スクリーン/フィルムシステムを用いたマンモグラフィの 画質と被曝線量の関係

小濱千幸・吉田 彰¹⁾・小寺裕子

論文受付
2003年11月4日

論文受理
2004年7月13日

Code No. 521

JA広島総合病院中央放射線室

1)広島県立保健福祉大学放射線学科

はじめに

2000年4月から50歳以上の乳癌検診には原則として乳房X線写真撮影(以下、マンモグラフィ)が導入されることになった。検診マンモグラフィを実施する機関の選定基準は、「日本医学放射線学会の定める仕様基準を満たし、線量(3mGy以下)および画質基準を満たすこと、なお仕様基準を満たさない施設も暫定的に認めるが、この場合でも線量および画質基準を満たすこと」とされている¹⁾。

なかでも、マンモグラフィの画質管理は最も重要な項目の一つであり、通常はACR(American College of Radiology)Mammography Accreditation Programで使われた156ファントムを撮影し、その画像を評価す

ることによってなされている。乳房撮影精度管理マニュアル(以下、管理マニュアル)では、156ファントム中央部での写真濃度を $1.4(\pm 0.15)$ とするように推奨している^{1, 2)}。さらに、マンモグラフィ検診精度管理中央委員会(以下、精中委)の画質基準では、臨床写真における乳腺濃度を1.20-1.59の範囲に収まるよう勧告している¹⁾。

スクリーン/フィルムシステムを用いたマンモグラフィでは乳腺密度や乳房厚(被写体パラメータ)の変化に伴い、管電圧(kV)や管電流時間積(mAs)などの照射パラメータを変えることによって、写真の濃度を適切に維持している。しかし、被写体パラメータや照射パラメータが変化すると、マンモグラフィの画質と平均

Average Glandular Tissue Dose and Image Quality in Screen-film Mammography

CHIYUKI KOHAMA, AKIRA YOSHIDA,¹⁾ and YUUKO KODERA

Department of Radiological Technology, JA Hiroshima General Hospital

1)Department of Radiological Sciences, Hiroshima Prefectural College of Health Sciences

Received Nov. 4, 2003; Revision accepted July 13, 2004; Code No. 521

Summary

We investigated the relationship between average glandular tissue dose and imaging properties such as image density, contrast, and visual image quality, varying the tube voltage and subject parameters(glandular fraction and breast thickness). The wax inserts of 156 phantom and disk of polymethyl methacrylate(PMMA) were arranged between the BR-12 breast-equivalent phantoms. These phantoms were radiographed using automatic exposure control(AEC)for the various combinations of tube voltage and subject parameters. In addition, exposures were measured at the same time. The results showed that the average glandular tissue dose increased when the high glandular fraction and/or thick phantom were being radiographed with the low tube voltage. We found that the criteria of the Japanese Mammography Screening Accreditation Program for image quality were not satisfied when breast thickness was greater than 6 cm.

Key words: Mammography, Average glandular tissue dose, Image quality

別刷資料請求先: 〒738-8503

広島県廿日市市地御前1-3-3

JA広島総合病院・中央放射線室 小濱千幸 宛

乳腺線量の両方に影響を及ぼす。

そこで本研究では、被写体パラメータや照射パラメータの違いが平均乳腺線量と画質にどのような影響を与えるかを調べた。また、それらが、精中委のガイドラインで定める線量基準や画質基準とどのような関係にあるかも検討した。

1. 方法

1-1 使用機器

使用した乳房撮影装置は管電圧変動式のセミオートタイプ、GE横河メディカルシステム社製Senographe 600THFで、モリブデンターゲット/モリブデンフィルタ(以下Mo/Mo)、グリッド比5:1、0.3mm焦点である。線量計は、Radcal corporation製Model 9015、シャロー型チェンバー10x5-6Mを用いた。乳房等価ファントムとしては、イーステック社製Breast Phantom Research Set CIRS Model 12A(以下、BR12ファントム)100×125×10mmを、視覚評価用ファントムにはRadiation Measurements, Inc.(RMI)社製Mammographic accreditation phantom Model 156(以下、156ファントム)、スクリーン/フィルムシステムは、コダック社製Min-R2000/Min-R2000を使用した。自動現像機は、富士フイルムメディカル社製CEPROSS M2(現像温度34°C、現像時間90秒)である。濃度は、富士フイルムメディカル社製Model 301 RSで測定した。

