



# 平滑化した矩形波を用いたコントラスト法によるcomputed radiography (CR)でのpresampled MTF測定

*Measurement of presampled MTFs with computed radiography (CR) by contrast method using smoothed square-wave.*

望月 安雄<sup>1)</sup> (16813) 笠原 良<sup>1,2)</sup> 上田 大輔<sup>1)</sup> 武田 真澄<sup>1)</sup>

1) 日本医療科学大学 医療保健学部 診療放射線学科 2) 柏崎総合医療センター (現)

**Key words:** contrast method, square wave response function (SWRF), presampled MTF, Sampling bin, square -wave chart

## 【Abstract】

The presampled modulation transfer function (MTF) was determined with a computed radiography (CR) system, using the contrast and edge methods.

In the contrast method, the smoothing of profiles presented in a square-wave chart was performed at different effective sampling points, based on the sample theorem. High and low spatial frequencies in each profile were easily measured, and stable presampled MTF performances were achieved for standard (ST) and high quality (HQ) images.

In the edge method, the line spread function (LSF) was extrapolated in an exponential manner until its intensity ratio was 1:1,000, and stable presampled MTF performances were achieved for standard (ST) and high quality (HQ) images. To improve the accuracy of measurements, presampled MTF was determined five times to calculate the mean, and there were no significant differences among the measurements. These results suggest that the contrast method is a simple, excellent method in which samples for the determination of presampled MTF can be easily prepared and the measurement principle can be clearly understood.

## 【要旨】

computed radiography system (CR) を用い、コントラスト法でpresampled MTF (modulation transfer function) 測定を行った。MTF値の比較のためにエッジ法でも測定した。

コントラスト法は、矩形波チャートのprofileをsampling定理に基づき実効sampling distanceの数点でsmoothingした結果、各空間周波数のtopとbottomの読み取りが容易になり、標準画像 (ST) と高精細画像 (HQ) で安定したpresampled MTFが得られた。

エッジ法は、line spread function (LSF) の強度比を1000分の1まで指数関数で外挿した結果、STとHQで安定したpresampled MTFが得られた。

各測定の精度を上げるため5本で平均したpresampled MTF比較では、測定間で有意な差は見られなかった。よってコントラスト法はpresampled MTF測定の試料作成が容易で、測定原理の理解が平易な優れた測定方法である。

## 緒言

近年, digital radiography (DR) システムの computed radiography (CR) や flat panel detector

Yasuo Mochizuki<sup>1)</sup> (16813), Ryo Kasahara<sup>1,2)</sup>  
Daisuke Ueda<sup>1)</sup>, Masumi Takeda<sup>1)</sup>

1) Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Nihon Institute of Medical Science.

2) Now at Kashiwazaki General Hospital and Medical Center.

(FPD) の presampled modulation transfer function (MTF) の測定は, International Electrotechnical Commission (IEC) で推奨しているエッジ法で行われ, 測定技法は Buhr<sup>1)</sup> や Samei<sup>2)</sup> らの詳細な報告がある. また測定デバイスに矩形波チャートを用い, 出力波形の山 (top) と谷 (bottom) のサンプリング点を補正し, 各窓をフーリエ変換して解析的に presampled MTF を求めた報告<sup>3)</sup> もある.

他方, 増感紙-フィルム系 (screen-film system: S/F系) の MTF測定に多用されてきたコントラスト法での presampled MTFの報告<sup>4)</sup> は少ない. コントラスト法は, 矩形波チャートの最小空間周波数のコントラスト値で正規化した, 離散的な矩形波レスポンス関数 (square wave response function: SWRF) によって近似的な方法で MTFを算出する. 従って, 正確なコントラスト値を得るためには, 矩形

波チャートから滑らかなプロファイル像を入手することが重要である。S/F系では、矩形波チャート像のプロファイルを生データの情報量規範を用い、有限フーリエ級数で近似してMTFを算出した報告<sup>5)</sup>がある。しかし、方法が難解なため普及には至らなかった。

今回、デジタル画像装置のRegius 170（コニカミノルタ社製）を用い、矩形波チャートをわずかに傾けて取得した、実効サンプリング間隔が小さい矩形波チャート像のプロファイルを生、標準化定理に基づき単純にサンプリングした数点で平滑化し、その出力波形で山と谷を抽出し、汎用表計算ソフトのエクセル2003によってpresampled MTFを算出した。

