

小照射野電子線の線量測定

池崎 廣海^{*1}, 池田 郁夫^{*1}, 名古 安伸^{*1}, 楠田 順子^{*2}, 高山 誠^{*2}

DOSIMETRY OF SMALL ELECTRON BEAMS

Hiromi IKEZAKI^{*1}, Ikuo IKEDA^{*1}, Yasunobu NAKO^{*1},
Junko KUSUDA^{*2}, Makoto TAKAYAMA^{*2}

(Received 17 March 1999 accepted 8 June 1999)

Abstract: Using dose measurements of electron beams in ionization chambers for small fields, the average energy of electron beams determined with large fields was examined to ascertain the smallest size of field to which applicability could be achieved. Simple and accurate methods of dose measurements of electron beams generally applicable for very small fields were also examined. In large fields, PDDs measured with ionization chambers agreed well (within 2%) with PDDs measured using either film methods and semiconductor detectors. As such, the energy dependency of electron beams in film and semiconductor detectors was considered to be disregardable. The PDD of irradiated fields less than 4 cm in diameter achieved with small electron cones were measurable with either film methods or semiconductor detectors.

We introduced the concept of "output factor" (OPF), which is analogous to field factor (FA), to the dose measurements of electron beams. We found that measurements of the OPF of electron beams (6-18 MeV) in JARP ionization chambers in irradiated fields of greater than 6 cm in diameter, with semiconductor detectors in irradiated fields from 3 cm in diameter to 5 cm in diameter, and using film methods in very small irradiated fields of approximately 2 cm in diameter are both convenient and very accurate.

Key words: Small electron beams, Dosimetry

はじめに

高エネルギーX線および電子線の吸収線量測定法は日本医学放射線学会物理部会（JARP, 現, 日本医学放射線物理学会）による「放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法」¹⁾（以下標準測定法）を基準に行われてきている。

小照射野の電子線測定法は標準測定法では明確に示されていないのが現状である。American association of physicists in medicine (AAPM). Task Group 21では d_{50} （電離量半価深）は d_{50} の深さが増加しない照射野より広い照射野で決定され、この

ように決定された平均入射エネルギーは決定された d_{50} に使用された照射野より小さい照射野に適用できるとしている²⁾。更にICRU Report 35³⁾, AAPM Task Group 25⁴⁾では新しい小照射野電子線測定のプロトコル「Square-root method」等が示された。

小照射野電子線の線量測定において、電離箱を使用した場合、大きな照射野で決定された平均エネルギーはどの程度小さな照射野まで適用可能か、また非常に小さな照射野についてはどのような測定方法を用いれば簡便で精度の高い線量測定が行えるか検討した。

^{*1} 杏林大学医学部付属病院放射線科（〒181-8611 東京都三鷹市新川6-20-2）
Department of Radiological Technology, Kyorin University Hospital (6-20-2, Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo, 181-8611 JAPAN)

^{*2} 杏林大学医学部放射線医学教室
Department of Radiology, Kyorin University School of Medicine.

装置および方法

使用した検出器, 濃度計, フィルム, ファントム, 直線加速器, および電子線コーンを以下に示す.

線量計; AE-132a (応用技研製),

電離箱; C-110 (指頭形, 容量: 0.6 ml, 内径: 6 mm, 長さ: 20 mm, 壁厚: 0.059 g/cm²),
C-134A (シャロー形, 容量: 0.046 ml, 電極間隔: 2 mm, 集電極: 5.4 mm ϕ , ガード電極: 14 mm ϕ)

線量計; DPD-510 (Scanditronix),

半導体検出器; EDD-2 (p-Si半導体検出器, 検出器直径: 1.5 mm, 壁厚: 0.405 g/cm²)

濃度計; KONICA PDM-5 (アパーチャー・サイズ: 100 $\times$ 100 μ m²)

フィルム; EM-1, MR-1, XV2 (Kodak)

ファントム; MixDP (40 $\times$ 30 cm²)

直線加速器; Siemens Mevatron 77DX67, (電子線エネルギー; 6, 12, 18 MeV, 電子線コーン; 20 $\times$ 20, 15 $\times$ 15, 10 $\times$ 10 cm², 5 cm ϕ ; 8, 7, 6 cm ϕ (ステンレス製), 5, 4, 3, 2 cm ϕ (アクリル製))

1. 照射野中心軸上の線量に影響を及ぼす

電子線コーンの大きさ

照射野の大きさによって電子線コーンからの散乱電子が中心軸上の線量に影響を与えるかどうかを見るために同一照射野間で仮想線源と電離箱間距離 (SCD) を一定にし, 距離逆自乗則によって変換したPDD (以下SCD法によるPDD) と仮想線源と表面間距離 (SSD) を一定にした通常の測定方法によるPDD (以下SSD法によるPDD) の比較を行った.