実験に先立ち、156ファントムを管電圧28kVで撮影したとき、ファントム中央部の濃度が 1.4 ± 0.15 になるようAEC(Auto Exposure Control)を調節した(3回の独立した測定において中央部の平均濃度は1.48であった)。このときの平均乳腺線量は2.02mGyとなり、精中委のガイドラインで定める3mGy以下の基準を満たしていた。また、156ファントム上に置いて同時に撮影した直径10mm、厚さ4mmのPolymethyl methacrylate(PMMA)円板(以下、アクリルディスク)とその周囲との濃度差は、0.45であった。この濃度差を管理マニュアルでは写真コントラスト(ΔD)と定義しているが、管理マニュアルの推奨値0.4以上をクリアしていた。さらに、156ファントムのワックス部内蔵試料である繊維組織(Fiber)、微小石灰化群(Speck)、腫瘍(Mass)の評価では、それぞれ4、3、3点の合計10点であり、管理マニュアルの基準を満足していた。

1-2 ファントム撮影と濃度測定

BR12ファントムの間に156ファントムのワックス部とアクリルディスクを置き、BR12ファントムの乳腺密度(乳腺組織/脂肪組織比:30/70, 50/50, 70/30)と厚さ(2, 3, 4, 5, 6cm)をそれぞれ変化させて管電圧(26, 27, 28, 29, 30, 31kV)でAEC撮影を行った。

これらの組み合わせは、臨床現場で実際に遭遇するであろう乳房と、撮影管電圧のほとんどを含んでいと考えられる。

実験配置をFig. 1(a), (b)に示す。156ファントムから取り出したワックス部は撮影台から常に40mmの高さに保持した。これは、156ファントム内にワックス部があるとき、その内蔵試料の拡大率と同じにするためである。Fig. 1に示すように、線量計の入射面とファントム上面の高さが一致するように線量計を置いた。乳房圧迫板の位置は、ファントム上面近くとした。

撮影したファントム画像についてワックス部、BR12ファントム部およびアクリルディスク部の濃度測定を行った。便宜上ワックス中央部の濃度をワックス部濃度、BR12ファントム部の濃度をベース濃度とした。Fig. 1で示すように、ワックス部とBR12ファントム部の濃度は胸壁側より40mm内側を、アクリルディスク部の濃度はディスクの中央をそれぞれ測定した。また濃度は、独立して3回測定した。

1-3 平均乳腺線量の測定

管電圧、乳腺密度や乳房厚の違いによる平均乳腺線量を計算するために、前述の実験のファントム撮影と同時に照射線量も測定した。

平均乳腺線量は、ACRで採用されているWuらによるモンテカルロシミュレーションを使用して得られた換算表と補間式を用いて算出した³⁻⁵⁾。計算に用いたAl半価層は26kVで0.36mm、27kVで0.37mm、28kVで0.38mm、29kVで0.39mm、30kVで0.40mm、31kVで0.41mmであった。

平均乳腺線量は以下の式で求めた。

$$\bar{D}_g = \bar{D}_{gN} \times X_{ESE}$$

ここでは、

$\bar{D}_g$: 平均乳腺線量

$\bar{D}_{gN}$: 照射線量1R当たりの平均乳腺線量

X_{ESE} : 撮影時の照射線量

である。

さまざまな乳腺密度の乳房の平均乳腺線量を求めるために以下の式を用いた。

$$\bar{D}_{gN}(F) = \bar{D}_{gN}(0.0) + C_1 F + C_2 F^2$$

$$C_1 = -3\bar{D}_{gN}(0.0) + 4\bar{D}_{gN}(0.5) - \bar{D}_{gN}(1.0)$$

$$C_2 = 2\bar{D}_{gN}(0.0) - 4\bar{D}_{gN}(0.5) + 2\bar{D}_{gN}(1.0)$$

Fは、乳腺含有の割合で

F=0.0は100%脂肪

F=0.5は50%乳腺+50%脂肪

F=1.0は100%乳腺

である。

半価層の測定、照射線量などの基礎データの測定

Fig. 1 Experimental arrangement for the dosimetry and radiography of a phantom.

