原 著

NEQ(u)によるクロスオーバー効果の画像特性の解析

岡 田 弘 治・宇佐美 公 男・倉 又 雄 一

若 松 孝 司*・山 下 一 也**

近畿大学医学部附属病院中央放射線部

*国立循環器病センター放射線診療部

**大阪大学医療技術短期大学部

(論文受理 1986年6月20日)

(最終論文受理 1986年11月21日)

(Code No. 313, 333, 334)

Key words: Crossover effect, Image quality, Number of noise-equivalent quanta (NEQ(u)), Sharpness and granularity, ROC analysis

ANALYSIS OF IMAGE CHARACTERISTICS FOR CROSSOVER EFFECT
BY UTILIZING NEQ(u)

HIROHARU OKADA, KIMIO USAMI, UICHI KURAMATA
TAKASHI WAKAMATSU* and KAZUYA YAMASHITA**

Department of Radiology, Kinki University

*Department of Radiology, National Cardiovascular Center

**College of Biomedical Technology, Osaka University

(Article received; Jun., 20, 1986)

Summary

The recent developed anti-crossover film provides more improved sharpness, but less granularity. In that sense a monistic evaluation using conventional individual evaluating methods is difficult.

Used with two kinds of screens, high-speed and low-speed, we compared the image characteristics of the crossover effect regarding anti-crossover film and conventional film of similar speeds, designed for a total evaluation of the image quality by introducing a number of noise-equivalent quanta (NEQ(u)).

On the same system of the screen, conventional film provides superior NEQ(u) compared with anti-crossover film at a low frequency, but at a high frequency anti-crossover film possesses superior NEQ(u), when compared with conventional film. These results were in good agreement with the results that had been obtained

from images of needles and beads, or ROC analysis.

1. 緒 言

近年、X線用フィルムにクロスオーバー光を減じる形式のいわゆるアンチ・クロスオーバーフィルムの開発と改善が行われている。たとえば、ハロゲン化銀粒子の結晶形や大きさなどの改良、分光増感色素の添加などである。この結果、クロスオーバー光を減弱させ、乳剤層中のイラジェーションを防止する効果もあって、鮮鋭度の向上がはかられた^{1)~5)}。また、初期のアンチ・クロスオーバーフィルムにみられた高濃度域でのグラジェントの低下や感度の低下などが⁷⁾、改善された⁴⁾⁵⁾。しかし、他方では、粒状性の悪化がみられる⁴⁾⁵⁾。これまで、クロスオーバー効果は、変調伝達関数 (MTF) やウィナースペクトル、クロスオーバー係数などによって個々に評価されたり、一元評価においては、受信動作特性 (ROC) による解析やテスト被写体などによって視覚的に行われた。われわれは、アンチ・クロスオーバー形のフィルムと、これとほぼ同感度の従来形のフィルムを同一の増感紙にそれぞれに組合せ、視覚的評価と、空間周波数領域における総合画像評価としての雑音等価量子数 (NEQ(u), number of noise-equivalent quanta(u))⁹⁾¹⁰⁾ を対比し、クロスオーバー効果による画像特性を比較した。

2. 方法と結果

2.1 装置・器具

X線装置：島津 SHD-150G, X線管：島津 P-38D, 濃度計：サクラ PDA-65とサクラ PDM-5B, 増感紙：Lanex Fine, Lanex Regular (Kodak), フィルム：TMG, OG-1 (Kodak), 自動現像機：M8 (Kodak), コンピュータ：NEC PC-9801, PC-9801M3, A/D変換器：宝和98AD, 金属スリット：Kennetrium Grad W-10 (90% - 10% Ni, Cu and Fe), スリット幅：10 μ m, 開口比200:1 (シカゴ大学製)。

2.2 特性曲線とグラジェント曲線

増感紙/フィルム系の特性曲線は、管電圧80 kV, 付加フィルタ20 mmAlを用い、強度スケール法 (距離法：60~570 cm, 21ステップ) により求めた。実験で得られた結果を、3次スプライン法¹¹⁾によって、平滑・補間を行った。Fig. 1は、TMG, OG-1を用いたときの特性曲線である。ここでは、Lanex Regularとの組合せたものだけ示したが、Lanex Fineに組合せた特性曲線の形状と殆ど一致している¹⁰⁾。濃度1.0における相対感度比は、

Lanex Fineと組合せたときは1.07倍、Lanex Regularでは1.12倍となった。いずれの場合もTMGがやや高感度である (Table 1)。

つぎに、得られた特性曲線からグラジェント曲線を求めた (Fig. 2)。低濃度域から高濃度域にわたり、TMGの方がOG-1よりわずかに高い値を示している。Table 1にそれぞれの平均グラジェント $\bar{G}$ 、および濃度1.0でのグラ

Fig. 1 H & D curves of the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1) is combined with Lanex Regular screens, exposed at 80 kV with an additional 20 mm aluminium filter.