SCD一定により行った測定値は次の順序でPDDに変換した.

$$\textcircled{1} M'_d = M_d \times \text{Pion} \quad \cdots(1)$$

$$\textcircled{2} M''_d = M'_d \times (SCD / (SSD' + d))^2 \quad \cdots(2)$$

③ M''_d から読み値の百分率を求める

④ 以下標準測定法の手順に従う

ここで M_d は各深部の電離箱の読み値, M'_d は M_d についてイオン再結合補正を行った値であり, そ

して M''_d は M'_d について距離逆自乗補正を行った値である. *Pion* はイオン再結合補正係数であり, SSD' は仮想線源と電子線コーン先端 (アイソセンター) 間距離である.

使用した電子線コーンは6 MeVの場合は15 $\times$ 15 cm², 5 cm ϕ (固定照射野用), 5, 4, 3, 2 cm ϕ , 12 MeVの場合は20 $\times$ 20 cm², 3, 2 cm ϕ , 18 MeVの場合は20 $\times$ 20 cm², 3, 2 cm ϕ である. 電離箱は6 MeVの場合はC-143A, 12 MeVおよび18 MeVの場合はC-143A, C-110を使用した.

2. フィルムおよび半導体検出器の電子線に対するエネルギー依存性

大きな照射野の水中におけるPDD測定はJARP形線量計を用いることにより確立している¹⁾. フィルムおよび半導体検出器のエネルギー依存性は電子線の平均入射エネルギーが水中で減衰し¹⁾⁴⁾, その平均エネルギーが判明していることから, 電離箱で作成されたPDDと比較することにより判定できる.

6 MeV電子線の場合は20 $\times$ 20 cm²の電子線コーンを用いC-143A, EDD-2, EM-1にて測定し, 12 MeV電子線の場合は15 $\times$ 15 cm²の電子線コーンを用いC-143A, C-110, EDD-2, XV2にて測定した.

1) フィルムでのPDD測定

フィルム法によるPDDはフィルムに一定の黒化度 (以下 *Dfix*) を与えるモニター指示値 (Monitor Unit: 以下 *MU*) を求め, 基準深に *Dfix* を与える *MU* を各深さに *Dfix* を与える *MU* で除することにより求める⁵⁾. フィルム法により行ったPDD測定の場合, *MU* は1~5 *MU* と非常に少ない線量であることから, *MU* 当たりの線量が一定しない. しかしPDD測定の場合, コリメータ下部の照射野内に取り付けた線量計の読み値 (Pilot Dose: 以下 *PD*) はコリメータ散乱が一定であることから *MU* の代りに用いることができる.

標準測定法では表面の照射野が A_0 のとき, ビーム軸上の深さ d 点における深部量百分率PDD (d, A_0) は (3) 式で定義される¹⁾.

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot D(d, A_0) / Dr(A_0) \quad \cdots(3)$$

$D(d, A_0)$ は表面の照射野が A_0 のときの深さ d 点の吸収線量であり, $Dr(A_0)$ は表面の照射野が A_0

のときの基準点吸収線量である。

基準深で D_{fix} を作る $D_r(A_0)$ は PD に対応している。求める深さの D_{fix} は PD を h 倍して得られるものとする。次式となる。

$PDD(d, A_0) = 100 \cdot D(d, A_0) / (h \cdot D_r(A_0)) \cdots (4)$
フィルムの黒化度について深さ依存性は無視できると仮定し、 $D(d, A_0)$ に $D_r(A_0)$ を代入する。

