

平成 29 年度 修士論文

サブ秒角撮像を目指す X 線多重像干渉計 *MIXIM* の基礎開発

大阪大学大学院理学研究科
宇宙地球科学専攻
松本研究室

博士前期課程 2 年
学籍番号 24F16010

川端 智樹

2018 年 3 月 23 日

概要

現代の X 線天文学の標準的な観測装置は斜入射反射望遠鏡と CCD などの X 線撮像分光検出器を組み合わせたものになっている。斜入射望遠鏡を持つ 1999 年打ち上げの *Chandra* 衛星は角度分解能に関して圧倒的に優れており、0.5 秒角を達成しているが、これを再現あるいは凌駕するのは困難となっている。例えば 2028 年うちあげ予定の大型天文衛星 *Athena* でも目標が 5 秒角にとどまっている。また、斜入射望遠鏡は焦点距離が 3–12 m と長く、角度分解能を向上させると重量も重くなる傾向にあり (*Chandra* は約 1 トン)、その結果衛星が大型になるという問題もある。このような状況で、我々は新しいタイプの天文用 X 線干渉計を提案している。数 μm ピッチの回折格子と X 線撮像分光検出器を組み合わせた単純な構成で、Talbot 効果によって得られる格子の自己像を撮影する。得られた多数の像を格子ピッチで重ね合わせることで、光源プロファイルを得る。我々は、これを X 線多重像干渉計 (*MIXIM*, *Multi Image X-ray Interferometer Module*) と呼び *Chandra* 衛星を超えるサブ秒角の角度分解能を 50 cm サイズの超小型衛星で実現することを目指している。本研究では *MIXIM* 実現のための基礎開発を行なった。我々はまず、焦点サイズが 1 μm 程度のマイクロフォーカス X 線源を光源とした実験を行った。4.8 μm ピッチ、17 μm 厚 Au、開口率 0.5 の X 線吸収格子とピクセルサイズ 30 μm の SOI 型 X 線検出器 (XRPIX2b) を組み合わせた装置で撮影を行い、Talbot 干渉縞を得ることに成功した。ただし、この場合は 4.4 倍の拡大撮影になっており、平行光に対してはさらに小さいピクセルサイズの検出器が必要となっていた。そこで、可視光用に開発されたピクセルサイズ 4.25 μm の CMOS 検出器 (GSENSE5130) を導入し、X 線検出に利用することにした。空乏層が薄いという問題があるものの、常温動作で X 線光子のエネルギー測定 (エネルギー分解能: FWHM220 eV@5.9 keV) に成功した。上記の X 線吸収格子と GSENSE5130 と組み合わせたシステムにより、SPRING-8 BL20B で準平行光を照射する実験を行った結果、X 線エネルギー 12.4 keV 入射の場合、Talbot 干渉条件を満たす 23 cm, 46 cm の位置で Talbot 干渉縞の検出に成功した。後者の位置では、像幅が 1 秒角に対応し、少なくとも秒角の角度分解能を達成できることが分かった。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	X 線天文学の歴史と現状	1
第 2 章	X 線多重像干渉計 MIXIM 計画	3
2.1	MIXIM の構造と原理	3
2.1.1	Talbot 効果と X 線 Talbot 干渉計	4
2.1.2	X 線回折格子	5
第 3 章	CMOS ピクセル検出器	7
3.1	X 線ピクセル検出器の形式	7
3.2	MOSFET と CMOS ピクセル検出器の原理・構造	8
3.2.1	MOSFET の動作原理	8
3.2.2	CMOS 回路と CMOS ピクセル検出器の構造	9
3.2.3	表面照射型と裏面照射型	9
3.2.4	フレームモードとイベント駆動モード・グローバル露光読み出しとライン露光読み出し	9
	SOIPIX	10
3.3	X 線フレームデータ解析プロセス	10
3.3.1	ペDESTAL補正	10
3.3.2	バッドフレームの除去	10
3.3.3	X 線イベント選別アルゴリズム	11
	X 線イベントの抽出	11
	シングルピクセルイベントの判定	11
	ダブルピクセルイベントの判定	11
	その他のイベント	11
3.3.4	クロストークの補正	12
3.4	X 線用 SOI ピクセル検出器 XRPIX2b 検出器	12
3.4.1	XRPIX2b の仕様	13
3.4.2	読み出し回路、冷却装置、真空槽	13
3.4.3	XRPIX2b の性能評価	14
3.5	可視光用 CMOS 微小ピクセル検出器 GSENSE5130	14
3.5.1	GSENSE5130	14
3.5.2	グローバル露光読み出しとライン露光読み出し	15
3.5.3	読み出し回路と DAQ ソフトウェア	15

3.6	GSENSE5130 の X 線応答と性能評価試験	16
3.6.1	ノイズ特性	16
	暗電流の見積もり	17
3.6.2	X 線に対する分光性能評価	18
3.6.3	X 線検出効率と空乏層厚・有感領域厚	21
3.6.4	^{55}Fe から GSENSE5130 への X 線照射試験の結果のまとめ	22
第 4 章	Fresnel 近似による MIXIM 撮像システムの検討	25
4.1	Fresnel 回折と Talbot 効果	25
4.1.1	球面波による Talbot 効果	27
4.2	平行光の場合の波動場シミュレーション	28
第 5 章	マイクロフォーカス X 線源を用いた拡散光による撮像実験	33
5.1	マイクロフォーカス X 線源	33
5.1.1	X 線発生装置 (X 線管) の原理 [1]	33
	カソード	33
	アノード (ターゲット)	33
	制動放射	34
	特性 X 線	35
5.1.2	マイクロフォーカス X 線源 L8321-01	36
5.2	マイクロフォーカス X 線源と回折格子を用いた撮像システム	37
5.3	マイクロフォーカス X 線源を光源に XRPIX2b を検出器として用いた回折格子の撮像実験	38
5.3.1	実験セットアップ	38
5.3.2	データ解析方法	39
	電荷分割解析	39
	フォールディング解析	40
5.4	ナイフエッジを用いた電荷分割解析による位置分解能の評価	41
5.5	XRPIX2b による格子像撮像結果	43
5.5.1	撮像イメージとスペクトル	43
5.5.2	周期解析結果	46
5.5.3	光源プロファイル	47
5.5.4	結論	49
5.6	マイクロフォーカス X 線源を光源とした GSENSE5130 による回折格子の撮像実験	49
5.6.1	実験セットアップ	49
5.7	GSENSE5130 による撮像実験結果	50
5.7.1	撮像イメージとスペクトル	50
5.7.2	マイクロフォーカス X 線源の焦点サイズの評価	51
第 6 章	SPring-8 ビームラインを使用した準平行光による撮像実験	53
6.1	大型放射光施設 SPring-8: BL20B2	53
6.2	実験概要	54
6.3	解析プロセス	56
6.4	実験結果	57

6.4.1	X線ビームのスペクトルとイメージ	57
6.4.2	回転角度と周期の走査	60
6.4.3	重ね合わせプロファイルと検出された周期	62
6.4.4	複数ピクセルに広がったイベントを用いた解析	66
第7章	まとめと今後の展望	71
7.1	まとめ	71
7.2	今後の課題と展望	72
付録		75
A	クロストーク補正	75
A.1	スペクトル	75
A.2	補正	75
謝辞		79
引用文献		81

1.1	一部の X 線天文衛星と天文台の角度分解能。直線は回折限界 $1.2\lambda/D$ (D は直径) で、上 (暗い方) から順に 0.1 mm, 1 m, 10 m, 10 km, 10000 km。赤で囲った領域が <i>MIXIM</i> の目指す角度分解能とエネルギーバンド。	2
1.2	天体の距離、サイズと見かけの視半径。角度分解能が 1 ミリ秒で AGN のトラスやバイナリ天体が見えることが期待される。	2
2.1	<i>MIXIM</i> の構造と撮像原理 [2]	4
2.2	Talbot 効果による X 線の強度分布 [3]	5
2.3	4.8 μm ピッチ、Au 17 μm 厚の吸収型回折格子。ドイツのカールスルーエ工学研究所の放射光施設を利用して、同研究所発明の LIGA プロセスで製作された。日本代理店 ASICON 社より調達。	5
3.1	n -チャンネル MOSFET の模式図	8
3.2	SOIPIX の構造 [4]	10
3.3	X 線イベント選別のフローチャート *1	12
3.4	XRPIX2b のセラミックパッケージと素子のブロック図 [5]	13
3.5	SEABAS ボードとサブボードの写真 [6]	14
3.6	GSENSE5130 セラミックパッケージの写真	15
3.7	一般的なマイクロレンズの配置。GSENSE5130 の構造はメーカーから公表されていない、レンズの厚み約 1 μm のみメーカーから得た情報。	15
3.8	GSENSE5130 評価ボードの写真	16
3.9	波高値平均の空間分布 (素子の一部 100 \times 100 ピクセル分を表示) (左) と 1 次元ヒストグラム (右)	16
3.10	ペDESTAL補正後の各ピクセル、各フレーム波高値の 1 次元ヒストグラム。左が Low Gain、右が High Gain。	17
3.11	ピクセルごとの波高値のばらつき (標準偏差) の空間分布 (100 \times 100 ピクセルの領域を取り出して表示) (左) とあるピクセルの波高値のヒストグラム (中上・中下) と時間変動 (右上・右下)	17
3.12	積算時間によるペDESTALの変化。青、赤、黒がそれぞれ積算時間 5 ms, 50 ms, 500 ms で、暗電流の増加分が観測されている。	18
3.13	ペDESTALの平均値と積算時間の関係	18
3.14	^{55}Fe 照射実験セットアップ模式図	19
3.15	^{55}Fe 照射の様子	19
3.16	GSENSE5130 に ^{55}Fe の X 線 (5.9 keV と 6.5 keV) を照射した場合 (赤) と線源なしの場合の (黒) の波高値分布。露光時間は 50 ms \times 200 frame = 10 sec。左が Low Gain で右が High Gain。Low Gain で 490 ADU 付近にみえているのが、5.9 keV の X 線イベントに対応する。High Gain で 4000 ADU 付近にみえているのは信号レベルが飽和したピクセルである。	19

3.17	GSENSE5130 に ^{55}Fe 線源を照射して得た各種イベントの X 線スペクトル	20
3.18	シングルイベントのスペクトルのフィット結果。MnK α 線のスペクトルは低エネルギー側に非対称にのびているので、もう一本のガウス関数モデルを追加してフィットした。	20
3.19	GSENSE5130 で検出した X 線イベントの波高値マップ。100 \times 100 ピクセルの領域の各ピクセルの波高値マップ (a) とその領域で捉えた X 線のシングルピクセルイベント (b) と複数ピクセルに広がったイベント (c) の周辺拡大図。	21
3.20	XR-100T への X 線照射のセットアップ写真	21
3.21	CdTe 検出器 XR-100T と GSENSE5130 により取得した ^{55}Fe 線源照射時のスペクトル	22
4.1	回折格子と検出器面の座標系	25
4.2	波動場シミュレーションの模式図	28
4.3	回折格子のスリット数 N を変化させた時の検出器面上での強度分布。黒、水色、緑、青、赤の順に $N = 1, 2, 3, 10, \gg 1$ 。 $d = 5 \mu\text{m}$, $f = 0.2$ の振幅格子、 $\lambda = 0.1 \text{ nm}$, $z = 50 \text{ cm}$ ($m = 2$ の Talbot 距離)。	29
4.4	バンド幅をによる強度分布の変化	30
4.5	バンド幅 $\Delta\lambda/\lambda = \pm 10\%$ で 0.5 秒角離れた独立の点光源からの X 線が入射した場合に得られる強度分布	31
5.1	マイクロフォーカス X 線源 L8321-01 全体写真 [1]	36
5.2	CdZn 検出器で取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル。	37
5.3	X 線撮像システムの写真。XRPIX2b を検出器として使用した場合のセットアップ。	38
5.4	マイクロフォーカス X 線源を光源とした XRPIX2b による格子撮像実験セットアップ	39
5.5	ピクセル間をまたぐ電荷分割の模式図	40
5.6	ピクセル内でのシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントが生じる X 線吸収位置。赤がシングルピクセルイベントの領域で青がダブルピクセルイベントの領域。	40
5.7	フォールディング解析の概念図	41
5.8	カッターの刃の撮影セットアップ模式図	41
5.9	ナイフエッジのイメージ (上) と一部拡大イメージ (下)。10 \times 10 bin/pixel で表示している	42
5.10	射影プロファイル。黒がピクセル単位イメージより求めたプロファイルで赤が電荷分割解析を用いたプロファイル。	43
5.11	XRPIX2b で取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル	44
5.12	XRPIX2b で取得した格子撮像イベントイメージ。ピクセル単位イメージを表示している。	45
5.13	CA 軸へ射影した 1 次元プロファイルの一部 (CA: 40–60 pixel) 拡大。赤は水平方向のダブルピクセルイベントのみを使用したもので、黒は水平方向のダブルピクセルイベントとシングルピクセルイベントを使用したもの。(a) $R = 42 \text{ mm}$, (b) $R = 72 \text{ mm}$, (c) $R = 102 \text{ mm}$, (d) $R = 201 \text{ mm}$, (e) $R = 235 \text{ mm}$, (f) $R = 235 \text{ mm @} 88\text{--}107 \text{ ADU}$ 。	46
5.14	フォールディング解析による周期解析結果。ピーク位置が周期構造の検出位置に対応する。赤と黒の意味は図 5.13 と同じ。(a) $R = 42 \text{ mm}$, (b) $R = 72 \text{ mm}$, (c) $R = 102 \text{ mm}$, (d) $R = 201 \text{ mm}$, (e) $R = 235 \text{ mm}$, (f) $R = 235 \text{ mm @} 88\text{--}107 \text{ ADU}$ 。	47
5.15	1 周期で重ね合わせたプロファイル。(a) $R = 42 \text{ mm}$, (b) $R = 72 \text{ mm}$, (c) $R = 102 \text{ mm}$, (d) $R = 201 \text{ mm}$, (e) $R = 235 \text{ mm}$, (f) $R = 235 \text{ mm @} 88\text{--}107 \text{ ADU}$ 。	48
5.16	GSENSE5130 による格子像の撮影セットアップ	50

