

被検者被曝線量の実用的な測定方法

山形大学医学部附属病院 江 口 陽 一
弘前大学医学部附属病院 木 村 均
秋田県成人病医療センター 土 佐 鉄 雄
岩手医科大学附属循環器医療センター 瀬 川 光 一
東北大学医学部附属病院 佐 藤 州 彦
NTT 東北病院 大 久 敏 弘
福島県立医科大学附属病院 久保田 浩 之

1. はじめに

この課題研究班の目的は、被検者の被曝線量を測定するにあたり、現況の問題点を整理し、実用的な測定法を検討することにある。

2. 今、なぜ被曝線量の測定が求められているのか

近年、血管撮影領域では被検者の被曝線量が話題の一つに挙がっている。その背景には次のようなことが考えられる。

- (1) IVR (interventional radiology) が施行された被検者の一部に、放射線による確定的影響（皮膚障害）が発生している¹⁻⁴⁾。
- (2) 1994年のFDA (Food and Drug Administration: 米国食品医薬品局) 勧告で、被検者の被曝線量が1Gy以上になる場合は、被曝線量を記録することを勧告している⁵⁾。
- (3) 医療被曝に線量限度はないが、被検者に放射線を照射して検査を行っている以上、その線量を把握していない現状に問題がある。
- (4) 被曝線量の把握は、重篤な確定的影響の発生の回避、放射線防護の最適化、術者の被曝低減に寄与する。

この様な背景から、被検者の被曝線量が話題になり、その測定が求められてきていると考える。

3. 測定にあたっての前提条件

線量測定にあたって定めておかなければならない前提条件がある。

- (1) 何を測定し、何を評価するのか。
- (2) 人体からの後方散乱を含めるのか否か。
- (3) 線量の単位は何を使用するのか。
- (4) 線量測定に際し、必要な測定精度をどの程度にするのか。

被検者の被曝線量を知ろうとするとき、照射野内の皮膚線量を評価するのが最もわかりやすく実用的である。診断領域のX線では皮膚面での吸収が大きく、問題となる放射線による確定的影響の多くは皮膚障害である。このことから皮膚線量を測定するのが適切と考える。

皮膚線量と言ってもいくつかの考え方がある。米国のAAPM (American Association of Physicists in Medicine)⁶⁾では、皮膚面位置での空中照射線量を皮膚線量としているし、IAEAのガイダンスレベル⁷⁾では後方散乱を考慮に入れた皮膚の吸収線量を皮膚線量としている。また、ICRPでは吸収線量に線質係数(1990年勧告では放射線荷重係数⁸⁾)を乗じて求めた70 μ m線量当量(1990年勧告では等価線量⁹⁾)を皮膚線量とする考え方もある。医療被曝の単位については多くの専門家が皮膚面での吸収線量を求めることを推奨している^{7,9,10)}。しかし、血管撮影では頻りにI.I.サイズを変更する場合があります、それに伴い照射野や管電圧が目まぐるしく変化するため、測定方法によっては皮膚の吸収線量を求めることが非常に困難な場合が予想される。被検者の被曝線量は理想的には皮膚の吸収線量を求めることが望ましいが、困難な場合には最低限、皮膚面位置での照射線量を

求めておくべきと考える。

測定精度に関しては、測定方法によつてかなり異なってくるのが考えられることと、皮膚の吸収線量を測定するのにどの程度誤差が許されるのかわからず、今回我々は定めることができなかった。

4. 線量計に求められる条件

血管撮影領域で線量計に求められる条件には、次の様なことが挙げられる。

- (1) 被検者の苦痛にならない。
- (2) 画像に影響を及ぼさない。
- (3) 計測が簡便である。
- (4) リアルタイムで積算線量が表示できる。
- (5) 管電圧 60-120kV の範囲でエネルギー特性が良好である。
- (6) 透視の低線量率から DSA 撮影の高線量率まで良好な線量率特性をもっている。
- (7) 費用があまりかからない。

被検者の被曝線量を測定する線量計としては、TLD、ガラス線量計、電離箱線量計、面積線量計、それに昨年販売された米国マクマホン社製のリアルタイム積算皮膚線量計（以下、SDM と略す）を挙げることができる。上記の条件を全て満たす線量計はないが、血管撮影領域で実用的な線量計と思われる面積線量計と SDM を取り上げ、その特性の評価と問題点を整理した。また、透視撮影条件から計算で被曝線量を推定する NDD (Non Dosimeter Dosimetry) 表面線量簡易換算法¹⁾についても検討した。