$$PDD(d, A_0) = 100 / h \cdots (5)$$

すなわち、フィルム法による PDD は h の逆数の100倍したものとする。

2) 半導体検出器による PDD 測定

半導体検出器による PDD 測定は $D_r(A_0)$ および $D(d, A_0)$ 共に線量計の読み値を用いた。

3) 電離箱による PDD 測定

電離箱による PDD 測定は標準測定法に準じて行った。

3. 電子線の出力係数測定

標準測定法においては電子線には照射野係数という用語は規定されていない。そこでAAPM Task Group 25⁴⁾に示されているOutput factor (OPF)を「出力係数」とした。電子線の場合は $10 \times 10 \text{ cm}^2 \sim 15 \times 15 \text{ cm}^2$ 以上の照射野を基準の照射野として用いるのが通常であるため、X線で定義されている $F_A(A) = D_r(A) / D_r(A = 10 \times 10)$ の式のうち $A = 10 \times 10$ を $A = 15 \times 15$ に変更して電子線の出力係数の式とする ((6) 式)。

$$F_A(A) = D_r(A) / D_r(A = 15 \times 15) \cdots (6)$$

$D_r(A)$ は電子線コーン・サイズ A における基準点吸収線量である。

小照射野の電子線コーンの出力係数について、電離箱の場合は(6)式により求め、半導体およびフィルムの場合は(7)式により求めた $8 \text{ cm } \phi$ の電子線コーンを基準の照射野とした出力係数($F_{As}(A)$)に $F_A(8)$ を乗じて求める ((8) 式)。

$$F_{As}(A) = D_r(A) / D_r(A = 8) \cdots (7)$$

$$F_A(A) = F_A(8) \cdot F_{As}(A) \cdots (8)$$

6, 12, 18 MeVの出力係数ではC-134A, EDD-2およびMR-1を用い、12, 18 MeVについてはC-110を追加して測定した。

1) フィルムによる出力係数測定

電子線コーン・サイズ A において一定の基準

点吸収線量を与えるために必要な PD を $PD(A_s)$ とすると次の(9), (10)式が成り立つ。

$$D_r(A) = PD(A_s) \cdot F_{As}(A) \cdots (9)$$

$$D_r(A = 8) = PD(A_s) \cdots (10)$$

$D_r(A)$ と $D_r(A = 8)$ は等しいことから、(9)および(10)式により(11)式が成り立つ。

$$F_{As}(A) = PD(A_s) / PD(A_s) \cdots (11)$$

フィルム法の場合、線量は MU 値を用いるのが基本である⁵⁾、今回の実験のように MU が少ない場合は MU 当たりの線量が不安定となり MU は使用できない。しかし小照射野用電子線コーンの場合、使用した直線加速器の2次コリメータの開度は $17 \times 17 \text{ cm}^2$ に設定されており、 $2 \text{ cm } \phi$ から $8 \text{ cm } \phi$ までのコーンの場合には同じアタッチメントが使用されることから各コーンの入射口に入射される一次線およびコリメータ散乱は一定であり、2次コリメータ下部と電子線コーンの入射口の間に取り付けられた線量計の読み値は電子線コーンの大きさに影響されないことから MU は PD に置き換えることができる。

4. 小照射野 $2 \text{ cm } \phi$ 電子線の線量プロフィール

小照射野用電子線コーンの場合、ビルドアップ領域の線量分布は電子線コーンによるエネルギーの低い散乱線の影響を受けることから中心軸上の線量より電子線コーン近傍の線量が高くなる⁶⁾。 $2 \text{ cm } \phi$ 電子線コーンの線量プロフィール測定は中心軸上のピーク深における線量が各種の測定器にどのように影響を及ぼすのか視覚的に観察するために行った。線量プロフィール測定はMR-1をビーム軸に垂直に置き、6, 12 MeVではMixDP中5 mm, 18 MeVでは10 mmで行った。黒化度の線量校正は $15 \times 15 \text{ cm}^2$ の電子線コーンを使用し、C-110線量計で作成した黒化度線量曲線により行った。

結 果

1. 照射野中心軸上の線量に影響を及ぼす電子線コーンの大きさ

6, 12, 18 MeV電子線では大きな照射野($15 \times 15 \text{ cm}^2$, $20 \times 20 \text{ cm}^2$)のSSD法とSCD法による PDD 曲線は各エネルギー共に良く一致した (Fig. 1a)。

Fig. 1bは6 MeV電子線の PDD 曲線である。ピー

ク深より深い場合, $2\text{ cm } \phi$ (SSD法) のPDD曲線は $15 \times 15\text{ cm}^2$ (SSD法) のPDD曲線と最も差が大きく, 電子線コーンサイズが大きくなるに従い, また同じサイズの電子線コーンでもSSD法よりSCD法の場合が差が小さくなることからわかる。