5.17	GSENSE5130 による格子像の撮影セットアップの写真	50
5.18	GSENSE5130 で撮影した格子像。検出器面 500×500 ピクセルの部分を 3×3 ピクセルでビンまとめをしている。	51
5.19	GSENSE5130 によって取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル	51
5.20	回折格子と光源プロファイルの畳み込み積分	52
5.21	GSENSE5130 $R = 42$ mm で得た強度分布 (青) と畳み込み積分を用いたプロファイルのベストフィットモデル (赤)	52
6.1	SPring-8 の中尺ビームライン BL20B2 の模式図 [7]	53
6.2	実験ハッチ内のセットアップ模式図。回折格子はスリット方向が、ほぼ鉛直方向になるように設置している。4 極スリットから回折格子までの距離は約 220 m である。	56
6.3	実験ハッチ 2 内のセットアップの写真	56
6.4	エネルギー 12.4 keV (上) と 24.8 keV (下) の X 線ビームを照射した際に GSENSE5130 で取得した X 線エネルギースペクトル。左の赤はシングルピクセルイベントで青がダブルピクセルイベントのスペクトル、右の緑が 3×3 イベントでマゼンタが 5×5 イベントのスペクトルである。回折格子の位置は $z = 230$ mm。	58
6.5	エネルギー 12.4 keV の X 線ビームを照射した場合の、シングルピクセルイベント + ダブルピクセルイベントのイメージ。波高値範囲は 1000–1200 ADU。(a) は格子・検出器間距離 $z = 37$ mm、(b) は $z = 230$ mm、(c) は $z = 350$ mm、(d) は $z = 460$ mm。	59
6.6	$z = 230$ mm (図 6.5b) のイメージを 0.37° 回転させて射影した 1 次元プロファイル	59
6.7	イメージを射影する際の回転角度とフォールディング解析する際の重ね合わせ周期の走査結果。入射 X 線のエネルギーは 12.4 keV で、シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントを用いている。横軸は回転角度で、縦軸はフォールディング解析の重ね合わせ周期で、 χ^2/dof の値をカラーコードで示している。走査を実施した範囲は $-3^\circ - +3^\circ$ であるが、 χ^2/dof の最大値付近を 2 段階に拡大表示している。	61
6.8	周期解析結果 (左) と検出周期で重ねた 2 周期分のプロファイル (右)	63
6.9	重ね合わせプロファイルと正弦関数によるフィッティング結果。左から右に向かって $z = 37$ mm, 230 mm, 350 mm, 460 mm。上から順にダブルピクセルイベント、シングルピクセルイベント、シングルピクセルイベント + 水平方向のダブルピクセルイベント、水平方向のダブルピクセルイベントの 1 次元プロファイル。	64
6.10	性能指標による評価。Single がシングルピクセルイベント使用、Double がダブルピクセルイベント使用、Single+H Double がシングルピクセルイベントと水平方向のダブルピクセルイベント使用、H Double が水平方向のダブルピクセルイベント使用。	65
6.11	解析に使用する領域の幅を変えて作成した重ね合わせプロファイル	66
6.12	解析に使用する領域幅によるコントラスト値の変化	66
6.13	広がったイベントに対する周期解析結果 (左) と 2 周期分の重ね合わせプロファイル (右)。緑が 3×3 イベントでマゼンタが 5×5 イベント。	67
6.14	24.8 keV 入射の場合の 5×5 イベント (1800–2200 ADU) のイメージ	68
6.15	24.8 keV 入射、 5×5 イベント重心位置のイメージを使用したフォールディング解析。回転角度と周期による χ^2/dof の走査結果を示している。全範囲と一部拡大。横軸は回転角度で、縦軸はフォールディング解析のテスト周期。	68

6.16	図 6.15 の走査から最適な回転角度を 0.66° と判定して、周期を細かく変えてフォールディング解析を行なった結果。 5×5 イベント重心解析でも 24.8 keV 入射のデータに対しては、周期構造は検出できなかった。	69
A.1	GSENSE 5130 で得られた 12.4 keV の X 線スペクトル	75
A.2	シングルイベントの波高値とその周囲のピクセルの波高値	76
A.3	図 A.2 の左を 50 ch ずつの領域に分けた様子	77
A.4	各領域でのガウスフィッティング	77
A.5	シングルの波高値とその左右のピクセルの波高値。赤:平均値、青:ガウスフィッティング	78
A.6	補正前のスペクトル (左) と補正後の 12.4 keV のスペクトル (右)	78

表目次

3.1	XRPIX2b の仕様 [5]	13
3.2	GSENSE5130 の仕様 [8]	15
3.3	GSENSE5130 で得た $\text{MnK}\alpha$ 線と $\text{MnK}\beta$ 線のシングルピクセルイベントのスペクトルのフィッティング結果	20
3.4	^{55}Fe 線源の $\text{MnK}\alpha + \text{MnK}\beta$ の X 線強度	22
3.5	GSENSE5130 の性能評価の結果。常温での動作。	23
5.1	回折格子の位置 R と格子像の期待周期	39
5.2	コントラスト値。H Double は水平方向のダブルピクセルイベント。	48
6.1	使用した実験データ	55
6.2	走査によって決めた最適回転角度と検出された周期	60
6.3	重ね合わせプロファイルのコントラスト値と解析に使用したイベント数。H Double は水平方向のダブルピクセルイベント。図 6.9 の正弦関数によるフィット結果から求めた。ただし、図 6.9 は 2 周期分を表示しているが、1 周期分に対するフィットで誤差を求めている。	65

第 1 章

序論

1.1 X 線天文学の歴史と現状

X 線天文学は 1962 年の R.Giacconi らによるガイガーカウンターを搭載したロケット実験で太陽以外の X 線で光る天体を初めて観測したことから始まり、1970 年に打ち上げられた最初の X 線天文衛星 *Uhuru* 以降は次々と観測衛星が打ち上げられて現在に至る。

これらに対し、斜入射反射鏡と位置検出型検出器を組み合わせた X 線望遠鏡は、1979 年打ち上げの *Einstein* 衛星に搭載されて以降、X 線天文衛星の主流となっている。特に、1993 年打ち上げの日本の *ASCA* 衛星では検出器に X 線 CCD が用いられ、X 線分光と撮像を同時に行うことで、多くの発見がなされた。1999 年打ち上げの *Chandra* 衛星、*XMM-Newton* 衛星、2005 年打ち上げの *Suzaku* 衛星、2016 年打ち上げの *Hitomi* 衛星、全てにこの形式の X 線望遠鏡 + X 線 CCD の観測装置が搭載されている。斜入射反射鏡とは名前の通り X 線の全反射を利用して集光を行う望遠鏡である。X 線の屈折率はほとんどの物質で 1 に近く、集光が難しいためこのような反射鏡が用いられている。X 線天文衛星に用いられる望遠鏡は Wolter I 型で、秒角から分角スケールの高い角度分解能を得ることができる。中でもアメリカの *Chandra* 衛星は 0.5 秒角の角度分解能を持ち、超巨大ブラックホール連星の発見など多くの功績を残している [9]。しかし、これを超えることは技術的にもコスト的にも容易ではなく *Chandra* 衛星が打ち上げられた 1999 年以降 0.5 秒角の分解能を超える衛星は打ち上げられておらず、2028 年度打ち上げ目標のヨーロッパの大型 X 線天文衛星 *Athena* でも角度分解能は 5 秒角とされている。

これを打破することを目標に X 線干渉計がいくつか提案されてきた。*MAXIM* 及び *MAXIM Pathfinder* という衛星計画では、平面鏡を用いて二本の X 線ビームの光路を曲げて一つの検出器上で干渉させるデザインをとっている。ただし、前哨版の *MAXIM Pathfinder* 計画でも 2 台の衛星を 450 km 離して編隊飛行させる必要があり実現の目途はたっていない。一方、立教大学のグループは二本の X 線ビームを半透明ミラーで透過/反射させ 2 個の検出器で検出するデザインで 1 台の衛星におさめるサイズの X 線干渉計デザインを提案しているが現在のところ X 線干渉縞の検出は報告されていない。いずれも光学系を用いており、その技術開発が実現の必要条件となっている。

一方で我々は、光学系を用いない新しい形式の X 線干渉計を提案し、これを X 線多重像干渉計 *MIXIM* (*Multi Image X-ray Interferometer Module*) と呼称している。本論文では第 2 章で *MIXIM* の原理について説明し、基礎開発としての地上実験での結果を第 5 章、第 6 章にまとめる。

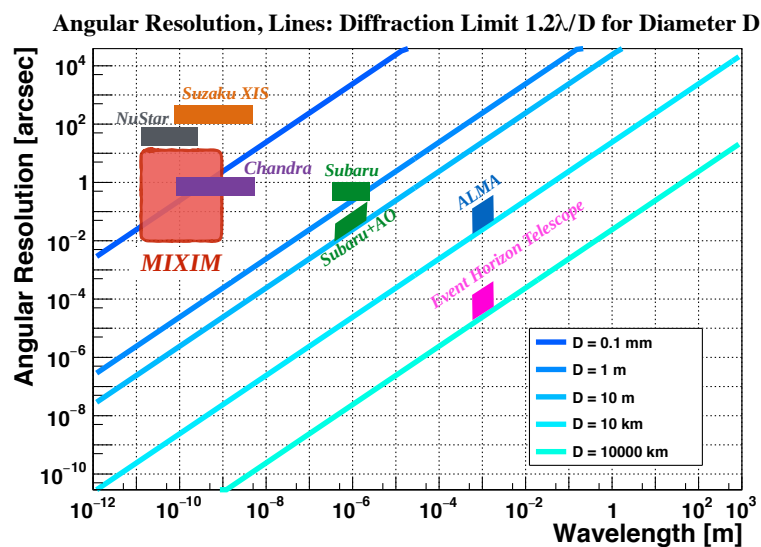


図 1.1: 一部の X 線天文衛星と天文台の角度分解能。直線は回折限界 $1.2\lambda/D$ (D は直径) で、上 (暗い方) から順に 0.1 mm, 1 m, 10 m, 10 km, 10000 km。赤で囲った領域が MIXIM の目指す角度分解能とエネルギーバンド。

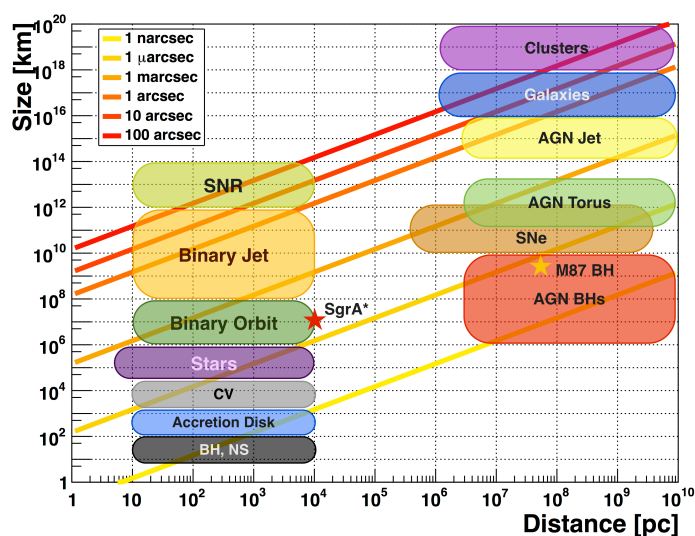


図 1.2: 天体の距離、サイズと見かけの視半径。角度分解能が 1 ミリ秒で AGN のトーラスやバイナリ天体が見えることが期待される。

第 2 章

X 線多重像干渉計 MIXIM 計画

本章では我々が提案している X 線多重像干渉計 *MIXIM* の概念と計画について述べる。

2.1 MIXIM の構造と原理

X 線多重像干渉計 *MIXIM* の構造は非常に簡単で X 線回折格子と X 線撮像分光型ピクセル検出器のみで構成される。図 2.1(a) のように天体からの X 線は回折格子を透過して検出器面上に格子像を形成する。図 2.1(b) のように 2 つの点光源からの X 線が到来した場合、ピンホールカメラと同様に光源間の距離を反映した 2 つ格子像が重なった像が得られる。得られる像の周期は回折格子のピッチに等しいので、重ねあわせることで精度の高い像が得られる。これが光源のプロファイルに他ならない。例えば、ピッチ $d = 5 \mu\text{m}$ 、開口率 $f = 0.2$ の格子から $z = 50 \text{ cm}$ の距離におくと、像の幅は $\Delta\theta = 0.4 \text{ arcsec}(f/0.2)(d/5 \mu\text{m})/(z/0.5 \text{ m})$ となり、*Chandra* 衛星の 0.5 arcsec を凌駕することになる。

