

AN05: 高解像度CMOSイメージングデテクター

Thorsten Graeve and Gene P. Weckler
Rad-icon Imaging Corp.

要約

デジタルX線撮影専用設計された2.5cmX5cm、512X1024ピクセルのCMOSフォトダイオードアレイデテクターについて説明します。スキャンと読み出しに必要な電子回路はすべてデテクター内に集積化されています。48 μ mという微小なピクセル間隔によって、このイメージャーは造影剤使用の乳房X線撮影アプリケーションに必要な10 lp/mmという解像度を容易に達成しています。シンチレーターとの直接結合と80%以上のピクセル充填係数によって広範な露光値にわたって高いDQEを維持しています。このデテクターは、暗電流が室温で約30pA/と非常に低いので、低ノイズの動作と長い積算時間が可能になっています。200エレクトロンrms以下の読み出しノイズと 2.8×10^6 エレクトロンの飽和レベルが合わさって80dB以上の広いダイナミックレンジを実現しています。デテクターの変換ゲインは0.5 V/e⁻エレクトロンです。このイメージャーは、Gd202Sシンチレーターと組み合わせて、10 lp/mmで25%までのMTFと50%のDC検出量子効果を達成しています。デテクターの設計は10kVから50kVのX線エネルギー用に最適化されていますが、別のシンチレータースクリーンを用いて、160kVまでの広範なイメージングアプリケーションに適用できるように改造できます。

キーワード: CMOSデテクター、フォトダイオードアレイ、アクティブピクセルセンサー、X線イメージング、デジタルX線撮影

1. はじめに

デジタルX線撮影用のイメージングデテクターは、ここ数年のうちに成熟を遂げました。一般のX線撮影用の広域フラットパネルデテクターはもとより、デジタル乳房X線撮影用の高解像度デテクターも熱心に研究されてきました。このようなシステムは、通常は5ないし10 lp/mmの解像度を必要とし、特定の観察領域のイメージング用に設計されたより小さい入力ウィンドウを備えていることが多くあります。こうした研究には、非晶質シリコンあるいは非晶質セレンウムのフラットパネルデテクターを扱っているものもありますが、現在までのほとんどのシステムは、レンズ結合あるいは光ファイバケーブルによる入力燐光体スクリーン結合の電荷結合素子(CCD)センサーを備えたものです。これら2つの方法の利点を比較対照した研究もいくつかあります。

非晶質シリコンイメージャーは、各ピクセルに薄膜トランジスタ(TFT)読み出しスイッチを備えたフォトダイオードアレイです。薄膜技術によって(40cmまでの)非常に広いイメージング領域が可能になりました。非晶質シリコンには非常に高い放射線耐性という利点

もあります。けれども非晶質シリコン半導体の特性が理想どおりとはいかないので、解像度（一般に少なくとも100 ピクセルサイズ）と性能（特に目立つのがノイズと画像のずれ）には限度があります。さらに非晶質シリコンイメージャーは、専用の工場設備での特殊な製造工程が要求されるので、競合する技術よりも製造と開発に費用がかかります。

CCDイメージャーは高性能光学イメージング技術の主流になりました。CCDは、非晶質シリコンパネルやCMOSイメージャーのようなマトリックスタイプのイメージャーとは異なって、シリコン基板で電荷パケットを移動させて信号を読み出します。高解像度、低ノイズ、高感度という長所があります。デジタルX線撮影では、視野を広げるとともにCCDを放射線による損傷から保護する光ファイバテーパと結合させるのが一般的です。CCDは放射線による損傷を非常に受けやすいので、テーパを付けてシールドングをしても、低エネルギー（一般に50kV以下）のX線イメージングアプリケーションでしか使用できません。非晶質シリコンのように、製造には特殊な工程が必要とされるので、開発費用は高くなります。光ファイバテーパも高価で、CCDチップとの結合は難しく、結合した場合にCCDの感度は著しく悪化します。

CMOSイメージャーも非晶質シリコンパネルのように、マトリックスタイプのフォトダイオードアレイです。ところが高度に発達した工業インフラ 半導体産業 のおかげで、マイクロプロセッサやロジックアレイを製造するのと同じ製造工程と設備を使用できます。言い換えると、IC産業はすでに技術開発と製造設備の元を取ってしまい、さらにまだ続いているということになります。現在では狭いライン幅の処理によってピクセル単位で特性を操作できるようになり、CMOSアレイの性能は著しく向上しています。ノイズレベルはCCDに匹敵するほどになり、CMOSイメージャーの飽和能力は通常はCCDの数倍あります。さらに、CMOSテクノロジーによって、イメージング、タイミング、読み出しという機能をすべて同一の素子上にまとめることができます。高集積の構造によって「オンチップシステム」の設計が可能になり、大量の補助電子回路を必要とするイメージャーよりもかなり低価格になっています。