2. フィルムおよび半導体検出器の電子線に対するエネルギー依存性

大きな電子線コーンを使用した場合, ビルドアップ領域において電離箱およびフィルムによるPDD曲線は良く一致したが, 半導体の場合は両者に比較してファントム表面において6 MeV電子線で約4%高く, 12 MeV電子線で約9%高い値を示し

た (Fig. 2a, b). ビルドアップ領域よりも深い領域では電離箱とフィルムおよび半導体検出器による各々の深さでのPDDの差は6 MeV電子線においてフィルムの場合は最大で2%高く, 半導体検出器の場合は最大で1%低い. 12 MeV電子線においてもフィルムの場合は最大で1%高く, 半導体検出器の場合は最大で2%低い値を示した. 大きい照射野ではPDDは2%以内で一致した.

$2\text{ cm } \phi$ 電子線コーンを使用し6, 12, 18 MeV電子線を半導体検出器, フィルムおよび電離箱にて測定したPDD曲線では半導体検出器とフィルムによるPDD曲線は良く一致したが, 電離箱によるPDD曲線は半導体検出器とフィルムによるPDD曲線と一致しなかった (Fig. 3a, b, c).

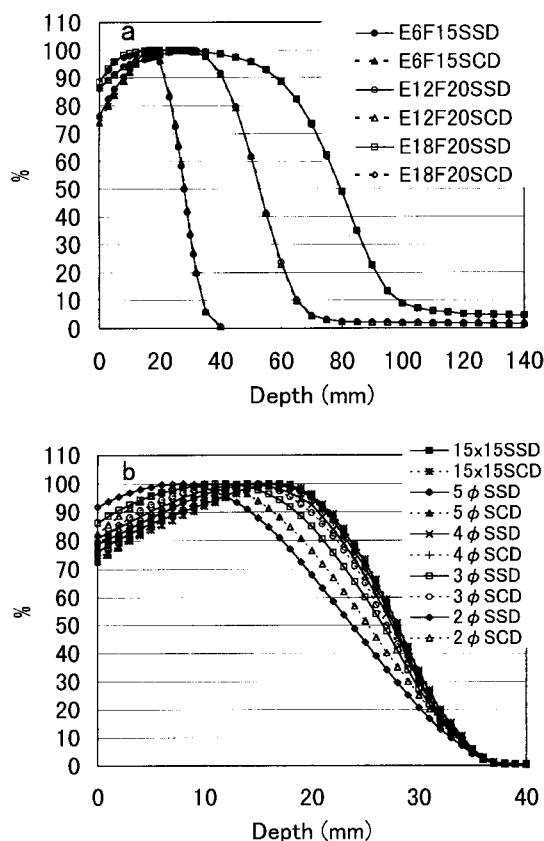


Fig. 1 Comparison of PDD of electron beams by SSD method and by SCD method.

(a) PDD of 6, 12 and 18 MeV electron beams in large fields.

(b) PDD of 6 MeV electron beams in 2, 3, 4, 5 cm ϕ and $15 \times 15\text{ cm}$ irradiated fields.

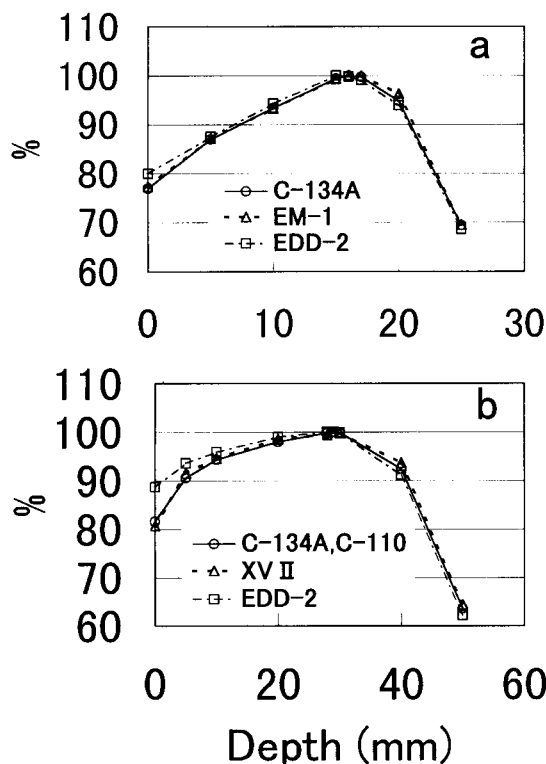


Fig. 2 Comparison of PDD measured by semiconductor detectors and film methods and PDD by ionization chambers in large fields.

