

Title	胃部・胸部撮影における臓器・組織線量の簡易計算
Author(s)	西沢, かな枝
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1984, 44(10), p. 1279-1293
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17778
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

胃部・胸部撮影における臓器・組織線量の簡易計算

杏林大学医学部放射線医学教室

西 沢 かな 枝

(昭和58年12月26日受付)

(昭和59年3月22日最終原稿受付)

A Simple Calculation for the Determination of Organ or Tissue Doses from Medical X-ray Diagnosis for Stomach and Chest

Kanae Nishizawa

Department of Radiology, Kyorin University School of Medicine

Research Code No. : 302

Key Words : Dose calculation, Medical exposure, Effective dose equivalent

A simple calculation method has been developed to determine the organ or tissue doses of patients for typical X-ray diagnoses. The absorbed doses related to radiation-induced stochastic effects were calculated based on the dosimetric parameters experimentally determined and technical parameters for X-ray diagnostic examinations. The present method is principally based on the TRA method for the beam therapy. The dosimetric parameters such as percentage depth-dose curves and isodose curves were measured with ionization chambers in the MixDP phantom. The distance from the incident surface of X-ray beams to the organ or tissue of interest was determined with a mathematical phantom, which was the modified version of the MIRD phantom for the average Japanese adult. The absorbed doses were determined with a simple table look-up method using a computer.

The calculated doses were tabulated for various technical parameters of stomach and chest X-ray examinations. The present calculation was applied to the Rando woman phantom to compare with the phantom measurements. The calculated values agree with the experimental doses within 20% discrepancy.

It was concluded that the present calculation method can determine organ or tissue doses very simply for various X-ray examinations and that it was valuable for the estimation of population doses and risks from X-ray diagnoses.

1. 緒 言
2. 方 法
 - 2-1. 計算方法
 - 2-2. 数学的ファントム
 - 2-3. 組織等価物質中の深部量百分率の測定
3. 臓器・組織線量の測定及び結果
4. Rando woman phantom 実験
 - 4-1. 診断用X線装置の撮影条件
 - 4-2. Rando woman phantom による線量測定
 - 4-3. 実験結果

5. 考 察
 - 5-1. 深部量百分率の測定及び線量計算
 - 5-2. 計算の応用性
6. 結 論

1. 緒 言

疾病の診断及び治療の為の患者の意図的な被曝、すなわち医療被曝は人工放射線源からの人の被曝の中で最も大きく、国際放射線防護委員会(ICRP)や国連科学委員会(UNSCEAR)なども

以前からその放射線影響を重視してきた。最近 ICRP はその報告書¹²⁾の中で、放射線被曝の正当化、防護の最適化に関する勧告を行っている。又防護の最適化を決定するのに、被曝の低減に要する単位線量当量当りの費用と低減によって生じたリスクの減少すなわち利益とのバランスを考える費用—利益解析が勧告されておりその詳細は ICRP³⁷⁾に述べられている。正当化と最適化は一体をなしており、放射線による損害は主にリスクが対象となる。費用—利益解析で、利益は特定のグループあるいは個人だけでなく、社会全体についても考えるべきであり、又、リスクについても同様である。この解析において利益もリスクも、問題としている医療行為で受けた線量あるいは線量当量の関数として表わすのが最適である。

医療被曝の中で最も頻度が高く、重篤な疾病のない患者も対象となる X 線診断が最も重要である。我が国では、国民 1 人当り年当りほぼ 3 枚の X 線撮影を受けている⁴⁾。この内受診者が最も多いのが胸部撮影であり、撮影枚数が最も多いのが胃部撮影である。従ってこの二種類の撮影は被曝の低減を図る上で重要である。

胸部及び胃部撮影は全国の病院・診療所で日常盛んに行なわれているが、撮影枚数についてはほぼ画一化されているものの撮影条件は医療施設により、医師によりかなり異っている。正当化と最適化を考える上で基礎となる臓器組織線量は撮影条件に依存している。従来、これらの線量はファントム実験により、平均的撮影条件について測定されてきた⁵⁾。しかし ICRP の勧告している実効線量当量の概念からも明らかな様に測定すべき臓器組織は非常に多いし又ファントム実験では、被検体のサイズも一定となり、臓器組織の位置の個人差等を考慮した線量測定は困難である。最近の ICRP の報告書 ICRP 34⁶⁾に、X 線診断における 2, 3 の臓器組織の被曝線量が示されているが、それらは大型計算機を用いたモンテカルロ法により計算されている。

本報は医療被曝における正当化と防護の最適化を図る上で基礎となる臓器組織線量を推定する為の簡単な計算方法を検討し、この方法で得られた

結果とファントム実験の結果とを比較すると共に計算の応用性について考察した。

2. 方 法

2-1. 計算方法

外部被曝線量の評価は多くの場合種々のファントムを用いて実験的に行なわれる^{7)~12)}。しかし被曝者の体格や被曝の方向、線源の多様さ等を考えると、実験には多くの困難を伴うし、不可能なこともしばしばある。そこで、計算による被曝線量の評価が、数学的ファントムを用いたモンテカルロ法により多くの研究者により行なわれている^{13)~17)}。

モンテカルロ法による評価は精度の高い方法であるが、複雑な計算コードと大型コンピュータを必要とする為、手軽な方法とは言えない。著者等は計算過程をより簡単にするため、数学的ファントムを用い、次の様な方法により、原爆による線量や職業人の被曝線量を推定してきた^{18)~22)}。1) 一様な空間線量中又は平行線束による全身被曝の場合について、組織等価物質中の深部量百分率を実験的に又は計算により求める。2) MIRD の数学的ファントム²³⁾を用い、ファントム内の任意の点における線量を入射面からの距離から求める。

X 線撮影の場合は部分被曝であり、照射野内にある診断すべき部位とその周辺は直接線に曝射されるが、照射野外にある臓器組織線量は散乱線及び漏洩線により被曝するものがあり、全身均等被曝の場合とは計算方法を異にしなければならない。ここでは、a) ある照射野で照射された時の組織等価物質中での線量分布を、直接線及び散乱線について測定し、b) それにより照射野中心を原点とした三次元線量分布を作製し、数学的ファントムを用いて照射野中心と線量を求める臓器組織との位置関係により、線量を三次元線量分布から補間法により計算する。従つてこの計算には、a) 線量推定する人体の数学的ファントム及び吸収線量を求める臓器組織の位置、更に照射野の数学的表示、b) 線質、照射野の異なる場合の組織等価物質中での線量分布がパラメーターとして必要となる。

人体ファントムを Fig. 1 (A) のように O を中

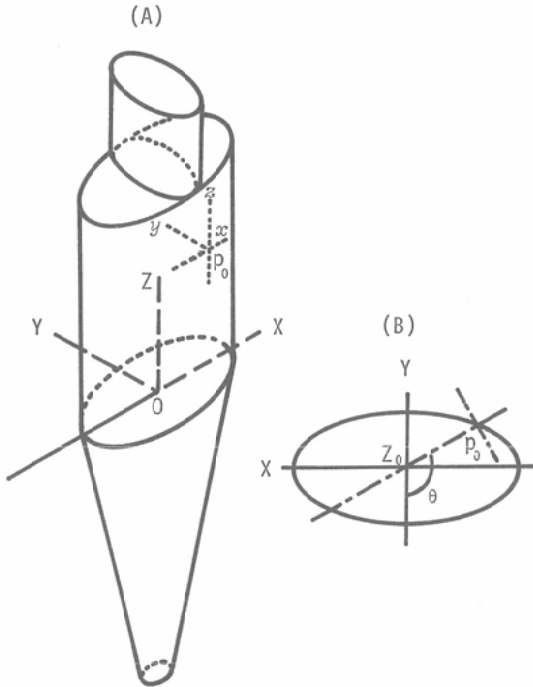


Fig. 1 Schematic diagram to illustrate calculation method of organ doses using a mathematical phantom

心とした (X, Y, Z) の三次元座標で表わす。線量を求める任意の臓器組織中の点を $P_i (X_i, Y_i, Z_i)$, X線撮影時のファントム表面上の照射野の中心を $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$ とする。人体中の等線量曲線の分布は P_0 を中心にほぼ対称であると考えられるため、計算を簡単にする為、X線ビーム中心軸は常に P_0 を通り、ファントムのZ軸に垂直に交わるとする。これをy軸とし P_0 を原点、X-Y面に平行にx軸、Z軸に平行にz軸とした三次元座標により等線量曲線を表わす。すなわち Fig. 1(B)の様にY軸とy軸のなす角を θ とし、 P_i を θ と Z_0 の関数として (x, y, z) 座標に変換し $P_{i\theta} (x_{i\theta}, y_{i\theta}, z_{i\theta})$ とする。 $P_{i\theta}$ と P_0 との位置関係により等線量曲線から $P_{i\theta}$ における深部量百分率を求める。 P_i での線量 D_{P_i} は、

$$D_{P_i} = D_s \cdot R_{P_{i\theta}} \quad (1)$$

ここで、 D_s は照射野中心でのファントム表面での線量、 $R_{P_{i\theta}}$ は臓器組織中の点 P_i における深部量百分率である。表面線量及び等線量曲線は実験的

Table 1 Geometrical formulation and dimensions of the body and left lung for average Japanese adult.

