

# 高フレームレート検出器 XSPA の性能評価

中江 保一\*, 佐久間 保孝\*\*, 作村 拓人\*\*, 三楠 聡\*\*, 松下 一之\*\*

昨今、X線計測分野において、Hybrid Photon Counting (HPC) 検出器が広く用いられている。読み出しノイズが無い、ダイナミックレンジが大きい、フレームレートが高い、Point Spread Functionが小さい、ブラーが生じない等といったHPC検出器の長所を高速データ読み出しシステムと組み合わせることによって、シングルフォトン検出と高い検出効率を持った高性能X線検出システムを実現することができる。現在、商用非商用含め様々なHPC検出器システムが世界中で提供されており、学術研究及び産業分野で使用されている。HPS検出器において最も重要な要素の一つが高速読み出し技術であり、最新のHPC検出器システムであれば、1000 fps程度のフレームレートが容易に実現可能であり、これまで主流であったCCDのフレームレートと比較して1-2桁の高速化が実現されている。しかし、先端科学分野においてダイナミックな現象を観測しようとするれば、より高速なシステムが必要となることは明らかである。そうした要求に応えるためにXSPA検出器シリーズは56,000 fpsでの連続測定を可能とし、さらに、バーストモードを使用することで970,000 fpsでの間欠測定が可能となっている。また、単一フレームでは最短露光時間48 nsでのイメージ取得が可能である。これらはAGH大学と共同開発したUFXC32kチップの性能と自社製の高速データレートをリアルタイムに取り扱うことのできるデータ読み出しシステムによって実現されている。本稿ではXSPA検出器の基礎性能の評価を行った。

## 1. はじめに

X線計測へのHybrid Photon-Counting (HPC) 検出器の応用は30年以上前に遡る。多くの大学や研究機関において様々なHPC検出器が開発されてきた。その中には製品として各所の学術研究、産業分野で使用されてきたものもある。多くの近代的なX線計測手法がHPC検出器の存在なしには実現することが困難である。例えば、ダイナミクスを観測するための先進的な計測手法であるX-ray Photon Correlation Spectroscopy (XPCS)やPump-probe測定には、対象とする凝集系と時間スケールに応じて非常に高フレームレートな検出器が必要とされる。リガクはAGH大学との共同研究により開発されたUFXC32k読み出しチップ<sup>(1)</sup>を使用した検出器を高フレームレート実験に応用可能なHPC検出器とするべく、2014年<sup>(2)</sup>から世界各地の放射光施設及びラボ装置を使って評価実験を行ってきた。それ以降、より高速な検出器とするべく、フロントエンド、読み出し回路及びソフトウェアの高速化を推し進め56,000 fpsでの連続測定が可能なHPC検出器を実現した。このXSPA-500kと名付けられた検出器(図1)の性能評価実験を、SPring-8, Advanced Photon Source (APS)とSOLEILにおいて、ビームライン研究者、AGH大学及びリガク共同で行ったので報告する<sup>(3),(4)</sup>。

\* Rigaku Americas Corporation.

\*\* 株式会社リガク X線研究所 要素技術開発部

## 2. XSPA検出器

XSPA-500kをはじめとするXSPA検出器は、 $76 \times 76 \mu\text{m}^2$ サイズのピクセルを $77.8 \times 38.9 \text{mm}^2$ の1モジュールあたり512k(1024×512)個持つHPC検出器である。それぞれのモジュールは単一のセンサに対して16枚のUFXC-32k読み出しApplication Specific Integrated Circuit (ASIC)をタイリングしたものである。UFXC-32k ASICについては次の節で詳説する。センサとASICは、同種の検出器と同様にインジウムパンプを用いてフリップチップ接続されている。しかしながら、同種の他の検出器と大きく異なるXSPA検出器の特徴として、センサ側の全てのピクセルのサイズが $76 \times 76 \mu\text{m}^2$ であることが挙げられる。一般的に既存の総検出面積が $25 \times 25 \text{mm}^2$ を超えるようなHPC検出器では、タイリングされている読み出しASIC間の接触を避けるた

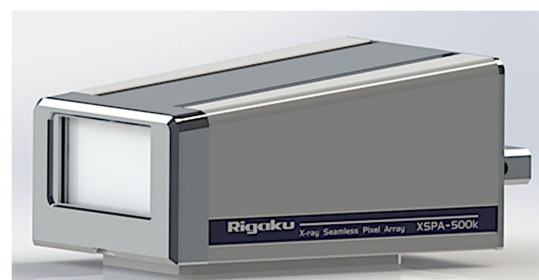


図1. XSPA-500k検出器.

