

令和 3 年度 卒業論文

PDD 構造を有する SOI-CMOS 検出器 XRPIX8 における  
イベント駆動読み出しの評価

宮崎大学 工学部 電子物理工学科

岩切 卵月

2022 年 2 月 3 日

## Abstract

本研究では Pinned-Depleted-Diode(PDD) 構造を有する X 線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX8 におけるイベント駆動読み出しの性能評価を行った。開発の初期段階で問題になっていたコンパレータ回路とアナログ信号間の干渉が PDD 構造では大きく改善していることが、先行研究による分光性能の評価からわかつていた。ここでは、アナログ信号を直接観測することで、コンパレータ回路とアナログ信号間の干渉によるあらわな影響が解消していることを確認した。一方で、コンパレータ回路の動作に伴い輝線中心波高値が変化する様子を定量的に捉えた。つまり、依然としてイベント駆動読み出しでは分光性能の劣化が見られることがわかった。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>Introduction</b>	5
1.1	研究背景	5
1.2	本研究の目的	5
1.3	本論文の流れ	5
<b>第 2 章</b>	<b>X線 SOI-CMOS 検出器</b>	7
2.1	Bulk-CMOS と SOI-CMOS	7
2.2	X線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX	8
2.2.1	XRPIX 構造の特徴	8
2.2.2	読み出し方法の特徴	8
2.2.3	XRPIX シリーズ	9
2.2.4	Single-SOI 構造, Double-SOI 構造	9
2.2.5	Pinned-Depleted-Diode 構造	11
2.3	PDD 構造を導入した XRPIX8	12
2.3.1	ウェルの不純物濃度を変更した XRPIX8.X	13
2.4	イベント駆動読み出し	15
2.5	トリガー信号出力までのプロセス	15
2.6	コンパレータ回路とアナログ信号の干渉の調査	18
2.6.1	イベント駆動読み出しの入射 X 線エネルギーと波高値の関係におけるオフセット	18
2.6.2	イベント駆動読み出しのアナログ信号の観測	19
2.6.3	コンパレータ動作時の影響の調査	20
<b>第 3 章</b>	<b>実験システム</b>	21
3.1	実験のセットアップ	21
3.2	アナログ信号の観測実験のセットアップ	22
3.3	ソフトウェア	22
3.3.1	データ読み出しソフト	22
3.3.2	解析ソフト	23
<b>第 4 章</b>	<b>XRPIX8.5 のイベント駆動読み出しの性能調査</b>	27
4.1	イベント駆動読み出しのアナログ信号の観測	27
4.1.1	信号の説明	27
4.1.2	Single-SOI 構造でみられた問題点との比較	28
4.2	コンパレータ回路動作時の影響	30
4.2.1	輝線中心波高値の $\Delta VTH$ 依存性	30
4.2.2	輝線中心波高値のシフト幅のエネルギー依存性	31

---

第 5 章　まとめ	33
参考文献	35
付録 A　X 線入射によるアナログ信号の電圧レベルの計算方法	37

# 第1章

## Introduction

### 1.1 研究背景

我々は次世代のX線天文衛星への搭載を目指したX線 SOI-CMOS 検出器である「XRPIX」の開発を行っている。XRPIX は、Silicon-On-Insulator (SOI) 技術を用いてセンサ層と回路層が一体化した半導体検出器である。XRPIX は各ピクセルにコンパレータ回路を備えており、X 線の入射を検出したピクセルのみを読み出すことができる。この読み出し方法はイベント駆動読み出しと呼ばれ、CMOS 検出器においては他に例を見ない、我々独自の読み出し方法である。初期の XRPIX の構造では、このイベント駆動読み出しの場合、センサ層と回路層間の容量結合によりコンパレータ回路の動作がアナログ信号へ干渉し分光性能が劣化するという問題があった [1]。この問題を受けて、我々はセンサ層と回路層間の干渉をシールドするために固定電位層を導入した Pinned-Depleted-Diode (PDD) 構造を開発し、イベント駆動読み出しの分光性能の劣化を抑制することに成功した [2]。しかし、この PDD 構造におけるコンパレータ回路によるアナログ信号への干渉の調査は行われておらず、具体的に干渉の効果がどのように解消したのか、また、分光性能の劣化が完全に解消したのかという点は未検証のままである。

### 1.2 本研究の目的

本研究では、PDD 構造を有する XRPIX8.5 用いてコンパレータ回路の動作によるアナログ信号への干渉を調査することで、イベント駆動読み出しの性能を評価することを目的とする。

### 1.3 本論文の流れ

本論文では、第 2 章で X 線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX と従来の構造におけるイベント駆動読み出しの問題について述べる。第 3 章で実験セットアップを述べる。第 4 章で実験結果を述べ、5 章で本研究のまとめを述べる。



## 第2章

# X線 SOI-CMOS 検出器

本章では一般的な CMOS である Bulk-CMOS と本研究で使用する SOI-CMOS の違いについて説明し、次にX線 SOI-CMOS 検出器である XRPIX について説明する。なお、この章は福田 (2018) 宮崎大学修士論文 [4] と原田 (2019) 京都大学修士論文 [2] を参考にした。

### 2.1 Bulk-CMOS と SOI-CMOS

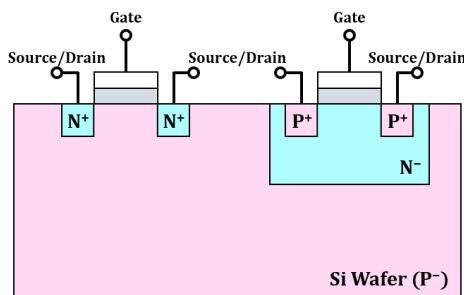


図 2.1 Bulk-CMOS の構造模式図

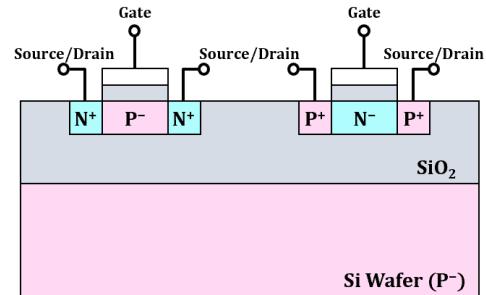


図 2.2 SOI-CMOS の構造模式図

図 2.1 に Bulk-CMOS の構造模式図を、図 2.2 に SOI-CMOS の構造模式図を示す。Silicon-On-Insulator(SOI) とは Si ウエハ上に酸化皮膜 ( $\text{SiO}_2$ ) を作り、更にその上に別の Si 薄膜形成する技術である。 $\text{SiO}_2$  の酸化皮膜層を Buried-OXide(BOX) 層、BOX 層上の Si 薄膜層を SOI 層という。Bulk-CMOS は Si ウエハに p-well/n-well を埋め込み、その上に NMOS/PMOS を形成し回路層を設けるのに対し、SOI-CMOS は SOI 層に回路層を設ける。これにより、SOI-CMOS はトランジスタ同士が分離されるため、寄生容量の低減や回路の高速化、省電力化が可能となる。

## 2.2 X線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX

### 2.2.1 XRPIX 構造の特徴

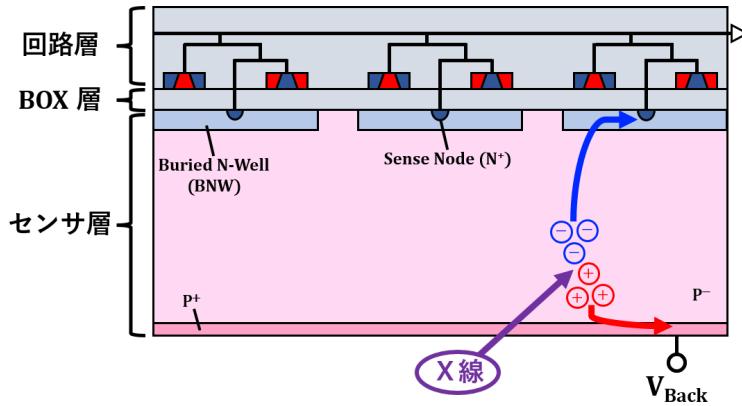


図 2.3 XRPIX の構造模式図

図 2.3 にX線 SOI-CMOS 検出器 XRPIX の構造模式図を示す。XRPIX は、SOI 技術を用いることで BOX 層を挟んで高比抵抗のセンサー層と低比抵抗の回路層を一体化している。センサ層の高比抵抗 Si によりX線の検出効率を上げるために厚い空乏層を実現し、回路層の低比抵抗の Si により高速な CMOS 回路を形成することができる。

### 2.2.2 読み出し方法の特徴

XRPIX の特徴の 1 つに読み出し方法がある。XRPIX ではフレーム読み出しとイベント駆動読み出しという 2 種類の読み出し方法がある。

- イベント駆動読み出し

イベント駆動読み出しは、X線が入射したタイミングで入射したピクセルのみを読み出す方法である。ピクセル毎に備わったコンパレータ回路によって、設定した閾値電圧を超えるとトリガー信号が出力される。このトリガー信号を利用してX線が入射したタイミングで入射したピクセルのみを読み出すことができる。イベント駆動読み出しは XRPIX 独自の読み出し方法であり、高時間分解能を達成できる。読み出し方法とコンパレータ回路の詳細は 2.4 節で説明する。

- フレーム読み出し

フレーム読み出しは、CCD 検出器と類似して、一定時間露光した後、全ピクセルのデータを 1 フレームとして読み出す方法である。CCD 検出器と異なり、XRPIX ではピクセル毎に備わっている読み出し回路により、指定した領域のピクセルのみを読み出すことが可能である。本論文では読み出すピクセルを指定して実験を行った。また、フレーム読み出しではトリガー信号を用いないため、本来は閾値電圧は大きな値に設定している。フレーム読み出しの用途は主に性能評価である。実際に衛星で運用される際には、イベント駆動読み出しを用いる。

### 2.2.3 XRPIX シリーズ

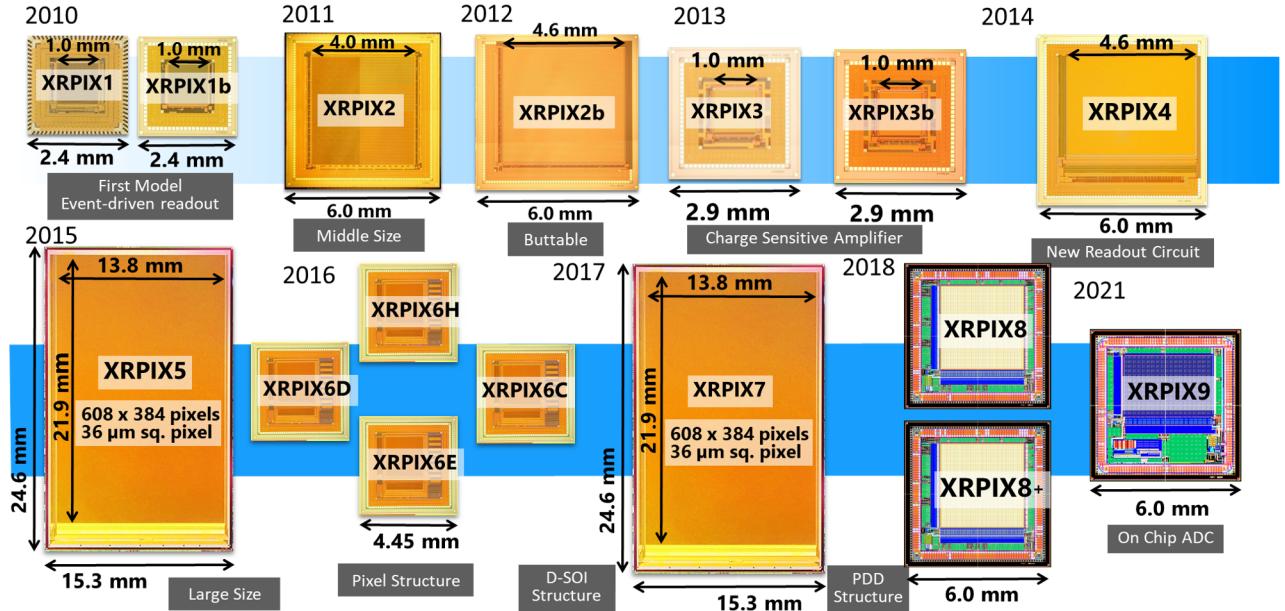


図 2.4 XRPIX の開発歴史。XRPIX のスケールは合わせていない。

図 2.4 にこれまで開発してきた XRPIX の開発歴史を示す。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と京都大学が 2010 年に XRPIX の最初のプロトタイプである XRPIX1 を開発してから、2013 年に宮崎大学も開発に参加し、東京理科大学、静岡大学などと共に XRPIX の改良を行なってきた。次節では従来の XRPIX の構造について説明する。