ところが、X 線の波長、格子のピッチ、格子-検出器間の距離によっては回折格子の下流では回折が無視できず、格子の像は大きくなまされる。ここである特定の波長の X 線だけを選択すると、Talbot 効果とよばれる干渉によってシャープな格子像が得られる。検出された X 線イベントのうち、特定のエネルギーの X 線イベントのみ選び出し、また、それらの検出位置を格子ピッチで重ねあわせることで、光源プロファイルを得る。我々はこの原理の干渉計を提案し [2]、X 線多重像干渉計 (*MIXIM, Multi Image X-ray Ineterferometer Module*) と称している。X 線の波長 λ と回折格子のピッチ d を用いて Talbot 距離 z_T は式 (2.1) のように決まる。

$$z_T = m \frac{d^2}{\lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.1)$$

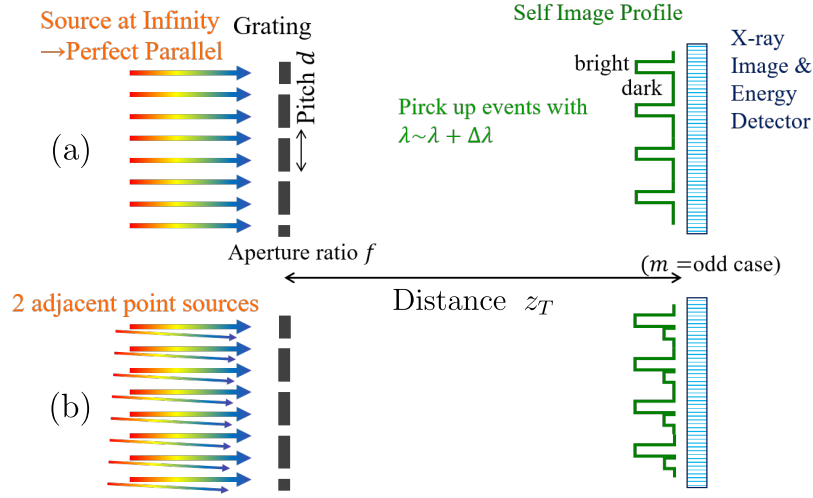


図 2.1: MIXIM の構造と撮像原理 [2]

格子周期 $d = 5 \mu\text{m}$ 、開口率 $f = 0.2$ 、回折格子から検出器までの距離 z を波長 $\lambda = 0.1 \text{ nm}$ の Talbot 距離 $z_T = 25 \text{ cm}$ の 2 倍 ($m = 2$) に選んだ時、像幅は式 (2.2) となり、Chandra 衛星の角度分解能を超える。

$$\theta = \frac{fd}{z} = 0.4 \text{ arcsec} \left(\frac{0.1 \text{ nm}}{\lambda} \right) / \left(\frac{m}{2} \right) \left(\frac{d}{0.5 \mu\text{m}} \right) \quad (2.2)$$

2.1.1 Talbot 効果と X 線 Talbot 干渉計

波動場のそろった高いコヒーレンスを持つ光が回折格子を透過すると、下流では干渉を起こし、回折格子からある特定の距離だけ離れた位置に格子像を形成する。この現象は Talbot 効果と呼ばれおり、1836 年に可視光において発見され、Rayleigh によって光の回折、干渉現象として説明された。X 線でも同様の現象は起きることが実証されたのは 1997 年 [10] になる。

格子の上流に試料をおくと、通過する X 線の位相が試料の厚み分だけずれる。この結果、格子の自己像がゆがむ。この歪みからフーリエ変換等の方法で試料通過の位相差像を再合成する方法が提案され [11]、X 線 Talbot 干渉計と呼ばれている。その後、放射光施設の平行 X 線のかわりにマイクロフォーカス X 線源や、さらに一般の X 線源を用いる方法 (Talbot-Lau 干渉計 [12]) も提案、実現されている。医療用途の実用試験もはじまっており、X 線位相コントラストイメージングの様々な手法の中で実用化の最前線にある。MIXIM の発案もこれらの X 線 Talbot 干渉計に触発されたものであるが、X 線 Talbot 干渉計では干渉縞の歪みから資料の構造をさぐることを目的にしているのに対し、MIXIM では光源のプロファイルを重ねあわせによって得る点で異なる。

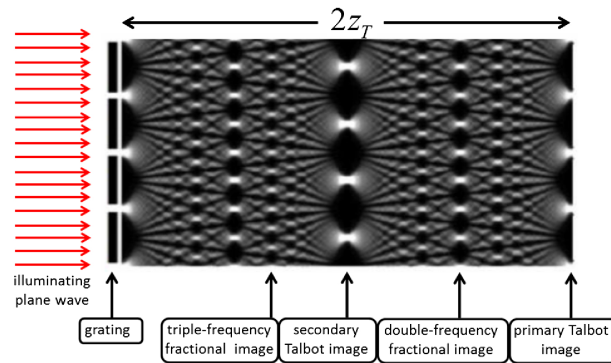


図 2.2: Talbot 効果による X 線の強度分布 [3]

2.1.2 X 線回折格子

X 線回折格子には透過型と反射型があるが、本研究では Talbot 効果を扱うため前者を用いる。さらに、入射 X 線に対して透過する部分と吸収する部分が交互に並んだ吸収型回折格子と、単に溝を掘ることで入射 X 線に対して位相差を与える位相型回折格子に分類される。本研究では図 2.3 の $4.8 \mu\text{m}$ ピッチ、Au 厚さ $17 \mu\text{m}$ 、Si 基盤 $200 \mu\text{m}$ の吸収型回折格子 [13] を使用した。X 線をブロックするような厚みの X 線吸収型格子の製作は容易ではない。LIGA プロセスという X 線リソグラフィーで作成される。このような格子の製作がなされた一つの動機が X 線 Talbot 干渉計の実用化にある。

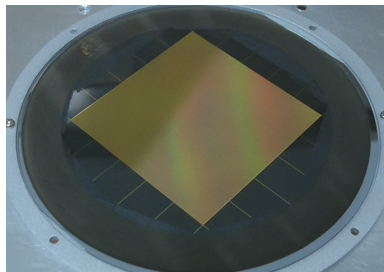


図 2.3: $4.8 \mu\text{m}$ ピッチ、Au $17 \mu\text{m}$ 厚の吸収型回折格子。ドイツのカーlsruhe工学研究所の放射光施設を利用して、同研究所発明の LIGA プロセスで製作された。日本代理店 ASICON 社より調達。

第 3 章

CMOS ピクセル検出器

この章では CMOS ピクセル検出器に関する基本的な説明と本研究で用いた CMOS ピクセル検出器である XRPIX と GSENSE の概要と検出器性能について述べる。CMOS ピクセル検出器について理解する上で [14][15] をよく参照した。

3.1 X 線ピクセル検出器の形式

X 線ピクセル検出器の大半はシリコン半導体を使用して製作されている。シリコン半導体 X 線ピクセル検出器を X 線検出方法で分類すると、直接撮像型と間接撮像型に分かれる。前者は、シリコン空乏層中で X 線が光電吸収された際に発生するキャリア（電子、正孔）を電極で収集する。それに対し、後者はシンチレータが X 線を光電吸収した際に発する紫外、可視域のシンチレータ光を、半導体ピクセル検出器で検出する。直接撮像型は、個々の光子のエネルギーをシリコン半導体検出器の分解能（ファノ限界で 120 eV@5.9 keV）で検出できる。X 線天文衛星に使用されているのは直接撮像型である。一方、個々の X 線光子のエネルギーを測定する必要がない医療用・工業用では多くの場合、間接撮像型が用いられる。本研究の *MIXIM* では、個々の X 線のエネルギーを測定し、Talbot 条件を満たす X 線イベントのみ使用する必要がある。従って、直接撮像型であることが必須である。一方、X 線用途に限らず、シリコン半導体ピクセル検出器を信号読み出し方式で分類すると、CCD (Charge Coupled Device) と CMOS (Complimentary Metal Oxide Semiconductor) ピクセル検出器の二つの形式が代表となる。シリコン半導体の各ピクセルで生じた信号電荷をバケツリレー的に転送する CCD に対して、CMOS ピクセル検出器（CMOS イメージセンサ）は、ピクセルに読み出し回路をもつ。CCD は長らく半導体ピクセル検出器の主流であったが、デジタルカメラやスマートフォンの画像センサーは、ここ数年で CMOS ピクセル検出器にほぼ置き換わった。かつての CMOS ピクセル検出器は、ノイズ等の面で CCD におとっていたが、現在は遜色なく、消費電力が小さいことも大きな利点となり、広く普及するに至った。可視光域でも科学計測目的には CCD が使用されているケースも多いが（例えば、すばる望遠鏡 Hyper Supreme Camera）、CMOS ピクセル検出器への転換も図られている。

現在軌道上にある、及び打ち上げを控えている X 線天文衛星では X 線用の CCD が用いられている。エネルギー分解能、検出効率、位置分解能の面で優れており、技術的成熟度も高いことがその理由である。一方で、CCD は電荷を転送して読み出すために、時間分解能の面で不十分である。X 線光子のエネルギー測定のためには、1 露出（1 フレーム）の間に、1 ピクセルに 2 個以上の光子が入ること（パイルアップ）を低い確率におさえなければいけない。望遠鏡の性能向上とともにこの問題は深刻になりつつあり、CMOS ピクセル検出器（あるいは別形式の各ピクセルごとに読み出すセンサー、Active Pixel Sensor）の開発、使用が進められている。

日本国内では、SOIPIX と総称される SOI 技術を使用した各種 CMOS ピクセル検出器の開発が、KEK を中心に分野横断的にすすめられている。その中で、X 線天文用途として京都大学を中心に開発されているのが、XRPIX である。本研究の前身が、XRPIX を使用した位相コントラストイメージングの Talbot 干渉計の開発 [6] であったこともあり、

最初は XRPIX を使用した実験から開始した。実際、マイクロフォーカス X 線源を用いた Talbot 干渉計でも、ミリ秒のフレームタイムでも計測できる XRPIX は秒単位のフレームタイムの X 線 CCD に比べてはるかに効率的である^{*1}ことが示されている [6]。しかし、MIXIM では原理的に微細なピクセルサイズが必要で、現状の XRPIX2b のピクセルサイズ $30\ \mu\text{m}$ では平行光撮影（第 6 章）には不適である。X 線用 CMOS ピクセル検出器は世界的にみても開発初期段階で、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の微細ピクセルのものは、国外を含めても開発されていない。一方、可視光用途であれば数 μm の微細ピクセルの CMOS ピクセル検出器は広く使用されており、科学計測目的と称される低ノイズの製品も数多く市販されている。本研究ではその中から Gpixel 社の GSENSE5130 というピクセルサイズ $4.25\ \mu\text{m}$ の素子を選び、X 線検出の可能性をさぐった。

3.2 MOSFET と CMOS ピクセル検出器の原理・構造

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOS 電界効果トランジスタ) とは金属、酸化膜、半導体の 3 層構造 (MOS 構造) を持つ電界効果トランジスタで、図 3.1 のゲート電極への電圧を調整することで Si 基板に電場を発生させるとドレイン-ソース間に反転層 (チャンネル) が形成され、電流を制御することができる。このような MOSFET を集積回路の中で組み合わせ、同一ピクセル内にフォトダイオード、増幅器、信号読み出しスイッチを集積したものが、CMOS ピクセル検出器 (CMOS イメージセンサ) である。

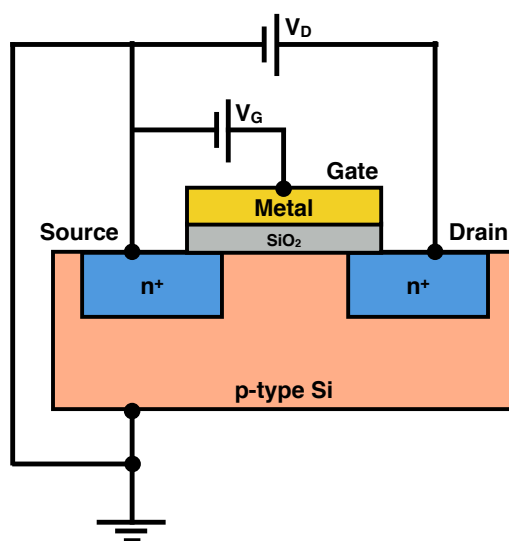


図 3.1: n-チャンネル MOSFET の模式図

3.2.1 MOSFET の動作原理

NMOS の場合を考える。PMOS の場合は符号を逆にすれば良い。ゲートに印加する電圧 V_G によって、酸化膜下の半導体は次の 3 つの状態をとる。表面電極に負の電圧を印加すると、酸化膜の電極側には正の、半導体側には負の電荷が誘起され、p 型半導体中のキャリア (正孔) が酸化膜下に集まる。表面電極に正の電圧を印加すると、酸化膜の電極側には負の、半導体側には正の電荷が誘起される。半導体と酸化膜の境界には電子が誘起されるとともに、正孔は電極側から排斥され、酸化膜下にはキャリアの少ない空乏領域が形成される。また、ゲートの反対側は電子が排斥されてい

