

放射線治療技術学Ⅱ

線量分布 相対線量(PDD, TPR他)

前回からの続き



絶対線量と相対線量

(1) 絶対線量と相対線量

絶対線量 → 物理量としての単位がある → (例)校正深吸収線量 D [Gy]

相対線量 → 物理量としての単位が無い → (例)PDD, TMR, OCR, OPFなど

(2) 相対線量の種類

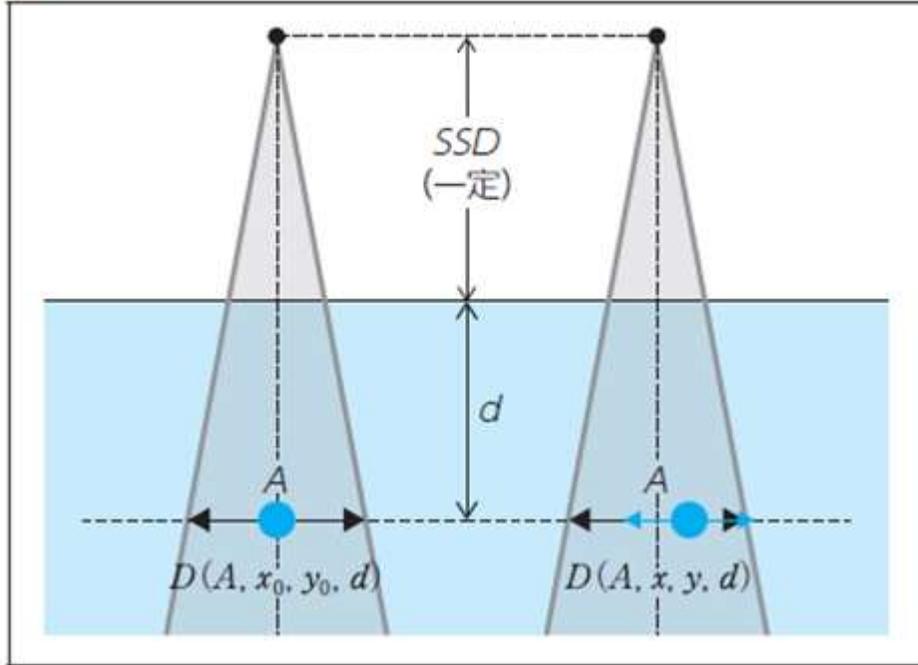
• 深部線量関数

深部線量関数	距離の設定	基準深 d_r
深部量百分率 percentage depth dose : PDD	SSD(一定)法	線量最大深(d_{max})
深部電離量百分率 percentage depth ionization : PDI	SSD(一定)法	電離量が最大となる深さ
組織最大線量比 tissue-maximum ratio : TMR	SAD(一定)法	線量最大深(d_{max})
組織ファントム線量比 tissue-phantom : TPR	SAD(一定)法	任意の基準深
組織空中線量比 tissue-air ratio : TAR	SAD(一定)法	ビルドアップキャップを装着したときの空中線量

- 軸外線量比 (off-axis ratio : OAR , または off-center ratio : OCR)
- 出力係数 (output factor : OPF)
- ウェッジ係数 (wedge factor : WF)
- トレイ係数 (tray factor : TF)

3 軸外線量比 (off-axis ratio : OAR)

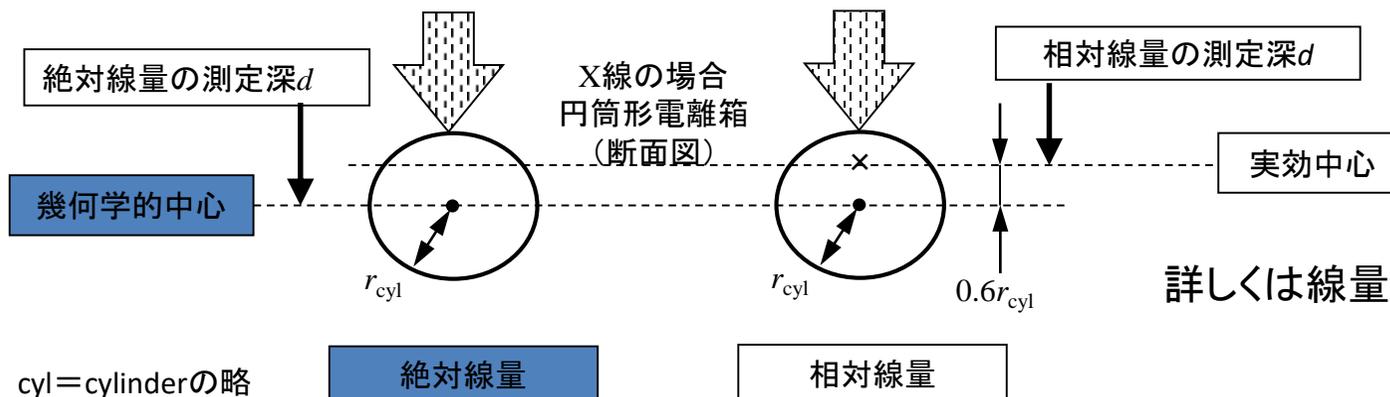
▲ OAR



- ビーム軸上の吸収線量に対するビーム軸に直交する同一平面上の任意の点の吸収線量の比
- 照射野A, 深さdにおける任意の点(x, y)の軸外線量比OAR(A, x, y, d)を次式で定義する

$$OAR(A, x, y, d) = \frac{D(A, x, y, d)}{D(A, x_0, y_0, d)}$$

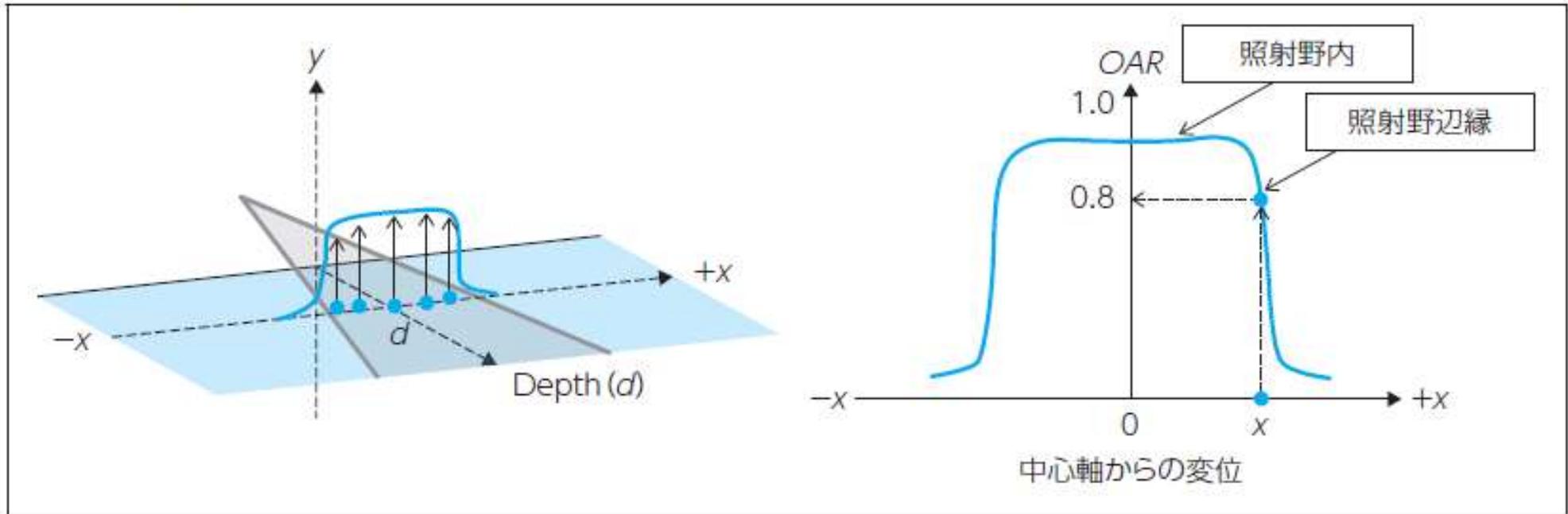
- ※(x, y)はビーム軸の座標を表す
- ※SSDおよびSCDは一定とする
 - SSDおよびSCDを固定し, 電離箱線量計の位置(x,y)を移動させて計測する
 - 実効中心で計測する



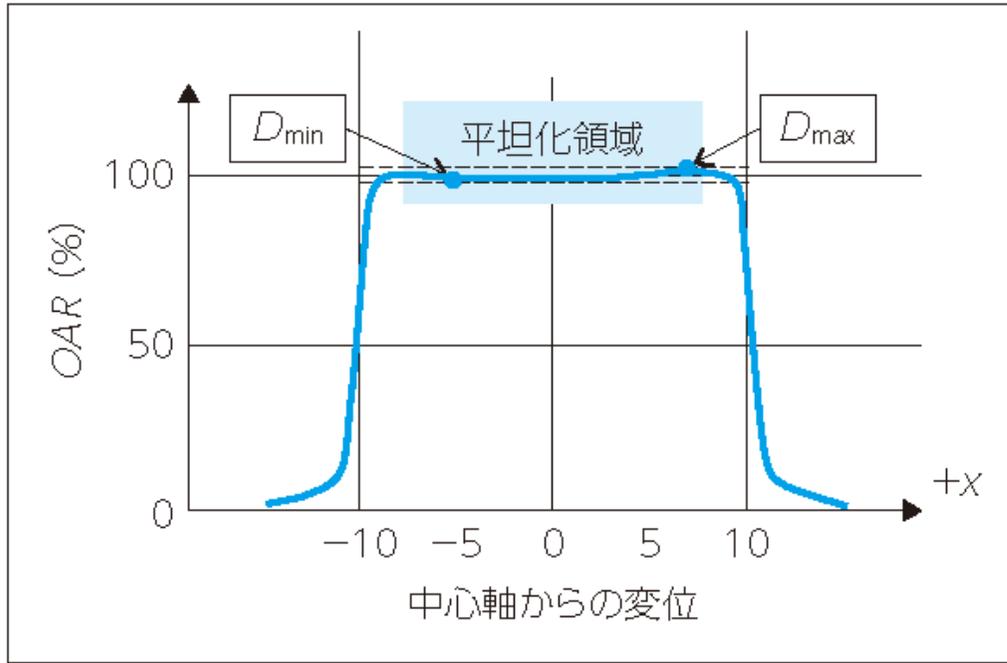
cyl=cylinderの略

詳しくは線量計測(X線1)のスライド参照

▲ OAR 曲線



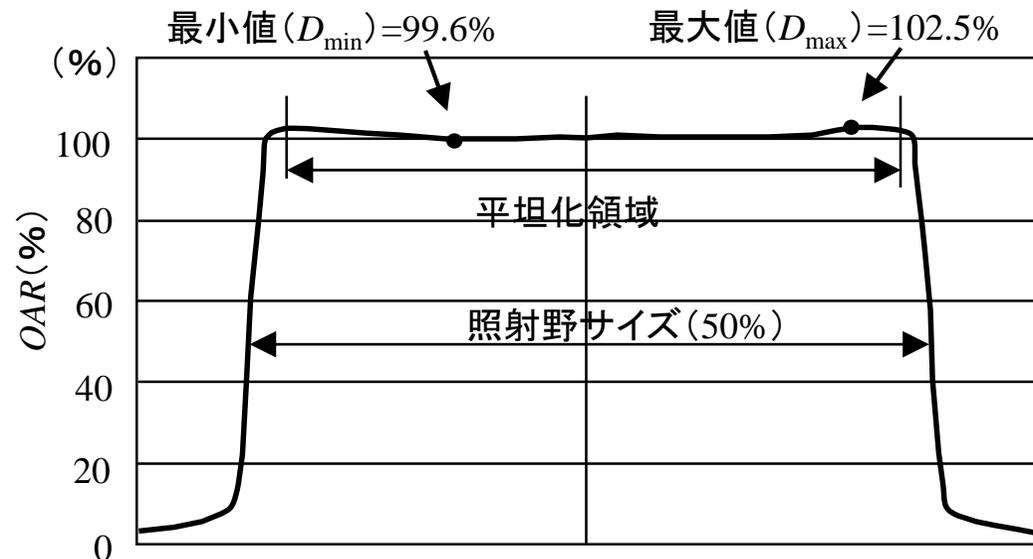
- 縦軸をOAR, 横軸を中心軸からの変位で表した曲線
- 照射野内はほぼ平坦, 照射野辺縁は肩下がりの傾斜を示す
- OARは, 以前はOCR(off-center ratio)と呼ばれていたが, 標準計測法12でOARに改訂されている



