原 著

論文受理
1995年5月1日最終論文受理
1996年2月17日Code No.313,
333,
334

増感紙・フィルム系の非対称性による画質特性

岡田弘治¹⁾・若松孝司²⁾・福井 豊¹⁾・西松和彦¹⁾・橋場久幸¹⁾・村野喜彦¹⁾

1)近畿大学医学部附属病院中央放射線部

2)国立療養所宇多野病院放射線科

1. はじめに

従来の増感紙・フィルム系においては、前面と後面が同一の増感紙のもの、あるいは、後面の感度が前面の増感紙より高い組合せで、対称なフィルム(両面同一の乳剤)と組合わされたものが一般的であった。しかも、フィルムのクロスオーバー係数は0.2~0.5程度の値を示していた¹⁾。また、従来の画像特性の一つを示すH&D曲線は、増感紙の組合せ、あるいは管電圧に関係なくその形状が一定であるとされていた^{2~3)}。また、Modulation transfer function(MTF)においても、濃度依存性はないとされてきた。

近年のKodak社による本格的な非対称フィルムの出現は、このような過去の画像特性に関する概念の再検討の必要がある。非対称フィルムの主な内容は、クロ

スオーバーが殆どゼロであり、さらにフィルムの両面の乳剤特性が異なり、それぞれのH&D曲線の形状が異なっている。したがって、前面・後面の増感紙の感度差がある場合には、増感紙・フィルム系のH&D曲線も様々な形状を示す。さらに、矩形波チャートによるMTF測定では、測定濃度によって、MTF値が異なつて混乱をきたしていた。しかし、著者ら^{4,5)}やMetter⁶⁾は、非対称系の出力側の総合MTF(信号伝達特性)に濃度依存性のあることを示した。

この場合は、フィルム自体が非対称であった。本論文では、従来の対称なフィルム(両面に同一の乳剤が塗布されたフィルム)を用いたときに、増感紙・フィルム系の非対称性の存在について、管電圧の変化、組合わせる増感紙の種類等に対応したH&D曲線の変化

Image Characteristics by Asymmetry of the Screen-Film System

HIROHARU OKADA¹⁾・TAKASHI WAKAMATSU²⁾・YUTAKA FUKUI¹⁾
KAZUHIKO NISHIMATSU¹⁾・HISAYUKI HASHIBA¹⁾・YOSHIHIKO MURANO¹⁾

1)Department of Central Radiology, Kinki University Hospital

2)Department of Radiology, National Sanatorium Utano Hospital

Summary

We studied the asymmetry of screen-film systems for some combinations between screen and tube voltage using symmetric films with crossover factors near-zero and 0.26.

Our results showed that gradient values might be changed, when different kinds of screens were used front and back.

When we used the same-speed screens in the fronts and backs and increased the tube voltage, the gradient of the system became higher; but when we used different speed screens in the front and back, the gradient of the system became lower. And the total modulation transfer function(MTF) of the output side was decreased as increasing the tube voltage with the effect due to K-X-ray, but the gradient.

On the density region, the total MTF of the output side was changed, when different kinds of screens were used front and back, but was not changed when the same kind of screens were used.

Key words: Asymmetry of screen-film system, Symmetric film, Crossover factor, Gradient, MTF(Modulation transfer function)

や出力側のMTFの濃度依存性について検討を行なった。

2. 方法と結果

2-1 使用機器

X線装置：東芝KXO-850(N)型，X線管：東芝DRX-2930HD，濃度計：サクラPDA-65とPDM-5B，増感紙：Lanex Fine,Medium,Fast(Kodak)，フィルム：MinR-T，TMS-RA，線量計：Capintec，自動現像機：M6-AN(Kodak)，コンピュータ：NEC PC-9800 VX，金属スリット：Kenetrium Grad W-10 (シカゴ大学製)

2-2 フィルムのクロスオーバー係数の測定

対称なフィルムのクロスオーバー係数を以下のような方法で測定した。黒紙を挟んだ2枚のMinR-TフィルムとFastの後面側の増感紙と組合せ、片面によるX線露光を行った。つぎに、フィルムのベース濃度とカブリ濃度、およびX線のカブリを除いた濃度0.75における相対露光量の比からフィルムだけのクロスオーバー係数0.016を得た(Fig.1)。

