

マンモグラフィ用増感紙／フィルムシステムの 特性曲線における空気減弱の影響

丸山敏則, 後藤佐知子, 東 義晴, 中桐義忠,
渋谷光一, 杉田勝彦

要 約

マンモグラフィ専用装置を使用して, 距離法で低エネルギー領域のX線におけるマンモグラフィ用増感紙／フィルムシステムの特性曲線を得るためには, 空気減弱の影響を考慮する必要がある。その影響について, 実効エネルギーから空気減弱分を補正, 照射線量測定による補正, Bednarek法を応用した新距離法の3種類の方法を使って検討した。さらに, 一般撮影装置でも, マンモ用システムに対して距離法で特性曲線を作成し, エネルギーの変化による影響についても検討した。

その結果, 3方法の特性曲線およびグラディエント曲線は, 新距離法が高濃度域でわずかにずれるもののほぼ一致した。新距離法に対する平均階調度, 最大階調度の最大誤差は, 2.7%, 0.2%であり, 一般撮影用装置の距離法と3方法との間では, 一般撮影用装置の距離法に対して最大誤差は2.7%, 1.5%であった。以上のことから, エネルギーの変化による特性曲線への影響はほとんどなく, 低エネルギー領域での特性曲線は空気減弱の補正を行うことのみで得られると考えられる。

キーワード: マンモグラフィ, 低エネルギー領域, 特性曲線, 距離法, 空気減弱

はじめに

増感紙／フィルムシステムの最も基本的な特性のひとつを表す特性曲線は, X線写真の画質と被検者の被曝線量を評価するのに重要である。特性曲線の作成には, 距離逆自乗則を用いてX線量を変化させる距離法が標準的な方法としてよく用いられている^{1,2)}。しかし, 胸・腹部などの一般撮影よりも低いエネルギー領域を使用するX線乳房撮影(以下マンモグラフィ)では, 空気減弱の影響で距離の逆自乗則が成立しないため, 距離法を用いる場合は空気減弱分の補正が必要となる。また, 空気減弱によるエネルギーの変化が特性曲線に及ぼす影響も懸念される。乳癌のスクリーニング検査にマンモグラフィが導入されようとしている昨今, マンモグラフィ用増感紙／フィルムシステム(以下マンモ用システム)も種々開発され, それぞれのシステムを評価するため, 特性曲線の作成について多くの議論や試みがなされている³⁻⁷⁾。

そこで本研究では, マンモグラフィ専用装置, マ

ンモ用システムに対して距離法を基に, 実効エネルギーから空気減弱分を補正, 照射線量測定による補正, 天野らのBednarek法を応用した新距離法⁷⁾を行い, 特性曲線を作成し, 空気減弱とエネルギー変化の影響について検討した。また, 高いエネルギーを使用するため, 距離逆自乗則が成立し, 空気減弱を考慮しなくともよい一般撮影用装置において, マンモ用システムに対し距離法で特性曲線を作成し, エネルギーの違いが特性曲線に及ぼす影響についても検討したので報告する。

使用機材

自動現像機: KX-300(コニカ株式会社, 以下コニカ社)
濃度計: Fuji 303(富士メディカルシステム株式会社, 以下富士メディカル社)
増感紙／フィルム: HR Mamma Fine/UM-MA HC(富士メディカル社)
マンモグラフィ専用X線装置: Model MGU-01

(Mo target/Mo filter) (東芝・東芝メディカル株式会社)
 一般撮影用X線装置：DC-15K (東芝・東芝メディカル株式会社)
 線量計：Model 1015 (ラドカル社),
 プローブ Model 10x5-6M
 アルミ半価層キット：RMI 115A (GAMMEX RMI社)
 現像液：XD-90C (コニカ社)
 定着液：XF-SR・C (コニカ社)

