

宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における
電荷収集効率の改善

京都大学大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室
松村 英晃

2015 年 1 月 28 日

Abstract

現在に至まで、多くの検出器で X 線トランジェントが観測されてきたが、10 keV 以下の軟 X 線帯域での観測例は非常に少ない。その原因は、軟 X 線に感度があり、かつ広視野な検出器が無かったからである。

我々の研究室では Silicon On Insulator (SOI) 技術を用いた、検出部・読み出し回路一体型のピクセル検出器である SOI ピクセル検出器を改良し、宇宙 X 線観測用とした XRPIX を開発している。XRPIX はシリコンのピクセル検出器であり、良いエネルギー分解能 ($E/\Delta E = 6 \text{ keV}/0.14 \text{ keV}$) と位置分解能 (ピクセルサイズ: $30 \mu\text{m}$ 角) が期待できる。さらに、各ピクセルに X 線入射のタイミングを判定するトリガー機能を備え、X 線が入射したピクセルのみを読み出し良い時間分解能 (数 μsec) を達成する。この XRPIX とコーデットマスクを組み合わせて、広視野で広帯域観測が可能な検出器を開発することが我々の研究目的である。

先行研究によりイベント駆動読み出しと、 $30 \mu\text{m}$ 角ピクセルで厚い空乏層 ($500 \mu\text{m}$) を持つ素子 (XRPIX1b) の開発に成功した。その一方で、最重要課題の 1 つであるエネルギー分解能が目標に到達していなかった。我々は XRPIX1b に $10 \mu\text{m}\Phi$ の細いビームを $6 \mu\text{m}$ ピッチで照射して素子のサブピクセルレベルでの X 線レスポンスを調査した。その結果、電荷収集効率および検出効率が悪い場所がピクセルサイズの間隔で存在することを発見した。これら共に電荷損失が原因であり、これがエネルギー分解能を悪くしている最大の要因でもある。素子内部の電場のシミュレーションを行い検証した結果、ピクセル回路の影響を受けたセンサー層内の電場構造、およびセンサー層表面の電位分布が電荷収集効率を低下させる原因であった。

ここで我々は、ピクセル回路の配置によって、電場が影響されることを逆に利用することができることに気づいた。つまり、回路配置から電場をコントロールし、電荷収集効率を向上することが期待できる。そこで、それを新たに試作した素子 XRPIX2b で実証した。性能評価の結果、XRPIX1b では存在した発生した電荷が複数のピクセルにまたがって回収されるイベントでのピークシフトが XRPIX2b では見られなかった、つまり電荷収集効率を改善させることに成功した。

目次

第 1 章	X 線トランジェント天体と 10 keV 以下を含む広帯域観測装置の開発	1
1.1	X 線トランジェント	1
1.1.1	ガンマ線バースト	1
1.1.2	潮汐破壊現象	2
1.1.3	超新星ショックブレイクアウト	3
1.2	従来の観測装置	4
1.2.1	コーデットマスク	4
1.2.2	コーデットマスクを用いた観測装置例	5
1.3	従来の観測装置の問題点と次世代広帯域観測装置の開発	5
1.3.1	従来の観測装置の問題点	5
1.3.2	次世代広帯域観測装置の開発	7
第 2 章	SOIPIX	9
2.1	SOIPIX の原理	9
2.2	空乏層	10
2.3	MOSFET	11
2.3.1	MOSFET について	11
2.3.2	発生するノイズ	12
2.4	バックゲート効果抑制のための BPW	14
第 3 章	X 線天文用 SOIPIX の開発	15
3.1	初の X 線天文用 SOIPIX	15
3.2	XRPIX1 素子の仕様	15
3.2.1	概要	15
3.2.2	ピクセル回路	15
3.3	XRPIX1 の性能評価 (先行研究)	18
3.4	低寄生容量の新素子 XRPIX1b	18
3.4.1	低寄生容量の新素子の開発	18
3.4.2	素子の仕様	20
第 4 章	XRPIX1b の X 線照射試験と電荷収集効率の問題の発見	21
4.1	実験環境	21
4.2	基本性能試験: ペDESTAL 特性	24
4.2.1	ペDESTAL の測定	24
4.2.2	ピクセルごとのオフセット成分の推定	26

4.3	X線照射試験	27
4.3.1	X線検出の解析プロセス	27
4.3.2	イベント検出とチャージシェアリングイベントの補正	27
4.4	試験結果	29
4.4.1	センサー層の完全空乏化の確認	29
4.4.2	エネルギースペクトル	30
4.4.3	素子のゲインとエネルギー分解能	30
4.4.4	検出部の寄生容量の算出	31
4.5	電荷損失によるエネルギー分解能の劣化の発見	32
4.5.1	ダブルピクセルイベントでの電荷損失	32
4.5.2	電荷損失のバックバイアス電圧依存性	33
4.5.3	電荷損失の他の依存性	33
第5章	SPring-8 X線ビーム試験によるXRPIX1bの電荷収集効率の測定	36
5.1	概要	36
5.2	実験のセットアップ	37
5.3	事前試験	39
5.3.1	ビームの強度落とし	39
5.3.2	アライメント調整	42
5.4	ビーム試験結果①、検出効率とエネルギースペクトル	44
5.4.1	試験結果	44
5.4.2	ビーム強度変動と補正した検出効率	48
5.5	ビーム試験結果②、エネルギースペクトルのバックバイアス電圧依存性	52
5.6	電荷損失のエネルギー依存性の説明、不感層の仮説	53
5.7	電荷損失とピクセル回路の位置関係	53
第6章	XRPIXの電場シミュレーション	56
6.1	XRPIX1b、デバイス構造	56
6.2	XRPIX1b、シミュレーション結果	56
6.3	XRPIX1b、酸化膜中の電荷を含めたシミュレーション	58
6.3.1	酸化膜中の電荷	58
6.3.2	酸化膜中の電荷を含めたシミュレーション	59
6.4	XRPIX1の電場構造	61
第7章	電場構造の改良による電荷収集効率の改善 (XRPIX2b)	63
7.1	電場構造の改善案	63
7.2	XRPIX2bの概要	64
7.3	XRPIX2bの電場シミュレーション	65
7.4	X線照射試験	67
第8章	まとめ	69

付録A XRPIXのピクセル回路、CDS機能付き読み出し部の動作	71
付録B XRPIXのピクセル回路、トリガー部の動作	73
付録C データ取得用ソフトウェア、DAQ	75

目次

1.1	ガンマ線バーストの残光	2
1.2	Swift-XRT による Swift J1644+57 のライトカーブ	2
1.3	超新星ショックブレイクアウトのイメージとライトカーブ	3
1.4	コーデットマスクを用いた撮像	4
1.5	NXB のカウントレート	6
1.6	反同時計数法による NXB の除去、概念図	8
2.1	SOIPIX の構造の模式図	9
2.2	PN 接合と空乏層の形成	10
2.3	MOSFET の模式図	12
2.4	MOSFET を含む RC 回路	13
2.5	BPW の有無による MOSFET の特性変化	14
3.1	XRPIX1 の写真	16
3.2	XRPIX1 のピクセル内の回路	17
3.3	XRPIX1-FZ で取得したエネルギースペクトル	18
3.4	検出部の寄生容量のバックバイアス電圧依存性	19
3.5	XRPIX1、XRPIX1b のピクセル回路のレイアウト図	19
3.6	XRPIX1b の写真	20
4.1	実験システムの全体図	22
4.2	コールドプレートの写真	23
4.3	データ読み出し用ボード	23
4.4	XRPIX1b の出力マップ	24
4.5	XRPIX1b の 1 ピクセルのライトカーブと波高値のヒストグラム	25
4.6	XRPIX1 の全ピクセルのピクセル平均したライトカーブと波高値のヒストグラム	25
4.7	オフセット成分を引いたライトカーブとヒストグラム	26
4.8	イベントセレクションの関係図	28
4.9	^{109}Cd のフォトンカウント、バックバイアス電圧依存性	29
4.10	XRPIX1b で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル	30
4.11	XRPIX1b-FZ のエネルギー較正の結果	31
4.12	^{241}Am のエネルギースペクトルのピークシフト	32
4.13	^{241}Am のエネルギースペクトルのバックバイアス電圧依存性	33
4.14	ピークシフトのバックバイアス電圧依存性	34

4.15	ピークシフトの空乏層厚依存性と電場依存性	35
5.1	素子のピクセルとビーム照射ピッチのおおよその位置関係	36
5.2	実験のセットアップの模式図	37
5.3	実験のセットアップの写真	38
5.4	チャンパー用 XZ ステージと計算機の信号のやり取り	39
5.5	アンジュレーターギャップと強度の関係	41
5.6	ビーム電流の推移	41
5.7	ビーム/レーザー と感光紙、XRPIX の位置関係	43
5.8	ビーム位置確認時の DAQ 画面、ピクセルの位置と波高値	43
5.9	エネルギースペクトル ($E_{beam} = 8.0 \text{ keV}$, $V_{back} = 200\text{V}$)	44
5.10	ビームの入射位置に対する検出効率	45
5.11	ビームの入射位置に対するエネルギースペクトル ($E_{beam} = 8.0 \text{ keV}$, $V_{back} = 200\text{V}$)	46
5.12	ビームの入射位置に対するエネルギースペクトル ($E_{beam} = 17.7 \text{ keV}$, $V_{back} = 200\text{V}$)	47
5.13	8.0 keV の X 線ビーム、フォトンカウントの時間変化	49
5.14	17.7 keV の X 線ビーム、フォトンカウントの時間変化	49
5.15	ビームの入射位置に対する検出効率 (ビームの強度変化補正後)	51
5.16	8.0 keV の X 線ビームのエネルギースペクトル、バックバイアス電圧依存性	52
5.17	XRPIX1b のピクセル回路のレイアウト図	54
5.18	8.0 keV X 線ビームの検出効率とピクセル回路の比較	55
6.1	XRPIX1b のピクセル回路のレイアウト図	57
6.2	電場シミュレーションのための XRPIX1b のデバイス構造	57
6.3	XRPIX1b の電場シミュレーション結果、センサー層内の電場構造	58
6.4	XRPIX1b の電場シミュレーション結果、センサー層表面付近の電位分布	59
6.5	XRPIX1b、固定電荷を含めた電場シミュレーション結果	60
6.6	XRPIX1 のピクセル回路のレイアウト図	61
6.7	XRPIX1、固定電荷無しの電場シミュレーション結果	62
6.8	XRPIX1、固定電荷有りの電場シミュレーション結果	62
7.1	電場構造を矯正するためのピクセルレイアウト案	63
7.2	XRPIX2b の写真	64
7.3	XRPIX2b、ピクセル回路のレイアウト図	64
7.4	電場シミュレーションで再現した領域、および用いたデバイス構造	65
7.5	固定電荷無しの電場シミュレーション結果	66
7.6	固定電荷有りの電場シミュレーション結果	66
7.7	XRPIX2b で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル	67
A.1	CDS 機能の動作	72
B.1	トリガー機能の動作。	74

C.1 DAQソフトウェア 75

表目次

1.1	次世代広帯域観測装置の要求性能	7
4.1	^{241}Am の輝線のフィッティング結果	31
5.1	各実験のパラメーター	37
5.2	ビーム強度調整用パラメーターの実効値	40
5.3	検出効率のライトカーブ、フィッティング結果	50
7.1	^{241}Am の輝線のフィッティング結果	68
8.1	XRPIX シリーズの各素子の性能	70
C.1	DAQ の各種制御パラメータ	76

第1章 X線トランジェント天体と10 keV 以下を含む広帯域観測装置の開発

1962年のB. RossiとR. Giacconiによる宇宙X線源の発見を皮切りに、X線観測はブラックホール周辺の高エネルギー現象や宇宙の様々な場所での超高温ガスの存在など、それまで知られていなかった宇宙の新しい姿を明らかにしていった。宇宙X線観測の初期の頃は、大気を透過できず地上では観測できないX線を捉えるために観測ロケットや観測気球などが用いられていたが、1970年のX線天文衛星「UHURU」の打ち上げ以降、長期間の観測が可能となるX線天文衛星はX線観測の要となっている。その後、現在に至まで数多くのX線天文衛星が打ち上げられた結果、数万のX線天体がカタログに名を連ねている。宇宙に存在するほとんどの天体や現象が何かしらの形でX線と関わっていると言える [1]。

X線トランジェントとは、突然出現するX線天体であり、その多くは激しい時間変動を伴う。X線天体観測の初期の時代から確認されていたこの現象は、現代でも非常に興味深いものである。数あるX線トランジェントの内、重要であると思われるものを次節で述べる。

1.1 X線トランジェント

1.1.1 ガンマ線バースト

ガンマ線バーストは1967年に核実験探査衛星「Vela」によって初めて発見された突発現象である [2]。ある方向から突然、最大で 10^{52} ergものガンマ線が放出される現象で、ミリ秒単位の短く激しい時間変動を示す。バーストの継続時間は 10^{-1} – 10^2 秒と短いものである。1997年、バーストの後にも一週間近く観測が可能な「X線残光」と呼ばれる現象が発見された。この残光は、X線、紫外線、可視光、赤外線、電波と主に輝く波長を変えながらどんどん暗くなる (図 1.1)。X線残光の発見により数時間の観測が可能となり、ガンマ線バーストの正確な発生位置が分かるようになった。発生位置が最も遠いもので約130億光年 (赤方偏移 $z \sim 10$) と、遠方の宇宙からのバーストも確認されている。

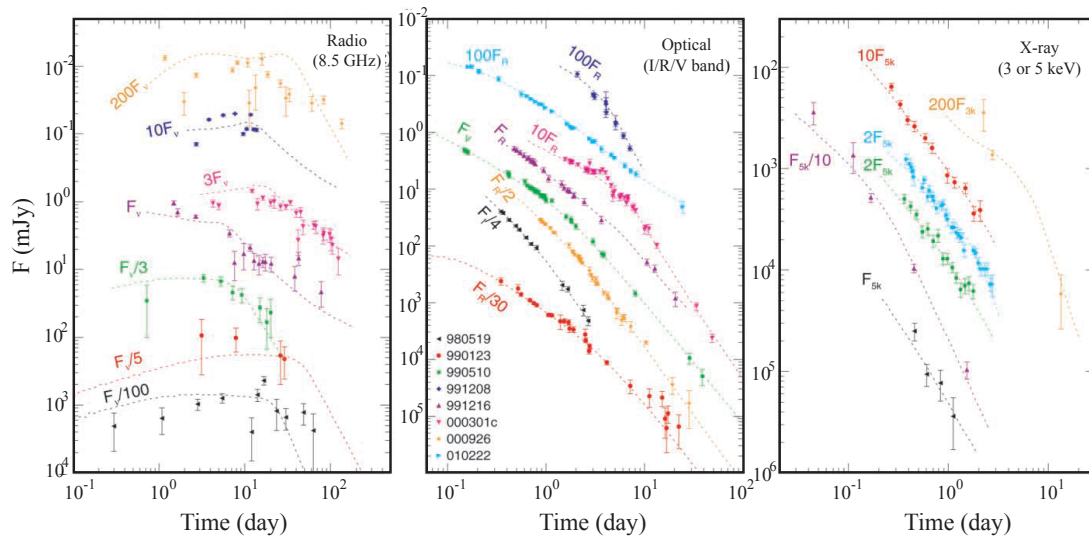


図 1.1: カンマ線バーストの残光のライトカーブ。左図が電波、中央図が可視光、右図が X 線の帯域である。破線は、Panaitescu & Kumar [3] の行ったモデルフィットの結果。

1.1.2 潮汐破壊現象

潮汐破壊現象とは、恒星がブラックホールからの強い潮汐力により恒星が破壊され、銀河の中心核にあるブラックホールに吸い込まれる現象である。恒星が吸い込まれた後には、光速に近い荷電粒子のジェットが発生する。2011年にSwift衛星でりゅう座の方向にある天体から突然強いX線が検出されたのが最初の発見である(図1.2)。最初の放射の観測後も、強いX線の放射を繰り返したことからガンマ線バーストと区別される。

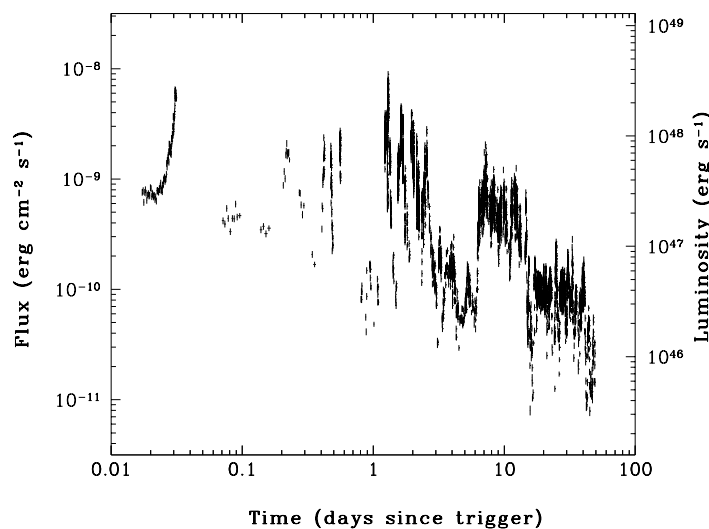


図 1.2: Swift-XRT による Swift J1644+57 のライトカーブ。

1.1.3 超新星ショックブレイクアウト

10 M_{\odot} (太陽質量) 以上の大質量星はその一生を終わらせるときに大規模な爆発現象を起こす。これを超新星爆発と呼ぶ。鉄の核の光分解で星の内部に衝撃波が発生し、その衝撃波が外層を突き抜けること (ショックブレイクアウト) によって爆発は引き起こる。しかし、衝撃波が発生させる過程には謎が多く、超新星爆発の原理は完全に説明されていない。超新星爆発の皮切りである超新星ショックブレイクアウトの観測が爆発の原理を解明する上で重要な手がかりとなる。

超新星ショックブレイクアウトの観測例はとても少なく、X線帯域では2008年1月、Swift搭載のX線検出器XRTでの銀河NGC2770の観測中に偶然発見したSN2008Dの1例のみである(図1.3) [4]。0.3–10 keVの軟X線のエネルギー帯域で、約400秒のX線バーストが観測された。このX線バーストはSwift衛星の広視野検出器BATで爆発の30分前から継続的に見られていたが、ガンマ線は観測されなかった。X線バーストの総エネルギーは、 2×10^{46} erg とガンマ線バーストよりも三桁以上低く、また、ピーク光度は 2×10^{46} erg/sec と太陽質量のエディントン光度よりも数桁高く、すべての既知のX線トランジェントと特性が異なっていた。

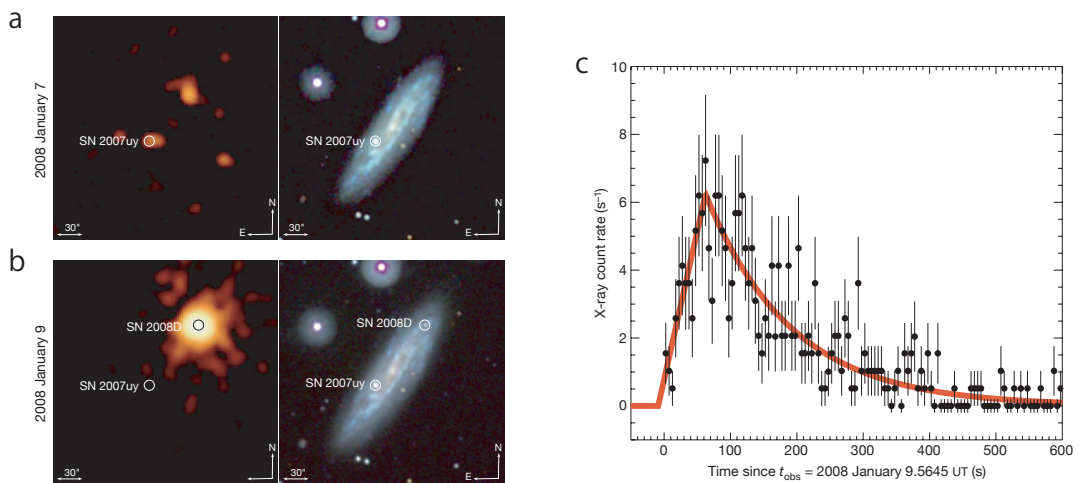


図 1.3: 超新星ショックブレイクアウトの発生前 (a), 後 (b) における Swif-XRT, UVOT による銀河 NGC2770 の X 線 (左), 紫外線 (右) イメージ。Swif-XRT による超新星ショックブレイクアウトのライトカーブ (c)。

1.2 従来の観測装置

X線による宇宙観測のためには、X線がどの方向からやってきたかを知らなければならない。これを実現するためには検出器の前にコリメーターを置くことで、X線の到来方向をしぼる必要がある。しかし、コリメーターでしぼることのできる視野は 0.5° 程度と非常に狭く、どの場所で起こるか分からないX線トランジェントを能動的に捉えるには不十分である。そこで、広視野のX線観測を可能にする方法としてコーデットマスクを用いた撮像が考案された。

1.2.1 コデットマスク

コーデットマスクは、X線を遮る部分と通す部分を特定のパターンで1:1の割合に配置したマスクである(図1.4左)。このX線が通ることが出来る開口部のそれぞれがピンホールの役目を果たし、マスクを通過したX線を二次元検出器で撮像する。マスクおよび検出器の面積を大きくすることで広視野の撮像が可能となる。コーデットマスクを用いて取得した画像は、マスクの幾何学パターンを投影したものとなり、この画像のパターンからX線の到来方向を知ることができる(図1.4右)。検出器の角度分解能 $\Delta\theta$ は検出器からコーデットマスクまでの距離 l とコーデットマスクの孔径 m 、および検出器の位置分解能 d によって決まり、 m が d より十分小さいときは以下の式のように近似できる。

$$\Delta\theta \approx \frac{\sqrt{d^2 + m^2}}{l} \quad (1.1)$$

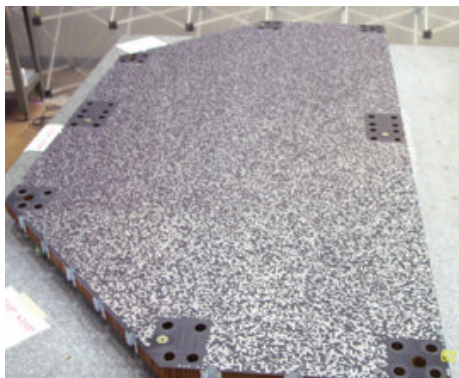


図 1.4: (左) Swift-BAT で使われたコーデットマスク [5]。 (右) コデットマスクを用いた撮像の概念図。X線の到来方向を異なる画像パターンとして検出器に投影する。

1.2.2 コーデットマスクを用いた観測装置例

コーデットマスクを用いた広視野の X 線検出器として以下の二例を紹介する。

INTEGRAL-IBIS

Imager on-Board the INTEGRAL Satellite (IBIS) は 2002 年に打ち上げられたガンマ線バースト観測用衛星 INTEGRAL に搭載されている観測装置である [6]。11.2 mm × 11.2 mm のサイズのセルを 95 × 95 個持つコーデットマスクを用いている。撮像検出器には、前側に 4 mm × 4 mm × 2 mm の CdTe 素子を 128 × 128 個、後側に CsI 素子を 64 × 64 個を並べたものを用いている。検出器はタングステンと鉛のパッシブシールドで覆われている。検出器領域は 2600 cm² と非常に大きく、19° × 19° と広視野な検出器である。角度分解能は 12 arcmin であり、この視野を達成するためにマスクと撮像検出器の距離は 3.2 m となっている。観測可能なエネルギー帯域は、15 keV–10 MeV であり、硬 X 線からガンマ線帯域の天体がターゲットである。

Swift-BAT

Swift は 2004 年に打ち上げられたガンマ線バースト観測用衛星であり、Burst Alert Telescope (BAT) はこの衛星に搭載された広視野検出器である [5]。コーデットマスクは 5 mm × 5 mm のセルを持ち、撮像検出部には CdZnTe 素子 (4 mm × 4 mm × 2 mm) を 32768 個並べている。コーデットマスクと撮像検出器を 1 m 離すことで角度分解能は 17 arcmin となっている。視野は 100° × 60° と非常に広く、全天の 1/6 をカバーする。エネルギー帯域は 15–150 keV と硬 X 線の帯域である。年間に 100 程のガンマ線バーストが BAT により発見されている。

1.3 従来の観測装置の問題点と次世代広帯域観測装置の開発

1.3.1 従来の観測装置の問題点

IBIS や BAT などのコーデットマスクを用いた検出器は非常に広視野な観測が可能であり、数多くの X 線トランジェント天体を観測してきた。ただし、それらのエネルギー帯域は 15 keV 以上の硬 X 線であり、それ以下の軟 X 線帯域では行われてこなかった。従来の検出器では、CdTe や CdZnTe など軟 X 線の感度が弱いものを用いており、エネルギー帯域が制限されていたからである。軟 X 線の情報が無いために、サイエンスが限られてしまっていた。超新星ショックブレイクアウトのような硬 X 線を出さないトランジェント天体は、従来の装置では観測できない。さらに、10 keV 以上の X 線は 10 keV 以下の X 線よりも光子数が少ないため、検出できる天体も明るいものに限られる。コンパクトかつ暗い天体の発見にも、軟 X 線帯域の観測が必要である。そこで我々は、10 keV 以下を含む広帯域で X 線トランジェントを観測する次世代の装置を開発することを目指す。

X 線トランジェントを捉える次世代の広帯域観測装置として必要な要素は、広視野での観測、イメージング能力、大有効面積である。これらの要素を両立させるには、従来のよ

うなコーデットマスクを使用するのが良い。コーデットマスクを用いる観測装置の観測可能なエネルギー帯域は、用いている撮像検出器によって決まる。よって、10 keV以下の軟X線帯域観測を行うためには、軟X線に感度のある撮像検出器を用いる必要がある。また、撮像検出器は高い位置分解能を持つものが望ましい。位置分解能の良い検出器はコーデットマスクとの距離を十分長く取らずとも、観測装置の要求する角度分解能を満たすことができる。つまり、観測装置を小型化することが可能となり、衛星搭載品として適している。既存の検出器でこれらの要求を満たす代表的なものとしては、X線CCDカメラ[7]がある。X線CCDカメラは、良い位置分解能(ピクセルサイズ: $20\ \mu\text{m}$)とエネルギー分解能(2% FWHM @6 keV)を持ち、現在のX線天文衛星の主力検出器の一つである。しかし、X線CCDカメラとコーデットマスクと組み合わせて広視野で広帯域観測を行う検出器とするためには二つの問題がある。

問題の一つ目は、検出器の動作温度である。X線CCDカメラは検出部で発生するノイズであるリーク電流を抑えるために、 $-100\ ^\circ\text{C}$ 以下に冷却して動作させなければならない。この温度まで冷却するためにペルチェ素子やスターリングクーラーなどの能動的な冷却装置が必要になる。広視野な観測装置とするためには、大きな検出領域が必要であり、検出器を数多く並べなければならない。数多くの検出器を冷却するとなると冷却装置の消費電力は非常に大きくなり、使用できる電力が限られている衛星搭載品としては不向きである。用いる撮像検出器としては $-30\ ^\circ\text{C}$ 以上で動作可能なものが適している。この動作温度ならば電力を消費しないラジエーターのみで冷却可能である。

二つ目の問題である10 keV以上のエネルギー帯域観測について述べる。X線CCDカメラの感度は検出部の空乏層の厚みで決まるため、10 keV以上のX線に対しても十分な感度を持つ。しかし、10 keV以上のX線の観測では宇宙線と呼ばれる高エネルギー荷電粒子によるバックグラウンド(以降、NXB: Non X-ray Background)が支配的となり、X線CCDカメラを用いての有効な観測はできなくなる(図1.5)。宇宙線を止めるシールドで検出器を取り囲むことで原理的にはNXBを減らすことは可能であるが、シールドは現実的でない厚みが必要となり、衛星に載せて運用するのは不可能となる。広帯域な観測装置を目指すには、NXBを有効的に除去できる検出器が必要である。

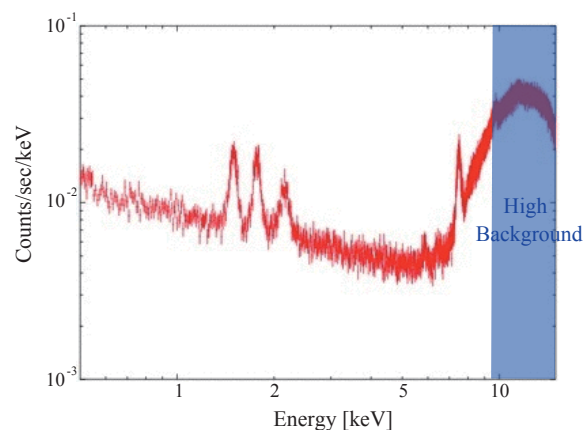


図 1.5: すざく衛星搭載のX線CCDカメラXISで取得したNXBのカウントレート。NXBは10 keV以上のX線帯域で強い。

1.3.2 次世代広帯域観測装置の開発

前項であげた二つの問題は、X線 CCD カメラの不十分な時間分解能に起因している。X線 CCD カメラは電荷を転送して読み出すという性質上、時間分解能が数秒程しかない。電荷の読み出しが終わるまでの間、検出器をリセットすることができずにリーク電流がノイズとして蓄積される。時間分解能の良い検出器であれば、頻繁にリセットをかけることでリーク電流の蓄積を抑えることができるため、リーク電流を低減させるための冷却も抑えることができる。また、時間分解能が良い検出器であれば、検出器の周りをアクティブシールドで囲うことで NXB を除去することが可能となる。NXB はエネルギーが高く、検出器を突き抜けるので、NXB が入射した際には、検出器とアクティブシールドの両方がほぼ同時に反応する。そこで、これらの反同時計数を取ることで、NXB を除くことができる (図 1.6)。NXB の入射頻度は 1 kHz であるので、反同時計数法を用いるためには 1 msec よりも十分良い時間分解能の検出器が必要となる。

