原 著

論文受付
2004年12月27日

論文受理
2005年4月5日

Code Nos. 522
254

50 μ m両面集光CR-mammography： 画質特性と検出能におけるX線斜入射の影響

井手口忠光・東田善治¹⁾・赤澤史生・川路康之・財前 誠
佐々木三男・中村由美子・大喜雅文¹⁾
豊福不可依¹⁾・池田尋隆

独立行政法人国立病院機構九州医療センター放射線部(臨床研究部)
1)九州大学医学部保健学科放射線技術学専攻

緒 言

乳房画像は、X線写真のなかでも特に微細構造の検出が要求される。したがって検出器には医用画像の検出器としては最も高い解像特性を有する片面増感紙-片面乳剤フィルムシステムが用いられてきた。しかし最近のデジタル化の流れのなかで、乳房撮影にもデジタルシステムの導入が進んでいる。特にわが国では、

computed radiography (CR) システムによる乳房撮影が広く行われており¹⁾、最近の調査では、乳房撮影を行っている施設の約40%がCRシステムを用いている地域もみられる²⁾。乳房画像の診断では微小石灰化を検出することは、病変の良悪性を決定するうえで大きな意味を持っており、特に非浸潤癌や触知不能癌などの症例におけるX線撮影の意義は大きい³⁾。CRシステム

CR-mammography with Pixel Size of 50 μ m and Dual-sided Reading System: Effect of the Oblique Incident of the X-ray Beam on Imaging Properties and Detection

TADAMITSU IDEGUCHI, YOSHIHARU HIGASHIDA,¹⁾ FUMIO AKAZAWA, YASUYUKI KAWAJI,
MAKOTO ZAIZEN, MITSUO SASAKI, YUMIKO NAKAMURA, MASAFUMI OHKI,¹⁾
FUKAI TOYOFUKU,¹⁾ and HIROTAKA IKEDA

Department of Radiology, Clinical Research Institute, National Hospital Organization Kyushu
Medical Center

1)Department of Radiological Sciences, School of Health Sciences, Faculty of Medicine,
Kyushu University

Received Dec. 27, 2004; Revision accepted April 5, 2005; Code Nos. 522, 254

Summary

In mammography units, the X-ray tube focal spot is located directly above the chest wall edge of the detector. Therefore, the X-ray beam is incident at a different angle along the cathode-anode axis. When the X-ray beam is incident on the imaging plate (IP) at a relatively large angle, the resolution property of a new imaging plate with dual-sided reading system would be degraded compared with the conventional imaging plate because of the parallax effect, which produces a shift in the image on two sides of the imaging plate. To evaluate the oblique incidence effect of the X-ray beam on the degradation of resolution properties and detection of simulated microcalcifications of a new CR system with a pixel size of 50 μ m, its basic imaging properties and observer performance tests were compared with those of a conventional CR system. The resolution properties were evaluated by measuring modulation transfer functions (MTFs). Observer performance tests were conducted to compare the detectability of simulated microcalcifications of CR systems. Degradation of presampling MTFs for the new system is greater than that of the conventional CR system when the X-ray beam was incident at the same angle on the imaging plate. We found that the degradation of the area under the ROC curve (Az) for the new CR system was greater than that of the conventional CR system when the X-ray beam was incident at the same angle on the imaging plate.

Key words: CR-mammography, 50 μ m pixel size, Oblique X-ray

別刷資料請求先: 〒856-8563 福岡市中央区地行浜1-8-1
独立行政法人国立病院機構 九州医療センター 放射線部 井手口忠光 宛

を用いた乳房撮影に関しても、微小石灰化の検出に関する報告があり、初期のCRシステムでは微小石灰化の検出に問題があることが報告されている^{4~6)}。しかしその後イメージングプレート(imaging plate: 以下IP)の改良や、拡大デジタル乳房撮影⁷⁾などの試みによって、増感紙-フィルム系と遜色ない画質が得られるまでになっている。しかし現在、乳房撮影に用いられているCRシステムのピクセルサイズは $100\mu\text{m}$ であるため、さらに高精細なCRシステムの開発が望まれていた。こういう背景のなかで、従来のCRシステムに加えて、ピクセル間隔が $50\mu\text{m}$ (公称値)の乳房撮影専用CRが開発され、すでに臨床で使用されている。このシステムに採用されているIPの特徴は、これまでのIPに比べ輝尽性蛍光体粒子径を30~40%小さくし、蛍光体層を30%程度厚くすることによってX線吸収効率を向上させている。また支持体を透明にすることで裏面からの集光を可能にし、ノイズ低減を図っている⁸⁾。

