原 著

論文受付
2020年3月13日

論文受理
2021年5月6日
Code No. 621

一般撮影領域における面積線量計を用いた 被ばく線量管理についての検討

中野伸哉¹ 中川英雄² 津上唯佳² 藤田知子² 中村悦子² 琴浦規子²

¹ 兵庫医科大学病院放射線技術部(現 富士フイルムメディカル株式会社)

² 兵庫医科大学病院放射線技術部

緒 言

2020年度より computed tomography(CT)検査などのモダリティにおいて被ばく線量の記録管理が義務化される。一般撮影領域については今回該当しないが、今後、線量の記録が義務化されると考えられる。国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)は、防護の最適化の指標として診断参考レベル(diagnostic reference levels: DRLs)の適用を勧告しており¹⁾、一般撮影領域では入射表面線量(entrance surface dose: ESD)の値が用いられている。ESDの算出方法としては、熱蛍光線量計を用いて直接計測する方法や撮影条件から計算によって

算出する表面線量簡易換算法(numerical dose determination: NDD法)などが挙げられるが²⁻⁴⁾、Japan DRLs 2015では、電離箱線量計による計測を標準とし、電離箱線量計の測定値を用いて標準体型を想定した被写体厚におけるESDにて評価するとされている⁵⁾。しかし、この方法は、焦点-被写体間距離や撮影ごとの撮影条件を基に計算を行う必要があり、個人の被ばく線量の記録に用いることは困難と考えられる。当院では、2019年8月に面積線量計を搭載したX線発生装置が導入され、撮影ごとの面積線量を把握することが可能となった。面積線量計は、interventional radiology(IVR)領域では広く用いられており、面積線

A Study of Patient's Dose Control at Radiography by Using a Dose Area Product Meter

Shinya Nakano,^{1*} Hideo Nakagawa,² Yuika Tsugami,² Tomoko Fujita,² Etsuko Nakamura,² and Noriko Kotoura²

¹ Department of Clinical Radiology, The Hospital of Hyogo College of Medicine Hospital (Current address: FUJIFILM Medical Co., Ltd)

² Department of Clinical Radiology, The Hospital of Hyogo College of Medicine Hospital

Received March 13, 2020; Revision accepted May 6, 2021

Code No. 621

Summary

Purpose: The International Commission on Radiological Protection recommends adaptation of the diagnostic reference levels (DRLs). Japan DRLs 2020 apply the entrance surface dose (ESD) in radiography. However, it is difficult to measure ESD in the clinical setting. A dose area product meter has been proposed for use as a dose index in interventional radiology. We investigated the basic characteristic of a dose area product meter and the relationship of ESD and dose area product meter values in radiography. **Method:** We measured calibration factors from phantom studies and estimated ESD from the dose area product meter. Subject thickness was measured from the chest clinical images for calculation of ESD. Estimated ESD from the dose area product meter was compared with that calculated from program software (Surface Dose Evaluation Code, Sdec). **Result:** Relative dose (dose area product meter/ionization chamber) decreased when tube voltage was lower (60 kV) or higher (130 kV). A positive correlation was found between the estimated and calculated ESD. **Conclusion:** Dose area product meter can be used for patient's dose control in radiography.

Key words: radiography, dose area product meter, entrance surface dose

*Corresponding author

Fig. 1 (a) Geometry for dosimetry
(b) Geometry for backscatter factor calculation

量計の基本特性および校正定数を把握することで簡便に入射皮膚線量を推定可能であると報告されている⁶⁾。しかし、一般撮影領域では、面積線量計を用いた被ばく管理に関する報告は少なく、ESDの推定についての報告はない。今回、一般撮影領域における面積線量計の基本特性の把握および胸部正面撮影時のESDの推定を試みたので報告する。