本論文は、MTF測定デバイスとして安価で、医用X線画像の解像特性評価として多用されてきた矩形波チャート<sup>3)</sup>を用い、presampled MTF測定を行った。コントラスト法は試料作成や測定法原理が平易である利点を生かし、教育現場や医療現場の日常管理などで測定を実践して、デジタル画像の解像特性の理解につながることを目的として報告する。また本報告はコニカミノルタ社のCR (Regius 170) で、標準画像 (ST: 175 $\mu$ m) と高精細画像 (HQ: 87.5 $\mu$ m) の異なる画素サイズで主 (平行) 走査方向と副 (垂直) 走査方向のpresampled MTFを測定し、結果を示したことも意義が高いと考える。

## 1. presampled MTFの測定

### 1-1 コントラスト法 (チャート像の読み取り方法)

従来、マイクロデントメーターを用いたS/F系での矩形波チャート像の読み取りは、空間周波数の低・中域ではノイズの影響を除くため、おのおのの山や谷で変動部を平均 (中央) した濃度値を用いた。また高周波領域では濃度分布の両端で山や谷が崩れるため、左右の山と谷は省いてコントラストの計算を行ってきた。

CR画像を用いた本法では、取得したプロファイルを生サンプリング定理に基づきサンプリングアパーチャの幅 (仮称: sampling of rectangle filterあるいはsampling binと呼ぶ、以後単にbin) を設定し、bin内のピクセル値を平均して平滑化を行った。binの設定は、ナイキスト周波数の2倍の空間周波数において影響しない範囲で、サンプリング間隔が0.01, 0.02, 0.03mm内にあるピクセル値で平均した。平滑化したプロファイルは、S/F系で見られた山と谷の変動部分のノイズ成分が除去されて、波形の抽出が容

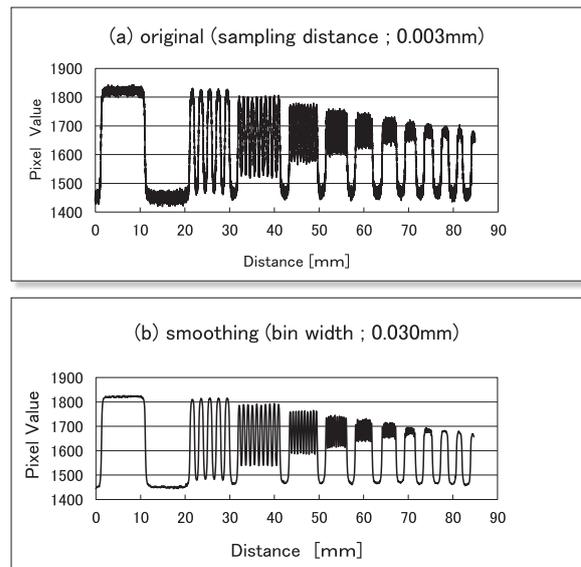


Fig. 1 Composite chart image generated from chart images corresponding to various alignments of the square-wave chart.  
(a): Profile of original data.  
(b): A bin smoothing processing to profile of data

易となった。

Fig. 1に、実効サンプリング間隔が約0.003mmの生データのプロファイル像と、0.030mmのbin内に含まれるピクセル値で平滑化した高精細画像のプロファイルを示す。

実際のコントラストの計算は、空間周波数が0.5cycle/mmでは三つの山と二つの谷を抽出、1.0 cycle/mm以遠の高周波ではS/F系に準じて両側の山と谷を除き、八つの山と七つの谷を抽出したおのおのの山と谷で求めた平均値<sup>6)</sup>によって行った。

### 1-2 コントラスト法での測定

矩形波チャート (極光Type 1: 化成オプトニクス) を輝尽性蛍光体プレート (以下、プレート) に対し2°程度わずかに傾け<sup>4)</sup>、管電圧60kV、管電流100 mA、照射時間25msec、撮影距離200cmで撮影した。DICOMデータは、汎用画像処理ソフトウェア「Image J」を用いて矩形波チャートのデータをパーソナルコンピュータ (PC) に読み込み、CSV形式で保存した。

