
テクニカルノート

簡単な近似法による不整形照射野の照射野係数, TPR の計算

荒木 不次男・熊谷 孝三・井芹 卓見

河野 孟

国立熊本病院放射線科

(論文受理 1990年6月6日)

(最終論文受理 1990年11月10日)

(Code No. 763, 222, 742)

Key words : irregularly shaped field, scattered radiation, equivalent square field

**SIMPLE APPROXIMATION METHOD FOR DETERMINING FIELD FACTORS
AND TISSUE-PEAK RATIOS OF IRREGULARLY SHAPED FIELDS.**

FUJIO ARAKI KOZO KUMAGAI TAKUMI ISERI

TSUTOMU KAWANO

Department of Radiology, Kumamoto National Hospital

(Article received. Jun. 6. 1990)

Summary

Dose calculations of irregularly shaped fields can be made by the Clarkson technique, which, however requires considerable time and is thus not practical.

We investigated a simple approximation method for determining field factors (F_A) and tissue-peak ratios (TPRs) for irregularly shaped fields.

By this method, we approximated scatter dose by the ratio of area for an irregularly shaped field to that for the overall field (without blocking).

Maximum error of equivalent square fields as determined by this method for irregularly shaped fields was -1.3% for field factors, $+2.1\%$ for TPRs and $+1.4\%$ for the $F_A \times \text{TPRs}$.

1. 緒 言

CT・MR が進歩した今日、これらの画像情報からターゲットボリュームが容易にしかも正確に決定でき、健全組織を保護し、できる限り病巣に線量を集中させる不整

形照射野が多く用いられるようになってきた¹⁾。

不整形照射野の深部線量計算は Clarkson 法²⁾ とそのいくつかの変法^{3,4)} から精度よく行えるが、計算に多くの時間を費やし、治療計画用コンピュータが普及した今日でも個々の治療への適応は、まだ一部の施設に限られて

簡単な近似法による不整形照射野の照射野係数, TPR の計算 (荒木・他)

いるのが現状である。

また, 比較的簡単で, 精度いい方法として A/P 法⁵⁻⁸⁾ や \sqrt{A} 法⁹⁾ による不整形照射野の等価正方形がよく使用されているが, A/P 法はこれまでの報告^{7,8)}にあるように, 照射野周囲長が不整形照射野の形状に依存するため, 凹凸の入り込んだ複雑な形状では過小補正となる。ただし, 多分割コリメータの中心軸の線量計算は各分割絞りの中心を結んでできる実効照射野周囲長 P_e を用いた A/P_e^2 の使用で近似できる。一方, \sqrt{A} 法は細長い照射野で先端からの散乱線の寄与が少なくなり, 過大補正となる。

今回われわれは, 鉛ブロックを使用した不整形照射野について, A/P 法および \sqrt{A} 法の欠点を補い, 不整形照射野の形状にあまり左右されない深部線量計算の近似法について検討したので報告する。

2. 使用機器および実験方法

2.1 使用機器

放射線発生装置: 三菱電機社製 ML-15M III

線量計: IONEX 2500/3 型

プローブ: NE 2505/3A 0.6 cc

シャドウトレイ: 穴あきルサイト板, 厚さ1.0 cm

ファントム: Mix-Dp 40×40×30 cm³

鉛ストレートブロック: 密度11.3 g/cm³, 厚さ7.5 cm (透過率は校正深で2.6%)

2.2 実験方法

2.2.1 不整形照射野の近似法

照射野係数および組織ピーク線量比 (tissue-peak ratio: 以下これを TPR と略す) と正方形照射野面積の関係は両対数グラフで表すと, Fig. 1, 2 に示すように直線的な比例関係になる⁷⁾。言い換えれば, 散乱線量は面積に比例して増加する。われわれはこの関係を不整形照射野の散乱線補正の近似に用い, 照射野係数および TPR が既知の矩形照射野(不整形照射野のコリメータ照射野)に対するその不整形照射野の面積比によって, 散乱線量を近似補正した。また, 矩形照射野には A/P 法によって求めた等価正方形照射野を用いた。