1. 方法

1-1 使用機器

一般撮影装置は島津製作所(京都)製 RADspeed Pro を、FPD 装置は富士フイルム(東京)製 CALNEO Smart C77 を用いた。線量測定には、VacuTec(Dresden, Germany)製の面積線量計 VacuDap-OEM, Radcal(Monrovia, CA, USA)製の指頭型電離箱線量計 Radcal 9015 型(6 cc)および線量計算ソフトウェア Sdec-V15(藤田医科大学, 愛知)を用いた。

1-2 面積線量計の基本特性

1-2-1 線質特性および線量特性

Figure 1a に測定時の配置を示す。X 線管焦点から 100 cm の位置に電離箱線量計を設置し、管電流 250

mA, 照射時間 100 ms, 照射野 14×14 inch の条件で管電圧を 50–140 kV に変化させた場合(線質特性)と管電圧 120 kV, 管電流 250 mA, 照射野 14×14 inch の条件下で照射時間を 10–500 ms まで変化させた場合(線量特性)で電離箱線量計の測定値と X 線装置のコリメータに装備された面積線量計の表示値を比較した。ただし、電離箱線量計、面積線量計ともに温度、気圧補正を行った値を用い、面積線量計の表示値は FPD 表面における照射面積で補正を行った値[μGy]とする。

1-2-2 個体差

X 線発生装置に装備された面積線量計 4 台を対象とし、管電圧 120 kV, 管電流 250 mA, 照射時間 100 ms, 照射野 14×14 inch の条件で 1-2-1 と同様の位置に配置した電離箱線量計の測定値と面積線量計の表示値を記録し、面積線量計間での個体差を比較した。

1-2-3 後方散乱の影響

後方散乱の補正係数を求めるため、FPD 前面にアクリルを配置し(Fig. 1b)、管電圧 120 kV, 管電流 250 mA, AEC(+)照射野 14×14 inch, Cu 0.3 mm の条件でアクリル厚を 12–20 cm まで変化させて、アクリル表面における電離箱線量計の測定値をアクリルがない状態での測定値と相対的比較を行った。次に、同一の撮

影条件で照射野を変化させ、アクリルあり(10 cm)/なしでの電離箱線量計の測定値について比較を行った。

1-3 入射表面線量

1-3-1 被写体厚の推定

当院にて正面・側面の胸部撮影を行った 200 例を無作為に抽出し、正面撮影時の面積線量計の表示値と胸部の正面および側面 X 線単純画像から計測した被写体厚の係数について検討を行った。被写体厚については、ImageJ(National Institutes of Health)を用いて計測を行い、次式(1)より算出した⁷⁾。当院では管電圧 120 kV、管電流 250 mA、AEC(+), 焦点-検出器間距離(source-image receptor distance: SID)200 cm で 0.3 mm の Cu フィルタを挿入して(半価層: 8.2 mmAl)撮影を行っている。

$$\text{Estimated thickness} = A \times \frac{(SID - B)}{SID} \quad \dots\dots\dots (1)$$

A : 側面像における胸骨中央部の高さの厚み

B : 正面像における横隔膜レベルの体幅の半値

なお、「一般撮影領域における面積線量計を用いた被ばく線量管理についての検討」として当施設の医学研究倫理審査の承認(第 3351 号)を得ている。

1-3-2 入射表面線量の推定

1-3-1 において被写体厚を推定した 200 例に対し、撮影条件および推定した被写体厚から計算ソフト Sdec を用いて ESD を算出した⁸⁾。この ESD と面積線量計の表示値に線質特性および後方散乱、照射面積の補正を行い、次の推定式(2)で算出した値(ESD_{DAP})について比較した。

$$\text{ESD}_{\text{DAP}} = a \cdot b \cdot K_{\text{DAP}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

a : 線質特性および後方散乱の補正係数

b : 被写体厚による照射面積の補正係数

K_{DAP} : 面積線量計の表示値を FPD 表面での照射面積で補正した値

2. 結果

2-1 面積線量計の基本特性

2-1-1 線質特性および線量特性

管電圧の変化による相対値(面積線量計の表示値/電離箱線量計の測定値)の変化を Fig. 2 に示す。線質特性は、管電圧が 60-120 kV の範囲では、変動が 3% 程度で良好だったが、60 kV 未満または 130 kV 以上の範囲では、変動が大きくなり、最大で 9% となった。線量特性は直線性がよく保たれており、誤差は 2% 程度となった(Fig. 3)。