	MIRD	Japanese
Height	174 cm	162.0 cm
Chest	97 cm	89.0 cm
Weight	70 Kg	56.3 Kg
Sitting height	97 cm	87.0 cm

Head*	$(\frac{x}{7})^2 + (\frac{y}{9})^2 \leq 1$	$65.0 < z \leq 87.0$
Trunk*	$(\frac{x}{18.4})^2 + (\frac{y}{9.2})^2 \leq 1$	$0.0 \leq z \leq 65.0$
Legs*	$(\frac{x}{18.4})^2 + (\frac{y}{9.2})^2 \leq (\frac{91.0+z}{91.0})^2$	$-74.5 \leq z < 0.0$
Lung*	$(\frac{x-7.5}{4.4})^2 + (\frac{y}{6.6})^2 + (\frac{z-40.2}{22.2})^2 \leq 1$	$z \geq 40.2$

* These dimensions were expressed in unit of cm

に求める。

2-2. 数学的ファントム

人体の模型としてMIRDの数学的ファントム²³⁾を日本人の平均身長、胸囲、座高により縮小し決定した。1981年の全国統計²⁴⁾によれば日本人の平均身長は15~60歳の男性167.9cm、女性155.3cm、胸囲はそれぞれ87.4cm、81.3cm、座高はそれぞれ90.6cm、84.5cmであった。そこで男女の平均として身長162cm、胸囲84cm、座高87cmとした。MIRDファントムは上肢の骨を含み腰部まで同型としているので、これにならぬ胸囲より上肢の骨に相当する部分として5cm増加して胸囲89cmとした。種々の臓器組織も同様に縮尺した。種々の臓器組織に身体外形の縮尺率を適用するのは例えば脳・甲状腺の様に欧米人と同様かもしくは日本人の方が大きい場合もあり^{25)~27)}適当ではない。しかし、ここでは吸収線量を求めるのに臓器組織内の数点に注目し、その点での線量を求めたので、臓器組織の大きさ、形状にはあまり大きく関係しない。線量を計算する位置は便宜的に臓器の中心とした。用いた数学的ファントム外形の式と計算した臓器組織の位置を Table 1, 2に示した。但し Table 2中肺-Aは上肺、肺-Bは肺門に相当すると思われる位置、胃-Aは噴門、胃-Bは幽門とした。又肝-Aは肝における比較的深部、Bは浅部とした。卵巣及び大腸はMIRDファントムを縮尺した場合の位置より比較的下部が適当と考

Table 2 Coordinates of positions of various organs or tissues in a mathematical phantom

Organs or tissues	X_i^*	Y_i	Z_i	
Gonad	Ovary	±5.5	-0.0	8.5
	Testis	±1.2	-7.4	-2.1
Breast		±8.0	-9.0	45.0
Lung	A	±7.7	0.0	59.0
	B	±6.5	0.0	46.0
Thyroid		±1.0	-6.0	64.5
Remainder	Bladder	0.0	-4.1	7.4
	Kidney	±5.5	5.5	29.9
Upper large intestine		-7.8	-2.2	12.0
Lower large intestine		7.8	1.6	12.0
Liver	A	-9.0	-3.1	34.2
	B	-13.0	-3.1	34.2
Lectum		0.0	4.1	7.4
Spleen		10.0	2.8	34.0
Small intestine		0.0	-1.8	20.2
Stomach	A	7.4	-3.7	38.5
	B	7.4	-3.7	25.0
Thymus		-1.8	-5.5	56.0
Uterus		0.0	1.8	8.5

* +;Left -;Right

えられる為²⁸⁾卵巣を恥骨上縁から5~10cm, 大腸は10~15cm位とした。赤色骨髄の計算点はなるべく全身の骨の分布に均等になるよう左右対称に67点を選んだ。リンパ組織も全身に分布するがその位置の決定は極めて困難である為、便宜的に、赤色骨髄と同じ位置に分布すると仮定して計算した。Fig. 2に計算点を示す。

2-3. 組織等価物質中の線量分布の測定

(1) 式における R_{Pi0} を求める為次の実験を行った。X線発生装置は東芝 KXO-12を用いた。総濾過2mmAlとし、管電圧70, 90, 110kV, 照射野10×10, 15×15, 20×20, 30×30, FSD 90cmとした。組織等価物質に MixDp を使い、Fig. 3に示すようにX線ビーム方向に平行に20cm, 垂直に35cm×100cmに組み、照射野内外における線量を測定した。測定には12ccと0.6ccの電離箱を用いた。測定結果の一例として Table 3, 4に MixDp 中のビーム中心軸上の深部量百分率を示した。又管電圧90kV, 照射野30×30cmの場合の, MixDp 表面から種々の深さの面上の線量プロファイルを Fig. 4に、同条件のビーム中心軸上の深部量百分率を Fig. 5に示した。(1)式における R_{Pi0} はこれらのデータから内挿し作製した等線量曲線から求めるが、一例として、Fig. 4, 5より求めたビーム

Table 3 Percentage depth doses in MixDp phantom for various field sizes; 110kV (4.0mm Al HVL)

Field size (cm) Depth (cm)	10x10	15x15	20x20	30x30
0	100.0	100.0	100.0	100.0
1	94.0	94.5	95.0	96.0
2	85.0	86.0	86.5	88.0
3	74.0	76.0	77.0	77.6
4	62.4	64.8	67.0	67.9
5	52.0	53.5	57.8	58.5
6	42.7	44.9	49.5	50.5
7	35.0	37.6	42.0	46.6
8	28.5	31.4	35.6	43.2
9	23.6	26.2	30.2	31.8
10	19.2	21.9	25.5	27.0
12	12.6	15.2	18.4	19.2
14	8.3	10.9	13.1	13.6
16	5.3	7.0	9.2	9.4

Table 4 Percentage depth doses in MixDp phantom for various field sizes; 90kV (3.4mm AL HVL)

Field size (cm) Depth (cm)	10x10	15x15	20x20	30x30
0	100.0	100.0	100.0	100.0
1	93.5	93.5	93.5	93.5
2	82.5	83.0	83.5	84.0
3	69.8	71.1	71.6	73.0
4	57.2	59.0	61.6	62.2
5	47.0	49.0	52.1	52.9
6	38.5	40.5	44.0	44.9
7	31.2	33.5	37.0	37.9
8	25.2	27.8	30.9	31.8
9	20.4	22.9	25.8	26.5
10	16.5	18.7	21.5	22.2
12	10.6	12.6	15.0	15.5
14	6.8	8.4	10.4	10.6
16	4.2	5.5	7.0	7.2

中心軸を含み、中心軸に平行な面上での等線量曲線を Fig. 6に示す。Fig. 6において照射野の境界では等線量曲線はわずかに不連続であるが計算機での計算の都合上、連続とした。

3. 臓器組織線量の計算及び結果

胃撮影の場合には管電圧70, 90, 110kV, 照射野20×20, 30×30cmで、腹背(A/P), 背腹(P/A), 左側(L/R), 第1斜位について臓器組織線量の計算を行った。又胸部撮影の場合には管電圧110kV, 照射野30×30cmで計算した。

