

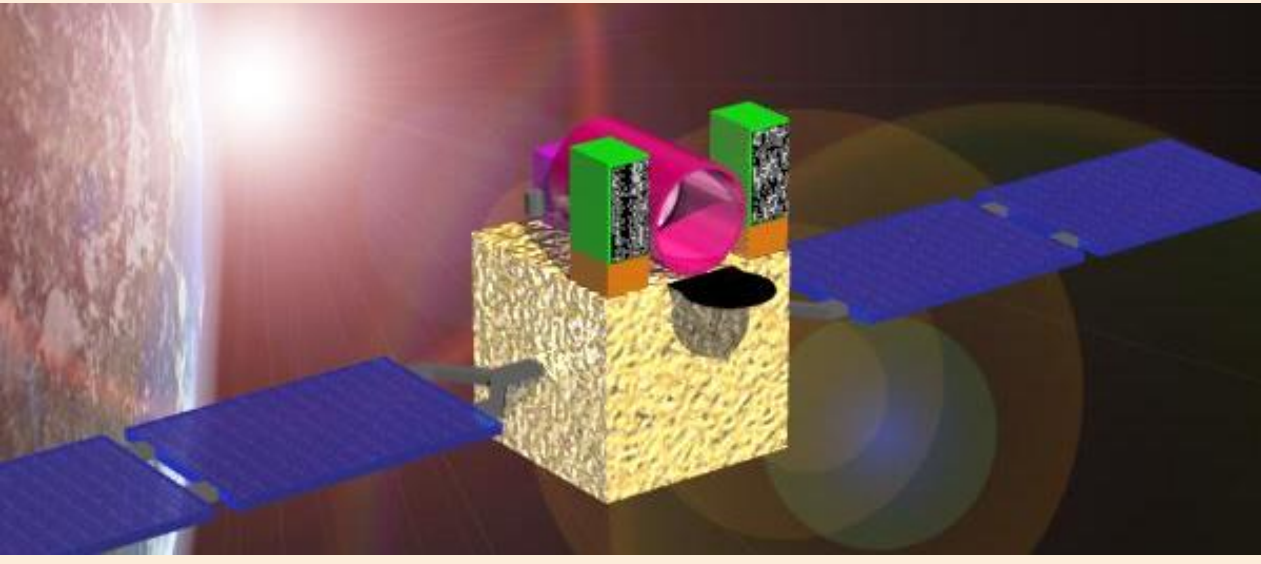
HiZ-GUNDAM 搭載へ向けた 広視野X線撮像検出器を用いた撮像性能実験

米徳 大輔¹、三原 建弘²、○澤野 達哉¹、河合 誠之³、有元 誠³、池田 博一⁴、榎戸 輝揚⁵、大野 雅功⁶、黒澤 俊介⁷、郡司 修一⁸、坂本 貴紀⁹、
芹野 素子²、田代 信¹⁰、谷森 達⁵、中川 友進¹¹、村上 敏夫¹、谷津 陽一³、山岡 和貴¹²、湯浅 孝行¹³、吉田 篤正⁹、¹⁴Amati Lorenzo

¹金沢大学理工研究域、²理化学研究所MAXIチーム、³東京工業大学大学院理工学研究科、⁴宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、⁵京都大学大学院理学研究科、⁶広島大学大学院理学研究科、
⁷東北大学金属材料研究所、⁸山形大学理学部、⁹青山学院大学大学院理工学研究科、¹⁰埼玉大学大学院理工学研究科、¹¹宇宙航空研究開発機構、¹²名古屋大学太陽地球環境研究所、
¹³理化学研究所宇宙観測実験連携研究グループ、¹⁴Istituto Nazionale di Astrofisica

科学的意義

科学衛星HiZ-GUNDAM[1]は、初期宇宙で最も明るい光源であるガンマ線バースト(Gamma-Ray Burst: GRB)を観測し、星形成、宇宙再電離、重元素合成の歴史の解明など、初期宇宙観測のフロンティアを目指す。特にこれまでに十分な観測が行われていない赤方偏移 $z>7$ におけるGRBを発見し、発生時刻や発生方向、赤方偏移などの情報を通報することで、GRBを背景光とした効率の良い探手法を大型望遠鏡に提供するまでを目的とし、初期宇宙における星の形成率、銀河間空間の水素中性度、重元素量を定量的に測定するため、 **$z>7$ のGRBを年間10例**程度観測することを目標とする。



観測装置への要求

これらの目的を実現するため、HiZ-GUNDAM ではX線撮像検出器と近赤外線望遠鏡を搭載し、このうちX線撮像検出器は、広い視野で強い赤方偏移によりX線帯域で輝くGRBの発生を待ち受け、GRBの初期放射に対して粗い角度分解能で観測・方向決定し、X線撮像検出器と比べて狭視野である近赤外線望遠鏡による赤方偏移度決定のための追観測を可能にする。このときX線撮像検出器に求められる性能は、GRBが強く赤方偏移していることから **$1-20\text{ keV}$** での観測帯域、これまでの観測装置の感度より1桁暗い **$10^{-8}\text{ erg/cm}^2\text{/sec}$** のエネルギーフラックスをとらえられる感度、 **1 sr** 程度の広い視野、近赤外線望遠鏡の視野より充分精細な**10分角**以下の位置決定精度をもつことが要求される。

シリコンストリップセンサー (SSD) の開発

要求される1 keVからの信号読み出しを満たすSSDの電極幅や電極長さの最適値を探るため、電極幅が50 μm から280 μm まで異なるSSDを試作し(図2左)、リーク電流と静電容量の測定を行った(図2右)。**電極ピッチ300 μm** のSSDに対しては、**電極幅を150 μm** とすると、後述のASICから要請される**10 pF以下**の容量をもち、リーク電流の急激な上昇がみられず安定したオペレーションが期待できるという観点で最適と評価できる。