### 2.2.4 Single-SOI 構造, Double-SOI 構造

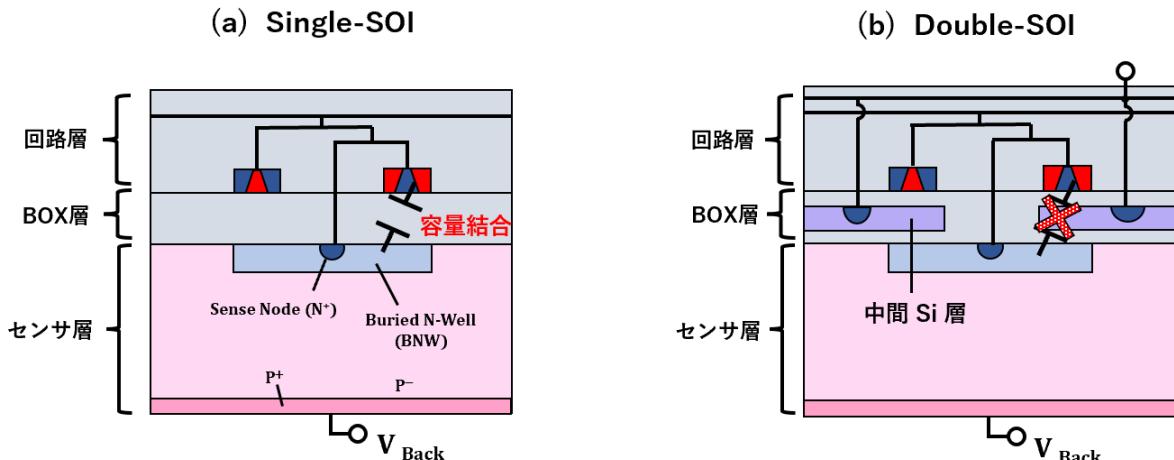


図 2.5 (a)Single-SOI 構造模式図と (b)Double-SOI 構造模式図

図2.5(a)にSingle-SOI構造模式図を、図2.5(b)にDouble-SOI構造模式図を示す。Single-SOI構造とDouble-SOI構造はXRPIPX6E以前に採用していた構造である。この2つの構造の最大の違いは、BOX層に新たに挿入された中間Si層である。先行研究によりSingle-SOI構造では、回路層のデジタル回路とBNWとの間に容量結合が存在した。この結合により、コンパレータ回路の動作がアナログ信号へ干渉し、イベント駆動読み出しの性能が劣化していた[1]。そこで、容量結合による干渉を抑制する目的でDouble-SOI構造が開発された。Double-SOI構造はBOX層に中間Si層を挿入した構造で、中間Si層の電位を固定し、静電シールドとして作用させる。これにより、回路層とBPW間の容量結合を抑え、干渉の抑制が可能となる。Double-SOI構造によってアナログ信号への干渉が実際に抑えられていることは先行研究で確認されている[3]。

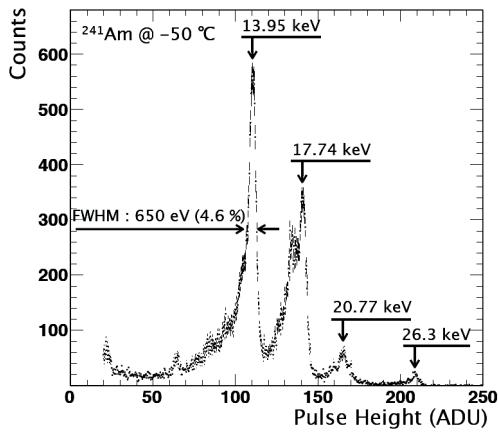


図2.6 XRPIX2bのフレーム読み出しで取得した $^{241}\text{Am}$ のX線スペクトル。縦軸がカウント数、横軸が波高値を表す[7]。

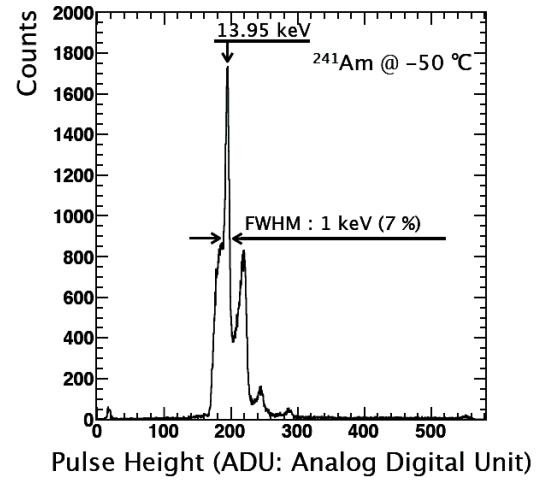


図2.7 XRPIX2bのイベント駆動読み出しで取得した $^{241}\text{Am}$ のX線スペクトル。縦軸がカウント数、横軸が波高値を表す[7]。

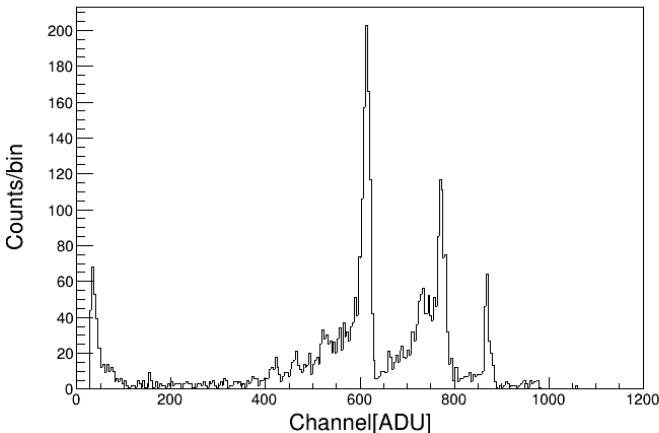


図2.8 XRPIX6Dのフレーム読み出しで取得した $^{241}\text{Am}$ X線スペクトル。縦軸がカウント数、横軸が波高値を表す[4]。

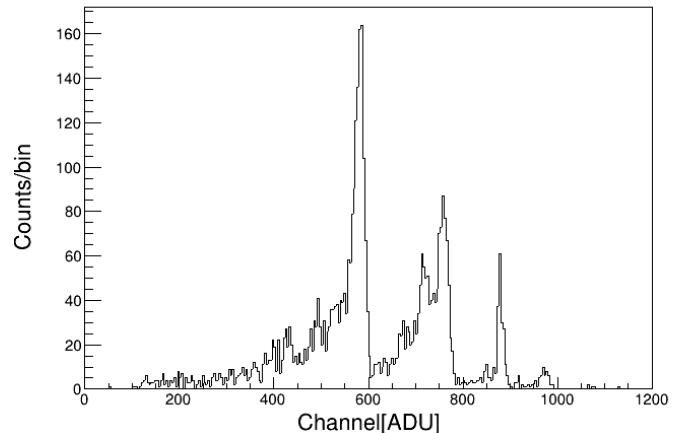


図2.9 XRPIX6Dのイベント駆動読み出しで取得した $^{241}\text{Am}$ のX線スペクトル。縦軸がカウント数、横軸が波高値を表す[4]。

図2.6にXRPIX2bのフレーム読み出しで取得した $^{241}\text{Am}$ のX線スペクトルを示し、図2.7にXRPIX2bのイ

イベント駆動読み出しで取得した  $^{241}\text{Am}$  の X 線スペクトルを示す。XRPIX2b は Single-SOI 構造を持つ素子である。XRPIX2b はフレーム読み出しに比べて、イベント駆動読み出しでは著しく性能が劣化している。図 2.8 に XRPIX6D のフレーム読み出しで取得した  $^{241}\text{Am}$  の X 線スペクトルを示し、図 2.9 に XRPIX6D のイベント駆動読み出しで取得した  $^{241}\text{Am}$  の X 線スペクトルを示す。XRPIX6D は Double-SOI 構造を持つ素子である。Double-SOI 構造により、コンパレータ回路のアナログ信号への干渉が抑制され、イベント駆動読み出しの性能劣化の改善が確認されている [4]。

### 2.2.5 Pinned-Depleted-Diode 構造

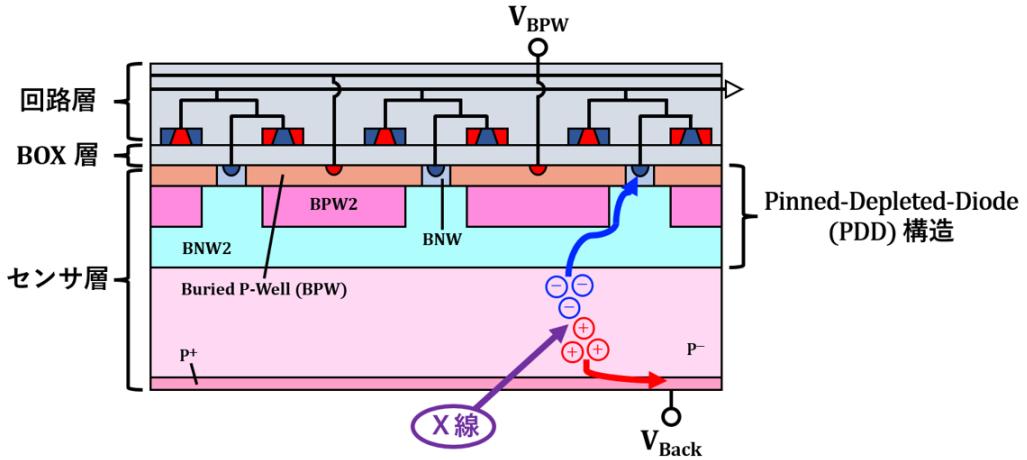


図 2.10 Pinned-Depleted-Diode 構造

図 2.10 に Pinned-Depleted-Diode(PDD) 構造を示す。Double-SOI 構造で、容量結合によるアナログ信号への干渉の抑制に成功したが、従来の XRPIX の構造ではリーク電流や電荷回収効率の低下が生じていた。これは、格子不整合によって BOX 層/センサ層界面に形成される新たなエネルギー準位（表面準位）による熱励起、電荷トラップに起因していた。この問題を受け、最新の XRPIX には PDD 構造を導入している。PDD 構造は BOX 層/センサ層界面を覆うように Buried P-Well (BPW) を形成し、濃度の異なる BNW、BNW2 を階段状に形成している。BOX 層/センサ層界面を覆うように形成した BPW により、BOX 層/センサ層界面で発生した電子は BPW に存在するホールとすぐに再結合するため、リーク電流が削減される。階段状に形成した濃度の異なる BNW、BNW2 は横方向電場を形成し、信号電荷を BOX 層/センサ層界面を介さずに回収させることで、電荷回収効率を向上させている。

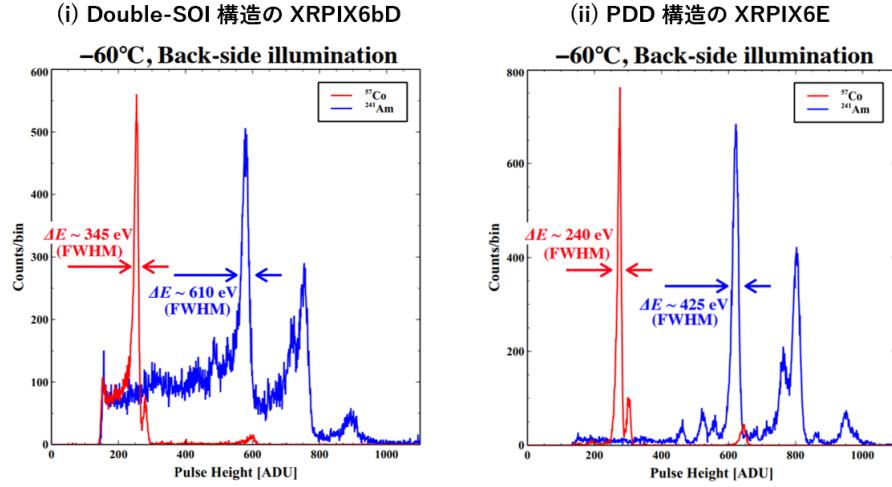


図 2.11 XRPIX6E と XRPIX6bD のイベント駆動読み出しで取得した  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{241}\text{Am}$  のスペクトル [2]

図 2.11 の (i) に XRPIX6bD のイベント駆動読み出しで取得した  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{241}\text{Am}$  のスペクトル、(ii) に XRPIX6E でイベント駆動読み出しで取得した  $^{57}\text{Co}$ 、 $^{241}\text{Am}$  のスペクトルを示す。XRPIX6bD は Double-SOI 構造、XRPIX6E は PDD 構造の素子である。XRPIX6bD では電荷トラップによってスペクトルにテール成分が見られた。XRPIX6E では PDD 構造を導入したことでのテール成分が改善され、分光性能が向上している [2]。