以上からコーデットマスクと組み合わせる撮像検出器に必要な要素は、X線 CCD カメラと同等のエネルギー分解能と位置分解能、そして 1 msec よりも十分良い時間分解能である。我々が開発する検出器の要求性能を表 1.1 に示す。

要求性能を満たす検出器として我々が目を向けたのは CMOS センサーである。一般的な CMOS センサーは CCD カメラと同じシリコンの検出部を持つため、CCD カメラと同等のエネルギー分解能、位置分解能が期待できる。さらに、CMOS センサーは CCD カメラとは異なり、各ピクセルに読み出し回路とトリガー回路を備え付けることができる。これにより、X線が入射したピクセルからトリガー信号を出し、そのピクセルだけを読み出すことが可能である。ひとつ (または数个) のピクセルを読み出すだけで良いため時間分解能は $\sim 10 \mu\text{sec}$ と非常に良くなる。既存の CMOS センサーは空乏層が薄く、X線の検出に不向きであるため、我々は SOI 技術を用いた X線検出用 CMOS センサーを新たに開発することにした。

表 1.1: 次世代広帯域観測装置の要求性能 [8]。

項目	要求性能値
位置分解能	チップサイズ: 25 mm × 25 mm、ピクセルサイズ: 30 – 60 μm
エネルギー帯域	0.3–40 keV
エネルギー分解能	140 eV FWHM @6 keV
読み出しノイズ	10 e ⁻ (rms)
時間分解能	10 μsec
NXB	X線 CCD カメラの 1/100 @20 keV (5×10^{-5} cps/keV/10mm × 10mm)

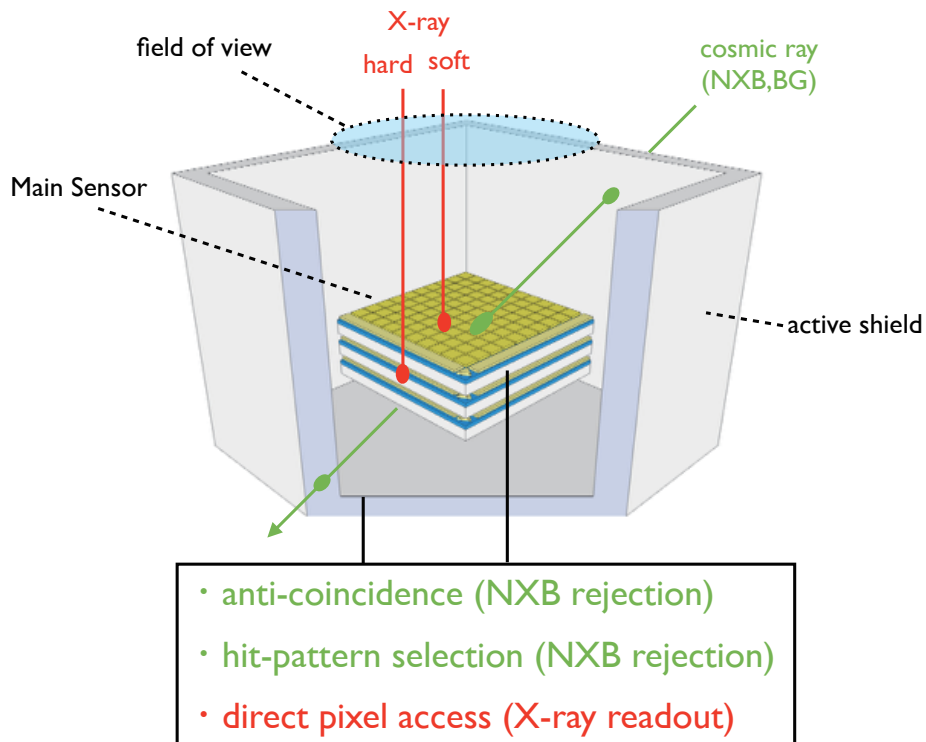


図 1.6: 反同時計数法による NXB の除去の概念図。

第2章 SOIPIX

2.1 SOIPIX の原理

SOIPIX とは、Silicon On Insulator (SOI) 技術を用いた CMOS ピクセルセンサー (PIXel sensor) である [9]。SOI 技術とは、シリコンウェハの上に酸化膜 (SiO_2) を作り、その上に別のシリコン薄膜 (SOI 層) を形成する技術である [10]。この SOI 技術を用いることで、抵抗率の異なる二種類のウェハを一枚のウェハ上に作製することが可能となる。SOIPIX 最大の特徴は、裏面に電圧 (バックバイアス電圧) をかけることで、高抵抗率のシリコン (センサー層) を空乏化させて X 線検出部として利用し、抵抗率の低い SOI 層に CMOS 回路を搭載して読み出し部として利用することで、検出部・読み出し部一体型の検出器として利用できることである (図 2.1)。ここでの表面は検出器の SOI 層側の面、裏面センサー層側の面のことである。

以下では SOIPIX の要素である、空乏層と回路層の MOSFET、さらに BPW という SOIPIX で必須の技術を紹介する。

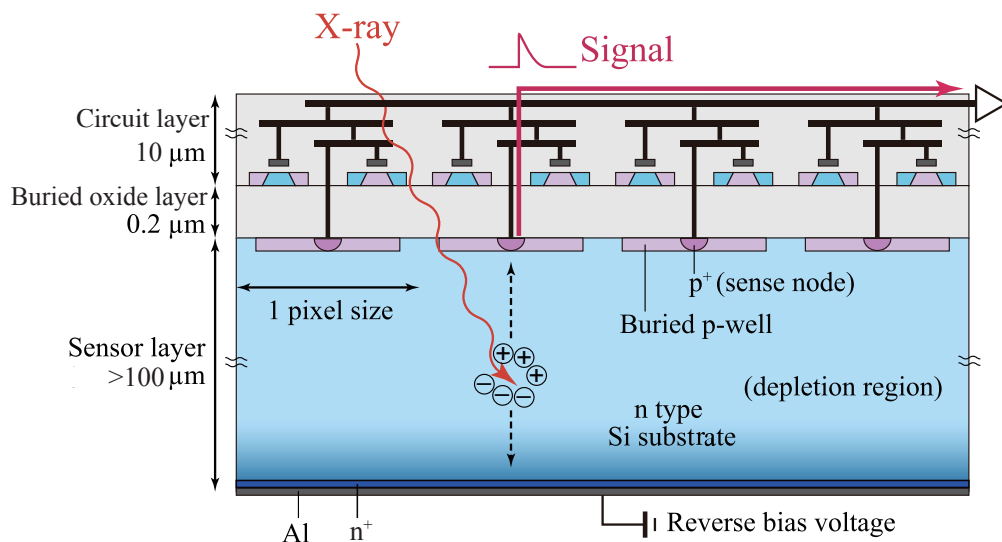


図 2.1: SOIPIX の構造の模式図。

2.2 空乏層

空乏層とは、P型半導体とN型半導体を接合したもの(PN接合)で見られる、電子や正孔(キャリア)がほとんど存在しない領域のことである。シリコン(^{14}Si)やゲルマニウム(^{32}Ge)などの半導体結晶に少量の不純物を混ぜることで電気伝導性を持たせることができ、5価の元素(e.g. ^{15}P)を混ぜることで電子が余るN型半導体に、3価の元素(e.g. ^{5}B)を混ぜることで正孔が余るP型半導体となる。空乏層の形成を以下で説明する。

図2.2のようなPN接合を考える。P型では正孔の、N型では電子の濃度が高いため、接合面を通じて各々反対側へ拡散が起こる。すると、P型では負のアクセプタイオンが、N型では正のドナーイオンが取り残され、電位勾配が生じる。この電位勾配により、拡散とは逆方向にドリフト電流が発生し、最終的に拡散とドリフトが平衡状態となる。このときに接合面の周辺にキャリア密度が非常に低い空乏層ができる。拡散とドリフトが平衡状態時のPN間の電位差を接合電圧(V_i :シリコンでは $\sim 0.6\text{V}$)と呼ぶ。

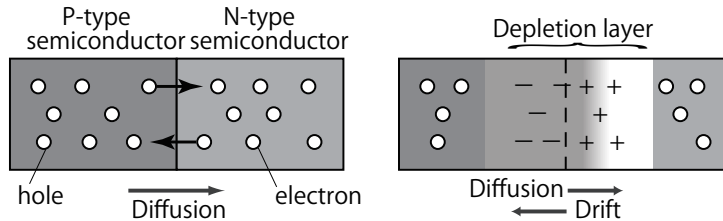


図 2.2: PN 接合と空乏層の形成。

平衡状態のPN接合に、電位差がN型 > P型となるように外部から電圧(逆バイアス電圧)をかけると、N型の電子とP型の正孔がそれぞれ電極にひかれていく。その結果、キャリアが少なくなった分だけ空乏層が広がる。逆バイアス電圧値を V 、ドナー濃度を N_D 、アクセプタ濃度を N_A とすると、P型、N型半導体の空乏層厚 x_p, x_n は、

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_i)}{eN_A(1 + N_A/N_D)}}, \quad x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_i)}{eN_D(1 + N_D/N_A)}} \quad (2.1)$$

$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_i)}{e} \left(\frac{1}{N_D} + \frac{1}{N_A} \right)} \quad (2.2)$$

となる。ここで、 ϵ は半導体の誘電率(シリコンは $1.04 \times 10^{-12}\text{F/cm}$)、 W_{dep} は全空乏層厚である。ドナー濃度とアクセプタ濃度が著しく異なるとき(e.g. $N_D \ll N_A$)を考えると、

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_i)}{eN_A^2}} \ll x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V + V_i)}{eN_D}} \simeq W_{dep} \quad (2.3)$$

となる。よって、 $N_D \ll N_A$ のときには空乏層はN側へと広がっていく。N型半導体の抵

抗率 $\rho = 1/\epsilon\mu N_D$ (ここで μ は電子の移動度、シリコン内では $1.5 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec/V}$) を用いて上式を書き直すと、

$$W_{dep} = \sqrt{2\epsilon\mu\rho(V + V_i)} \quad (2.4)$$

となり、空乏層厚は逆バイアス電圧および抵抗率の平方根に比例する。

この空乏層に X 線が入射することによって光電吸収が起き、価電子帯の電子がエネルギーを獲得してバンドギャップを超え、電子正孔対が形成される。入射エネルギーに比例した個数だけ対が生成されるため X 線のエネルギーの測定が可能である。エネルギー E_γ の X 線が入射したとすると、平均電離エネルギー w (シリコンは 3.65 eV) を用いて、生成される対の個数は E_γ/w 個となる。

電子数を測る検出器のエネルギー分解能は、出力される電子数の統計的な揺らぎと読み出し回路からの電子透過ノイズ $\sigma_R [e^-]$ で決まる。エネルギー分解能の半値全幅の理論式は、

$$\Delta E_{FWHM} = 2\sqrt{\ln 2} w \sqrt{\frac{E_\gamma F}{w} + \sigma_R^2} \quad (2.5)$$

と表される [11]。ここで F は Poisson 統計からのずれを表す Fano 因子である (シリコンでは $F \sim 0.1$)。冷却環境や読み出し回路を工夫し、 σ_R を抑えることで、エネルギー分解能は良くなる。

2.3 MOSFET

2.3.1 MOSFET について

MOSFET とは、メタル (Metal)、酸化物 (Oxide)、半導体 (Semiconductor) から構成される電界効果トランジスタ (Field-Effect Transistor) であり、半導体としてシリコンが一般的に用いられる。

MOSFET には NMOS と PMOS の二種類が存在し、NMOS は P 基板の内に高濃度の N 型不純物でソースとドレイン領域を作り、基板の上に薄い酸化層 (SiO_2) を形成し、さらにその上にメタルとして高濃度ポリシリコンでできたゲートを載せる (図 2.3)。PMOS は N 基板でソースとドレインが P 型不純物で形成されている。MOSFET の特性は、ゲート・ソース間の長さ L (チャンネル長) とそれに直行する奥行き W (チャンネル幅) によって決まる。

ゲート電圧を制御し、ソース・ドレイン間の電流を変化させることで動作させる。NOMS の場合を考えると、ゲート電圧を大きくしていくと、酸化膜下の P 型基板から空乏層が伸びる。これは P 型基板のキャリア (正孔) がゲート電圧により界面から移動するために起こる。これを空乏化と言う。さらにゲートの電圧を大きくしていくと空乏層がさらに厚くなるため、ソースからの電子が P 型基板の方に侵入可能となる。これにより、ソース・ドレイン間に電子の通り道であるチャンネルが形成され、ソース・ドレイン間に電流が流れる。

これを反転と言い、空乏状態から反転状態へ転換するときの電圧を閾値電圧と言う。ゲートに加える電圧を調整することで MOSFET をスイッチのように使用することができる。

信号処理回路は MOSFET により構成され、特に NOMS と PMOS を組み合わせたものを CMOS 回路という。CMOS 回路は、汎用性の高さ、高集積化、低消費電力などの大きな利点を有する。

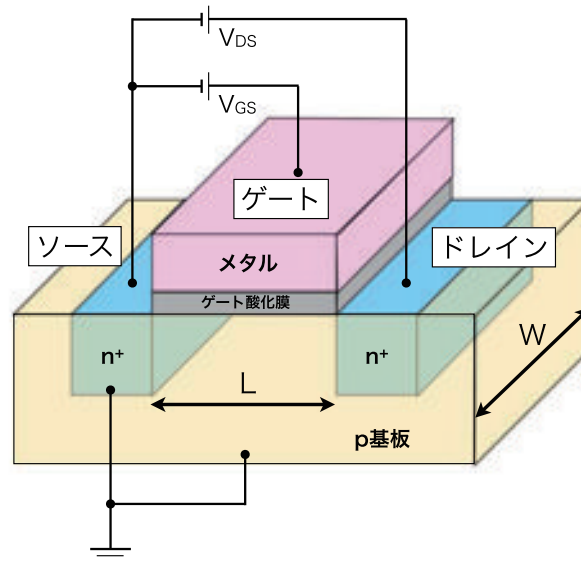


図 2.3: MOSFET (NMOS) の模式図。

2.3.2 発生するノイズ

MOSFET で発生するノイズは、熱ノイズ (kT/C ノイズ) とフリッカノイズ ($1/f$ ノイズ) の二種類である。それぞれを以下で述べる。

熱ノイズ

電子のランダムな熱運動により導体中に電圧の変動が誘起される。これを熱ノイズと呼ぶ。抵抗値 R が存在するとき、単位周波数あたりの熱ノイズパワーは $V^2 = 4k_B T R$ [V^2/Hz] となり、周波数に依存しない。 k_B はボルツマン定数、 T [K] は温度である。MOSFET も抵抗とみなせるため、熱ノイズが発生する。図 2.4 のように MOSFET とキャパシタが並列に接続されているとき V_{out} で観測される熱ノイズを考える。この接続はローパスフィルター (RC 回路) であるため周波数特性は、

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f CR)^2}} \quad (2.6)$$

と書ける。よって、熱ノイズを全周波数で積分したパワーは、

$$P_{noise} = \int_0^{\infty} 4k_B T R \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f C R)^2}} \right)^2 df = k_B T / C \text{ [V}^2\text{]} \quad (2.7)$$

となる。この式より MOSFET の抵抗値 (特性) によらず温度と容量だけでノイズのパワーが決まることが分かり、 kT/C ノイズと呼ばれる。SOIPIX では MOSFET をスイッチとして動作させているため、切り替えの際に kT/C ノイズが問題となる。

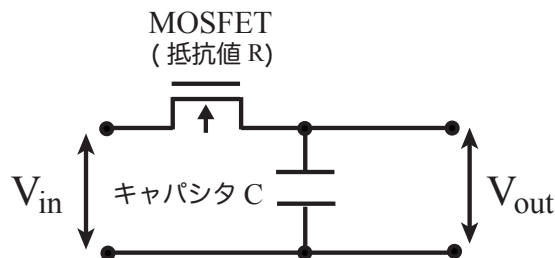


図 2.4: MOSFET を含む RC 回路。

フリッカノイズ

MOSFET の基板と酸化膜の界面では、シリコン結晶と酸化膜結晶の格子定数の違いにより、Si 原子が格子を作られず、未結合ボンドが発生する。この未結合ボンドのチャンネル内の電子を捕捉または放出するために、ドレイン電流がランダムで減少または増加する。これをフリッカノイズと呼ぶ。単位周波数あたりのフリッカノイズのパワーは、

$$\Delta V_f^2 = \frac{K}{C_{OX} W L} \times \frac{1}{f} \text{ [V}^2\text{/Hz]} \quad (2.8)$$

と表せられる。 C_{OX} は単位面積あたりのゲート容量、 K は製造プロセスに依存する量である。フリッカノイズは周波数と反比例するので $1/f$ ノイズとも呼ばれる。

2.4 バックゲート効果抑制のためのBPW

SOIPIXはセンサー層が厚く、空乏化させるために高いバックバイアス電圧を基板に印可する。基板に電圧がかかるとSOI層にあるトランジスタのボディ部分のキャリア分布が変化し、(バック)チャンネルが形成される。よって、印可するバックバイアス電圧値によってトランジスタの閾値電圧が変化する。これをバックゲート効果と呼ぶ。SOIPIX (NMOS)では図2.1のように、CMOS回路の直下のセンサー層表面部にBuried P-Well (BPW)と呼ばれる薄いP層を形成している。BPWの電位を一定に固定することでバックゲート効果を抑制している。BPWの有無によるMOSFETの特性の変化を図2.5に示す。BPWがない場合はバックバイアス電圧値によって、MOSFETの電流電圧特性が変化しているのに対し、BPWがある場合は特性は変化しない。

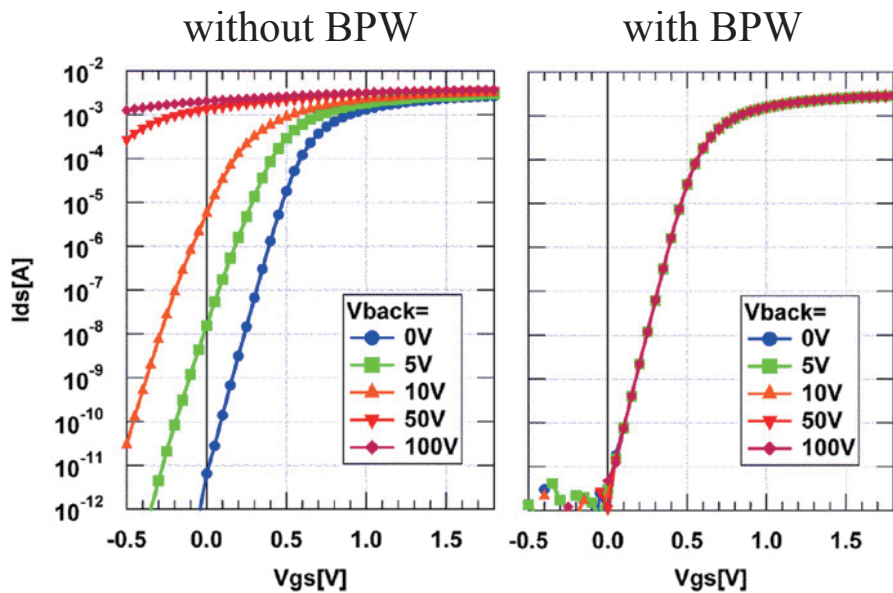


図 2.5: BPW の有無による MOSFET の特性変化 (NMOS) [12]。横軸はゲート・ソース間電圧、縦軸はドレイン・ソース間電流。左図は BPW 無し、右図は BPW 有り。

第3章 X線天文用 SOIPIX の開発

3.1 初の X 線天文用 SOIPIX

SOIPIX グループは 2005 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で発足し、京都大学は 2008 年より参加している。KEK で開発された高エネルギー実験用の SOIPIX である INTPIX2、INTPIX3 の性能試験を行い、SOIPIX が X 線を撮像分光できることを確かめた [13]。そしてその経験をもとに、京都大学が主導となって X 線天文学用の SOIPIX の初号機である XRPIX1 を完成させた。先行研究により、XRPIX1 での X 線の撮像分光、およびトリガー機能を用いた X 線イベントの読み出しに成功している [14]。

3.2 XRPIX1 素子の仕様

3.2.1 概要

XRPIX1 は京大が主導し、KEK、A-R-Tec (株) と共同で開発した X 線天文学用の SOIPIX である。チップの製造は OKI セミコンダクタ (株) (現、ラピスセミコンダクタ (株)) の FD-SOI 0.2 μm ピクセルプロセスで行った。チップはセラミックパッケージに搭載され、ワイヤーボンディングされている (図 3.1(a))。チップのサイズは 2.4 mm 角、一つのピクセルは 30.6 μm 角であり、全部で 32×32 個のピクセルがある (図 3.1(b))。ピクセル回路のトランジスタやキャパシタにより 4 種類のブロック (1 ブロックあたり $16 \times 16 = 256$ ピクセル) に分けられている。性能評価より、最も良いブロックは 44M であったため、本研究はすべて 44M ブロックで取得した測定結果を表示している。検出部のウェハはシリコンの結晶生成法の異なる二種類があり、Czochralski 法を用いた、抵抗率が 0.7 $\text{k}\Omega \text{ cm}$ の CZ ウェハと、Floating zone 法を用いている抵抗率が 1 $\text{k}\Omega \text{ cm}$ 以上の FZ ウェハがある。抵抗率の大きい FZ ウェハを用いることで、低いバックバイアス電圧値で厚い空乏層を得ることが期待できる。CZ ウェハによりプロセスされた XRPIX1 を XRPIX1-CZ、FZ ウェハによるものを XRPIX1-FZ のように表記する。XRPIX1-CZ と XRPIX1-FZ のセンサー層の厚みは共に 260 μm である。

3.2.2 ピクセル回路

XRPIX1 のピクセル回路を図 3.2 に示す。ピクセル回路は低ノイズ化のための CDS 機能を搭載した読み出し部と、X 線の入射を判定するトリガー部の 2 つに分けることができる。以下で読み出し部とトリガー部について説明する。

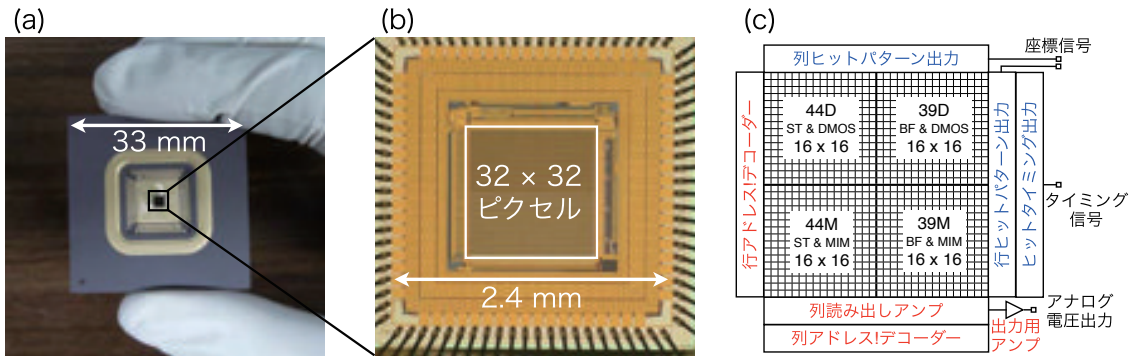


図 3.1: (a) XRPIX1 のパッケージ写真、(b) 顕微鏡で撮影した素子部の拡大写真、(c) XRPIX1 の機能ブロック図 [14]。

CDS 機能付き読み出し部

XRPIX1 は一定時間、電荷を蓄積して読み出すという動作を繰り返すが、溜まった電荷をリセットする際に検出部に kT/C ノイズが発生する。ゲインを大きくするためには検出部の容量を小さくする必要があるが、 kT/C ノイズは容量の平方根に反比例して増加してしまう。そこで、検出部の容量は大きいまま、 kT/C ノイズを減少させるために考案されたのが CDS 機能である。CDS 機能は、図 3.2 の赤点線で囲われた CDS キャパシタを要としたノイズ低減機能である。CDS キャパシタを挟んだ前後で、検出部の容量に依存するノイズから CDS キャパシタの容量に依存するものへと置き換わる (付録 A 参照)。検出部の容量よりも十分大きな容量の CDS キャパシタを用いることで、信号への kT/C ノイズの影響を低減させることが可能となる。XRPIX1 の検出部の容量 ~ 40 fF に対し、CDS キャパシタの容量を 100 fF とすることで、 kT/C ノイズを $\sim 60\%$ に低減できる。

トリガー部

各ピクセルの X 線の入射のタイミングを判定するために、X 線のヒットピクセルの位置情報を出力するトリガー機能が必要となる。トリガー信号は、ヒットタイミング信号とヒットパターン信号の二種類からなる。ヒットタイミング信号は、各ピクセルで基準値電圧を超えたか判定し、それを全ての OR で外部に出力する。すなわち、どれか一つのピクセルがヒットすると出力される。ヒットパターン信号はどのピクセルでヒットが起きたか、行と列の位置の射影情報をそれぞれ出力する。

各ピクセルに備わっているトリガー回路を図 3.2 の青点線の領域に示す。XRPIX1 のトリガー回路は 2 つの反転増幅器 (インバーターチョッパー型コンパレータ) で構成される。トリガー回路の動作は付録 B で説明する。

各ピクセルの読み出し部を通った信号は、後段の列読み出しアンプで増幅され、アウトプットバッファを通過した後、アナログ信号として読み出される。X 線の入射を判定するトリガー信号は、ユーザーが任意の基準値電圧を決めることができる。

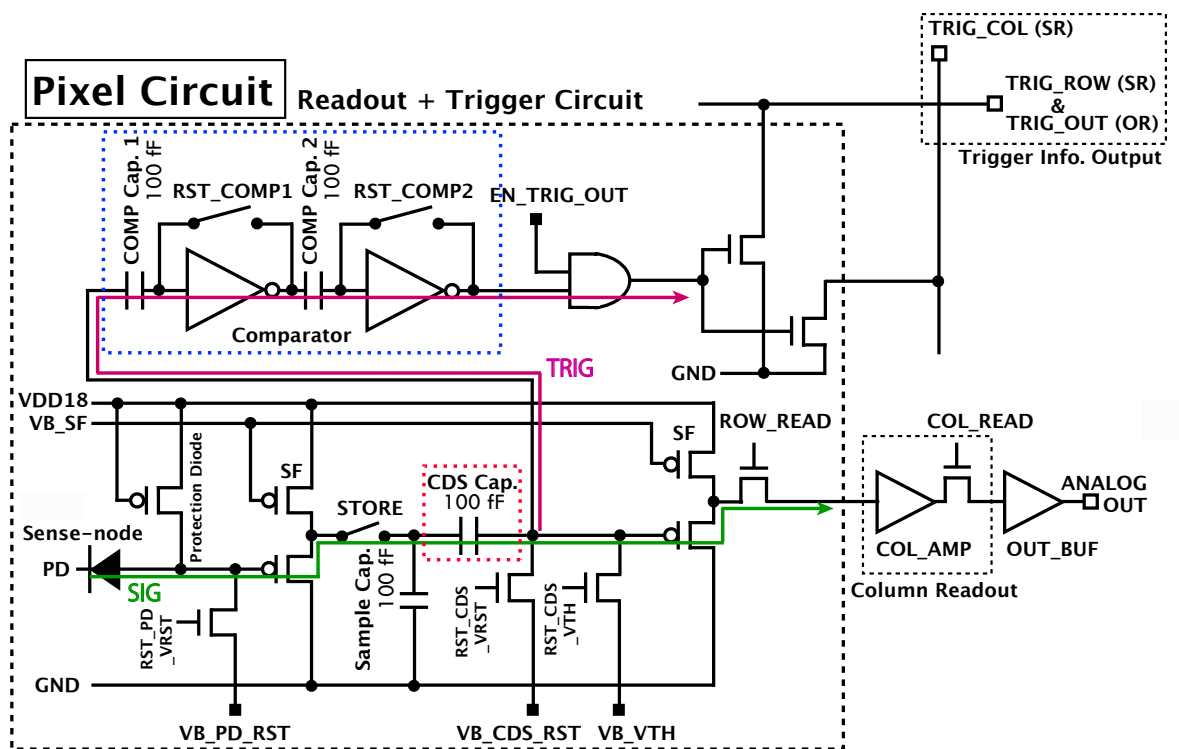


図 3.2: XRPIX1 のピクセル内の回路。赤点線で囲った部分が CDS キャパシタ。青点線で囲った部分がトリガー機能として働く二つの反転増幅器。

3.3 XRPIX1 の性能評価 (先行研究)

先行研究である XRPIX1 の性能評価 [14] について紹介する。図 3.3 は、バックバイアス電圧値 20V、冷却時 (-50°C)、XRPIX1-FZ で取得した X 線のエネルギースペクトルである。これらの輝線からゲインをキャリブレーションすると、XRPIX1 の素子のゲインは $3.60 \mu\text{V}/e^-$ 、読み出しノイズは $103 e^-$ (rms) である。また検出部の寄生容量は 37.3 fF であった。エネルギー分解能は、 8.8% FWHM @ 13.9 keV と衛星搭載への目標値は達成していなかった。エネルギー分解能を良くするためには、素子のゲインをあげて信号ノイズ比を良くする必要がある。

素子のゲインは素子の寄生容量に反比例し、素子の寄生容量を下げると増大する。XRPIX の検出部の寄生容量は、BPW-N 基板間、BPW-BPW 間、配線、MOSFET の寄生容量により決まる。図 3.4 は、検出部の寄生容量のうち各部分の占める割合を調べるために行ったシミュレーション結果である。横軸をバックバイアス電圧としている。この結果より、BPW-N 基板間、BPW-BPW 間の寄生容量順で占めていることが分かった。

