原 著

乳房撮影装置の半価層測定に関する検討

八木浩史・北村怜子¹⁾・猿渡理恵²⁾・土居奈津子³⁾†・山根英里子³⁾‡論文受付
2002年12月19日論文受理
2003年4月3日Code Nos. 622
814

徳島大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

1)岡山大学医学部附属病院核医学診療室

2)医療法人伸和会共立病院放射線部

3)徳島大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科

現 †高知医科大学医学部付属病院放射線部

‡医療福祉センター倉吉病院放射線科

緒 言

乳房撮影装置の品質管理項目の一つである線質測定(半価層測定)の実施方法は、(社)日本放射線技術学会が出版する放射線医療技術学叢書(14-2)「乳房撮影精度管理マニュアル(改訂版)」¹⁾(以降、マニュアル)に詳細に記載されている。半価層(線質)はマンモグラフィの画質、特にコントラストおよび患者の被曝線量を評価する平均乳腺線量と深いかわりがあり、非常に重要な管理項目であるから、可能な限りマニュアルどお

りに行わなければならない。

本実験は日常的な品質管理のために、測定を簡略化する目的で、マニュアルに記載されている方法に許容はあるのか、マニュアルどおりに実施しなければどのような問題が生じるのかを、(1)電離箱の設置位置、(2)データ収集方法と計算方法、(3)測定に使用する電離箱、などについて検討した。

この検討に関連する文献としてWagnerらの報告²⁾がある。この報告は半価層の測定精度に関するものであ

Measurement of Half-value Layer in Mammography

HIROFUMI YAGI, REIKO KITAMURA,¹⁾ RIE SARUWATARI,²⁾ NATSUKO DOI,³⁾†
and ERIKO YAMANE³⁾‡

Department of Radiologic Science and Engineering, School of Health Sciences, The University of Tokushima

1)Clinical Department of Nuclear Medicine, Okayama University Hospital

2)Department of Radiology, Kyoritsu Hospital

3)Department of Radiological Technology, School of Medical Sciences, The University of Tokushima

Present address:

†Department of Radiology, Kochi Medical School Hospital

‡Department of Radiology, Kurayoshi Hospital

Received Dec. 19, 2002; Revision accepted April 3, 2003; Code Nos. 622, 814

Summary

The half-value layer (HVL) of an X-ray beam for film-screen mammography is considered an important parameter for image quality and patient dose. Thus, HVL must be measured in accordance with *The Manual of Accuracy for Mammography* printed by the Japanese Society of Radiological Technology. The manual prescribes exactly the geometry of measurement, chamber position of measurement in the field, selection of chamber, and so on. However, the measurement of HVL is difficult in the actual clinical setting. This study examined the results of failure to perform the measurement of HVL in accordance with the manual for measuring HVL in the clinical setting. The investigation indicated that serious problems do not arise when measuring HVL for routine quality control even if the chamber in the field is not always set according to the manual and if a chamber for radiotherapy or diagnosis is used that is not recommended for soft X-ray by the manual.

Key words: Mammography, Quality control, Half-value layer

別刷資料請求先: 〒770-8509

徳島市蔵本町3丁目18番地の15

徳島大学医学部保健学科放射線技術科学専攻 八木浩史 宛

るが、測定値の一部を参考にした。

今回の検討を通して、マニュアルに記載された半価層測定法には許容があり、測定を簡略化しても、重要な問題の生じない半価層の得られることが確認できた。

1. 使用機器

1-1 乳房撮影装置

- ① MAMMOMAT 2 (シーメンス旭メディテック株式会社製)
- ② MAMMOACE MGV-01 (東芝メディカル株式会社製)

1-2 電離箱

市販されている測定目的(治療線量測定用、診断域X線用、軟X線用)の異なる代表的な電離箱として、次のものを使用した。

- ① PTW23343 (FREIBURG製)：高エネルギー電子線用の平行平板形電離箱
- ② PTW30001 (FRIBURG製)：高エネルギーX線用のファーマ形電離箱
- ③ 96035B (INOVISION製)：両面に入射窓を持つ軟X・診断域X線両用の円柱形電離箱
※軟X線用として使用
- ④ 2530/IC (NUCLEAR ENTERPRISES LIMITED製)：診断域X線用の円筒形電離箱
- ⑤ 2536/3A (NE TECHNOLOGY LIMITED製)：軟X線用の平行平板形電離箱
※半価層測定の基準電離箱として使用
- ⑥ RADCAL MOD 10×5-6M (Radcal Corporation製)：軟X線用の平行平板形電離箱
※リファレンス電離箱として使用