実験方法

Fig. 1の実験配置図において、X線管焦点に極めて近い点での線量を I_0 とし、 I_{x_0} , I_{x_1} , I_{x_2} , …, I_{x_n} を各任意の距離での線量とすると、 x_1 と x_0 での線量 I_{x_1} , I_{x_0} は空気による減弱と照射面が離れることによりX線管焦点-フィルム間距離 (以下 FFD) の逆二乗比で減弱され(1), (2)式となる。

$$I_{x_1} = I_0 \cdot e^{-\mu x_1} \left(\frac{1}{x_1} \right)^2 \quad (1)$$

$$I_{x_0} = I_0 \cdot e^{-\mu x_0} \left(\frac{1}{x_0} \right)^2 \quad (2)$$

μ は空気の線減弱係数である。(2)式を(3)式で割り、両辺の対数をとる。

$$\log \frac{I_{x_1}}{I_{x_0}} = \mu(x_0 - x_1) \cdot \log e + 2 \log \left(\frac{x_0}{x_1} \right) \quad (3)$$

線量比および FFD の逆二乗比の対数値を $\log E$, $\log E_d$ とし

$$\log E = \log \frac{I_{x_1}}{I_{x_0}} \quad (4)$$

$$\log E_d = 2 \log \left(\frac{x_0}{x_1} \right) \quad (5)$$

とすると

$$\log E = \mu(x_0 - x_1) \cdot \log e + \log E_d \quad (6)$$

となる。(6)式の $\mu(x_0 - x_1) \cdot \log e$ が空気減弱分である。胸・腹部などの一般撮影領域では、逆自乗則が成立するエネルギーを使用すれば、 μ の値は小さく減弱分は無視でき、距離逆自乗比を相対露光量として用いることができる。本研究では、距離法で作成した試料に減弱分を補正するために以下の実験およびデータ整理を行った。またマンモ用システムに対して一般撮影用装置で通常の方法を行った。

1. 濃度試料フィルムの作成

増感紙/フィルムを入れた真空カセットを Fig. 1 に示したカセットホルダーに装着し、X線を照射すれば、開口窓の部分が露光される。順次 FFD を変えるごとにカセットホルダーも上 (下) に移動させて開口窓にフィルムの未露光部分がくるように照射すると、そのフィルムを現像すればX線量の変化に伴った濃度が得られる。照射距離 x_0 , x_1 , x_2 , …, x_n は350cmから35cmまで $\Delta \log E_d = 0.1$ の増加で合計21段の濃度変化になるように決定する。マンモグラフィ専用装置の照射条件は、28kV-10mAs, 自動現像機は現像温度34°C, 処理時間90秒で処理した。10mAsはこの装置の最小出力値であり、 $x_0 = 350$ cmでの写真濃度はベース+カブリ濃度+0.02であった。なお以下