^{*1} X 線強度を強くすることができるため総露出時間を桁で短くできる。

い領域が残されており、これを中性領域という。

空乏状態から、さらに大きな正の電圧をかけると、それにしたがって空乏領域も広がっていく。しかし、酸化膜表面に誘起される電子によって電場が遮断されるようになるため、あるところで空乏領域の成長は止まってしまう。このとき、本来少数キャリアであった電子濃度が正孔濃度よりも高い。反転領域が形成されると、ソースからドレイン間を電子が行き来できるため、電流が流れるようになる。この反転領域はチャンネルと呼ばれ、空乏状態から反転状態へ転換するとき（電子と正孔の濃度がつりあうとき）の電圧は閾値電圧 V_{th} と呼ばれる。このように MOSFET はゲートに加える電圧を調整することで、スイッチとして使用することもできる。

3.2.2 CMOS 回路と CMOS ピクセル検出器の構造

CMOS (Complementary MOSFET, 相補型 MOSFET) とは p -チャンネル MOSFET と n -チャンネル MOSFET を組み合わせた回路、あるいは回路素子をさす。どちらか一方の MOSFET を使用した論理回路素子では、例えば、オン状態では常に電流を流し続ける必要がある。それに対して、CMOS の構成をとると、論理を反転するタイミングでのみ電流を流せばよく、消費電流を低くおさえることができる。従って、コンピュータの CPU、メモリはじめ大規模集積論理回路 (LSI) の多くが CMOS を基本として構成されている。半導体素子製造のプロセスとして確立しており、かつ最先端の開発が常に進行している。CMOS ピクセル検出器はこのような CMOS 論理回路製造プロセスを利用して、フォトダイオードや増幅器を同一ピクセル内に集積した光検出器である。各列、各行のピクセルにはスイッチを介して、垂直信号線、水平信号線がつながっており、そのスイッチを切り替えることで、任意のピクセルの電荷を転送することなく読み出す。

3.2.3 表面照射型と裏面照射型

CMOS ピクセル検出器には CCD と同様に、受光面の違いにより表面照射 (Front Side Illuminated; FSI) 型と裏面照射 (Back Side Illuminated; BSI) 型がある。前者が電極側 (CMOS 回路側) で後者はその逆側のフォトダイオード側が受光面となる。裏面照射型は光子が電極を通過しない分、検出効率が高くなる利点があるが、入射面のシリコン基板を薄くけずなどの製造処理が必要になる。デジタルカメラなどの可視光用途では、ここ数年で裏面照射型が急激に普及してきているが、科学計測用には表面照射型が使用されることも多く、X 線用は現時点でも開発段階である。

3.2.4 フレームモードとイベント駆動モード・グローバル露光読み出しとライン露光読み出し

CCD では電荷の垂直転送と水平転送を組み合わせることで全ピクセルの電荷を順次読み出す。露光と全ピクセル読みだしの 1 サイクルをフレームと称している。CMOS ピクセル検出器は各ピクセルに読み出し回路がついているものの、やはり、露出と全ピクセルを読みだしの 1 サイクルをフレームとよぶ。フレーム単位で撮影することをフレームモードと称しており、CCD、CMOS ピクセル検出器、いずれも動作の基本となる。フレームモード以外にも動作方法、素子の構造の工夫で様々な動作モードが可能である。例えば、後述する XRPIX は X 線イベントが検出されたピクセルとその周辺ピクセルのも読み出す、イベント駆動モードの実現を目標にしている。ただし、本研究で取得したデータは全てフレームモードである。

フレームモード読み出しには、全面素同時タイミング（あるいは非常に短い時間幅）で電荷を読み出すグローバル露光読み出しモードと、1 ラインあるいは数ラインごとに順次読みだすライン露光読み出しモードがある。それぞれ、グローバルシャッター、ローリングシャッターと呼ばれることもある。本研究で使用した XRPIX2b はグローバル露光読み出しモードで、GSENSE5130 はライン露光読み出しモードで動作させている。

SOIPIX

SOIPIX とは KEK とラピスセミコンダクタを中心に開発されている Silicon On Insulator (SOI) 技術を用いた CMOS ピクセル検出器である。SOI 技術とは Si ウェハ上に酸化膜 (SiO_2) を作り、その上に別の Si 薄膜 (SOI 層) を作る技術であり、これにより抵抗率の異なる二種類のウェハを絶縁層をはさんで一枚のウェハ上に作成することが可能となる。SOIPIX 最大の特徴は、裏面に電圧 (バックバイアス電圧) をかけることで高抵抗率の Si (センサー層) を空乏化させて検出部として利用し、抵抗率の低い SOI 層に CMOS 回路を読み出し部として搭載することで、検出・読み出し一体型の検出器としている点である (図 3.2)。SOIPIX は配線部や MOSFET 部と基板部分が絶縁されているため、寄生容量が小さく高速動作が可能であり、かつリーク電流が低減されるため低消費電力を実現している。また放射線耐性が高いという利点がある。

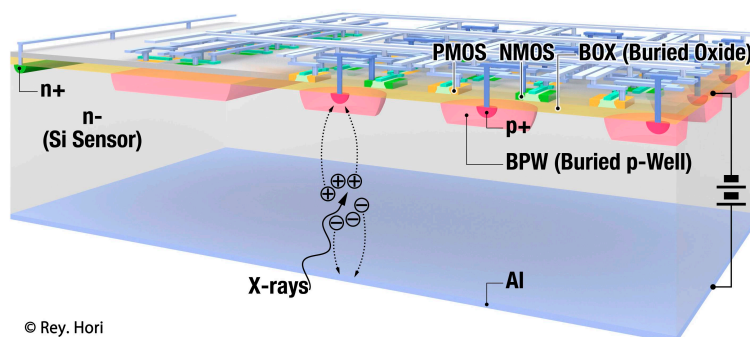


図 3.2: SOIPIX の構造 [4]

3.3 X 線フレームデータ解析プロセス

フレームモードで取得した X 線データの解析プロセスについて説明する。

3.3.1 ペDESTAL 補正

CMOS ピクセル検出器は光が入らない場合にも一定の信号出力を持つ。これは、主に各ピクセルの回路部で生じる熱ノイズと空乏層中で生じる暗電流に起因している。これをダークレベルあるいはペDESTAL と呼ぶ。ペDESTAL は各ピクセルによってそれぞれ異なり、固有のオフセット成分とノイズ成分をもつ。ここではまず、各ピクセル毎に一定のフレーム数毎に波高値の平均をとり、それを各ピクセルのペDESTAL 推定値としている。そして各フレームの各ピクセルからこのペDESTAL 推定値を差し引くことで、オフセット成分のピクセル間でのばらつきおよび時間変動が補正される。生の波高値からペDESTAL 値を差し引いた波高値のヒストグラムは、平均が 0 となるガウス分布に従うことが期待される。このガウス分布をゼロピークと呼び、ノイズ成分に相当する。その幅を読み出しノイズと定義する。

3.3.2 バッドフレームの除去

XRPIX2b でデータ取得をした場合、原因は明らかではないが、全フレームの 1% 以下の割合で他のフレームより出力が異常に大きいフレームが検出される。このようなフレームをバッドフレームと呼び、解析プロセスで除去している。各フレームの出力平均からフレーム間の平均値と標準偏差 (σ_{frame}) を求め、平均値よりも $3\sigma_{\text{frame}}$ 以上出力が離れたフレームをバッドフレームと判定している。

3.3.3 X線イベント選別アルゴリズム

ペDESTAL補正後の波高値を用いてX線イベント判定を行う。ピクセル検出器では、入射したX線により発生した電荷が複数のピクセルにまたがってしまうマルチピクセルイベントが存在する。空乏層の深い位置で発生した一次電子雲は読み出しノードがあるセンサー表面に到達するまでに広がり、近隣のピクセルで読みだされてしまう割合が大きくなる。よって、空乏層の深い位置まで到達できるようなエネルギーの高いX線でマルチピクセルイベントが起こりやすい。このようなイベントは複数のピクセルで電荷が回収されるので、入射したX線のエネルギーを正しく知るにはそれらの電荷を足し合わせる必要がある。マルチピクセルイベントも含めたX線イベントの判定について以下で順に説明する。

X線イベントの抽出

まず、あるピクセルの出力に着目したとき隣接した周囲8ピクセルの出力よりも大きく、かつ任意のイベント閾値を超えているとき、X線イベント（の中心）と定義する。イベント閾値は特に指定がない限り、読み出しノイズの10倍としている。

シングルピクセルイベントの判定

X線イベントと判定された中心のピクセルに隣り合う上下左右のピクセルの出力波高値が、任意のスプリット閾値よりも小さいとき、このイベントをシングルピクセルイベントと定義する。中心のピクセルの出力がシングルピクセルイベントのX線エネルギーとなる。スプリット閾値は読み出しノイズの3倍としている。

ダブルピクセルイベントの判定

イベント中心の上下左右のピクセルの出力値のうち、一つのみがスプリット閾値を超えたときダブルピクセルイベントと定義する。これは電荷雲が二つのピクセルにまたがったマルチピクセルイベントである。このときのX線エネルギーは、中心のピクセルとスプリット閾値を超えたピクセルの出力を足し合わせたものである。

その他のイベント

シングルピクセルイベント、ダブルピクセルイベントどちらにも判定されなかったイベントはその他のイベントと定義される。これらはイベント中心周囲の2ピクセル以上がスプリット閾値を超えたイベントである。後述するが、特にGSENSE5130では大きく広がったマルチピクセルイベントが多く、本研究では5×5ピクセルまでイベント判定を行う領域を広げて、3×3ピクセル内に広がったイベントと3×3ピクセルを超えて広がったイベントに区別して、それぞれ3×3ピクセルイベント、5×5ピクセルイベントと呼ぶ。

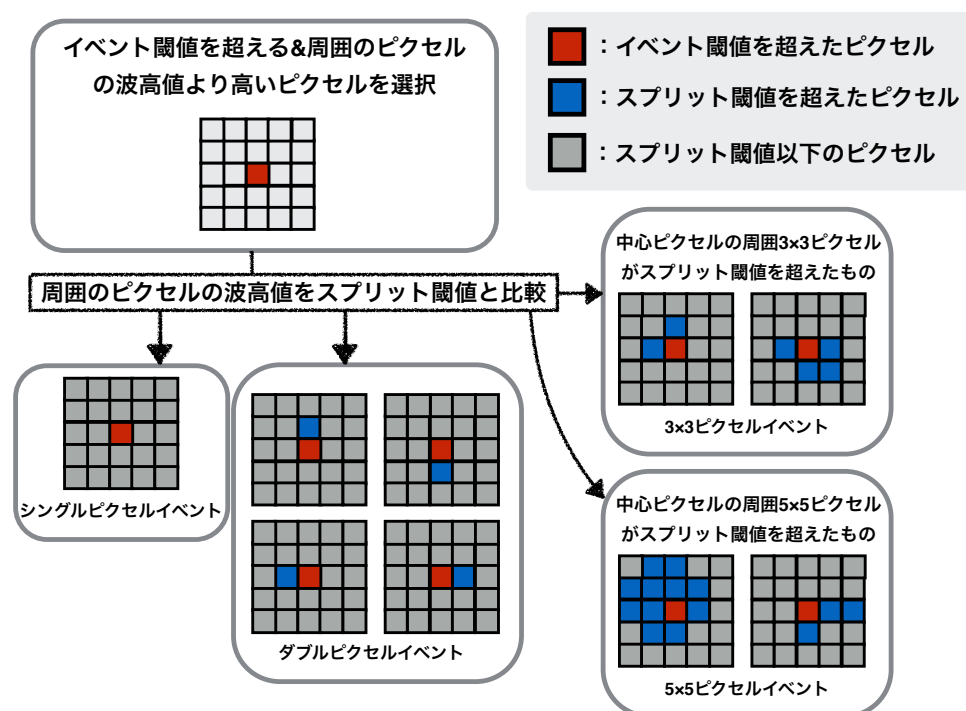


図 3.3: X 線イベント選別のフローチャート *1

3.3.4 クロストークの補正

GSENSE5130 において、あるピクセルに X 線が入射した際にその出力波高値に比例した出力が読み出し方向 (水平方向) 両隣のピクセルも現れている。詳しい原因は不明であるが、隣接ピクセル間での電氣的な干渉 (クロストーク) だと考えられる。このクロストークの補正を行うために実験データから補正パラメータを求め、イベント選別の際に閾値を超えたピクセルの両隣のピクセルの波高値に対して補正パラメータを差し引いた上でスプリット閾値との比較を行う。パラメータの決定方法等、詳しくは付録 A で説明する。