1-3 電位計

- ① DOSE-DOSERATE METER TYPE 2620 (NE TECHNOLOGY LIMITED製)
- ② FARMER DOSEMETER TYPE 2570/A (NE TECHNOLOGY LIMITED製)
- ③ Radiation Monitor Controller model 9015 (Radcal Corporation製)

1-4 アルミニウム吸収板

- ① RMI 115H (Gammex RMI製)：99.9% Pure Aluminum；
Thickness 0.1mm±5%

1-5 管電圧計

- ① TEST-O-METER kVp METER Type 9005 (UNFORS INSTRUMENT AB製)

2. 検討項目と実験方法

実験は「乳房撮影精度管理マニュアル(改訂版)」¹⁾の半価層測定法に準じて行った。使用管電圧は表示値28kV(14.6keV)、照射野は通常撮影に使用される大きさ；乳房撮影用フィルムの大きさ、を基準とした。

2-1 電離箱の設置位置

2-1-1 ヒール効果の影響

乳房撮影装置は管軸方向で線質に関係するヒール効果が顕著に現れる。線質は乳頭側すなわち陽極側に近づくほど硬くなり、半価層は管軸方向の位置によって変化する。マニュアルどおりの位置(以降、基準位置)；「線量計のX線検出部の中心はカセットホルダの胸壁内側40mmで、線量計のX線検出面はカセットホルダの天板上45mm」に設置した電離箱を陽極側に移動させながら半価層を測定し、ヒール効果の影響について検討する。

2-1-2 前方散乱線の影響

半価層測定は散乱線の影響を極力避けて測定するのが基本である。しかし、乳房撮影装置の半価層測定は圧迫板を取り付けた状態で、圧迫板上にアルミニウム吸収板を設置して行うのが一般的である。基準位置の電離箱に可能な限り近づけた圧迫板(吸収板を含む、以後同じ)を電離箱から離しながら半価層を測定し、圧迫板からの散乱線の影響について検討する。

2-1-3 空気吸収の影響

乳房撮影は低エネルギーX線撮影であり、低エネルギーX線は空気吸収を受けやすい。空気吸収があれば線質は硬くなり、空気厚によって半価層が変化する。基準位置の電離箱を焦点側に移動しながら半価層を測定し、空気吸収の影響について検討する。

2-2 絞りの効果

散乱線は圧迫板だけでなく、空気や撮影装置などからも発生する。基準位置で、乳房撮影に通常使用される照射野と電離箱の検出部ぎりぎりに絞った照射野で半価層を測定し、絞りの効果について検討する。

2-3 半価層の計算方法

2-3-1 対数補間法と直線補間法との比較

半価層の計算式として対数補間法がマニュアルに記載してある。

$$\text{HVL}(\text{mmAl}) = \frac{t_b \ln[2E_a/E_0] - t_a \ln[2E_b/E_0]}{\ln[E_a/E_b]}$$

今回、基本的な直線補間法も実施し、計算方法について検討する。

$$\text{HVL (mmAl)} = \frac{[t_b \{E_a - (E_0/2)\}] - [t_a \{E_b - (E_0/2)\}]}{(E_a - E_b)}$$

ただし、

E_0 : アルミニウム板なしの場合の線量

E_a : $E_0/2$ より少し大きい線量

E_b : $E_0/2$ より少し小さい線量

t_a : E_a が得られたときのアルミニウム板厚

t_b : E_b が得られたときのアルミニウム板厚

$E_a > E_b$, $t_a < t_b$

2-3-2 データ収集法の検討

補間法に必要なデータは E_0 および E_a と t_a , そして E_b と t_b である。この t_a と t_b は測定に慣れれば予測できるが、通常は吸収板を追加しながら半価層を超えるまで測定を行わなければならない。測定の簡略化のために、乳房撮影の条件; 28kV付近, では半価層を超えることのない0.1mmAl厚の値(E_a)と必ず半価層を超える0.5mmAl厚の値(E_b)を使用して半価層を求め、データ収集の簡略化について検討する。