これより, 不整形照射野の等価正方形照射野の一辺の長さ Eq. Sq. (Side length of the equivalent square field) の近似式は

$$\text{Eq. Sq.} = (4A_0/P) \times (\sqrt{A_1/A_0}) \quad (1)$$

で求まる。ここで, $4A_0/P$ は矩形照射野の等価正方形照射野であり, A_1 , A_0 はそれぞれ不整形照射野とその矩形照射野の面積である。

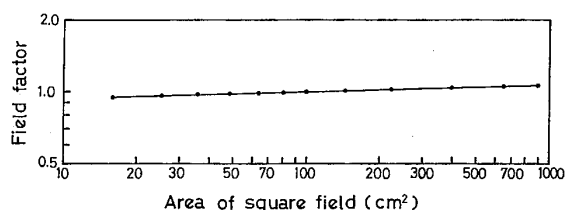


Fig. 1 Field factors plotted as a function of square field area for 10 MV X-rays.

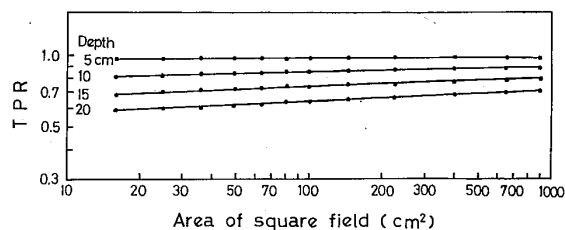


Fig. 2 Tissue peak ratios plotted as a function of square field area for 10 MV X-rays.

(1)式で求めた(i)面積比補正法 (area-ratio correction method, 以下 ARC 法とよぶ) による等価正方形照射野と不整形照射野の深部線量の比較を行った。また, (ii)面積/周囲長法 (A/P 法) および(iii)等価面積法 (\sqrt{A} 法) についても比較した。

2.2.2 不整形照射野の選択

3種類の近似法を比較するために, Fig. 3 に示すような不整形照射野を選択した。まず, ブロックのアライメントを同じにして小, 中, 大サイズの照射野を各2種類選択した。また, 婦人科領域の照射野として, 四隅カット型とそれにセンターブロックのあるものを選択した。最後に細長い照射野として3種類を選択し, 合計11種類について検討した。

2.2.3 深部線量測定および評価

測定のジオメトリーを Fig. 4 に示す。測定点はビーム中心軸とした。ただし, センターブロックのあるものはビーム中心軸の左右5 cmの2点とした。また, すべての測定はシャドウトレイを装着して行い, 不整形照射野と各近似法による等価正方形照射野は同時に測定した。不整形照射野における各近似法の線量評価は照射野係数 (F_A), 組織ピーク線量比 (TPR) で比較した。

3. 結 果

Table 1~7 に, 各不整形照射野について各近似法で求めた深部線量の比較結果を示す。なお, Table の Eq. Sq. (Side length of the equivalent square field) は等価正方形照射野の一辺の長さで, $\Delta\%$ は不整形照射野の実測値と各近似法の偏差 (誤差) で次式より求めた。