3.4 X 線用 SOI ピクセル検出器 XRPIX2b 検出器

XRPIX は SOIPIX の一環として、京都大学、KEK、ラピスセミコンダクタを中心に開発が進められている X 線天文用 SOI ピクセル検出器である。各ピクセルにコンパレータを実装することで X 線入射位置をトリガ信号として出力可能でイベント駆動読み出しすることができる。これにより、天体からの X 線と宇宙線 (陽子等の荷電粒子) 由来のバックグラウンドを同時計数による判別除去することができ、5 keV 以上のエネルギー帯で問題になる非 X 線バックグラウンドを軽減することが期待される。具体的な目標として 2020 年代打ち合わせを目標に検討されている *FORCE* 衛星の焦点面検出器としての利用が考えられている。ただし、本研究では一定時間露光させて全ピクセルの波高値を読み出すフレーム読み出しで使用している。XRPIX シリーズは XRPIX1 に始まり、現在では XRPIX6 まで開発が進められているが、本研究で使用するのは XRPIX2b 素子である。XRPIX2b の導入に関しては [6] に記述がある。

*1 XRPIX の場合は周囲 3×3 ピクセルのみでシングルピクセルイベントとダブルイベントのみを選別している。

3.4.1 XRPIX2b の仕様

XRPIX2b は XRPIX シリーズ 4 番目の素子で、仕様を表 3.1 にまとめる。センサー層のシリコンウェハの製造工程の違いにより、CZ 法による NHRI (n-type High Resistivity wafer ver.I) と FZ 法による NFZ (n-type Floating Zone wafer) の 2 種類がある。本研究で使用したのは NFZ の表面照射型の素子である。XRPIX2b の導入に関しては [6] に記述がある。

表 3.1: XRPIX2b の仕様 [5]

製造プロセス	NHRI	NFZ
チップサイズ	6.0 mm × 6.0 mm	
ピクセルサイズ	30 μm × 30 μm	
BPW サイズ	12 μm × 12 μm	
ピクセル数	152 × 152	
有効ピクセル数	144 × 144	
有効面積	4.3 mm × 4.3 mm	
厚さ	250 μm	500 μm
比抵抗	1 k Ω · cm	500 k Ω · cm
バックバイアス	5 – 500 V	

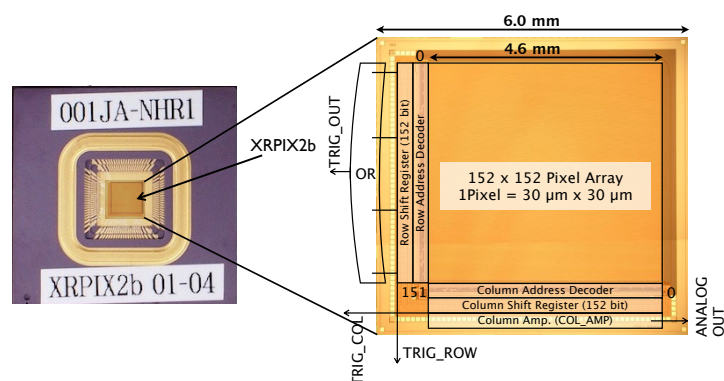


図 3.4: XRPIX2b のセラミックパッケージと素子のブロック図 [5]

3.4.2 読み出し回路、冷却装置、真空槽

XRPIX2b の制御とデータ取得には図 3.5 の SOI ピクセル検出器の汎用読み出しボード SEABAS (SOIPIX Evaluation Board with SiTCP) と素子を取り付けるサブボードを用いる。[6] に記されているように、素子をつけたサブボードは真空容器内に設置し、SEABAS ボードは変換ケーブルを通して真空層外に設置している。SEABAS ボードは LAN ケーブルを通してデータ取得用 PC に接続されている。バックバイアス電圧はソースメータを使用して 200 V 印加している。真空層は真空ポンプで 10^{-6} Torr 程度の真空度を保ち、スターリング冷凍機により -40°C 程度まで素子冷却ができるようになっている。

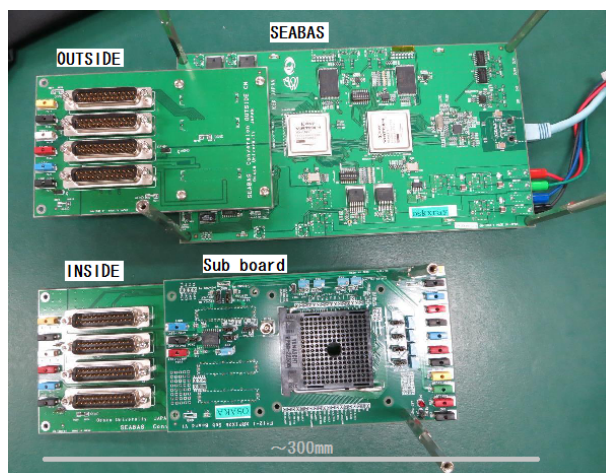


図 3.5: SEABAS ボードとサブボードの写真 [6]

3.4.3 XRPIX2b の性能評価

先行研究 [6] では素子への印加電圧と温度条件を変化させて、 ^{241}Am 線源を用いて X 線を照射した時の XRPIX2b のゲインとエネルギー分解能を調べている。結果としては素子温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、印加電圧 200 V でゲインが $6.97 \pm 0.02\text{ }\mu\text{V/e}^-$ 、エネルギー分解能が FWHM で $6.01^{+0.27}_{-0.26}\% @ 13.4\text{ keV}$ となっている。本研究ではこの条件で XRPIX2b を動作させた。

3.5 可視光用 CMOS 微小ピクセル検出器 GSENSE5130

$4.8\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの回折格子を用いて、平行光入射に対して *MIXIM* の原理で干渉縞を得るためには、少なくとも数 μm の位置分解能が必要となる。節 3.1 で述べたように、現時点でそのような微小ピクセルの X 線用 CMOS は開発されていない。X 線 CCD でもピクセルサイズは $24\text{--}72\text{ }\mu\text{m}$ である。そこで可視光用途まで範囲を広げて CMOS ピクセル検出器の検討をした。その過程で、中国で計画されている *Einstein Probe* という重力波 X 線対応天体探査計画に、Gpixel 社の科学計測用 CMOS ピクセル検出器が搭載予定であることがわかったことをきっかけに、同社のラインアップを調査した。我々の目的には、ピクセルサイズが小さいことが本質的であるため、同社のラインアップでも最小ピクセルサイズに近い、GSENSE5130 というピクセルサイズ $4.25\text{ }\mu\text{m}$ の素子を選択した。Gpixel 社の GSENSE シリーズの CMOS ピクセル検出器は様々な型式があり、国内でも使用がはじまっている。例えば、国立天文台の太陽観測グループはロケット実験 *FOXSI* の軟 X 線カメラ用に搭載することを計画しているが、GSENSE5130 とは型式、ピクセルサイズの異なるものである。ここでは、GSENSE5130 の X 線検出の性能を初めて調査する。これまで報告された中で最小のピクセルサイズの検出器の X 線検出性能となる。

3.5.1 GSENSE5130

GSENSE5130 の仕様を表 3.2 にまとめる。GSENSE5130 は可視光用途の表面照射型 CMOS ピクセル検出器であるため、パッケージには標準でカバーガラスがつけられており、さらに、素子表面にはピクセル毎に厚さ約 $1\text{ }\mu\text{m}$ のマイクロレンズが取り付けられている。今回はカバーガラスを外した素子を入手したが、マイクロレンズなしの素子が入手できなかった。一般的なマイクロレンズは図 3.7 のようにピクセル間に配置され、可視光線を電極から避けるように誘導する。GSENSE5130 も同様の構造になっていると推測するが詳細は不明である。GSENSE5130 では Low Gain

と High Gain の 2 つデジタル信号が素子から同時に出力される、High Dynamic Range という特長をもっている。それぞれのゲインはカタログ値で Low Gain が 0.2417 ADU/e^- 、High Gain が 3.8519 ADU/e^- となっている [8]。素子内臓の 12bit-ADC により AD 変換されるため、4096 ADU がフルレンジで、Si の電離エネルギー 3.65 eV/e^- を使って換算すると、Low Gain で約 60 keV、High Gain で約 4 keV に対応する。本研究で扱う X 線のエネルギーは 5 keV を超えるため、特に断りのない限り Low Gain のデータを用いている。将来的には、同時に High Gain のデータも取得するモードで動作し、低い信号レベルのピクセルに関しては High Gain のデータも参照するなど、有効活用できる可能性もあることは注意しておきたい。

表 3.2: GSENSE5130 の仕様 [8]

チップサイズ	19.29 mm × 24.23 mm
ピクセルサイズ	$4.25 \mu\text{m} \times 4.25 \mu\text{m}$
有効ピクセル数	5056×2968
有効面積	12.614 mm × 21.488 mm

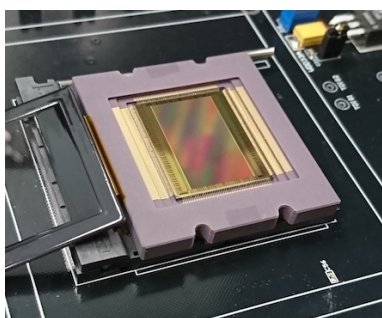


図 3.6: GSENSE5130 セラミックパッケージの写真

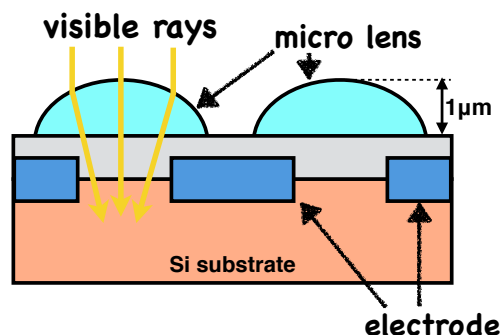


図 3.7: 一般的なマイクロレンズの配置。GSENSE5130 の構造はメーカーから公表されていない、レンズの厚み約 $1 \mu\text{m}$ のみメーカーから得た情報。

3.5.2 グローバル露光読み出しとライン露光読み出し

GSENSE5130 ではグローバル露光読み出しとライン露光読み出しの 2 つの読み出し方式に対応し、評価ボード上の FPGA ロジックを変更することで切り替えができる。ライン露光読み出しでは 1 フレーム中で各行の読み出しには時間差が生じるものの、読み出しノイズはグローバル露光読み出しに比べて小さい。本研究では GSENSE5130 は全てライン露光読み出しで動作させている。

3.5.3 読み出し回路と DAQ ソフトウェア

GSENSE の制御とデータ取得には Gpixel 社が用意している GSENSE5130 用評価ボードと評価用ソフトウェアを使用した。評価ボードは二本のカメラリンクケーブルによって、データ取得用 PC に装着したカメラリンク I/F ボード (NI PCIe-1433) に接続している。配線や設定については [16] に基づいて行った。一度にデータ取得可能なフレーム数は評価用ソフトウェアの制限で 200 frame となっている。

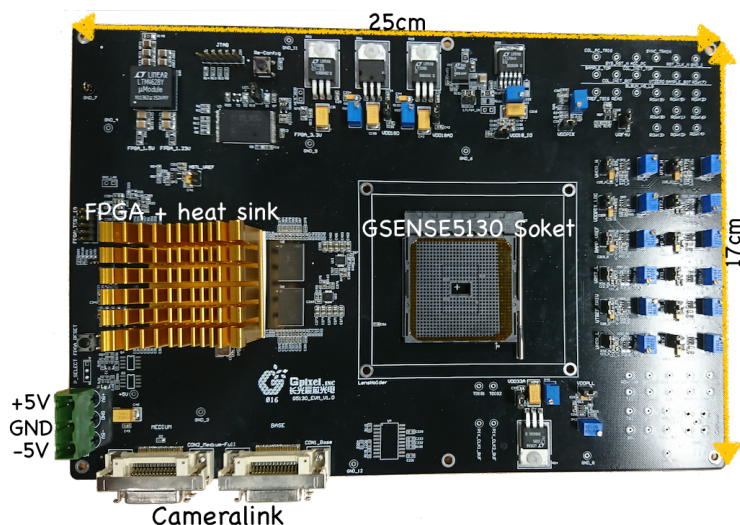


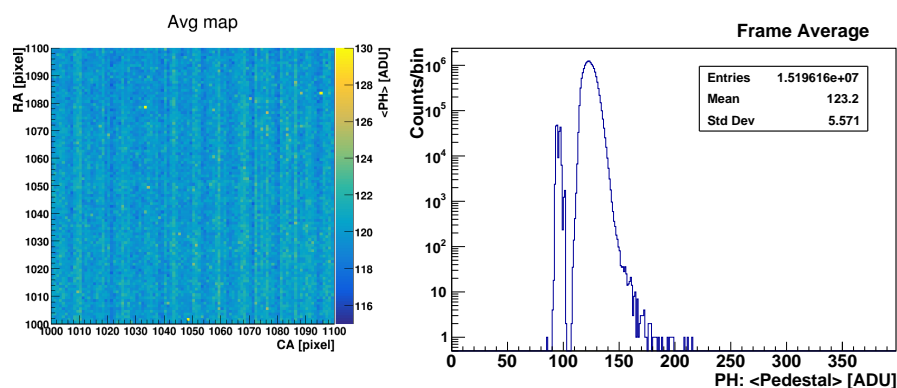
図 3.8: GSENSE5130 評価ボードの写真

3.6 GSENSE5130 の X 線応答と性能評価試験

先に述べたように、GSENSE5130 はもともと可視光用 CMOS ピクセル検出器であるため、X 線に感度があるのか否かから試験する必要がある。ここでは、GSENSE5130 の基本性能、および ^{55}Fe 線源からの X 線に対する検出性能、分光性能を調べた。なお、実験は全て常温大気中で実施している。X 線 CCD は一般に $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度に冷却する必要があり、XRPIX2b も $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ に冷却して使用している。冷却の必要がなければ真空装置も不要で、取り扱いが著しく容易になる点は注意したい。

