

画像セミナー

FPD を中心とするデジタル画像検出システムの 画像特性と測定方法

国立病院機構 九州医療センター 放射線部（臨床研究部） **井手口 忠光**

九州大学医学部保健学科 放射線技術科学専攻 東田 善治、大喜 雅文

九州大学病院 医療技術部 放射線部門 氷室 和彦

大阪大学大学院 医学系研究科 保健学専攻 松本 政雄

広島県立保健福祉大学 放射線学科 吉田 彰

大阪市立大学医学部附属病院 中央放射線部 奥迫 謙治

岐阜大学 大学院 医学研究科 再生医科学専攻 藤田 広志

1. はじめに

ここ数年、X線画像は多くの施設でデジタル化され、CR (Computed Radiography) や FPD¹⁾ (Flat Panel Detector) が日常臨床で使用されるようになってきた。

医用 X線画像の評価法を大別すると、物理評価と視覚評価（画質の定量化）があるが、アナログとデジタルでは、その実験方法や解析方法に若干の違いはあるものの、ベースとなる理論は同じである。デジタル画像における画像特性の理論は、数多く出版されている成書に譲り、今回は、デジタル画像における画像特性の具体的な測定方法と解析手順を簡便に記載する。

特に、最近のデジタル X線画像は、DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) 規格で出力した画像データを PC (Personal Computer) に取り込めることができ、そのデジタルデータを利用すれば、Excel などの表計算ソフトでデジタル特性曲線^{2) 3)}、プリサンプリング (Presampling) MTF^{4)~8)} (Modulation Transfer Function)、デジタルィナスpekトル⁹⁾ (Wiener Spectrum: WS) などを解析することが可能である。

本稿では、九州大学の東田善治を班長とする、「デジタル画像検出システムの画像特性に関する研究班」で評価してきた測定方法およびデータも含めて紹介し、解説する。

2. デジタル特性曲線

X線検出器に入射した相対露光量の対数を横軸にとり（対数をとらない場合もある）、A/D変換後のデジタル値（ピクセル値）を縦軸にプロットした入出力特性をデジタル特性曲線 (digital characteristic curve) と呼ぶ。これに対して、入力としての相対照射線量に対して、レーザーイメージャなどによってフィルム上に写真濃度として出力した特性曲線は、オーバーオール特性曲線 (overall characteristic curve) と呼ばれることがあり、CRシステムの入出力特性にもよく用いられてきた。しかし、解像特性の解析や画像の定量解析には、デジタル特性曲線が用いられる。

