原 著

X線イメージインテンシファイアのコントラスト比と
低空間周波数におけるMTFの落ち込み(LFD)との関係

斉藤啓一・玉川文康

(株)東芝 電子デバイス事業部

論文受理

1995年5月9日

最終論文受理

1996年1月19日

Code No.520

1. 緒言

X線イメージインテンシファイア(以下, XRII)は近年のX線診断システムにおいて画像抽出を行うキーコンポーネンツと考えられている。その画像性質を示す重要なパラメータとしてはコントラスト比(以下, CR), 変調度伝達関数(以下, MTF)などがあげられる。CRはその逆数をベーリンググレア指数(Veiling glare index, 以下, VGI)と呼び¹⁾, 点強度分布(以下, PSF)と関連づけられていることが報告されている²⁾。XRIIのMTFはこれまで一般には空間周波数が増加するに従って100%から徐々に低下していた。しかし, XRIIは出力窓において光の散乱を生じたり, XRIIの入力窓自身がX線に対して散乱体であるので, X線診断システムにおけるほかの構成要素(例えば光学系,

テレビカメラ, フィルムなど)とは異なってくる。KühlはXRIIのMTFが空間周波数の極めて低い部分で値が急激な低下をするものでなければならないとし, この部分を低空間周波数での落ち込み(Low frequency drop, 以下, LFD)と名付けた³⁾。LFDの測定はXRIIの出力窓に現れる強い光のピークに対する微弱な部分の光強度を測定することにより得ることができる。従って, LFDはMTFと同様, 線強度分布(以下, LSF)をフーリエ変換することで求めることができる。ここでLSFとPSFの関係はMarchandらにより研究されている⁴⁾ので, CRとLFDはPSFまたはLSFを通じて互いに関連があると考えられる。CRとMTFの関係についてはCRとCR測定に使用される鉛円板径との関係をガウス曲線とCauchyのPSFで表現し, MTF曲線を導いた報告があ

The Relationship between the Contrast Ratio and Low Frequency Drop of the Image Intensifier

KEIICHI SAITO・FUMIYASU TAMAGAWA

Electron Device Division, Toshiba Corporation

Summary

The relationship between the drop at low frequency of the MTF and contrast ratio of the x-ray image intensifier is evaluated. The three samples have the different contrast ratios. It is shown as the function of Pb disc diameter. That relationship is called the disc transfer function (DTF). The DTF can be expressed by two exponential parts. By this result it is shown that the flare of the part of the small Pb disc diameter corresponds to the LFD, and the short range effects is especially related to the LFD. Therefore, it is able to be expressed by the simple equation of the relationship between the contrast ratio and the LFD of the XRII. The LFD evaluation which is the difficult measurement can take place the contrast ratio evaluation by several Pb disc diameter which is a simple measurement.

Key words: X-ray image intensifier, Contrast ratio, Low frequency drop (LFD),
Modulation transfer function (MTF)

る⁵⁾。また、FujitaらはXRIIとテレビカメラ系から得られるデジタル信号を用いて鉛円板径とベ어링ングレア含有率との関係を求め、その結果からLFDを示した⁶⁾。

本論文はXRII自体のCRとLFDの関係を光学系やテレビカメラなどの他の構成要素をまったく含めず、直接、定量的に考察することを目的とする。理論はCRとPSFの関係をj用いて第2章で行う。第3章では今回の測定にj用いたXRIIの特徴を述べ、CRの測定およびLFDの測定法を示す。第4章においてCRとLFDの測定結果とそれらの関係式の導出を行い、その結果について考察する。最終章で結論を述べる。