- 線量プロファイルの保守管理は、照射野内の線量分布を均一にするために重要である
- OARからは照射野辺縁部の線量傾斜や照射野外における線量評価が可能である
- 平坦化領域の平坦度(最小吸収線量に対する最大吸収線量の比)は次式で求められる

$$\text{平坦度} = \frac{D_{\max}(\text{最大吸収線量})}{D_{\min}(\text{最小吸収線量})} \times 100[\%]$$

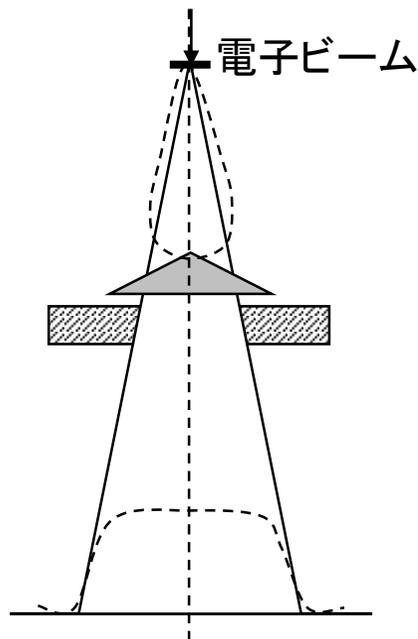
- 平坦度は百分率(%)で表される



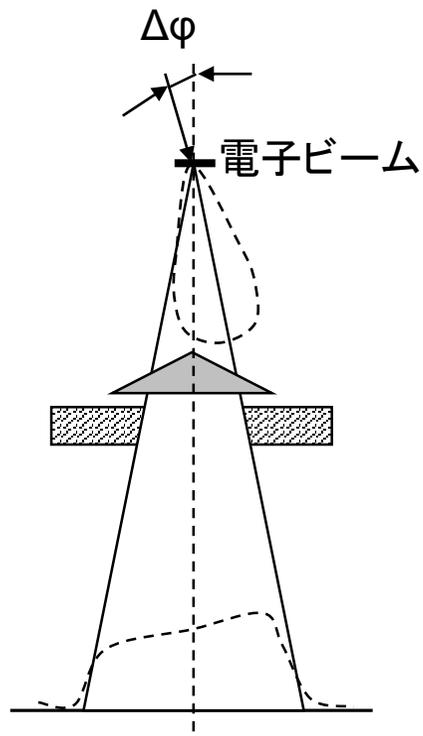
$$\text{平坦度} = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \times 100 = \frac{102.5\%}{99.6\%} \times 100 = 102.9\%$$

- *OAR*は平坦化フィルタの物理的形狀と配置に依存する

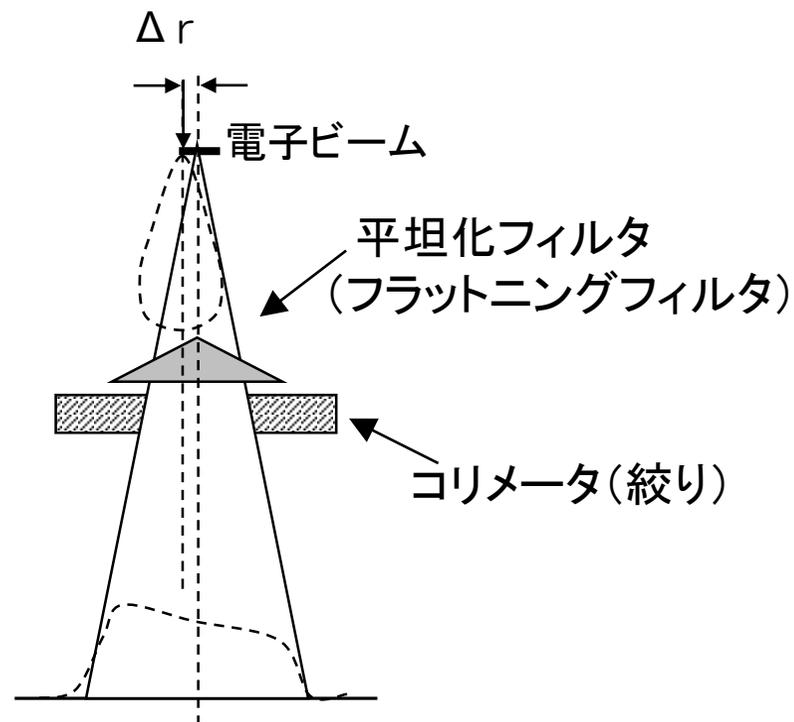
正しい焦点の位置



中心軸に対して $\Delta\phi$ だけ角度変位した場合

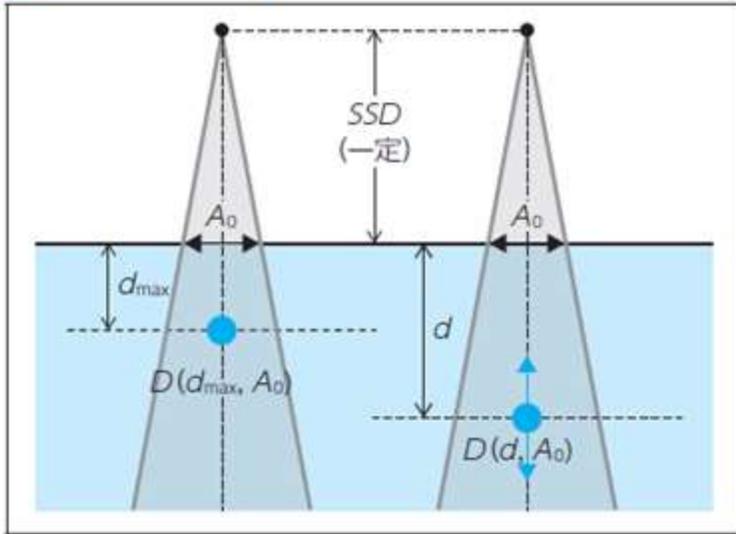


中心軸が Δr だけ平行に変位した場合



1 深部量百分率 (percentage depth dose : PDD)

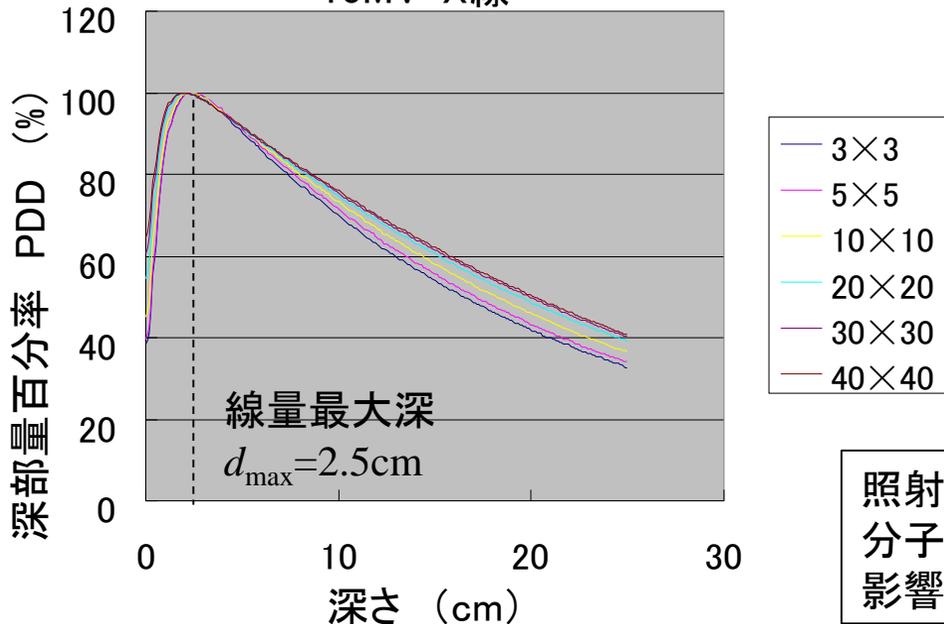
▲ 深部量百分率 (PDD)



- 水中でビーム軸上における線量最大深の吸収線量 $D(d_{\max}, A_0)$ に対する任意の深さでの吸収線量 $D(d, A_0)$ の百分率
- 表面照射野が A_0 のとき, ビーム軸上の深さ d での深部量百分率 $PDD(d, A_0)$ を次式で定義する

$$PDD(d, A_0) = \frac{D(d, A_0)}{D(d_{\max}, A_0)} \times 100$$

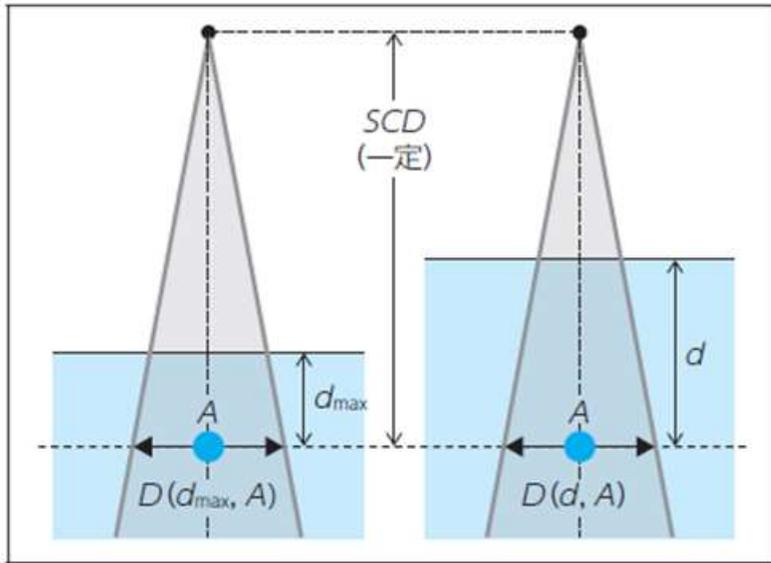
10MV-X線



- SSDは一定とする
- SSDを固定し電離箱線量計の位置(深さ d)を移動させて計測する
- 実効中心で計測する

照射野が大きいほど傾きは小さくなる(散乱線の増加のため)
分子と分母で線源からの距離が異なるため距離逆2乗則の影響がある(下に凸のグラフ)