ラドアイコンイメージング社は、デジタルX線撮影用のデテクターの開発にCMOSテクノロジーの利点を生かして、ラドアイ1 CMOSイメージセンサーを開発しました。ピクセルサイズと有効領域は、特に乳房X線撮影や同様のバイオプシーアプリケーション用に設計されています。現在のCMOSテクノロジーによって、デテクターはシンチレーターと直接接触するように十分大きく作れるので、信号損失や、レンズ結合や光ファイバテーパに関係するほかの問題を避けることができます。素子の読み出しノイズは非晶質シリコンパネルよりも1桁近く低いので、X線エネルギーが小さい場合でもフォトンノイズを制限することができます。次節では、光の特性、暗電流、MTF、DQEに関してこのデテクターの特徴を詳しく説明して、アプリケーションの可能性を示すためにイメージングの例を多数挙げます。

2. 解説

図1に示したラドアイ1イメージセンサーは、CMOS構造体と2次元配列のフォトダイオードという構成でスキャンと読み出しを行っています。24.6mmX49.2mmの有効面積は48 m spacingの512X1024のフォトダイオードマトリクスで構成されています。サポートとコントロールの機能はすべて集積回路に収められています。素子は3面取り付け可能なので、複数のセンサーを貼り付けてより広い画像領域を実現できます。

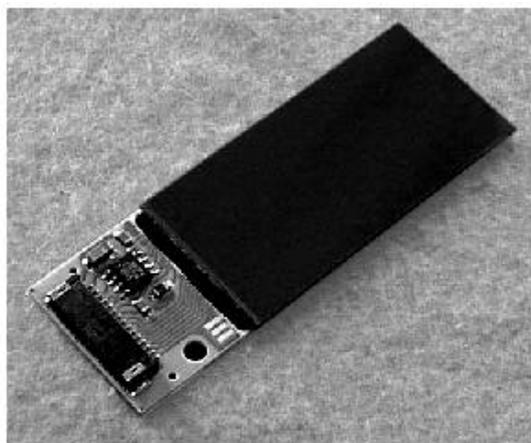


Figure 1a – RadEye1 CMOS image sensor.

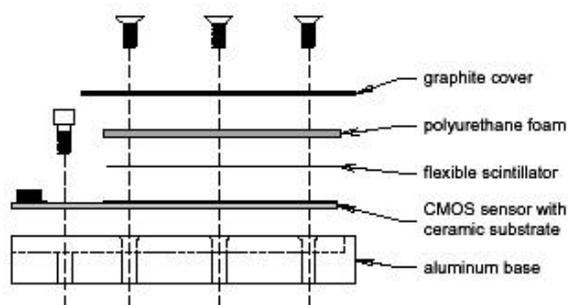


Figure 1b – Cross section with scintillator.

図2には製品の仕様をまとめてあります。ラドアイ1デテクターは、300万エレクトロン近くの大きな飽和信号能力がありますが、ダークノイズは200エレクトロン以下になっています。結果として、ダイナミックレンジは83dB(14,000:1)を超えています。室温でピクセル当たりの暗電流は10,000エレクトロン/秒以下で、素子を飽和させることなく数十秒の積算時間が可能になっています。リアルタイムに近いアプリケーション用に、最大読み出しレートは2.5MHzで、最大4.5フレーム/秒で動作可能です。

ラドアイ1には、スタンダード出力モード、非破壊読み出しモード、1行1列おきにサンプリングする高速低解像度間引きサンプリングモードといった、いくつかのイメージングモードがあります。一番単純な読み出しモードでは、5Vの電源のみを使用し、素子から連続的にフレームを出力するの

に参照電圧と外部ピクセルクロックを必要とします。フレームレートは、ピクセルクロックの周波数を調整するか、各読み出し過程の開始にトリガーをかける外部スタートパルス

Dark Current (each pixel)	< 10 ⁴ electrons/sec
Read Noise (at 1 fps)	< 200 electrons
Saturation	2,800,000 electrons
Dynamic Range	> 10,000:1
Frame Rate	0.01 to 4.5 fps
Max. Data Rate	2.5 MHz
Conversion Gain	0.5 μ V/electron
Supply Voltage (VDD)	5 V (\pm 0.25 V)
Supply Current	25 mA (typ)
Reference Voltage (VD)	3.8 V (\pm 0.5 V)
Analog Output +	2 V (dark) to 2.7 V (sat)
Analog Output -	2 V (dark) to 1.3 V (sat)
Digital "low" Voltage	0.5 V max.
Digital "high" Voltage	4.5 V min.
Operating Temperature	0 to 50 °C
Storage Temperature	-25 to +85 °C

Figure 2 – RadEye1 Specifications.