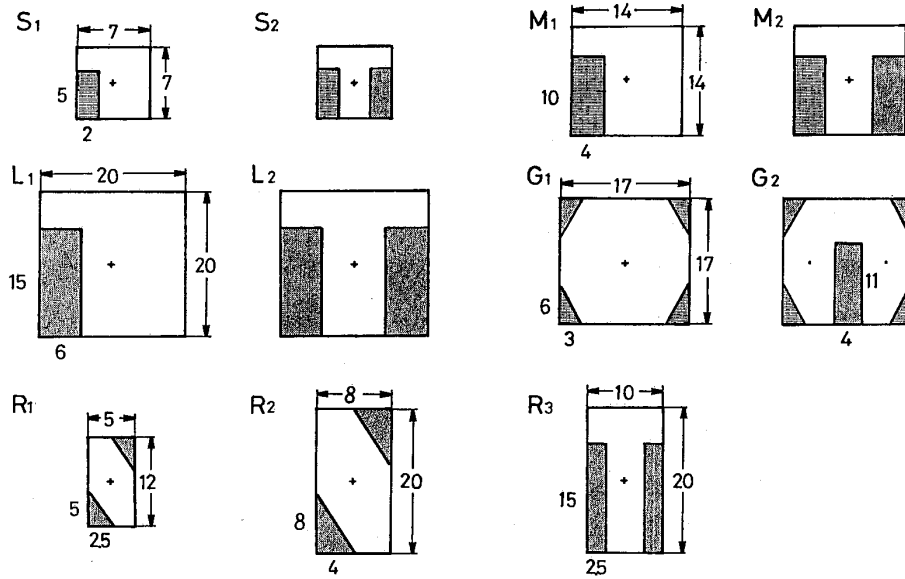


Fig. 3 Eleven kinds of irregularly shaped fields used for measurement of field factors and TPRs. S_{1-2} , M_{1-2} , L_{1-2} , G_{1-2} , R_{1-3} show differences in irregularly shaped fields and field, respectively.

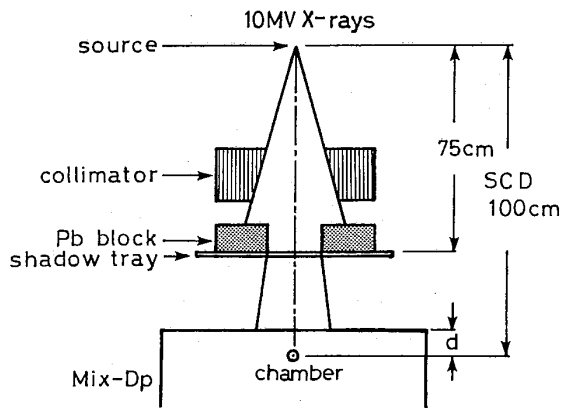


Fig. 4 Geometry for measurement of an irregularly shaped field by lead blocks.

$$\Delta\% = \frac{\text{各近似法} - \text{不整形照射野の実測値}}{\text{不整形照射野の実測値}} \times 100$$

また、Table 1~4 の不整形照射野では矩形照射野が正方形照射野であり、(i), (iii)の近似法は同じ等価正方形照射野になるので、(iii)については省略した。そして、Table 4 の照射野 G_2 については A/P 法は等価正方形照射野が 10.5 cm^2 となり、誤差が大きくなることが予想されたので除外した。

まず、Table 1~3 の片側ブロックの照射野 S_1 , M_1 , L_1 の比較では ARC 法、A/P 法とも照射野係数、TPR は $\pm 1.5\%$ 以内でよく一致した。両側ブロックの照射野 S_2 , M_2 , L_2 についても ARC 法は照射野係数で $-0.2\% \sim$

1.3% 、TPR で $-0.2\% \sim +2.1\%$ と比較的誤差が少なかった。一方、A/P 法は TPR は $-1.2\% \sim +0.4\%$ であるが、照射野係数が照射野 S_2 で -3.6% の大きな誤差になった。

次に、Table 4 の照射野 G_1 では ARC 法、A/P 法とも 1% 以内の誤差であった。照射野 G_2 については左右のジオメトリを揃えるために、ARC 法で求めた正方形照射野に等価な長方形照射野 (BJR table¹⁰) を使用し、ビーム中心軸から左右 5 cm の点で比較した。この結果、最大誤差が左で $+1.5\%$ 、右で $+0.8\%$ と誤差の少ない off-center ratio (OCR) を示した。

さらに、Table 5~7 の矩形照射野が長方形の照射野 R_1 , R_2 , R_3 でも ARC 法は照射野係数で $\pm 0.4\%$ 、TPR $-0.5\% \sim +1.1\%$ と一致したが、A/P 法は照射野 R_3 で照射野係数が -1.7% 、 \sqrt{A} 法で TPR が最大誤差 $+2.2\%$ とやや大きくなった。