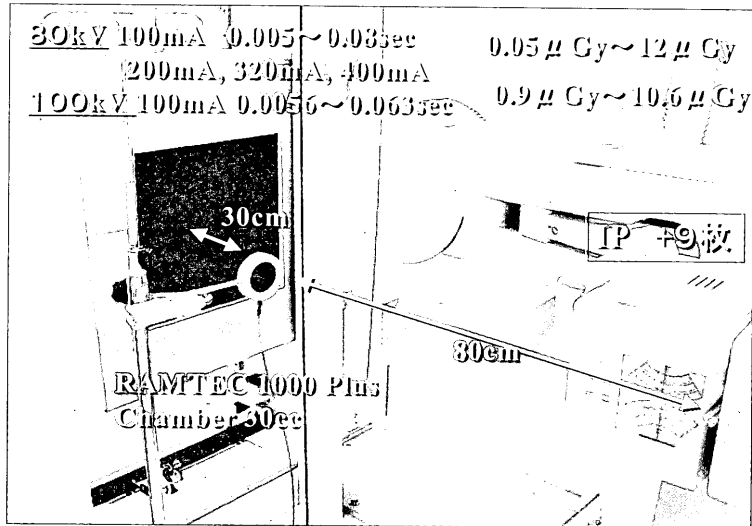


図1 直接型 FPD における特性曲線測定の実験配置

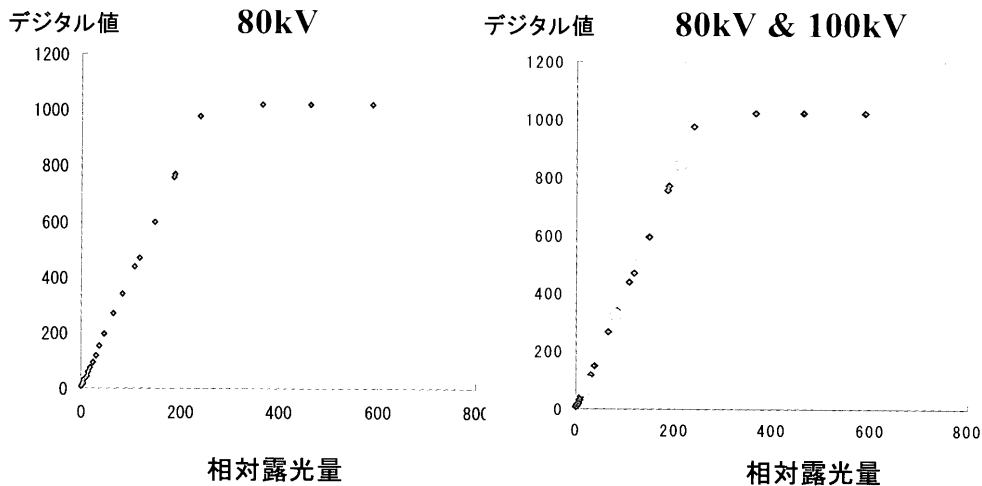


図2 2種類のX線管電圧による直接型 FPD のデジタル特性曲線
管電圧（線質）が変わっても、その傾きに変化は見られない。

CR や FPD は、3 桁以上のダイナミックレンジを有しているので、広い範囲で線量を変化させる必要がある。しかし、FPD は X 線管球とディテクタの距離が固定されている場合が多く、付加フィルタ（増感紙や Imaging Plate: IP がよい）などによって、デジタル値の低い部分と、高い部分のデータをつなぎ合わせる必要もある。距離法が使えないデジタルシステムの場合、増感紙／フィルム系と異なり相反則が成立するため、タイムスケール法にて測定を行える。

また、実際、特性曲線を測定する際は、鮮鋭度 (MTF) や粒状特性 (WS) などの測定データも同時に収集することが多いので、FPD のディテクタ部のカバー、グリッド、自動露出機構の受光部を取り外して X 線照射を行い、FPD からワークステーションに送られた画像データを CD-R に取り出す。

特性曲線のデジタル値は、CD-R に取り込んだデータ (DICOM ファイル) を、Image-J¹⁰⁾ という

フリーのソフトウェアで簡単に開くことが出来る。開いた画像に関心領域 (ROI) を囲み「Analyze」→「Measure」を選択すれば、ROI 内の最大、最小、平均デジタル値が表示される。Excel にて平均デジタル値を縦軸に、相対露光量を横軸にプロットすれば、デジタル特性曲線が得られる。図 1 にその実験配置を、図 2 に得られたデジタル特性曲線を示す。

3. 鮮鋭度 (プリサンプリング MTF)

鮮鋭度を表す MTF 測定には、矩形波チャート法¹¹⁾、スリット法^{12) 13)}、あるいはエッジ法¹⁴⁾があることは良く知られている。従来、増感紙/フィルム系の MTF 測定では、矩形波チャート法とスリット法が一般的に用いられてきた。

この項ではデジタル画像の鮮鋭度を、スリット法を用いたプリサンプリング (Presampling) MTF の測定理論に基づき、その測定法および解析の手順を解説する。

3. 1 スリットの撮影

スリットを撮影する場合は、X 線管球とスリットのアライメント調整が重要であり、経験を要する作業の一つでもある。われわれは、スリットの回転と平行移動がミクロン単位で稼動可能であるスリットステージを作成し (図 3)、その上に開口幅 $10\mu\text{m}$ のスリットを置き、回転、または左右に移動 (白矢印) しながら、アライメントの調整を行っている。このとき撮影したスリット像を図 4 に示す。スリット像は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 (約 3 度) 傾けて配置してある。

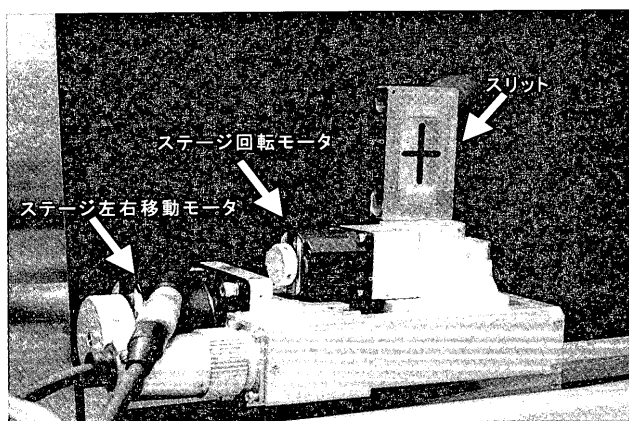


図 3 ミクロン単位で左右、回転の移動ができる
スリットステージ

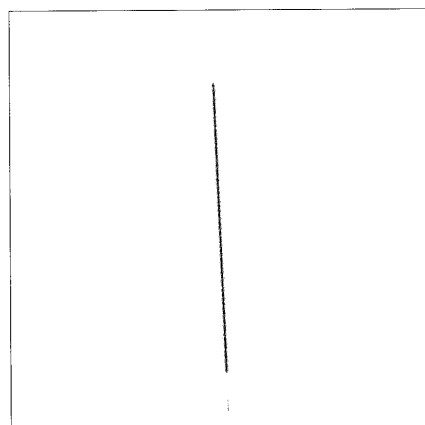


図 4 撮影された少し傾いたスリット像

また、スリットを撮影するときの条件は、経験的にセンターアライメントのピクセル値が、最高デジタル値の 8 割程度になるような条件が望ましい。

図 5 (a) に間接型 FPD にて露光条件 (80kV, 60mAs) でスリット撮影を行った合成 LSF (1 倍露光) とその 5 倍の露光条件 (80kV, 300mAs) で撮影した合成 LSF (5 倍露光) を示す。1 倍露光では最高デジタル値の 70%、5 倍露光で 85% のデジタル値を示した。2 つの合成 LSF はほぼ一致しているが、合成 LSF 値 0.01~0.001 のデータは、1 倍露光のバラツキが大きいのが明瞭である。両者から計算された最終的なプリサンプリング MTF はほとんど一致したが (図 5: b)、LSF の裾野部分の量子化誤差を考慮した場合、センターアライメントのデジタル値が、最高デジタル値の 80% 程度に条件設定することが望ましいと言える。