われわれはすでに、従来タイプの10画素/mm $\times$ 10画素/mm($100\mu\text{m}$: 以下, $100\mu\text{mPX}$)片面読取CRと、20画素/mm $\times$ 20画素/mm($50\mu\text{m}$: 以下, $50\mu\text{mPX}$)両面読取CRシステムの画像特性と微小石灰化の検出特性について報告し、 $50\mu\text{mPX}$ が優れた特性を持っていることを明らかにした⁹⁾。

しかし、乳房X線撮影装置では、胸壁側のブラインドエリアをなくすため検出器に対してX線管球が傾斜している¹⁰⁾。このため両面読取CRシステムでは、増感紙-フィルム系でみられるX線斜入射による鮮鋭度の低下が考えられる¹¹⁾。

本研究では、X線斜入射とIPの両面読み取りによる効果について、画像特性と検出特性の観点から従来の片面集光法($100\mu\text{mPX}$)と両面集光法($50\mu\text{mPX}$)との違いを明らかにした。

1. 実験方法

1-1 CRシステムと乳房X線撮影装置

実験に用いたCR読取装置(富士写真フィルム)は、片面読取の従来タイプがFCR9000Cで、IPは $20.0\text{cm}\times 25.4\text{cm}$ のHR-V、読み取り間隔(ピクセルサイズ)が $100\mu\text{m}$ 、濃度分解能10ビットである。新しく開発されたCR読取装置は両面読取のFCR5000MA-Plusで、IPは $20.0\text{cm}\times 25.4\text{cm}$ のHR-BD、読み取り間隔(ピクセルサイズ)は $50\mu\text{m}$ 、濃度分解能10ビットである。実験に使用した乳房X線撮影装置はACOMA-ESP200(アコマレントゲン)で、焦点サイズ 0.3mm 、Mo/Mo、格子比5:1(格子密度:31本/cm、中間材質:カーボンファイバー、移動型)を用いた。基礎画像特性を測定する際には、グリットは取り外して行った。焦点-検出器間距離(source-image receptor distance: SID)は

65cm である。

1-2 基礎的画像特性

$100\mu\text{mPX}$ 片面読取CRと、 $50\mu\text{mPX}$ 両面読取CR(両CRシステム)の特性曲線は、タイムスケール法を用いて測定した。使用したX線管電圧は 30kV で、mAs値を2~ 50mAs まで変化させ撮影を行った。撮影後、パーソナルコンピュータに画像転送を行い、Image J¹²⁾を用いてデジタル値を測定した。検出器に入射する線量は、校正した線量計¹³⁾(QA test-o-meter; Unfors Instruments)でモニターを行った。

解像特性はpresampling modulation transfer function(以下、MTF)を測定し比較した¹⁴⁾。前述したように乳房X線撮影装置では、管球が検出器に対して傾斜しており、胸壁側では検出器に対して垂直に、乳頭側では最大 24° 程度斜入射する(Fig. 1)。このためMTFはX線がIPに対して垂直に入射する胸壁側と、斜入射が最も大きい乳頭側で測定する必要があるが、乳房X線撮影装置では焦点-検出器間距離が短く、また固定されているので、実際のスリット像の撮影はアライメントの調製が容易な通常のX線装置(DHF-155H: 日立製作所)を用いた。厚さ 2mm 、幅 $10\mu\text{m}$ のタングステン合金スリットを水平移動および回転移動が可能なステージ上に固定し、IPの装填されたカセット上に密着させ、センターアライメントおよびシフトドアライメントを含むように、垂直からわずかに傾けて(約 2.5°)配置した¹⁴⁾。乳頭側での測定は、IPを装填したカセット側を 24° 傾けて撮影を行った。このとき、スリットとカセットにわずかな隙間が生じ、焦点の幾何学的不鋭を含む可能性が考えられるが、その不鋭がないことを事前に実験で確認した。撮影したスリット像を、両システムの特性曲線を用いて線形化し、フーリエ変換を行うことによってMTFを求めた。MTFの計算は各照射条件で3回行い、測定精度の指標とした。スリット撮影時の使用X線管電圧は 80kV で、スリットにおける最高デジタル値が、システムの最高デジタル値(1023)の70~80%になるように、mAs値(照射線量)を変化させ撮影を行った。

