ノート

アクリルスライスファントムを使った 患者の実効線量の評価 - 心臓カテーテル検査時 -

川端千香子・越田吉郎・早川まゆみ・茶谷 晃・中川浩人・能登公也¹⁾
福田篤志²⁾・松原孝祐¹⁾・飯田泰治¹⁾

論文受付
2005年7月26日

論文受理
2006年6月6日

Code Nos. 621
873

金沢大学大学院医学系研究科
1) 金沢大学医学部附属病院放射線部
2) 滋賀県立成人病センター放射線部

緒言

最近, 心臓カテーテル治療などのinterventional radiology(以下, IVRと略す)の手技は多様化し, flat panel detector(以下, FPDと略す)搭載型心血管撮影装置の普及などにより機器のモダリティも増加している。しかしIVRの発展の一方では, 透視時間の延長, 撮影回数の増加が原因となり, 患者・術者の放射線被曝も増加を免れない。術者の被曝は適切な鉛エプロン, 防護板の使用等により最適化に向けてさまざまな検討がなされている¹⁻³⁾。また患者サイドにおいても被曝への

関心は急激に高まっており, インフォームドコンセント等で放射線障害, 放射線被曝リスクの説明も必要となってくる⁴⁾。心臓カテーテル検査時における患者皮膚入射線量評価は各施設で多く報告されており, 皮膚障害の回避等, 放射線障害防護の意識は高まってきた^{5, 6)}。しかし, 放射線防護の立場においては, 放射線の影響は確定的影響が現れる線量以下の非常に低い線量でも確率的影響が起こりうると仮定している^{7, 8)}。したがってさまざまなモダリティを持つ放射線診断や治療では, 放射線被曝がもたらす障害を予測し, その

Estimation of the Effective Dose of Patient in Interventional Radiology: Study of Coronary Angiography

Chikako Kawabata, Kichirou Koshida, Mayumi Hayakawa, Akira Chadani, Hiroto Nakagawa, Kimiya Noto,¹⁾ Atsushi Fukuda,²⁾ Kousuke Matsubara,¹⁾ and Hiroji Iida¹⁾

Graduate School of Medical Science, Kanazawa University
1) Department of Radiology, Kanazawa University Hospital
2) Department of Radiology, Shiga Medical Center for Adults

Received July 26, 2005; Revision accepted June 6, 2006; Code Nos. 621, 873

Summary

The applications of interventional radiology(IVR) increasingly are being used in clinical examinations, where they tend to extend examination time. In addition, the risk of occupational exposure necessarily is increasing with this technology. In this study, the dose distributions in a sliced acrylic-acid phantom involving the bore for each irradiation condition were measured using a thermoluminescence dosimeter(TLD). Four patterns of set-up for the fluoroscopy unit were chosen as references for the conditions generally used clinically. Exposure also was measured with dose area product(DAP), and we then calculated the entrance skin dose and effective dose for the patient. The results showed that the effective dose was 7.0 mSv to 8.0 mSv at LAO45° and RAO30°; 100 kV, 2.3 mSv to 3.3 mSv at LAO45° and RAO30°; 80 kV. The effective dose is greatly influenced by the setup of fluoroscopy in IVR. The change in DAP is especially influenced. We found that the relation between DAP and effective dose was corrected with the exponential function. The effective doses were not necessarily less than those of other radiation examinations, and increase. When PCI and TAE are repeated many times in IVR, we propose that the effective dose should be taken into consideration together with the skin dose for dose control management.

Key words: interventional radiology (IVR), coronary angiography, effective dose, dose area product meter

別刷資料請求先: 〒524-0022 滋賀県守山市守山5-7-30
滋賀県立小児保健医療センター 川端千香子 宛

Fig. 1 Geometrical arrangement of the X-ray tube and the sliced acrylic-acid phantom.