なお、クロスオーバーが少ない対称なフィルムを使用した理由は、非対称な特性が効果的に現れることを考慮に入れたものである。

2-3 H&D 曲線とグラディエント曲線

2-3-1 距離法における逆自乗則のべき数の測定

管電圧の変化に伴う増感紙・フィルム系のH&D曲線の測定のために、距離法(強度スケール法)における距離の逆自乗のべき数の測定を、三相12パルスの発生装置、Capintec線量計を用いて行った。リファレンスとして蛍光量計をコリメータの斜め前に、線量測定に影響を与えない位置に設置し、与えられたX線量のバラツキの補正を行った。なお、線量計と蛍光量計の相

関について、予めその相関係数がほぼ1.0であることは確認済である。

得られた距離-線量の関係を両対数でグラフ化し、回帰直線の傾きから管電圧における距離の自乗のべき数を2.11(50kV)，2.10(60kV)，2.08(80kV)，2.03(80kV20mmAl)とした。

2-3-2 増感紙の組合せが異なる場合

フィルムMinR-Tを用いた、前面にFine，後面にMediumの組合せと、前面・後面とも同一のMedium増感紙による組合せ2種類のシステムについて、各管電圧で各べき数を用いて、距離法によるセンチメートルを行った。なお、センチメートルは、各システムとも3回の測定を行い、その平均値を用いた。

Fig.2(a)，2(b)に同一の管電圧において、フィルムMinR-Tに対し、増感紙の組合せが異なる場合として、Fine/Mediumと、Medium/MediumのH&D曲線とグラディエント曲線を示す。この結果から、二つのシステムにおいて、H&D曲線及びグラディエント曲線の形状が明かに異なっていた。

2-3-3 管電圧が異なる場合

Fig.3(a)，3(b)にFine/MinR-T/Medium系とMedium/MinR-T/Medium系の各管電圧におけるH&D曲線を示す。このとき各管電圧間による線量測定は行なっていないので、H&D曲線の感度比較は考慮にいていない。Fine/MinR-T/Medium系は、Medium/MinR-T/Medium系に比べ、相対的に低いグラディエントを示していた。さらに、これらについてグラディエント曲線をFig.4(a)，4(b)に示す。Fine/MinR-T/Medium系は、管電圧が上昇するにつれて、グラディエントの僅かな低下がみられたが、Medium/MinR-T/Medium系では、管電圧が上昇するにつれてグラディエントが幾分高くなっていた。

なお、各システムの測定の変動を変動係数(Coefficient of variation, CV)で表わすと、センチメートルの濃度変動は、濃度1.5付近のCV=0.026が最も高かった。グラディエント曲線の平滑化の場合は、濃度0.31付近でCV=0.12，濃度0.62付近でCV=0.06，そして濃度1.75でCV=0.035が、他の濃度に比較して最も大きい値であった。

2-4 MTF測定

著者らのグラディエント結合法による非対称性システムのMTFの測定は、

$$MTF_{Total} = \frac{G_F}{G} MTF_F + \frac{G_B}{G} MTF_B \quad \dots\dots\dots (1)$$

によって表わされる^{5,6}。G=G_F+G_B，また、Fは前面側，Bは後面側を示す。Fig.5(a)にFine/MinR-T/Medium 80kVの前面，後面，および総合のグラディエント曲線の例を示す。Fig.5(b)に、フィルムMinR-Tの片面とそれぞれ増感紙Fine，Mediumを組合わせたMTFを示す。これらのデータを用いて、(1)式のグラディエント結合法を用いてMTFの濃度依存性について調べた。

Fine/MinR-T/Medium系の濃度が変わったときの

Fig. 1 H & D curves of MinR-T film for measuring the cross-over coefficient.

Fig.2 a) H & D curves of two screen/film systems at 80 kV with 20 mm aluminum filter. Screen/film systems are Lanex Fine/MinR-T/Medium and Medium/MinR-T/Medium.
b) Gradient curves of two screen/film systems. Screen/film systems are Lanex Fine/MinR-T/Medium and Medium/MinR-T/Medium.

