

CMOS イメージセンサを用いた超小型 X 線偏光計の開発

The development of an ultra-compact X-ray polarimeter
using a CMOS imaging sensor

東京大学大学院
理学系研究科 物理学専攻
馬場研究室

畠内康輔

令和3年1月6日

概要

X線天文学はこれまで熱く激しい、宇宙の高エネルギー現象に関する知見を我々にもたらしてきた。その未開拓領域の1つである偏光情報から期待されるサイエンスは非常に大きく、高エネルギー天体の幾何構造や磁場構造の解明に不可欠な情報を提供する。しかし近年偏光X線検出器の発展を見るまで、ほとんど観測は行われてこなかった。我々は低ノイズかつ $2.5\ \mu\text{m}$ の微小ピクセルサイズを持つCMOSイメージセンサを用い、超小型偏光計を開発している。さらにこれを符号化開口による撮像系やCubeSatと組み合わせる事で、低コストで早期の偏光撮像実現を目指す。プロジェクト実現に向け、数多くの問題が残されているが、特に解析に用いるイベント統計の向上が課題であった。

本修論では、超小型衛星での偏光撮像実現に向け、まず小型のデータ取得系を新規開発し、新たなDAQ系を用いてセンサの基礎特性を評価した。次にSPring-8でのシンクロトン放射光を用いた偏光測定評価実験と偏光撮像実験を行った。偏光測定実験では空乏層厚の異なる2種類のセンサを用いて、検出器のモジュレーションファクタやエネルギー分解能、検出効率等を比較した。偏光撮像実験では符号化開口マスクを用いて偏光と撮像の同時測定を行い、プロジェクトのコンセプトが実現可能かどうかを確かめた。従来までの手法を用いてこれらの実験データを解析した他、これまでの偏光観測では用いられてこなかった3ピクセル以上のX線イベントに対して機械学習を用いた偏光方向推定手法の評価を行った。シミュレーションデータと実際の偏光実験データで、簡単な物理モデルを仮定した従来までの手法と比較し、その評価を行った。その結果、空乏層の厚いセンサでも偏光測定能力があることを確認した他、機械学習を用いることでこれまで解析できなかったイベントに対しての偏光解析が行えるようになり、結果として偏光解析に用いるイベントの統計量に関して、24 keVで30倍以上と大幅な改善を実現した。

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	X 線の偏光と検出	3
2.1	偏光 X 線とその放射メカニズム	3
2.1.1	偏光と偏光度	3
2.1.2	双極子放射	3
2.1.3	制動放射	4
2.1.4	シンクロトロン放射	4
2.1.5	逆コンプトン散乱	5
2.2	偏光から得られる天体の情報	5
2.3	X 線の検出	6
2.3.1	光電効果	6
2.3.2	コンプトン散乱	7
2.3.3	電子陽電子対生成	7
2.4	偏光 X 線検出器	7
2.4.1	ガス検出器	7
2.4.2	半導体検出器	8
2.4.3	ブラッグ反射を用いた偏光計	8
2.5	CMOS イメージセンサの動作原理	8
2.5.1	半導体検出器の原理	9
2.5.2	MOS 構造	9
2.5.3	MOSFET	10
2.5.4	CMOS	10
2.5.5	CMOS イメージセンサの天文学への利用	10
第 3 章	新規開発したセンサボードを用いた様々な CMOS センサの特性評価実験	12
3.1	データ読み出し系	12
3.2	実験に使用するセンサ	12
3.3	検出器の特性評価実験：データ取得	13
3.3.1	実験セットアップ	15
3.4	検出器の特性評価実験：ダークのペDESTAL 評価	15
3.4.1	ペDESTAL の波高値分布	15
3.4.2	ペDESTAL peak 成分の空間分布	16
3.4.3	センサ毎のペDESTAL 分布の比較	17
3.5	検出器の特性評価実験：ダーク波高値の揺らぎ	17
3.5.1	ダーク波高値の不偏標準偏差の評価	17
3.5.2	センサ毎のダーク波高値不偏標準偏差分布の比較	20

3.6	検出器の特性評価実験：X線応答解析	20
3.6.1	X線解析の流れ	20
3.6.2	ゲイン関数	22
3.7	センサ毎の評価とまとめ	25
第4章	ビームラインを使用した偏光X線照射実験	26
4.1	SPring-8 実験概要	26
4.2	電気系	26
4.3	符号化開口マスクと実験セットアップ	28
4.4	データ取得	31
4.5	符号化開口を用いて取得したイベントデータ	33
第5章	ダブルイベントを用いた偏光解析	35
5.1	偏光検出方法の検討	35
5.2	偏光検出性能の評価	35
5.2.1	X線イベント解析：グッドピクセル選別	36
5.2.2	X線イベント解析：スプリッドスレシヨルドの最適化	36
5.2.3	データリダクション後のエネルギースペクトル	40
5.2.4	ダブルピクセルイベントの抽出	41
5.2.5	検出器モジュレーションの決定	43
5.3	3つのセンサーの差異	46
5.3.1	モジュレーションファクタ	46
5.3.2	エネルギー分解能	46
5.3.3	検出効率	48
5.4	まとめ	50
第6章	ニューラルネットワークを用いた偏光解析	51
6.1	3ピクセル以上のイベントでの偏光解析の重要性	51
6.2	機械学習を用いた光電子放出角推定	51
6.2.1	シミュレーションを用いたデータセット作成の手法	53
6.2.2	ニューラルネットワークを用いたモデル作成手法	54
6.2.3	実際の学習プロセス	56
6.2.4	シミュレーションによるニューラルネットワークの構築	56
6.2.5	シミュレーションデータに対するニューラルネットワークを用いたモジュレーションの取得	58
6.3	従来までの解析手法との比較	58
6.3.1	従来までの手法	61
6.3.2	シミュレーションデータを用いたニューラルネットワークによる解析と従来までの解析の比較	63
6.3.3	ビーム実験イベントを用いたニューラルネットワーク偏光解析手法の評価	63
6.4	今後の展望	64
第7章	結論	68

付録 A センサ毎のペDESTAL、不偏標準偏差分布 (本文不掲載分)	70
A.1 ペDESTAL分布と不偏標準偏差分布	70
付録 B SPring-8 実験で取得されたスペクトルと weight 分布 (本文不掲載分)	73
付録 C SPring-8 実験で取得された ビームデータのモジュレーションカーブ (本文不掲載分)	76
付録 D 偏光撮像実験でステージを動かしながら取得したイメージ (速報)	78

目次

2.1	双極子放射イメージ	4
2.2	電子静止計における逆コンプトン散乱のイメージ	5
2.3	入射光子エネルギーと Si の (巨視的な) 相互作用反応断面積	6
2.4	光電効果イメージ	7
2.5	MOS 構造の概念図	9
2.6	MOSFET の概念図とその動作原理	10
2.7	CMOS の最も基本的な回路の概念図	11
3.1	データ読み出し系	13
3.2	実験に用いたセンサ	14
3.3	検出器特性評価実験のセットアップ	15
3.4	normal センサのペDESTAL分布	16
3.5	normal センサの各ペDESTALピークを構成するピクセルの分布	18
3.6	CMOS におけるピクセル座標とペDESTAL波高値の相関	19
3.7	galss センサと NIR センサのペDESTAL分布	19
3.8	不偏標準偏差分布とグッドピクセルの決め方のイメージ	20
3.9	glass センサと NIR センサの不偏標準偏差分布	21
3.10	X 線イベントの例	22
3.11	X 線の 700 μm 厚ガラスに対する透過率	23
3.12	normal センサで取得した線源のエネルギースペクトル	24
3.13	線源を用いた観測により取得した weight2 での入射 X 線と波高値の関係	24
4.1	SPring-8 偏光実験セットアップ	27
4.2	SPring-8 偏光撮像実験セットアップ	27
4.3	実験セットアップにおける配線図	28
4.4	実験で使用した符号化開口マスクと、光学系取り付けのための治具	29
4.5	SPring-8 実験のために製作した光学系の 3D CAD モデル	30
4.6	SPring-8 実験のために製作した光学系	31
4.7	SPring-8 偏光撮像実験セットアップ	32
4.8	偏光撮像実験で取得されたマスクを通したビームイメージ	34
5.1	異常ピクセルを含むダーク波高値の不偏標準偏差分布と異常ピクセルの CMOS 上での分布	37
5.2	スプリッドスレシヨLDを変化させた時のダブルイベント割合と MF の変化	38
5.3	スプリッドスレシヨLDと MDP の相関	39
5.4	スペクトルのビーム成分に含まれるダブルイベントに対するシングルイベントの割合	40
5.5	16 keV ビームを照射した際のセンサ毎のスペクトルと weight 分布。	42

5.6	センサに対する座標系とダブルピクセルイベントの定義	43
5.7	16keV ビームに対するモジュレーションカーブ	44
5.8	各センサ毎の MF とビームエネルギーの関係と先行研究との比較。	46
5.9	エネルギー分解能の比較	47
5.10	glass センサと NIR センサにおける検出効率の比較	49
6.1	2019 年 SPring-8 実験で取得した、実験データの weight 分布	52
6.2	2019 年に SPring-8 で取得した 16 keV データ中の weight が 3 以上のイメージ	52
6.3	2019 年に SPring-8 で取得した 24 keV データ中の weight が 3 以上のイメージ	53
6.4	シミュレーションにより作成された 24 keV のイベントイメージ	54
6.5	単純な全結合型のニューラルネットワークの概念図	55
6.6	電子の放出角のカテゴリ分類に関するイメージ	57
6.7	24 keV の無偏光イベントに対するニューラルネットワークの学習曲線	57
6.8	学習モデルを使用した複数のイベントに対する電子放出角の推定	59
6.9	電子放出角の正解データと学習後のニューラルネットワークを用いた推測の角度分布比較	60
6.10	ニューラルネットから得られるシミュレーションデータのモジュレーションカーブ	60
6.11	従来までの手法を参考にした、電子放出方向の推定手法概イメージ	61
6.12	シミュレーションデータに対して、従来までの手法を用いて取得したモジュレーションカーブ	62
6.13	シミュレーションデータに対する、ニューラルネットワークと従来までの偏光角測定手法の比較	63
6.14	実験データに対してニューラルネットと従来までの手法を用いて取得したモジュレーションカーブ	65
6.15	実験データに対する、ニューラルネットワークと従来までの偏光角測定手法の比較	66
6.16	シミュレーションと実験データの weight 分布の比較	67
A.1	normal センサ、ゲイン 2 で取得した pedestal 分布と不偏標準偏差分布	70
A.2	glass センサ、ゲイン 2 で取得した pedestal 分布と不偏標準偏差分布	71
A.3	glass センサ、ゲイン 1.5 で取得した pedestal 分布と不偏標準偏差分布	71
A.4	NIR センサ、ゲイン 2 で取得した pedestal 分布と不偏標準偏差分布	71
A.5	NIR センサ、ゲイン 1.5 で取得した pedestal 分布と不偏標準偏差分布	72
B.1	glass センサで取得した 32 keV ビームのスペクトルと weight 分布	73
B.2	glass センサで取得した 24 keV ビームのスペクトルと weight 分布	73
B.3	NIR センサで取得した 32 keV ビームのスペクトルと weight 分布	74
B.4	NIR センサで取得した 28 keV ビームのスペクトルと weight 分布	74
B.5	NIR センサで取得した 24 keV ビームのスペクトルと weight 分布	74
B.6	NIR センサで取得した 20 keV ビームのスペクトルと weight 分布	75
C.1	glass センサで取得したモジュレーションカーブ	76
C.2	NIR センサで取得したモジュレーションカーブ	77
D.1	偏光撮像実験再構成後のイメージ	79

表目次

3.1	本修論で扱うセンサー一覧	13
3.2	使用した線源が放射する X 線とその強度	14
3.3	検出器のエネルギー比較校正のフィットパラメータ	23
3.4	グッドピクセル条件と解析に使用しないピクセル数と不偏標準偏差のピーク値	25
4.1	偏光測定実験データの角度 ϕ_x セット	31
4.2	偏光測定実験データリスト	33
4.3	偏光撮像実験データリスト	33
5.1	偏光測定実験におけるグッドピクセル条件	36
5.2	ダーク測定から予測されるランダムノイズのレート	40
5.3	モジュレーションカーブによるフィッティングパラメータ	45
5.4	glass センサと NIR センサの 16 keV、24 keV、32 keV ビームに対する検出効率の比	50
6.1	ニューラルネットワークにより取得した MF と偏光角	60
6.2	シミュレーションデータに対して、従来の解析手法 method1-3 を用いて取得した MF と偏光角	62
6.3	ニューラルネットワークと method1-3 を用いた実験データ解析の MF と偏光角	64

第1章 はじめに

1962年にR.Giacconiらにより打ち上げられたロケット実験¹により「さそり座X-1 (Sco X-1)」からのX線を観測したことがX線天文学の始まりである。当時は太陽以外からX線が観測されるとは考えられておらず、同氏はこの発見により2002年にノーベル物理学賞を受賞している。その後1970年に世界初のX線天文衛星である*Uhuru* (Giacconi et al., 1971)が打ち上げられたことにより、本格的にX線天文学が始まり、今日までに多くの発見を我々にもたらしてきた。日本も*Hakucho* (Oda, 1980)、*Tenma* (Tanaka et al., 1984)、*Ginga* (Makino and ASTRO-C Team, 1987)、*ASCA* (Tanaka et al., 1994)、*Suzaku* (Takahashi et al., 2016)、*Hitomi* (Takahashi et al., 2016)と多くのX線天文衛星を国際協力のもと打ち上げてきた歴史があり、X線天文学に対して大きく貢献してきた。また2022年には*Hitomi*の代替機²である*XRISM*衛星の打ち上げも予定しており、X線天文学をこれからもリードしていくことが期待されている。

X線は一般的には波長が 10^{-8} m以下、周波数が 10^{17} Hz以上で、温度に置き換えると100万 K以上、エネルギーに変換すると100 eV以上と、可視光と比較して高エネルギーの光をさす。物理現象が高エネルギーであればあるほど放射光は高エネルギーになるので、X線は熱く激しい宇宙現象を観測するのに適している。これまでX線観測はブラックホールや中性子星、超新星残骸などの極限状態の宇宙物理に対して数々の発見を行ってきた。また酸素、ケイ素、鉄などの宇宙に豊富に存在する物質は、X線帯域に特性X線と呼ばれるその物質特有の輝線を持つので、天体における物質の分布を知ることができるのも魅力である。

これまでX線天文学では天体からのX線から、その「エネルギー」、「空間分布」、「時間変動」の情報を用いて宇宙における現象を解明してきた。本研究で我々が扱う「偏光」はこれら3つの情報とは独立の、光が持つ4つ目の情報である。磁場に伴うシンクロトロン光や散乱に伴う偏光の物理はよく知られており、偏光は高エネルギー天体における磁場や散乱体の構造解明に対して強力な観測手段である。これらはブラックホール周辺の時空構造や中性子星表面の強磁場環境、宇宙における粒子加速のメカニズム解明に必要不可欠な情報を提供し、これまでのX線観測と組み合わせることで豊富なサイエンスが期待されている。実際、10 keV以下の軟X線帯域に関しては、*IXPE* (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) 衛星 (Weisskopf et al., 2016) による偏光撮像観測が予定されており、20 keV以上の硬X線帯域で*PoGO+* (Chauvin et al., 2017) や*Hitomi* SGD (Collaboration, 2018)、*X-Calibur* (Abarr et al., 2020) などのミッションで偏光観測が行われてきた。しかし10 keV以上の非熱的放射が卓越し高い偏光度が期待できる帯域での空間分解した偏光観測は手付かずであり、また撮像を伴わない観測においても十分な精度の観測は実現していないため、この帯域におけるX線偏光観測が急がれる。

近年半導体の技術革新により、低ノイズでかつ微小ピクセルサイズのCMOSイメージセンサ(以下CMOSセンサ)が登場している。またCubeSatなどの超小型衛星を用いることで、従来までの衛星と比べて短期間で低コストの衛星開発が実現しており、これらを組み合わせることで機動性の高い偏光観測ミッションが現実的になってきた。従来のX線観測で主に用いられてきたミラー

¹当時はアポロ計画の最中であり、太陽X線の月面反射を利用して月面状態を探查する目的で本来は打ち上げられた。

²*Hitomi*は打ち上げには成功したものの、1ヶ月の運用後制御不能になり運用終了している。

を用いた撮像系よりも、超小型衛星に合った必要体積の小さい符号化開口を撮像系として採用することで、偏光撮像を狙うことができる。我々はこの超小型衛星を用いた偏光撮像プロジェクトを *cipher* (Coded Imaging Polarimetry of High Energy Radiation) と名付け、コンセプト評価を進めてきた。CMOS センサの硬 X 線偏光測定能力は先行研究 (會澤, 2020, Asakura et al., 2019) により実証されている。このシステムと組み合わせる金属微細加工による符号化開口撮像は、Kasuga et al., 2020 で成功している。超小型衛星による偏光撮像の実現に向けた重要課題は、小型センサの読み出し系の開発と可視光用 CMOS センサの低い検出効率を改善することである。

そこで、本修論の目的を、(1) 新規開発した小型センサボードを用いた CMOS センサの特性評価、(2) 放射光ビームを用いた CMOS センサの偏光 X 線に対する応答と、符号化開口を組み合わせた偏光撮像コンセプト実証のためのデータ取得、(3) 空乏層の厚い近赤外用線センサの偏光 X 線に対する応答の評価、(4) 解析可能データを大きく増やす新しい偏光解析手法の開発、と定める。

本修論の構成を述べる。まず、偏光 X 線が持つ基本的な性質や、その検出原理に関してのレビューを行う (2 章)。その後本研究のために新規開発した小型センサボードを用いた CMOS センサの特性評価を行い (3 章)、シンクロトロン放射光を用いた CMOS センサの偏光応答評価実験 (4 章) と実験データの解析結果 (5 章) について述べる。さらに従来までの偏光解析手法では解析ができなかったイベントに対する機械学習を用いた偏光解析を開発し、偏光ビームデータを用いて評価した (6 章)。

本研究のコンセプトが実現し偏光撮像が実現した際には、宇宙物理学の発展に大きな貢献が見込まれる。我々が作った衛星でこれまで誰も見たことのない宇宙の姿が見られるような日が来るかもしれない。

第2章 X線の偏光と検出

2.1 偏光 X線とその放射メカニズム

ここでは偏光に関して基礎的な知識から、天文学で登場する偏光 X線を生み出す物理現象に関してまとめる。なお本章での内容に関しては、主に Rybicki and Lightman, 1986 を参考にしている。

2.1.1 偏光と偏光度

光はその進行方向に垂直な面内で振動する電場と磁場を持つ横波として空間を伝搬し、その電場ベクトルの偏りを偏光という。xyz 直交座標系で z 軸正方向に進む単色光に関して電場成分は、角周波数 ω 、初期位相 ϕ_1 、 ϕ_2 を用いて以下のように記述できる。

$$E_x(x, y, z) = E_1 \cos(\omega t + \phi_1) \quad (2.1)$$

$$E_y(x, y, z) = E_2 \cos(\omega t + \phi_2) \quad (2.2)$$

$\phi_1 - \phi_2 = 0$ または π の時を直線偏光、 $\phi_1 - \phi_2 = \pm \frac{\pi}{2}$ かつ $E_1 = E_2$ の場合を円偏光、その他を楕円偏光と分類する。実際この分類は xy 平面で電場ベクトルが描く図形に対応している。

自然光は様々な電場状態の単色光の重ね合わせであり、偏光成分と無偏光成分が足し合わされた状態で観測される。この時の偏光度 Π は偏光成分の強度 I_{pol} と無偏光成分の強度 I_{unpol} を用いて、以下のように定義される。

$$\Pi = \frac{I_{\text{pol}}}{I_{\text{pol}} + I_{\text{unpol}}} \quad (2.3)$$

2.1.2 双極子放射

荷電粒子の振動による電磁波の発生機構を簡潔に記述したものに双極子放射がある。双極子放射は加速度を持つ非相対論的な荷電粒子からの放射光を近似的に記述し、天体からの放射光を理解するのに必要不可欠である。双極子モーメント \mathbf{d} 、双極子モーメントと光子の放出方向とのなす角を Θ をとすると、双極子放射パワーの分布は

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{|\ddot{\mathbf{d}}|^2}{4\pi c^3} \sin^2 \Theta \quad (2.4)$$

と記述される。またこの時に放出される光の電場は、十分遠方という条件のもと、双極子モーメントの加速度ベクトルと光子放出方向ベクトルが形成する面内で振動する。

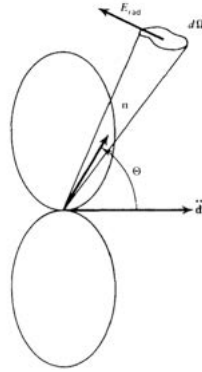


図 2.1: 双極子放射の放射イメージ。 \vec{d} は双極子モーメント、 \vec{n} は光子の放出方向、 \vec{E}_{rad} は光子の電場ベクトルを表している。(Rybicki and Lightman, 1986)

2.1.3 制動放射

運動する荷電粒子は主に原子によるクーロン相互作用で曲げられ加速度を持つ時に電磁波を発生し、この放射は制動放射 (bremsstrahlung) と呼ばれる。光学的に薄い熱プラズマからの放射ではこの制動放射がスペクトルに連続成分として出現する。

制動放射の1プロセスに注目すれば、2.1.2節の近似等を用いることで偏光方向を求めることができるが、熱プラズマ中では自由電子の加速度成分が等方的であり、全体として制動放射成分は無偏光として観測される。

2.1.4 シンクロトロン放射

相対論的な速度を持つ電子が磁場中を運動すると、ローレンツ力をうけ磁場に対して垂直方向に加速度を持ち光子が放出される。この時観測者が電子の運動面内にいる場合、到来光子は磁場に対して垂直方向に直線偏光する。対して観測者が電子運動面に対して仰角を持つ場合は、その仰角に応じた楕円偏光が観測される。

また、多数の電子が磁場に対して一様の角度を持って螺旋運動している時、観測者は仰角が非零の観測を行うことになり、楕円偏光の足し合わせとして観測を行う。この時観測面の上下に位置する電子により楕円成分が相殺され、結果として磁場に垂直な偏光成分のみが観測される。この時の周波数 ω の光が持つ偏光度 $\Pi(\omega)$ は、磁場に並行、垂直な方向の単位周波数あたりの放射強度をそれぞれ $P_{\parallel}(\omega)$ 、 $P_{\perp}(\omega)$ とすると、以下のように記述できる。

$$\Pi(\omega) = \frac{P_{\perp}(\omega) - P_{\parallel}(\omega)}{P_{\perp}(\omega) + P_{\parallel}(\omega)} = \frac{G(x)}{F(x)} \quad (2.5)$$

ここで x は磁場と電子の速度ベクトルが成す角度を α 、 $\omega_c = 3\gamma^2 qB \sin \alpha / 2mc$ とした時に、 $x = \omega / \omega_c$ で与えられ、 $G(x)$ 、 $F(x)$ は変形ベッセル関数 K を用いて以下のように定義される。

$$F(x) = x \int_x^{\infty} K_{\frac{5}{3}}(t) dt \quad (2.6)$$

$$G(x) = x K_{\frac{2}{3}}(x) \quad (2.7)$$

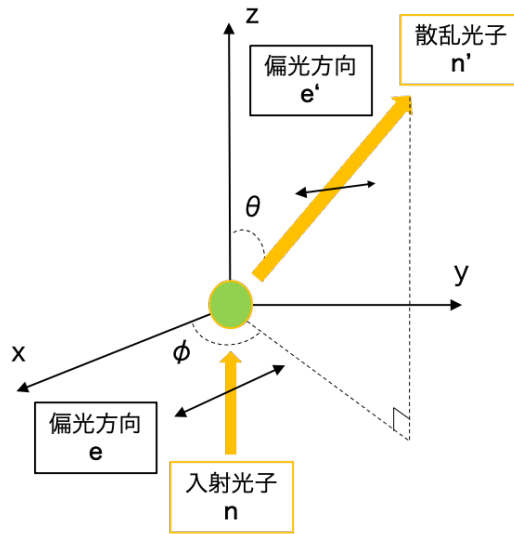


図 2.2: 電子静止系における逆コンプトン散乱のイメージ図。

2.1.5 逆コンプトン散乱

相対論的な速度で運動する電子が光子と衝突し、エネルギーの受け渡しにより光子のエネルギーが増加する現象を逆コンプトン散乱という。図 2.2 のように極座標で電子の静止系に関して考える。入射光子の方向ベクトルを \mathbf{n} 、偏光ベクトルを \mathbf{e} 、光子振動数を ν 、散乱後の光子の方向ベクトルと偏光ベクトル、振動数をそれぞれ \mathbf{n}' 、 \mathbf{e}' 、 ν' と添字付きにする。また散乱前後の光子エネルギー比を $\eta = \nu'/\nu$ とすると、散乱断面積は Klein-Nishina の式 (McNamara et al., 2008) として

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \eta + \eta^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \quad (2.8)$$

のようになる。また散乱後の光子の偏光ベクトル \mathbf{e}' は以下のようになり (Angel, 1969)、

$$\mathbf{e}' \propto (\mathbf{e} \times \mathbf{n}') \times \mathbf{n}' \quad (2.9)$$

偏光度 Π は以下で記述される (Dolan, 1967)。

$$\Pi = \frac{\sin^2 \theta}{\eta + \eta^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi} \quad (2.10)$$

2.2 偏光から得られる天体の情報

X 線偏光観測により、既存の手法では得られなかった天体情報を得ることができる。特に 10 keV 以上の X 線偏観測が重要である。なぜなら 10 keV 以下の軟 X 線帯域では熱的な制動放射成分や黒体放射が卓越し、観測される X 線はほとんど無偏光である天体が多いのに対し、10 keV 以上の硬 X 線帯域では、シンクロトロン放射や逆コンプトン散乱などの成分が卓越し、高い偏光度を持った偏光 X 線の観測が可能になるからである。したがってこの帯域の偏光観測を行うことにより、様々な天体の物理情報を引き出すことができる。例えば天体からのシンクロトロン放射光の偏光を測定することで、その磁場構造を推定することができる。超新星残骸やパルサー星雲では、磁場方向や強度、乱雑度は粒子加速の効率や最大エネルギーに大きな影響を与えるため、宇宙線

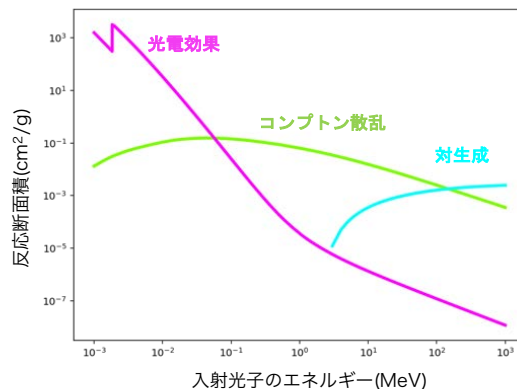


図 2.3: 入射光子のエネルギーと Si の (巨視的な) 相互作用反応断面積。NIST XCOM¹ のデータベースより作成した。

加速問題に対して非常に有益な情報を提供する。また逆コンプトン散乱のような散乱された光が持つ偏光情報を用いて、散乱体の幾何構造の推定などが可能である。例えば、ブラックホールは視直径が非常に小さく、イメージングによる幾何構造の推定が非常に難しい。しかし降着円盤からの逆コンプトン散乱光の偏光を測定することで、観測における見込み角や幾何構造の推定が可能であると考えられている (Schnittman and Krolik, 2010)。これらの物理情報はこれまでの観測手法では解明することができなかつたため、偏光観測という新たなツールに対する期待は非常に大きい。

2.3 X線の検出

X線を検出するためには、検出器を構成する物質とX線が相互作用する必要がある。X線と物質の相互作用は確率的な現象で、その確率は反応断面積により記述される。図 2.3 は本研究で用いる半導体検出器を構成する Si と光子の (巨視的な) 反応断面積を表す。数十 keV 程度までは光電効果、さらに高エネルギー帯域では数百 MeV までがコンプトン散乱、それ以上のエネルギーは対生成が支配的であることがわかる。またこれらの相互作用により生成された自由電子は、Bethe-Bloch の式 (e.g., Longair, 2011) で記述されるようなエネルギー損失を起こしながら検出器物質内を移動する。

2.3.1 光電効果

数十 keV 程度の低エネルギー帯域における X 線と Si の相互作用は、光電効果が支配的である。物質中の電子が入射光のエネルギーを吸収して束縛状態を脱し、光電子と呼ばれる自由電子として放出される。この時、光電子の放出方向は入射光子の偏光方向に依存した異方性を有している。図 2.4 を参考に、光子が +z 方向に入射して原点で光電効果を起こすと考える。電子質量よりエネルギーの十分小さい光子の、K 殻電子に対する光電効果の微分断面積は式 2.11 のようになる (Fraser et al., 1989)。

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 - \beta \cos)^4} \quad (2.11)$$

¹<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>

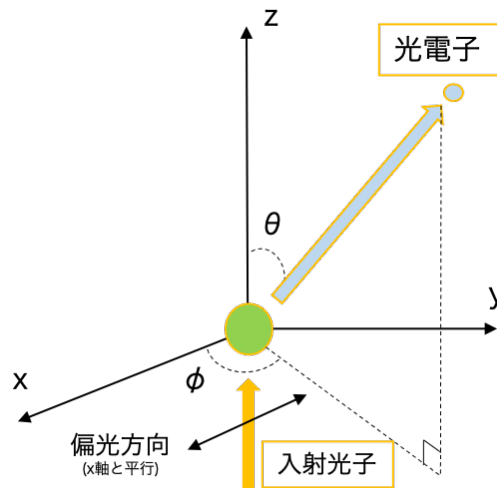


図 2.4: 光電効果の概念図。

この式より、電子質量よりエネルギーの十分小さい光子が K 殻電子と光電効果を起こした場合、入射 X 線の偏光方向に飛び出しやすい性質があることがわかる。また X 線が Si と光電効果を起こす場合、そのほとんどが殻内部の K 殻との反応によるものであるため、Si 検出器内では多くの場合偏光 X 線の光電子は偏光方向に偏って飛び出す。

2.3.2 コンプトン散乱

さらに入射光子のエネルギーが高くなると、コンプトン散乱の断面積が増加する。コンプトン散乱は自由電子により光子が散乱される現象である。その微分断面積は式 2.10 同様に計算され、

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \eta + \eta^{-1} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \quad (2.12)$$

と記述される。このことから $\phi = \frac{\pi}{2}$ で最も微分断面積が大きく、偏光方向に垂直な方向に電子が飛び出しやすい性質がある。

2.3.3 電子陽電子対生成

入射光子のエネルギーがさらに大きくなり、電子の静止質量である 511 keV の 2 倍を超えると、光子が物質内の粒子と相互作用しながら電子・陽電子ペアに変化することができる。この現象を電子・陽電子対生成と呼ぶ。対生成により生成された陽電子は、エネルギーが低い場合はすぐに他の原子内の電子と相互作用して電子・陽電子対消滅を起こし、対消滅由来の 2 つの光子が生成される。

2.4 偏光 X 線検出器

2.4.1 ガス検出器

ガス検出器は軟 X 線の偏光観測において優れた性能を持ち、多用されている。軟 X 線の光電効果に伴う光電子のガス検出器内での飛跡は、物質の密度が非常に小さいことからミリメートル程

度と長く、光電効果によって放出される光電子のトラッキングを高精度で行うことができる。したがって、ガス検出器は偏光に対して高い感度を持つ。ただしガスのイオン化エネルギーは比較的大きく²、半導体検出器と比較してエネルギー分解能はあまりよくない。また密度の小ささから、一定以上の検出効率を確保するために検出器の体積を非常に大きくする必要があり、望遠鏡を用いた集光をする際に検出器内部に望遠鏡の焦点深度を収めるのが難しいなどの問題点もある。2021年度打ち上げ予定の *IXPE* (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) 衛星 (Weisskopf et al., 2016) では 2–8 keV の軟 X 線観測に対してガス検出器を用いた偏光撮像が予定されている。

2.4.2 半導体検出器

半導体検出器は Si や Ge などの半導体を用いた検出器であり、検出原理については 2.5 節でまとめる。半導体検出器は、ガス検出器と比較した時にエネルギー分解能が良いことや、高密度に由来する同体積での検出効率が高いなどのメリットを持ち、実際半導体検出器として代表的な CCD (Charge Coupled Device) は多くの X 線衛星で標準的に用いられてきた。光電効果を使用した CCD による X 線偏光計の検討は以前から (Tsunemi et al., 1992) 行われているが、現在までに用いられてきた CCD の典型的なピクセルサイズは数十 μm である。Bethe-Bloch の式を用いて計算される飛程は軟 X 線に対して数 μm 程度であるため、CCD の典型的なピクセルサイズは Si 内部の光電子をトラッキングするには大きすぎる。それに対して同様の半導体検出器である CMOS (Complementary MOS) イメージセンサは主に可視光用として数 μm のピクセルサイズのものが多数開発されており、先行研究 (Asakura et al., 2019, 會澤, 2020) より X 線偏光に対して感度を持つことがわかっているので、超小型の偏光計開発を目的とする本研究には CMOS イメージセンサを用いた検出器の方が適している。

2.4.3 ブラッグ反射を用いた偏光計

ブラッグ反射は X 線の回折現象として有名であり、偏光測定にも利用することができる。例えば、*OSO-8* (Weisskopf et al., 1976) ではブラッグ反射を用いた偏光計が採用された。X 線が結晶でブラッグ反射を起こす時、反射面に対して垂直方向の偏光成分と平行方向の偏光成分の反射率が異なり、平行成分の方が反射されやすい。よってブラッグ反射の反射面を傾けながら、X 線の反射光を測定することで、検出器に入射した X 線の偏光度と偏光角を知ることができる。しかしブラッグ反射のための結晶格子間隔が決まっていることから、特定のエネルギーでしか観測できないなどの欠点がある。

2.5 CMOS イメージセンサの動作原理

本研究では CMOS イメージセンサを用いた偏光検出器の開発を取り扱い、ここではその基礎知識に関してまとめる。CMOS の構造をレビューする前に、まず半導体検出器の原理と CMOS を構成する上で最も基本的な構造となる MOS (Metal-Oxide Semiconductor) や MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) に関してまとめる。その後 CMOS の構造に関して記述する。

²一般的にキャリアを 1 つ生成するのに平均的に 20~30 eV 必要である (Leo, 1994)。

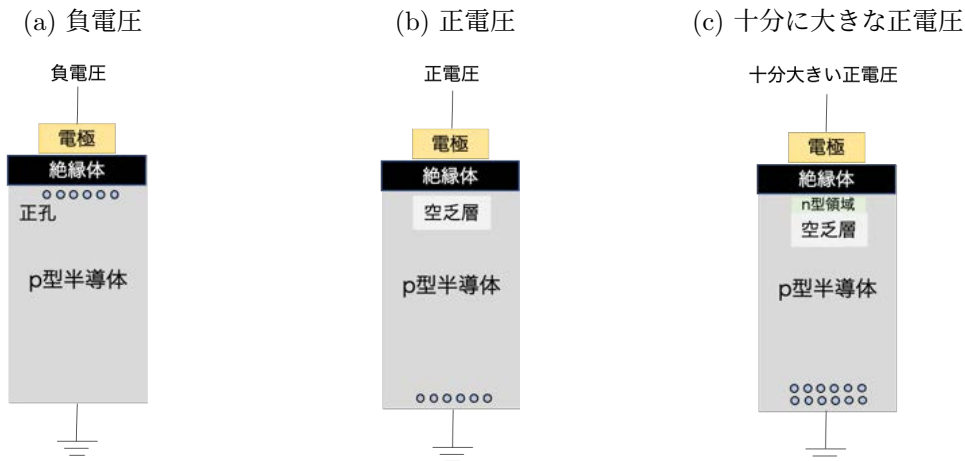


図 2.5: MOS 構造に対してそれぞれ (a) 負電圧。 (b) 正電圧。 (c) 十分に大きな正電圧。を印加した時の概念図。

2.5.1 半導体検出器の原理

pn 接合は半導体素子を形成する上で最も基本的な構造である。半導体物質より荷電子数が多いドナー物質を混入させた n 型半導体と、荷電子数の少ないアクセプタ物質を混入させた p 型半導体を接合させた構造をしている。n 型半導体では電子密度が、p 型半導体ではホール密度がそれぞれ大きくなり、電流を流すキャリアとして働く。接合部では電子とホールとの中和によりキャリアがなくなる。キャリアが存在しないこの中和領域は熱拡散により広がるが、電子とホールが移動することにより生じる内部電場によりこの拡散範囲は無限には広がらない。この中和領域を空乏層という。pn 接合に対して半導体検出器では、n 型半導体側に対しては正電圧を、p 型半導体側には負電圧を印加する。こうすることで空乏層はさらに厚くなり、内部電場も大きくなる。

