

1章 MU 値計算法の概要

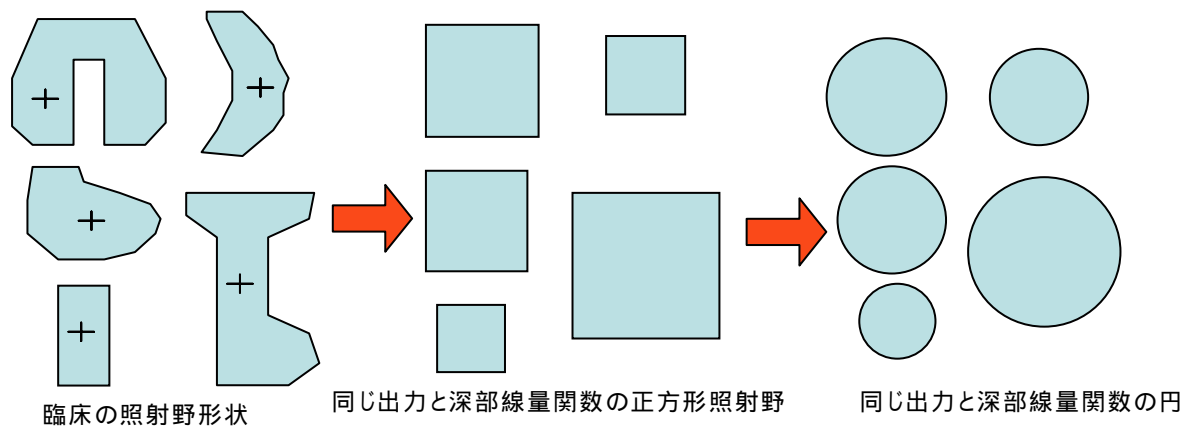
1-1 MU 計算の基本事項

実際に Excel で MU 値を計算する場合の重要なポイントを説明する。

1. MU 計算の基本は、矩形照射野や不整形照射野を、計算可能な等価正方形の一辺または等価円の半径の長さに変換して計算に利用する。

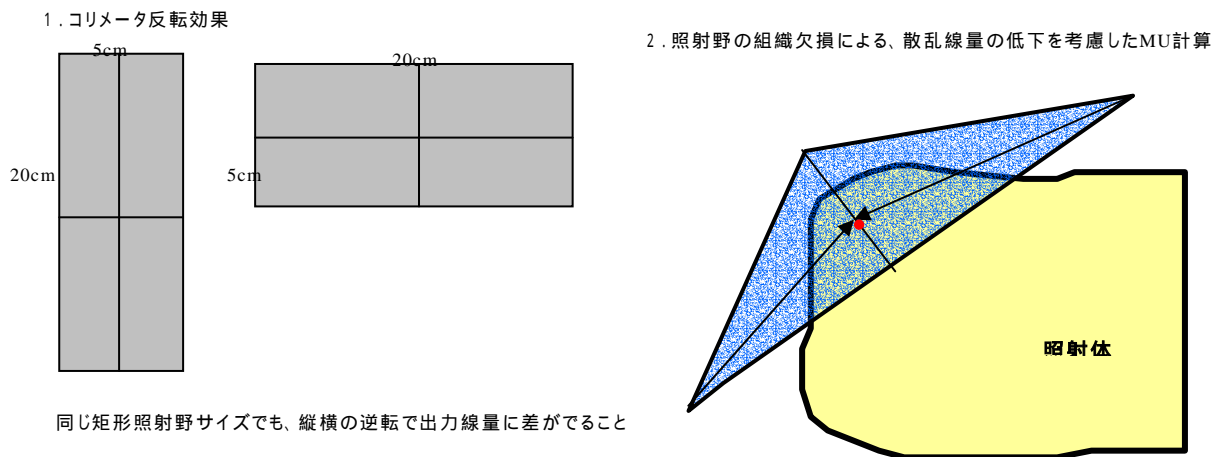
ここでの“等価”とは、同じ出力または同じ深部線量関数 (TMR , TPR) を示す照射野のことである。様々な形をした照射野はそれと同じ出力または同じ深部線量関数の正方形照射野、つまり“等価正方形”に変換する。加速器の基礎ビームデータは正方形で取得するので、等価正方形を利用することで MU 計算ができるようになる。