骨髄線量の算定には次式を用いた。

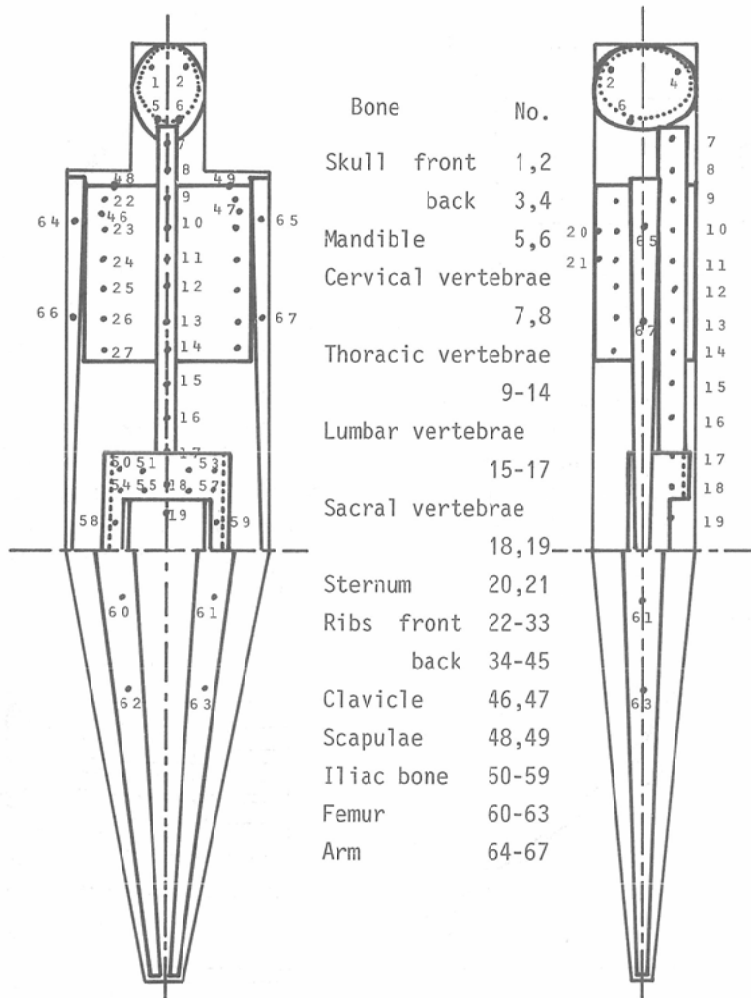


Fig. 2 Distribution of red bone marrows in average Japanese adult phantom for calculations of bone marrow dose

$$D = \frac{1}{M_1} \sum_{r=1}^{67} m_r d_r \quad (2)$$

Mは全身の赤色骨髓量, m_r はFig. 2に示すようにr番目の赤色骨髓量, すなわち $M = \sum_{r=1}^{67} m_r$, d_r はr番目の赤色骨髓の線量を示す. 赤色骨髓は骨梁間隙に分布している為, 平均原子番号の高い骨梁からの二次電子の影響として4%²⁹⁾の補正を行った. 皮質骨による減弱を考慮すべきであるが^{30)~32)}, これらは全身の骨により異なり補正は困難であるため, 行なわなかった. 赤色骨髓の重量分布は欧米人, 日本人^{33)~38)}とも多くのデータがあるがここでは成人の場合についてTable 5に示す値を用い合計766.5g³⁴⁾とした.

骨表面での線量は骨髓線量計算に用いたと同じ位置の骨について計算した. 骨肉腫に対するリスクが骨ミネラルの量に比例すると仮定して全身の骨ミネラルの分布²⁵⁾³⁹⁾に従って重みづけをし(2)式と同様に計算した. 骨ミネラルの重量分布をTable 5に示した.

肺は密度が軟組織の1/3であるため, Fig. 1の P_{i0} と P_o の間に肺が存在する場合, $\overline{P_{i0}P_o}$ を肺を通過する部分のみ1/3に縮尺した.

リンパ組織の線量は骨髓での線量の算術平均($\sum d_r / 67$)とし重みづけはしなかった.

R/rad変換係数はICRU 17⁴⁰⁾のf-factorによ

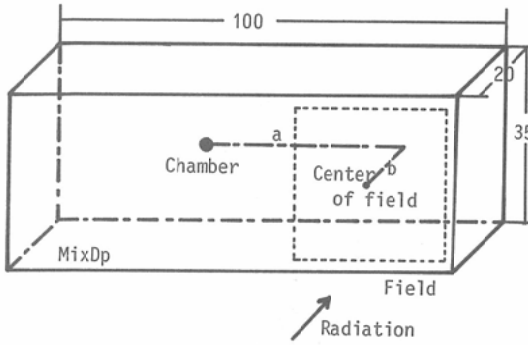


Fig. 3 Experimental geometry for measurement of depth dose in MixDp phantom, a; distance between central beam axis and the center of chamber, b; depth from the phantom surface. Depth doses and beam profiles were measured under this geometry for various field sizes.

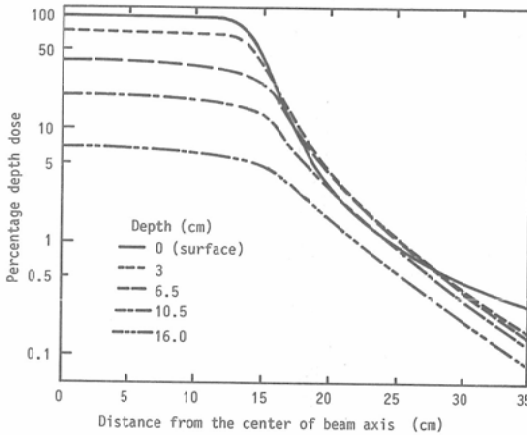


Fig. 4 Beam profiles at various depths in MixDp phantom (90kV, field size 30x30cm)

り用いたX線の管電圧70kV (3.1mmAl HVL), 90kV (3.4mmAl HVL), 110kV (4.0mmAl HVL) に対し, それぞれ MixDp 深部において線質は変わらないと仮定して軟組織には0.910, 0.914, 0.916を用いた. 骨表面の線量について ICRP 26¹⁾ では骨表面から10 μ mの深さでの線量を評価すべきであるとしているが, ここでは compact bone に対する f-factor を用い, それぞれ4.38, 4.30, 4.25とした.

同時に種々の臓器組織線量による実効線量当量 H_E を計算したが, これは ICRP 26¹⁾ により次式で

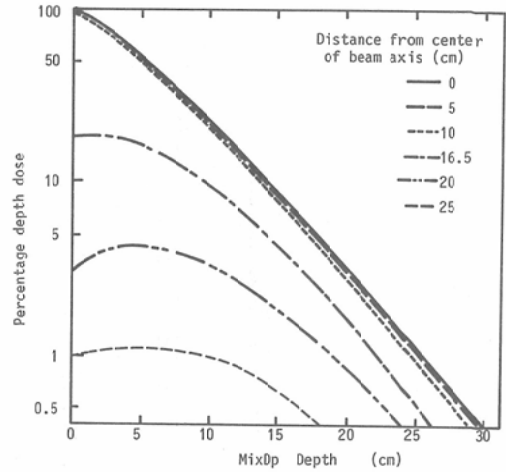


Fig. 5 Percentage depth dose curves on parallel lines with beam axis at a distance from beam axis in MixDp phantom (90kV, field size 30x30 cm)

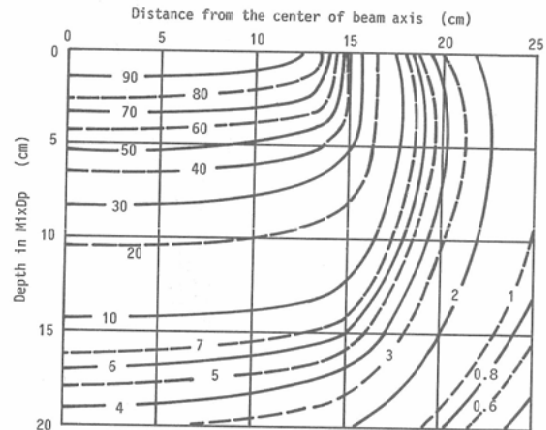


Fig. 6 Isodose curves in MixDp phantom (90kV, field size 30x30cm)

定義されている.

$$H_E = \sum_T W_T H_T \quad (3)$$

ここで W_T は臓器組織 T の発がんのリスクのがんのリスク全体に対する荷重平均で ICRP 26¹⁾ に示されている値を用いた. この値を Table 6 に示す. H_T はがんのリスクに関する T が X 線により受けた線量当量である. ここでは X 線が対象なので, 線質係数を 1 とした.

計算結果を Table 7, 8 に示した.

