

AN07: シャドボックスカメラ用シンチレーターオプション

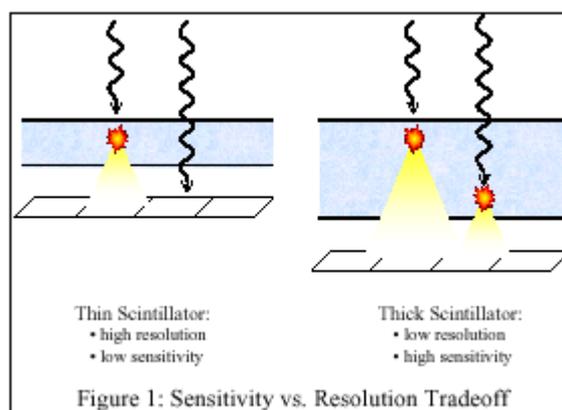
はじめに

デジタル・イメージング・デテクターには、X線放射を可視光あるいは電荷に直接変換するために様々な検出用素材が使用されます。アモルファスシリコンフラットパネル、CCDおよびCMOSフォトダイオードアレイのような多数のデテクターは、X線を可視光に変換するために、シンチレータースクリーンを組み込みます。シンチレーター内の蛍光によって放射された光は、デテクターに吸収されて電子的な画像に変換されます。デテクターには、感度や特定のアプリケーション用の解像度を最適化するために異なったシンチレーターを装備できるものがあります。特に、シャドボックス・デジタルX線カメラは、特定のエネルギー範囲や解像度の条件を満たすために製造時に異なったシンチレーターオプションを選択して装備することができます。

この資料は、シャドボックスカメラに利用可能な3種類のシンチレータースクリーンを比較したものです。スタンダードモデルのシャドボックスカメラとEV(電圧範囲拡張)モデルの両方を比較に使用しています。検討するX線エネルギー範囲を30~120 kVpとし、また、デテクターを、感度、解像度、信号対ノイズ比の点からテストしています。結果をグラフと表で示して、ユーザーがどのカメラとシンチレーターを使用すればアプリケーションに最適かを決めるのに役立つ情報を提供しています。

シンチレーターの概要

テルビウム($Gd_2O_2S:Tb$ あるいは単にGadox)でドープされたガドリニウム酸硫酸物は、投射X線エネルギー当たりの光出力の点から実用上特に効率的なシンチレーターのうちの1つです。さらに、原子番号が大きく高密度のために、X線を効率的に吸収します。主な欠点は、圧縮パウダーとして生成されるために、X線によって生成されたどの光も、デテクターに達する前に急速に散乱して広がることです。厚いGadoxスクリーンは、高エネルギーのX線をよく吸収しますが、ぼやけも強まるので、高解像度イメージングには使用できません。他方、もっと薄いスクリーンは、特に高エネルギーで入射するX線を大部分吸収しないので、感度が弱くなって信号対ノイズ比が低下します。図1はこのことを示しています。



性能の比較

この研究では、プラスチックを基材とした柔軟なシートの形で実用上利用可能な3種類のGadoxスクリーン、つまりLanex Fine、Min-R Medium、Lanex Fastを検討しています(いずれも製造メーカーはコダックです)。蛍光スクリーンからの光出力を捕らえるために、シャドボックス1024デジタルX線カメラ内部のRadEye2 CMOSフォトダイオード・デテクターを使用しています。シャドボックスカメラのスタンダードモデルを使用して、30、50、80 kVpの設定でスクリーンをテストしていますが、さらに、80および120 kVpの設定ではEVモデルを使用しています。80kVpの設定は、スタンダードシャドボックスカメラで推奨している動作範囲から外れていますが、このエネルギーを設定することで2種類のカメラモデルを直接比較した結果を提供することにしました。これらのテストには、最小限のフィルターを備えたスタンダードタングステンターゲットX線源を使用しています。

感度

デジタルX線カメラの感度は、(1)シンチレータに吸収されるX線フォトン割合、(2)吸収された各フォトンごとにスクリーンによって生成される光の量、(3)光を集めて電荷または電圧へ変換するデテクターの効率で表されます。

Table 1 – Average Sensitivity (ADU/mR).

kVp	Camera	Lanex Fine	Min-R Medium	Lanex Fast
30	Std.	11	23	41
50	Std.	18	32	73
80	Std.	31	60	266
80	EV	18	33	161
120	EV	27	45	189

Table 2 – Signal-to-Noise Ratio at 1000 ADU.

kVp	Camera	Lanex Fine	Min-R Medium	Lanex Fast
30	Std.	48	63	263
50	Std.	43	53	169
80	Std.	34	46	120
80	EV	114	136	305
120	EV	98	115	255

Table 3 – MTF at 7.5 lp/mm.

