深 部 線 量 測 定 に 際 す る 考 察

レントゲン技術専修学校

山 田 勝 彦・滝 内 政 治 郎・木 村 幾 生

(論文受付 昭和40年7月20日)

CONSIDERATION ON THE DEPTH DOSE MEASUREMENT

By KATSUHIKO YAMADA

MASAJIRO TAKIUCHI

IKUO KIMURA

The X-ray Technician Training School,
Kyoto

(Article received : July 20, 1965)

Summary

It is the Percentage depth dose curve that is one of important data of deep therapy. In order to draw this curve, the accurate measurement of the depth dose is required. The authors studied theoretically as well as experimentally the two problems which must be considered in measuring the depth dose in a phantom. These two problems are :

- 1) When a dosimeter is inserted in a phantom, the volume of the dosimeter causes an error in the depth dose measurement.
- 2) X-ray spectrum changes according to the depth of a phantom, which makes an effect on the sensitivity of the dosimeter and causes an error in percentage depth dose curve.

These errors mentioned above are calculated and are measured experimentally. The conclusions on these two errors are obtained as follows :

- 1) In the former case, the volume of the dosimeter has certain effect on the depth dose measurement; when the radius of the dosimeter is 1cm, an error reaches to 6% of accurate depth dose and if that of the dosimeter is 0.5cm, an error reaches to 3%.
- 2) In the latter case, an error of the depth dose measurement reaches to about 1-1.5% in the field which we usually uses.

I. 諸 言

放射線深部治療を実施するに当たって、まず正確な深部線量の測定をすべきことは言うまでもない。一般に深部治療を行なうにはファントム中の深部百分率を測定し、これを使って空中線量の測定値から病巣線量を推定している。したがってわれわれはまずファントム中の

正確な深部線量測定を計らねばならない。

われわれはファントム中の深部線量を測定するに当たって考慮せねばならない2つの問題を取り上げ、若干の理論的考察を加え、実験により確かめてみた。

第一の問題は、ファントム中に深部線量計を直接挿入して深部線量を測定する際、電離槽の指頭部の体積により測定値が変わることである。言い換えれば測定点が

ずれるとも言える。この問題に関する補正法を理論的に検討した。第二の問題は深部百分率に関する補正である。元来深部線量は吸収線量単位(Rad)で表わすべきものであろう。したがって深部百分率も吸収線量の比として考えるべきである。ところが、Rad と R との関係は測定点の X 線エネルギー分布が一定な場合は問題はないが、ファントム表面と、ファントム深部のように X 線のエネルギー分布の異なっていることが予想される場合には、この両者の単位は平行しない。そこでこの量がどの程度変わるものか理論的に考え、併わせ実験を行なった。

II. 線量計の電離槽体積が深部線量に与える影響について

1) 理論的考察

ファントム中に指頭形電離槽を直接に挿入して深部線量の測定をする場合を考えてみる。今ファントムとして水を例にとってみる。その状態を示したものが第 1 図で、横軸に水の深さをとり、縦軸に深部線量をとって空気等価壁の指頭形電離槽を水中に挿入した場合を想定してみる。入射 X 線は水中での吸収、散乱により線量が減少していくが、指頭形電離槽の空洞部までくると、空気体積部通過中の X 線はほとんど線量を減らすことなく実線のような結果を示すであろう。仮にこのような空洞部の挿入といった問題が起こらなければ当然、線量の減少は点線のような形で進むに違いない。もしもこの場合の測定点を電離槽の中心と考えるならば（一般の測定ではこのように考えられている） ΔD_0 だけの補正は当然必要であろう。また逆に電離槽の測定点が移動したものと

第 1 図 水中に電離槽を挿入した場合の深部線量の測定に対する考え方

考えるならば、凡そ電離槽部の前面を測定点と考えることもできる。しかし補正をするならば、測定点を中心部と考えて線量の補正量を考える方が容易である。そこでこの補正方法を理論的に考えてみよう。

イ) 指頭形電離槽の挿入により、水体積の欠損が起こり、一次 X 線の増加が生ずる……… $D'p$

この効果は欠損分の水体積の濾過作用が減少したものと考えればよい。すなわち電離槽中心部から、前面までの水が消えた結果一次 X 線が吸収されなくなり、測定値は $D'p$ だけ増加する傾向にある。

ロ) 指頭形電離槽の挿入になり、水体積の欠損が起こり、二次 X 線（散乱線）の増加が生ずる……… $D's$

この効果は(イ)と同じ効果を二次線について考えたもので、当然散乱線についても濾過作用の減少として働き、電離槽中心部に到達する線量は増加する傾向にある。

ハ) 指頭形電離槽の空気体積と丁度同じ水体積が欠損するため、本来この水体積から一次 X 線により発生していた散乱 X 線が消失し、散乱付加量に減少を来す……… ΔDp

この効果は電離槽中心部から前面までの効果だけではなく、電離槽体積全体について考える必要がある。したがって測定値に対しては線量減少の傾向がある。

ニ) 二次 X 線に対する(ハ)の効果……… ΔDs

先に述べた(イ)の効果は一次 X 線によって発生した散乱 X 線を言うが、(ハ)では散乱 X 線により欠損部の水体積から発生した散乱 X 線（三次線とも言える）について考慮したものである。したがってこれも測定値に対して減少の傾向として働く。