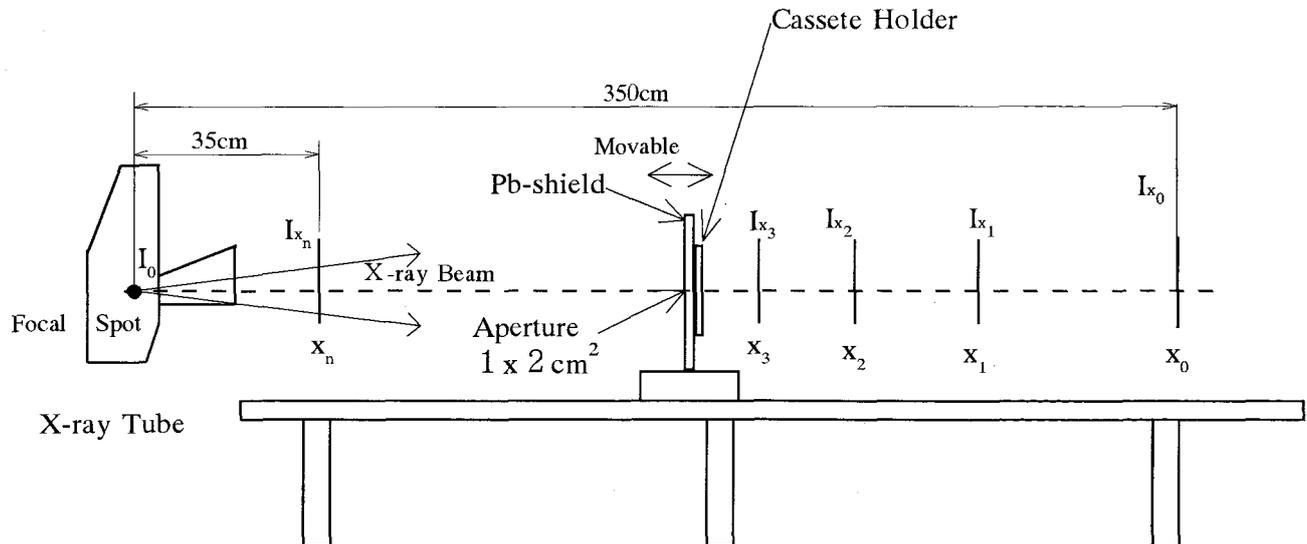


Fig. 1 Schematic diagrams of the inverse square sensitometry.

に述べる 2.～4. はすべてマンモグラフィ専用装置で行った。

2. 線減弱係数 μ を用いた補正

1. に従って作成した濃度試料フィルムに対し、文献⁹⁾に準じて測定した半価層から X 線の実効エネルギーを求め、空気の線減弱係数 μ を算出した。そして各 FFD x_i における相対露光量 (対数值) に、 μ を用いて計算した空気減弱分 $\mu(x_0 - x_i) \cdot \log_e$ の補正を行い、特性曲線を作成した。半価層測定における X 線管焦点-線量計間距離 (以下 FCD) は 46cm である。

3. 照射線量測定を用いた補正

(6)式における $\log E$ を求めるため、各 FFD x_i において照射線量 I_{x_i} を順次測定し、(4)式に従って、 I_{x_0} に対する相対露光量 (対数值) を算出した。1. で作成した濃度試料フィルムに対し、算出した相対露光量 (対数值) を用いて特性曲線を作成した。測定は各 FFD において十数回行い、それぞれの平均値を用いて計算し、各 FFD における相対露光量 $\log E$ とした。

4. Bednarek の手法を用いた新距離法

この手法は空気層をステップウェッジに見立てた 1 種のブートストラップ法^{2,9)}である。各 FFD x_i において、ある基準線量での照射と、カセットだけを横に移動させて倍数線量での照射を行い濃度試料フィルムを作成した。現像処理後濃度測定して、文献⁷⁾に準じて基準照射と倍数照射の 2 本の濃度曲線から特性曲線を作成した。その際、特性曲線横軸上の相対露光量 (対数) の間隔はその線量比の対数となる。基準線量の照射条件は 28kV-10mAs、倍数線量の照射条件は mAs 値を 16mAs とした。X 線出力の安定性と

線量比を確かめるために、フィルムに照射する前に任意の FFD 数点において、10mAs と 16mAs をそれぞれ 20 回線量測定した。また、測定点が多い方が精度よく特性曲線が得られるため、距離法により設定している FFD 21 点に任意の距離 7, 8 点を加え、照射を行った。

5. 一般撮影用装置における距離法

一般撮影用装置でマンモ用システムに対し、1. と同様の手順で得たフィルム試料から特性曲線を作成した。照射条件は 80kV-50mA-0.25sec とした。一般撮影用装置の照射条件も $x_0=350$ cm での写真濃度が 1. と同等になるよう設定した。また自動現像機の処理条件は 1. と同様である。撮影装置には 0.05mmCu と 2mmAl のフィルターを付加してあり、距離の逆自乗則が成立している。