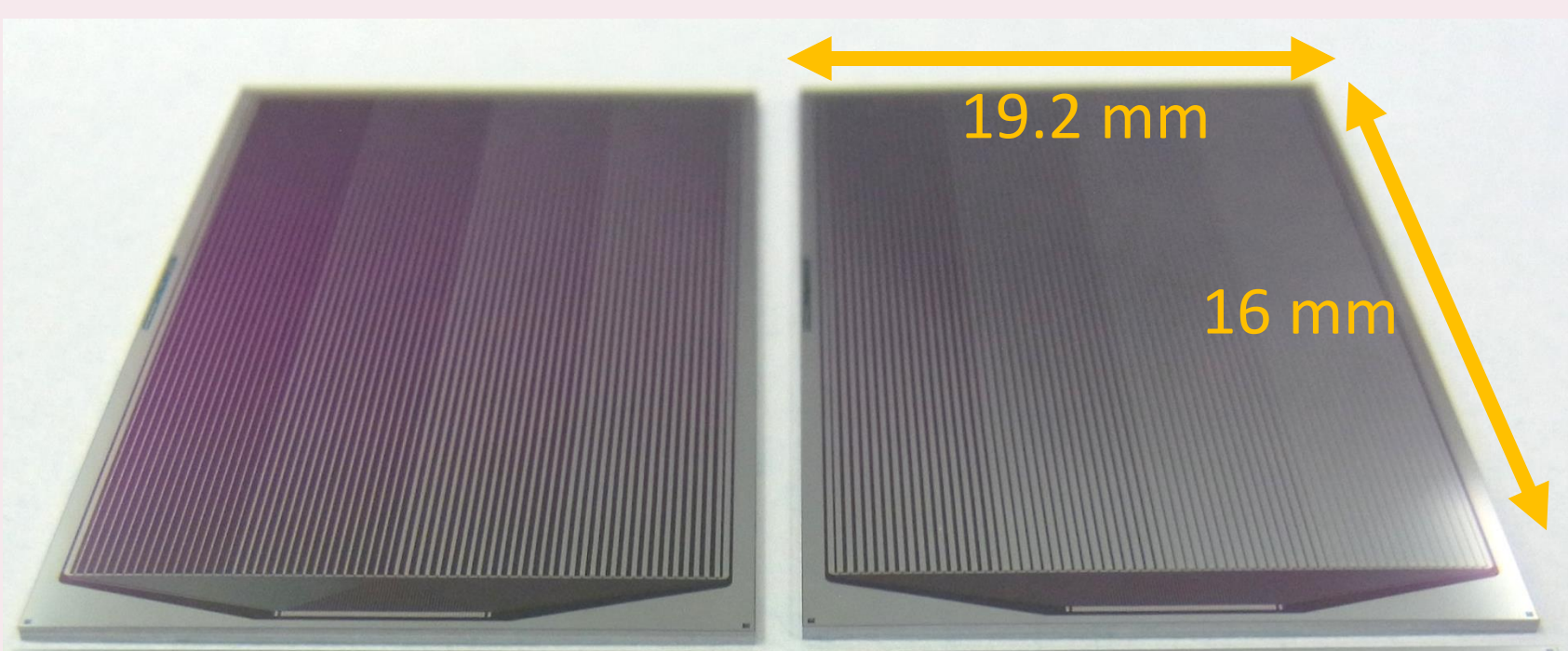
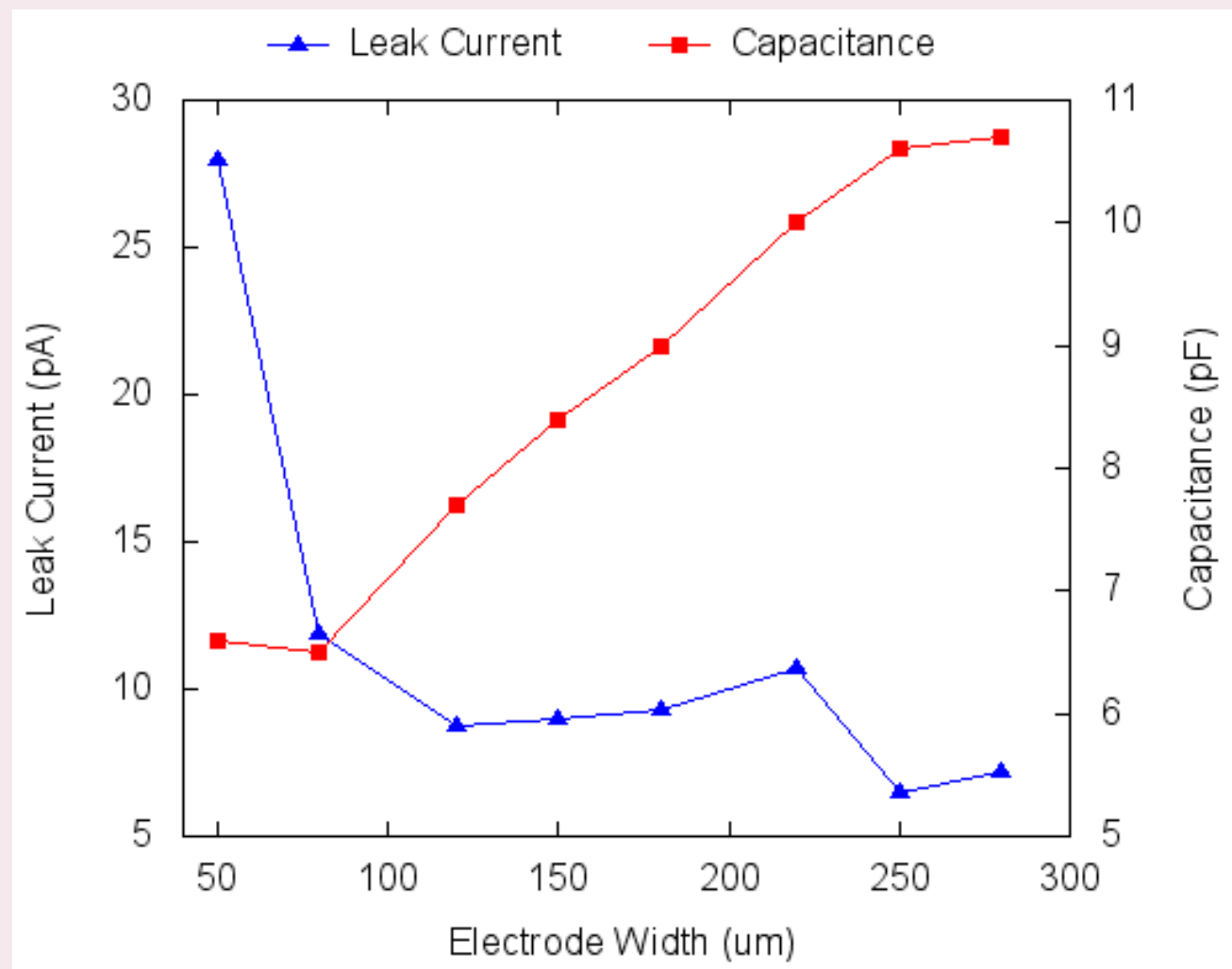