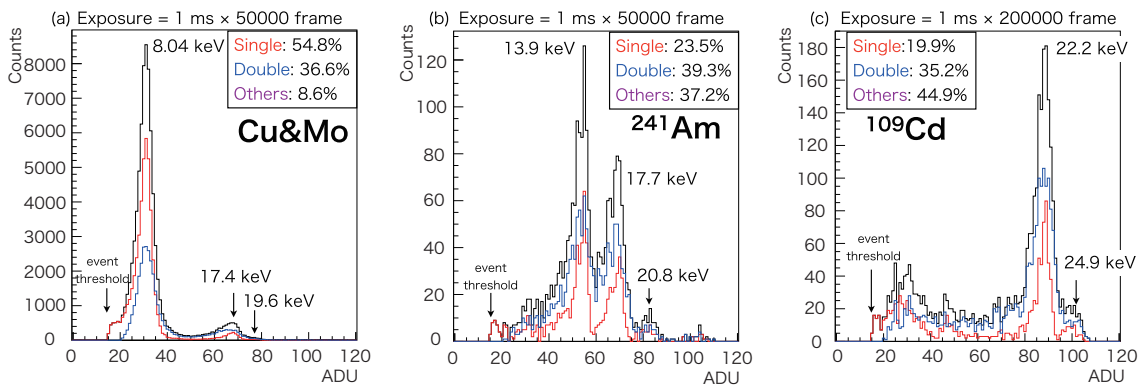


図 3.3: XRPIX1-FZ のエネルギースペクトル [14]。赤線がシングルピクセルイベント、青線がダブルピクセルイベント、黒が二つを足し合わせたもの。(a) ジェネレーター (Cu & Mo)、(b) ^{241}Am 、(c) ^{109}Cd 。

3.4 低寄生容量の新素子 XRPIX1b

3.4.1 低寄生容量の新素子の開発

衛星搭載への要求性能を達成するために、低寄生容量の素子が必要である。先行研究により、BPW-N 基板間、BPW-BPW 間の寄生容量が最も支配的であることが分かった。よって、我々は BPW のサイズを小さくすることにより、素子の寄生容量を減らすアプローチを取った。

図 3.5 左は XRPIX1 のピクセル回路のレイアウト図である。XRPIX1 は $30.6 \mu\text{m}$ 角のピクセルサイズに対して、BPW が $20.9 \mu\text{m}$ 角の領域を占めている。この BPW のサイズをバックゲート効果が起こらない限界である $14.0 \mu\text{m}$ 角にまで小さくした素子、XRPIX1b (図 3.5 右) を開発した。

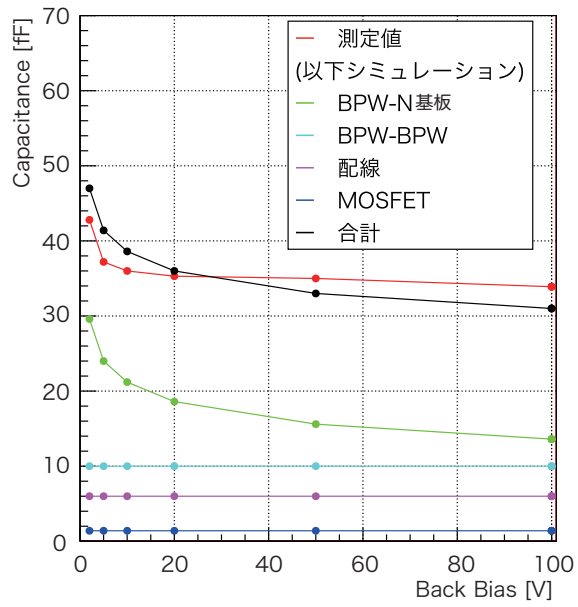


図 3.4: 検出部の寄生容量のバックバイアス電圧依存性 [14]。

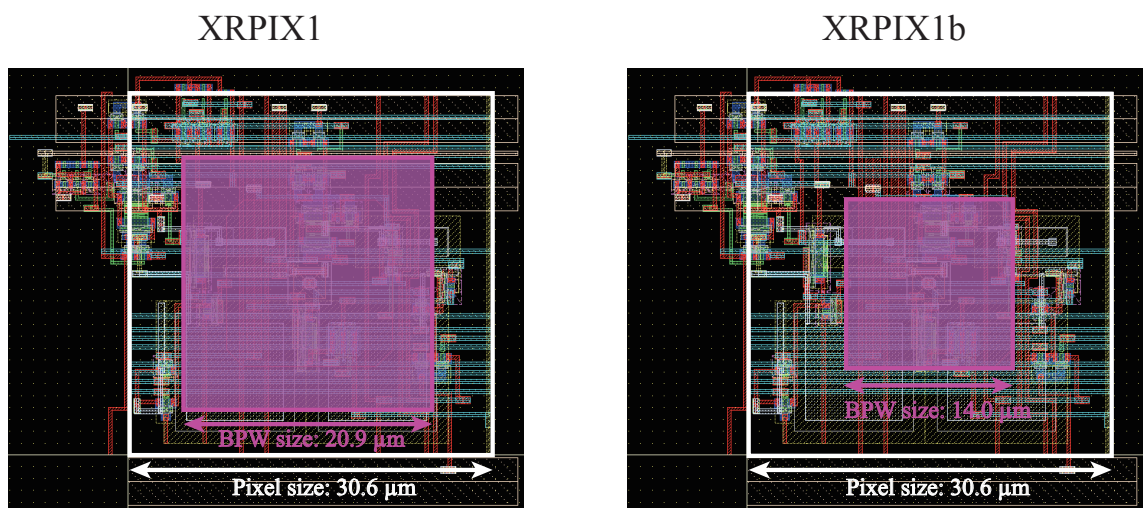


図 3.5: XRPIX1 (左)、XRPIX1b (右) のピクセル回路のレイアウト図。

3.4.2 素子の仕様

XRPIX1b は京大が開発した X 線天文学用 SOIPIX の二号機である (図 3.6)。初号機である XRPIX1 よりも BPW のサイズを小さくすることで、寄生容量を減らすことを目指した素子となる。XRPIX1b のピクセル回路は XRPIX1 と同じである。チップのサイズは、2.4 mm 角、一つのピクセルは $30.6 \mu\text{m}$ 角であり、全部で 32×32 個のピクセルを持つ。本研究で用いた XRPIX1b-CZ の検出部の厚みは $100 \mu\text{m}$ 、XRPIX1b-FZ は $500 \mu\text{m}$ 厚のものである。XRPIX1 と同様にピクセルは SOI 層に組み込まれているトランジスタとキャパシタの種類により 4 種類のブロックに分けられている (図 3.1(c) と同様)。本研究では、本命のブロックである 44M で取得した試験結果を表示する。

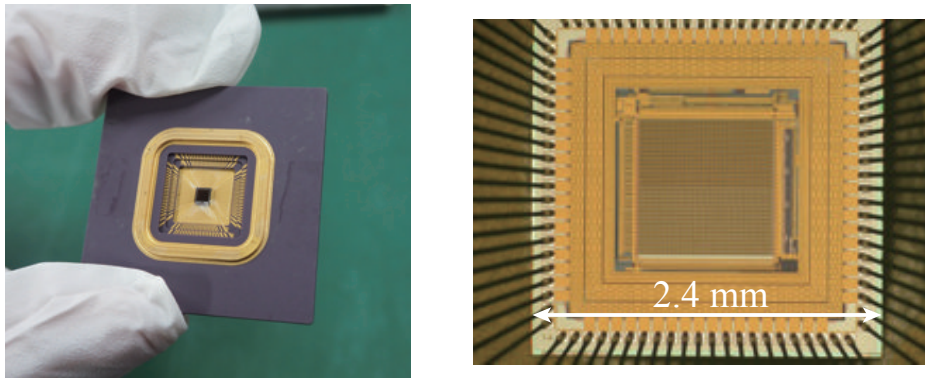


図 3.6: (左) XRPIX1b のパッケージ写真、(右) 顕微鏡で撮影した素子部の拡大写真

第4章 XRPIX1bのX線照射試験と電荷収集効率の問題の発見

4.1 実験環境

実験環境を図 4.1 に示す。以下で各部位について説明する。

電源系

回路への電源供給には KENWOOD PWR36-1 トランジスタ電源を用いた。また、素子へのバックバイアス用として、KEITHLEY2410 ソースメータを用いた。このソースメータは、素子に流れる電流を 0.01 nA の精度で計測することが可能である。

真空冷却系

真空槽は大阪真空機器製作所(株)に発注したものである。そこにロータリーポンプ(アルカテル社製)とターボ分子ポンプ(大阪真空機器製作所社製)を接続している。試験は -50°C の飽和蒸気圧 4.5×10^{-2} torr を十分に下回る真空度で行う。

冷却には岩谷瓦斯のクライオミニ(コンプレッサー: CA201、コールドヘッド: P301)を用い、コールドヘッドの先に、素子を冷却するためのコールドプレートを接続する。コールドプレートは厚み 5 mm の銅で作製し、測温計を取り付けている(図 4.2 右)。また、密着度を高くし、熱伝導を良くするために、素子とコールドプレートの間に薄いインジウム板を挟んでいる。温調器は CHINO PB1000 を用いた。

データ取得システム

素子の動作の制御と外部へのデータの出力を行うために読み出しボードを用いている。読み出しボードは、素子に依らない共通のメインボードである SEABAS (Soi EvAluation BoArd with Sitep) と素子によって異なる SUB ボードの二つから成る(図 4.3)。SEABAS ボード [15] には、素子制御用の User FPGA とネットワークでのデータ転送用の SiTCP FPGA の二つが搭載されている。使用する素子に合わせてユーザーが User FPGA でデジタル回路を組み変えることで各制御を行う。SiTCP FPGA [15] は User FPGA から出される出力信号をイーサネット転送できる形式に変換するものである。読み出しボードを LAN ケーブルで計算機と接続することで、簡単にデータのやり取りができるようになっている。

SEABAS ボードには ADC と DAC が搭載されていて、各信号の AD (DA) 変換

を行うことができる。ADCの分解能は1 V/12 bitであり、1ADU (Analog-to-Digital Unit)の幅は $244 \mu\text{V}$ である。またDACの分解能は3.3 V/12 bitである。データ取得用のソフトウェアとしてDAQ (Data Acquisition system) ソフトウェアを用いている。詳しくは付録Cを参照。

X線源

X線の照射源には、 ^{241}Am 、 ^{109}Cd の線源を用いた。 ^{241}Am は、13.9 keV、17.7 keV、20.8 keVの特性X線を、 ^{109}Cd は22.1 keVの特性X線を照射するために用いる。 ^{241}Am はアルファ線源でもあるため素子の放射化を防ぐ必要がある。素子と線源の間に、厚さ $50 \mu\text{m}$ のカプトンフィルムを挿んでアルファ線を止めている。

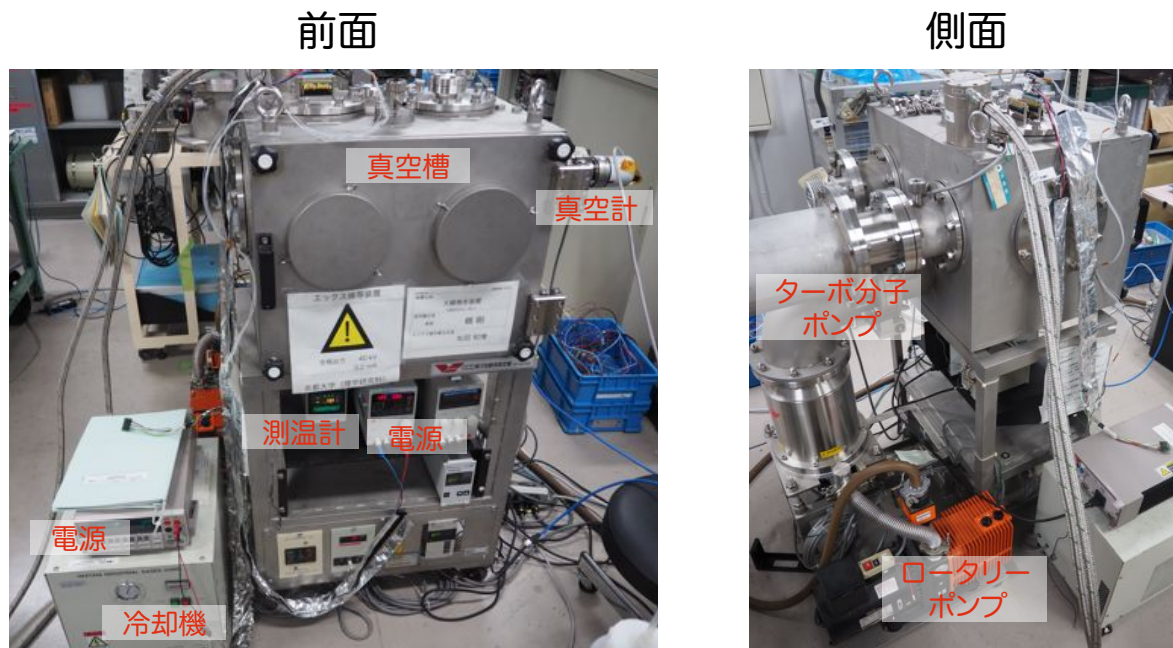


図 4.1: 実験システムの全体図。

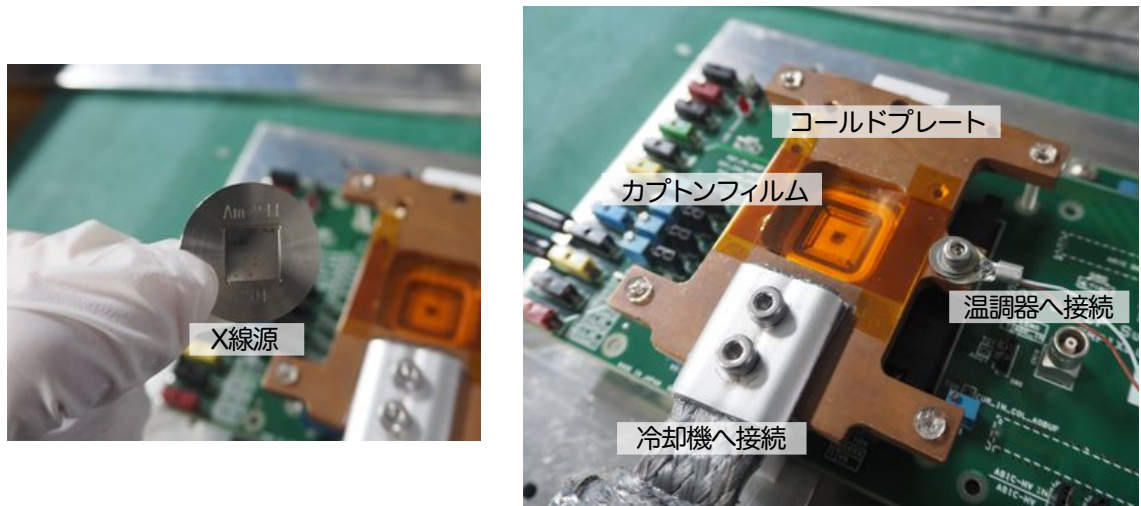


図 4.2: コールドプレート (右) と用いた ^{241}Am の線源 (左) の写真。

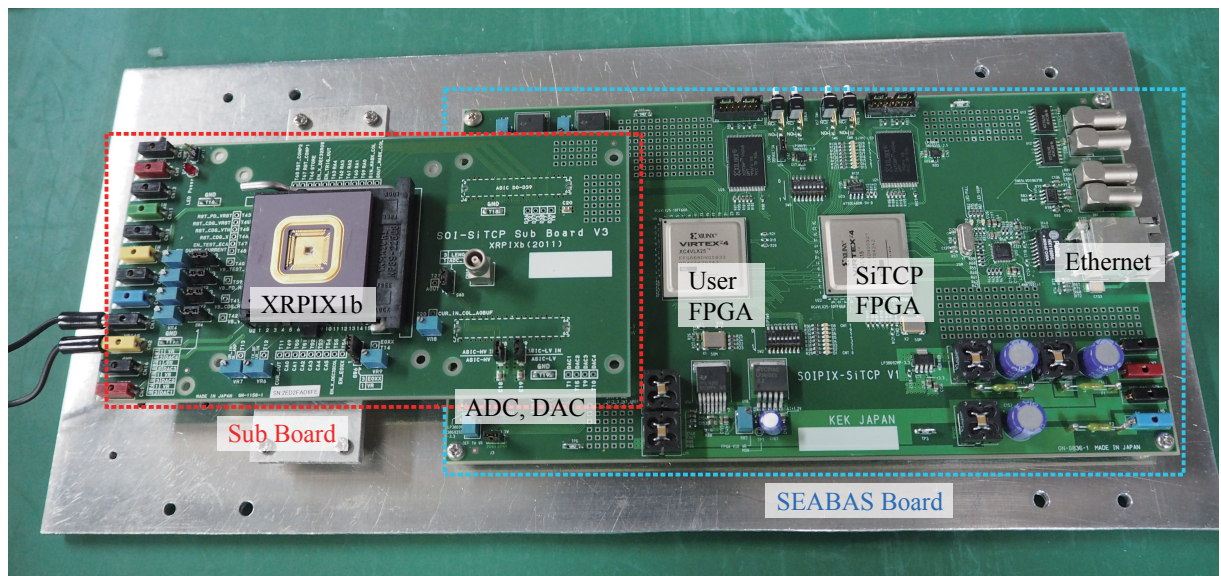


図 4.3: データ読み出し用ボード。

4.2 基本性能試験: ペDESTAL特性

4.2.1 ペDESTALの測定

XRPIXはX線が入射していないときでも、リセット電圧やリーク電流に起因した一定の出力が存在する。これをペDESTALと呼ぶ。X線の検出の前にXRPIX1b-FZのペDESTALの特性を調べるための試験を行った。試験は真空槽内で遮光し、X線も照射せずに行う。この試験は、一定の時間露光し、全てのピクセルの波高値を順番に読み出し、その後再び露光を始める「全面読み出し法」でデータを取得した。測定は室温(約20°C)で行い、素子にかけたバックバイアス電圧値は10V、取得フレーム数は5000である。各ピクセルの5000フレームの出力平均値を図4.4を示す。各ピクセルで出力が異なっていた。

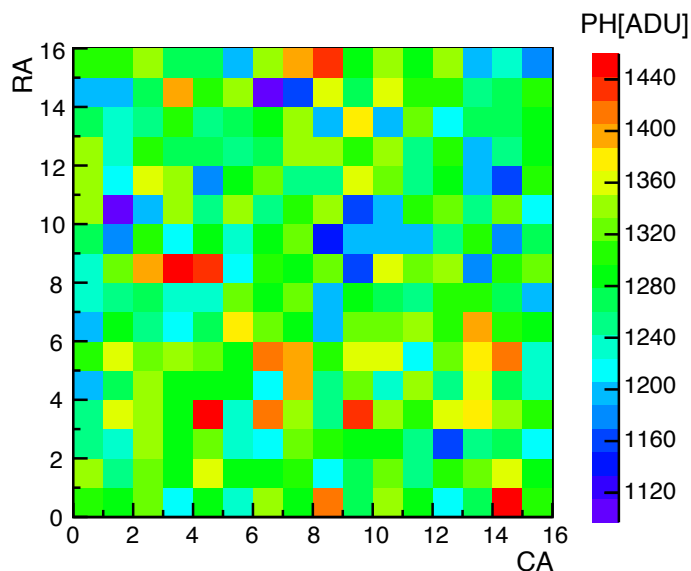


図 4.4: 遮光した状態で取得したXRPIX1bの出力マップ。横軸と縦軸はそれぞれ列アドレスと行アドレスに対応。

次にひとつのピクセル(CA=7、RA=7)に着目し、出力の時間変化(ライトカーブ)とヒストグラムを図4.5に示す。ライトカーブの特性は、非常に早く変化する「ノイズ成分」と変化が緩やかな「オフセット成分」に分けることができた。出力のヒストグラムは、ガウシアンで分布していることが分かる。この分布の平均値がオフセット成分の時間平均に、広がりがノイズ成分とオフセット成分の時間変化に対応する。ひとつだけ出力が大きいフレームが存在するが、後述するバットフレームである。

さらに、全ピクセルを用いたライトカーブとヒストグラムを図4.6に示す。ライトカーブは1フレームのピクセル平均を取ったものであり、ヒストグラムは全ピクセルの全フレーム分を入れたものである。このライトカーブから素子全体の傾向を見ることが出来る。この全ピクセルのライトカーブにも、ひとつだけ出力が大きいフレームが存在する。

これをバッドフレームと呼ぶ。バッドフレームの割合としては、全フレーム数の1%以下である。このようなフレームが生じる理由は分かっていない。ヒストグラムを見ると、細かい山がいくつも重なって分布している。細かい山は1ピクセルのヒストグラムに対応し、オフセット成分が各ピクセルで異なるためこのような分布となっている。全体としてはガウシアンで分布している。

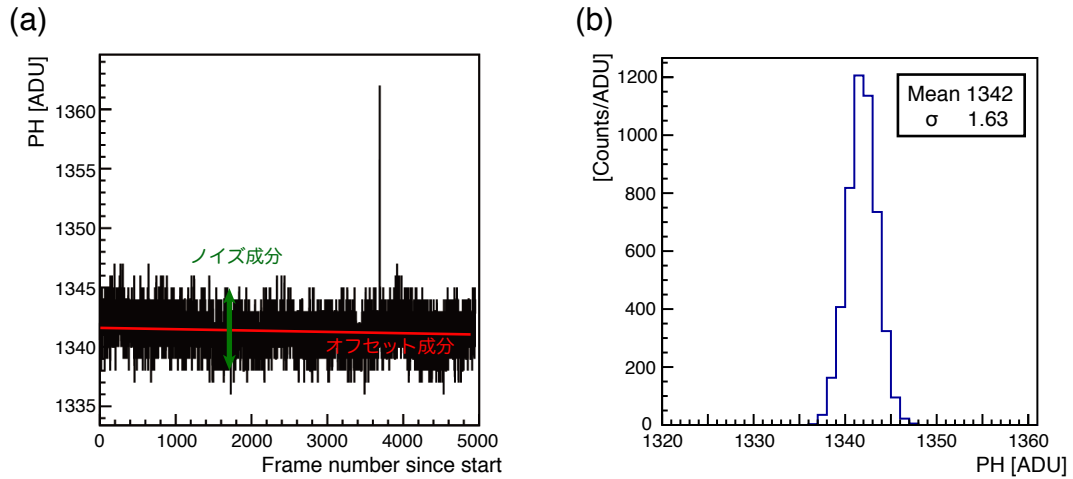


図 4.5: XRPIX1b の 1 ピクセルのデータ。(a) ライトカーブ。赤線でオフセット成分を、緑線でノイズ成分を表している。(b) ヒストグラム。

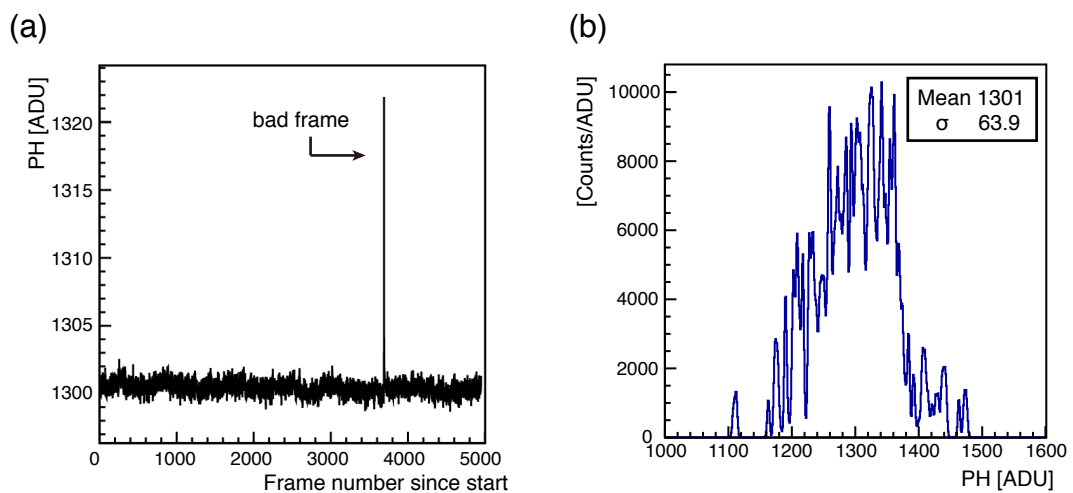


図 4.6: XRPIX1 の全ピクセルのデータ。(a) 1 フレームごとにピクセル平均したライトカーブ。(b) 波高値のヒストグラム。

4.2.2 ピクセルごとのオフセット成分の推定

前項より、各ピクセルは固有のオフセット成分 $PH_{\text{off}_{ij}}(f)$ (添字の i, j はそれぞれ列, 行アドレスを、 f はフレームを表す) と、ノイズ成分 $\Delta PH_{ij}(f)$ を持つことが分かった。すなわち、あるピクセルのあるフレームにおけるペDESTAL $PH_{ij}(f)$ は

$$PH_{ij}(f) = PH_{\text{off}_{ij}}(f) + \Delta PH_{ij}(f) \quad (4.1)$$

と書ける。

もし、各ピクセル、各フレームの $PH_{\text{off}_{ij}}(f)$ が算出できれば、それを $PH_{ij}(f)$ から引くことで、オフセット成分の時間変化とピクセル間でのオフセット成分のばらつきを補正することができる。本研究では、あるピクセルにおいて、着目するフレームの前後50フレームの出力平均を取ることで早く変化するノイズ成分を打ち消し、 $PH_{\text{off}_{ij}}(f)$ を推定した。すなわち、

$$PH_{\text{off}_{ij}}(f) \simeq \frac{1}{101} \sum_{f'=f-50}^{f+50} PH_{ij}(f') \quad (4.2)$$

とする。ただし、バットフレームなどの明らかに出力が大きいフレームは計算には含めないようにしている。

上で述べた計算方法で各 $PH_{\text{off}_{ij}}(f)$ を求めて、それを各ピクセル、各フレームの生出力から差し引いて作成したライトカーブとヒストグラムを図4.7に示す。ライトカーブを見ると、オフセットを差し引いているため、平均出力は0となり、時間変化も補正されている。ヒストグラムも同様に平均が0となり、ピクセル間のオフセット成分のばらつきも補正されて、きれいなガウシアンとなっている。これを以後、ゼロピークと呼ぶ。ゼロピークの幅はノイズ成分と考えられ、これを「読み出しノイズ」と定義する。

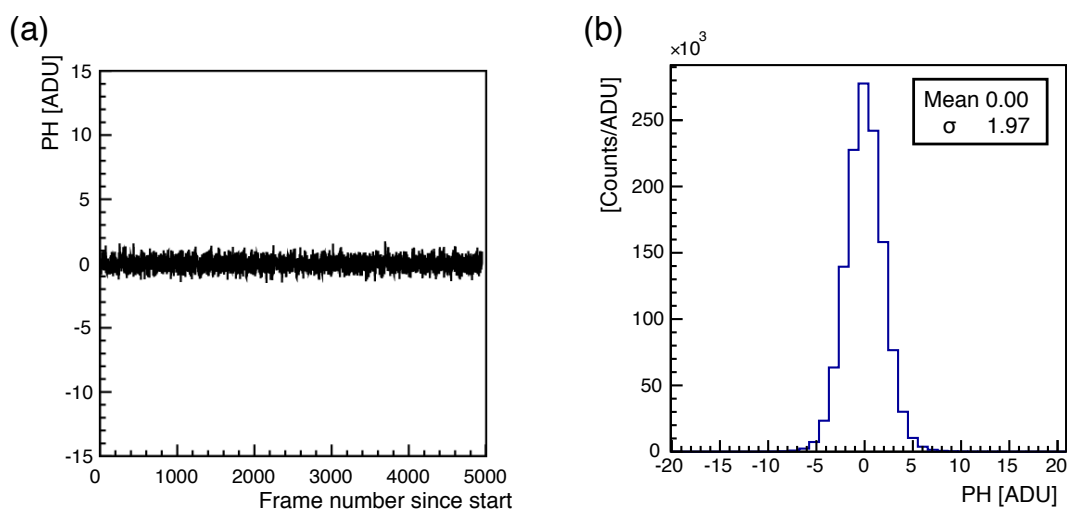


図 4.7: バットフレームを除き、オフセット成分を引いた後の XRPIX1 の全ピクセルのデータ。(a) 1 フレームごとにピクセル平均したライトカーブ。(b) 波高値のヒストグラム。

4.3 X線照射試験

4.3.1 X線検出の解析プロセス

「全面読み出し法」でデータを取得した場合の解析プロセスについて紹介する。前節のペDESTAL特性の研究をもとに、解析は以下の手順で行った。

(1) オフセット成分の差し引き

4.2.2項で行ったように、各フレームにおける各ピクセルの $PH_{off_{ij}}(f)$ の推定値を算出する。その後、各フレームにおける各ピクセルのペDESTALからその推定値を差し引く。これにより、オフセット成分のピクセル間のばらつき、および時間変動が補正される。

(2) バットフレームの選定

4.2.2項で行ったように、各フレーム間の平均値と標準偏差(σ_{frm})を求める。平均値よりも $3\sigma_{frm}$ 以上出力が離れたフレームをバットフレームと判定し、以後の解析では使用しない。

(3) X線イベントの検出

各フレーム、各ピクセルの出力からX線のイベントを判定する。イベントの検出については4.3.2項で詳しく説明する。

(4) チャージシェアリングイベントの評価

XRPIXのようなピクセル検出器では、発生した電荷が複数のピクセルにまたがってしまうチャージシェアリングイベント(マルチピクセルイベント)が存在する。空乏層の深い位置で発生した一次電子雲は、読み出しノードがあるセンサー層表面に到達するまでに大きく広がる。このような場合はチャージシェアリングイベントの割合が大きくなる。よって、空乏層のより深い位置まで透過できるエネルギーの高いX線で、このイベントが起こりやすい。チャージシェアリングイベントは、複数の読み出しノードから電荷が回収させるので、入射したX線のエネルギーを知るためには、解析時にそれらの電荷を足し合わせる必要がある。解析時の補正についても4.3.2項で説明する。

4.3.2 イベント検出とチャージシェアリングイベントの補正

この項ではX線イベントの検出とチャージシェアリングイベントの補正を行うための解析である「イベントセレクション」について説明する(図4.8)。

(i) イベントの抽出

あるピクセルに着目したとき、隣接した周囲8ピクセルの出力値よりも大きくかつ、その値があらかじめ設定したイベント閾値(特に記載がない限り読み出しノイズの15倍の値)よりも大きいとき、X線による「イベント」と定義する。