以上述べた 4 項をそれぞれ計算して最後に加え合わせることにによって、電離槽部挿入による補正項が理論的に求められる。

a) $D'p$ の計算

第 2 図に示すように水ファントム中に挿入すべき指頭形電離槽を円筒形として考え、その内側半径を a とする。また水に対する一次 X 線の全吸収係数を μ (cm^{-1}) とすると、矢印で示した radial 方向に相当する線束が受ける吸収の割合は $e^{-\mu a}$ である。したがって濾過作用の減少による線量増加の割合は $e^{\mu a}$ である。一方、円筒の

第 2 図 D_p' 計算のための電離槽断面

中心をはずれた周辺部での割合はこれより小さくなる。 D'_p による補正量を ε_p として、このような幾何学的効果を考慮に入れると、次のような関係式となる。

$$D_p' = D_p e^{\mu a} \left[1 - \mu a \left(1 - \frac{8}{3\pi} \right) \right] = (1 + \varepsilon_p) D_p$$

ただし D_p は電離槽を挿入しなかった時の、線量計中心部における一次X線量である。これより

$$\varepsilon_p = e^{\mu a} \left[1 - \mu a \left(1 - \frac{8}{3\pi} \right) \right] - 1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

b) D'_s の計算

D'_s は先に述べたように水ファントムから発生した散乱X線が電離槽空気体積部の濾過作用の減少を受ける結果、増加した線量値を表わすものである。散乱X線は一次X線と異なり、方向性を持ち、しかも各角度における強度分布も変ってくる。したがってまず最初に電離槽中心部に到達する散乱X線の強度分布を求めなければならない。これには differential dose build up value ($dB_D/d\Omega$) を用いる。この値は第3図に示すように単位立体角 $d\Omega$ 当りの水体積から電離槽中心部に到達する散乱線量と考えればよい。このような各立体角から到達する散乱X線が電離槽

第3図 D'_s 計算のための電離槽

体積に相当した水が空气に置き換えられたことになり、どの程度の線量増加が期待されるかを考えればよい。そこで各立体角についての吸収 ($e^{\mu a}$) を計算して第3図に示す θ について、積分すればよいことが判る。このような計算をする場合、指頭形電離槽を円筒形と考えると非常に計算が複雑となるので、この電離槽と同体積の球形電離槽に置換して計算することにする。この球形電離槽の半径を d 、散乱線に対する水の全吸収係数を μ_s 、 D'_s に対する補正量を ε_s とすると、次のような関係式が得られる。

$$\varepsilon_s = \frac{\int_0^\pi \frac{dB_D}{d\Omega} \left[e^{\mu_s b} \left\{ 1 - \mu_s b \left(1 - \frac{9\pi}{32} \right) \right\} - 1 \right] \sin \theta \, d\theta}{\int_0^\pi \frac{dB_D}{d\Omega} \sin \theta \, d\theta} \quad \dots\dots\dots(2)$$

c) $4D_p$ の計算

$4D_p$ は電離槽の空気体積部に相当した水体積から発生した散乱X線のうち、電離槽中心部に到達する散乱X線量を計算すればよい。この場合も計算の複雑さを省くために円筒形電離槽を球形電離槽と考える。 $4D_p$ 対

する補正量を ε_{sp} とすると、

$$4D_p = \frac{\delta_p}{\mu_p} I \cdot S \cdot N 2\pi \int_0^\pi \frac{1 - e^{-\mu_s(\varphi)b}}{\mu_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e \delta_s}{d\Omega} \cdot f_{(E)} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi$$

ただし

δ_p : Compton による散乱係数 (cm^{-1})

μ_p : 全吸収係数 (cm^{-1})

I : 一次X線の energy flux (erg/cm^2)

ρ : 水の密度 (g/cm^3)

N : 水 1g 中の電子数 (g^{-1})

$f_{(E)}$: erg/cm^2 から R 単位への変換係数

$\mu_s(\varphi)$: 一次X線から φ 方向へ散乱した散乱X線に対する水の全吸収係数

$d_e \delta_s/d\Omega$: 単位立体角当たりの Compton 微分断面積

$f_{(E)}$ はエネルギー依存性がないと仮定する、したがって $I \cdot f_{(E)} = R$ (roentgen) となる。また、 ρN は水 1cm^3 当たりの電子数であるから、これを N_0 で表わすと

$$\varepsilon_{sp} = \frac{\delta_p}{\mu_p} \cdot N_0 \cdot 2\pi \int_0^\pi \frac{1 - e^{-\mu_s(\varphi)b}}{\mu_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e \delta_s}{d\Omega} \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \quad \dots\dots(3)$$

d) $4D_s$ の計算

$4D_s$ は散乱X線に対する(c)の効果を考えればよい。したがって(3)式の中で δ_p 、 μ_p 、 I 、 $\mu_s(\varphi)$ 、 $d_e \delta_s/d\Omega$ の値を散乱X線に対してそれぞれ求め、(3)式を用いて計算すればよい。この場合の補正量は、 ε_{ss} として表わすことにする。