不整形照射野の場合、等価円の半径を利用することで、複雑な形状にも対応可能となる。正方形照射野の1辺を等価円の半径に変換する方法は後で述べるが、簡単な計算式であり変換は容易である。



2. 出力係数 (旧照射野係数) をコリメータ散乱係数とファントム散乱係数に分離する。

装置ヘッド内の散乱線量とファントム (照射体) の散乱線量を分離評価することで、以下の図に示す利点が生まれる。



3. 出力係数・深部線量関数 (TMR or TPR)・軸外補正などの近似多項式を Excel を利用して作成、それを利用して各数値を決定する。

では実際の計算式を次に示す (計算式が多く退屈かも知れませんが重要な部分なのでお許し下さい)

1-2 モニタ単位数算出の計算式

正方形および矩形照射野における MU 値を求めるための、一般的な式を下記に示す。

$$MU = \frac{D(d,s)}{DMU \cdot S_c(c) \cdot OAF(r) \cdot S_p(s) \cdot TMR(d,s) \cdot WF(d,s) \cdot TF(d,s) \cdot \left(\frac{SCD}{SAD}\right)^2 \cdot (Others\ factors)}$$

ここで

- MU : モニタ単位数 (MU 値)
- $D(d,s)$: 深さ d , 照射野 s , の線量評価点に対して処方された線量 (cGy)
- DMU : 基準深の線量率 (cGy/MU)
- $S_c(c)$: 上下絞り開度に対する等価正方形照射野の辺の長さ c におけるコリメータ散乱係数
- $OAF(r)$: アイソセントラ面でのコリメータ回転中心から線量計算点までの距離 r での軸外補正係数
 $OAF(r) = A_0(r) \cdot G$ で表される. $A_0(r)$: 空中軸外線量比 G : 距離の逆二乗補正
- $S_p(s)$: 患者投影等価正方形照射野の辺の長さ s における、ファントム散乱係数
- $TMR(d,s)$: 患者投影等価正方形照射野の辺の長さ s , 深さ d の組織最大線量比
- $WF(d,s)$: ウェッジフィルタ係数 (深さ・照射野に依存する)
- $TF(d,s)$: シャドウトレイ係数 (深さ・照射野に依存する)
- SCD : 線源計算点間距離
- SAD : 線源中心軸間距離 (定格治療距離 通常:100cm)
- $Other\ factors$: その他、照射法により必要となる補正係数

次に不整形照射野における MU 値の計算式を示す。

$$MU = \frac{D(d,s)}{DMU \cdot S_c(c) \cdot OAF(r) \cdot S_p(r) \cdot TMR(d,r) \cdot WF(d,s) \cdot TF(d,s) \cdot \left(\frac{SCD}{SAD}\right)^2 \cdot (Other\ factors)}$$

矩形照射野との違いを下記する。

- $S_p(r)$: 患者投影等価円形照射野の半径の長さ r における、ファントム散乱係数
- $TMR(d,r)$: 患者投影等価円形照射野の半径の長さ r , 深さ d の組織最大線量比

矩形と不整形の差は、媒質 (患者・ファントム) の照射体積により変化する、 S_p と $TMR(TPR)$ を、

矩形照射野・・・等価正方形照射野の1辺

不整形照射野・・・等価円照射野の半径 で処理する点である。

両者は別のものではなく、下記に示す式を利用することで、正方形照射野の辺と等価の円形照射野の半径を求めることができ、基礎ビームデータは同一のものを使用できる。

$$r = 0.5611 s$$

r : 等価円形照射野の半径 s : 等価正方形の1辺

保科の MU 値計算手法では、MU 計算に使用する、出力係数・深部線量関数 (TMR or TPR)・軸外補正などの近似多項式を作成し、それを利用して各数値を算出する手法である。