Table 5 Red bone marrow and mineralized bone distributions (Weight and Fraction) after reference * Miyagawa³⁴⁾ and ** Tanaka³⁹⁾

Bone	Red bone marrow		Mineralized bone		Number of calculation points
	Weight*	Fraction	Weight**	Fraction	
Skull	55.6g	0.072	663.0g	0.179	4 (4)
Mandible	3.7	0.005			2 (2)
Clavicle	5.6	0.007	44.0	0.012	2 (1)
Scapulae	16.7	0.022	113.0	0.031	2 (1)
Sternum	20.6	0.027	18.5	0.005	2 (1)
Cervical vertebrae	22.2	0.029	51.5	0.014	2 (2)
Thoracic vertebrae	101.0	0.132	156.5	0.042	6 (4)
Lumbar vertebrae	85.6	0.112	128.0	0.035	3 (3)
Sacral vertebrae	65.8	0.086	72.5	0.020	2 (2)
Ribs	104.5	0.136	368.5	0.073	24 (6)
Ilium	170.2	0.222	317.0	0.085	10 (4)
Femur	87.1	0.144	676.0	0.185	4 (1)
Patella			24.5	0.007	
Tibia			383.5	0.104	
Fibula			90.0	0.024	
Feet			198.0	0.053	
Humerus	27.9	0.036	237.0	0.064	4 (-)
Radius			75.0	0.020	
Ulna			94.0	0.025	
Hand			89.5	0.024	
Total	766.5g	1.000	3700.0g	1.000	67 (31)

() ; Number of measured points in Rando woman phantom

A/P 照射では乳房の存在により骨髄等の線量が異なるので Table 7-a, 8 では男女別に示した。実効線量当量の計算において ICRP 26¹⁾ ではその他の臓器として線量の大きいものから 5 つを選ぶよう勧告している為、Table 7, 8 に示したように選択した。一つの臓器で複数点測定したものについては平均値を用いた。

4. Rando woman phantom 実験

4-1. 診断用 X 線装置の撮影条件

X 線撮影条件は仮令同一の機種を用いたとしても、増感紙やグリッドの有無、種類により異なるとともに診断目的や術者個々の方針・方法によっても異なる。従って被曝線量も異なる。

一般に診断領域で用いられている条件の範囲を知る為に全国での種々の施設に X 線撮影条件に関してアンケート調査をした。回答を得た 147 施設による胃と胸部の撮影条件のヒストグラムを Fig. 7 に示す。施設により撮影条件はかなり広い範囲に渡り分布している事を示している。

MixDp 中の等線量曲線の作製及び Rando woman phantom 実験にはこれらの条件から推定した一般的な管電圧、照射野等を用いた。

Table 6 The values of weighting factor (W_T) representing the proportion of the stochastic risk resulting from tissue (T) to the total risk recommended by ICRP 26

Organ or tissue	W_T
Gonads	0.25
Breast	0.15
Red bone marrow	0.12
Lung	0.12
Thyroid	0.03
Bone surfaces	0.03
Remainder	0.30

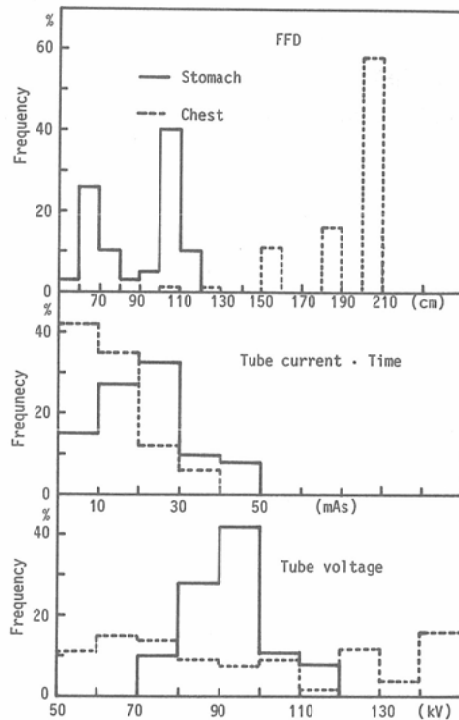


Fig. 7 Technical factors for stomach and chest X-ray examination. These data were obtained from a nationwide survey

4-2. Rando woman phantom による線量測定

ここで行った線量計算の結果と実測の場合の値と比較する為、Rando woman phantom を用いて臓器組織線量を測定した。

測定には MSO-S (Mg_2SiO_4) (日本化成オプティクス社製) の熱ルミネッセンス線量計 (TLD)

を用いた。TLD 素子相互の感度のバラツキ7%以内のものを選び MixDp 中で電離箱（応用技研製円筒型12cc）と比較校正した。この電離箱は電総研で校正した電離箱（応用技研製円筒型12cc）により校正してある。

測定した部位は照射野内のファントム表面、生殖腺、骨髄及び致死の癌に関係する主な臓器組織で、各位置は Gambarelli⁴¹⁾等の CT 像を参考にそれらに相当する Rando woman phantom の位置に穴をあけ TLD を装着した。骨髄は全身の赤色骨髄量の分布に従い Rando woman phantom の骨の代表的な31点に TLD を装着した。各骨の測定点の数を Table 5 に示した。

4-3. 実験結果

Rando woman phantom を用いて線量測定し

た結果の一例として胃撮影で管電圧90kV, 25 mAs, 照射野30×30cm, A/P を、また胸部撮影で110kV, 25mAs, 30×30cm P/A について Table 9, 10 に示した。表中二列目が測定の結果である。三列目に MixDp 中の等線量分布から(1)式により算出した結果を示した。この場合の人体数学的ファントム内の位置 P_i はそれぞれ x 軸及び y 軸方向の表面からの深さを Rando woman phantom の形状に近く補正した。 z 軸方向は両ファントムの差はほとんどない。表中第四列に測定と計算結果の比を示した。

5. 考察

5-1. 深部量百分率の測定及び線量計算

1) MixDp 中での深部量百分率

深部量百分率は照射野の大きさ、形、線質、FSD

Table 7 Calculated organ dose equivalents (H_T) and effective dose equivalents (H_E) in 10^{-6} Sv (mrem) for average Japanese adult phantom for stomach examinations which various tube voltage and field sizes

a. (A/P)

Organs or tissues	Tube voltage Field size	110kV				90kV				70kV			
		20x20		30x30		20x20		30x30		20x20		30x30	
		H_T	H_E	H_T	H_E	H_T	H_E	H_T	H_E	H_T	H_E	H_T	H_E
Gonad	Ovary	1.19	0.30	3.86	0.96	0.47	0.12	2.02	0.51	0.18	0.04	0.67	0.17
	Testis	0.22	0.05	0.53	0.13	0.12	0.03	0.30	0.07	0.02	0.01	0.11	0.03
Breast		28.10	4.22	148.80	22.32	19.56	2.93	102.29	15.34	8.52	1.28	49.95	7.49
Red bone marrow	M	10.94	1.31	20.08	2.41	6.74	0.81	12.88	1.55	2.82	0.34	5.50	0.66
	F	9.12	1.09	17.27	2.07	5.48	0.66	10.89	1.31	2.14	0.26	4.53	0.54
Lung (Male)	A	4.05	4.16	14.67	6.12	2.24	2.66	9.25	4.12	0.79	1.17	3.58	1.81
	B	65.32		87.45		42.25		59.50		18.71		26.63	
Lung (Female)	A	4.05	3.11	14.67	4.65	2.24	1.93	9.25	3.00	0.79	0.80	3.58	1.27
	B	47.90		62.80		29.95		40.60		12.49		17.43	
Thyroid		0.47	0.01	1.33	0.04	0.28	0.01	0.80	0.02	0.10	0.00	0.43	0.01
Bone surface	M	29.97	0.90	54.70	1.64	18.87	0.57	35.61	1.07	8.23	0.25	15.88	0.48
	F	23.29	0.70	45.70	1.37	14.25	0.43	29.12	0.87	5.78	0.17	12.66	0.38
Bladder		0.96		3.06		0.53		1.64		0.15		0.59	
Kidney		22.36		24.29		13.08		14.08		4.64		5.21	
Upper large intestine		3.11		10.52		1.71		5.97		0.59		2.29	
Lower large intestine		2.65		8.40		1.42		4.61		0.45		1.60	
Liver	A	81.04	3.01	97.36	5.50	51.01	1.89	66.42	3.64	25.24	0.91	30.16	1.71
	B	19.46		85.87		12.02		55.07		4.90		26.60	
Lymphonodi	M	13.09		34.46		11.51		22.79		5.10		10.24	
	F	14.35		28.55		8.86		18.51		3.65		8.12	
Pancreas		63.52	3.81	67.21	4.03	40.09	2.41	41.70	2.50	16.48	0.99	17.15	1.03
Rectum		0.68		2.22		0.35		1.13		0.09		0.34	
Spleen		25.98	1.56	35.25	2.11	15.90	0.95	21.86	1.31	6.14	0.37	8.48	0.51
Small intestine		24.63	1.48	73.37	4.40	15.03	0.90	47.47	2.85	5.69	0.34	21.58	1.30
Stomach	A	74.52	5.26	80.31	5.72	47.19	3.41	52.78	3.83	20.97	1.50	23.43	1.76
	B	100.72		110.47		66.44		75.09		32.47		35.17	
Thymus		1.31		4.51		0.65		2.47		0.25		0.94	
Uterus		1.04		3.48		0.43		1.84		0.15		0.59	
Effective dose equivalent	Male		25.77		59.86		16.58		36.32		7.26		16.80
	Female		24.58		53.23		15.64		35.19		6.76		16.17

b. (P/A)