を供給することによってコントロールできます。さらにコントロール入力を追加して、デテクターとX線源を同期させることができるようにし、読み出し過程の融通性を高めています。

ラドアイ1イメージャーは、それだけで可視光デテクターとして用いることも、シンチレーターを直結してX線デテクターとして用いることもできます。素子の面積が広いので、デテクターに光ファイバプレートや同様の硬くて曲がらないシンチレーターモジュールを結合するのは困難です。裏が曲げやすいプラスチックになっているシンチレーターや直接取り付けのシンチレーターによって、結合の均一性と解像度について最良の結果が得られます。この研究では、ラドアイ1イメージャーは、可視光を用いるか、有効領域に直結して曲げやすい希土類シンチレータースクリーン(Gd₂O₂S:Tb)を用いてテストしました。シンチレーターは薄いポリウレタンホーム層を用いて圧迫してデテクターに固着させ、厚さが1mmのグラファイトのカバーで覆っています(図1bを参照)。接着剤は用いていません。

ラドアイ1の有効面積は素子の3面の縁から50 μmのところまで広がっています。これによってデテクターをモザイク上に貼り付けて、各モジュール間の隙間が2ピクセルだけになるより大きなセンサーを構成できます。2つのモジュールを結合すると有効面積は5cmX5cmになり、これはすでに製品化されています。4つを結合したもっと大きなもの(5cmX10cm)や、さらにそれを2つ結合したもの(10cmX10cm)も可能です。モザイク内のすべてのモジュールは平行に動作するので、イメージャーの蓄積データレートは向上し、フレームレートはラドアイ1モジュールを1個用いた場合と同じになります。

3. 測定

ラドアイ1素子を可視光イメージャーとして用いた場合と、様々なシンチレーターと結合してX線イメージセンサーとして用いた場合の両方について、動作特性を徹底的に検証しました。光の測定については、センサーをパルス状の緑色のLED光源で照らしました。タイミングパルスの発生とセンサーからのアナログ信号の取り込みには12ビットのデータ取り込みボード(National Instruments PCI-6111E)を使用しました。X線測定は、ラドアイ1センサーを、ラドアイコンイメージング社の製品であるシャドボックスカメラに装着して行いました。このカメラも出力ビデオを12ビットにデジタル化して、デジタルフレームグラバーを介してコンピュータに画像データを転送します。取り込まれた画像データは250 V/ADのカメラゲインで割って、信号をラドアイ1センサーの出力に参照しました。測定に用いたX線源は、タングステンターゲットと0.5mmアルミニウム濾過装置を備えたOxford XTC5010です。ほとんどの測定はX線源を30kVに設定して行いました。

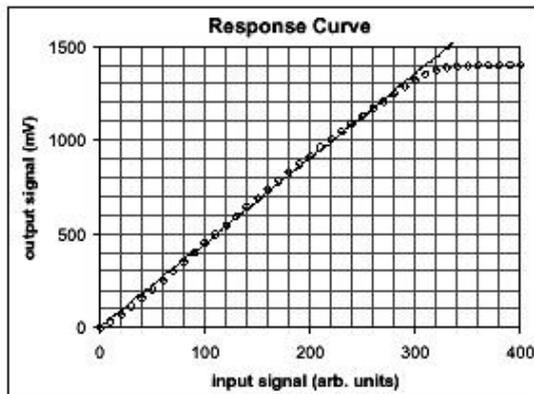


Figure 3 - RadEye1 response to visible light (pulsed green LED).

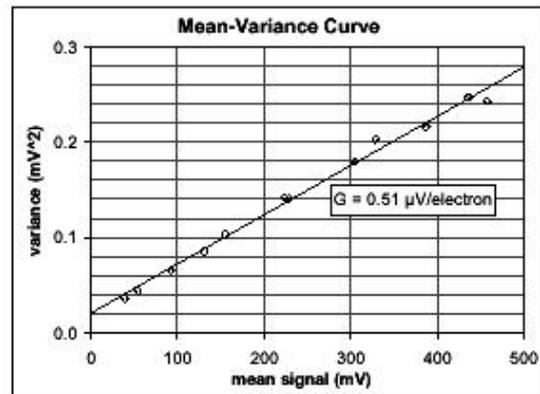


Figure 4 - Mean-variance curve for visible light input (pulsed green LED).

