原 著

輝尽性蛍光体の瞬時発光を利用したCRシステムの
プリサンプリングMTFの予測と問題点

小野喜太平・稲津 博・原尾基継・糸永治夫・宮本秀幸

論文受付
2000年7月19日論文受理
2001年1月29日

Code No. 254

日本文理大学NBUメディカルカレッジ放射線学科

緒 言

デジタル方式医用画像の利益はX線CTによって明らかにされ、その後のデジタル画像機器の積極的な開発につながった。なかでも、従来の増感紙-フィルム系と同じ特性の画像を作成することを目標に開発されたコンピューテッドラジオグラフィ(CR)は医用画

像に大きなインパクトを与えた。とくに、カセットタイプのCRは、使い慣れている増感紙-フィルム系と画像作成および診断においてほとんど同じ取り扱いができ、常にほぼ適切な写真濃度の画像が得られるという利点のために、多くの病院で広く導入され、著しい普及を示した。

Estimation of Presampling MTF in CR Systems by Using Direct Fluorescence and Its Problems

KITAHEI ONO, HIROSHI INATSU, MOTOTSUGU HARAO, HARUO ITONAGA,
and HIDEYUKI MIYAMOTO

Department of Radiological Technology, NBU Medical College, Nippon Bunri University

Received July 19, 2000; Revision accepted Jan. 29, 2001; Code No. 254

Summary

We proposed a method for practical estimation of the presampling modulation transfer function (MTF) of a computed radiography (CR) system by using the MTFs of an imaging plate and the sampling aperture. The MTFs of three imaging plates (GP-25, ST-VN, and RP-1S) with different photostimulable phosphors were measured by using direct fluorescence (the light emitted instantaneously by x-ray exposure), and the presampling MTFs were estimated from these imaging plate MTFs and the sampling aperture MTF. Our results indicated that for imaging plate RP-1S the measured presampling MTF was significantly superior to the estimated presampling MTF at any spatial frequency. This was because the estimated presampling MTF was degraded by the diffusion of direct fluorescence in the protective layer of the imaging plate's surface. Therefore, when the presampling MTF of the imaging plate with a thick protective layer is estimated, correction for the thickness of the protective layer should be carried out. However, the estimated presampling MTF of imaging plates with a thin protective layer were almost the same as the measured presampling MTF, except in the high spatial frequency range. Therefore, we consider this estimation method to be useful and practical, because the spatial resolution property of a CR system can be obtained simply from the imaging plate MTF measured with direct fluorescence.

Key words: Imaging plate modulation transfer function (MTF), Imaging plate intrinsic property, Imaging plate intrinsic resolution

別刷資料請求先: 〒870-0022 大分市大手町 1-1-45
NBUメディカルカレッジ 放射線学科 小野喜太平 宛

Fig. 1 Schematic diagram of experimental arrangement.

このような背景から、近年、いくつかのカセットタイプCR装置が開発された。これに伴って、X線画像情報検出器として異なる輝尽性蛍光体を用いたイメージングプレート(IP)が発表され、増感紙と同様にCRにおいても性能の異なるIPが開発されつつある。したがって、使用者はこれらの多くのIPのなかから目的にあったIPを選択して使用する時代に向かうと考えられる。

増感紙-フィルム系の画質はおもに増感紙に支配される。したがって、増感紙-フィルム系では増感紙の性能を知ることによって系の鮮鋭度に関する特性を知ることができる。これに対して、CRはIPに固有の性能のほかに励起レーザ光の線束径、標本間隔および標本開口寸法など、多くの要素の影響を受ける¹⁾。このため、CRの鮮鋭度や雑音などの特性は、実際に装置を導入するまで測定することができない。しかしその一方、前述のようにIPの種類が増加すると使用者が前もってIPの性能を簡単に測定し、その結果と診断目的に基づいてIPを選択する必要がある。

そこで、比較的簡単にCR系の鮮鋭度を知る方法として、瞬時発光を利用して測定したIPのMTFからプリサンプリングMTFを予測することを試みた。IPから得られる初期データはアナログ信号である。これをA/D変換器でデジタル信号に変換するのであるから、鮮鋭度はアナログの状態で測定できる。しかも、アナログ段階での性能測定では、従来の手法が使用できるはずである^{2,3)}。