## 2.3 PDD 構造を導入した XRPIX8

PDD 構造を導入した XRPIX8 の仕様と問題点を説明する。

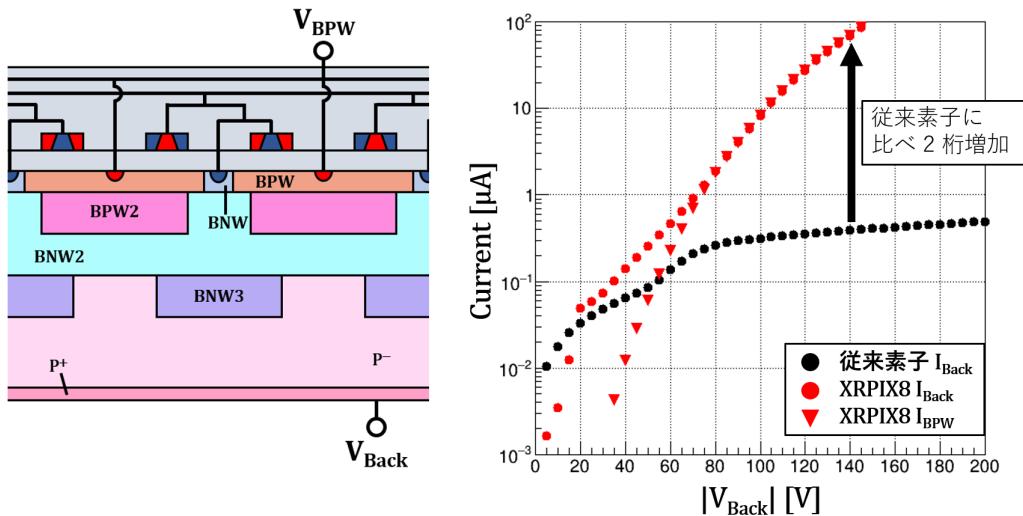


図 2.12 XRPIX8 の構造と従来の XRPIX の電流電圧特性の比較 [5]

図 2.12 に XRPIX8 の構造と従来の XRPIX の電流電圧特性の比較を示す。XRPIX8 は新たに BNW3 を追加した構造になっている。BNW3 を追加することにより、電荷を回収するポテンシャルのフラットな部分を減らし、電荷回収効率を上げることができる。XRPIX8 には、リーク電流問題と呼ばれる従来の XRPIX に比べピクセル部に流れる電流

( $I_{\text{Back}}$ ) が大きい問題があった。図 2.12 から、バックバイアス電圧 ( $V_{\text{Back}}$ ) を大きくすると電流が従来素子より 2 枠大きくなっている。このリーク電流問題は、BPW-P 型基板間の電流密度が高いことが原因で、BPW-P 型基板間にある BNW2 の不純物濃度を濃くすることで解決できる [5]。

### 2.3.1 ウェルの不純物濃度を変更した XRPIX8.X

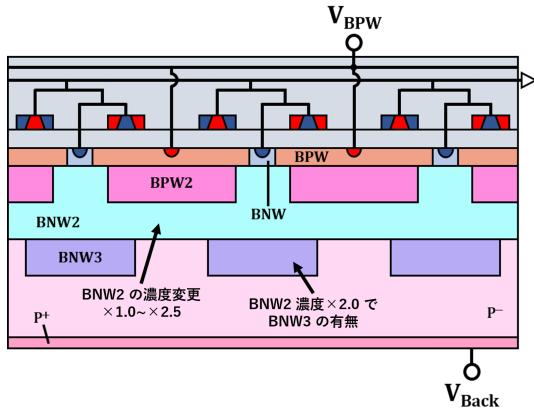


表 2.1 XRPIX8.X 各素子における PDD 構造のウェルの不純物濃度の条件

素子名	BNW2 濃度	BNW3 の有無
XRPIX8	1 倍	あり
XRPIX8.2	1.5 倍	あり
XRPIX8.3	2.0 倍	あり
XRPIX8.4	2.5 倍	あり
XRPIX8.5	2.0 倍	なし

図 2.13 XRPIX8.X での変更箇所と変更パターン。

図 2.13 に XRPIX8 からの変更箇所と変更パターンを示し、表 2.1 に XRPIX8.X 各素子における PDD 構造のウェルの不純物濃度の条件を示す。リーク電流の抑制の為、XRPIX8 のウェルの不純物濃度を変更した素子を 4 パターン作成した。XRPIX8 のウェルの不純物濃度の条件を変更した素子の総称を XRPIX8.X と呼ぶ。末尾の X には BNW2 濃度が濃い順に 2~4 の数字が入り、BNW3 を除去した素子には 5 が入る。

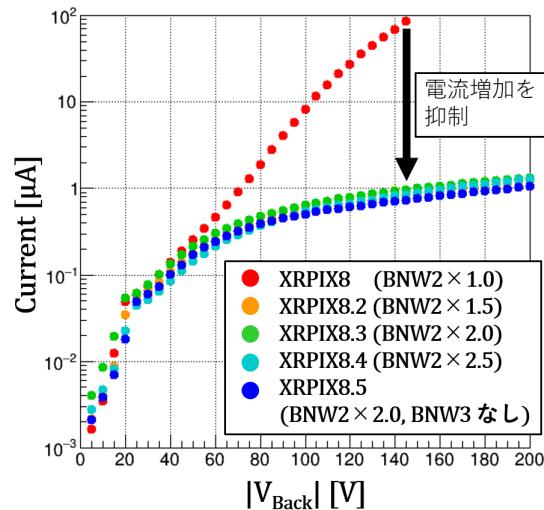


図 2.14 XRPIX8 と XRPIX8.X 各素子の電流電圧特性の比較 [5]

図 2.14 に XRPIX8 と XRPIX8.X 各素子の電流電圧特性の比較を示す。BNW2 の濃度を 1.5 倍以上にすることによりリーク電流が抑制されていることが確認されている [5]。

図 2.15 に XRPIX8 と XRPIX8.X の各素子で取得した  $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{241}\text{Am}$  のスペクトルを示す。また、図 2.16 に XRPIX8、XRPIX8.X の各素子で取得したスペクトルの 5.9 keV と 13.9 keV でのエネルギー分解能の比較を示す。BNW2 の濃度

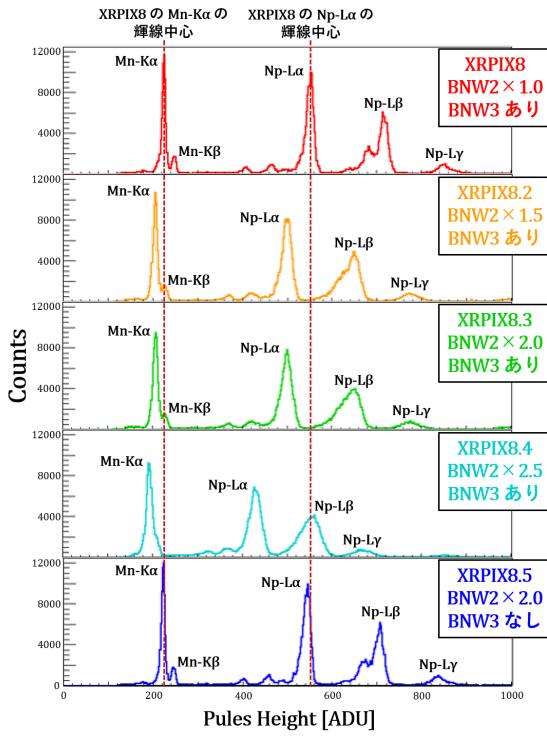


図 2.15 XRPIX8 と XRPIX8.X の各素子で取得した  $^{55}\text{Fe}$ 、 $^{241}\text{Am}$  のスペクトル。横軸は波高値、縦軸はカウント数。[6]

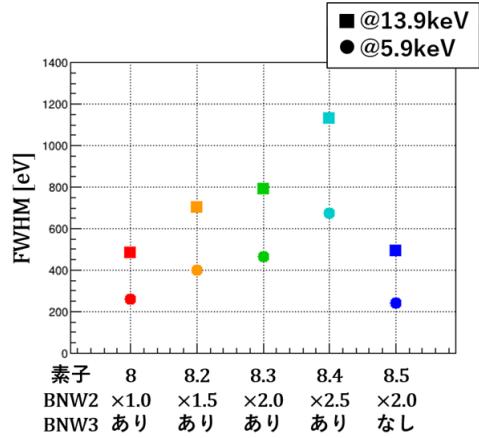


図 2.16 XRPIX8、XRPIX8.5 の各素子で取得したスペクトルの 5.9keV と 13.9keV でのエネルギー分解能の比較。横軸は素子の種類、縦軸は各輝線のピークをガウス関数でフィットして求めた FWHM[6]。

を濃くすると、輝線ピークが低波高値側にシフトする。また、分光性能は度合いの一番大きい XRPIX8.4 で、XRPIX8 に対して 5.9 keV で約 161 %、13.9 ~keV で約 134 % 劣化している。しかし、BNW3 を除去した XRPIX8.5 では輝線のピークが XRPIX8 と近い位置になり、分光性能は XRPIX8 に対して 5.9 keV で約 6 %、13.9 ~keV で約 2 % の劣化に抑えられている。本研究では、先行研究の結果から、リーク電流を抑えつつ分光性能の劣化が少ないとされる不純物濃度条件を持つ XRPIX8.5 を用いた。

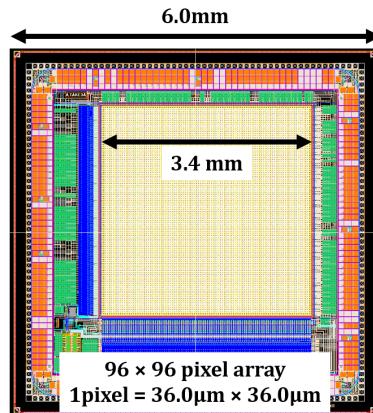


図 2.17 XRPIX8.5 のチップレイアウト

図 2.17 に XRPIX8.5 のチップレイアウトを示す。チップサイズは 6.0 mm 角で、ピクセルサイズは 36  $\mu\text{m}$  角、ピクセル数は 96 × 96 ピクセルである。

## 2.4 イベント駆動読み出し

イベント駆動読み出しあとは一定時間露光中にX線による入射を検出した場合に、検出したピクセルのみを読み出す方法である。XRPIXは各ピクセルにコンパレータ回路を搭載している。コンパレータ回路により、予め設定したトリガー閾値電圧を超えるアナログ信号が来た場合にトリガー信号が outputされる。このトリガー信号の出力を利用して、検出したピクセルのみを読み出すことができる。以下にイベント駆動読み出しの読み出しプロセスを示す。

## 2.5 トリガー信号出力までのプロセス

XRPIXでは、トリガー信号を出力するためにコンパレータ回路を使用している。コンパレータには2つの反転増幅器からなるインバータチャップ型を用いている。予めトリガー閾値電圧を設定しておく、その閾値電圧を超える信号が来た際にトリガー信号が出力される。コンパレータ回路の制御方法を以下で説明する。

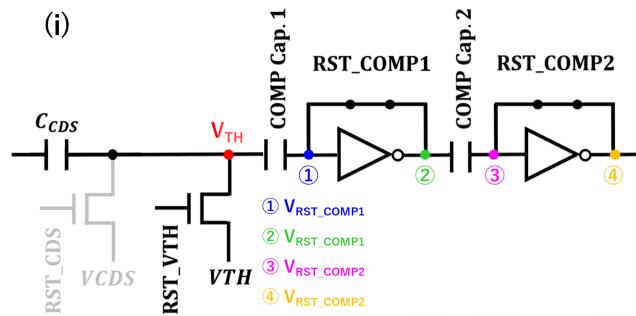


図 2.18 コンパレータリセット時の回路の動作

- (i) 図 2.18 のように RST\_VTH、RST\_COMP1、RST\_COMP2 を ON、RST\_CDS を OFF にして、コンパレータのリセットを行う。この時、青と緑で示した場所の電位は1つ目のコンパレータの動作電圧である  $V_{RST\_COMP1}$  となり、マゼンタとイエローで示した場所の電位は2つ目のコンパレータの動作電圧である  $V_{RST\_COMP2}$  となる。