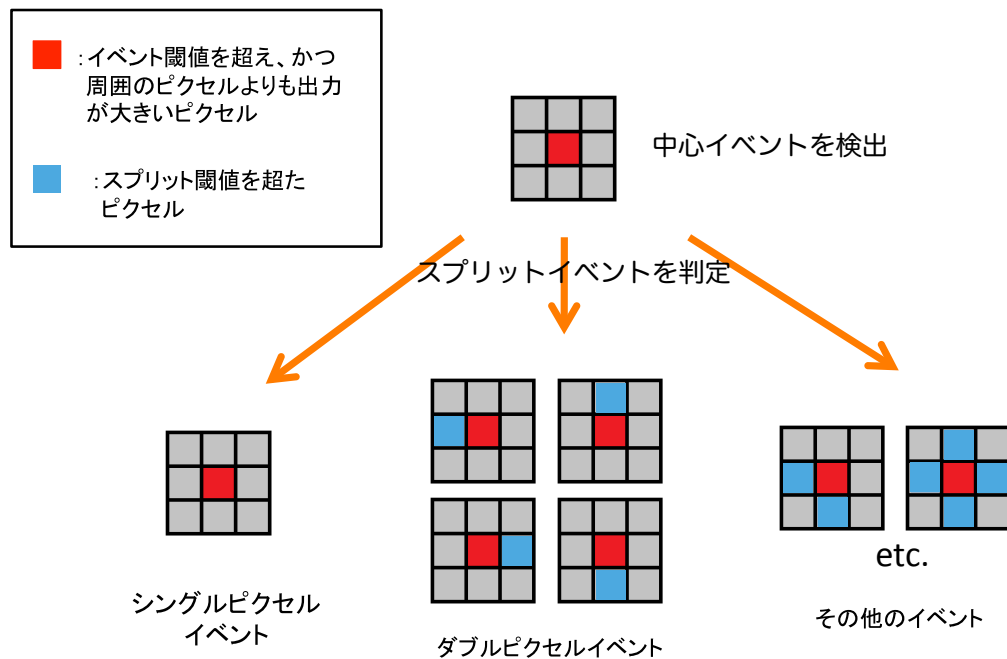


図 4.8: イベントセレクションの関係図。

(ii) シングルピクセルイベントの判定

抽出したイベントに隣り合う上下左右のピクセルの出力値が全て、あらかじめ設定したスプリット閾値 (特に記載がない限り読み出しノイズの3倍の値) よりも小さいとき、これを「シングルピクセルイベント」と定義する。これはX線により作られた電荷が一つのピクセルに収まったイベントだと判定する。中心のピクセルの出力がシングルピクセルイベントの出力とする。

(iii) ダブルピクセルイベントの判定

抽出した上下左右のピクセルの出力値のうちひとつのみが、あらかじめ設定したスプリット閾値を超えるようなイベントを「ダブルピクセルイベント」と定義する。これは電荷が2つのピクセルにまたがったチャージシェアリングイベントと判定する。ダブルピクセルイベントの出力は、中心のピクセルと、スプリット閾値を超えたピクセルの出力を足し合わせたものとする。

(iv) その他のイベントの判定

シングルピクセルイベント、ダブルピクセルイベントのどちらにも判定されなかったイベントを「その他のイベント」と定義する。これらは、周囲のピクセルの2つ以上がスプリット閾値を超えたものである。三つ以上のピクセルにまたがるようなチャージシェアリングイベントも存在するが、現状のXRPIXは読み出しノイズが大きいため、三つ以上のピクセルを足し合わせるとエネルギー分解能が非常に悪くなる。よって、本研究では、このイベントは表示させていない。

4.4 試験結果

4.4.1 センサー層の完全空乏化の確認

はじめに、XRPIX1b-FZのセンサー層が完全空乏することを確認した。調査方法としては、線源 ^{109}Cd からからのX線のフォトンカウントのバックバイアス依存性を調べる方法を取った。

空乏層厚 W_{dep} と、バックバイアス電圧 V_{back} には式(2.4)の関係が成り立つ。XRPIXにおいて、逆バイアス電圧はバックバイアス電圧である($V = V_{back}$)。バックバイアス電圧を大きくする従い、空乏層も厚くなる。十分なバックバイアス電圧値が印可されると、空乏層厚がセンサー層厚($500\ \mu\text{m}$)に達し、空乏層はそれ以上厚くはならない。

エネルギーが十分高いX線、つまり減衰長がセンサー層厚よりも長いX線を照射したときに検出されるフォトンカウントは、空乏層厚に依存する。よって、X線のフォトンカウントが飽和するバックバイアス電圧値を調べた。

線源 ^{109}Cd から $22.1\ \text{keV}$ のX線(減衰長が約 $1200\ \mu\text{m}$)をXRPIX1b-FZの表面より照射し、露光時間 $1\ \text{msec}$ で30万フレームのデータを室温(約 20°C)で取得した。バックバイアス電圧値を変化させたときのフォトンカウントを調べた。図4.9に測定結果を示す。X線のフォトンカウントはバックバイアス電圧値が $200\ \text{V}$ で飽和していたため、XRPIX1b-FZは $200\ \text{V}$ で完全空乏することが分かった。

完全空乏する電圧値が判明したことにより、XRPIX1b-FZのウェハの抵抗率を算出できる。空乏層厚 $W_{dep} = 500\ \mu\text{m}$ 、バックバイアス電圧値 $V_{back} = 200\ \text{V}$ を式(2.4)に入れて算出すると、ウェハの抵抗率 ρ は $4.0\ \text{k}\Omega\ \text{cm}$ と求まった。

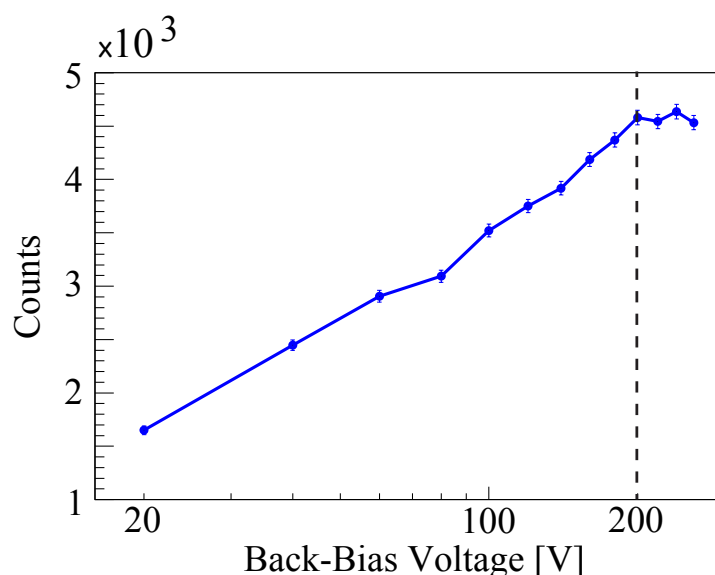


図 4.9: ^{109}Cd のフォトンカウントのバックバイアス電圧依存性。

4.4.2 エネルギースペクトル

4.3.1項で説明した解析プロセス「全面読み出し法」を用いて取得したXRPIX1b-FZのエネルギースペクトルを図4.10に示す。バックバイアス電圧200Vを印可し、 -50°C に冷却したときの ^{241}Am のエネルギースペクトルである。左図の赤線はシングルピクセルイベント、右図の青線はダブルピクセルイベントのスペクトルである。シングルピクセルイベントのスペクトルでは、 ^{241}Am の13.9 keV、17.7 keV、20.8 keVの3本の輝線の検出を確認した。さらに、9.7 keVと11.4 keVのAu $L\alpha$ とAu $L\beta$ の輝線も存在した。この二本の輝線は線源の窓の部分に用いられている金パラジウムに ^{241}Am からのアルファ線が照射され発生した二次X線である。ダブルピクセルイベントのスペクトルでは、エネルギー分解能が悪く、輝線の分離が難しい。この原因については後の4.5節で考察する。

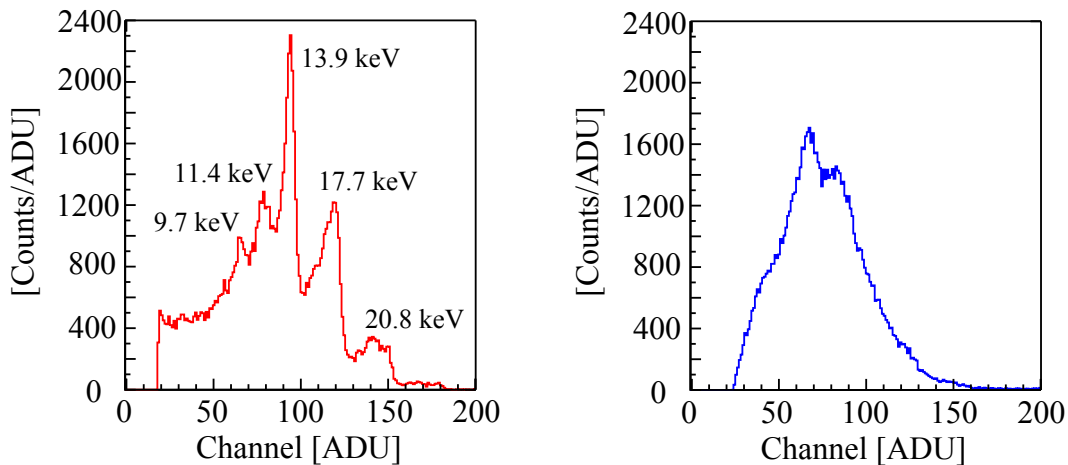


図 4.10: XRPIX1b で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。(左) シングルピクセルイベントと (右) ダブルピクセルイベントのエネルギースペクトル。

4.4.3 素子のゲインとエネルギー分解能

前項で得られたシングルピクセルイベントのエネルギースペクトルの輝線(図4.10)をガウシアンでフィットし、その中心値を求めることで、エネルギー較正を行った。それぞれの輝線の中心値を表4.1に示す。これらの値を一次関数でフィットし、その傾き(単位ADU/keV)から素子のゲインを算出した(図4.11)。ここで素子のゲインとは、X線が作った電子一個が最終的にどのぐらいの電圧に変換されるかを示す値である。1 ADU = 244 μV でありかつ、Siの平均電離エネルギーが $3.65 \times 10^{-3} \text{ keV/e}^-$ であるので、素子のゲインは以下の式で計算できる。

$$(\text{素子のゲイン } [\mu\text{V/e}^-]) = (\text{フィットの傾き } [\text{ADU/keV}]) \times 244 \times (3.65 \times 10^{-3}) \quad (4.3)$$

この式を用いて、XRPIX1b-FZのゲインを計算すると、 $(5.86 \pm 0.02) \mu\text{V/e}^-$ であった。先行研究で得たXRPIX1-FZの素子のゲインは $3.60 \mu\text{V/e}^-$ (バックバイアス電圧値: 20 V) であり、XRPIX1b-FZは1.6倍のゲインを得ることに成功した。

次に、素子のエネルギー分解能 (FWHM) を求める。先に求めたスペクトル輝線のガウスフィットの標準偏差 σ [ADU] の結果と一次関数のフィットの傾きの結果から以下の式で求めることができる。

$$\Delta E_{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \div (\text{フィットの傾き [ADU/keV]}) \quad (4.4)$$

この式を用いて XRPIX1b-FZ のエネルギー分解能を求めると、 $(8.2 \pm 0.2)\%$ FWHM @ 13.9 keV であった。

表 4.1: XRPIX1b-FZ で取得した ^{241}Am の輝線のガウスフィットの結果。

輝線のエネルギー [keV]	9.7	11.4	13.9	17.7	20.8
中心値 [ADU]	65.67 ± 0.17	78.89 ± 0.21	93.77 ± 0.05	118.9 ± 0.10	141.0 ± 0.81
標準偏差 [ADU]	3.95 ± 0.52	7.69 ± 0.46	3.20 ± 0.06	3.67 ± 0.10	10.1 ± 0.89

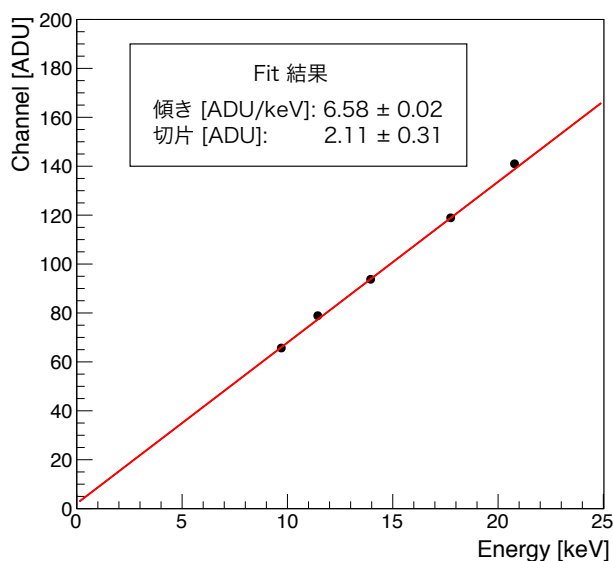


図 4.11: XRPIX1b-FZ のエネルギー較正の結果。

4.4.4 検出部の寄生容量の算出

前項で得た素子のゲイン G は $5.86 \mu\text{V}/e^-$ (バックバイアス電圧値: 200 V) であった。この素子のゲインを用いて検出部の寄生容量 C_{sens} を算出することができる。回路のゲインを A_{cir} 、電荷素量を e ($= 1.6 \times 10^{-19}$ C) とすると、

$$C_{sens} = \left(\frac{G}{eA_{cir}} \right)^{-1} \quad (4.5)$$

となる。XRPIX1bのピクセル回路はXRPIX1と同じであるため、回路ゲインもXRPIX1と同じ $(0.936)^2 = 0.876$ であると思われる[14]。各値を入れると $C_{sens} = 23.9$ fFと算出された。XRPIX1の検出部の寄生容量は37.3 fF(バックバイアス電圧値: 20 V)[14]であったため、35%の容量の削減に成功した。

4.5 電荷損失によるエネルギー分解能の劣化の発見

4.5.1 ダブルピクセルイベントでの電荷損失

4.4.2項で示した ^{241}Am のダブルピクセルイベントのエネルギースペクトル(図4.10右)について考察する。図4.10右のダブルピクセルイベントの輝線のエネルギー分解能は、シングルピクセルイベントのもの(図4.10左)よりも悪いものであった。

また、シングルピクセルイベントにおいて、最もカウント数の大きい輝線は13.9 keVで二番目は17.7 keVであるので、ダブルピクセルイベントで確認できる2つの輝線も ^{241}Am の13.9 keVと17.7 keVだと思われる。しかし、それらの輝線のピークを確認するとダブルピクセルイベントのスペクトルでは、シングルピクセルイベントの輝線のよりも低いチャンネルに存在していた(図4.12参照)。以下では、この現象を「ピークシフト」と呼ぶ。

ピークシフトはXRPIX1(図3.3)では確認できないXRPIX1b特有の現象であった。このピークシフトは、ダブルピクセルイベントでは電荷損失が起こり、入射したX線のエネルギーを再現できていないことを示している。また、電荷損失が起こると回収できる電荷量が各イベントでばらつくため、エネルギー分解能は悪くなる。ダブルピクセルイベントはピクセル境界をまたぐチャージシェアリングイベントであるので、電荷損失の原因はピクセル境界付近にあるのかもしれない。この現象は、検出器の電荷収集効率を著しく悪くし、ひいてはエネルギー分解能を劣化させる検出器開発上の大きな問題である。本研究は、この電荷収集効率の問題の原因追及と改善を課題とした。

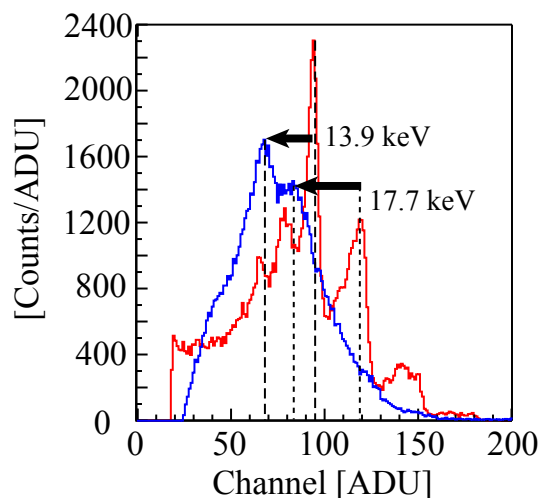


図4.12: XRPIX1bで取得した ^{241}Am のエネルギースペクトルのピークシフト。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベントのエネルギースペクトル。

4.5.2 電荷損失のバックバイアス電圧依存性

電荷損失の問題の原因追及の第一歩として、ピークシフトのバックバイアス電圧依存性を調べた。図 4.13 は、XRPIX1b-FZ にバックバイアス電圧値 5 V (左図)、50 V (中央図)、200 V (右図) を印可し、 -50°C に冷却して取得した ^{241}Am のエネルギースペクトルである。シングルピクセルイベント、ダブルピクセルイベントのスペクトルはそれぞれ赤線と青線で表示している。これらのスペクトルを比較すると、バックバイアス電圧値が高くなるにつれて、ピークシフトの現象が大きくなっていることが分かる。

より詳しい調査のため、XRPIX1b-FZ に印可するバックバイアス電圧値を 5–200 V の範囲で変化させて 6 点のデータを取得した。また、ウェハの異なる XRPIX1b-CZ でも同様の試験をし、ピークシフトが FZ ウェハ特有の現象かを調べた。図 4.14 にピークシフトのバックバイアス電圧依存性を示す。 ^{241}Am の 17.7 keV の輝線について、縦軸をピークチャンネル、横軸をバックバイアス電圧値として表示している。XRPIX1b-FZ (青) と XRPIX1b-CZ (赤) で取得したデータについて、シングルピクセルイベントのピークチャンネルは ‘○’、ダブルピクセルイベントは ‘□’ でプロットしている。

どちらのウェハの素子で取得したものでも、バックバイアス電圧値の増加に従ってピークシフトが大きくなっていることが分かった。つまり、電荷損失はウェハ特有の現象ではなかった。

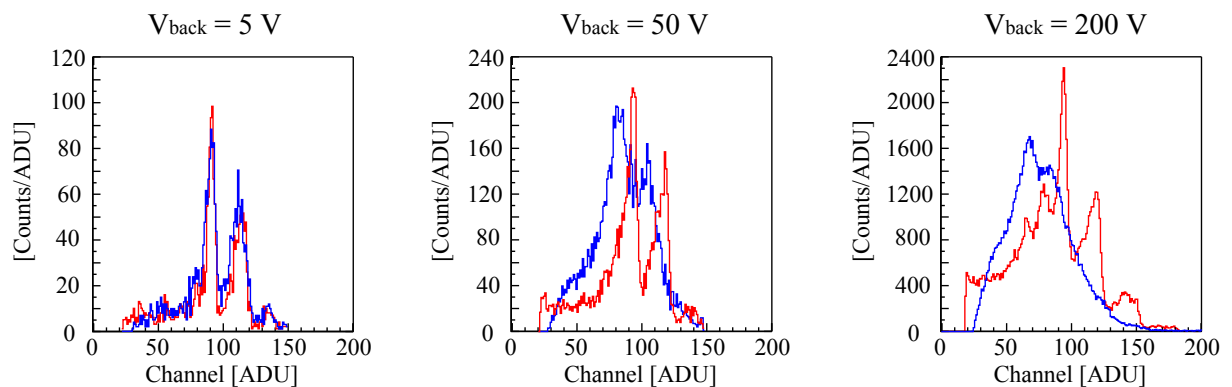


図 4.13: XRPIX1b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。バックバイアス電圧値がそれぞれ 5 V (左図)、50 V (中央図)、200 V (右図)。

4.5.3 電荷損失の他の依存性

電荷損失のバックバイアス電圧値以外の依存性を調べた。まずはじめに、電荷損失と空乏層の厚みとの関係について述べる。式 (2.4) を用いて、図 4.14 の横軸のバックバイアス電圧値を素子の空乏層厚に焼き直したものを図 4.15(a) に表示する。この結果を見ると、どちらのウェハの素子でも空乏層厚の増加に従いピークシフトは大きくなっていった。しかし、このピークシフトの増加の傾向はウェハの違いによって著しく異なる。電荷損失は空乏層の厚みだけで決まるとは言えない。

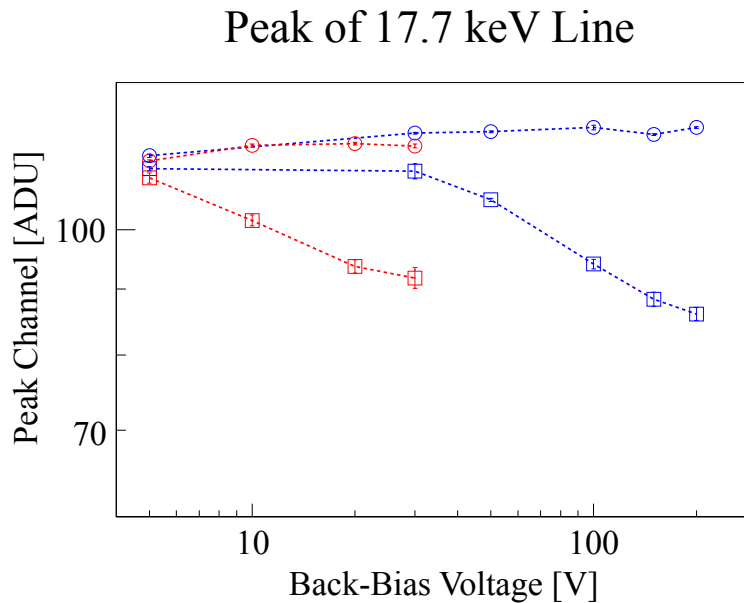


図 4.14: ^{241}Am の 17.7 keV 輝線のピークシフト、バックバイアス電圧依存性。縦軸はチャンネル、横軸はバックバイアス電圧値。XRPIX1b-FZ (青) と XRPIX1b-CZ (赤) で取得したデータについて、シングルピクセルイベントは ‘○’、ダブルピクセルイベントは ‘□’ でプロットしている。

次に素子のセンサー層内にかかる電場の強さと電荷損失の関係を調べた。センサー層内の電荷が最終的に運ばれる場所はセンサー層表面付近である。センサー層表面の電場 E_{surf} は、空乏層の厚み W_{dep} とバックバイアス電圧値 V_{back} を用いて、

$$E_{surf} \approx 2 \times \frac{V_{back}}{W_{dep}} \quad (4.6)$$

と近似することができる [16]。空乏層の厚みはバックバイアス電圧で記述できるので、センサー層表面の電場はバックバイアス電圧値から算出できる。式 (4.6) を用いて、図 4.14 の横軸のバックバイアス電圧値をセンサー層表面付近の電場強度に焼き直したものが図 4.15(b) である。ピークシフトはセンサー層表面付近の電場強度の増加に従い大きくなり、さらに異なるウェハの素子で取得したデータであっても、同様の増加の傾向を示していた。

X線が入射し、空乏層内で発生した電荷は、センサー層内の電場に沿って移動し、読み出しノードから回収される。さらにセンサー層内の電場は、センサー層の裏面に印可しているバックバイアス電圧と、センサー層の表面にある読み出しノードの電位によって決定する。読み出しノードから遠いピクセル境界では電場の強度や構造が期待されるものと異なるかもしれない。我々は XRPIX1b の電荷収集効率のさらに詳しい調査を行うために SPring-8 でビーム照射試験を行った。

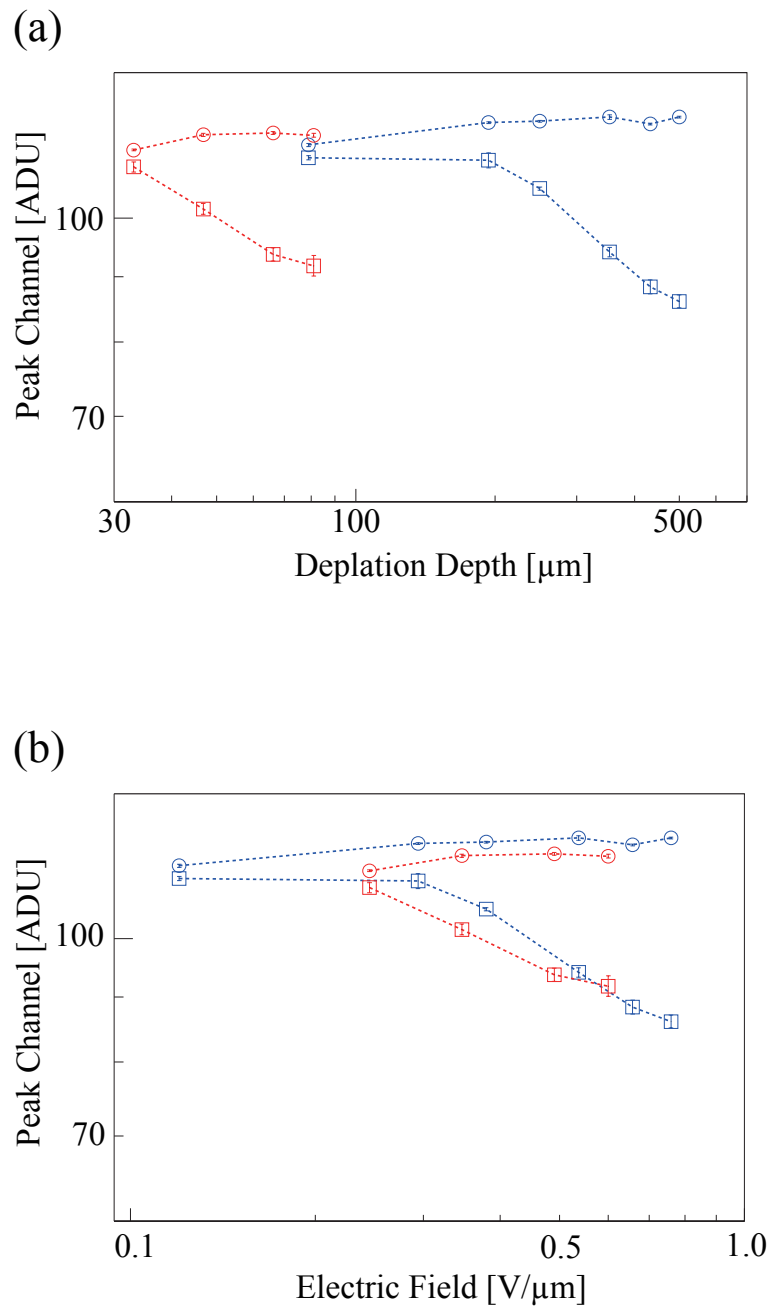


図 4.15: ピークシフトの空乏層厚依存性 (a) と電場依存性 (b)。縦軸はチャンネル、横軸は空乏層厚 (a) と電場強度 (b) の計算値。マーカーの色と形は図 4.14 と同じ。

第5章 SPring-8 X線ビーム試験による XRPIX1b の電荷収集効率の測定

5.1 概要

XRPIXのサブピクセルレベルのX線レスポンスを調べるために、SPring-8のBL29XUL [17]にてX線の照射試験を行った。XRPIX1b-FZに、 $10\ \mu\text{m}\Phi$ のビームを素子の表面から照射する。ビーム入射位置を $6\ \mu\text{m}$ ピッチで動かし(図5.1)データを取得する。読み出しは全面読み出し法を用いており、イベントセレクションではイベント閾値を20 ADU($\sim 3\ \text{keV}$)、スプリット閾値を6 ADU($\sim 1\ \text{keV}$)と設定した。バックバイアス電圧が素子は完全空乏する200 Vで、ビームのエネルギーは8.0 keVと17.7 keVの二種類の実験を行い、 $11 \times 11 = 121$ 点のデータを取得した。さらに三番目の実験として、素子に印可するバックバイアス電圧を変動させて、ビームエネルギーが8.0 keVのときのバックバイアス依存性も調査した。三番目の実験では、時間不足のため特定の一点のみのデータを取得した。各実験のパラメーターを表5.1にまとめる。

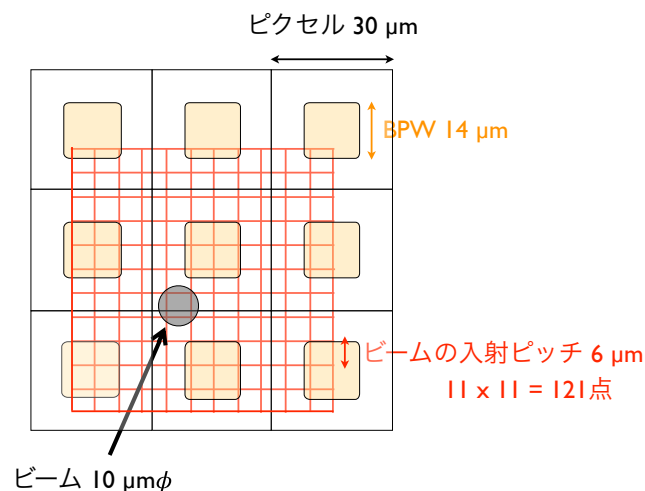


図 5.1: 素子のピクセルとビーム照射ピッチのおおよその位置関係。

表 5.1: 各実験のパラメーター

	実験 1	実験 2	実験 3
データ取得の日時	12/19 5:30 - 16:34	21:24 - 12/20 4:39	7:03 - 7:25
ビームのエネルギー [keV]	17.7	8.0	8.0
バックバイアス電圧 [V]	200	200	5, 20, 40, 100
取得データ数	$11 \times 11 = 121$	$11 \times 11 = 121$	4