2-1-2 個体差

今回用いたすべての面積線量計で電離箱線量計の測定値よりも高い値を示したが、面積線量計ごとに相対値(面積線量計の表示値/電離箱線量計の測定値)にばらつきがみられ、個体差は、最大で 11 ポイントとなった(Fig. 4)。

2-1-3 後方散乱の影響

アクリル厚および照射野サイズを変化させた場合の電離箱線量計の相対値(アクリルあり/アクリルなし)を Fig. 5 に示す。アクリル厚および照射野サイズが大きくなるにつれて相対値は増加したが、アクリル厚 18 cm 以上、照射野サイズ 35 cm 以上では一定となった。

Fig. 2 Energy dependence of area product meter on tube voltage. Relative dose (dose area product meter/ionization chamber) decreased when tube voltage was lower (60 kV) or higher (130 kV).

Fig. 3 Exposure dose dependence of area product meter. Relative dose (dose area product meter/ionization chamber) maintained linearity.

Fig. 4 An individual difference of the dose area product meters. The individual difference of four dose area product meters is lower (11 points).

Fig. 5 Effects of backscatter. Relative dose (acryl/air) increases as acrylic thickness and side length of square field are higher. (a)Acrylic thickness, (b)FOV

Fig. 6 Histogram of estimated thickness.

2-2 入射表面線量

2-2-1 被写体厚推定

無作為に抽出した 200 例から計測した被写体厚のヒストグラムを Fig. 6 に示す. 被写体厚は, 最小で 16 cm, 最大で 28.8 cm となり, 中央値は 21.4 cm となった. Figure 7 は, 面積線量計の表示値を FPD 表面での照射面積で補正した値(K_{DAP})と被写体厚の関係性を示す. 面積線量計の表示値と被写体厚の相関係数は 0.71 となった.

2-2-2 入射表面線量の推定

ESD と ESD_{DAP} を比較した結果を Fig. 8 に示す. ESD と ESD_{DAP} は高い正の相関を示し, 相関係数が 0.99, 近似式は, $y=1.06x-3.34$ となった. なお, ESD_{DAP} については, 1-2 の結果より, 線質および後方散乱の

Fig. 7 Relationship between estimated thickness and dose area product meter. The dose area product meter values (K_{DAP}) shows a positive correlation with estimated thickness.

Fig. 8 Relationship between ESD and ESD_{DAP}.
There is a positive correlation between ESD and ESD_{DAP}.
ESD: ESD calculated by Sdec
ESD_{DAP}: ESD estimated by the dose area product meter

補正係数は照射時間 9 ms 未満で 1.51, 照射時間 9 ms 以上では 1.55 とし, 被写体厚による照射面積の補正は 2-2-1 の結果より, すべての症例について焦点皮膚面距離を 180 cm として補正を行った. なお K_{DAP} は, 面積線量計の表示値を FPD 表面での照射面積で補正した値とする.

$$(\text{照射時間 9 ms 未満})\text{ESD}_{DAP} = 1.51 \cdot (180/200)^2 \cdot K_{DAP}$$

$$(\text{照射時間 9 ms 以上})\text{ESD}_{DAP} = 1.55 \cdot (180/200)^2 \cdot K_{DAP}$$

3. 考 察

今回, 面積線量計の特性の把握および面積線量計の表示値から ESD を推定する方法について検討を行った. 面積線量計の線質特性については, 60–120 kV の範囲では安定しているが, 60 kV 未満または 130 kV 以上の範囲では相対値が低くなる傾向がみられた. これは, 面積線量計と電離箱線量計の線質依存性の違いが影響していると考えられ, 越田らの報告と一致する⁹⁾.