影響を総合的に判断する必要がある、IVRにおいても実効線量の推測が必要である。本研究では、IVR時の体内線量分布をアクリルスライスファントムを使用して熱ルミネセンス線量計(thermoluminescence dosimeter: TLDと略す)で測定し、患者入射皮膚線量とともに実効線量推定を試みたので報告する。

1. 使用機器と方法

1-1 使用装置

心血管撮影装置

- ・ Siemens社製 POLYDOROS100(image intensifier : I.I.搭載型)
グリッド格子比 11 : 1 , 総ろ過 2.5mmAl , I.I.使用 4 年

測定機器

- ・ TLD素子 : 化成オプトニクス社製 KYOKKO MSO-S (Mg^2SiO_4)
- ・ TLD読み取り装置 : Victoreen社製 MODEL 2800M
- ・ 面積線量計 : PTW社製 DIAMENTOR-M2
- ・ リファレンス線量計 : 東洋メディック社製 RAMTEC-1500B
- ・ 電離箱 : 3cc指頭型 (JQAにて校正を行った)
- ・ ファントム : 京都科学社製 アクリルスライスファントム(人骨・コルク封入)

1-2 吸収線量測定

照射時のジオメトリをFig. 1に示す。左の冠状動脈撮影時としてRAO30°、右冠状動脈撮影時としてLAO45°を想定している¹⁾。イメージサイズは7inchを使用し可動絞りを開放状態にした。アクリルスライスファントムの測定部位は、皮膚表面、甲状腺、心臓、肺、乳房、食道、胃、肝臓、生殖腺(女性型ファントムであったため卵巣)、骨髄などとし、ファントムの相当箇所にTLDを各条件で70点ずつ挿入した(Fig. 2)。本研究ではシネ撮影は行わず、透視のみで評価した。透視時間は5分である。透視条件は各照射方向ごとに管電圧80kV、管電流は2.5mA、90kVで3.0mA、100kVで3.5mAであった。測定は各条件ごとに1回である。

今回はファントムの体型やI.I.の影響による管電流の変動を抑えて線量測定をするため、自動露出制御装置(auto exposure control : AECと略す)の機能は使用していない。この装置はパルス透視のできないタイプであり、連続透視を使用している。また、この心血管撮影装置には面積線量計を可動絞り前面に装着して、照射時の面積線量積(dose area product : DAPと略す)の値も読み取った。

今回はファントムの体型やI.I.の影響による管電流の変動を抑えて線量測定をするため、自動露出制御装置(auto exposure control : AECと略す)の機能は使用していない。この装置はパルス透視のできないタイプであり、連続透視を使用している。また、この心血管撮影装置には面積線量計を可動絞り前面に装着して、照射時の面積線量積(dose area product : DAPと略す)の値も読み取った。

1-3 実効線量の算出

実効線量の算出式は以下に示す⁴⁾。

$$E = \sum Wt \cdot Ht$$

E : 実効線量 Wt : 組織荷重係数

Ht : 組織・臓器の等価線量

実効線量算出の際、組織線量は通常では各臓器・組織の平均吸収線量⁹⁾を使用する。しかし今回はTLD素子とアクリルスライスファントムを使用するため各臓器の容積を考慮に入れた平均値の計算は困難なため、本研究では各臓器・組織に配置されたTLDの平均値より計算した。なお等価線量は組織・臓器の吸収線量に放射線荷重係数を乗じた線量である。

管電圧やジオメトリを変えてもファントム位置を容易に再現させるために、ファントムの心臓部中心のTLD挿入孔には針金を挿入し、位置決めの指標とした。このため、焦点-I.I.間距離(source-I.I. distance :

Fig. 2 Organs equipped with TLD chips.

Table 1 Tissue absorbed dose of each organ under each condition.