なお、実験で得られた特性曲線のすべてのデータは文献¹⁰⁾に従い多項式近似を行い、その微分からグラディエント曲線を求めた。

結 果

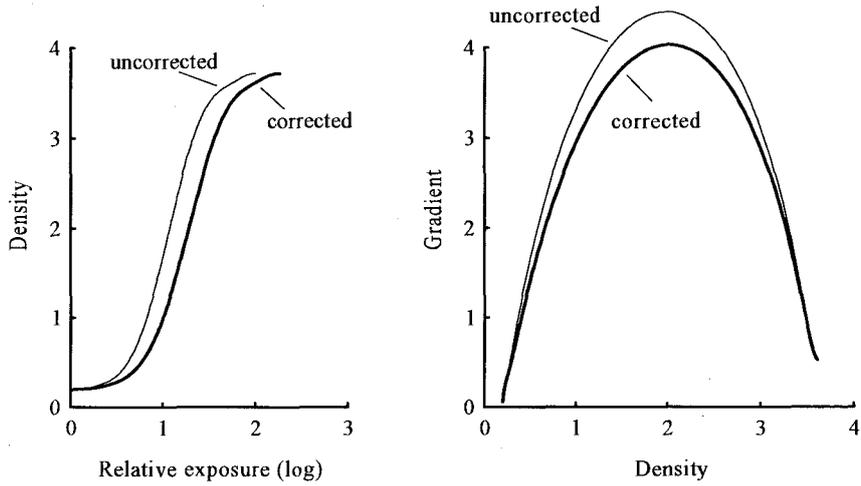
Table 1 に文献¹¹⁾から引用した実効エネルギーと減弱係数を、Table 2 に半価層の測定値とその値から文献値を対数補間して求めた実効エネルギーと減弱係数を示した。Fig. 2 (a)～(c)に、線減弱係数 μ を用いた補正、照射線量測定を用いた補正、Bednarek の手法を用いた新距離法の各方法で作成した特性曲線と、特性曲線から得られたグラディエント曲線を示した。比較のために、補正を行わずに作成した特性曲線とグラディエント曲線も併せて示した。Fig. 3 には、マンモグラフィ専用装置で行った先の 3 種類の方法の結果に加えて、一般撮影用装置で距離法を行って作成した特性曲線とグラディエント曲線を

Table 1 Reference data of the attenuation coefficients for aluminum and air.

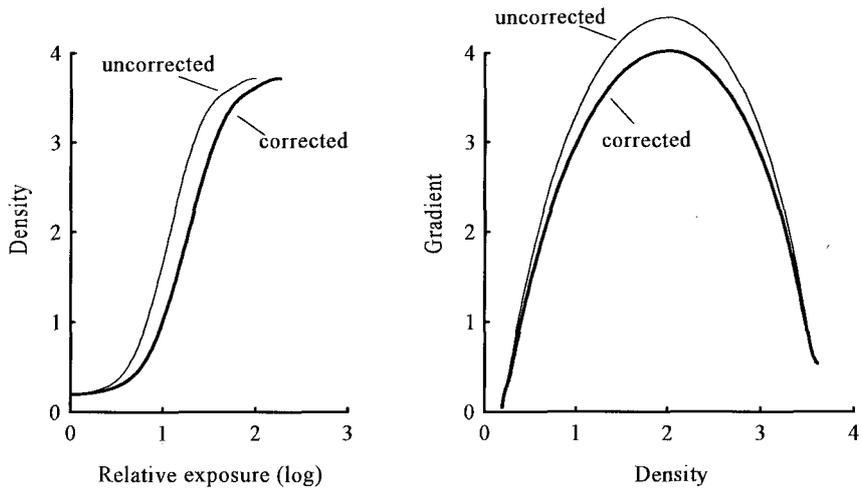
Energy [keV]	Mass attenuation coefficient of Al [cm ² /g]	Linear attenuation coefficient of air [10 ⁻⁴ cm ⁻¹]
10	25.75	59.88
15	7.967	18.4

Table 2 Calculation value of the effective energy and air attenuation coefficient by half value layer.