3.6.1 ノイズ特性

GSENSE5130 のペDESTALレベルを確認するために周囲からの光を遮断した状態で GSENSE5130 を動作させ、露光時間 $50\text{ ms/frame} \times 200\text{ frame}$ でデータ取得を行なった。図 3.9 に得られた波高値の 200 フレーム分の平均の空間分布と波高値の 1 次元ヒストグラムを示す。100 ADU のピークは素子両端にあるダミーピクセルからの出力信号に対応する。

図 3.9: 波高値平均の空間分布（素子の一部 100×100 ピクセル分を表示）（左）と 1 次元ヒストグラム（右）

CMOS ピクセル検出器は各ピクセルに増幅器が取り付けられているため、増幅率のばらつきにより、ペDESTALの平

均レベルはピクセルごとに異なっている。これを補正するため、各ピクセル、各フレームの出力波高値から対応するピクセルの平均波高値を差し引いた。こうして行ったペDESTAL補正後の 1 次元ヒストグラムを図 3.10 に示す。この分布の幅 (標準偏差) を読み出しノイズと定義すると、Low Gain で $\sigma_{LG} = 2.288$ ADU、High Gain で $\sigma_{HG} = 8.089$ ADU である。

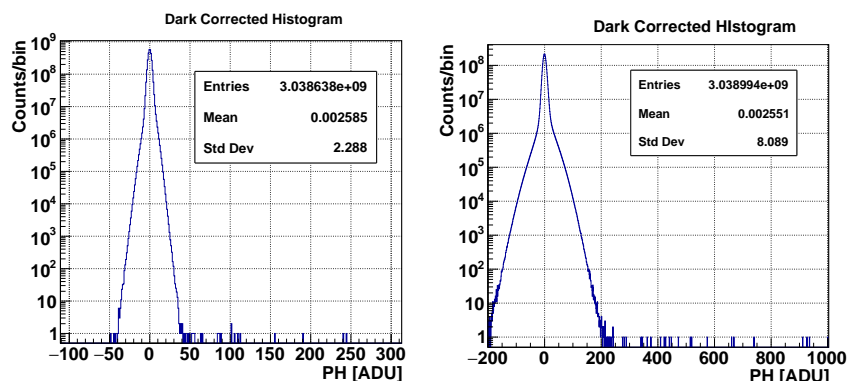


図 3.10: ペDESTAL補正後の各ピクセル、各フレーム波高値の 1 次元ヒストグラム。左が Low Gain、右が High Gain。

図 3.11 にピクセルごとの波高値のばらつき (200 フレーム分の標準偏差) の空間分布と任意に抽出した 2 ピクセルの波高値のヒストグラムと時間変動を示す。図 3.11 で上に示した例のように露光時間中常に安定した波高値を出力するピクセルもあれば、原因は不明だが、下に示した例のように不規則に大きく変動するピクセルもあることが分かった。

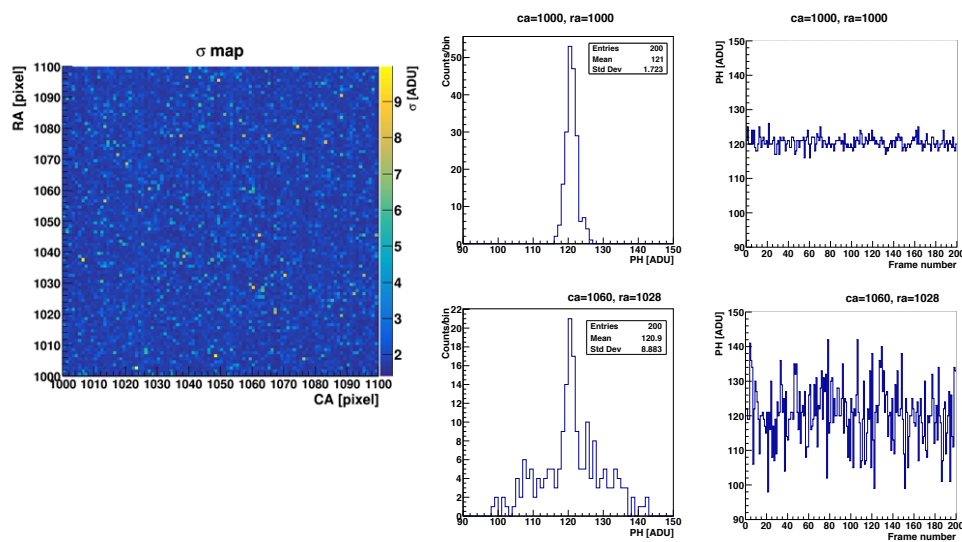


図 3.11: ピクセルごとの波高値のばらつき (標準偏差) の空間分布 (100 × 100 ピクセルの領域を取り出して表示) (左) とあるピクセルの波高値のヒストグラム (中上・中下) と時間変動 (右上・右下)

暗電流の見積もり

逆電圧をかけたフォトダイオードなどで、光が入射していない状態で流れる電流を暗電流と呼ぶ。暗電流は主に Si 結晶中の電子が熱エネルギーにより価電子帯から伝導帯へ励起されることが原因で生じる。CCD や CMOS ピクセル検出器に対しても、光を当てない状態で生じる信号電荷を称して暗電流と呼ぶが、フレームモードで一定時間に電荷を

蓄積してから読み出す場合、その積算時間に比例して暗電流も増加するため、1 ピクセルあたり、単位時間に発生する電子数で評価される。

GSENSE5130 の暗電流を調べるために積算時間を 5 ms, 50 ms, 500 ms と変えてデータを取得した。暗電流の時間変化を詳細にみるため High Gain のデータを示す。図 3.12 のようにペDESTAL レベルは積算時間が長くなるほど高くなる。図 3.13 は積算時間と波高値平均の波高値のプロットで、1 次関数でフィッティングしている。この傾きが暗電流 (ADU/sec) に対応し、 0.0113 ± 0.0009 ADU/sec である。これを GSENSE5130 のゲイン (ADU/e⁻) で割ると暗電流として $3 \text{ e}^-/\text{s/pixel}$ という値を得る。一般に暗電流は素子の温度に大きく依存するが、ここで示したのは常温、周囲温度 25 °C の結果である。素子温度は、素子内蔵の温度計から推測すると 40–50 °C である。

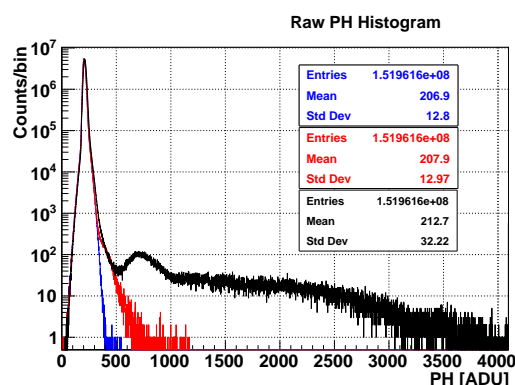


図 3.12: 積算時間によるペDESTAL の変化。青、赤、黒がそれぞれ積算時間 5 ms, 50 ms, 500 ms で、暗電流の増加分が観測されている。

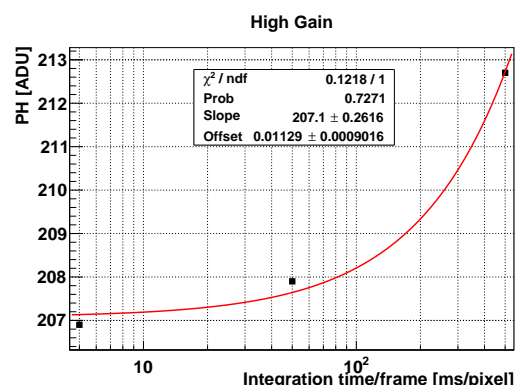


図 3.13: ペDESTAL の平均値と積算時間の関係

3.6.2 X 線に対する分光性能評価

図 3.14 のように、評価ボード上に遮光のための 10cm 角の暗箱を GSENSE5130 にかぶせる形で設置する。この暗箱 (にはった暗幕) の内側、GSENSE5130 表面から 23 mm 離れた位置に ^{55}Fe 線源を設置した。露光時間 $50\text{ms} \times 200 \text{ frame} = 10 \text{ sec}$ 、素子温度 25 °C の常温大気中で X 線を照射したところ、図 3.16 のような波高値分布が得られた。線源なし (黒) の分布に対して線源あり (赤) の方が明らかに高い波高値にも分布が伸びていることから、確かに X 線が検出できていることがわかる。さらに、左の Low Gain では 460–510 ADU 付近に 5.9 keV の $\text{MnK}\alpha$ 輝線と思われるピークが見えている。右の High Gain で 4000 ADU 付近のピークは 4095 ADU で飽和した出力波高値がペDESTAL 補正で広がって見えているものであり、飽和した出力波高値に対応する。

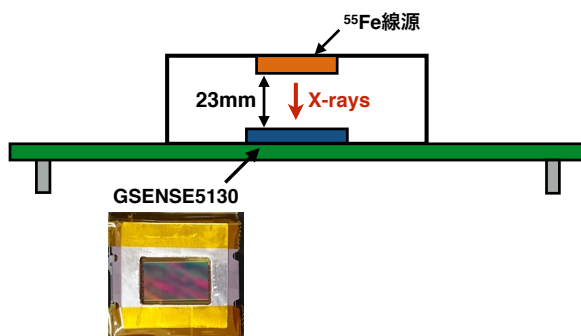
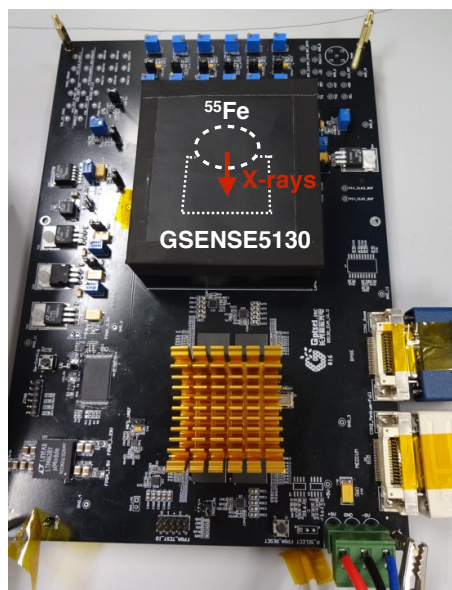
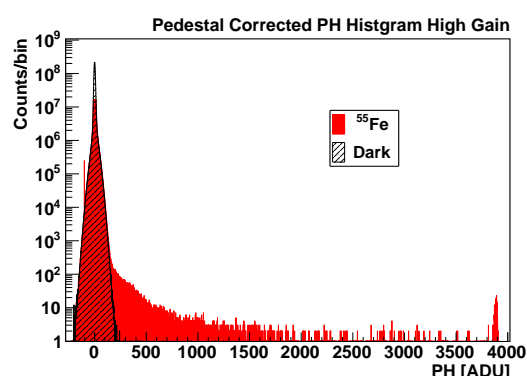
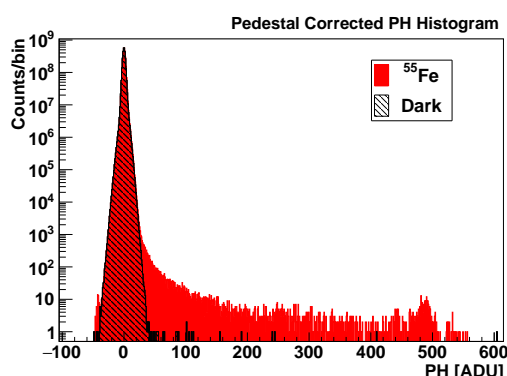
図 3.14: ^{55}Fe 照射実験セットアップ模式図図 3.15: ^{55}Fe 照射の様子

図 3.16: GSENSE5130 に ^{55}Fe の X 線 (5.9 keV と 6.5 keV) を照射した場合 (赤) と線源なしの場合の (黒) の波高値分布。露光時間は $50 \text{ ms} \times 200 \text{ frame} = 10 \text{ sec}$ 。左が Low Gain で右が High Gain。Low Gain で 490 ADU 付近にみえているのが、5.9 keV の X 線イベントに対応する。High Gain で 4000 ADU 付近にみえているのは信号レベルが飽和したピクセルである。