5. 使用機器

使用した機器は、面積線量計がドイツ PTW 社のダイヤモンド M2、SDM は米国マクマホン社のモデル SDM104-101。これらの線量計の特性を評価するために、モニター線量計として校正されたラドカル社 mdh1015C 電離箱線量計（イオンチェンバー：10X5-6）を使用した。

6. 方法

Fig.1 に測定配置図を示した。各種線量計の

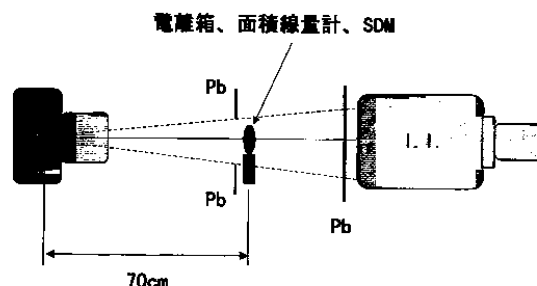


Fig.1 測定配置図

チェンバーは X 線焦点から 70cm 位置に配置して測定した。面積線量計のチェンバーは通常 X 線絞り前面に装着するが、チェンバーに入射する照射面積を正確にするために、X 線絞りから距離をおき、X 線絞りとチェンバー前面に配置した鉛マスクで正確に照射野を調整した。また、後方散乱の影響を小さくするため I. I. の前面に鉛板を置いた。

7. 結果

(1) 面積線量計 (Fig.2)

面積線量計はヨーロッパの多くの国で X 線透視装置に取り付けが義務付けられている。日本国内でも設置する施設が増えてきている。チェンバーを X 線絞り前面に取り付けることで、被検者に触れることなく全症例で被曝線量を測定できるが、この測定値のままでは X 線管からの出力を見ているにすぎない。面積線量計の値は、リアルタイムで $R \times cm^2$ または $Gy \times cm^2$ で表示される。この値を皮膚面での照射面積で割ることにより皮膚面位置での照射線量または空気吸収線量（後方散乱を含めない）が求まる。さらに、皮膚面での吸収線量を求めるためには、X 線の実効エネルギーと

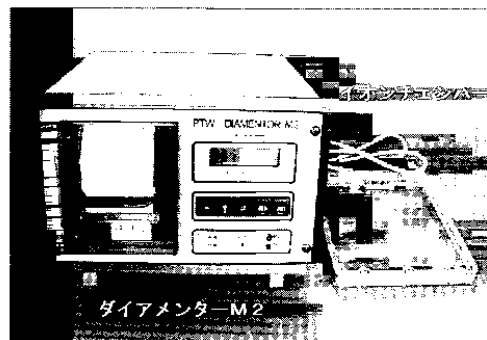


Fig.2 面積線量計
(ドイツ PTW 社 ダイヤモンド M2)

照射野サイズから後方散乱係数と吸収線量換算係数を求めて、照射線量に乗じる必要がある。また、血管撮影装置のほとんどがアンダーチューブタイプのため、カテーテル天板の吸収を補正する必要もある。

Fig. 3 に、面積線量計の線量率特性を示した。横軸がモニター線量計での照射線量の値を示し、縦軸が面積線量計の表示値を照射面積で割った値を示している。透視の低線量レベルから DSA 撮影の高線量レベルまで直線性は良好であった。面積線量計の値がモニター線量計より 40% ほど低い値を示したが、この原因には、今回の測定配置に問題があったことが挙げられる。面積線量計は 0.5mmAl 相当のフィルタ効果をもつチェンバー透過後の X 線で校正されているため、今回の測定方法では誤差が大きくなったものとする。追加