Organs or tissues		110kV				90kV				70kV			
		Tube voltage		Field size		Tube voltage		Field size		Tube voltage		Field size	
		H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E
Gonad	Ovary	1.19	0.30	3.86	0.96	0.47	0.12	2.02	0.51	0.18	0.04	0.67	0.17
	Testis	0.08	0.02	0.23	0.06	0.04	0.01	0.14	0.04	0.01	0.00	0.03	0.01
Breast		18.35	2.75	23.62	3.54	10.76	1.61	14.10	2.12	3.97	0.59	5.30	0.80
	Red bone marrow	21.99	2.64	36.88	4.43	14.66	1.76	25.00	3.00	6.82	0.82	11.58	1.39
Lung	A	4.05	4.16	14.67	6.13	2.24	2.66	9.29	4.13	0.79	1.17	3.58	1.81
	B	65.32		87.44		42.25		59.50		18.71		26.63	
Thyroid		0.10	0.00	0.33	0.01	0.06	0.00	0.19	0.01	0.01	0.00	0.04	0.00
Bone surface		44.96	1.35	75.02	2.25	29.83	0.89	51.09	1.53	13.95	0.42	23.83	0.71
Bladder		0.68		2.22		0.35		1.13		0.09		0.34	
Kidney		136.88	8.21	146.84	8.81	96.52	5.79	102.77	6.17	47.90	2.87	51.48	3.09
Upper large intestine		2.59		7.97		1.39		4.33		0.45		1.49	
Lower large intestine		3.11		10.34		1.69		5.74		0.58		2.19	
Liver	A	28.17		34.45		16.94		20.98		6.66		8.14	
	B	10.85		30.68		6.21		18.39		2.28		7.28	
Lymphonodi		23.99	1.44	42.94	2.58	15.73	0.94	28.93	1.74	7.26	0.44	13.30	0.80
Pancreas		63.52	3.81	67.21	4.03	40.09	2.41	41.70	2.50	16.48	0.99	17.15	1.03
Rectum		0.96		3.06		0.53		1.64		0.16		0.59	
Spleen		64.85	3.89	90.96	5.46	42.31	2.54	62.09	3.73	18.53	1.11	28.01	1.68
Small intestine		16.07		40.18	2.41	9.11		24.11	1.45	3.48		10.10	0.61
Stomach	A	28.72	1.72	32.77		17.05	1.03	19.43		6.53	0.40	7.49	
	B	28.73		32.65		17.26		19.35		6.58		7.47	
Thymus		0.81		2.73		0.37		1.40		0.12		0.44	
Uterus		1.24		4.07		0.51		2.16		0.19		0.75	
Effective dose equivalent	Male		29.99		39.71		19.64		25.51		8.81		11.93
	Female		30.27		40.61		19.75		25.98		8.85		12.09

c. (L/R)

Organs or tissues		110kV				90kV				70kV				
		Tube voltage		Field size		Tube voltage		Field size		Tube voltage		Field size		
		H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	
Gonad	Ovary	Left	0.86	0.11	3.11	0.39	0.34	0.04	1.54	0.19	0.13	0.02	0.47	0.06
		Right	0.28	0.03	0.68	0.09	0.11	0.01	0.31	0.04	0.04	0.00	0.09	0.01
	Testis	Left	0.08	0.01	0.21	0.03	0.05	0.01	0.12	0.01	0.02	0.00	0.03	0.00
		Right	0.06	0.01	0.16	0.02	0.04	0.00	0.09	0.01	0.02	0.00	0.02	0.00
Breast		Left	17.04	1.28	43.96	3.30	9.82	0.74	26.47	1.99	3.68	0.28	11.30	0.85
		Right	1.16	0.09	1.98	0.15	0.57	0.04	0.98	0.07	0.19	0.01	0.28	0.02
	Red bone marrow		5.56	0.67	9.11	1.09	3.33	0.40	5.47	0.56	1.28	0.15	2.14	0.26
Lung (Left)		A	3.70	1.73	12.62	2.39	2.00	1.04	7.55	1.52	0.69	0.45	2.84	0.64
		B	54.08		66.92		33.08		43.48		14.36		18.83	
Lung (Right)		A	1.50	0.15	3.45	0.25	0.67	0.07	1.83	0.13	0.20	0.01	0.55	0.03
		B	3.19		5.00		1.67		2.76		0.51		0.87	
Thyroid			0.45	0.01	1.48	0.04	0.21	0.01	0.75	0.02	0.05	0.00	0.22	0.01
Bone surface			13.36	0.40	21.79	0.62	8.19	0.25	12.70	0.38	3.27	0.10	5.15	0.15
Bladder			0.41		1.24		0.21		0.59		0.05		0.18	
Kidney		Left	31.26	1.87	33.94	2.03	18.63	1.11	20.25	1.21	6.93	0.23	7.72	0.25
		Right	3.71		4.03		1.98		2.11		0.61		0.65	
Upper large intestine			0.42		0.86		0.18		0.40		0.05		0.12	
Lower large intestine			2.69		8.53		1.44		4.69		0.46		1.63	
Liver		A	1.95		2.16		1.06		1.17		0.31		0.35	
		B	0.83		0.90		0.44		0.54		0.12		0.16	
Lymphonodi			9.14	0.55	14.00	0.84	5.69	0.34	8.70	0.52	2.32	0.14	3.64	0.22
Pancreas			10.93	0.65	12.58	0.75	6.92	0.41	7.02	0.42	2.27	0.13	2.30	0.13
Rectum			0.41		1.24		0.21		0.59		0.06		0.18	
Spleen			72.18	4.33	76.66	4.59	46.27	2.77	48.19	2.89	19.41	1.16	20.54	1.23
Small intestine			5.38		9.82		2.98		5.63		0.99		1.92	
Stomach		A	42.44	2.47	46.67	2.75	25.25	1.52	28.54	1.67	10.15	0.59	11.39	0.67
		B	40.03		45.18		24.77		27.45		9.82		11.11	
Thymus			2.97		9.08		1.48		4.91		0.47		1.56	
Uterus			0.51		1.60		0.22		0.77		0.07		0.23	
Effective dose equivalent	Male		14.22		17.98		8.71		11.50		3.44		4.67	
	Female		14.34		19.27		8.75		11.71		3.46		4.74	

d. (First oblique)

		Tube voltage				110kV				90kV				70kV			
		Field size		20x20		30x30		20x20		30x30		20x20		30x30			
Organs or tissues		H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E	H _T	H _E				
Gonad	Ovary	Left	1.25	0.16	4.07	0.51	0.50	0.06	2.13	0.27	0.19	0.02	0.73	0.09			
		Right	0.69	0.09	2.25	0.28	0.29	0.04	1.16	0.15	0.10	0.01	0.37	0.04			
	Testis	Left	0.09	0.01	0.29	0.04	0.05	0.01	0.15	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00			
		Right	0.09	0.01	0.29	0.04	0.05	0.01	0.15	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00			
Breast		Left	14.19	1.06	33.54	2.52	7.97	0.50	20.21	1.52	2.98	0.22	8.10	0.61			
		Right	2.00	0.15	3.70	0.28	1.08	0.08	1.98	0.15	0.34	0.03	0.61	0.05			
Red bone marrow			14.33	1.72	23.10	2.77	9.24	1.11	14.99	1.80	4.07	0.49	6.79	0.81			
Lung (Left)	A		1.67	1.78	5.57	5.49	0.88	1.11	3.21	3.59	0.30	0.42	1.16	1.65			
		B	23.01		85.93		17.59		56.70		6.68		26.37				
(Right)	A		0.82	0.62	2.77	1.34	0.40	0.34	1.45	0.78	0.12	0.12	0.44	0.28			
		B	9.44		19.57		5.31		11.58		1.88		4.24				
Thyroid			0.13	0.00	0.42	0.01	0.06	0.00	0.22	0.01	0.01	0.00	0.05	0.00			
Bone surface			30.67	0.92	49.70	1.43	20.14	0.60	31.57	0.95	9.24	0.28	14.32	0.44			
Bladder			0.61		1.96		0.33		0.99		0.08		0.30				
Kidney	Left		137.23	8.23	147.19	8.83	98.03	5.88	102.82	6.17	47.87	2.87	50.25	3.01			
		Right	34.74	2.08	40.14	2.41	20.93	1.26	24.30	1.46	8.36	0.50	9.64	0.58			
Upper large intestine			1.25		3.13		0.58		1.67		0.17		0.53				
Lower large intestine			3.06		10.84		1.72		6.52		0.61		2.55				
Liver	A		8.03		8.62		4.55		4.70		1.47		1.52				
		B	4.37		4.72		2.23		2.53		0.73		0.78				
Lymphonodi			16.84		28.05		11.29		18.67		5.34		9.09				
Pancreas			41.91	2.51	43.93	2.64	25.51	1.53	26.59	1.60	9.63	0.58	10.00	0.60			
Rectum			0.90		3.01		0.51		1.56		0.13		0.50				
Spleen			159.26	9.56	167.26	10.04	114.40	6.86	121.19	7.27	58.95	3.54	62.59	3.76			
Small intestine			13.54		28.19		7.54		17.05		2.77		6.62				
Stomach	A		55.82		62.58		33.67		39.71		14.77		17.02				
		B	55.82	3.35	62.58	3.75	33.67	2.02	39.71	2.38	14.77	0.89	17.02	1.02			
Thymus			0.65		2.10		0.30		1.07		0.09		0.33				
Uterus			1.07		3.69		0.42		1.91		0.16		0.61				
Effective dose equivalent	Male		32.00		41.67		21.41		27.72		9.94		12.81				
	Female		32.23		42.46		21.51		28.14		9.97		12.94				