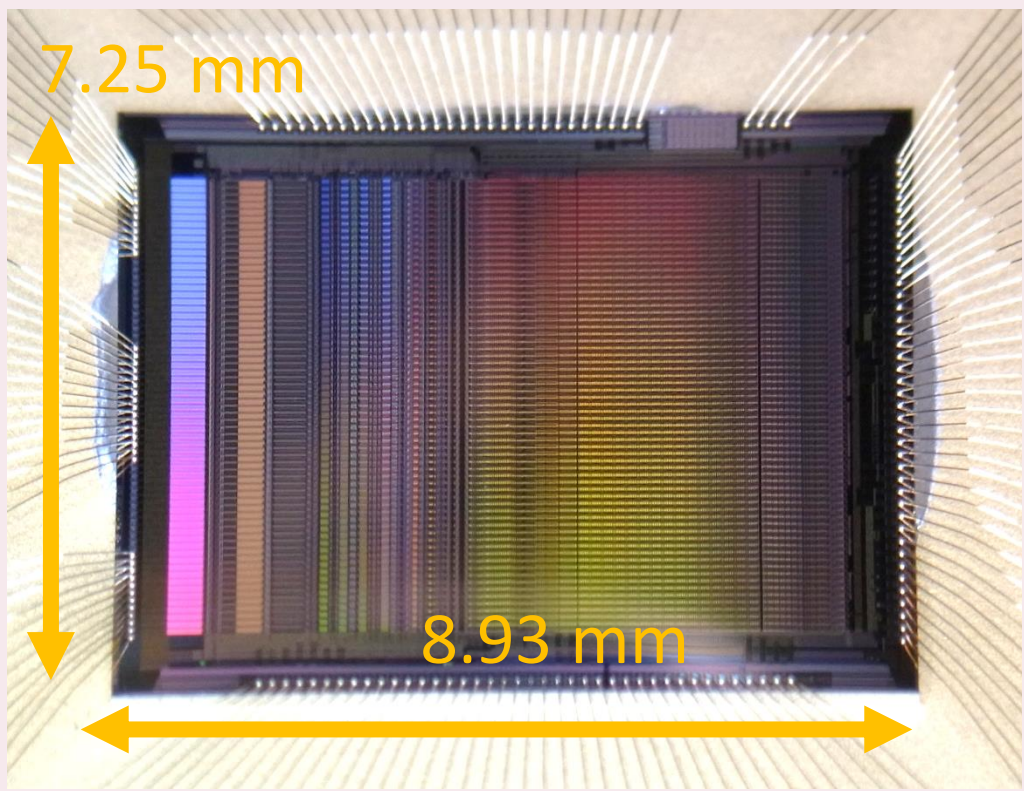


