原 著

個人線量計の特性をふまえたIVR従事者の被ばく線量評価

森 泰成・越田吉郎¹⁾・市川勝弘¹⁾論文受付
2006年11月27日論文受理
2007年6月11日

Code No. 814

北海道社会保険病院放射線部
1) 金沢大学大学院医学系研究科保健学専攻
医療科学領域量子医療技術学講座

緒 言

放射線業務従事者の外部被ばくの管理には、さまざまな線量計が用いられている¹⁾。従来、電子式線量計などの個人線量計は、主に個人モニタリングを目的として使われてきた。さらに、最近では作業場の空間線量を測定する手段としても使用されている²⁾。

このように、個人線量計の用途が広がっているなかで、線量計はそれぞれ固有の特性を持つため、個人線量計から得られた測定値に相違が生じている可能性³⁾がある。interventional radiology(以下、IVR)従事者の被ばく管理においては、測定する位置により散乱線の線質や入射方向、線量率が大きく変化する⁴⁾。そのた

め、エネルギー特性や方向特性が大きく線量率特性も認められる電子式線量計^{2, 5)}は、その他の線量計と比べ、測定値の相違がさらに顕著になることが予測される。

本研究では、電子式線量計など使用機器の特性を把握したうえで、IVR従事者の被ばく管理に使われている各個人線量計の測定値を比較し相違を調べた。さらに、電子式線量計においては、測定値に対して基本特性をふまえた補正法を考案し、その評価を行った。最後に、これらの結果から個人線量計の特性を考慮したIVR従事者の被ばく線量評価の検討を行ったので報告する。

Estimation of Personal Dose Based on the Dependent Calibration of Personal Dosimeters in Interventional Radiology

Hiroshige Mori, Kichiro Koshida,¹⁾ and Katsuhiko Ichikawa¹⁾

Department of Radiology, Hokkaido Social Insurance Hospital

1) Department of Quantum Medical Technology, Division of Health Sciences, Kanazawa University Graduate School of Medical Science

Received Nov. 27, 2006; Revision accepted June 11, 2007; Code No. 814

Summary

The purpose of present study is, in interventional radiology(IVR), to elucidate the differences between each personal dosimeter, and the dependences and calibrations of area or personal dose by measurement with electronic dosimeters in particular. We compare space dose rate distributions measured by an ionization survey meter with the value measured by personal dosimeter: an optically stimulated luminescence, two fluoroglass, and two electronic dosimeters. Furthermore, with electronic dosimeters, we first measured dose rate, energy, and directional dependences. Secondly, we calibrated the dose rate measured by electronic dosimeters with the results, and estimated these methods with coefficient of determination and Akaike's Information Criterion(AIC). The results, especially in electronic dosimeters, revealed that the dose rate measured fell by energy and directional dependences. In terms of methods of calibration, the method is sufficient for energy dependence, but not for directional dependence, because of the lack of stable calibration. This improvement poses a question for the future. The study suggested that these dependences of the personal dosimeter must be considered when area or personal dose is estimated in IVR.

Key words: personal dosimeter, personal monitoring, interventional radiology (IVR), directional dependence, Akaike's information criterion (AIC)

別刷資料請求先: 〒062-8618 北海道札幌市豊平区中の島1条8丁目3-18
北海道社会保険病院放射線部 森 泰成 宛

1. 使用機器

1-1 X線発生装置

- ・X線発生装置A: Infinix Celeve VC
(東芝メディカルシステムズ株式会社製)
アンダーチューブ型flat panel detector(以下, FPD)
X線管装置: DRX-T7345GFS
(固有濾過 1.1mmAl当量)
総濾過: 4.0mmAl当量
(付加フィルタ Al: 1.5mm)
寝台のAl当量: 平均 1.0mmAl当量
 - ・X線発生装置B: KXO-80N
(東芝メディカルシステムズ株式会社製)
X線管装置: DRX-3535HD
(固有濾過 1.2mmAl当量)
総濾過: 2.5mmAl当量
- なお, 今回の測定では基本的に装置Aを使用した。しかし, 電子式線量計のエネルギー特性の測定では, 幾何学的配置上の制約により装置Bを使用した。また, 装置の実効エネルギー測定については, 装置A, Bともに行った。