2-4 電離箱の特性

2-4-1 後方散乱線の影響

電離箱には円柱形や円筒形(ファーマ形を含む), そして平行平板形などがある。これらの電離箱は後方散乱線の影響によって空中線量を過大評価する可能性がある。カセットホルダがある場合とない場合との空中線量を基準位置で測定し、後方散乱線の影響について検討する。

2-4-2 電離箱の型式と測定値

電離箱の感度の線質依存性(以降, 線質依存性)は電離箱の型式によって異なり, 半価層に影響する。各電離箱によって基準位置で半価層を測定し, 線質依存性の影響を検討する。

2-4-3 半価層の校正

半価層測定の場合, 線質は吸収板の厚さによって異なる。電離箱の感度はその線質ごとに異なるが, その線質を知ることではできないので, 線量を校正することは不可能である。そこで, 基準線質(28kV: 14.6keV), 基準電離箱2536/3Aで測定した半価層を標準値として, 校正定数(=基準電離箱で測定した半価層/その他の電離箱で測定した半価層)を求め, それを対象とする線質の半価層に乗じて半価層そのものの校正を行い, その有用性について検討する。

3. 実験結果

3-1 電離箱の設置位置

3-1-1 ヒール効果の影響

ヒール効果の影響をFig. 1に示す。縦軸は基準位置

で測定した半価層と, 管軸方向の異なる位置で測定した半価層との相対値である。横軸は基準位置から陽極側への電離箱の変位距離である。

電離箱が基準位置から陽極側に約4cm以上変位すると相対値が1より大きくなり, ヒール効果の影響によって半価層が過大評価された。

3-1-2 前方散乱線の影響

前方散乱線の影響をFig. 2に示す。縦軸は基準位置で測定した半価層と, 異なる電離箱-圧迫板間距離で測定した半価層との相対値である。横軸は基準位置の電離箱表面と圧迫板間距離である。

電離箱-圧迫板間距離が約15cm以上になると相対値が1となり, 圧迫板からの散乱線の影響がなくなり, 半価層は正しく測定された。

3-1-3 空気吸収の影響

空気吸収の影響をFig. 3に示す。縦軸は基準位置で測定した半価層と, 基準位置から焦点側への異なる位置で測定した半価層との相対値である。横軸は基準位置から焦点方向への電離箱の変位距離である。

変位距離が約20cmまでの相対値は1で, 空気吸収の影響はみられず, 半価層は正しく測定された。電離箱を基準位置から20cm以上焦点側に移動したとき, 相対値が1より大きくなったのは前方散乱線の影響である。

3-2 絞りの効果

絞りの効果をFig. 4に示す。縦軸は各電離箱の検出部ぎりぎりに絞って測定した半価層と, 乳房撮影に使用される照射野で測定した半価層との相対値である。縦軸の値が大きいほど絞りの効果が大きい。

絞りの効果は円柱形96035Bに対して最も大きく, 半価層の測定精度を約1.6%向上させた。

3-3 半価層の計算方法

異なるデータ収集方法と計算方法で求めた半価層をFig. 5に示す。縦軸は基準位置の半価層と, 異なるデータ収集法および補間法で求めた半価層との相対値である。縦軸の値が大きいほど, 基準値との差すなわち誤差が大きい。

マニュアルどおりのデータを使用した対数補間法による結果がA, 直線補間法による結果がBである。0.1mmAl厚と0.5mmAl厚のデータを使用した対数補間法による結果がC, 直線補間法による結果がDである。

AとBは全く同じ結果であった。Cは約3%, Dは約16%の誤差となった。

Fig. 1 Influence of heel effect (relationship between relative half-value layer and displacement distance from standard point to anode).

Fig. 2 Influence of forward scatter (relationship between relative half-value layer and distance between chamber and compression paddle).

Fig. 3 Influence of air absorption (relationship between relative half-value layer and displacement distance from standard point to focus).