図2. 試作した異なる電極幅を4種類ずつもつSSD(左)。厚み500 μm 、電極ピッチは300 μm で共通。右は140 V、-20°Cにおける静電容量とリーク電流。



X線信号読み出しASICの開発



1 keVからの信号読み出しを達成するため**64チャンネル**入力をもつ**750 mV/fc**の高利得ASIC“ALEXシリーズ”を開発してきた。第2世代ASIC ALEX-02では、 **$1-20\text{ keV}$ 相当の入力電荷に対して $\pm 4\%$ 以下の非線形性**で波高応答性能をもつ(図3下)。トリガーを生成する波形整形増幅器出力における等価雑音電荷は、回路の時定数を伸ばすことで前世代での**150 e⁻から103 e⁻(1 σ)へと改善し、1.5 keVの閾値を達成している。今後、**プリアンプ回路の相互コンダクタンスの最適化**により目標の1.0 keVの閾値実現を目指す。また、SSDとのダイレクトボンディングによりSSDで光電吸収したX線信号の読み出しでは $\Delta E \sim 0.7\text{ keV}$ (FWHM)の分解能を達成している(図4)。**

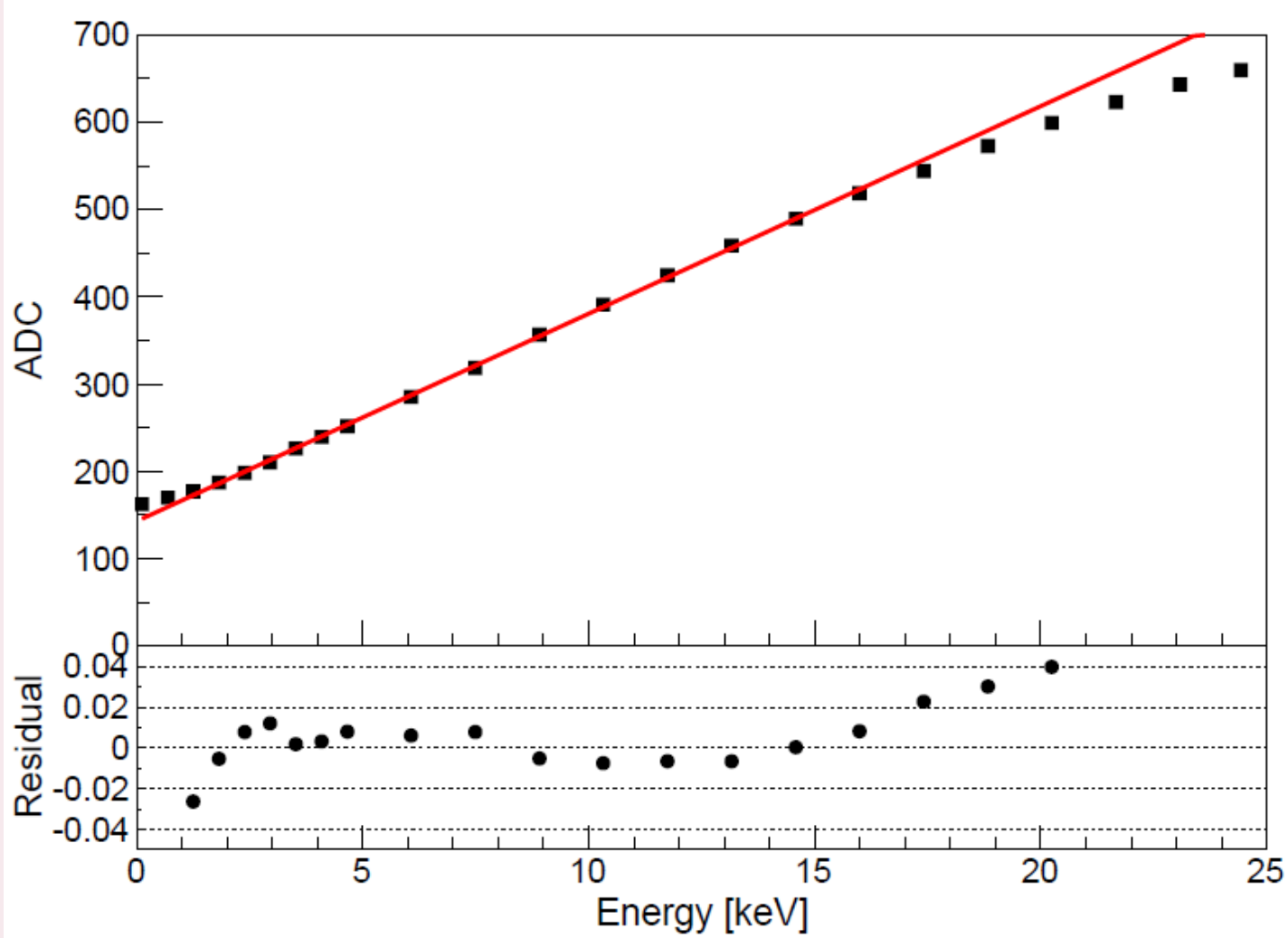
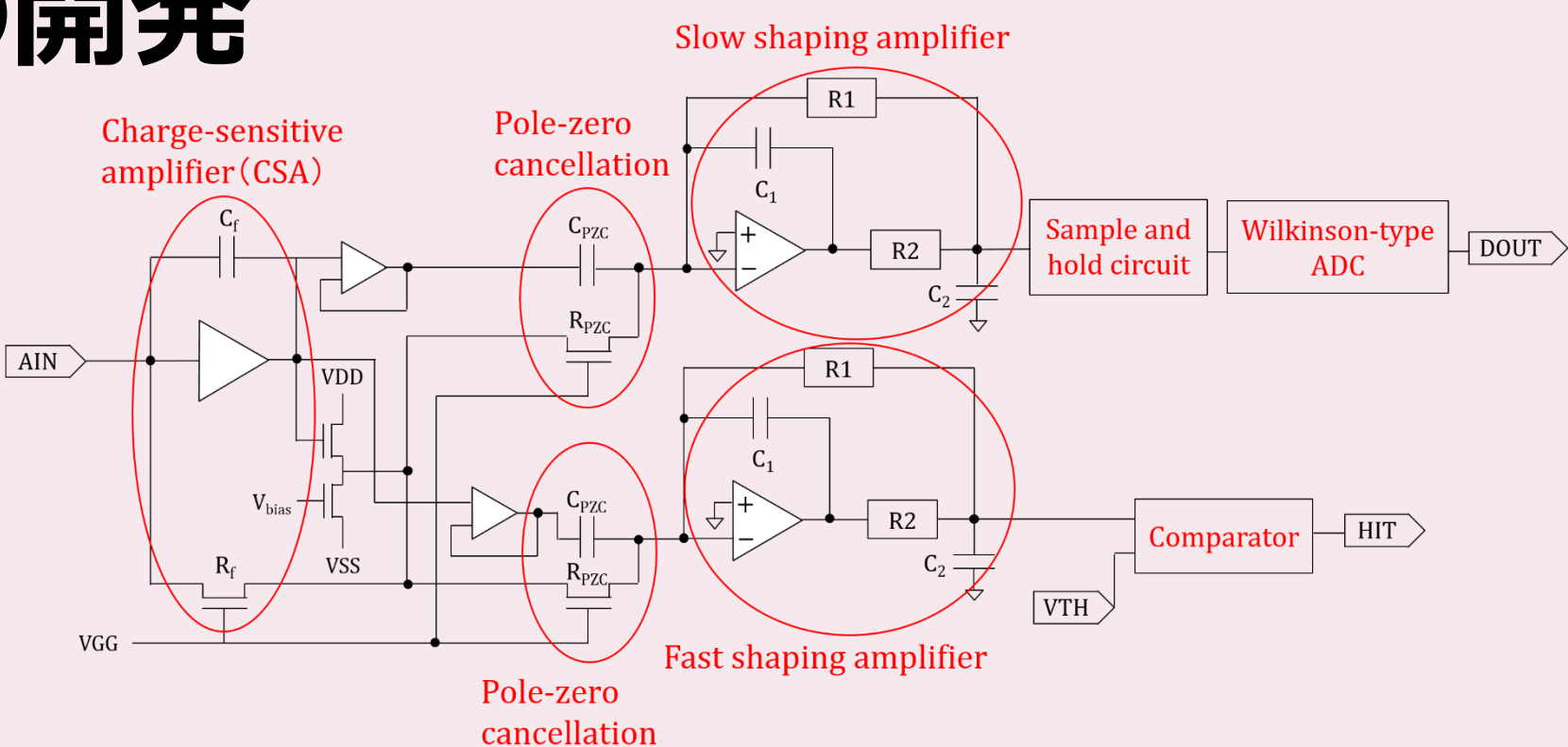


図3. ASIC ALEX-02写真(左上)、ASICのアナログ信号処理の概念図(右上)、ALEX-02単体のテスト電荷入力に対する波高応答の線型性(右下)。1-20 keV相当の電荷入力に対し+4%以内の非線形性をもつ。