従来、アナログシステムの MTF 測定では、トランケーションエラーを防ぐため、倍数露光が行われてきたが、デジタルシステムの MTF 測定では、これらの測定法がまだ確立していない。今回、研究班で数種類の FPD にて照射条件を 5 倍程度変化させてスリットを撮影し、これから求めた合成 LSF から MTF を計算して比較を行ったが、違いを認めなかった。

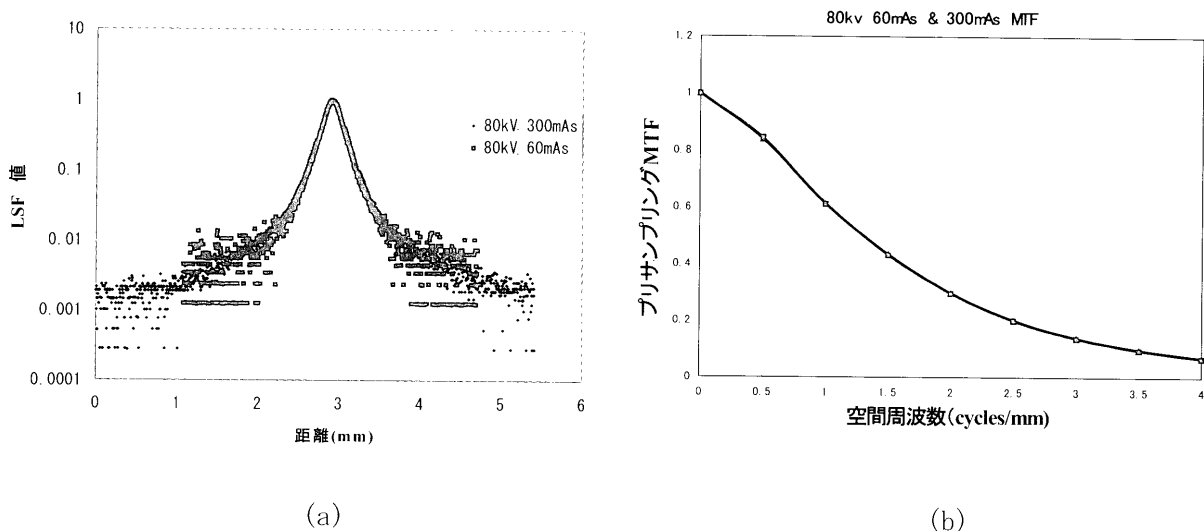


図 5 ある露光量とその 5 倍の露光量にて得られた合成 LSF の比較 (a)
それらの合成 LSF から求められたプリサンプリング MTF (b)

3. 2 スリット像からデジタルデータを得る

スリット像からデジタルデータを得る手順を説明する。PC に取り込んだスリット生データ (DICOM ファイル) はデジタル特性曲線と同じく Image-J で開くことが出来る。図 4 のようなスリット像から、解析に必要な関心領域 (ROI) を囲み「Image」→「Crop」を選択し、「File」→「Save as」→「Text Image…」でテキストデータで保存する。保存した「Text Image…」ファイルを Excel で開くと、図 6 に示すようなスリット像のデジタルデータが得られる。

図6 撮影されたスリット像のデジタル値 (Excel 表示)

3. 3 合成 LSF の実際

合成 LSF を作成する方法は 2 種類あるが¹⁵⁾、われわれの研究ではそのうちのひとつで、さまざまなアライメントで得た LSF を合成して実効的なサンプリングが小さくなった合成 LSF から MTF を計算する方法にて解析を行った。その、詳細については文献 5), 6), 15) を参照していただきたい。

図 7 には実際の FPD の合成 LSF を示す。アナログの時のように、裾野の外挿を推奨している文献もあるが、デジタルの場合 MTF の結果には低周波の部分で若干差があるものの、ほとんど差は見られなかった (図 8)。