X 線が空乏層に入射し、光電効果などによって自由電子が生じると、その運動エネルギーに対応するだけの電子・ホール対を生じさせる。一般的な検出器では、これを内部電場を用いて回収する際に生じる誘導電流を読み取ることで、X 線検出が可能になる。

2.5.2 MOS 構造

MOS 構造は図 2.5 のように金属 (Metal) を用いた電極と絶縁体である酸化物 (Oxide)、さらに半導体 (Semiconductor) がこの順に重なったものであり、半導体デバイスの最も重要な構造の一つである。半導体物質として Si が用いられる場合には、絶縁体に SiO_2 や Si_3N_4 などが用いられる。この構造は金属を電極として電圧を加えたときに、半導体と金属間に電流を流さず、半導体内に電場をかけて電荷を移動させることが可能である。

例えば p 型の半導体を使用した時の MOS 構造の性質に関して考える。図 2.5a のように MOS 構造で電極に負電圧を加えると p 型半導体内部存在する正孔が電場により引き寄せられ、絶縁体付近に正孔の層ができる。また図 2.5b のように正電圧を印加すると、絶縁体付近の正孔が電場を受けて移動し、キャリアの存在しない空乏層ができる。さらに図 2.5c のように正電圧の値を上げていくと、絶縁体付近の電子密度がホール密度を上回り、n 型の層ができる (反転)。この時に流れる電流は印加電圧にかかわらず一定になる。

(a) n-チャンネル MOSFET の構造。 (b) ゲート、ドレイン電極に電圧を印加した時。 (c) さらにドレインに印加する電圧を上げた時。

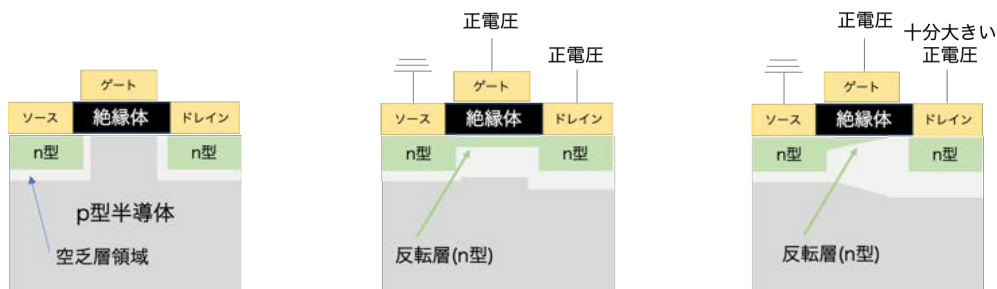


図 2.6: MOSFET の概念図とその動作原理

2.5.3 MOSFET

MOSFET は MOS の反転構造を用いたトランジスタである。図 2.5.2 のように、前述した MOS 構造の両側に、MOS の半導体とついでになる方の半導体と電極のセットを接合した構造をしている。この時埋め込んだ電極はソース電極とドレイン電極と名付けられており、MOS 構造を構成する電極をゲート電極という。MOS 構造を形成する半導体が p 型で、ソースとドレインの半導体が n 型の MOSFET は n-チャンネル MOSFET、n と p が入れ替わったものを p-チャンネル MOSFET という。例えば n 型の MOSFET について考える。簡単のためここでは図 2.6b のようにソース電極はアースする。またゲート電極には十分大きい正電圧を印加し、反転を生じさせる。この時ドレインに電圧が印加されると、ゲート電極下が n 型になっているのでソース・ゲート・ドレイン下が n 型領域で接続され、n 型キャリアである電子がゲート電極下を通過し電流が流れる。ドレイン電極に印加する電圧を大きくすればするほど、流れる電流も大きくなるが、一定以上の電圧をドレイン電極に印加すると、ゲート下反転層とドレイン下 n 型半導体の接合部が空乏層化し、流れる電流値が一定になる。このサチレーションが起きるドレイン電極への印加電圧をピンチオフ電圧といい、この値はゲート電極とソース電極の電位差で決定される。

2.5.4 CMOS

CMOS(Complementary MOS) は n-チャンネル MOSFET と p-チャンネル MOSFET を相補的に組み合わせたものであり、最も基本となる CMOS インバータは図 2.7 のようになっている。n-チャンネル MOSFET のソース電極に低電圧 V_{low} を p-チャンネル MOSFET のソース電極には高電圧 V_{high} をそれぞれ印加する。この時に高電圧・低電圧を逆にすると整流作用により電流が流れないことに注意する。インプットとなる電圧が高いと n-チャンネル MOSFET がオンになり電流が流れ、反対にインプットの電圧が低いと p-チャンネル MOSFET がオンになる。そのためインプットが高電圧の時にはアウトプットは低電圧が、インプットが低電圧の時には高電圧が出力される。

2.5.5 CMOS イメージセンサの天文学への利用

CMOS 検出器は複数の CMOS 回路で構成したアンプをピクセル上に形成した構造を持つ。入射 X 線は空乏層領域で相互作用を起こし、各ピクセルで入射 X 線のエネルギーを知ることができる。CMOS イメージセンサではピクセル毎に読み出しを行うので、ピクセル列毎に読み出しを行

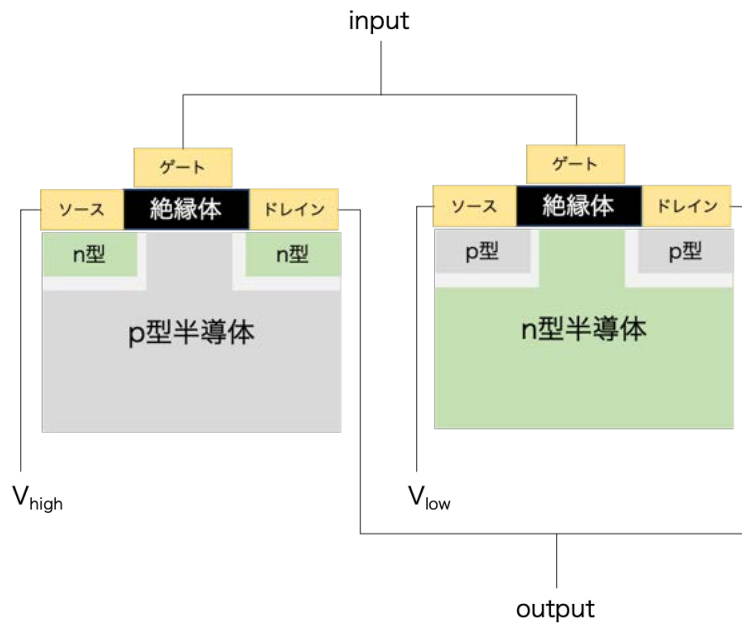


図 2.7: CMOS の最も基本的な回路の概念図。高電圧をインプット時すると n-チャンネル MOS-FET(左)が、低電圧を印加すると p-チャンネル MOSFET(右)がオン状態になる。

う CCD 検出器と比較して、時間分解能が高い。その一方でピクセル毎のノイズやゲインのばらつきが大きかったため、高精度のデータが要求される天文学ではあまり使用されてこなかった。近年では技術の発展によりピクセルノイズが抑えられた CMOS センサが登場している。さらには偏光計としての側面も近年注目されており、天文学への使用が期待されている。特に CubeSat に代表される超小型衛星では消費電力を小さく抑えることが重要であり、CMOS センサの利用価値は非常に大きい。

第3章 新規開発したセンサボードを用いた様々な CMOS センサの特性評価実験

本章では本研究に用いた CMOS センサの基礎特性評価実験に関してまとめる。その後、線源を用いた基本的な X 線応答評価実験に関してデータ取得とその解析について述べる。本研究ではデータ取得システムに小型衛星搭載を視野に入れた、全く新しい小型のセンサボードを開発・運用した。またより高い検出効率を目指し、先行研究(會澤, 2020)で扱ったセンサ以外に、センサ空乏層領域を厚くした近赤外線用センサを用いた評価を行った。

3.1 データ読み出し系

データの読み出し系をシマフジ電機¹・大阪大学と共同開発を行った²。センサ用³小型センサボード(図 3.1 左)と ZDAQ-SoC ボード(図 3.1 右)を組み合わせた系を使用する。センサボードは本研究のために新規開発されたものであり、そのサイズはセンサ上面から見た時に 80 mm×90 mm と、超小型衛星搭載が可能なサイズ⁴を実現した。

ZDAQ-SoC ボード⁵は DualCore ARM Cortex-A9 プロセッサとプログラマブルロジックを統合した ZYNQ-SoC を搭載したボードであり、本研究におけるデータ取得系の制御はここから行う。真空下でも稼働可能であり、実際の宇宙観測実験でも採用実績(FOXSI-3; Ishikawa et al., 2018)があるため、本研究に適した制御システムであると考えられる。動作電圧は 12 V で、動作温度は 0–50°C である。センサボードと ZDAQ-SoC ボードは、拡張ボードを経て接続される。センサが取得した各ピクセル毎の波高値信号はセンサボードから LVDS(Low Voltage Differential Signaling)を経由して、ZDAQ-SoC ボードに転送する。ただしこの時、電気的には拡張ボードを経由する。ZDAQ-SoC ボードはデータ取得用 PC と Ethernet ケーブルで接続されている。

3.2 実験に使用するセンサ

本修論では可視光用の CMOS イメージセンサ(図 3.2)を使用した偏光計を扱う。検出部は Si で構成され、ピクセルピッチが 2.5 μm で 5120×5120 ピクセルで構成されている。センサ仕様を表 3.1 にまとめた。normalセンサは(會澤, 2020)で使用したものと同一センサである。この先行研究で使用したセンサに加え、空乏層厚は同じでセンサ上部に 700 μm ⁶の保護ガラスを搭載したセンサ⁷と、700 μm 保護ガラス付きで、近赤外線に対する感度を向上させた近赤外線用センサ⁸を用い

¹<http://www.shimafuji.co.jp>

²筆者は主に動作テストによる異常動作部分のデバッグを行った。

³3 種類のセンサは同じ型をしており、どのセンサにも対応する。

⁴超小型衛星に代表される CubeSat では 10 cm 立方を最小規格として衛星を作成する。

⁵シマフジ電機により制作、販売されている。

⁶メーカー公称値であり、センサから取り外しができないため未測定である。

⁷センサは可視光用の産業製品であり、保護ガラスが取り付けられている。

⁸レスポンスに関する資料 (<https://www.gpixel.com/news/gpixels-gmax0505rf-image-sensor-employs-enhanced-red-fox-process-to-achieve-high-resolution-nir-imaging/>)

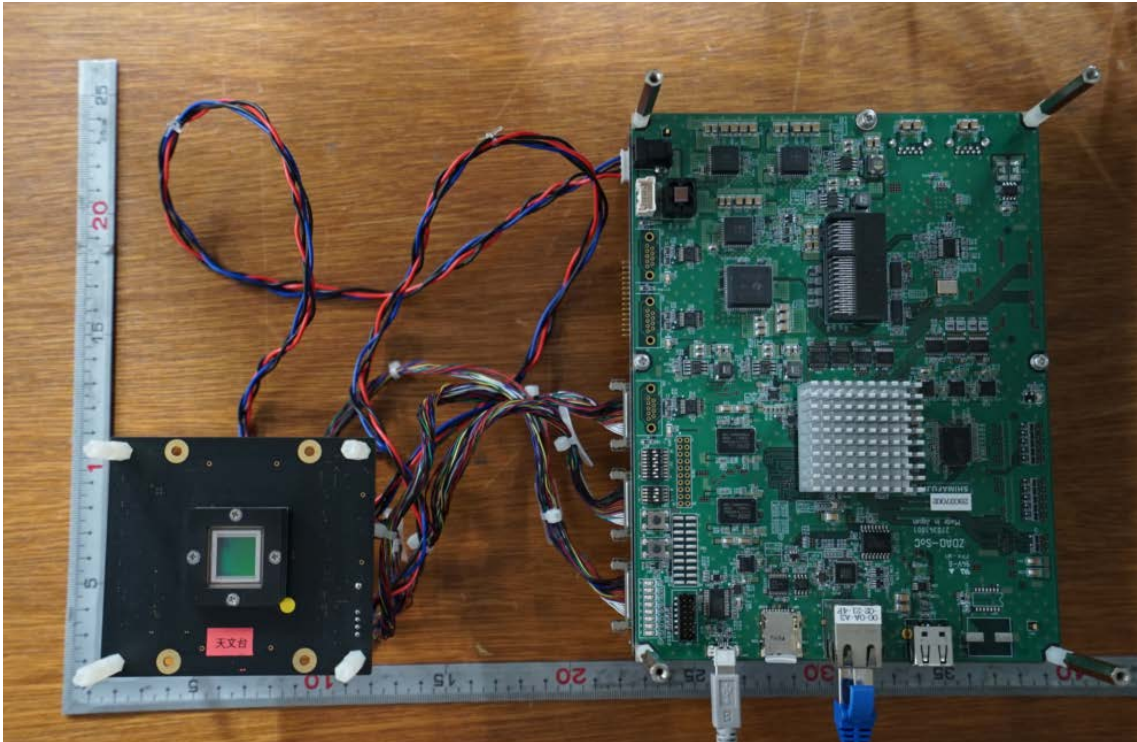


図 3.1: 新たに開発したデータ読み出し系。左がセンサボード、右が ZDAQ-SoC と拡張ボードを組み合わせたものである。

て実験を行った。近赤外線用センサは他のセンサと比較して空乏層がより厚く、硬 X 線に対する検出効率の向上が期待される。以降簡単のため、それぞれセンサを normal センサ、glass センサ、NIR センサ⁹と呼ぶ (表 3.1)。

表 3.1: 本修論で扱うセンサ一覧

	normal センサ	glass センサ	NIR センサ
対応波長域 (メーカー推奨)	可視光	可視光	可視光 - 近赤外
保護ガラス	なし	700 μm	700 μm
ピクセルピッチ (μm)	2.5	2.5	2.5
ピクセル数	5120 \times 5120	5120 \times 5120	5120 \times 5120

3.3 検出器の特性評価実験：データ取得

以下では CMOS イメージセンサの基礎的な性能評価を行う。まず X 線検出能力以外の系の安定性をダーク測定により取得したデータで評価する。その後線源を用いて検出器の X 線応答について考察する。X 線測定で用いた線源は表 3.2 のようになっている¹⁰¹¹

⁹NIR(Near Infrared) は近赤外線を意味する。

¹⁰牧島一夫研究室時代の線源強度リストの値から、2020 年 12 月 28 日現在の強度を算出した。

¹¹Table of Radioactive Isotopes(<http://nucldata.nuclear.lu.se/toi/radSearch.asp>) を参考にした。

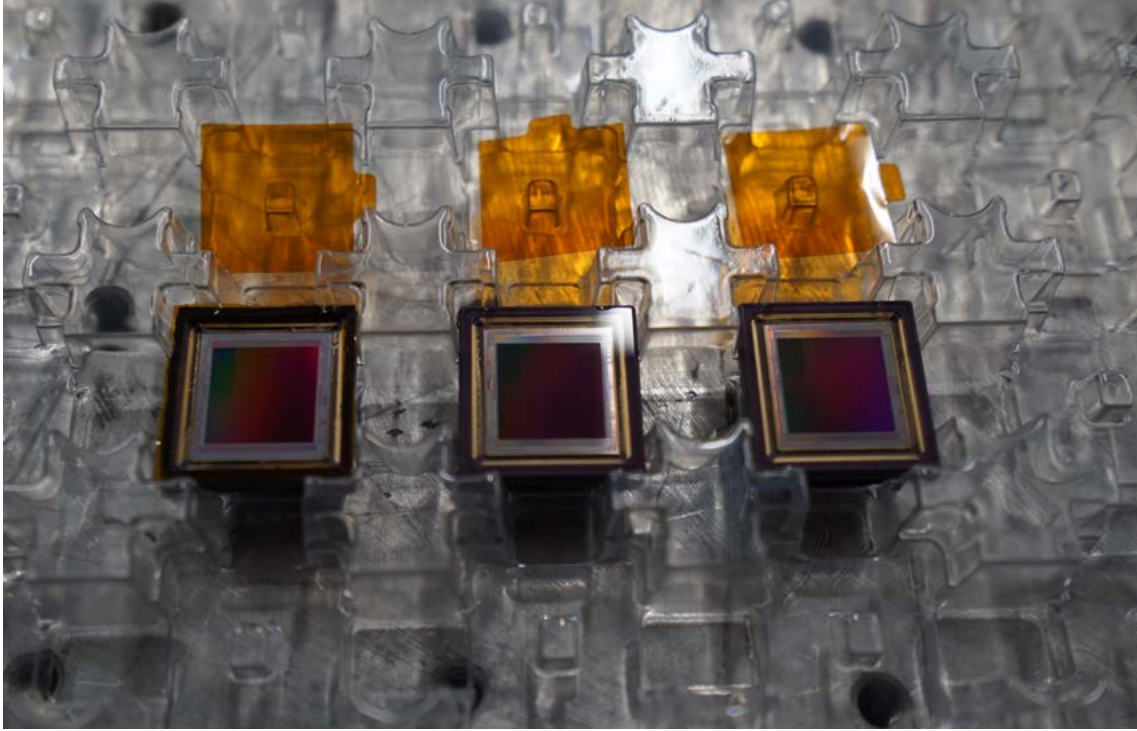


図 3.2: 実験に用いたセンサ、左から normalセンサ、glassセンサ、NIRセンサ。

表 3.2: 使用した線源が放射する X 線とその強度。

線源の種類	30 keV 以下の X 線 (keV)	強度 (Bq)
^{55}Fe	5.90(Mn $K\alpha$)、6.49(Mn $K\beta$)	107k
^{241}Am	13.95、16.82、17.75、21.04(Np L-line)、26.34	3.25M



図 3.3: 線源ありの検出器特性評価実験セットアップ。センサボード上部にスペーサを置き、物理的にセンサと線源が接触しないようにしている。

3.3.1 実験セットアップ

実験セットアップは図 3.3 に示す通りで、センサボード上部に線源を配置してデータを取得した。性能評価実験は 25°C の実験室 (非恒温槽) で行っている。センサ上部を遮光シートで覆い、可視光がセンサに入り込まないようにした。また線源配置の際に、そのまま線源をセンサ上部に配置するとセンサと線源が物理的に接触を防ぐため¹²スペーサを用いた。

3.4 検出器の特性評価実験：ダークのペDESTAL 評価

3.4.1 ペDESTAL の波高値分布

各ピクセルに何も信号が入ってこない時、理想的な検出器において 0 になるはずである。しかし主に熱的ノイズ由来の暗電流と読み出しノイズにより信号値は 0 でなくなる。このように、何も信号を受けていない時のデータをダークデータと呼ぶ。従って、実際の観測では、X 線イベントを観測したデータから、同じ観測条件のダークデータの波高値を引く必要がある。イベントデータから引く波高値は各ピクセル毎に決定され、その値をペDESTAL と定義する。

最も単純かつ多用されるペDESTAL 値の決定手法は、ダークを一定時間取得し各ピクセル毎で波高値のフレーム平均値を採用するものである。しかしこの手法では宇宙線や環境放射線などの高エネルギー X 線が偶発的に検出器に入射した場合に、本来検出器が備え持つノイズレベルより

¹²線源の一部がセンサに付着したり、線源がセンサに傷をつける恐れがある。

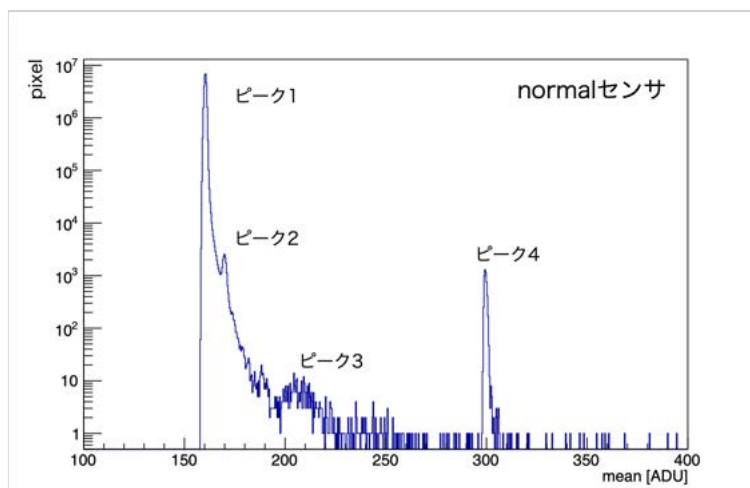


図 3.4: normalセンサでゲイン 1、フレーム数 100、露光時間 100 ms で取得されたペダスタルの波高値分布。データ処理として各ピクセル毎に波高値の上位、下位 3 フレームを除外している。

も高いペダスタル値を持つことになる。これは高エネルギー X 線が入射したピクセルで取得したイベントデータの波高値を低く見積もる原因となり、分解能の悪化を引き起こす。

そこで本解析では各ピクセル毎に波高値分布を観測し、波高値の上位数フレームを省いて平均値を計算することでダークデータへの高エネルギーイベント混入を防ぐ。この時に上位側で省いたフレーム数と同数のフレームを波高値分布の下位側でも同様に省いてペダスタルの計算を行う。上位と下位の波高値を持つ数フレームを取り除いた後、各ピクセルで波高値のフレーム平均をとり、ペダスタルとして使用する。上位と下位から取り除くフレーム数に関しては、ダークのデータ取得フレーム数や、観測されたダーク分布を適宜解析しながら調整する。

またゲイン毎のペダスタルの変化を観測するため、センサ毎にゲインを変化させながらデータを取得した¹³。図 3.4 は normalセンサでゲイン 1、フレーム数 100、露光時間 100 ms で取得し、データ処理として各ピクセルで波高値の上位、下位 3 ピクセルを取り除いた際のペダスタル分布を表している。ピーク構造が波高値として約 162、172、208、300 ADU の 4 箇所を観測され、ほとんどのピクセルが波高値約 ADU の最も波高値の低いピークに属している。この図からピクセル毎のペダスタル値は単純に正規分布のようなモデルでは記述できず、ごく少数のピクセルは大部分のピクセルが持つペダスタル値より大きな値を持つことがわかる。

3.4.2 ペダスタル peak 成分の空間分布

図 3.4 で見られる各ピークを構成するピクセルの CMOS 面での空間分布を確認する。説明のため、4 つのピークに対して、ピーク波高値の小さい方からそれぞれピーク 1 から 4 と名前をつける(図 3.4)。各ピークを正規分布を仮定してフィットし、ピークのペダスタル値から $\pm 2\sigma$ の波高値を持つ範囲を取り出した。図 3.5 はそれぞれピーク 1 から 4 を構成するピクセル分布である。この時ピーク 2、ピーク 3 のピクセル空間分布は CMOS 面に対して一様だが、ピーク 1 と 4 のピクセル分布は CMOS 面内で非一様であることがわかる。ピーク 1 では図 3.5a から、 $y \sim 3600$ で明らかに周囲よりもピクセル密度が低い横線構造が確認できる。またこの明らかな横線構造以外にも、全体的なピクセル分布密度のムラがある。一方、ピーク 4 では図 3.5d から $y \sim 3600$ 付近に明らかに

¹³本研究では広いエネルギー帯域をカバーするため、エネルギーに応じたゲイン設定を用いる。ゲインが大きければ大きいほど、測定できるエネルギー帯域が低エネルギー側に集中する。

周囲よりもピクセル密度の高い横線構造が見え、ピーク 1 の横線構造と相補的になっている。この横線構造の部分は、明らかに他のピクセルと比較して異なる挙動を持つピクセルが含まれていることがわかる。よってこのピーク 4 に含まれるピクセルを異常ピクセルと見なし、このピーク 4 を構成するピクセルよりもペDESTAL波高値が大きなピクセルは解析に用いないことにする。

また図 3.6 はペDESTAL波高値の CMOS 内での傾向を表し、横軸が CMOS 内での x と y 軸、縦軸がペDESTAL波高値で各プロットがピクセル毎に対応する。この図から x 方向に対してペDESTAL波高値の傾向は変化しないが、 y 方向に関しては y の値が大きい領域でペDESTAL値が小さくなる傾向が見られ、CMOS 内で数%程度以内の場所によるペDESTAL波高値差があることがわかる。

3.4.3 センサ毎のペDESTAL分布の比較

一方で glass センサ、NIR センサのゲイン 1、露光時間 100 ms、フレーム数 100 のペDESTAL波高値分布は図 3.7 のようになる。glass センサでは 180、185、210 ADU 付近をピークとする、また NIR センサは 150、155、180 ADU 付近をピークとする構造が確認できる。このような 3 ピーク成分から構成されるペDESTAL波高値分布の形状は、対応するピークの波高値は厳密には一致しないが 3 種類のセンサで同様に確認され、3 種類のセンサに共通する特性と言える。そのためこれら 3 つのピークの成分に関しては個々のセンサで見られる明らかな異常ピクセルとは認定しない。そのため、本研究ではこの 3 つめの波高値ピーク構造までの波高値を持つピクセルをグッドピクセルと定義し、それ以上のペDESTALを持つピクセルをバッドピクセルと定義して解析から除外した。

3.5 検出器の特性評価実験：ダーク波高値の揺らぎ

3.5.1 ダーク波高値の不偏標準偏差の評価

次に不偏標準偏差を用いて、各ピクセルにおけるダーク波高値のばらつきを評価する。ノイズによりダークデータの波高値はばらつきが存在するため、任意のピクセルでイベントが来ていないフレームの波高値から、3.4.1 節で求めたペDESTAL値を差し引いても 0 になるとは限らない。このばらつきの大きさは、ピクセルごとのノイズの大きさに依存し、ばらつきが大きいピクセルほど X 線に対するエネルギー分解能が低いことが予想される。

そこでこのダーク波高値のばらつきを不偏標準偏差 d を用いて評価する。3.4.1 節でペDESTALを計算した方法同様に、偶発的な高エネルギーイベントにより不偏標準偏差の値が大きくなる影響を最小にするため、上位と下位数ピクセルを取り除いたデータで不偏標準偏差を評価する。この時各ピクセルで不偏標準偏差は、解析に使用するフレームに対してフレーム i の波高値を v_i 、ペDESTAL値を \bar{v} 、計算に用いるフレーム数を n とすると以下のように計算できる。

$$d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_i (v_i - \bar{v})^2} \quad (3.1)$$

図 3.8 は 3.4.1 節のペDESTAL導出に用いたデータセットに対する不偏標準偏差分布である。分布を見ると 2 ADU 程度にピークを確認でき、ここから高エネルギー側にわずかに伸びるテール構造を持つ。この分布から、ほとんどのピクセルにおいて平均的に 2 ADU 程度の波高値揺らぎが存在することがわかる。

不偏標準偏差が大きい値を持つピクセルは、データ取得毎に出力される波高値のばらつきが大きいピクセルと考えることができ、X 線が入射した際にイベント波高値の決定精度が悪いピクセル

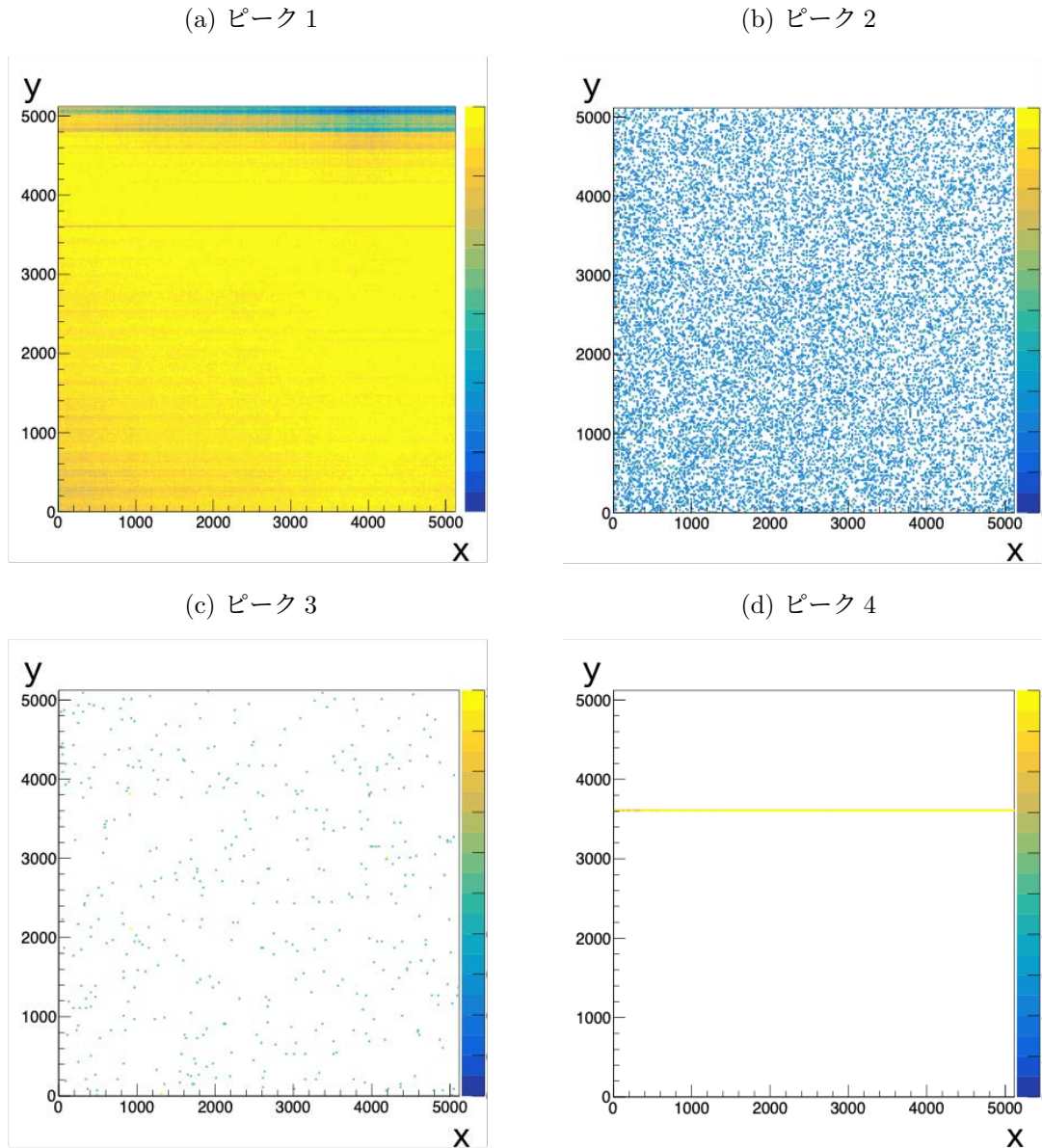
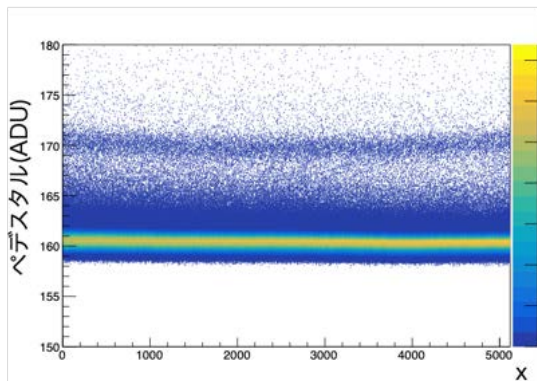


図 3.5: normalセンサの各ペデスタルピークを構成するピクセルの分布。センサ面で値の 20×20 ピクセル領域毎にピーク構成ピクセル数をプロットしてあり、最大値で規格化している。(a) ピーク 1。(b) ピーク 2。(c) ピーク 3。(d) ピーク 4。横軸と縦軸はそれぞれ CMOS センサの軸に対応する。カラーバーは linear scale。

(a) x 軸との相関



(b) y 軸との相関

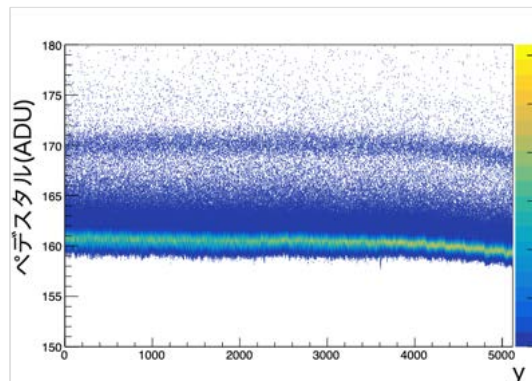
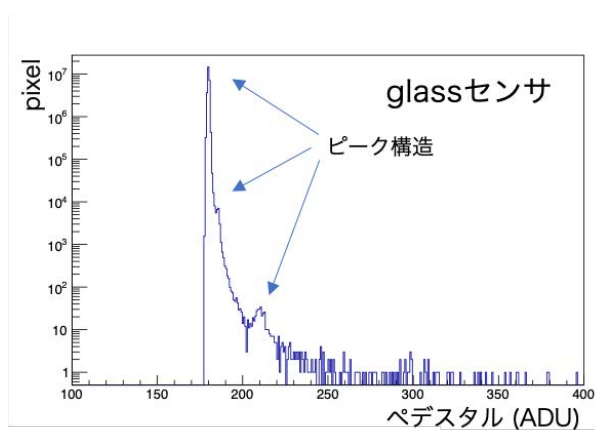


図 3.6: CMOS におけるピクセル座標とペDESTアル波高値の相関。(a)x 軸との相関。(b)y 軸との相関。y 軸との相関では 4000 を超えたところから、ペDESTアルが全体的に下がる傾向が見られる。カラーバーは linear scale。

(a) glass センサ



(b) NIR センサ

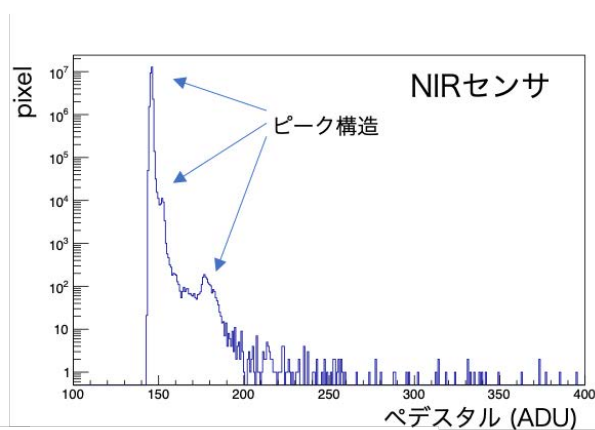


図 3.7: ゲイン 1、露光時間 100 ms、フレーム数 100 のペDESTアル波高値分布。(a)glass センサ。(b)NIR センサ。

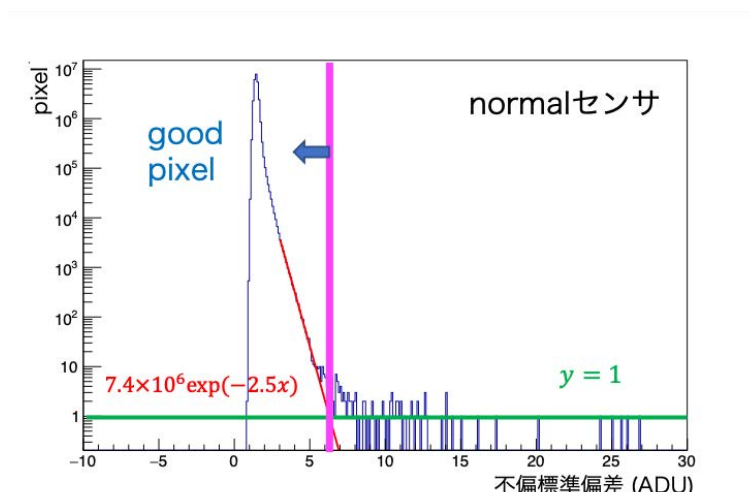


図 3.8: normal センサを使用してゲイン 1、露光時間 100 ms、フレーム数 100 で取得したダークデータ各ピクセルの不偏標準偏差分布と、グッドピクセルのスレシヨルド決定のイメージ。1 bin が 0.1 ADU に相当。