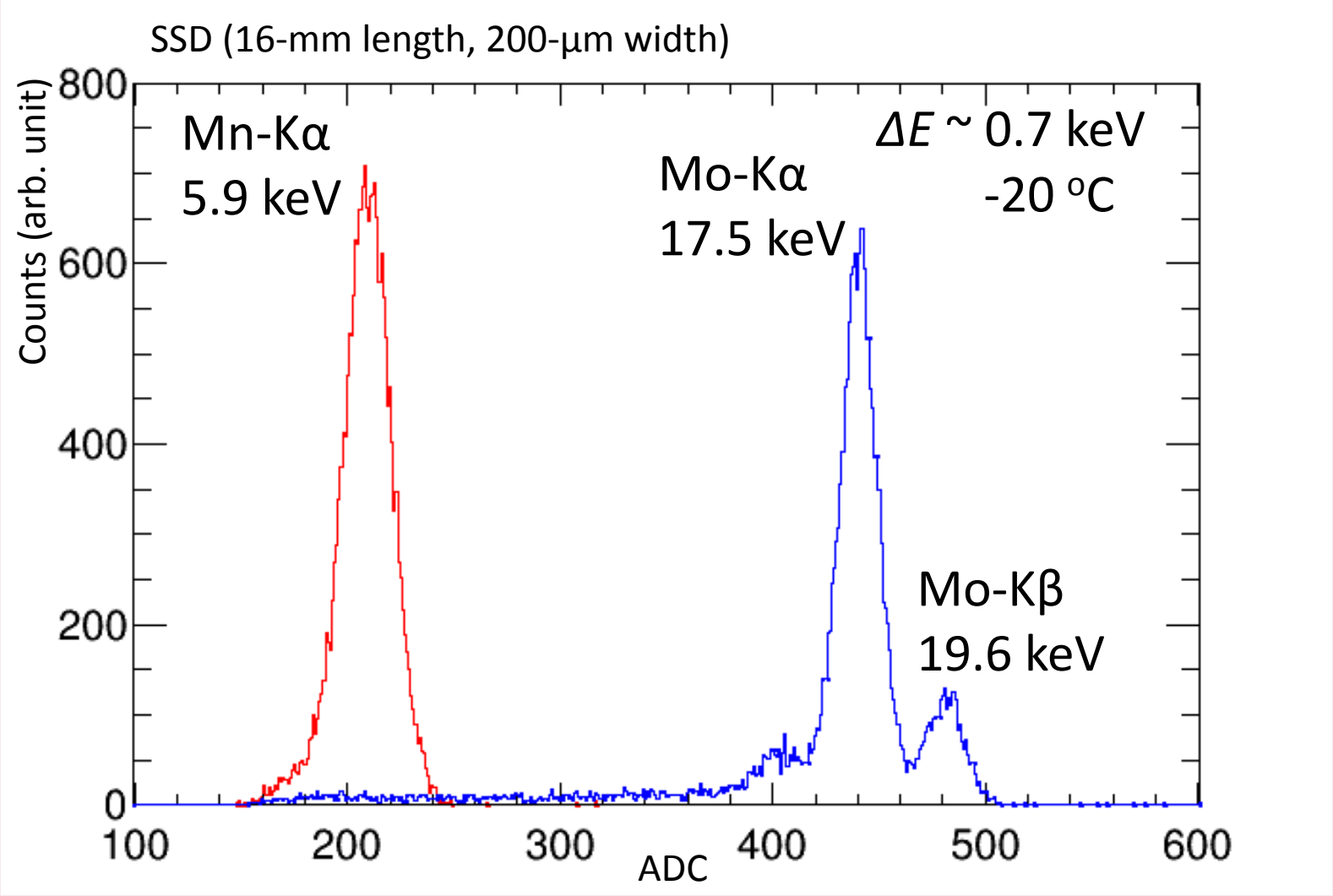
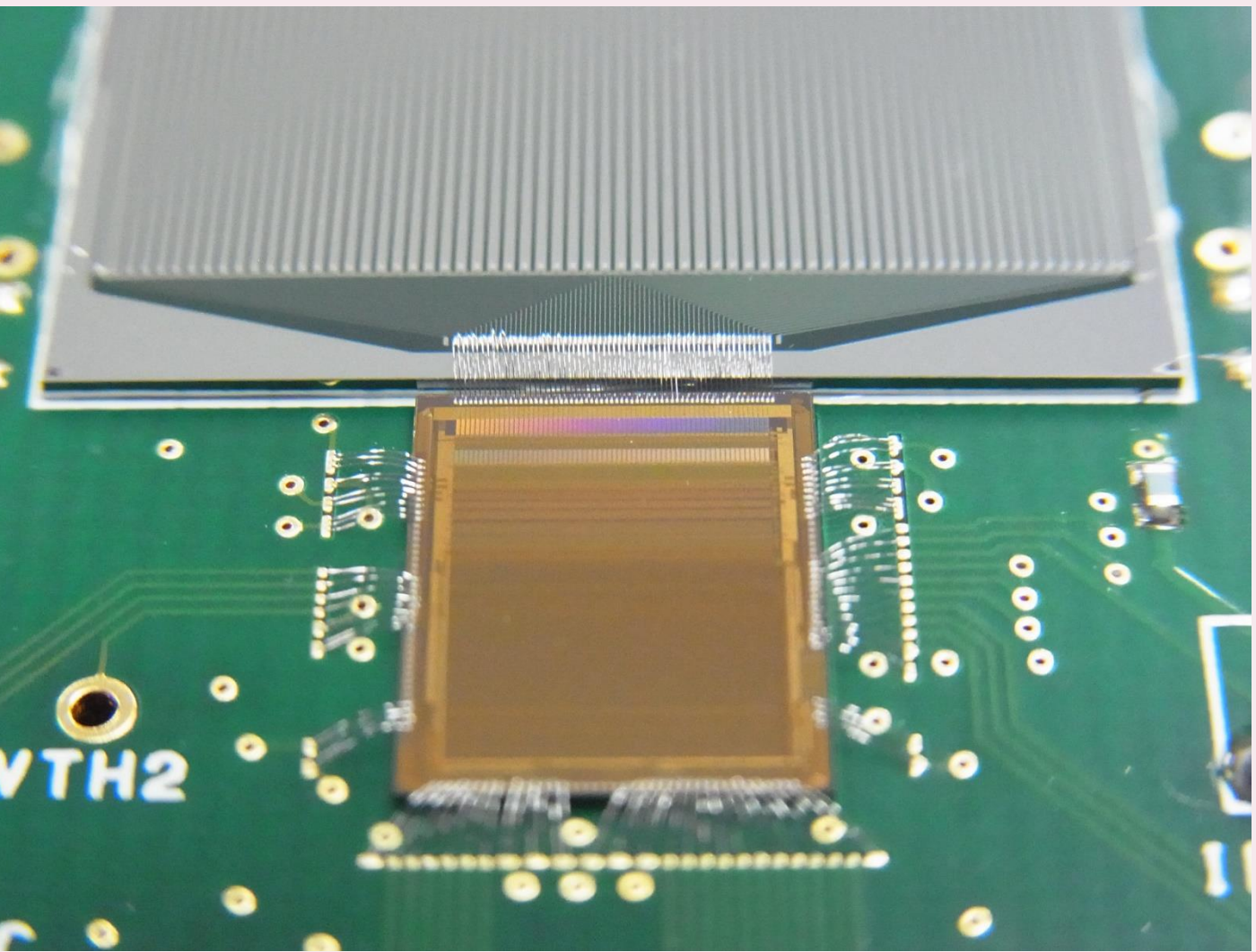


図4. ALEX-02とSSDのボンディング接続写真(左)、取得したX線スペクトル(右)。

X線撮像検出器の概要

HiZ-GUNDAM搭載X線撮像検出器に課される要求を満たす感度をもつためには、光子数にして1 ph/cm²/sec程度の感度が必要である(図1左)。これを満たす観測装置として**1000 cm²**の有感領域をもつ1次元シリコンストリップセンサー(Silicon Strip Detector: SSD)と1次元符号化マスクを用いたX線撮像検出器を提案している(図1右)。互いに直交する方向にスリットの空いた撮像ユニット2つを並べ、それぞれで1次元方向に光源を再構成してそれらのクロスポイントとして突発天体の方向を一意に決定する。位置決定精度や視野は符号化マスクの大きさや開口ピッチ d と撮像素子との距離 D で決まり、幾何学的には $\tan^{-1}(d/D)$ の位置決定精度をもつ。