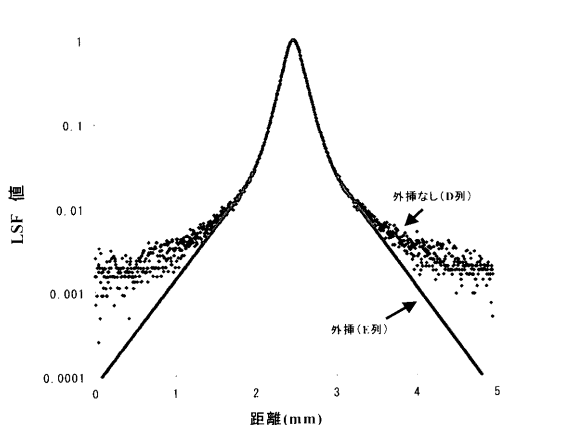


図 7 合成 LSF (点) と指数関数で外挿を行った合成 LSF (実線) の比較

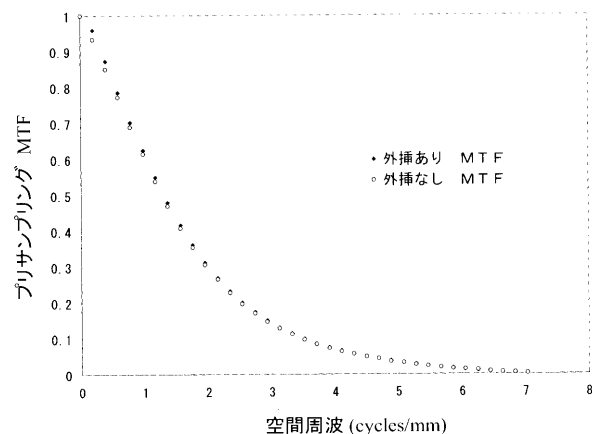


図 8 外挿あり、と外挿なしの合成 LSF から計算された MTF

3. 4 Excel への入力方法

具体的にExcelで計算表を用いてMTFを解析する手順を説明する。そのワークシートを図9に示す。

【A列・・・サンプリング間隔(mm)】

まず、Aの列(図9)にはスリットのサンプリング間隔(距離:mm)を入力する。サンプリング間隔は、合成LSFを作成する時の個数から計算を行う。すなわちセンターアライメント(シフテッドアライメント)から、センターアライメント(シフテッドアライメント)の個数で一個のピクセルサイズを、割れば求まる。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2	x (距離mm)	デジタル値	有効露光量	LSF (正規化)	外挿 LSF	外挿 LSF FFT	外挿 LSF FFT絶対値	MTF	空間周波数
3	0	967	0.19406759	0.001580522	0.00008	60.1286534329865	60.12865343	1	0
4	0.00516129	653	0.088518051	0.000720907	8.11923E-05	-56.6331497828061-10.7078146423872i	57.63654178	0.95855368	0.1953125
5	0.010322581	1165	0.31836754	0.002592844	8.24024E-05	-46.8753946327643+19.0964006667677i	52.47174742	0.87265795	0.390625
6	0.015483871	965	0.193099674	0.001572639	8.36305E-05	-40.01316615108+24.998443129805i	47.18026224	0.78465523	0.5859375
7	0.020645161	757	0.114801724	0.000934966	8.48769E-05	-31.02817941495998+28.6041756301296i	42.20126516	0.7018495	0.78125
8	0.025806452	1057	0.243035252	0.001979324	8.61419E-05	-22.3624609440111-30.0789735546759i	37.49220008	0.62353301	0.9765625
9	0.030967742	1057	0.243035252	0.001979324	8.74257E-05	14.749272346702+29.679117189962i	35.02080426	0.5491692	1.171875
10	0.036129032	246	0.031999059	0.000260606	8.87287E-05	-7.64954935170776-27.8271619860096i	28.8583674	0.47994368	1.3671875
11	0.041290323	1015	0.218810597	0.001782034	9.00511E-05	2.46775595705012+24.975352704685i	25.06084307	0.41678703	1.5625
12	0.046451613	1097	0.268995492	0.002187491	9.13932E-05	2.22667343160345-21.5666323545605i	21.68117279	0.36057972	1.7578125
13	0.051612903	1271	0.414970113	0.003379593	9.27553E-05	-5.32399746737394+17.9459277635335i	18.71900832	0.31131594	1.953125
14	0.056774194	503	0.060837508	0.000495472	9.41377E-05	-7.37231368041804+14.3789961920502i	16.15879195	0.26873697	2.1484375
15	0.061935484	1058	0.2436436	0.001984278	9.55407E-05	-9.34948872443168+11.0321130197467i	13.95467288	0.23208025	2.34375
16	0.067096774	907	0.167035523	0.001360368	9.69646E-05	9.01356220637524-9.0177328992645i	12.0635308	0.20062865	2.5390625
17	0.072258065	1219	0.36438336	0.002967605	9.84098E-05	-6.938881693790325+5.28721364721847i	10.43674659	0.1735736	2.734375
18	0.077419355	756	0.114515078	0.000932632	9.98764E-05	6.46315431812571-3.16742267673512i	9.036456575	0.15026536	2.9296875
19	0.082580645	1012	0.217175656	0.001768719	0.000101365	-7.71137674163593+1.34964635933669i	7.828593523	0.13019739	3.125
20	0.087741935	1058	0.2436436	0.001984278	0.000102876	6.76583024866639+0.0920787668889564i	6.786326227	0.11286344	3.3203125
21	0.092903226	967	0.114515078	0.000932632	0.000104402	-6.79373766889792+1.3378229864215i	6.807770646	0.09781866	3.51625
330	1.687741925	1775	1.462944554	0.01191449	0.01009304	-0.059008578883302+0.00607576604025i	0.059320625	0.00098956	63.8671875
331	1.692903226	1739	1.33703065	0.010889024	0.010243464	0.051937006127805-0.006068030421785i	0.052299929	0.00086963	64.0625
332	1.698064516	1726	1.294275686	0.010540819	0.010396131	-0.042098620806332+0.01019799166761i	0.043316197	0.00072039	64.2578125
333	1.703225806	1739	1.33703065	0.010889024	0.010551072	0.035316842395098-0.012416708047252i	0.037434775	0.00062258	64.453125
334	1.708387097	1746	1.36064619	0.011081259	0.010708323	-0.031593266754626+0.00675683411509i	0.032307728	0.00053721	64.6484375
335	1.713548387	1732	1.313836158	0.010700123	0.010867917	0.0274331366632502+0.006637462891686i	0.028224686	0.00046894	64.84375
336	1.718709677	1757	1.39857131	0.011390222	0.01102989	-0.019842449281888-0.02172333333500i	0.029421506	0.00048931	65.0390625
337	1.723870968	1689	1.179925408	0.00960953	0.011194278	0.0104579494541495+0.031026979749347i	0.032743856	0.00054456	65.234375
338	1.729032258	1737	1.330362182	0.010834714	0.011361115	-0.00314759894680664-0.0219129947039i	0.032067844	0.00053332	65.4296875
339	1.734193548	1762	1.416163171	0.011533493	0.011533493	0.000563790818395258+0.0273994945694i	0.027365303	0.00045511	65.625
340	1.739354839	1775	1.462944554	0.01191449	0.01191449	-0.000721868785569022-0.02262668776i	0.022838099	0.00037982	65.8203125
341	1.744516129	1763	1.419708008	0.011562363	0.011562363	-0.000256855754749515+0.02092992761i	0.020931565	0.00034811	66.015625
342	1.749677419	1814	1.612766815	0.01313467	0.01313467	0.0046972237012829+0.02065776079236i	0.021221686	0.00035294	66.2109375
343	1.75483871	1792	1.526459837	0.01243177	0.01243177	0.0112118493262047+0.01959051837743i	0.022576942	0.00037548	66.40625
344	1.76	1749	1.370877742	0.011164681	0.011164681	0.0162136736868643-0.017749692872322i	0.024040275	0.00039981	66.6015625
345	1.76516129	1819	1.633052924	0.013299884	0.013299884	0.01162337741724153+0.01713619465975i	0.025307986	0.0004209	66.796875
346	1.770322581	1808	1.588755845	0.01293912	0.01293912	0.0219104352157304-0.019064402980990i	0.028742963	0.00047802	66.9921875
347	1.775483871	1801	1.561194483	0.012714655	0.012714655	-0.0292667857883252+0.02093463656656i	0.035174853	0.00058499	67.1875