により異なる。本報では照射野20×20cmと30×30cmでのビーム中心軸上の深部量百分変の違いはTable 4, 5からも明らかのように数%であった。Harrison⁴²⁾の水ファントム中での深部量百分率のデータと、半価層 (HVL) 4mmAl X線の場合について比較してみると3~10%だけ著者のデータの方が高い値を示した。線質, FSD, 照射野の違いなどを考慮すれば比較的良好一致を示していると思われる。

FSDの違いによるビーム中心軸上の深部量百分率の違いはMayneord⁴³⁾等の異なるFSDにおける同じ深さの深部線量の比F-factorの式によれば、例えばファントム表面から15cmの深さにおけるFSD 90cmと190cmの深部量百分率の違いは17%である。しかしJohns⁴⁴⁾⁴⁵⁾等は実験的にはこの値の1/2以下であるとしている。この程度の誤差であれば本報での他の因子による誤差以内で

あると考えられる為、線量計算に当っては胃、胸部撮影とも、FSD 90cmの等線量分布を用いた。

2) 線量計算

ICRP 34⁶⁾にいくつかの選ばれたX線撮影法における臓器組織の平均吸収線量が示されている。HVL 4mmAlのX線で胸部P/A撮影における肺での吸収線量を比較した。ICRP 34⁶⁾では入射カーマ1Gy当りについて示されているので、このエネルギーでの再生係数を1.4⁴⁶⁾⁴⁷⁾とし、表面線量を0.65mGy (65mrad)と変換すると、肺での線量は約0.3mGy (30mrad)となる。著者の計算結果では0.27mGy (27mrad)であったので比較的良好一致している。

Fig. 8に管電圧を横軸に、表面線量に対する臓器組織線量の比を縦軸にプロットした。Drexler¹⁷⁾等のモンテカルロ法による計算結果と比較したところ、撮影条件が異なるため、数値の直接比較はで

Table 8 Calculated organ dose equivalents (H_T) and effective dose equivalents (H_E) in $10^{-5}Sv$ (mrem) for average Japanese adult phantom for chest examinations; 110kV, field size $30 \times 30cm$

Organs or tissues	A-P		P-A		L-R		Oblique					
	H_T	H_E	H_T	H_E	H_T	H_E	H_T	H_E				
Gonad	Ovary	0.05	0.01	0.05	0.01	Ovary	Left	0.04	0.01	0.04	0.01	
							Right	-	-	0.03	-	
	Testis	-	0.00	-	0.00	Testis	Left	-	0.00	-	0.00	
							Right	-	-	-	-	
Breast		49.27	7.39	11.39	1.71	Breast	Left	14.87	1.27	17.90	1.50	
							Right	1.97	-	2.09	-	
Red bone marrow	Male	9.06	1.09	12.84	1.54	Red bone marrow		4.85	0.58	10.29	1.23	
	Female	8.01	0.96									
Lung	Male	A	25.18	3.23	25.18	3.23	Lung (Left)	A	20.33	1.34	37.29	2.10
		B	28.64		28.64			B	24.41		32.89	
Lung	Female	A	25.18	2.75	25.18	3.23	Lung (Right)	A	2.87	0.24	6.94	0.45
		B	20.17		28.64			B	5.07		7.90	
Thyroid		6.21	0.19	1.80	0.05	Thyroid		1.92	0.06	3.00	0.09	
Bone surface	Male	27.05	0.81	34.29	1.03	Bone surface		16.05	0.48	29.83	0.89	
	Female	23.57	0.71									
Kidney		3.27		8.55		Kidney	Left	4.30	0.26	15.58	0.93	
							Right	0.64		7.14		
Liver	A	26.35	1.65	11.49	0.74	Liver	A	1.75		2.84		
	B	28.62		13.29			B	0.78		1.77		
Lymphonodi		14.65	0.88	18.30	1.10	Lymphonodi		3.46	0.21	15.48	0.93	
Pancreas		16.14	0.97	16.14	0.97	Pancreas		2.90		12.89	0.77	
Spleen		12.50		25.18	1.51	Spleen		18.41	1.10	56.13	3.37	
Stomach	A	26.60	0.36	16.31	0.53	Stomach	A	18.99	0.62	28.42	0.95	
	B	2.03		1.43			B	1.62		3.16		
Thymus		42.81	2.57	6.81		Thymus		5.94	0.36	5.56		
Uterus		0.06		0.08		Uterus		-		0.05		
Effective dose equivalent	Male		19.64		12.07				6.52		13.21	
	Female		18.94		12.72				6.53		13.22	

Table 9 Comparison of calculated organ doses in $10^{-5}Gy$ (mrad) with experimental data obtained for the Rando woman phantom for stomach examination; 90kV, field size $30 \times 30cm$, A/P

Organs or tissues	Experiment (A)	Calculation (B)	Ratio (A/B)
Ovary	1.71	1.99	0.86
(Testis)	0.25	0.27	0.92)
Breast	80.81	72.20	1.12
Red bone marrow	8.66	9.89	0.88
Lung	29.69	26.06	1.14
Thyroid	0.98	0.88	1.12
Bone surfaces	18.11	20.65	0.88
Lymphonodi	8.85	9.58	0.92
Stomach	85.53	72.88	1.17
Liver	65.38	61.98	1.05
Large intestine	3.55	3.94	0.90
Bladder	1.18	1.27	0.93
Effective dose equivalent	27.58	25.28	1.07

Table 10 Comparison of calculated organ doses in $10^{-5}Gy$ (mrad) with experimental data obtained for the Rando woman phantom for chest examination; 110kV, field size $30 \times 30cm$, P/A

Organs or tissues	Experiment (A)	Calculation (B)	Ratio (A/B)
Ovary	0.03	0.04	0.75
(Testis)	0.01	0.01	-)
Breast	4.50	5.18	0.87
Red bone marrow	11.71	13.31	0.88
Lung	34.16	29.46	1.16
Thyroid	6.37	5.51	1.16
Bone surfaces	29.09	32.06	0.91
Lymphonodi	13.40	15.25	0.88
Stomach	8.95	10.24	0.87
Liver	14.80	14.38	1.03
Large intestine	0.05	0.10	0.50
Bladder	0.02	0.04	0.50
Effective dose equivalent	9.49	9.44	1.01

きないが管電圧の増加に対する臓器組織線量の比の増加や A/P, P/A 撮影時の違いなど傾向は一致していた。

胃撮影における Rando woman phantom による測定結果と数学的ファントムによる計算結果を比較すると、数学的ファントムは体型をはじめ解

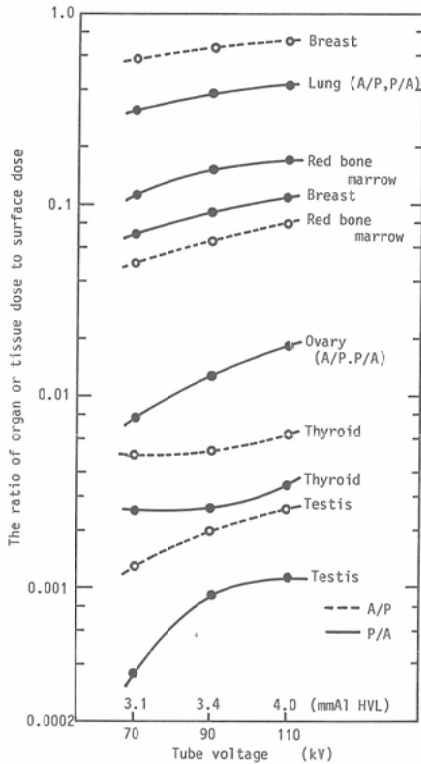


Fig. 8 Organ or tissue doses per unit surface dose for stomach examination at various tube voltage