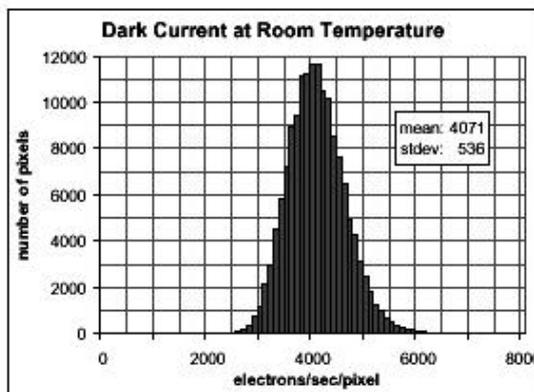


Figure 5 - Dark current distribution at 23°C. The mean dark current corresponds to approximately 30 pA/cm².

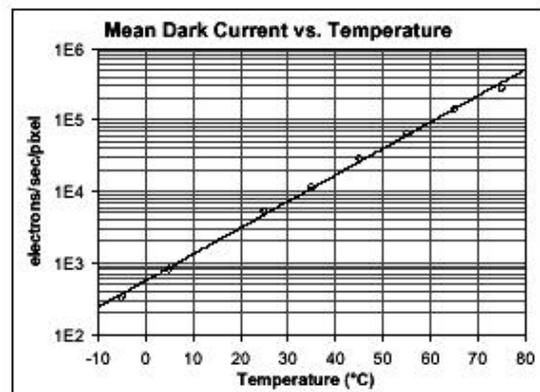


Figure 6 - Dark current as a function of substrate temperature. The dark current doubles every 8°C.

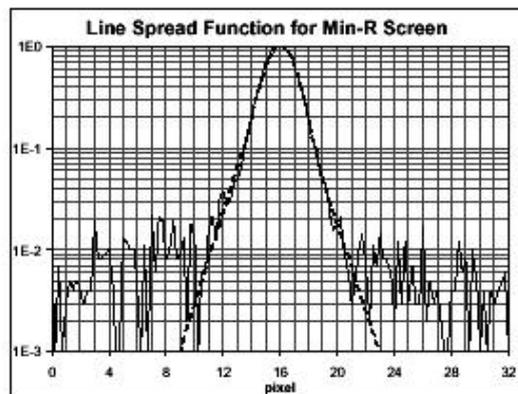


Figure 7 - Normalized LSF from step image with 4 times oversampling. Dashed lines indicate the extrapolated tails.

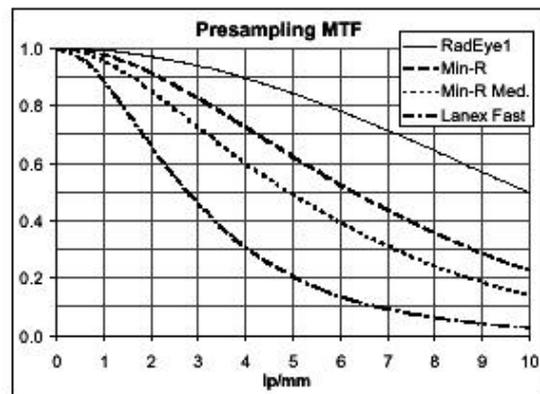


Figure 8 - Presampling MTF for the bare RadEye1 detector and with three different Gd₂O₃S scintillators.

3.1. 光反応とダイナミックレンジ

ラドアイ1センサーの光反応は、センサーからの出力信号が横ばい状態になるまで、輝く緑色のLEDのパルス幅を徐々に増やして測定しました。イメージャーは列の順にスキャンされるので、光のパルスはフレーム読み出しの間のプランク期間中に落ち込むようにして、すべてのピクセルが同じように輝くようにしました。それから出力信号を小さな100x100ピクセルの観察領域(ROI)にわたって平均化して、照明の非均一性の影響が最小限になるよう

にしました。図3は、結果として得られた反応曲線を示しています。入力信号は任意に調整したものではないことに注意してください。たとえばLEDの発熱に起因するような光のパルスのわずかな変動は修正していません。