め、ASICの境界上に他のピクセルよりも大きな面積のインターチップピクセルと呼ばれるものを設ける必要がある。これらインターチップピクセルは、通常ピクセルと比較して一辺の長さは1.5～3倍、有効面積は1.5～9倍と大きくなっている<sup>(5),(6)</sup>。これらインターチップピクセルは、その面積の大きさのためより広範囲の電荷が流れ込むことで、入射位置の情報が失われる。また、カウンターがより早く飽和し、アンプで処理すべき計数率も上昇するため、統計的な信頼性も低下する。今までは、非常に精密な測定をする場合、こういったインターチップピクセルをマスクして解析に使用しないという選択をせざるを得なかった。この問題を解決するため、リガクはX-ray Seamless Pixel Array (XSPA)向けに、ASICのタイリングギャップに起因するインターチップピクセルが生じないデザインを採用したセンサを開発した。このことにより、すべてのピクセルが同等に取り扱うことができ、従ってすべてのピクセルが同等な性能を持ち、全ての検出器領域が解析に使用可能な検出器を実現した。単一モジュールのXSPA-500k検出器は150(W)×100(H)×208(D)mm<sup>3</sup>の外寸法を持ち、エネルギー閾値を2–30 keVの範囲で設定することができる。標準的なモデルは320 μm厚のSiセンサを搭載し、厚みの異なるSiセンサ、GaAs、CdTe、CZT等のセンサを収集電荷の極性によらず使用することができる。

### 2.1. UFXC32k読み出しチップ

UFXC32k(UltraFast X-ray Chip with 32k channels)は130 nm CMOSテクノロジーを用いた、9.64×20.15 mm<sup>2</sup>サイズの約5千万トランジスタ規模のASICである<sup>(1)</sup>。この集積回路の主要部分は128×256個の75×75 μm<sup>2</sup>ピクセルマトリックスである [図2(a)]。それぞれのピクセルは、Krummenacher フィードバック回路 (feed krum) を採用した Charge-Sensitive Amplifier (CSA)、最小ピーキングタイム40 nsの波形成型アンプ (SH)、閾値設定ブロック (TH)、2つのディスクリミネータ (DISCR) と2つの14-bitカウンター (COUNTER) から構成され

ている [図2(b)]。CSAのフィードバックディスタンスチャージブロックの電流を適切に設定することによって、アプリケーションに適した時定数とノイズレベルのバランス調整が可能である<sup>(8)</sup>。

ディスクリミネータ閾値は対象としているX線のエネルギー及び、アプリケーションに応じて、全ての読み出しチャンネルに対して共通の値が設定される。エネルギー閾値は、ゼロ点とディスクリミネータ閾値の関係で決定され、全てのピクセルで同じ、あるいは、ピクセル毎に異なる値を設定される。目標設定値からのバラツキによる影響を最小限に抑えるため、2つのディスクリミネータの入力にはそれぞれ独立したトリム用DACが用意されている。各ピクセルは独立にアナログフロントエンドのゲインを調整する機能を備えている。さらに、アナログフロントエンドは正負両極 (ホールおよび電子) の入力電荷を取り扱うことができ、優れたリーク電流補償回路と組み合わせることで、SiだけでなくCdTe、GaAsなど種々のセンサ素材をサポート可能としている。

データ読み出しに際して、各ピクセル列のカウンターはシフトレジスタとして動作する。このシフトレジスタからのデータは、外周部の128-bit高速レジスタにビット毎に書き込まれ、8本の並列Low Voltage Differential Signal (LVDS) 配線を使ってUFXC32kから読み出される。チップからのデータ読み出し部は以下のような複数の読み出しモードをサポートしている：

- (i) それぞれが独立した2つの14-bitカウンターとしてDISCR-LとDISCR-Hに接続されて動作する通常モード。
- (ii) 2つの14-bitカウンターが接続され、1つの28-bitカウンターとしてDISCR-Lに接続されて動作するロングカウンターモード。
- (iii) 2つの14-bitカウンターが交互にDISCR-Lに接続されるZero Dead Time (ZDT)モード。このモードでは、1つの14-bitカウンターが計数中にもう一方の14-bitカウンターがシフトレジスタとして読み

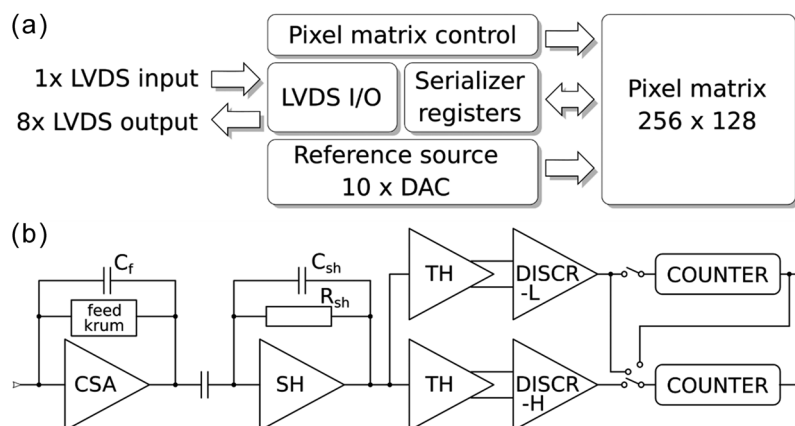


図2. UFXC32kチップの概略構成図(a)及びピクセルの概略回路図(b).