▲ TMR

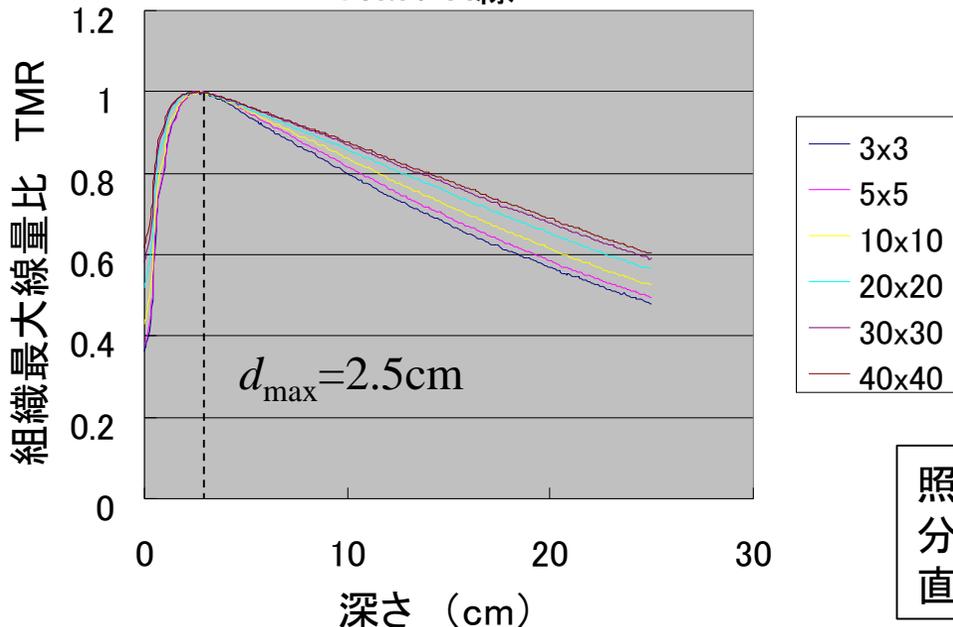


- ビーム軸上の深さ d , その深さでの照射野が A のとき, TMR を次式で定義する

$$TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{max}, A)}$$

- ここで, $D(d, A)$ は任意の深さでの水吸収線量, $D(d_{max}, A)$ は線量最大深 d_{max} の吸収線量を表す
- $SAD(SCD)$ 一定で高エネルギーX線および γ 線を照射する際の線量計算に用いる
- $SAD(SCD)$ は一定とする
 - SCD (電離箱線量計の位置)を固定し, ファントム内の水量を変化させて計測する
 - 実効中心で計測する

10MV X線



照射野が大きいほど傾きは小さくなる(散乱線の増加のため)
分子と分母で距離が同じため(距離逆2乗の影響がなく)
直線的な変化をする

【例題】

標準計測法によりX線の線量測定を行った。その際、校正深での線量 $D(d_c, A)$ が0.75 Gyであった。このときの線量最大深での線量 $D(d_{\max}, A)$ はいくらか。

ただし、TMRは下のグラフのとおりとする

1. 0.25 Gy
2. 0.56 Gy
3. 0.75 Gy
4. 1.0 Gy
5. 1.5 Gy

【答え】 4

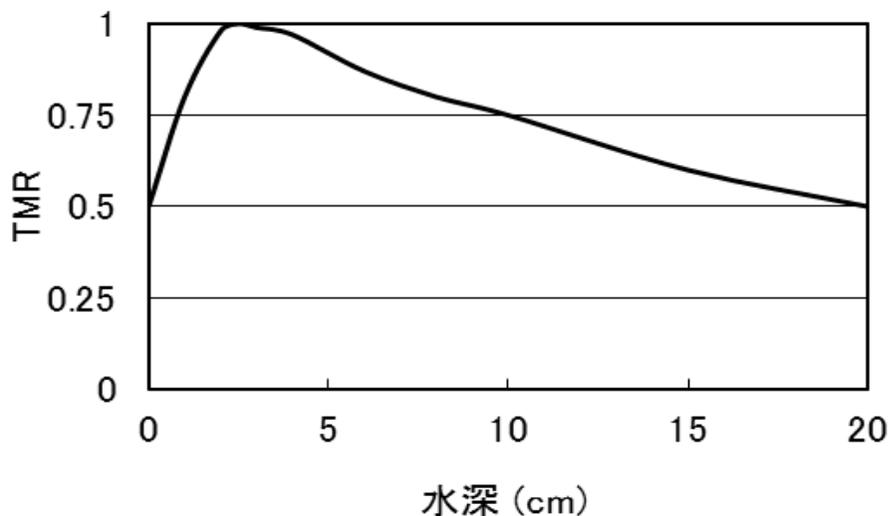
TMRの定義より校正深 $d_c=10$ cm では

$$TMR(d_c, A) = \frac{D(d_c, A)}{D(d_{\max}, A)}$$

問題文より、線量 $D(d_c, A) = 0.75$ Gy、グラフより、 $TMR(d_c, A) = 0.75$

よって

$$D(d_{\max}, A) = \frac{D(d_c, A)}{TMR(d_c, A)} = \frac{0.75 \text{ Gy}}{0.75} = 1.0 \text{ Gy}$$



PDDとTMRの関係(1)

- PDDとTMRの変換式

$$PDD(d, A_0) = 100 \times TMR(d, A) \times \underbrace{\frac{S_p(A)}{S_p(A_{dmax})}}_{S_p = \text{ファントム散乱係数}} \times \underbrace{\left(\frac{f+d_{dmax}}{f+d} \right)^2}_{\text{距離の逆二乗則による補正項}}$$

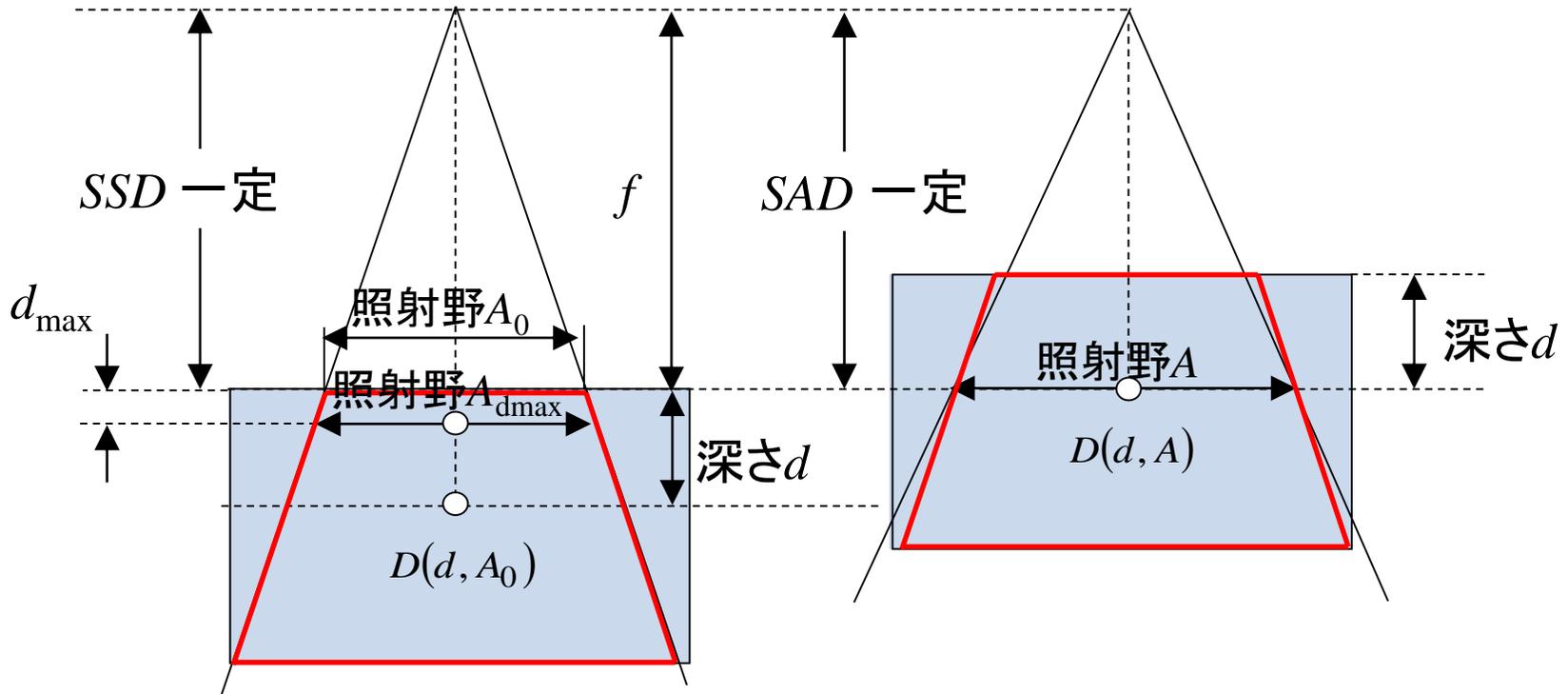
S_p = ファントム散乱係数

照射野内に含まれる水の体積
(太線部)による散乱線量の補正項

距離の逆二乗則による補正項

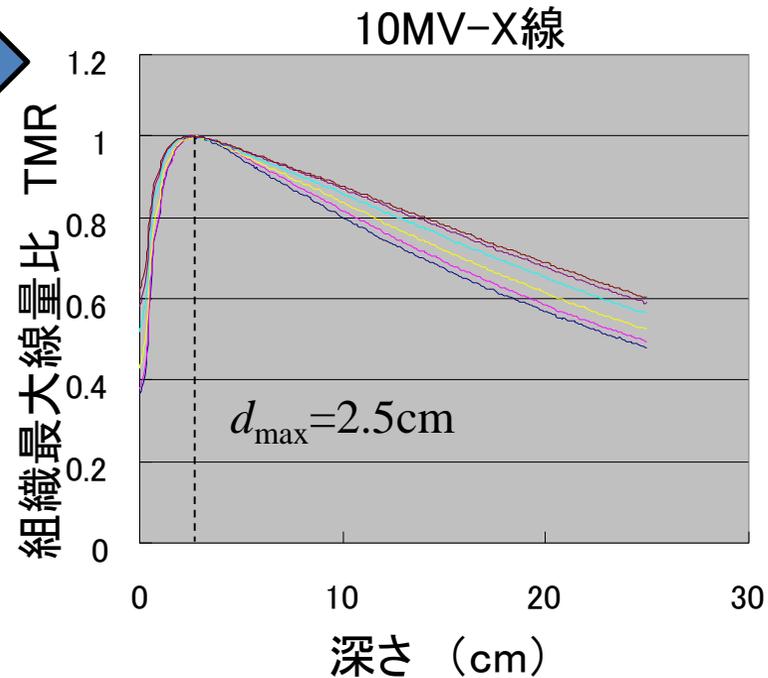
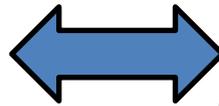
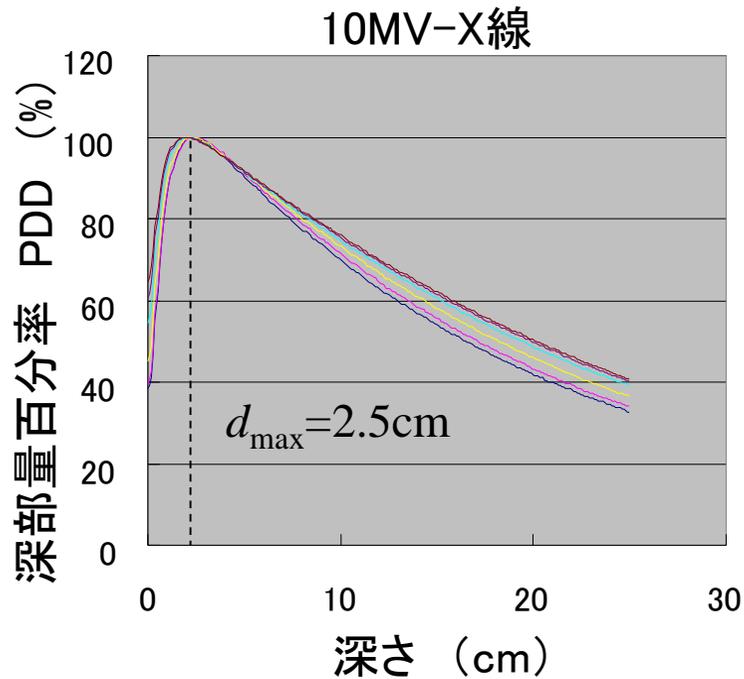
$$A = A_0 \times (f + d)^2 / f^2$$

$$A_r = A_0 \times (f + d_r)^2 / f^2$$



PDDとTMRの関係(2)

