

# 宇宙総合学研究ユニット

## NEWS 2024年4・5月号



### 宇宙倫理学教育プログラム（人文社会委託費）のお知らせ

2021年10月に発足した人文社会委託費プロジェクト「倫理学を基盤とした宇宙人材育成プログラムの開発と実践」について、定期的に、準備状況や活動内容などをお知らせしています。

#### 1. 受講生の決定

「宇宙倫理学教育プログラム」受講生募集は2024年4月14日に締め切れ、たくさんのご応募をいただきました。複数の審査員による精査の結果、学部コース1名、一般コース4名の受講者が新たにプログラムに加わることが決まりました。多くの方にご関心を持っていただき、誠に感謝しております。しかしながら、受け入れ可能な生徒数に限りがあるため、残念ながら多くの方のご要望にお応えできない形となってしまいました。来年度も受講生の募集を行うかは未定ですが、もし来年度も募集を行う場合は、ぜひ皆様のご応募をお待ちしております。

#### 2. 授業開始について

宇宙倫理学教育プログラムに関連した講義が次々と開講されています。基幹講義である「宇宙倫理学入門」（京大文学部提供科目）及び「宇宙倫理学ゼミ」（宇宙ユニット提供科目）は4月24日から開始いたしました。

### SOI 技術を用いた大面積シリコンピクセル X 線検出器の開発

上ノ町 水紀

（東京工業大学 科学技術創成研究院）

2022年5月～2024年3月まで京都大学・宇宙総合研究ユニットに特定助教として在籍しておりました上ノ町水紀と申します。2024年4月から東京工業大学・科学技術創成研究院の特任助教に着任しました。本稿では、宇宙ユニットに在籍していた間に行っていた研究について簡単に紹介させていただきます。

## 研究背景

私は宇宙ユニット在籍時、理学系研究科・物理学第二教室・宇宙線研究室と協力して、SOI (Silicon-on-insulator) 技術による超微細シリコンピクセル X 線検出器 “XRPIX” [1] の開発研究を主に行なっていました。XRPIX は 2010 年頃から、X 線天文衛星への搭載を目指し、京都大学、KEK、宮崎大学を中心に、多くの研究機関と共同で長年開発されています。広帯域(0.5-79 keV)での低バックグラウンドな X 線観測のため、10 電子 rms (root mean square) 以下のノイズレベルかつ 300 eV FWHM (Full width at half maximum) 以下@ 6 keV の高エネルギー分解能を有する大面積素子 (15.3 mm × 49.2 mm) を目指しています。

SOI 技術とは、図 1 のようにシリコン基板の上に絶縁の酸化膜(SiO<sub>2</sub>)を形成し、その上に MOS (Metal-oxide-semiconductor)トランジスタを作製する技術で、XRPIX は、放射線を検出するシリコンセンサと読み出し回路が一体型となった Monolithic な X 線 SOI ピクセル検出器です。センサからの電気信号を直接回路に届けることができるので、損失を抑え、雑音を低減することができます。XRPIX の大きな特徴としては、各ピクセルの回路にトリガー信号を出力するデジタル回路が搭載されていることです。長年、数 μm ~ 数十 μm のピクセルサイズを有するシリコン X 線検出器としては、CCD (Charge coupled device) が用いられています。CCD では、フォトダイオードで受光した光を電荷に変換して蓄積し、隣のピクセルにバケツリレーで電荷を転送します。そのため、CCD では 1 回の電荷の読み出しに 1~10 秒程度の時間を要しますが、XRPIX は一定の閾値以上の電荷がピクセルに入ってきた際にトリガー信号が出てくるので、トリガーピクセル周辺の必要なピクセルの電荷だけを読み出すこと (以後、イベント読み出しと呼ぶ) ことができます。この独自の機能によって、約 10 μs 以下の高速読み出し時間を達成しています。XRPIX の開発は、有感面積 1 mm × 1 mm 程度の小さい素子から始まり、回路やデバイス構造の改善を経て、現在は有感面積 21.9 mm × 13.8 mm の大面積素子も開発中です。本稿では最新の大面積素子 “XRPIX-X” について紹介します。