1-3 微小石灰化の検出に関するROC解析

X線斜入射と両面読取方式が微小石灰化の検出能に与える影響について定量的に解析するために、receiver operating characteristic(以下、ROC)解析による視覚評価を行った。観察試料は、人体の摘出乳房を模擬した厚さ 40mm の豚肉を用いた。微小石灰化は乾燥骨を砕いて作成し、直径 $50\sim 250\mu\text{m}$ のものを顕微鏡にて抽出し使用した。微小石灰化約20~25個(直径 $50\sim 250\mu\text{m}$)からなる6種類のクラスターを厚紙の上の

Fig. 1 The dedicated mammographic unit. The X-ray beam is incident perpendicularly at the chest wall, and the X-ray beam is obliquely incident with a relatively large angle at the nipple edge of the radiation field.

りで固定し豚肉の上に重ねた。同一試料を胸壁側と乳頭側のできる限り端に配置し、臨床と同じ条件(28kV-80mAs)で撮影した。撮影されたX線写真から、臨床でみられる微小石灰化像と似た画像を選択し観察試料とした。試料は、一つのCRシステムで胸壁側と乳頭側でそれぞれ、微小石灰化あり25枚、微小石灰化なし25枚、合計100枚である。したがって、100 μ mPX片面読取CRと、50 μ mPX両面読取CRの二つのシステムを合わせると、合計200枚である。すべての画像は、同一画像読み取り条件(コントラスト、周波数処理)を使用し、背景の写真濃度も同一になるように調整した。

Fig. 2に胸壁側と乳頭側に配置し撮影した豚肉のX線写真を示す。観察試料を、50 μ mPX両面読取と100 μ mPX片面読取の二つのセットに分け、1セットの観察が終了した後、次のセットの観察まで1週間の間隔をあけた。観察は、胸壁側と乳頭側の写真が分らないように、乳頭側の写真を180°回転して胸壁側の写真に合わせた。またすべての観察実験において、観察を始める前に、オリエンテーション用に作成した画像を用いて訓練を行った。観察は、経験年数10年以上の放射線科医1名、および乳腺専門外科医1名、乳房撮影の経験が2年以上ある放射線技師4名の計6名で行った。評価方法は連続確信度法によるROC解析を用いた。信号“あり”または“なし”の確信度に応じて、用意した長さ7cmのスケールにマークを付けるよう依頼した。得られた観察結果は、Metz's ROC

Fig. 2 Hard-copy films of porcine specimen CR images obtained at the chest wall (a) and nipple edge (b).

Software¹⁵⁾を用いて解析を行った。評価はROC曲線下の面積(Az)で行い、統計的有意差はpaired-t検定を用いて判定した。

2. 結果

Fig. 3にそれぞれのシステムにおける斜入効果がMTFに及ぼす影響について示す。100 μ mPX片面読取CRでは、X線の垂直入射と24°斜入射におけるMTFの低下は少ない[Fig. 3(a)]。しかし、50 μ mPX両面読取CRでは、X線が24°斜入射した場合、MTFは大きく低下する[Fig. 3(b)]。

垂直入射および斜入射における両CRシステムのMTFの比較をFig. 4に示す。垂直入射で二つのシステムを比較すると、低空間周波数領域(0~2.5cycles/mm)における50 μ mPX両面読取のMTFは、100 μ mPX片面読取に比べてやや改善しており、周波数が高い領域(4~6cycles/mm)では明らかに優れている[Fig. 4(a)]。一方斜入射では、垂直入射に比べて二つのCRシステムのMTFの差は少ない[Fig. 4(b)]。Fig. 4の結果は、増感紙-フィルム系で起こる、X線斜入射によるMTFの劣化が、デジタル画像のCRでも起こり、その程度は片面読取より両面読取CRの方が大きいことを示している。