4. 考 察

TPR の比較ではどの近似法も $\pm 2\%$ 程度の誤差内であるが、傾向としては ARC 法は凹凸が入り込んだ細長い型で過大補正になり、A/P 法は四隅カット型で矩形照射野より過大補正、凹凸が入り込んだ型では逆に過小補正となる。また、 \sqrt{A} 法は細長い型で矩形照射野より過大補正になるが、どの近似法でも大きな誤差がでなかったのは使用したエネルギーが高く、ピーク深でノーマライズしているためである。

簡単な近似法による不整形照射野の照射野係数, TPR の計算 (荒木・他)

Table 1 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped fields of open field size 7×7 cm².

	S_1					S_2				
	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 6.2 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 5.6 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 5.4 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 4.1 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$
F_A	0.969	0.969	0.960	0	-0.9	0.965	0.956	0.930	-0.9	-3.6
Depth (cm)										
2.0	0.977	0.977	0.977	0	0	0.977	0.977	0.981	0	+0.4
2.5	0.995	0.998	1.0	+0.3	+0.5	1.0	1.0	1.0	0	0
3.0	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0	1.0	1.0	0	0
5.0	0.959	0.959	0.959	0	0	0.954	0.959	0.955	+0.5	+0.1
10.0	0.823	0.825	0.821	+0.2	-0.2	0.817	0.825	0.815	+1.0	-0.2
15.0	0.700	0.700	0.697	0	-0.4	0.689	0.696	0.682	+1.0	-1.0
20.0	0.591	0.591	0.587	0	-0.7	0.580	0.585	0.573	+0.9	-1.2

Table 2 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped fields of open field size 14×14 cm².

	M_1					M_2				
	Irreg. Field	ARC Eq. Sq. 12.5 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 11.1 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 10.8 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 8.3 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$
F_A	1.020	1.018	1.009	-0.2	-1.1	1.011	1.009	0.991	-0.2	-2.0
Depth (cm)										
2.0	0.993	0.991	0.987	-0.2	-0.6	0.989	0.987	0.982	-0.2	-0.7
2.5	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0	1.0	0.996	0	-0.4
3.0	0.998	0.996	1.0	-0.2	+0.2	0.998	1.0	1.0	+0.2	+0.2
5.0	0.959	0.963	0.965	+0.4	+0.6	0.963	0.965	0.960	+0.2	-0.3
10.0	0.846	0.850	0.846	+0.5	0	0.840	0.848	0.839	+0.7	-0.1
15.0	0.731	0.739	0.732	+1.1	+0.1	0.722	0.732	0.719	+1.4	-0.4
20.0	0.629	0.635	0.627	+1.0	-0.3	0.617	0.627	0.612	+1.6	-0.8

Table 3 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped fields of open field size 20×20 cm².

	L_1					L_2				
	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 17.6 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 15.5 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 14.8 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 11.0 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$
F_A	1.044	1.040	1.031	-0.4	-1.2	1.040	1.027	1.009	-1.3	-3.0
Depth (cm)										
2.0	0.996	0.996	0.991	0	-0.5	0.996	0.996	0.987	0	-0.9
2.5	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0	1.0	1.0	0	0
3.0	0.996	0.996	0.996	0	0	0.996	0.996	1.0	0	+0.4
5.0	0.962	0.962	0.961	0	-0.1	0.962	0.966	0.965	+0.4	+0.3
10.0	0.852	0.860	0.854	+0.9	+0.2	0.847	0.858	0.846	+1.3	-0.1
15.0	0.746	0.757	0.751	+1.5	+0.7	0.736	0.750	0.732	+1.9	-0.5
20.0	0.648	0.655	0.648	+1.1	0	0.634	0.647	0.627	+2.1	-1.1

Table 4 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped fields of open field size 17×17 cm².