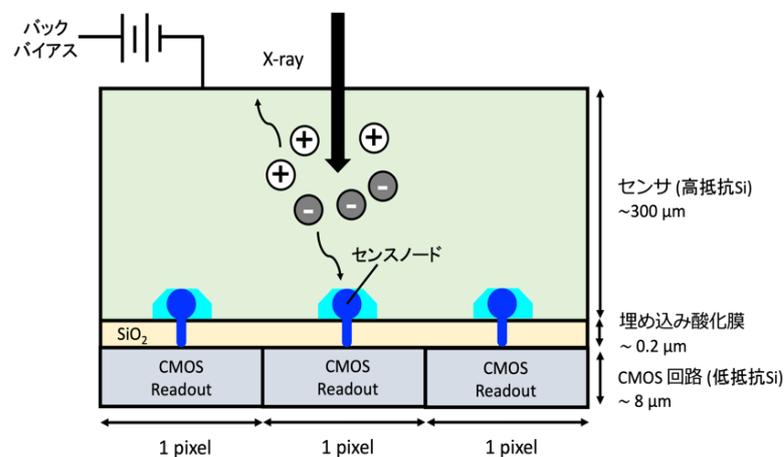


図 1 シリコンセンサ・回路一体型の X 線検出器である SOI ピクセル検出器の構造。X 線が高抵抗 Si のセンサ層で相互作用し、生成された電荷はセンスノードに集められ、CMOS 回路層で信号処理が行われてエネルギー情報などが出力される。

## XRPIX-X の概要と PDD 構造

XRPIX-X は PDD (Pinned depleted diode) 構造を有する小型素子 XRPIX8 (有感面積 3.4 mm × 3.4 mm) を大面積化した素子 (有感面積 21.9 mm × 13.8 mm) です。PDD 構造とは、図 2 のように、Si センサと SiO<sub>2</sub> の間に階段状に形成された BPW (Buried p-well) と BNW (Buried n-well) を組み込んだ構造のことです [2]。図 1 のような従来の Single SOI 構造では、センサ層と回路層/絶縁層間の干渉や寄生容量の影響により、想定のカゲンが得られず、読み出しノイズが増大し、また、CCD のようなトリガ機能を用いないフレーム読み出しで取得した X 線スペクトルと比べ、トリガ機能を動作させるイベント読み出しではスペクトル性能 (分光性能) が大幅に劣化する問題が発生していました。小型素子 XRPIX8 では PDD 構造を組み込むことで、センサ層と回路層の干渉や寄生容量を抑え、低ノイズ化、イベント読み出しでの分光性能の改善、さらに電荷収集効率の構造、暗電流の低減、放射線耐性の向上が可能となりました [3]。

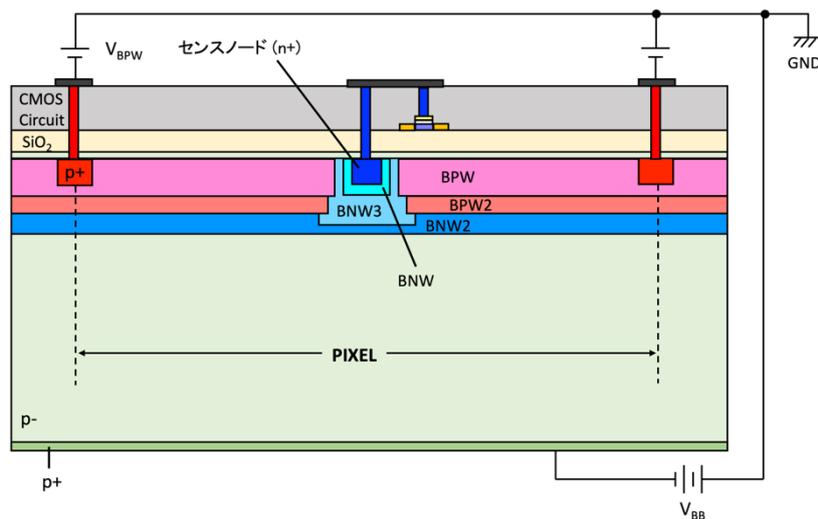


図 2 PDD 構造を組み込んだ SOI ピクセル検出器の断面図。Si センサと SiO<sub>2</sub> の間に階段状に形成された BPW (Buried p-well) と BNW (Buried n-well) が組み込まれている。