5.2 実験のセットアップ

実験のセットアップを図 5.2 に模式図として、図 5.3 に写真として示す。ビームは 4 象限スリットと $10 \mu\text{m}\Phi$ のピンホールで細くし、ベリリウム窓を通して真空槽内に入る。真空槽内には、素子およびコールドプレートを搭載した読み出しボードが、ビームの入射口の中心に素子がくるように固定されている (図 5.3 上)。真空槽は架台の上に固定され、その架台を XZ ステージに載せる (図 5.3 左下)。この XZ ステージは計算機と信号をやり取りすることで動作し (図 5.4 参照)、ステージを $6 \mu\text{m}$ ピッチで動かすことで、ビームの入射位置を決める。真空層に、スクロールポンプ、ターボ分子ポンプ、冷却機、真空計を取り付け、真空引きおよび冷却ができるようにしている (図 5.3 右下)。真空槽は $6 \mu\text{m}$ ピッチと細かく動作させるため、真空ポンプからの振動が十分小さいことを確認する必要がある。真空槽に加速器計を取り付けた後、真空ポンプを動作させて調査した結果、振動は最大で $100 \text{ nm} @ 30 \text{ Hz}$ と問題無い値であった。

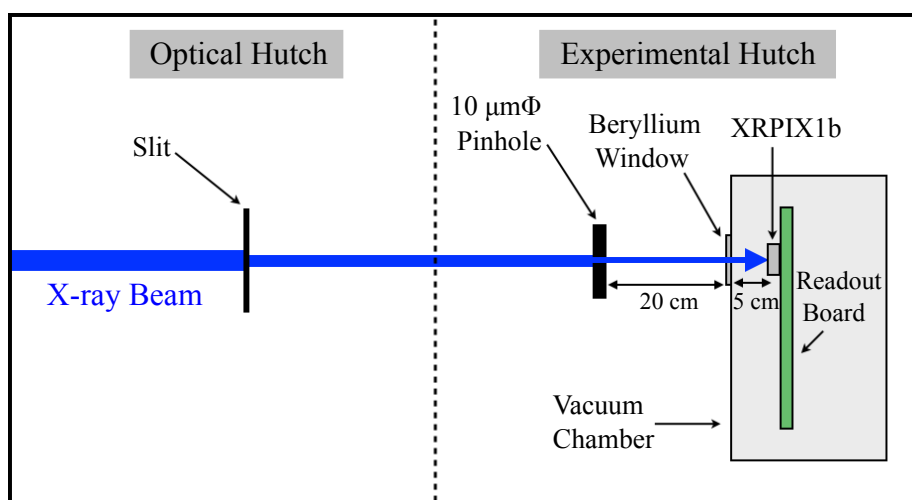


図 5.2: 実験のセットアップの模式図。

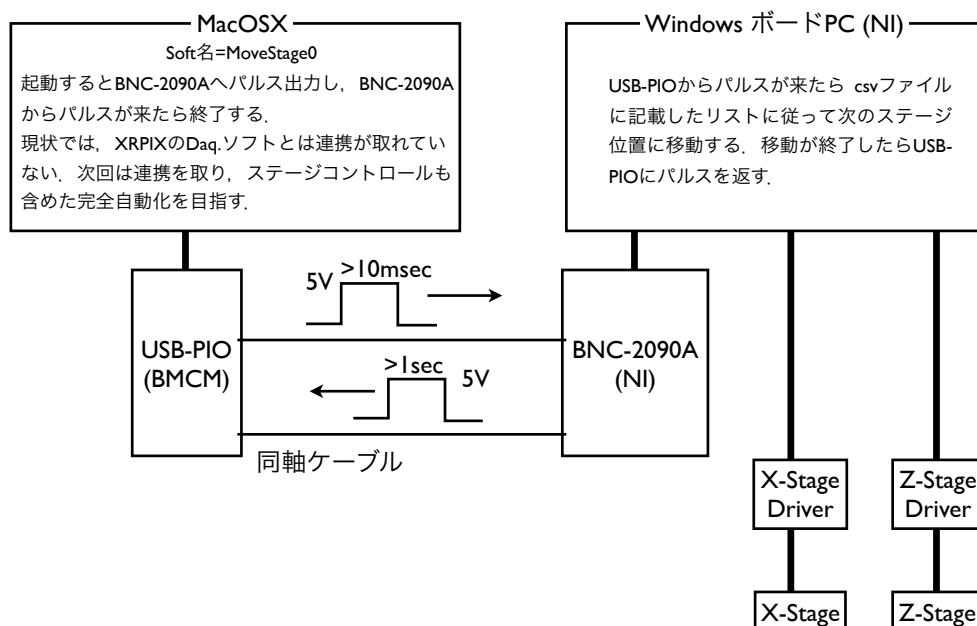


図 5.4: チャンバー用 XZ ステージと計算機の信号のやり取り。

5.3 事前試験

5.3.1 ビームの強度落とし

XRPIX の放射線耐性は 150 krad である。それ以上の放射線を照射すると、SOI 構造の BOX 領域に捕獲電荷 (6.3.1 項参照) が作られ、バックゲート効果により回路層の MOS-FET が正常に動作しなくなる。今回の実験は 2 日間連続で行うので、その間の照射線量が 150 krad [18] を超えないようにビーム強度を落とす必要がある。従って 75 krad/day (1000 counts/sec/pix) を十分下回る強度にする。BL29XU EH2 のビームのノミナル値は、 5.3×10^{13} [photon/sec/mm²] である。

BL29XU EH2 の X 線ビームには目的のエネルギーの主ビームに対し、高次光のビームが混在している。8.0 keV のビームの高次光 (24.0 keV) は高次光除去ミラーで主に落とされている。ビームの強度落としの方法は以下の 4 種類である。

(1) 高次項除去ミラー

2桁程度強度を落とせる。エネルギーの高い高次光ビームの方を主に落とせる。エネルギーが 8.0 keV のビーム強度が $\sim 1/2$ 、その高次光である 24.0 keV のビーム強度が $\sim 1/2400$ 、17.7 keV のビーム強度が $\sim 1/900$ にまで落とせる。

(2) 4象限スリット

ビームの幅を狭くする。主ビームと高次光ビームの両方を同じ割合で落とせる。

(3) アンジュレーター

2-3桁程度強度を落とせる。主ビームと高次光ビームの両方を同じ割合で落とせる。アンジュレーターギャップ (IG) と強度の関係を図5.5に示す。図5.5はIGが35–50 mmの範囲での Photo Diode (PD) で測定した強度である。

(*) 8.0 keV のビームを用いた実験時の4象限スリット幅は $0.015 \times 0.015 \text{ mm}^2$ 、IGは28 mmであった。このときスリットとアンジュレーターでビーム強度を1/1000に落とせる。17.7 keV のビーム使用時は、スリット幅 $0.17 \times 0.17 \text{ mm}^2$ 、IGは50 mmであった。このときのビーム強度は1/100に落とせる。

(4) アルミニウム板

ピンホールの前に挟むことで、強度を落とす。ビームのエネルギーによって落とせる割合は異なる。17.7 keV のビーム使用時は4.5 mm厚のアルミニウム板を用いてビーム強度を1/250に落とした。

高次項除去ミラーを用いて強度を落とした17.7 keVのビーム強度をPDで測定した。4象限スリットを $0.17 \times 0.17 \text{ mm}^2$ 、アンジュレーターギャップを50 mmのときのビーム強度は、 $8.3 \times 10^6 \text{ [photon/sec/mm}^2\text{]}$ であった。さらに強度を調整するために、ピンホールの前にアルミニウム板を挟みアンジュレーターギャップを32 mmに変えた。8.0 keVのビームの強度落としについては、アルミニウム板を挟んでいないという点を除き、同様に行った。それぞれの強度落としによってアライメント調整時、データ取得時のビーム強度調整の各パラメータを表5.2に示す。「アライメント1」とはビームのエネルギーが17.7 keVのときのアライメント調整のことを、「アライメント2」はビームのエネルギーが8.0 keVでのアライメント調整を指す。

さらに、本実験でのビームの電流の推移を図5.6に示す。ビーム使用中(12/18~12/20)のビーム電流の変動の幅は1%以下で安定であった。

表 5.2: ビーム強度調整用パラメーター

	アライメント1	実験1	アライメント2	実験2	実験3
ビームのエネルギー [keV]	17.7	17.7	8.0	8.0	8.0
バックバイアス電圧 [V]	200	200	200	200	5, 20, 40, 100
カウントレート [counts/sec/pix]	13	36	40	40	40
スリット [mm^2]	0.17×0.17	0.17×0.17	0.015×0.015	0.015×0.015	0.015×0.015
アンジュレーターギャップ [mm]	32	30	28	28	28
アルミニウム板 [mm]	4.5	4.5	0	0	0

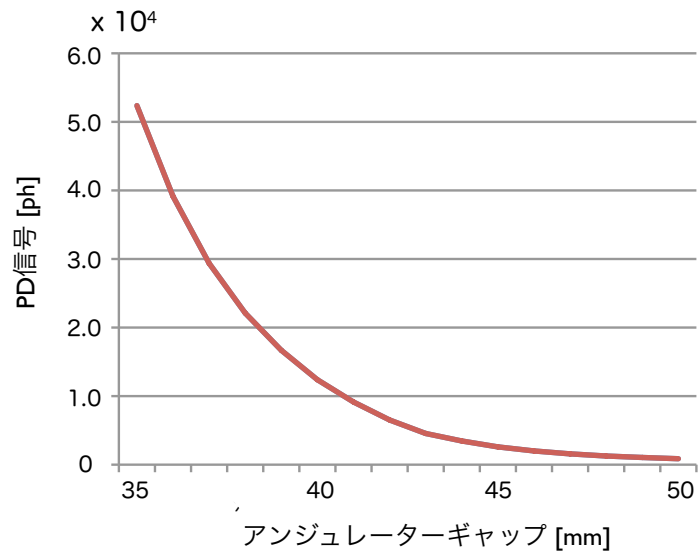


図 5.5: アンジュレーターギャップと強度の関係。

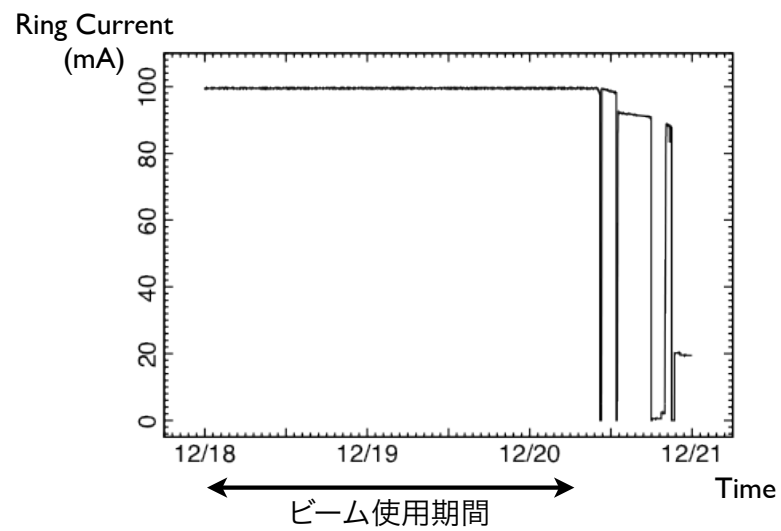


図 5.6: ビーム電流の推移。

5.3.2 アライメント調整

ビーム位置に素子を持っていくために感光紙と可視レーザーを用いて素子のアライメント調整を行った。手順は以下の通りである。

- i) 高次項除去ミラーのみで強度を落としたビームを用いる。PD を用いて、ビームの強度を確認する。
- ii) 素子に X 線が当たらないよう鉛で遮光。ビームを感光紙に当て、位置を感光紙に記録する (図 5.7 左)。
- iii) 感光紙の位置にレーザーを通しビームの軌道を可視化させた。ビームの入射口を覗きながら XZ ステージを動作させ、素子の中心にビームが当たるようチャンバーを移動させる (図 5.7 右)。
- iv) アンジュレーター、4 象限スリット、アルミニウム板 (17.7 keV のビームのみ) を用いてビームの強度を落とす。PD を用いて、ビームの強度を確認する。
- v) PD と鉛を除き、チャンバーのビームの入射口にベリリウム窓を取り付ける。
- vi) XRPIX でビームの位置の確認を行う。

次にピンホールのアライメントを調整した。感光紙 - ピンホール - 鉛 - XRPIX の配置で、素子のアライメント調整と同様に調整を行った。ピンホールを入れた後の XRPIX でのビームの入射位置を図 5.8 に示す。

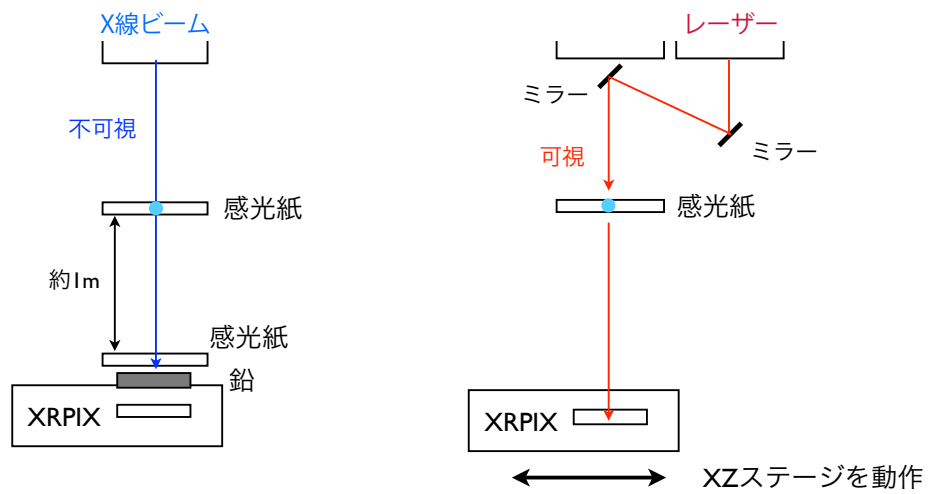


図 5.7: ビーム/レーザー と感光紙、XRPIX の位置関係。

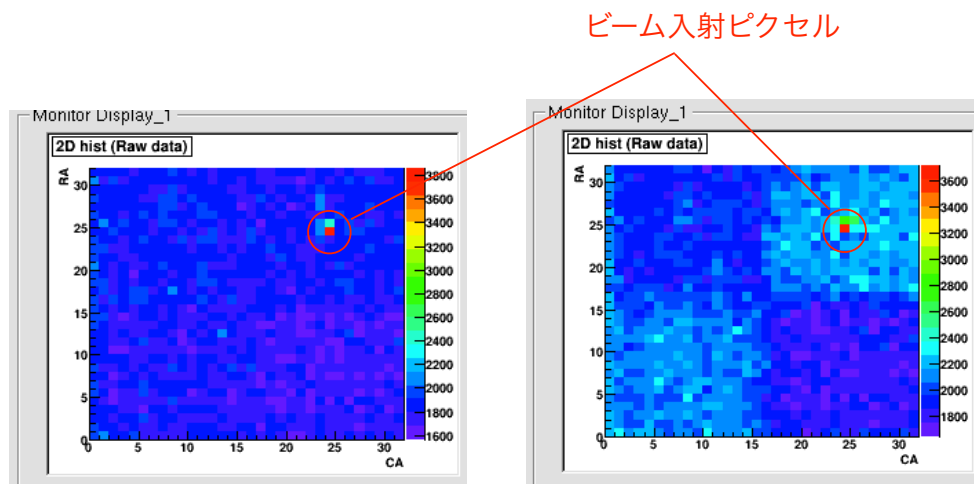


図 5.8: ビーム位置確認時の DAQ 画面、ピクセルの位置と波高値。左はビームのエネルギーが 8.0 keV の時、右は 17.7 keV のビーム位置確認時。

5.4 ビーム試験結果 ①、検出効率とエネルギースペクトル

5.4.1 試験結果

試験結果として、バックバイアス電圧を 200 V 印可したのときのビームの入射位置に対する検出効率を図 5.10 示す。左図は 8.0 keV、右図では 17.7 keV の X 線ビームを各位置に照射したときに得られたフォトンカウントを、最もカウント数の大きいもので規格化し、二次元マップとして表示している。これらの配置は、ビームの入射位置に対応し、データの取得は (1,i), (1,ii), … (1,xi) と 1 行目のスキャンが終わり次第、2 行目、3 行目、…、11 行目 という順番で取得した。

さらに、ビームの入射位置に対するエネルギースペクトルを図 5.11、図 5.12 に示す。それぞれ、ビームのエネルギー E_{beam} が 8.0 keV、17.7 keV で 200V のバックバイアス電圧 V_{back} を印可したのときの試験結果である。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベントのスペクトルである。これらの配置は検出効率の試験結果と同じである。

はじめにビームエネルギーが 8.0 keV のときの検出効率を見ると、破線で表示した位置の検出効率の値は同じ行列の値と比較すると低いものとなっていた。この破線は行列に一定間隔で表示できる。さらに破線が交差する位置では、検出効率の最も低い値となっていた。ビームエネルギーが 8.0 keV のときのエネルギースペクトルの結果でも、同じ位置で同じ間隔の周期性を確認できた。同じ行である (8,vi) と (8,viii) の位置のスペクトル (図 5.9 の左図と中央図) を比べると、(8,vi) の位置のスペクトルはシングルピクセルイベントの輝線が一本あるのに対し、破線上である (8,viii) の位置のスペクトルはダブルピクセルイベントの輝線も存在した。このダブルピクセルイベントの輝線ではピークシフトの現象が見られた。さらに、同じ列である (8,viii) と (10,viii) の位置のスペクトル (図 5.9 の中央図と右図) を見ると、破線が交差する点である (10,viii) の位置のスペクトルでは輝線成分は存在しなかった。この破線での周期性はビームエネルギーが 17.7 keV の結果でも同様であった。

また、検出効率については列方向に値が変動している傾向があった。この変動は破線で表示した周期性とは無関係に起こっており、それぞれ別の原因があると予想できる。

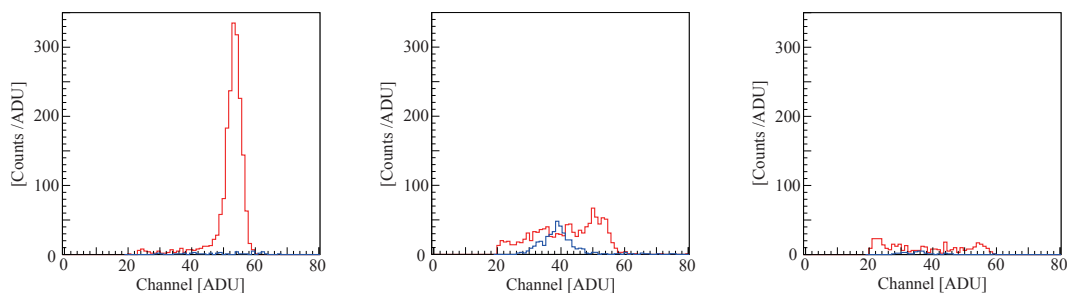


図 5.9: エネルギースペクトル ($E_{beam} = 8.0$ keV, $V_{back} = 200$ V)。左から順に、図 5.11 の (8,vi)、(8,viii)、(10,viii) の位置のスペクトルを拡大して表示したものである。

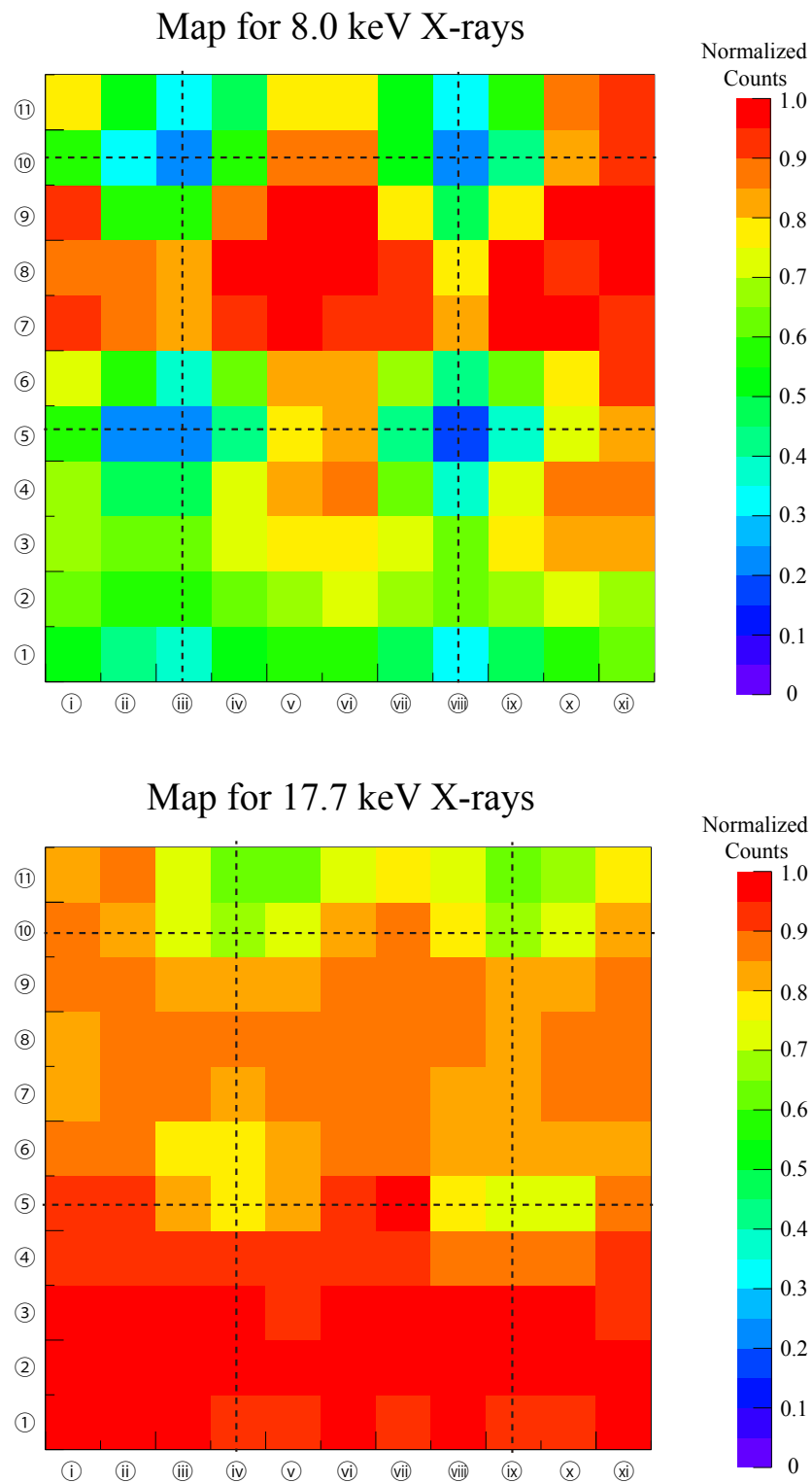


図 5.10: ビームの入射位置に対する検出効率、ビームのエネルギーは 8.0 keV (上)、17.7 keV (下) でバックバイアス電圧値が 200 V のときのデータ。

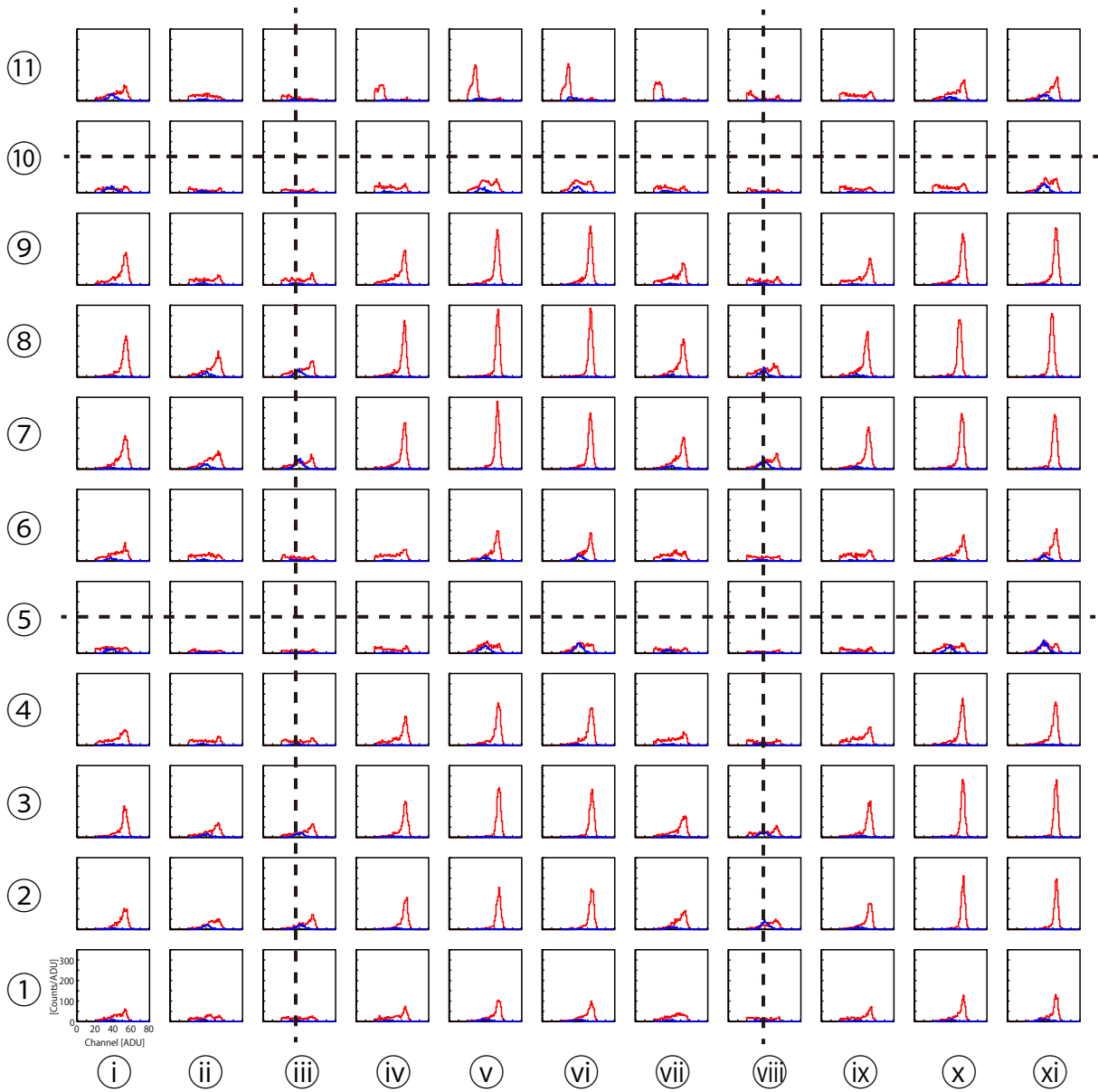


図 5.11: ビームの入射位置に対するエネルギースペクトル ($E_{beam} = 8.0 \text{ keV}$, $V_{back} = 200\text{V}$)。

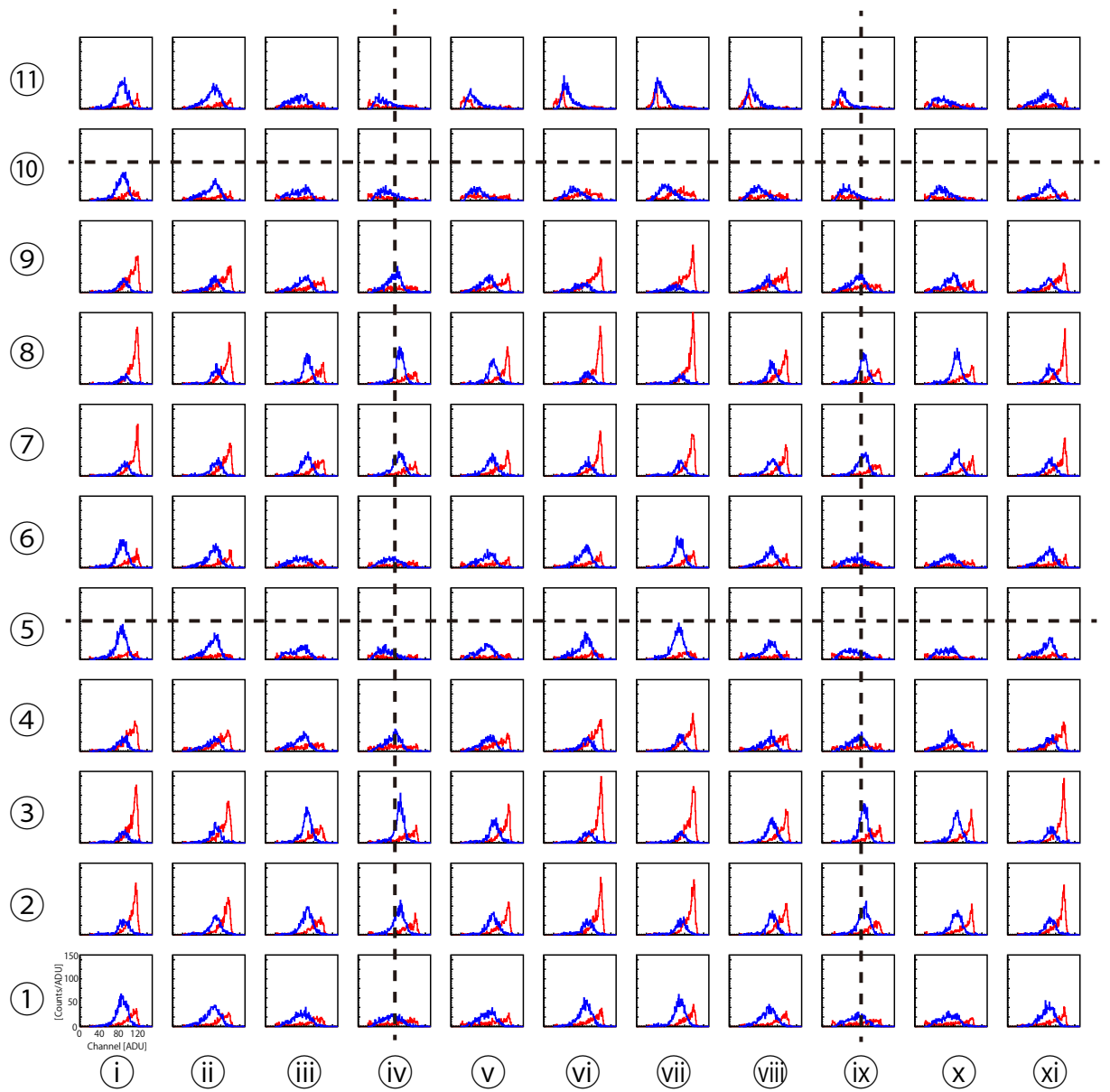


図 5.12: ビームの入射位置に対するエネルギースペクトル ($E_{beam} = 17.7$ keV, $V_{back} = 200$ V)。

5.4.2 ビーム強度変動と補正した検出効率

はじめに図 5.10、図 5.11、および図 5.12 に破線で表示した一定間隔の周期性について考察する。この間隔は5ピッチ分 ($30\ \mu\text{m}$) であり、ピクセルサイズと一致する。よって、ピクセルの内部構造に依存していると考えられる。破線上のエネルギースペクトルでは、ピークシフト現象が確認できるため、電荷損失が起きている。さらに、破線が交差する位置では輝線成分が見えないことから、この位置ではより多くの電荷が損失していると考えられる。