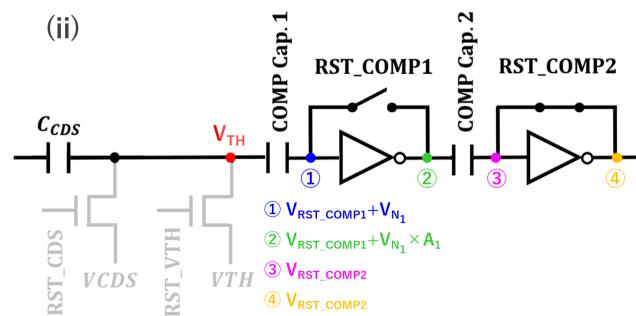


図 2.19 RST\_VTH を OFF にした後、RST\_COMP1 を OFF にした回路の動作

- (ii) 図 2.19 のように RST\_VTH を OFF にした後、RST\_COMP1 を OFF にする。この時、リセットノイズ  $V_{N1}$  が発生する。よって緑の電位は、1つ目のコンパレータの増幅率  $A_1$  を用いて  $V_{N1} \times A_1$  が加算される。

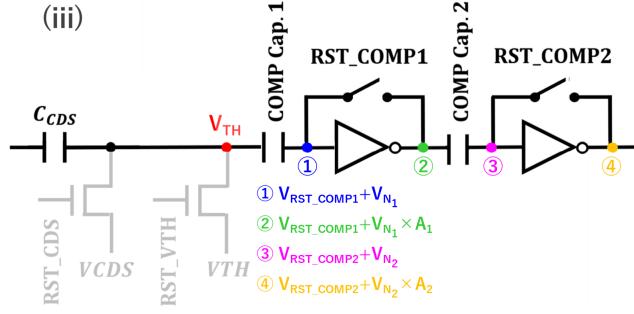


図 2.20 RST\_VTH、RST\_COMP1、RST\_COMP2 を ON、RST\_CDS を OFF にした回路の動作

- (iii) 図 2.20 のように RST\_COMP2 を OFF にする。COMP Cap.2 によりリセットノイズ  $V_{N_1}$  がキャンセルされ、新しくリセットノイズ  $V_{N_2}$  が発生する。よって、マゼンタの電位には  $V_{N_2}$  が加算され、イエローの電位には 2 つ目のコンパレータの増幅率  $A_2$  を用いて  $V_{N_2} \times A_2$  が加算される。

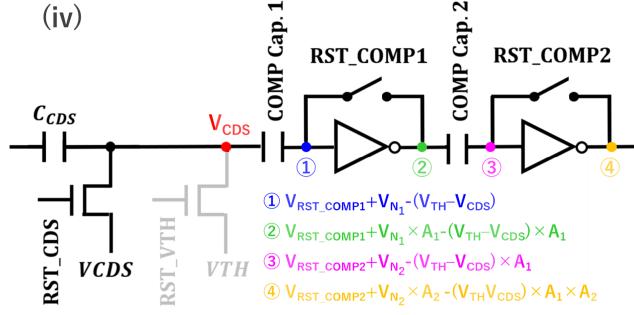


図 2.21 RST COMP2 を OFF にした回路の動作

- (iv) 図 2.21 のように RST\_CDS を ON にする。入力電圧は  $V_{CDS}$  になる。COMP Cap.1 に貯った電荷により、COMP Cap.1 の両側の電圧差は保持されるため、青の電位には  $-(V_{TH} - V_{CDS})$  が加算される。また、出力側のイエローの電圧は、

$$V_{RST\_COMP2} - (V_{TH} - V_{CDS}) \times A_1 \times A_2$$

となるが、 $A_1$ 、 $A_2$  が十分大きければ、

$$-(V_{TH} - V_{CDS}) \times A_1 \times A_2$$

の電位となる。この  $V_{TH} - V_{CDS}$  が基準電位となる。

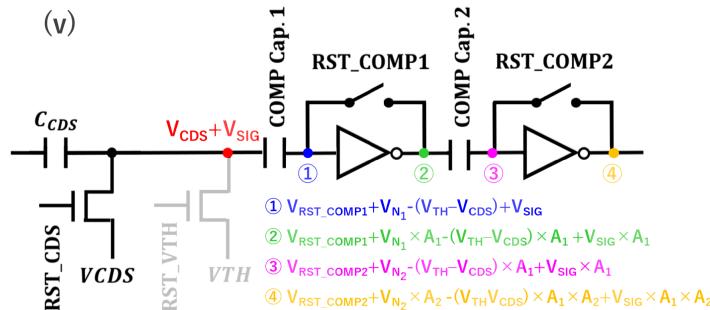


図 2.22 RST\_VTH、RST\_COMP1、RST\_COMP2 を ON、RST\_CDS を OFF にした回路の動作

- (v) X線による信号  $V_{SIG}$  が生じると  $C_{CDS}$  の電位は保持されるため、入力側の赤の電圧は  $V_{CDS} + V_{SIG}$ 、出力側のイエローの電圧は、

$$V_{SIG} - (V_{TH} - V_{CDS}) \times A_1 \times A_2$$

となる。ここで、

$$V_{SIG} > (V_{TH} - V_{CDS})$$

のとき、トリガー信号が出力される。このように、 $V_{TH}$ 、 $V_{CDS}$  を設定し、閾値電圧を決めることでトリガー信号を出力している。本論文では、この閾値電圧  $V_{TH} - V_{CDS}$  を  $\Delta V_{TH}$  と表記する。

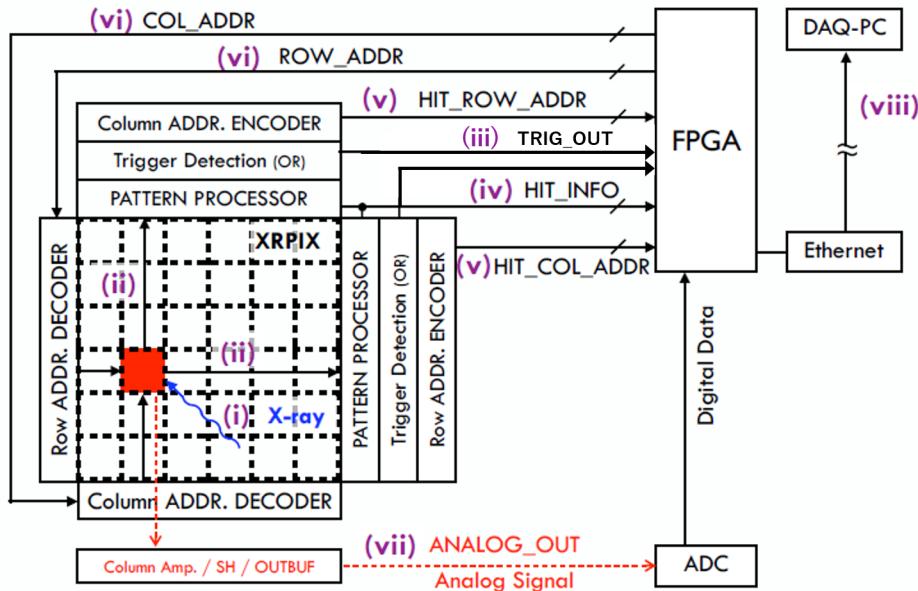


図 2.23 イベント駆動読み出しの読み出しプロセスの概念図

図 2.23 にイベント駆動読み出しの読み出しプロセスの概念図を示す。

- (i) あるピクセルにX線が入射し電荷が生成される。
- (ii) 生成された電荷による信号レベルが閾値電圧を超えると、Row、Column 方向にトリガー信号 (TRIG\_OUT\_ROW、TRIG\_OUT\_COL) が outputされる。
- (iii) 全ピクセルのトリガー信号の OR を FPGA に出力する。その後、Column と Row の AND を取得する。
- (iv) X線が入射した際の時間情報やピクセルのパターン情報 (单一ピクセルか複数ピクセルか) を記録する。
- (v) X線が入射したピクセルの座標情報を記録する。
- (vi) FPGA 内でX線によるイベントと判定した場合、入射ピクセルのアナログ信号が出力される。
- (vii) 出力されたアナログ信号を Analog to Digital Converter(ADC) で AD 変換し、FPGA 内で一時的に保存される。
- (viii) データをネットワーク経由で PC へ出力する。

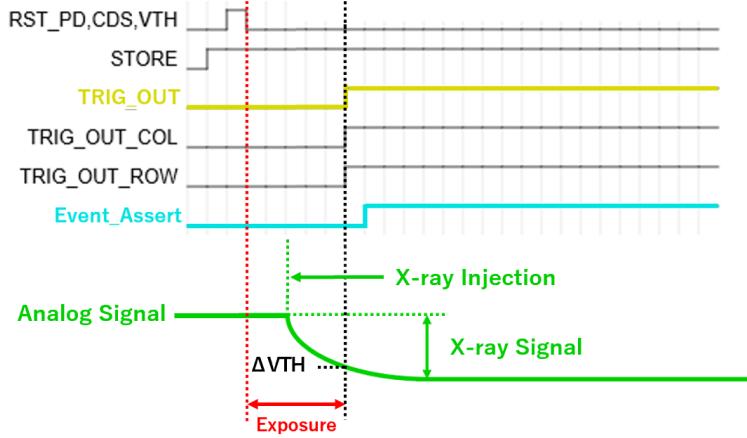


図 2.24 イベント駆動読み出しの読み出しのタイミングダイアグラム。スケールは適切ではない [4]。

図 2.24 にイベント駆動の読み出しのタイミングダイアグラムを示す。 $\Delta VTH$  を超えるX線が入射すると Row 方向、Column 方向の射影に TRIG\_OUT\_ROW、TRIG\_OUT\_COL が出力され、その OR をとって TRIG\_OUT が出力される。その際、TRIG\_OUT\_ROW、TRIG\_OUT\_COL の AND を取得してイベント確定信号である Event Assert が出力される。どちらか一方の場合は出力されない。

## 2.6 コンパレータ回路とアナログ信号の干渉の調査

2.2.5 節で、PDD 構造素子である XRPIX6E ではイベント駆動読み出しのスペクトルの劣化が見られなかったことから、PDD 構造はコンパレータ回路によるアナログ信号への干渉は抑制されていると考えられる。この干渉の抑制は、入射X線エネルギーと波高値の関係におけるオフセットの違いからも確認できる。

### 2.6.1 イベント駆動読み出しの入射X線エネルギーと波高値の関係におけるオフセット

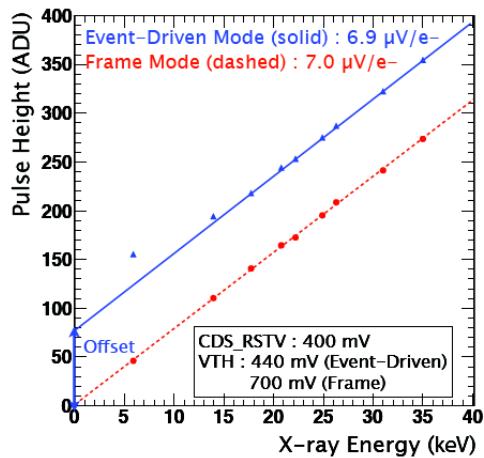


図 2.25 XRPIX2b の各読み出しでの入射X線のエネルギーと波高値の関係 [7]。赤線はフレーム読み出し、青線はイベント駆動読み出しを表す。

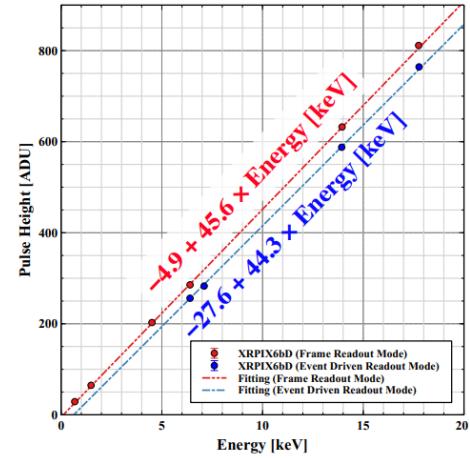


図 2.26 XRPIX6E の各読み出しでの入射X線のエネルギーと波高値の関係 [2]。赤線はフレーム読み出し、青線はイベント駆動読み出しを表す。

図 2.25 は、XRPIX2b の各読み出しでの入射X線のエネルギーと波高値の関係を示している。図 2.26 は、XRPIX6E

の各読み出しでの入射X線のエネルギーと波高値の関係を示している。赤線はフレーム読み出し、青線はイベント駆動読み出しを表す。XRPIX2bでは、コンパレータ回路の動作がアナログ信号へ干渉し、イベント駆動読み出しでは大きなオフセットを有することが確認されている。これに対して、XRPIX6Eではオフセットが小さいことが確認されている[2]。このオフセットの違いでPDD構造ではコンパレータ回路の動作とアナログ信号間の干渉は抑制されていると考えられる。しかし、スペクトルの形状、オフセット以外の観点で、コンパレータ回路の動作によるアナログ信号への干渉の抑制は詳細に調査されていない。