1-3 不整形照射野の TMR(TPR)

不整形照射野で使用する $TMR(d, r)$ は、次式から求める。

$$TMR(d, r) = \frac{\sum_{i=1}^n [TMR(d, r_i) \cdot S_p(r_i)]}{\sum_{i=1}^n S_p(r_i)} \quad \text{式(1)}$$

$TMR(d, r_i)$: i 番目の扇形の計算点 Q から照射野端までの距離 r_i を、等価円形照射野の半径とした深さ d での TMR

$S_p(r_i)$: i 番目の扇形の計算点 Q から照射野端までの距離 r_i を、等価円形照射野の半径とした S_p

不整形照射野の TMR は、図 1 に示すように照射野を計算点から等間隔 (10° 程度) で放射状に分割し、その計算点から照射野端までの距離を計測、それを等価円形照射野の半径 r_i とし、その長さの $TMR(d, r_i)$ と $S_p(r_i)$ の積を、各角度で計算し合計する、同じように求めた $S_p(r_i)$ の合計で割った値となる。

図 1 で示す、扇形の 7 番目のように、途中で遮蔽された部分がある場合、

$$S_p(i=7) = S_p(r_c) - S_p(r_b) + S_p(r_c)$$

つまり、 r_b と r_c の間の部分を差し引く形となる。

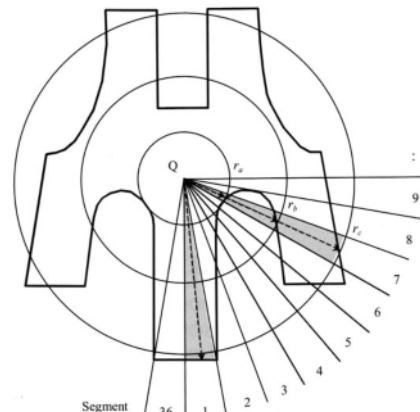


図 1 照射野放射状分割と距離計測の例

上記の式(1)を解説すると、不正形照射野の TMR は、図 1 で示す各扇形の合算により照射野全体の TMR が得られる。Khan の論文によれば、このときの $\overline{TMR} = (d, r_d)$ は、一次成分 (ゼロ照射野の TMR と S_p) と散乱最大線量比: SMR を用いることで次式より得られる。

$$\overline{TMR}(d, r_d) = [TMR(d, 0) + \overline{SMR}(d, r_d)] \cdot \frac{S_p(0)}{\overline{S_p}(r_d)} \quad \text{式(2)}$$

また

$$\overline{SMR}(d, r_d) = \overline{TMR}(d, r_d) \cdot \frac{S_p(r_d)}{S_p(0)} - TMR(d, 0) \quad \text{式(3)}$$

式(2),(3)より、ゼロ照射野と散乱最大線量比:SMRを除くように修正した保科の展開を下記に示す。

$$\begin{aligned}
 \overline{TMR}(d, r_d) &= \left[TMR(d, 0) + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[TMR(d, r_i) \cdot \frac{S_p(r_i)}{S_p(0)} - TMR(d, 0) \right] \right] \cdot \frac{S_p(0)}{S_p(r_d)} \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[TMR(d, r_i) \cdot \frac{S_p(r_i)}{S_p(0)} \right] \cdot \frac{S_p(0)}{S_p(r_d)} \\
 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[TMR(d, r_i) \cdot S_p(r_i) \right] \cdot \frac{1}{S_p(r_d)} \\
 &= \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[TMR(d, r_i) \cdot S_p(r_i) \right]}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_p(r_i)} \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^n \left[TMR(d, r_i) \cdot S_p(r_i) \right]}{\sum_{i=1}^n S_p(r_i)}
 \end{aligned}$$