両システムにおける胸壁側と、X線が斜入射する乳頭側の微小石灰化の検出能に関するROC解析の結果を、Fig. 5に示す。100 μ mPX片面読取CR、50 μ mPX両面読取CRともに乳頭側のAzが胸壁側に比べ有意に低下するが(P<0.05)、50 μ mPXの両面読取CRでは、胸壁側がAz=0.88に対し、乳頭側はAz=0.76と差が大きい。

Fig. 3 Effect of the oblique incident of the X-ray beam on the imaging plates. MTFs were calculated with the X-ray beam incident perpendicularly and obliquely at 24° angles on the imaging plates for both systems. The degradation of MTFs for the $50\ \mu\text{m}$ CR system (b) is greater than that of the $100\ \mu\text{m}$ CR system (a).

Fig. 4 Comparison of MTFs for $100\ \mu\text{m}$ and $50\ \mu\text{m}$ CR systems with vertical position (a) and oblique position (b)

Fig. 5 Comparison of average ROC curves for detecting simulated microcalcifications with the positions of chest wall and nipple edge. (a) $100\ \mu\text{m}$ CR, (b) $50\ \mu\text{m}$ CR.

Fig. 6 Comparison of average ROC curves for detecting simulated microcalcifications with the 100 μ m and 50 μ m CR systems obtained at chest wall (a) and nipple edge (b), respectively.

a | b

X線斜入射の影響による微小石灰化の検出能に関するROC解析の結果を、Fig. 6に示す。胸壁側では二つのCRシステムの検出能に有意差が認められるが($P<0.05$)、乳頭側では有意差がなく、100 μ mPXと50 μ mPXの微小石灰化の検出能には差がなかった。

3. 考 察

前述したように、乳房専用の新しいCRシステムに使用されているIPは、従来のIPに比べ蛍光体の粒子径が小さく、蛍光体層が厚くなっている。また蛍光体の深部で発行した光の収集効率を上げるため、支持体を透明にすることで裏面からの集光を可能にしている。これらの改善によってノイズ低減を図っているが、両面集光方式になっているため、増感紙-フィルム系で起こる、X線斜入射によるMTFの劣化が考えられる。特に乳房X線撮影装置ではX線管の長軸が検出面に対して角度(傾き)を持っており、胸壁側ではX線が垂直に、乳頭側になるに従い検出面に対してX線が斜入射するようになる。X線管の傾きは、通常22°までの装置も多いが¹⁰⁾、本実験で用いた装置は、24°の傾きを持っている。

本研究では、X線が垂直に入射する胸壁側と斜入射する乳頭側で、両面集光と従来の片面集光方式IPにおけるMTFの違いについて明らかにした。またこの実験結果から、胸壁側と乳頭側で微小石灰化の検出能に違いがあるかどうか、ROC解析を行った。

100 μ mPX片面読取CRでは、X線斜入射による両CRシステムのMTFへの影響は、X線が垂直入射(胸壁側)したときと比べると、X線が24°斜入射した場合わずかに低下した。これは、読み取りが片面のみで行われる

ために蛍光体層内での発光ピークのズレが少なかったからだと考えられる。しかし、50 μ mPXの両面読取CRでは、X線が24°斜入射した場合MTFは大きく低下した。増感紙-フィルム系で起こる、X線斜入射によるMTFの劣化の原因と同じように¹¹⁾、前面(X線入射側)と後面(X線射出側)での発光ピークにズレが生じ(Fig. 7)、片面読取の100 μ mPXに比べMTFが大きく低下したと考えられる。X線斜入射による鮮鋭度の劣化は、デジタル画像のCRでも起こり、その程度は片面読取より、両面読取のCRの方が大きいことを、この研究において明らかにした。