ラドアイ1デテクターの変換ゲインは、よく知られた平方偏差法を用いて測定しました。LEDの照度の範囲で連続して2回の露光を行い、200x200ピクセルのROIにわたって平均化を行って平均信号を求めました。次に固定パターンオフセットを除くために同じROIにわたる差分画像から各信号レベルの平方偏差を計算しました。結果を図4に示しています。

3.2. 暗電流

暗電流は、通常の1秒と5秒の積算時間で2つのダーク露光を行って測定しました。2つの画像の差分を、積算時間の差と変換ゲインで割って、各ピクセルの暗電流をエレクトロン/秒で算出しました。図5はラドアイ1センサーの室温での暗電流測定値の分布を示しています。平均暗電流は4000エレクトロン/秒をわずかに上回り、約30pA/cm²に相当します。図6は、素子の動作範囲にわたる温度の変化による平均暗電流の変化を示しています。データは幾何級数的に変化して、暗電流が8.1°Cごとに2倍になることを示しています。

3.3. 変調転送機能 (MTF)

ラドアイ1イメージャーのMTFは、ジュディおよびライエンバツハ両氏が発表した方法を用いて測定しました。行の方向にわずかに傾いた直線状のセラミックエッジをX線ビームの中に置いて、階段関数の画像を得ました。ラインスプレッド機能(LSF)は、各列を1ピクセルの何分の1かずらしてエッジの場所に並べてから、多数の列について平均化し、結果を

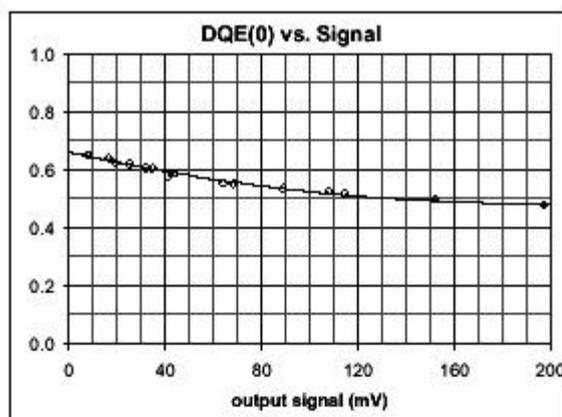


Figure 9 – DQE(0) as calculated from the image mean and variance, and the estimated quantum fluence.

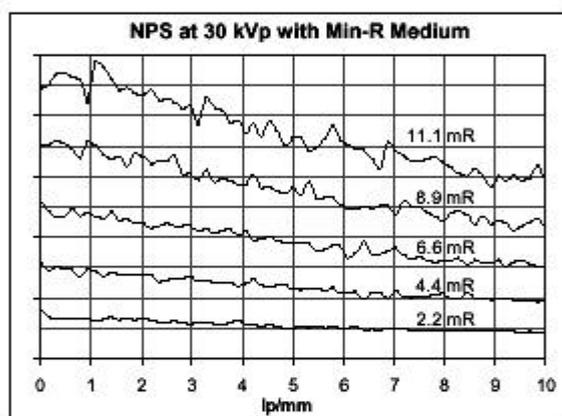


Figure 10 – NPS at different exposure levels.

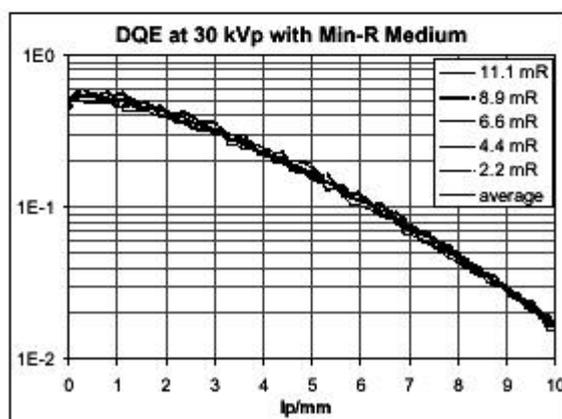


Figure 11 – Frequency-dependent DQE from equation (2), using data from Figures 8 and 10.