1-2 線量計

I) 電離箱

- ・RAMTEC 1500B型線量計 東洋メディック株式会社製
3.0cc指頭形電離箱 Wellhofer製
- ・電離箱式サーベイメータICS-311 ALOKA株式会社製

II) 光刺激ルミネセンス線量計

- ・ルクセルバッジ 長瀬ランダウア株式会社製
(optically stimulated luminescence dosimeter: 以下, OSLD)

III) 蛍光ガラス線量計

- ・ガラスバッジ 株式会社千代田テクノル製
(glass badge: 以下, GB)
- ・蛍光ガラス線量計 小型素子システムDose Ace 線量計素子GD-352M 旭テクノグラス株式会社製
(photo luminescence dosimeter: 以下, PLD)

IV) 電子式線量計

- ・シーメンス電子線量計 SIEMENS社製
(siemens personal dosimeter: 以下, SPD)
- ・マイドーズミニ χ PDM-117 ALOKA株式会社製
(electronic personal dosimeter: 以下, EPD)

なお, 電離箱式サーベイメータとOSLD, GB, PLDは, free in airの条件下で校正, または換算された線量計を使用した。電子式線量計(SPD, EPD)は, JIS Z 4511で定義されている幾何学的条件下におけるfree in airで, 実効エネルギーが34.6keVとなる線質により校

正した線量計²⁾を使用した。RAMTEC 1500B型線量計については, 財団法人日本品質保証機構で校正された線量計を使用した。

1-3 ファントム

空間線量率分布の測定において, 長径30cm, 短径20cm, 長さ45cmの楕円型の胸腹部用水ファントム(JIS Z 4915-1973準拠 美和医療電機株式会社製)を腹部用として使用した。

2. 方法

2-1 使用機器の特性測定

2-1-1 X線発生装置の実効エネルギー測定

各装置から出力されるX線の線質を把握するために, アルミニウム(以下, Al)減弱法による半価層測定⁶⁾を行った。この際, 装置Aの付加フィルタは, 照射条件に応じて種類や厚さが自動的に変わるため, 厚さ1.5mmのAlフィルタで固定されるように手動で設定した。また, 体厚を補償するフィルタは全開にした。幾何学的条件と照射条件などをTable 1に示す。なお, 線量計はRAMTEC 1500B型線量計を使用した。

2-1-2 電子式線量計の基本特性の測定

以下の3特性をfree in airにて測定した。各測定における幾何学的条件をFig. 1に示す。測定回数は各測定において5回ずつ行い, その平均値を特性値とした。

・線量率特性

ファントムと線量計間の距離を50cmより10cmずつ変化させ200cmまで測定した。照射条件は管電圧99kV, 管電流100mA, 照射時間30秒, 7frame/sec, パルス幅5msecのパルス透視とした。

・エネルギー特性

指頭形電離箱と同時に照射し測定した。照射条件は管電圧を50, 60, 70, 80, 90, 100, 110kVと変化させ, 管電流0.5mA, 照射時間30秒の連続透視とした。

・方向特性

線量計に対する入射角度を縦方向, 横方向ともに15度ずつ変化させて測定した。照射条件は管電圧56kV, 管電流1.0mA, 照射時間30秒の連続透視とした。

2-2 個人線量計による空間線量率分布の測定

従事者が頻繁に立つ位置であり, 高さ方向において散乱線の線質や入射方向が大きく変化すると予測される患者の頭側付近にて測定を行った⁷⁾。幾何学的条件をFig. 2に示す。

今回の測定では, 消化器系のIVRを想定し, 楕円型の胸腹部用水ファントムを腹部用として使用した。照

Table 1 Geometry and exposure conditions at measurement of half-value layer.