本論文の目的はIPの瞬時発光を利用して、装置購入前にプリサンプリングMTFを予測し、その問題点を洗い出すこと、および予測したプリサンプリングMTFと

実際に測定したプリサンプリングMTFを比較することである。

1. 実験方法

実験に使用したIPはGP-25[BaFBr:Eu, コダック株式会社製], ST-VN[BaF(Br.I):Eu, 富士写真フィルム株式会社製]およびRP-1S[BaFI:Eu, コニカ株式会社製]である。また、瞬時発光を記録する道具としてCRT用片面乳剤フィルム(SR-IC, コニカ株式会社製)を使用した。

MTFはスリット法で測定した。まず、線像濃度分布は、幅 $10\mu\text{m}$ のスリットをIPを納めたカセットの前面に密着させ、80kV, 200mAの条件でX線を照射して求めた。スリット-X線管焦点間距離は100cmである。また、カセットのX線管球側にフィルムを置き、その後ろにIPを配置した。実験配置図をFig. 1に示す。

露光は基準露光および基準露光の5倍の倍数露光を用い、倍数露光法および指数関数近似でトラランケーションエラーを補正した。線像濃度分布はマイクロデンシトメータの開口 $10\times 800\mu\text{m}^2$ でフィルムを走査して求めた。この後、別に測定した瞬時発光による特性曲線を用いて有効露光に変換し、線像強度分布を得た。

特性曲線はインバータ式X線装置(KXO-30F: 東芝メディカル株式会社製)を用い、銅1.0mm厚のフィルタを付加して80kV, 100mA, 0.1secの条件でX線を照射して求めた。また、比較のためにRP-1SのプリサンプリングMTFを測定した。このとき、X線照射条件は瞬時発光のときと同じである。

2. 結果および考察

Fig. 2に3種類のIPの瞬時発光による特性曲線を示す。RP-1Sの相対的な発光強度を100とすると、ST-VNは76, GP-25は57であった。

Fig. 3に瞬時発光で求めた3種類のIPのMTF [$MTF_M(u)$]を示す。1.5cycles/mmで比較したときのMTF値はRP-1SとST-VNが0.45で同じであり、最も鮮鋭度が劣るのはGP-25の0.37である。

簡単のため一次元で考える。一般に、デジタルシステムにおける鮮鋭度はプリサンプリングMTF [$MTF_{PRE}(u)$]で評価される。IPを非常に細いレーザ光で走査して得られるIP固有のアナログMTFを $MTF_A(u)$ とおけば $MTF_{PRE}(u)$ は

$$MTF_{PRE}(u) = MTF_A(u) \cdot \text{sinc}(\pi du) \cdots \cdots \cdots (1)$$

である⁴⁾。ここで、 $\text{sinc}(\pi du)$ は標本開口寸法がdのときの空間周波数特性である。

Fig. 2 Characteristic curves of three different imaging plates (RP-1S, ST-VN, and GP-25) with single coated films (SR-IC), obtained by using direct fluorescence.

いま、この実験で求めた $MTF_M(u)$ が $MTF_A(u)$ であればIPの基本性能を表す。しかし、 $MTF_M(u)$ はIPをレーザ光で走査するときのレーザ光の拡散による影響が含まれていないので、 $MTF_A(u)$ と等しくない。

いま、 $MTF_A(u)$ を次のように二段階に分けて考える。第一段階ではIPに入射したX線は蛍光体を励起させ、励起された電子の大部分は捕獲中心に捕獲されるが、残りの電子は増感紙と同様に蛍光を発して基底状態に戻る。この蛍光をここでは瞬時発光と呼び、今回はこの現象を利用して $MTF_M(u)$ を測定した。したがって、この実験で求めた $MTF_M(u)$ は増感紙のそれとまったく同じである。