実効サンプリング間隔は、矩形波チャートの傾きを計測し、 $\tan \theta$ の逆数値からサンプリングの行数を決定した。合成サンプリング法による矩形波チャート像のプロファイルは、エクセルにマクロを組みピクセル値のデータをサンプリングの行数で並び替えて取得した。

並び替えたプロファイルはbinで平滑化し、事前にタイムスケール法と距離法で測定したデジタル特性曲線の傾きの1022を用いて有効露光量変換を行った。各窓のコントラストの計算は、線形化したプロファイルの各空間周波数で山と谷を抽出し行った。次に最小の空間周波数のコントラスト値で各周波数のコントラストを正規化してSWRFを算出し、3次のスプライン関数を用いてSWRF曲線を近似した。そのナイキスト周波数近傍のSWRFから高周波の70cycles/mmまで指数関数で外挿<sup>6)</sup>し、コルトマンの式で第4項まで補正を行いpresampled MTFを取得した。MTF値は、Regius 170のSTとHQのおおのの画素で5回測定し、その平均値で表した。

### 1-3 エッジ法 (フーリエ変換法)

presampled MTFの測定は、タングステン板をプレートに対し約2.0°傾けて配置し、幾何学的な誤差を軽減するため撮影距離は200cm、撮影管電圧はコントラスト法と同じ60kVで撮影<sup>7)</sup>した。mAs値は合成エッジ像のピークがシステムの最高デジタル値の80%程度になるように調整した。エッジ像のDICOMデータは「Image J」を用いてPCにCSV形式で保存した。

高精細画像では、約2.0の $1/\tan \theta$ から1画素内の28本のプロファイルを端から順にマクロによって並び替え、binで実効サンプリング間隔が0.020mmになる1本のピクセル値プロファイルを作成した。次にコントラスト法と同様に、エッジプロファイルをデジタル特性曲線で有効露光量変換を行い、エッジプロファイルを微分してline spread function (LSF)<sup>8)</sup>を取得した。そのLSFをフーリエ変換してpresampled MTFを算出した。実際のエッジ法測定詳細は、汎用表計算による松本<sup>8)</sup>を参照されたい。

エッジ法のpresampled MTFは、コントラスト法と同様に、Regius 170のSTとHQにおいて、おのおので5回測定した。また表計算のエクセル上でのフーリエ変換では、空間周波数間隔がデータ数とサンプリング間隔の積の逆数となるため、任意の空間周波数間隔でMTF値が得られる離散フーリエ変換 (discrete Fourier transform: DFT) で行った。

以上、本報告の試料作成は、全て島津製作所社製のX線発生装置R20で行った。

## 2. 実験結果

### 2-1 コントラスト法でのpresampled MTF

Fig. 2にSTとHQの副走査方向と主走査方向で、矩形波プロファイルのbin幅が0.01, 0.02, 0.03 mmで計算し、各5本を平均したpresampled MTFの結果を示す。