### 2.6.2 イベント駆動読み出しのアナログ信号の観測

Takeda et al.(2014)[1]、Takeda(2014)[7]の報告では、コンパレータ回路のアナログ信号への干渉の調査でアナログ信号を観測している。

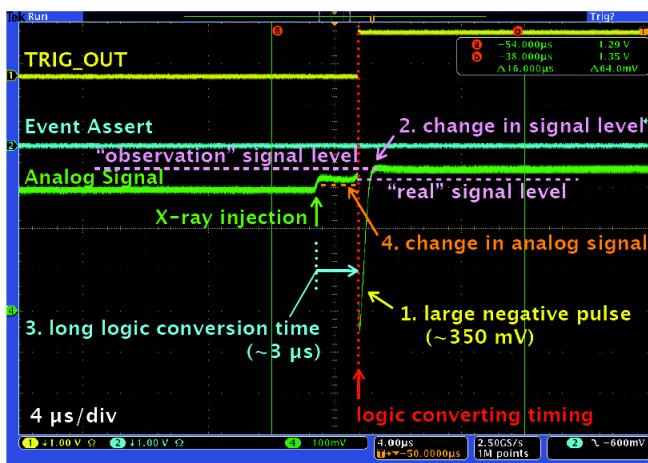


図 2.27  $^{109}\text{Cd}$  からのX線入射時のイベント駆動読み出しにおける各信号の波形 [7]

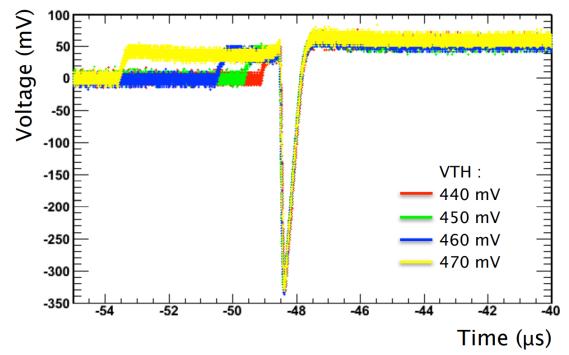


図 2.28 閾値電圧によるアナログ信号の波形の変化 [7]

図 2.27 では Ag-K $\alpha$  のX線検出時のイベント駆動読み出しにおける各信号の波形が示されている。TRIG\_OUT は閾値電圧を超えるX線が入射したことによるコンパレータの動作信号であり、Event Assert はイベント確定信号である。図 2.28 は  $V_{\text{CDS}} = 400 \text{ mV}$  に固定し、 $V_{\text{TH}}$  を変化させた時の、各  $V_{\text{TH}}$  ごとのアナログ信号の波形が示されている。図 2.27 より確認されている、コンパレータ回路の動作によるアナログ信号へ干渉で起きる問題を以下に示す。

- 大きな負のパルス  
TRIG\_OUT が Low から High に変化すると約 350 mV の大きな負のパルスが発生している。
- アナログ信号の電圧レベルの差  
TRIG\_OUT が Low から High に変化した前後でアナログ信号の電圧レベルに差が生じている。これは実際に我々が取得するデータにオフセットが付加された状態で出力されてしまうことを意味している。実際に、このレベル差は図 2.25 に現れているイベント駆動読み出し時の約 80 ADU のオフセットと一致している。この問題は得られたスペクトルを解析することで別の視点からの検証も行われている。2.6.3 節で説明する。
- 長いコンパレータの論理反転時間  
X線が入射し、TRIG\_OUT が High になるまでの時間をコンパレータの論理反転時間と呼ぶ。このコンパレータの論理反転時間に約 3  $\mu\text{s}$  かかっている。X線の入射からここまで時間がかかるることは予期していない。また、図 2.28 から、コンパレータの特性により閾値電圧をアナログ信号の電圧レベルに近づけると、コンパレータの論理反転時間が遅延することが確認されている[7]。
- アナログ信号の変化  
X線が入射し、TRIG\_OUT が High になるまでの間に、アナログ信号が変化している。コンパレータ回路のレイ

アウトによるものであることがわかっている。現在はレイアウトの変更により改善されている [4]。

### 2.6.3 コンパレータ動作時の影響の調査

フレーム読み出しで閾値電圧を低く設定し、意図的にコンパレータを動作させることで、2.6.2節の問題の検証が行われている。

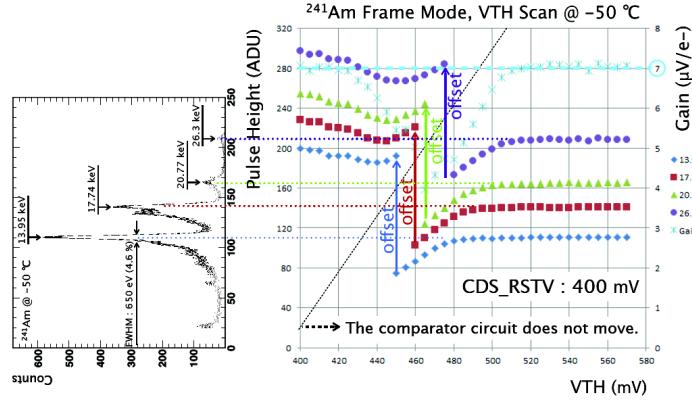


図 2.29 XRPIX2b における  $^{241}\text{Am}$  の輝線中心波高値の閾値電圧 ( $V_{\text{TH}}$ ) に対する依存性 [7]

図 2.29 はフレーム読み出しで取得した  $^{241}\text{Am}$  の輝線中心波高値の閾値電圧 ( $V_{\text{TH}}$ ) 依存性を示している。斜線は各輝線エネルギーでコンパレータ回路が動作する最大の  $V_{\text{TH}}$  を表している。 $V_{\text{CDS}}$  を 400 mV に固定し、 $V_{\text{TH}}$  を 570 mV から 400 mV まで変化させ、フレーム読み出しで取得した  $^{241}\text{Am}$  の輝線中心波高値をプロットしている。 $V_{\text{TH}}$  を小さくすると、コンパレータが動作する範囲内 (斜線より左側) で、輝線中心波高値がジャンプしていることが確認されている。これはコンパレータ回路が動作することによって生じるオフセットが乗ってしまうためである。

## 第3章

# 実験システム

本章では、本研究で使用したXRPIX8.5の実験セットアップを述べ、データの読み出し方法、及びデータの解析方法を述べる。

### 3.1 実験のセットアップ



図 3.1 実験システムのセットアップ全体写真

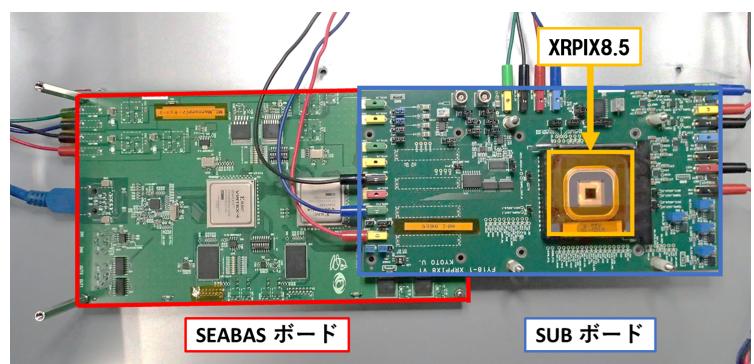


図 3.2 恒温槽内の実験セットアップ写真

図 3.1 に実験システムのセットアップ全体写真を、図 3.2 に恒温槽内の実験セットアップ写真を示す。以下で実験に使用した装置について説明する。

- 恒温槽

恒温槽とは内部を設定した一定の温度に保つ装置である。 $-65^{\circ}\text{C}$ から $+150^{\circ}\text{C}$ まで $0.1^{\circ}\text{C}$ ごとに設定が可能である。この装置を使うことで、素子と読み出しボード全体を冷やすことができ、暗電流を抑えることができる。使用した恒温槽はエスペックの SU-662 である。

- 直流安定化電源

直流安定化電源は読み出しボードに電源を供給する目的で使用した。使用した直流安定化電源は TEXIO の PW18-1.8Q、PW18-1.3ATS である。

- ソースメータ

ソースメータは素子へのバックバイアス電圧 ( $V_{\text{Back}}$ ) を印加する目的で使用した。使用したソースメータは

Tektronix の KEITHLEY2410 である。本研究では  $V_{\text{Back}} = -200 \text{ V}$  で実験を行った。

- 読み出しボード

- Soipix Evaluation Board with Sitcp (SEABAS) ボード

FPGA が搭載されており、FPGA 内のデジタル回路を組み替えることで素子の動作制御を行う。また、Analog to Digital Converter(ADC) も搭載されているため、アナログ信号をデジタル信号へと変換する役割も担っている。

- SUB ボード

使用する XRPIX に合わせて設計されたボード。また、SEABAS ボードから送られた制御信号を XRPIX に伝え、素子からの出力された信号を SEABAS ボードに伝える役割を担っている。

## 3.2 アナログ信号の観測実験のセットアップ

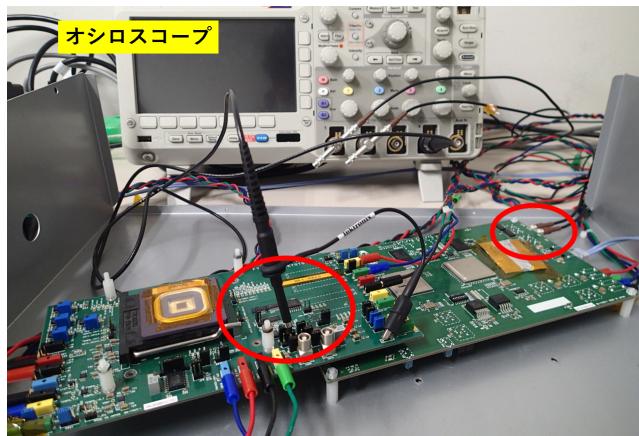


図 3.3 アナログ信号の観測実験のセットアップ写真

図 3.3 にアナログ信号観測実験のセットアップ写真を示す。前節の実験のセットアップに追加して、アナログ信号や制御信号を観測するためにオシロスコープを読み出し基板と接続した。図 3.3 の赤丸で囲んだ部分でレモコネクタを介して制御信号を、プローブを介して出力されたアナログ信号をオシロスコープで読み取っている。使用したオシロスコープは Tektronix の MSO2024B である。

## 3.3 ソフトウェア

### 3.3.1 データ読み出しソフト

データの読み出しには Data Acquisition system(DAQ) ソフトウェアを使用した。

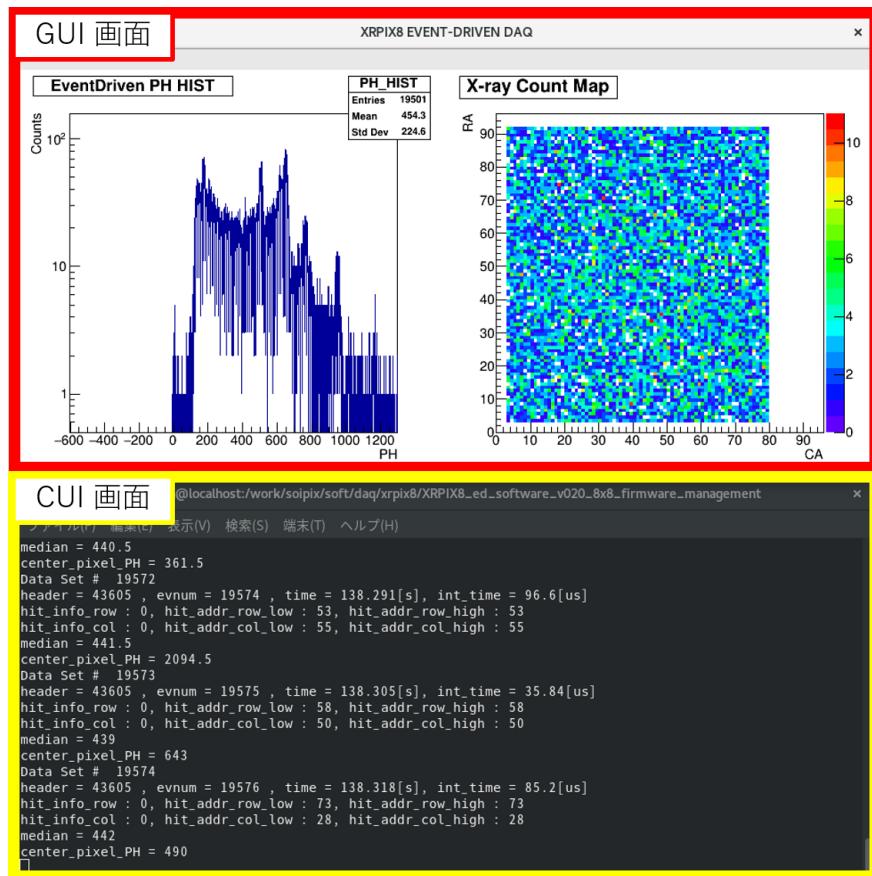


図 3.4 イベント駆動読み出しの DAQ ソフトウェアのデータ出力画面。赤枠は DAQ ソフトウェアの GUI 画面、黄色枠は CUI 画面。

図 3.4 に、イベント駆動読み出しの Data AcQuisition system (DAQ) ソフトウェアの画面を示す。図中の赤枠は DAQ ソフトウェア実行中の GUI 画面、黄枠は CUI 画面である。DAQ ソフトウェアは XRPIX の 1 フレームの露光時間や取得フレーム数などのデータ取得に関するパラメータの設定と、XRPIX から出力されたデータをファイルへ格納することができるソフトウェアである。LAN ケーブルで読み出しボードと PC を接続することで XRPIX との通信ができる。GUI 画面では、取得したフレームまでの各ピクセルの波高値を詰めたヒストグラムと各ピクセルの X 線入射のカウントマップが表示される。CUI 画面ではデータ取得ログが出力されている。