ルと考えることができる。そこで不偏標準偏差の波高値のスレシヨルドを設定し、この値以下の不偏標準偏差を持つピクセルをグッドピクセルとして解析に使用する。ただし不偏標準偏差が 0 のピクセルに対しては、一定波高値を連続して出力し続ける異常なピクセルなので解析から除外する。不偏標準偏差の波高値分布は、ほとんどのピクセルが属するピーク構造から、波高値が大きくなるにつれて 1 ADU あたりに含まれるピクセル数は急激に減少する。そこでこの部分を、現象論的に指数関数で近似し、ピクセル数の期待値が 1 になる部分を不偏分散のスレシヨルドとする。また SPring-8 実験では長時間ビームを当てている最中に、一定の高波高値を連続して出力し不偏標準偏差が 0 のピクセルが出現した。これらは X 線による内部構造の損傷等により、他のピクセルとは異なる挙動を示すようになったことが原因と考えられる。

3.5.2 センサ毎のダーク波高値不偏標準偏差分布の比較

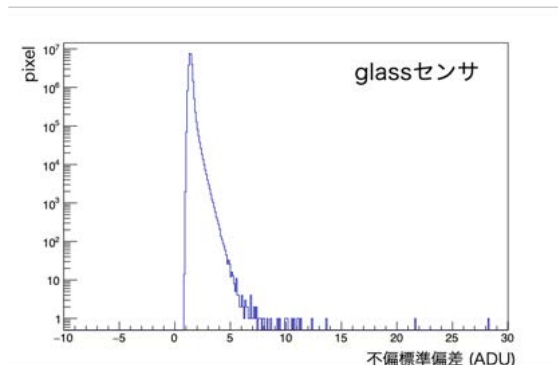
図 3.9 は glass センサ、NIR センサのゲイン 1、露光時間 100 ms、フレーム数 100 で取得したデータの非偏標準偏差分布で、3.4.3 節の解析同様、波高値上位と下位 3 フレームを除外して計算している。これらは normal センサ同様にほとんどのピクセルから構成されるピークと、そこから急激に単位 ADU あたりの波高値数が減少する部分により構成されている。また、SPring-8 実験で使用したセンサとゲインの組み合わせに関して、同様の分布が見られており (付録 A)、以降 3.5.1 節のように、指数関数で分布を近似することでグッドピクセルスレシヨルドを決定する。

3.6 検出器の特性評価実験：X 線応答解析

3.6.1 X 線解析の流れ

ダークに対する検出器の評価の後、線源を用いて X 線に対する応答を確認する。前述の ^{55}Fe と ^{241}Am を用い、ダーク取得と同一の条件でデータを取得し、検出器応答を評価する。X 線イベントは以下の X 線解析フローを通して解析される。

(a) glassセンサ



(b) NIRセンサ

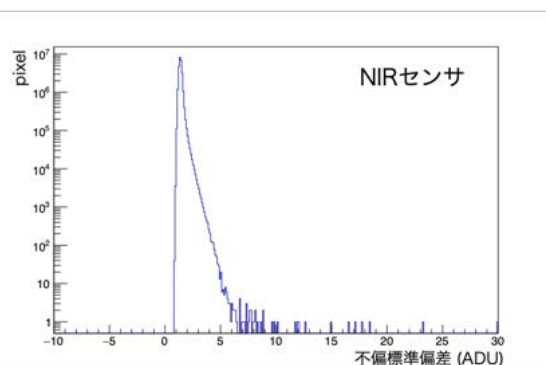


図 3.9: ゲイン 1、露光時間 100 ms、フレーム数 100 で取得した不偏標準偏差分布。(a)glassセンサ。(b)NIRセンサ。上位と下位の 3 フレームは計算から除外している。

(1) グッドピクセルの選別

ダークデータを用いて、3.4.3 節と 3.5.1 節のようにグッドピクセルをペDESTAL分布と不偏標準偏差分布の両方から算出する。ペDESTAL波高値分布から算出したグッドピクセルと不偏標準偏差分布から算出したグッドピクセルの積集合を、イベント解析のグッドピクセルとして解析に用いる。

(2) ペDESTAL除去

取得された X 線データは X 線イベントの波高値と、ダークノイズが足し合わされた形で出力される。よって X 線データの各フレーム毎に、3.4.1 節で計算したペDESTALを各ピクセル毎に引く。

(3) イベントの検出

ペDESTAL除去後、ある値 E_{event} 以上の波高値が任意のピクセルで検出された時、そのピクセル周辺に X 線が入射したと考える。この E_{event} の値を以降イベントスレシヨルドと呼ぶ。

(4) イベントの形状判定

波高値が E_{event} を超えたピクセルを囲む 5×5 ピクセルを調べる。各ピクセルが、ある値 E_{split} を超えた波高値を持つ場合、そのピクセルまでイベントが広がっていると考える。この E_{split} はイベントの形状を決定するのに重要な役割を果たし、以降スプリットスレシヨルドと呼ぶ。

上記の方法でイベント解析を行った時、解析領域でスレシヨルド¹⁴を超えたピクセル数をそのイベントの weight と定義する。イベントが持ちうる weight は解析領域が 5×5 の本研究において、1 から 25 と考えられ、その weight の値が大きければ大きいほど基本的にはイベントが広がっていると解釈することができる。また特に、weight が 1 のイベントをシングルイベント、weight が 2 がかつ、スプリットスレシヨルドを超えたピクセルが中心のピクセルと隣接する場合をダブルイベントと呼ぶ。

イベントスレシヨルドは X 線イベントの検出効率を高め、かつノイズをイベントと間違って解析しないように、ペDESTALの揺らぎよりも十分に大きく、予想される X 線のエネルギーに対応する値に対しては十分小さい値であることが必要である。この条件を満たした場合、イベントス

¹⁴中心ピクセルではイベントスレシヨルド、それ以外のピクセルではスプリットスレシヨルド。

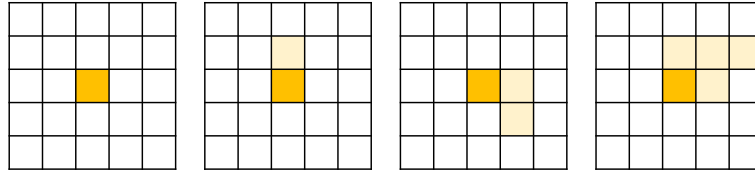


図 3.10: X 線イベントの一例。濃い黄色が E_{event} 、薄い黄色が E_{split} を波高値が超えたピクセル。左からそれぞれ weight1、weight2、weight3、weight5 に分類される。

レシヨルドを多少変化させても検出効率やエネルギー分解能、X 線イベント形状などの解析結果にほとんど影響を及ぼさない。一方、スプリットレシヨルドに関しては X 線イベントの形状を決定する場合に、非常に重要な役割を果たす。スプリットレシヨルドが小さすぎると、ほとんどのイベントが広がった形状とみなされ weight が非常に大きいイベントが増加する。反対にスプリットレシヨルドが大きすぎると、ほとんどのイベントがシングルイベントに分類される。そこで 5 章では、実験条件によって変化する最適なスプリットレシヨルドの値について考察する。

3.6.2 ゲイン関数

線源由来のエネルギーが既に分かっている X 線を用いて、波高値とエネルギーの変換関数推定を行う。3.6.1 節で weight によりイベントの広がりや推定できることを述べた。イベントが広がりピクセル間を跨ぐ際には電荷の一部が回収されずに失われる電荷損失が起き、その影響はイベントの広がり度合いによって異なる。よって波高値とエネルギー変換関数は weight 毎に計算するのが妥当であると考え、偏光解析で用いる weight2 イベントに対しての解析を行った。

また本来であれば使用可能な ^{55}Fe と ^{241}Am を用いて、使用する全センサの変換関数を求めるべきである。 ^{55}Fe の輝線は 700 μm のガラスをほとんど透過しない。図 3.11 は 700 μm 厚ガラスに対する X 線の透過率である。 ^{55}Fe の輝線エネルギー 5.90 keV と 6.49 keV の X 線の透過率は 10^{-4} 以下と、非常に小さいことが見て取れる。従って glass センサと NIR センサに関しては ^{241}Am の輝線のみを用いた。

図 3.12 は normal センサに対してゲイン 1、露光時間 100 ms、1000 フレームの実験を行った際の ^{55}Fe と ^{241}Am の weight2 イベントのスペクトルに対して、ガウシアンを用いてフィットを行ったものである。ペDESTAL の値はダークの各ピクセルで、全フレームにおける上位、下位 3 フレームを取り除いて計算し、 E_{event} と E_{split} に関しては先行研究(會澤, 2020)を参考にそれぞれ 100 ADU、10 ADU を使用した。4 章ではセンサ毎によって当てるビームエネルギーが異なり、normal センサはゲイン 2、他の 2 種類のセンサではゲイン 1、1.5、2 の設定を用いてデータを取得する。そこでこれらのセンサとゲインの組み合わせに対して同様の解析を行った。

輝線のエネルギーは既知であるためガウシアンのピークの ADU 値を対応させてデータ取得し、1 次関数

$$(\text{エネルギー} [\text{keV}]) = A \times (\text{波高値} [\text{ADU}]) + B \quad (3.2)$$

を用いてフィットする。フィット結果は図 3.13 のようになり、変換関数を一次関数で近似することが妥当であることがわかる。またフィッティングパラメータは表 3.3 のようになり、全てのセンサにおいてゲイン関数の y 切片 B が小さい一次関数による再現が可能であることが確認できる。ここで B の値がエラーの範囲でわずかに 0 に収まっていない原因としては、統計誤差のみを考慮

¹⁵https://henke.lbl.gov/optical_constants/filter2.html

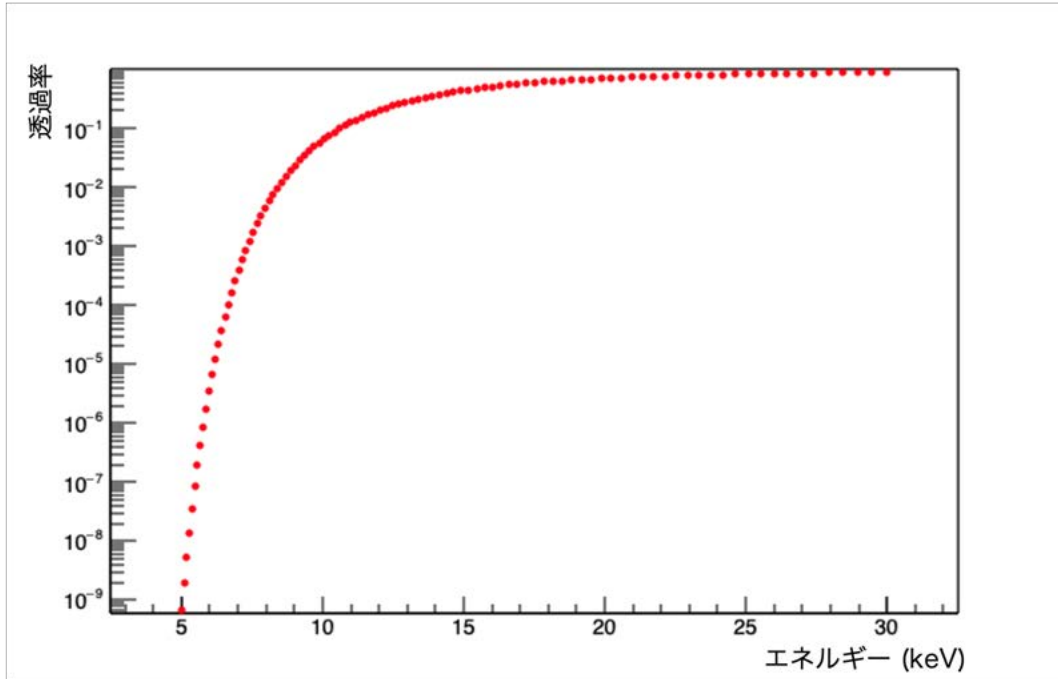


図 3.11: Filter Transmission¹⁵のデータベースから作成した、X線の700 μm厚ガラスに対する透過率。

表 3.3: 検出器のエネルギー校正のフィットパラメータ。

		gain1	gain1.5	gain2
normal	A (keV/ADU)	$(1.187 \pm 0.004) \times 10^{-2}$	-	$(5.938 \pm 0.008) \times 10^{-3}$
センサ	B (keV)	$(3 \pm 5) \times 10^{-2}$	-	$(2 \pm 2) \times 10^{-2}$
glass	A (keV/ADU)	$(1.177 \pm 0.009) \times 10^{-2}$	$(7.968 \pm 0.007) \times 10^{-3}$	$(5.95 \pm 0.02) \times 10^{-3}$
センサ	B (keV)	$(-1 \pm 1) \times 10^{-1}$	$(-4 \pm 2) \times 10^{-1}$	$(-1.8 \pm 0.6) \times 10^{-1}$
NIR	A (keV/ADU)	$(1.19 \pm 0.01) \times 10^{-2}$	$(8.03 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	$(6.08 \pm 0.03) \times 10^{-3}$
センサ	B (keV)	$(-2 \pm 1) \times 10^{-1}$	$(-1 \pm 1) \times 10^{-1}$	$(-2.4 \pm 0.9) \times 10^{-1}$

した解析を行ってることが考えられる。校正に使用した²⁴¹Amは各ガウシアンフィット範囲に複数の輝線が存在し、輝線エネルギーとしてその強度を用いた重み付け平均値を使用しているため、フィット範囲による系統誤差が大きくなることが予想される。また²⁴¹Amが出す高エネルギーの放射線に由来すると考えられる連続成分が輝線成分以外にも存在し、これらの影響は小さくないと考えられる。

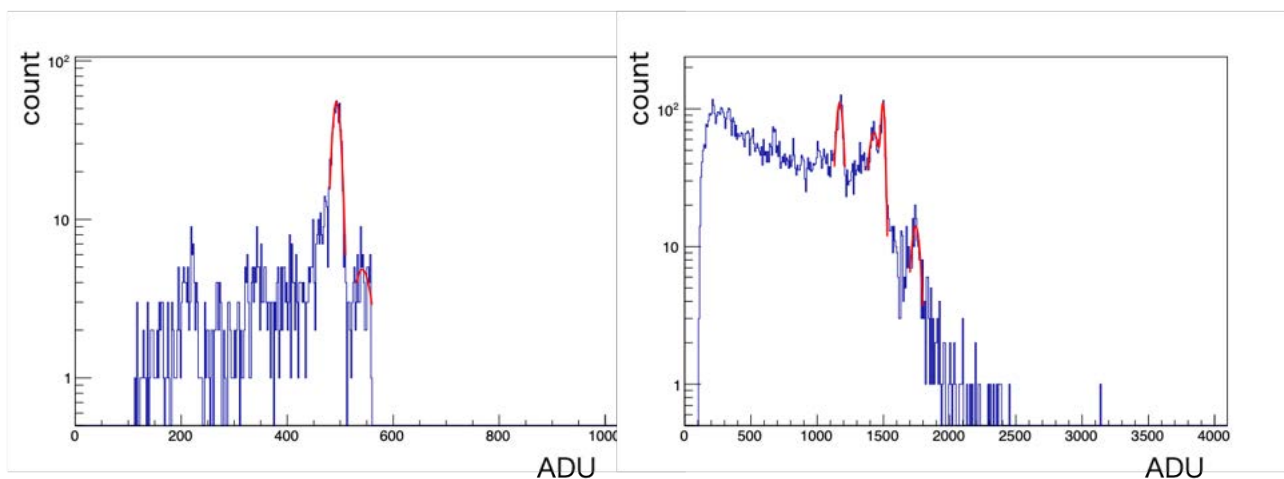
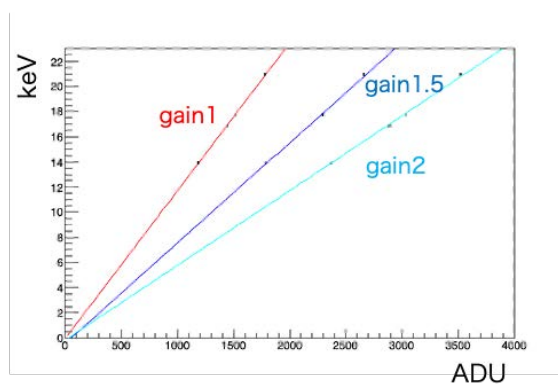
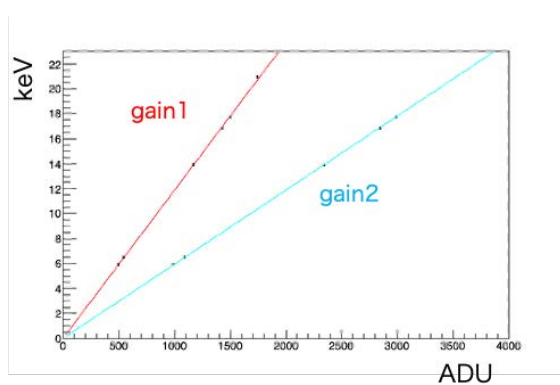
(a) ^{55}Fe (b) ^{241}Am 

図 3.12: normalセンサでゲイン 1、露光時間 100 ms、フレーム数 1000 で取得した (a) ^{55}Fe 、(b) ^{241}Am の weight2 イベントのスペクトルとガウシアンによるフィット。

(a) normalセンサ

(b) glassセンサ



(c) NIRセンサ

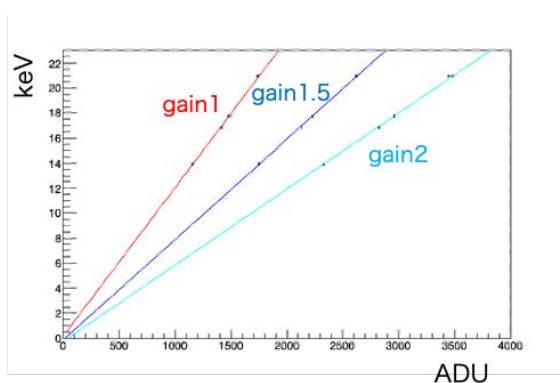


図 3.13: 線源を用いた観測により取得した weight2 での入射 X 線と波高値の関係 (a)normalセンサ (b)glassセンサ (c)NIRセンサ。

表 3.4: グッドピクセル条件と解析に使用しないピクセル数、不偏標準偏差のピーク値

センサ種類	normalセンサ	glassセンサ	NIRセンサ
グッドピクセル条件 (ペDESTAL)	0-270	0-250	0-210
グッドピクセル条件 (不偏標準偏差)	0-6.3	0-6.6	0-6.1
解析に使用しないピクセル数	5242	118	184
不偏標準偏差のピーク値	1.44824 ± 0.00003	1.40417 ± 0.00003	1.37932 ± 0.00003

3.7 センサ毎の評価とまとめ

本章の最後に各センサのノイズレベルとグッドピクセルに関して考察し、他のセンサとの性能の比較を行う。各センサのゲイン1、露光時間 100 ms、フレーム数 100 のダークフレームデータに対して、ペDESTAL波高値分布と不偏標準偏差から算出したグッドピクセルを選定した時の解析に使用しないピクセル数を求めた。さらに検出器の性能に相関がある不偏標準偏差分布の最も大きいピークをガウシアンを用いて近似したときの中心値を求めまとめた (表 3.4)。ここから NIR センサの解析に使用できるピクセル数や不偏標準偏差は glass センサと有効数字 2 桁で一致する。さらにどのセンサも波高値とエネルギーがほぼ線形の関係にあり、ダークと線源を用いた評価で NIR センサは glass センサとほぼ同等の性能を持つことがわかる。

第4章 ビームラインを使用した偏光 X 線照射実験

本章では第5章の偏光計性能評価で用いるデータを取得した、SPring-8での偏光 X 線照射実験の方法を述べる。

4.1 SPring-8 実験概要

検出器の偏光検出の性能を評価するために、偏光度と偏光角が既知のビームを用いた偏光測定実験が必要不可欠である。我々は高い偏光度を持つ 10-30 keV の X 線ビームを利用できる SPring-8 のビームライン BL20B2(Goto et al., 2001)でのビーム実験を、2020年11月に行った。BL20B2は高エネルギー電子の軌道を偏向電磁石を用いて曲げることで放出される、水平方向にほぼ100%偏光したシンクロトロン光を利用できる。利用可能なエネルギー帯域は5-113 keVと非常に広く、結晶分光器により単色光を取り出すことが可能である。またビームラインは215 mと非常に長く、最終的には300 mm×200 mmサイズのビームによる実験を行うことができる。ビーム照射口から実験ハッチ内にビームが入射し、その後AlとCuで作成した減衰フィルタを用いて強度調整し、検出器に照射した。

図4.1、4.2のようにステージ系として、センサ自体を光軸(x 軸)中心に回転させる回転ステージと、実験施設の2軸並進(y, z) + 1軸回転(θ_z) + 2軸ゴニオ(首振り)(θ_x, θ_y)の計6個の自由度を持つステージを用いた。センサは光軸に対して垂直になるように設置し、 x 軸回転ステージを回転させることでセンサに対するビームの偏光角(ϕ_x)を変化させ、異なる偏光角を持つビームが検出器に入射した際の応答を評価する。また(θ_y, θ_z)を変化させ、ビームの検出器への入射角を変化させながらデータ取得を行うことで、検出器から観測した天空上の広がった光源から到来する X 線を模擬したデータセットを取得することができる。

本実験では撮像系を使用せずにセンサの偏光感度のみを評価する偏光測定実験と、4.3節に述べる符号化開口マスクを撮像系として使用し、偏光撮像の能力を測定する偏光撮像実験の2つを行った。偏光測定実験では図4.1のようにセットアップを行い、 x 軸回転ステージのみを回転させて(ϕ_x のみを変化させて)データ取得を行った。この実験ではglassセンサとNIRセンサを使用し、エネルギーを変えながら検出器の偏光に対するモジュレーションを取得した。また偏光撮像実験では図4.2のように符号化開口マスクをビーム照射口とセンサの間に設置し、 $\phi_x = 0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 315^\circ(-45^\circ)$ のセットアップに対して(θ_y, θ_z)を変化させながらデータを取得した。偏光撮像実験ではnormalセンサに対して16 keV単色光を用いた。

4.2 電気系

データ取得のためにSPring-8で構築した電気・データ通信系は図4.3に示す通りである。データ取得のためのセンサ制御、データ転送、 x 軸回転ステージ以外のステージ制御はハッチ内のZDAQ-SoC

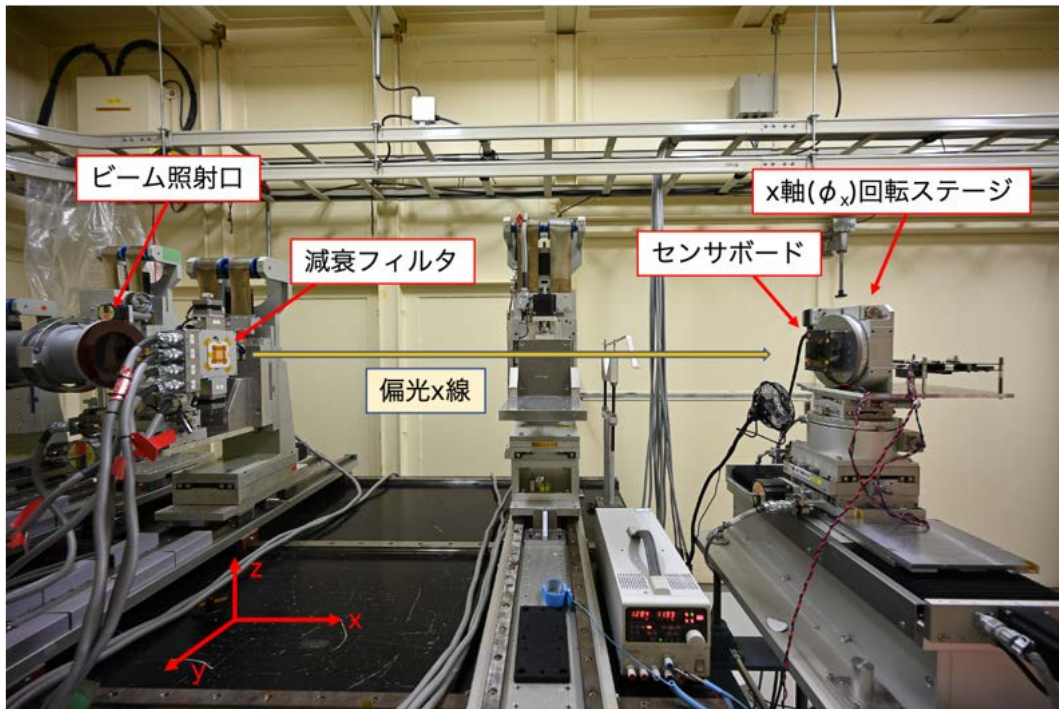


図 4.1: 偏光測定実験のセットアップ。図左から右に偏光 X 線が照射される。図右の x 軸回転ステージを回転させることで異なる偏光角に対する検出器の応答を見る。

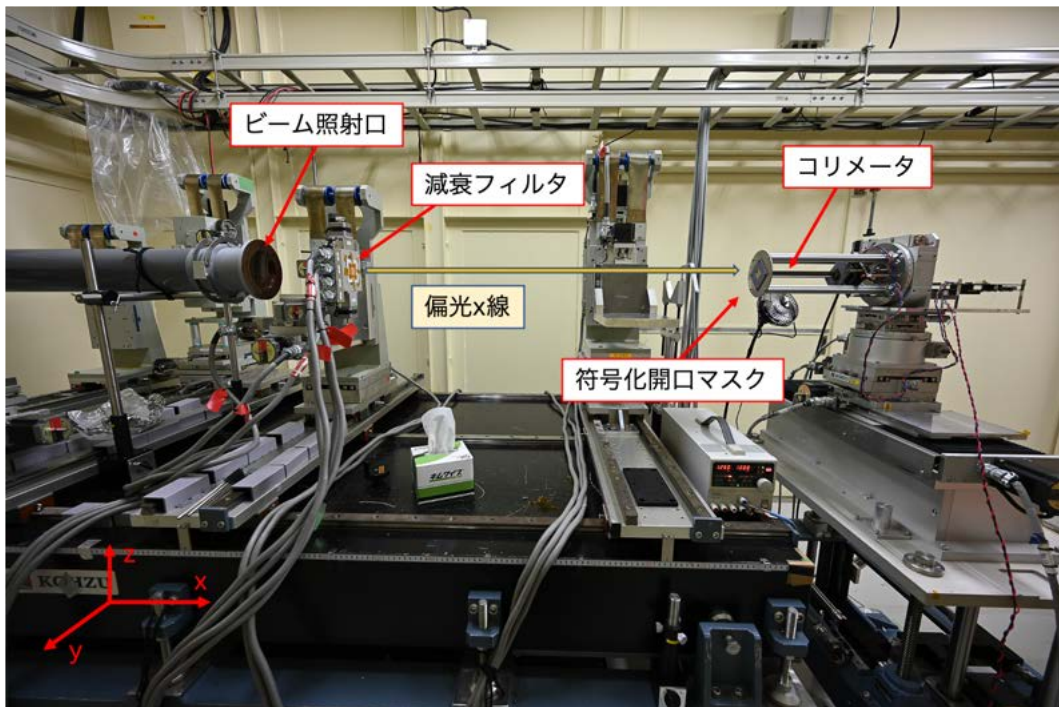


図 4.2: 偏光撮像実験のセットアップ。図左から右に偏光 X 線が照射される。センサとビーム照射口の間に符号化開口マスクを配置し、マスクがセンサ上に作るイメージを取得する。

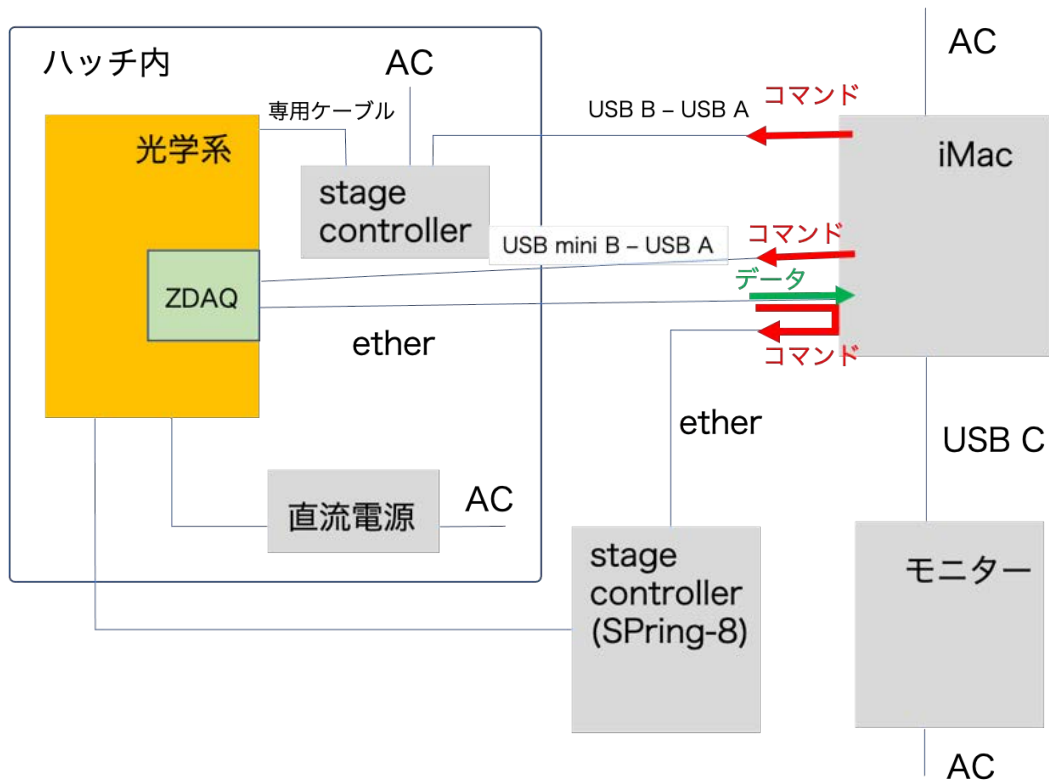


図 4.3: 実験セットアップにおける配線図。

から行い、ZDAQ-SoC へのコマンド転送と x 軸回転ステージ制御は iMac から、それぞれリアルコンソールと専用ソフトウェア¹で行う。

4.3 符号化開口マスクと実験セットアップ

図 4.4 は SPring-8 実験に用いられた符号化開口マスクである。使用したマスクは 8 種類の異なるパターンを持つ領域と、位置確認用の音符型の領域から構成されている。マスクパターン領域は各領域 2.48 mm 四方で、直径 70 μm の穴がランダムに開けられている。厚みは 100 μm で、ステンレス SUS304 製である。

SPring-8 実験のために制作した新しい評価系の 3D CAD モデルを図 4.5 に示す。また実機の写真を図 4.6 に示す。回転ステージから伸びる 4 本の支持機構²に取り付けてあるジグに符号化開口マスクを取り付け、回転ステージを回転させることでセンサとマスクを同時に回転させる。

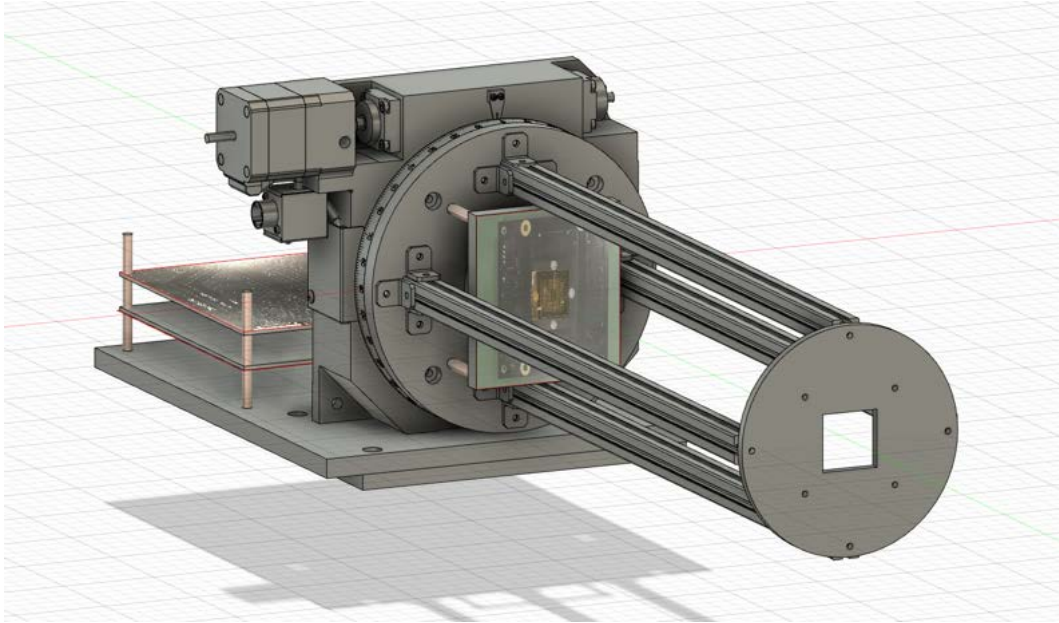
¹Chamonix(<https://www.kohzu.co.jp/downloads/application/#c276>)

