



Title	X線撮影における赤色骨髓線量推定の一方法
Author(s)	高久, 祐治
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1975, 35(8), p. 685-691
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15325
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

X線撮影における赤色骨髓線量推定の一方法

福島県立医科大学物理学講座

高 久 祐 治

(昭和50年2月21日受付)

(昭和50年4月14日最終原稿受付)

A Method for Estimation of Active Bone Marrow Dose from X-Ray Radiography

Yuji Takaku

Department of Physics, Fukushima Medical College

Research Code No.: 302

Key Words: Bone marrow dose, Computer processing, Chest tomography.

Contours and red marrow distributions on horizontal body sections were converted into data for computer processing, using available red marrow data and anatomy charts to which Rando phantom sections of 25-mm thickness were well correlated. Doses of the surface and several inner points of the phantom from X-ray radiography were measured by LiF thermoluminescence dosimeters. Dose distribution in 5-mm intervals on the plane of each phantom section was obtained by intra- and extrapolations of measured values, where logarithmic function was used for direction parallel to the beam axis. Integral dose, red marrow integral dose, average red marrow dose, and red marrow dose spectrum were computed from these red marrow and dose distribution data. Results from chest tomography are shown.

1. 緒 言

放射線による人体への影響を調べる場合、または、今まで得られている様々な結論を基にして影響を推定する場合、まず、問題となる器官への放射線量を正確に把握する必要がある。人工の電離放射線源から集団が受ける被曝のうちでは医療上の患者の被曝、その中でもX線撮影による被曝線量がその主なものであるとされている¹⁾。そして、赤色骨髓線量はその増大が白血病を誘発するかも知れないという理由で個人にとっても集団社会にとっても無視できない問題であり、人体への放射線の影響を論じる場合には生殖腺線量の次に重要であるとされている。

赤色骨髓線量を求めようとするとき、骨の中の

赤色骨髓量とその点の赤色骨髓に対する吸収線量を求めるなければならない。X線撮影の条件で決まるある照射範囲にわたってそれらの積を加算していき積分線量にしたり、または、平均赤色骨髓線量を求めたりする。撮影に使用されるX線のエネルギー分布は低いところにあるので、一般に撮影部位内の線量分布は変化が大きく、骨の影響などを受け複雑である。また、赤色骨髓の分布の複雑さ、それを含む骨そのものの体内における分布の多様性がこの作業を難しいものにしている。単色光量子線に対する単純化された条件での“標準人”に対する線量を大型の電子計算機で求めている例はある²⁾。しかし、撮影条件の多様さ、人体の複雑さを考えると単純なモデルから計算して得

た結果に対してはファントムなどを使った実測による充分な裏付けが必要のように思われる。

従来試みられている方法の主なものには橋詰等の方法と Russell 等による方法がある。橋詰等³⁾はX線撮影と透視について、実測赤色骨髓量を参考に、赤色骨髓20 g当たりガラス線量計1本の割合で36本を人体ファントム内に配置し、曝射・線量測定を行ない、骨髓積分線量は骨ごとの線量と赤色骨髓量の積を集計して求めている。この中では、赤色骨髓が接している骨境界面の影響による線量の補正を丁寧に扱つており、骨梁間隔頻度分布と2次電子の影響による超過線量値から平均超過線量を求め、腰椎、胸骨、腸骨、肋骨に対し50keVで2~3%の補正值を得ている。Russell 等⁴⁾は頭頂から骨盤までの骨を透明なアクリライトの箱に納め、次に箱の必要な部分を5 cmずつに区切り、全部で $4 \times 7 \times 17 = 476$ 個の立方区画に分けた。各立方区画中の赤色骨髓量をワックスを使って実測している。これと各立方区画の線量からいろいろな撮影条件での赤色骨髓積算線量を求めている⁵⁾。

今回著者の試みた方法の狙いは、まず、標準的な体格の人体に代わるファントム内の赤色骨髓の分布を信頼のおける何らかの方法で求め、これをデータ化する。次に、ある撮影条件における人体等価ファントム内の線量を線量依存性の少ない線量計を使ってなるべく多くの点で実測し、これを基に、その他の点の線量を電子計算機によつて求める。赤色骨髓と線量のファントム内分布を対応させて赤色骨髓線量を推定しようとするものである。これを胸部断層撮影の一例について試みた結果を含めてまとめ本報とした。