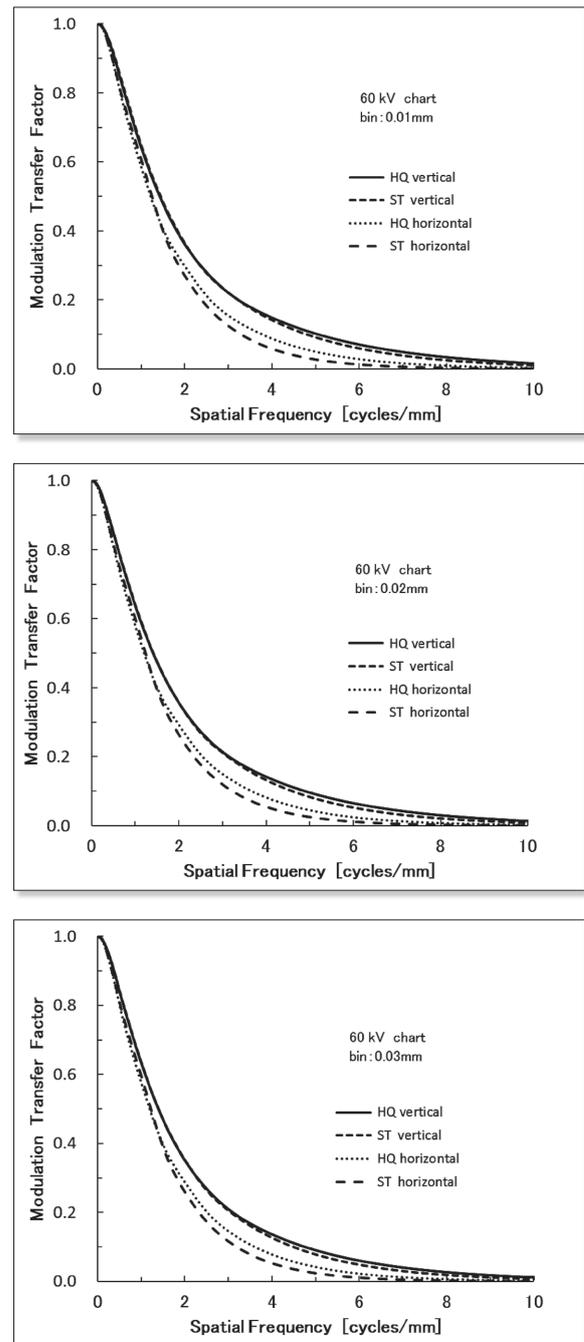


Fig. 2 Presampled MTFs in the horizontal and vertical direction on Standard image (ST) and High quality image (HQ) obtained by contrast method.  
(a) bin with 0.01mm (b) bin with 0.02mm  
(c) bin with 0.03mm

## 2-2 エッジ法でのpresampled MTF

オーバーサンプリングして取得した合成LSFの裾野の強度比0.004~0.0025付近で、グレアと量子化誤差の影響が見られた。そこでS/F系でのトラランケーションエラーの補正に準じて強度比1000分の1まで指数関数で外挿し、そのLSFをフーリエ変換してpresampled MTFを計算した。Fig. 3にbin幅が0.02mmでのSTとHQでの副走査方向と主走査方向のpresampled MTF 5本の平均値を示す。

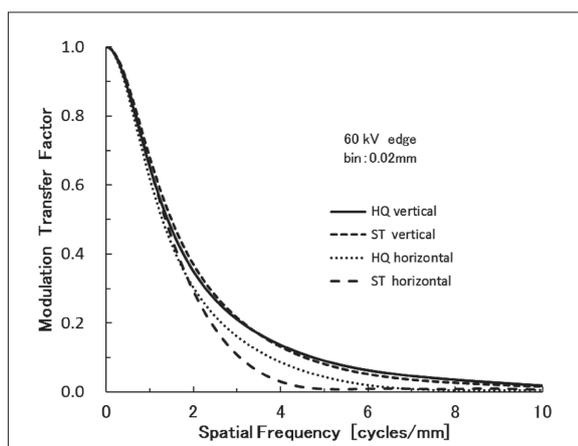


Fig. 3 Presampled MTFs in the horizontal and vertical direction on ST and HQ obtained by edge method.

測定の結果、副走査方向ではコントラスト法とエッジ法共にSTとHQのMTF曲線の形状がほぼ一致した。主走査方向ではHQのMTF曲線がSTのMTFと比較して優れ、特にナイキスト周波数付近でエッジ法での低下が顕著に見られた。

Table 1に空間周波数2.0 cycles/mmでのコントラスト法とエッジ法のMTFの平均値と標準偏差を示す。コントラスト法とエッジ法共にbin幅の増加とともにわずかながらMTF値の低下する傾向が見られる。

method	bin [mm]	MTF			
		vertical		horizontal	
		HQ	ST	HQ	ST
contrast	0.01	0.366 ± 0.0025	0.364 ± 0.0026	0.298 ± 0.0019	0.27 ± 0.0014
	0.02	0.356 ± 0.0009	0.356 ± 0.0012	0.292 ± 0.0013	0.263 ± 0.0010
	0.03	0.351 ± 0.0017	0.353 ± 0.0012	0.288 ± 0.0022	0.256 ± 0.0011
edge	0.01	0.387 ± 0.0155	0.367 ± 0.0223	0.302 ± 0.0083	0.299 ± 0.0177
	0.02	0.349 ± 0.0120	0.369 ± 0.0079	0.291 ± 0.0053	0.292 ± 0.0124
	0.03	0.338 ± 0.0021	0.344 ± 0.0031	0.284 ± 0.0058	0.288 ± 0.0027

Table 1 Average Presampled MTF values at 2 cycles/mm obtained by five different time measurements and their standard deviations for ST and HQ obtained by contrast method and edge method.