(a) Overhead view.

(b) Lateral view.

は、管理マニュアルに準拠し、3回の測定を行い、結果を平均した。

1-4 画質因子の測定

画質因子として、精中委の画質基準「臨床写真での乳腺濃度が1.20～1.59の範囲であること、写真コントラストが0.4以上であること、156ファントムの内蔵試料のX線写真像の検出がFiber, Speck, Massのそれぞれで4, 3, 3点以上、合計10点以上であること」を考慮した。すなわち、今回われわれは画質因子として、ワックス部濃度や写真コントラストと同時に視覚的な画質評価値として、Fiber, Speck, Massの模擬試料のそれぞれについて管理マニュアルに基づいて採点した評価値を取り上げた。視覚的画質評価では、マンモグラフィ撮影に携わっている診療放射線技師6名で観察を行った。観察は照度15,000luxの高輝度シャウカステンを利用し(観察した部屋の照度は10～50lux)、フィルム外部からシャウカステンの光が目に入らないようにマスキングをして行った。

2. 結果

2-1 平均乳腺線量の測定

管電圧や被写体パラメータの違いによる照射線量と平均乳腺線量の測定結果を、Fig. 2とFig. 3に示す。照射線量はBR12ファントム厚3cmでは乳腺密度や管電圧にあまり影響されなかったが、ファントムが厚くなるほど、また乳腺密度が増すほど照射線量は管電圧の影響を大きく受けた。ファントムが厚く、乳腺密度が高い場合、管電圧が低いほど照射線量は増加した(Fig. 2)。

平均乳腺線量は、Fig. 3に示すように照射線量とほぼ比例関係を示し、同一厚では乳腺密度が高いほど平均乳腺線量は増加した。

Fig. 2 Exposure vs. tube voltage.

Fig. 3 Average glandular tissue dose vs. exposure.

2-2 平均乳腺線量と画像濃度およびコントラストとの関係

被写体パラメータと管電圧を変化させたときのワックス部濃度と平均乳腺線量との関係をFig. 4およびTableに示す。ワックス部濃度については、この実験に用いた被写体パラメータのすべての組み合わせで

Fig. 4 Relationship between average glandular tissue dose and photographic density. White, gray, and black indicate 70% gland/30% adipose, 50% gland/50% adipose, and 30% gland/70% adipose breast, respectively. Rectangle, triangle, circle, and diamond indicate breasts of 3, 4, 5, and 6 cm in thickness, respectively.

Table Photographic density, photographic contrast (ΔD), and average glandular tissue dose measured for different conditions of tube voltage, glandular fraction, and breast thickness.