出し動作を行うことでフレーム間の時間的空隙が生じることを回避することができる。また読み出しbit長を最小2-bitまで減少させることでさらにフレームレートを向上させることができ、最大56 kfpsでの連続動作が可能である。

- (iv) 露光毎に、各カウンターを1, 2, あるいは3-bitシフトし、23, 11あるいは7露光分のデータを高速に取得可能なバーストモード。このモードでは、250 MHzのバスクロックで970 kfpsでの動作が可能である。

### 2.2. フレームレート

検出器のフロントエンド部では2つの読み出し基板にそれぞれ8つのASICが接続されている(図3)。2つの読み出し基板は1つの基板によって制御されている。各ASICからのデータは、FPGAに対して、250 MHzバスクロック Double-Data-Rate (DDR)で読み出される。従って、各ASICからの転送レートは4 Gbpsである。1/2モジュール8 ASICは秒間32 GbitのデータをFPGAに転送する。読み出し基板からサーバーPC上のFrame Grabber (FG) カードへのデータ転送は光ケーブルによって行われる。データ転送は8b/10bエンコーディングによって行われ、1/2モジュール分の16-bit/pixel(14-bitカウンター)データ524,288 byteは629,146 byte、2-bit/pixelデータ65,536 byteは78,644 byteとなる。トランスミッタのデータ転送レートは12.5 Gbpsであり、データポート1つあたり4つのトランスミッタが使用されているので、最大50 Gbpsの転送が可能である。データ転送レートは最大転送レートの約2/3であるが、実測したPCIeの帯域幅は約30 Gbps(理論上の最大帯域幅は63 Gbps)であり、この帯域幅がシステム全体の帯域を律速している。この帯域制限から、ZDTモード16-bit/pixel(14-bitカウンター)での測定を行った場合には最大8,500 fpsでの読み出しが可能であり、8-bit/pixelでは17,000 fps、4-bit/pixelでは33,000 fps、2-bit/pixelでは56,000 fpsでの読み出しが可能である。バーストモードを使用すると、2-bit/pixelで最大11フレーム、1-bit/pixelで最大23フレームを最大970,000 fpsで読み出すことが可能である。

### 3. 検出器の性能評価

XSPA 検出器はリガクによって開発され、ラポ線源、Spring-8 (BL26B2, BL29XU), あいちSR (BL2S1), Advanced Photon Source (APS) (8ID-D<sup>(3)</sup>, 2ID-D), SOLEIL (Metrology)においてテストを行ってきた。本稿では基礎性能評価試験について報告する。

#### 3.1. 実験セットアップ

SOLEILのMetrologyビームライン<sup>(9)</sup>において総合的な基礎評価を行った。評価内容によって、蛍光X線を使用する配置と、ダイレクトビームを使用する配置を用いた。

蛍光X線を使用する配置 [図4(a)] は検出器の一様性と空間分解能の評価に用いた。Geを添加したガラスを12 keVのダイレクトビーム光軸に対して45度傾けて設置したものをターゲットとして検出器法線と直交するように配置し、9.9 keV (Ge K $\alpha$ 線)を使用した。

ダイレクトビームを使用する配置 [図4(b)] は9.9 keVの単色ダイレクトビームを使用し、計数率に対する応答の評価に使用した。ビームの強度は、挿入するアルミアッテネータの厚みを変化させることで調整した。また、ビーム強度は校正済のフォトダイオードを検出器と同じ距離に設置して測定した。

実験中、シンクロトロンは図5に示したハイブリッドバンチモードで運転されていた。

#### 3.2. 実験結果

##### 3.2.1. 一様性及び信号対ノイズ比

一様性補正は、調整しきれない読み出しICの閾値の差やセンサ自体に起因する強度斑が引き起こす系統誤差を緩和する為に各ピクセルの計数値に補正を加える操作である。この操作によって検出器のポワソン限界を上昇させることができる。一様性補正の効果を正しく得るためには、補正が適用される際に使用するエネルギーと同じエネルギーの様なX線を、統計処理に十分な計数となるように照射し、補正係数を取得する必要がある<sup>(10)</sup>。XSPA-500k検出器に対して、約 $5 \times 10^5$  photon/pixelとなるように照射した9.9 keVのGeの蛍光X線を用いて一様補正係数を求めた。補正係数の分布