### 3.3.2 解析ソフト

素子から得られたデータを解析するソフトウェアは、大きく 3 つのプロセスに分かれている。本実験では、xrpxfphgen と xrpxevlistgen の 2 つのプロセスを使用した。

- xrpxfphgen

- ペデスタルの算出

XRPIX から出力される生波高値には暗電流によるオフセット成分が含まれている。そのオフセットをペデスタルと呼ぶ。xrpxfphgen では、算出したペデスタルを生波高値から引くことで、信号電荷による波高値の算出を行う。

- \* フレーム読み出し

フレーム読み出しでは、各ピクセルにおいて各フレームの前後 50 フレームを含む 101 フレームの生波高値の平均値をペデスタルと定めている。

- \* イベント駆動読み出しイベント駆動読み出しでは1フレームごとに $8 \times 8$ ピクセルの中央値をペデスターと定義している。フレーム読み出しと異なり、イベントごとに読み出すピクセルが異なるためこの方法を採用している。
- bad frame の算出  
各フレーム毎に波高値の平均値を算出する。算出した値からフレーム間の平均と標準偏差  $\sigma$  を求め、 $3\sigma$  以上離れたフレームは bad frame として以降の解析に含めないようにする。
- 解析結果の出力

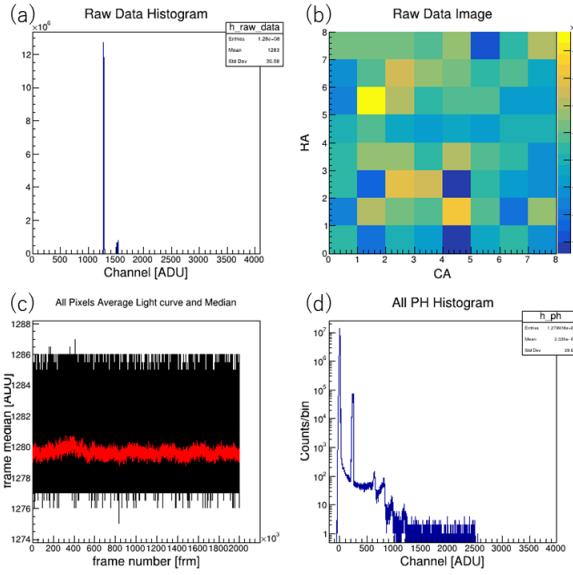


図 3.5 xrpxfphgen の解析により得られる出力ファイルの画像。

- (a) 全ピクセルの生波高値のヒストグラム。横軸が波高値、縦軸がカウント数。
- (b) 全ピクセルの生波高値の 2D ヒストグラム。横軸はピクセルの Column Address 、縦軸はピクセルの Row Address。
- (c) 全ピクセルのライトカーブ。横軸がフレーム数、縦軸が波高値。赤線は 101 フレームごとの平均値。
- (d) 全ピクセルのペデスター補正後のヒストグラム。横軸が波高値、縦軸がカウント数。

#### • xrpxevlistgen

- イベントの検出

あるピクセルが設定した X 線によるイベントとして判定する閾値 (EventTh) を超え、周囲 8 ピクセルより大きい出力値であるとき、そのピクセルを X 線によるイベントとして判定する。EventTh は、ペデスターのピークをガウス関数でフィットしたときの  $10\sigma$  とした。

- イベントセレクション

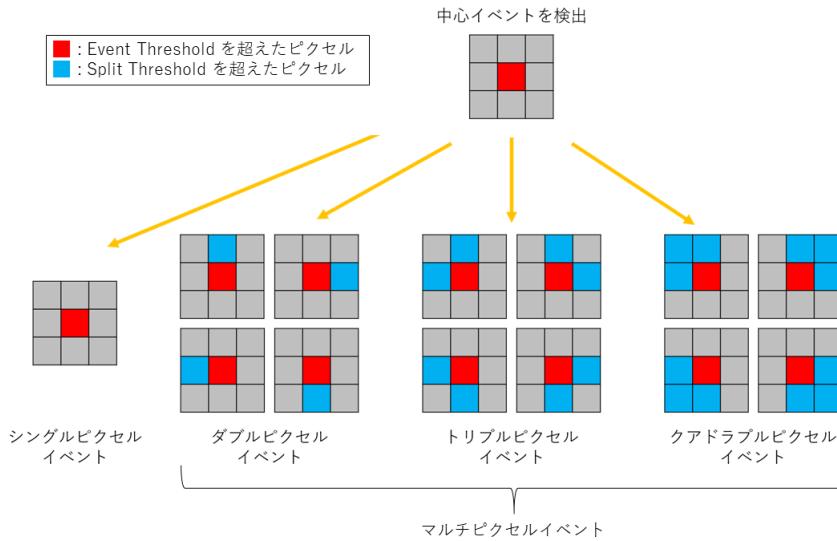


図 3.6 イベントセレクションの概念図

図 3.6 にイベントセレクションの概念図を示す。X線によるイベントとして判定されたピクセルの周囲 8 ピクセルの出力値がユーザの設定した閾値 (SplitTh) を超えているとき、同じ X 線によるイベントとして判定される。その周囲 8 ピクセルのうち出力値が SplitTh を超えたピクセルの個数でマルチピクセルイベントの種類を判定している。SplitTh は、ペデスタルのピークをガウス関数でフィットしたときの  $3\sigma$  と設定した。また、取得したデータは全イベントによるスペクトルを用いている。

#### – 解析結果の出力

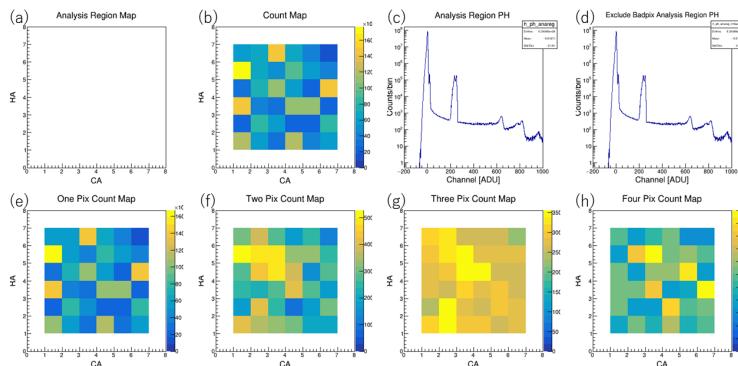


図 3.7 xrpixevlistgen の解析により得られる出力ファイルの画像。

- ユーザが任意に解析から除外したピクセル。横軸はピクセルの Column Address 、縦軸はピクセルの Row Address 。
- 全イベントの頻度分布。横軸はピクセルの Column Address 、縦軸はピクセルの Row Address 。
- 全ピクセルのオフセット補正後のヒストグラム。横軸が波高値、縦軸がカウント数。
- 解析したピクセルのオフセット補正後のヒストグラム。横軸は波高値、縦軸はカウント数。
- シングルピクセルイベントの頻度分布。横軸はピクセルの Column Address 、縦軸はピクセルの Row Address 。
- ダブルピクセルイベントの頻度分布。横軸はピクセルの Column Address 、縦軸はピクセルの Row Address 。

- (g) トリプルピクセルイベントの頻度分布。横軸はピクセルの Column Address、縦軸はピクセルの Row Address。
- (h) クアドラブルピクセルイベントの頻度分布。横軸はピクセルの Column Address、縦軸はピクセルの Row Address。

## 第4章

# XRPIX8.5 のイベント駆動読み出しの性能調査

本章では、XRPIX8.5 のイベント駆動読み出しの性能調査について述べる。比較対象として、XRPIX2b と同じ問題が見られた Single-SOI 構造を持つ XRPIX3b を合わせて示す。なお、2.5 節でも述べた通り、必要に応じて閾値電圧 ( $V_{TH} - V_{CDS}$ ) を  $\Delta V_{TH}$  と表記する。

### 4.1 イベント駆動読み出しのアナログ信号の観測

コンパレータ回路の動作によるアナログ信号への干渃の抑制をダイレクトに確認するため、イベント駆動読み出しでコンパレータが動作する時のアナログ信号を観測した。実験条件は常温、 $V_{CDS}=400$  mV、 $V_{Back}=-200$  mV で、線源<sup>109</sup>Cd を用いてX線入射時の信号を観測した。

#### 4.1.1 信号の説明

最初に、本実験で観測した信号を説明する。詳細な説明は 2.5 節に記載している。

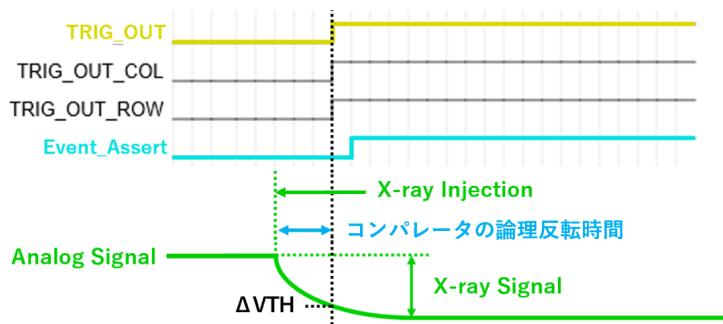


図 4.1 イベント駆動読み出し時の読み出しタイミングダイアグラム。スケールは適切ではない。

図 4.1 にイベント駆動読み出し時の読み出しタイミングダイアグラムを示す。図 4.1 は理想的な信号の振る舞いをした場合の図である。観測した信号を以下で説明する。

- TRIG\_OUT(黄)

図 4.1 における、TRIG\_OUT\_ROW、TRIG\_OUT\_COL のどちらか一方が High になった場合に Low から High になる信号。 $\Delta V_{TH}$  を超えるX線が入射したことによってコンパレータが動作したことを表す。

- EVENT\_ASSERT(青)

図 4.1 における、TRIG\_OUT\_ROW、TRIG\_OUT\_COL の両方が High になった場合に Low から High になる信号。X線によるイベント確定信号を表す。

- Analog Signal(緑)

XRPIX から出力されたアナログ信号を表す。アナログ信号の下がり始めが X 線の入射タイミングである。また、X 線が入射してから TRIG\_OUT(黄色) が Low から High になるまでの時間をコンパレータの論理反転時間と呼ぶ。

次項で示す波形はすべて色と信号を統一している。以下から Single-SOI 構造で見られた問題点との比較を述べる。

#### 4.1.2 Single-SOI 構造でみられた問題点との比較



図 4.2  $\Delta V_{TH}=80$  mV の条件で取得した XRPIX3b での  $^{109}\text{Cd}$  の X 線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形。黄は TRIG\_OUT、青は Event Assert、緑はアナログ信号を表す。

図 4.2 に  $\Delta V_{TH}=80$  mV の条件で取得した XRPIX3b での  $^{109}\text{Cd}$  の X 線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形を示す。図 4.2 から、2.6.2 で説明した XRPIX2b と同じ問題が見られることがわかる。具体的には以下の点である。なお、各番号は図 4.2 と対応させている。

1. 大きな負のパルス

TRIG\_OUT が High になるタイミングでアナログ信号に大きな負のパルスが見られる。2. の問題を生み出していた要因だった。

2. アナログ信号の電圧レベル差

TRIG\_OUT が High になる前後でアナログ信号の電圧レベルに差が見られる。これはイベント駆動読み出し時、取得するデータにオフセットが乗る原因だった。PDD 構造ではオフセットが小さくなることが分かっていることから、XRPIX8.5 では見られないと考えられる。