では、破線の位置で電荷損失が起きているとすると、この位置で検出効率が低い値となっているのはなぜだろうか？本ビーム試験は、X線のイベントはイベント閾値 (20 ADU) を超えたものを検出している。もし破線上で起こる電荷損失が非常に大きく、イベント閾値を下回る程であるとすると検出効率の破線上の周期性も電荷損失で説明可能である。以上から、行列で一定間隔で起こる周期性は、ピクセルの内部構造に依存する電荷損失であると考察する。

次に検出効率で見られる列方向の変動について考える。図 5.10 の各行に着目すると、破線上での検出効率が最も低い値であった。しかし、各列に着目すると破線上が最小値を取るとは限らない。これらの結果を、長いビーム照射時間の間にビーム強度が変動したと仮定して説明する。

ビームエネルギーが 8.0 keV、17.7 keV のときのフォトンカウントのライトカーブを図 5.13、図 5.14 にそれぞれ示す。破線から離れていて、電荷損失の影響が小さいと予想できる位置のフォトンカウントを‘■’、電荷損失の影響が大きいとする破線に近い位置のものを‘○’でプロットした。ライトカーブを見るとフォトンカウントは早い変動と緩やかな変動の二種類が存在する。早い変動はピクセルの内部構造に依存する電荷損失に起因するが、緩やかな変動は電荷損失では説明できない。電荷損失の影響が小さい位置のプロット(■)を、図 5.13 は時間の二次関数、5.14 は一次関数でそれぞれフィッティングし、結果を黒線で各図に表示している。フィッティング結果を表 5.3 に示す。

この結果より、X線ビームが素子に入射する位置(ビーム下流)での強度変動が、 $\sim 35\%$ (8.0 keV) と $\sim 10\%$ (17.7 keV) としてフォトンカウントの緩やかな変動は説明できる。光学ハッチ内(ビーム上流)での強度変動は1%以下(図 5.6)であったが、今回の実験環境では非常に細いピンホールを用いているため、ビーム下流から遠い位置にある2結晶分光器(モノクローム)の振動の影響が大きい。よって、ビーム下流で強度変動が起っていた可能性は十分ある。本研究では、ビームの強度変動が起っていたと仮定し、検出効率の補正を行った。フィッティング結果を用いて補正した検出効率を図 5.15 示す。ビーム強度の補正を行うことで、検出効率のビーム入射位置の依存性は電荷損失のみで考えることができる。以降、補正後の結果を用いて電荷損失の原因を追求する。

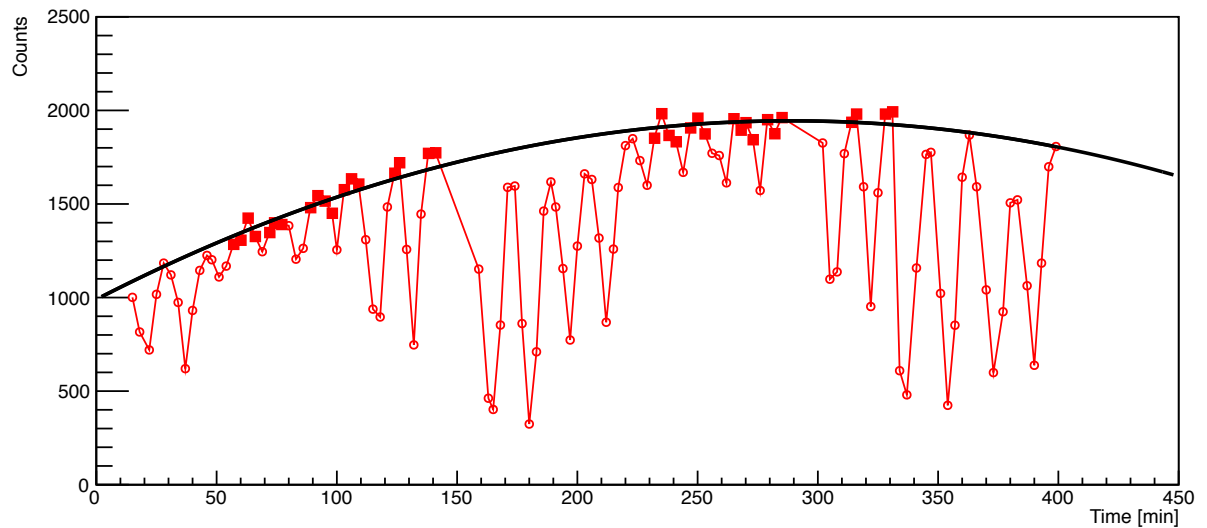


図 5.13: 8.0 keV の X 線ビームの光子カウントの時間変化。電荷損失の影響が小さい位置の光子カウントを‘■’、電荷損失の影響が大きい位置のものを‘○’でプロットした。黒線は■のデータを時間の二次関数でフィッティングした結果。

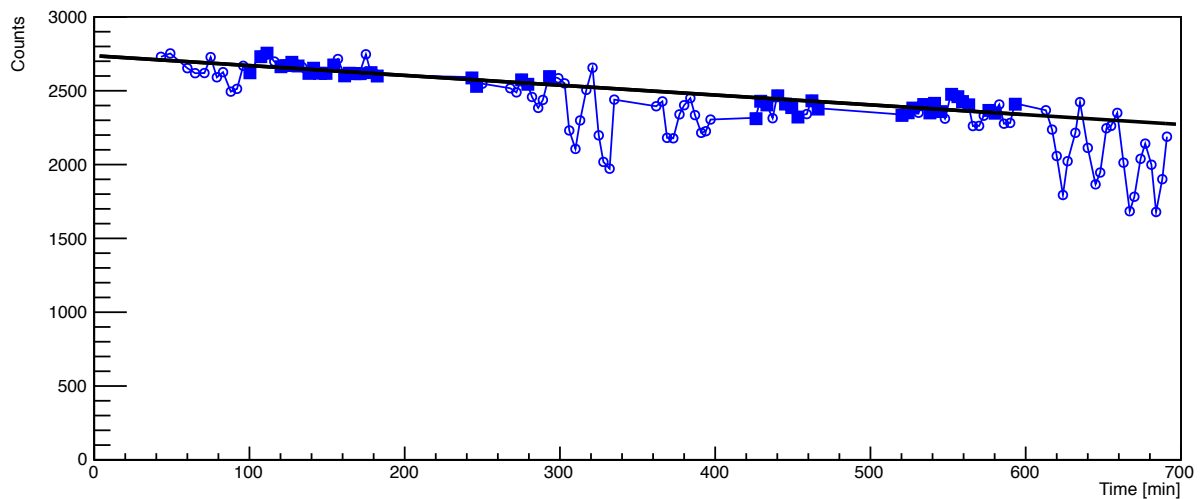


図 5.14: 17.7 keV の X 線ビームの光子カウントの時間変化。電荷損失の影響が小さい位置の光子カウントを‘■’、電荷損失の影響が大きい位置のものを‘○’でプロットした。黒線は■のデータを時間の一次関数でフィッティングした結果。

表 5.3: 検出効率のライトカーブのフィッティング結果。

ビームのエネルギー [keV]	8.0	17.7
フィッティングに用いた関数 時間 t [min]	$a_0 + a_1t + a_2t^2$	$b_0 + b_1t$
フィッティング結果 (各係数)	$a_0 = 992 \pm 49$ $a_1 = 6.60 \pm 0.65$ $a_2 = -0.0114 \pm 0.0017$	$b_0 = 2743 \pm 15$ $b_1 = -0.666 \pm 0.041$

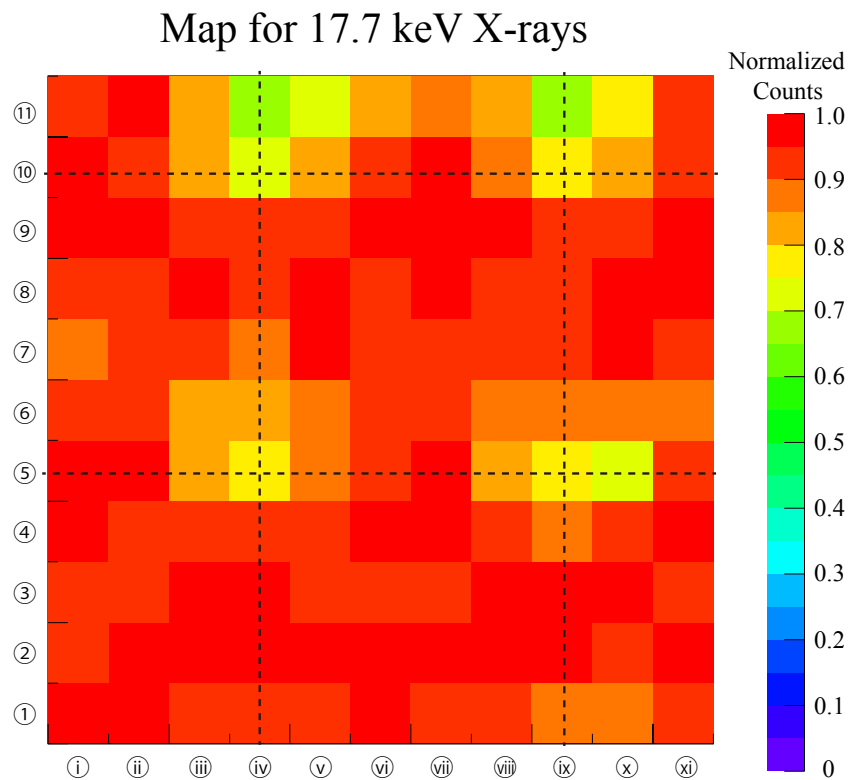
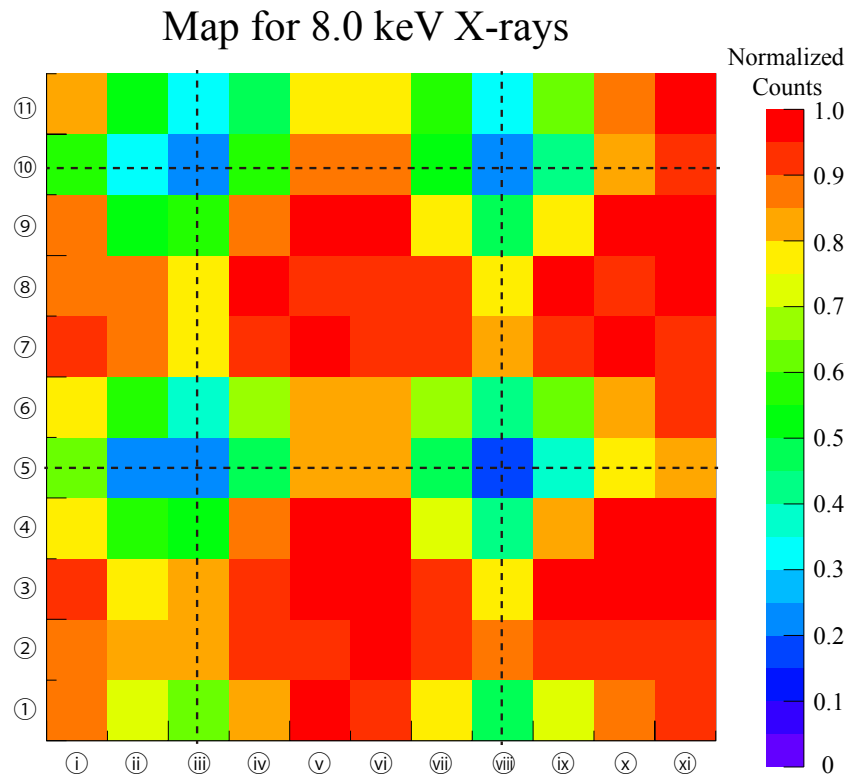


図 5.15: ビームの強度変化の補正後のビームの入射位置に対する検出効率、ビームのエネルギーは 8.0 keV (上)、17.7 keV (下) でバックバイアス電圧値が 200 V のときのデータ。

5.5 ビーム試験結果 ②、エネルギースペクトルのバックバイアス電圧依存性

ビームエネルギーが 8.0 keV での電荷損失のバックバイアス電圧の依存性を調べた。図 5.16 は、印可するバックバイアス電圧を変化させて、図 5.11 の (8,viii) に対応する位置にビームを入射したときのエネルギースペクトルである。バックバイアス電圧が 200 V のときの図 5.16 のスペクトルは図 5.11 のものと同じであるが、電荷損失の効果を見やすくするために縦軸の尺を変えた。この結果から大きなバックバイアス電圧のときほど、電荷損失の影響が大きいことが確認できた。この結果は、4.5.2 項の実験結果と一致する。

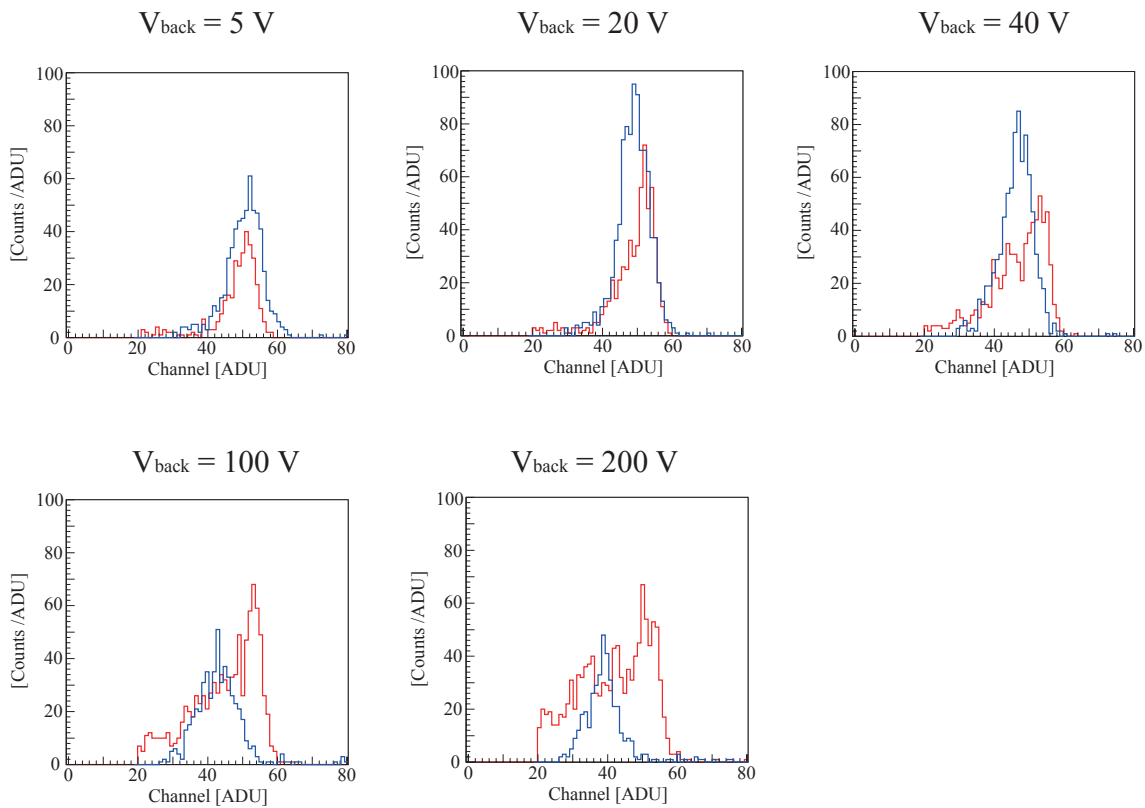


図 5.16: 8.0 keV の X 線ビームのエネルギースペクトル、バックバイアス電圧依存性。

5.6 電荷損失のエネルギー依存性の説明、不感層の仮説

検出効率の結果より、電荷損失はピクセルの内部構造に依存すると予想される(図5.15)。この電荷損失は、X線ビームが8.0 keV、17.7 keVの両方で起こる現象であるが、それら二種類のビームエネルギーの結果を比較すると、損失の割合に差が生じていた。この電荷損失のエネルギー依存性を、ピクセル境界に不感層が存在しているとして説明する。

図5.15より、ビームエネルギーが8.0 keVの結果の方が破線の位置の検出効率は低い。低エネルギーのX線の方がセンサー層の浅い位置で吸収されるため、不感層はセンサー層の表面に存在すると予想できる。さらにそれぞれの検出効率から、ピクセル境界に存在する不感層の厚みを以下のように見積もる。ビームエネルギーが8.0 keVの検出効率は、電荷損失が起きていない位置の(8,vi)に対して、電荷損失が起きている破線上の(8,vii)では $(81.1 \pm 2.8)\%$ 、破線の交差点である(10,viii)では $(22.4 \pm 1.2)\%$ である。ここでの検出効率 Q は、センサー層厚(空乏層厚) W_{dep} 、シリコン内でのX線の減衰長 λ 、不感層厚 d を用いて、

$$Q = \frac{1 - \exp(-\frac{W_{dep}}{\lambda}) - (1 - \exp(-\frac{d}{\lambda}))}{1 - \exp(-\frac{W_{dep}}{\lambda})} \quad (5.1)$$

となる。8.0 keVのX線の減衰長は $66.4 \mu\text{m}$ であり、センサー層厚は $500 \mu\text{m}$ であるので、破線上の不感層は $(13.9 \pm 0.5) \mu\text{m}$ 、破線の交差点では $(99.1 \pm 5.3) \mu\text{m}$ と計算できる。

また、ビームエネルギーが17.7 keV(シリコン内の減衰長が $674 \mu\text{m}$)の検出効率は、図5.15右の位置(8,vii)に対して、ピクセル境界である(8,ix)では $(95.6 \pm 2.9)\%$ 、ピクセル境界の交差点である(10,ix)では $(79.4 \pm 2.4)\%$ である。同様に計算すると、不感層はピクセル境界では $(15.6 \pm 0.2) \mu\text{m}$ 、ピクセル境界の交差点では $(77.0 \pm 1.1) \mu\text{m}$ であった。

これらの結果から、素子XRPIX1b-FZのセンサー層表面には、破線上で $13\text{--}15 \mu\text{m}$ 、破線の交差点では $75\text{--}100 \mu\text{m}$ の不感層が存在する。

5.7 電荷損失とピクセル回路の位置関係

5.4節および5.5節から、電荷損失はピクセルの内部構造に依りかつ、バックバイアス電圧に依存する。これらの結果から、電荷損失の原因について考察する。

電荷損失にバックバイアス依存性があることより、4.5.2項よりセンサー層の電場構造に原因があると考えられる。センサー層内の電場は、読み出しノードの電位とバックバイアス電圧によって決まるはずである。ただしXRPIXではセンサー層の近くにピクセル回路が存在するため、この回路の電位(0–1.8 V)がセンサー層内の電場に影響を与えている可能性がある。ピクセル回路とセンサー層はBOX層によって絶縁されているが、BOX層の厚みは 200 nm と非常に薄いためである。ピクセル回路の電位の影響はセンサー層表面が最も顕著であると思われる。これは、不感層がセンサー層表面にあるという予想と一致する。

図5.17左にXRPIX1bのピクセル回路を示す。白枠が1ピクセル、桃枠がBPWの範囲である。回路は、センサー層に近くに位置するトランジスタ(青色)とポリシリコン配線

(緑色)のみ表示している。これらのトランジスタとポリシリコン配線の電位が、最も強くセンサー層の電場に影響を与える。これらをまとめて斜線部で表示したものを図 5.17 右に示す。

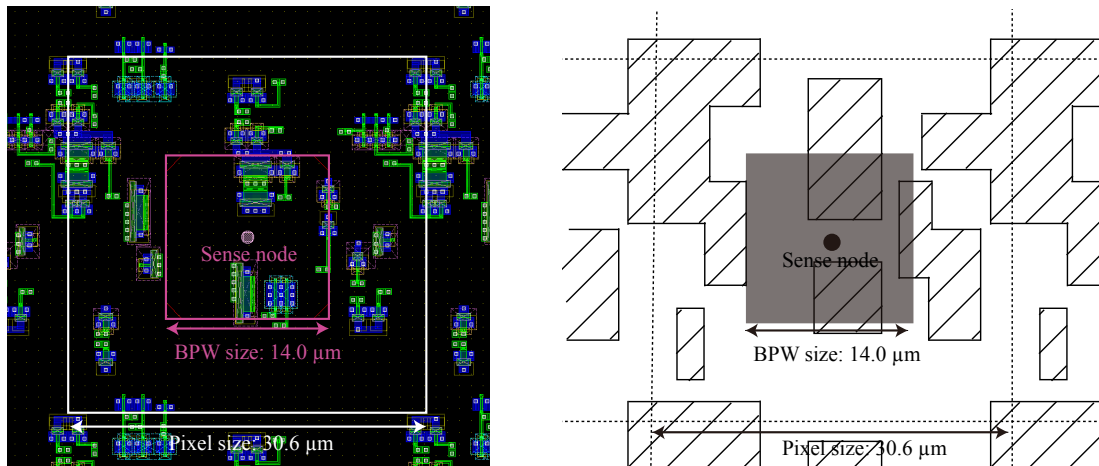


図 5.17: 左図は、XRPIX1b のピクセル回路のレイアウト図。白枠が 1 ピクセル、桃枠が BPW の範囲。トランジスタを青色、ポリシリコン配線を緑色で表示している。右図は、ピクセル回路の模式図。トランジスタとポリシリコンをまとめて斜線部で表示。

次にこのピクセル回路の配置と、検出効率の二次元マップを比較して相関を調べた。二次元マップは電荷損失の影響がより顕著に見える 8.0 keV の X 線ビーム照射時のもの (図 5.15 上) を用いた。読み出しノードおよび BPW に近接してかつ、ピクセル回路が存在しない場所の検出効率が最も高く、BPW から遠くかつ、ピクセル回路が存在する領域での検出効率が最も低いとし、ピクセル回路図と検出効率の二次元マップを合わせて表示させた (図 5.18)。図 5.18 から、ピクセル回路がある領域でも、BPW に接している場合は検出効率は比較的高いことが分かった。

このように、ピクセル回路の配置と電荷損失には相関があった。電荷損失の原因を探るためには、ピクセル回路がセンサー層内の電場構造に与える影響を調べる必要がある。

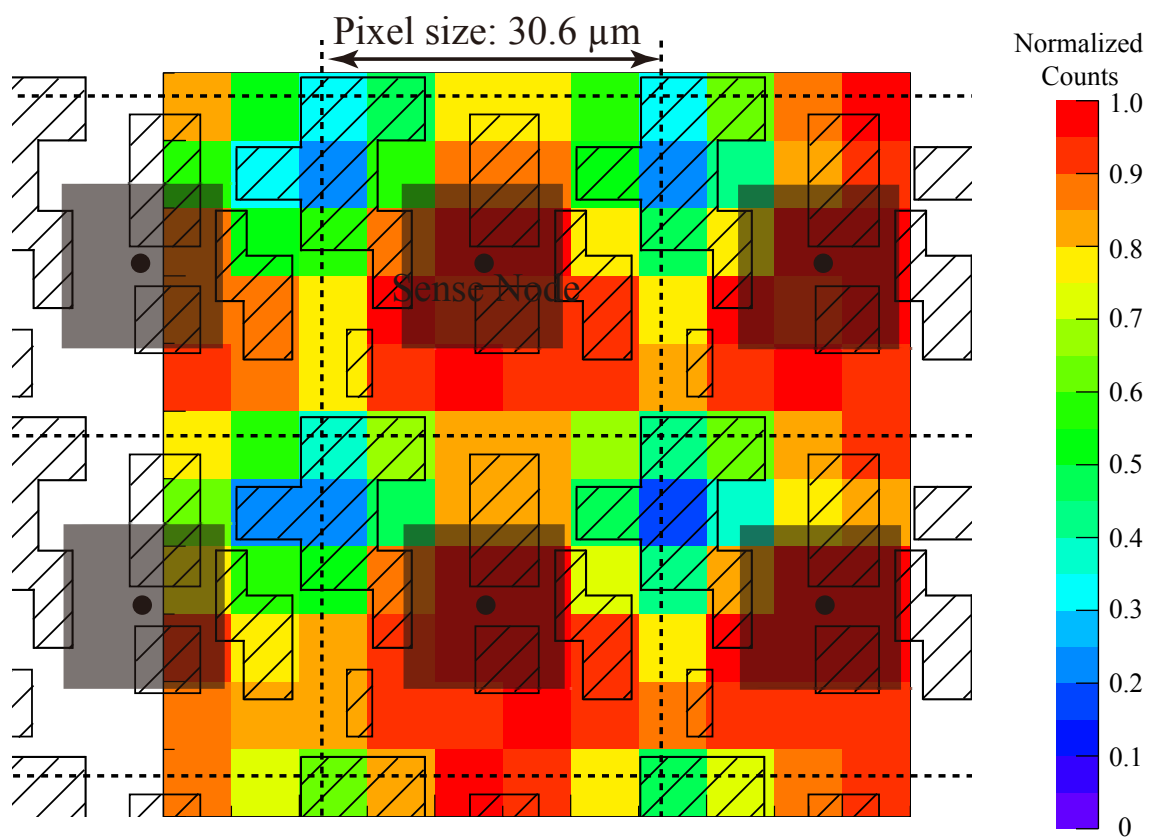


図 5.18: 8.0 keV X 線ビームの検出効率とピクセル回路の比較。検出効率のマップは図 5.15 の上図と同じものである。

第6章 XRPIXの電場シミュレーション

センサー層内の電場構造を調査するため、TCAD (Technology Computer Aided Design) シミュレーションを行った。TCADとは半導体デバイスのプロセスから作成したデバイスの電気特性までを、シミュレーションできるソフトウェアである。本研究で用いたTCADシミュレータはHyENEXSS 5.5 [19]である。このシミュレータでSOIデバイスを仮想的に作り、センサー層内の電場構造を調査した。

6.1 XRPIX1b、デバイス構造

HyENEXSS 5.5は三次元の電場シミュレーションが可能であるが、シミュレーションの計算時間が非常に長くなるため、本研究では二次元でのシミュレーションを行った。前章の図5.18の最も検出効率の悪い場所を含むような読み出しノード間を、本シミュレーションで再現した。この範囲を図6.1上の赤線で示す。図の点A, Fが読み出しノード、B, EがBPWの端点、C, Dがピクセル回路の端点である。

作成したデバイス構造は、図6.2の模式図のようなものである。電位を固定する電極の範囲を赤線で表示している。 V_{back} はバックバイアス電圧、 V_{node1} 、 V_{node2} は読み出しノードの電位、 V_{circuit} はピクセル回路の電位である。点A-Fは、図6.1の位置と対応する。BPW直上のピクセル回路はセンサー層の電場構造に影響を与えないため省略した。

6.2 XRPIX1b、シミュレーション結果

センサー層が完全空乏するバックバイアス電圧値 $V_{\text{back}} = 200 \text{ V}$ 、読み出しノードの電位 $V_{\text{node1}} = V_{\text{node2}} = 0 \text{ V}$ 、ピクセル回路の電位 $V_{\text{circuit}} = 0 \text{ V}$ としたときの電場シミュレーション結果を図6.3に示す。点A-Fは、図6.1の位置と対応する。電場構造を見みると、BPWのあるAB間やEF間に向いている電場の他に、ピクセル回路直下のCD間に向いている電場が存在した。X線入射により発生した電荷は、このセンサー層内の電場に沿って移動するため、CD間に向いている電場の領域で作られた電荷はピクセル回路直下の領域まで運ばれることになる。センサー層とBOX層の界面から $50 \mu\text{m}$ 以降の電場はどの領域でも裏面から表面へと真直ぐ向いていた。

センサー層表面のCD間にまで運ばれた電荷はどうなるのであろうか？ 一般的には電子の熱運動などにより、緩やかに読み出しノードまで移動し、回収される。しかし、実験結果ではピクセル回路直下の領域で発生した電荷は失われていた。この理由は、センサー層表面付近の電位分布が解決へと導く。

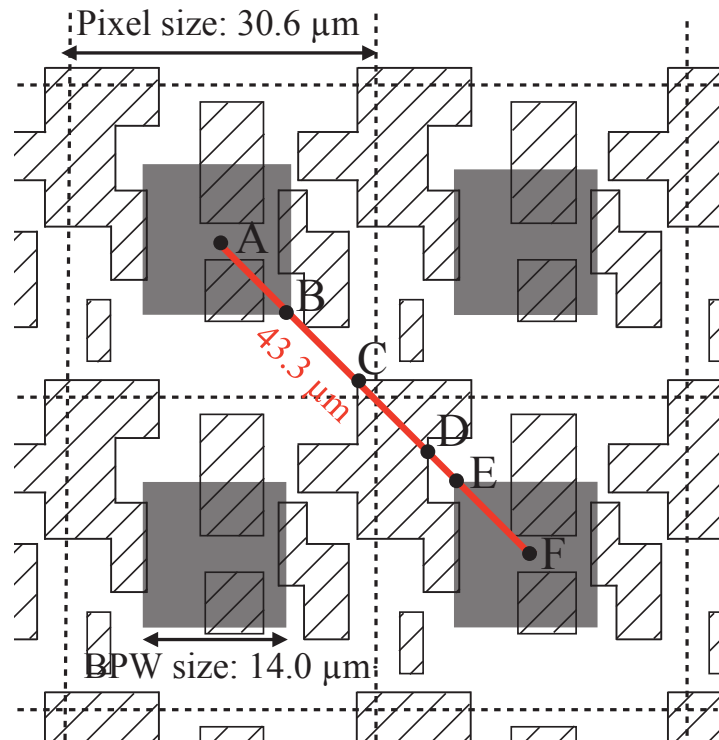


図 6.1: XRPIX1b のピクセル回路のレイアウト図。赤線はシミュレーションで再現した領域。位置 A, F が読み出しノード、B, E が BPW の端点、C, D がピクセル回路の端点である。