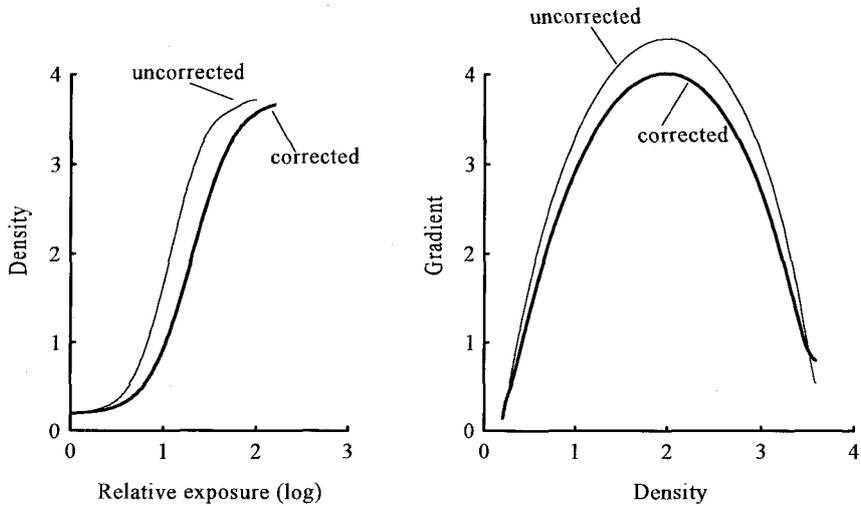
HVL [mmAl]	Mass attenuation coefficient of Al [cm ² /g]	Energy [keV]	Linear attenuation coefficient of air [10 ⁻⁴ cm ⁻¹]
0.31	8.31	14.8	19.2



(a) Corrected by air attenuation



(b) Corrected by exposure dosimetry



(c) Modified the technique of Bednarek

Fig. 2 Characteristic curves and gradient curves.
 (a) Corrected by air attenuation with effective energy HVL 0.31mmAl,
 (b) Corrected by exposure dosimetry, (c) Modified the technique of Bednarek
 (a)~(c) were showed uncorrected inverse square sensitometry together.

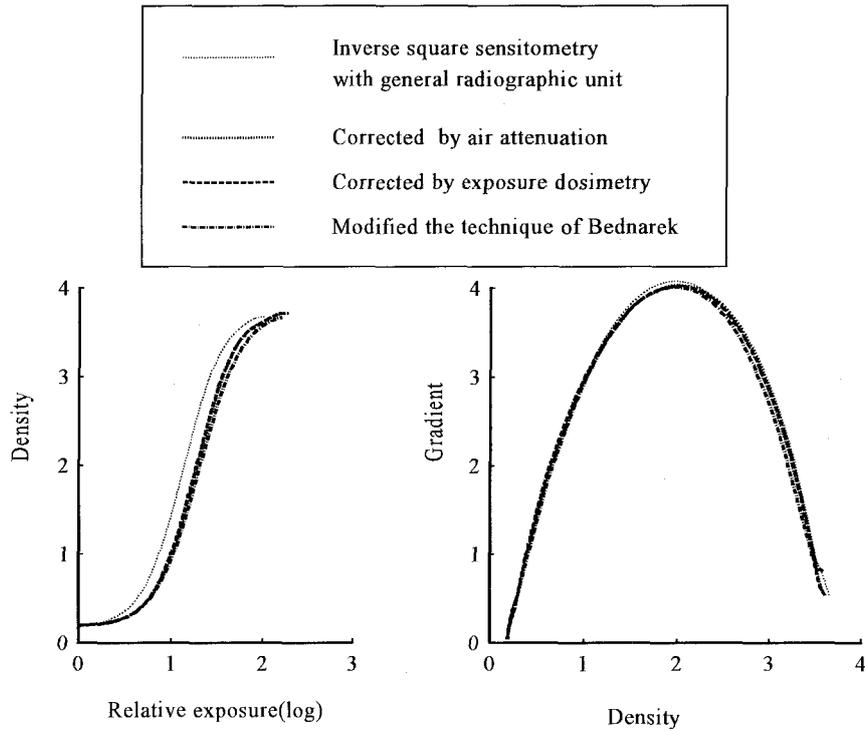


Fig. 3 Comparison of characteristic curves and gradient curves with general radiographic unit and three kinds of methods with dedicated mammographic unit.

Table 3 Comparison of average gradients and maximum gradients for uncorrected inverse square sensitometry, three kinds of methods with dedicated mammographic unit and general radiographic unit.