²30 cm のアルミフレームで製作。



図 4.4: 実験で使った符号化開口マスクと、光学系取り付けのための治具。

(a) 前から見たイメージ



(b) 後ろから見たイメージ

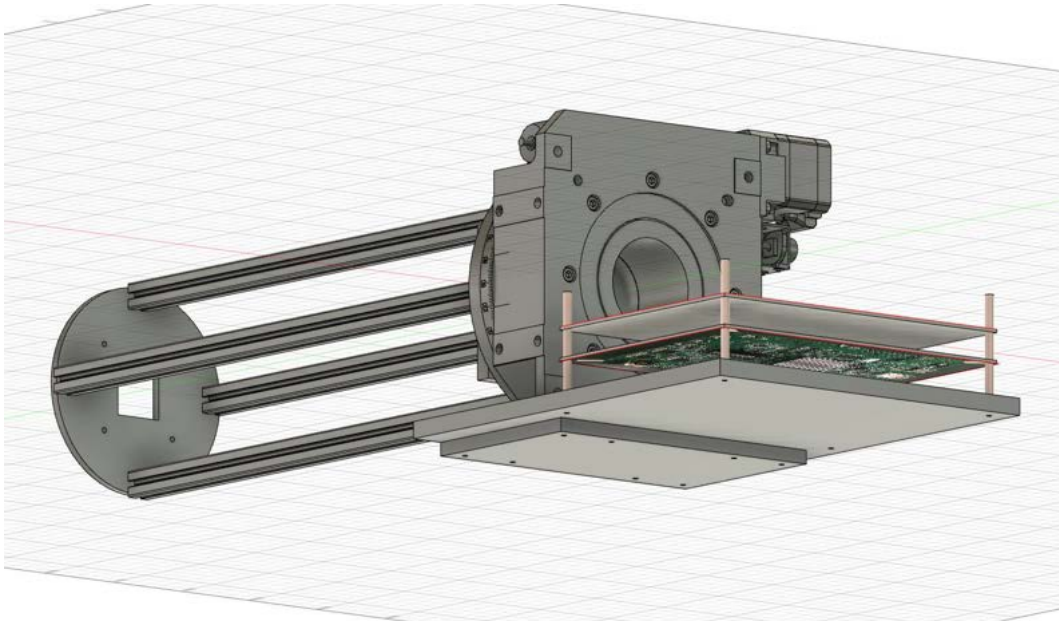


図 4.5: SPring-8 実験のために製作した光学系の 3D CAD モデル (a) 前からのイメージ。(b) 後ろからのイメージ。



図 4.6: SPring-8 実験のために製作した光学系

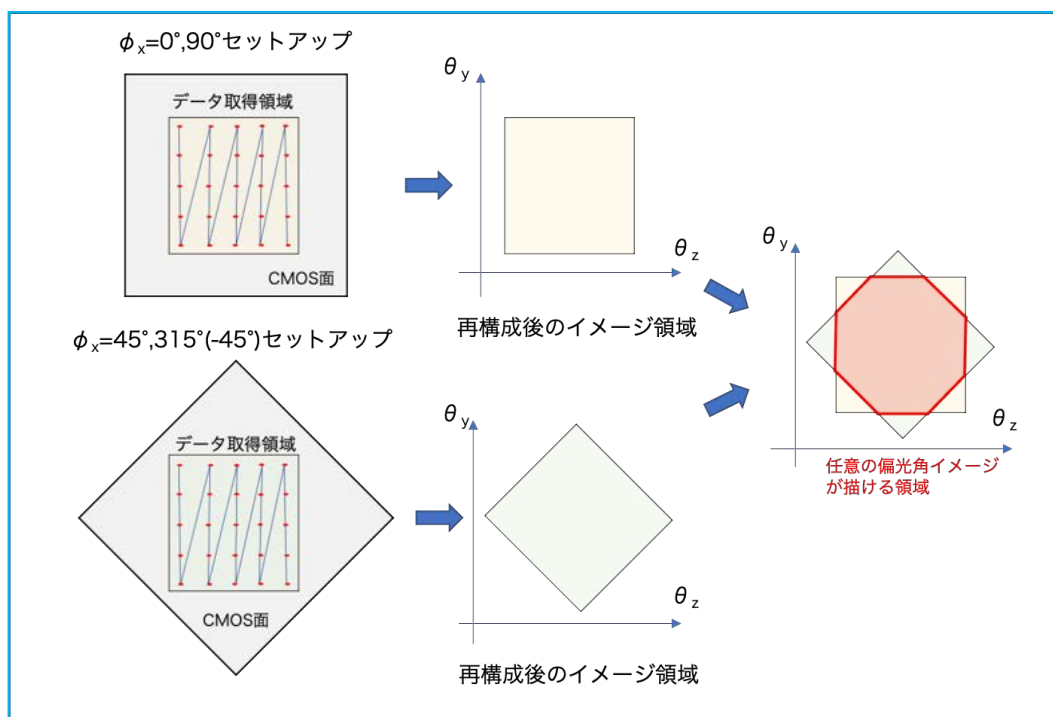
表 4.1: 偏光測定実験データの角度 ϕ_x セット

角度セット	角度 ($^{\circ}$)
A	0, 45, 90, 135, 180, 270, 360
B	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180, 270, 360
C	0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180, 202.5, 225, 247.5, 270, 292.5, 315, 337.5, 360

4.4 データ取得

実験により取得したデータセット詳細は表 4.2 のようになる。偏光測定実験では glass センサで 32 keV、24 keV、16 keV、NIR センサで 32 keV、28 keV、24 keV、20 keV、16 keV のデータを取得した。偏光測定実験ではビームタイムの関係上、表 4.1 のように 3 種類の回転角の組み合わせを使用してデータ測定を行い、各回転角に対して 100 フレームずつデータ取得した。実験データ取得中にセンサやビームエネルギーを変更する際にはその都度ダーク取得を行った。また全データ 1 フレームあたりの露光時間を 100 ms とした。その一方で偏光撮像実験では、normal センサに対して 16 keV のビームを照射して行った。 ϕ_x の値が 0° 、 45° 、 90° 、 $315^{\circ}(-45^{\circ})$ のデータセット取得するため、それぞれの ϕ_x に対して (θ_y, θ_z) をそれぞれが $0.0036^{\circ}(12.96'')$ 、 $0.004^{\circ}(14.4'')$ ずつ変化するようにステージを制御しながら各点で $\phi_x = 0^{\circ}$ 、 90° の時には 10 フレーム、 $\phi_x = 45^{\circ}$ 、 $315^{\circ}(-45^{\circ})$ の時には 4 フレームずつデータ取得した。 (θ_y, θ_z) の走査範囲は $\phi_x = 0^{\circ}$ 、 90° では 31×31 点 (約 $6'30'' \times 7'$)、 $\phi_x = 45^{\circ}$ 、 $315^{\circ}(-45^{\circ})$ では 45×45 点 (約 $9'45'' \times 10'30''$) で行った。 $\phi_x = 0^{\circ}$ 、 90° と $\phi_x = 45^{\circ}$ 、 $315^{\circ}(-45^{\circ})$ でデータ取得範囲が異なるのは、異なる偏光角を持つデータを足し合わせて任意の偏光角を持つイメージデータを作成することを考慮した時に、図 4.7 のように同じ大きさの領域でデータを取得すると天球上の四角領域のイメージを作成するのが難しくなるからである。

(a) $\phi_x = 0^\circ, 90^\circ$ と $\phi_x = 45^\circ, 315^\circ(-45^\circ)$ のデータ取得領域が同じ場合。



(b) 実際の偏光撮像実験のデータ取得領域。

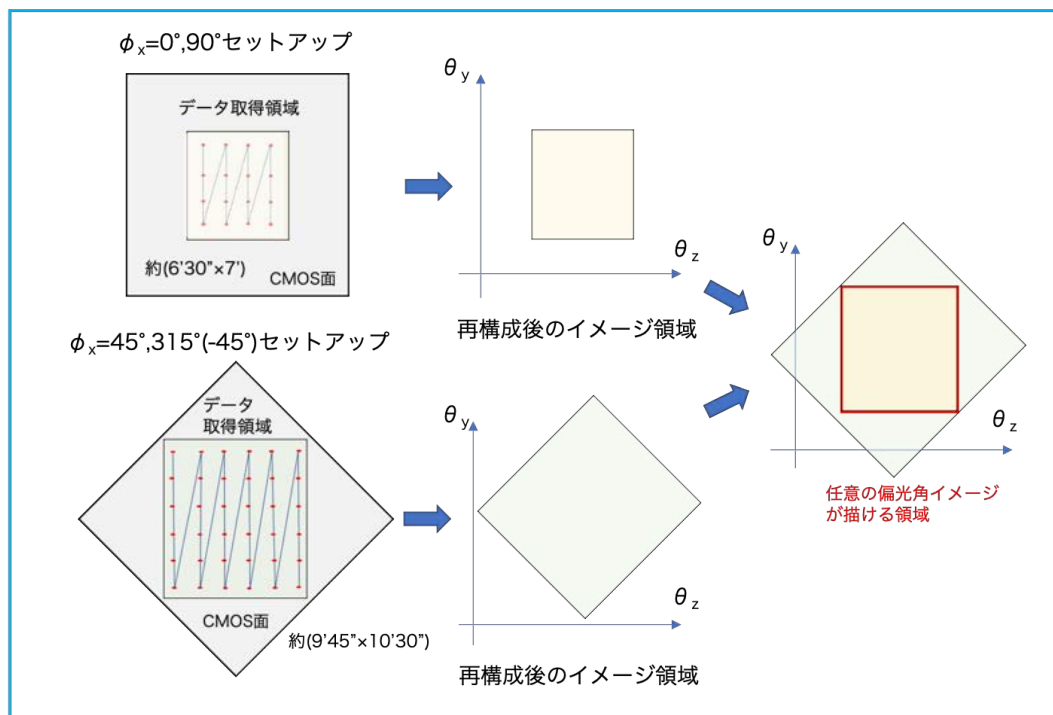


図 4.7: 全 ϕ_x で (θ_z, θ_y) が同じ範囲のデータ取得を行った場合のイメージ。ステージを動かすことで、図中青線と赤点で示されるように CMOS に対するビーム中心を移動させながらデータを取得する。この時 (a) $\phi_x = 0^\circ, 90^\circ$ と $\phi_x = 45^\circ, 315^\circ(-45^\circ)$ のデータ取得領域が同じ場合。(b) 実際の偏光撮像実験のデータ取得領域。(a) の場合、それらをを合成して作られるイメージ領域の形が四角形でなくなってしまう。

表 4.2: 偏光測定実験データリスト

センサ種類	エネルギー	回転角セット	ゲイン	減衰フィルタ	総露光時間
glassセンサ	16 keV	B	2	Cu 140 μm	110 s
	24 keV	B	1.5	Cu 460 μm	110 s
	32 keV	A	1	Cu 860 μm	70 s
NIRセンサ	16 keV	C	2	Cu 140 μm	170 s
	20 keV	A	2	Cu 250 μm	70 s
	24 keV	C	1.5	Cu 460 μm	170 s
	28 keV	A	1.5	Cu 610 μm	70 s
	32 keV	A	1	Cu 860 μm	70 s

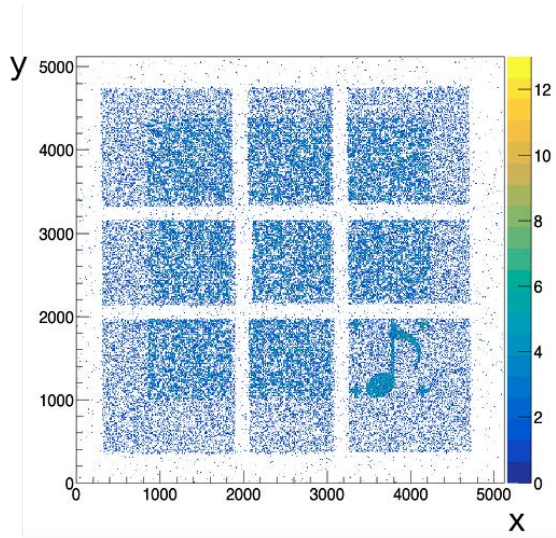
表 4.3: 偏光撮像実験データリスト

センサ種類	エネルギー	ゲイン	減衰フィルタ	回転角 (ϕ_x)	データ取得領域	総露光時間
normal センサ	16 keV	2	Al 600 μm	$0^\circ, 90^\circ$	約 ($6'30'' \times 7'$)	961 s
				$45^\circ, 315^\circ (-45^\circ)$	約 ($9'45'' \times 10'30''$)	810 s

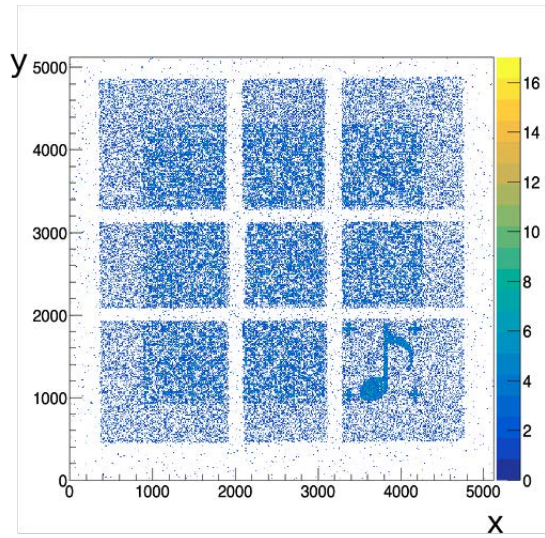
4.5 符号化開口を用いて取得したイベントデータ

偏光撮像実験では図 4.4 をビームとセンサの間に配置し、ビームを照射した。ビームを当てながら、ステージの (θ_z, θ_y) を変化させて、マスクによりできた影を取得していく。この時にビームとマスクにより散乱された際の散乱光や、ステージを大きく動かした際に複数のマスクで作られる影が重ならないように、事前にコリメータを製作し、マスクとセンサの間に配置した。ビーム照射により得られたイメージは図 4.8 のようになり、マスク 8 領域と音符の構造が確認される。各セットアップでパターンの開いた領域はイベントが多く、その外側のイベント密度が薄い領域はステンレスを透過してセンサに入射した X 線イベントであると考えられる。また各パターン領域間の X 線イベントがほとんど無い部分に関しては、コリメータにより完全に X 線が遮られている部分と考えることができる。アライメントのため、 (θ_y, θ_z) を変化させながら、最もコリメータによる影の幅が狭くなるように調整を行った。コリメータは厚さ 300 μm で作られ、センサのピッチサイズは 2.5 μm なので、光学系が理想的にアライメントされている時、この幅は 120 ピクセルになる。しかし実際には (θ_y, θ_z) のステップサイズに起因する、理想的なアライメント位置の不確定性や、コリメータのたわみなどに影響により 120 ピクセルよりも大きな値になっている。

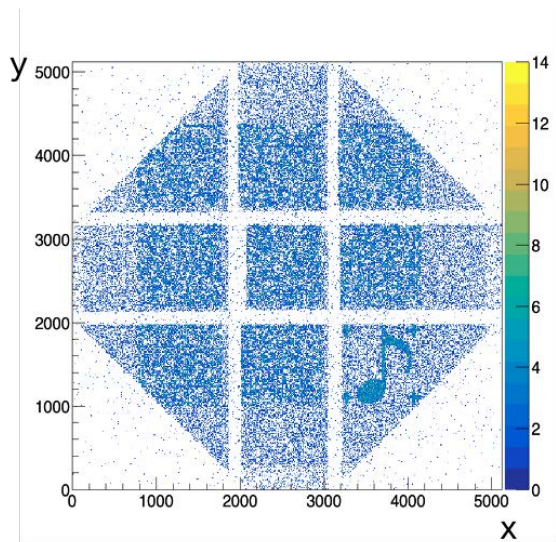
(a) 0° セットアップ



(b) 90° セットアップ



(c) 45° セットアップ



(d) $315^\circ (-45^\circ)$ セットアップ

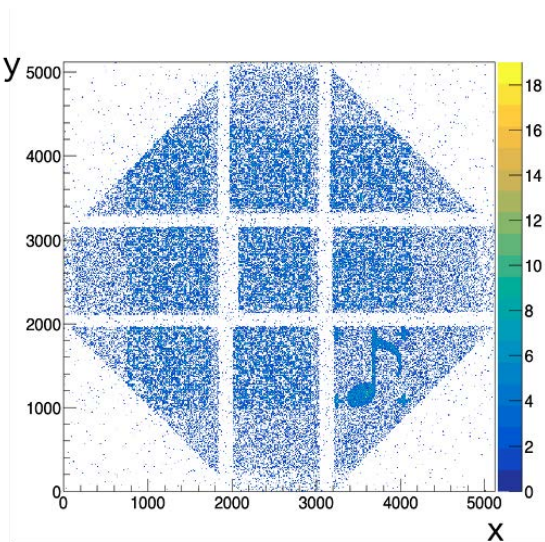


図 4.8: 偏光撮像実験で取得されたマスクを通したビームイメージ

第5章 ダブルイベントを用いた偏光解析

この章では SPring-8 実験で得られたデータを用いた偏光解析の詳細に関して記述する。まず本修論で記述する偏光計の偏光測定原理について、その後解析に用いるパラメータの調整に関して述べる。その後実際に SPring-8 実験で取得したデータを解析し、検出器の偏光に対するモジュレーションファクタ (以下 MF) の決定、センサ毎の比較を行う。同時に、エネルギー分解能や検出効率といった検出器の基本性能も測定・比較する。

5.1 偏光検出方法の検討

偏光の検出のため本修論では光電効果を利用する。光子が検出器面に入射し、光電効果を起こし光電子が放出された時、光電子は Bethe-Bloch の式 (e.g., Longair, 2011) を満たすようにエネルギーを落としながら運動し¹、検出器はその運動を平面的な波高値情報として出力する。CMOS イメージセンサ内で光電子は偏光方向に飛び出しやすく、単位角度あたりに飛び出す電子の確率分布は正弦関数的である (2.3.1 節参照)。従って、偏光解析においてはイベント数や割合の方向分布を三角関数 $P(\phi) = A \sin(2\phi + B) + C$ でフィットする手法が多く用いられる。ここで $P(\phi)$ は常に正の値をとる関数となる。この時偏光計の偏光測定性能を示す指標として MF が多用される。MF は検出器の応答が偏光角に対して持つ変調の度合いを表したパラメータであり、観測に用いた偏光光の偏光度を f とすると

$$\text{MF} = \frac{1}{f} \frac{A}{C} \quad (5.1)$$

で記述される。MF は偏光光に対する感度を示す 0-1 の間を取る関数で、1 に近い値を取るほど“良い”偏光計といえることができる。このフィッティングに用いた関数はモジュレーションカーブと呼ばれ、この関数が既知の偏光計を用いることで、未知の偏光度と偏光角を持った偏光光の測定を行うことができる。具体的に偏光光の偏光度 f 、偏光角 ϕ_0 はそれぞれ以下のように記述できる。

$$f = \frac{1}{\text{MF}} \frac{A}{C} \quad (5.2)$$

$$\phi_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{B}{2} \quad (5.3)$$

本章では先行研究 (會澤, 2020) と同様にダブルイベントのみでモジュレーションカーブを描き、偏光解析を行う。

5.2 偏光検出性能の評価

ここでは SPring-8 で取得された偏光ビームデータを用いて検出器の偏光検出性能を評価する。取得されたデータから X 線イベントを抽出し、ダブルピクセルイベントの内特定の方向に電子が放

¹実際には散乱等の影響も受け、簡単に記述することはできない。

表 5.1: 偏光測定実験におけるグッドピクセル条件

センサ名	パラメータ	ゲイン 1	ゲイン 1.5	ゲイン 2
sensor(normal)	ペDESTAL (ADU)	-	-	0-300
	不偏分散 (ADU)	-	-	0.5-11.2
sensor(glass)	ペDESTAL (ADU)	0-250	0-275	0-300
	不偏分散 (ADU)	0.5-6.6	0.5-8.7	0.5-11.2
sensor(NIR)	ペDESTAL (ADU)	0-210	0-230	0-250
	不偏分散 (ADU)	0.5-6.1	0.5-8.8	0.5-11.5

出された割合を取得する。検出器を回転させながら取得したデータに対して解析を繰り返し、異なる偏光角に対する検出器応答を用いてモジュレーションカーブを記述する。なお本章では SPring-8 で取得された全データに対して、偏光解析を行う。

5.2.1 X 線イベント解析：グッドピクセル選別

X 線イベント解析では 3.6.1 節で記載したように、グッドピクセル選別、ペDESTAL 除去、イベントの検出、イベントの形状判定の流れで行っていく。グッドピクセル選別では、ダークのペDESTAL 空間分布と波高値の不偏分散分布を用いて解析に使用するピクセルを決定する。SPring-8 で取得したビームデータ取得の直前に行ったダーク測定データを用いて算出したグッドピクセル条件は表 5.1 のようになり、これを満たすピクセルを用いて解析を行った。また 3.5.1 節でも記述したように、SPring-8 実験で X 線ビームを当てている最中に一定波高値を連続出力するピクセルが出現した。このピクセルは測定中波高値の変動が全く見られず (波高値の不偏標準偏差は 0)、ピクセル分布も列や一部に偏った分布になっている (図 5.1)。ダークデータ毎にそのピクセル数や分布が異なり、実験中ビームを当てることによりセンサに異常が生じたものと考えられる。

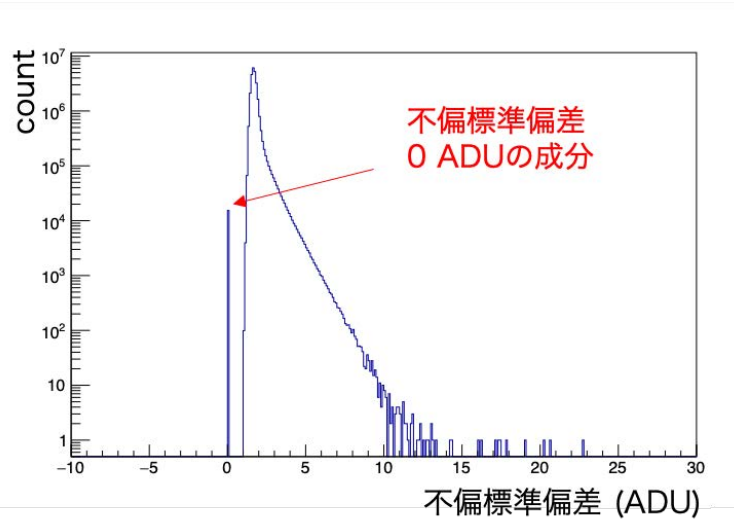
5.2.2 X 線イベント解析：スプリッドスレシヨルドの最適化

3.6.1 節でも記載したように、イベント形状判定はスプリッドスレシヨルドの値に大きく影響を受け、ダブルイベントのみを用いる本解析において、スプリッドスレシヨルドは解析における重要なパラメータとなりうる。そこで、normal センサを使用して 16 keV のビームを取得した偏光撮像のデータに対して、スプリッドスレシヨルドの最適化を行う。なおこの解析ではデータ解析時間の短縮のため、偏光撮像実験の各 ϕ_x に対するセットアップで (θ_y, θ_z) を変えながら取得した複数フレームのデータのうち 1 フレームずつを取り出し解析している。

スプリッドスレシヨルドが小さくしすぎるとノイズ混入の確率が高くなり、実際に光電子がエネルギーを落としていないピクセルも光電子の軌跡情報として解析してしまい、電子放出方向推定精度が悪くなる。一方でスプリッドスレシヨルドを大きくしすぎると、本来のイベントの一部のみをイベントと認識してしまい、電子放出方向を十分に推測することができなくなる。またスプリッドスレシヨルドを変化させることで、イベント内におけるダブルイベントの割合も変動するので、統計量も評価した上でのスプリッドスレシヨルド最適化を行う必要がある。

図 5.2a, 図 5.2b はスプリッドスレシヨルドを変化させた時の、それぞれビーム成分におけるダブルイベント割合と MF である。スプリッドスレシヨルドを変化させてイベント抽出を行いながら、エネルギースペクトルを確認し、それぞれのスペクトルのビームピークをガウシアンでフィットし

(a) 異常ピクセルを含むダーク波高値の不偏標準偏差分布。



(b) 不偏標準偏差が0のピクセルのCMOS上での分布。

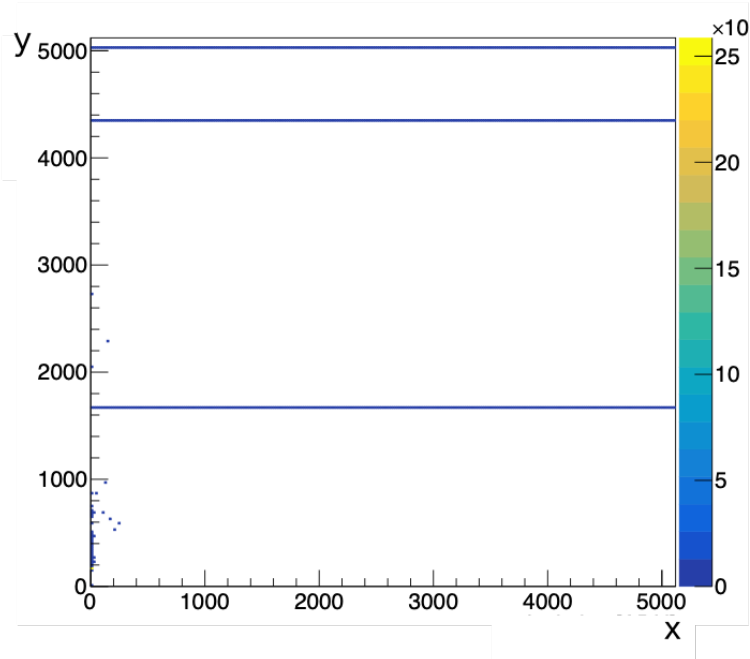


図 5.1: SPring-8 実験最中に見られた一定波高値を出力し続ける異常ピクセルに対して、(a) 異常ピクセルを含むダーク波高値の不偏標準偏差分布。(b) 不偏標準偏差が0のピクセルのCMOS上での分布。CMOSの 20×20 ピクセル領域毎の該当ピクセル数で色付けされている。これらの不偏標準偏差やピクセル分布はあくまでも1例である。

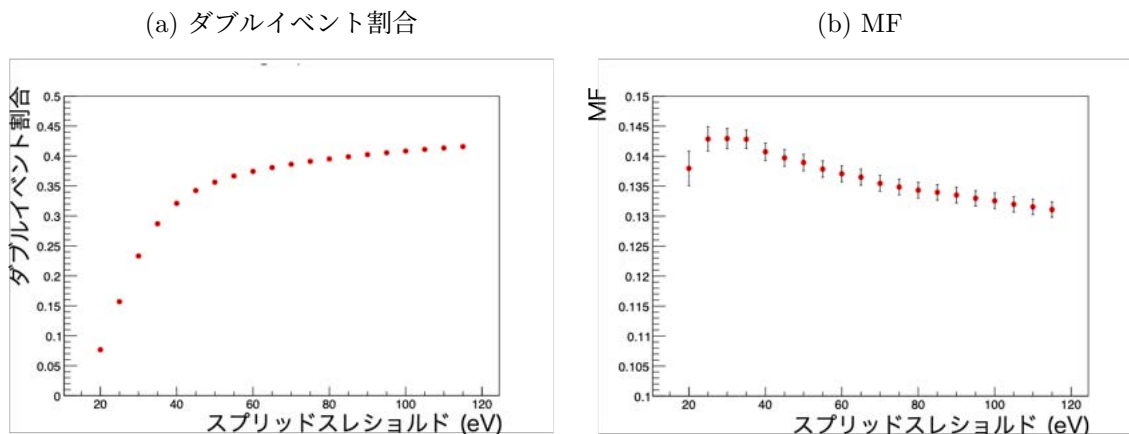


図 5.2: スプリットスレシヨルドを変化させた時の (a) ダブルイベント割合の変化、(b)MF の変化。

た時の $\pm 2\sigma$ の範囲を解析対象とした。スプリットスレシヨルドを変化させながら 5.2.4 節、5.2.5 節で後述する方法を用い、モジュレーションカーブによるフィッティングを行い MF を算出する。ダブルイベント割合を多くすることでビームイベント中でより多くのイベントを偏光解析に用いることができ、より精度の高いイベント解析が行える。スプリットスレシヨルド 40 eV 以下では、ほとんどのイベントが広がったイベントと判定されるため、ダブルピクセルイベントは急激に減少している。また MF の分布では、スレシヨルドが 25 eV 付近にピークをもち、スレシヨルドの増加に従って MF が減少する。統計的な観点からはスプリットスレシヨルドは比較的大きい方がよく、MF の観点からは比較的小さい方がよい解析を行えると言える。

最適化を図るため、我々は Minimum Detectable Polarization(以下 MDP) を用いた。これは偏光観測における偏光検出限界を示す感度指標で、観測値の統計的揺らぎを考慮した時に、検出器がある有意度以上で偏光を検出できる最小の偏光度である。具体的に MDP(99%confidence) は、モジュレーションファクター MF、ソースのカウントレート R_S 、バックグラウンドのカウントレート R_B 、観測時間 T とした時に、

$$\text{MDP} = \frac{4.29}{\text{MF} \times R_S} \sqrt{\frac{R_S + R_B}{T}} \quad (5.4)$$

のように記述され (Weisskopf et al., 2010)、この値は観測において偏光が 99%の有意性で観測されるためにソースの偏光度がいくら以上である必要があるかを示している。

この値が小さければ小さいほど偏光に対して高精度の観測を行っていると考えられることができる。今回 R_S は偏光解析に用いるイベント、すなわちダブルイベントのカウントレートと考えることができる。このカウントレートがバックグラウンドのカウントレートに対して十分大きいと仮定すると、

$$\text{MDP} \sim \frac{4.29}{\text{MF}} \sqrt{\frac{1}{TR_S}} \quad (5.5)$$

となる。ここで TR_S は観測時間中でのダブルイベント数を表す。この時、観測により取得された全イベント数 N_{total} 、全イベント中におけるダブルイベントの割合を r_{double} とすると、 $TR_S = N_{\text{total}} r_{\text{double}}$ と表せ、

$$\text{MDP} \times \sqrt{N_{\text{total}}} \sim \frac{4.29}{\text{MF}} \sqrt{\frac{1}{r_{\text{double}}}} \quad (5.6)$$

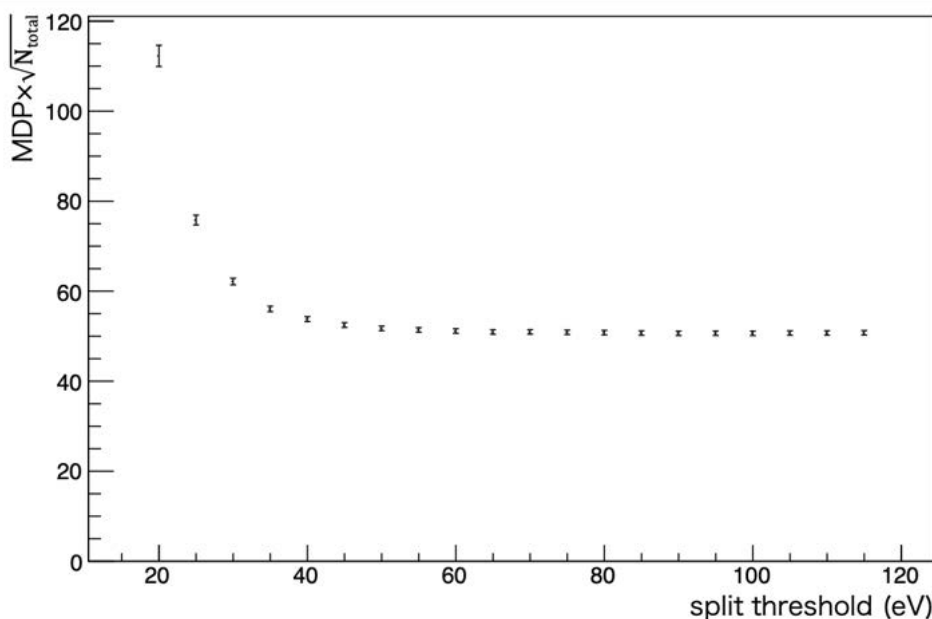


図 5.3: スプリッドスレシールドと $MDP \times \sqrt{N_{total}}$ の関係。50 eV 程度まではスプリッドスレシールドを増加させると縦軸の値は減少し、そこからほぼ一定になっている。

となる。MF と r_{double} は既知の値であるため、MDP と全観測イベント数の平方根の積を見積もることができる。この値をは観測の時間やソースフラックスに依存しない値で、これを最小化するパラメータを解析に用いることで、偏光計の偏光に対する感度を高くすることができる。図 5.3 は MF を変化させた時の $MDP \times \sqrt{N_{total}}$ の変化であり、スプリットスレシールドの値を増加させるとこの値は減少する傾向にあることがわかる。本来であればこのグラフにおける最小値を厳密に求めて偏光解析パラメータを定義する必要がある。しかし 50 eV 程度からほとんどグラフが減少していないことや、スプリッドスレシールドをあまりに上げすぎると偏光解析が全く行えないシングルイベントが増加してしまい 6 章で扱うような広がったイベント解析を行う際の統計量が減少することから、本解析では 50 eV をスプリッドスレシールドに採用した。これは normal センサのデータ取得条件下で波高値 8.5 ADU に対応する。

この値はイベントのピーク波高値の値から考えても十分低い。その一方でこの値がスプリッドスレシールドとして小さすぎないかを確認する必要がある。表 5.2 はスプリッドスレシールド 8.5 ADU の時のノイズ混入率を表したものである。この値はダークデータイベントデータと考えて、各ピクセル毎にペDESTAL 値を引いた後に、8.5 ADU 以上の波高値を持つピクセルの数を数えることにより算出した。ここではダークノイズ以外にも、ビームの高調波が施設のシャッターで遮断されず高エネルギーイベントとして混入する場合も含む (5.2.3 節参照)。

ダブルピクセルイベントを使用した偏光解析時のノイズの影響は、シングルイベントの隣接する 4 ピクセルにおいて、このスプリッドスレシールドを超える波高値を持ったノイズが混入した際に現れる。この時全く偏光情報を持たないイベントを、偏光情報を含むイベントと考えて解析してしまうため、結果的に検出器の偏光観測能力が低下する。この影響を考察するにはシングルイベントとダブルイベントの比 (図 5.4) を用いて、ダブルイベントに含まれるノイズの影響を見積もる必要がある。表 5.2 からノイズレートは非常に少なく、シングルイベントとダブルイベントの比はノイズの影響をほとんど受けないと仮定する。ダブルイベントに対するシングルイベントの比は $E_{split} \sim 8.5$ ADU 付近でどのセンサ、ビームエネルギーの組み合わせでも最大 0.6 程度で

表 5.2: ダーク測定から予測されるランダムノイズのレート (event/pix/frame)。

センサ名	ゲイン 1	ゲイン 1.5	ゲイン 2
glassセンサ	0.00066	0.00017	0.000012
NIRセンサ	0.00069	0.00017	0.000015

あり、ダブルイベントへのノイズの混入率は最も多く見積もった場合においてもダブルイベントの約 $0.00066 \times 4 \times 0.6 \sim 0.16\%$ 程度となるため、偏光解析にはほとんど影響しないと結論付けた。そのためスプリッドスレシールド値 8.5 ADU を用いた偏光解析は妥当であると考えられる。ここでは解析コスト削減のためそれぞれの組み合わせに対する最適化は行わず、8.5 ADU をそのまま E_{split} として使用する。

また、図 5.4 に関して、glassセンサの方が NIRセンサよりも single/double 比が大きい傾向が見られる。これは NIRセンサの方がセンサ内部でイベントが広がりやすい傾向があることを示唆しているが、センサ内部の詳細に関しては複雑であり、さらなる定量的な議論のためにはさらなる解析が必要である。

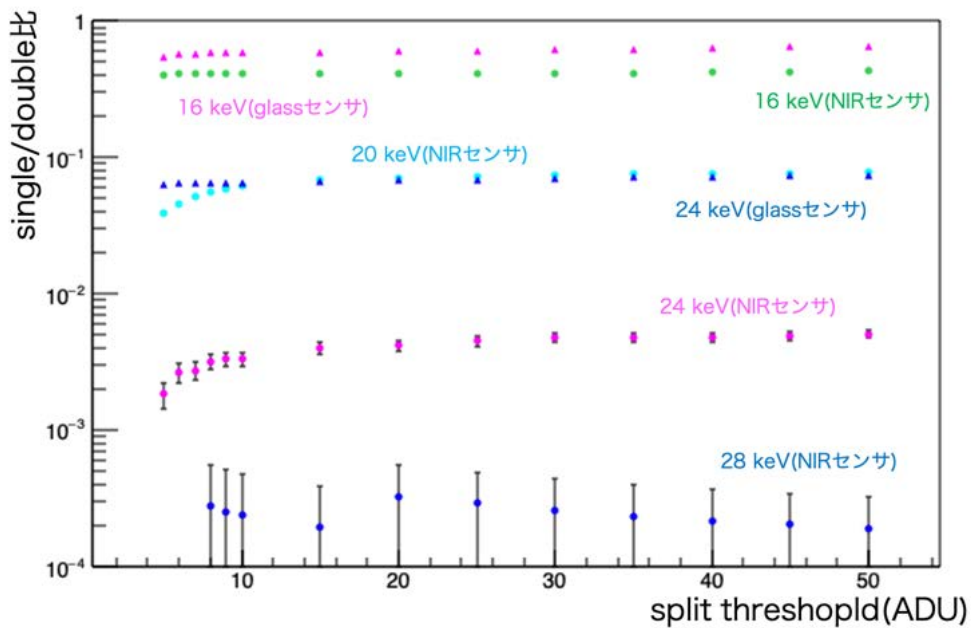


図 5.4: スペクトルのビーム成分 ($\text{mean} \pm 2\sigma$) に含まれるダブルイベントに対するシングルイベントの割合。32 keV のビームでは glassセンサ、NIRセンサ両方においてシングルイベントが全く観測されなかった。