Unite	Distance from Focus(cm)		Exposure Conditions		Thickness of Aluminium Plate (mm)
	Attenuation Plate	Thimble Chamber	Tube Voltage (kV)	Tube Current (mA)	
A: DRX-T7345GFS	30	90	50,60,70,80,90,100,110	4.0	0,1,2,3,4,6,7,10
B: DRX-3535HD	30	85	60,70,80,90,100	1.0	0,2,3,4,5,6,8,10

- Source-image receptor distance is the maximum of unites.
- Fluoroscopy. Narrow beam.
- Attenuation plate of aluminium is purity 99.99%.

Fig. 1 Geometry to measure dependences of electronic dosimeters.
(a) (b) Dose-rate dependence. : Measured point.
(a) Left side view of a projection chart.
(b) Plane view of a projection chart.
(c) Energy dependence.
(d) Directional dependence.

a	b
c	d

Fig. 2 Geometry for measurement of space dose-rate distributions.
: Measured point.
(a) Left side view chart. (b) Plane view of a projection chart.

a	b
---	---

Fig. 3 Entrance angle of scattered radiation to electronic dosimeters used to calibrate directional dependence.
: Measured point used for monitoring in space dose-rate distributions.

射条件はこのファントムを自動露出機構下で撮影した際の条件(管電圧99kV, 管電流100mA, 7frame/sec, パルス幅5msec)とした。照射時間は, OSLDとGB, PLDには3分間, 電子式線量計には1分間照射し, 計測された積算値から線量率を求めた。なお, 測定回数は各測定点において3回ずつ行い, その平均値を測定値とした。照射野は25.4cm×25.4cm, 線束中心はファントム中心とした。付加フィルタは, 1.5mm厚のAlフィルタである。各線量計の検出面の向きは一次X線の線束軸方向とし, 軸に対して平行に配置した。

2-3 電子式線量計による空間線量率分布の測定値に対する補正と評価

2-1-2項目で測定された特性を利用して, 2-2項目で計測された電子式線量計の測定値に対し, 補正とその評価を行った。

2-3-1 エネルギー特性補正係数 $k(E)$

$$k(E) = \frac{1}{f(E)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし,

E : OSLDより得られたエネルギー値⁸⁾

$f(E)$: エネルギー特性値

とする。

2-3-2 方向特性補正係数 $k(\theta)$

$$k(\theta) = \frac{1}{f(\theta)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 4 Relation of tube voltage and effective energy.

ただし, Fig. 3より,

$$\theta = \theta_{xcm} - 90^\circ \quad \dots\dots\dots (3)$$

θ : 線量計に対する散乱線の入射角度

θ_{xcm} : 入射面における光子の散乱角度

$f(\theta)$: 上下方向の方向特性値

とする。

散乱線の発生源を高さ方向に対して検討した文献⁴⁾において, 主な発生源は可動絞りと被写体からであり, 特にX線入射面付近からの散乱線が最も高い線量率であると報告されている。

今回の測定ではこの傾向に着目し, Fig. 3のように1次X線の線束軸と入射面との交点から求めた散乱角度 θ_{xcm} (前方0度, 後方180度)を補正の際に利用した。

2-3-3 補正された空間線量率分布の評価

補正を行った空間線量率分布について, 決定係数(以下, R^2)と情報量規準(Akaike's Information Criterion: 以下, AIC⁹⁾)の値を求め, 評価を行った。

3. 結 果

3-1 使用機器の基本特性

3-1-1 X線発生装置の実効エネルギー

Al減弱法による半価層測定から求めた各装置の管電圧と実効エネルギーの関係をFig. 4に示す。装置Aは装置Bよりも各管電圧において約3keV高かった。

Fig. 5 Dose-rate dependence of electronic dosimeters.