2. 方 法

線量分布実測用の人体等価ファントムとして Rando ファントムを使うことにした。これは身長 160cm、体重約54kgの女性ということになつておらず、軟組織等価物質、肺等価物質と人骨が使われている。また、直立位における水平面で厚さ25 mmの“切片”層に切断してある。それぞれの切片には、外径5 mmで厚さ 0.5mmのスチロール製カプ

セル内に線量計を入れ、これを20mmおきに挿入、固定できる穴が加工してある。この25mm厚の切片を、その切断面を上、下面とする $5 \times 5 \times 25$ mmの直方柱の“マス”に区分し、それぞれのマスに組番号(I, J)を対応させた。

赤色骨髓の分布と人体ファントムの輪郭を示すための電子計算機用データ BONE (I, J) を人体横断解剖図と赤色骨髓の骨内含有量から作成し、また、組番号(I, J)のマス中の組織の放射線量を示すデータ DOSE (I, J) を、ファントムにX線曝射して得られる線量計実測値を基に切片ごとに作る。これらのデータを電子計算機で処理し赤色骨髓線量を求める。データ処理に使用した計算機は東北大学大型計算センターに本体 NEAC シリーズ2200、モデル 500があり、これを東北各地にある端末タイプライターで操作する Time Sharing System (TSS) である。TSS の処理能力では(45, 45)が限度だったので、1つの切片、それも正中面で分けた片側についてだけ計算を実行させ、この処理を問題とすべき切片数だけ繰り返した。両側分、および、問題とすべき切片分全体の結果はマニュアルで集計することにした。

X線線量の測定にはフッ化リチウム熱ルミネッセンス線量計(TLD)を使用した。

2. 1 BONE (I, J) 作成法

赤色骨髓の人体内分布に関しては Ellis, R.E. の報告がある⁶⁾。彼は文献調査によつて、死体の重量で平均56.4kg、40歳の場合の赤色骨髓の骨内含有量を赤色骨髓が含まれると思われる主な骨について求めている。同報告の中では1対の肋骨、あるいは椎骨1つずつに含まれる量まで算出しておらず、頭蓋骨から大腿骨までに含まれる赤色骨髓の総量として1045.7gを得ている。本報告ではこれらの資料を使うことにした。

Rando ファントムには人骨が使われているのでこの骨を赤色骨髓分布のデータ化に利用することを考えたが、ファントム中の骨の位置と大きさに不満があつたので断念した。一方、西等による自然大の人体横断解剖図があり⁷⁾、これらの輪郭

が胸のあたりでは対応するファントム切片の輪郭とかなり良く合つていたのでBONE (I, J) はこの解剖図によつて作成した。BONE (I, J) を作成したときの手順を箇条書にまとめるとして：

- 1) 解剖図の必要な線を5mmの方眼紙に写しとり、マス目に番号を付ける。
- 2) 体輪郭境界はマス目の $\frac{1}{2}$ 以上を占めているかで決め、その外縁のBONE (I, J) を99.0とする。
- 3) 椎骨はそれぞれファントム切片の何れかに属させ、属す切片内にその椎骨は全て入っているものとする。マス目が全部骨で占められていればマス目の“重み”を1.0、一部なら0.5とする。
- 4) 肋骨は胸部の輪郭に沿つて背部より腹下方に斜走しているが、これを水平位に存在するものと便宜上仮定し、第n—2肋骨はそつくり第n胸椎が属していると見なしたファントム切片中に水平に入っているものとする。その分布はマス目1つずつの連続とし、その重みを1.0とする。また、マス目が斜めに斜めに接している部分は1個所につきそのどちらかのマス目の重みを $\sqrt{2}$ 倍する。
- 5) 1つの骨のマス目重みの総和値でEllisが求めたその骨に含まれている赤色骨髄質量(正中面で分けた片側だけについて作成するときはその半分の値)を割り、重み当たりの赤色骨髄質量を求め、これからBONE (I, J) を決める。
- 6) 胸骨、肩甲骨、上腕骨は解剖図とファントム切片が良い対応を示していない部分があるので、マス目重みの総和を内挿などしてまず求め、重み当たりの赤色骨髄量を決める。
- 7) 鎖骨は第1胸椎の属する切片にあるとし、肋骨のときと同じ方法で作る。

著者の先の報告⁸⁾ではBONE (I, J) の作成を、マス目内の骨の容積と骨の単位容積当たりの赤色骨髄の質量によつて行なうことを試みたが、手数がかかり、修正も大変面倒なので前述の方法に変更した。