Condition	80kV		90kV		100kV	
	RAO30°	LAO45°	RAO30°	LAO45°	RAO30°	LAO45°
Gonads	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6
Bone marrow(red)	3.1	1.7	7.4	6.6	10.2	9.9
Colon	0.2	0.2	0.5	0.4	0.7	0.8
Lung	8.6	7.5	15.6	13.3	21.7	19.2
Stomach	4.4	0.7	6.7	1.7	7.2	2.5
Bladder	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Breast	0.7	1.0	1.7	1.9	2.5	2.8
Liver	4.7	9.1	4.8	13.6	6.6	19.1
Oesophagus	2.8	2.1	6.4	5.7	9.1	8.2
Thyroid	0.3	0.3	0.6	0.6	0.9	1.1
Skin	26.3	13.0	48.9	31.5	70.5	44.6
Remainder(Heart)	12.2	5.7	19.2	14.3	28.6	19.3
(mGy)						
DAP	9.0	9.0	18.0	18.0	22.4	22.4
(mGy · cm ²)						

SIDと略す)は100cmであるが、焦点-皮膚間距離 (source-skin distance: SSDと略す)は、RAO30°では75cm、LAO45°では67cmとした。

TLDの測定にはフェーディングの効果を考慮して照射後6時間以降にTLD読み取り装置で読み取った。校正は心血管撮影装置とは別のX線照射装置で行うが、線質、管電圧を合わせてリファレンス線量計と同時照射で校正し、TLDそれぞれに校正定数を持たせている。TLDは変動係数±7.0%以下であり、再現性の精度もその範囲に収まっていた。またこのとき、リファ

レンス線量計の値を使った計算では温度気圧補正係数も考慮した。

2. 結果

2-1 吸収線量測定

各条件から得られた組織平均吸収線量とDAPの関係をTable 1に示す。この心血管撮影装置の実効エネルギーをAI半価層の測定結果より求めると、管電圧80kVで34.5keV、100kVで38.1keVであった。どの臓器においても、文献7)より求めた実効エネルギーの変

Fig. 3 Tissue absorbed dose of each organ at 100 kV tube voltage.

Fig. 4 (a) Relation between tissue absorbed dose of lungs and DAP.
(b) Relation between tissue absorbed dose of heart and DAP.

化による吸収線量変換係数の変化はほとんどなかった。

管電圧100kVでの組織平均吸収線量の照射方向による比較をFig. 3に示す。他の管電圧でも同様の結果を示していた。また肺・心臓部それぞれの組織平均吸収線量とDAPの関係を分布図としてFig. 4に示す。このとき、肺の組織平均吸収線量は照射方向の変化に影響されず、DAPに対して指数関数での近似が可能であった。心臓の線量は照射方向ごとに分布をプロットし、肺と同じく指数関数での近似を行った。

アクリルスライスファントム内に挿入されているTLDは、それぞれの臓器・組織に複数個配置されている。IVRの性質上、同じ臓器内であっても被曝線量には差がある。管電圧80kVにおける各臓器・組織の変動係数 (coefficient of variation : CVと略す) をTable 2に示す。

2-2 実効線量算出

前述の各条件における組織平均吸収線量より算出した各臓器の等価線量に組織荷重係数をかけたものと実

Table 2 Coefficient of variation(CV)of each organ at 80 kV tube voltage.

Condition	80kV	
	RAO30°	LAO45°
Gonads	37.7	41.1
Bone marrow (red)	119.5	91.2
Colon	27.1	31.4
Lung	141.9	125.7
Stomach	56.8	52.4
Bladder	10.7	14.6
Breast	49.4	14.1
Liver	128.8	60.1
Oesophagus	85.6	83.6
Thyroid	27.1	22.8
Skin	131.3	178.8
Remainder (Heart)	36.8	47.0

(%)

Table 3 Effective dose of each organ under each condition.