Fig. 6 Energy dependence of electronic dosimeters.

Fig. 7 Directional dependence of electronic dosimeters.

(a) Right and left directions.
(b) Top and bottom directions.

3-1-2 電子式線量計の基本特性

線量率特性をFig. 5に示す。180 $\mu\text{Sv/min}$ 以下においてSPD, EPDともに距離の逆2乗を満たし、それぞれ $R^2_{SPD}=0.995$, $R^2_{EPD}=0.994$ と電離箱式サーベイメータの測定値と非常に高い相関を示した。

エネルギー特性をFig. 6に示す。27keVから35keVまでの範囲では、エネルギーが低下するに従い応答特性が上昇した。

方向特性をFig. 7に示す。SPDでは、上下、左右方向ともに $\pm 30^\circ$ から感度が徐々に低下し始め、 $\pm 60^\circ$ 付近より急激に低下した。EPDでは、上と右方向で $+30^\circ$ 度、下と左方向では -15° 度以降で感度が急激に低下した。

3-2 個人線量計による空間線量率分布

OSLDとGB, PLDを用いて測定した分布をFig. 8に示す。OSLDやGBの測定値は、床面(5cm)以外のすべての高さにおいて電離箱式サーベイメータの標準偏差内に収まった。

PLDについては、高さ80cm以下において電離箱式サーベイメータの測定値より約30%低下した。しかし、エネルギー特性¹⁰⁾を補正することによって、高さ80cm以外の測定点では測定値の低下が改善された。

電子式線量計を用いて測定した分布をFig. 9に示す。高さ40cm以下の測定点($\theta > +30^\circ$)において、電離箱式サーベイメータの標準偏差内より低い測定値が計測された。

Fig. 8 Space dose-rate distributions by OSLD, GB, and PLD.

Fig. 9 Space dose-rate distributions before calibrations by electronic dosimeters.
 θ : Entrance angle of scattered radiation to dosimeter (cf. Fig. 3 & Table 2)

Table 2 Calibrations of space dose-rate distributions by personal dosimeters.

Height (cm)	Energy (keV) E	Entrance Angle θ	Dose Rate after Calibrations(μ Sv/min)								Dose Rate of Ionization Surveymeter (μ Sv/min)
			Siemens Personal Dosimeter				Electronic Personal Dosimeter TM				
			(Before Calibration)	Energy	Direction	Energy & Direction	(Before Calibration)	Energy	Direction	Energy & Direction	
140	(34.2)	−34°	22.4	22.4	23.6	23.5	10.1	10.0	31.0	30.8	25.7
130	34.0	−28°	28.3	28.1	28.6	28.4	17.4	17.2	33.1	32.7	32.7
120	33.8	−21°	34.9	34.6	35.2	34.9	31.3	30.8	43.5	42.8	39.2
100	33.2	−6°	51.8	50.9	51.8	50.9	61.2	59.6	62.5	60.8	61.4
80	(32.4)	11°	73.9	71.8	75.4	73.2	76.9	73.6	80.9	77.5	83.5
60	31.5	25°	107.0	102.7	111.5	106.9	100.8	95.1	114.6	108.0	105.7
40	30.4	37°	99.5	93.8	115.6	109.1	80.7	74.5	126.1	116.4	110.8
20	29.4	46°	82.2	76.3	104.7	97.2	47.6	43.2	120.1	108.9	93.8
5	28.9	53°	54.6	50.3	72.7	67.0	7.0	6.3	39.7	35.7	71.6

・“Energy” is the average of effective energy measured by optically stimulated luminescence dosimeter(OSLD).

・“Entrance Angle” is the angle that scattered radiation enter dosimeters (cf. Fig. 3)

・“() ” of Energy is the value extrapolated or interpolated effective energy of scattered radiation because the energy couldn't be measured by OSLD.

・The value of Energy was also used to calibrate energy dependence of photo luminescence dosimeter.