図 3 に XRPIX-X の概要を示します。XRPIX-X は PDD 構造を組み込んだ大面積素子で、チップサイズ 24.6 mm × 15.3 mm、有感面積 21.9 mm × 13.2 mm、ピクセルサイズ 36 μm × 36 μm、センサ厚約 300 μm の SOI ピクセル検出器です。ピクセル数以外の基本構成は XRPIX8 と同じですが、アナログ信号の出力チャンネルは従来の 1ch から 8ch に増やし、将来的な読み出し時間の改善を図っています。チップの制御やアナログ信号処理は、ADC (Analog to digital converter) や FPGA (Field programmable gate array) を搭載した読み出しボードを用いて行います。イベント読み出しでは、トリガ信号を出力したピクセルを中心とした 8 × 8 のピクセルの電荷 (エネルギー情報) を順次読み出します。

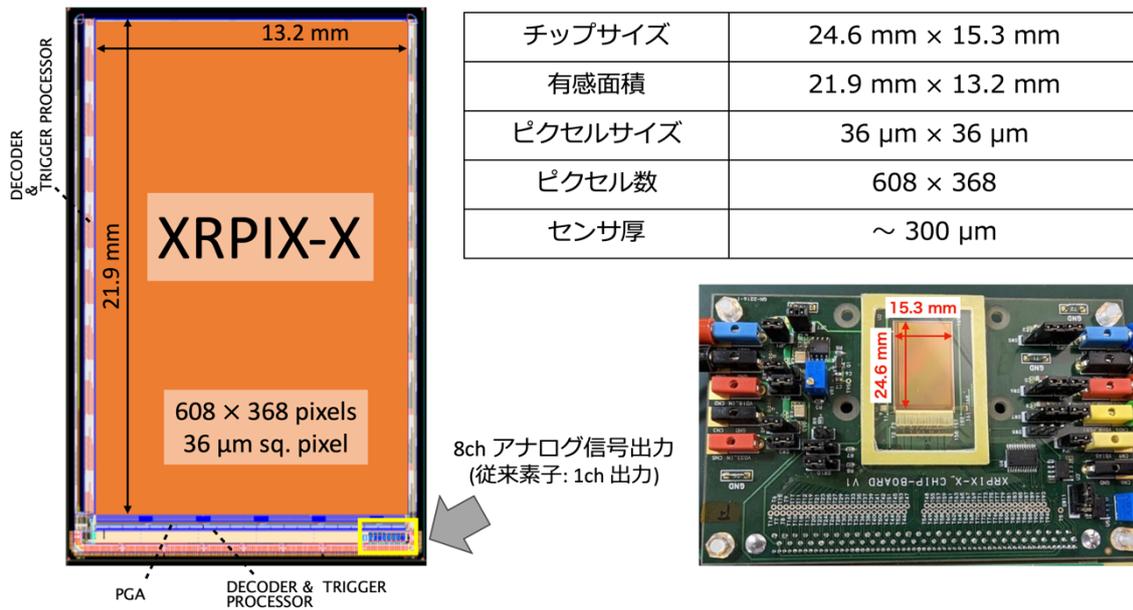


図 3 XRPIX-X の概要。ピクセルサイズ 36 μm × 36 μm、有感面積 21.9 mm × 13.2 mm (ピクセル数 608 × 368)、センサ厚約 300 μm の大面積素子。