Condition	80kV		90kV		100kV	
	RAO30°	LAO45°	RAO30°	LAO45°	RAO30°	LAO45°
Gonads	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
Bone marrow(red)	0.4	0.2	0.9	0.8	1.2	1.2
Colon	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
Lung	1.0	0.9	1.9	1.6	2.6	2.3
Stomach	0.5	0.1	0.8	0.2	0.9	0.3
Bladder	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Breast	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
Liver	0.2	0.5	0.2	0.7	0.3	1.0
Oesophagus	0.1	0.1	0.3	0.3	0.5	0.4
Thyroid	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Skin	0.3	0.1	0.5	0.3	0.7	0.4
Remainder(Heart)	0.6	0.3	1.0	0.7	1.4	1.0
Effective dose	3.3	2.3	5.8	4.8	8.0	7.0

(mSv)

効線量をTable 3に示す．また，管電圧100kVでの等価線量に組織荷重係数をかけた線量の照射方向による比較をFig. 5に示す．実効線量は，どの管電圧でもRAO30°の方がLAO45°より高くなる．実効線量とDAPの関係をFig. 6に示す．それら得られたDAPと計算した実効線量の関係より推測した結果，照射方向ごとに指数関数で近似が可能であり，得られた近似式を以下に示す．

RAO30°の場合： $y=1.73e^{0.07x}$

LAO45°の場合： $y=1.02e^{0.08x}$

x：DAP(Gy・cm²)，y：Effective dose(mSv)

3．考 察

3-1 吸収線量測定

皮膚は各条件で最も高線量を受ける部位であり，最高線量はRAO30°においては80kVでは70mGy，100kVでは140mGy，LAO45°において80kVでは82mGy，100kVでは172mGyと計測された．坂本らの報告¹⁰⁾を参考にDAPの値から換算された値は，RAO30°では80kVで約75mGy，100kVで約160mGy，LAO45°において80kVで約85mGy，100kVで約180mGyであり，TLD測定値とDAPからの換算値の両者は近い値であった．DAPとSSD等を把握することにより皮膚吸収線量は評価できることが確認できる．体内で高線量が目立つのは肺である．肺は照射野内における臓器容積の

Fig. 5 Equivalent dose of each organ at 100 kV tube voltage.

割合が高く、照射方向の変化を受けずにDAPに対して指数近似で相関係数 $r=0.982$ の高い相関を持つ。また、肺は大きな臓器ゆえに、組織平均吸収線量は照射野によっても大きく影響される。今回は可動絞りは開放としたが、照射野を絞ることにより線量は大きく変化することが予想される。SIDを固定したことによりRAO30°では入射面から射出面までの距離が短く、LAO45°のときよりも照射野内の肺と心筋は高い線量を受けることとなった。特に心臓部においては大きな臓器ではないことと、照射野の中心の臓器であることから、肺と同様にDAPに対して指数近似で相関係数 $r=0.98$ 程度の高い相関を持つことが明らかとなった。ただし、肺とは違って左右対称な臓器ではないため、照射方向ごとに近似曲線を作成し相関を得る必要がある。

胃は今回の測定では、RAO30°で高い線量を示した。LAO45°では照射野よりやや離れたことが判明した。しかし胃は心臓に近く、また呼吸により移動する臓器である。質量エネルギー吸収係数は測定した臓器のなかで一番低いですが、照射野内に入ると高い線量を受け組織平均吸収線量も高くなる可能性が大いにある。さらに、cranialまたはcaudal方向への照射があれば胃の組織は直接線を受けることが頻発し、線量増加は免れない臓器であると考えられる。

肝臓は体軸より右に位置するため、RAO30°より

Fig. 6 Relation between tissue effective dose and DAP.

LAO45°の方が高い値を示す。心臓に近い臓器でもあり、照射野内に入ると局部的に大きな線量を受ける臓器の一つである。心臓カテーテル検査においては乳房部分は射出面となり、必ず線量を受ける臓器である。しかし乳房は形状の個人差が大きく、評価が難しい。

また今回は、赤色骨髄が照射野にほとんど入っていないため、どの照射条件でも比較的低い値を示した。しかし実際の透視では、胸椎が照射野に入っているこ

とも多々あり、臨床現場では組織平均吸収線量も高くなると予測される。甲状腺、卵巣、膀胱、結腸では直接線が当たることはないの体内散乱から及ぼされる線量のみが測定された。膀胱、結腸部ではバックグラウンドと同じ程度の値となった。