さらに、EPDでは高さ120cm以上の測定点($\theta < -15^\circ$)においても標準偏差内より低い測定値であった。特に、高さ130cm以上の測定点においては、電離箱式サーベイメータの測定値の50%以下となった。

3-3 電子式線量計の測定値に対する補正とその評価
 2-3項目で定義した E と θ 、および補正前後の値をTable 2に示す。また、補正後の空間線量率分布をFig. 10に示す。

エネルギー特性や方向特性を補正することによって、標準偏差内に測定値がほぼ収まった。特に、方向特性のみの補正では、高さ40cm以下と120cm以上の測定点における測定値の低下を補正する効果があった。

補正された分布の R^2 とAICによる評価値をTable 3に示す。 R^2 では、 $K(E)$ と $K(\theta)$ の補正、 $K(E)$ の補正、 $K(\theta)$ の補正、補正前の順に評価値が高かった。しかし、AICでは $K(E)$ の補正が最も低く、 $K(E)$ と $K(\theta)$ の両方の

Fig. 10 Space dose-rate distributions after calibrations of energy and directional dependences.

Table 3 Evaluation after calibrations of energy and directional dependence.

Calibration (Explanatory Variate)	SPD(SIEMENS EPD)		EPD TM (ALOKA PDM-117)	
	R^2	AIC	R^2	AIC
(Before Calibrations)	0.970	33.7	0.615	56.6
Energy Dependence	0.989 *	26.6	0.992 *	24.1
Directional Dependence	0.986 *	28.6	0.891 *	47.3
Energy & Directional Dependence	0.991 **	27.0	0.992 **	26.1

•Criterion variate is the value of ionization surveymeter(ALOKA ICS-311).

•“*” is $F_0 > F(2, 6; 0.005)$. “**” is $F_0 > F(3, 5; 0.005)$.

•SPD: Siemens Personal Dosimeter

•EPD: Electronic Personal Dosimeter. R^2 : Coefficient of determination.

AIC: Akaike's Information Criterion.

補正を加えたものよりも良い評価値となった。

4. 考 察

4-1 個人線量計による空間線量率分布と基本特性との関係

4-1-1 OSLD, GB, PLD

OSLDとGBは、複数のフィルタの応答特性を組み合わせてエネルギー依存性を補正¹¹⁾したり、方向特性も良い⁵⁾ために、電離箱式サーベイメータとの相違が小さかった。

40keV以下から徐々に感度が低下する¹⁰⁾PLDに関しては、エネルギー特性の補正が重要であることが分かった。また、補正後も高さ80cmの値が低下したことに関しては、内挿法により求めた散乱線のエネルギー値が正確ではなかったためであると考えられる (cf. Table 2)。この高さは、ファントムと多重絞りからの線質の違う散乱線がほぼ同等の線量率で入射して

くる領域である⁴⁾。さらに、寝台からの散乱線も加わる¹²⁾。この三つの異なる線質を持つ散乱線がそれぞれ違う方向から入射するため、実効エネルギーの推定が難しいと考えられる。なお、同じ蛍光ガラス線量計であるGBは、たとえエネルギーの推定ができなくてもレスポンス補正法¹¹⁾により精度の良い線量の算定が可能である。

4-1-2 SPD, EPD

3-1-2項目から、エネルギー特性と方向特性が電子式線量計の測定値に影響を与えていると思われる。特に、Fig. 7において感度の低下が始まる角度と、Fig. 9において測定値の低下が始まる角度 α (線量計に対する散乱線の入射角度)が、SPDとEPDともに一致している。また、低下する程度も相似している。このことから、測定値の低下の主な要因は方向特性にあるといえる。

また、EPDにおいて高さ130cm以上における測定値

の約50%の低下は、頭頸部の被ばく線量評価を行ううえで注視すべき点である。

4-2 電子式線量計による空間線量率分布の補正法の評価

R^2 の結果は、線量計の種類によらず評価値の傾向が一致していた。このことから、エネルギー特性と方向特性を補正することにより、電離箱式サーベイメータの分布との適合度をかなり高められる。