	G_1					$G_2(L)^*$			$G_2(R)^*$		
	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 15.9 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 17.2 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 13x17* (cm ²)	ARC $\Delta\%$	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 13x17* (cm ²)	ARC $\Delta\%$
F_A	1.027	1.027	1.031	0	+0.4	1.031	1.031	0	1.018	1.022	+0.4
Depth (cm)											
2.0	0.996	0.996	0.996	0	0	0.991	0.996	+0.5	0.991	0.991	0
2.5	1.0	1.0	1.0	0	0	1.0	1.0	0	1.0	1.0	0
3.0	0.996	1.0	1.0	+0.4	+0.4	0.996	0.996	0	0.996	0.996	0
5.0	0.961	0.961	0.964	0	+0.3	0.957	0.958	+0.1	0.961	0.960	-0.1
10.0	0.858	0.858	0.858	0	0	0.836	0.845	+1.1	0.838	0.843	+0.6
15.0	0.750	0.750	0.755	0	+0.7	0.720	0.728	+1.1	0.721	0.726	+0.7
20.0	0.651	0.647	0.657	-0.6	+0.9	0.616	0.625	+1.5	0.618	0.623	+0.8

* at 5cm from central axis
Eq. Sq. 14.5²

Table 5 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped field of open field size 12×5 cm².

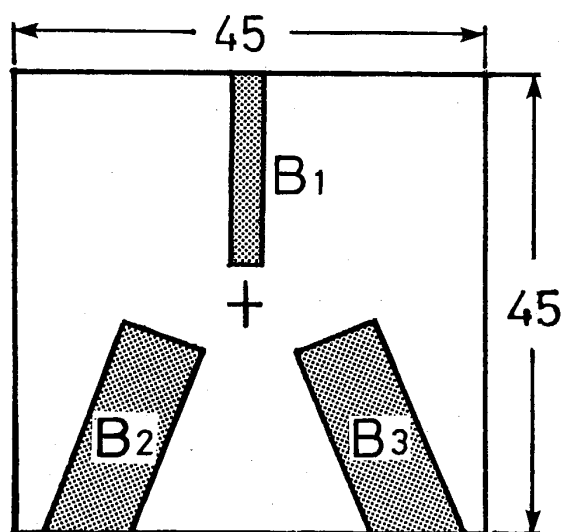
	R_1						
	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 6.3 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 6.3 ² (cm ²)	\sqrt{A} Eq. Sq. 6.9 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	\sqrt{A} $\Delta\%$
F_A	0.965	0.969	0.969	0.973	+0.4	+0.4	+0.8
Depth (cm)							
2.0	0.977	0.977	0.977	0.977	0	0	0
2.5	1.0	0.995	0.995	1.0	-0.5	-0.5	0
3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0	0
5.0	0.959	0.963	0.963	0.959	+0.4	+0.4	0
10.0	0.826	0.822	0.822	0.827	-0.5	-0.5	+0.1
15.0	0.702	0.699	0.699	0.705	-0.4	-0.4	+0.4
20.0	0.592	0.589	0.589	0.595	-0.5	-0.5	+0.5

Table 6 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped field of open field size 20×8 cm².

	R_2						
	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 10.2 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 10.3 ² (cm ²)	\sqrt{A} Eq. Sq. 11.3 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	\sqrt{A} $\Delta\%$
F_A	1.0	1.0	1.0	1.004	0	0	+0.4
Depth (cm)							
2.0	0.989	0.985	0.985	0.991	-0.4	-0.4	+0.2
2.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0	0
3.0	1.0	0.996	0.996	1.0	-0.4	-0.4	0
5.0	0.960	0.960	0.960	0.960	0	0	0
10.0	0.845	0.841	0.841	0.846	-0.5	-0.5	+0.1
15.0	0.726	0.721	0.721	0.731	-0.7	-0.7	+0.7
20.0	0.622	0.619	0.619	0.626	-0.5	-0.5	+0.6

Table 7 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for irregularly shaped field of open field size 20×10 cm².