(a) 6 MeV electron.

(b) 12 MeV electron.

3. 電子線の出力係数測定

各エネルギー（6, 12, 18 MeV）毎に小照射野の電子線出力係数を電離箱、半導体検出器およびフィルムにより測定し、比較した。18 MeV電子線で2および3 cm ϕ の電子線コーンを用いた場合を除いて半導体検出器よりフィルムの方が大きな値を示した（Fig. 4a, b, c）。

12, 18 MeV電子線では、C-110とC-134Aによる出力係数を比較すると3 cm ϕ 以上では3%以内で一致した。2 cm ϕ 電子線コーンの場合は12 MeV電子線では20%，18 MeV電子線では17%の相違がみられた。

C-134AとEDD-2による出力係数を比較すると、両者は2 cm ϕ から8 cm ϕ まで全ての出力係数について3%以内で一致した。6 MeV電子線ではEDD-2による出力係数は4 cm ϕ 以上でC-134Aより小さな値となったが、2 cm ϕ と3 cm ϕ でC-134Aより大き

な値となった。12 MeV電子線ではEDD-2による出力係数は3 cm ϕ 以上でC-134Aより小さな値となったが、2 cm ϕ でC-134Aより大きな値となった。18 MeV電子線では2 cm ϕ から8 cm ϕ まで全ての電子線コーンでC-134Aによる出力係数より小さな値となった。

同様にC-134AとMR-1による出力係数を比較した。6 MeV電子線で出力係数は4 cm ϕ 以上の場合3%以内で一致した。12 MeV電子線では両者による出力係数は3 cm ϕ 以上の場合3%以内で一致した。18 MeV電子線では2 cm ϕ から8 cm ϕ まで全ての電子線コーンにおいて両者による出力係数は3%以内で一致した。