Tube voltage		26kV			27kV			28kV		
Glandular fraction	Breast phantom thickness (mm)	Density	ΔD	Average glandular dose (mGy)	Density	ΔD	Average glandular dose (mGy)	Density	ΔD	Average glandular dose (mGy)
70/30	30	1.50	0.61	0.87	1.54	0.61	0.81	1.49	0.58	0.75
	40	1.51	0.58	1.70	1.50	0.58	1.54	1.47	0.57	1.37
	50	1.52	0.58	3.28	1.49	0.56	2.83	1.45	0.56	2.42
	60	—	—	—	—	—	—	1.38	0.50	4.23
50/50	30	1.47	0.61	0.78	1.46	0.59	0.72	1.41	0.59	0.68
	40	1.48	0.58	1.67	1.50	0.58	1.52	1.48	0.58	1.38
	50	1.47	0.56	2.66	1.48	0.56	2.34	1.45	0.55	2.04
	60	—	—	—	1.46	0.54	4.05	1.42	0.54	3.41
30/70	30	1.46	0.60	0.66	1.46	0.59	0.62	1.48	0.57	0.59
	40	1.54	0.58	1.16	1.54	0.58	1.07	1.53	0.58	0.98
	50	1.50	0.57	2.08	1.48	0.56	1.87	1.47	0.55	1.66
	60	1.47	0.54	3.73	1.43	0.51	3.25	1.41	0.50	2.80
Tube voltage		29kV			30kV			31kV		
Glandular fraction	Breast phantom thickness (mm)	Density	ΔD	Average glandular dose (mGy)	Density	ΔD	Average glandular dose (mGy)	Density	ΔD	Average glandular dose (mGy)
70/30	30	1.48	0.59	0.70	1.47	0.60	0.64	1.44	0.58	0.61
	40	1.43	0.59	1.23	1.39	0.55	1.10	1.39	0.53	1.00
	50	1.41	0.56	2.07	1.39	0.55	1.79	1.35	0.53	1.56
	60	1.34	0.51	3.50	1.32	0.49	2.91	1.28	0.49	2.44
50/50	30	1.43	0.59	0.63	1.42	0.58	0.60	1.46	0.57	0.57
	40	1.46	0.57	1.25	1.46	0.55	1.14	1.41	0.57	1.04
	50	1.42	0.55	1.79	1.41	0.56	1.59	1.38	0.55	1.41
	60	1.38	0.55	2.88	1.35	0.54	2.44	1.36	0.55	2.09
30/70	30	1.46	0.58	0.55	1.43	0.59	0.54	1.46	0.56	0.51
	40	1.48	0.57	0.91	1.48	0.56	0.83	1.47	0.56	0.77
	50	1.46	0.55	1.48	1.42	0.54	1.34	1.41	0.52	1.21
	60	1.41	0.51	2.43	1.37	0.53	2.08	1.34	0.48	1.82

1.20–1.59というガイドラインの至適濃度範囲に収まっていた。さらにBR12ファントム厚が4cm以下の場合、管電圧、乳腺密度、ファントム厚にかかわらず平均乳腺線量もガイドラインで推奨されている3mGy以下であった。しかし、BR12ファントム厚が5cmでは27kV以上、6cmでは28kV以上の高い管電圧を選択しなければ平均乳腺線量が3mGy以下とはならなかった。乳房が厚くて乳腺密度が高い乳房では、管電圧の選択によっては3mGy以上の被曝をする可能性があり、それを避けるためには高い管電圧の使用が要求される。

至適濃度と同様に、写真コントラストと平均乳腺線量について検討した結果をFig. 5およびTableに示す。コントラストは最小0.48から最大0.61の範囲にあり、すべての場合で管理マニュアルの基準値0.4以上を満たしていた。しかし、BR12ファントム厚が5cm以上で、かつ乳腺密度が高い場合、管電圧を低く設定すると平均乳腺線量が3mGyを超え、被曝基準を満足させることはできなかった。

2-3 平均乳腺線量と視覚評価との関係

Fiberの視覚評価点数と平均乳腺線量の関係をFig. 6に示す。4cm厚以下および5cm厚の50/50、30/70では、管電圧が低いときには4点以上となり基準点に達した。また、線量基準も満足していた。6cm厚と5cm厚の70/30では被写体パラメータすべての組み合わせで4点以下となり、精中委の定めたガイドラインの画質基準を満たさなかった。被写体パラメータのすべての組み合わせにおいて適切な管電圧を選択しなければ、Fiberは基準点に達するものがなかった。

Speckの視覚評価点数と平均乳腺線量の関係をFig. 7に示す。3cm厚の30/70、50/50のみ、すべての管電圧で基準点3.0を超えていた。5cm厚以下では管電圧が低いときのみ、基準点に達した。6cm厚では30/70の29kV以下で撮影したときのみ基準点に達した。しかし、他の評価項目と比べて被写体パラメータによる点数のバラツキは最も少なかった。

Massの視覚評価点数と平均乳腺線量の関係をFig. 8に示す。3cm厚以下では被写体パラメータすべての組み合わせで、ほぼ基準点に達した。4–5cm厚では管電圧が低いときには基準点に達したが、6cm厚では被写体パラメータほとんどのケースで基準を満たさなかった。

3. 考 察

管電圧と照射線量の関係は、Fig. 2に示すように、ファントムが厚くなるほど照射線量は管電圧によって大きく変化する。これは、他でも同様の報告があ

Fig. 5 Relationship between average glandular tissue dose and photographic contrast. White, gray, and black indicate 70% gland/30% adipose, 50% gland/50% adipose, and 30% gland/70% adipose breast, respectively. Rectangle, triangle, circle, and diamond indicate breasts of 3, 4, 5, and 6 cm in thickness, respectively.