2. 2 線量測定について

線量測定には低エネルギーでも比較的良い線質依存性を示すフッ化リチウム熱ルミネッセンス線量計を47個使用した。感度較正法、熱処理法、測定法の詳細は前に行なつた報告⁹⁾¹⁰⁾と同じである。

線量計の配置についてであるが、表面線量は規準になる大切な量なので、これに対して5個の線量計をファントム表面照射野中心におくことにした。ファントム内部を測るためには必要な範囲だけでも、線量計用の穴を総て利用すると約2,000個の線量計が必要になるので測定点を選ばなければならなかつた。選び方は、前頭方向の補間の計算を先に行なうので、まず、ファントム切片上、前頭の線を何本か決め、その線上に少なくとも2個所以上適当な間隔の穴に線量計を2個ずつ入れるようにした。これを必要な切片数について行なうと、やはり、かなりの数の線量計を要する。しかし、隣り合うファントム切片の線量分布に差があまりないことが判つていればDOSE (I, J) を隣りの切片の計算に流用することもできる。

2. 3 計算法

計算用のプログラムをFORTRANで作成した。大きさは208行である。計算実行時、計算機に入力するデータは：ファントム切片の番号、ファントム表面X線照射野中心と内部のいくつかの点のTLR実測値DOSE (I, J), TLD実測値を照射線量に換算する係数、ファントム輪郭と赤色骨髄分布を示すデータBONE (I, J)等である。この外に、DATA文によつて与えるデータは：照射線量を吸収線量、線量当量に換算する為の係数(それぞれ0.92, 1.0とした)、骨境界層の影響補正係数(1.03とした)、軟組織だけがあるとしたときのマス目中軟組織の質量(0.625となる)、配列DOSE (I, J), BONE (I, J)の大きさを指定する為の変数、等である。電子計算機で実行している内容をプログラムにある順序に従つて箇条書にすると、

- 1) データを読み込む。BONE (I, J), DOSE (I, J) はディスクから、その他は

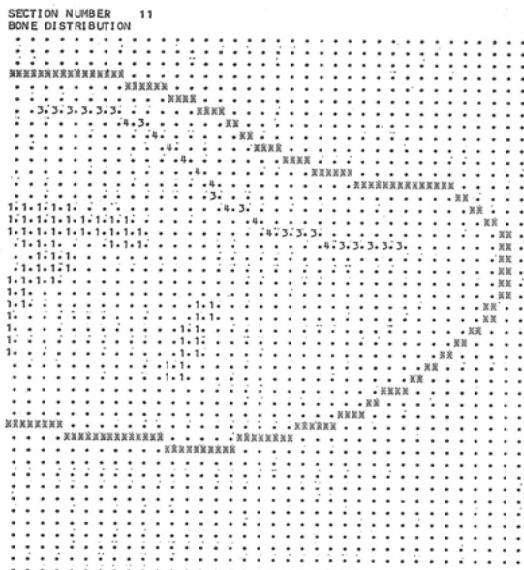


Fig. 1 Print-out from TSS terminal for check up of body contour and red marrow distribution data of a phantom section correlative to 1st thoracic vertebra. A row of 2 letters corresponds to 5×5 mm 2 . All data belonging to each 5×5 mm 2 have been multiplied by 10 for display.

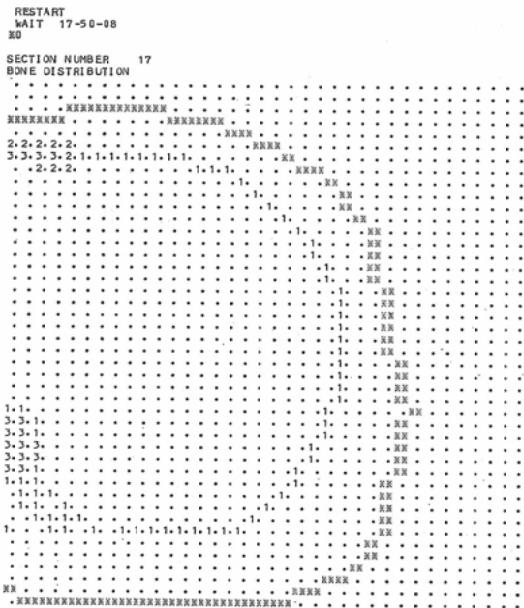


Fig. 2 Print-out of body contour and red marrow distribution data of a phantom section correlative to 7th thoracic vertebra and 5th ribs.

```

READY 15-8-29
RESTART
WAIT 15-8-44
X0
DOSE DISTRIBUTION SECTION NUMBER# 11