## 3. 考 察

デジタル装置のRegius 170を用いてpresampled MTFの測定を行った結果、コントラスト法は、生データの矩形波チャート像のプロファイルをサンプリングアパーチャーの幅(bin)で平均化することで、ノイズなどの影響による特異点のない滑らかな波形が得られた(Fig. 1)。その結果PCに描写したコントラストの計算に用いる山と谷の抽出が容易で、測定者による山や谷などでの検出エラーが減少できると推察できる。現在、当施設ではbinで平滑化した矩形波チャート像をPCに読み取り、花田<sup>5)</sup>と同様に山と谷の抽出やコントラスト法で一連の作業を自動計算してpresampled MTFを取得している。

副走査方向のMTF値は、STのナイキスト周波数付近でHQのMTFと比較し、STがわずかに低い傾向を示した。これはSWRFをコルトマンの補正式でMTFに変換するために、ナイキスト周波数付近(ST: 2.86cycles/mm, HQ: 5.71cycles/mm)で指数関数外挿を行うが、STの外挿が低めに近似されたと推定できる。しかし、bin幅が0.01, 0.02, 0.03mmの全てでMTF形状は類似した。従って副走査方向のpresampled MTFにおいても、STのナイキスト周波数以上の高周波域では、STとHQの画素サイズで差異が生じると推測されるが要因の特定はできていない。

主走査方向のMTF値は副走査方向のMTF値よりも低い。さらに画素サイズが大きい標準画像が高精細画像のMTF値の減少より大きい傾向を示した(Fig. 2~4)。これはCR装置で生データのピクセル値を読み取る際、主走査方向ではエリアシングエラーを回避するため、A/D変換前にローパスフィルター<sup>9)</sup>で、ナイキスト周波数よりも低い周波数に調節されていることが原因だと考えられる。従って副走査方向ではローパスフィルター処理の影響を受けないため、生データを取得する走査方向の違いによりMTF曲線に差異が認められた。

bin幅でMTF値を比較すると、各サンプリングピッチ、各測定方向のどの組み合わせでも、MTF値はbin幅の増加とともに、0.01mm > 0.02mm > 0.03mmと低下した。これはbin幅が大きいほどより多くのデータを平均参照して平滑化するため、高周波域でプロファイルの山や谷の値が損なわれ、binによるノイズの平滑化によって、規格化の周波数に対して他の空間周波数のSWRF値が丸めになったことが原因と考えられる。逆にbin幅が小さいと、平均参照するデ

ータは少なく、プロファイルはあまり損なわれないが、プロファイルのデータ数も多く、ノイズ成分の影響が残り、各周波数の最大X線強度と最小X線強度を抽出してのコントラストの計算は困難で、山と谷のコントラストの計算値は過小評価になる可能性がある。

佐々木<sup>9)</sup>らは、3施設でRegius 170のpresampled MTFをコントラスト法で測定し、空間周波数 2.0 cycles/mmでのMTF値は、今回のbinで平滑化した測定値0.356に比べてわずかに低い0.31が2施設、0.32が1施設と報告している。従ってbin幅の推奨値はエッジ法でサンプリングピッチの10~20%<sup>7)</sup>であることから、画素サイズがSTとHQの両方を含む0.0175mmのbin幅に近い0.020mmのbin幅でのMTF値が、本研究の結果からも信頼性が高いと類推できる。

コントラスト法とエッジ法で得られた平均のMTF値を、パラメトリック法のt-検定を用い、統計的有意差を判定した。STとHQのMTF値は、両側5%のt-検定の結果、主走査方向と副走査方向の全てでP ≤ 2.79で有意差は認められなかった。また5回測定したMTFの平均値は、コントラスト法とエッジ法の空間周波数 2.0cycles/mmでの差分が、最大でも0.032と良い対応を示した (Table 2)。

以上、Regius 170を用いたコントラスト法での空

difference	bin [mm]	MTF			
		vertical		horizontal	
		HQ	ST	HQ	ST
contrast	0.01	-0.021	-0.003	-0.004	-0.029
Subtract	0.02	0.007	-0.013	0.001	-0.029
edge	0.03	0.013	0.009	0.004	-0.032

at 2.0 cycles/mm

Table 2 Difference between MTF values at 2 cycles/mm obtained by contrast method and edge method.