Fig. 4 Effect of collimation (ratio of large field to small field).

Fig. 5 Relationship between relative half-value layer and methods of calculation and data collection.

Fig. 6 Influence of backscatter (ratio of air dose with cassette holder assembly to air dose without cassette holder assembly).

Fig. 7 Comparison of measured values at 28 kV (14.6 keV) obtained by using various chambers.

Fig. 8 Comparison of measured values at 32 kV (15.1 keV) obtained by using various chambers.

3-4 電離箱の特性

3-4-1 後方散乱線の影響

後方散乱線の影響をFig. 6に示す。縦軸は各電離箱を用いて測定したカセットホルダがない場合と、ある場合との空中線量の相対値である。この値が大きいほど、電離箱は後方散乱線の影響を受けやすい。

基準電離箱2536/3A以外の電離箱は後方散乱線の影響を受け、円柱形96035Bが影響を最も受けやすかった。

3-4-2 電離箱の型式と測定値

電離箱の型式と測定値との関係をFig. 7に示す。縦軸は基準電離箱2536/3Aで測定した半価層と、各電離箱で求めた半価層との相対値である。この値が1から離れるほど誤差が大きい。

電子線用PTW23343は半価層を約5%過小評価した。その他の電離箱は、診断域X線用2530/ICの約10%を最大として、半価層を過大評価した。

しかし、測定されたすべての半価層はマニュアルに規定してある許容範囲内であった。

3-4-3 半価層の校正

各電離箱によって測定した32kV(15.1keV)の半価層(Fig. 8)の校正結果をFig. 9に示す。縦軸は基準電離箱2536/3Aで測定した半価層と、各電離箱で測定した校正後の半価層との相対値である。この値が1から離れるほど誤差が大きい。

校正前は最大で約10%の誤差(Fig. 8)であったが、校正後は約1%以下の誤差(Fig. 9)に収まった。

4. 考 察

考察するにあたって必要なことは、誤差はどこまで許容できるかということである。

Fig. 9 Relative half-value layer at 32 kV (15.1 keV) calibrated by standard value obtained with 2536/3A.

品質管理のみを目的とした半価層測定ならば、測定値の大きさそのものは問題でなく、測定値の再現性が重要である。電離箱や電位計の型式および測定条件によって多少異なるが、線量測定値の変動係数は0.4%程度であり、電離箱の再現性は良好である。この誤差の半価層に対する影響は0.6%程度であるから、この数値を図のエラーバーとした。

平均乳腺線量の測定を目的とするならば、半価層の誤差が平均乳腺線量に直接反映されるので、測定値の精度が重要である。許容誤差は測定目的や測定者の考えにもよるが、仮に10%²⁾として考察を進める。

さらに、乳癌検診に用いるX線装置の仕様基準³⁾は詳細に決められているので、撮影装置が異なっても、今回の結果に対して許容誤差10%以上の差が出現するとは考えられないので、撮影装置の違いは考慮しない。

4-1 電離箱の設置位置

許容誤差10%を考えると、電離箱が基準位置から約9cm陽極側へ変位しても、電離箱と圧迫板がほとんど密着しても、得られた半価層に問題はない(Fig. 1, 2)。

約20cmの空気厚で、空気吸収の影響はなかったので、乳房撮影装置の半価層測定において、空気吸収の影響は全く考慮しなくてよい。よって、圧迫板からの散乱線の影響を受けない程度まで電離箱を焦点に近づけると、半価層測定時に撮影装置の負荷が軽減できる。

以上のように基準位置に許容があるので、電離箱が照射野内にあるならば、電離箱はマニュアルどおりの位置に必ずしも正確に設置しなくても、品質管理や平均乳腺線量測定のための半価層は問題なく求められる。

4-2 絞りの効果

圧迫板からの散乱線が無視できる4-1で検討した条件ならば、絞りで除去されるのは空気や撮影装置からの散乱線である。この散乱線量が一定ならば、線量(E_0 , E_a と E_b)に一定の影響を与え、計算過程で相殺される。半価層測定の場合、吸収板を増やすと線質が硬くなり、散乱線発生率は次第に増加し、散乱線量も次第に増加する。その線量増加分が半価層を過大評価する。