2. 理論

XRIIのCRの特徴を定式化するため、以下の仮説を導入する。それはXRIIの画像伝達系においては線形性を有していること、位置不変性が成り立つこと、X線エネルギーに独立であること、軸対象を有していることの4つである²⁾。この仮説により、XRIIの画像伝達系ではPSFで表現することが可能になり、XRIIの出力像で観測される最終画像は入力信号とPSFの畳み込み(Convolution)で表現することが可能になる。PSFの中心部分の光強度分布の強い部分と散乱部分の2項に分離し、その散乱光の含有率を*P*とすると

$$PSF(r) = (1-P) \frac{\delta(r)}{r} + \frac{P}{2Kr} \exp\left(-\frac{r}{K}\right) \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

と表現できる。*K*は散乱光が及ぶ範囲を示し、 $\delta(r)$ はDiracのデルタ関数である。光の法線方向の減衰は $1/r$ としている。今、XRIIの中心に直径*d*の鉛円板を置いたときのCRを①式を用いて計算すると

$$CR(d) = \frac{1 - P \exp\left(-\frac{D}{2K}\right)}{P \exp\left(-\frac{d}{2K}\right) - P \exp\left(-\frac{D}{2K}\right)} \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

となる。ここで*d*はCRを測定するときに用いる鉛円板の直径であり、*D*はXRIIの入射面視野寸法である。ここで*D/2K*が十分大きいと仮定し、*VGI(d)*を

$$VGI(d) = \frac{1}{CR(d)} \quad \cdots \cdots \textcircled{3}$$

で表すと¹⁾、

$$VGI(d) = P \exp\left(-\frac{d}{2K}\right) \quad \cdots \cdots \textcircled{4}$$

となる。よって*VGI(d)*はPSFの散乱光の含有率*P*によってその大きさを定量的に表現することが可能であることがわかる。

3. 実験方法

3-1 サンプルの特徴

XRIIのCRは出力窓における光の散乱を少なくすることにより向上させることができる^{7,8)}。今回の実験のため、特に入射面視野寸法220mm、出力像径20mmで出力窓の構造が異なるXRIIを3種類準備した。サンプルAの出力窓は2枚のガラスから構成されている。サンプルBの出力窓は1枚のガラスで構成されているが、光透過率は約50%である。サンプルCの出力窓はガラスが1枚であり、さらにその厚さはサンプルBの約2倍である。

3-2 CRの測定

XRIIのCR(*VGI*)の測定のためのシステムをFig. 1に示し、使用した装置、X線条件をTable 1に示す。測定に使用した入射野は通常視野(220mm、以下Nモード)と約2倍の拡大視野(115mm、以下Mモード)について行った。10mmの直径を持つ鉛円板のCRを10mm CRとし、Nモードのとき70mm、Mモードのとき36.5mmの直径を持つ鉛円板におけるCRをそれぞれの視野での10%面積CR(以下、10%CR)とした。鉛円板の厚さは3mmである。

各入射野で鉛円板を置かない時のXRIIの出力像の中心輝度Aと鉛円板を置いた時のXRIIの出力像の中心輝度Bの比(A/B)からCRを求めた。

3-3 *VGI(d)*の測定

厚さ3mmの鉛円板の直径を5mmから118mmまで15種類準備し、サンプルの各入射野(NモードとMモード)において鉛円板のそれぞれの直径における*VGI(d)*

Fig. 1 Experimental configuration for the measurement of the contrast ratio

Table 1 The measurement equipment and conditions for measuring contrast ratio and $VGI(d)$

Item	Measurement equipment and condition
X-ray generator	KXO-1050F (Toshiba)
X-ray tube	DRX-2325C (Toshiba)
Photometer	SPECTRA SPOTMETER 1980 (Photo Research)
Nominal focal spot value	0.3
X-ray tube voltage	50kV
Source to entrance plane distance	1000mm