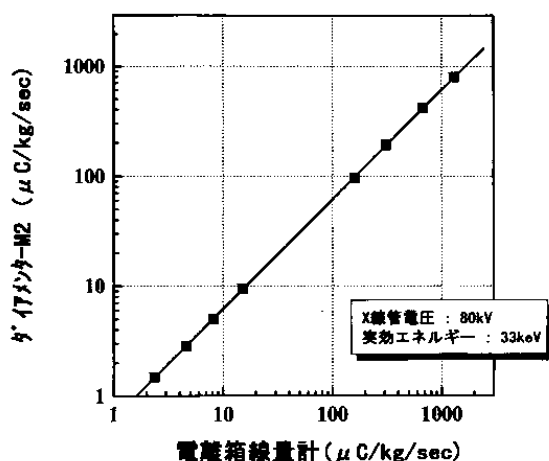


Fig. 3 面積線量計の線量率特性

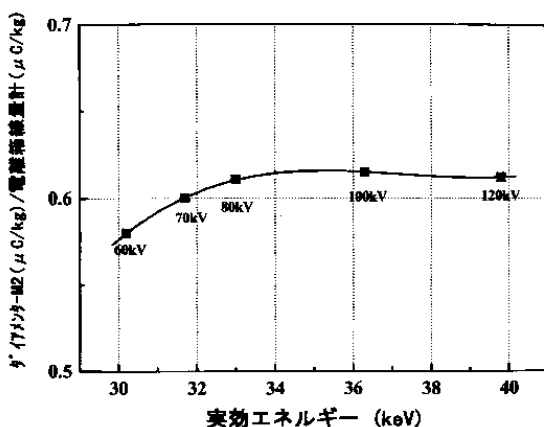


Fig. 4 面積線量計のエネルギー特性

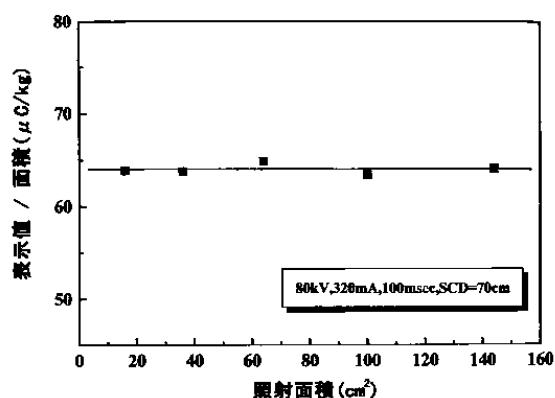


Fig. 5 面積線量計の照射野特性

実験でチェンバーを X 線絞り前面に装着し測定したが、それでも、モニター線量計より 25% 程度低い値を示した。いずれにしても、チェンバーを装着する X 線絞り精度や絞り内の X 線散乱など、外部の影響を受けることが考えられるので、チェンバーを装着する X 線装置ごとに校正定数を求めておく必要がある。

Fig. 4 にエネルギー特性を示した。横軸が X 線の実効エネルギー、縦軸は面積線量計の値をモニター線量計の値で割った値である。エネルギー特性自体は、実効エネルギー約 30keV ~ 40keV、管電圧で 60kV ~ 120kV の範囲で 6% 以内に納まっており良好な結果であった。

Fig. 5 の横軸はチェンバーに入る照射面積で、縦軸が面積線量計の表示値を照射面積で割った値を示した。照射面積によらず安定した値を示している。

面積線量計は個々に校正定数を求めておく必要があるが諸特性は良好であった。面積線量計で正確な皮膚の吸収線量を求めるには、X 線が入射した皮膚面位置と照射面積を知る必要がある。さらに、後方散乱係数と吸収線量換算係数を求める作業が必要となるが、現実的には困難である。

(2) SDM (Fig. 6)

SDM は、光ファイバーセンサーの検出部を測定位置の皮膚面に直接貼り付けて測定する。この検出部には蛍光体が内蔵されており、X 線で発光した光は細い光ファイバーで本体に導かれる。この発光量が線量に変換されリアルタイムで皮膚の

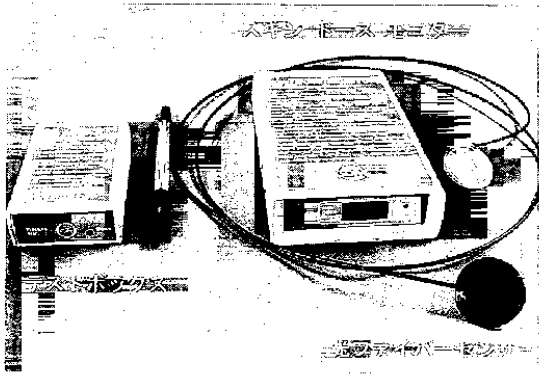


Fig. 6 リアルタイム積算皮膚線量計スキンドースモニター (米国マクマホンメディカル社 SDM104-101)