```

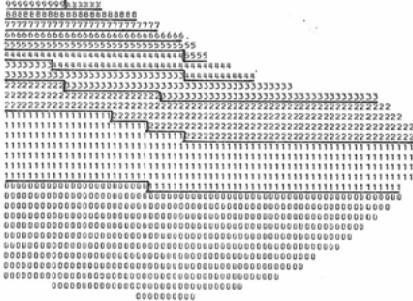


Fig. 3 Print-out of 10 even-step pattern of dose distribution on the same section as Fig. 1, obtained from LiF TLD measurements and intra- or extrapolations. Logarithmic function was used in the calculation for parallel direction of beam axis. Figs. 3~7 are results from chest tomography.

```

READY 18-13-15
RESTART
WAIT 18-13-57
X0
DOSE DISTRIBUTION SECTION NUMBER# 17

```

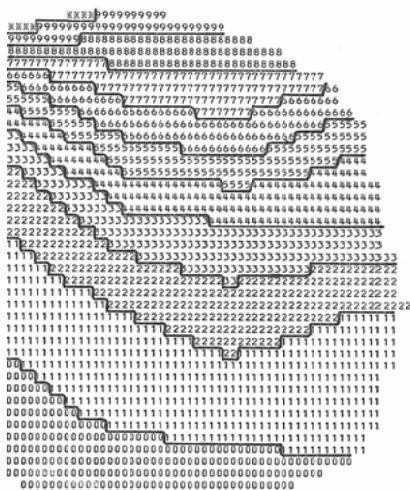


Fig. 4 Print-out of 10 even-step pattern of dose distribution on the same section as Fig. 2.

SECTION NUMBER# 11
 SURFACE DOSE# .320 REM
 DOSE NORMALIZED TOTAL# 155.
 DOSE INTEGRAL# 30.9 GM×RAD
 MARROW DOSE NORMALIZED TOTAL# 4.12
 MARROW DOSE INTEGRAL# 1.36 GM×RAD
 MARROW DOSE NORMALIZED AVERAGE# .296

MARROW DOSE SPECTRUM
 10×REM/SFSDOS×FRBONE MARROW GM

0 - 1	1.88
1 - 2	3.52
2 - 3	4.23
3 - 4	.996
4 - 5	.734
5 - 6	.367
6 - 7	.629
7 - 8	1.57
8 - 9	.000
9-10	.000
TOTAL	13.9
	GM

STOP
 EOP 33.205

READY 16-21-30

*

Fig. 5 Print-out of computed results for the phantom section same as Figs. 1 and 3.

SECTION NUMBER# 17
 SURFACE DOSE# .320 REM
 DOSE NORMALIZED TOTAL# 34.2.
 DOSE INTEGRAL# 68.4 GM×RAD
 MARROW DOSE NORMALIZED TOTAL# 5.02
 MARROW DOSE INTEGRAL# 1.65 GM×RAD
 MARROW DOSE NORMALIZED AVERAGE# .371

MARROW DOSE SPECTRUM
 10×REM/SFSDOS×FRBONE MARROW GM

0 - 1	2.05
1 - 2	5.80
2 - 3	.385
3 - 4	.231
4 - 5	.416
5 - 6	.324
6 - 7	.216
7 - 8	.846
8 - 9	2.41
9-10	.870
TOTAL	13.5
	GM

STOP
 EOP 32.155

READY 17-02-56

*

Fig. 6 Print-out of computed results for the phantom section same as Figs. 2 and 4.

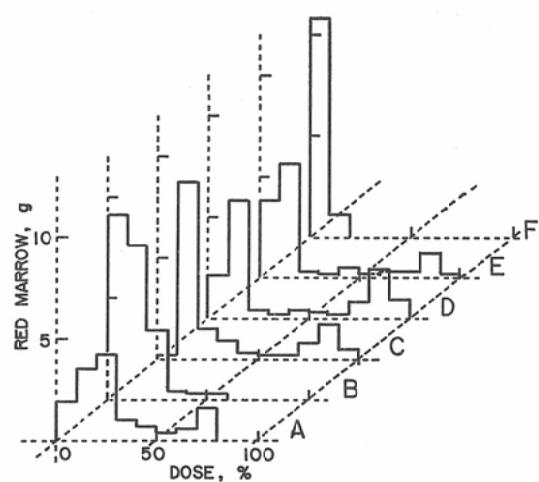


Fig. 7 Red marrow dose spectra. A, B, C, D, E and F represent those for sections correlative to 1st, 3rd, 5th, 7th, 9th, and 11th thoracic vertebrae, respectively.