デジタルマルチメータで高速サンプリングされ、GP-IBを介してコンピュータに送られ、高速フーリエ変換される。フォトマルは測定時に十分にエージングをして安定した電流が取り出せるようにした。またスリットからの散乱線を最小限にするため、スリットのX線管側直前でX線を絞った。LFD値は以下の式で求めた⁵⁾。

$$LFD = 1 - MTF(0.1 \text{ lp/mm}) \quad \cdots \textcircled{5}$$

を測定した。

3-4 LFDの測定

XRIIのLFDの測定はXRII全面に円形開孔を用いた例があるが⁹⁾、今回はスリットを用いてLSFを得て、これをフーリエ変換して求めた。

XRIIのLFDの測定のためのシステムをFig. 2に示し、使用した装置、X線条件をTable 2に示す。測定に使用した入射野はNモードとMモードについて行った。LFDの測定はLSFの裾野の部分を十分にとる必要があるので、X線管側のスリット幅は0.5mmと広くした。このスリット幅においてLFDの測定領域を十分に満たすことができる。フォトマルから得られた信号は

4. 結果と考察

4-1 CRの測定結果

Table 3で示されているようにサンプルAは10mm CRがほかのサンプルより劣っていた。サンプルBは10mm CRはサンプルAと比較して優れているが10% CRはサンプルAと同程度であった。サンプルCは10mm CR、10% CRの双方が優れていた。この結果から3種類のサンプルはCRの特性の異なるXRIIであることがわかった。

4-2 $VGI(d)$ の測定結果

各サンプルについてFig. 3aからFig. 3cに示している。●はNモードにおける結果を示し、■はMモード

Fig. 2 Experimental configuration for the measurement of the low frequency drop

Table 2 The measurement equipment and conditions for measuring low frequency drop

Item	Measurement equipment and condition
X-ray generator	KXO-2050 (Toshiba)
X-ray tube	DRX-3535HC (Toshiba)
Photomultiplier	R268-S20 (Hamamatsu Photonics)
Test device	width 0.5mm length 20mm thickness 3mm material Tungsten
Slit to MTF analyser	width 0.5mm length 5mm
Relay optics	M Plan Apo 10 (magnification 10, Mitsutoyo)
Digital multimeter	7561 (Yokogawa)
Preamplifier	C1556 (Hamamatsu Photonics)
Computer	PC-9801DX (NEC)
Nominal focal spot value	0.3
X-ray tube voltage	50kV
Source to entrance plane distance	1000mm

における結果を示している。 $VGI(d)$ は片対数として示すと鉛円板径の大きい部分では直線で示され、指数関数で表現できることがわかった。

4-3 LFDの測定結果

測定により得られたLSFをFig. 4 にサンプルAとサンプルCのMモードについて示している。ダイナミックレンジは 10^{-5} から 10^{-6} 程度が得られている。サンプルAはXRIIの出力像の中心から半径約4mmの範囲内にフレアが大きく表れている。サンプルCでは出力像の中心から半径約2mmの範囲内にフレアが大きく現れている。

このLSFをフーリエ変換するとMTFが得られるが、計算にあたっては裾野の処理をほかの関数等で近似、外挿せず、フォトマルから得られた信号を直接フーリエ変換した。結果をFig. 5 に示している。サンプルAに現れていたフレアがサンプルCでは少ないので低空間周波数におけるMTF値の落ち込みが少なく、それだけLFD値が小さくなっている。⑤式による各サンプル、各視野でのLFDの結果をTable 4 に示す。

4-4 2つの関数による $VGI(d)$ の表現

Fig. 3aからFig. 3cで得られたように $VGI(d)$ は鉛円板径の大きい部分では指数関数で表現できる。鉛円板径の小さい部分はその指数関数から外れてくるがそのずれをこの節で評価する。

Fig. 6 ではサンプルAのMモードにおける結果を例として示している。Fig. 6 によると鉛円板径の大きい部分は

$$VGI(d) = P_2 \exp\left(-\frac{d}{2K_2}\right) \quad \text{.....⑥}$$

と表現できる。このサンプルの場合、鉛円板径が約25mmから小さい部分では式⑥からずれてくる。その差を○で示した。この部分も指数関数で表現でき、それを破線で表示している。全体として $VGI(d)$ は

$$VGI(d) = P_1 \exp\left(-\frac{d}{2K_1}\right) + P_2 \exp\left(-\frac{d}{2K_2}\right) \quad \text{.....⑦}$$