微分して得ました。LSFの端は指数関数に沿って検出システムのノイズフロアーにまで伸ばしました。これはいずれも、結果として生じるMTF曲線をなめらかにし、ノイズフロアーでLSFが切り捨てられることによって生じる不自然さをなくすことに役立ちました。正規化したラインスプレッド機能と補外した端の部分を図7に示しています。LSFのフーリエ変換係数から事前サンプリングした変調転送機能が得られます。図8は(シリコンのX線の直接検出を用いて測定した)ラドアイ1デテクター自体とイメージャーに直接結合した3種類のシンチレーターの事前サンプリングMTFを示しています。センサーの列と行の方向に沿って測定したMTF曲線にはどんな差も認められませんでした。

3.4. 検出量子効果(DQE)

ラドアイ1のDQEは、Min-R Mediumシンチレーターを用いて、直流および空間周波数の関数として計算しました。直流の場合は以下の式になります。

$$DQE(0) = (V_{out}^2 / s^2) \cdot 1/q = G^2 \cdot q / s^2 \quad (1)$$

Gは平均変換ゲインで単位はmV/photonか単にVout/q; qは1回の積算期間中のデテクター上のピクセル当たりのX線フォトン数; s^2 は出力信号の平方偏差です。Voutと s^2 は、露光レベルを様々に変えて撮影したX線画像から直接測定しました。量子フルエンスqは、公表されているX線放出スペクトルの表に基づいて推定しました。図9は、いくつかの信号レベルで計算したDQE(0)のグラフを示しています。

DQE(f)を計算するには、ノイズパワースペクトル(NPS)を知る必要があります。このNPSは、1つの次元に沿って直接フーリエ変換法を適用して、さらにほかの次元に沿って平均化することによって、画像データから得ました。図10は、いくつかの露光レベルで得られたグラフを示しています。そうするとDQEは次の式から得られます。

$$DQE(f) = G^2 \cdot q \cdot MTF^2(f) / NPS(f) \quad (2)$$

図11は、結果として得られたDQE(f)のグラフを示しています。

4. 考察

4.1. 光反応とダイナミックレンジ

図3は、ラドアイ1センサーの光反応を示しています。ラドアイ1素子は電圧ピックアップ方式を用いているので、本来的に信号の反応は電荷読み出し素子ほどリニアにはなりません。けれども電圧ピックアップ回路には、低ノイズ、広いダイナミックレンジ、より速い読み出し速度といった利点があります。図3は、飽和信号には、理想的にリニアな反応曲線からの1%までのわずかなずれがあることを示しています。デテクターは約1400mVつまり 2.8×10^6 エレクトロンで飽和します。

ラドアイ1デテクターの検出および読み出しの回路は、約0.15pFのピクセル容量とピクセルから出力まで約0.51V/Vの総電圧ゲインを用いています。したがって理論上の変換ゲイン

は0.54 V/electroになります。ポアソン統計とフォトンノイズを制限する操作を前提として、図4の平方偏差のグラフの傾きはデテクターの変換ゲインの逆数に等しくなります。グラフから実際の変換ゲインは0.51 V/electroであると計算しました。図3の反応曲線に見られるゲインのわずかな非均一性は、このグラフでもわかります。平方偏差のグラフのy切片で与えられる推定のrmsダークノイズは280エレクトロンと計算されます。この数値には、このテストに用いたデータ取り込みシステムの読み出しノイズも加わっています。このノイズを控除することによって、ラドアイ1デテクターに固有のダークノイズは200エレクトロン以下であると推定されます。

4.2. 変調転送機能

図8に見られるように、直接的X線デテクターとしてのラドアイ1イメージャー単体の事前サンプリングMTFは、理論上の最大値に非常に近くなっています。コダックMin-R RegularとMin-R Mediumスクリーンのいずれも非常によい結果をもたらしています（この研究では、もっと新しいMin-R 2000とMin-R 2190スクリーンは使用できませんでした）。ところが、Lanex Fastスクリーンでは明らかにデテクター本来の高解像度が生かされていません。

より低い空間周波数に対してグラフがわずかにそれる傾向のある事前サンプリングMTF曲線を決めるのに指数関数外挿法を用いました。ノイズフロアを除くことによって、結果として得られたMTF曲線は、低い空間周波数では高く、遮断周波数ではわずかに低くなっています。あいにく、MTFの計算用のエッジ画像を取り込むのに用いた露光は比較的短いものでした。結果としてLSFのグラフは、実用ダイナミックレンジが100:1ほどにしかありません。ラドアイ1のダイナミックレンジを十分に生かしたコントラストの高い露出を用いると、もっと正確な推定ができます。図8の曲線の推定エラーは約±5%になります。

4.3. 検出量子効果

式(1)を用いてDQE(0)を推定することには、3つの関連したパラメーターのうち2つを、デテクターがもたらす出力画像から直接測定できるという利点があります。あいにく、これには推定が困難なパラメーター q つまり量子フルエンスを知る必要があります。Qを計算できるX線放出スペクトルの表が文献にはありますが、これらの数値は、X線源の実際のkVpと使用される濾過装置のタイプと規模に大きく左右されます。したがって図9と図11のデータは推定値でしかありません。