しかし、AICの結果からは、エネルギー特性のみの補正のほうがエネルギー特性と方向特性の両補正を加えたものよりも安定性が良いという評価が得られた。これは、標本数の関係もあるが、方向特性補正後のAIC値が特に高いことから、主に今回用いた方向特性の補正法が不十分で不安定なものであったことを示す。

これらから、今回用いたエネルギー特性と方向特性の補正法は、ともに用いることにより適合度は高められるが、不安定になることが分かった。しかし、エネルギー特性の補正法については R^2 、AICともに良好な評価が得られたため、有効な補正法であった。今後は R^2 、AICともに評価が低かった方向特性の補正法を改良することによって、さらに良い補正が行えるものと思われる。例えば、ファントムからの散乱線方向のみの補正だけではなく、寝台や多重絞りの散乱線方向も補正対象に加えたり、散乱X線スペクトル¹³⁾を用いた補正法などが考えられる。

最後に、従来このような補正法の評価では R^2 などを算出し、補正された分布と電離箱式サーベイメータの分布との適合度を評価していた。しかし、適合度を高めるために補正係数を多く増やすと偶発的な変動にも無理に合わせてしまうため、推定結果も不安定になる(過適合問題)¹⁴⁾。そこで、与えられたデータの情報量に見合う補正係数の数を考慮したうえで優劣の判定が簡便に行えるAICを R^2 とともに用いることにより、再現性のある安定した補正法を選択できるものと考えられる。

4-3 個人線量計の特性をふまえたIVR従事者の被ばく線量評価手法の提言

現在、個人線量計は多くの施設が所有し、安価で測定法が簡便なため広く用いられている。しかし、使用条件や測定位置によっては、方向特性などの影響で測定値が電離箱式サーベイメータの半分程度になってしまう線量計もある。個人線量計を使用する際には、事前にエネルギー特性や方向特性を十分考慮したうえで用いなければならない^{15, 16-17)}。

エネルギー特性については、OSLDやGBで散乱線

のエネルギーを把握し、2-3-1項目の(1)式を用いて補正すると良い。しかし、常に移動するために測定点が定まらず条件も変化する個人モニタリングの場合は、想定されるエネルギー範囲内で最も感度が低いエネルギー値において校正することにより、過小評価を防ぐことができる。また、測定目的に合わせてfree in airやwith phantomの校正を行うことは必須である⁵⁾。

方向特性については、今回の研究において補正法の確立ができなかった。しかし、測定の際に個人線量計の検出面を変化させ、最大の計数値をとる方向を見つけてから測定することにより、大幅に低かった測定値が改善するものと思われる。また、使用条件や測定位置が常に変化する個人モニタリングの場合は、検出面の向きを常に変えられないので、OSLDやGB、MOSFETトランジスタを利用した電離箱式線量計(direct ion storage線量計: DIS線量計)など、できる限り方向特性の良い個人線量計を使用することを推奨する。

また、方向性線量当量や角度依存性を加味した個人線量当量の導入については、今後の検討課題である⁵⁾。

5. 結 語

今回は個人線量計より得られる測定値の相違の把握を通じて、電子式線量計を中心に要因を調査し、その補正法を評価した。また、個人線量計による線量評価手法についても検討を行った。

PLDではエネルギー特性、電子式線量計ではエネルギー特性と方向特性が起因して生じる測定値の相違が確認された。特に、電子式線量計の方向特性が起因する測定値の低下は、線量評価に大きな影響を与える。しかし、エネルギー特性の補正や方向特性の良い線量計の選択などを行えば、不偏性を有する線量評価が行えることが示唆された。