変換式によって
PDDとTMRは相互に変換できる



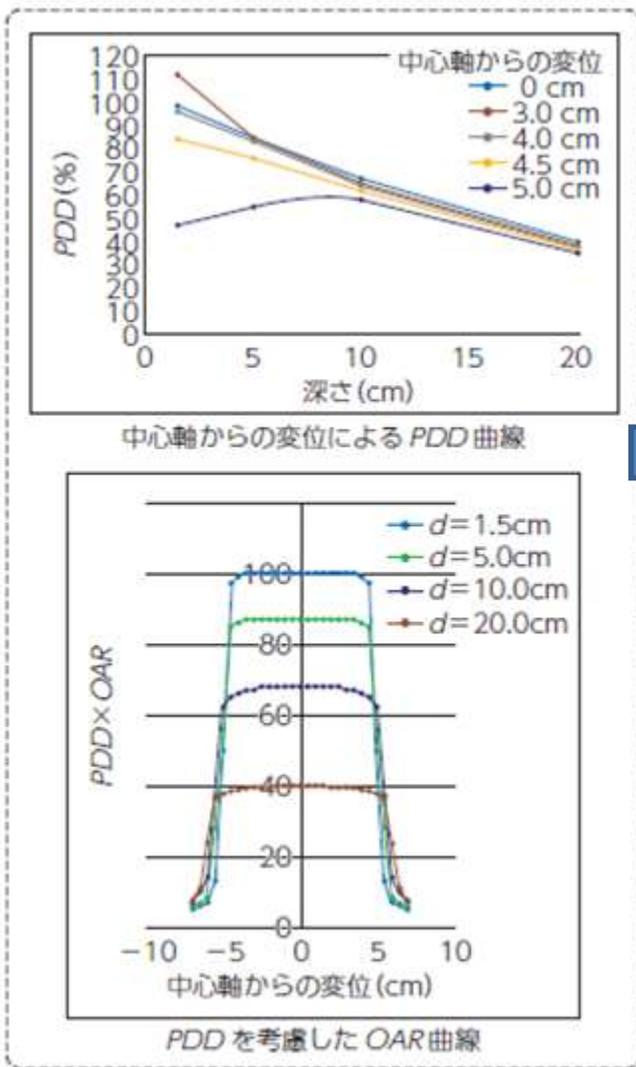
線量分布図の合成

線量分布図を合成するためには以下の手順で合成する

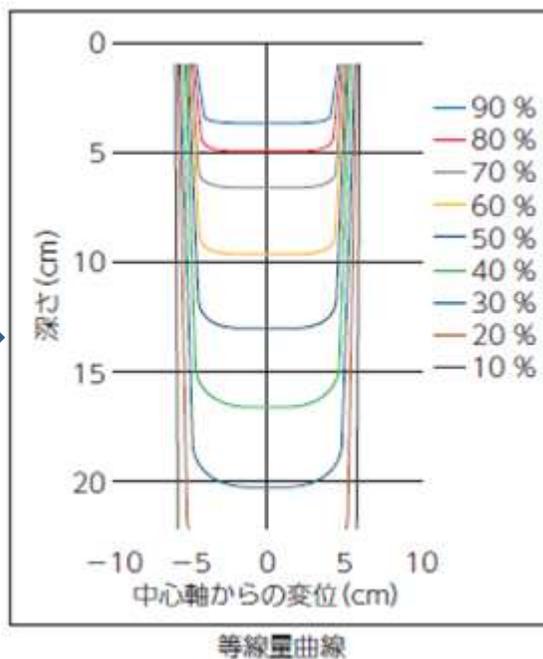
・SSD一定のセットアップの場合 → PDD曲線とOAR曲線

・SAD一定のセットアップの場合 → TMR (TPR) 曲線とOAR曲線

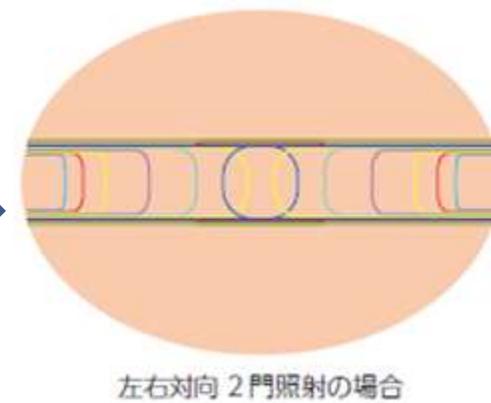
から作成した等線量曲線を各照射方向から重ね合わせる



②各照射野方向から等線量曲線を重ね合わせる

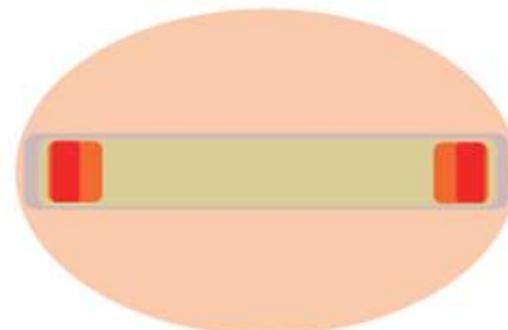


②



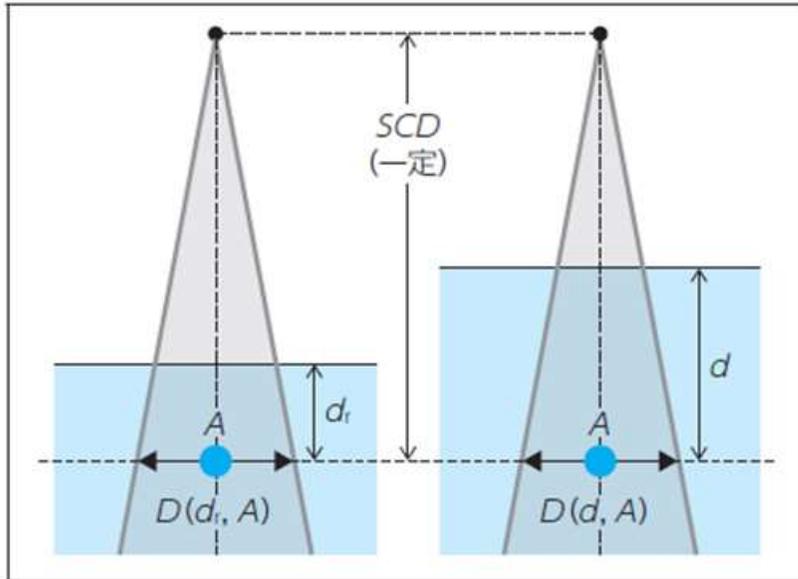
③

③合成した等線量曲線の交点を求め、交点における線量が等しくなる点同士を線で結ぶことで線量分布図を作成



①PDDとOARを考慮した等線量曲線を作成
または、
TMR (TPR) とOARを考慮した等線量曲線を作成

▲ TPR

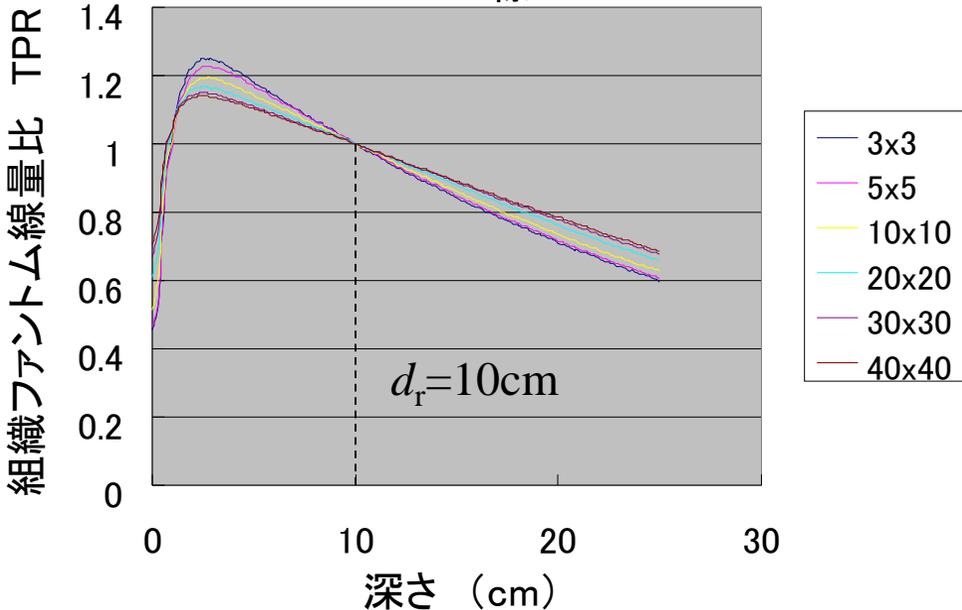


- ビーム軸上の深さ d , その深さでの照射野が A のとき, TPR を次式で定義する

$$TPR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_r, A)}$$

- ここで, $D(d, A)$ は任意の深さでの水吸収線量
 $D(d_r, A)$ は基準深 d_r の吸収線量を表す
- $SAD(SCD)$ 一定で高エネルギーX線および γ 線を照射する際の線量計算に用いる
- $SAD(SCD)$ は一定とする
 - SCD (線源電離箱距離)を固定し,
ファントム内の水量を変化させて計測する
 - 実効中心で計測する

10MV X線



TMRとTPRの関係(1)

- 組織最大線量比: TMR

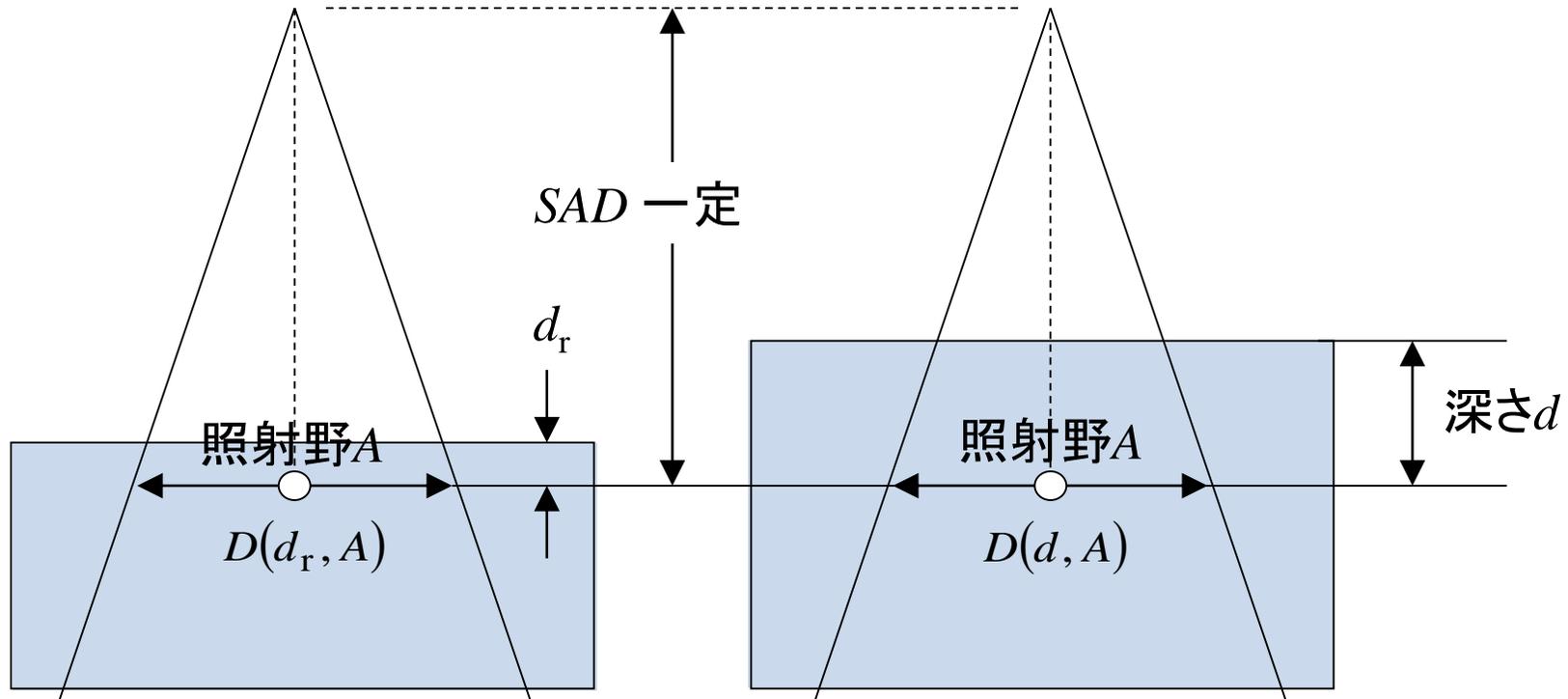
$$TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{\max}, A)}$$