図9には、予想に反した興味深いデータが見られ、このデテクターのDQE(0)が一定ではなくデテクターの信号によって変わることが示されています。積算時間を増やすことによってだけでなく、フォトンの流量を変える（つまりX線管のmAを増加させる）ことによってデテクターの信号を変えても、この傾向は続きます。この現象は、ダイナミックレンジの最初の20%をわずかに増加させるデテクターのゲインの変化に関係していると考えられます。

DQE(0)を推定する別の方法が、西川氏らによって発表されています。デテクターが問題となるほどのノイズを加えない(つまりシステムにはフォトンノイズしかない)と仮定すると、DQE(0)は、AQつまり検出システムの量子効果の結果と、ASつまり燐光体スクリーンのスワック係数によって与えられます。プラスチックの裏板とグラフィートの保護カバーによる吸収に加えてMin-R Mediumスクリーンの有効層の厚さを考慮すると、ラドアイ1システムのAQは30kVpで約65%になります。Min-R Mediumのスワック係数の妥当な推定値は0.8です。これで理論上のDQE(0)は52%になり、実測値に非常に近くなります。

図10のノイズパワースペクトルは、明らかに露光レベルに関係していますが、MTFのグラフから予想されるほど急速には周波数とともに落ち込んでいません。結果として、対応する図11のDQE曲線はデテクターの遮断周波数で2%しか落ち込んでいません。これは、デテクターのシリコン基板でのX線の直接吸収に起因すると考えられます。入射するフォトンのうちわずかのものが燐光体の層を通過してデテクターのシリコン基板に吸収されます。これらのフォトンには信号全体に加わりますが、これらのフォトンは1つ当たり、シンチレータに吸収されるフォトンよりも多くの電子を発生させるので、信号対ノイズ比には逆の影響を与えます。この結果、高周波数のノイズパワーが増大します。なぜなら、直接吸収されるフォトンのMTFは、10 lp/mmでMin-R MediumのMTFの3倍以上になるデテクター単体のMTFになるからです。ほかに考えられる誤差の原因は、測定されるROIにわたるゲイン変動やX線強度の変化による画像の非均一性がNPS曲線で補正されていないことです。NPS曲線には通常ゆるやかな揺らぎがあるので、低い空間周波数でDQEが減少する傾向があります。

5. アプリケーション

ラドアイ1デテクターの一般的なアプリケーションには、乳房X線撮影(針生検)、微小血管撮影、骨組織密度撮影、歯科医療撮影などがあります。現在の検出領域は、どのようなアプリケーションにも対応できるほど大きくはありませんが、観察領域を限った高解像度のイメージングには十分です。これらのアプリケーションのほとんどには、ラドアイ1イメージャーを2個貼り付けた5cmX5cmのデテクターが用いられています。

図12は、30 ㎍の鉛箔でできた解像度パターンを示しています(Nuclear Associates P/N 07-539)。この画像はMin-R Mediumスクリーンを用いて50kVpで撮影されました。画像に挿入された部分を見ると、10 lp/mmまでにわたって鉛バーのコントラストが一様によいことがわかります。画像の中央には、鉛バー間にわずかな不連続が見られます。ここが2つのラドアイ1センサーの間の隙間がある個所です。この装置に比較的大きな隙間(~200 ㎍)があるために、その隙間を横切る線的な特徴がわずかにずれますが、これはイメージングソフトウェアの隙間補正アルゴリズムが隙間の調整を2ピクセル分にしているためです。次世代のセンサーでは隙間が100 ㎍に減らされるので、この問題もなくなります。

図13は、Min-R Mediumスクリーン(50mR露光)を用いた30kVpでの生物標本の例を示しています。骨格の細部も柔組織の特徴のいくつかも画像で認識できます。

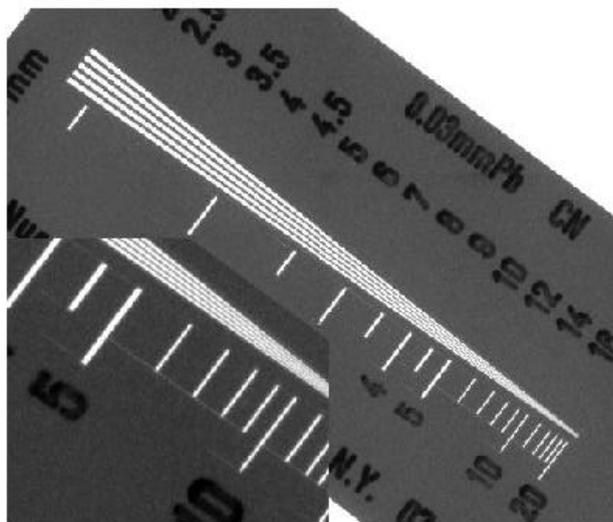


Figure 12 – Resolution pattern (50 kVp, Min-R Medium).