Kee Board Input (KBI).

- 2) 表面線量を計算する。
- 3) DOSE (I, J) を入射表面照射野中心値に規格化する。
- 4) BONE (I, J) を図の形で Kee Board Output (KBO) する。これはデータの誤りの点検を兼ねている。各 BONE (I, J) は10倍にして印字させている。
- 5) DOSE (I, J) を前頭方向で線形補間する。
- 6) DOSE (I, J) を矢状方向で対数による補間をする。
- 7) DOSE (I, J) の一部を数値で KBO. 点検用である。
- 8) BONE (I, J) で与えられるファントム切片輪郭外側の DOSE (I, J) をゼロにする。
- 9) 10等分割による DOSE (I, J) の10段階組分けに従つて BONE (I, J) の赤色骨髓線量スペクトルを作る。
- 10) BONE (I, J)=BONE(I, J)*DOSE (I, J) とする。
- 11) DOSE (I, J) の和と必要な定数から

積分（容積）線量を計算する。

12) 10段階等分割でDOSE (I, J) を記号化し、図の形でKBO. 規格化された線量分布を与える。

13) BONE (I, J) の和と必要な定数で赤色骨髓積分線量を計算する。

14) 切片の平均赤色骨髓線量を計算する。

15) 計算結果をKBO.

3. 具体例

本法で胸部正面断層撮影の場合の赤色骨髓線量を求めた例を示す (Fig. 1~6). この場合は斜入射ではあるが平均してX線が矢状に入射したと考えた。撮影条件は、管電圧65kVp, 管電流50mA, FFD = 158cm, 円軌道, 90°~90°, 1.5秒曝射, θ=25°, 照射野はフィルム位置で大陸大, AI 0.5mm相当フィルター, HVL = 2.1mmAl.

計算結果は Fig. 5, 6 のように印字させている。赤色骨髓積分線量は各切片の MARROW DOSE INTEGRAL の値を、また、積分線量は DOSE INTEGRAL をそれぞれマニュアルで集計し、2倍にして両側分とすれば得られる。照射野内の赤色骨髓の平均吸収線量は集計した赤色骨髓積分線量を、集計した MARROW 量で割ると得られる。Fig. 5, 6 中のその他の関係を述べると、DOSE NORMALIZED TOTAL 値に SURFACE DOSE 値と 0.625 を乗ずれば DOSE INTEGRAL 値になる。また、MARROW DOSE NORMALIZED TOTAL 値は、BONE (I, J) と規格化された DOSE (I, J) の積の総和となつており、これに SURFACE DOSE 値と 1.03 を乗じると MARROW DOSE INTEGRAL 値になり、MARROW の TOTAL 値で割ると MARROW DOSE NORMALIZED AVERAGE 値となる。

結果をフィルム 1 枚当たりの線量で示すと：

表面線量	320 mrem
赤色骨髓積分線量	41.4g·rad
赤色骨髓の平均吸収線量	63.4mrad
積分線量	1150g·rad

同様の例に対し安徳等は皮膚線量 315mrad, 赤色骨髓積分線量 13.9g·rad を得ている⁵⁾. 照射野

外の被曝を無視して平均（赤色）骨髓線量 (Mean bone marrow dose) を求めるすると Ellis の骨髓データによつてるので、集計した MARROW 量として 1045.7 g を使うことになり、この場合 39.6m·rad/枚を得る。

全身曝射されたときの骨髓被曝線量を与える量として用いられたりする 50mm 深部の線量は、照射野のほぼ中央に位置する第 7 胸椎を通る横断層を与える Fig. 4 で見ると、この場合、表面線量の 40~60%，即ち、約 130~190mrem となり、平均吸収線量として算出された 63.4mrem の 2~3 倍の値となる。平均吸収線量は表面線量の 19.8% なので、これは同じく Fig. 4 で見ると、印字 1 と 2 の境の線近辺になり深さ 100~140mmあたりに分布している。