第二段階では、IP蛍光体に励起光を照射し、輝尽発光を行わせる。CRにおけるIPの $MTF_{PRE}(u)$ は、この段階の発光を利用して測定される。ただし、エリアシングエラーを除くため、標本間隔の影響を除いている。したがって、 $MTF_{PRE}(u)$ は第一および第二段階の両方の過程を含んだMTFである。そこで、 $MTF_M(u)$ と $MTF_A(u)$ の相異が小さいのであれば $MTF_M(u)$ から $MTF_{PRE}(u)$ を予測することができるはずである。

今回測定した $MTF_M(u)$ と $MTF_A(u)$ の間にはいくつかの相異点がある。 $MTF_M(u)$ は第一段階だけの特性である。 $MTF_M(u)$ は、 $MTF_A(u)$ と比較して瞬時発光の拡散を含むことと、散乱X線によって発光中心から離れた

Fig. 3 MTFs of three different imaging plates (RP-1S, ST-VN, and GP-25) obtained by using direct fluorescence [$MTF_M(u)$].

場所に捕獲された電子によるMTFの劣化、および励起光の拡散の影響を含んでいないなど、 $MTF_A(u)$ とは微妙に異なっている。そこで、この実験で求めた $MTF_M(u)$ を式(2)で処理して求めた予測プリサンプリングMTF [$MTF_S(u)$]と、CR装置(REGUS-150)を用いて求めた $MTF_{PRE}(u)$ を比較した。

$$MTF_S(u) = MTF_M(u) \cdot \text{sinc}(\pi du) \quad \dots\dots\dots (2)$$

このとき、 $\text{sinc}(\pi du)$ は d を $175\mu\text{m}$ (メーカ公称値)として計算した。

結果をFig. 4aに示す。 $MTF_M(u)$ に含まれる瞬時発光の拡散が無視できるのであれば、 $MTF_{PRE}(u)$ は開口寸法効果やレーザ光の拡散効果が付加されているために $MTF_S(u)$ より低い値となるはずである。しかし、Fig. 4aに示すようにRP-1SのIPにおける $MTF_S(u)$ と $MTF_{PRE}(u)$ の関係は前述の傾向と一致しない。この原因としてIPの保護膜による瞬時発光の拡散が影響していると考えられる。RP-1Sの蛍光体は強い潮解性があるために比較的厚い保護層を用いて防湿を行っている。IPの保護層の厚さはレーザ光の拡散をまねき鮮鋭度を低下させるが、RP-1Sでは散乱防止層を設けることで鮮鋭度の低下を回避している。このため、保護層による $MTF_{PRE}(u)$ の低下はほとんどない⁵⁾。しかし、IPとフィルムを組み合わせる瞬時発光を利用した今回の実験では、保護膜はフィルムと蛍光体を密着不良状態にするので $MTF_M(u)$ は低下する。このため、 $MTF_S(u)$ の値は $MTF_{PRE}(u)$ よりすべての周波数で低い値となる。

保護膜による影響を確かめるために、保護膜を取り

Fig. 4 Various MTFs for the RP-1S imaging plate.

a: With 68 μm thick protective layer.

b: Without protective layer.

$\text{MTF}_M(u)$ or $\text{MTF}_D(u)$: Imaging plate MTF obtained by direct fluorescence, $\text{MTF}_S(u)$ or $\text{MTF}_{SD}(u)$: estimated presampling MTF, $\text{MTF}_{PRE}(u)$: actually measured presampling MTF, and $\text{sinc}(\pi du)$: sampling aperture MTF.

a | b

Fig. 5 Imaging plate MTFs with 68 μm thick protective layer and without protective layer.

Fig. 6 Various MTFs for the ST-VN imaging plate.