		Ave.G	Max.G
Dedicated mammographic unit	uncorrected inverse square sensitometry	3.26	4.45
	corrected by air attenuation	2.88	4.08
	corrected by exposure dosimetry	2.92	4.07
	modified the technique of Bednarek	2.84	4.07
General radiographic unit	inverse square sensitometry	2.92	4.13

示した。Table 3 に各特性曲線から求めた平均階調度とグラディエント曲線から求めた最大階調度を示した。

Fig. 2(a)~(c)では、いずれも補正を行わない場合に比べて、特性曲線の形状は傾きがやや低下し、平均階調度は10~14%小さくなった。グラディエント曲線も低くなり、最大階調度は9%低くなった。それぞれの低下は空気減弱による影響が主な要因である。3種類の方法の違いについては、Fig. 3 に示すとおり、新距離法のみが、特性曲線の形状では高濃度域でわずかなずれがみられ、グラディエント曲線も最大値以降でやや低下した。新距離法に対して2つの補正方法の平均階調度、最大階調度の相対誤差は最も大きい場合でそれぞれ2.7%、0.2%であった。

一方、一般撮影用装置の距離法で得られた結果と3種類の方法と比較すると、特性曲線、グラディエント曲線ともほぼ一致している。一般撮影用装置の距離法に対して平均階調度、最大階調度の相対誤差は最も大きい場合でそれぞれ2.7%、1.5%であった。

Table 4 に実験方法の2.および3.で得られた補正した相対露光量(対数値)を示した。また方法4.における基準照射と倍数照射の線量比の平均値±標準偏差は 1.60 ± 0.01 であった。

考 察

線減弱係数 μ を用いる場合、低いエネルギー領域を使用するマンモグラフィでは、空気層のフィルター効果のためにX線エネルギースペクトルが変化し

Table 4 Logarithm relative exposure corrected by air attenuation and exposure dosimetry.

Inverse square	Corrected by air attenuation	Corrected by exposure dosimetry*	Relative error** [%]
0.00	0.00	0.00±0.00	0.00
0.10	0.13	0.14±0.00	-6.25
0.20	0.26	0.26±0.01	0.01
0.30	0.39	0.38±0.01	1.35
0.40	0.51	0.50±0.01	1.52
0.50	0.63	0.62±0.01	1.23
0.60	0.75	0.74±0.01	0.75
0.70	0.86	0.86±0.01	0.18
0.80	0.98	0.97±0.01	0.58
0.90	1.09	1.08±0.01	0.76
1.00	1.20	1.19±0.01	0.80
1.10	1.31	1.30±0.01	0.74
1.20	1.42	1.41±0.02	0.60
1.30	1.53	1.52±0.01	0.42
1.40	1.63	1.63±0.02	0.22
1.50	1.74	1.74±0.01	0.00
1.60	1.85	1.84±0.01	0.30
1.70	1.95	1.95±0.01	0.03
1.80	2.06	2.06±0.01	-0.24
1.90	2.16	2.16±0.01	-0.04
2.00	2.26	2.27±0.01	-0.32

*The values were average and standard deviation.

**Relative error of the exposure dosimetry for the value corrected by air attenuation.

ている¹²⁾。それは実効エネルギーの変化、すなわち線減弱係数 μ も変化していることになる。したがって、線減弱係数 μ を一定値として補正すると、相対露光量の補正分 $\mu(x_0 - x_1) \cdot \log e$ に誤差が生じる。半価層測定の場合FCDが340cmのときで半価層が27%増加している報告¹¹⁾がある。装置の出力に違いがあるが、仮に本実験での半価層が27%増加したとすれば、線減弱係数 μ は $19.2 \times 10^{-4} [\text{cm}^{-1}]$ から $15.6 \times 10^{-4} [\text{cm}^{-1}]$ に減少し、補正分に10%以上も差がでてくることになる。このことから生じる誤差はFig. 2(a)およびFig. 3の特性曲線の相対露光量において高露光部での補正に大きな影響を及ぼす。本実験ではFCD 46cmで測定した半価層から求めた線減弱係数なので、計算上高露光部の補正值は大きめになっていると思われる。

次に照射線量測定を用いた補正の場合にも、FFDを200cm, 300cmと大きくとった時には、前述したフィルター効果のためにエネルギーが変化し、線量計の感度とエネルギー依存性が問題となる。製造会社の資料によれば、本実験で使用した線量計はエネルギー依存性において±5%の誤差を持つ。校正定数は15keVで1.00であるが、FCDが大きく、測定すべ