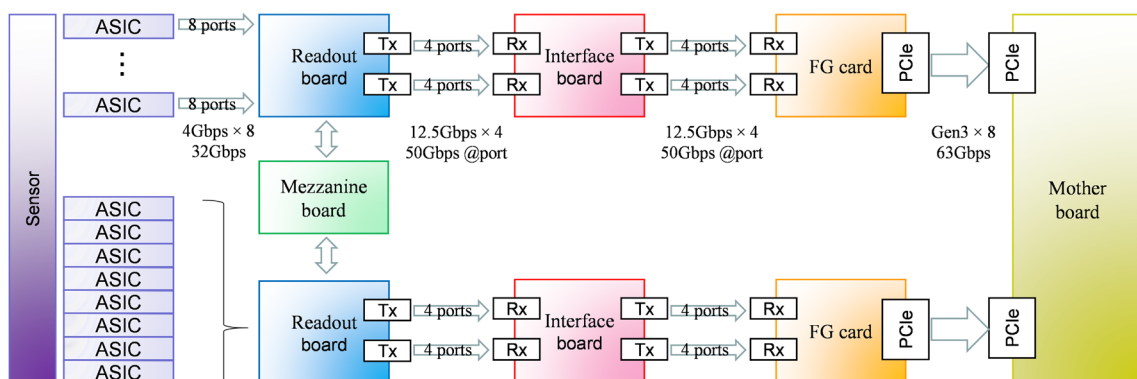


図3. XSPA 検出器1モジュール (XSPA-500k相当)の概略構成図。



をヒストグラムとして図6に示した。ほとんどのピクセルが係数1(平均強度)近傍の値を持つが、それとは別に係数の低い(生データでの計数が大きい)2つのピークが確認できる。これらは外周2列のピクセル群の係数で、このことから、外周部ではガードリング部

を含めた、標準ピクセルサイズよりも広い領域の電荷を収集して計数していることがわかる。このようにして得られた一様性補正係数を9.9 keVの一様照射画像に適用したところ補正後のピクセル間の強度のバラつきは $\sigma=0.37\%$ の正規分布で近似でき、ほぼ全てのピ

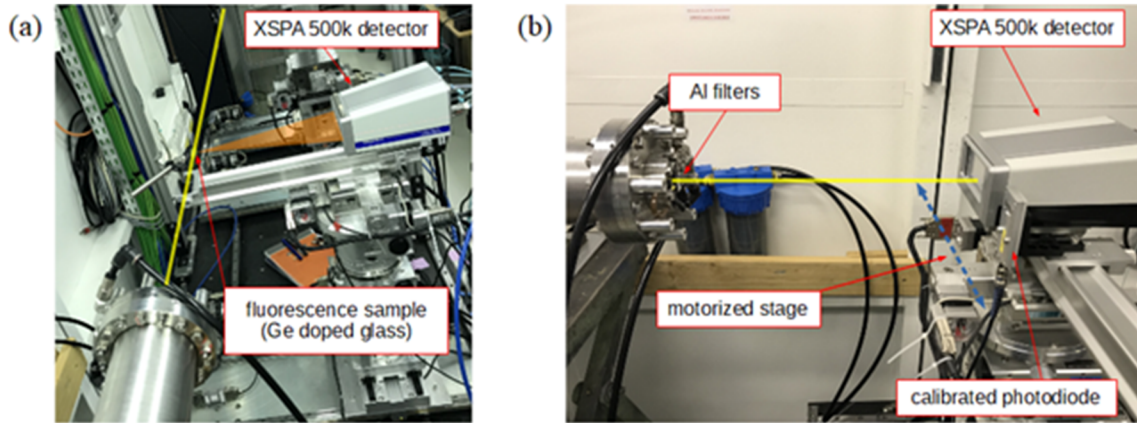


図4. SOLEILでの基礎性能評価実験における検出器の実験配置。左がGeの蛍光を使用する配置で、Ge試料が直接ビームの光路上に配置され、検出器は試料と正対するように配置した。右は直接ビームを使用する配置で、検出器は直接ビームの光軸上に置かれ、Alフィルタを使用して入射X線の強度を減衰させている。