図9 高速フーリエ変換によるMTF計算過程のワークシート

【B列・・・合成スリットデジタル値】

次のB列には、図6で得られたスリットのデジタル値を入力していく。セルB3から合成LSFを作成した順番にデジタル値を入力する。

【C列・・・相対露光量変換】

Cの列にはB列のスリットデジタル値を、求めたデジタル特性曲線より、相対露光量に変換する。

【D列・・・合成したスリットの正規化(合成LSF)】

Dの列では、合成したスリットの正規化を行い、合成LSFを作成する。相対露光量変換したC列の値が一番大きかったセルの値でCのセルすべてを割り、正規化を行う。

【E列・・・指数関数近似を用いた外挿】

前述のように外挿は行っても良いが、結果にはほとんど影響はなく、D列を直接FFTしてもかまわない。

【F列・・・E列のFFT】

FFTを行う場合その理論上、2のべき乗のセル数しか計算ができないので、入力範囲の設定で、注意してほしい。メニューの中の「ツール」→「分析ツール」→「フーリエ解析」→「OK」で入力範囲、出力範囲を指定し(F列に)、OKボタンを押すとFFTが実行されF列にFFT後の値が入力される。

【G列・・・F列(複素数)の絶対値】

MTFは合成LSFのフーリエ変換の絶対値と定義されており、G列にはF列の絶対値を入力する。通常Excelで絶対値の関数はABSを用いるが、フーリエ変換後のデータでは、複素数が含まれているため、複素数の絶対値を返す関数、IMABSを使用する。