と表現できる。3種のサンプルの各視野での P_1 , K_1 , P_2 , K_2 の値をTable 5 に示す。

Table 3 Contrast ratio values of three type XRII

		A	B	C
10mm Contrast Ratio	N	9±1	15±1	20±2
	M	11±1	18±2	26±3
10% Contrast Ratio	N	24±2	23±2	26±3
	M	29±3	26±3	36±4

A C
B

Fig. 3 Experimental disc transfer function about each sample on semilogarithmic paper (● shows N-mode and ■ shows M-mode.)

Fig. 4 Line spread function of sample A and C on M-mode. Sample A is shown by solid line and sample C is shown by dash line.

Fig. 5 Modulation transfer function of sample A and sample C on M-mode from 0Lp/mm to 0.20Lp/mm for getting low frequency drop. Sample A is shown by solid line and sample C is shown by dash line.

Fig. 6 The separation of $VGI(d)$ by two exponential parts about sample A on M-mode. The solid line shows one exponential function within large Pb disc diameter and the dash line shows the difference between $VGI(d)$ and exponential function of large disc diameter. The dash line also shows the another exponential function.

Table 4 Low frequency drop values of three samples on N-mode and M-mode

Sample	A		B		C	
mode	N	M	N	M	N	M
LFD Value	0.108 ± 0.01	0.072 ± 0.01	0.068 ± 0.01	0.045 ± 0.01	0.028 ± 0.01	0.018 ± 0.01

Table 5 The parameters of the exponential functions for $VGI(d)$

Sample	A		B		C	
mode	N	M	N	M	N	M
P_1	0.10 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01
P_2	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01
K_1	4.4 ± 0.22	5.4 ± 0.27	3.0 ± 0.15	3.8 ± 0.19	1.7 ± 0.09	3.2 ± 0.16
K_2	45.8 ± 2.3	27.3 ± 1.4	109 ± 5	62.5 ± 3.1	132 ± 7	45.7 ± 2.3

4-5 考察

Table 4 で得られたLFD値とTable 5 で得られた P_1 の値を比較してみるとよく一致していることがわかる。これは次のように考えることができる。

XRIIのベーリンググレアの影響はXRIIの入力窓の構造や材料、出力窓の構造やそのガラス厚に強く影響を受ける。一方、CRもまたXRIIのベーリンググレアによる画像のコントラストの低下の程度を示している。式⑦を見てわかるようにVGIつまり、CRは2つの領域に分割できることを意味している。第1項は狭い領域におけるベーリンググレアであり、第2項は広い領域におけるベーリンググレアである。Table 5 より $K_1 < K_2$ であるから K_1 は狭い領域がおよぶ範囲を示し、それは鉛円板径の小さい部分に大きく影響を与えるところである。今回の測定結果からLFDに大きく寄与する部分は狭い領域におけるフレアであるといえる。つまり、大きい領域のCRがよくてもLFDはよくならないことを示す。これはサンプルAとサンプルBでは10%CRはサンプルAの方がよいがLFDはNモード、Mモードのどちらの視野においてもサンプルBのほうがよい。これは10mmCRがサンプルBの方が優れていることによるものであることを反映している。

K_2 は比較的大きな領域におけるフレアを示すのでCR、特に大きな領域のCRには影響を与えるが、LFDに与える影響はほとんどないといえる。

Fig. 5 でサンプルAでは空間周波数0.05LP/mm近くまで急激にMTFが減少し、その後なだらかに減少している。この結果はKühlの測定結果も同様である³⁾。LFDは空間周波数の極めて低いところにおけるMTFの落ち込みを測定することにあるのでグラフからサンプルAの場合は約7%、サンプルCの場合は極めて小さく1%位である。LFDの測定精度を絶対値で $\pm 1\%$ としたときこのLFD値を取り得る空間周波数の範囲はサンプルAの場合が0.05Lp/mmから0.13Lp/mm、サンプルCの場合が0Lp/mmから0.11Lp/mm程度となる。0.2 Lp/mmを越える領域はすでにLFDの範囲を越え、高空間周波数の領域として別途測定する必要があることがわかる。以上よりLFDを空間周波数0.1Lp/mmで決定して