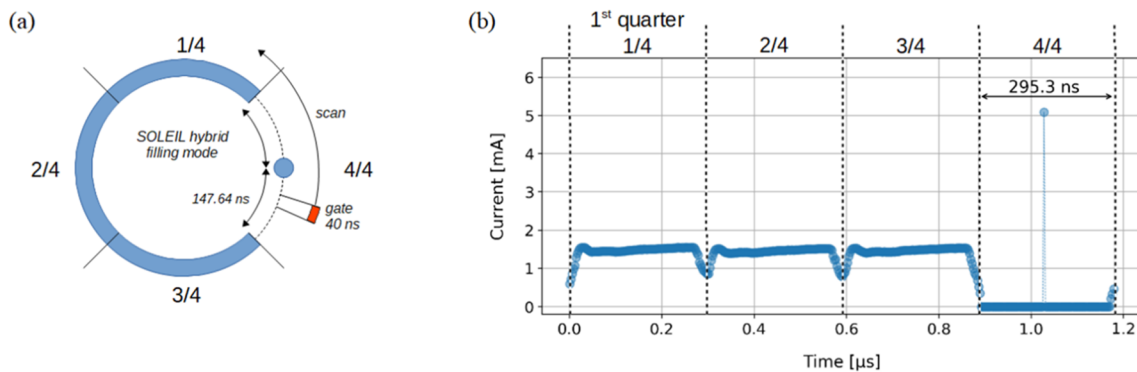


図5. 今回の実験で使用したハイブリッドバンチモードのバンチ時間構造概略図。

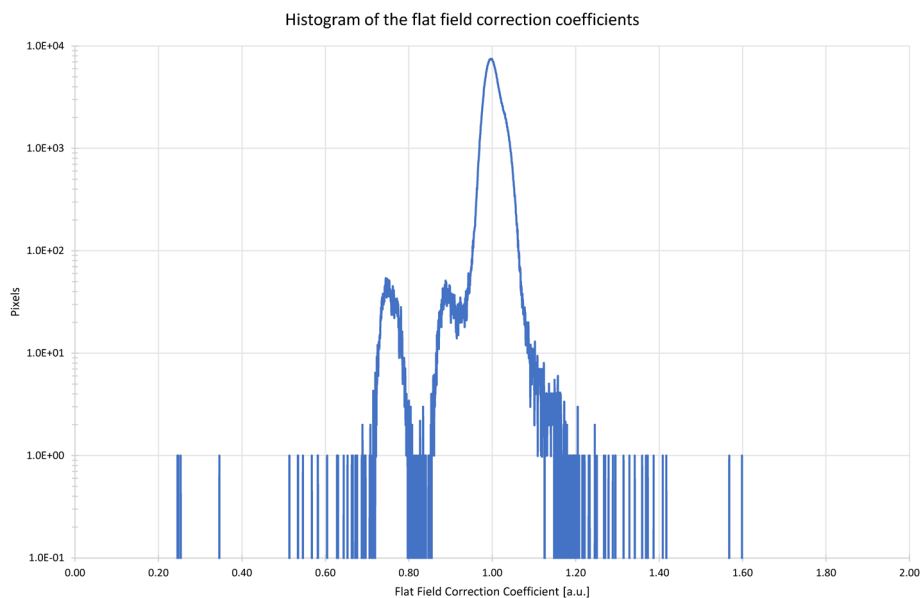


図6. Ge蛍光X線(9.9 keV)の一様照射によって得られた一様性補正係数の分布。1.0にピークを持つ主要な係数群の左側に0.9, 0.75近傍にピークを持つ2つの小さな計数群が見られる。

クセルが±1%以内に収まっている [図7].

図8に示したように、信号対ノイズ比(SNR)が信号強度に対してどの程度単調に増加するかも、また検出器の重要な性能指標である。このプロットから直接検出器のポワソン限界を知ることができる<sup>(11)</sup>。HPC検出器は読み出しノイズの影響を受けないので、SNR曲線に影響を及ぼすのはポワソンノイズ(ショットノイズ)と固定パターンノイズとなる。これらのノイズ源境界がPhoton Response Non-Uniformity (PRNU)の2乗の逆数、ポワソン限界として定義される。PRNUは解析モデルを実験データにフィッティングすることで求めることができる。一様性補正により、ポワソン限界が約 $10^4$  photons/pixel/secから約 $10^5$  photons/pixel/secに一桁改善していることが分かる。

これらの解析を行う前に、50×50周辺ピクセルのメディアンとの比較により、不良ピクセルを抽出しマスクしている。メディアンの1/2未満もしくは2倍以上の強度を示したピクセルが不良ピクセルと判定されている。XSPA-500k検出器は、全ピクセルのわずか0.02%未満のみが不良ピクセルと判定された。