除いてRP-1SのMTF [$\text{MTF}_D(u)$]を瞬時発光を用いて測定した。Fig. 4bに $\text{MTF}_D(u)$, $\text{MTF}_D(u)$ と $\text{sinc}(\pi du)$ を用いて予測したプリサンプリングMTF [$\text{MTF}_{SD}(u)$]および $\text{MTF}_{PRE}(u)$ を示す。また、Fig. 5に保護膜があるときとないときのRP-1SのMTFの変化を示す。保護膜のないときのRP-1SのMTF値は、保護膜があるときのRP-1SのMTF値と比較して、2cycles/mmで36%、3cycles/mmで64%の改善がみられる。この結果を反映しFig. 4bの $\text{MTF}_{SD}(u)$ と $\text{MTF}_{PRE}(u)$ の関係は前述の傾向 [$\text{MTF}_{SD}(u) \geq \text{MTF}_{PRE}(u)$]と一致する。なお、われわれが測定したRP-1Sの保護膜の厚さは約68 μm (67~69 μm)である。

Fig. 6にST-VNの $\text{sinc}(\pi du)$, $\text{MTF}_M(u)$, $\text{MTF}_S(u)$ および $\text{MTF}_{PRE}(u)$ の関係を示す。このとき、 $\text{sinc}(\pi du)$ は

d を200 μm (メーカー公称値)として計算した。 $\text{MTF}_{PRE}(u)$ の値はST-VNとST-V (富士写真フィルム株式会社製)でほとんど等しい⁶⁾。このため、西原らが求めたST-Vの値を参考にした⁷⁾。Fig. 6の $\text{MTF}_{PRE}(u)$ と $\text{MTF}_S(u)$ との関係は、RP-1Sほどの差はなく、両者はほぼ一致する。この原因はST-VN保護膜の厚さが9 μm ⁶⁾であり、RP-1Sよりかなり薄いためである。

この保護層による不鋭は増感紙-フィルム系の密着不良による不鋭と同じであるから、増感紙-フィルム系の密着不良によるMTFが使えるはずである。この密着による不鋭の一次元MTF [$P_X(u)$]は次のように示される⁸⁾。

$$P_X(u) = 2\pi lu \cdot K_1(2\pi lu) \cdots \cdots \cdots (3)$$

Fig. 7 $P_X(u)$: MTF degradation caused by diffusion in protective layers of 10, 20, and 60 μm thick.

Fig. 8 Estimated presampling MTF obtained by correction in $P_X(u)$ with a 60 μm thick protective layer [$MTF_D(u) \cdot \text{sinc}(\pi du) / P_X(u)$] and actually measured presampling MTF for the RP-1S imaging plate.

Fig. 9 Various MTFs for the GP-25 imaging plate.

K_1 : 変形ベッセル関数

l : 保護層の厚さ

u : 空間周波数

Fig. 7に、保護膜の厚さが10, 20, 60 μm のときの $P_X(u)$ を示す。保護層10 μm では、空間周波数3cycles/mmでも劣化は約4% (4.1%)であり、ほとんど補正の必要がないことが分かる。

Fig. 8に、保護膜の厚さが60 μm のときの $P_X(u)$ を用いて補正した予測プリサンプリングMTF [$MTF_D(u) \cdot \text{sinc}(\pi du) / P_X(u)$]と実測プリサンプリングMTF [$MTF_{PRE}(u)$]を示す。Fig. 8は、中間周波数領域で補正

が十分でないが、低周波数領域では良好に補正されていることを示している。

Fig. 8のようにRP-1Sでは、保護膜の厚さを考慮に入れ検討する必要がある。しかし、保護層が9 μm のST-VNは、 $MTF_{PRE}(u)$ と $MTF_S(u)$ の関係がほぼ一致する。このため、ST-VNでは保護層を考慮に入れず瞬時発光を利用してIPのMTFを測定し、プリサンプリングMTFを予測しても大きな誤差は発生しない。

Fig. 9にGP-25の $\text{sinc}(\pi du)$ 、 $MTF_M(u)$ 、 $MTF_S(u)$ を示す。このとき $\text{sinc}(\pi du)$ は d を100 μm (メーカー公称値)として計算した。したがって、標本開口寸法による影響は他のシステムより少ない。そこで、GP-25の保護膜の厚さがST-VNと同程度であれば、 $MTF_{PRE}(u)$ は

$MTFs(u)$ とほぼ同等の値となるはずである。

瞬時発光を利用したIPの鮮鋭度は保護膜の厚さが影響するが、保護膜の厚さによるMTFの低下は式(3)を用いて補正することができる。また、保護膜が薄いときは補正を必要としない。したがって、保護層が $10\mu\text{m}$ 程度と薄いときは、IP固有の鮮鋭度およびプリサンプリングMTFを推定する手段として本手法は有効である。