5.2.3 データリダクション後のエネルギースペクトル

イベント処理後の 16 keV ビームに対するエネルギースペクトルと weight 分布は、それぞれのセンサで図 5.5 のようになる。スペクトルは weight1、2、3、それ以上で分けており、weight 毎にスペクトルの形状が異なるのがわかる。それぞれのスペクトルで最も単位 ADU あたりのカウント数が多いピークが 16 keV に対応する部分である。またシングルイベントのスペクトルではどの

センサも 3900 ADU 程度でサチレーションを起こしていることが確認でき、これは 12 bit 読み出しの最大値である 4095 ADU から各ピクセルのペドスタルを引いたものに対応する。

さらにピークより波高値が大きいイベントに関しては、(1) 環境放射線、(2) パイルアップ、(3) 高調波イベントが考えられる。パイルアップはフレームデータを取得する間に複数のイベント光子が同一、もしくは隣接するピクセル領域に入射した際に、複数光子を同一イベントとして解析してしまうことを指し、本来の入射光子それぞれのエネルギーよりも高いエネルギーイベントとして観測される。高調波イベントに関しては、SPring-8 では結晶を用いて単色光を取得しているが、この手法では周波数が整数倍の高調波もビームに混入してしまう。この高調波が散乱やエネルギーの一部を検出器内に落とした場合も、本来のエネルギーピークよりも高いエネルギーイベントが観測される可能性がある。

また、図 5.5 の weight 分布に着目すると、NIR センサとそれ以外のセンサで分布の形状が異なることが確認できる。イベントにおける weight は電子の検出器内での飛程が長ければ長いほど大きくなり、検出器が空乏層領域のみで光子と反応する単純構造の場合、最も確率的に生じやすい電子の飛程に対応する weight から²、weight の増加に伴ってイベント数が減少する分布が予想できる。normal センサや glass センサの weight 分布は上記のような定性的な理解が可能であるが、NIR センサでは weight が非常に大きいイベントでイベント数の増加が見られる。そこで weight 10 より大きいイベントのスペクトルを NIR センサに関して描くと、図 5.5e グレーのようになり、ビーム本体のピークよりも低波高値のピークを持つ構造が見られる。このような分布は検出器における空乏層領域以外の領域、例えば中性領域などで入射 X 線が相互作用した際に見られると考えられている (大野, 1995, 村上, 1999)。

5.2.4 ダブルピクセルイベントの抽出

ここでは取得されたイベントデータを用いて、検出器の偏光測定性能評価を行う。本研究では光電効果時に伴う光電子の放出角をダブルピクセルイベントを用いて推定し、偏光解析を行う。図 5.6 のように座標系を定義し、ダブルイベントに各方向のイベント数をそれぞれ N_{0° , N_{90° , N_{180° , N_{270° と定義する。またダブルピクセルイベント中における各方向のイベント数の割合を求め、それぞれ n_{0° , n_{90° , n_{180° , n_{270° とする。ここで、 N_ϕ と n_ϕ には以下のような関係がある。

$$n_\phi = \frac{N_\phi}{\sum_{\phi'} N_{\phi'}} \quad (\phi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ) \quad (5.7)$$

この時、偏光解析に使用するイベント分岐比としては検出器の無偏光への応答を考慮した分岐比を求める必要がある。検出器はその構造の非対称性などから、イベントが広がりやすい方向に偏りが生じる可能性がある。0° と 90° の偏光ビームデータを足し合わせることで、擬似的な無偏光のビームデータを作成し、ダブルイベントの分岐比を求めることで補正係数を算出、その後偏光データのダブルイベント分岐比を補正する。0° と 90° それぞれのセットアップ時の各方向イベント数をそれぞれ $N(0^\circ)_\phi$, $N(90^\circ)_\phi$ とすると、 ϕ 方向の補正係数 C_ϕ は

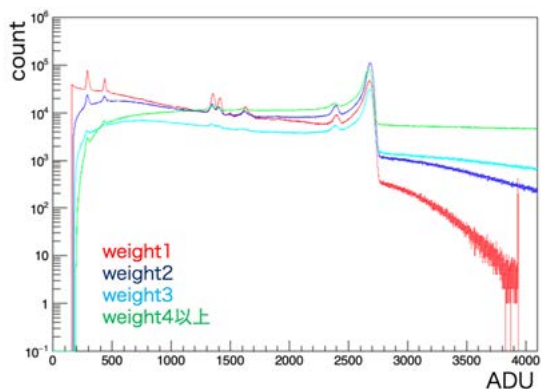
$$C_\phi = 0.25 \frac{\sum_{\phi'} N(0^\circ)_{\phi'} + r \sum_{\phi'} N(90^\circ)_{\phi'}}{N(0^\circ)_\phi + r N(90^\circ)_\phi} \quad (5.8)$$

となる。ここで 0° と 90° のダブルイベント強度の規格化定数 r を、

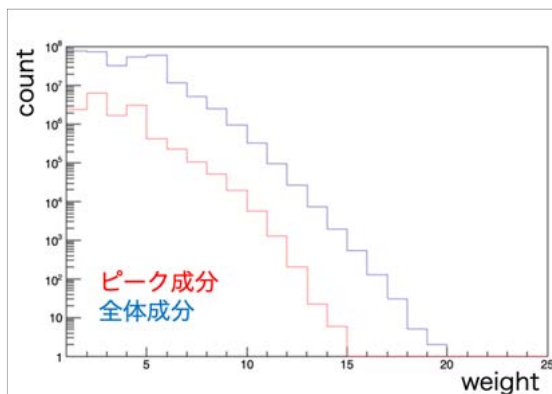
$$r = \frac{\sum_{\phi'} N(0^\circ)_{\phi'}}{\sum_{\phi'} N(90^\circ)_{\phi'}} \quad (5.9)$$

²Bethe-Bloch の式からある程度推測できるが、飛び出す方向が 360° あることや、熱拡散等の効果により精度の高い計算は難しい。

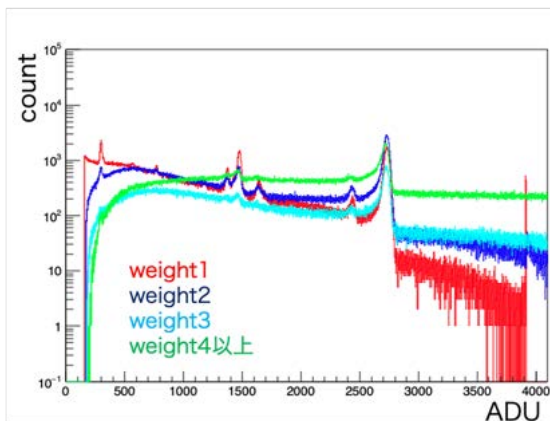
(a) normalセンサのスペクトル



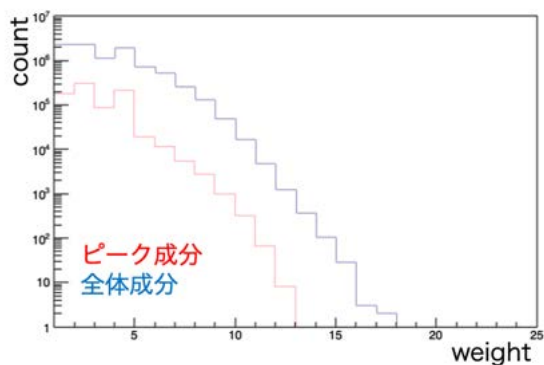
(b) normalセンサの weight 分布



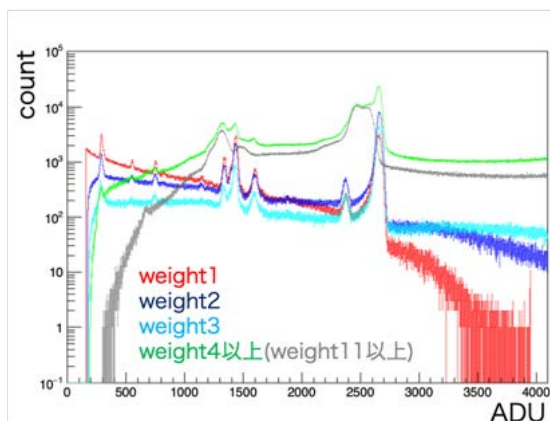
(c) glassセンサのスペクトル



(d) glassセンサの weight 分布



(e) NIRセンサのスペクトル



(f) NIRセンサの weight 分布

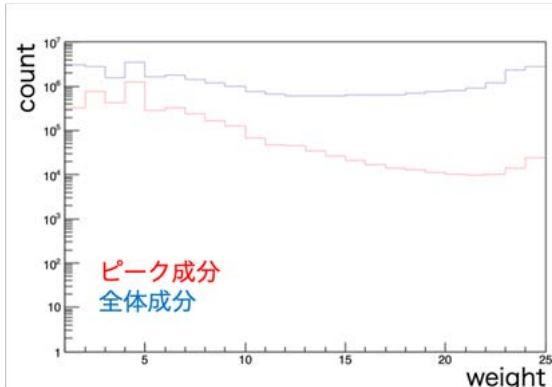


図 5.5: 16 keV ビームを照射した際のセンサ毎のスペクトルと weight 分布。(a)normalセンサのスペクトル。(b)normalセンサの weight 分布。(c)glassセンサのスペクトル。(d)glassセンサの weight 分布。(e)NIRセンサのスペクトル。(f)NIRセンサの weight 分布。スペクトルは weight1、2、3、それ以上のイベント毎に分けて記述している。NIRのみ weight が非常に大きいイベントが観測されたので、weight11 以上のイベントのスペクトルを追加した。また weight 分布ではスペクトルピークをガウシアンでフィットした際の 2σ 領域のビーム成分 (赤) と全体成分 (青) で分けている。

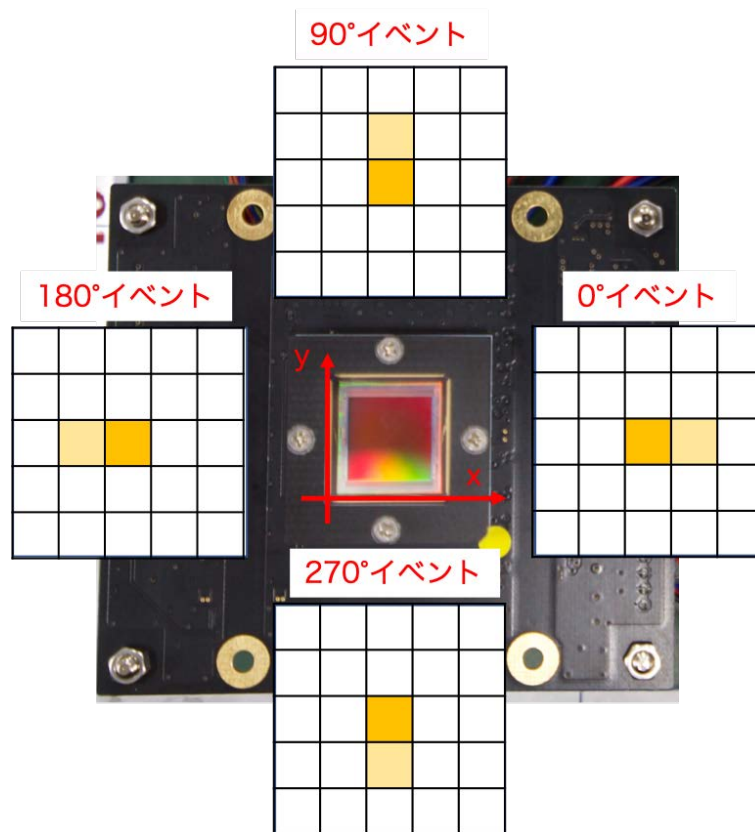


図 5.6: センサに対する座標系とダブルピクセルイベントの定義。

のように定義した。以降ダブルイベントの各方向への分岐比 n_ϕ は本節で求めた補正係数による無偏光バイアスを補正をしたものを用いる。

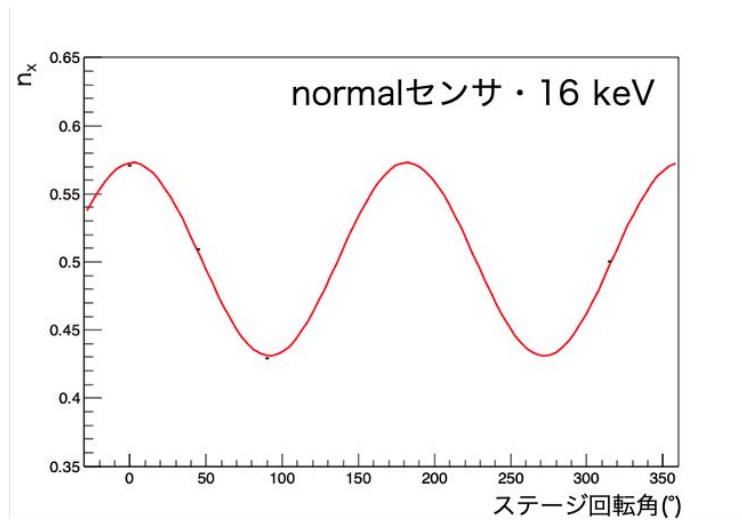
5.2.5 検出器モジュレーションの決定

SPring-8 実験ではステージを回転させながらデータ取得を行い、4 方向へのイベント分岐比を確認した。初期セットアップでビーム偏光方向とセンサ座標系における 0° 、 180° 方向を一致させ、ステージ回転角毎にセンサ座標系での x 方向のイベント割合すなわち、 $n_x = n_{0^\circ} + n_{180^\circ}$ を定義してステージ回転角、すなわちセンサに対する偏光角との相関を確認する。この時、光電子はビームの偏光方向に飛び出しやすい性質を持つので、 ϕ_x の変化に伴い n_x の値も変化し、モジュレーションカーブに相当するものを取得することができる。図 5.7 は normal センサ、glass センサ、NIR センサに対して 16 keV ビームを当てながらステージ回転を行った際の、 n_x の変化である。³データ点はステージ回転角が 0° と 180° の時にピークを持ち、光電効果の微分断面積から予想される分布をしている。モジュレーションカーブを用いてフィットを行い、ビームの偏光度を 100% と仮定して式 5.1 から検出器の MF を計算した (表 5.3)。normal センサの偏光角が真の値である 0° からずれているのは、系統的な誤差として考慮できていない項の存在が原因であると考えられる。系統的な誤差にはセンサのアライメント誤差⁴や、SPring-8 のビーム強度が非一様であることに起因する誤差等が考えられる。

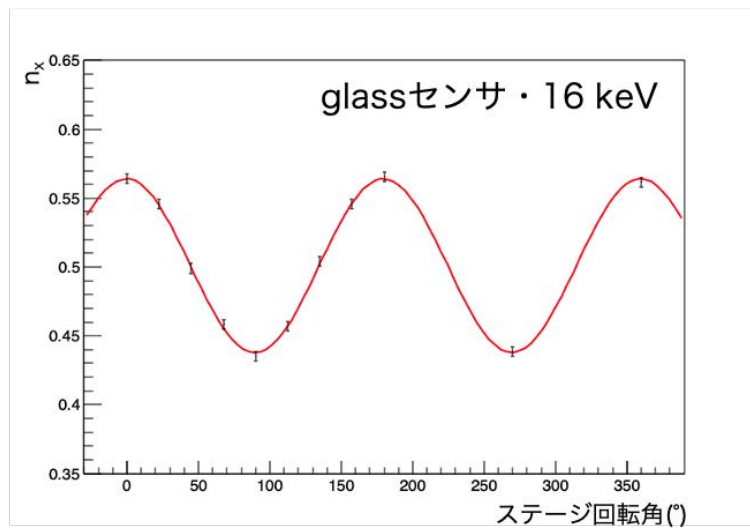
³normal センサに関しては $\phi_x = -45^\circ$ を $\phi_x = 315^\circ$ としてプロットしているが、幾何学的にこの二つは同一である。

⁴センサ面でのビーム像から 1° 程度と見積もられる。

(a) normalセンサ



(b) glassセンサ



(c) NIRセンサ

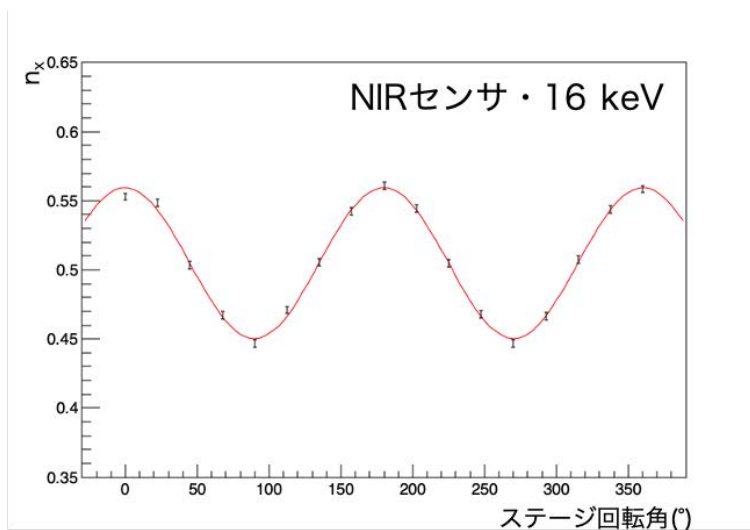


図 5.7: 16keV ビームを用いた際のモジュレーションカーブ。(a)normalセンサ。(b)glassセンサ。(c)NIRセンサ。偏光方向は 0° に対応する。

表 5.3: モジュレーションカーブによるフィッティングパラメータ

センサ名	エネルギー	A	B	C	MF	偏光角 (°)
normalセンサ	16 keV	0.0709±0.0002	86.4±0.2	0.5020±0.0002	0.1412±0.0004	-1.8±0.1
glassセンサ	32 keV	0.05±0.02	100±40	0.46±0.02	0.10±0.05	0±20
	24 keV	0.086±0.8	88±3	0.499±0.003	0.173±0.007	1±2
	16 keV	0.64±0.01	91±2	0.501±0.001	0.126±0.003	0±1
NIRセンサ	32 keV	0.07±0.02	100±20	0.50±0.02	0.14±0.04	0±10
	28 keV	0.079±0.009	100±10	0.509±0.007	0.15±0.02	-3±5
	24 keV	0.076±0.003	91±2	0.500±0.002	0.151±0.006	-1±1
	20 keV	0.079±0.001	88±2	0.498±0.001	0.158±0.003	0.8±0.8
	16 keV	0.0545±0.0009	90±1	0.5049±0.0007	0.108±0.002	0.1±0.5

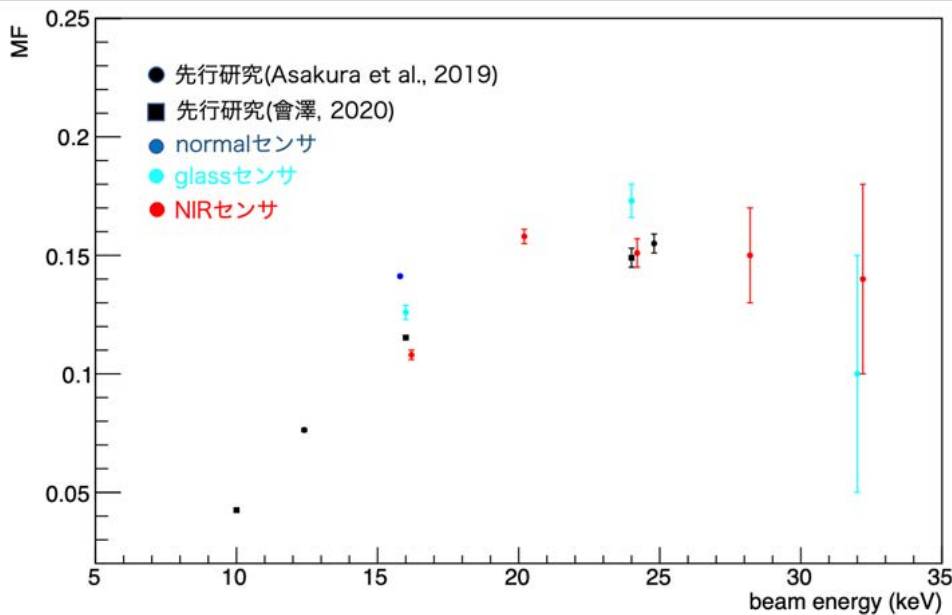


図 5.8: 各センサ毎の MF とビームエネルギーの関係と先行研究との比較。エラーは 1σ の統計誤差。見やすさのため、normal センサと NIR センサのデータ点を、それぞれ微量だけ低エネルギー側と高エネルギー側にシフトさせている。

5.3 3つのセンサーの差異

本ビーム試験では、各センサの MF、エネルギー分解能、検出効率の比較も行った。本節では、測定結果を示したのち、センサ間の比較を行う。

5.3.1 モジュレーションファクタ

各センサの偏光検出器としての性能を評価するために、表 5.3 を参考にして、センサとビームエネルギー毎の MF を比較する (図 5.8)。全体的な傾向として、エネルギーが 20 keV 以下では MF が減少している。これは Bethe-Bloch で計算される 20 keV 光電子の Si 内部での飛跡が $\sim 5 \mu\text{m}$ (約 2 ピクセルに対応) であることから理解できる。なぜなら、先行研究含め本研究の MF は 2 ピクセルにイベントが広がるダブルイベントを用いて解析をしており、20 keV 以下では典型的な光電子の飛跡が 2 ピクセル分より短くなるため、ダブルピクセルイベントを観測したときに角度の決定精度が小さくなるためだと考えられるからである。

また先行研究 (會澤, 2020, Asakura et al., 2019) は本研究の normal センサと同じものを使用しているが、統計エラーの範囲で結果が一致していない。これはアライメントのズレやビームの異なる領域をセンサに当てたことに起因する誤差など、複合的な原因が考えられ、単純に理解するのは難しい。

5.3.2 エネルギー分解能

エネルギー分解能はセンサを評価する上で最も重要な指標の一つである。図 5.9 は偏光測定実験で取得されたデータ中での weight2 イベントに対して解析したエネルギー分解能である。それぞ

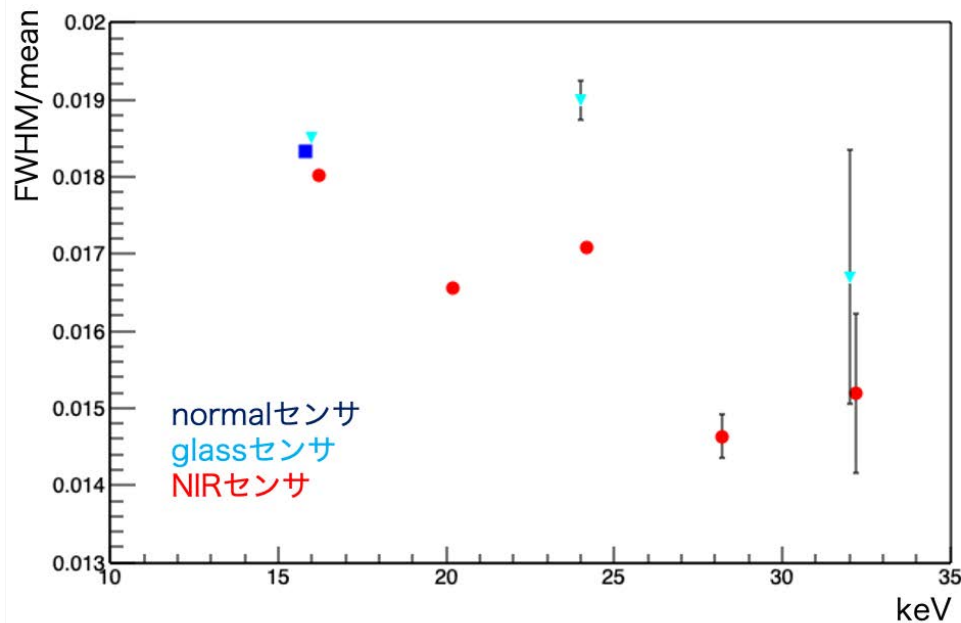


図 5.9: weight2 のイベントを用いたビームに対する各センサ毎のエネルギー分解能の比較。見やすさのため同じエネルギーでもセンサ毎にプロット点をずらしている。また全てのセンサでデータ取得の際には 16, 20 keV ではゲイン 2、24, 28 keV ではゲイン 1.5、32 keV ではゲイン 1 を使用している。

れの点の色がセンサの種類を示し、横軸がビームエネルギー、縦軸がピーク中心波高値とピークの FWHM(半値全幅) の比である。横軸に関してはデータ点の重なりを防ぐため、normal で取得したデータを低エネルギー側に、NIR センサで取得したデータを高エネルギー側に微量だけシフトさせている。ゲインが同じ時のエネルギー分解能に関しては、センサ毎にエネルギーが大きくなるほど縦軸の値が小さくなる傾向が見られる。これはエネルギーが高い方がセンサ内で生成される電子・ホール対の個数が多くなることにより、統計的な揺らぎの割合が減少するからであると考えられる。また glass センサと NIR センサで見た時に NIR センサの方がエネルギー分解能が良い傾向が見られる。

一般的にエネルギー E に対する分解能 δE の 1σ 分は

$$\delta E = W \times \sqrt{N^2 + \frac{EF}{W} + AE^2} \quad (5.10)$$

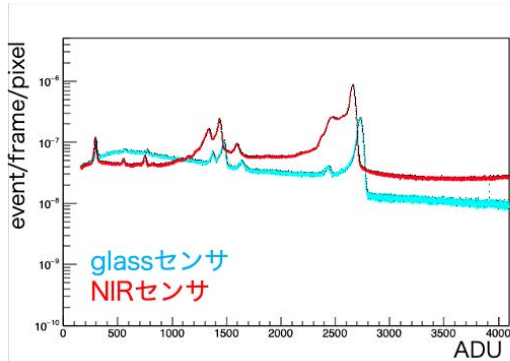
のように記述される (e.g. Koyama et al. 2007)。ここで W, N, E, F, A はそれぞれ検出器内での電子正孔対生成の平均エネルギー、RMS ノイズに対応する電子数、入射 X 線エネルギー、Fano factor、比例定数である。平方根中の第 1 項、第 3 項はそれぞれダークや読み出し等に起因するノイズ成分、現象論的な原因がよくわかっていない補正項であり、理想的な検出器では第 2 項⁵のみが残る。Si 検出器の場合、 $W \sim 3.6$ eV、 $F \sim 0.12$ であることを用いると、理想的な検出器では 32 keV、24 keV、16 keV の FWHM/mean 値はそれぞれ 0.0087, 0.010, 0.012 であり、実験データはこの値よりも大きな値をとる。

⁵統計的な揺らぎによる項。

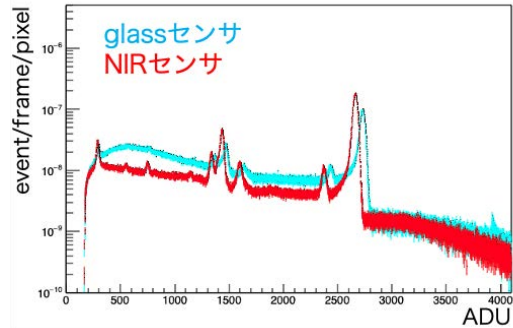
5.3.3 検出効率

検出効率は入射した X 線光子に対してどれだけの割合がセンサにイベントとして検出されるかを示した指標である。この値は検出器の組成や密度、空乏層厚、電極や絶縁体の厚み等によって決定され、入射 X 線のエネルギーにより変化する。glass センサと NIR センサを比較した場合は空乏層が厚い分 NIR センサの方が検出効率は高いと予想される。図 5.10 は 16 keV、24 keV、32 keV ビームを当てた時の glass センサと NIR センサの単位ピクセル、単位フレームあたりのスペクトルである。ビームに対して単純に全 weight イベントでどれだけの検出効率を取得できるかと、偏光解析の観点から weight2 イベントの検出効率の比較を行った。各スペクトル中にビーム成分を表すピークが見られる。glass センサと NIR センサに対しては同じ強度のビームを照射しているので、ピークをガウシアンで近似してその面積を積分して比較することで、ビームに対する検出効率の比を求めた。表 5.3 はビームエネルギーに対して全 weight と weight2 イベントを用いた時の、上記手法で算出した検出効率比である。また全 weight イベントで求めた検出効率比の方が、weight2 イベントで求めた時よりも大きい傾向にあることがわかる。これは NIR センサの方が X 線イベントが広がりやすい性質を示唆しているが、その原因解明にはさらなる実験や解析が必要である。またエネルギーが高くなるにつれて検出効率が高くなる傾向が見られる。これはエネルギーが高くなると glass センサは空乏層が薄いため、光電子がエネルギーを落とし切る前に検出部外に出ていく確率が高くなるからであると考えられる。この表の全 weight イベントの結果から、NIR センサは glass センサと比較してエネルギー帯域にもよるが数倍程度検出効率が良いことがわかった。ただし weight2 イベントのみに着目すると検出効率は 1.0–1.7 倍程度である。

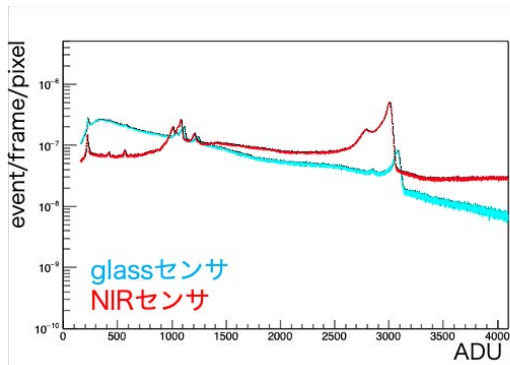
(a) 16 keV ビーム, 全 weight イベント



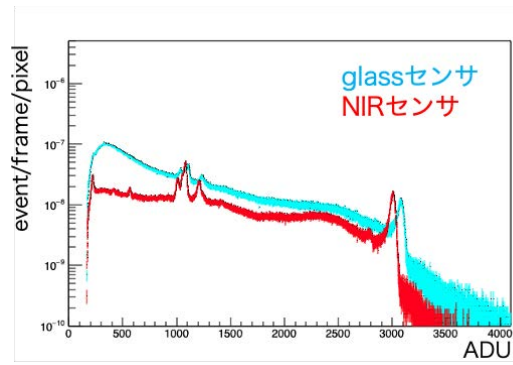
(b) 16 keV ビーム, weight2 イベント



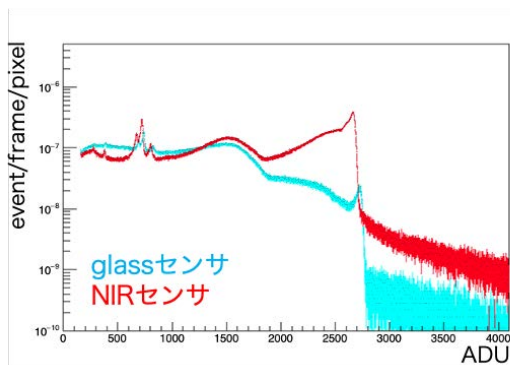
(c) 24 keV ビーム, 全 weight イベント



(d) 24 keV ビーム, weight2 イベント



(e) 32 keV ビーム, 全 weight イベント



(f) 32 keV ビーム, weight2 イベント

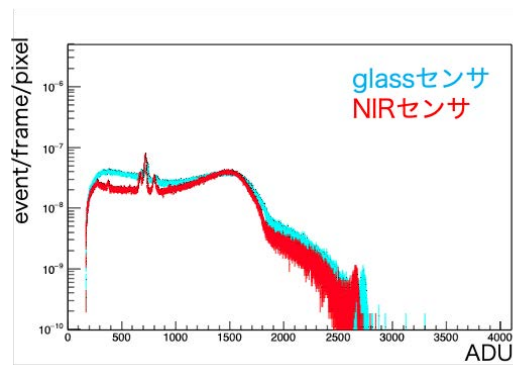


図 5.10: glassセンサと NIRセンサの単位ピクセル、単位フレームあたりに規格化したスペクトル。(a)16 keV ビームを当てた時の全イベント。(b)16 keV ビームを当てた時の weight2 イベント。(c)24 keV ビームを当てた時の全イベント。(d)24 keV ビームを当てた時の weight2 イベント。(e)32 keV ビームを当てた時の全イベント。(f)32 keV ビームを当てた時の weight2 イベント。

表 5.4: glassセンサと NIRセンサの 16 keV、24 keV、32 keV ビームに対する検出効率の比

検出効率比	16 keV	24 keV	32 keV
全 weight イベント	3.37 ± 0.02	5.23 ± 0.07	16.6 ± 0.5
weight2 イベント	1.72 ± 0.01	1.12 ± 0.04	1.1 ± 0.1

5.4 まとめ

本章では 2020 年 11 月に SPring-8 で取得した偏光ビームデータに対して、3 種類のセンサの偏光測定能力を MF を用いて評価した。その結果、NIRセンサは MF やエネルギー分解能で従来のセンサと遜色なく、検出効率が数倍程度上がっていることを示した。これは NIRセンサを用いることで天体観測に必要な時間を大幅に減らすことができることを示している。

第6章 ニューラルネットワークを用いた偏光解析

本章では3ピクセル以上に広がったイベントに対する、機械学習を用いた偏光解析について記述する。まず、3ピクセル以上に広がったイベントに関する簡単なレビューと本研究で用いるニューラルネットワークに関する基礎知識をまとめる。その後、シミュレーションで作成したデータを使用して、3ピクセル以上のイベントに対するニューラルネットワークを用いた偏光解析を評価した。さらに、2019年度にSPring-8で取得した実際の偏光ビームのデータを用いて、ニューラルネットワークによる偏光解析の実データへの性能を評価した。

6.1 3ピクセル以上のイベントでの偏光解析の重要性

SPring-8実験での偏光推定にはイベント領域の中心と、それに隣接するピクセルにイベントが広がるダブルイベントのみを用いた。しかし実験データ(図6.1)からわかるように、ビーム成分でのダブルイベントを含むweight2イベントの割合は、16 keVの時39.3%、24 keVの時13.5%とイベントの大部分というわけではない。一方イベント中で3ピクセル以上に広がるようなweight3イベントは16 keVの時40.5%、24 keVの時86.4%と、weight2イベントと比較すると16 keVでは同等、24 keVでは約6.4倍ほどである。weight3イベントは、weight2イベントと比較して統計的に十分であるだけでなく、自由電子がより長く検出器内を運動したイベントである可能性が高いので、電子の放出方向に関する情報が、シングル、ダブルイベントと比較した時に多く含まれていると考えられる。

本章では主に2019年にSPring-8のビーム実験で取得されたデータをもとに、3ピクセル以上のイベントに対する偏光解析の手法の考察を行う。この実験ではnormalセンサに10 keV、16 keV、24 keVのビームを照射して偏光に対する応答を確認し¹、全てのビームエネルギーに対して解析パラメータの最適化が行われている。

しかし、検出器内での電子の運動を単純な物理モデルに落とし込むのは難しく、3ピクセル以上に広がったイベントに対して光電子放出方向を推測する解析手法は確立していない。図6.2と図6.3は、それぞれ実際に16 keV、24 keVのビーム実験で取得された3ピクセル以上に広がったイベントイメージである。これらのイメージから光電子の放出方向を推測することが可能になれば、より高精度の偏光観測が行えると考えた²。