吸収線量が表示する。光ファイバーセンサーはほとんど画像に写ることはないが、その長さが1.5mのため、本体は被検者の近くに置くことになる。本体はたいへん小さいもので(150×95×35mm)、電源は乾電池を使用している。

SDMの表示値は、そのまま皮膚の吸収線量を表す。

Fig. 7にSDMの線量率特性を示した。横軸がモニター線量計で得られた照射線量を空中吸収線量に変換した値で、縦軸がSDMの表示値を示している。低線量レベルから高線量レベルまで直線性は非常に良好で、しかも、モニター線量計に近い値を示している。

Fig. 8にエネルギー特性を示した。管電圧60kV(実効エネルギー約30keV)でモニター線量計より13%程度低い値を示したが、全体的には良好な結果であった。

Fig. 9は、光ファイバーセンサーの後方に厚さ10cmのMix-Dpファントムを密着して配置し、後方散乱に対するレスポンスを見たグラフである。モニター線量計の値は、後方散乱体を置かないで測定した空中照射線量に、後方散乱係数と吸収線量換算係数を乗じて求めた値を用いた。エネルギー特性が反映して、実効エネルギーが低いところで、モニター線量計の値より20%程度低い値を示したが、全体的には後方散乱に対するレスポンスも良好で、皮膚の吸収線量に近い値を示した。

SDMの線量率特性、エネルギー特性、後方散乱に対するレスポンスは良好であった。SDMは検出部を目的の皮膚面に貼り付けておけば、何の苦

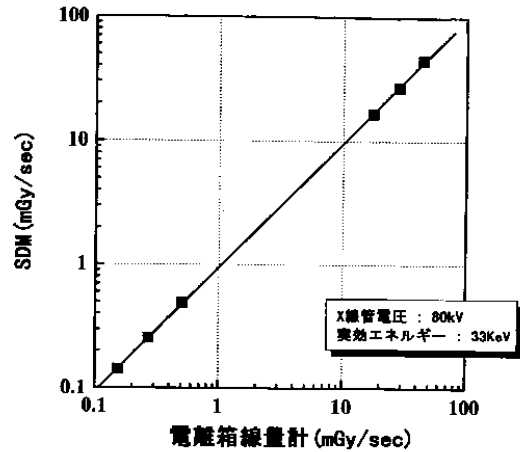


Fig. 7 SDMの線量率特性

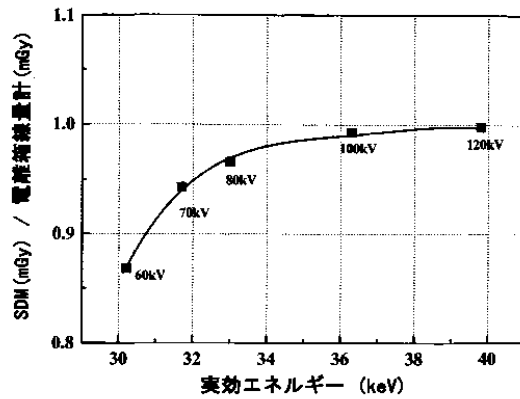


Fig. 8 SDMのエネルギー特性

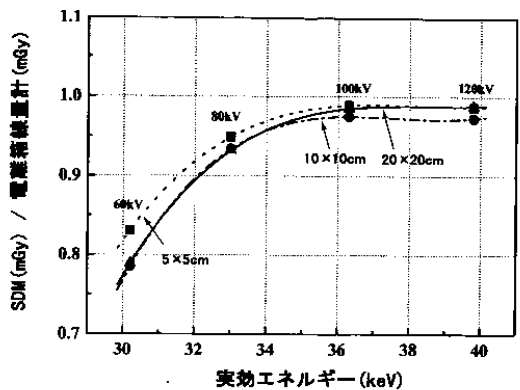


Fig. 9 SDMの後方散乱に対するレスポンス

労もなく精度の高い皮膚面での吸収線量が求まる。SDMは皮膚線量を測定する目的で開発されたこともあって、この分野で最も簡単に皮膚の吸収線量を測定できる線量計である。