以上のようにして4つの補正量をそれぞれ計算し、加え合わせると一測定点に対する補正が出来る。ただし、 ε_p 、 ε_{ss} は、増加する効果であるから、正の値であり、 ε_{sp} 、 ε_s は減少する効果であるから負の値をとる。したがって全補正量 ε は

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_s - \varepsilon_{sp} - \varepsilon_{ss} \quad \dots\dots\dots(4)$$

そこで測定線量値を D として、補正された正しい線量を D_0 とすると

$$D_0 = D(1 + \varepsilon) \quad \text{となる。}$$

2) 実験的考察

以上述べた理論的な考え方をもとにして、実際例について、どの程度の補正量になるのか、また深部百分率曲線にこの補正を適用した場合、どのような曲線の変化が現われるだろうか、等を実際に考えてみた。

まず計算するに当たって次のような条件を与えてみる。

指頭形電離槽の内側半径	(a) = 1cm, 0.5cm
球形電離槽に置き換えた球半径	(b) = 1cm, 0.5cm
一次X線のエネルギー	= 113keV (2mm Cu H.V.L.)
水ファントムの照射野	= 200cm ²
F.S.D.	= 60cm

この条件をもとにして4つの補正量を計算してみる。ただし a , b の値を 1cm と 0.5cm に取ってあるのは半径 1cm の場合と 0.5cm の場合の両者について計算し電離槽容積の違いを調べるためである。また、一次X線のエネルギー 113keV は丁度半価層にして 2mmCu の線質に相当する。そこで水ファントムの表面(0cm)と深さ 2.5, 6.0, 15cm の合計4点について求め、最後に深部百分率曲線に書き直してみることにする。

a) ε_p …… ($a=1\text{cm}$ の場合)

ε_p を求めるには(1)式を用いるが、これを計算するためには線吸収係数 μ を求めればよい。この計算結果を第1表に示す。

第1表 ε_p の計算過程

水の深さ (cm)	E_{eff} (keV)	μ_p (cm^{-1})	ε_p
0	118	0.163	0
2.5	120	0.161	0.146
6.0	122	0.16	0.145
15	130	0.158	0.142

b) ε_s ($a=1\text{cm}$, $b=1\text{cm}$) の場合)

ε_s を求めるには(2)式を用いて、 $dB_D/d\Omega$ を θ について積分せねばならない。また散乱X線に対する吸収係数 μ_s も各散乱角によって変わってくる。(2)式を数学的に積分することは困難であるため、われわれはグラフ積分

することにした。散乱角度は、少し間隔が大きいですが、22.5° から 135° まで6点に分割してそれぞれの項を計算しグラフ積分した。2.5cm の場合の結果を第2表に示す。

第2表の最終欄の値を散乱角 θ に対してグラフ積分し $dB_D/d\Omega \cdot \sin \theta$ を同じく θ に対してグラフ積分して、割算すると ε_s が求まる。その結果、

$$\varepsilon_{s(2.5)} = 0.17746$$

次に水ファントム深さ 0cm (ファントム表面) における $\varepsilon_{s(0)}$ を求める。

水表面での一次X線エネルギー 113keV に対する、表面散乱を含めた光量子エネルギーは 75keV (at 200cm²) である。また $\mu_s=0.1865$ を用いて同様に $\varepsilon_{s(0)}$ を計算すると

$$\varepsilon_{s(0)} = 0.1770$$

さらに水ファントム深さ 6cm における $\varepsilon_{s(6)}$ の計算過程を第3表に示す。

これらの値をもとにして先と同様な方法でグラフ積分すると

$$\varepsilon_{s(6)} = 0.1783$$

水ファントム深さ 15cm における計算過程を第4表に示す。

これから $\varepsilon_{s(15)}$ を計算すると

$$\varepsilon_{s(15)} = 0.19814$$

ε_s の値を全部まとめると第5表となる。

第2表 $\varepsilon_{s(2.5)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 2.5cm)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	μ_s (cm^{-1})	$\sin \theta$	$\frac{dB_D}{d\Omega}$	$\frac{dB_D}{d\Omega} \left[e^{\mu_s b} \left\{ 1 - \mu_s b \left(1 - \frac{9\pi}{32} \right) \right\} - 1 \right] \sin \theta$
22.5°	91	0.175	0.383	0.12	0.00764
45°	84	0.180	0.707	0.098	0.01187
67.5°	77	0.185	0.924	0.102	0.0166
90°	71	0.19	1.00	0.085	0.0155
120°	71	0.19	0.866	0.086	0.0135
135°	71	0.19	0.707	0.094	0.0120