【H列・・・ゼロ周波数で正規化(MTF)】

最終的に、MTFは周波数ゼロで正規化を行う。

【I列・・・空間周波数ピッチの決定】

空間周波数の決定を最後に行う。空間周波数は、次式(1)で与えられる。

空間周波数ピッチ = $1 \div (\text{FFTに使用した個数} \times \text{サンプリング間隔}) \dots (1)$

式(1)のサンプリング間隔は、ピクセルサイズそのものではなく、合成LSFを作成するときの間隔で、今回の例では0.00516129・・・となる。

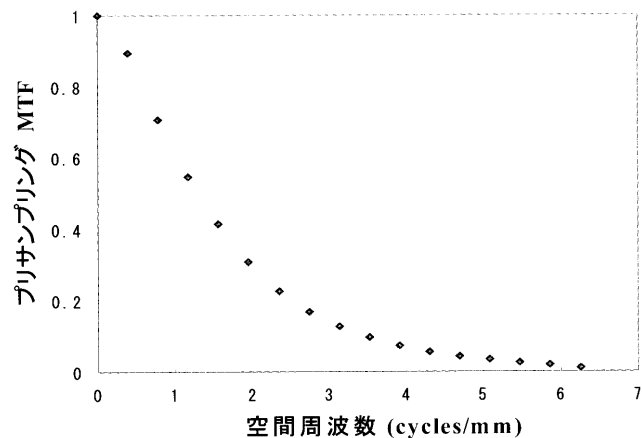


図10 高速フーリエ変換によるプリサンプリングMTF

すなわち、I3セルに0(ゼロ)を入力し、I4セルには

$=1 / (1024 * 0.00516129)$ の結果の数値 0.1953125 を入力する

図10に合成LSFの中心から左右に256点(合計512点)のデータでFFTを行ったプリサンプリングMTFの結果を示した。

4. デジタルのウィナーズスペクトル¹⁶⁾

デジタル系のノイズ評価にも、アナログ系と同様にウィナーズスペクトル(WS)を用いることができるが、画像信号を離散的にサンプリングすることで生ずる、エリアジングの効果を考慮す

る必要がある。

デジタル系のノイズの主な原因には (1) X 線量子モトル (2) システムの構造モトルや電気系のノイズ (3) 量子化ノイズ (4) 表示、記録系の電氣的なノイズやフィルムの粒状性、などが考えられる。このほかにも、X 線検出器の構造モトルや、X 線が光に変換されて検出される光量子の統計的ゆらぎに起因した光量子モトルも無視できない。

デジタルイナースペクトルの測定は、X 線検出器に一樣な X 線照射を行い、得られたデジタル値の画像をフーリエ変換して、その絶対値の 2 乗したものをスリットの長さで割り算して計算できる。このとき、2 次元 WS の一断面を得るためには、仮想的な走査スリットの高さ (走査スリットの幅は 1 ピクセル固定) を変化させて WS を計算し、WS 値が飽和するようなスリットの高さを事前に調べておく必要がある。デジタル研究班の松本政雄 (大阪大学) の測定データでは、仮想スリットの高さは少なくとも 16 ピクセル以上が必要であるとの測定結果も示されている。一般にデジタル系の 2 次元 WS は等方的でなく、WS の形状や大きさが方向によって変化するもので、直交する 2 つの方向について測定することが多い。またデジタル値はデジタル画像システムごとに任意に設定しているため、デジタル値で計算された WS は他のシステムと相互比較するのが困難である。そこで式(2) を用いてデジタル値で計算された $WS_{\Delta P}$ を、相対 X 線量で計算した $WS_{\Delta E/\bar{E}}$ に変換する。

$$WS_{\Delta E/\bar{E}} = WS_{\Delta P} / \left\{ G^2 \cdot (1 - k)^2 \cdot (\log_{10} e)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで G はデジタル特性曲線の傾き (グラディエント) を表し、k はコントラストを低下させるグレアの含有率である。

4. 1 デジタルイナースペクトルを求める手順

デジタルイナースペクトルは線量依存性があるため、各デジタルシステムのノイズを解析する時は、同線量で一樣露光することが原則である。

以下、デジタルイナースペクトルを求める手順を述べる。

- (1) 同線量で一樣露光したデジタル画像から、256×256 の関心領域を抽出する。通常、試料となる一樣露光されたデジタル画像は、デジタル特性曲線を測定した時の画像を用いることが多い。
- (2) 高さ 2mm の仮想スリット (幅は 1 ピクセル) で抽出した 256×256 の関心領域を 15 ピクセル間隔で、15 回走査を行う (図 11)
- (3) 走査結果の入力ワークシートを図 12 に示す。すなわち図 11 で示した仮想スリット(A1..T1) で矢印方向に走査した結果を、図 12 の B 列に入力する。
- (4) 次に得られたデジタル特性曲線を用いて、B 列のデータを C 列で相対露光量に変換する。
- (5) 多項式 (例では 3 次) を用いて各走査結果データ (C 列) に対しトレンド処理を行う。ト

トレンドとは、信号成分に入り込んだ非常にゆっくりした低周波数成分のことである。測定したデータが定常であればトレンド除去の必要はないが、信号にトレンドが入っている場合にはスペクトル解析を行うことにより、低周波数側にトレンドの周波数成分が重なって現れる。

(6)トレンドを行った値をC列の線量から差し引くことで、線量の揺らぎ成分が抽出できる。

その線量揺らぎを線量の平均値で除した後 (F列) 高速フーリエ変換を行う。(G列)