Fig. 5, 6 の下方の部分は、赤色骨髓量をその受ける線量の表面線量に対する比で分類したものを赤色骨髓の線量スペクトルとして、等間隔 10 分割した結果である。このようにすると赤色骨髓の被曝の状態がよく判る。また、これらはそのままプロットできて、切片別に図にしたもののが Fig. 7 である。A と、B, C, D の切片で 70~80% 附近に、それぞれ鎖骨と胸骨によるピークが見られる。また、分布は 10~20% と 70~80% に偏在している。

4. 検討

ここで試みた赤色骨髓線量を求める具体的な方法は、使用可能だつたファントム、線量計、電子計算機の内容に適した方法になつたが、線量計、あるいは、ファントムでも、もつと適当な物があればそれらを使つべきであろうと考えている。1 つの骨の中に含まれる赤色骨髓の質量とその分布状態が正確に判れば、それを基にした赤色骨髓分布のより正確なデータを作ることができ。正確なデータが得られれば、これと、あとは X 線照射による線量実測値を基にして得る線量分布によってかなり正確な赤色骨髓線量を求めることができると確信する。赤色骨髓の積分線量、赤色骨髓線量のスペクトル、平均赤色骨髓線量、積分線量等も得ることができ、撮影法と被検者が受けける線量

の関係を調べたり、線量とそれに伴う影響の解析を行なう場合の基礎的な資料を提供するものである。表面線量で被曝線量を評価、記述している報告が多いが、赤色骨髓線量との一定な関係を求めておくことも必要であろう。著者は、撮影法と赤色骨髓線量の関係には検討の余地が残つていると考えている。また、ある集団の有意線量を求めるにも、それへの寄与が大きな検査に対しては基になる線量評価を確りやつておかねばならないとも考えている。

終りに、本法で検討の余地、あるいは、改良可能な点をまとめておく。

1) 照射方向を矢状と仮定して計算機プログラムを作つた。前頭、あるいは、斜入射でも線量分布が不正確にならないように改良することは可能である。

2) 積分線量を算出するときは密度の補正を行なつていない。これは改良可能である。

3) 計算機による処理が正中面で分けた片側だけの場合には、仮に撮影条件が対称的でも、計算結果を2倍にし両側分とすると heel effect、心臓のように非対称になつていている部分などの影響が入り得る。

4) 年齢差、体格差、性差等が問題になる場合にはこれらに対する補正を必要とする。あるいは、別のファントムと赤色骨髓分布の資料を使わなければならぬ。

5) マス目の大きさを $10 \times 10\text{mm}$ とするとデータの作成、TSSによるデータの処理が大変楽になる。荒くなるので輪郭転写や積分線量の算出に不

安があるが、 $10 \times 10\text{mm}$ によるBONE (I, J) の作成が可能で、 $5 \times 5\text{mm}$ の場合と同じ結果が得られれば $10 \times 10\text{mm}$ にすべきであろう。

6) 頭蓋、腰椎、骨盤、大腿骨、そして様々な撮影法に対する試みは今後の機会に待たねばならない。

(本報告の概要は第26回日本医学放射線学会物理部会、および、第33回日本医学放射線学会において発表した。)

文 献

- 1) Morgan, K.Z.: 放射線科学, 11 (1968), 111—116.
- 2) Jones, T.D., Auxier, J.A., Snyder, W.S. and Warner, G.G.: Health Physics, 24 (1973), 241—255.
- 3) 橋詰 雅、加藤義雄、丸山隆司、白貝彰宏、丸山静雄、滝沢正臣：日本医学放射線学会雑誌, 24 (1964), 1087—1093.
- 4) Russell, W.J., Yoshinaga, H., Antoku, S. and Mizuno, M.: British Journal of Radiology, 39, 735—739.
- 5) Antoku, S., Russell, W.J., Milton, R.C., Yoshinaga, H., Takeshita, K. and Sawada, S.: Health Physics, 23 (1972), 291—299.
- 6) Ellis, R.E.: Physics in Medicine and Biology, 5 (1961), 255—258.
- 7) 西 成甫、岡 治道、佐々賀之、大槻菊男、長谷川敏雄：臨床人体横断解剖図説 (S. 24), 日本医書出版株式会社。
- 8) 高久祐治：X線撮影における骨髓線量について、第26回日本医学放射線学会物理部会 (1973).
- 9) 高久祐治：日本医学放射線学会雑誌, 30 (1970), 291—295.
- 10) 高久祐治、中島敏行、加藤義雄：日本医学放射線学会雑誌, 32 (1972), 551—555.