第3表 $\varepsilon_{s(6)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 6cm)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	μ_s (cm^{-1})	$\sin \theta$	$\frac{dB_D}{d\Omega}$	$\frac{dB_D}{d\Omega} \left[e^{\mu_s b} \left\{ 1 - \mu_s b \left(1 - \frac{9\pi}{32} \right) \right\} - 1 \right] \sin \theta$
22.5°	87	0.178	0.383	0.310	0.02
45°	83	0.181	0.707	0.256	0.0315
67.5°	74	0.188	0.924	0.669	0.0281
90°	67	0.194	1.00	0.135	0.0251
120°	67	0.194	0.866	0.128	0.0206
135°	68	0.193	0.707	0.133	0.0174

第4表 $\varepsilon_{s(15)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 15cm)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	μ_s (cm^{-1})	$\sin \theta$	$\frac{dB_D}{d\Omega}$	$\frac{dB_D}{d\Omega} \left[e^{\mu_s b} \left\{ 1 - \mu_s b \left(1 - \frac{9\pi}{32} \right) \right\} - 1 \right] \sin \theta$
22.5°	82	0.181	0.383	1.00	0.0696
45°	73	0.188	0.707	0.56	0.0713
67.5°	64	0.198	0.924	0.33	0.0583
90°	60	0.23	1.00	0.23	0.0511
120°	60	0.23	0.866	0.23	0.0442
135°	60	0.23	0.707	0.22	0.0346

第5表 ε_s の計算結果

記号	水ファントムの深さ (cm)	ε_s
$\varepsilon_s(0)$	0	0.1770
$\varepsilon_s(2.5)$	2.5	0.17746
$\varepsilon_s(6)$	6.0	0.17830
$\varepsilon_s(15)$	15.0	0.19814

c) ε_{sp} ($a=1\text{cm}$, $b=1\text{cm}$) の場合)

水ファントム中に挿入された電離槽空気体積部のための散乱付加の消失効果である, ε_{sp} を求めるには(3)式を用いる. この場合もそれぞれの項をまず計算して, グラフ積分する必要がある. 積分項の中の計算過程を水ファントム深さ 0cm について第6表に示す.

第6表 $\varepsilon_{sp(0)}$ の計算過程 (水ファントム表面)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	$\mu_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e \delta_s}{d\Omega}$	$\frac{1 - e^{-\mu_s(\varphi)b}}{\mu_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e \delta_s}{d\Omega} \sin \varphi$
90°	水表面の平均	0.1865	2.35×10^{-26}	2.15×10^{-26}
120°	実効エ	"	$2.0 \times "$	$1.58 \times "$
135°	ネルギー	"	$2.15 \times "$	$1.39 \times "$
150°	を75	"	$2.45 \times "$	$1.12 \times "$
180°	keVと	"		
	して扱	"		0
	う	"		

第6表の最後の欄をグラフ積分すると, 2.062×10^{-26} が得られた. 一方

$\mu_p = 0.1615$ (at 118keV), $\delta_p = 0.137$ (at 118keV), $N_0 = 3.34 \times 10^{23}$ を使用して,

$$2\pi \frac{\delta_p}{\mu_p} \cdot N_0 = 17.684 \times 10^{23}$$

が計算できる. 結局

$$\varepsilon_{sp(0)} = 0.0365$$

となる.

次に水の深さ 2.5cm における $\varepsilon_{sp(2.5)}$ を第7表に, 深さ 6cm における, $\varepsilon_{sp(6)}$ を第8表に, 15cm における, $\varepsilon_{sp(15)}$ を第9表に示す.

第7表 $\varepsilon_{sp(2.5)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 2.5cm)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	$\mu_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e \delta_s}{d\Omega}$	$\frac{1 - e^{-\mu_s(\varphi)b}}{\mu_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e \delta_s}{d\Omega} \sin \varphi$
22.5°	91	0.175	7.15×10^{-26}	2.51×10^{-26}
45°	84	0.180	$4.35 \times "$	$2.82 \times "$
67.5°	77	0.185	$3.05 \times "$	$2.59 \times "$
90°	71	0.19	$2.35 \times "$	$2.14 \times "$
120°	71	0.19	$2.00 \times "$	$1.58 \times "$
135°	71	0.19	$2.15 \times "$	$1.38 \times "$

$$\mu_p = 0.1615 \text{ (at 118keV)} \quad \delta_p = 0.135 \quad N_0 = 3.34 \times 10^{23}$$

$$\varepsilon_{sp(2.5)} = 0.1020$$

第8表 $\varepsilon_{sp(6)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 6cm)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	$\mu_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e \delta_s}{d\Omega}$	$\frac{1 - e^{-\mu_s(\varphi)b}}{\mu_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e \delta_s}{d\Omega} \sin \varphi$
22.5°	91	0.178	7.15×10^{-26}	2.51×10^{-26}
45°	84	0.181	$4.35 \times "$	$2.81 \times "$
67.5°	77	0.188	$3.05 \times "$	$2.57 \times "$
90°	71	0.194	$2.35 \times "$	$2.14 \times "$
120°	71	0.194	$2.00 \times "$	$1.57 \times "$
135°	71	0.193	$2.15 \times "$	$1.38 \times "$

$$\mu_p = 0.1605 \text{ (122keV)} \quad \delta_p = 0.134 \quad N_0 = 3.34 \times 10^{23}$$

$$\varepsilon_{sp(6)} = 0.1020$$

第9表 $\varepsilon_{sp(15)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 15cm)