剖学的構造を細かくする事については限界があり、線量推定を行った部位が測定した部位とは異なる事もある。生殖腺で3~6%、骨髄線量では20~25%の違いがあった。骨髄線量はいずれも計算による方が大きかったのであるが、最も違いの大きいのはP/A方向からの照射野30×30cmの場合であった。これはRando woman phantomには上肢がないが、数学的ファントムでは上腕での線量を考慮しており、これが全体の7%を占めている事、又照射野内に赤色骨髄の割合が多く、数学的ファントムの方がより多くの線量計算の点をとっておりFig. 2にも明らかなように背部の方に多いと考えられる。更に、この計算では骨髄線量に皮質骨による減弱の補正を行っていない。この減弱は骨によって異なるが、10%もしくはそれ以上となる場合もある³¹⁾³²⁾⁴⁸⁾⁴⁹⁾。従ってこの減弱の影響によることも考えられる。

実効線量当量もRando woman phantom実験

と数学的ファントムによる計算結果との違いが大きかった。Rando woman phantom実験では測定点を任意にとることはできないが、計算では可能である。従って線量の大きい順に5つの臓器組織を選択するという操作が数学的ファントムによる計算の方がよりの確に行えた為であると考えられる。

甲状腺の線量はファントムの形、特に頸部の形及び照射野・肺・甲状腺の位置関係が大きく影響し、照射の方向によってはRando woman phantomの実験結果と全く異ってしまう。A/P方向からの照射ではこれらの影響は少ない為計算結果は実験と10%以内で一致した。Rando woman phantomの実験結果ではP/A, L/R方向からの照射による線量はA/P照射によるそのそれぞれ1/2, 3/4程度であった。従って計算の場合でもP/A, L/R方向の照射による線量はA/P照射の際のそれぞれ1/2, 3/4とした方がより実際的であるとも考えられる。

これらの傾向は胸部撮影でも同様であった。

本報の線量計算に用いたMixDp中の線量分布等計算に用いたパラメーターの測定及びRando woman phantom実験は一種類のX線発生装置のみにより行われた。これらの測定結果を用いた線量計算値が他のX線発生装置による線量とは一致しないかも知れないが、他の報告⁶⁾¹⁷⁾⁴²⁾との比較から推してほぼ平均的な値であろうと思われる。又組織等価物質中の深部量百分率は一般によく測定されており計算パラメータとしては得やすいものである。従って各施設で実際に使用しているX線装置でのこれらのパラメータを得ることにより臓器線量の算出は容易である。

5-2. 計算の応用性

1) 種々の撮影部位での線量推定

この報告では胸部と胃部撮影について線量計算を行ったが体幹部における他の部位の撮影も同様に線量推定が可能であると考えられる。

しかしRagozzino⁵⁰⁾等は骨盤撮影及び尿路撮影時の胎児の被曝線量を求める為にRando woman phantomのNo. 31及びNo. 32での深部線量曲線を測定により作製している。それによれば、A/PとP/A方向による照射では深部線量曲線が、腸骨

と仙骨の存在の為に10~20%異なる。従って骨盤内のP/A方向撮影の線量計算を行う場合、骨での吸収を考慮すべきである。

リンパ組織は血管と同様に広く全身に分布しており、位置の決定は難かしいが、リンパ管系の主要部を考えると頸部や上胸部の浅い位置以外はリンパ管造影等によれば骨の周囲に沿って多い。これにより胃・胸部撮影では一応骨と同じ位置と仮定し腋窩等胸部外側面は肋骨で代え、頸部については線量が少くなる為考えなかった。しかし撮影部位によっては肩径部リンパ節等無視出来ない部分もある。リンパ組織は本報の計算では実効線量当量計算において無視しえない組織と考えられる為、照射方法と照射部位によっては位置の検討が必要である。

2) 国民線量推定への適用

UNSCEAR⁵¹⁾の報告によれば各国における医療被曝による国民線量の中で、X線診断からの寄与が最も大きい。日本においても橋詰等⁵²⁾⁵³⁾の推定で同様の結果が報告されている。

国民線量推定の基礎となるX線撮影時の被検者の被曝線量は実際の患者にTLDを装着させて測定した報告例⁵¹⁾⁵⁴⁾⁵⁵⁾もあるがこの方法では測定不可能な臓器組織も多く、多くの場合はファントム実験により得ている。しかしファントム実験によってもあらゆる臓器組織について線量を求める事は困難である。数学的なファントムは体格や臓器組織の位置を容易に変えて計算できる。従って国民線量の推定において、性別年齢別による体格の違いを考慮したより精度の高い線量推定が可能である。

また、撮影条件に関するアンケート調査によれば、施設により撮影条件はかなり広く分布している。これらの条件をいくつかの代表的な条件に分けて線量を集計することにより精度の向上が期待できる。

3) 計算位置を細かく変える事が出来る為容積線量の計算や、卵巣のように小さいか又は位置の定まりにくい臓器等の線量の確率分布を求める等の作業にも有効である。

4) 計算にはACOS-700S(2Mバイト)でFor-

tran言語を用いて行った。必要記憶容量21Kバイトでデータはカードイメージで500枚、実行時間はコンパイルを含めて24secであった。これはパーソナルコンピュータ程度で充分実効可能であると考える。

6. 結 論

医療被曝における正常化と防護の最適化を図る上で重要となる臓器組織線量の簡単な計算方法を検討した。この方法は放射線医学でよく用いられている深部量百分率と等線量曲線及び標準日本人の数学的ファントムを用いる。医療被曝に最も大きな寄与をしているX線撮影時の被検者の臓器組織線量を、最も撮影頻度の高い胸部と撮影枚数の多い胃部撮影に対しこの方法を応用した。更にRand woman phantomを用いてこの方法と実測との一致性を求めた。その結果は最大20%以内で一致した。

この方法により種々の条件下での臓器組織線量を簡単に計算することができ、医療被曝の実態の把握や国民線量推定の為の基礎的資料収集の簡素化と精度の向上が期待できると思われる。

稿を終るにあたり、御懇篤な御指導と御校閲を頂いた杏林大学医学部放射線医学教室古屋儀郎教授ならびに放射線医学総合研究所物理研究部丸山隆司室長に深く感謝致します。また御教示頂いた麻布大学獣医学部放射線科学教室橋詰雅教授に深く感謝致します。更に本研究に多くの御援助を頂いた放医研物理研究部及び技術部電子計算機室各位に心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) ICRP: Recommendation of the International Commission on Radiological Protection, Publication 26, Pergamon Press, : Oxford, 1977
- 2) ICRP: Protection against Ionizing Radiation from External Sources Used in medicine, Publication 33, Pergamon Press, Oxford, 1982
- 3) ICRP: Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection, Publication 37, Pergamon Press, Oxford, 1982
- 4) 橋詰 雅, 丸山隆司, 野田 豊, 福久健三郎: 診断用X線によるリスクの推定, 第1報, 撮影回数, 診断件数及び透視件数について, 日本医放会誌, 40: 885-897, 1980
- 5) 橋詰 雅, 丸山隆司, 野田 豊, 岩井一男, 館野之男, 西沢かな枝: 診断用X線によるリスクの推定, 第2報, X線診断による個人のリスク, 日本