Fig. 2 Gradient curves of the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1) is combined with the Lanex Regular screens.

NEQ(u)によるクロスオーバー効果の画像特性の解析 (岡田・他)

Table 1 Each value of the four screen/film systems.

R.S. : Relative speed 1.0 of system with OG-1 film at a density of 1.0
 $\bar{G}$: Mean gradient
 $G_{1.0}$: Gradient value of system at a density of 1.0
 MTF : MTF value at 2 cycles/mm
 W.S. : Wiener spectral value (mm^2) at 0.1 cycles/mm

	R.S. (density 1.0)	$\bar{G}$	$G_{1.0}$	MTF (at 2 cycles/mm)	WS $\times 10^{-5}$ (at 0.1 cycle/mm)
Lanex Fine/OG-1	1.00	2.42	2.53	0.513	3.21
Lanex Fine/TMG	1.07	2.67	2.70	0.672	3.86
Lanex Regular/OG-1	1.00	2.42	2.53	0.245	6.76
Lanex Regular/TMG	1.12	2.67	2.70	0.354	8.61

ジェント値 $G_{1.0}$ を示す。

2.3 MTF (modulation transfer function)

スリット法により MTF を求めた。焦点-スリットのアライメントを行いスリット像を撮影する。そして、これを特性曲線を用いて有効露光量に変換後、フーリエ変換して MTF を得た。走査アパーチャの大きさは $10 \times 1000 \mu\text{m}^2$ である。

Fig. 3 は、その結果である。従来形の OG-1 に比べ、TMG を用いたとき明らかに MTF が良い。これは、アンチ・クロスオーバー効果による MTF の改善がみられたものである。その改善率は、空間周波数 2 cycles/mm において、Lanex Fine の場合 30%、Lanex Regular では 43% であった。これは、TMG が T 粒子を用いており、そのためにハロゲン化銀量に対して分光増感色素が多く用いられているので、増感波長域の光吸収が大きくなったものと考え²⁾。

Fig. 3 MTFs of the four screen/film systems. Lanex Fine screens are combined with the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1), and the Lanex Regular screens with TMG or OG-1 film.

2.4 ウィナースペクトル

管電圧 80 kV、付加フィルタ 20 mmAl を用いて、一様な濃度 1.0 のフィルム試料を作製した。これを走査アパーチャ $10 \times 1000 \mu\text{m}^2$ 、サンプリング間隔 $10 \mu\text{m}$ で走査し (全標本点数は 164000 点)、高速フーリエ変換 ($N=1024$) のあと、集合平均してウィナースペクトルを求めた。トレンド除去などの処理は、BRH の方法¹⁰⁾ に従った。

Fig. 4 にそれらの結果を示す。Lanex Fine と Lanex Regular のいずれにおいても、OG-1 の場合が、低周波数域から高周波数域にわたり TMG を用いたときより優れていた。また、肉眼視においても、その差は認められた。

低周波数域のノイズレベルは、増感紙中で吸収される X 線の量子数が減少するほど増加する。このことは、増感紙/フィルム系の吸収特性と感度に関係する。本実験の場合、同一の増感紙を使用していることから、低周波域のノイズレベルの差は、フィルムの相対感度比に影響されると考える。量子モトルのウィナースペクトル $W_Q(u)$ は、フィルムのグラジエント G と MTF、および吸収された X 線量子の平均数 $\bar{n}$ に関係する。次式は、その関係を表わすものである¹⁰⁾。

$$W_Q(u) = (0.43)^2 \frac{G^2 \cdot \text{MTF}^2}{\bar{n}} \quad (1)$$

ここで、(1) 式は一次元のウィナースペクトルである。また、低周波数域の MTF は、ほとんど 1.0 に近いことから⁶⁾、相対感度比は次式で表わすことができる。

$$\frac{\bar{n}_{OG}}{\bar{n}_{TMG}} = \frac{G_{OG}^2}{G_{TMG}^2} \quad (2)$$

ここで、 $\bar{n}_{OG}$ 、 $\bar{n}_{TMG}$ は各増感紙/フィルム系で吸収された X 線量子の平均数、 G_{OG} 、 G_{TMG} は各フィルム系のグラジ

Fig. 4 Wiener spectra of the four screen/film systems, Lanex Fine screens are combined with the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1), and the Lanex Regular screens with TMG or OG-1 film, uniformly exposed to a density of 1.0 at 80 kV with an additional 20 mm aluminium filter.