Fig.3 a) H & D curves of Lanex Fine/MinR-T/Medium at various tube voltages.
b) H & D curves of Lanex Medium/MinR-T/Medium at various tube voltages.

Fig. 4 a) Gradient curves of Lanex Fine/MinR-T/Medium at various tube voltages.
b) Gradient curves of Lanex Medium/MinR-T/Medium at various tube voltages.

Fig.5 a) Gradients of front, back, and total emulsion at 80 kV.

b) MTFs of each one-side emulsion system at 80 kV.

MTFをFig.6(a)に示す。前面の感度が後面より低いシステムの場合において、MTFは濃度が高くなるに従って高い。さらにMedium/MinR-T/Medium系のMTFをFig.6(b)に示す。前面・後面が同一の増感紙を用いた場合、MTFは濃度に依存しない結果となった。

2-5 管電圧に対するMTFの変化

管電圧の上昇に対する、MTFの変化を調べた。Fig.7(a)にFine/MinR-T/Medium系の濃度1.0における管電圧50, 60, 80kV, 及び80kV20mmAlにおけるMTF測定を(1)式を応用して求めた。同様に、Fig.7(b)に濃度1.8におけるMTFを求めた。

5回測定の結果、いずれの濃度においても、管電圧50kV~80kVにおいて、わずかに管電圧の上昇に伴うMTFの低下がみられたが、管電圧80kV 20mmAlにおいては顕著な低下がみられた。濃度1.0, 1.8それぞれにおいて、前面と後面のグラディエントは異なったが、総合のグラディエントは各電圧ともほぼ同一のグラディエントであった。つまり、管電圧間のMTFの差は、管電圧の影響が大きい。

MTFの測定の変動は、結果的に空間周波数2 cycles/mmにおいて、CV=0.026が最も大きい値であった。

3. 考 察

組合わせる増感紙・フィルム系において、同一のフィルムであれば、増感紙の種類によっては、山内らの論文⁷を除いてH&D曲線の形状は変わらないとされていた。しかし、2-3-2の結果から、異なる増感紙の組合せに対して、同一の対称なフィルムを用いたとき、H&D曲線の形状すなわちグラディエント曲線が異なっていた。これはクロスオーバーがゼロに近いことが大きく作用し、フィルムの前面と後面のH&D曲線がその感度差によってシフトされることにより、前面と後面の並列結合による濃度加法性から生じる総合的なH&D曲線の形成によるものである。さらにHausらは、光センシトメータを用いて、従来のクロスオーバー係数が0.3程度の対称なフィルムと比較して、わずかであるがH&D曲線の形状に変化があることを指摘している¹¹。

Fig.6 a) MTFs for Lanex Fine/MinR-T/Medium in various densities.
b) MTFs for Lanex Medium/MinR-T/Medium in various densities.

Fig.7 a) MTFs of different Lanex Fine/MinR-T/Medium at various tube voltage in density 1.0.
b) MTFs of Lanex Fine/MinR-T/Medium at various tube voltage and density 1.8.

また, Vybonyらは, 増感紙・フィルム系のH&D曲線は管電圧の変化に対して, H&D曲線の形状は変わらないとしていた². しかし, 2-3-3で得られた管電圧の上昇に対して, 同一の増感紙を組合わせたシステムの時, グラディエントは高くなった. それに反して後面が前面より感度が高いシステムの時, グラディエントは低くなった. つまり, 管電圧の変化に対して, 増感紙・フィルム系のH&D曲線の形状が変化することを意味する. この結果の原因について以下のように考える.

フィルムの感光に寄与する前面・後面の増感紙の蛍光体のフィルムに近い領域において, 管電圧の上昇に対して, 前面の増感紙の相対的なX線吸収率は低下する. したがって相対感度が低下して前面のH&D曲線は, 相対露光軸に対して高露光側にシフトする. 一方, 後面の増感紙は, 管電圧の上昇に対して, 相対的なX線吸収率が高くなる. したがって相対感度が高くなり後面のH&D曲線は, 低露光側にシフトする.