皮膚面に検出器を貼り付けて測定する方法の問題点としては、当然のことだが検出器を貼り付け

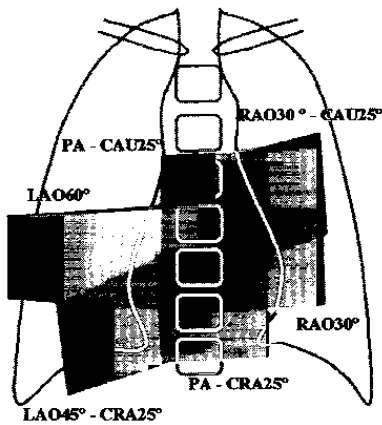


Fig. 10 冠動脈撮影における皮膚面へのX線入射分布

た位置以外の皮膚線量がわからないことである。心臓カテテル検査では、多方向から透視撮影が行われるために、X線は皮膚面の広範囲に入射し複雑に分布する (Fig. 10)。この様な場合、検出器を線量が最も高くなる照射野内に貼り付けないと、被曝線量が過小評価されてしまう部分が生じる。我々の臨床経験でもこのようなケースが見られた。

(3) NDD 法

NDD 法は、透視撮影条件、焦点皮膚間距離や総濾過の条件から表面入射線量を推定する方法である。この方法の最大の特長は線量計を持たない施設でも被曝線量を推定できることにある。

NDD 表面線量換算法の基本的な換算式¹¹⁾を示す。

$$D(\text{mGy}) = 6.5 \times \text{kV}(f) \times \text{総濾過}(f) \times \text{mAs} \times (1/\text{FSD})^2 \times 0.88 \times 10^{-2}$$

D(mGy) : 三相全波装置による表面線量

6.5 : 定数

kV(f) : 管電圧補正係数

総濾過(f) : 総濾過補正係数

mAs : 管電流(mA) × 撮影時間(sec)

FSD(m) : 焦点皮膚間距離

0.88×10^{-2} : 吸収線量変換係数
(mR-mGy 変換係数)

Fig. 11 は、NDD 法で算出した値とモニター線量計の値を比較した一例である。計算に用いた撮影条件は実測値ではなくコントローラに表示された値を用いた。管電流 50mA 以上の撮影領域では、

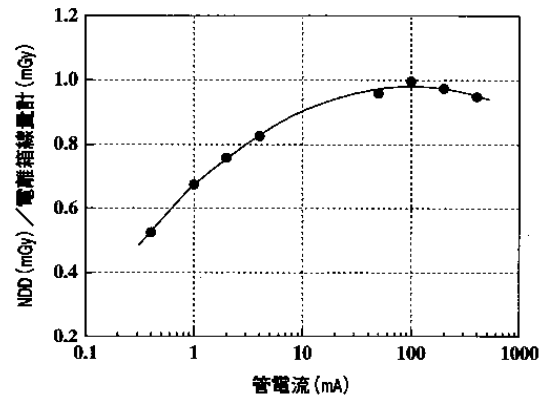


Fig. 11 NDD 法で算出した値とモニター線量計の値を比較した一例

モニター線量計との誤差が 10% 以内で良好な結果であったが、3mA 以下の透視領域では誤差が 20% 以上になってしまった。この X 線装置の調整状態が、透視領域の低電流側で悪かったことが考えられる。NDD 法で被曝線量を算出する場合、当然だが使用する X 線装置の管電圧、管電流等を実測または調整しておく必要がある。

NDD 法で被曝線量を算出するには、どうしても撮影条件と付加フィルタ等の情報が必要となる。各装置メーカーの現在の血管撮影装置で、どれだけの情報が表示されるかアンケート調査を行った (Table1)。外国メーカーでは検査後、撮影条件を一覧で表示できる機構があるが、国産の装置では画像の付随データとして見るか、RIS などと接続

Table 1 現在の血管撮影装置でどれだけの情報が表示されるかのアンケート調査 フィリップスのインテグリスH5000は面積線量計が標準装備 OP: オプション、○: 標準装備、△: 画像の付随データやRISとの接続などで可、×: できない