仮にIPの蛍光体層の厚さを T 、中心X線の入射角度を θ とすると、その発光ピークのズレ幅 D は、近似的に次の式によって求めることができる¹¹⁾。

$$D = T \cdot \tan \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

本研究で用いた100 μ mPX片面読取CRの蛍光体層の厚さは約200 μ mで、50 μ mPX両面読取CRの蛍光体層の厚さは約260 μ mである。したがって、X線斜入射の角度24°における前面と後面の発光ピークのズレ幅を計算すると、100 μ mPXでは約89 μ m、50 μ mPXでは約115.7 μ mとなる。100 μ mPXでは前面からのみ集光するので、その発光のズレは1~2個のピクセル内に収まる可能性が高いが、50 μ mPXでは両面から集光するので、その発光のズレは2~3ピクセルのズレとなる可能性が高く、鮮鋭度劣化の大きな要因になったと考えられる。

X線斜入射の影響による微小石灰化の検出能に関するROC解析の結果では、X線が垂直入射する胸壁側

と、斜入射する乳頭側では、100 μ mPX片面読取CR、50 μ mPX両面読取CRともに乳頭側のAzが胸壁側に比べ有意に低下した($P<0.05$)。しかし、低下の割合は、100 μ mPX片面読取CRが少なく、MTFの測定結果と同じ傾向を示した。また、胸壁側と乳頭側で100 μ mPXと50 μ mPXのそれぞれのROC曲線を比較すると、胸壁側では両システムの検出能に有意差は認められるものの($P<0.05$)、乳頭側では有意差は認められなかった。この結果は、MTFの結果と同様の傾向を示しており、50 μ mPX両面読取CRにおける乳頭側の検出能は、斜入射に起因する不鋭が大きいため、従来のシステムと同程度の検出能であることが明らかになった。

微小石灰化の検出に影響を及ぼす因子には、解像特性の他に粒状特性の寄与も考えられる。この研究では、同一線量下における垂直入射でのウィナースペクトル(Wiener spectrum: WS)の測定は行ったが、斜入射との比較は行わなかった。理由は、斜入射による測定サンプルの作成が難しいことと、WSに及ぼす斜入射の影響が比較的少ないことが予想されるからである。WSと線質に関しては、Vybornyら¹⁶⁾の研究があるが、斜入射の影響に関しては、われわれが知る限り報告がない。蛍光X線(単一エネルギー)を用いたVybornyらの研究では、低空間周波数領域におけるWSの値は、線質の上昇とともに高く(すなわち粒状が悪く)なるがこの値は小さい。斜入射の場合は、検出器におけるX線のthrough passが長くなり、この結果WSの改善が期待される。しかし、垂直入射と斜入射における微小石灰化の観察実験は、垂直入射の検出能が優れており、この結果はMTFの測定結果とあまり矛盾がない。したがってここでは、視覚評価の結果については、MTFの測定結果から考察を行った。

4. まとめ

今回、乳房撮影専用の新しいCRシステム50 μ mPX両面読取と、従来型100 μ mPX片面読取において、X線斜入射による鮮鋭度への影響について検討した。またROC解析を用いた微小石灰化の検出能を求めた。

X線斜入射による鮮鋭度の劣化は、デジタル画像の

Fig. 7 The parallax effect, which produces a shift in the image on two sides of the imaging plate.

CRでも起こり、その程度は片面読取100 μ mPXより、両面読取の50 μ mPX CRの方が大きいことが明らかになった。

X線の斜入射における微小石灰化の検出能は、プリサンプリングMTFの結果とよく一致し、X線が斜入射する乳頭側では、胸壁側に比べ微小石灰化の検出能が劣化することが明らかになった。またその程度は、両面読取の50 μ mPX CRの方が大きいことを明らかにした。

謝 辞

本研究を行うにあたり有意義な討論と意見をいただきました「日本放射線技術学会デジタル画像検出システムの画像特性に関する研究班」の藤田広志、松本政雄、氷室和彦、奥迫謙治の各先生方にお礼を申し上げます。