基準深 d_r =線量最大深 d_{\max} の場合が
 TMR である(日本では一般的)

- 組織ファントム線量比: TPR

$$TPR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_r, A)}$$

基準深 d_r は任意の深さ
(海外では $d_r=10$ cmが多い)



TMRとTPRの関係(2)

• 組織最大線量比: *TMR*

• 組織ファントム線量比: *TPR*

$$TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{\max}, A)}$$

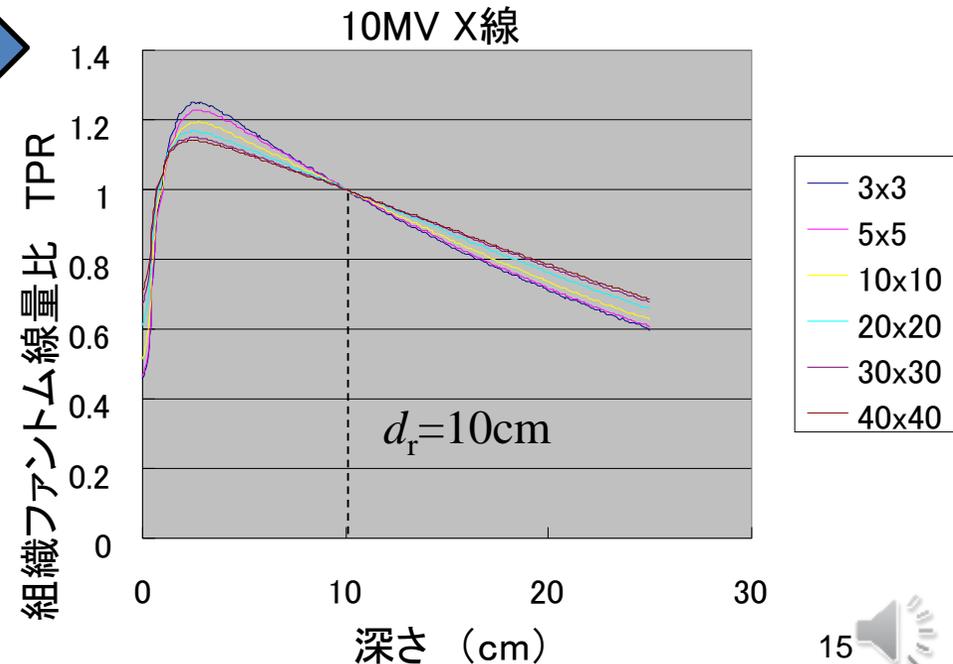
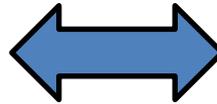
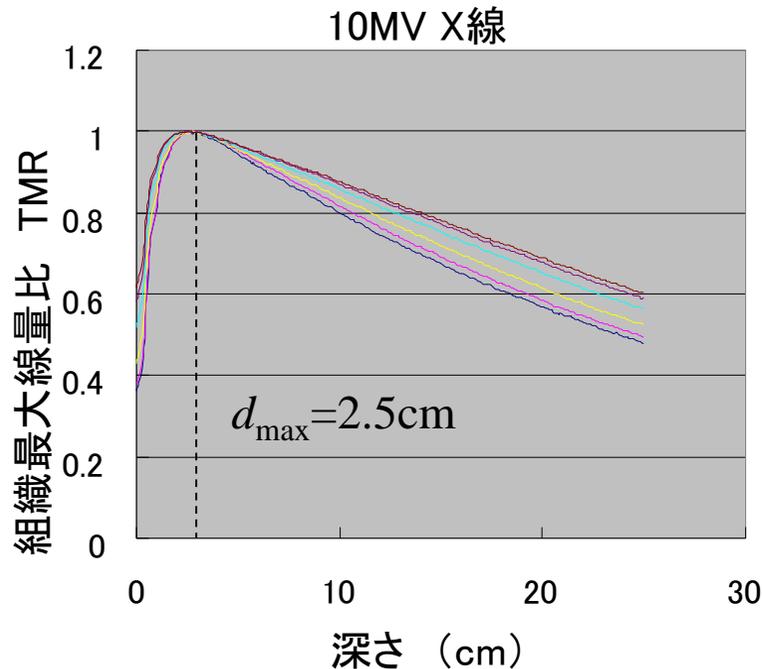
$$= \frac{D(d, A)}{D(d_{\max} = 2.5\text{cm}, A)}$$

TMRはTPRの
特別な場合である

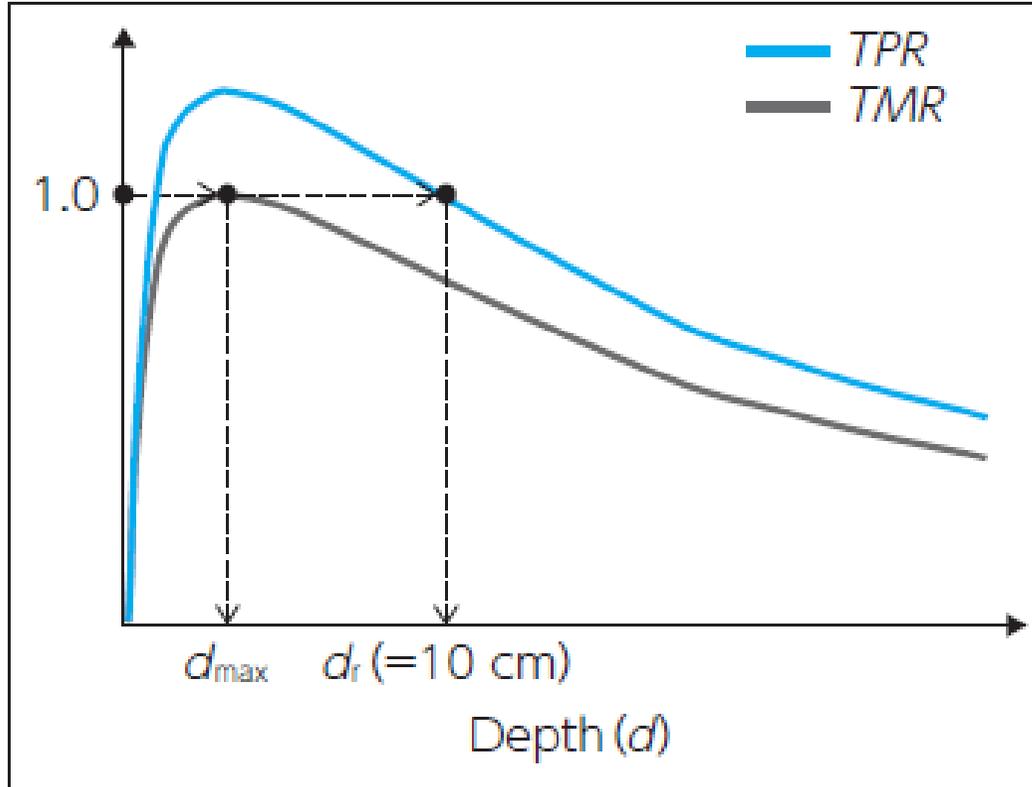
基準深 d_r は任意の深さ
 $d_r=10\text{cm}$ とすると→
← $d_{\max}=2.5\text{cm}$ のとき

$$TPR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_r, A)}$$

$$= \frac{D(d, A)}{D(d_r = 10\text{cm}, A)}$$



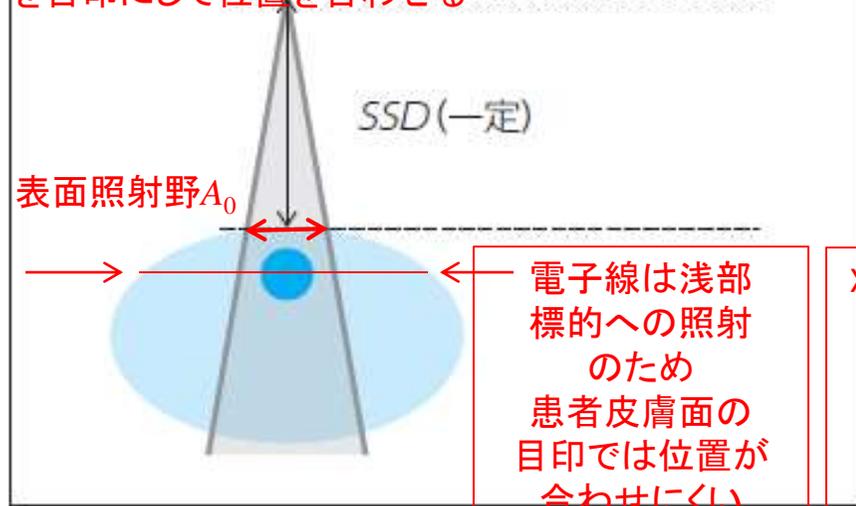
TPR と TMR の違い



- TPRは「基準深 d_r (任意の深さ)」における吸収線量の比である
- TMRは「線量最大深 d_{\max} 」における吸収線量の比である
- TPRにおいて d_r (基準深) $=d_{\max}$ (線量最大深)であればTMRとして扱うことができる

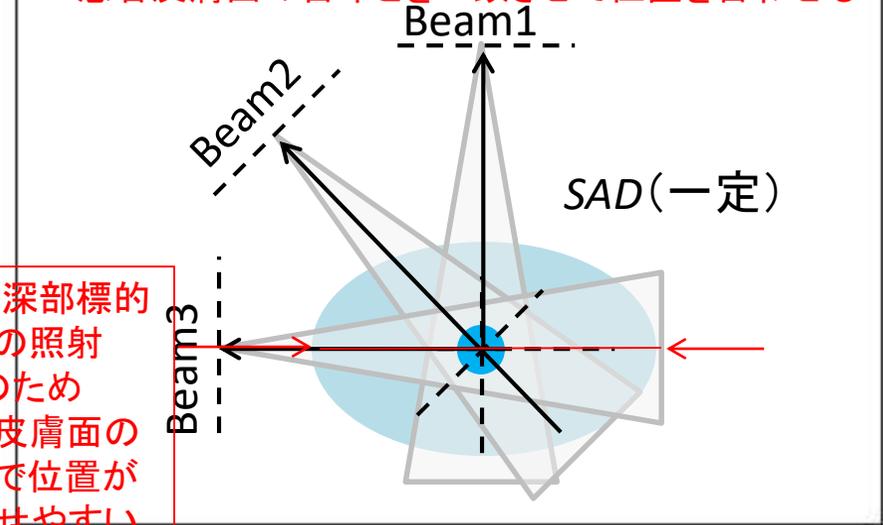
PDDとTPRの使い分け

◎表面照射野の大きさ(光照射野)と距離計の数値とを目印にして位置を合わせる



SSD法

◎壁から投影されたレーザー光(=アイソセンタ)と患者皮膚面の目印とを一致させて位置を合わせる



STD法

- 1門照射
- PDDを利用して線量計算を行う
- 線源表面間距離SSDを一定としてセットアップする照射法
- 電子線照射では、SSD=100 cmにセットアップして治療することが多いため、PDDが重要である