CVは照射野に近く、体積の大きな臓器・組織では高い値を示した。同じ臓器・組織であっても被曝線量に大きな差があることが明らかとなった。

各臓器が受ける組織平均吸収線量は、確率の影響を大きく与える線量ではない。しかし、非常に低線量の被曝であっても確率の影響は起こりうると仮定している⁸⁾。またIVRの特徴として、一部だけに高い線量を受ける可能性のある臓器が多い。臨床現場ではそれらの臓器に対する放射線障害への意識を高めるべきである。

3-2 実効線量算出

甲状腺、膀胱、結腸はバックグラウンドと同じ程度の線量しかないので組織等価線量も小さくなり、実効線量に与える影響も非常に小さくなる。組織荷重係数が一番大きな生殖腺(卵巣)も、実効線量では各条件において1%程度の値となった。

等価線量において一番大きな線量を受けているのが肺である。等価線量はおおよそ1~3mSvとなり、各条件においてそれぞれ実効線量の30%以上の割合となっている。肺は照射野内にも大きな容積を持つ臓器であるため、照射野を絞ることにより実効線量は減る。照射野絞りを多用することは実効線量の増加を抑えることに効果的である。赤色骨髄は組織荷重係数も0.12で、肺、結腸、胃などとともに実効線量に大きく影響する。特に赤色骨髄は入射面から近い臓器であるため、照射野内に入ると大きな線量を受けると予想される。

胃は照射方向に影響され、RAO30°で実効線量の約10%、LAO45°では5%程度である。組織平均吸収線量でも述べたが、照射方向によって線量の変動が大きく実効線量における割合もそれに伴って大きく変わってくる。また肝臓も、胃と同様に照射方向に影響され、LAO45°ではRAO30°より大きな値となる。

一方で、組織平均吸収線量では高線量を受けていた皮膚は組織荷重係数が0.01と低く、実効線量に対する割合も約5~9%である。組織平均吸収線量も、等価線量も照射方向に影響されことなくSSDのみに依存すると考える。

今回得られた心臓カテーテル検査における実効線量は、他の放射線診療による被曝線量と比べても少なくはない^{11, 12)}。実効線量とDAPの関係では照射方向ごとに指数関数で近似されるので、相関もRAO30°で

$r=0.999$ 、LAO45°においては $r=1.00$ となり、DAPによるおおまかな実効線量を推測できる可能性があると考ええる。面積線量計はその特性により、照射野変化を反映するので、臨床で実践的に使用することが可能な計測機器である。他のモダリティでも実効線量の推測に使用例があり信頼できる値も得られている^{13, 14)}。5分の透視で3~8mSvの実効線量があるとすると、透視時間の延長や撮影回数によっては相当な被曝線量になることも予測できる。心血管撮影装置に面積線量計を取り付けて患者被曝線量を管理する施設が最近増加しているが、今回の結果により患者皮膚線量などの管理とともに実効線量の把握ができる可能性も示唆された。

今回の実験では、透視条件を使った6パターンの照射条件による測定結果である。またアクリルスライスファントムを使用した実測であることから、等価線量や実効線量の計算においては、臓器容量や測定可能な組織に制限があった。本来、実効線量評価は標準人(reference man)で推測するものであって、個々の体格や形状によって異なるものを評価することはもともとの趣旨から離れている。しかし、推定としてそれぞれの手技や人体に適應させることは放射線管理上必要である。IVRにおいてそれらの線量を把握することは非常に重要であることから、今回得られた結果がその指標となると期待したい。