よいことがFig. 5 からわかり、しかもこの空間周波数におけるLFDがVGI(d)による結果ともよく一致する。

5. 結語

さまざまなCRを持つXRIIのVGI(d)を測定し、その値とLFDの関係を求めた。VGIをひとつの曲線で表現し、VGI(0)をベーリンググレアとする報告もある¹⁰⁾。しかし、この表現法によるベーリンググレアがLFDにならないことは次のように示される。例えば、Fig. 3aで示されているように、LFDはNモード、Mモードとも10%を越えてしまい、LFD測定結果に反する。今回の測定によりLFDに影響を与えるものはXRIIの狭い領域から生じるフレアのみであることが示される。

XRIIのLFDの測定はきわめて高価な測定装置とその測定における準備、調整を十分に行わなければならない。一方、CR(VGI)は輝度計と計算機で求めることができる。本論文で明らかのようにLFDとCR(VGI)との関係が明らかになり、これによって測定の困難なLFDを測定の容易なCR(VGI)の測定に代用できるようになり、測定値の信頼性を向上させることができる。

今後は他のX線管電圧や付加フィルターの有無によるCRとLFDのエネルギー依存性の評価を行っていくことが課題である。特にX線管電圧を上げて測定する場合はX線制御装置とX線管にX線エネルギーとの線量の安定性が要求される。これはLFDの測定はXRIIの出力像全体を捕らえる必要があるため、測定の最初にXRIIに入射されたX線エネルギーとX線量が測定の最後にXRIIに入射されたX線エネルギーとX線量が一致している必要があるからである。この場合はX線エネルギーと線量をモニターしながら測定することも考慮していく必要がある。

謝辞

稿を終えるにあたり、本研究の遂行にご協力いただいた宇都宮大学工学部中井研究室の各位に感謝いたします。なお、本論文の一部は第18回日本放射線技術学会秋季学術大会(1994)において発表した。

参考文献

- 1) International Electrotechnical Commission: International Electrotechnical Commission Standard. Publication No. 1262-6(1994).
- 2) Seibert JA, Nalcioğlu O and Roeh WW: Characterization of the veiling glare PSF in X-ray image intensified fluoroscopy. Med. Phys., **11**(2), 172-179, (1984).
- 3) Kühl W: Design Considerations on X-ray image intensifier systems. Proc. SPIE, Vol.56, 80-84, (1975).
- 4) Marchand EW: Derivation of the point spread function from the line spread function. J. Opt. Soc. Am., A4, 915-919, (1964).
- 5) Bromberg N: Image intensifier contrast ratio measurements. Acceptance Testing of Radiological Imaging Equipment, New York, 45-52, (1982).
- 6) Fujita H, Doi K, MacMahon, et al.: Basic imaging properties of a large image intensifier-TV digital chest radiographic system. Inv. Rad., **22**(4), 328-335, (1987).
- 7) Tsuda M and Kimura Y: Reduction of background luminance generated in output screen of X-ray image intensifier tubes. Jpn. J. App. Phys., **24**(3), 342-350, (1985).
- 8) 河村重治, 野地隆司, 河澄清人: アドバンスド・スーパメタルII, 東芝レビュー, **45**(9), 751-754, (1990).
- 9) 鈴木明秀, 荒牧成光: X線イメージインテンシファイアのMTFの測定, 放射線像研究, **12**(3), 127-133, (1982).
- 10) Heidsieck R: Characterization of veiling glare in angiographic systems. Proc. SPIE Vol. 1090, 222-232, (1989).