間周波数2.0cycles/mmのpresampled MTF値は、エッジ法の報告で既知のMTF値<sup>7)</sup>と同程度の結果が得られた。また本報告の矩形波プロファイルをbinで平滑化する方法は、空間周波数2.0cycles/mmでのMTF値の標準偏差が最大で0.26% (Table 1)と、走査型濃度計の精度に依存し2~3%程度<sup>11)</sup>の誤差が認められていたS/F系のMTF測定よりも高い再現性が得られる方法である。そしてデジタル画像でのコントラスト法は、プロファイル入手後の一連の作業をPC上で行うことができ、チャート試料の作成 (撮影) や計算が直観的で平易<sup>12)</sup>であることから、デジタル装置の初歩的な解像特性の学習や、装置の日常管理な

どに適した実践的な測定法であることが示された。

## 4. 結 語

CR装置のRegius 170を用い、矩形波チャート像のプロファイルをサンプリング定理に基づき、bin幅が0.01, 0.02, 0.03mmで平滑化して求めたコントラスト法でのpresampled MTF測定の結果、MTF値は比較に用いたエッジ法と同等の値が得られた。

5本のMTF値のバラツキは、標準画像 (ST) と高精細画像 (HQ) とともに空間周波数2.0cycles/mmで、標準偏差が最大で0.26%と、極めて再現性が良好であった。よってコントラスト法は、デジタル装置のpresampled MTFの測定においても、矩形波チャートの撮影など、試料作成が容易で、測定原理の理解も平易で利便な測定方法である。

## 参考文献

- 1) Buhr, E, et al: Accuracy of a simple method for deriving the presampled modulation transfer function of a digital radiographic system from an edge image. Med. Phys, 30,2323-2331, (2003).
- 2) Samel, E, et al: A method for measuring the presampled MTF of digital radiographic system using an edge test device. Med, Phys, 25, 102-113, (1998).
- 3) 市川勝弘, 他: 矩形波チャート像のフーリエ変換によるプリサンプリングMTFの新しい測定法. 日放技学誌, 58(9), 1261-1267, (2002).
- 4) 望月安雄, 他: 矩形波チャートを用いたコントラスト法でのプリサンプリングMTFの簡易測定. 日放技学誌, 61(9), 13551-1357, (2005).
- 5) 花田博之: チャート濃度の計算機による読み取り情報量基準を用いた有限フーリエ級数によるチャート像の測定. 放射線医学物理, 16(3), 129-137, 1996.
- 6) 小寺吉衛: 画像のものさしIV 放射線で描く画像の世界 MTFの測定—矩形波チャート法— INNERVISION. 3-5, 52~56, (1988).
- 7) 東出 了, 他: エッジ法によるpresampled MTFの簡便な解析方法の提案と検証. 日本放射線技術学会雑誌, 64(4), 417-425, (2008).
- 8) 松本政雄: 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. 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2), INNERVISION. 19-1, 37-43, (2004).
- 9) 佐藤昌美, 他: フラットパネルディテクタシステムの画像評価. 日放技学誌, 57(1), 68-77, (2001).
- 10) 佐々木喬, 他: CRシステムの絶対感度測定 (第2法). 日放技学誌東北部会誌, Vol 14, 210-212, 2005.
- 11) Junji Morishita, et al: Comparison of two methods for accurate measurement of modulation transfer functions of screen-film systems. Med, Phys, 22(2), 193-200, (1995)
- 12) 望月安雄, 他: イメージ・ディジタイザを用いたX線TVのデジタル画像解析. 日放技学誌, 51(11), 1635-1640, (1995).