(7)FFT後の絶対値 (IMABS関数) の2乗をI列で行う。

(8)最後のJ列ではウィナースペクトルをデジタル計算するとき、試料の全長Xを、サンプリング間隔 ΔXで離散的に読み取ったデータをFFTにかけるが、このときFFT演算にはΔXを省略してデジタル値をX線強度に変換した値のみで計算しFxを得る。したがってウィナースペクトルは、サンプリング間隔と試料の全長を含めた計算式 (3) つまり

$$W(u) = \frac{1}{X} |F_n \cdot \Delta x|^2 = \frac{(\Delta x)^2}{N \cdot \Delta x} |F_x|^2 = \frac{\Delta x}{N} |F_x|^2 \quad (3)$$

となる。ただしNはサンプル数、Δxはサンプリング間隔である。

(9)合計150本のウィナースペクトルの平均値をとってデジタルウィナースペクトルとする。横軸の空間周波数の決定はMTF計算過程の【空間周波数ピッチの決定】の項と同じである。

図 11 高さ2mm、幅1ピクセルの仮想スリット (太枠) で均一照射より得られたデジタルデータを、矢印の方向にスキャン (平均) する。(大阪大学提供)

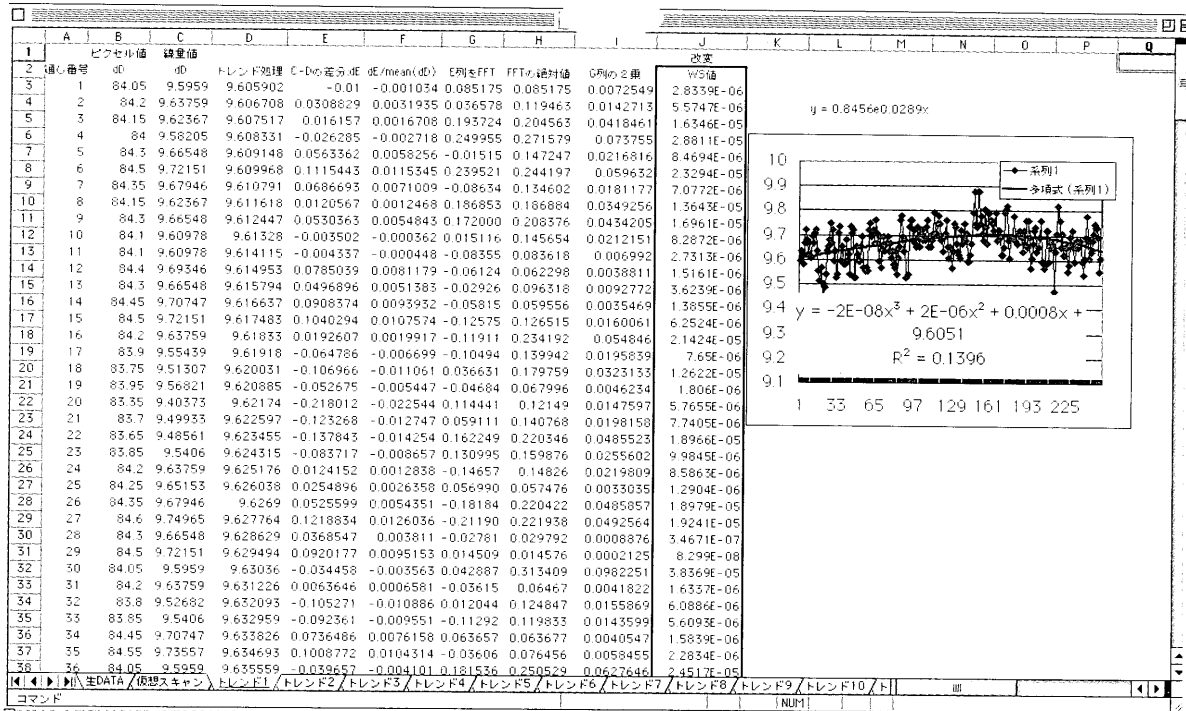


図 12 ピクセル値の線量変換、トレンド除去、線量ゆらぎ、高速フーリエ変換より WS 値を求める計算過程を示す、ワークシート (大阪大学提供)

図 13 には、計算で得られたデジタルマンモシステム (CR, FPD) の WS の結果を示した。横軸に空間周波数、縦軸にはデジタル WS 値 (mm²) を示す。