しかし、線質変化による散乱線の増加は少なく、絞りの使用は半価層の測定精度を許容誤差10%より小さい1.6%程度向上させる結果になったので、絞りの使用にこだわる必要はない。

4-3 半価層の計算方法

マニュアルどおりに収集したデータを使用する限り、対数補間法に代えて直線補間法を用いても問題はない。

絶対に半価層以下であるアルミニウム厚と確実に半価層以上であるアルミニウム厚のデータを使用する場合、対数補間法を用いると許容誤差10%以下の精度で求めることができるが、直線補間法で求めると許容誤差を超えるのでその使用は避けるべきである。しかし、品質管理が目的であるならば、直線補間法を使用しても問題はない。

4-4 電離箱の特性

基準電離箱2536/3A以外の電離箱は後方散乱線の影響を受け、空中線量を過大評価したが、4-2の検討(絞りの効果)と同様の理由で空中線量の過大評価分がそのまま半価層に影響しない。実際、後方散乱線が半価

Fig. 10 Relationship between response (calibration factor) and effective energy.

層に与える影響は小さく、後方散乱線の影響を半価層の誤差として評価できなかった。したがって、半価層に対する後方散乱線の影響は考慮しなくても問題はない。

しかし、空中線量は平均乳腺線量に関係するので、後方散乱線に関係する電離箱の特性は重要である。電子線用PTW23343は表面近傍の線量を測定できる構造なので、後方散乱線の影響を受けたと考えられる。同じ円筒形である高エネルギーX線用PTW30001と診断域X線用2530/ICに対する後方散乱線の影響が異なっている。この理由としてPTW30001の直径が7mmそして2530/ICの直径が30mmであるから、電離箱を基準位置に設置したとき、カセットホルダー電離箱壁間距離がそれぞれ41.5mm, 30mmと異なるためと考えられる。円柱形96035Bは、その構造上、後方散乱線の影響を受けるのは当然である。96035Bは軟X・診断域X線両用であり、電離体積も基準電離箱2536/3Aの0.2cm³に比べて15cm³と大きく感度の観点からも有利であるが、後方散乱線の影響に注意しなければならない。しかし、後方散乱線の影響は円柱形96035Bに対する4%が最大であり、許容誤差10%より小さいから、後方散乱線の影響を考慮することなく、平均乳腺線量のための空中線量測定にこれらの電離箱は使用できる。

電離箱の型式によって得られる半価層が異なるのは、線質依存性や散乱線などの影響である。リファレンス電離箱の校正定数は10keVで0.99, 15keVで0.97, 20keV以上で0.98である。Fig. 10は、このリファレンス電離箱を用いて求めた各電離箱の校正定数である。ただし、基準線質の校正定数を1とする相対値で表し、線質依存性のみられなかった基準電離箱2536/3Aと円柱形96035Bは図から除いた。

円柱形96035Bは、線質依存性のない軟X線用電離箱として使用するので、小さな誤差で半価層が測定できる。誤差要因は散乱線の影響と考えられる。

散乱線の影響を受ける電子線用PTW23343が半価層を過小評価した。その原因として、イオン再結合と線質依存性が考えられる。イオン再結合のないことは2点電圧法⁴⁾によって確認した。エネルギーが大きくなるとPTW23343の校正定数は大きくなる。すなわち、吸収板が厚くなると線量を過小評価するので、PTW23343が半価層を過小評価した原因は線質依存性と考えられる。

エネルギーが大きくなると円筒形電離箱の校正定数は小さくなる。すなわち、吸収板が厚くなると線量を過大評価するので、半価層は過大評価される。また、円筒形電離箱は散乱線の影響を受けるので、半価層を過大評価する。したがって、円筒形電離箱が半価層を過大評価するのは線質依存性と散乱線の影響と考えられる。

しかし、これらの電離箱で得られた半価層は、マニュアルに規定されている許容範囲内であるし、許容誤差10%を超えないので品質管理や乳腺線量測定のために問題はない。

よって、マニュアルで推奨されている軟X線用電離箱に限らず、治療線量測定用や診断域X線用の電離箱も品質管理や平均乳腺線量のための半価層測定に使用できる。しかし、吸収板を追加することに変化する線質を知ることができず、吸収板を追加することに測定される線量を校正することは不可能であるから、できるだけ線質依存性のない電離箱を使用すべきである。