前面・後面が同一の増感紙の場合, 前面のH&D曲線は, 後面のH&D曲線に比べ, 低露光側にあり, 管

電圧の上昇とともに前面と後面のH&D曲線は接近し, 双方の相対露光量の差は小さくなる. したがって, 前面と後面のグラディエント曲線は, 管電圧の上昇とともに接近し, その和である総合のグラディエントは高くなる(Fig.8(a)(b)). 一方, 後面の増感紙が前面の増感紙より感度が高い場合, 管電圧50kVの時, 後面のH&D曲線は, Fig.9に示すように相対露光軸に対して, すでに低露光側に位置しており, 管電圧が上昇すると前面と後面のH&D曲線の相対露光量の差は大きくなる. したがって, 前面と後面のグラディエント曲線は, 管電圧の上昇につれて離れて行き, その総合のグラディエントは低くなる.

Fig.10に濃度0.75における増感紙・フィルム系Fine/MinR-T/Medium系とMedium/MinR-T/Medium系の前面と後面の相対露光量の差(LogRE_{Dir})を示す. このように, 前面・後面の相対露光量の差が小さくなると総合グラディエントは, 高くなり, 反対にその差が大きくなると, 総合グラディエントは低くなる. したがって管電圧の変化に対して, 増感紙・フィルム系のグラディエントは変化する.

Fig.8 a) Gradient curves of Lanex Medium/MinR-T/Medium of front, back, and total emulsion at 50 kV.
b) Gradient curves of Lanex Medium/MinR-T/Medium of front, back, and total emulsion at 80 kV with 20 mm aluminum filter.

Fig. 9 H & D curves of Lanex Fine/MinR-T/Medium of front, back, and total emulsion at 50 kV.

Fig. 10 The difference in relative exposure (logRE) between front screen/film and back screen/film system at density 0.75.

Fig. 11 MTFs of Lanex Fast/TMS in various densities.

Fig. 12 Gradient curves of Lanex Fast/TMS at 50 kV and 80 kV with 20 mm aluminium filter.

これらの現象は、フィルムのクロスオーバー係数と密接に関係し、クロスオーバーが少ないほど顕著に現れると推測できる。したがって、従来のフィルムについても、フィルムのクロスオーバー係数とグラディエントとの関係をさらに検証する必要がある。その一例は後述する。

対称なフィルムを用いた場合の濃度域に対する著者らが規定したMTFの変化については、前面・後面が同一な増感紙の場合は、濃度域に対して一定であるが、前面と後面の増感紙が異なる場合、濃度域に対してMTF値は変化する結果となった。Fine/MinR-T/Medium系のような前面・後面の増感紙が異なる場合は、増感紙のMTFが違うことは勿論、フィルムの各濃度において、前面と後面では感度差による濃度が異なる。

したがって、それぞれの濃度におけるグラディエントも異なるために、明らかに(1)式による濃度域に対するMTF値は変化する。一方、Medium/MinR-T/Medium系のような同一な増感紙の組合せの場合では、(1)式において、それぞれ前面・後面において各系のMTFが同一であり、グラディエントの項が分母と分子で消去されるために、結局総合のMTFは片面のMTFと同一となり、濃度域に対するMTFは、一定となる。つまり、

$$MTF_{Total} = MTF_F \left(\frac{G_F + G_B}{G} \right) = MTF_F$$

ただし、 $MTF_F = MTF_B$ となる。したがって、対称なフィルムと前面・後面の増感紙が同一の組合せの場合濃

度域に対してMTF値は一定となる。このことは、非対称なフィルムを用いた場合も同様である。

ここで、クロスオーバー係数0.26の従来の対称フィルムTMSと、前面と後面の感度が異なる既成の増感紙Fastとを組み合わせ、MTFの濃度依存性、さらに管電圧50kV、80kV 20mmAlにおけるH&D曲線の形状の変化を検証した。

濃度域に対するMTFは、Fig.11に示すように、一定ではなく、高濃度になるに従って僅かに下がる結果となった。これは、前面と後面のグラデーションの差と、前面および後面の各片面のMTFの差との総合的な結果によるものである。したがって前面・後面の増感紙のMTFが異なれば、従来のクロスオーバー係数をもつ対称フィルムと、前面・後面の非対称な増感紙の組み合わせの場合においてもMTFの濃度依存性が生じる。