電子線は数cmの深さで線量がほぼゼロになる浅部標的の照射に向いている

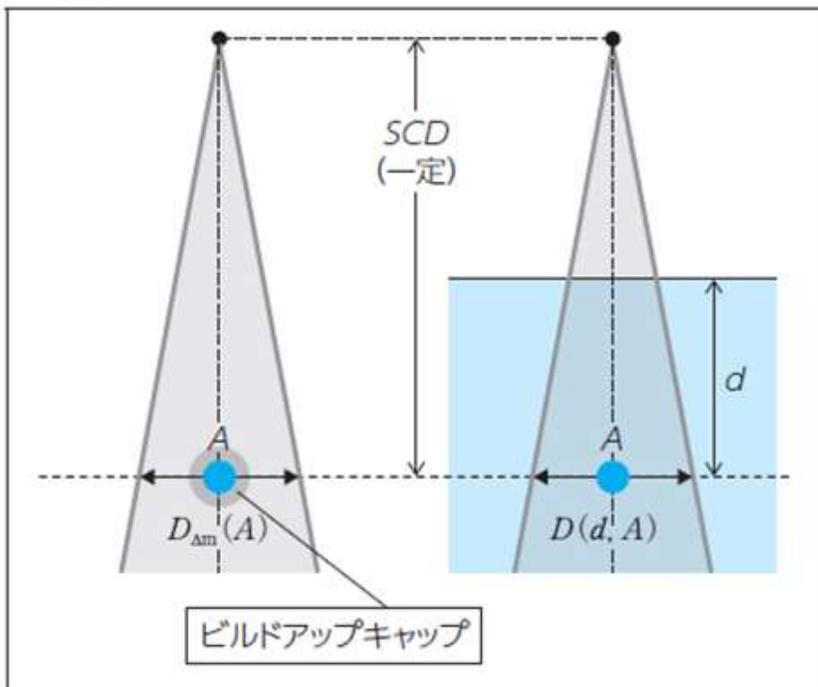
→SSD一定の方が位置が合わせやすい

- 多門照射
- TMR (TPR)を利用して線量計算を行う
- X線照射では、アイソセンタを軸にガントリ回転して治療を行うため、STD(SAD)=100 cmにセットアップして治療することが多い
- 多門照射の場合は照射方向(Beam1, Beam2, Beam3)によって皮膚面～標的間距離が異なり、TMR(TPR)が重要となる

X線は(電子線に比べて)深部でも線量が大い深部標的の照射に向いている

→SAD一定の方が位置が合わせやすい

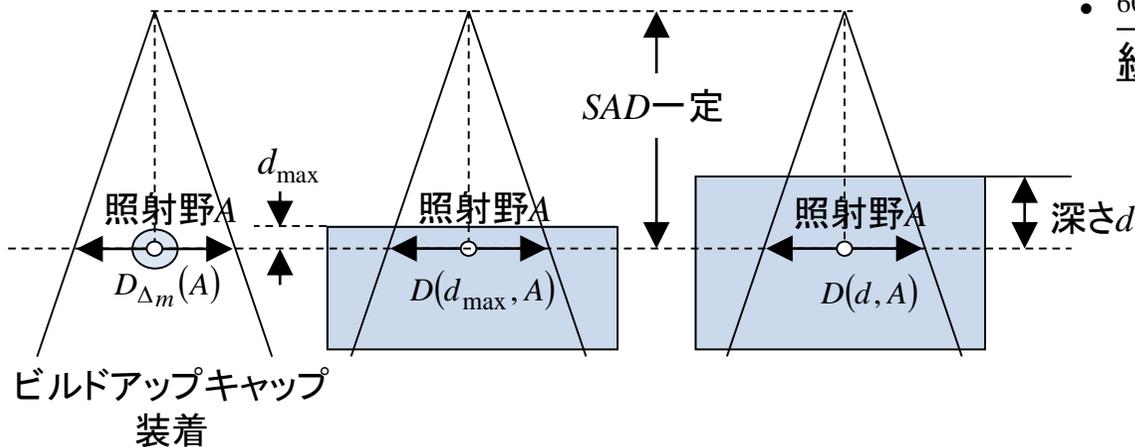
▲ TAR



$$TAR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D_{\Delta m}(A)}$$

- ビーム軸上の深さを d , その深さでの照射野が A のとき, TAR を次式で定義する

- ここで, $D(d, A)$ は任意の深さでの水吸収線量, $D_{\Delta m}(A)$ は空中組織吸収線量を表す
- $D_{\Delta m}(A)$ は, 自由空間内に置かれた質量 Δm の組織中心での吸収線量を表す
- Δm は, 線量最大深に相当する厚みがあるビルドアップキャップの質量を表す
- $SCD(SAD)$ は一定とする
 - 実効中心で計測する
- ^{60}Co - γ 線または数MV以下のX線を照射する際の線量計算に用いる



※TARは現在はほとんど利用しない
 →高エネルギーX線ではTMRを利用する
 (水からの散乱線の影響が大きい)

▲ ビルドアップキャップ

ビルドアップキャップ



装着時

- ビルドアップ (build up) とは、ファントムから発生した二次電子がある長さを走りながら電離を起こし、二次電子の飛程の深さ近くで最大線量を示す現象をいう
- 電離箱線量計を使用して高エネルギーX線および γ 線の照射線量を計測する際は、電離箱線量計の電離空洞内でビルドアップを形成させるために、ビルドアップキャップを使用する
- 電離箱線量計に密着する設計となっている

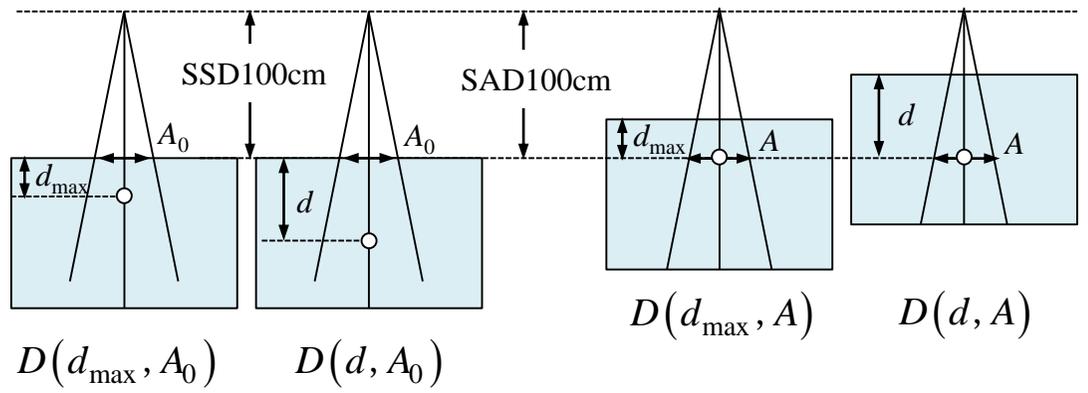


【問題】

X線, γ 線について誤っているのはどれか.

1. PDDはSSDによって変わる
2. PDDは照射野によって変わる
3. TMRは照射野によって変わる
4. TMRはエネルギーによって変わる
5. TMRはSSDによって変わる

(※)ヒント
「SSDで変わる=距離で変わる」と考える
それぞれの定義は以下で表す



$$PDD(d, A_0) = \frac{D(d, A_0)}{D(d_{max}, A_0)} \times 100$$

$$TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{max}, A)}$$

【答え】

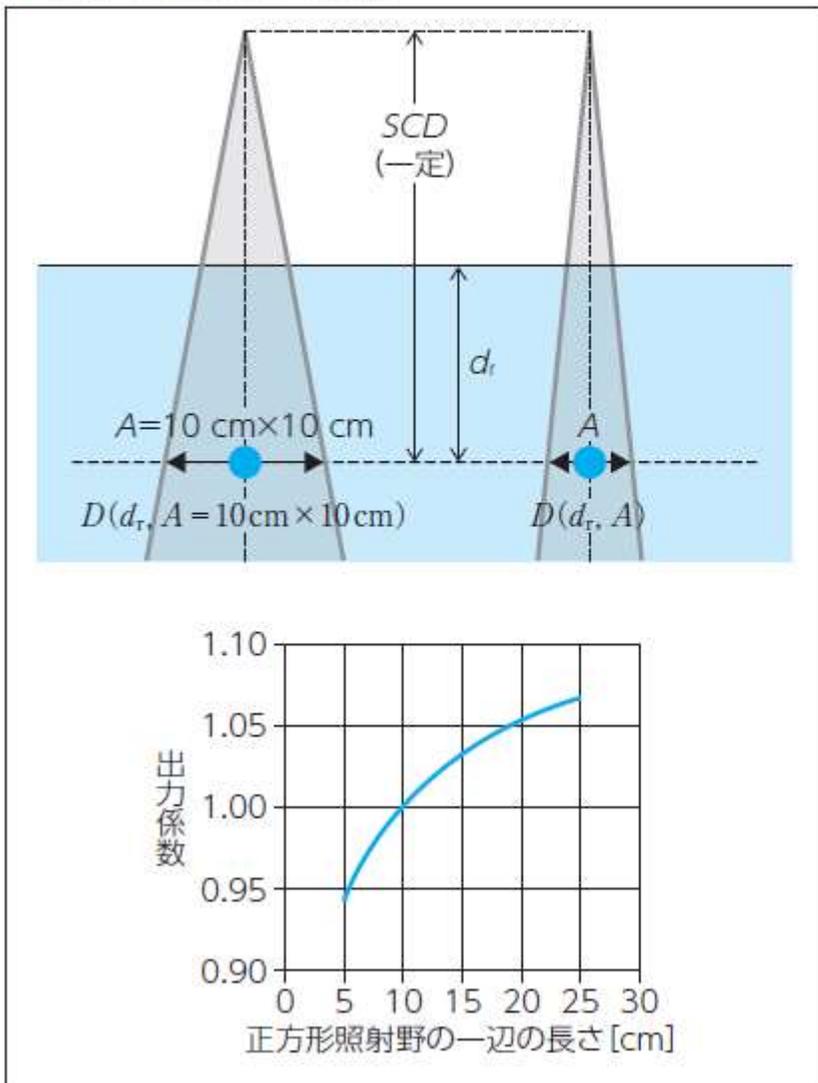
5が誤り

SSD(距離)で変わるかどうかは式の分子と分母が線源から等距離かどうかで区別できる。

- ・PDDは分子と分母で距離が異なるのでSSD(距離)で変わる。
- ・TMR(TPR)やTARは分子と分母で等距離なのでSSD(距離)で変わらない。
- ・ $PDD(d, A_0)$, $TMR(d, A)$ で表されるようにPDDやTMRは深さ d や照射野 A , A_0 によって変わる。
- ・同じ深さ d , 照射野 A での値を比べるとエネルギーによって変わる(透過力が異なる)。

7 出力係数 (output factor : OPF)

▲ OPF と照射野との関係



- 基準照射野 ($A=10\text{cm} \times 10\text{cm}$) に対する任意の照射野 A または A_0 での吸収線量の比

- 基準深 d_r の出力係数 $OPF(d_r, A)$ を次式で定義する

$$OPF(d_r, A) = \frac{D(d_r, A)}{D(d_r, A = 10\text{cm} \times 10\text{cm})}$$

または

$$OPF(d_r, A_0) = \frac{D(d_r, A_0)}{D(d_r, A_0 = 10\text{cm} \times 10\text{cm})}$$