また、補正法の評価に際しては、従来の R^2 のほかにAICを用いることで、より良い評価が行えることが分かった。

線量評価は放射線管理の根幹である。今回の研究から示唆された点を、日々の線量評価業務において参考にしていただければ幸いである。

謝 辞

稿を終えるにあたり、計測機材の貸し出しや測定にご協力いただきました北海道大学病院、株式会社千代田テクノル、長瀬ランダウア株式会社に感謝の意を表します。

なお、本研究は日本放射線技術学会第34回秋季学術大会(2006年10月)にてその一部を発表した。

付 録

1. 情報量規準(AIC)

AICとは真の分布との距離を測る一つの基準であるKulback-Leiblerの情報量の期待値を計算したものの¹⁸⁾で、真のモデルからのずれを評価するものである。最大対数尤度(maximum logarithm likelihood: 以下、MLL)を用いて以下のように表される。

$$AIC = -2MLL + 2k \quad \text{ただし, } k: \text{パラメータ数}$$

AICの値が低いほどモデル間の当てはまりが良いと評価される。このずれの差によりモデルの優劣が判定できる¹⁴⁾。なお、この式の右辺の第1項はモデル間の当てはまりの良さを、第2項はモデルの複雑さを表している。

2. AICによる評価手順

今回の評価においては、

目的変数: 電離箱サーベイメータの分布 I_0

説明変数: 補正前の電子式線量計の分布 I

エネルギー特性補正係数 $k(E)$

方向特性補正係数 $k(\theta)$

として、補正した各分布のAIC値を計算した。

一般に、 $(k-1)$ 個の説明変数($x_1, x_2, \dots, x_{k-1}$)による回帰モデルは、

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{k-1}x_{k-1} + \varepsilon$$

のように表現される。ここで、誤差項 ε が平均0、分散 σ_0^2 の正規分布に従うものと仮定すると、与えられた変数に対するMLLは以下になる¹⁹⁾。

$$MLL = -\frac{n}{2} \ln \frac{Q}{n}$$

ただし、

$$Q = \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - (b_0 + b_1x_{1,i} + b_2x_{2,i} + \dots + b_{k-1}x_{k-1,i}) \right\}^2$$

: 残差の平方和

よって、目的変数を加えた k 個の変数によるAICは以下のように表せる。

$$AIC = n \ln \frac{Q}{n} + 2k$$

他の評価手段としては、自由度調整済み重相関係数(以下、 R^*)やマロウズの C_p (以下、 C_p)がある。しかし、 R^* では説明変数選択時の有意水準がAICや C_p と比べてやや緩い。また、 C_p では真の分布の分散値に当てはめる推定値を検討する必要がある²⁰⁾。AICの場合は、 R^* や C_p と比べてさまざまな分野で使用されており、文献も豊富である。これらの理由から、今回の評価ではAICを使用した。