H&D曲線の形状について、増感紙Fastの相対露光量の差(LogRE_{Diff})は、管電圧50kVのとき0.02、管電圧80kV 20mmAlのときでは0.05であった。Fig.12に示すように僅かに管電圧50kVのグラデーションの方が高い。したがって、従来のクロスオーバー係数の対称フィルムと、前面・後面の非対称な増感紙を組合せたときにも、H&D曲線の形状も変化すると考える。ただし、前面・後面のいずれの増感紙の発光量が多くても、前面と後面の相対露光量の差が同一であれば、グラデーション曲線は同一である。

管電圧の変化によるMTF値の変化は、管電圧50kV～80kVにおいて、わずかな低下がみられたが、管電圧80kV 20mmAlの場合には顕著な違いがみられた。このことは、K特性X線によるMTFへの影響と推測する。管電圧80kV 20mmAlの場合において、管電圧60kVや80kVに比べ、増感紙のガドリニウム蛍光体のK吸収端より相対的にX線の高エネルギー成分が多く、K特性X線の発生確率が高く、増感紙内においてK特性X線の再吸収が多く発生することによって、鮮鋭度の低下したものと考えられる。これらは、Arnoldらの結果⁸⁾と一致している。

4. 結 論

従来型の対称なフィルムを用いて、前面・後面の増感紙の組合せ、管電圧の変化などについて検討した結果、以下のような従来の定説と異なる増感紙・フィルム系の非対称性が確認できた。

- 1) クロスオーバーが殆どゼロで、対称なフィルムMinR-Tを用いたとき、組合せる増感紙によって、H&D曲線の形状は変化した。したがって、従来型のクロスオーバー係数をもつ対称なフィルムを用いたときにも、H&D曲線の形状が変化する可能性が残されていることが判明した。
- 2) 対称なフィルムを用いて、前面・後面同一の増感紙を用いた場合、管電圧の上昇とともに、グラデーションは高くなった。一方、前面に低感度、後面に高感度の増感紙の組合せの場合には、この感度差が大幅に異なるときには、管電圧の上昇とともにグラデーションは低くなった。したがって、管電圧の変化によって増感紙・フィルム系はH&D曲線の形状が変わる可能性がある。
- 3) 対称なフィルムを用いて、前面・後面の増感紙のMTFが異なる場合、出力の総合MTFは濃度依存性を生じる。
- 4) 管電圧の上昇とともにMTF値の変化がみられた。この変化のうち、グラデーションの管電圧の変化による影響もみられたが、増感紙内でのK特性X線の寄与によって前面および後面の増感紙のMTFそのものが低下する影響の方が大きいと推測される。

本研究の一部は、日本放射線技術学会・関西支部の研究助成金によるものである。

謝 辞

本研究にあたって、ご協力を戴いた当放射線部技師諸兄に心から感謝致します。また、フィルム等の提供を戴いた日本コダック株式会社にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Arthur G. Haus, Robert E. Dickerson: Problems associated with simulated light sensitometry for low-crossover medical X-ray film. *Med. Phys.*, **17**(4), 691-695, (1990).
- 2) Carl J. Vyborny: H and D curve of screen-film systems: factors affecting their dependence on x-ray energy, *Med. Phys.*, **6**(1), 39-44, (1979).
- 3) 放射線写真のスリーフィルム系のMTFとウィナースペクトル. *日放技学誌*, **39**(3), 240-270, (1983).
- 4) 岡田弘治, 若松孝司: 非対称システムのMTF. *日放技学誌*, **48**(4), 640-642, (1992).
- 5) 若松孝司, 岡田弘治: 非対称性増感紙・フィルム系の画像評価の理論的考察. *日放技学誌*, **50**(3), 371-378, (1994).
- 6) Richard Van Metter: Describing the signaltransfer characteristics of asymmetric radiographic screen-film systems, *Med. Phys.*, **19**(1), 53-58, (1992).
- 7) 山内秀一, 大塚昭義, 水谷宏他: 増感紙の発光色と特性曲線. *日放技学誌*, **45**(10), 1603-1608, (1989).
- 8) Ben A. Arnold, Bengt E. Bjärgard: The effect of phosphor K x-rays on the MTF of rare-earth screen, *Med. Phys.*, **6**, No.6, 500-503, (1979).