4. 小照射野2 cm ϕ 電子線の線量プロフィール

Fig. 5は6, 12, 18 MeV電子線における照射野2 cm ϕ の線量プロフィールである。6 MeV電子線の場合

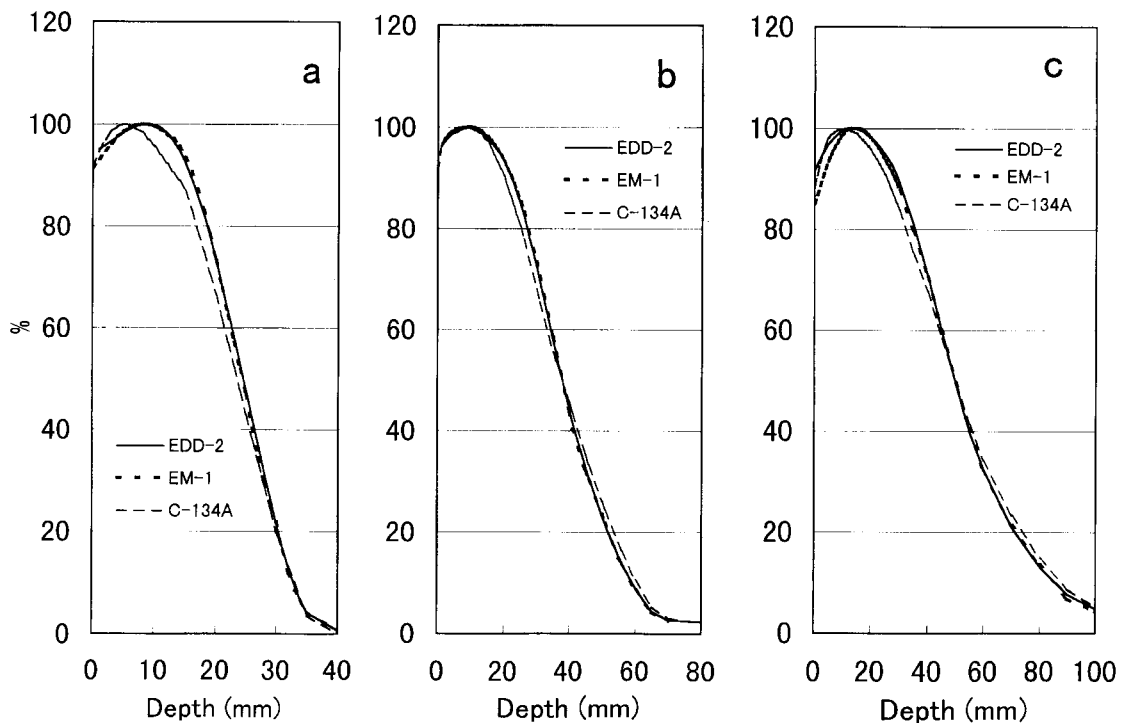


Fig. 3 Comparison of PDD measured by ionization chambers, semiconductor detectors and film methods in 2 cm ϕ irradiated field.

- (a) 6 MeV electron.
- (b) 12 MeV electron.
- (c) 18 MeV electron.

合は電子線コーン内において電子線コーン壁側の肩が落ち込み、ビーム中心軸がピークを示すならかな山になっている。18 MeV電子線の場合は

電子線コーン壁側にピークがあり、線量プロファイルは6, 12 MeV電子線よりも平坦になっている。

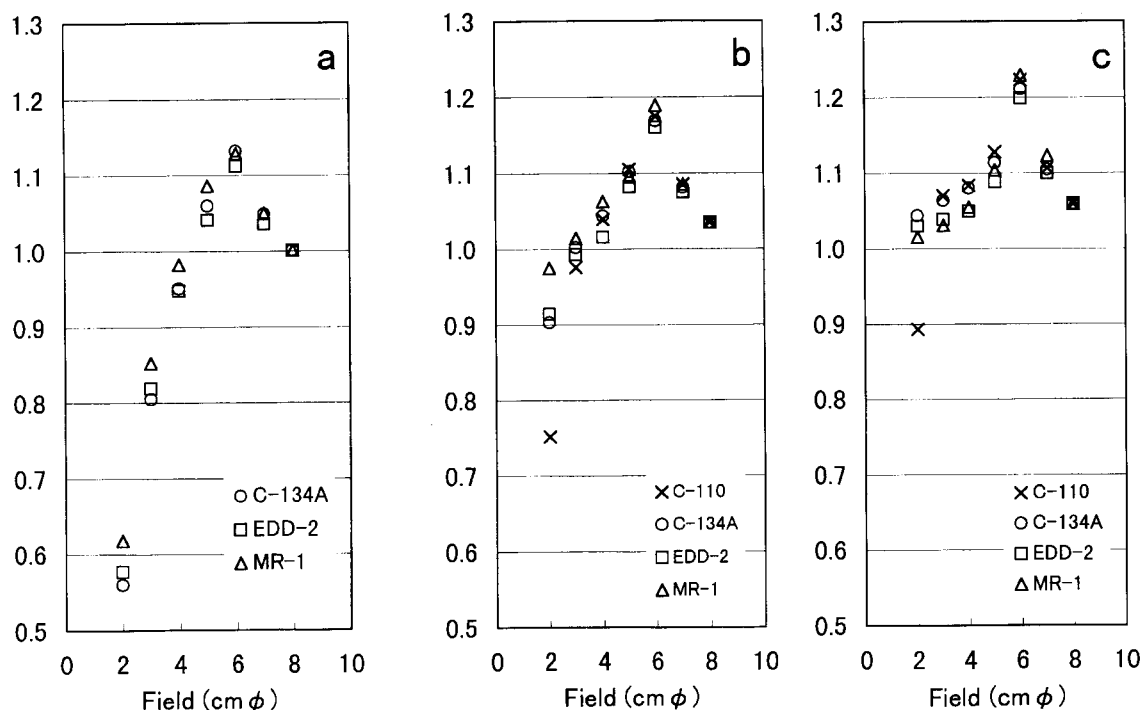


Fig. 4 “Output factor” measured by ionization chambers, semiconductor detectors and film methods in small fields.
 (a) 6 MeV electron.
 (b) 12 MeV electron.
 (c) 18 MeV electron.