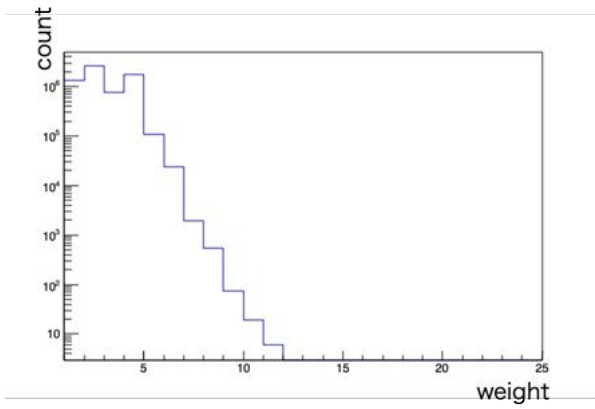
6.2 機械学習を用いた光電子放出角推定

このように複雑なアルゴリズムが要求される問題に対して、近年、機械学習を用いたアプローチが多く試みられている。機械学習は大量のデータを用いてコンピュータに分類や予想値出力を行うアルゴリズムを自動作成させる技術である。本研究ではこの機械学習のモデルの一つであり、汎用性の高さから広く用いられるニューラルネットワークを使用し、検出器内での光電子放出角を

¹データ取得にはメーカ純正評価ボードを使用している(會澤, 2020を参照)。

²実際にはコンプトン散乱由来の電子も含まれるが、反応断面積から光電効果に比べて非常に少ない。

(a) 16 keV



(b) 24 keV

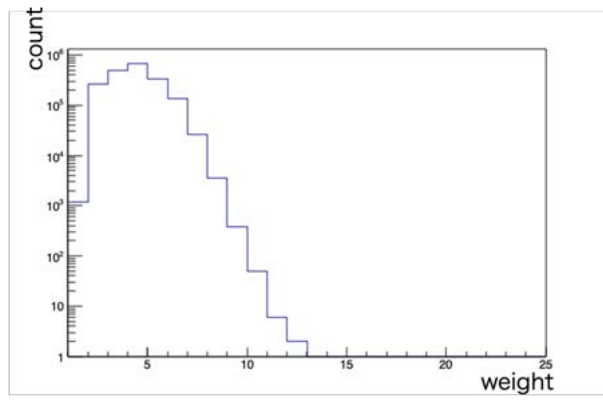


図 6.1: 2019 年 SPring-8 実験で取得した、ビーム成分中の weight 分布。(a)16 keV。(b)24 keV。横軸 weight はイベント 5×5 領域における、 E_{split} を超えたピクセル数。

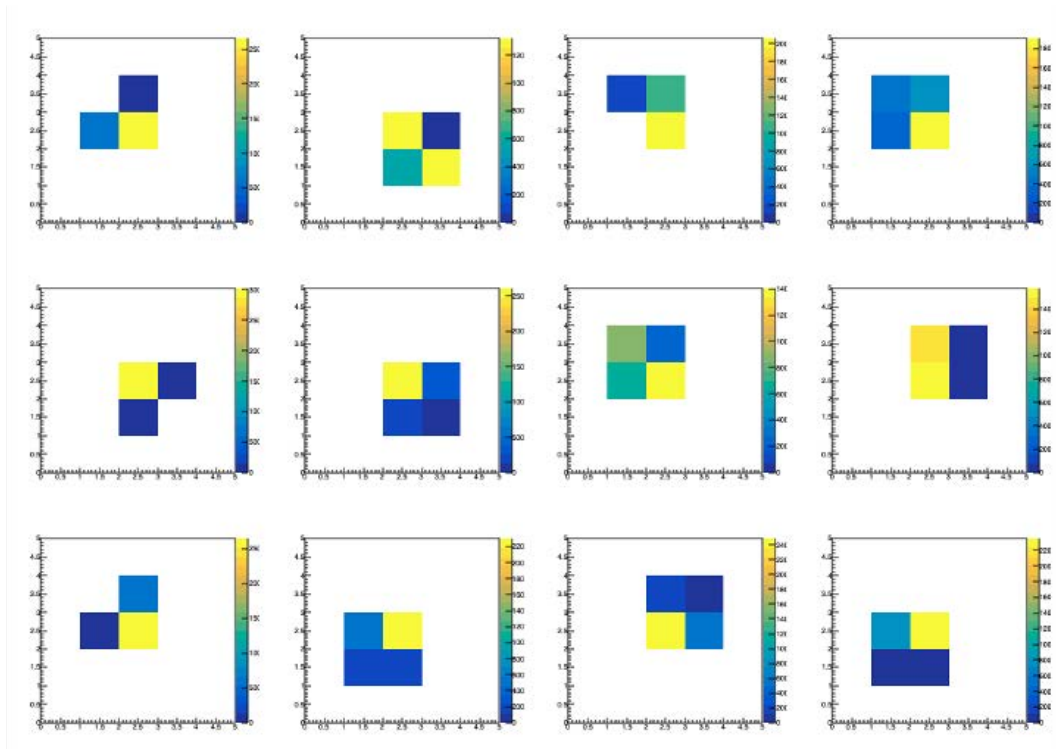


図 6.2: 2019 年に SPring-8 で取得した 16 keV データ中の weight が 3 以上の (3 ピクセル以上にイベントが広がった) イベントイメージ。カラーバーは中心波高値にスケールされている。

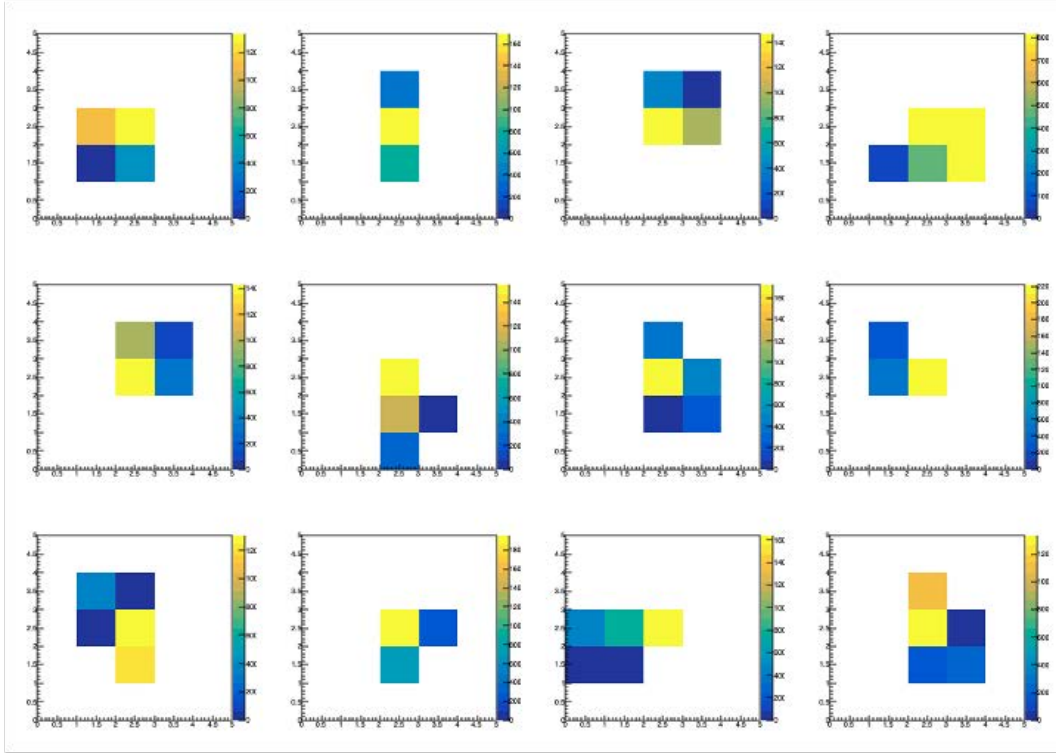


図 6.3: 2019 年に SPring-8 で取得した 24 keV データ中の weight が 3 以上の (3 ピクセル以上にイベントが広がった) イベントイメージ。カラーバーは中心波高値にスケールされている。

推測することで、偏光観測に応用する。なおニューラルネットの基礎知識に関しては斎藤 (2016) を参考にしている。

6.2.1 シミュレーションを用いたデータセット作成の手法

機械学習は一般的にデータを用いてアルゴリズム最適化³を行う。最適化の手法は大きく分けて「教師あり学習」と「教師なし学習」に分けられる。「教師あり学習」は、最適化に使用するデータとして問題とその問題に対する正解をセットとして与え、基本的にその正答率 (厳密には評価関数) が最大化 (最小化) するようにアルゴリズムのパラメータを調整していく。一方「教師なし学習」では、そのアルゴリズムが導き出す正解を決めずにデータを与え、モデルがデータ全体の傾向などを抽出するのに用いられる。本研究では問題とその問題の正解が、それぞれイベントイメージと電子の飛び出す方向に対応し、シミュレーションを用いたデータセットを用いることで「教師あり学習」を行う。具体的な解析手法として、シミュレーションによりピクセルが3つ以上に広がったイベントの学習用、偏光解析用のデータセットをそれぞれ用意し、学習用のデータを用いて最適化したアルゴリズムで偏光解析用データのモジュレーションカーブを評価した。シミュレーションのツールとして、シミュレーションライブラリ Geant4(GEometry ANd Tracking:Agostinelli et al., 2003, Allison et al., 2016, 2006) を利用した半導体検出器モンテカルロシミュレーションソフトである ComptonSoft(Odaka et al., 2010) を用いた。またイベント解析におけるスレシヨルドに関しては、先行研究 (會澤, 2020) を参考にした。

³一般的に学習と呼ぶ

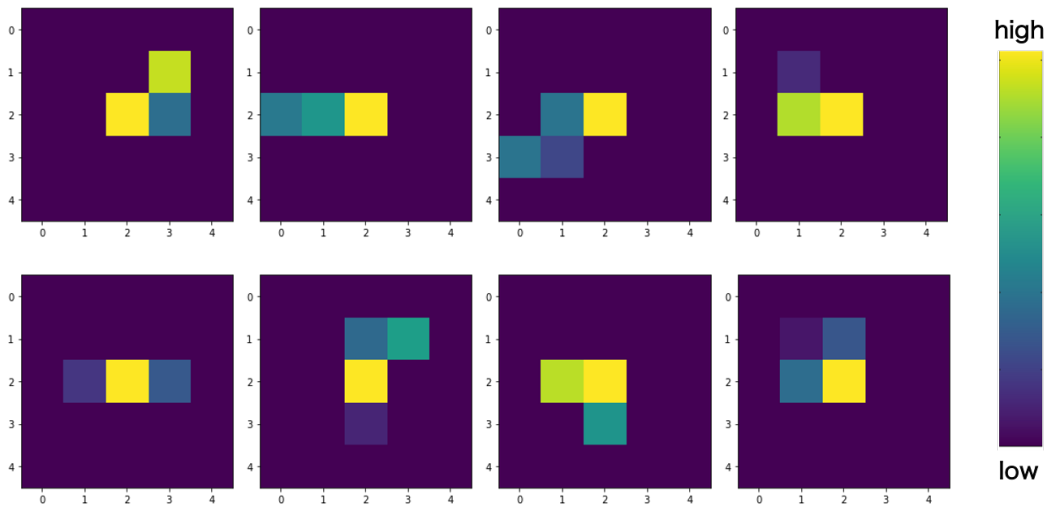


図 6.4: シミュレーションにより作成された 24 keV のイベントイメージ。イベント中における最大波高値を持つピクセルを中心にセンタリングしている。

ここでは 16 keV と比較して 24 keV の X 線の方が光電子の飛跡が長くなり、放出角推定も容易であると予想されることから、24 keV の X 線が入射した際に関して機械学習の適応を考える。検出器を模擬した 5 μm 厚の Si 板に 24 keV の X 線を照射して相互作用を記録し、Si 板を 2.5 μm 四方のピクセルサイズを持つセンサとして考えた時に予想される波高値を算出、検出イベントイメージの構築を行う。その後実際の観測データと合わせるため最大波高値を持つピクセルを 5 \times 5 領域の中心にセンタリングし、X 線イベントイメージを作成する (図 6.4)。また最初の入射 X 線と Si が相互作用した場所を始点に、放出された電子が初めて検出器と相互作用をした場所を終点としてベクトルを描き、電子が飛び出す方向と考える。この時機械学習の面から考えるとイベント波高値イメージが入力で、電子放出方向が出力となり、波高値イメージから電子放出方向を推測する精度がアルゴリズム評価の指標となる。

6.2.2 ニューラルネットワークを用いたモデル作成手法

ニューラルネットワークは図 6.5 のように入力層 (input-layer)、中間層 (intermediate-layer)、出力層 (output-layer) で構成されている。中間層はしばしば隠れ層 (hidden-layer) とも呼ばれ、この層の数を多くしたり、ノードと呼ばれる各層を構成するパラメータの数を増やしたりすることで、より複雑なモデルを作ることができる。

またニューラルネットワークは大きく分けて、全結合型、行列の畳み込みを用いた CNN (Convolution Neural-Network)、解析結果をフィードバックとしてパラメータに反映させる RNN (Recurrent Neural-Network) などに分類される。画像処理を行う多くの機械学習では CNN がその精度の高さから標準的に使用され、ガス検出機での電子放出角推測アルゴリズムを作成した先行研究 (Kitaguchi et al., 2019) でも CNN が使用されている。しかし CNN はモデルがより複雑であることや、行列の畳み込みを繰り返す毎に画像のサイズが小さくなってしまいうことから、今回のような 5 \times 5 の画像解析には最適とは言えない。そこで本研究では最も基本的な全結合型のニューラルネットワークを用いて解析を行い、本節ではこれに関する基礎知識をまとめる。

全結合型ニューラルネットワークの解析過程は、まず入力層に解くべき問題となるデータをベクトル形式で入力する。本修論ではここに 5 \times 5 ピクセルのイベントイメージを、25 成分からなるベ

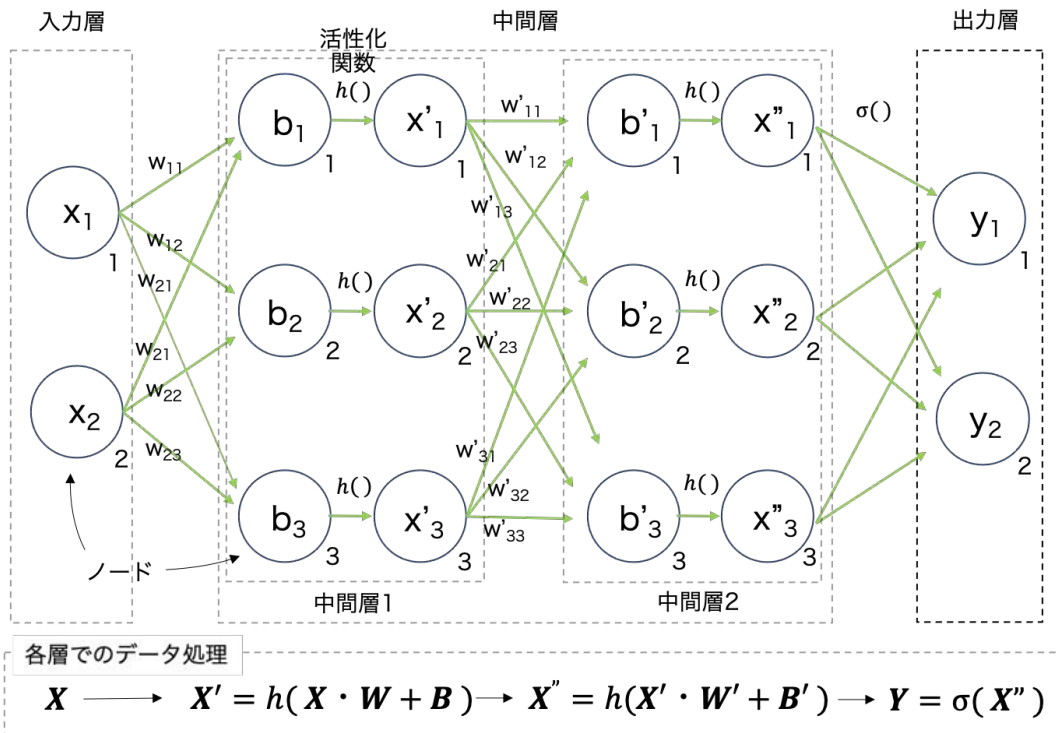


図 6.5: 単純な全結合型のニューラルネットワークの概念図。大きく分けてデータを入力する入力層、各ノードの値を用いた線形変換と活性化関数による非線形変換によりデータ処理を行う中間層、データ処理結果を欲しい形式に変換して問題に対する回答を出力する出力層に分けられる。中間層の層数や各層を構成するノードの数を増やすことでより複雑なモデルを構成することができる。

クトルに変換して入力する。その後それぞれの中間層で重み行列 \mathbf{W} とバイアスペクトル \mathbf{B} を使用した線形変換と、活性化関数を用いた非線形変換を繰り返し行う。活性化関数には従来まではステップ関数やシグモイド関数などが使用されていたが、近年、以下で記述されるような ReLU 関数が主に使用されており (LeCun et al., 2015)、ここでも ReLU 関数 $h(x)$ を採用することにする。

$$h(x) = \max(0, x) \tag{6.1}$$

中間層でのデータ処理を行った後に、出力層の各パラメータを決定する。出力層ではそのニューラルネットワークが扱う問題が「回帰」問題か「分類」問題かで採用される関数が異なる。本修論では角度をカテゴリ分けし、電子放出方向がどのカテゴリに属するかを「分類」して検出器モジュレーションを決定する。「分類」の問題においては出力層に以下のようなソフトマックス関数がよく使用され、本修論でもこの関数を採用する。なおここでの x_i は出力層に最も近い層の各ノードの値を表す。

$$\sigma(x_i) = \frac{\exp(x_i)}{\sum_{i=1} \exp(x_i)} \tag{6.2}$$

ソフトマックス関数は出力層での各ノード和が 1 になることから、そのノードが正解となる確率と解釈されることも多い。本修論ではこのソフトマックス関数により決定される出力層のノード値を比較して、最大値を持つノードが電子放出角カテゴリに対応するとして、放出角を決定する。

6.2.3 実際の学習プロセス

6.2.2節で紹介したようなニューラルネットワークに対して、教師データを用いて最適なアルゴリズムになるように、各パラメータの最適化を行う。最適化を行う上で指標となる評価関数を損失関数として定義し、これを最小化する事でアルゴリズムの最適化を行う。代表的な損失関数の一つに交差エントロピー誤差があり、本研究でもこの関数を用いて学習を行っている。これはニューラルネットワークの出力層のベクトルを \mathbf{y} (各成分 y_i)、教師データの正解成分のみ1であとの成分は0のベクトルを \mathbf{t} (各成分 t_i) とした時に、次の数式で表される。

$$E = - \sum_{i=1} t_i \ln y_i \quad (6.3)$$

この関数は正解となるカテゴリの出力値のみを抜き出し、データに対するアルゴリズムの推測が正確であればあるほど0に近づき小さくなる。この評価関数の値をサンプル平均して、より小さい値となるニューラルネットワークが最適なモデルとなる。この時にランダムにパラメータを変化させながら最適なモデルを探すのではなく、評価関数の微分係数を用いながら最適なパラメータ群を探索する。このような手法を勾配降下法という。

また学習を行う際には全ての教師データを一度に学習させるのではなく、学習データの一部のみをランダムに取り出し使用する学習を繰り返す。取り出した学習データによってアルゴリズムの損失関数を計算させ、勾配降下法を用いてパラメータを少し変化させる手順を繰り返す。この手法はミニバッチ学習と呼ばれ、一度の学習毎に取り出すデータ数をバッチサイズ、繰り返し学習の1サイクルを1エポックと呼ぶ。このミニバッチ学習法は短い計算時間でパラメータの最適化を行うことができ、データ量が多い時などに特に有効である。

さらにモデルの過学習の有無は、モデルが正しく学習を行えているかどうかを判断する上で、非常に重要な判断材料となる。過学習はモデルが学習データに対して過剰に適合してしまう現象であり、過学習を起こしてしまうと未知のデータに対する解析が正しく行えなくなる。そのため一般的に学習データ以外にテストデータを作成しておき、テストデータは学習には用いずに、過学習の有無の判断にのみ使用する。具体的には学習を繰り返す途中で、テストデータを読み込ませ、損失関数や正答率を学習データとテストデータそれぞれを使用した時で比較する。もし過学習が起きていればモデルが学習データに過剰に適合しているので、テストデータと比較したときに正答率(損失関数)が異常に高く(小さく)なる。過学習を防ぐための学習手法は多く挙げられるが、本修論では重み行列成分の二乗和で計算される罰則項を用いたL2正規化や、ランダムにノードを無視して計算しながらモデル構築を行うDropout(Srivastava et al., 2014)を組み合わせて用いた。

6.2.4 シミュレーションによるニューラルネットワークの構築

まずシミュレーションを用いて、エネルギーが24 keVの無偏光ビーム照射時のイベントデータを作成した。そこから3ピクセル以上に広がったイベントデータセットを作成し、ニューラルネットワークの学習を行う。具体的には電子が飛び出した方向を、検出器内の方位角0-360°を用いて表す。ただし ϕ がとりうる領域を図6.6のように8カテゴリに分割して、電子が飛び出した方向のカテゴリ推定をイベントイメージから行うようにする。シミュレーション時に算出した正しい電子放出角を各イベントイメージにセットとして与えた。無偏光ビームのデータに関しては約 1.2×10^6 イベントを用意し、このうちランダムに選出した90%を学習用に、残りの10%を検証(過学習の評価)に用いた。

図6.7はバッチサイズ16,384⁴で学習を行った時の学習曲線である。エポックとともに学習が進

⁴2進数で100000000000000

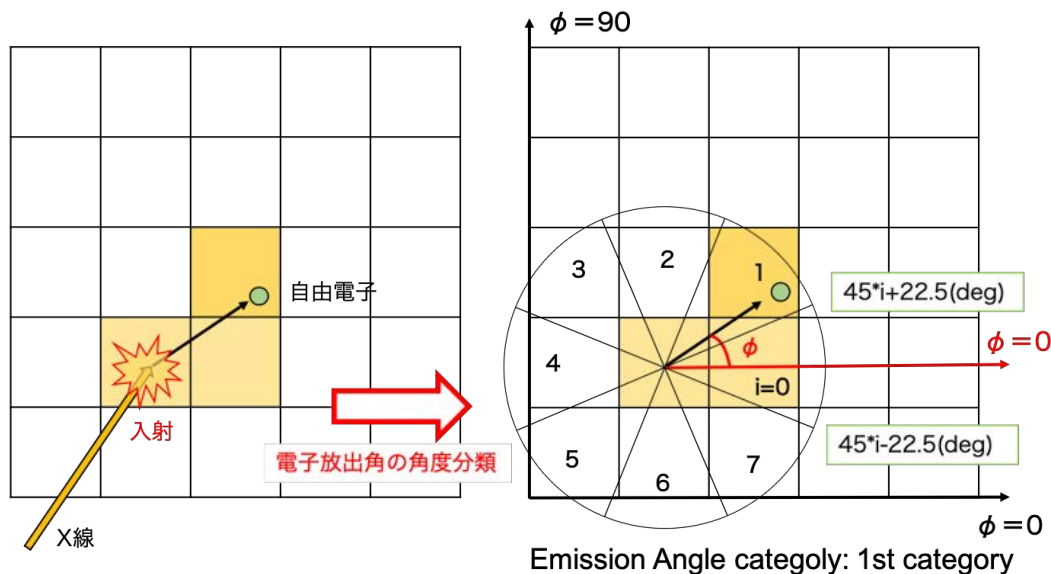


図 6.6: 電子の放出角のカテゴリー分類に関するイメージ。360° を -22.5° (337.5°) から 45° ずつ分割し、それぞれ 0 から始まるカテゴリー番号をラベルする。

み、損失関数であるクロスエントロピー関数の減少とデータ予測の正答率も増加する傾向が見て取れる。またエポックが 100 程度までで、学習用データのグラフとテストデータのグラフが大きく解離しておらず過学習の傾向が見られないことや、損失関数の下げ止まりが見られることから、エポック 100 で十分に学習が行われたとみなし、このモデルを用いて以降の解析を行う。なお過学習をしているケースでは、未知のデータに対する推測が正しく行えなくなり、テストデータに対してエポックの増加に従い損失関数は増加し正答率は減少する。このモデルでは学習曲線から 30%以上の正答率を出すことが分かり、全くランダムに判定を行う場合に予想される 12.5%よりも精度が高いことがわかる。

学習後のモデルを使用してイベントイメージから電子放出角を推定すると図 6.8 のようになる。今回出力層にはソフトマックス関数を使用され、その値はそのノードが正解である確率と解釈さ

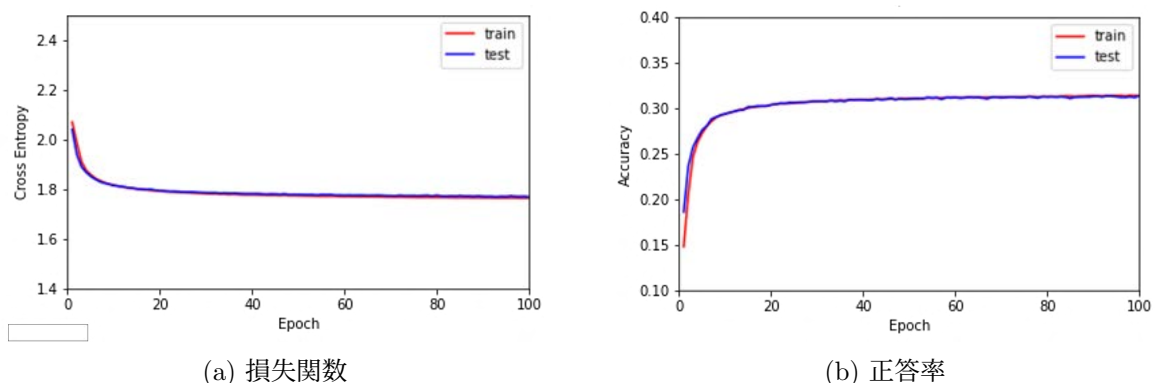


図 6.7: 24 keV の無偏光イベントに対してニューラルネットワークを学習させた時の横軸エポックの学習曲線。(a) 損失関数。(b) 正答率。なお、正答率はアルゴリズムが予測した角度が正解となる角度のカテゴリーと一致する割合で定義する。

れていた。各データに対して左が入力イメージ、右の棒グラフが出力層の各ノードの値となり、左からそれぞれカテゴリ 0-7 に対応している。この棒グラフの値から最も大きな値を持つカテゴリがモデルが予測する角度カテゴリと考える。また見やすさのためモデルの推測が正解と不一致の時は青、一致の時は赤にラベルしている。本解析では各データに対して棒グラフの最大値に対応する角度カテゴリを用いるが、棒グラフの値自体を用いた偏光角推測を行うことで、より高精度な偏光解析が行える可能性がある。

6.2.5 シミュレーションデータに対するニューラルネットワークを用いたモジュレーションの取得

図 6.2.4 で作成したモデルを用いて、3 ピクセル以上に広がった偏光 X 線イベントを用いた検出器モジュレーションの取得を行う。シミュレーションを用いて偏光度 100% で偏光角 0° 、 22.5° 、 45° の 24 keV 単色光により得られるイベントイメージを作成し、ニューラルネットワークに入力する。その後出力層から電子の放出角を求め、角度カテゴリーを決定する。3 ピクセル以上のデータ全てに対してこの解析を行い、角度カテゴリー毎の全イベント中に占める割合をプロットした後、モジュレーションカーブによりフィットする。ニューラルネットワークを用いたモデルが正しく構築されている場合、偏光角とモジュレーションカーブのピークは一致し、その振幅から算出される MF によりモデルを評価することができる。なおモジュレーションカーブを描くためのデータ点は、シミュレーションにより作成した無偏光ビームを当てた際の角度分布から算出される、補正係数を用いた補正を行っている。

図 6.9 は 3 つの偏光角のデータセットの、正解となる電子放出角分布と、ニューラルネットワークで推測した電子放出角分布である。光電効果を起こした際に放出される光電子は、偏光角方向に放出されやすい性質があるため、偏光方向分布に近い。 ϕ の偏光光と $\phi + \pi$ の偏光光は物理的な差はなく、 0° 、 22.5° 、 45° の偏光角を持つ X 線は、 180° 、 202.5° 、 225° 方向に偏光しているとも考えられる。よって、各データセットに対して、これらの偏光方向に対応する角度カテゴリーのイベント数が相対的に多くなると予想される。実際に正解の分布を確認すると、角度カテゴリー毎にイベント数は大きく変化している。偏光角が 0° の時には角度カテゴリ 0 と 4 が、偏光角が 22.5° の時には角度カテゴリが 0、1、4、5 が、偏光角が 45° の時には角度カテゴリが 1 と 5 が、正解の分布においてもニューラルネットワークを用いた分布においても、相対的にイベント数が多くなっている。この方向はピークの部分が偏光角方向に対応しており、モデルが光電子の放出方向を正しく推測できていることを示す。しかし正解の分布とニューラルネットワークを用いた分布を比較した時に、ピーク部分がなまされたようになっている。

モデルの偏光に対する感度を評価するために、得られた角度分布を使用してモジュレーションカーブを描き、得られたパラメータで MF を計算する。取得されたモジュレーションカーブは図 6.10 のようになり、そこから算出される MF、偏光角は表 6.1 のようになる。MF はどの 3 種類のどの偏光角に対しても 24% 程度となった。偏光角が 22.5° の時のみ 1σ の統計エラー内に偏光角が収まっていないが、それぞれの偏光角に対してほぼ偏光角の推測を行えている。

6.3 従来までの解析手法との比較

先行研究 (會澤, 2020) では 3 種類の手法を用いて、3 ピクセル以上のイベントに対する電子放出方向に関する考察を行った。ここではそれらの手法を参考に 3 ピクセル以上の全イベントに対して解析が行えるように手法を拡張し、ニューラルネットワークとの比較を行う。

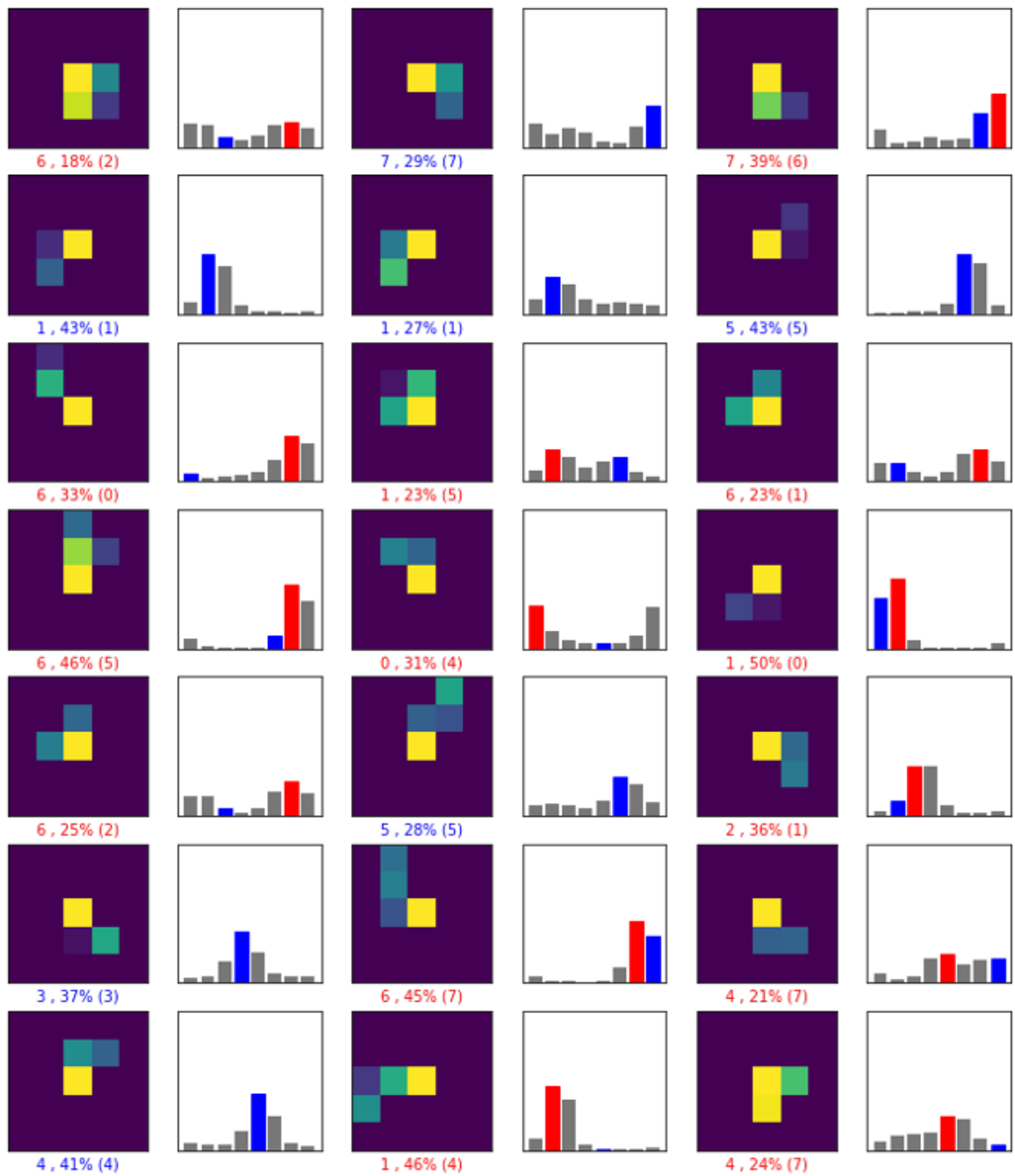


図 6.8: 学習モデルを使用した複数のイベントに対する電子放出角の推定。各データで、左：ニューラルネットワークに入力したイベントイメージ。イメージの下部には左からニューラルネットワークが予想した角度カテゴリー、モデルが計算した答えに対して、モデルが算出するそれが正解である確率。また見やすさのため、モデルが正しく角度を推測している場合、青文字で、間違っている場合赤文字で記載されている。右：ニューラルネットワークから出力された各カテゴリー毎に対してモデルが推測した、そのカテゴリーが正解であると考えた確率の棒グラフである。左からそれぞれカテゴリー 0-7 に対応し、棒グラフが高ければモデルはその方向に電子が放出された確率が高いと考えている。モデルによる予測が正解時と不正解時でそれぞれ青、赤に色付けしている。