なお、この研究の一部は2003年JRC(横浜)、2003年RSNA(シカゴ)において発表した。

参考文献

- 1) 武下正憲, 隈 浩司, 竹川直哉, 他: デジタルマンモグラフィ画質・線量調査に関する報告. 日放技学誌, 58(11), 1461-1468, (2002).
- 2) 田中 勇, 東田善治, 畑田俊和, 他: 平成12年度福岡県内の乳房撮影の実態調査. 福岡県放射線技師会学術奨励研究助成金研究報告, (2003).
- 3) Black JW, and Young B: A radiological and pathological study of the incidence of calcification in diseases of the breast and neoplasms of other tissues. Br J Radiol, 38, 596-598, (1965).
- 4) Kimme-Smith C, Bassett LW, Gold RH, et al.: Digital mammography. A comparison of two digitization methods. Invest Radiol, 24(11), 869-875, (1989).
- 5) Chan HP, Vyborny CJ, MacMahon H, et al.: Digital mammography. ROC studies of the effect of pixel size and unsharp-mask filtering on the detection of subtle microcalcifications. Invest Radiol, 22(7), 581-589, (1987).
- 6) Higashida Y, Moribe N, Morita K, et al.: Detection of subtle microcalcifications: comparison of computed radiography and screen-film mammography. Radiology, 183(2), 483-486, (1992).
- 7) 東田善治, 羽手村昌宏, 吉田 彰, 他: 拡大デジタル乳房撮影による微小石灰化検出能の改善. 日本医放会誌, 58(9), 473-478, (1998).
- 8) Arakawa S, Yasuda H, Kohda K, et al.: Improvement of Image Quality in CR Mammography by Detection of Emission from Dual Sides of an Imaging Plate. Proceedings of SPIE, Vol. 3977, 590-600, (2000).
- 9) Ideguchi T, Higashida Y, Kawaji Y, et al.: New CR system with pixel size of 50 μ m for digital mammography: Physical imaging properties and detection of subtle micro-calcifications. Radiation Medicine, 22(4), 218-224, (2004).
- 10) Tang S, Barnes GT, and Tanner RL: Slit camera focal spot measurement errors in mammography. Med Phys, 22(11 pt1), 1803-1814, (1995).
- 11) 内田 勝, 山下一也, 稲津 博: 放射線技術者のための画像工学. pp.145-158, 通商産業研究社, 東京, (1985).
- 12) ImageJ: <http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>
- 13) 野村純恵, 田中 勇, 古賀 淳, 他: 乳房撮影領域におけるガラス線量計およびQAメータの特性について. 日本乳癌検診学会誌, 10(1), 115-121, (2001).
- 14) Fujita H, Doi K, and Giger ML: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. 6.MTFs of II-TV digital imaging systems. Med Phys, 12(6), 713-720, (1985).
- 15) Metz CE, Herman BA, and Shen JH: Maximum-likelihood estimation of receiver operating characteristic (ROC) curves from continuously-distributed data. Stat Med, 17(9), 1033-1053, (1998).
- 16) Vyborny CJ, Loo LN, and Doi K: The energy-dependent behavior of noise Wiener spectra in their low-frequency limits: comparison with simple theory. Radiology, 144(3), 619-622, (1982).

図表の説明

- Fig. 1 乳房X線撮影装置. X線は, 胸壁側に対し垂直に入射し, 乳頭側は比較的大きな角度で斜入射する.
- Fig. 2 観察に使用する胸壁側(a)と乳頭側(b)で撮影された, 模擬摘出乳房のX線写真
- Fig. 3 100 μ mPX片面読取と50 μ mPX両面読取システムの胸壁側(垂直入射)と乳頭側(24°斜入射)におけるプリサンプリングMTFの比較. 100 μ m CR(a)より50 μ m CR(b)の方がX線が24°斜入射した場合, MTFは大きく低下した.
- Fig. 4 垂直入射および斜入射における両CRシステムのMTFの比較
(a)垂直入射, (b)24°斜入射
- Fig. 5 X線斜入射における胸壁側と乳頭側の微小石灰化の検出能 平均ROC曲線
(a)100 μ mPX, (b)50 μ mPX
- Fig. 6 X線斜入射における100 μ mPXと50 μ mPXの微小石灰化の検出能 平均ROC曲線
(a)胸壁側, (b)乳頭側
- Fig. 7 両面集光方式におけるX線斜入射による発光ピークのズレ