kVp	Camera	Lanex Fine	Min-R Medium	Lanex Fast
30	Std.	0.37	0.30	0.09
50	Std.	0.38	0.31	0.10
80	Std.	0.37	0.31	0.11
80	EV	0.29	0.25	0.10
120	EV	0.30	0.24	0.10

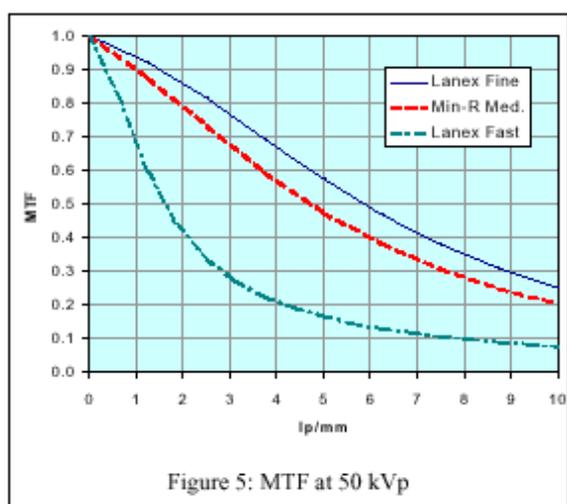


Figure 5: MTF at 50 kVp

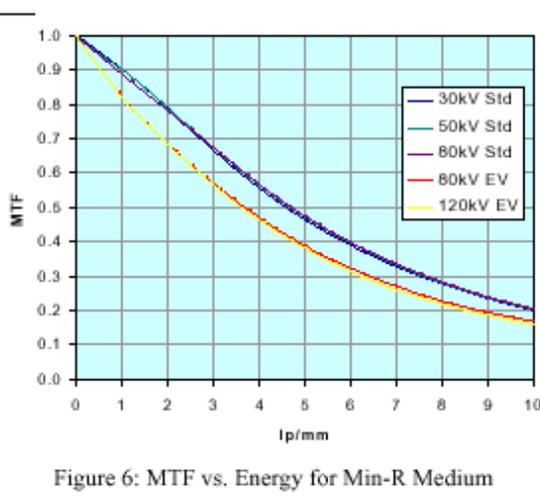


Figure 6: MTF vs. Energy for Min-R Medium

入力シグナルは、1フレーム当たりの露光 (mR)、あるいは単に線量率にカメラの積算時間を掛けたものです。露光は、X線源のmAの設定の調整によって変更され、電離箱で正確に測定されます。出力シグナルはこの場合、画像内のいくつかの対象領域について平均され

た、カメラのA/Dコンバーターからの1ピクセル当たりのデジタルカウント値(ADUあるいはアナログデジタルユニット)です。感度の測定では、この測定値は、デテクターのゲインとカメラの電子回路のゲインと合わされてしまいますが、ここでは絶対値を測定するのではなく、異なるシンチレーターを比較するのが目的なので、これで大丈夫です。

図4は、50kVpのスペクトルを使用して、3種類のシンチレーターの典型的な反応曲線を示しています。Lanex Fastシンチレーターは、X線を吸収する割合が高いため、Min-R Mediumよりも2倍ほど感度がよくなり、さらにMin-R MediumはLanex Fineスクリーンよりも2倍ほど感度がよくなります。グラフはわずかに「S」形になっていますが、これはデテクター本来の反応曲線の特性によります。デテクターの飽和点は、4095 ADUの最大カメラシグナル(シャドボックスカメラは12ビットA/Dコンバーターを備えています)よりもわずかに上です。表1は、テストしたすべての組み合わせで測定した平均感度を示しています。

信号対ノイズ比

信号対ノイズ比は、画像内の対象領域の平均シグナルを同じ領域の標準偏差で除算することによって測定されます。ほとんどのX線イメージングアプリケーションで主なノイズ源になるのは、X線ビーム自体の量子モトルです。RadEyeデテクターおよびシャドボックスカメラ電子回路のノイズはわずかで、一般に約0.5 ADUです。厚いシンチレーターは、ぼやけが増すために、薄いスクリーンよりも平均して高周波数の量子モトルが増える傾向があります。表2によって、結果として生じる画像の信号対ノイズ比がLanex Fastで最も高いのがはっきりわかります。さらにEVカメラは、スタンダードカメラよりも感度が40%低くても、信号対ノイズ比がかなり高いこともわかります。これは、CMOSフォトダイオードのX線の直接吸収つまりスタンダードカメラ内のノイズ源は、EVモデルでは著しく削減されるためです。

解像度

MTFは傾斜エッジ法を使用して測定されます。この測定では、長いストレートエッジを備えたタングステン(あるいはほかの吸収率の高い素材)の薄いブロックがデテクター上に直接置かれます。エッジは、たとえば列方向に10°以内に置かれます。タングステンブロックで獲得された画像からの行プロフィールは、デテクターとスクリーンのエッジ反応を示します。エッジ反応を微分して線広がりファンクションを取得し、さらにフーリエ変換をしてデテクターのMTFが算出されます。