参考文献

- 1) 医療放射線管理測定マニュアル編集委員会: 第4章個人線量の測定。医療放射線管理測定マニュアル*2003*。pp.51-59, 医療放射線防護連絡協議会, 東京, (2003)。
- 2) 社団法人日本アイソトープ協会 編: 第6章放射線管理計測。医療放射線管理の実践マニュアル。pp.181-200, 日本アイソトープ協会, 東京, (2002)。
- 3) 草間朋子, 太田勝正, 小西恵美子: 看護婦, 医師などの個人線量の測定法。改訂版医療のための放射線防護。pp.81-84, 真興交易医書出版部, 東京, (1992)。
- 4) 飯田泰治, 茶島光浩, 清水 満, 他: 血管撮影領域における術者に対する放射線防護。日放技学誌, 57(12), 1548-1555, (2001)。
- 5) 財団法人原子力安全技術センター: 第1部外部被ばくマニュアル。被ばく線量の測定・評価マニュアル。pp.1-169, 東京, (2000)。
- 6) 西谷源展: 3.3半価層の測定と実効エネルギー。医療被ばく測定テキスト(放射線医療技術学叢書25)。pp.13-15, 日本放射線技術学会, (2006)。
- 7) 中村仁信, 富樫厚彦, 諸澄邦彦: 5.門脈圧亢進症に対するIVR施行時の被曝。IVRの臨床と被曝防護。pp.175-183, 医療科学社, 東京, (2004)。
- 8) 飯田泰治, 能登公也, 中川浩人, 他: 積算型個人線量計を用いたIVR装置の線量測定。日放技学誌, 62(2), 305-314, (2006)。
- 9) Akaike H: Factor analysis and AIC. Psychometrika, 52, 317-332(1987)。
- 10) 旭テクノグラス株式会社サイテック事業部: 5. エネルギー特性。蛍光ガラス線量計・小型素子システムDose Ace 基本特性資料。pp.3, 旭テクノグラス, (2000)。
- 11) 株式会社千代田テクノル測定センター: 3 測定方法。ガラスバジ技術仕様書。pp.7-12, 千代田テクノル, 東京, (2006)。
- 12) 飯田泰治, 上田伸一, 清水 満, 他: 血管造影検査における透視環境の違いによる術者の被曝線量。日放技学誌, 56(4), 610-618, (2000)。
- 13) 大釜 昇, 藤本信久, 西谷源展, 他: 散乱X線の実効エネルギー計測に関する研究。日放技学誌, 51(6), 695-701, (1995)。
- 14) 鈴木義一郎: §13 情報量規準による回帰分析。先をよむ統計学「情報量規準」とは何か。pp.174-185, 講談社, 東京, (1991)。
- 15) アロカ株式会社: マイドーズミニ χ PDM-117仕様書, (2002)。
- 16) Devine IR, Weeks AR, Pottinger MP, et al.: The Use and Operational Experience of the Siemens Electronic Personal Dosimeter by BNFL. IRPA International Congress proceedings IRPA 10, P-3a-200, 1-6(2000)。
- 17) Glenn F. Knoll 著, 木村逸郎, 阪井英次 翻訳: 4.7.4パルス状線源の場合の不感時間による数え落とし。放射線計測ハンドブック。pp.143-145, 日刊工業新聞社, 東京, (2001)。
- 18) 庄野 宏: 情報量規準TICとc-AICによるモデル選択の有効性。遠洋水研報, 38, 21-28, (2001)。
- 19) 鈴木義一郎: 情報量規準による統計解析入門。講談社, 東京, (1995)。
- 20) 丹後俊郎: 4 モデルを比較する。医学統計学シリーズ2 統計モデル入門。pp.36-60, 朝倉書店, 東京, (2000)。

図表の説明

- Fig. 1 電子式線量計の基本特性を測定する際の幾何学的配置
(a),(b)線量率特性 : 測定点
(a)左側面投影図
(b)平面投影図
(c)エネルギー特性
(d)方向特性
- Fig. 2 空間線量率分布測定の際の幾何学的配置
: 測定点
(a)左側面図
(b)平面投影図
- Fig. 3 方向特性補正時の電子式線量計に対する散乱線の入射角度
: 空間線量率分布測定の際の測定点
- Fig. 4 管電圧と実効エネルギーとの関係
- Fig. 5 電子式線量計の線量率特性
- Fig. 6 電子式線量計のエネルギー特性
- Fig. 7 電子式線量計の方向特性
(a)左右方向
(b)上下方向
- Fig. 8 OSLD, GB, PLDを用いて測定した空間線量率分布
- Fig. 9 補正前の電子式線量計(SPD, EPD)による空間線量率分布
 θ : 線量計に対する散乱線の入射角度(Fig. 3とTable 2参照)
- Fig. 10 エネルギー特性と方向特性を補正した電子式線量計(SPD, EPD)による空間線量率分布
- Table 1 半価層測定時の幾何学的配置と照射条件
- Table 2 個人線量計による空間線量率分布の補正
- Table 3 エネルギー特性と方向特性を補正した後の空間線量率分布の評価