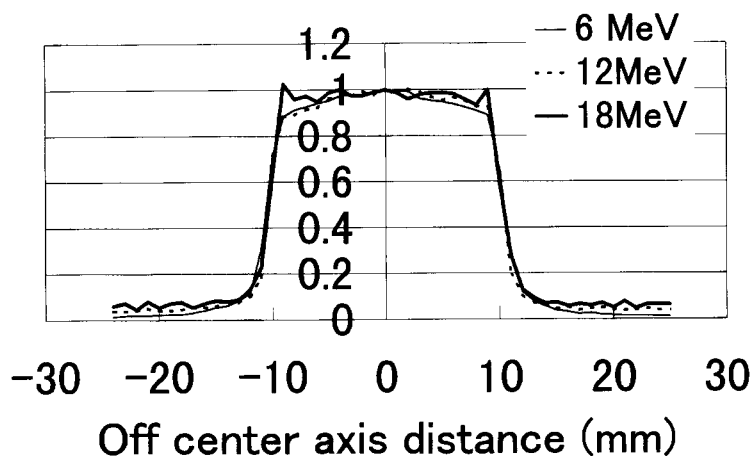


Fig. 5 Dose profiles of 6, 12 and 18 MeV electron beams in 2 cm ϕ irradiated field.

考 察

1. 照射野中心軸上の線量に影響を及ぼす

電子線コーンの大きさ

電子線のPDD測定はSSD法で行われているのが現状である。大きな電子線コーンを使用した場合にはSCD法およびSSD法によるPDDは一致した。大きな電子線コーンを使用した場合のPDD測定はSCD法でも可能であると考え、小さな電子線コーンを使用した場合にはSCD法およびSSD法によるPDDの相違は電子線コーンが小さくなるほど大きくなった。実用飛程 (R_p) より小さな照射野では電子線コーンによる散乱電子により最大線量位置は入射表面の方向に移動する。SSDが大きいほどPDDは大きくなり、SSDを距離逆自乗則で補正すると、その一次線による深部線量は一致するが、散乱線に対しては補正が困難である⁷⁾。

小照射野の場合SSD法およびSCD法によるPDDに差を生じさせる原因は検出器の照射野依存および電子線コーンからの散乱電子がビーム中心軸に影響を及ぼしていることが考えられる。4 cm ϕ 以下の小さな電子線コーンのPDD測定はSSD法およびSCD法によるPDDが一致しないことから今回使用した電離箱により直接PDDを測定する方法は不適性と考え。

2. フィルムおよび半導体検出器の電子線に対するエネルギー依存性

電離箱、フィルムおよび半導体検出器により大きな照射野で測定されたPDDを比較した場合、電離箱とフィルムおよび半導体検出器の相違は2%以内であり、フィルムは電離箱より高く、半導体検出器は電離箱より低い値を示す。フィルムおよび半導体のエネルギー依存性は3%を測定誤差内として許容する⁸⁾ならば、エネルギー依存性は無視できるのではないかと考える。

小照射野でのPDD測定法は確立されていないためAAPM⁹⁾に準じて電離箱で行われている。2 cm ϕ 電子線コーンの場合、フィルムと半導体検出器によるPDDは一致した。しかし電離箱によるPDDは両者と大きな相違がみられた。前述のSSD法およびSCD法によるPDDの比較結果から2 cm ϕ 電子

線コーンのPDD測定にはフィルムおよび半導体検出器を用いるのが良く、今回使用した電離箱により直接測定する方法は不適性と考える。

3. 電子線の出力係数測定

電子線の線量校正時、標準測定法では線量計について、6 MeV電子線ではJARP形あるいはシャロー形を、12および18 MeV電子線はJARP形を用いるように勧告している¹⁾。

12, 18 MeV電子線ではC-110およびC-134Aによる出力係数は電子線コーン3 cm ϕ 以上では3%以内で一致したが、2 cm ϕ の電子線コーンでは約20%の相違がみられた。また線量プロフィールにおいて90%線量域の幅が18 mmであったことから2 cm ϕ 電子線コーンの場合JARP形は照射野依存性により線量低下することがわかる。

6, 12, 18 MeV電子線の各のエネルギーについて6 cm ϕ 以上の出力係数が電離箱 (C-110, C-134A) とEDD-2およびMR-1において2%以内で一致することから、6 cm ϕ 以上の電子線コーン中心軸上の基準深線量は電子線コーンからの散乱線の影響を受けないことがわかる。