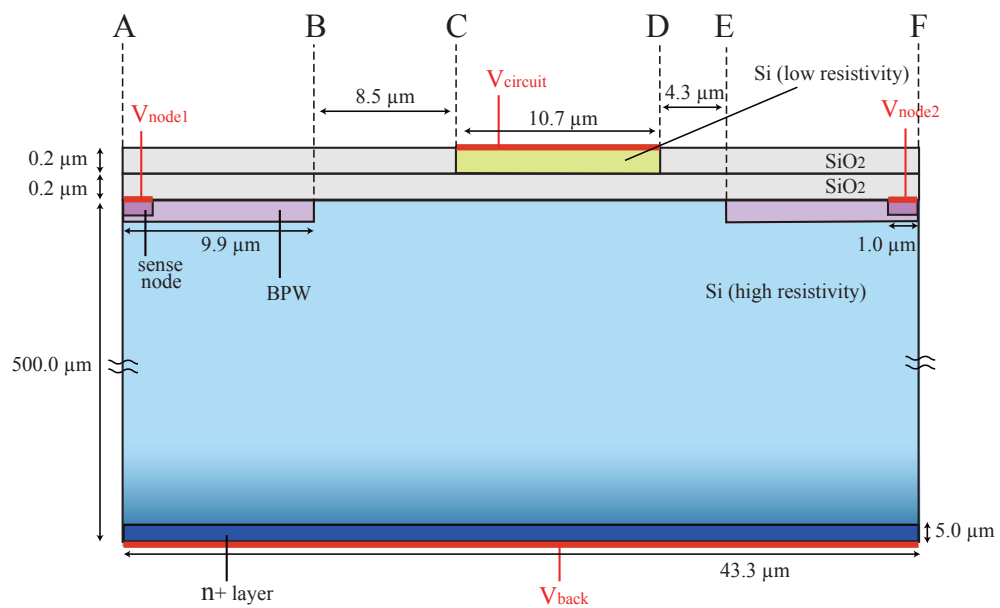


図 6.2: 電場シミュレーションのための XRPIX1b のデバイス構造。点 A-F は、図 6.1 の位置と対応する。電位を固定する電極の範囲を赤線で表示している。 V_{back} はバックバイアス電圧、 V_{node1} 、 V_{node2} は読み出しノードの固定電位、 $V_{circuit}$ はピクセル回路の電位に対応する。

図6.4は、センサー層表面付近の電位分布のシミュレーション結果である。点A-Fは、図6.1の位置と対応する。電位分布をみると、ピクセル回路があるCD間には凹みのような構造が見られた。この凹みの両端には、高さが約1.5 Vと0.5 Vの電位障壁が存在した。素子の裏面にかかっているバックバイアス電圧によって、電位が固定されていないBC間およびCD間の電位が引き上げられ、0 V固定されている各電極 (V_{node1} 、 V_{node2} 、 V_{circuit}) の影響が強いBPW (AB間、EF間) とピクセル回路の直下 (CD間) の領域よりも高い値となるからである。温度 -50°C での電子の熱運動のエネルギーは約0.02 eVであるので、このCD間の凹みに運ばれた電荷は電位障壁を超えることができず、その場所に捕われてしまう。ピクセル回路の影響によってできたセンサー層内の電場構造の凹み、および電位障壁が電荷収集効率を低下させる原因であった。

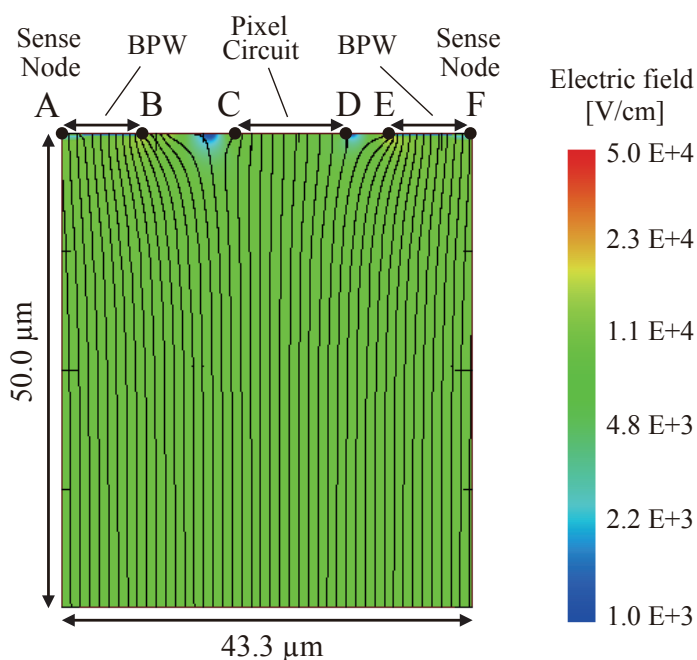


図 6.3: XRPIX1b の電場シミュレーション結果、センサー層内の電場構造。点 A-F は、図 6.1 の位置と対応する。

6.3 XRPIX1b、酸化膜中の電荷を含めたシミュレーション

6.3.1 酸化膜中の電荷

Si/SiO₂ 界面を持つ一般的な CMOS センサーでは酸化膜中の電荷が存在する。前節のシミュレーション結果は酸化膜中の電荷を考慮せずに求めたものであるため、これらがセンサー層内の電場にどのような影響を与えるのか調べた。酸化膜中の電荷には、固定電荷と捕獲電荷の二種類が存在する [16]。

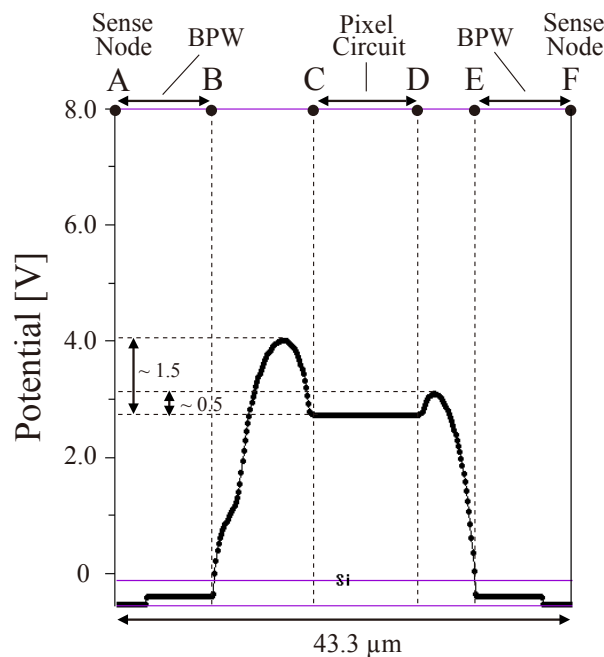


図 6.4: XRPIX1b の電場シミュレーション結果、センサー層表面付近の電位分布。点 A-F は、図 6.1 の位置と対応する。

固定電荷

一般的に正の電荷でウェハのプロセス時に生成され、酸化、アニールの条件、および結晶方位に依存する。酸化が停止されたとき、イオン化したシリコンの一部が Si/SiO₂ 界面に残るものと考えられている。センサー層と BOX 層から約 3 nm 以内の所に存在し、表面の電位が大きく変化しても充電されたり放電されたりすることはない。固定電荷はシート状の電荷と見なすことができ、注意深く作られたウェハでの個数密度は $1\text{--}5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ である。

捕獲電荷

X 線または高エネルギー電子の照射による電離で生成した正孔である。放射線の入射により、シリコン層と酸化膜層の両方の層で電離が置き、電子と正孔のペアができる。シリコン層で電離した電子と正孔は、スムーズに電極で回収される。一方で、酸化膜層で電離した電子と正孔については、電子は素早く回収される。しかし、正孔は酸化膜中に一部が捕獲されながら Si/SiO₂ 界面へとドリフトし、界面付近のシリコンからの電子のトンネリングにより相殺されるという過程をたどる。その結果、酸化膜層には正孔が残る。

6.3.2 酸化膜中の電荷を含めたシミュレーション

XRPIX のウェハのプロセス時に十分大きい固定電荷 $2.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ が発生したと仮定して、固定電荷を含む電場シミュレーションを行った。固定電荷は XRPIX の Si/SiO₂ 界面から 1–3 nm の層に一様に分布するとした。捕獲電荷が XRPIX に重大な影響を及ぼすのは X 線ビームの照射量が 150 krad 以上となったときである。X 線ビームの照射試験で素

子に照射した X 線は、3 krad 以下と十分少ないため、発生した捕獲電荷の影響は無視した [20]。

固定電荷を含めたシミュレーション結果を図 6.5 に示す。左図はセンサー層内の電場、右図はセンサー層表面付近の電位分布の結果である。

固定電荷有りの電場構造を見ると、BC 間および DE 間のセンサー層表面から $10\ \mu\text{m}$ までの範囲に電場が弱いスポットがそれぞれ存在した。固定電荷無しの際にはセンサー層表面に存在したこの電場の弱いスポットは、BOX 層の固定電荷による正電位の影響で移動したと思われる。このように、固定電荷の有無で電場構造には多少の変化が見られるが、固定電荷有りの場合でも依然としてピクセル回路直下へと向かう電場は存在する。つまり、ピクセル回路へと運ばれる電荷が存在すると言える。

次に、固定電荷有りのときの電位の分布を見ると、固定電荷無しの際の結果と同様に CD 間に凹みのような構造がある。この凹みをつくる両端の電位障壁の高度は、固定電荷の正電位の影響で左が $\sim 2.6\ \text{V}$ 、右が $\sim 1.2\ \text{V}$ と、固定電荷無しの際の結果よりも高い値となった。電場に沿って CD 間に運ばれた電荷は、この凹みからよりぬけられないこととなる。これらの結果から固定電荷の有無に関わらず、BPW から離れているピクセル回路直下のセンサー層表面に捕われる電荷が存在することが分かった。

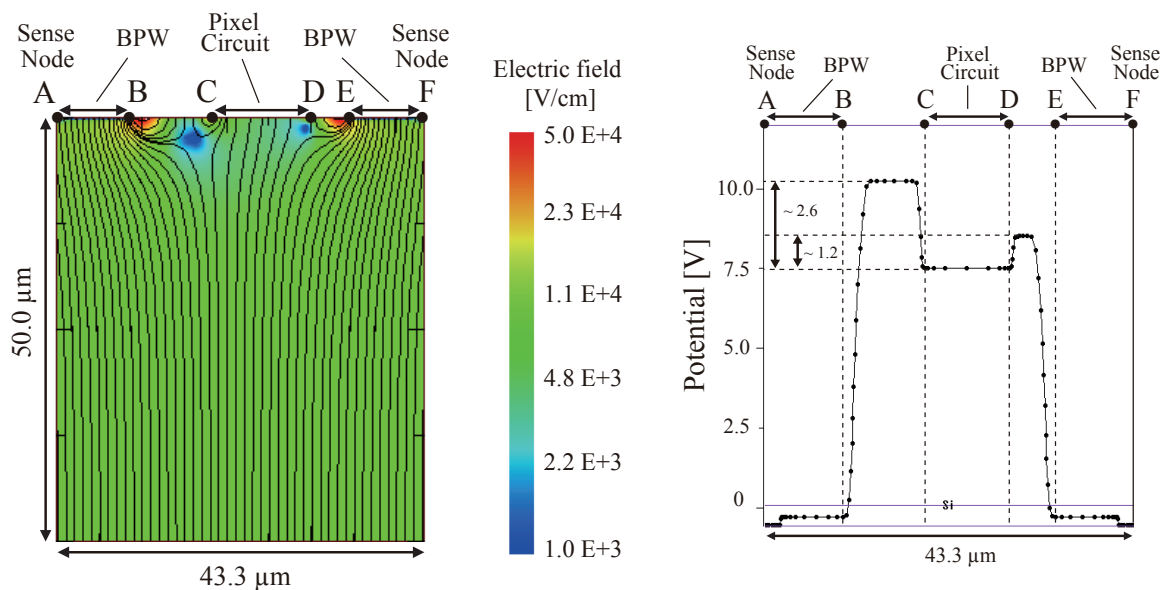


図 6.5: XRPIX1b、固定電荷を含めた電場シミュレーション結果。点 A-F は、図 6.1 の位置と対応する。

6.4 XRPIX1の電場構造

先行研究によるXRPIX1のエネルギースペクトル(図3.3)は、XRPIX1bのエネルギースペクトルで見られるようなピークシフト現象は見られないことから、電荷損失は起こっていないと思われる。XRPIX1とXRPIX1bとの違いは、BPWの大きさである。図6.6にXRPIX1のピクセル回路のレイアウトより、XRPIX1のピクセル回路(CD間)はBPWに接しているため、XRPIX1bとは異なる電場構造をしていると予想できる。図の位置A, Eが読み出しノード、B, DがBPWの端点、C, Dがピクセル回路の端点である。

AF間の範囲のシミュレーション結果を図6.7と図6.8に示す。それぞれ固定電荷無しと有りの結果である。読み出しノードおよびピクセル回路の電位は0V、バックバイアス電圧は100V(素子は完全空乏)としている。XRPIX1bの時と同様に固定電荷の有無に関わらず、ピクセル回路(CD間)へと向かう電場は存在している。しかし、センサー層内の表面付近の電位分布をみると、CD間の電位はBPW(DE間)へ向かってなだらかな勾配ができてきている。よって、XRPIX1bのときとは異なり、電場に沿ってピクセル回路へと運ばれた電荷もBPWへと向かい、読み出しノードから回収される。

以上の結果より、XRPIX1bの電荷収集効率の低下の原因はBPWのサイズを小さくしたために、ピクセル境界付近の回路によるセンサー層の電場構造への干渉が顕著になったことであった。

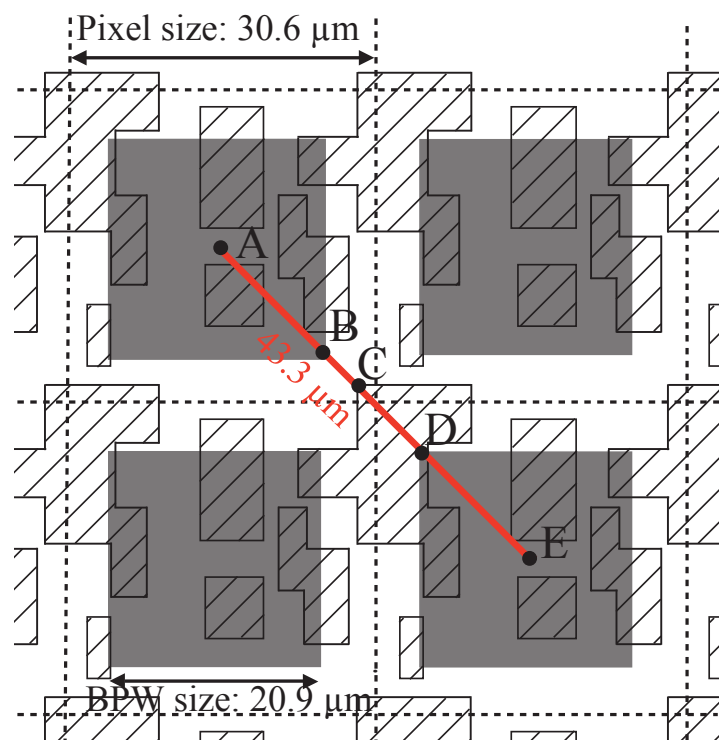


図 6.6: XRPIX1 のピクセル回路のレイアウト図。赤線はシミュレーションで再現した領域。位置 A, E が読み出しノード、B, D が BPW の端点、C, D がピクセル回路の端点である。

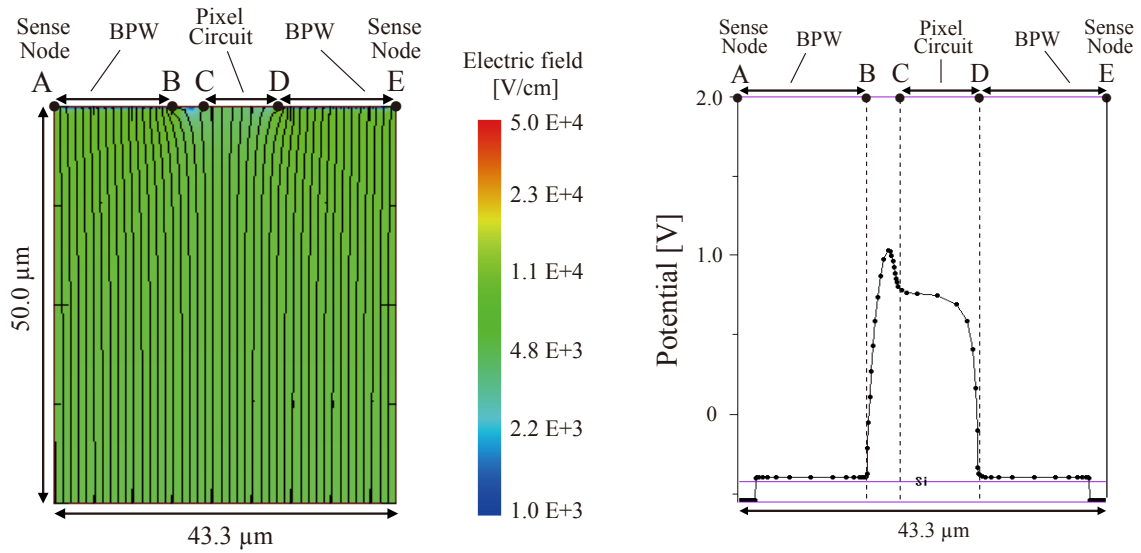


図 6.7: XRPIX1、固定電荷無しの電場シミュレーション結果。点 A-F は、図 6.6 の位置と対応する。

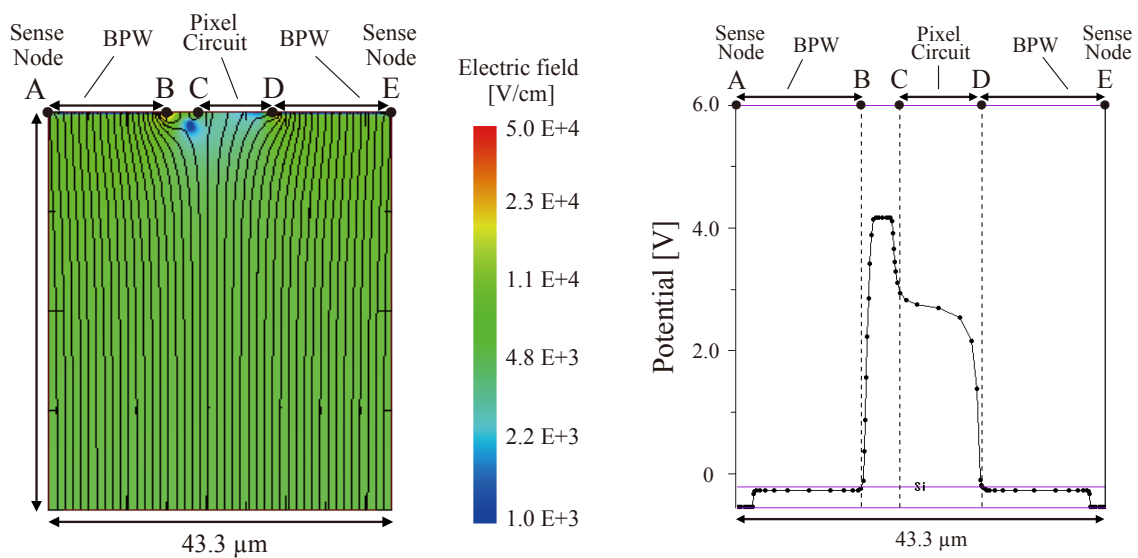


図 6.8: XRPIX1、固定電荷有りの電場シミュレーション結果。点 A-F は、図 6.6 の位置と対応する。

第7章 電場構造の改良による電荷収集効率の改善 (XRPIX2b)

7.1 電場構造の改善案

XRPIX1b の電荷収集効率の考察により、BPW から離れているピクセル回路がセンサー層内の電場構造を歪ませ、検出器の電荷収集効率を低下させていることが分かった。つまり、ピクセル回路が電場構造に影響を与えることを確認した。本来、この現象は素子にとって不利益なものでしかない。しかし、我々はこのピクセル回路の影響を逆に利用することで素子の電荷収集効率を良くする案を思いついた。

ピクセル回路の電位は電場を引きつけ、ピクセル回路直下の領域では遠い場所にある読み出しノードや BPW の電位よりも影響を及ぼす。だがこの影響は、「ピクセル回路を置く位置次第では、センサー層内の電場構造をコントロールすることが可能である」と良いように捉えることもできる。ピクセル回路を BPW に沿うように配置することで、電場が読み出しノードと BPW へと向かうように矯正することが期待できる (図 7.1)。我々はこのようなピクセル回路の配置を持つ素子 XRPIX2b で電荷収集効率が改善していることを実証した。

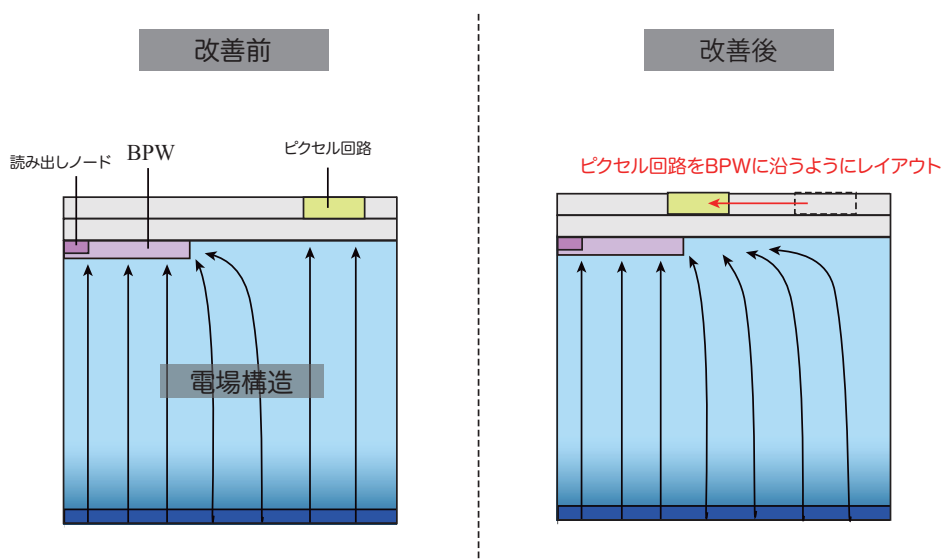


図 7.1: 電場構造を矯正するためのピクセルレイアウト案。改善後の電場は BPW および読み出しノードへと向かうことが期待できる。

7.2 XRPIX2b の概要

XRPIX2b はピクセルレイアウトを XRPIX1b から変更した素子である (図 7.2)。ピクセルサイズは、 $30.0\ \mu\text{m}$ 角と XRPIX1、XRPIX1b とほとんど同じであるのに対し、BPW のサイズは $12.0\ \mu\text{m}$ 角と前の素子よりも小さくした。フォーマットは 152×152 ピクセル、素子のサイズは $6.0\ \text{mm}$ 角と、大面積化した素子である。図 7.3 にピクセル回路のレイアウト図 (左) とその模式図 (右) を示す。ピクセル回路は BPW に隣接するように設計している。

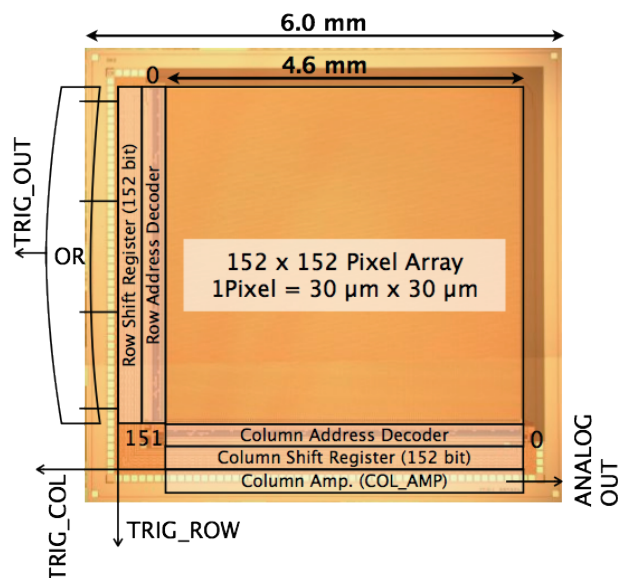


図 7.2: XRPIX2b の顕微鏡で撮影した素子部の拡大写真。

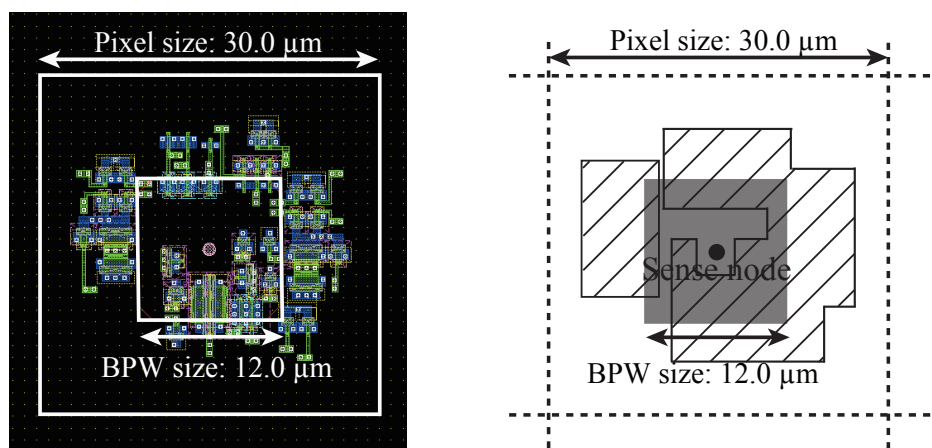


図 7.3: 左図は XRPIX2b のピクセル回路のレイアウト図。トランジスタを青色、ポリシリコン配線を緑色で表示している。右図は、ピクセル回路の模式図。トランジスタとポリシリコンをまとめて斜線部で表示。

7.3 XRPIX2b の電場シミュレーション

XRPIX2b で、前章と同様の電場シミュレーションを行った。シミュレーションで再現した領域、および用いたデバイス構造については図 7.4 に示す。図の位置 A, F が読み出しノード、B, E が BPW の端点、C, D がピクセル回路の端点である。右図のデバイス構造では電位を固定する電極の範囲を赤線で表示している。 V_{back} はバックバイアス電圧、 V_{node1} 、 V_{node2} は読み出しノードの固定電位、 $V_{circuit1}$ 、 $V_{circuit2}$ はピクセル回路の電位に対応する。

バックバイアス電圧値 $V_{back} = 200 \text{ V}$ ($500 \mu\text{m}$ のセンサー層が完全空乏)、読み出しノードの電位 $V_{node1} = V_{node2} = 0 \text{ V}$ 、ピクセル回路の電位 $V_{circuit} = 0 \text{ V}$ としたときの電場シミュレーション結果を図 7.5 と図 7.6 に示す。図 7.5 は固定電荷なしのとき、図 7.6 は固定電荷有りのときのシミュレーション結果である。

固定電荷の有無に関わらず、電場は読み出しノードおよび BPW へと向かっていた。さらにセンサー層表面付近の電位分布より、読み出しノードへと向かう勾配ができているため、電荷が回収できる電場構造へと改善されていると予想できる。これらの結果から、XRPIX2b では電荷収集効率の向上が期待される。

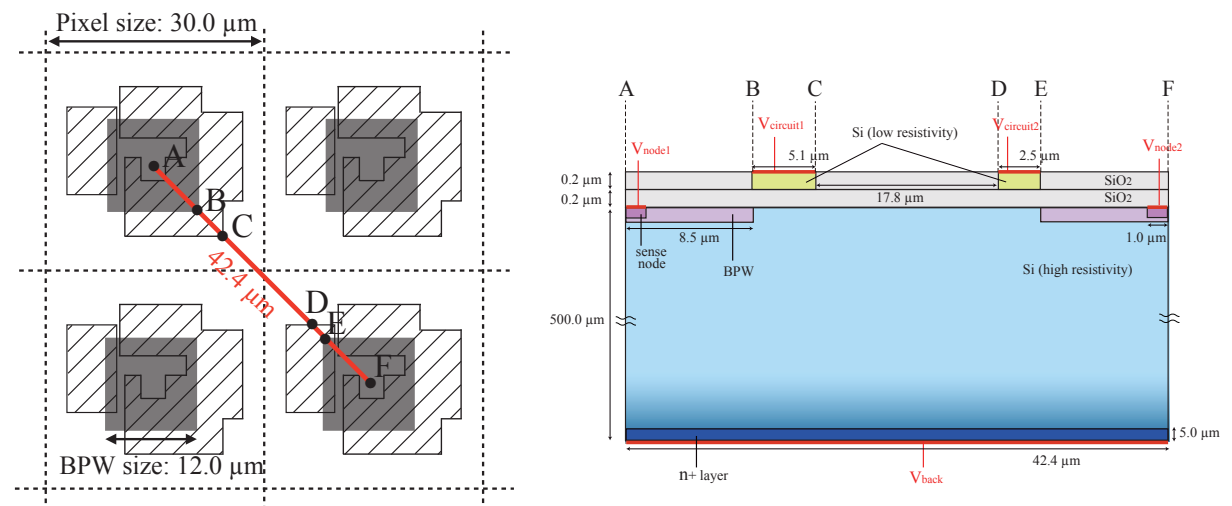


図 7.4: (左) 電場シミュレーションで再現した領域と、(右) 用いたデバイス構造。図の位置 A, F が読み出しノード、B, E が BPW の端点、C, D がピクセル回路の端点である。右図のデバイス構造では電位を固定する電極の範囲を赤線で表示している。 V_{back} はバックバイアス電圧、 V_{node1} 、 V_{node2} は読み出しノードの固定電位、 $V_{circuit1}$ 、 $V_{circuit2}$ はピクセル回路の電位に対応する。