き線量が100mR以下の場合、精度が低下すると思われる。FCDが大きくなったときの指示値が実際の照射線量より低くなれば、相対露光量の算出の際、高露光部になるほど誤差は大きくなる。Table 4およびFig. 3で2つの補正方法が比較的一致しているのは線減弱係数を用いた補正の場合と同様に、Fig. 2(b)およびFig. 3の特性曲線において高露光部での相対露光量が大きくなっていると思われる。

距離法を基にした以上の2方法は実験方法の(3)式において、相対露光量の基準をFFDが最も離れている $x_0=350\text{cm}$ の低露光部にしている。したがって相対露光量の補正を行う場合、FFDが小さい高露光部での補正が問題とされる。

先の2方法に比べて、新距離法は空気層をステップウェッジに見立てた1種のブートストラップ法である。低エネルギー領域にステップウェッジ法を利用する場合、吸収体からの散乱線や入射X線と透過X線の線質の変化が問題となるが、吸収体が空気の場合、これらの影響は少ない。X線出力が安定し、基準照射と倍数照射の線量比が一定であれば、新距離法が補正を行わず、またエネルギー変化の影響を受けにくい、最も安定した特性曲線を求める方法で

あるといえる。問題になるのは近似計算上の誤差である。基準照射と倍数照射の2本の濃度曲線から整理された特性曲線作成のためのデータ点が十点程になることより、近似曲線の次数が1変わるだけで平均階調度は0.03変化する。その誤差をなくすためにも基準照射と倍数照射の点数が多い方がよいことは指摘されているとおりである⁹⁾。また倍数照射を1.6倍より低く設定できる装置であれば、データ点を増やし、近似誤差を少なくすることができる。本実験ではX線出力が安定しているため近似が誤差の最も大きな要因と考える。

また、Fig. 3, Table 3より一般撮影用装置の距離法で得られた特性曲線は、マンモグラフィ専用装置で行った3方法とほぼ一致し、一般撮影用装置の距離法に対して、平均階調度、最大階調度の最大相対誤差はそれぞれ2.7%、1.5%である。本実験では、空気減弱補正法の違いから説明できる誤差がでていのみで、データ整理途中の近似から生じる誤差等も考慮すれば、マンモ用システムの特性曲線におけるエネルギーの違いによる影響は認められないと言える。エネルギーの影響がなければ、一般撮影用装置の距離法を使用してマンモ用システムの特性曲線を作成し、システムを評価することができる。また2.および3.の2方法は理論上誤差をまだ含んだ補正であるが、特性曲線上では新距離法、通常の距離法に比較して、誤差はわずかなものである。したがって、低エネルギー領域においては、空気減弱によるエネルギーの変化の影響は考慮せずともよく、通常の距離法に空気減弱分の補正を行うことで特性曲線が得られると思われる。

ま と め

マンモ用増感紙／フィルムシステムにおいてマンモグラフィ専用装置で距離法を基に、低エネルギー領域のX線の空気減弱に対する補正方法が異なる3種類の特性曲線の作成を行った。そして、X線の空気減弱とそれに伴うエネルギーの変化が、マンモ用システムにおける特性曲線に及ぼす影響について調べた。さらに、X線が高エネルギー領域のため空気減弱の無視できる一般撮影用装置を用いて、エネ