### XRPIX-X の基礎性能と課題

図 4 に XRPIX-X のイベント読み出しにおける 241Am のエリア毎のエネルギースペクトルを示します。放射線の有感領域を作るためのバックバイアス (VBB) が -10 V、20°C の一定温度下という測定条件で取得した結果です。縦軸はカウント数、横軸はチャンネル [ADU: Analog to digital unit] で、チャンネル値は X 線のエネルギー値と比例しています。241Am からは主に 13.9 keV、17.8 keV、20.8 keV 等のエネルギーを有する X 線が放出されています。例えば黒のラインに着目すると、280 [ADU]、350 [ADU]、430 [ADU] のあたりにピークがあり、それぞれ 13.9 keV、17.8 keV、20.8 keV に対応しています。ピークの広がりや計測したエネルギーのばらつきを反映し、この広がりが狭ければ狭いほど、エネルギー分解能が高いこととなります。図 4 に示す分光性能は、図 5 の左図に示す小型素子 XRPIX 8 の分光性能 (94 × 94 ピクセル) と比較すると非常に悪い結果となりました。図 4 では有感面積を 6 分割したエリア毎に分けた時のスペクトルを示していますが、エリア⑥の 13.9 keV のピークはエリア①の 13.9 keV のピーク値と比べて約半分のチャンネル値に位置しています。XRPIX-X では、ピクセル間のピーク位置のずれが小型素子と比べて大きく、特に RA (Row address) が大きいピクセルほど (エリア①よりエリア⑥の方が) ピーク位置が小さいチャンネル値にシフトしていました。

図 5 の右図に 1 ピクセルの XRPIX-X の 241Am のエネルギースペクトルを示します。測定条件は図 5 左図の XRPIX 8 の測定と異なりますが、1 ピクセルの分光性能自体は小型素子に十分匹敵するエネルギー分解能を有することがわかりました。XRPIX-X はピクセル毎にエネルギー較正することで全体として小型素子 XRPIX 8 と同等のエネルギー分解能が得られる可能性があります。ピクセル数は 223,744 と非常に莫大であり、1 ピクセル毎のエネルギー較正を行うことは現実的ではありません。私たちはさらに、XRPIX-X のピークシフトの原因を調査、原因を推定し、改善策を盛り込んだ大面積素子 XRPIX-11 を開発しました。現在読み出し基板を作成中で、今年度評価予定です。

## XRPIX-Xの分光性能（エリアごと）

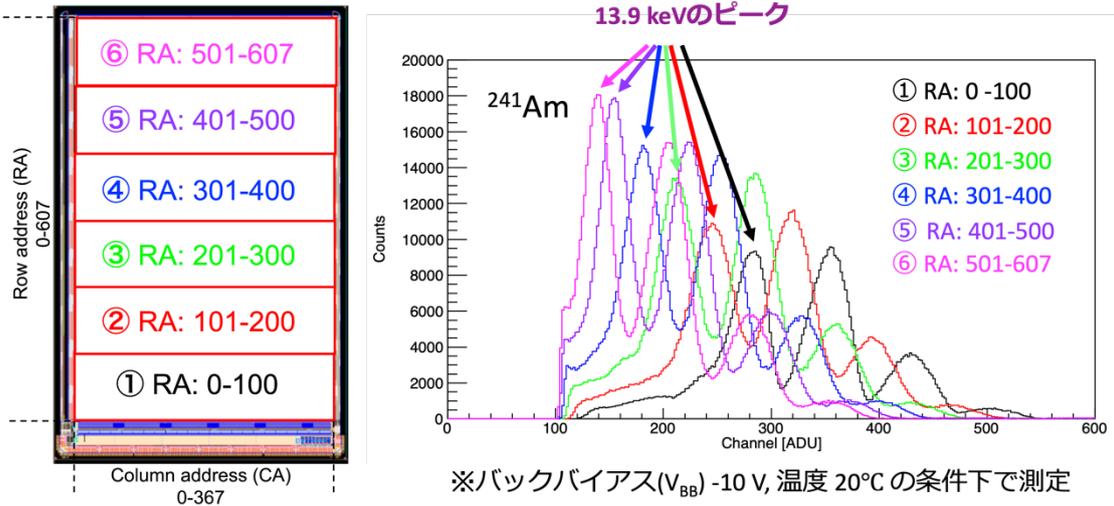
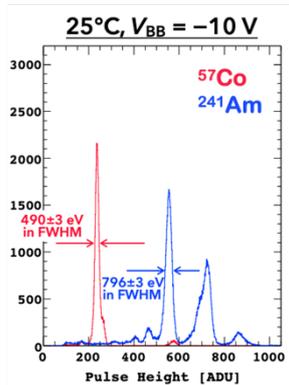