散乱角 (θ)	実効電圧 (keV)	$\mu_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e \delta_s}{d\Omega}$	$\frac{1 - e^{-\mu_s(\varphi)b}}{\mu_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e \delta_s}{d\Omega} \sin \varphi$
22.5°	91	0.181	7.1×10^{-26}	2.49×10^{-26}
45°	84	0.188	$4.3 \times "$	$2.77 \times "$
67.5°	77	0.198	$3.0 \times "$	$2.51 \times "$
90°	71	0.23	$2.3 \times "$	$2.06 \times "$
120°	71	0.23	$1.9 \times "$	$1.47 \times "$
135°	71	0.23	$0.2 \times "$	$1.29 \times "$

$$\mu_p = 0.158 \text{ (130keV)} \quad \delta_p = 0.13 \quad N_0 = 3.34 \times 10^{23}$$

$$\varepsilon_{sp(15)} = 0.0966$$

ε_{sp} の値を全部まとめると第10表となる。

第10表 ε_{sp} の計算結果

記 号	水ファントムの深さ (cm)	ε_{sp}
$\varepsilon_{sp(0)}$	0	0.0365
$\varepsilon_{sp(2.5)}$	2.5	0.1020
$\varepsilon_{sp(6)}$	6.0	0.1020
$\varepsilon_{sp(15)}$	15.0	0.0966

d) ε_{ss} ($a=1\text{cm}$, $b=1\text{cm}$ の場合)

ε_{ss} を計算するには(3)式をそのまま使えばよいが, (3)式の $\mu_p \rightarrow \mu'_s$, $\delta_p \rightarrow \delta'_s$ に置き換え, $\mu'_s(\varphi)$, $d_e\delta'_s/d\Omega$ の値はそれぞれ散乱X線エネルギーに対して求めなければならない。これを第11表に示す。

第11表 $\varepsilon_{ss(0)}$ の計算過程 (水ファントム表面)

散乱角 (θ)	実効 電圧 (keV)	$\mu'_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e\delta'_s}{d\Omega}$	$\frac{1-e^{-\mu'_s(\varphi)b}}{\mu'_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e\delta'_s}{d\Omega} \sin\varphi$
90°	75	0.1865	2.65×10^{-26}	2.42×10^{-26}
120°	"	"	$2.40 \times "$	$1.90 \times "$
135°	"	"	$2.65 \times "$	$1.71 \times "$
150°	"	"	$3.00 \times "$	$1.37 \times "$

$\mu_s=0.1865$ (75keV) $\delta_s=0.155$ $N_0=3.34 \times 10^{23}$

$\varepsilon_{ss(0)}=0.0415$

次に同様にして水ファントム深さ 2.5cm の $\varepsilon_{ss(2.5)}$, 6cm の $\varepsilon_{ss(6)}$, 15cm の $\varepsilon_{ss(15)}$ をそれぞれ第12, 13, 14表に示す。

第12表 $\varepsilon_{ss(2.5)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 2.5cm)

散乱角 (θ)	実効 電圧 (keV)	$\mu'_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e\delta'_s}{d\Omega}$	$\frac{1-e^{-\mu'_s(\varphi)b}}{\mu'_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e\delta'_s}{d\Omega} \sin\varphi$
22.5°	91	0.175	7.25×10^{-26}	2.54×10^{-26}
45°	84	0.180	$4.7 \times "$	$3.05 \times "$
67.5°	77	0.185	$3.35 \times "$	$2.84 \times "$
90°	71	0.190	$2.65 \times "$	$2.41 \times "$
120°	71	0.190	$2.40 \times "$	$1.89 \times "$
135°	71	0.190	$2.65 \times "$	$1.71 \times "$

$\mu_s=0.186$ (76keV) $\delta_s=0.155$ $N_0=3.34 \times 10^{23}$

$\varepsilon_{ss(2.5)}=0.1110$

以上 ε_{ss} の結果をまとめると第15表のようになる。

このようにして4つの効果に対する補正係数が求められたが, これを直線入射線量に乗ずるわけにはいらない。何故ならば ε_p と ε_{sp} は一次X線に対する効果であり, ε_s と ε_{ss} とは散乱X線に対する効果である。したがって深部量曲線の各深さにおける線量を一次X線量と二次X線量に分離して考えなければならない。幸いなこと

第13表 $\varepsilon_{ss(6)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 6cm)

散乱角 (θ)	実効 電圧 (keV)	$\mu'_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e\delta'_s}{d\Omega}$	$\frac{1-e^{-\mu'_s(\varphi)b}}{\mu'_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e\delta'_s}{d\Omega} \sin\varphi$
22.5°	91	0.128	7.25×10^{-26}	2.54×10^{-26}
45°	84	0.181	$4.7 \times "$	$3.04 \times "$
67.5°	77	0.188	$3.4 \times "$	$2.86 \times "$
90°	71	0.194	$2.65 \times "$	$2.41 \times "$
120°	71	0.194	$2.45 \times "$	$1.93 \times "$
135°	71	0.193	$2.7 \times "$	$1.74 \times "$