線質依存性が明らかでない電離箱を使用する場合、線量を校正するのではなく、得られた半価層そのものを校正する方法が半価層の誤差を小さくできると考えた。例えば、基準線質を28kVとして、32kVの半価層を校正すると、すべての半価層が1%以下の誤差で評

価できた。この誤差は線質によって異なり、基準線質から離れるほど大きくなる。乳房撮影に使用する線質から大きく離れる40kV(25.0keV)の半価層に対しても校正を試み、約3%以下の誤差で評価できることを確認した。したがって、半価層そのものを校正する方法は有用であることが示唆された。

5. 結 語

乳房撮影装置の半価層測定は、マンモグラフィの画質と患者被曝線量に関係する非常に重要な品質管理項目であるから、マニュアルにしたがって実施することが必要である。

検討はマニュアルどおりに半価層測定を行わなかった場合の問題点について行った。

その結果、許容誤差を10%とすると、マニュアルに記載してある位置から数cm変位させた位置に電離箱を設置しても、マニュアルで推奨されている軟X線用以外の治療線量測定用や診断域X線用の電離箱を選択しても、品質管理や平均乳腺線量測定に支障をきたさない半価層測定の行えることが確認できた。

さらに、半価層そのものを標準値に対して校正する方法を試み、その方法は半価層の誤差を軽減するために有用であることが示唆された。

この内容の一部は中国・四国部会第42回(2001年9月23, 24日:高知市)、第43回(2002年9月21, 22日:松山市)、および日本放射線技術学会第29回(2001年11月8, 9, 10日:名古屋市)、第30回(2002年10月17, 18, 19日:松江市)秋季学術大会で報告した。さらに、内容の一部は日本放射線技術学会放射線防護分科会会誌14号(2002.4.4)、日本放射線技術学会中国・四国部会会誌12号(2001.11)、および13号(2002.12)に発表後抄録として掲載されている。

参考文献

- 1) 社団法人日本放射線技術学会出版委員会: 乳房撮影精度管理マニュアル(改訂版). 望月印刷株式会社, 埼玉, (1999).
- 2) Wagner LK, Archer BR, and Cerra F: On the measurement of half-value layer in film-screen mammography. Med Phys, 17(6), 989-997, (1990).
- 3) 精度管理マニュアル作成に関する委員会: マンモグラフィによる乳がん検診の手引き—精度管理マニュアル—(改訂第2版). pp.9-18, 日本医事新報社, 東京, (2001).
- 4) 日本医学物理学会編: 外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法01). pp.136-138, (株)通商産業研究社, 東京, (2002).

図表の説明

- Fig. 1 ヒール効果の影響；電離箱を陽極側へ移動させたときの半価層の変化
- Fig. 2 前方散乱線(圧迫板と吸収板からの散乱)の影響；圧迫板(吸収板を含む)を電離箱から離していったときの半価層の変化
- Fig. 3 空気吸収の影響；電離箱を焦点に近づけていったときの半価層の変化
- Fig. 4 絞りの効果；電離箱の検出部ぎりぎりに絞ったときに得られた半価層と撮影に使用される照射野で得られた半価層との関係
- Fig. 5 半価層の計算方法とデータ収集法の違いによる測定結果；マニュアル通りと 0.1mmAl厚, 0.5mmAl厚で得られたデータを対数補間と直線補間で計算した結果得られた半価層
- Fig. 6 後方散乱線(カセットホルダからの散乱)の影響；カセットホルダがある場合とカセットホルダがない場合との空中線量の比較
- Fig. 7 種々の電離箱による半価層の測定結果；管電圧28kV(14.6keV)
- Fig. 8 種々の電離箱による半価層の測定結果；管電圧32kV(15.1keV)
- Fig. 9 半価層の校正結果の一例；基準電離箱・基準線質で得られた半価層を標準として校正した半価層
- Fig. 10 電離箱の校正定数(基準線質：14.6keVに対する相対値)