る^{6, 7)}。ファントムを通過したX線強度は、管電圧が高ければ大きく、低ければ小さくなるため、照射線量はそれとは逆の関係で管電圧が高ければ減少、低ければ増加する。さらに、被写体が厚くなればなるほどこの差は大きくなる。Fig. 3に示す平均乳腺線量は照射線量とほぼ比例関係を示し、厚さや乳腺密度が大きい被写体を低管電圧撮影するほど平均乳腺線量は増加する。例えば、6cm厚で30/70のファントムでは、管電圧31kVで1.82mGyの平均乳腺線量が、管電圧26kVでは3.73mGyと約2倍になっている。したがって、臨床マンモグラフィにおいても、乳房が厚く、乳腺組織の多い患者を撮影する場合、管電圧を低く設定すると3mGy以上の被曝をさせる恐れがある。

なお、今回の実験に使用した乳房撮影装置は、Mo/Moの組み合わせしか選択できない。Mo/Rhを選択できる装置での結果は、本研究とは異なりいくぶん改善される可能性がある⁸⁾。

マンモグラフィの画質は、ほとんど156ファントムを用いて検討されてきた^{9, 10)}。すなわち、ファントム厚4.2cm、乳腺密度50/50というある限定された乳房を想定し、これを管電圧28kVで撮影して検討されたものである。したがって、ガイドラインの基準を満たすマンモグラフィシステム(X線装置と感光材料および現像系を含む)を使用しても、実際の臨床における多様な乳房すべてに対してこの基準を満足しているかどうかは判然としないし、そのようなデータもない。ガイドラインの線量基準と画質基準を満足するようなマンモグラフィシステムを使用しても、乳房が厚く乳腺密度が高い乳房を撮影した場合、必ずしも精中委のいう線量と画質の基準を満足するとは限らないことを認

Fig. 6 Relationship between average glandular tissue dose and evaluation score for the fibers in a breast of 3 to 6 cm in thickness. White, gray, and black indicate 70% gland/30% adipose, 50% gland/50% adipose, and 30% gland/70% adipose breast, respectively.

Fig. 7 Relationship between average glandular tissue dose and evaluation score for the specks in a breast of 3 to 6 cm in thickness. White, gray, and black indicate 70% gland/30% adipose, 50% gland/50% adipose, and 30% gland/70% adipose breast, respectively.

Fig. 8 Relationship between average glandular tissue dose and evaluation score for the masses in a breast of 3 to 6 cm in thickness. White, gray, and black indicate 70% gland/30% adipose, 50% gland/50% adipose, and 30% gland/70% adipose breast, respectively.

識すべきである。今回は、線量基準を3mGyで考察したが、管理マニュアルでは2mGy以下が望ましい、とさらに厳しい推奨値も提言している。

ガイドラインの目的からして当然のことであるが、あらゆる場合の乳房撮影に対して画質と被曝基準を保証しているわけでもなく、それを求めること自体が無理なことであろう。ただ、この基準さえ守っていればよいという消極的な態度ではなく、常に低被曝と高画質を考慮した撮影を心がけることがガイドラインを策定した本意であろうと思われる。そのためには、科学的な基礎データの集積は不可欠であり、今回の結果がその一助となれば幸いである。

4. 結 語

以上の結果は、次のようにまとめることができる。

- 1) 156ファントムでAECの濃度調整を行った今回のマンモグラフィ装置と現像処理系では、被写体と撮影パラメータの組み合わせすべてにおいて1.20–1.59の至適濃度域に入った。また、コントラストもすべての組み合わせで管理マニュアルの基準値0.4以上であった。しかし、濃度とコントラスト基準を満たしても、乳腺密度が高く、かつ厚いファントムを低管電圧撮影したとき、平均乳腺線量はガイドライン