以上により、GSENSE5130 が 5.9 keV の X 線に対して感度を持つことが判明した。そこで、さらに露光時間を増やし、 $50 \text{ ms} \times 2000 \text{ frame} = 100 \text{ sec}$ 分のフレームデータを取得した。フレームデータに対して、3.3 節の方法で X 線のイベント選別を行った。イベント選別後のスペクトルを図 3.17 に、得られた X 線イベントの波高値の空間分布の例を図 3.19 に示す。図 3.19(b) のような 3×3 ピクセル以内に収まったイベントよりも、図 3.19(c) のように 3×3 ピクセルより広がったイベントが多く確認できた。図 3.19(b) のようなイベントは、空乏層中で X 線が光電吸収したケースに対応すると考えられる。一方、図 3.19(c) のようなイベントは、電場の弱い中性領域で吸収されたイベントが発生した電荷が、拡散によって大きく広がり、電極に収集されたケースと考えている。GSENSE5130 の電極構造や空乏層、中性領域の場所は情報が公開されておらず、不明である。しかし、このように広がったイベントも含めて、X 線に感度を持つ領域を有感領域と定義し、シングルピクセルイベントが生じる領域を空乏層と想定する。

図 3.17 に表示したスペクトルのうち、シングルピクセルイベントのスペクトルの $\text{MnK}\alpha$ 線 (5.9 keV) と $\text{MnK}\beta$ 線 (6.5 keV) のピークをガウス関数によってフィットしてゲインとエネルギー分解能を求めた (表 3.3)。なお、ここで $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ を利用している。5.9 keV に対するエネルギー分解能 220 eV はファノ限界 120 eV に比べると 2 倍近く大きな値であるが、常温動作でこのようなエネルギー分解能が得られた点は、 -100°C に冷却する必要がある X 線 CCD と比較して、大きなメリットである。

表 3.3: GSENSE5130 で得た $\text{MnK}\alpha$ 線と $\text{MnK}\beta$ 線のシングルピクセルイベントのスペクトルのフィッティング結果

	$\text{MnK}\alpha$	$\text{MnK}\beta$
Constant [Counts]	93.3 ± 3.3	7.9 ± 0.7
Center [ADU]	487.6 ± 0.3	535.0 ± 0.9
σ [ADU]	7.7 ± 0.3	10.1 ± 0.8

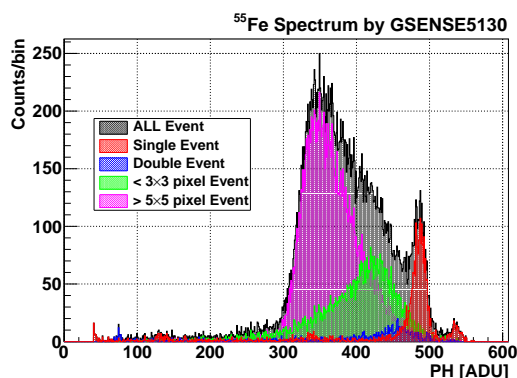


図 3.17: GSENSE5130 に ^{55}Fe 線源を照射して得た各種イ M $\text{nK}\alpha$ 線のスペクトルは低エネルギー側に非対称にのびてイベントの X 線スペクトル

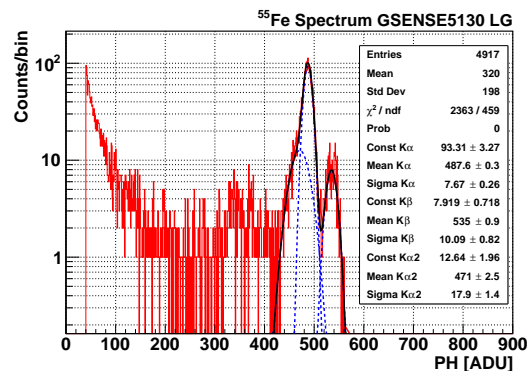


図 3.18: シングルイベントのスペクトルのフィッティング結果。
 いるので、もう一本のガウス関数モデルを追加してフィッ
 トした。

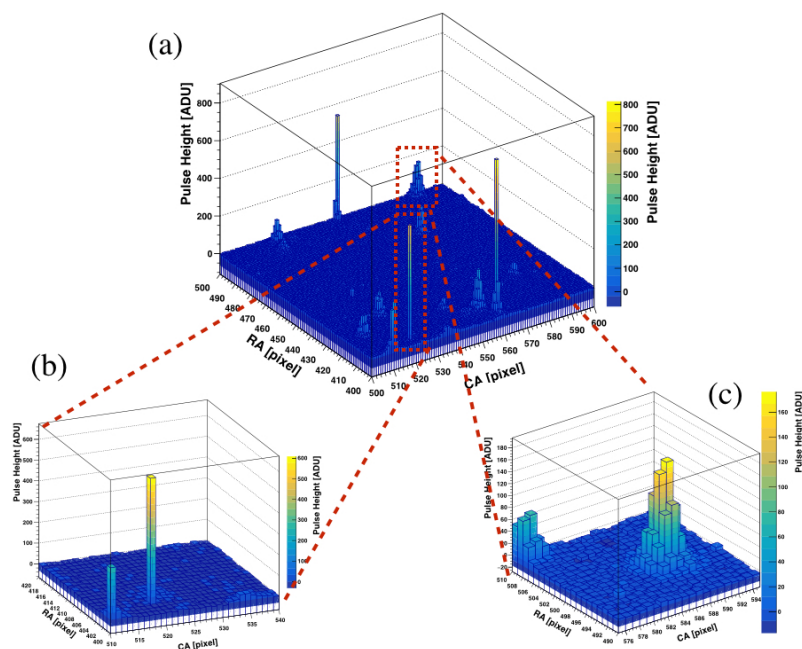


図 3.19: GSENSE5130 で検出した X 線イベントの波高値マップ。100×100 ピクセルの領域の各ピクセルの波高値マップ (a) とその領域で捉えた X 線のシングルピクセルイベント (b) と複数ピクセルに広がったイベント (c) の周辺拡大図。

3.6.3 X 線検出効率と空乏層厚・有感領域厚

X 線検出効率を求めるために、 ^{55}Fe 線源の X 線強度を Amptek 社の CdTe 検出器 XR-100T[17] を用いて校正した。XR-100T の検出器サイズは $5 \times 5 \text{ mm}^2$ で厚さは 1 mm、検出器前面には $100 \mu\text{m}$ 厚の Be 窓が取り付けられている。図 3.20 のように XR-100T 検出器面から 23 mm 離れた位置に ^{55}Fe 線源を設置し、露光時間 1000 sec でデータを取得した。図 3.21 は露光時間と立体角で規格化し、それぞれのゲインからエネルギー較正を行なったスペクトルである。CdTe 検出器 XR-100T のスペクトルについては Be による吸収を補正するために、得られたスペクトルを Be の透過率で割っている [18]。シングルイベントの検出効率 η_{single} と広がったイベントも含めた検出効率 η_{all} を $\text{MnK}\alpha$ と $\text{MnK}\beta$ の強度 (表 3.4) から計算すると、 $\eta_{\text{single}} \simeq 3.0\%$ 、 $\eta_{\text{all}} \simeq 55.4\%$ となった。

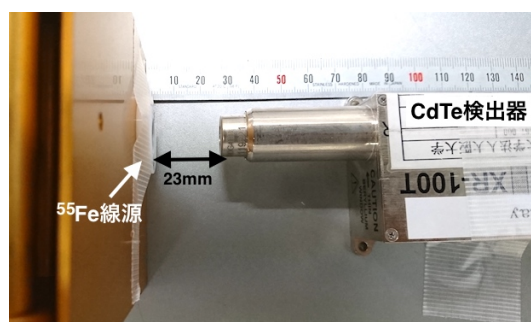


図 3.20: XR-100T への X 線照射のセットアップ写真

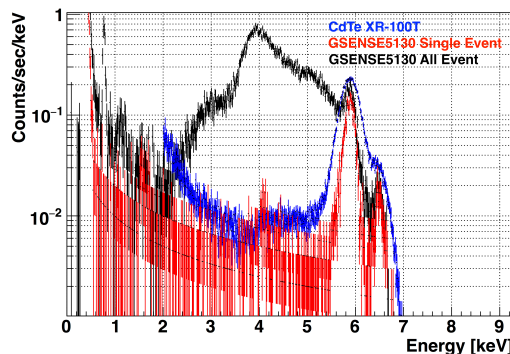
表 3.4: ^{55}Fe 線源の $\text{MnK}\alpha + \text{MnK}\beta$ の X 線強度

XR-100T (CdTe)	90.457 counts/mm ² /s
GSENSE5130 Single Event	0.107 counts/mm ² /s
GSENSE5130 All Event	2.004 counts/mm ² /s

CMOS ピクセル検出器の表面にある厚さ d の不感層があると仮定すると X 線の絶対強度 I_0 、空乏層の厚さ D に対して量子検出効率 η は以下のように計算できる。

$$\eta = \frac{I_0 [1 - \exp(-D/l)] \exp(-d/l)}{I_0} = [1 - \exp(-D/l)] \exp(-d/l) \quad (3.1)$$

l は X 線の物質中での平均自由行程である。ここで、CMOS ピクセル検出器の X 線入射面には厚さ $1\text{ }\mu\text{m}$ のマイクロレンズが取り付けられているため、これを $d = 1\text{ }\mu\text{m}$ の Si と仮定する。表 3.4 から求めた X 線検出効率と式 (3.1) を使うことで、空乏層の厚さ D_{single} と X 線に対して感度を持つ有効厚 D_{all} を求めることができる。結果として、それぞれ $D_{\text{single}} \simeq 0.9\text{ }\mu\text{m}$ 、 $D_{\text{all}} \simeq 25.5\text{ }\mu\text{m}$ となった。ただし、 l として Si 中での $5.9\text{ keV} - 6.5\text{ keV}$ の平均自由行程 $30\text{ }\mu\text{m}$ を使っている [18]。

図 3.21: CdTe 検出器 XR-100T と GSENSE5130 により取得した ^{55}Fe 線源照射時のスペクトル

3.6.4 ^{55}Fe から GSENSE5130 への X 線照射試験の結果のまとめ

性能評価試験の結果を表 3.5 にまとめる。Low Gain については求めたゲイン (ADU/eV) と Si の電離エネルギー 3.65 eV/e^- で割って、High Gain はカタログ値で電子数に換算した。

表 3.5: GSENSE5130 の性能評価の結果。常温での動作。

	Low Gain	High Gain
ゲイン	0.083 ADU/eV	1.055 ADU/eV[8]
エネルギー分解能	220 eV@5.9 keV	—
	287 eV@6.5 keV	—
読み出しノイズ	$6.6 e^-$	$2.1 e^-$
暗電流	—	$3 e^-/\text{s/pixel}$
	空乏層	有感領域
検出効率@6keV	3.0%	55.4%
厚さ	$1 \mu\text{m}$	$26 \mu\text{m}$

第 4 章

Fresnel 近似による MIXIM 撮像システムの検討

第 2 章でも述べたが、Talbot 効果は光が回折格子を通過した下流で回折・干渉を起こし、ある特定の位置で格子の自己像を形成する現象である。本章では Talbot 効果について Fresnel 回折積分を用いて説明する [19]。さらに、MIXIM 撮像システムの実験装置のための計算を実施する。特に、厳密には、ある特定の波長に対して成立する Talbot 効果に関して、多少ずれた波長の X 線は混入した場合にどのようなさまになるかが、MIXIM を干渉計として使用する場合のバンド幅になる。この点に着目する。

4.1 Fresnel 回折と Talbot 効果

図 4.1 のように単色平面波（波長 λ ）の X 線が $-z$ 方向から (ξ, η) 面の回折格子に入射し、 (x, y) 面の検出器で X 線を捉えた場合を考える。 $z = 0$ の回折格子の開口関数を $T(x, y)$ とすると、回折格子より下流の位置 z におけるスカラー波動場の複素関数 $U(x, y, z)$ は式 (4.1) のように表せる。

$$U(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{\sqrt{i\lambda z}} \iint T(\xi, \eta) \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda z} (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 \right] d\xi d\eta \quad (4.1)$$

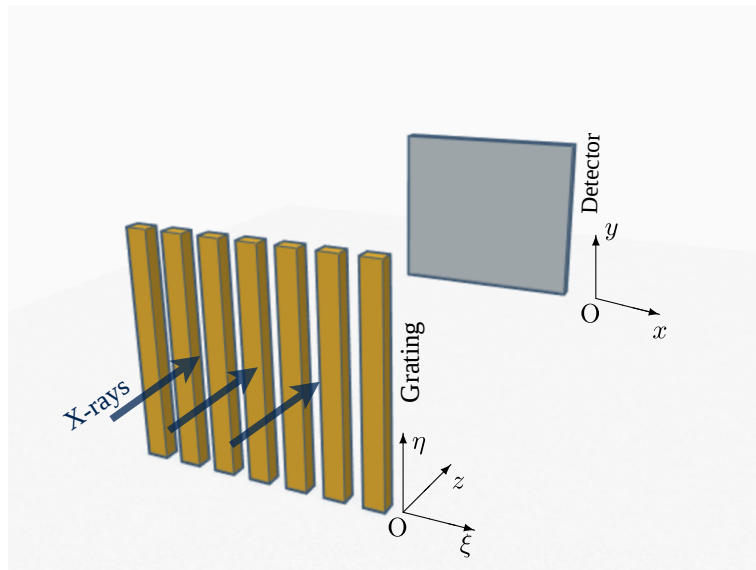


図 4.1: 回折格子と検出器面の座標系

回折格子は開口が周期 d の 1 次元格子であるので、開口関数は $T(\xi)$ であり式 (4.1) の η 積分を実行できる。また、 z 方向の位相子は省略して $\exp(ikz) \sim 1$ とすると、

$$U(x, z) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda z}} \int T(\xi) \exp \left[\frac{i\pi}{\lambda z} (\xi - x)^2 \right] d\xi \quad (4.2)$$