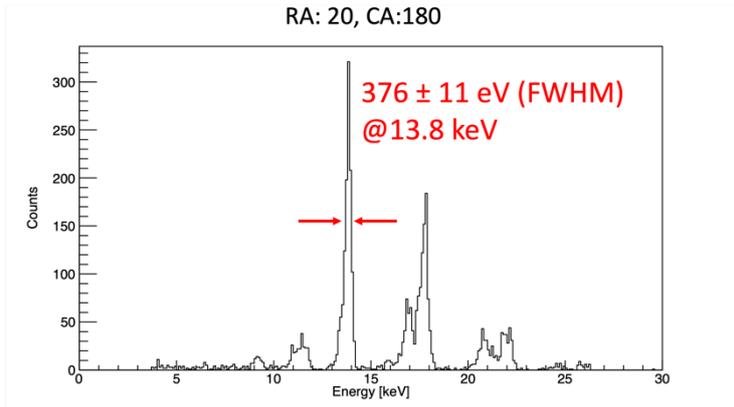
図 4 エリアごとの XRPIX-X の分光性能。RA (Row address) が大きいピクセルほど、つまり、エリア①よりエリア⑥の方が、13.9 keV のピーク位置が小さいチャンネル値に位置している。

## XRPIX8の分光性能 (94×94ピクセル)



※ピクセル毎のゲイン補正なし  
2018年児玉修論(京大)[3]より転載

## XRPIX-Xの分光性能（1ピクセル）



※バックバイアス( $V_{BB}$ ) -30 V, 温度 -20°C の条件下で測定

図 5 小型素子 XRPIX8 の分光性能[3]（左図）と大面積素子 XRPIX-X の 1 ピクセルの分光性能（右図）。右図はチャンネル値をエネルギー値に校正し、横軸はエネルギー [keV] としている。測定条件は異なるが、XRPIX-X の 1 ピクセルの分光性能を調べると、小型素子の XRPIX8 に匹敵する分光性能を有している。

## まとめ

本稿では SOI 技術を用いた大面積シリコンピクセル検出器“XRPIX-X”の開発と性能評価について簡単に紹介させていただきました。XRPIX の開発は、多くの研究機関や研究者の協力のもと、デバイス構造や回路の改善を経て、現在は大面積素子 XRPIX-X の開発まで至っています。大面積化では配線抵抗などの影響により、小型素子では起きなかった問題が発生するなど、素子開発は一筋縄ではいかない難しい部分も改めて実感しました。一方で、XRPIX-X は PDD 構造により、“常温で”高バイアスを印加することができます。もともとは X 線天文衛星への搭載を目指して始まった開発ですが、トリガー出力機能を有する常温動作可能な高エネルギー分解能の XRPIX は、宇宙だけでなく、医学や原子力などの分野にとっても魅力的な素子です。私は実際に、XRPIX を用いた医用応用に向けたガンマ線イメージングの開発も行っており、XRPIX を用いることで、シンチレータ検出器を用いたシステムでは難しかった 100-200 keV の低エネルギーガンマ線のコンプトンイメージングが可能になりました。XRPIX-X では 1 ピクセルの分光性能は小型素子に匹敵するものでしたが、大面積化によってピクセル全体ではピークシフトの問題が発生していました。次の大面積素子 XRPIX-11 ではこの問題に対処し、全ピクセルで一様の性能が得られると期待されています。私は今後も XRPIX の基礎開発研究に携わり、医用応用の研究へつなげていきたいです。

## 参考文献

- [1] T. G. Tsuru et al., “Development and performance of Kyoto’s x-ray astronomical SOI pixel (SOIPIX) sensor.”, Proc. SPIE, 9144, (2014) 914412
- [2] H. Kamehama et al., “A Low-Noise X-ray Astronomical Silicon-On-Insulator Pixel Detectors Using a Pinned Depleted Diode Structure”, Sensors, 18, (2018) 27
- [3] 児玉 涼太 (2021) 「次世代 X 線天文用 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能及びノイズ性能の定量的研究」京都大学大学院理学系研究科 修士論文

---

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

## 京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<https://www.ussp.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 507 号室

編集人：高口和也(宇宙ユニット RA)

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: [ussp@kwasan.kyoto-u.ac.jp](mailto:ussp@kwasan.kyoto-u.ac.jp)