メント値, $W_{Q,OG(u)}$, $W_{Q,TMG(u)}$ は各系の量子モトルを表わす。

Table 1 に写真濃度1.0, 空間周波数0.1 cycle/mm におけるウィナースペクトル値を示した。(2)式から求めた Lanex Fine と Lanex Regular の相対感度比は, それぞれ1.06, 1.12となった。これは, 特性曲線から得られた相対感度比とほぼ一致した。

2.5 NEQ(u) と検出能 d'

2.2~2.4から得られた濃度1.0におけるグラジエント値 G , ウィナースペクトル $W(u)$, および MTF(u)を次式に代入して, NEQ(u) を求めた。

$$NEQ(u) = \frac{(\log_{10} e)^2 \cdot G^2 \cdot MTF^2(u)}{W(u)} \quad (3)$$

若松らは, 増感紙/フィルム系の理想的検出器による信号の検出能 d' の一次元表示を提案している¹²⁾。その提案を発展させると,

$$d' = \sqrt{\int_{0.1}^{10} NEQ(u) du} \quad (4)$$

を求めることができる。ただし, ここで空間周波数 0.1~10 cycles/mm とする。

Fig. 5 は, (3)式から求める各系の NEQ(u) である。Lanex Fine, Lanex Regular のいずれの系においても曲線は, 交叉し, 低周波数域では OG-1が, 高周波数域では TMG が優れ, 明らかに特性の二重性を示している。

Lanex Fine/OG-1系と Lanex Fine/TMG 系との交点は, 1.7 cycles/mm, Lanex Regular/OG-1系と Lanex Regular/TMG 系との交点は, 1.5 cycles/mm であった。このように, NEQ(u) は, 空間周波数領域における増感紙/フィルム系の画像特性を明確に表わす。

また, 検出能 d' では, Lanex Fine/OG-1系: 433, Lanex Fine/TMG 系: 466, Lanex Regular/OG-1系: 222, Lanex Regular/TMG 系: 231, と TMG を用いた系が優れていた。

Fig. 5 NEQ(u)s of the four screen/film systems, Lanex Fine screens are combined with the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1), Lanex Regular screens with TMG or OG-1 film.

2.6 針像とビーズ像の比較

2.4と同一条件で, 針とアクリルビーズ (直径2.0, 1.5, 1.0 mm) を撮影し, 視覚評価の試料とした。Fig. 6 は, 針像とビーズ像である。Lanex Fine, Lanex Regular のいずれの増感紙に組合せても, ビーズ像においては OG-1が, 針像では TMG が優れていた。このことは, NEQ(u) での二重性と一致した結果を示したものといえる。

2.7 ROC 解析

増感紙 Lanex Regular にフィルム TMG と OG-1 とをそれぞれ組合せ, 直径 2 mm のアクリルビーズを2.4と同一条件で撮影した試料を200枚作製した。これを8人の観察者によって5段階評価による評価実験を行い, ROC 曲線を求めた。

Fig. 7 は, それぞれの ROC 曲線を示す。観察者8人中

Fig. 6 Radiographies of needles and beads (2.0, 1.5, 1.0 mm ϕ) of the four screen/film systems, Lanex Fine screens are combined with the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1), and the Lanex Regular screens with TMG or OG-1 film, uniformly exposed to a density of 1.0 at 80 kV with an additional 20 mm aluminium filter.

の6人は、ほぼ一致した結果になった。すなわち、僅少差で Lanex Regular/OG-1 が優れ、これは低周波域における NEQ(u) の結果とよく一致している。ROC 曲線から算出した最大情報量 $I_{\max}$ を **Table 2** に示す。Lanex Regular/OG-1 系と Lanex Regular/TMG 系の相対比は、1.11であった。

2.8 $SNR^2(u)$ と SNR

直径 2 mm のアクリルビーズを用いた SNR (signal-noise ratio) : 信号対雑音比は、二次元表示で次式のように表わされる¹²⁾。

$SNR =$

$$\sqrt{2\pi \int_0^\infty \frac{[2(\log_{10} e) G k \mu (J_{3/2}(2\pi u)/2u^{3/2}) MTF(u)]^2}{W(u)} u du} \quad (5)$$

ここで、SNR : 等方性の被写体を用いた場合の検出能で、一次元表示と区別して SNR とした。したがって、一

Fig. 7 ROC curves of the Lanex Regular screens are combined with the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1), exposed to a density of 1.0 $\pm$ 0.03 at 80 kV with an additional 20 mm aluminium filter.