線量特性については, 面積線量, 電離箱線量計の測定値ともに線量の増加に伴い直線的に増加し, 誤差は 2% 程度であった. このことから, 管電圧一定であれば面積線量計の表示値に線質特性の補正を行うことで照射線量の算出が可能といえる.

個体差については, 線量計ごとにばらつきがみられ, 最大で 11 ポイントの差がみられた. 面積線量計の誤差としては, IEC 規格の範囲内 ($\pm 25\%$) ではあるが¹⁰⁾, 被ばく管理に用いるには大きな値であり, 定期的に精度管理を行い, 線量計ごとの校正定数を把握しておく必要がある.

後方散乱の影響は, 照射面積や線質によって変化する¹¹⁾. そのため, 患者ごとの後方散乱係数を把握するためには撮影条件および照射野から計算して求める方法があるが, すべての患者に対して行うことは困難である. そこで今回, アクリルを散乱体とし, 散乱体のあり/なしによる電離箱線量計の測定値の比から後方散乱の補正係数を簡易的に算出した. 照射野サイズに関しては 35 cm 以上であれば一定であったことから, 胸部撮影で用いる照射野の範囲では照射野の影響は小さいと考えられる. アクリル厚については, アクリル厚が 18 cm 未満では補正係数が低値を示した. これは, 後方散乱係数が被写体厚の影響を受けるためだと考えられる. 前川は水ファントムを用いた実験において, ファントムの厚みが増すほど後方散乱係数は大きくなり, 20 cm を超えると一定になったと報告しており, 今回の結果と一致する¹²⁾. この結果から, 照射時間 8 ms (AEC 使用時のアクリル厚 18 cm での照射時間) で群分けを行い, 補正係数を決定した.

被写体厚の推定については, 市川らの考案した胸部の 2 方向撮影画像からの被写体厚推定法を用いた⁷⁾. これは, 胸部 2 方向の撮影画像から被写体厚を推定する方法であり, 事前実験として被写体厚既知の胸部ファントムを用いて比較した結果, 実測値が 21.00 cm, 画像からの推測値が 20.98 cm となり, 高い精度が確認された.

胸部正面撮影時の ESD については, 推定被写体厚が 19 cm 以上 25 cm 未満の症例において最小値が 0.02 mGy, 最大値が 0.08 mGy, 中央値が 0.033 mGy となり, Japan DRLs 2020 の DRL 値 0.3 mGy よりはるかに低い値となった¹³⁾. これは, FPD で撮影を行っていることに加え, 0.3 mmCu の付加フィルタを使用しているためだと考えられる. シンチレータにヨウ化セシウム蛍光体 (CsI) を用いた FPD は, CR と比べて量子検出効率 (detective quantum efficiency: DQE) が高いために低線量での撮影が可能と報告されている¹⁴⁾. また付加フィルタについては, Cu フィルタを用いることで画質を劣化させることなく, 入射表面線量を 40–60% 低減できると報告されており^{15, 16)}, 当院でも CsI を用いた FPD を使用し, 0.3 mmCu フィルタを付加して胸部 X 線撮影を行っているために低線量での撮影が可能になったと考えられる.

面積線量計を用いた ESD の推定については, Sdec を用いて臨床データから算出した ESD と面積線量計の表示値に照射面積, 線質特性および後方散乱の補正を行った補正值の比較を行った. 照射面積については, 被写体厚によって焦点皮膚間距離が異なるために

補正が必要と考えられる。しかし、被写体厚を実測した結果、全症例中 98% が 15-25 cm の範囲に含まれており、被写体厚 20 cm として照射面積の補正を行っても誤差は $\pm 5\%$ 程度となるため、今回は被写体厚 20 cm での補正係数を全症例に用いた。その結果、ESD と ESD_{DAP} は、 $r=0.99$ と非常に高い相関がみられ、近似式は $y=1.06x-3.34$ となり、誤差率は、 $\pm 10\%$ 程度であった。