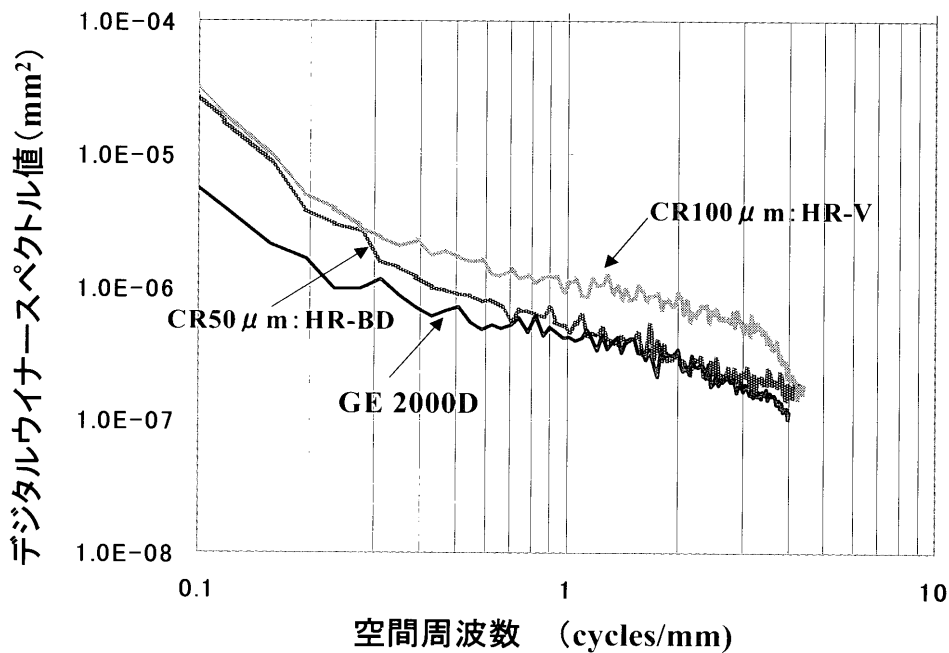


図 13 同一線量における CR およびフルフィールドデジタルマンモシステムの WS の比較

5. まとめ

今回、デジタル画像の画像特性の具体的な測定方法と解析手順を簡便に解説した。MTF を求めるスリット法に関しては、若干の熟練や特殊なツールが必要であるが、デジタルの特性曲線や、デジタルWSはアナログより測定方法や試料作成および手技は簡便である。最近、MTFに関してはアライメントの調整が不要で、撮影が簡便なエッジ法がIEC62220-1¹⁷⁾のrecommendationで推奨されている。この内容や解析方法に関しては、同じデジタル画像研究班の松本政雄（大阪大学）が今回の紙面に詳しく掲載されているので、参照していただきたい。

従来MTFやWSの計算ソフトは、C言語等を用いたプログラミングが主流であった。しかし、作成した本人はその内容や理論を理解しているが、その解析ツール（ソフト）を利用する実験者は、プログラムの内容や理論を理解しないまま、結果のみが得られると言う欠点を有していた。

今回解説した表計算ソフトを用いた解析方法は、今から物理評価を始めた研究者や、卒後新人者用の教育用ツールとして、利用できると考えている。

【参考文献】

- 1) 佐藤昌見, 江口陽一, 山田金一, 他: フラットパネルディテクタシステムの画像評価. 日本放射線技術学会雑誌, 50(1), 68-77, (2000)
- 2) 東田善治: デジタル特性曲線の実践的測定法. INNERSVISION, 18(10), 79-83, (2003)
- 3) Fujita. H, Doi. K, M.L. Giger, et al. : Med. Phys., 13(1), 13-18, (1986)
- 4) 藤田広志, 上田克彦, 藤川津義, 他: 輝尽性蛍光体を用いたコンピューテッドラジオグラフィの解像特性II. デジタル特性曲線とプリサンプリングMTFの測定. 医用画像情報学会雑誌, 5(1), 1-10, (1988)
- 5) Fujita. H., Tsai, D.Y., Itoh, T., et al. : A simple method for determining the modulation transfer function in digital radiography. IEEE TRANS. MED IMAG., 11(1), 34-39, (1992)
- 6) 藤田広志: 医用画像工学. 医用放射線科学講座 第14巻, 医歯薬出版(株), 東京, (1997)
- 7) 柱下淳次: 解像特性(2). デジタル時代の医用画像情報技術セミナー(イメージ評価編). INNERSVISION, 14(12), 81-86, (1999)
- 8) 井手口忠光: 表計算ソフトExcelを用いたプリサンプリングMTFの実践的測定法. INNERSVISION, 18(11), 68-75, (2003)
- 9) 山崎達也: デジタルウィナーズペクトルの実践的測定法. INNERSVISION, 18(12), 40-46, (2003)
- 10) ImageJ : <http://rsb.info.nih.gov/ij/download.html>
- 11) 小寺吉衛: MTFの測定—矩形波チャート法. 画像のものさし(放射線で描く画像の世界7), INNERSVISION, 3(5), 52-56, (1988)
- 12) 小寺吉衛: MTFの測定—スリット法. 画像のものさし(放射線で描く画像の世界8). INNERSVISION,

- 3(7), 60-64, (1988)
- 13) 畑川政勝, 青木雄二, 朝原正喜, 他: 増感紙-フィルム系の MTF 測定におけるスリット法と矩形波チャート法の比較. 日本放射線技術学会雑誌, 52(5), 701-708, (1996)
- 14) 松本政雄: 表計算ソフト Excel を用いたエッジ法によるプリサンプリング MTF の実践的測定法. INNNEVISION, 19(1), 37-43, (2004)
- 15) 内田 勝 監修: デジタル放射線画像. pp. 103-106, オーム社, 東京, (1998)
- 16) 内田 勝 監修: デジタル放射線画像. pp 106-108, オーム社, 東京, (1998)
- 17) IEC 62220-1: Medical electrical equipment -Characteristics of digital X-ray imaging devices- Part 1: Determination of the detective quantum efficiency, ed1.