### 3.2.2. エネルギー分解能

エネルギー閾値の正確な設定には、十分なエネルギー分解能が不可欠である。これは、XSPA-500kのように複数の閾値を持つ検出器で特に重要である。9.9 keV Ge K $\alpha$ 蛍光X線に対して閾値をスキャンすることで、全てのピクセルに対してエネルギー分解能を測定した。閾値は4.0 keVから18.0 keVまで100 eV刻みでスキャンした。全てのエネルギー閾値に対してそ

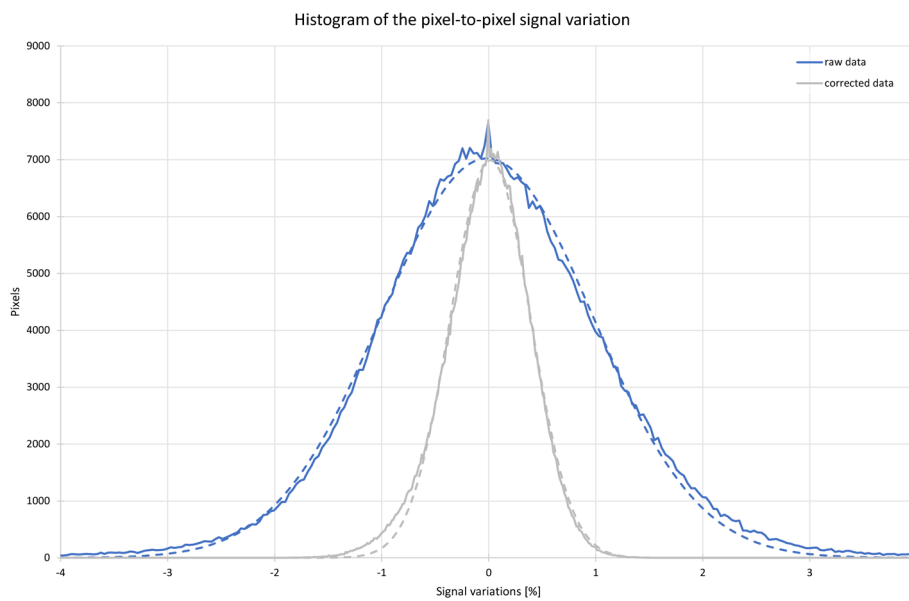


図7. 一様性補正前後でのピクセル毎の強度のバラつき。一様性補正によって、補正前の $\sigma=1.54\%$ から $\sigma=0.37\%$ へと改善されている。

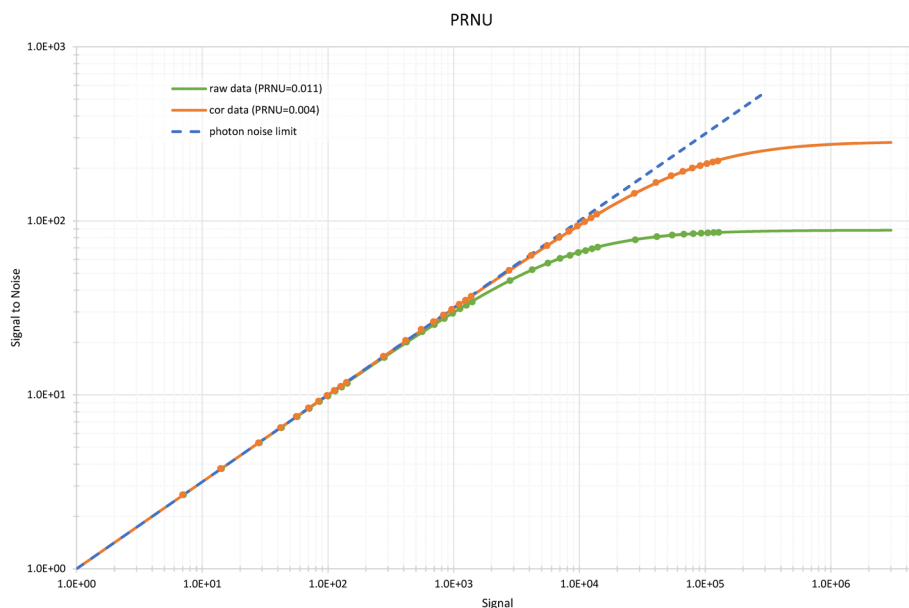


図8. 一様性補正前後での信号強度比を信号に対してプロットした。PRNUが0.11から0.0035へと一桁以上改善されている。

それぞれ1枚のイメージを測定し平均値を使用した。結果として得られた微分スペクトルをガウス関数でフィッティングしたものととも図9に示す。エネルギー分解能は、微分カーブのピークの半値全幅から求められる。ここではフィッティングしたガウス関数の半値全幅を算出した。検出器全体に対して、求められたエネルギー分解能は約1.5 keVであった。この値は、シングルフォトンカウンティング方式のピクセル検出器としては一般的な値で、他の最新鋭検出器と比較しても遜色ない<sup>(12)</sup>。