	R_3						
	Irreg. field	ARC Eq. Sq. 10.5 ² (cm ²)	A/P Eq. Sq. 8.3 ² (cm ²)	\sqrt{A} Eq. Sq. 11.2 ² (cm ²)	ARC $\Delta\%$	A/P $\Delta\%$	\sqrt{A} $\Delta\%$
F_A	1.004	1.0	0.987	1.004	-0.4	-1.7	0
Depth (cm)							
2.0	0.987	0.985	0.982	0.991	-0.2	-0.5	+0.4
2.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0	0
3.0	1.0	0.996	1.0	1.0	-0.4	0	0
5.0	0.958	0.960	0.960	0.960	+0.2	+0.2	+0.2
10.0	0.835	0.841	0.834	0.846	+0.7	-0.1	+1.3
15.0	0.718	0.721	0.713	0.731	+0.4	-0.7	+1.8
20.0	0.612	0.619	0.605	0.626	+1.1	-1.1	+2.2



$$\begin{aligned}
 A_1 &= A_0 - (B_1 + B_2 + B_3) \\
 &= 39.9^2 \text{ cm}^2 \quad (\text{SCD}=150 \text{ cm}) \\
 &= 26.6^2 \text{ cm}^2 \quad (\text{SCD}=100 \text{ cm})
 \end{aligned}$$

Fig. 5 Mantle field of open field size $45 \times 45 \text{ cm}^2$ defined at a source-chamber distance (SCD) 150 cm. A_1 , A_0 and B_{1-3} show the areas of the irregularly shaped field, open field and lead blocking, respectively.

一方、照射野係数については各近似法で有意な差があった。ARC法は凹凸の入り込んだ細長い照射野でやや過小補正になるが、ほぼ実測値に一致する。A/P法は凹凸が入り込んだ型ではかなり過小評価となる。 \sqrt{A} 法はARC法と同じ傾向だがARC法より誤差が大きくなる。

矩形照射野の照射野係数はコリメータとファントムの散乱から求め、高エネルギー領域では前方散乱が主であるため、ファントムよりもコリメータの散乱の影響が大きくなる¹¹⁾。不整形照射野ではコリメータと鉛ブロックからの散乱線量が矩形照射野のコリメータ散乱線量と等しい¹²⁾と考えられ、照射野係数はファントム散乱に依存する。したがって、不整形照射野の照射野係数は矩形照射野のコリメータ散乱と不整形照射野のファントム散乱の差を考慮した正方形照射野になる。

しかし、これまでの報告⁹⁾にもあるが、われわれの実験結果においても不整形照射野の照射野係数の代わりに矩形照射野の照射野係数を使用して、+1.3%以内で近似できた。これは、エネルギーが高いためファントム散乱が照射野の大きさにあまり依存しないためである。

このことから、不整形照射野の近似として照射野係数とTPRを一つの等価正方形照射野で表すことには制限が生じる。しかし、われわれの近似のARC法では照射野

係数とTPRの最大誤差をそれぞれ-1.3%、+2.1%におさめることが可能であり、全体の散乱補正となる照射野係数とTPRの積は最大誤差が+1.4%と実測値によく一致し、一つの等価正方形照射野で十分近似できる。

さらに、ARC法はFig. 5のマントル照射においても、Table 8に示すように、source-chamber distance (SCD) が150 cmであるため、コンプトン電子の影響が少ないビルドアップ領域を除けば、TPRの誤差は小さい。また、逆2乗則より補正して求めたSCD100 cmに対する照射野係数も+2.0%の誤差であり、臨床的に十分実用可能である。

\sqrt{A} 法では照射野係数とTPRの積が最大+2.2%の誤差であるが、A/P法は-4.7%にもなるので照射野係数に不整形照射野の矩形照射野を用いれば照射野係数が+1.3%以内におさまる、照射野係数とTPRの積は最大+1.7%の誤差となる。結局、A/P法は照射野係数とTPRに対する二つの等価正方形照射野が必要である。