$\mu_s=0.188$ (73keV) $\delta_s=0.157$ $N_0=3.34 \times 10^{23}$

$\varepsilon_{ss(6)}=0.1113$

第14表 $\varepsilon_{ss(15)}$ の計算過程 (水ファントム深さ 15cm)

散乱角 (θ)	実効 電圧 (keV)	$\mu'_s(\varphi)$ (cm^{-1})	$\frac{d_e\delta'_s}{d\Omega}$	$\frac{1-e^{-\mu'_s(\varphi)b}}{\mu'_s(\varphi)} \cdot \frac{d_e\delta'_s}{d\Omega} \sin\varphi$
22.5°	91	0.181	7.25×10^{-26}	2.54×10^{-26}
45°	84	0.188	$4.75 \times "$	$3.06 \times "$
67.5°	77	0.198	$3.4 \times "$	$2.85 \times "$
90°	71	0.23	$2.7 \times "$	$2.41 \times "$
120°	71	0.23	$2.5 \times "$	$1.93 \times "$
135°	71	0.23	$2.75 \times "$	$1.74 \times "$

$\mu_s=0.195$ (68keV) $\delta_s=0.165$ $N_0=3.34 \times 10^{23}$

$\varepsilon_{ss(15)}=0.1140$

第15表 ε_{ss} の計算結果

記 号	水ファントムの深さ (cm)	ε_{ss}
$\varepsilon_{ss(0)}$	0	0.0415
$\varepsilon_{ss(2.5)}$	2.5	0.1110
$\varepsilon_{ss(6)}$	6.0	0.1113
$\varepsilon_{ss(15)}$	15.0	0.1140

に Hettinger. G と Liden. K は 113keV (2.12mm Cu H.V.L), 照射野 200cm^2 の条件のもとに, 深部量曲線を一次X線量と, 二次に分離した data を与えてくれている。われわれはこれを利用する。第16表にその結果を与える。

第16表 深部線量の一次X線と二次X線の割合
(Acta Radiol. Vol. 53 (1960) 73)

水の深さ (cm)	一次 X 線 (%)	二次 X 線 (%)
0	74	26
2.5	46	54
6.0	32	68
15.0	18	82

次に 118keV (2mm Cu H.V.L), 照射野 200cm^2 , F.S.D 60cm の条件の深部百分率を Quimby より求め, 第16表

の%をそれぞれ乗じたものが第17表である。

第17表 深部線量率の内訳

水の深さ (cm)	Quimby 深部百分率	一次X線 D_p (%)	二次X線 D_s (%)
0	100	74	26
2.5	95	43.7	51.3
6.0	68.2	21.8	46.4
15.0	22.7	4.09	18.6

第4図 電離槽容積を考慮に入れた深部百分率曲線

以上の計算結果を第18表にまとめてみる。

先にも述べたように ε_{sp} と ε_{ss} とは負の方向に働く効果であるから、当然差引かねばならない。最終欄が補正された深部線量率であり、Quimby の深部百分率と比べるとかなり違っていることが判る。

われわれは電離槽体積の大きさによって補正量がどの程度変わるかを調べるために、先にも述べたように、丁度½の大きさに相当する $a=0.5\text{cm}$, $b=0.5\text{cm}$ の電離槽について、全く同じ計算を試みた。その結果を第19表に示す。

第18表と第19表を比較してみると、明らかに小形電離槽の方が誤差は少ないことが判る。これをグラフ表示したものが第4図である。縦軸に深部百分率を目盛り、横軸に水の深さが取ってある。グラフは電離槽半径1cmの場合と0.5cmの場合がとってある。当然大きい電離槽の方が高い線量率を示すことは当初予想された通りであって $a=1\text{cm}$ の場合の値の違いは6%程度 $a=0.5\text{cm}$ の場合は3%程度が認められる。

III. ファントム内線質変化が、深部吸収線量に与える影響

1) 理論的考察

深部線量率あるいは深部百分率は通常表面線量と深部線量の比で表わされているようであるが、臨床的に考ええるとR単位ではなくて、吸収線量単位 (Rad) の比で表現すべきであると考ええる。また例えR単位で表わしても、ある係数を乗じてRadに換算する必要性が多々あるだろう。ところがR単位とRadがファントム中で比例的に変化するのであれば深部百分率はいずれの単位

第18表 補正深部線量率の計算結果 ($a=1\text{cm}$, $b=1\text{cm}$)

深さ (cm)	ε_p (%)	ε_s (%)	ε_{sp} (%)	ε_{ss} (%)	$\varepsilon_p \cdot D_p$ (R)	$\varepsilon_s \cdot D_s$ (R)	$\varepsilon_{sp} \cdot D_p$ (R)	$\varepsilon_{ss} \cdot D_s$ (R)	Total (R)	Quimby 深部 百分率	Total+ Quimby	補正深部 百分率
0	0	17.7	-3.65	-4.15	0	4.6	-2.7	-1.08	0.82	100	100.82	100
2.5	14.6	17.8	-10.2	-11.1	6.38	9.1	-4.47	-5.69	5.32	95	100.32	99.5
6.0	14.5	17.8	-10.3	-11.1	3.16	8.27	-2.22	-5.16	4.05	68.2	72.25	71.7
15.0	14.2	19.8	-9.7	-11.4	0.58	3.67	-0.4	-2.12	1.73	22.7	24.43	24.2