ゼロ照射野の TMR と S_p は、直接測定のできないため、測定誤差が起きやすい、小照射野の測定結果から、外挿値して求める仮定量であり、その点に問題が潜んでいる可能性がある。しかしここで使用する式では、ゼロ照射野の TMR と S_p を利用しないで、 TMR を求めることができる。

1-3 ファントム散乱係数(S_p)

出力係数は次の式で表される

$$S_{cp} = S_c \times S_p \quad \text{式(4)}$$

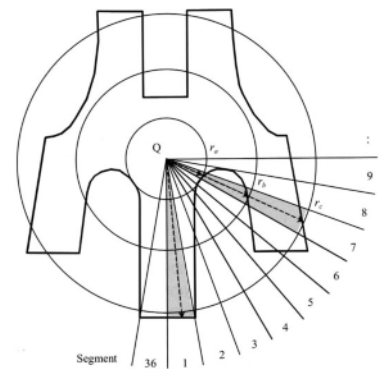
S_p は直接測定することが難しいことから、全散乱係数(S_{cp})と S_c を使って次式より求める。

$$S_p = \frac{S_{cp}}{S_c} \quad \text{式(5)}$$

不整形照射野全体の S_p である $S_p(iire)$ は次式で表される

$$S_p(iire) = \frac{\theta}{2\pi} \sum_{i=1}^n S_p(r_i) \quad \text{式(6)}$$

は 右図に示すように各扇形の角度は 10° 程度で実施する。



つまり、計算点 Q から照射野端までの距離を、等価円形照射野の半径 r_i として $S_p(r_i)$ を求め、各扇形から求めた $S_p(r_i)$ の平均値を不整形照射野の S_p とする。

1-4 コリメータ散乱係数(S_c)

コリメータ散乱係数(S_c)は、装置の構造により S_c の等価照射野の算出方法が異なる。

a. 上絞りと下絞りがモノブロックのタイプ(第3段 MLC タイプ Varian)

次式を使用して S_c を求めるための、等価正方形照射野の1辺 (C_{eq})を算出する。他の MLC タイプの装置においても、矩形照射野では次式を使用して C_{eq} を求める。

$$C_{eq} = \frac{(1 + k)X \cdot Y}{kX + Y}$$

k : コリメータ反転効果補正係数
 X : 下絞りの開度
 Y : 上絞りの開度

コリメータ反転効果は、モニタ線量計に近い上絞りの開度が狭いほど影響が大きい。ひとつの k 値で全ての矩形照射野を満足することは無理であり、何種類か矩形照射の S_c を測定、日々の臨床で多いパターンを優先して k を決定するか、 k を照射パターンにより使い分ける方法がある。従って同じ装置でも施設により使用する k 値は同じとは限らない。また第3段 MLC の場合、その照射開度が S_c に与える影響は少なく、多くの場合無視しても問題ない。

MU 計算には、上記の式で S_c を求めるための等価正方形照射野の1辺 (C_{eq})を算出、その結果に対応する S_c を使用する。

b. 下段絞り MLC タイプ (Siemens)

下段絞りが不整形であり、下段絞りの開度が S_c の変化に及ぼす影響を無視できないため、D.Gorg と A.Dutreix らの報告ではリーフ1枚ごとに補正係数を求める方法を提唱しているが、コリメータ反転効果を過小評価する可能性がある。ここで示す方法では TMR や S_p のときと同様に、照射野を計算点から等間隔 (10° 程度) で放射状に分割、計算点から照射野端までの距離の平均値から等価円形照射野の S_c を求める。この方法ではコリメータ反転効果は考慮していないが、日常の MU 検証には耐えうる精度がある。

次式を利用し、等価正方形1辺から等価円形照射野の半径に変換する。

$$r = 0.5611s \quad r: \text{等価円形照射野の半径} \quad s: \text{等価正方形の1辺}$$

c. 上段絞り MLC タイプ (Elekta)

上段絞りが MLC タイプの場合、 S_c は不整形照射野の影響を大きく受ける。上記の下段絞り MLC タイプと同じ方法で S_c を求めることがベストであろう。