の基準値3mGyを超えた。

- 2) 156ファントムの内蔵試料に対する画質の視覚評価では、ファントム厚が6cm以上になると画質基準をほとんど満足しなかった。また、平均乳腺線量も低管電圧では基準値を超えた。ファントム厚5cm以下では、低管電圧撮影をすれば画質基準を満足することもあった。平均乳腺線量は基準値をほとんど満足した。
- 3) 実際の臨床の現場で、乳房が厚く乳腺密度の高い乳房を撮影する場合、精中委のいう線量基準と画質基準が必ずしも満足されているとは限らないことが推測された。

謝 辞

本実験を行うにあたり、快くご協力いただいた当院の放射線技師の皆様および広島市安佐市民病院の放射線技師の皆様に深謝いたします。また、原稿を注意深く読んでいただき、有益な助言を賜りました広島県立保健福祉大学の西原貞光氏に深謝いたします。

なお、この内容の一部は第58回日本放射線技術学会学術大会にて発表した。

参考文献

- 1) 精度管理マニュアル作成に関する委員会監修：マンモグラフィによる乳がん検診の手引きー精度管理マニュアル(改訂第2版)．日本医事新報社，(2001)．
- 2) (社)日本放射線技術学会放射線撮影分科会：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)，(1999)．
- 3) 中村亜矢，五十嵐隆元，大柳友紀：mammographyにおける被曝線量の求め方について．千葉県放射線技術研究会誌，77-83，(1998)．
- 4) Wu X, Gingold EL, Barnes GT et al.: Normalized Average Glandular Dose in Molybdenum Target-Rhodium Filter and rhodium target-rhodium filter Mammography. Radiology 193, 83-89, (1994)．
- 5) Wu X, Barnes GT, and Tucker DM: Spectral Dependence of Glandular Tissue Dose In Screen-Film Mammography. Radiology, 179, 143-148, (1991)．
- 6) 石川光雄：乳房撮影における自動露出機構の問題点．日放技放射線撮影分科会誌，34，23-26，(2000)．
- 7) 宮崎 茂，齊藤一彦，青柳泰司：直接撮影用自動露出機構の特性とその現状．日放技学誌，41(7)，1055-1062，(1985)．
- 8) 牛尾綾香，石田悦子，石原久弥，他：CRマンモグラフィにおけるコントラストと被曝線量の検討．日放技学中国・四国部会誌，14，30，(2003)．
- 9) 鈴木昇一，浅田恭生，折戸武郎，他：乳房撮影における患者被曝線量と画質評価．映像情報，31(2)，77-82，(1999)．
- 10) 東田善治，朝原正喜，鈴木隆二，他：乳がん検診のための線量・画質調査班報告．日放技学誌，57(5)，530-539，(2001)．

図表の説明

- Fig. 1 ファントムの実験配置図
(a)上からの図，(b)横からの図
- Fig. 2 管電圧と照射線量の関係
- Fig. 3 照射線量と平均乳腺線量の関係
- Fig. 4 写真濃度と平均乳腺線量の関係(データ点の白，灰，黒色は，それぞれ乳腺密度70/30，50/50，30/70を示し，四角，三角，丸，菱形の記号は，それぞれ乳房厚 3，4，5，6cmを示す)
- Fig. 5 写真コントラストと平均乳腺線量の関係(データ点の白，灰，黒色は，それぞれ乳腺密度70/30，50/50，30/70を示し，四角，三角，丸，菱形の記号は，それぞれ乳房厚 3，4，5，6cmを示す)
- Fig. 6 視覚評価(Fiber)と平均乳腺線量の関係(データ点の白，灰，黒色は，それぞれ乳腺密度70/30，50/50，30/70を示す)
- Fig. 7 視覚評価(Speck)と平均乳腺線量の関係(データ点の白，灰，黒色は，それぞれ乳腺密度70/30，50/50，30/70を示す)
- Fig. 8 視覚評価(Mass)と平均乳腺線量の関係(データ点の白，灰，黒色は，それぞれ乳腺密度70/30，50/50，30/70を示す)
- Table 管電圧，乳腺含有率およびファントム厚の違いによる写真濃度，写真コントラスト(ΔD)と平均乳腺線量