4. 結 語

本研究では、心臓カテーテル検査時における体内線量分布を実測した結果、照射方向の違いと管電圧の変化により食道や肝臓をはじめとする心臓周辺臓器に及ぼす線量は多様に変化することが判明した。各臓器の線量を把握することで患者被曝低減のための照射野設定の最適化の必要性を確認できた。各臓器における吸収線量を測定し組織平均吸収線量を算出したが、皮膚とともに体内で高線量が目立ったのは肺であった。肺は心臓部とともにDAPとの相関性も得られている。等価線量を算出した結果では、肺と赤色骨髄の線量が実効線量の大きな因子となっている。実効線量算出により5分の透視で3~8mSvという値を得たが、これはほかの放射線診療より多い線量である。実効線量は照射方向ごとにDAPとの指数関数的相関も得られており、面積線量計による実効線量の把握が期待できる。今後は、反復した経皮的冠動脈形成術(percutaneous coronary intervention: PCIと略す)などでは皮膚線量とともに、実効線量も考慮した被曝管理と患者への十分なインフォームドコンセントが必要であることが認識できた。

謝 辞

この研究を進めるにあたり，実験に協力していただいた皆様に深く感謝します．

なお，本論文の要旨は日本放射線技術学会第61回総会学術大会(横浜)にて発表した．

参考文献

- 1) 栗井一夫 編：血管撮影領域における放射線被曝と防護．放射線医療技術学叢書(17)，22-24，41-112，日本放射線技術学会，(1999)．
- 2) 水谷 宏，小林幸雄，才田壽一，他：血管撮影における標準的な術者防護用具検討班報告．日放技学誌，57(12)，1469-1478，(2001)．
- 3) 石口恒男：放射線診療における被曝 IVRの被ばくとその対策 - 放射線科医の立場から．日本医放会誌，62(7)，356-361，(2002)．
- 4) ICRP Publication60：国際放射線防護委員会の1990年勧告．日本アイソトープ協会(発売元丸善)，東京，(1991)．
- 5) 富樫厚彦：IVRに伴う放射線皮膚障害報告症例から放射線防護を考える．日放技学誌，57(12)，1444-1450，(2001)．
- 6) 医療放射線防護連絡協議会：IVRに伴う放射線皮膚障害の防止に関するガイドライン．IVR等に伴う放射線皮膚障害とその防護対策検討会，東京，(2004)．
- 7) ICRP Publication85：IVRにおける放射線障害の回避．日本アイソトープ協会(発売元丸善)，東京，(2003)．
- 8) ICRP Publication73：医学における放射線の防護と安全．日本アイソトープ協会(発売元丸善)，東京，(1997)．
- 9) ICRU Report46: Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues. 11-13, ICRU, Maryland(1992)
- 10) 坂本 肇，中村 修，弓削 誠，他：面積線量計による患者被曝管理の検討．日放技学誌，56(10)，1256-1265，(2000)．
- 11) 日本放射線技師会医療被ばくガイドライン委員会：患者さんのための医療被ばくガイドライン(低減目標値)．日放技師会誌，47(10)，1694-1750，(2000)．
- 12) 長谷川隆幸，小泉正之，古川 友：部位別吸収線量の測定と被曝レベルの設定．日放技学誌，59(5)，640-649，(2003)．
- 13) Yakoumakis E, Tsalafoutas IA, Nikolaou D, et al.: Differences in effective dose estimation from dose-area product and entrance surface dose measurements in intravenous urography. Br J Radiol, 74(884), 727-734(2001)
- 14) Bor D, Sancak T, Olgar T, et al.: Comparison of effective doses obtained from dose-area product and air kerma measurements in interventional radiology. Br J Radiol, 77(916), 315-322(2004)

図表の説明

- Fig. 1 照射時のファントム，X線管，I.I.の幾何学的配置図
 Fig. 2 TLDを配置した臓器
 Fig. 3 管電圧100kVにおける各臓器の組織平均吸収線量
 Fig. 4 (a) 肺の組織平均吸収線量とDAPの関係
 (b) 心臓部の組織平均吸収線量とDAPの関係
 Fig. 5 管電圧100kVにおける各臓器の照射方向による比較
 Fig. 6 実効線量とDAPの関係

- Table 1 各条件における各臓器の組織平均吸収線量
 Table 2 管電圧80kVにおける変動係数
 Table 3 各条件における実効線量