	面積線量計	条件から算出	条件の表示		付加フィルタ
			撮影条件	透視条件	
日立	OP	×	△	×	×
島津	OP	×	△	△	×
東芝	OP	×	△	×	△
GE	OP	OP	○	OP	×
フィリップス	OP	OP	OP	×	×
シーメンス	OP	OP	○	○	△

しない一覧で表示することはできない。検査後に検査中の平均透視条件を表示できるのはシーメンスのみである。最近の装置では軟線除去用付加フィルターが自動的に挿入されるが、そのフィルターの材質や厚さを検査後に検索することができる装置はない。このような現状からNDD法で被曝線量を算出しようとする、検査中に撮影条件、幾何学的条件それに付加フィルタ等の条件をメモしておく必要があるが、この作業は非常に負担が大きく現実的ではない。

NDD法は線量計を持たない施設でも被曝線量を推定できるが、問題点としては諸条件の把握が難しいことである。血管撮影では撮影回数も多く、I.I.サイズによって条件の変動も大きいことから計算も大変である。血管撮影領域でNDD法を実用化するにはコンピュータとのオンライン化を進める必要があると考える。この点については、近畿大学の宇都氏¹²⁾や大阪大学の山口氏¹³⁾が技術学会で発表されていますので参考にさせていただきたい。

7. まとめ

- (1) 被検者の被曝線量は、皮膚面での吸収線量を測定するのが適切と考える。
- (2) SDMは簡単に皮膚の吸収線量を測定することができ実用的な線量計である。特に、同一部位での透視撮影が多い頭腹部検査に向いている。
- (3) 心臓カテーテル検査の様に多方向から透視撮影が行われる場合、広範囲の皮膚面で被曝線量を把握する必要があるが、現状では測定できる方法はなく今後の課題である。
- (4) 今回検討した測定方法は、それぞれ長所短所があるが、各測定法の特徴を理解した上で、それぞれの施設で出来ることから始めることをお勧めしたい。

参考文献

- 1) Shope TB. : Radiation-induced skin injuries from fluoroscopy. (1996). Center for Devices and Radiological Health, FDA. (URL : www.fda.gov/cdrh/rsnaii.html)
- 2) Kuwayama N, Takaku A, Endo S, et al.: Radiation exposure in endovascular surgery of the

head and neck. AJNR, 15, 1801-1808, (1994).

- 3) 庄子正志: 頭部血管内手術の現況 Interventional neuroradiology. 東北循環器撮影研究会誌, 5, 43-45, (1994).
- 4) 江口陽一: よりよい撮影技術を求めて(その27)、IVRに必要なX線透視装置の性能. 日放技学誌, 52 (6), 780-782, (1996).
- 5) Food and Drug Administration. : Public health advisory : Avoidance of serious X-ray-induced skin injuries to patients during fluoroscopically-guided procedures. September 30, 1994. Rocville, MD, Center for Devices and Radiological Health, FDA, (1994).
- 6) AAPM Report No.31 : Standardized methods for measuring diagnostic X-ray exposures. American Institute of Physics, New York, (1990).
- 7) 鈴木昇一: 診療用X線検査時の患者被曝線量を知る方法、診療現場の問題点—線量測定的位置と単位について—, 日放技学誌, 53 (12), 1859-1861, (1997).
- 8) ICRP Publication 60: 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, 東京, (1991).
- 9) 西谷源展: デジタルX線画像の画質と被曝—X線計測における問題点—. 日放技学誌, 52 (11), 1579-1582, (1996).
- 10) 草間朋子: あなたと患者のための放射線防護講座、10 医療領域で使われる放射線の量. INNERVISION, 10 (9), 114-116, (1995).
- 11) 森 剛彦、鈴木光昭、佐藤 齊: X線診断領域における患者の皮膚入射線量簡易換算式—NDD法—. (社)茨城県放射線技師会、(社)茨城県放射線技術学会茨城支部 被曝低減委員会、(1996).
- 12) 宇都辰郎、水谷貴史、山田浩司他: NDD簡易換算式を用いた心血管検査の被曝の推定. 日放技学誌, 52 (9), 1221, (1996).
- 13) 山口和也: 診療用X線検査時の患者被曝線量を知る方法、診療現場の問題点—簡易換算法による被曝線量の推定—. 日放技学誌, 53 (12), 1853-1855, (1997).