### 3.2.3. 計数率直線性

計数率に対する直線性を、ダイレクトビームを使用する配置で測定した。2.1節で述べたように、XSPA 検出器は複数の異なる設定によって、ノイズレベル、エ

ネルギー分解能、計数率に関するパフォーマンスを変更することができる。測定に際しては、最も汎用性の高いノーマルモードを使用しており、かなり低めのCSAのフィードバック電流設定が用いられている(CSAフィードバック電流を変更することで、ノイズレベルとパルス幅をトレードオフの関係で変更することができる<sup>(8)</sup>)。従って、計数率直線性だけを求める設定と比べて、限定的な結果である。検出器全面のうち、35×36ピクセルの領域に9.9 keVのダイレクトビームを照射した。この時使用したダイレクトビームの非一様性は7%程度であった。ビームの強度は、125 μmのアルミニウム箔をアッテネータとして光路上に挟むことで変更した。それぞれのアッテネータ厚で、校正済みの51 μm厚のフォトダイオードで強度を

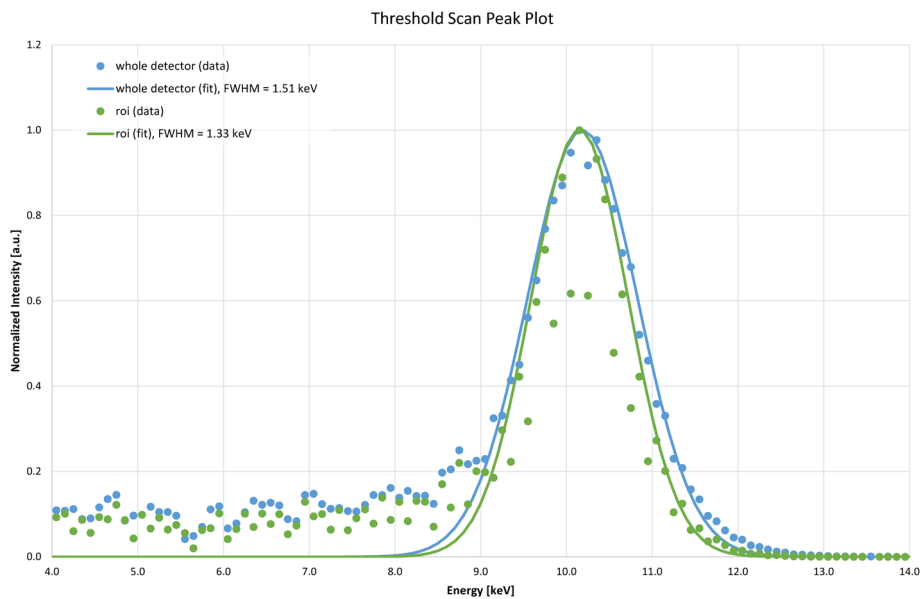


図9. 閾値スキャンによって得られたGe蛍光X線(9.9 keV)の微分プロファイルとガウスフィッティング曲線。

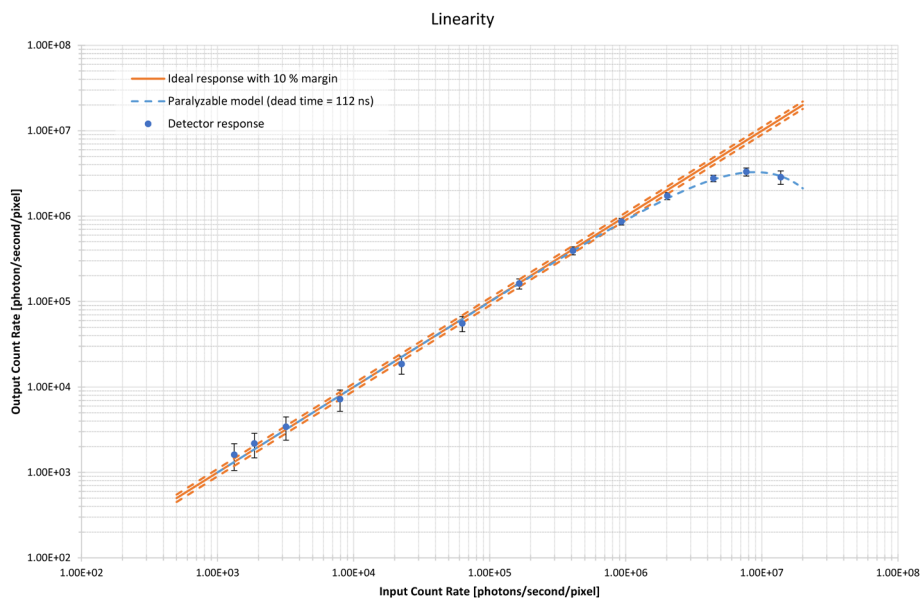


図10. 計数率直線性の測定結果と、麻痺モデルによるフィッティングカーブ。10%直線性が得られる計数限界は、フィッティングで得られた時定数から求めると約 $9.4 \times 10^5$  photons/second/pixelとなる。