- 医放会誌, 41: 59—70, 1981
- 6) ICRP: Protection of the patient in Diagnostic Radiology, Publication 34, Pergamon Press, Oxford, 1982
 - 7) Delafield, H.J.: Gamma-ray exposure measurements in a man phantom related to personal film dosimetry. *Hys. Med. Biol.*, 11: 63—73, 1966
 - 8) 古賀佑彦, 山本千秋, 田宮 正: X線診断の患者被曝. *臨床放射線*, 17: 122—129, 1972
 - 9) Sherman, G.J., Howe, G.R. and Miller, A.B.: Organ dose per unit exposure resulting from fluoroscopy for artificial pneumothorax. *Health Phys.* 35: 259—269, 1978
 - 10) Gray, J.E., Ragazzino, M.W., Van, Lysel, M.S. and Burke, T.M.: Normalized organ doses for various diagnostic radiologic procedures. *AJR*, 137: 463—470, 1980
 - 11) 西沢かな枝, 丸山隆司, 岩田猛男, 古屋義郎, 橋詰 雅: CT検査によるリスクの推定. 第2報. CT検査による臓器, 組織の吸収線量. *日本医放会誌*, 41: 242—249, 1981
 - 12) Niklason, L.T., Sorenson, J.A. and Nelson, J. A.: Scattered radiation in chest radiography. *Med. phys.*, 8: 677—681, 1981
 - 13) Jones, T.D., Auxier, J.A. and Snyder, W.S.: Dose to standard reference man from external sources of monoenergetic photons. *Health phys.*, 24: 241—255, 1973
 - 14) Warner, G.G., Poston, J.W. and Snyder, W.S.: Absorbed dose in phantoms which represent various aged male humans from external sources as a function of age. *Health phys.*, 28: 599—703, 1975
 - 15) O'Brien, K. and Sanna, R.: The distribution of absorbed dose-rates in human from exposure to environmental gamma rays. *Health Phys.*, 30: 71—78, 1976
 - 16) Rosenstein, M.: Organ doses in diagnostic radiology. HEW Publication 76—8030, Maryland, 1976
 - 17) Drexler, G., Eriskat, H. and Schibilla, H.: Patient exposure to radiation in medical x-ray diagnosis, Commission of the European communities, Munich-Neuherberg, 27—30 April 1981 (Proceeding)
 - 18) Hashizume, T., Maruyama, T., Nishizawa, K. and Nishimura, A.: Dose estimation of human fetus exposed in utero to radiation from atomic bombs in Hiroshima and Nagasaki. *J. Radiat. Res.*, 14: 346—362, 1973
 - 19) Hashizume, T., Maruyama, T., Nishizawa K. and Nishimura, A.: Estimation of absorbed dose in Thyroids and Gonads of survivors in Hiroshima and Nagasaki. *Acta Radiol.*, 13: 412—424, 1974
 - 20) Hashizume, T., maruyama, T., Nishizawa, K. and Fukuhisa, K.: Mean bone marrow dose of atomic bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki. *J. Radiat. Res.*, 18: 67—83, 1977
 - 21) Hashizume, T., Maruyama, T., Nishizawa, K., Noda, Y., Fukuhisa, K. and Takeda, E.: Determination of organ or tissue doses to survivors in Hiroshima and Nagasaki. *J. Radiat. Res.*, 21: 213—239, 1980
 - 22) Maruyama, T., Nishizawa, K., Noda, Y., Takeda, E., Fukuhisa, K., Furuya, Y. and Hashizume, T.: Estimation of the population doses and risk estimates from occupational exposures in Japan, 1978. Part 1. Determinations of organ or tissue doses and effective dose equivalents. *J. Radiat. Res.*, 22: 182—203, 1981
 - 23) Journal of Nuclear Internal Radiation Dose Committee, Supplement Number 3 Pamphlet 5, 1969
 - 24) 国民栄養の現状: 厚生省公衆衛生局栄養課編. 第1出版, 1983
 - 25) ICRP: Report of the task group on reference man. publication 23, Pergamon Press, Oxford, 1975
 - 26) 田中義一郎: 標準日本人について. *放射線科学*, 24: 41—45, 1982
 - 27) Tanaka, G., Kawamura, H. and Nakahara, Y.: Reference Japanese man. I. Mass of organs and other characteristics of normal Japanese. *Health Phys.*, 36: 333—346, 1979
 - 28) 鈴木正彦, 古屋義郎: 婦人科CT統影の実際. 金原出版, 東京, 1978
 - 29) 橋詰 雅, 加藤義雄, 丸山隆司, 白貝彰宏, 丸山静雄, 滝沢正臣: 診断用X線による骨髄線量の推定. *日本医放会誌*, 24: 1087—1093, 1964
 - 30) Spiers, F.W.: The influence of energy absorption and electron range on dosage in irradiated bone. *Brit. J. Radiol.*, 22: 521—533, 1949
 - 31) Spiers, F.W.: II. Dosage in irradiated soft tissue and bone. *Brit. J. Radiol.*, 24: 365—370, 1951
 - 32) 奥山武雄: 骨X線像の定量的観察についての研究(骨鉍物含有量のX線学的測定). *日本医放会誌*, 25: 775—790, 1965
 - 33) Hashimoto, M.: The distribution of active marrow in bone. *Kyushu. J. Med. Sci.*, 11: 103—111, 1960
 - 34) 宮川 正: 骨髄及び骨に対する電離放射線の個人

- ならびに集団の影響(所謂骨髓線量)に関する研究。文部省研究報告集録36年度放射線影響編, 67—75, 1961
- 35) 宮川 正: 診療用電離放射線による国民線量について。文部省研究報告集録38年度放射線影響編, 53—57, 1964
- 36) Ellis, R.E.: The distribution of active bone marrow in adult. *Phys. Med. Biol.*, 5: 255—258, 1978
- 37) Cristy, M.: Active bone marrow distribution as a function of age in humans. *Phys. Med. Biol.*, 26: 389—400, 1981
- 38) Takeshita, K., Yoshinaga, H. and Russell, W. J.: Revised active bone marrow distribution and mean active bone marrow dose. *Russell 私信*, 1981
- 39) Tanaka, G., Kawamura, H. and Nomura, E.: Reference Japanese man II. Distribution of strontium in the skeleton and in the mass of mineralized bone. *Health Phys.*, 40: 601—614, 1981
- 40) ICRU: Radiation dosimetry: X-rays Generated at potentials of 5 to 150-kV, International Commission and Measurements Report 17, Washington, D.C., 1970
- 41) Gambarelli, J., Gurinel, G., Chelvot, L. and Mattei, M.: Computerized axial tomography, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977
- 42) Harrison, R.H.: Central-axis depth dose data for diagnostic radiology. *Phys. Med. Biol.*, 26: 657—670, 1981
- 43) Mayneord, W.V. and Lamerton, L.F.: A survey of depth dose data. *Brit. J. Radiol.*, 14: 255—264, 1941
- 44) Johns, H.E., Bruce, W.R. and Reid, W.B.: The dependence of depth dose on focal skin distance. *Brit. J. Radiol.*, 31: 254—260, 1958
- 45) Johns, H.E.: Use of X-rays in radiotherapy, Edited by Attix F.H., Roesch W.C. and Tochilin, E.: *Radiation Dosimetry*, Academic Press, New York, 1969
- 46) Cohen, M., Jones, D.E.A. and Greene, D.: Central axis depth dose data for use in radiotherapy. *Brit. J. Radiol. Supplement*, No. 11, 1972
- 47) Harrison, R.M.: Back scatter factors for diagnostic radiography. *Phys. Med. Biol.*, 27: 1465—1474, 1982
- 48) Meema, H.E., Harris, C.K. and Porrett, R.E.: A method of determination of bone-salt content of cortical bone. *Radiology*, 82: 982—997, 1964
- 49) Imamura, K., Sakuyama, K., Fujii, M., Hasumura, H. and Miyoshi, K.: Assessment of bone mineral content of lumbar vertebrae by radiographic densitometry. *Nipp. Act. Radiol.*, 38: 111—119, 1978
- 50) Raggozzino, M.W., Gray, J.E., Brurke, T.M. and Lyse, M.S.: Estimation and minimization of fetal absorbed dose: Data from common radiographic examination. *AJR*, 137: 667—671, 1981
- 51) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 1977
- 52) Hashizume, T., Kato, Y., Maruyama, T., Kumamoto, T., Shiragai, A. and Nishimura A.: Genetically significant dose from diagnostic medical X-ray examinations in Japan 1969. *Health Phys.*, 23: 827—843, 1972
- 53) 橋詰 雅, 丸山隆司, 野田 豊, 岩井一男, 福久健二郎, 西沢かな枝: 診断用 X 線によるリスクの推定。第 3 報, X 線診断による国民線量と集団のリスク。日本医放会誌, 41: 132—143, 1981
- 54) Wall, F.B., Fisher, E.S., Shrimton, P.C. and Rae, S.: Current levels of gonadal irradiation from a selection of routine diagnostic X-ray examinations on Great Britain. *NRPB-R105*, Harwell, Didcot, 1980
- 55) Darby, S.C., Kendall, G.M., Rae, S. and Wall, B. F.: The genetically significant dose from diagnostic radiology in Great Britain in 1977. *NRPB-R106*, Hawell, Didcot, 1980