- ここで、 $D(d_r, A=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ と $D(d_r, A_0=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ は基準照射野における基準深吸収線量、 $D(d_r, A)$ と $D(d_r, A_0)$ は任意の照射野における基準深吸収線量を表す
- $SCD(SAD)$ は一定とする
 - SCD (線源電離箱間距離) を固定し、照射野の大きさを变化させて計測する
 - 実効中心で計測
- 光子線の OPF は、基準深で定義される (線量最大深であることが多い)
- OPF と照射野との関係を図に示す. 上式より照射野 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ では $OPF=1.00$ となる. また、照射野の大きさに比例して増加する. この傾斜は、エネルギーなどの諸条件によって異なる

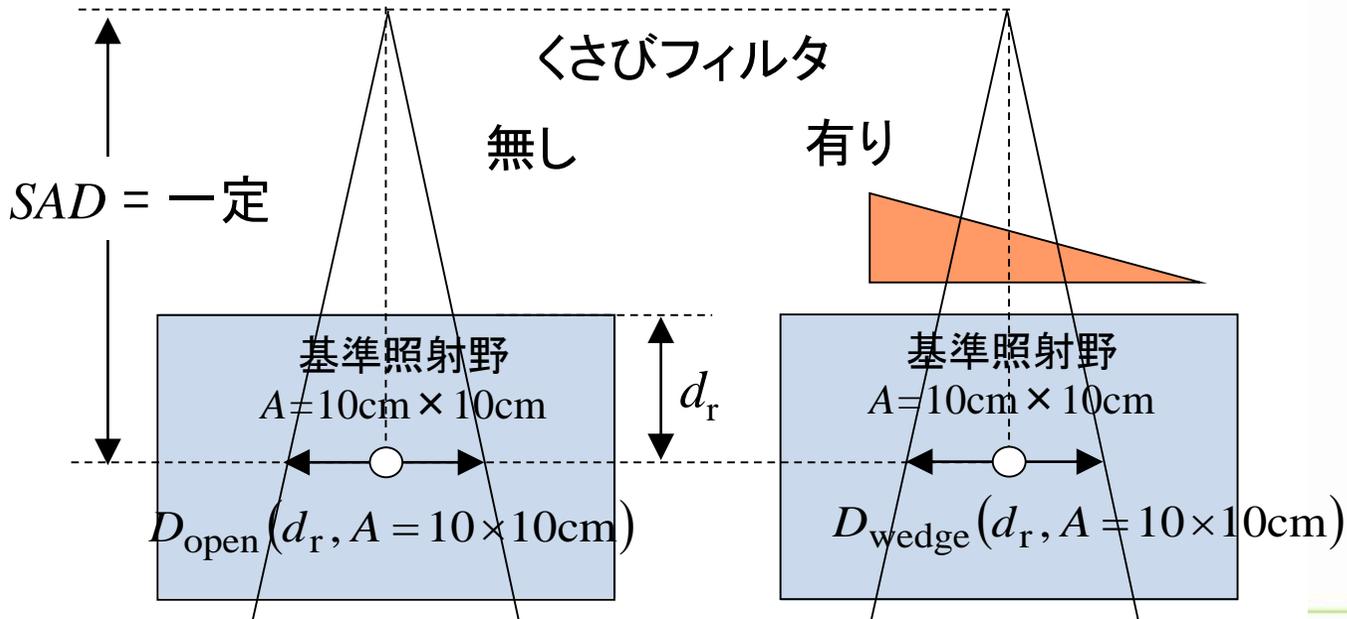
くさび係数(ウェッジ係数, wedge factor: WF)

・くさびフィルタ有り無しの比

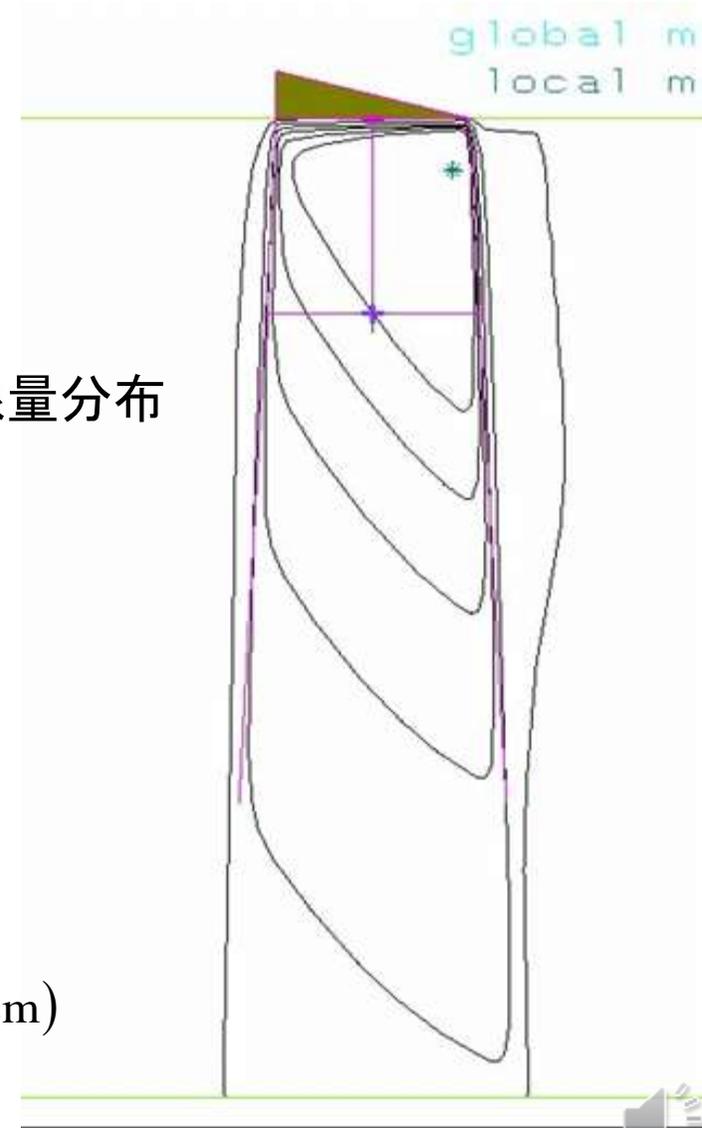
$$WF = \frac{D_{\text{wedge}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})}{D_{\text{open}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})}$$

【例題】電位計の表示値 M が、くさびフィルタ有り $M=1.9$ [nC]、くさびフィルタ無し $M=3.6$ [nC]のとき、くさび係数はいくらか

【答え】 $WF = \frac{D_{\text{wedge}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})}{D_{\text{open}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})} = \frac{1.9}{3.6} \doteq 0.527$



線量分布



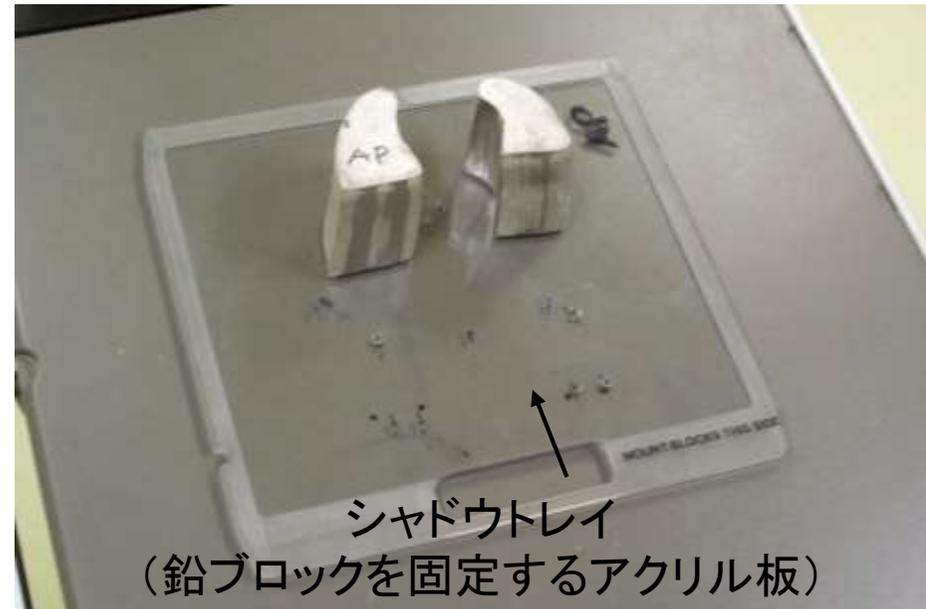
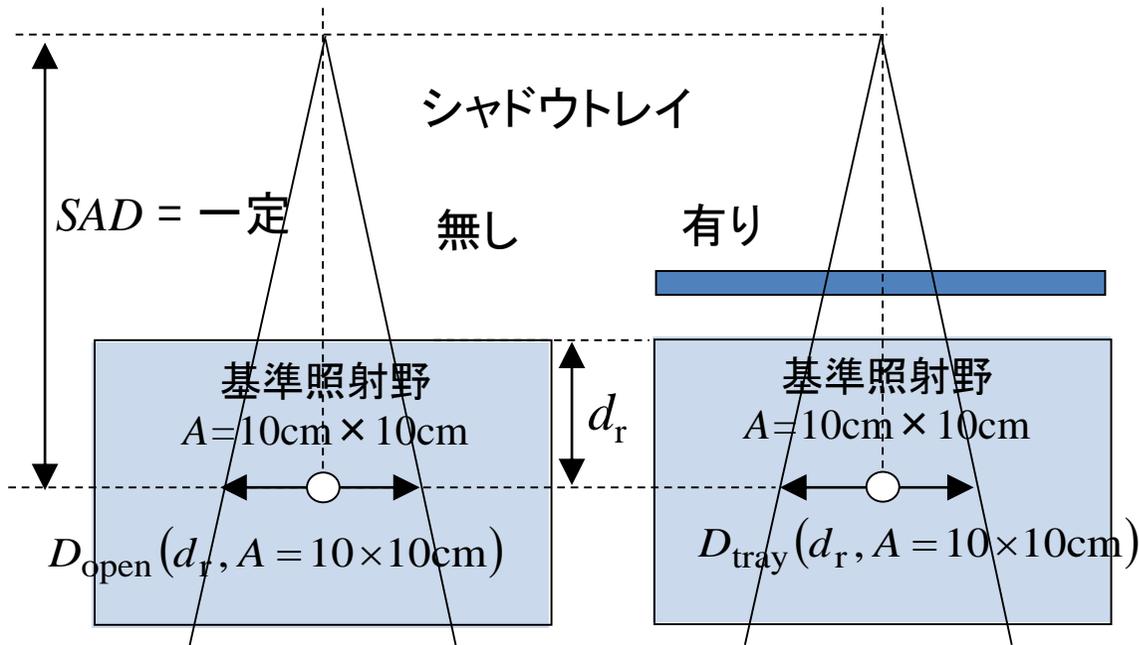
トレイ係数 (tray factor : TF)

- シャドウトレイ有り無しの比

$$TF = \frac{D_{\text{tray}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})}{D_{\text{open}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})}$$

【例題】電位計の表示値 M が、トレイあり $M=15.46$ [nC]、
トレイなし $M=15.84$ [nC] のときトレイ係数はいくらか

【答え】 $TF = \frac{D_{\text{tray}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})}{D_{\text{open}}(d_r, A = 10 \times 10 \text{cm})} = \frac{15.46}{15.84} \doteq 0.976$