3. アナログ信号の変化

X 線が入射し TRIG\_OUT が High になるまでにアナログ信号が変化している。過去に回路レイアウトの変更により改善されているため、XRPIX8.5 では見られないと考えられる。



図 4.3  $\Delta VTH=80$  mV の条件で取得した XRPIX8.5 での  $^{109}\text{Cd}$  の X 線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形。黄は TRIG\_OUT、青は Event\_ASSERT、緑はアナログ信号を表す。

図 4.3 に  $\Delta VTH=80$  mV の条件で取得した XRPIX8.5 での  $^{109}\text{Cd}$  の X 線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形を示す。EVENT\_ASSERT の振る舞いが XRPIX3b と異なるが、これは現在の EVENT\_ASSERT の制御が次の露光開始まで Low に切り替わらない設定になっているからである。図 4.3 から、XRPIX8.5 では XRPIX3b と同じ問題が見られないことがわかる。具体的には以下の点である。

### 1. 大きな負のパルス

XRPIX8.5 では、TRIG\_OUT が High になる際のアナログ信号の大きな負のパルスが見られない。

### 2. アナログ信号の電圧レベル差

XRPIX8.5 では、TRIG\_OUT が High になる前後でアナログ信号の電圧レベルに差が見られない。

### 3. アナログ信号の変化

XRPIX8.5 では、X 線が入射し TRIG\_OUT が High になるまでにアナログ信号の変化が見られない。

以上から、Single-SOI 構造で見られたコンパレータ回路の動作によるアナログ信号への干渉が、PDD 構造では見られないことを具体的に確認できた。

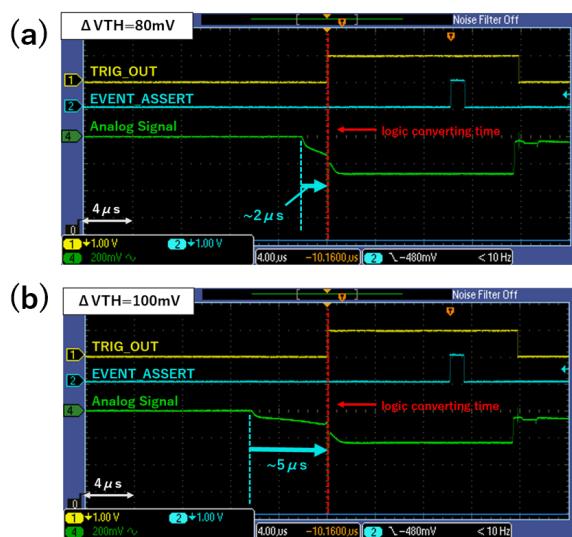


図 4.4 XRPIX3b での  $^{109}\text{Cd}$  の X 線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形。(a) は  $\Delta VTH=80$  mV、(b) は  $\Delta VTH=100$  mV の条件。黄は TRIG\_OUT、青は Event\_ASSERT、緑はアナログ信号を表す。

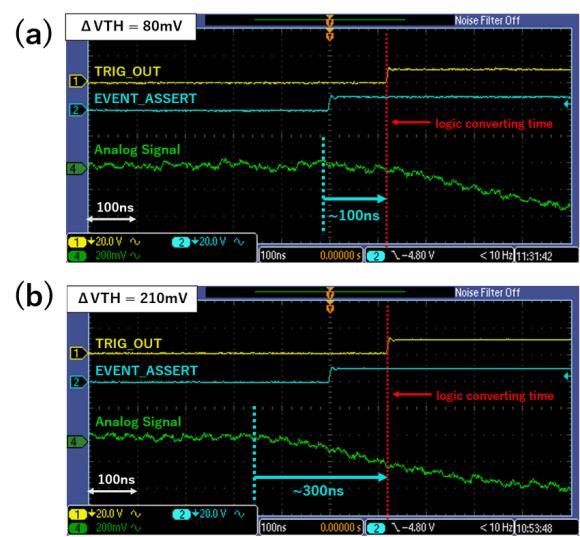


図 4.5 XRPIX8.5 での  $^{109}\text{Cd}$  の X 線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形。a) は  $\Delta VTH=80$  mV、(b) は  $\Delta VTH=200$  mV の条件。黄は TRIG\_OUT、青は Event\_ASSERT、緑はアナログ信号を表す。

図4.4に(a)  $\Delta VTH=80\text{ mV}$ 、(b)  $\Delta VTH=100\text{ mV}$ の条件で取得したXRPIX3bでの $^{109}\text{Cd}$ のX線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形を示す。また、図4.5に(a)  $\Delta VTH=80\text{ mV}$ 、(b)  $\Delta VTH=200\text{ mV}$ の条件で取得したXRPIX8.5での $^{109}\text{Cd}$ のX線入射時のアナログ信号と各制御信号の波形を示す。図4.4、4.5ともに(b)を見ると、(a)よりコンパレータの論理反転時間が遅延している。2.6.2で述べたように、コンパレータ回路の特性により、 $\Delta VTH$ をアナログ信号の電圧レベルに近づけるとコンパレータの論理反転時間が遅延することがわかっている。Ag-K $\alpha$ 入射によるアナログ信号の電圧レベルは約226 mV<sup>1</sup>であるため、(b)で設定した $\Delta VTH$ の方がアナログ信号の電圧レベルと差が小さい。よって、コンパレータ回路の特性が現れていると確認できた。また、本実験ではXRPIX8.5において、約226 mVにできるだけ近い $\Delta VTH$ を設定した。(b)同士を比較すると、XRPIX3bのコンパレータの論理反転時間は約5  $\mu\text{s}$ なのにに対しXRPIX8.5では約250 nsと短くなっている。XRPIX8.5でも依然としてコンパレータ回路の特性による遅延が見られるが、XRPIX3bと比べてその遅延の度合が小さくなっていることがわかる。

## 4.2 コンパレータ回路動作時の影響

2.6.3でも述べたが、コンパレータ回路の動作によるアナログ信号への干渉でコンパレータ動作時には輝線中心波高値にオフセットが乗ることが確認されている。前項の結果から、輝線中心波高値に大きな変動は見られないと推測する。そこで、コンパレータ回路動作時の輝線中心波高値の変化の有無、より詳細な干渉の抑制の確認を目的にコンパレータ動作時の影響を調査した。フレーム読み出しで $\Delta VTH$ を低く設定することで、意図的にコンパレータ回路を動作させ実験を行った。実験条件は $-60^\circ\text{C}$ 、 $V_{\text{Back}}=-200\text{ mV}$ の条件で、 $8 \times 8$ ピクセルの範囲でデータを取得した。 $V_{\text{CDS}}$ を400 mVに固定し、 $V_{\text{TH}}$ を800 mV～−100 mVまで変化させることで $\Delta VTH$ を変更した。

### 4.2.1 輝線中心波高値の $\Delta VTH$ 依存性

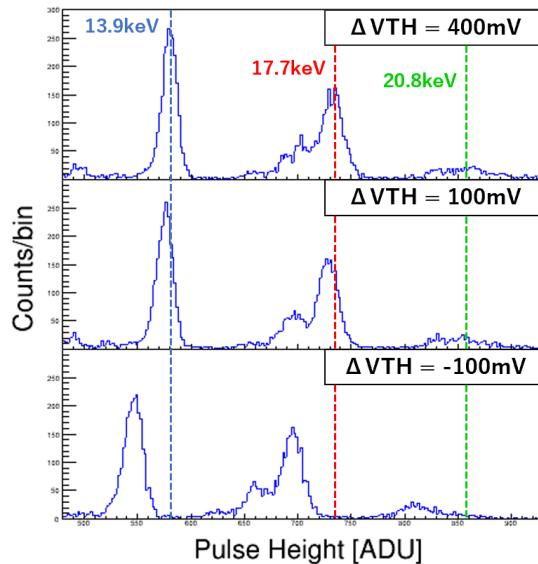


図4.6 XRPIX8.5のフレーム読み出しで取得した $^{241}\text{Am}$ のX線スペクトル。 $\Delta VTH=400\text{ mV}$ 時の各輝線中心に破線を引いている。

図4.6にXRPIX8.5のフレーム読み出しで取得した $\Delta VTH=-100$ 、100、400 mVにおける $^{241}\text{Am}$ のX線スペクトルを示す。図4.6より、 $\Delta VTH$ を小さくすると、輝線が低波高値側にシフトしていくことがわかる。

<sup>1</sup>付録Aを参照

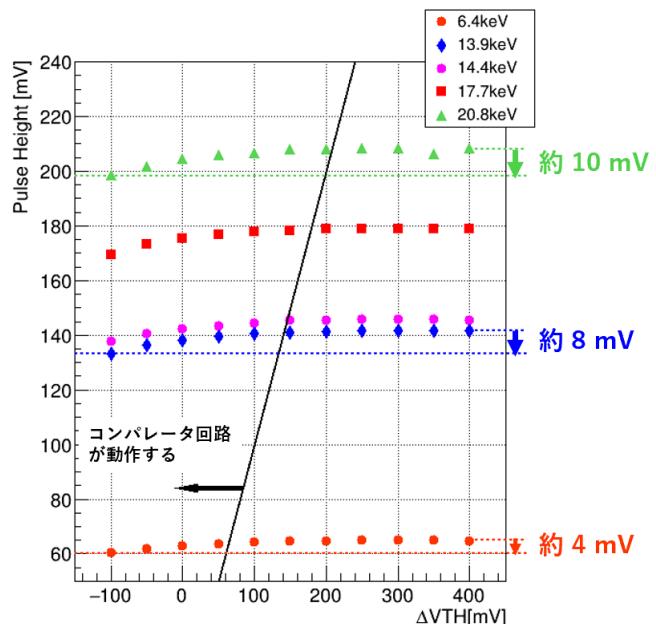


図 4.7 XRPIX8.5 における  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$  の輝線中心波高値の  $\Delta\text{VTH}$  依存性。縦軸が各輝線エネルギーでの輝線中心波高値を電圧換算した値、横軸が  $\Delta\text{VTH}$  を表す。

図 4.7 に XRPIX8.5 における  $^{241}\text{Am}$ 、 $^{57}\text{Co}$  の輝線中心波高値の  $\Delta\text{VTH}$  依存性を示す。図 4.7 の各色の破線は  $\Delta\text{VTH}=100$  mV、 $\Delta\text{VTH}=400$  mV 時の各輝線中心波高値、各色の矢印は各輝線中心波高値のシフト幅を表している。斜線は各エネルギーでコンパレータが動作する最大閾値電圧<sup>\*2</sup>を表している。以降、この最大閾値電圧を  $\Delta\text{VTH}_{\max}$  と表記する。 $\Delta\text{VTH}$  を低くしていくと、XRPIX2b で見られていたジャンプは見られないが、 $\Delta\text{VTH}_{\max}$  付近から輝線中心値が低波高値側にシフトすることがわかった。このシフトの変化の仕方には入射X線のエネルギー依存性は見られない。一方で、シフト幅は入射X線が高エネルギーになるほど大きくなつた。

#### 4.2.2 輝線中心波高値のシフト幅のエネルギー依存性

図 4.7 で示したように、各輝線のエネルギーによってコンパレータが動作し始める電圧 ( $\Delta\text{VTH}_{\max}$ ) は異なる。そのため、実際のシフト幅を比較するには  $\Delta\text{VTH}_{\max}$  からの輝線中心波高値の変化を見る必要がある。

<sup>\*2</sup> 最大閾値電圧  $\Delta\text{VTH}_{\max}$  [mV] = 輝線中心波高値 [ADU] × ADC の 1ADU あたりの幅 [mV/ADU]  
ADC の 1 ADU あたりの幅は 0.244 mV/ADU を用いた。

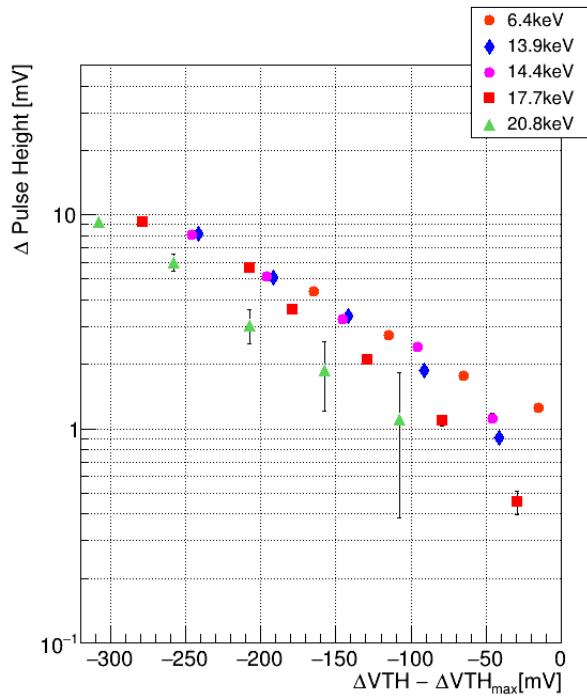


図 4.8 図 4.7 のコンパレータが動作する領域内 ( $\Delta VTH_{max}$  以下の電圧) の輝線中心波高値の減衰量の  $\Delta VTH$  依存性。縦軸が各輝線エネルギーでの輝線中心波高値の減衰量を電圧換算した値、横軸が  $\Delta VTH_{max}$  と  $\Delta VTH$  の差分を表す。