Table 2 Each detectability of the elements of NEQ(u), ROC curve, and spectral detectability.

- d' : Root of area of NEQ(u) from 0.1 to 10 cycles/mm
- $I_{\max}$: Maximum information content of ROC curve
- $k\mu$: Product of elimination contrast factor (k) and linear attenuation coefficient (μ)
- SNR : Root of area spectral detectability (signal-noise ratio, $SNR^2(u)$), from 0.1 to 2 cycles/mm

	d'	$I_{\max}$	$k\mu \times 10^{-3}$ (mm $^{-1}$)	SNR
Lanex Fine/OG-1	433		7.97	4.99
Lanex Fine/TMG	466		9.07	4.18
OG-1/TMG : SNR rate				1.19
Lanex Regular/OG-1	222	0.52	8.63	3.76
Lanex Regular/TMG	231	0.47	9.82	3.10
OG-1/TMG : $I_{\max}$ & SNR ratio		1.11		1.21

種の検出能とここでは考える。 $2J_{3/2}(2\pi u)/2u^{3/2}$: 直径 2 mm アクリルビーズのバessel変換項で、 $k\mu$ は、ウィナー スペクトルを求める場合と同一条件下で、1 mm ステ

ップのアクリル樹脂の階段を素地濃度が1.0になるように撮影し、その2 mm 段差に対する濃度の差から算出する¹²⁾。

スペクトル S/N 比を2乗して得られる、 $SNR^2(u)^{12)}$ を、ここでは検出能スペクトルと定義し、空間周波数領域では、次式で示される。

$$SNR^2(u) = \frac{2\pi [2(\log_{10} e) G k \mu (J_{3/2}(2\pi u) / 2u^{3/2}) MTF(u)]^2}{W(u)} u \quad (6)$$

したがって、SNR は、検出能スペクトルをある有限の領域で積分した面積の平方根で示される。

$$SNR = \sqrt{\int_{0.1}^2 SNR^2(u) du} \quad (7)$$

われわれは、 $k\mu$ を実測して、被写体直径2 mm のアクリルビーズを用いたときの $SNR^2(u)$ 、SNR を、(6)、(7)式から求め、ROC 解析の結果と比較した。

Fig. 8 は、検出能スペクトルの結果である。各系において、OG-1 が優れていることがわかる。また、SNR は、Lanex Fine/OG-1 系：4.99、Lanex Fine/TMG 系：4.19、Lanex Regular/OG-1 系：3.76、Lanex Regular/TMG 系：3.10 であった。いずれの場合でも、OG-1 を組合せたときが優れており、ROC 評価の結果とも一致した。各増感紙における OG-1 と TMG の SNR の相対比は、Lanex Fine では1.19、Lanex Regular で1.21 である。しかし、Lanex Regular 系の ROC 解析での OG-1 と TMG の $Imax$ の相対比とは異なっているが、この有意差は、視覚系の内部雑音¹³⁾ の存在を示すものと、われわれ

Fig. 8 $SNR^2(u)$ of the four screen/film systems. Lanex Fine screens are combined with the anti-crossover film (TMG) or conventional film (OG-1), Lanex Regular screens with TMG or OG-1 film.

れは考えている。

3. 考 察

土井らは、フィルムの乳剤層に光吸収層を設けクロスオーバー光を減弱させ、鮮鋭度を改善したフィルム XUD が、従来形のフィルム OG に比べて、約40%の感度の低下と、いくらかのグラジエントの低下がみられ、その結果、低周波数域のノイズ特性が改善されたと報告している⁶⁾。また、Kelsey らは、視覚によってそれらの問題を個々に評価している⁸⁾。しかし、本実験に用いたアンチ・クロスオーバーフィルム TMG は、鮮鋭度の向上とともに、約10%の感度の上昇と高グラジエント化をはかっているため、低周波数域のノイズ特性の劣化は必至と思われる。

われわれの研究は、増感紙/フィルム系のクロスオーバー効果が総合画像特性に及ぼす相乗効果を $NEQ(u)$ によって、一元評価を行うとともに、特性の逆転現象をも解析した。このことは、針像とビーズ像の視覚評価の結果と一致したことから証明された。