測定して光子数の正確な推定を行った。XSPA 検出器とフォトダイオードはどちらも出射窓から等距離に設置した。ピクセル毎の計数率は、照射領域内の合計計数率を領域のピクセル数で割って求めた。得られた計数率をプロットしたものが図10である。

測定したデータは以下に示した麻痺型モデル<sup>(13)</sup>でフィッティングした。

$$N_{\text{OUT}} = N_{\text{IN}} \exp(-N_{\text{IN}} \tau)$$

ここで $N_{\text{OUT}}$ は実際に測定された出力計数率、 $N_{\text{IN}}$ は入力計数率、 $\tau$ は検出器の時定数である。求められた時定数は112 ns, 最大計数率は $9 \times 10^6$  counts/s/pixel ( $1.6 \times 10^9$  counts/s/mm<sup>2</sup>)。

#### 4. 結 論

リガクとAGH大学によって、高速かつ高い一様性を持つ検出器が開発された。SOLEIL 検出器グループの協力を得て、Metrology ビームラインで基礎性能評価を行った。一様性、信号対ノイズ比の評価を行い、一様性補正後の強度バラつきは $\sigma=0.3\%$ 程度の正規分布で近似でき、ポワソン限界が約 $10^6$  photons/pixel/secと高い一様性が実現されている。エネルギー分解能、計数率直線性の評価から、時定数112 ns, 約 $10^7$  counts/s/pixelの高い計数率直線性と同時に、他の検出器と比べて遜色ない1.5 keV at 9.9 keVを実現している。

#### 参 考 文 献

- (1) P. Grybos, P. Kmon, P. Maj and R. Szczygiel: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **63** (2016), 1155–1161.
- (2) P. Maj, P. Grybos, R. Szczygiel, T. Taguchi, Y. Nakaye and S. Kobayashi: *Proceedings of the 2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 8–15 November 2014, Seattle, WA, USA. DOI:10.1109/NSSMIC.2014.7431095
- (3) Q. Zhang, E. M. Dufresne, Y. Nakaye, P. R. Jemian, T. Sakumura, Y. Sakuma, J. D. Ferrara, P. Maj, A. Hassan, D. Bahadur, S. Ramakrishnan, F. Khan, S. Veseli, A. R. Sandy, N. Schwarz and S. Narayanan: *J. Synchrotron Rad.*, **28** (2021), 259–265.
- (4) Y. Nakaye, T. Sakumura, Y. Sakuma, S. Mikusu, A. Dawiec, F. Orsini, P. Grybos, R. Szczygiel, P. Maj, J. D. Ferrara and T. Taguchi: *J. Synchrotron Rad.*, **28** (2021), 439–447.
- (5) X. L. Cudié: PhD Thesis 2007, Mid Sweden University, Sundsvall, Sweden.
- (6) P. Kraft, A. Bergamaschi, Ch. Broennimann, R. Dinapoli, E. F. Eikenberry, B. Henrich, I. Johnson, A. Mozzanica, C. M. Schlepütz, P. R. Willmott and B. Schmitt: *J. Synchrotron Rad.*, **16** (2009), 368–375.
- (7) T. Sakumura et al.: US Patent 2019/0245000 A1 (2019).
- (8) P. Kmon, R. Szczygiel, P. Maj, P. Grybos, and R. Kleczek: *J. Instrum.*, **11** (2016), C02057.
- (9) M. Idir, P. Mercere, T. Moreno, A. Delmotte, P. Dasilva, and M. H. Modi: *AIP Conf. Proc.*, **1234** (2010), 485–488.
- (10) J. R. Janesick: *Photon Transfer*. (2007), Bellingham, Washington: SPIE.
- (11) K. Medjoubi and A. Dawiec: *J. Instrum.*, **12** (2017), P12027.
- (12) R. Ballabriga, J. Alozy, M. Campbell, E. Frojdh, E. H. M. Heijne, T. Koenig, X. Llopart, J. Marchal, D. Pennicard, T. Poikela, L. Tlustos, P. Valerio, W. Wong and M. Zuber: *J. Instrum.*, **11** (2016), P01007.
- (13) G. F. Knoll: *Radiation Detection and Measurement* (2000), New York: Wiley.