図 4.8 は、図 4.7 のコンパレータが動作する領域内 ( $\Delta VTH_{max}$  以下の電圧) の、 $\Delta VTH$  に対する輝線中心波高値の減衰量の推移を表している。輝線中心波高値の減衰量は、図 4.7 のコンパレータが動作しない領域内 ( $\Delta VTH_{max}$  以上の電圧) の輝線中心波高値の平均値との差として求めた。 $\Delta VTH_{max}$  から、より低い  $\Delta VTH$  に設定するほど、減衰量が大きくなり輝線中心波高値が小さくなることがわかる。また、輝線中心波高値の減衰量の変化がエネルギーによって異なる傾向があることから、エネルギーによって輝線中心波高値のシフト幅が変わることが示唆される。輝線のエネルギーによって輝線の位置にオフセットが乗る量が変化することは、分光性能の劣化に寄与する。この現象の原因追究には、コンパレータ回路による干渉か回路の特性によるものかを調査する必要がある。回路シミュレーションによる検証を行うことで、原因の切り分けができると考えている。

## 第5章

### まとめ

XRPIX8.5 でコンパレータ回路の動作によるアナログ信号への干渉を調査した。以下に結果と考察をまとめる。

- イベント駆動読み出しのアナログ信号の観測
  - TRIG\_OUT が Low から High になる際、アナログ信号に大きな負のパルスは見られなかった。
  - オフセットが乗る原因である TRIG\_OUT が Low から High になる前後のアナログ信号の電圧レベル差は見られなかった。
  - コンパレータ回路のレイアウトによる、X線が入射し TRIG\_OUT が High になるまでのアナログ信号の変化は見られなかった。
  - コンパレータ回路の特性に起因する、論理反転時間の遅延がみられたが、Single-SOI 構造と比べると遅延は小さくなっていた。
- コンパレータ動作時の影響の調査
  - コンパレータが動作する閾値電圧範囲内では、閾値電圧が低くなるほど輝線中心波高値が低波高値側にシフトすることがわかった。
  - コンパレータ回路動作時、閾値電圧の低下に伴う輝線中心波高値のシフト幅にエネルギー依存性があることを示唆する実験結果を得た。
  - 輝線のエネルギーによって輝線中心波高値のシフト幅が異なる現象は、回路シミュレーションによる検証を行うことで回路の特性かどうかの原因の切り分けができると考えている。

以上の結果から、PDD 構造でのコンパレータ回路のアナログ信号への干渉の抑制の度合を、アナログ信号の観測から明らかにすることができた。一方で、PDD 構造でも依然として、コンパレータの動作に伴う影響はスペクトルにあらわれており、分光性能の劣化が完全に解消されていないことがわかった。今後の素子開発にむけて解決していく必要がある。



## 参考文献

- [1] A.Takeda et al. Development and Evaluation of an Event-Driven SOI Pixel Detector for X-ray Astronomy 2014,PoS (TIPP2014),138.
- [2] 原田 颯太. 固定電位層を導入した次世代 X 線天文用 SOI ピクセル検出器の研究 2019 修士論文
- [3] S.Ohmura et al. Reduction of cross-talks between circuit and sensor layer in the Kyoto' s X-ray astronomy SOI pixel sensors with Double-SOI wafer 2016,NIM A,831,61.
- [4] 福田 昂平. X線 SOI-CMOS 素子のイベント駆動読み出しの評価および改良 2018, 修士論文.
- [5] 行元 雅貴. SOI 技術を用いた新型 X 線撮像分光器の開発 48:PDD 構造におけるリーク電流の原因特定とその解決手法 2021 秋季天文年会
- [6] 米村 修斗. SOI 技術を用いた新型X線撮像分光器の開発 49:PDD 構造における分光性能のウェルの不純物濃度依存性の評価 2021 秋季天文年会
- [7] A.Takeda. Development of Advanced Pixel Detectors for X-ray Astronomy Technology 2014, 博士論文



## 付録 A

# X 線入射によるアナログ信号の電圧レベルの計算方法

X 線入射によるアナログ信号の電圧レベルの計算方法を以下に示す。

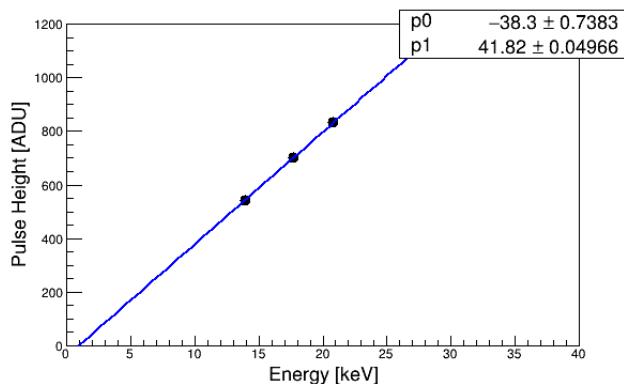


図 A.1 XRPIX8.5 におけるイベント駆動読み出しでの  $^{241}\text{Am}$  の輝線エネルギーと輝線波高値の関係。縦軸が波高値、横軸が輝線エネルギー、青線が一次関数でのフィット結果を示す。p0 はオフセット、p1 は傾きを表す。

図 A.1 は XRPIX8.5 におけるイベント駆動読み出しでの  $^{241}\text{Am}$  の輝線エネルギーと輝線波高値の関係を示す。入射 X 線のエネルギーに対応する XRPIX が出力するアナログ信号の電圧レベルの変化は以下の式で求めた。

$$\text{電圧値 [mV]} = \text{入射 X 線エネルギー [keV]} \times \text{Energy Scale [ADU/keV]} \times 1\text{ADU} \text{あたりの幅 [mV/ADU]} \quad (\text{A.1})$$

ADC の 1ADU あたりの幅は 0.244 mV/ADU である。また、Energy Scale は入射 X 線のエネルギーと波高値の関係における傾きで、図 A.1 の傾き 41.82 ADU/keV を用いた。



## 謝辞

本論文の作成もとより、これまでの研究において多くの方にご指導、支援頂きました。指導教員である森浩二教授には、自分の弱点を明確に指摘頂き、研究に関する知識や技術だけではなく、これから的人生の糧となる考え方を多く学ぶことができました。この一年間は自分の悟性が大きく成長したと感じています。心より感謝いたします。武田さん、執拗で稚拙な自分の質問に親身になって対応して頂きありがとうございました。雑談やお食事中の質問に対する知識量の多い返答にも圧倒させられました。そこで知った言葉や概念を覚えるだけメモっては、寝る前に調べるという日課が、今では研究の難しさに溺れない自分を形成していると思っています。これから多くのことを教わりに行きます。西岡さん、交流は数える程度ですが、数回の雑談でも研究室での経験の多さ漂うお話に興味惹かれ、研究生活でのノウハウを掴むことに繋がっていました。これからは研究の方でもお世話になることが多くなってくると思います。よろしくお願いします。解析班の先輩方とは、研究面では深い関わりはありませんでしたが、余暇の交流では何かとお世話になりました。金丸さん、雑談や議論の中で犇々と伝わる聰明さに感嘆していました。最適化された金丸さんの文脈を反芻することで、論理的な議論に綿密に対応することが徐々に出来るようになりました。この能力が卒論での自分の文章力にも繋がっていると感じています。寺田さん、もっとお話をしたかったと後悔が残る先輩です。寺田さんの趣味から感じる子供心の様な素直な感性は、時に新しい視点になっていました。宮崎さん、積極的に話しかけてくれる優しさに精神が救われていました。話上手で自分の素朴な疑問にも丁寧に答えてくださり、スムーズに研究を進める支えになっていました。これからもよろしくお願いします。楠さん、出会った頃は自分の領域を固く守っている先輩だと感じ、最初は忌避していた部分がありました。しかし、その気丈夫さがすごく安心でき、先輩として後輩に同情する楠さんの人となりに救われていました。違う班だからこそ素直に悩みを相談することもあり、酒に弱り夜風に足がすくむ中、力強い手で肩を寄せてくれた時は明日への励みになりました。行元さん、卒論の作成には直接的に関わることは少なかったですが、卒業研究を完遂するには行元さんへの憧れが原動力でした。それでも憧れと恐怖は表裏一体で、遠い先輩だと感じています。もう少しの付き合いがありますが、これからも勝手に憧れていこうと思います。石田さん、一番精神的に距離が近く、車の中で身を預けてしまうほどに甘えてしまえる先輩でした（涎とかつけていたら申し訳ないです）。教職のご経験故に、教え方がすごく丁寧で、デザインや文章に対する些細な指摘に納得しきてしまふことが多々ありました。卒論時期も夜遅くまで面倒を見てくださりありがとうございました。これからもお世話になります。米村さん、三枝さん、一年間の付き合いでしたが、同期以上にプライベートでも密接に関わった方々でした。自分は卒業シーズンになると、毎度面倒見の良い先輩に支えてもらっていると過去を偲ぶことがあります。その銘記の中でも、お二方は最高に大嫌いで大好きな先輩です。お二方の教育者として厳しさ、素の優しさに自尊心を鍛えられ、人間としての成長に深くお世話になったと感じています。三枝さん、三枝さんの单刀直入な指摘にはすごく感謝しています。遠回りをせずシンプルに教えてくれる豪快さはスポーツの様で、自分をストイックにさせてくれました。また、休日はイベントに多く誘って頂きありがとうございました。イベント中の三枝さんの愉快で面白い喋りから感じる秀逸さがとても大好きでした。米村さん、米村さんからは自分は生意気な後輩に写っていたと思います。合理的で秀才な米村さんにとって、よく考えず行動する自分の態度は癪に障っていたと考えています。申し訳ありません。それでも、年末に実験を代わりに進めてくれたこと、人の遠慮を見抜く姿、「頼っていい」という指示には米村さんの内にある優しさが隠れているのだと感じていました。将来は賢い女性に追いかけられて困って欲しい先輩だと強く思っています（笑）。もっと思い出を語って感謝を伝えたいお二方ですが、紙面上ここまでに留めておきます。人生の先輩として、近い嗜好を持つ仲間として、これからまたどこかで会える日を楽しみにしています。本当にありがとうございました。お二方のご活躍をお祈りして

います。同期の皆さん、変人な自分との付き合いには苦労したと思います。それでもこんな自分に歩み寄り励ましてくれたこと、みんなの凄さに感化できたことに感謝しています。泉くん、同じ実験班としてたくさんお世話になりました。泉くんの論理的に瞬時に理解する能力は自分には無く、すごく羨ましく思っています。だからこそ、それに依存してしまい不愉快にさせた部分もありました。ごめんなさい。次年度は自分が手助けできるように負けずと成長しよう思います。梅野くん、梅野くんが長期的に休んでいた時、君を同じ研究室に誘ったことに関して負い目を感じていたものもありました。それでも、梅野くんは強い人で、自分より自己を優先し守ることができる人なんだと教わりました。卒論の時期では、自信の無い自分を支えてくれた友人だと思っています。本当にありがとうございます。これからも応援します。横須くん、転入してきた君にはすごく興味を持っていました。それが同期としてこんなに親密な関係になるとは思っていなかったです。過程をものすごく大事にする性格な横須くんと議論すると、自分の盲点に気付かされます。美味しい横須くんの手料理も自分の健康的な体を作ってる要因だと思います。これからも美味しい料理食べさせてください。米丸さん、ゼミの時は強く当たってしまったこともあります。本当にごめんなさい。言い訳をするなら、米丸さんの素早く体系的に物事を捉える能力に頼ってしまったからと考えたりもしています。寧ろその能力が妬ましいのかもしれません。性格の悪い部分が出来てしまった自分だけど、弱音な発言に多く耳を傾けてくれてとてもうれしかったです。研究室を辞めずにいれるのは米丸さんのおかげだと思っています。大塚くん、君の優秀さはすごく大好きです。同期として君の様な存在がいたからこそ、焦りが生まれ卒論を完成させるモチベーションに繋がりました。自分の疑問や悩みを上手く肯定してくれて、同期では良き相談相手として感謝しています。これ以上に感謝を伝えたい程ですが、書ききれないため、支えてくださった皆様に改めて感謝を述べ、この卒業論文を締めたいと思います。ありがとうございました。