3. まとめ

IPの鮮鋭度を評価する手段の一つとして瞬時発光を利用した手法は、従来のアナログの増感紙-フィルム系と同じであり、その値はCR装置による影響を受けないが、この手法で求めたMTF値は保護膜の厚さの影

響を受ける。このため、IP固有の鮮鋭度の評価において保護層が厚いときはこの厚さを考慮に入れて評価しなければならない。しかし、保護層の厚さが $10\mu\text{m}$ 程度のときはIPの固有鮮鋭度を十分に評価できる方法である。したがって、瞬時発光を利用したMTFの測定はCR装置導入前の鮮鋭度の検討資料として有効である。

謝 辞

プリサンプリングMTFのデータ(ST-V)を快く提供してくださった西原貞光氏(広島県立保健福祉大学)に深謝します。また、英文のご指導をいただきました桂川茂彦氏(日本文理大学)に深謝いたします。

参考文献

- 1) Fujita H, Ueda K, Morishita J, et al.: Basic imaging properties of a computed radiographic system with photostimulable phosphors. *Med Phys*, 16(1), 52-59, (1989).
- 2) 田中嘉津夫, 他(内田 勝 監)著: 放射線画像工学. pp. 137-146, オーム社, 東京, (1986).
- 3) 藤田広志, 上田克彦, 大塚昭義, 他: 輝尽蛍光体を用いたコンピュータドラジオグラフィの解像特性 I. イメージングプレートのMTFの測定. *医用画像情報学会雑誌*, 4(3), 89-94, (1987).
- 4) Giger ML and Doi K: Investigation of basic imaging properties in digital radiography. I. Modulation transfer function. *Med Phys*, 11(3), 287-295, (1984).
- 5) 若松秀明, 中野 寧, 本田 哲: Regius Model-150用輝尽性蛍光体プレートの開発. *Konica Technical Report*, 13, 19-22, (1999).
- 6) Kengyelics SM, Davies AG, and Cowen AR: A comparison of the physical imaging properties of Fuji ST-V, ST-VA and ST-VN computed radiography image plates. *Med Phys*, 25(11), 2163-2169, (1998).
- 7) 西原貞光, 大村敬子, 吉田賢一, 他: イメージングプレート(CR)の基本的な物理特性. *日放技学誌*, 52(11), 1556-1560, (1996).
- 8) 平城 実, 土井邦雄: 増感紙・蛍光板の試験法. *極光X-RAY*, 21, 13-45, (1967).

図表の説明

- Fig. 1 実験配置図.
- Fig. 2 3種類のイメージングプレートと片面フィルム系の瞬時発光による特性曲線.
- Fig. 3 瞬時発光で求めた3種類のイメージングプレートMTF [$MTF_M(u)$].
- Fig. 4 RP-1Sイメージングプレートの種々なMTF.
(a) $68\mu\text{m}$ 厚の保護膜があるとき.
(b) 保護膜がないとき.
 $MTF_M(u)$ または $MTF_D(u)$: イメージングプレートMTF, $MTF_S(u)$ または $MTF_{SD}(u)$: 予測したプリサンプリングMTF, $MTF_{PRE}(u)$: 実測したプリサンプリングMTF, $\text{sinc}(\pi du)$: サンプリングアパーチャのMTF.
- Fig. 5 $68\mu\text{m}$ 厚の保護膜があるときとないときの、瞬時発光で求めたイメージングプレートMTF.
- Fig. 6 ST-VNイメージングプレートの種々なMTF.
- Fig. 7 10, 20, および $60\mu\text{m}$ 厚さの保護膜中における光の拡散によるMTFの劣化.
- Fig. 8 $60\mu\text{m}$ 厚さの保護層における光の拡散による劣化を補正して求めた予測プリサンプリングMTFと実際に測定したRP-1SイメージングプレートのMTF.
- Fig. 9 GP-25イメージングプレートの種々なMTF.