ギーのみが大きく異なる場合についてもマンモ用システムの特性曲線を作成して同様に調べ、以下のような結果が得られた。

1. エネルギーによる影響は認められなかった。
2. 低エネルギー領域では空気減弱分の補正を行うことで特性曲線が得られる。

文 献

- 1) 小寺吉衛：特性曲線の測定法 I 増感紙—フィルム系 A. 距離法、放射線受光系の特性曲線(小寺吉衛編), 41-49, 医療科学社：東京, 1994.
- 2) 上田克彦：フィルムの特性曲線. 実験 画像評価 初学者のための実験入門書(大塚昭義, 砂屋敷忠, 小寺吉衛編), 23-28, 日本アクセル・シュプリンガー出版：東京, 1994.
- 3) 天野貴司, 荒尾真一, 北山彰, 山下一也, 末盛慎治, 真田泰三, 齋藤尚之, 石井幸志：乳房撮影システムにおける特性曲線の作成(距離法) I 実効エネルギー換算による空気減弱補正の技術的諸問題. 日放技学誌, 54: 932, 1997.
- 4) 末森慎治, 真田泰三, 齋藤尚之, 石井幸志, 天野貴司, 荒尾真一, 北山彰, 山下一也：乳房撮影システムにおける特性曲線の作成(距離法) II フィルム法と線量測定による検討. 日放技学誌, 53: 933, 1997.
- 5) Bednarek DR, Rudin S, Wong R.: Methods of sensitometry for low energy radiography. Optical Engineering, 21: 105-107, 1982.
- 6) 天野貴司, 末盛慎治, 荒尾真一, 北山彰, 山下一也, 坂麻由香：Bednarekの手法を応用した強度スケール法, 医用画像情報学会雑誌, 15: 84-91, 1998.
- 7) 天野貴司, 荒尾真一, 北山彰, 山下一也, 末盛慎治：低エネルギーX線領域におけるセンシトメトリー, 放射線医学物理, 18: 272-279, 1998.
- 8) 堀田勝平, 寺田央, 五十嵐明人, 石岡亮, 大松正義, 榊原俊文, 鈴木隆二, 高橋清治, 武下正憲, 萩原明, 服部昭子, 水島隆：乳房撮影精度管理マニュアル, 日放技学撮影分科会 乳房撮影ガイドライン・精度管理普及班: 56-59, 1996.
- 9) 吉田彰：特性曲線の測定法 I 増感紙—フィルム系 B. ブートストラップ法、放射線受光系の特性曲線(小寺吉衛編), 41-49, 医療科学社：東京, 1994.
- 10) 小寺吉衛：特性曲線の数式近似. 放射線受光系の特性曲線(小寺吉衛編), 161-174, 医療科学社：東京, 1994.
- 11) 日本アイソトープ協会：アイソトープ手帳, 103-107, 日本アイソトープ協会：東京, 1990.
- 12) 武下正憲, 中島直, 蓬萊忠志, 高田武, 日浦康雄, 吉田真：乳房撮影エネルギー領域におけるセンシトメトリー(距離逆2乗法)の空気吸収について. 日放技学誌, 54: 164, 1998.

The influence of air attenuation in characteristic curve for mammographic screen-film system

Toshinori MARUYAHA, Sachiko GOTO, Yoshiharu AZUMA, Yoshitada NAKAGIRI,
Koichi SHIBUYA and Katsuhiko SUGITA

Abstract

It is necessary to take air attenuation into account when we use inverse square sensitometry to obtain characteristic curve for the mammographic screen-film system at low x-ray energies as used with the dedicated unit.

Three kinds of the inverse square sensitometry approach of correcting by air attenuation obtained from effective energy, of correcting by exposure dosimetry and of using modified the technique of Bednarek were employed to investigated the influence of x-ray energy in the characteristic curves for the mammographic screen-film system. In addition, the inverse square sensitometry with the general radiographic unit was employed and the influence of x-ray high energy in the characteristic curves was also investigated for the same screen-film system.

Though characteristic curves and gradient curves of the new inverse square sensitometry were a little lower than the others in high-density region, the curves with three kinds of methods almost coincided. Maximum relative errors of average gradient and maximum gradient for modified the technique of Bednarek were found to be 2.7% and 0.2% among the others respectively. Moreover, maximum relative errors of gradient and maximum gradient for the inverse square sensitometry with the general radiographic unit were 2.7% and 1.5% among three kinds of methods with the dedicated unit respectively.

It was considered that the characteristic curves for the mammographic screen-film system were little influenced by x-ray energy and could be obtained only by correcting air attenuation from above results.

Key words : mammography, low x-ray energy, characteristic curve, inverse square sensitometry, air attenuation

Faculty of Health Sciences, Okayama University Medical School