以上より、面積線量計の線質特性および後方散乱の影響を補正することで面積線量計を用いて ESD の推定が可能である。今回の推定式は、アクリル板と線量計を用いた基礎実験のみで算出可能であり、被写体厚の計測や被検者への線量計の装着を必要としないため、簡便に患者被ばく管理を行う方法として有用と考えられる。

参考文献

- 1) ICRP. Radiological Protection in Medicine. ICRP Publication 105. Ann ICRP 2007; 37(6).
- 2) 藤淵俊王, 加藤英幸, 橋本成世, 他. リアルタイム半導体線量計の特性評価と一般撮影における入射表面線量測定. 日放技学誌 2006; 62(7): 997-1004.
- 3) 江田和由, 甲斐倫明, 佐藤春雄, 他. 腹部 IVR の際の患者の皮膚線量のリアルタイム測定. 日放技学誌 1998; 54(6): 792-796.
- 4) 森剛彦, 武藤裕衣, 佐藤斉, 他. X 線診断撮影条件の調査に基づく被曝線量とわが国におけるガイダンスレベルの提案. 日本医放会誌 2000; 60(7): 389-395.
- 5) J-RIME. 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定. http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukoku_syo.pdf (cited 2019. 12. 25).
- 6) 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 2000; 56(10): 1256-1265.
- 7) 市川卓磨, 大野晃治, 浅田恭生. 臨床画像を用いた胸部撮影における入射表面線量の評価—2 方向撮影画像を用いた被写体厚の推定—. 日放技学誌 2018; 74(7): 661-666.
- 8) 加藤秀起, 藤井茂久, 吉見勇治. 診断用 X 線領域における入射表面線量計算ソフト SDEC の開発. 日放技学誌 2009; 65(10): 1400-1406.
- 9) 越田吉郎, 清水幸三, 宮地利明. 面積線量計の特性解析と空気カーマへの検討. 日放技学誌 2001; 57(12): 1541-1547.
- 10) IEC/62C 国内委員会. IEC 基準の紹介—面積線量計—. 日放技学誌 1979; 35(4): 511-520.
- 11) 加藤秀起. 微分後方散乱係数を用いた診断 X 線の後方散乱係数算出法. 日放技学誌 2001; 57(12): 1503-1510.
- 12) 前川昌之. 後方散乱係数の再検討と近似曲面(討論会テーマ:『X 線検査における医療被ばく線量標準測定法』の確立に向けて, 第 27 回計測分科会討論会(2)). 計測分科会誌 2006; 14(1): 10-12.
- 13) J-RIME. National diagnostic reference levels in Japan (2020) —Japan 2020 DRLs—. https://www.radher.jp/J-RIME/report/DRL2020_Engver.pdf (cited 2020. 08. 05).
- 14) 小川憲一, 米田和夫, 奈良井昇, 他. フラットパネルディテクタの画質評価と適正照射線量. 日放技学誌 2001; 57(5): 587-592.
- 15) Martin C. The importance of radiation quality for optimisation in radiology. Biomed Imaging Interv J 2007; 3(2): e38.
- 16) Samei E, Dobbins JT, 3rd, Lo JY, et al. A framework for optimising the radiographic technique in digital X-ray imaging. Radiat Prot Dosimetry. 2005; 114(1-3): 220-229.

4. 結 語

今回提案した面積線量計を用いた入射表面線量の推定法により、簡便に被ばく管理を行うことが可能である。

謝 辞

本研究を行うにあたり、ご協力いただいた兵庫医科大学病院放射線技術部の皆様に深く感謝申し上げます。

利益相反

筆頭著者の中野伸哉は富士フイルムメディカル株式会社の社員である。

それ以外の著者に開示すべき利益相反はない。

問合せ先

〒663-8501 西宮市武庫川町 1 番 1 号
兵庫医科大学病院 中野伸哉