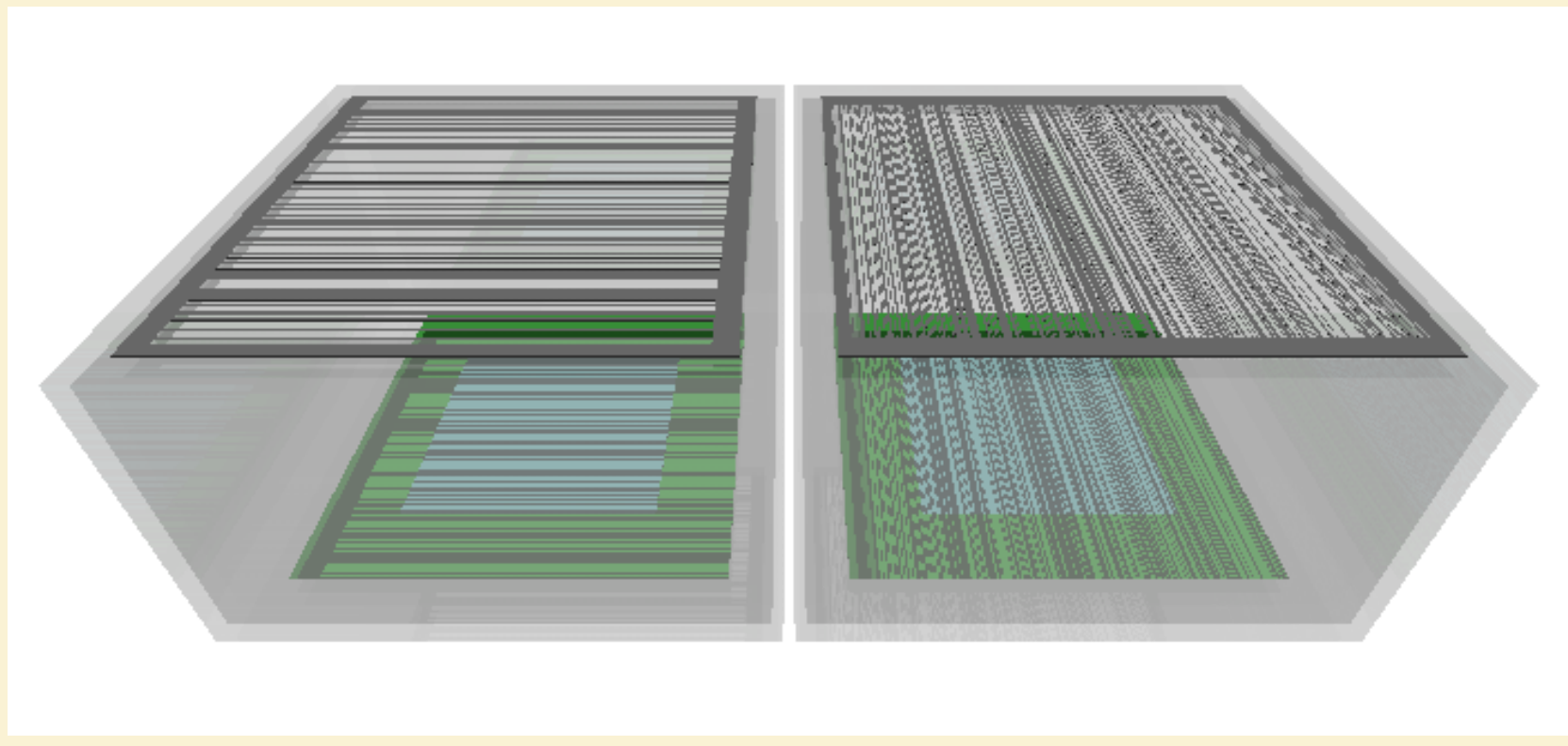
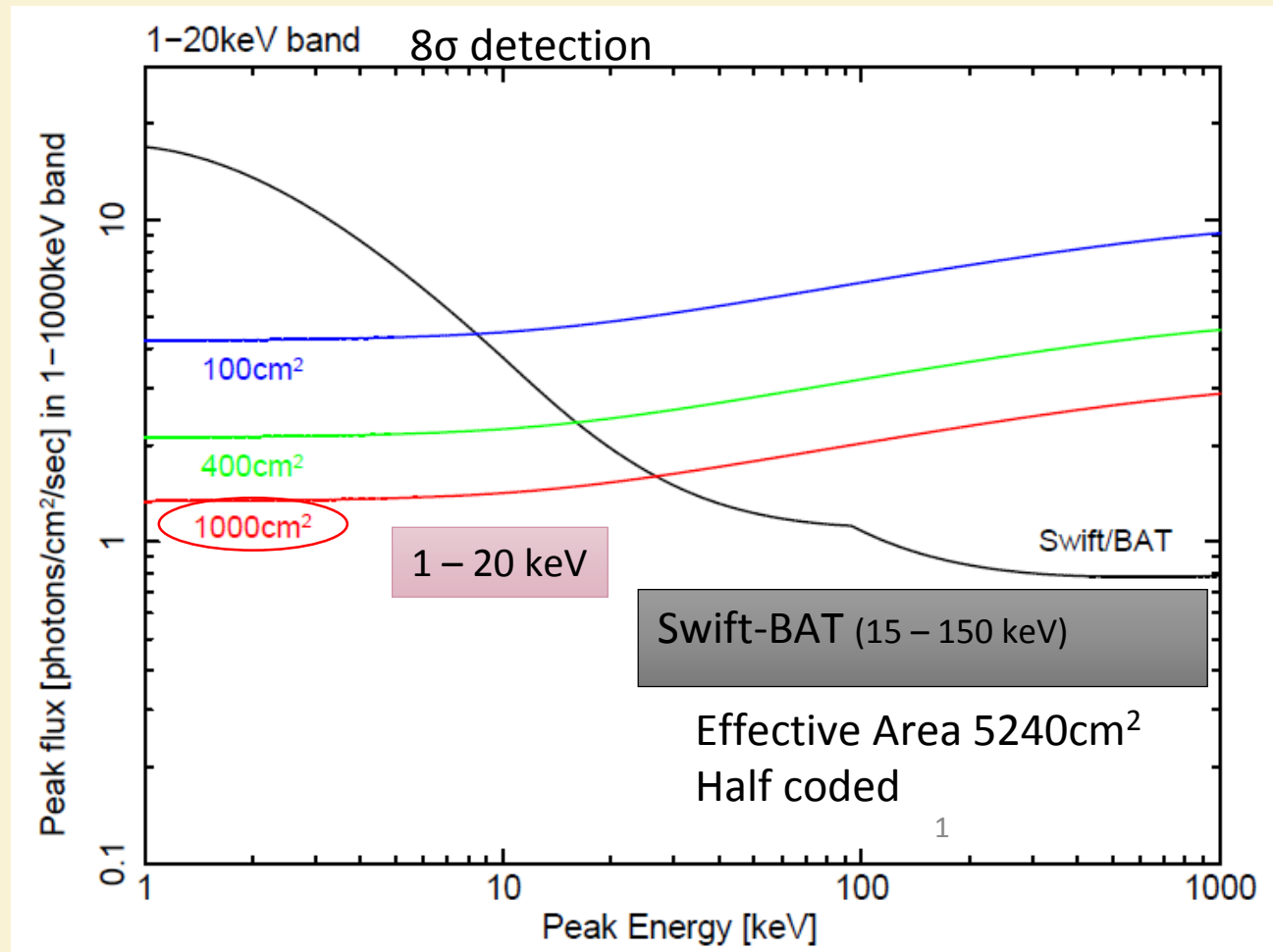