第19表 補正深部線量率の計算結果 ($a=0.5\text{cm}$, $b=0.5\text{cm}$)

深さ (cm)	ε_p (%)	ε_s (%)	ε_{sp} (%)	ε_{ss} (%)	$\varepsilon_p \cdot D_p$ (R)	$\varepsilon_s \cdot D_s$ (R)	$\varepsilon_{sp} \cdot D_p$ (R)	$\varepsilon_{ss} \cdot D_s$ (R)	Total (R)	Quimby 深部 百分率	Total+ Quimby	補正深部 百分率
0	0	8.60	-1.79	-2.15	0	2.24	-1.32	-0.56	0.36	100	100.36	100
2.5	7.06	8.45	-5.15	-5.7	3.09	4.33	-2.25	-2.92	2.25	95	97.25	96.9
6.0	7.02	8.58	-5.15	-5.75	1.53	3.98	-1.12	-2.67	1.72	68.2	69.92	69.7
15.0	6.93	9.7	-4.87	-5.96	0.29	1.8	-0.2	-1.11	0.78	22.7	23.48	23.4

でも関係がないが、ファントム中で線質が変化すると当然R単位とRadは平行しなくなる。またR単位のみで考える場合でも使用する電離槽に線質依存性があれば一応これは補正していく必要がある。(もちろん厳密に考えた場合)

吸収線量測定法でまず考えられるのはBragg-GrayのCavity Theoryであるが、実験のためにはこの考え方がよいだろうが、実用的には少し困る面が多々ある。そこで考えられる実用的な方法はよくR単位に較正された、air equivalentな壁を持つ電離槽を使用することである。このような電離槽を用いると次の式で吸収線量の測定ができる。

$$E_{med} = \frac{\mu_{med}}{\mu_{air}} \cdot E_{air} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで E_{air} , E_{med} は空気と物質に対する吸収エネルギーを表わし、 μ_{air} , μ_{med} は同じく、空気と物質の真の吸収係数を表わしている。そこで E_{air} はR単位を表わすことになるから、R単位からRadに変換するには、真の吸収係数の比を乗ずればよいことになる。したがって物質中でX線エネルギー分布が変わった場合に μ_{med}/μ_{air} が変化することが予想され、結果として深部線量率が変わることになる。

一方物質の吸収エネルギーは(4)式ではなくて次の(5)式によっても測定できる。

$$E_{med} = E_0 \cdot \mu_{med} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし E_0 はX線energy fluxである。ところが E_0 は通常使用するX線が連続分布であるため、各単一エネルギーに分割して(5)式のように積分する必要がある。

われわれは(5)式を用いて計算することにした。(5)式から判るように E_0 , μ_{med} ともにX線エネルギー(kV)の関数であるから一旦単一エネルギーに分割して計算する必要がある。

$$E_{med} = \sum_{kV=0}^{kV \max} E_0(kV) \mu_{med}(kV) \quad \dots\dots\dots(7)$$

まず水ファントムの中の、X線エネルギー分布を、Hettinger, G等が示している。これによって水表面から2.5cm, 6cm, 15cm, 深さの値を第5図, 第6図, 第7図に示す。それぞれ、横軸に光量子エネルギーをとり縦軸に光量子の数を目盛ったスペクトル分布である。その中の点線は散乱線分布を、細線は直接線分布、そして太線はTotalを示す。第7図の15cm深さのみは、値があまりにも小さいため、縦軸を4倍に拡大して表わしてある。これを見てよく判るように水中深くなると、ほとんど散乱線のみである。このスペクトル分布の横軸を5keV間隔で分割し、それぞれのTotalの値を観測す

る。これにそのエネルギーに対する水の吸収係数を乗じて、総和を求めると水の吸収エネルギーが求められる。2.5cm, 6cm, 15cm深さの結果を重合したものが第8図に示される。

第5図 水中におけるX線スペクトル分布 (2.5cm 深さ)

第6図 水中におけるX線スペクトル分布 (6cm 深さ)

第7図 水中におけるX線スペクトル分布 (15cm 深さ)

条件は 250kVp 照射野 200cm², F.S.D 67.5cm であり第 8 図の結果をグラフ積分してそれぞれの比を求めると深部百分率曲線となる。このような吸収線量の比として求めた深部百分率が、通常の R 単位 (空気吸収エネルギー) で求めた深部百分率曲線とどの程度の相違があるかを検討するために、比較曲線を引き第 9 図に示す。その結果水の吸収線量として深部百分率曲線を求めた方が小さな値として表わされていることが判る。また、二者の間の差違は約 1~1.5% 程度のものであることも同時に判った。