Figure 13 – Biological specimen (30 kVp, Min-R Medium).

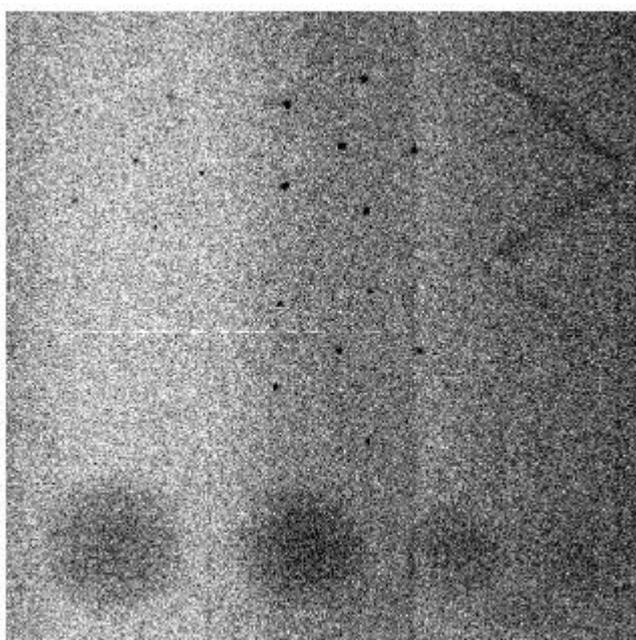


Figure 14 – ACR accreditation phantom for stereotactic breast biopsy.

最後に図14は、定位固定胸部バイオプシーのACR認可ファントムの画像を示しています(Nuclear Associates P/N 18-250)。

この画像は、タングステンターゲットのX線源を用いて25kVp、10mAsで撮影し、125 μmのベリリウムウィンドウと35cmのエアパス以外に濾過装置は用いていません。このスペクトルは一般の乳房X線撮影のスペクトルよりも強力で、実際にこのファントム用には最適化されていません。それにもかかわらず、画像内の問題のある特徴をす

べて識別することができます。目に見える3つの斑点群は0.24mmから0.54mmにわたっています。4つ目の0.20mmの斑点群はノイズフロアで見えなくなっています。同様に、直径が0.54、0.74、0.93mmの3つの最大の繊維が画像の右部分に見られますが、4つ目の直径が0.32mmの繊維は識別するのにコントラストが十分ではありません。厚さが0.25mmから1mmにわたるこのファントムの4つの塊体はすべて画像の下部に見えます。画像の左から右へ濃淡がわずかに変化しているのは、イメージャーのゲイン補正が非均一であるためです。

6. まとめ

ピクセルサイズを小さくしてイメージャーのサイズをさらに小さくしようとする場合にCMOS設計者がぶつかる難題を扱った多くの研究があります。ラドアイ1イメージャーのようにイメージャーのサイズを大きくしようとする場合にも、それとは違って同様にわかりにくい問題があって、解決が必要になります。この論文で述べた結果から明らかのように、ラドアイコンはそのような問題をうまく解決しました。ここで示した性能に関するデータは、競合する多くの技術に関するデータよりも優れていないとしても、それらに匹敵するものです。CMOSイメージセンサーが、より高度の集積化、より低い製造コスト、より簡単なパッケージングという要求を満たすことにより、同じアプリケーション用に、低価格、軽量のイメージング製品を開発することは可能です。

ラドアイの設計理念を推し進めて将来さらに大きなCMOSイメージャーを開発することも可能です。CMOSテクノロジーは発展を続けていて、ウェーハのサイズはしだいに大きくなっています。6インチサイズのウェーハでは、長さ100mmまでのイメージセンサーが可能で、組み合わせると幅20cmまでの画像領域を形成できます。近いうちにもっと広く用いられるようになる8インチのウェーハと、発売され始めた12インチのウェーハでは、より大きな素子が可能になり、画像領域は30-40cmまでになります。IC業界はこの技術の開発に資金を投入し続けていて、状況は常に進歩しているので、CMOSテクノロジーはデジタルX線撮影の将来を担っています。