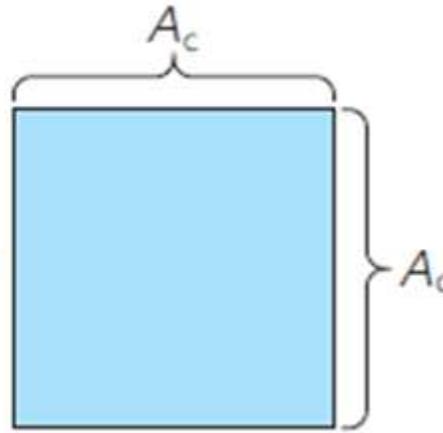
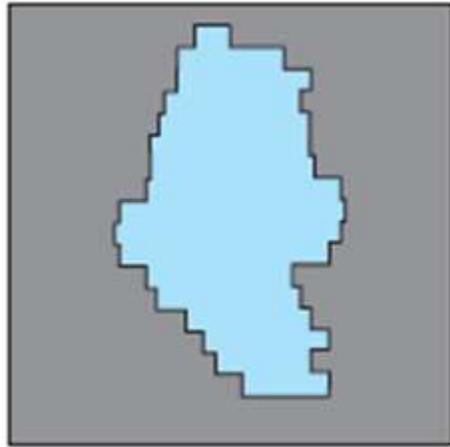


例題 2

SAD セットアップ, 照射野サイズ $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ で 100 MU 照射した時の基準深吸収線量は 0.980 照射野サイズ $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ に変更して 100 MU 照射した時の基準深吸収線量は 1.020 だった。この時, 出力係数はいくらか。

☞ 模範解答は ~~137~~ ページ
181

解答: _____



MLCによる不整形照射野

等価正方形照射野

等価面積法(ルートA法)

- 照射野面積が等しければ、等価な照射野として扱うことができるとしている
- 面積の平方根により等価正方形照射野を求める

等価面積法 (\sqrt{A} 法)

$$A_c = \sqrt{A}$$

A : 面積

- 出力係数は、正方形照射野に対して定義される
- 不整形照射野を等価正方形照射野に換算して求める

①等価面積法(ルートA法)

②面積周囲長法(A/P法)

面積周囲長法(A/P法)

- 照射野面積Aと照射野周囲長Pとの比が、等しければ、許容誤差内で等価な照射野として扱うことができるとしている
- A/Pの値を4倍することにより等価正方形照射野を求める

面積周囲長法 (A/P 法)

$$A_c = \frac{A}{P} \times 4$$

A : 面積

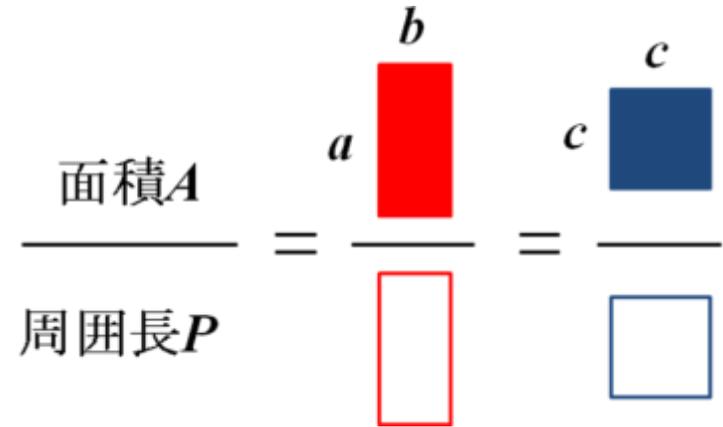
P : 周囲長

A/P法による等価正方形照射野

- A/P法¹⁾は面積周囲長比 (Area/Perimeterの比) が等しい照射野は吸収線量が等しい (等価) と仮定する
- 同じ測定深において、高さ a 、幅 b の長方形照射野と、一辺 c の正方形照射野のA/P比が等しいとすれば

$$A/P = \frac{a \times b}{2(a+b)} = \frac{c \times c}{2(c+c)}$$

$$c = 4 \cdot \frac{a \times b}{2(a+b)} = 4 \cdot \frac{A}{P}$$



- 複数の正方形照射野のPDD, またはTPR(TMR)を測定して間を線形補間すれば、任意の長方形照射野のPDD, またはTPR(TMR)を求めることができる

(※補足)

- 実際に計測するとA/P法はX線の矩形照射野ではほぼ成立するがMLCを用いた不整形照射野では成立しない
- A/P法は診療放射線技師国家試験によく出題される(ルートA法は出題されたことなし)

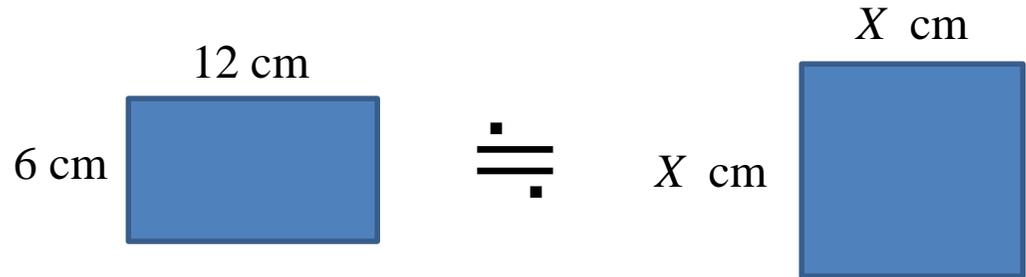
参考文献

1) Sterling TD, H Perry, L Katz: Automation of radiation treatment planning, Br. J. Radiol ; 37; 544; 1964.

【例題】

6 cm × 12 cmの照射野の吸収線量と等価な正方形照射野はどれか。

1. 6 cm × 6 cm
2. 7.5 cm × 7.5 cm
3. 8 cm × 8 cm
4. 9 cm × 9 cm
5. 10 cm × 10 cm



【答え】

3

吸収線量がほぼ等しい正方形照射野の
一辺の長さは何cmとなるか？

長方形照射野(辺 $a \times b$)と等価な正方形照射野の一辺 s をA/P法で求める
(面積 A , 周囲長 P),

$$s = \frac{4 \times A}{P} = \frac{2 \times a \times b}{a + b}$$

A/P法では6cm × 12cmの長方形照射野は8cm × 8cmの正方形照射野と等価

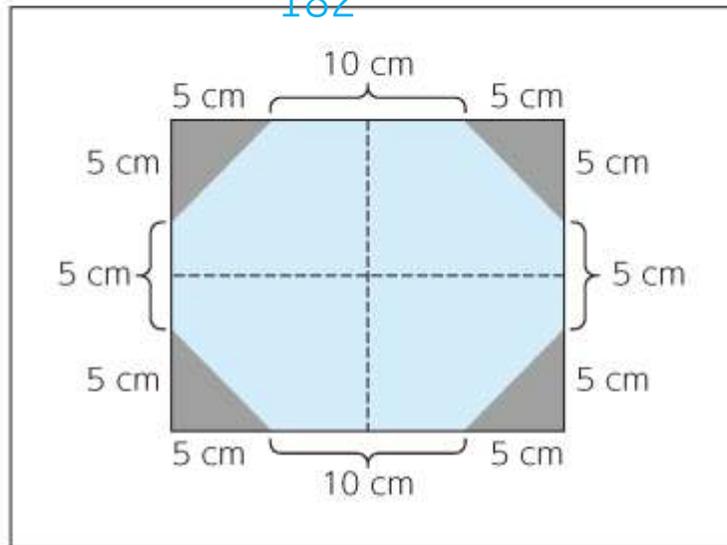
$$s = \frac{4 \times A}{P} = \frac{2 \times a \times b}{a + b} = \frac{2 \times 6 \times 12}{6 + 12} = 8.0$$

例題 3

動画はp.130と書いていますが
第2版ではこのページです

下図の不整形照射野に対する等価正方形照射野の1辺の長さ (A_c) を、等価面積法 (\sqrt{A} 法) および面積周囲長法 (A/P 法) を用いて求めよ。

模範解答は ~~138~~ ページ
182



【解答】

MLCが全開の場合、照射野面積は $20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} = 300 \text{ cm}^2$ となる
コリメート(遮へい)されている4箇所の面積は全て等しく、1領域の
面積は

$$\frac{1}{2} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} = 12.5 \text{ cm}^2$$

であるから、 $4 \times 12.5 \text{ cm}^2 = 50 \text{ cm}^2$ となる。

はじめに、不整形照射野の面積 A を求める。

不整形照射野の面積 A は照射野面積からコリメートされている
4箇所の面積を引けばよい。つまり、 $300 \text{ cm}^2 - 50 \text{ cm}^2 = 250 \text{ cm}^2$ と
なる。

次に照射野周囲長 P を求める。MLCでコリメートされている
辺の長さは

$$\sqrt{(5 \text{ cm})^2 + (5 \text{ cm})^2} = \sqrt{50} \text{ cm}$$

となる。これより、照射野周囲長 P はすべての辺の長さを足せば良いので、

$$5 \text{ cm} + 5 \text{ cm} + 10 \text{ cm} + 10 \text{ cm} + 4(\sqrt{50} \text{ cm}) = 30 + 4\sqrt{50} \text{ cm} \doteq 58.3 \text{ cm}$$

●等価面積法(ルートA法)の場合

$$A_c = A \text{ より, } A_c = \sqrt{250} \doteq 15.8 \text{ cm}$$

●面積周囲長法(A/P法)の場合

$$A_c = \frac{A}{P} \times 4 \text{ より, } A_c = \frac{250}{58.3} \times 4 \doteq 17.2 \text{ cm}$$

解答: _____ [cm]

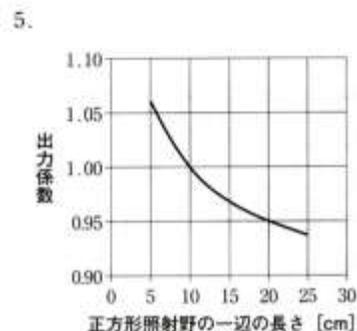
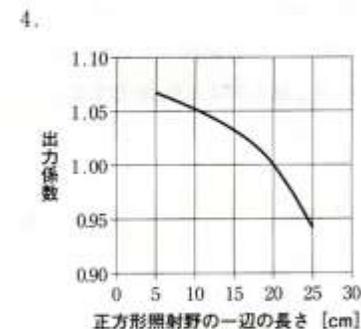
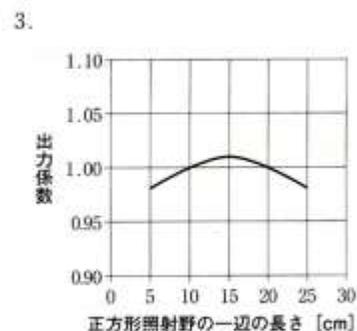
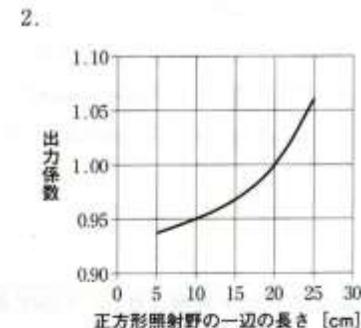
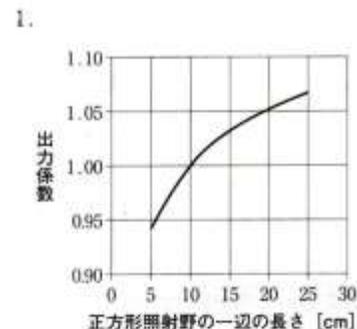
解答: _____ [cm]

小テスト

問題1 正しいのはどれか。

1. TMRとPDDは深さに依存しない。
2. TMRとTPRは距離に依存しない。
3. TMRとPDDは照射野の大きさに依存しない。
4. TARとPDDはいずれもSADは一定である。
5. TMRとTPRはいずれもSSDは一定である。

問題2 高エネルギーX線の照射野の大きさと出力係数との関係を示したグラフはどれか。



問題3 組織最大線量比TMRについて正しいのはどれか。

- a. SSD一定での深さによる吸収線量の変化である
- b. SAD(STD)一定での深さによる吸収線量の変化である
- c. 組織最大線量比と深部線量百分率は計算式で相互に変換できる
- d. 組織最大線量比の基準深は線量最大深である
- e. 組織最大線量比の基準深は10 g/cm²である

1. a,b,c 2. a,b,e 3. a,d,e 4. b,c,d 5. c,d,e