第 8 図 水中でのエネルギースペクトル分布

次に深部百分率曲線を実験的に求めるためによくフィルム黒化法で行なう場合がある。この場合は空気電離槽を使わないから、測定される量は AgBr の吸収エネルギーとして求められるであろう。われわれが求めたいのは水の吸収エネルギーである。この両者の関連性は(6)式に示す $\mu_{\text{med}}/\mu_{\text{air}}$ の項を $\mu_{\text{AgBr}}/\mu_{\text{air}}$ として考えれば、AgBr の吸収から水の吸収エネルギーに置き換えることができる。われわれは AgBr の吸収係数曲線を求めたが見当たらず、仕方なしに一応の例示として、Ag にもっとも原子番号の近い Sn の吸収係数を用いて、先と同様な計算をしたものが第 10 図である。これから見ると水の吸収曲線と、Ag の吸収を使って求めた吸収曲線とはかなりの相違があることが判る。最大の偏差を調べてみると約 10% もある。したがってこのようにファントム物質と原子番号のかなり違う測定器で深部百分率曲線を測定した場合は、必ずファントム物質内における線質較正を行なわなければならないことがわかる。

第 9 図 水中での X 線スペクトル分布の変化を考慮に入れた深部百分率曲線

第 10 図 フィルム法によって深部百分率曲線を測定した場合の変化

IV. 結 論

われわれはここで深部線量測定に関する 2 つの問題を論じた。第一の問題は II で述べたように深部線量測定に用いる指頭形電離槽の大きさが、測定結果にどの程度の誤差を与えるかということである。純実験的な裏付けは遂行していないが、理論的に考察し、そして実在する電離槽の大きさについて理論に基く、計算を行なってみたところが、使用する指頭形電離槽の内側半径が 1cm の場合には、線量率にして約 6% の誤差が生じた。また内側半径が 0.5cm の場合には約 3% となる。このことは指頭形電離槽の中心点を測定点と考えた場合の論議である。したがって逆に考えれば電離槽の大きさに応じて、測定点が中心部よりも、前方にずれていると考えてもよい。(空中線量測定の際にはこのような問題は生じない)そこで第 4 図の結果をもとにして、どの程度電離槽中心部より前方へずれているかを調べると、平均して半径 1cm の電離槽では約 0.5cm 半径 0.5cm の電離槽では約 0.2cm

である。この事実からわれわれは次のような簡単な結論を下した。

a) 線量率の誤差と考えた場合は水ファントームでは半径 1cm の電離槽で約 6%, 0.5cm 半径で約 3% の線量増加として考える。

b) 測定点が電離槽中心部より前方へずれると考えるならば、水ファントームの場合、電離槽半径の約 1/2 の距離だけ測定点を前方へずらして考えればよい。

これらの効果はファントーム物質の種類によってずい分変わることは予想される。物質による相異の問題は今後にゆずりして、放射線医学方面で使われる対象はほとんど人体組織に近いファントーム構成が要求されるから水ファントームとしてのこの結果でかなりの判断が下せるものと思う。

一方誤差を許容範囲に入れて、測定値をそのまま信ずる場合にはできるだけ小容量の電離槽を使用することである。すくなくとも半径 0.5cm 以下の電離槽を使うべきであろう。

第二の問題はファントーム内の X 線エネルギー分布の相違によって起こるところの深部百分率曲線の変化の問題である。R 単位で深部百分率曲線を測定した場合と、水の吸収線量 (Rad) で深部百分率曲線を求めた場合と比較すると、第 9 図に示すごとく、その差は約 1~1.5% であった。このことから考えると、この程度の X 線々質範囲では、このような考慮はほとんど払わなくてもよいと結論できる。しかしフィルム法等で、深部百分率曲線

を求めた場合、Ag の吸収エネルギーによって深部百分率曲線が画けるため R 単位による曲線とは相当違ってくる。両者の % 誤差は約 10% である。したがって深部吸収線量の測定にはフィルム黒化法はあまりよい方法ではないといえるだろう。

結局深部線量測定に際して言えることは、当然のこととは言えるができるだけ小容積電離槽を使うことが必要であり、生体の実効原子番号と大きく異なるような原子番号をもった測定器で測ることはできるだけ避けるべきであろう。(例えばフィルムや、ガラス線量計等) またこのような測定器を使った場合は正確な補正をすべきである。

参 考 文 献

- 1) Hettinger. G. and Liden. K., Acta Radio. vol.53, 1960, 73.
- 2) Hettiinger. G., Acta Radiol.vol.54, 1960, 129
- 3) "Depth dose date" Brit. J. Radiol., suppl. 10 1959.
- 4) Radiation Dosimetry.
- 5) Mulvey. T. and Ballinger. J. Brit. J. Radiol. vol.32 1959, 408.
- 6) Sköldbörn. H., "On the design, physical properties and practical application of small condenser ionization chambers" Acta Radiol.,Suppl 187 1959, 75.

ゾル状造影剤

消化管系レントゲン診断・内服用薬

使い易く、飲み易い液状剤

普及型	150cc×2×10	300cc×10
徳用型	150cc×30	600cc

バックスモルト

販売元 **東京田辺製薬株式会社**