図1. GRBの感度曲線(左)。GRBを8 σ の閾値で検出するために必要な明るさをスペクトルの形状をBand関数と仮定してEpeakの関数で表した[2]。右は検出器概念図。

最少要素モデルによる撮像性能実験

電極幅200 μm 、電極長さ16 mmのSSDとASIC ALEX-02による撮像素子に50 μm 厚のタングステン板にエッチング法で256本のランダムな開口パターンを形成した符号化マスクを、要求値である10分角をみたす5.7分角の幾何学的角度分可能が達成されるように182 mm離して配置した撮像ユニットを製作した(図5上)。X線発生装置とモリブデンターゲットを用いた平行光源(ビーム広がり ~ 20 分角)によりマスクを通過したX線の撮像パターンを測定し(図5中)、マスクとの相互相関

$$C_{ij} = \sum_i (d_i \cdot m_{i+j})$$

Shift index hit pattern mask pattern

をとることで[3]、1次元再構成イメージを取得した(図5下左、下中)。再構成した光源の中心位置方向と設置した光源の方向を比較して**幾何学的に設計した位置決定精度5.7分角**をもつことを確認した(図5下右)。

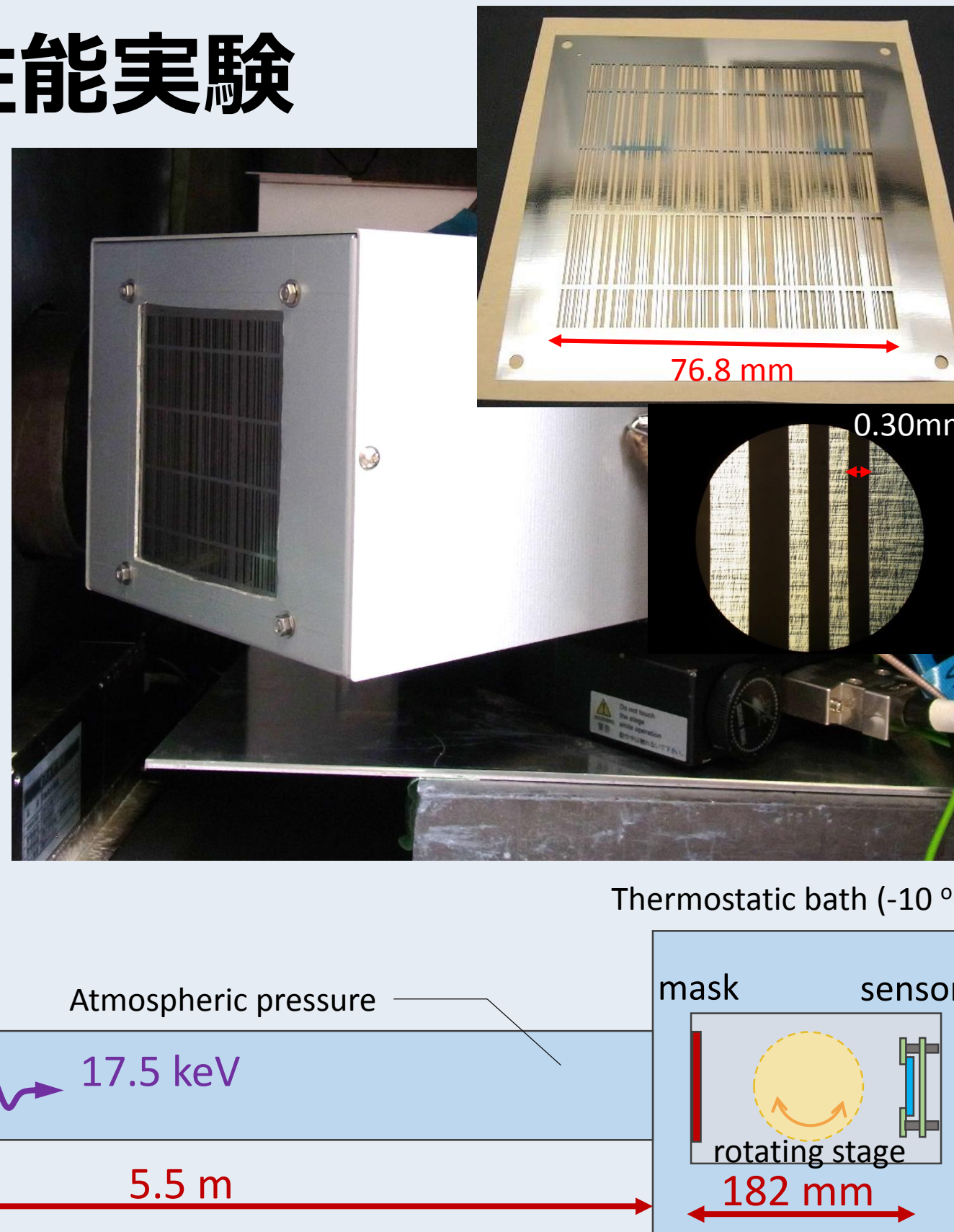
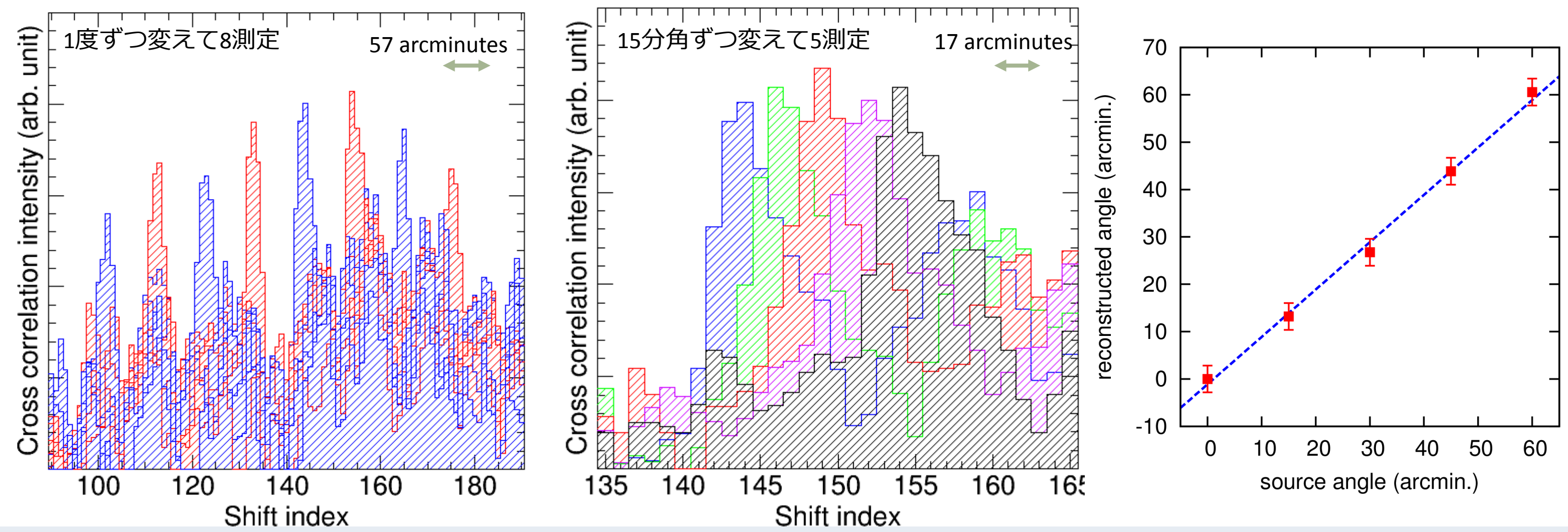