4. 結 論

鉛ブロックを使用した不整形照射野の照射野係数、TPRの計算に、等価正方形による近似を試みた。その近似法として、われわれが求めた面積比補正法 (ARC法) は不整形照射野の実測値との誤差が少なく、また、計算は電卓で簡単に行えるので、臨床の場では簡便で実用的な方法と考える。

A/P法を使用する場合は照射野係数に、不整形照射野の矩形照射野に対する照射野係数を用いた方が誤差が少

Table 8 Comparison of field factors (F_A) and TPRs for a mantle field of open field size $45 \times 45 \text{ cm}^2$ defined at a source-chamber distance (SCD) 150 cm (open field size $30 \times 30 \text{ cm}^2$ at SCD 100 cm)

	Mantle field	ARC Eq. Sq. 26.6^2 cm^2 at SCD 100 cm	$\Delta \%$
F_A	1.033*	1.054	+2.0
Depth (cm)			
1.0	0.855	0.927	+8.4
2.0	0.987	1.0	+1.3
2.5	0.998	1.0	+0.2
3.0	1.0	0.996	-0.4
5.0	0.970	0.966	-0.4
10.0	0.869	0.868	-0.1
15.0	0.771	0.771	0
20.0	0.677	0.675	-0.3

簡単な近似法による不整形照射野の照射野係数, TPR の計算 (荒木・他)

ない。 \sqrt{A} 法は不整形照射野の矩形照射野が細長い場合に過大補正となる。

稿を終るに臨み、御校閲戴いた熊本大学医学部附属病院中央放射線部、高田卓雄技師並びに熊本大学医療技術短期大学部、東田善治先生に感謝致します。

なお、第40回日本放射線技術学会九州部会において、本論文の要旨を発表した。

文 献

- 1) Japanese CMS Users Meeting 資料: Calculations for Irregular Fields. (1989).
- 2) Clarkson JR: A note on depth doses in fields of irregular shape. *Brit. J. Radiol.*, **14**, 265-268, (1941).
- 3) Cundiff JH, Cunningham JR, Golden R, et al.: A method for the calculation of dose in the radiation treatment of Hodgkin's disease. *Am. J. Roentgenol.*, **117**, 30-44, (1973).
- 4) Edwards FH, Coffey CW: A new technique for the calculation of scattered radiation for 10 MV photon beams. *Med. Phys.* **8**, 228-230, (1981).
- 5) Wrede DE: Central axis tissue-air ratios as a function of area/perimeter at depth and their applicability to irregularly shaped fields. *Phys. Med. Biol.*, **17**, 548-554, (1972).
- 6) Wrede D, Tai D, Edwards F, et al.: An inter-comparison between two methods of obtaining percentage depth doses for irregular shaped fields and comparison of each method with experimental data for ^{60}Co and 10 MV X rays. *Brit. J. Radiol.*, **52**, 398-404, (1979).
- 7) 尾内能夫, 入船寅二, 都丸禎三, 他: 面積/周囲長による TAR 計算法の多分割原体コリメータを用いた不整形照射野への適用. *日医放物理部会誌*, **1**(1), 11-16, (1981).
- 8) 加藤秀起: 10 MV X線不整形照射野における Field Factor について. *日放技学師*, **42**(4), 512-517, (1986).
- 9) Agarwal SK, Wakley J, Scheele RV, et al.: A method of dosimetry for irregularly shaped fields. *Int. J. Radiation oncology Biol. Phys.*, 199-203, (1977).
- 10) 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, (1989).
- 11) Houdek PV, VanBuren JM, Fayos JV: Dosimetry of small radiation fields for 10-MV x rays. *Med. Phys.*, **10**, 333-336, (1983).
- 12) Khan FM, Sewchand W, Lee J, Williamson JF: 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).