EDD-2による出力係数は6, 12, 18 MeV電子線ともにC-134Aより小さな値であるが、6 MeV電子線では3 cm ϕ と2 cm ϕ では大きくなる。また12, 18 MeV電子線でも、この傾向はみられた。12, 18 MeV電子線でこの傾向が数値ではっきりと現れない理由としては、18 MeV電子線の線量プロフィールは側壁の電子線散乱の影響により主ビームが平坦となり、12 MeV電子線の線量プロフィールは18 MeV電子線のように顕著ではないが、6 MeV電子線よりも平坦であることが考えられる。以上のことから3 cm ϕ 以下の電子線コーンの場合、C-134Aは電子線コーン壁からの散乱線の影響を受けると考える。

エネルギー依存性より電離箱によるPDDと比較して、EDD-2によるPDDは2%低く測定され、MR-1によるPDDは2%高く測定されることからEDD-2とMR-1によるPDDの差は4%が誤差範囲内と考えられる。EDD-2とMR-1による出力係数で4%以上の相違がみられるのは6, 12 MeV電子線での2 cm ϕ 電子線コーンである。18 MeV電子線では2 cm ϕ

の出力係数の相違は1%であり、MR-1よりEDD-2の方が高い値を示したことは、線量プロフィールからもEDD-2に電子線コーン壁からの散乱線が影響を与えているのがわかる。以上のことからEDD-2は2 cm ϕ 電子線コーンで小照射野の特性を示していることがわかる。

6 MeVから18 MeVの電子線エネルギーについて小照射野の出力係数を求める場合、6 cm ϕ 以上はJARP形線量計で、3 cm ϕ から5 cm ϕ は半導体検出器で、2 cm ϕ はフィルムで精度の高い測定が行えると考ええる。また6 cm ϕ 以上の出力係数を基準にして相対的に求める方法が簡便である。

結 論

- 1) 大きな照射野での電子線PDD測定はSCD法でも可能である。
- 2) フィルムおよび半導体検出器の電子線のエネルギー依存性は無視できる。
- 3) 4 cm ϕ 以下の小照射野用電子線コーンを使用した時の電子線のPDDはフィルムおよび半導体検出器により精度の高い測定が可能である。
- 4) 6 MeVから18 MeV電子線エネルギーの場合、6 cm ϕ 以上の出力係数はJARP形線量計を、3 cm ϕ から5 cm ϕ の出力係数は半導体検出器を、2 cm ϕ の出力係数はフィルムを用いて測定することが簡便であり、精度が高い。

文 献

- 1) 日本医学放射線学会物理部会編：放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法，通商産業研究社，1998。
- 2) Task Group 21 of AAPM: A Protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med Phys* **10**: 741-771, 1983.
- 3) ICRU Report 35: Radiation Dosimetry Electron Beams with Energy Between 1 and 50 MeV, ICRU Publications, 1984.
- 4) Task Group 25 of AAPM: Clinical electron-beam dosimetry. *Med Phys* **18**: 73-109, 1991.
- 5) 池田郁夫,池崎廣海,松本直素：小照射野領域における照射野係数のフィルム法による検討。日本放射学会誌 **51**: 1747-1750, 1995.
- 6) Jatinder RP, Nagalingam S: A non-docking intraoperative electron beam applicator system. *Int J Radiation Oncology Biol Phys* **17**: 411-417, 1989.
- 7) 日本医学放射線物理学会編：3治療物理学，医学物理データブック，日本医学放射線物理学会，1994，pp 56-68.
- 8) 日本放射線腫瘍学会研究調査委員会編：外部放射線治療装置の保守管理プログラム，通商産業研究社，1992，pp 28-30.

要旨：高エネルギー電子線の小照射野用電子線コーン使用時の線量測定において電離箱を使用した場合、大きな照射野で決定された平均エネルギーはどの程度小さな照射野まで適用可能か、また非常に小さなコーンについてはどのような測定方法を用いれば簡便で精度の高い測定が行えるか検討した。大きい照射野では電離箱によるPDDとフィルムおよび半導体検出器によるPDDは2%以内で一致した。フィルムおよび半導体検出器の電子線のエネルギー依存性は無視できると考えられる。4 cm ϕ 以下の小照射野用電子線コーンのPDDはフィルムおよび半導体検出器により精度の高い測定が可能である。6 MeVから18 MeV電子線では6 cm ϕ 以上の大きな照射野の電子線の出力係数はJARP形線量計を用い、3 cm ϕ から5 cm ϕ の小照射野の出力係数は半導体を用い、2 cm ϕ の小照射野の出力係数はフィルムを用いて測定することが簡便であり、精度が高い。