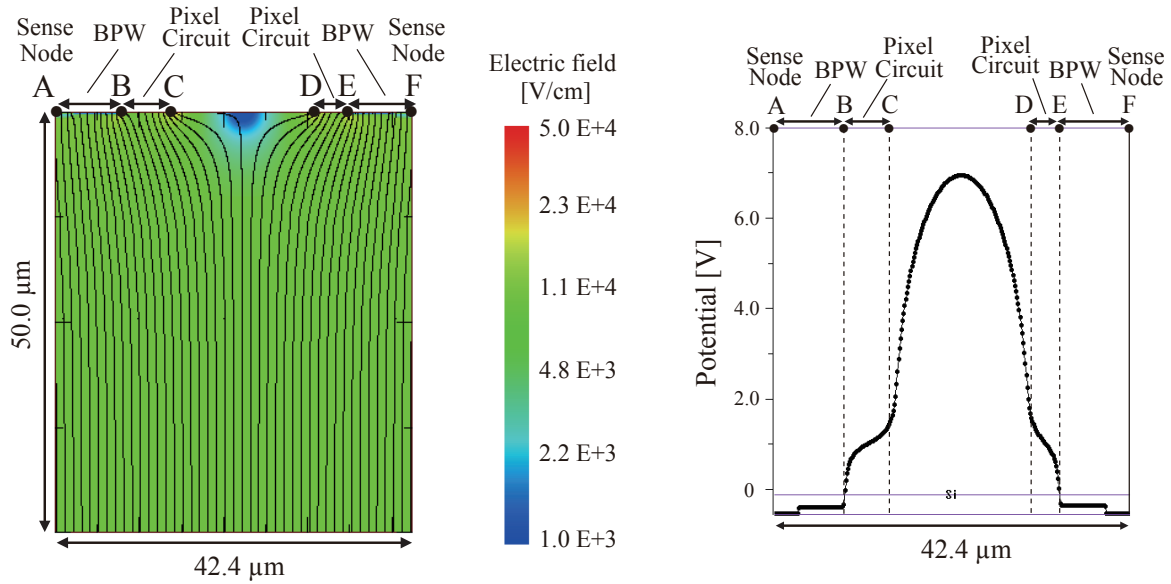


図 7.5: 固定電荷無しの電場シミュレーション結果。点 A-F は、図 7.4 の位置と対応する。

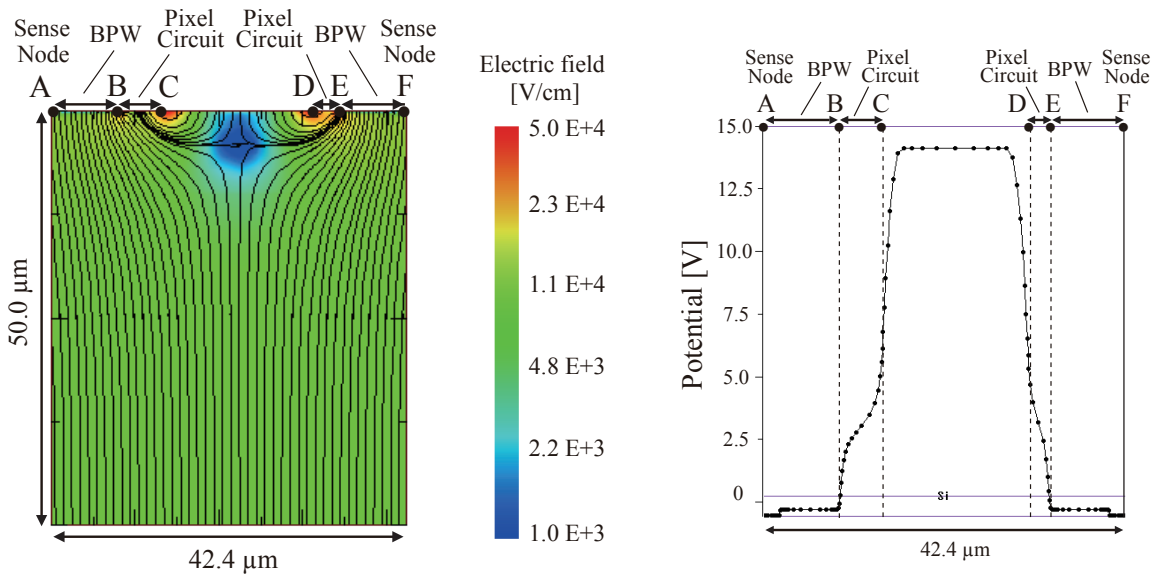


図 7.6: 固定電荷有りの電場シミュレーション結果。点 A-F は、図 7.4 の位置と対応する。

7.4 X線照射試験

線源として ^{241}Am を用いての XRPIX2b の X 線照射試験を行った。試験にはセンサー層厚が $500\ \mu\text{m}$ の XRPIX2b-FZ を用いた。実験のセットアップは用いた素子とサブボードの違いを除いて 4 章と同様であり、データの読み出しは全面読み出し法で行った。バックバイアス電圧値は $200\ \text{V}$ と素子が完全空乏するまで印可し、冷却時 ($-50\ ^\circ\text{C}$) のデータを取得した。

取得したエネルギースペクトルを図 7.7 に示す。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベントのスペクトルである。シングルピクセルイベントだけでなく、ダブルピクセルイベントのスペクトルでも、 ^{241}Am の $13.9\ \text{keV}$ 、 $17.7\ \text{keV}$ 、 $20.8\ \text{keV}$ の 3 本の輝線が確認できた。ダブルピクセルイベントのスペクトルの輝線は、シングルピクセルイベントのものとは比べて太いが、この原因はピクセル回路由来の読み出しノイズを 2 ピクセル分足し合わせているからである。XRPIX1b で取得したスペクトル (図 4.12) で見られたピークシフト現象は起きていないことから、電荷収集効率の改善に成功したと言える。

シングルピクセルイベントの各輝線をガウシアンでフィットし、エネルギー較正をして素子のゲインを求めると $(6.68 \pm 0.02)\ \mu\text{V}/e^-$ であった。ガウシアンでのフィッティング結果を表 7.1 に示す。このゲインの値から式 (4.5) を用いて検出部の寄生容量を求めると、 $20.9\ \text{fF}$ であった。また、 $13.9\ \text{keV}$ の輝線からエネルギー分解能を求めると、 $(6.9 \pm 0.1)\% \text{FWHM}$ @ $13.9\ \text{keV}$ であった。

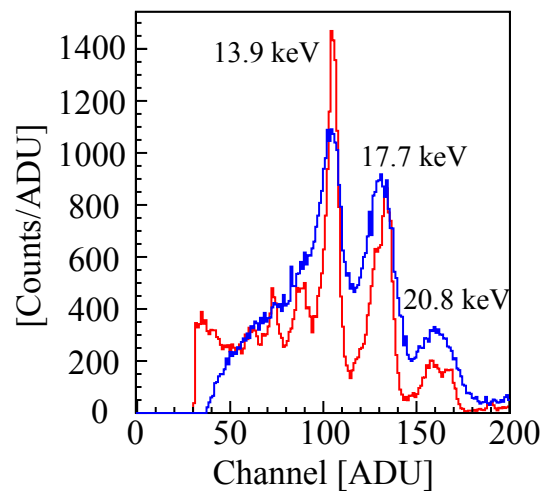


図 7.7: XRPIX2b で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。赤線はシングルピクセルイベント、青線はダブルピクセルイベントのエネルギースペクトル。

表 7.1: XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am の輝線のガウシアンフィットの結果。

輝線のエネルギー [keV]	9.7	11.4	13.9	17.7	20.8
中心値 [ADU]	73.43 ± 0.16	88.41 ± 0.19	105.0 ± 0.04	133.8 ± 0.12	158.8 ± 0.33
標準偏差 [ADU]	4.19 ± 0.30	6.01 ± 0.45	3.08 ± 0.04	3.37 ± 0.10	5.94 ± 0.39

第8章 まとめ

本研究は、次世代の広視野広帯域観測装置の開発を目標に、その撮像検出器である XRPIX の電荷収集効率の問題の原因追及から改善までを行った。

X 線天文用 SOIPIX の二号機である XRPIX1b での電荷損失の問題の発見を皮切りに、ビーム照射試験と電場シミュレーションの結果から分かったことは、

- XRPIX1b には、電荷収集効率および検出効率が低い場所がピクセルサイズの間隔で存在した。これらの場所では電荷損失が起こっていた。
- ピクセル回路は素子の電場構造に影響を及ぼしていた。BPW から離れた位置にあるピクセル回路は電場を引きつけ、素子の電場構造を大きく歪ます。
- BPW から離れたピクセル回路直下の領域の電位は凹みのような分布をしている。信号電荷は、この凹みの電位障壁を越えることができず、その場所に捕われてしまい、電荷損失となる。

ということである。しかし我々は、本来は不利益なものでしかないピクセル回路の電場構造への影響を逆手に取って、素子の電荷収集効率を改善させる案を思いついた。それは、ピクセル回路のレイアウトを調整することで、素子の電場構造を理想の形にコントロールするということである。

XRPIX2b はこの改善案通りのピクセル回路レイアウトを持つ素子である。ピクセル回路は BPW に沿うような配置であり、どの領域の電場も読み出しノードに向かうことが期待できる。

X 線照射試験の結果、電荷損失を起こらず、電荷収集効率の改善とエネルギー分解能の向上に成功した。電荷損失が起こらないことから、XRPIX2b の電場構造は改善したと言える。XRPIX2b の性能は以前の素子 XRPIX1 や XRPIX1b よりも素子のゲインやエネルギー分解能が良いことを確認した。

XRPIX シリーズの各素子の性能を表 8.1 にまとめる。XRPIX は改良を重ねることによって、着実に性能を向上させている。

表 8.1: XRPIX シリーズの各素子の性能。

素子名	XRPIX1-FZ	XRPIX1b-FZ	XRPIX2b-FZ
試験時のバックバイアス電圧値 [V]	20	200	200
素子のゲイン [$\mu\text{V}/e^-$]	3.60	5.86	6.68
検出部の寄生容量 [fF]	37.3	23.9	20.9
エネルギー分解能 (@ 13.9 keV)	8.8%FWHM	8.2%FWHM	6.9%FWHM

付録A XRPIXのピクセル回路、CDS機能付き読み出し部の動作

CDS機能の動作について説明する。

- (i) トリガー機能用のRST_CDS_VTHはあらかじめオフにしている。RST_PD_VRSTとRST_CDS_VRSTをオンにして、NSensとN02の電圧をそれぞれ、VB_PD_RSTとVB_CDS_RSTに固定する(これをリセットと呼ぶ)。またソースフォロア(SF1、SF2)を介しているN01とN03の電圧はそれぞれオフセットであるV_SF1とV_SF2が足されたものである。
- (ii) RST_PD_VRSTをオフにする。このとき発生したkT/Cノイズ(V_N1)が電圧としてNSensとN01に加わる。
- (iii) RST_CDS_VRSTをオフにする。このとき発生したkT/Cノイズ(V_N2)が電圧としてN02とN03に加わる。
- (iv) 信号(V_SIG)が入ると、CDSキャパシタにかかる電圧が保持されるようにN02が変化する。つまり、NSensからN03までの全てにV_SIGが加わる。最終的に取り出す信号はN03にかかる電圧である。

CDS機能によりCDSキャパシタを挟んだ前後でkT/CノイズがV_N1からV_N2へ置き換わったことが分かる。V_N1の大きさは検出部の容量、V_N2の大きさはCDSキャパシタの容量に依存することから、検出部の容量よりも十分大きな容量のCDSキャパシタを用いることで、信号へのkT/Cノイズの影響を大きく低減させることが可能となる。

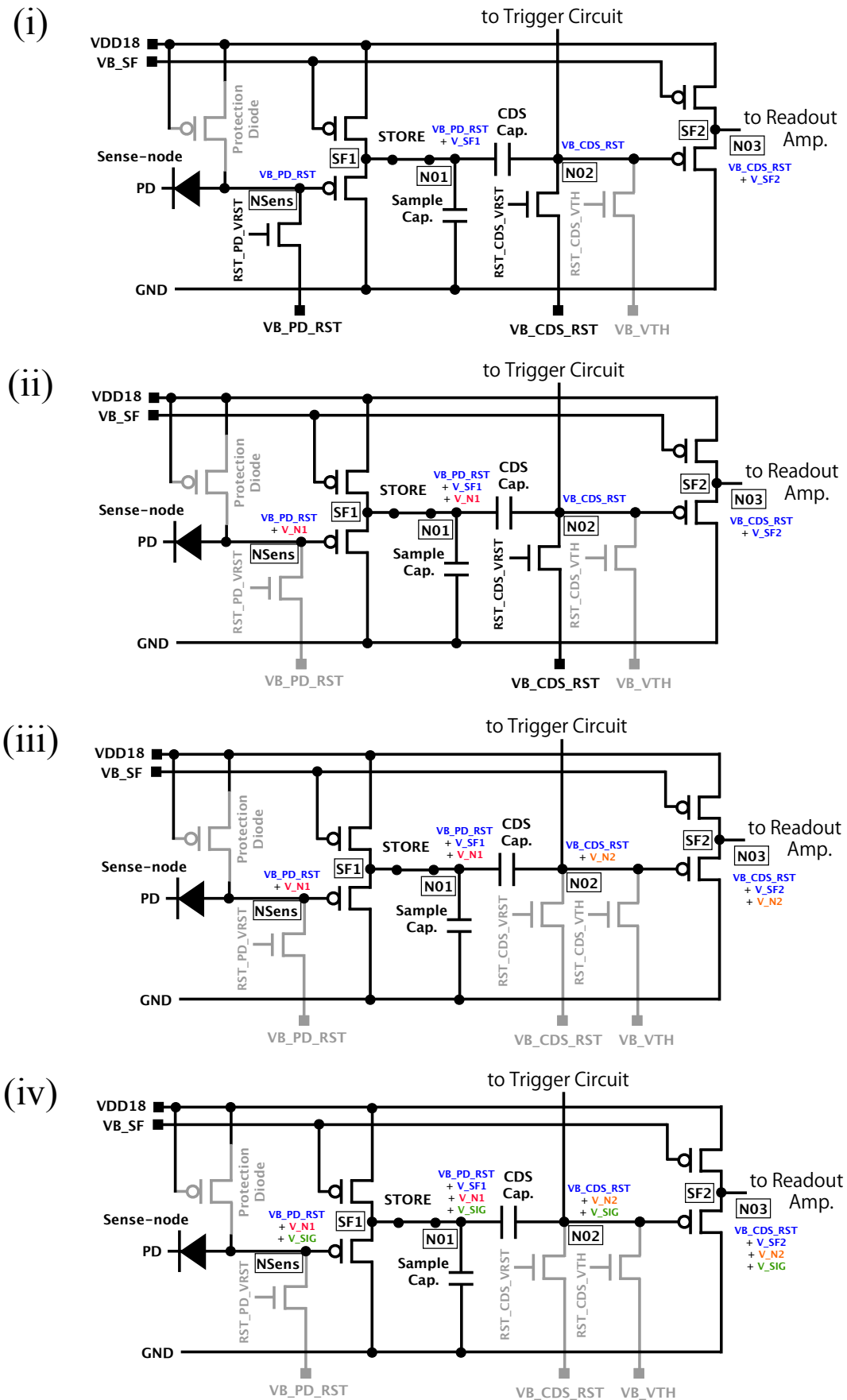


図 A.1: CDS 機能の動作。各端子の電圧を NSens、N01、N02、N03 で表している。

付録B XRPIXのピクセル回路、トリガー部の動作

XRPIXのトリガー回路は2つの反転増幅器で構成され(インバーターチョッパ型コンパレータ)、その動作は以下ようになる(図B.1)。

- (i) RST_CDS_VRST、RST_COMP1、RST_COMP2をオンにして、リセットを行う。このとき、RST_CDS_VTHはオンとなっている。このとき、N10とN11は一つ目のコンパレータの動作電圧であるVRST_COMP1となり、N12とN13には二つ目のコンパレータの動作電圧であるVRST_COMP2となる。
- (ii) RST_CDS_VTHをオフにした後に、RST_COMP1をオフにする。リセットノイズV_N1が発生する。コンパレータの後段のN11では、V_N1がA1に増幅されてかかる。
- (iii) RST_COMP2をオフにする。リセットノイズV_N1がコンパレータ間のCOMPキャパシタ2によってキャンセルされ、代わりにリセット電圧V_N2が発生する。二つ目のコンパレータの後段のN13では、V_N2がA2に増幅されてかかる。
- (iv) RST_CDS_VRSTをオンにする。入力側電圧N02はVB_CDS_RSTになる。一つ目のコンパレータの前段にあるCOMPキャパシタ1によって電圧が保持され、N10には $-(VB_VTH - VB_CDS_RST)$ が加算される。また出力側N13の電圧は

$$VRST_COMP2 + V_N2 \times A2 - (VB_VTH - VB_CDS_RST) \times A1 \times A2$$

となるが、 $A2 (=A1)$ が十分大きければ前の二項を無視することができ、実質の電圧値は、 $-(VB_VTH - VB_CDS_RST) \times A1 \times A2$ となる。 $VB_VTH - VB_CDS_RST$ が比較の基準電圧となる。

- (v) 信号(V_SIG)が入ると、入力側N02は、 $VB_CDS_RST + V_SIG$ 、出力側は実質、

$$\{V_SIG - (VB_VTH - VB_CDS_RST)\} \times A1 \times A2$$

となる。したがって、

$$V_SIG > (VB_VTH - VB_CDS_RST) \text{ ならば HI}$$

$$V_SIG < (VB_VTH - VB_CDS_RST) \text{ ならば LOW}$$

と判定される。

このようにアナログ信号がデジタル信号に変換されていることが分かる。ユーザーは、 VB_VTH 、 VB_CDS_RST を適当な値に設定することで、任意の基準電圧を決めることができる。

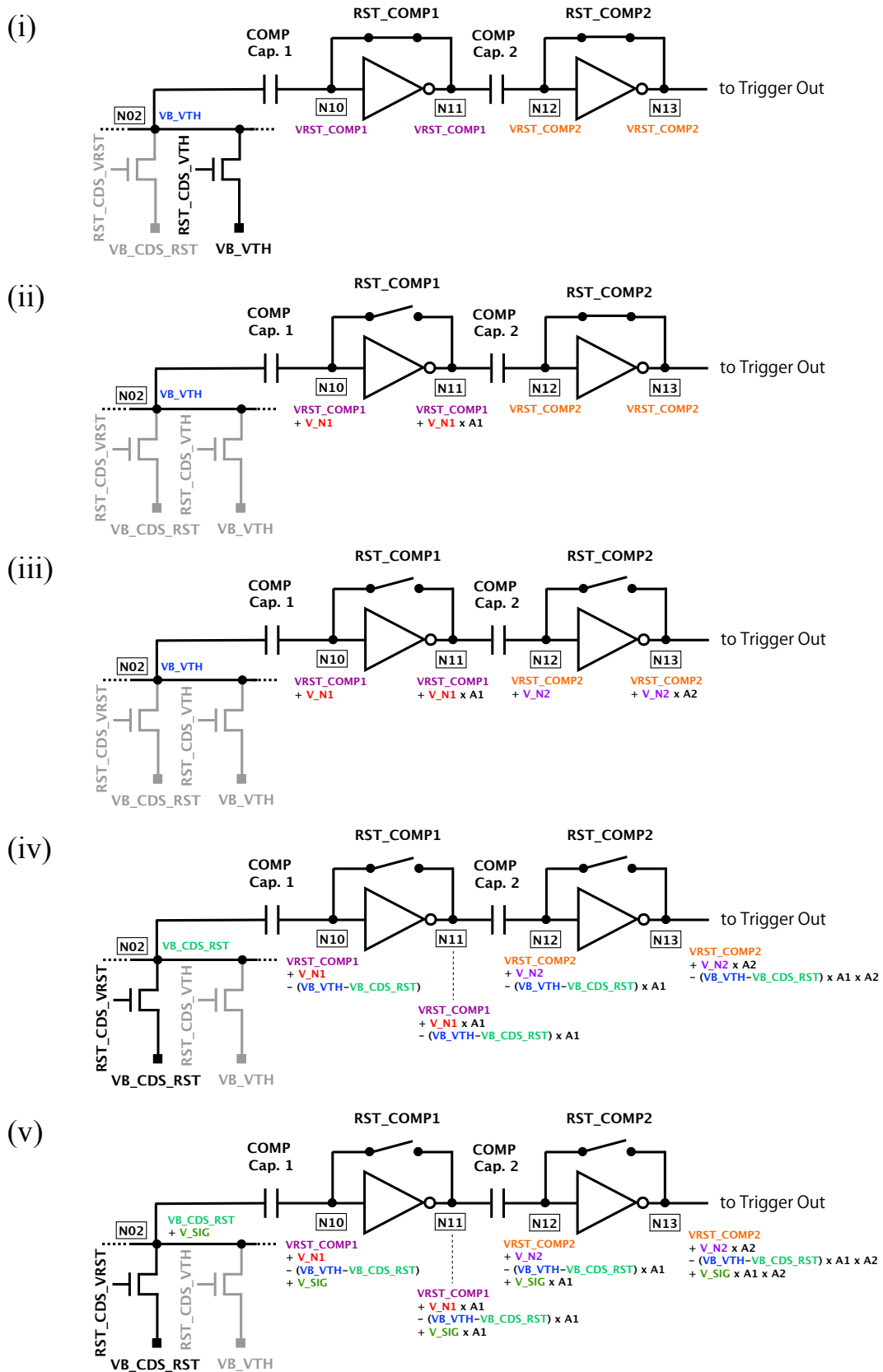


図 B.1: トリガー機能の動作。各端子の電圧を NSens、N02、N10、N11、N12、N13 で表している。

付録C データ取得用ソフトウェア、DAQ

Data Acquisition system (DAQ) ソフトウェアは ROOT ライブラリ (C++) の GUI をベースに開発したものであり、イーサネットを通じて SEABAS ボードと通信するようになっている。積分時間や取得フレーム数などの制御信号を設定すると同時に、送られてくるデータをファイルに格納する。1 フレームの画像とスペクトル、およびあらかじめ指定したピクセルのフレームと出力の関係が数秒毎に画面に表示され、素子が正常に動作しているか確認ができるようになっている。実際の画面を図 C.1 に示し、各領域の説明を以下に記す。

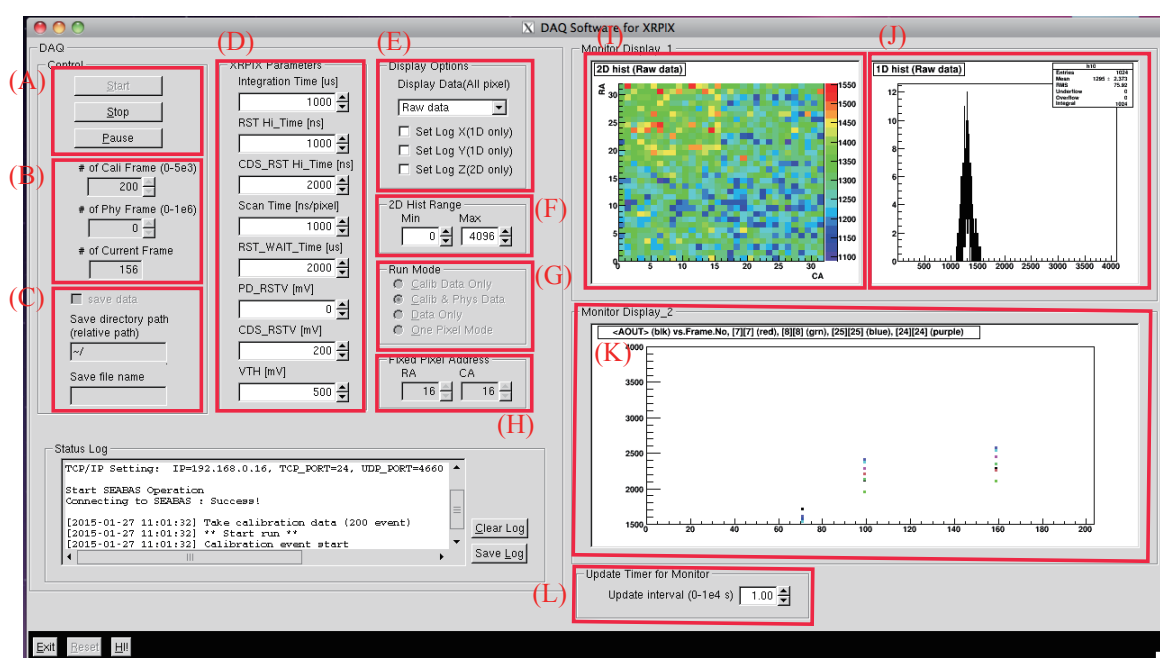


図 C.1: DAQ ソフトウェア。

- (A) DAQのスタート、ストップ、一時停止
- (B) カットするフレーム数、取得するフレーム数の設定および現在のフレーム数
- (C) データの保存の設定
- (D) 各種制御パラメータの設定 (表 C.1 参照)
- (E) グラフの表示モード
- (F) 2D ヒストグラムのレンジの設定
- (G) データの取得モードの設定
- (H) ピクセルの指定 (1 ピクセル読み出しモード指定時のみ有効)
- (I) 2D ヒストグラムのイメージ
- (J) 1D ヒストグラムのイメージ
- (K) あらかじめ指定したフレームと出力の関係
- (L) 画面更新の間隔の指定

本研究では、このDAQソフトウェアを用いてデータを取得し、その後ROOTを用いて詳しいデータ解析を行っている。

表 C.1: DAQの各種制御パラメータ。

各パラメータ	本研究の使用値	説明
Integration Time [μsec]	1000	1 フレームの積分時間
RST Hi_Time [nsec]	1000	ノード部のリセット信号がONとなる時間
CDS_RST Hi_Time [nsec]	2000	CDS 部のリセット信号がONとなる時間
Scan Time [nsec/pixel]	1000	1 ピクセルあたりのスキャン時間
RST_WAIT_Time [μsec]	—	使用していない
PD_RSTV [mV]	0	ノード部のリセット電圧
CDS_RSTV [mV]	200	CDS 部のリセット電圧
VTH [mV]	500	トリガー基準電圧のリセット電圧

謝辞

本論文は多くの方の御指導、御支援により完成しました。指導教官である鶴先生には、研究や実験の方針や進め方、実験結果の考察など、論理立て様々なご指導いただきました。特に、発表の論理の立て方のご教授には、非常に感銘を受けました。助教の田中さんには、本研究の X 線検出の基礎的なことから英語の読み方に至るまで様々な指導をしていただきました。助教の内田さん、特定助教の信川さんには、X 線天文学の面白さを教えていただき、実験を進める上で大きなモチベーションとなりました。研究員の武田さんには、私の些細な質問であってもいつも笑顔で答えていただきました。X 線グループの先輩である中島さん、河畠さんには私が学部生のときから検出器の面白さを教えていただきました。先輩方のお力添え無しには、本研究を成し遂げられませんでした。

また、KEK の新井先生、三好さん、SPring-8 の初井さんをはじめとした SOIPIX グループの皆様には実験や TCAD シミュレーションの環境整備をはじめ、実験データの解析方法や考察などアドバイスをたくさんいただきました。Spring-8 の香村さん、亀島さん、武井さんにはビーム照射試験の間、非常にお世話になりました。

同輩、後輩、ガンマ線グループの皆様とは、よく食事に行ったり、飲みに行ったりしました。皆様と意味の無い会話をするときが最も心休まりました。このような機会がなければ、面倒な現実から逃避していました。

最後に、御世話になりました全ての皆様に心より感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 井上一, 小山勝二, 高橋忠幸, 水本好彦 編, 「宇宙の観測 III 高エネルギー天文学」 日本評論社.
- [2] R. W. Klebesadel, I. B. Strong, & R. A. Olson 1973, ApJL, 182, L85.
- [3] A. Panaitescu, & P. Kumar 2001, ApJL, 560, L49.
- [4] A. M. Soderberg et al. 2008, Nature, Vol 454, Issue 7201, pp. 246.
- [5] BAT User 's Guide v6.3, <http://swift.gsfc.nasa.gov/analysis/>
- [6] IBIS Analysis User Manual, <http://glastweb.pg.infn.it/school2006/docs/>
- [7] K. Koyama 2007, PASJ, 59, S22.
- [8] T. G. Tsuru et al. 2014, SPIE, doi: 10.1117/12.2057158/
- [9] Y. Arai et al. 2010, NIM A, doi:10.1016/j.nima.2010.04.081
- [10] M. Bruel. U. S. Patent 5, 374, 564. 1994-12-20.
- [11] G. F. Knoll 著/ 木村逸郎, 阪井英次 訳, 「放射線計測ハンドブック」 日刊工業新聞社.
- [12] Y. Arai et al. 2011, NIM A, 636, S31.
- [13] 劉周強. 京都大学, 2010, 修士論文.
- [14] 中島真也. 京都大学, 2011, 修士論文.
- [15] T. Uchida. 2008, IEEE TRANSACTION ON NUCLEAR SCIENCE. 55, 1631.
- [16] S. M. Gee 著/ 南日康夫, 川辺光央, 長谷川文夫 訳, 「SEMICONDUCTOR DEVICES *Physics and Technology*」 産業図書.
- [17] SPring-8 BL29XUK, http://www.spring8.or.jp/wkg/BL29XU/instrument/lang/INS-0000000511/instrument_summary_view/
- [18] Hatsui private communication 2013.
- [19] 3D TCAD Simulator HyENEXSS, Developed by Selete. Semiconductor Leading Edge Technologies Inc.
- [20] T. Kameshima et al. 2014, Review of Scientific Instruments, 85, 033110.