このようにして変換された単一の行の測定精度は低いものです。けれども、エッジの正確な位置は単純な最小2乗法照合を使用してサブピクセルの精度で求められます。エッジの位置情報を使用して、すべての利用可能な行を平均することによって、滑らかなオーバーサンプリングされた線広がりファンクションを得ることができます。このオーバーサンプリングされた線広がりファンクションのフーリエ変換は、ピクセル化されたデテクター内のサンプリングプロセスによって引き起こされた(エイリアシングのような)不自然さを効果的に除去するので、前サンプリングMTFと呼ばれます。反応は多くの行について平均化されるので、生じるカーブは滑らかでノイズがなくなる傾向があります。

図5は、3種類のシンチレーターのそれぞれの典型的なMTFカーブを示しています。予想したとおり、薄い蛍光体は厚いLanex Fastスクリーンよりも解像度がよくなります。表3は、

各テスト条件について7.5 lp/mmの空間周波数で測定した比較を示しています。X線エネルギーが変わってもMTFの変動はほとんどありませんが、EVカメラはスタンダードカメラよりもわずかに解像度が落ちます(図6を参照)。Lanex Fastの場合は、エネルギーが増加すると解像度がわずかに上がります。これが起こる原因は、30 kVpではほとんどのX線がシンチレーターのトップ近くで吸収され、また、生成される光はデテクターに達する前にスクリーン自体によって散乱と吸収がなされるためです。エネルギーが高くなるほどX線はスクリーンの底近くで吸収されるようになるので、全体的に解像度が向上します。

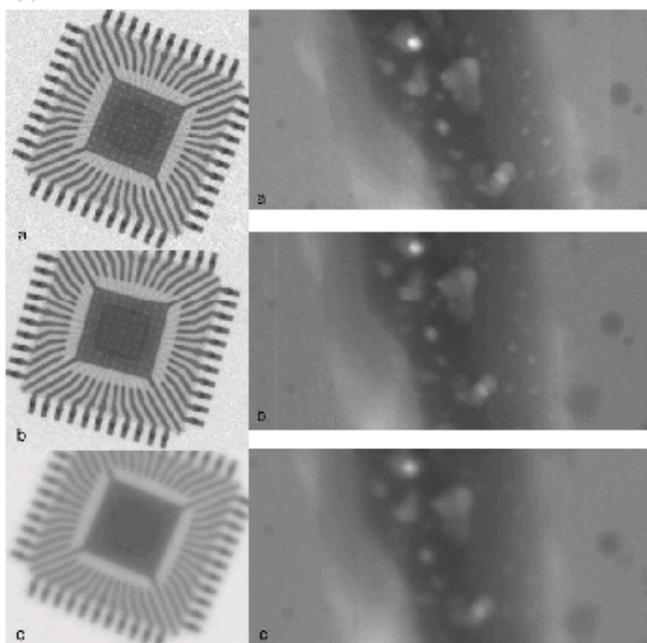
結論

Lanex Fastのような厚いシンチレーターの使用は、高い空間解像度を要求されないアプリケーションに向いています。けれども、シャドボックスカメラのような高解像度デテクターの性能は、この種の蛍光体では明らかに浪費されます。他方、Lanex Fineのような非常に薄いシンチレーターは、感度と信号対ノイズ比を犠牲にして解像度をわずかに向上させるだけです。

図7は、2つの一般的なイメージングアプリケーションでの3つのシンチレーターの性能を示しています。明らかに、Lanex Fast蛍光体は、ICの中のワイヤボンドや溶接サンプルの小さい空隙のような画像内の細部を識別できません。他方、Lanex FineとMin-R Mediumで撮影した画像は細部がよく見えています。ただしLanex Fineの溶接サンプルの画像はMin-R Mediumの場合よりも2倍の露光時間を必要としています。

X線フォトンがデジタル画像になる前に最初に遭遇するのがシンチレーターなので、シンチレーターの性能を最適化することは、一般に画質に最大の効果をもたらします。構造化されたCsIのようなシンチレーターには、層をより厚くしても解像度が維持できているものもあります。けれどもこれらの素材は、デテクターに使用するにはさらに錯綜した点があり

Figure 7 – Application images of an IC (left) taken at 80kV and a ¼" steel weld (right) at 120kV for (a) Lanex Fine, (b) Min-R Medium and (c) Lanex Fast scintillators.



費用も高くなります。CsIをMin-R Mediumと比較する研究を将来さらに進めることで道が開けるかもしれません。

もちろん、シンチレーターの最終選択は、デテクターの特性や使用されるアプリケーションの性質など多くの要因によって決まります。特にここで比較したデテクターについては、Min-R Mediumは、感度、信号対ノイズ比、解像度の組み合わせの点から最適であるように思われます。