本研究で明らかになったことは、増感紙/フィルム系の総合感度を同じくした場合、従来形のフィルム OG-1 と、アンチ・クロスオーバーフィルム TMG の比較において、低周波数領域では OG-1 が優れ、高周波数領域では TMG が優れている結果になった。これに対して、針像とビーズ像を並列した X 線写真における視覚評価では、この差が歴然としているにもかかわらず、ROC 解析によれば、多人数で、しかも膨大な実験によってはじめてこの差が証明される。つまり、心理的な動揺も含めて、視覚系に内部雑音が存在し¹³⁾、その攪乱によって画像の僅差を評価するには再現性を含めて ROC 解析の実験的な困難さの一側面を表わしている。したがって、特性曲線、MTF、そしてウィナーズスペクトルなどの物理量が正確に測定できるようになった今日、 $NEQ(u)$ を計測することによって画質の差を、安定した有意差として、総合的に表示できるようになったことを意味していると考えられる。

Lanex Regular を用いた場合の低周波数域の TMG と OG-1 のわずかな差は、 $NEQ(u)$ で確立された。そして、それは心理的雑音を含む ROC 解析においても同様に示された。さらに、ROC 解析に用いた同一のテスト被写体を用いて、 $k\mu$ を実測して得られた SNR においても、同様な結果が得られた。したがって、Lanex Fine を用いたときの OG-1 と TMG の SNR の相対比が、Lanex Regular とほぼ同じ値であることから、Lanex Fine における OG-1 と TMG の ROC 評価の差は、さら

NEQ(u)によるクロスオーバー効果の画像特性の解析 (岡田・他)

に増大するものと推察できる。このことは、Lanex Fine を用いた NEQ(u)、および針像とビーズ像における OG-1 と TMG との検出の差が、Lanex Regular を用いた場合のそれに比べ、増大していることから裏付けできる。

ここで、NEQ(u)を用いて、クロスオーバー効果の画質におよぼす影響の比較を行う場合、なるべく同程度の感度とガンマのフィルムを用いることが重要であると考えられる。それは、極端に感度やガンマの異なるフィルムを用いると、これらの差による粒状度への影響が大きくなって、本来のクロスオーバー効果による影響を分離できなくなるからである。

4. 結 論

- 1) アンチ・クロスオーバー形のフィルムと、これとほぼ同感度の従来形のフィルムを用い、クロスオーバー効果の画像特性の解析が、NEQ(u)を用いて評価できた。
- 2) アンチ・クロスオーバーフィルムの出現によって、画質の向上がいわれているが、実際には、低周波数域では従来形のフィルム OG-1の方が優れていた。したがって、TMGはこのことを考慮して使用する必要がある。

謝 辞

本研究に、協力いただいた近畿大学医学部附属病院中央放射線部の諸兄姉ならび、ナガセメディカルサプライ株式会社に心から感謝する。

文 献

- 1) 笹井明：写真乳剤の結晶形，写真工業，91-95，1984(9)。
- 2) 阿久津弘：平板ハロゲン化銀粒子，写真工業，129-131，1984(1)。
- 3) 山口尚，他：サクラ NEW ハイオルソフィルムタイプ MG，MGH の開発にあたって，サクラ X-レイ写真研究，No. 165，36(1)，42-44，(1985)。
- 4) 新井直樹，古川克治，他：富士医療用 X-レイオルソフィルム New RXO-G の開発意図および性能：Fuji Medical Forum，145，20-26，(1984)。
- 5) 高毛禮篤子，他：TMG フィルムの血管撮影への応用，RAD，ナガセ X-レイだより，7，13-16，(1984)。
- 6) Kunio Doi, et al.: Effect of Crossover Exposure on Radiographic Image Quality of Screen-film systems, Radiology, 139, 707-714, (1981)。
- 7) Charles A. Keseley, et al.: Anticrossover Emulsions Evaluated by Observer Performance Test, Radiology, 146, 209-211, (1983)。
- 8) Charles A. Keseley, et al.: ROC and Contrast Detail Image Evaluation Test Compared, Radiology, 154, 629-631, (1985)。
- 9) Dainty JJC, Haw R: Image Science, p.156, (1974). Academic Press, London and New York.
- 10) MTF's and Wiener spectra of radiographic screen-film systems, US Department of Health and Human Services, p. 20, 82-8187, (1982)。
- 11) 市田浩三：スプライン関数とその応用，教育出版。
- 12) 若松孝司，他：スペクトル S/N 比をもちいた検出能による総合画像評価の増感紙フィルム系への応用，日放技学誌，40，20-27，(1984)。
- 13) M Ishida, K Doi, et al.: Digital Image Processing: Effect on Detectability of Simulated Low-Contrast Radiographic Patterns, Radiology, 150, 569-575, (1984)。