図5. 撮像ユニットとタングステン製符号化マスク写真(上)、撮像性能実験セッアップ概念図(中)、再構成イメージ(下左、下中)、回転角と再構成角の相関(下右)。



プロトタイプモデルの製作

要求される1000 cm²の有感領域をSSDに持たせるためには最終的に**20000チャンネル**を超える信号処理が必要となる。この大規模化へのひな型として、**25 cm² 512チャンネルのSSDの信号を8個のASICとFPGA、CPU**を用いて読み出す1/40スケールプロトタイプモデルの製作を行った。現在基板が完成し、信号読み出しに向けてファームウェア開発などに取り組んでいる。

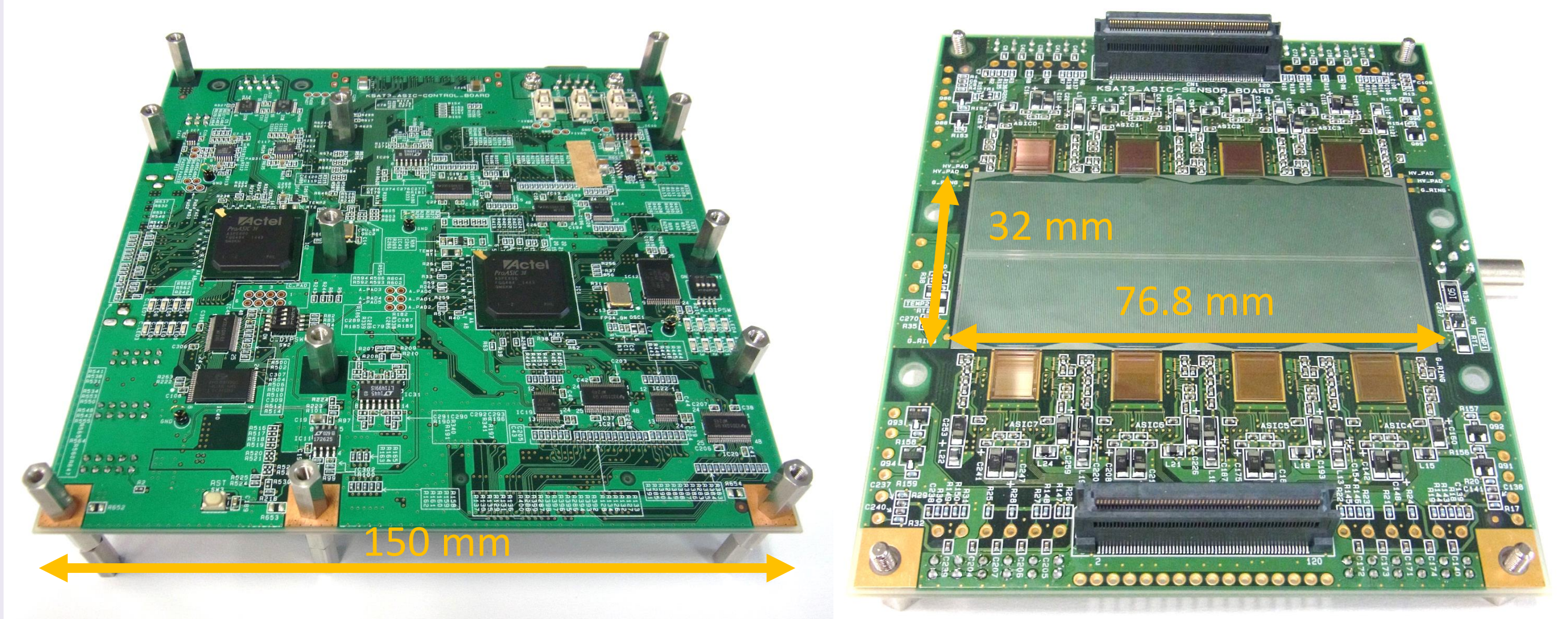


図6 ASICを読み出すFPGAとCPUを搭載した制御基板(左)、25 cm²のSSDと8個のASICを搭載したセンサー基板(右)。

まとめ

- ✓ X線信号読み出しASIC開発で1.5 keV閾値のノイズレベルを達成
 - ☞プリアンプ回路の相互コンダクタンス最適化で目標の1.0 keV閾値を目指す
- ✓ 撮像性能試験で5.7分角の位置決定精度を得ることを確認
- ✓ 今後、プロトタイプモデルを用いて複数のASICを制御し大規模化を目指す

参考文献

- [1] Yonetoku, D. et al., “High- z gamma-ray bursts for unraveling the dark ages mission HiZ-GUNDAM,” SPIE Proc. (2014).
- [2] Band, D.L., “Comparison of the Gamma-Ray Burst Sensitivity of Different,” ApJ (2003).
- [3] Caroli, E. et al., “Coded aperture imaging in X- and gamma-ray astronomy,” Space Science Reviews (1987).