother. Oncol.* 7, 371-384, 1986.
- (20) Nilsson B. and Brahme A. Absorbed dose from secondary electrons in high energy photon beams, *Phys. Med. Biol.* 24, 901-902, 1979.

- (21) Nilsson B. Electron contamination from different materials in high energy photon beams, *Phys. Med. Biol.* 30, 139-151, 1985.
- (22) Nilsson B. and Brahme A. Electron contamination from photon beam collimators, *Radiat. Oncol.* 5, 235-244, 1986.
- (23) Patterson M. S. and Shragge P. C. Characteristics of an 18 MV photon beam from Therac-20 medical linear accelerator. *Med. Phys.* 8, 312-318, 1981.
- (24) Petti P. L. and Goodman M. S. Investigation of build-up dose from electron contamination of clinical photon beams, *Med. Phys.* 8, 312-318, 1981.
- (25) Petti P. L., Goodman M. S. and Sisterton J. M. Sources of contamination for the Clinac-35 25 MV photon beam, *Med. Phys.* 10, 856-861, 1983.
- (26) Schrader R. and Maschuw R. Reduktion der Oberflächen-dosis von Co-60 Strahlen in der geweбетiefe von 0 bis 3 mm mit einem magnetischen Feld, *Strahlentherapie* 156, 257-263, 1980.
- (27) Spicka J., Herron D. and Orton C. Separating output factor in collimator and photon scatter factor for megavoltage photon calculations, *Med. Dos.* 13, 23-24, 1988.