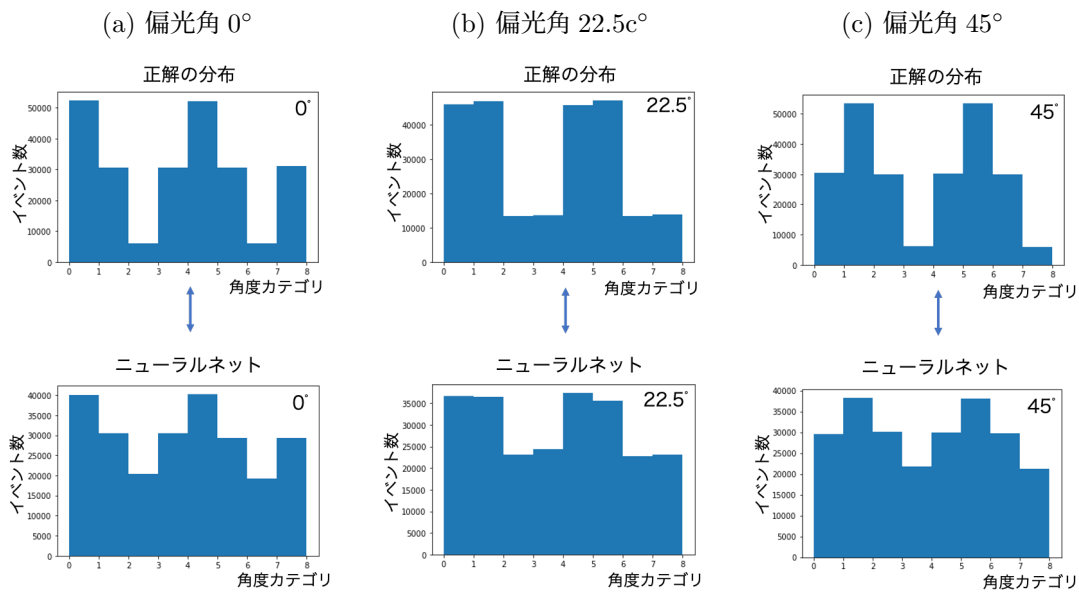


図 6.9: 電子放出角の正解データ (上パネル) と学習後のニューラルネットワークを用いた推測 (下パネル) の角度分布比較。(a) 偏光角 0° 。(b) 偏光角 22.5° 。(c) 偏光角 45° 。

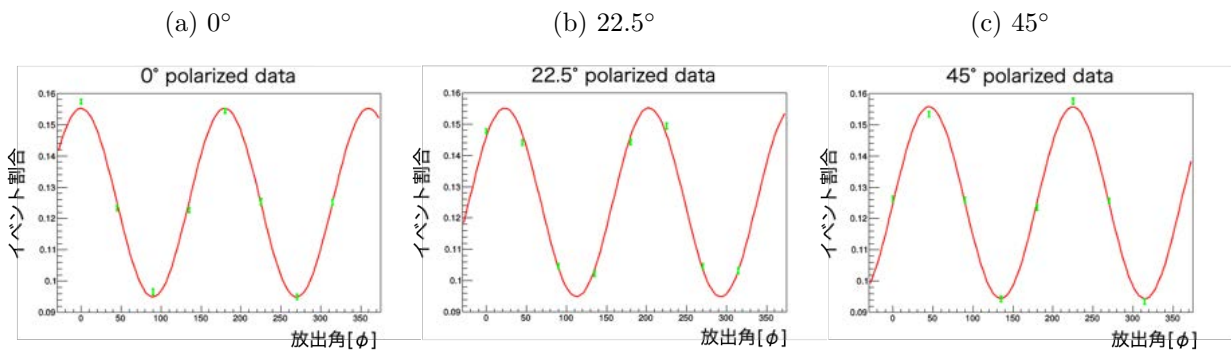


図 6.10: ニューラルネットワークから得られる (a) 0° 、(b) 22.5° 、(c) 45° の偏光光に対するモジュレーションカーブ。それぞれのモジュレーションカーブで偏光方向に対応する方向にピークを持つことがわかる。

表 6.1: ニューラルネットワークにより取得した MF と偏光角。

パラメータ	0°	22.5°	45°
MF	0.242 ± 0.003	0.244 ± 0.003	0.248 ± 0.004
偏光角 ($^\circ$)	-0.4 ± 0.4	23.2 ± 0.4	45.4 ± 0.4

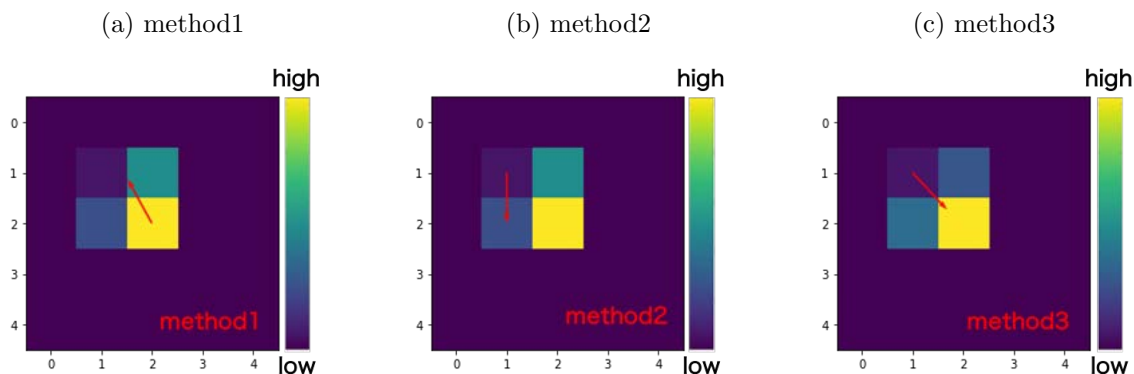


図 6.11: 従来までの手法を参考にした、電子放出方向の推定手法イメージ。(a)method1。(b)method2。(c)method3。

6.3.1 従来までの手法

會澤, 2020 ではイベントの形状を限定して以下の3つの手法を用いて電子放出方向の推測を行っていた。電子放出方向のベクトルの始点と終点を入れ替えても、6.2.5 で言及したように物理モデルとしては影響はないため、ベクトルの向きに関しては考慮していない (180° の任意性がある)。

(1) 中心からの重み付けベクトルを用いる -method1-

先行研究 (春日, 2019) で用いられていた手法である。イベント中で最大波高値を持つ中心ピクセルをベクトルの始点とし、中心ピクセルを座標中心とした時に、ピクセルの座標を波高値で重み付けして計算した波高値中心座標を終点としたベクトル方向に電子が放出されたと考える。

(2) イベント中の波高値の低いピクセルを使用する -method2-

「物質中を自由電子が運動する際に、進めば進むほど単位長さあたりに電子が落とすエネルギーが大きくなる」という性質に基づき、イベント中で最小波高値のピクセルから、2番目に波高値の低いピクセルに電子が放出されたと考え、電子放出方向を推測する。

(3) 最大波高値のピクセルから離れたピクセルを用いる -method3-

最大波高値のピクセルを静止ピクセルと考え、そこからもっとも離れたピクセルを光子の入射ピクセルと考える。最も離れたピクセルを中心とした波高値の重み付け位置ベクトルを計算し、その方向に電子が放出されたと考える。

これらの方法で光電子の放出方向を解析の一例を挙げると、図 6.11 のようになり、手法により電子放出方向に違いがあることがわかる。6.2 節で用いたデータを使用して、検出器モジュレーションを取得できるかどうかを確かめる。

それぞれの手法で無偏光データを使用して補正を行った時の偏光光に対するモジュレーションカーブとそこから導かれるパラメータはそれぞれ図 6.12、表 6.2 のようになる。行毎に上から method1・2・3 に対応しており、列毎に左から偏光角 0° 、 22.5° 、 45° に対応している。method1 では 0° でほとんどピークができず、 22.5° では偏光角とは異なるカテゴリーにピークが存在するように見える。一方 45° では偏光角とピークのズレは他と比較するとほとんどなく、偏光を高い精度で捕らえられていることがわかる。このような偏光角とピークの関係は method と偏光角の組み合わせによって大きく変化する。

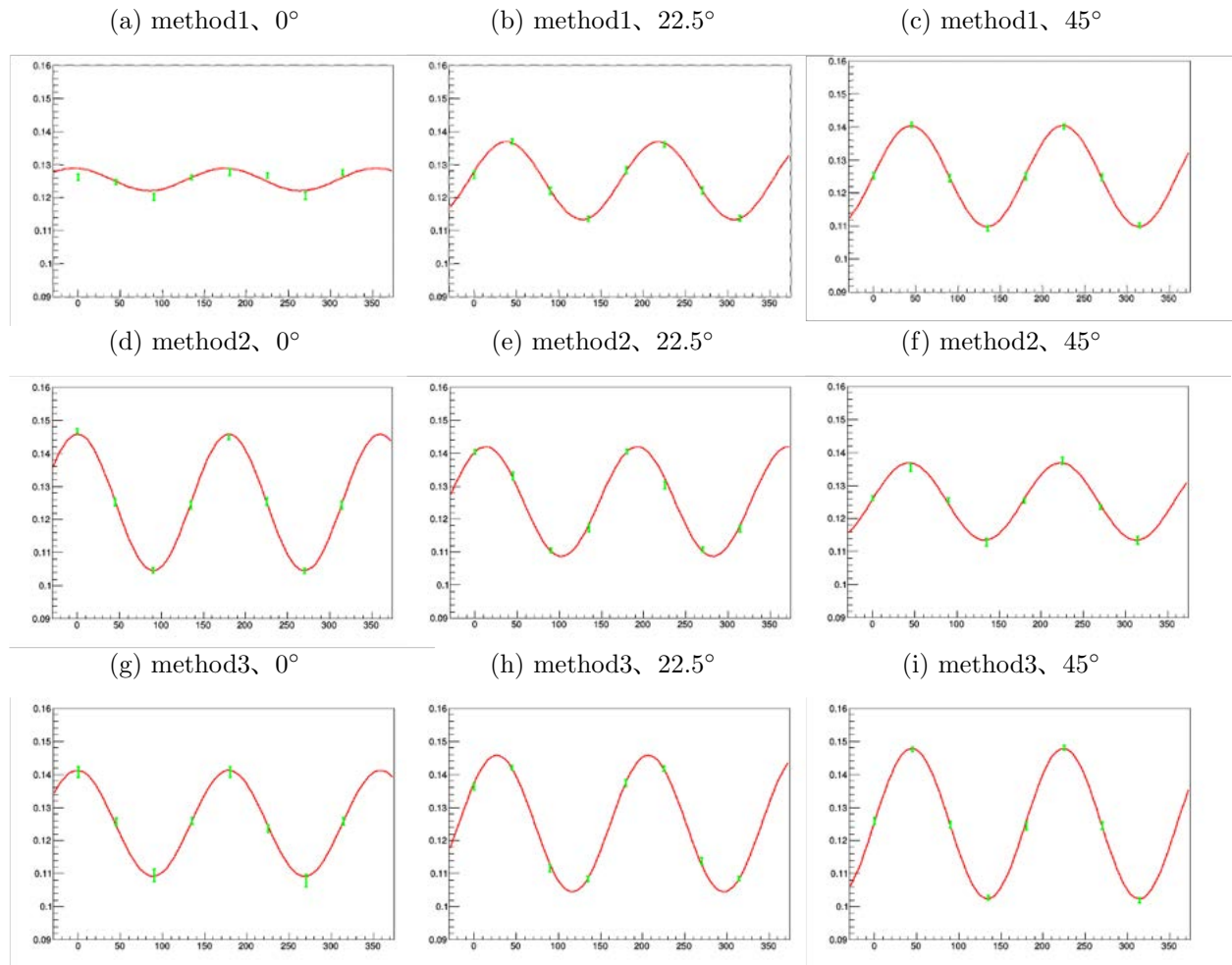


図 6.12: シミュレーションデータに対して、従来までの手法を用いて取得したモジュレーションカーブ。method1-3 と偏光角 0° 、 22.5° 、 45° の偏光光を組み合わせている。

表 6.2: シミュレーションデータに対して、method1-3 を用いて取得した MF と偏光角。

method	パラメータ	0°	22.5°	45°
method1	MF	0.027 ± 0.004	0.094 ± 0.003	0.122 ± 0.003
	偏光角 ($^\circ$)	-5 ± 3	38 ± 1	44.6 ± 0.9
method2	MF	0.165 ± 0.003	0.133 ± 0.003	0.093 ± 0.004
	偏光角 ($^\circ$)	0.7 ± 0.8	12.9 ± 0.9	43.5 ± 0.9
method3	MF	0.128 ± 0.007	0.165 ± 0.003	0.182 ± 0.003
	偏光角 ($^\circ$)	-1.1 ± 1.0	27.1 ± 0.7	44.7 ± 0.7

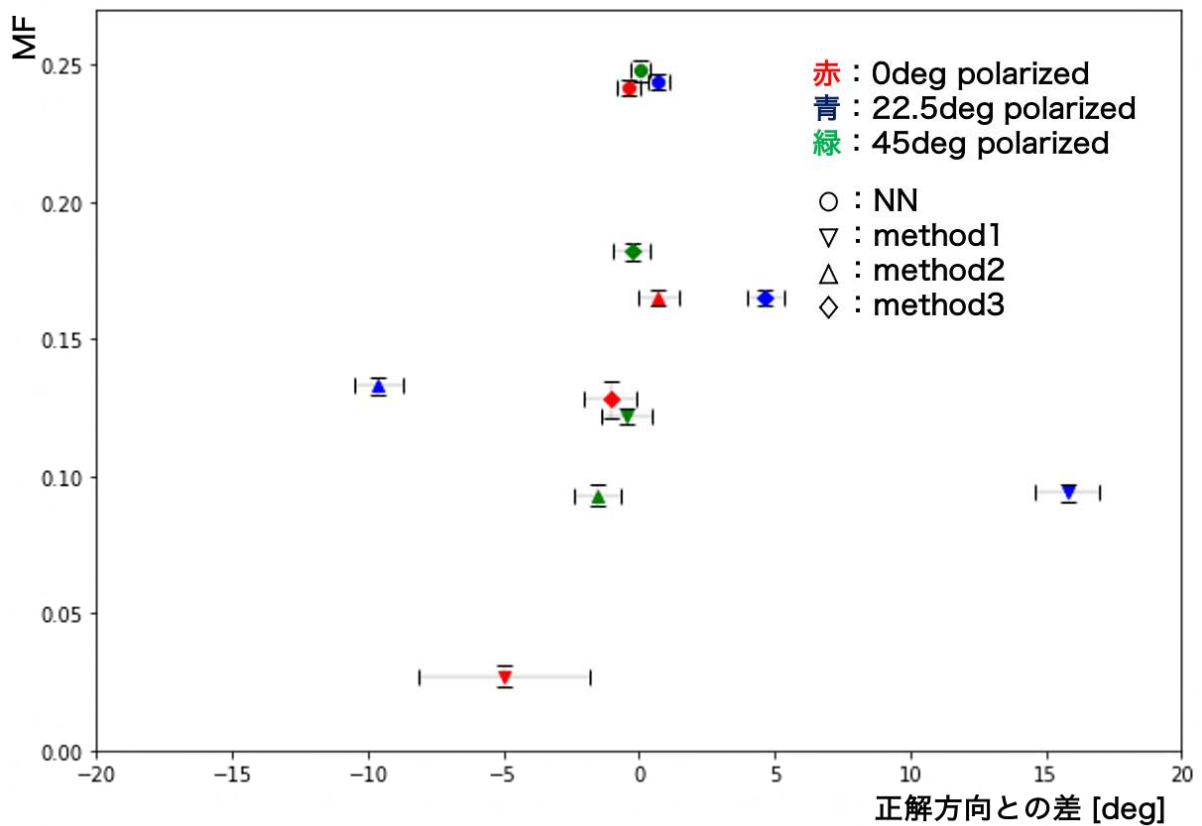


図 6.13: シミュレーションデータに対する、ニューラルネットワーク (図中 NN) と従来までの偏光角測定手法の比較。

6.3.2 シミュレーションデータを用いたニューラルネットワークによる解析と従来までの解析の比較

本節での解析結果と 6.2.5 節の内容を用いて、ニューラルネットワークと従来までの解析手法を比較したものが図 6.13 である。ニューラルネットワークを用いた手法は正解の角度からのズレがどの偏光角に対しても小さく、MF も最も高い。また MF の角度依存性が小さいことも重要である。これより MF と正解との差の両面から、ニューラルネットワークを使用した電子放出角推定のアルゴリズムが、他の手法よりも精度良く偏光観測できている。

6.3.3 ビーム実験イベントを用いたニューラルネットワーク偏光解析手法の評価

6.2.4 節で作成したモデルに対してビーム実験で取得したデータを用いた評価を行う。なおモデルは 2019 年度取得のデータ解析を行ったパラメータを用いてシミュレーションデータを作成し構築しているので、実際に入力するデータも 2019 年度に取得した normal センサに 24 keV 単色光を当てて取得したデータを用いている。90°、112.5°、135° の偏光データから、3 ピクセル以上に広がったイベントデータセットを作成し、ニューラルネットと 6.3 節で取り上げた method1-3 を用いて取得したモジュレーションカーブは図 6.14 のようになり、そこから算出される MF と偏光角は表 6.3 のようになる。また、これらを 6.3.2 節と同様に偏光角の正解方向との差、縦軸 MF でプロットすると図 6.15 のようになる。MF の観点のみから評価すれば、90° 偏光光を method3 で解

表 6.3: ニューラルネットと method1-3 を用いた実験データ解析の MF と偏光角。

method	パラメータ	90°	112.5°	135°
ニューラルネット	MF	0.147 ± 0.003	0.143 ± 0.004	0.133 ± 0.004
	偏光角 (°)	90.2 ± 0.7	111.8 ± 0.7	136.0 ± 0.7
method1	MF	0.040 ± 0.003	0.046 ± 0.004	0.122 ± 0.003
	偏光角 (°)	88 ± 3	114 ± 2	136.2 ± 2
method2	MF	0.090 ± 0.003	0.066 ± 0.003	0.001 ± 0.004
	偏光角 (°)	090 ± 1	88 ± 2	45 ± 6
method3	MF	0.178 ± 0.005	0.149 ± 0.005	0.096 ± 0.003
	偏光角 (°)	89.5 ± 0.4	103.8 ± 0.7	136 ± 2

析したものが最高性能となっているが、method3 では 112.5° 偏光光に対する解析角と正解の角度が大きくずれている。さらに 135° に対する MF が 0.1 以下とニューラルネットを用いた値よりも低い値になっており、任意の偏光角と偏光度を持つ偏光光に対する偏光角と偏光度の決定精度はそれほど高くないことが予想される。一方ニューラルネットを用いた偏光解析では MF や偏光角決定精度がどの偏光角に対しても高く、偏光解析により適した手法と考えられる。

6.4 今後の展望

ニューラルネットワークを用いて偏光解析では、シミュレーションデータに対しては MF が 0.24 程度、実験データに対しては MF が 0.14 程度のモデルを作成した。MF と偏光角決定精度の 2 つの観点から、従来までの手法と比較して、この偏光解析手法は優れた偏光解析手法であると考えられる。一方、本研究で教師データとして用いたシミュレーションデータは現実のセンサの X 線応答を十分に再現しているとは言い難い。例えば 24 keV の X 線が入射した際の、イベントの広がり分布の形状などからその傾向は確認できる。図 6.16 は昨年の実験で取得された 24 keV ビームに対する weight の分布とシミュレーションデータの weight 分布である。実際のデータの方がよりイベントが広がる傾向が見て取れるが、これはシミュレーションではセンサ中でのキャリアの拡散効果を考えていないことが原因である。またその他にも、センサ中の電場構造や、空乏層厚、センサを構成する Si 以外の物質の影響など考慮すべき点は非常に多い。今後の展望として、これらの検出器応答をより正確に考慮したシミュレーションモデル (e.g., Suzuki et al., 2020) を用いた教師データの作成を考えている。

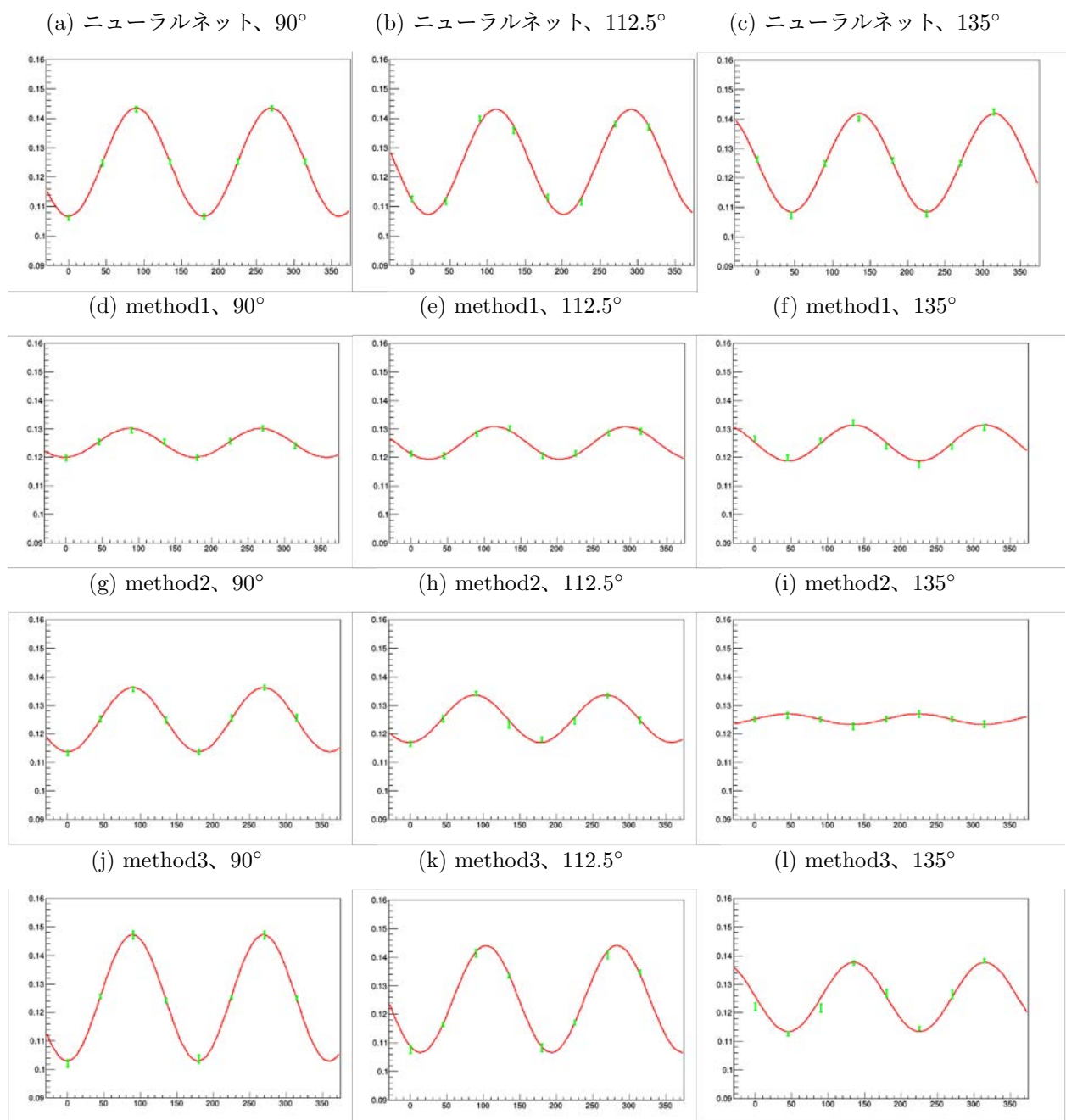
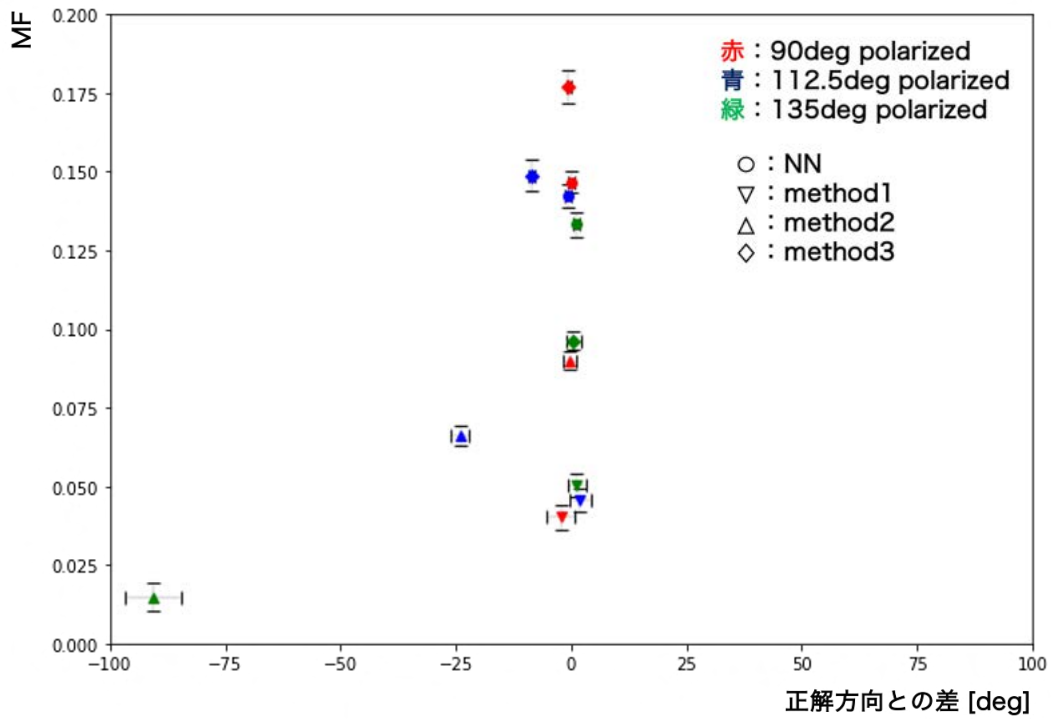


図 6.14: 実験データに対してニューラルネットと従来の手法を用いて取得したモジュレーションカーブ。ニューラルネット、method1-3と偏光角 90° 、 112.5° 、 135° の偏光光を組み合わせている。

(a) 横軸： -100° – 100°



(b) 横軸： -20° – 20°

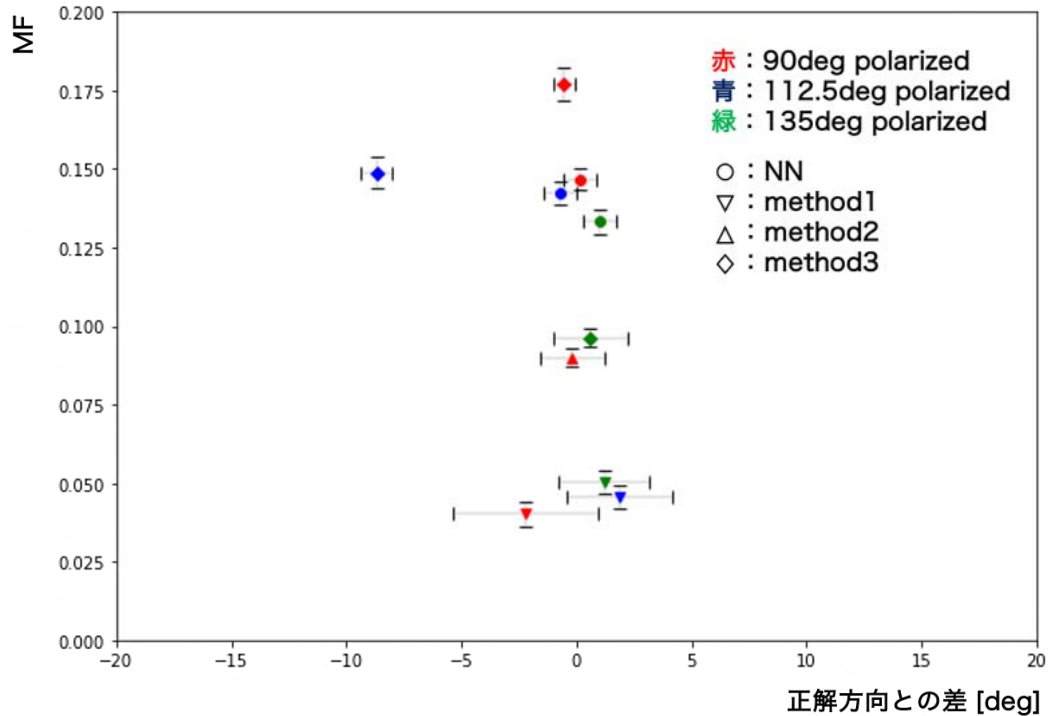


図 6.15: 実験データに対する、ニューラルネットワーク (図中 NN) と従来までの偏光角測定手法の比較。(a) 横軸： -100° – 100° 。(b) 横軸： -20° – 20° の拡大図。

(a) 実際の実験データ

(b) シミュレーション

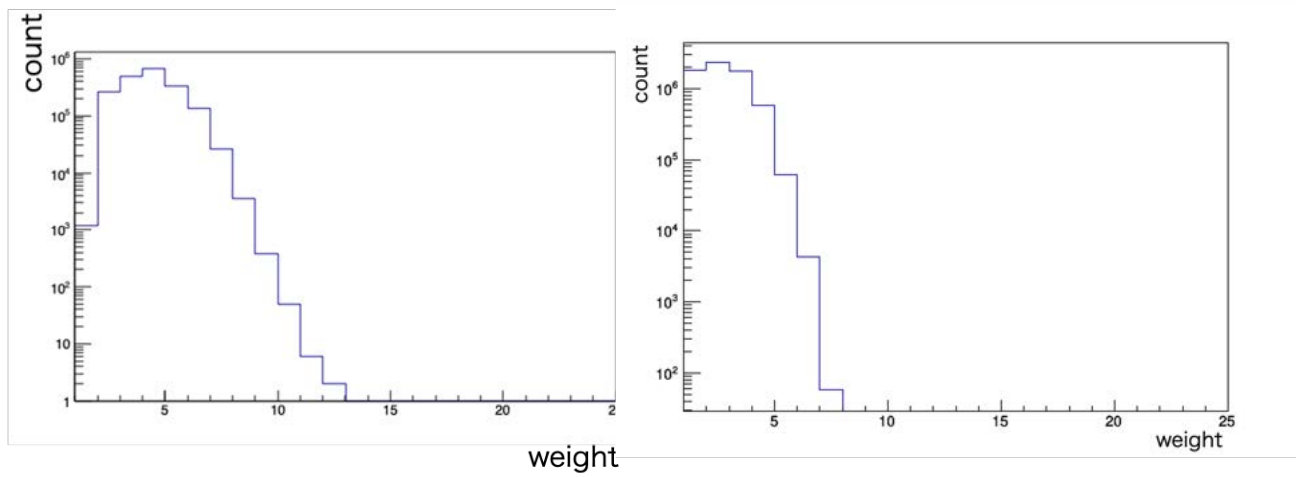


図 6.16: イベントの広がりを示す指標の一つである weight の (a) 実測値と (b) シミュレーションの比較。ビームのエネルギーは 24 keV を用いている。

第7章 結論

本研究では $2.5\ \mu\text{m}$ のピクセルサイズを持つ CMOS イメージセンサを用いた撮像偏光計の実現を目指している。偏光解析に使用できるイベント統計の向上のため、空乏層の厚い近赤外線用センサを用いた偏光測定評価と、従来は解析から除外されていた広がったイベントに対して機械学習を用いた偏光解析を開発し評価した。以下に本研究の成果をまとめる。

- 先行研究で用いられてきたセンサ (本文 normal センサ) に加え、保護ガラス付きセンサ (本文 glass センサ)、保護ガラス付き近赤外線用センサ (本文 NIR センサ) の 3 種類のセンサの常温約 25°C 下でのダークフレームと X 線応答を評価した。その結果、異常ピクセル以外のピクセルでは全てのセンサでよく似たベダスタル分布特性が得られ、 $20\ \text{keV}$ 以下のエネルギー帯域で線形性が良いことを示した。
- 放射光施設 SPring-8 での偏光ビーム照射実験を実施した。この実証実験のための機械系を新規に設計・製作した。実験ではガラス付きセンサに対しては $16\ \text{keV}$ 、 $24\ \text{keV}$ 、 $32\ \text{keV}$ のビームを、近赤外線用センサに対しては $16\ \text{keV}$ 、 $20\ \text{keV}$ 、 $24\ \text{keV}$ 、 $28\ \text{keV}$ 、 $32\ \text{keV}$ のビームを照射し、回転ステージを用いてセンサに対するビーム偏光角を変化させたデータを取得した。また、先行研究で用いられてきたセンサによる偏光撮像実験を行った。この実験では撮像系に符号化開口マスクを使用し、ステージの自動制御により、異なる偏光角を持つ広がった天体を模擬したビームデータを取得した。
- 保護ガラス付きセンサを参照として、近赤外線用センサの偏光測定性能を評価した。センサとビームエネルギーの組み合わせ毎の MF、エネルギー分解能を調べた。MF はガラス付きセンサでは $16\ \text{keV}$ 、 $24\ \text{keV}$ 、 $32\ \text{keV}$ のビームに対してそれぞれ統計誤差の範囲で 0.126 ± 0.003 、 0.173 ± 0.007 、 0.10 ± 0.05 であり、 $16\ \text{keV}$ 、 $20\ \text{keV}$ 、 $24\ \text{keV}$ 、 $28\ \text{keV}$ 、 $32\ \text{keV}$ のビームに対して統計誤差の範囲で 0.108 ± 0.002 、 0.158 ± 0.003 、 0.151 ± 0.006 、 0.15 ± 0.02 、 0.14 ± 0.04 であることがわかった。近赤外線用センサの検出効率はガラス付きセンサに対して、 $16\ \text{keV}$ 、 $24\ \text{keV}$ でそれぞれ 3.4 倍、5.2 倍高く、天体観測を効率よく行えることを示した。
- 従来手法では偏光解析に使用していなかった 3 ピクセル以上に広がるイベントに対して、全結合型ニューラルネットワークによる偏光解析手法を開発した。全結合型偏光解析の MF はシミュレーションデータに対して 0.24 程度、実験データに対して 0.14 程度であり、偏光角決定精度も高いことを示した。この偏光解析では MF の偏光角依存性が小さく、偏光度測定の系統誤差を従来手法より小さくできる。簡単な現象論的モデルを考慮した従来の解析手法と比較して優れている。

謝辞

本修士論文を書くにあたり、様々な人のお世話になりました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

まず、指導教官である馬場彩准教授には、修士課程の2年間にわたり丁寧かつ熱心な指導をしていただきました。X線天文学に関する知識を全く持っていなかった私に対して、基礎的なことから研究における細部に至るまで根気強く教えていただき、また同時に同じ研究者として対等な立場で議論していただきました。また小高裕和助教には、実験とデータ解析の両面から非常に多くのアドバイスをしていただき、何度も議論していただきました。お二人の尽力のおかげでコロナ禍で実験が思うように進められない中においても、成果を修士論文にまとめあげることができました。

大阪大学X線天文グループの林田清准教授、朝倉一統さん、佐久間翔太郎さんにはセンサボードの開発に尽力していただきました。また国立天文台の成影典之助教授には、センサ開発に尽力していただいた他、追加のセンサボードを貸していただき、効率的に実験を進めることができました。SPring-8実験では上杉健太郎主席研究員、星野真人主幹研究員にビームラインの説明や実験のサポートをしていただき、無事にデータ取得できました。また本学素粒子物理国際研究センターの神谷好郎助教授には、センサ特性評価のための治具を貸し出していただき、正確なデータを取得できました。

研究室のメンバーにも数多くのサポートをしていただきました。ポスドクの谷本敦さんには、SPring-8実験の準備や測定を数多く手伝っていただき、他にも文章を書くのが不得意な私に数多くのアドバイスをしてくださいました。博士3年の鈴木寛大さんは研究をする上で生じる素朴な疑問に対して、自分の仕事を後回しにしてまで一緒に考えてくださいました。博士2年の春日知明さんには修士1年生の頃のネジの締め方も知らない私に対して、実験の基礎を教えてくださいたり、進捗報告の際には鋭い指摘をしていただいたりしました。博士1年の丹波翼さんには解析ソフトの使い方を丁寧に教えていただいた他、解析を進める上で生じる疑問に対して一緒に考えていただきました。修士1年の渡邊泰平くんはセンサボードを動かすソフトウェアや、SPring-8実験でのQL作成に尽力していただきました。同じく修士1年の南木宙斗くんはSPring-8実験でログ取りなどの仕事を率先して引き受けていただきました。そして、同期の高嶋くんには2年間の短い間でしたが非常にお世話になりました。機械学習の研究においては、基礎知識習得のための書籍を貸してくれたり、例となるモデルを作成していただきました。高嶋くんとはつまらない冗談をいいながら研究に打ち込んだこの2年間は、私の掛け替えのない経験であり、今後もこの経験を糧にして生活していきたいと思います。また、秘書の沓間はづきさんと事務の河野久仁子さんには数多くの事務手続きをしていただき、研究に打ち込むことができました。

最後に、自分の意思を尊重して、何も言わずに見守ってくださった両親、息抜きに話し相手になってくれた大学や高校時代の友人たち。また自分のこれまでの生活を支えてくださった全ての方に感謝の意を込めて謝辞とします。

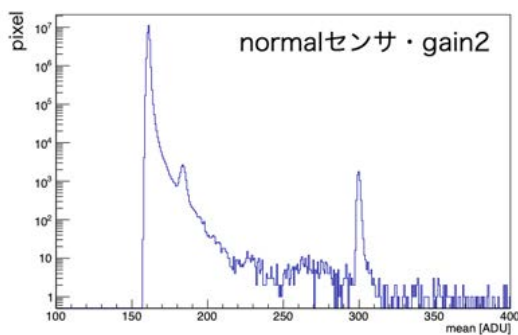
令和3年1月6日
畠内 康輔

付録A センサ毎のペDESTAL、不偏標準偏差分布 (本文不掲載分)

本文には掲載しなかった、ダークのペDESTAL分布と不偏標準偏差分布を掲載する。データは露光時間 100 ms、100 フレームを取得し、波高値の上位と下位 3 フレームずつを解析から除外している。またペDESTAL分布と不偏標準偏差に関して、センサとゲインの組み合わせが同じものに関しては同一のデータから算出したものである。

A.1 ペDESTAL分布と不偏標準偏差分布

(a) normalセンサ、ゲイン 2、ペDESTAL



(b) normalセンサ、ゲイン 2、不偏標準偏差

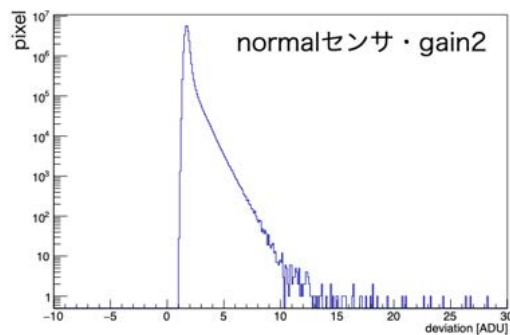
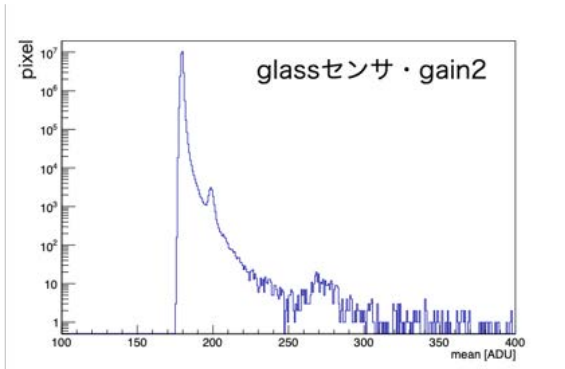


図 A.1: normalセンサ、ゲイン 2 で取得した (a)pedestal分布と (b) 不偏標準偏差分布。

(a) glassセンサ、ゲイン 2、ペDESTAL



(b) glassセンサ、ゲイン 2、不偏標準偏差

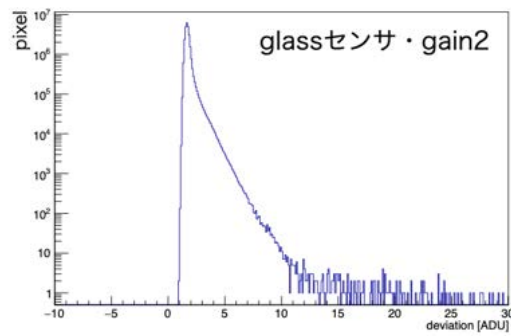
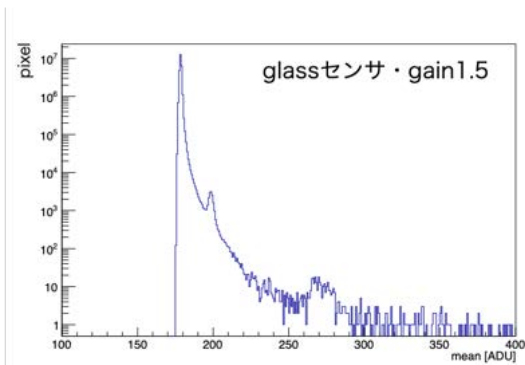


図 A.2: glassセンサ、ゲイン 2 で取得した (a)pedestal分布と (b) 普遍標準偏差分布。

(a) glassセンサ、ゲイン 1.5、ペDESTAL



(b) glassセンサ、ゲイン 1.5、不偏標準偏差

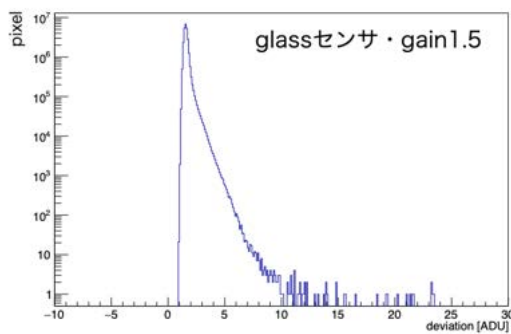
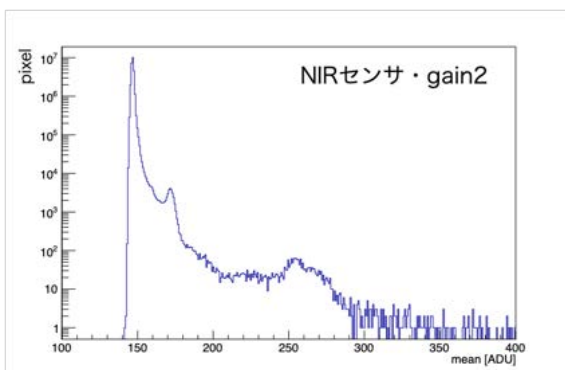


図 A.3: glassセンサ、ゲイン 1.5 で取得した (a)pedestal分布と (b) 不偏標準偏差分布。

(a) NIRセンサ、ゲイン 2、ペDESTAL



(b) NIRセンサ、ゲイン 2、普遍標準偏差

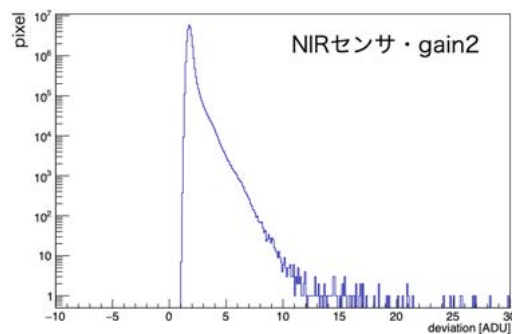
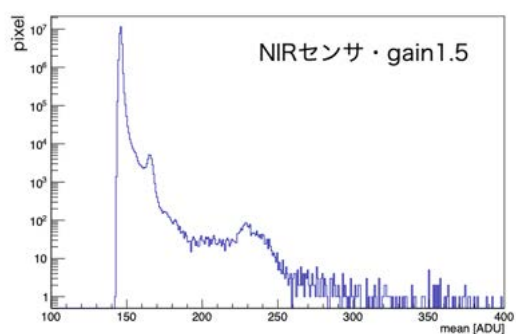


図 A.4: NIRセンサ、ゲイン 2 で取得した (a)pedestal分布と (b) 不偏標準偏差分布。

(a) NIRセンサ、ゲイン 1.5、ペデスタル



(b) NIRセンサ、ゲイン 1.5、不偏標準偏差

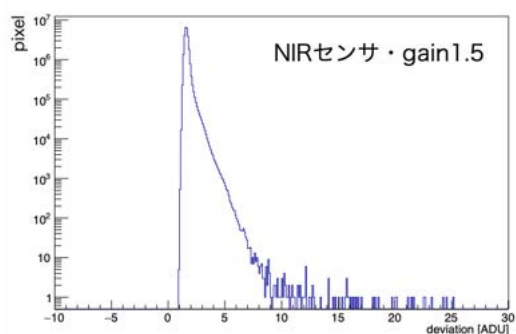
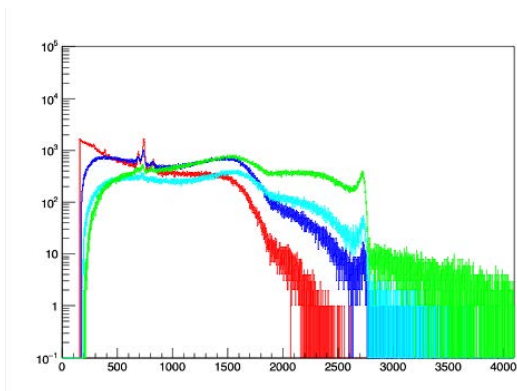


図 A.5: NIRセンサ、ゲイン 2 で取得した (a)pedestal分布と (b) 不偏標準偏差分布。

付録B SPring-8実験で取得されたスペクトルと weight 分布 (本文不掲載分)

スペクトルに関しては横軸波高値 (ADU) と縦軸カウントで描かれ、スペクトルの色毎にそれぞれ赤: weight1、青: weight2、水色: weight3、緑: weight4 以上を表している。また NIR センサに関しては weight11 以上のイベントのスペクトルを追記 (灰) している。weight 分布に関しては全 weight のスペクトルをガウシアンでフィットした時のピーク $\pm 2\sigma$ の波高値を持つ領域をビーム領域と定義し、ビーム領域に含まれるイベントで見た weight 分布は赤、全波高値のイベントで見た時の weight 分布は青で表している。

(a) スペクトル



(b) weight 分布

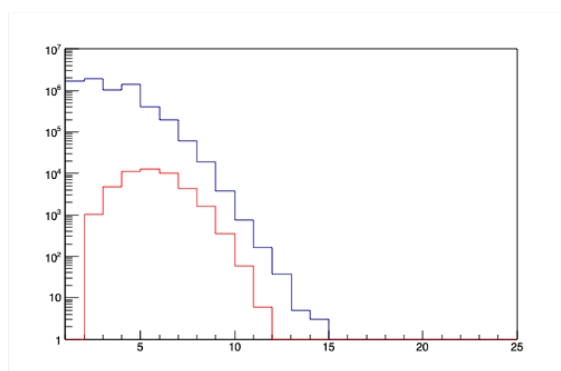
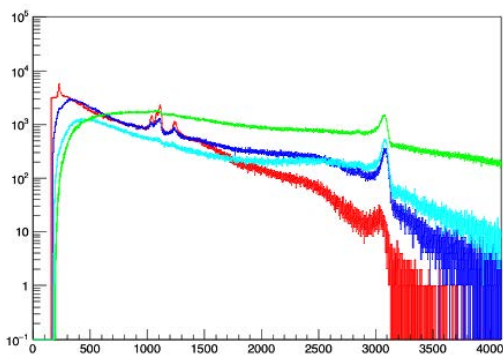


図 B.1: glass センサで取得した 32 keV ビームの (a) スペクトルと (b) weight 分布。

(a) スペクトル



(b) weight 分布

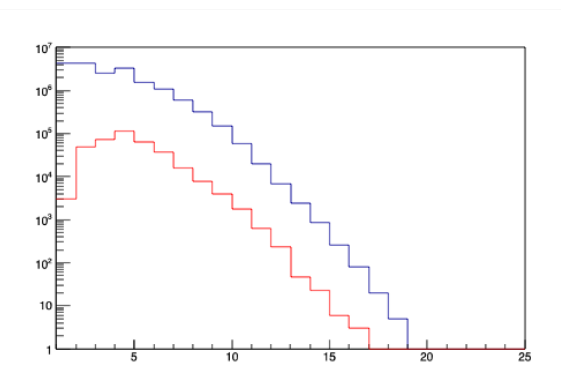
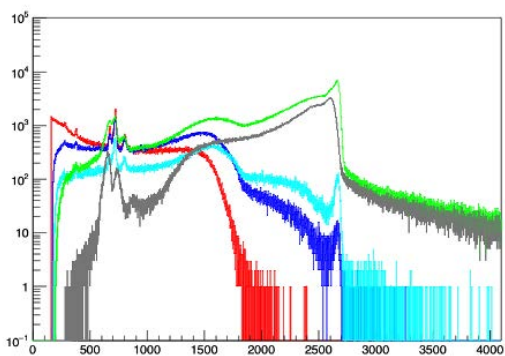


図 B.2: glass センサで取得した 24 keV ビームの (a) スペクトルと (b) weight 分布。

(a) スペクトル



(b) weight 分布

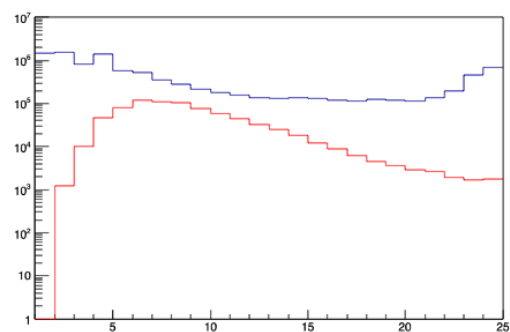
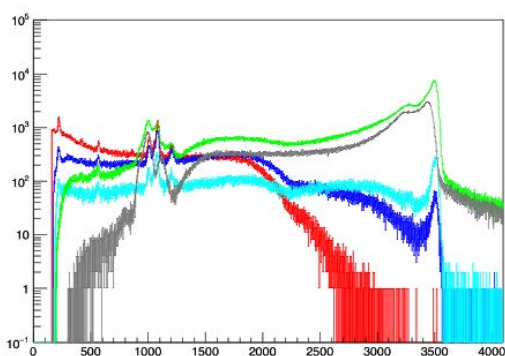


図 B.3: NIRセンサで取得した 32 keV ビームの (a) スペクトルと (b)weight 分布。

(a) スペクトル



(b) weight 分布

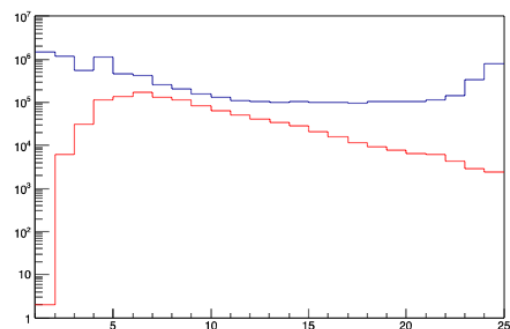
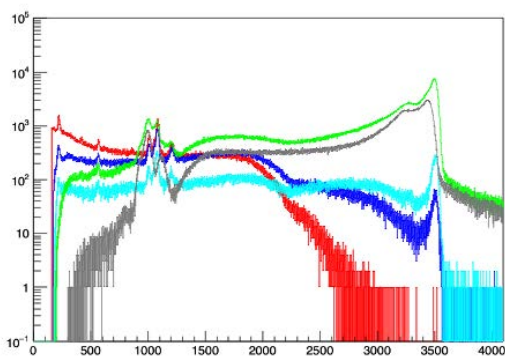


図 B.4: NIRセンサで取得した 28 keV ビームの (a) スペクトルと (b)weight 分布。

(a) スペクトル



(b) weight 分布

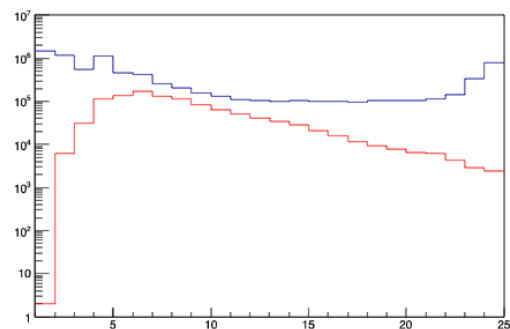
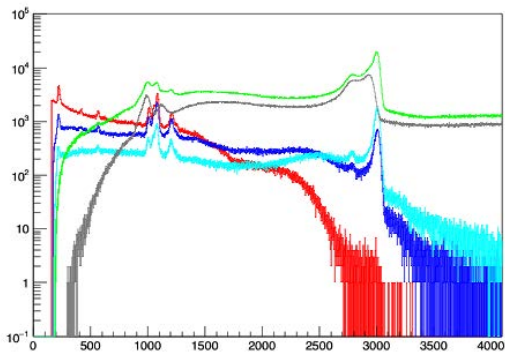


図 B.5: NIRセンサで取得した 24 keV ビームの (a) スペクトルと (b)weight 分布。

(a) スペクトル



(b) weight 分布

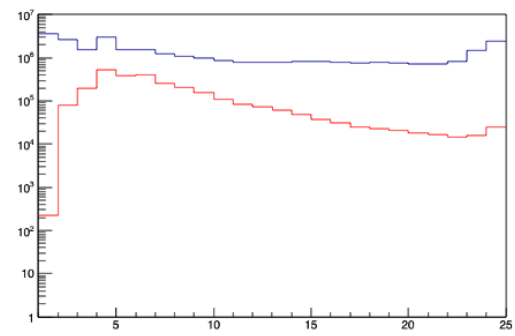
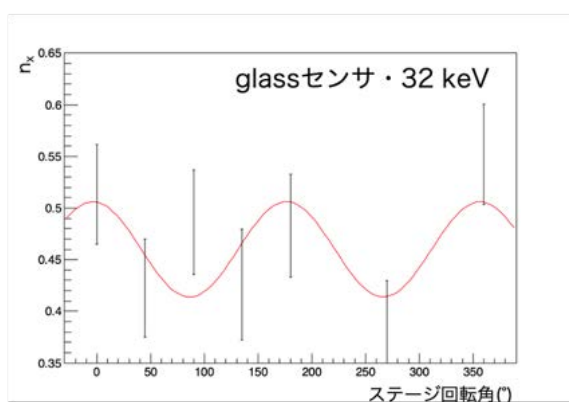


図 B.6: NIRセンサで取得した 20 keV ビームの (a) スペクトルと (b)weight 分布。

付録C SPring-8実験で取得された ビームデータのモジュレーションカーブ (本文不掲載分)

(a) 32 keV



(b) 24 keV

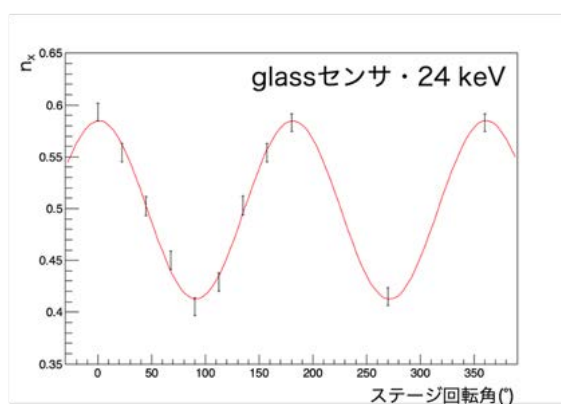
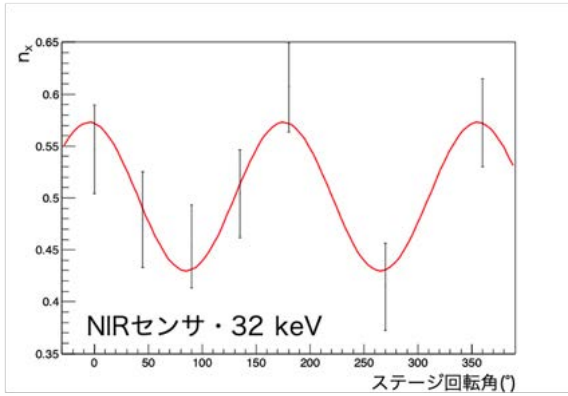
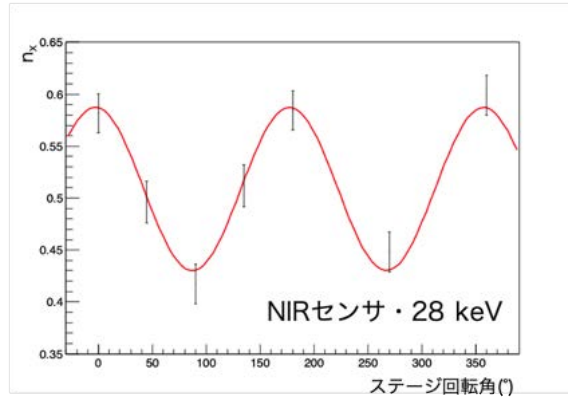


図 C.1: glassセンサで取得したモジュレーションカーブ。(a)32 keV。(b)24 keV。データ点のエラーは統計誤差のみで 1σ

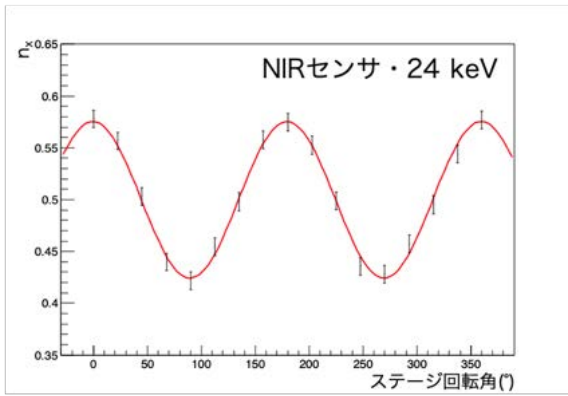
(a) 32 keV



(b) 28 keV



(c) 24 keV



(d) 20 keV

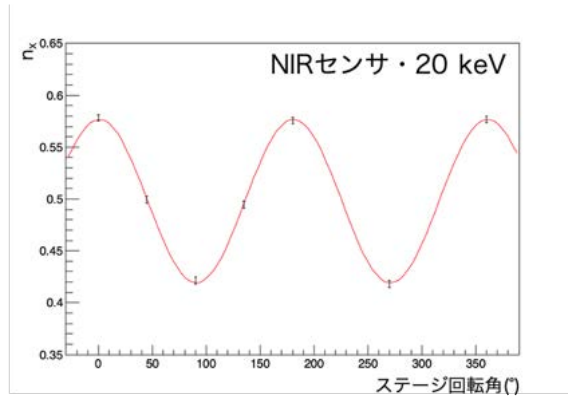


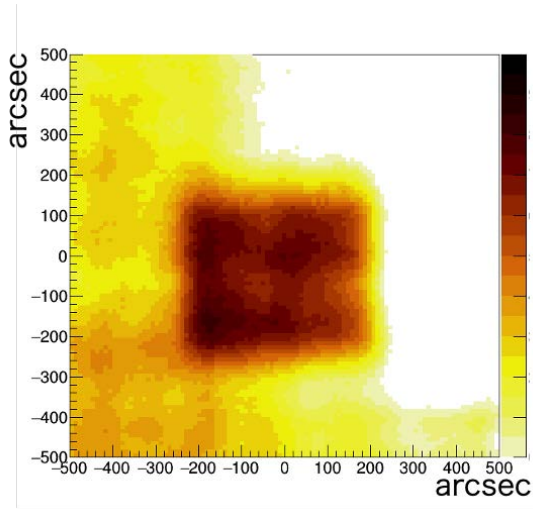
図 C.2: NIRセンサで取得したモジュレーションカーブ。(a)32 keV。(b)28 keV。(c)24 keV。(d)20 keV。データ点のエラーは統計誤差のみで 1σ

付録D 偏光撮像実験でステージを動かしながら 取得したイメージ(速報)

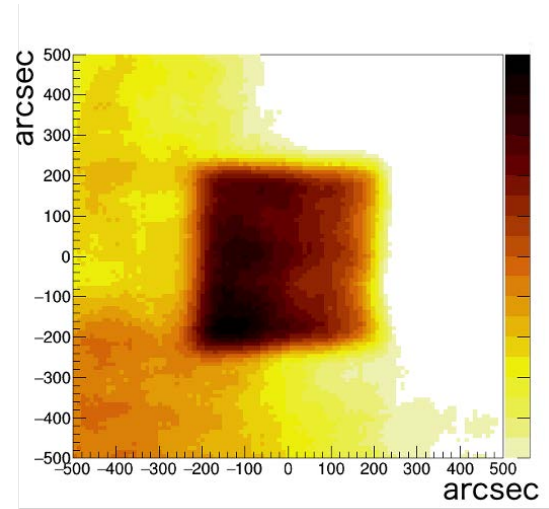
図D.1はダブルピクセルイベントを用いた画像再構成後のイメージである。偏光撮像実験で (θ_y, θ_z) (4章参照)を変化させながら取得したデータを、各マスク毎に再構成し足し合わせている。イメージの広がりにはデータ取得時に動かした (θ_y, θ_z) の領域に対応し、 $0^\circ, 90^\circ$ セットアップでは約 $(6'30'' \times 7')$ 、 $45^\circ, -45^\circ$ セットアップでは約 $(9'45'' \times 10'30'')$ の広がった領域からの放射の観測を想定したイメージで再構成ができています。イメージ領域でコントラストが一定にならないのは、アライメント誤差やビームの強度が場所によって異なることなど複合的な原因により生じています。

実際、理論的には5章で行った解析と画像再構成を天体データにおいて同時に行うことにより、天体の画像と場所毎の偏光度、偏光角を推測することができ、偏光撮像系というコンセプトは実証することができました。さらには各セットアップのイベントデータを足し合わせることで、任意の偏光度、または偏光角を持つ天体からの放射イメージを再現することができるため、本偏光撮像系を用いた宇宙偏光撮像の観測シミュレーションを行うことができます。

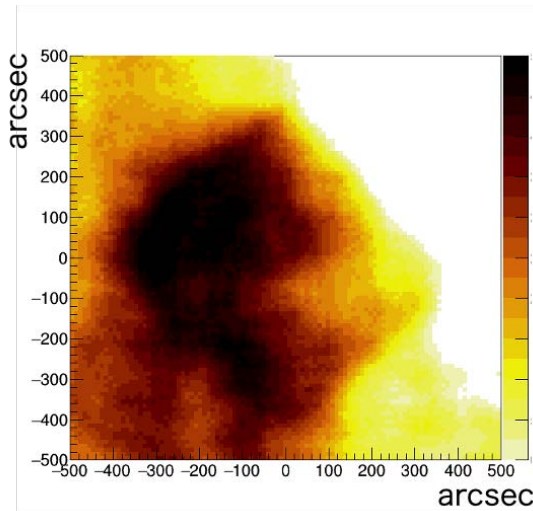
(a) 0° セットアップ



(b) 90° セットアップ



(c) 45° セットアップ



(d) -45° セットアップ

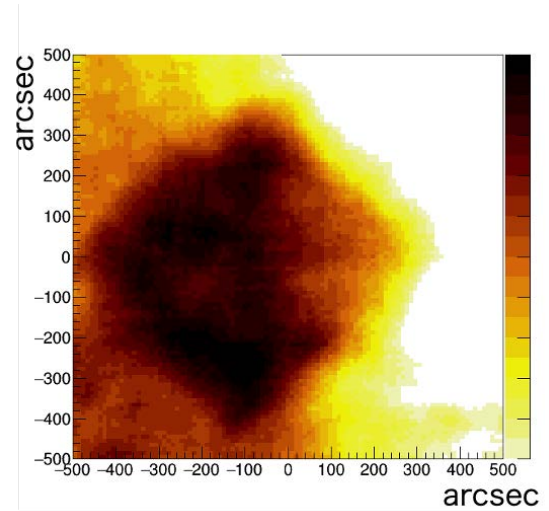


図 D.1: 偏光撮像実験再構成後のイメージ

参考文献

- Abarr, Q., Baring, M., Beheshtipour, B., et al. (2020) “Observations of a GX 301–2 Apsastron Flare with the X-Calibur Hard X-Ray Polarimeter Supported by NICER, the Swift XRT and BAT, and Fermi GBM,” *The Astrophysical Journal*, Vol. 891, No. 1, p. 70, mar, DOI: 10.3847/1538-4357/ab672c.
- Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., et al. (2003) “Geant4—a simulation toolkit,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 506, No. 3, pp. 250 – 303, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., et al. (2006) “Geant4 developments and applications,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 53, No. 1, pp. 270–278, Feb, DOI: 10.1109/TNS.2006.869826.
- Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., et al. (2016) “Recent developments in Geant4,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 835, pp. 186 – 225, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>.
- Angel, J. R. P. (1969) “Polarization of Thermal X-Ray Sources,” *ApJ*, Vol. 158, p. 219, October, DOI: 10.1086/150185.
- Asakura, K., Hayashida, K., Hanasaka, T., et al. (2019) 「X-ray imaging polarimetry with a 2.5- μ m pixel CMOS sensor for visible light at room temperature」, 『Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems』, 第 5 卷, 第 3 号, 1 – 7 頁, DOI: 10.1117/1.JATIS.5.3.035002.
- Chauvin, M., Florén, H. G., Friis, M., et al. (2017) “Shedding new light on the Crab with polarized X-rays,” *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, p. 7816, DOI: 10.1038/s41598-017-07390-7.
- Collaboration, H. (2018) 「Detection of polarized gamma-ray emission from the Crab nebula with the Hitomi Soft Gamma-ray Detector †」, 『Publications of the Astronomical Society of Japan』, 第 70 卷, 第 6 号, 11 月, DOI: 10.1093/pasj/psy118, 113.
- Dolan, J. F. (1967) “The polarization of celestial X-rays,” *Space Science Reviews*, Vol. 6, No. 5, pp. 579–600, DOI: 10.1007/BF00168792.
- Fraser, G., Lees, J., & Pearson, J. (1989) “Measurement of vectorial effects in the X-ray and UV photoemission from CsI: A novel polarimeter for soft X-ray astronomy,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and*

- Associated Equipment*, Vol. 284, No. 2, pp. 483 – 508, DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90321-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90321-5).
- Giacconi, R., Gursky, H., Kellogg, E., et al. (1971) “Discovery of Periodic X-Ray Pulsations in Centaurus X-3 from UHURU,” *ApJL*, Vol. 167, p. L67, jul, DOI: 10.1086/180762.
- Goto, S., Takeshita, K., Suzuki, Y., et al. (2001) “Construction and commissioning of a 215-m-long beamline at SPring-8,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 467-468, pp. 682 – 685, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)00445-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)00445-4), 7th Int.Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation.
- nosuke Ishikawa, S., Takahashi, T., Watanabe, S., et al. (2018) “High-speed X-ray imaging spectroscopy system with Zynq SoC for solar observations,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 912, pp. 191 – 194, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.033>, New Developments In Photodetection 2017.
- Kasuga, T., Odaka, H., Hatauchi, K., et al. (2020) “Artifact-less coded aperture imaging in the x-ray band with multiple different random patterns,” *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 1 – 11, DOI: 10.1117/1.JATIS.6.3.035002.
- Kitaguchi, T., Black, K., Enoto, T., et al. (2019) “A convolutional neural network approach for reconstructing polarization information of photoelectric X-ray polarimeters,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 942, p. 162389, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162389>.
- Koyama, K., Tsunemi, H., Dotani, T., et al. (2007) “X-Ray Imaging Spectrometer (XIS) on Board Suzaku,” *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 59, No. sp1, pp. S23–S33, 01, DOI: 10.1093/pasj/59.sp1.S23.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015) “Deep learning,” *Nature*, Vol. 521, No. 7553, pp. 436–444, DOI: 10.1038/nature14539.
- Leo, W. R. (1994) *Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach; 2nd ed.*: Springer.
- Longair, M. S. (2011) *High Energy Astrophysics*.
- Makino, F., & ASTRO-C Team (1987) “The X-ray Astronomy Satellite ASTRO-C,” *APLETT*, Vol. 25, p. 223, jan.
- McNamara, A. L., Kuncic, Z., & Wu, K. (2008) “X-ray polarization signatures of Compton scattering in magnetic cataclysmic variables,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 386, No. 4, pp. 2167–2172, 04, DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13174.x.
- Oda, M. (1980) “Cosmic X-ray satellite ‘Hakucho’,” *Acta Astronautica*, Vol. 7, pp. 957–965, sep, DOI: 10.1016/0094-5765(80)90094-6.

- Odaka, H., Sugimoto, S., nosuke Ishikawa, S., et al. (2010) “Development of an integrated response generator for Si/CdTe semiconductor Compton cameras,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 624, No. 2, pp. 303 – 309, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.11.052>, New Developments in Radiation Detectors.
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. (1986) *Radiative Processes in Astrophysics*.
- Schnittman, J. D., & Krolik, J. H. (2010) “X-RAY POLARIZATION FROM ACCRETING BLACK HOLES: CORONAL EMISSION,” *The Astrophysical Journal*, Vol. 712, No. 2, pp. 908–924, mar, DOI: [10.1088/0004-637x/712/2/908](https://doi.org/10.1088/0004-637x/712/2/908).
- Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., et al. (2014) “Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting,” *J. Mach. Learn. Res.*, Vol. 15, No. 1, pp. 1929–1958, January.
- Suzuki, H., Tamba, T., Odaka, H., et al. (2020) “Development of the detector simulation framework for the Wideband Hybrid X-ray Imager onboard FORCE,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 979, p. 164433, nov, DOI: [10.1016/j.nima.2020.164433](https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164433).
- Takahashi, T., Kokubun, M., Mitsuda, K., et al. (2016) “The ASTRO-H (Hitomi) x-ray astronomy satellite,” in den Herder, J.-W. A., Takahashi, T. & Bautz, M. eds. *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, Vol. 9905 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, p. 99050U, July, DOI: [10.1117/12.2232379](https://doi.org/10.1117/12.2232379).
- Tanaka, Y., Fujii, M., Inoue, H., et al. (1984) “X-ray astronomy satellite Tenma.,” *PASJ*, Vol. 36, No. 4, pp. 641–658, jan.
- Tanaka, Y., Inoue, H., & Holt, S. S. (1994) “The X-Ray Astronomy Satellite ASCA,” *PASJ*, Vol. 46, pp. L37–L41, jun.
- Tsunemi, H., Hayashida, K., Tamura, K., et al. (1992) “Detection of X-ray polarization with a charge coupled device,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 321, No. 3, pp. 629–631, oct, DOI: [10.1016/0168-9002\(92\)90075-F](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90075-F).
- Weisskopf, M. C., Cohen, G. G., Kestenbaum, H. L., et al. (1976) “Measurement of the X-ray polarization of the Crab nebula.,” *ApJL*, Vol. 208, pp. L125–L128, sep, DOI: [10.1086/182247](https://doi.org/10.1086/182247).
- Weisskopf, M. C., Elsner, R. F., & O’Dell, S. L. (2010) “On understanding the figures of merit for detection and measurement of x-ray polarization,” in Arnaud, M., Murray, S. S. & Takahashi, T. eds. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray*, Vol. 7732, pp. 98 – 102, International Society for Optics and Photonics: SPIE, DOI: [10.1117/12.857357](https://doi.org/10.1117/12.857357).
- Weisskopf, M. C., Ramsey, B., O’Dell, S., et al. (2016) “The Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE),” in den Herder, J.-W. A., Takahashi, T. & Bautz, M. eds. *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, Vol. 9905, pp. 356 – 365, International Society for Optics and Photonics: SPIE, DOI: [10.1117/12.2235240](https://doi.org/10.1117/12.2235240).

齋藤康毅 (2016) 『ゼロから作る Deep Learning——Python で学ぶディープラーニングの理論と実装』, オーラリー・ジャパン.

春日知明 (2019) 「宇宙 X 線偏光観測を目指した符号化開口イメージング手法の設計と評価」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科.

村上弘志 (1999) 「Astro-E 搭載 CCD 検出器 XIS と新しいイベント抽出法の研究」, 修士論文, 京都大学大学院理学研究科.

大野喜明 (1995) 「X 線検出用 CCD の研究開発」, 修士論文, 大阪大学大学院理学研究科.

會澤優輝 (2020) 「ブラックホール降着系の理解を目指した CMOS センサ型 X 線偏光計の性能評価」, 修士論文, 東京大学大学院理学系研究科.