となる。さらに、 $T(x)$ を Fourier 級数展開を用いて表すと

$$T(x) = \sum_n a_n \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} x \right) \quad (4.3)$$

となる。 a_n は Fourier 係数で、式 (4.3) を用いると式 (4.2) は解析的に解くことができ、

$$U(x, z) = \sum_n a_n \exp \left(-i\pi\lambda \frac{n^2}{d^2} z \right) \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} x \right) \quad (4.4)$$

となる。また、回折格子の下流での強度分布 $I(x, z)$ は

$$\begin{aligned} I(x, z) &= |U(x, z)|^2 \\ &= \sum_n b_n(z) \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} x \right) \end{aligned} \quad (4.5)$$

となる。ここで

$$b_n(z) = \sum_{n'} a_{n'+n} a_{n'}^* \exp \left(-i\pi\lambda \frac{(n' + n)^2 - n'^2}{d^2} z \right) \quad (4.6)$$

であり、 $b_n(z)$ は強度分布の n 次の Fourier 係数となっている。ここで、式 (4.4) において、

$$z = m \frac{d^2}{\lambda} \quad (4.7)$$

の場合を考える。 m は自然数で Talbot 次数と呼ばれる。

m が偶数である場合、式 (4.4) は

$$\begin{aligned} U \left(x, m \frac{d^2}{\lambda} \right) &= \sum_n a_n \exp \left[i2\pi \frac{n}{d} x \right] \\ &= T(x) \end{aligned} \quad (4.8)$$

となり、回折格子透過直後と同じ複素振幅分布および強度分布が得られることがわかる。この現象を Talbot 効果と呼び、回折格子と同じパターンの強度分布を自己像と呼ぶ。

m が奇数の場合、式 (4.4) は

$$\begin{aligned} U \left(x, m \frac{d^2}{\lambda} \right) &= \sum_n a_n \exp(-i\pi n^2) \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} x \right) \\ &= \sum_n a_n \exp(i\pi n) \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} x \right) \\ &= \sum_n a_n \exp \left[i2\pi \frac{n}{d} \left(x + \frac{d}{2} \right) \right] \\ &= T \left(x + \frac{d}{2} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

となり、回折格子に対して半周期分ずれた像が生じる。一般にはこれも含めて Talbot 効果と呼ぶ。Talbot 効果は回折格子からの距離が

$$z = m \frac{d^2}{\lambda}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4.10)$$

の面で起こることがわかる。Talbot 効果が表れる距離、つまり m が自然数の場合の式 (4.7) の距離を Talbot 距離と呼ぶ。

回折格子として、開口率が 0.2、開口部の振幅透過率が 1、それ以外の部分の振幅透過率が 0 であるような振幅格子を用いた場合、その自己像の強度分布 I_R は

$$I_R \left(x, m \frac{d^2}{\lambda} \right) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin \left(2\pi \frac{2n+1}{d} x \right) \quad (4.11)$$

となる。

以上のように、Talbot 距離、つまり m を自然数として $z = md^2/\lambda$ だけ離れた位置で Talbot 効果が生じることがわかったが、実際には m が自然数以外の位置でも x 方向に周期的なパターンが生じることが知られており、これを分数 Talbot 効果という。特に回折格子として位相格子を用いた場合は、 $z = (m - 1/2)d^2/\lambda$ の位置でコントラストの高いパターンが現れることが知られている。

なお Talbot 効果が生じる条件として、回折格子に入射する光の空間コヒーレンス長が格子の周期長程度かそれ以上である必要がある。光源から回折格子までの距離を R 、光源の大きさを σ とすると、波長 λ の X 線に対する空間コヒーレンス長 l_S は

$$l_S \sim \lambda \frac{R}{\sigma} \quad (4.12)$$

与えられる。つまり、波長 λ を固定すると、光源から格子までの距離が長いほど、光源のサイズが小さいほど回折・干渉の保障される距離が長くなる。

4.1.1 球面波による Talbot 効果

ここまでは入射波が平面波である場合について考えたが、球面波の場合でも Talbot 効果は生じる。

点光源から発生した球面波の複素振幅分布は点光源からの距離 r の関数として

$$U(r) = \frac{1}{r} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} r \right) \quad (4.13)$$

と表わされる。点光源から回折格子までの距離を R とすると、回折格子面上の点 (x, y) での複素振幅は $R \ll x, y$ とする近軸近似を用いて

$$U(x, y, R) \cong \frac{1}{R} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} R \right) \exp \left(i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda R} \right) \quad (4.14)$$

とかける。回折格子透過直後の複素振幅分布は、回折格子の開口関数 $T(\xi)$ と $U(x, y, R)$ の積で表わせるので、回折格子から z だけ下流の位置における複素振幅分布は Fresnel 回折積分より

$$\begin{aligned} U(x, y, R+z) &= \frac{1}{i\lambda z} \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \right) \iint T(\xi) E(\xi, \eta, R) \exp \left[i\pi \frac{(x-\xi)^2}{\lambda z} \right] d\xi d\eta \\ &= \frac{1}{\sqrt{i\lambda R z (R+z)}} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} (R+z) \right] \int T(\xi) \exp \left(i\pi \frac{\xi^2}{\lambda R} \right) \exp \left[i\pi \frac{(x-\xi)^2}{\lambda z} \right] d\xi \end{aligned} \quad (4.15)$$

となる。開口関数 $T(\xi)$ は式 (4.3) のように書けるので、式 (4.15) は解析的に解けて

$$U(x, z) = \frac{1}{R+z} \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} (R+z) \right] \sum_n a_n \exp \left(-i\pi \lambda \frac{n^2}{d^2} \frac{Rz}{R+z} \right) \exp \left[i2\pi \frac{n}{d} \frac{R}{R+z} x \right] \quad (4.16)$$

となり、強度分布は

$$I(x, z) = |U(x, z)|^2 = \frac{1}{(R+z)^2} \sum_n b_n \left(\frac{Rz}{R+z} \right) \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} \frac{R}{R+z} x \right) \quad (4.17)$$

となる。式 (4.16) より、平面波の場合と同様に考えると

$$z = z_m = \frac{md^2}{\lambda} \frac{R}{R - \frac{md^2}{\lambda}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4.18)$$

において Talbot 効果が生じる。このように球面波の場合は、平面波の場合とは異なる位置で Talbot 効果が観測されることがわかる。

またこのとき生じる自己像は

$$U(x, z_m) \propto \sum_n a_n \exp \left[i2\pi \frac{nx}{(1 + z_m/R)d} \right] \quad (4.19)$$

であり、自己像の周期は回折格子の周期 d の $\left(1 + \frac{z_m}{R}\right)$ 倍に拡大される。

4.2 平行光の場合の波動場シミュレーション

節 4.1 でも述べたように Talbot 効果は Fresnel 回折積分を用いて計算することができる。ここでは実際に格子のパラメータと X 線のエネルギーを仮定して検出器面に現れる干渉縞の強度分布の計算を行う。ただし、ここで仮定する回折格子は開口部で X 線をそのまま通し、遮蔽部分で X 線を完全に止めるような理想的な振幅型回折格子とする。

まず、セットアップについては節 2.1 の説明と同じで、図 4.2 のように、開口率 0.2、 $5 \mu\text{m}$ ピッチの回折格子で、回折格子から検出器面までの距離を z を波長 $\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 、 $m = 2$ の Talbot 距離 $z_T = 50 \text{ cm}$ とする。

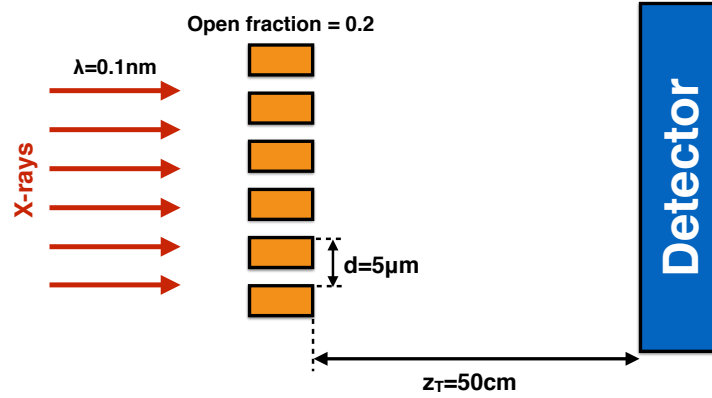


図 4.2: 波動場シミュレーションの模式図

まず、回折格子のスリット数 N を変化させながらフレネル回折積分を行なった。 N に対する検出器面上での強度分布を図 4.3 に示す。黒、水色、緑、青、赤の順に $N = 1, 2, 3, 10, \gg 1$ となっている。 $N = 1$ (開口が 1 つ) の場合は回折により像が数十 μm にわたって広がっていることが分かる。スリット数を増やすと干渉が効いてきて $N = 10$ では開口幅程度の Talbot 自己像が現れている。さらに $N \gg 1$ では矩形の Talbot 自己像が現れている。以降、 $N \gg 1$ の条件で計算を行う (実際には周期的境界条件を仮定した計算でこれを実現している)。

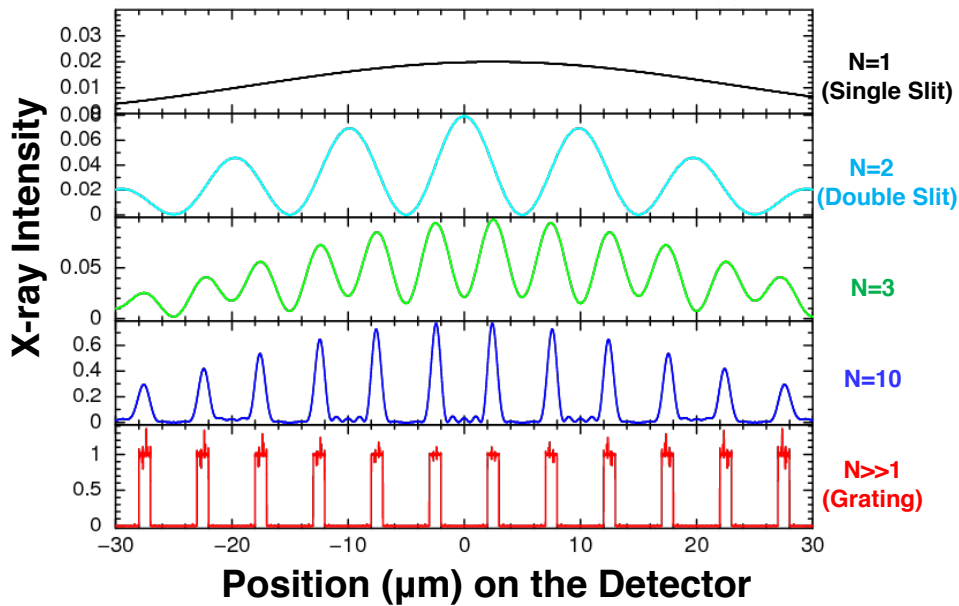


図 4.3: 回折格子のスリット数 N を変化させた時の検出器面上での強度分布。黒、水色、緑、青、赤の順に $N = 1, 2, 3, 10, \gg 1$ 。 $d = 5 \mu\text{m}$, $f = 0.2$ の振幅格子、 $\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 、 $z = 50 \text{ cm}$ ($m = 2$ の Talbot 距離)。

格子 - 検出器間距離を固定した場合、Talbot 効果は特定の波長に対して期待される現象である。しかし、天体からの放射は様々な波長の X 線を含み、しかも、X 線検出器のエネルギー分解能はゼロではない値なので存在するため、単一エネルギーのイベントを取り出すことは不可能である。そこで、実際にどれくらいのバンド幅をこの Talbot 干渉計として使用できるかを見積もるために、バンド幅 $\Delta\lambda/\lambda = \pm 0.5\%, \pm 10\%, \pm 60\%$ での強度分布を計算した。結果を図 4.4 に示す。図 4.4a が $\Delta\lambda/\lambda = \pm 0.5\%$ 、図 4.4b が $\Delta\lambda/\lambda = \pm 10\%$ 、図 4.4c が $\Delta\lambda/\lambda = \pm 60\%$ 中央の段、マゼンタで示したのが Talbot 干渉条件での格子自己像で、上下の段はバンド幅内で波長を変えた場合の強度分布に対応する。一番下の段の紫はその上に 11 段にわたって示した異なる波長の強度分布の平均である。図 4.4a ではいずれの段においても Talbot 自己像と同程度の幅となっており、強度分布の平均も Talbot 自己像に対してほとんど劣化がない。図 4.4b では、例えば 0.9λ のケースなど格子の自己像とは大きく異なる強度分布となっているが、バンド幅で平均した強度分布は光源のプロファイルを算出するには十分なコントラスト、格子と同じ周期性をもっている。一方、図 4.4c ほどバンド幅を広げると、平均強度分布をとっても格子の周期の 2 倍の位置にもピークが出るなど、光源プロファイルを測定するのに困難が懸念される。

以上から $5 \mu\text{m}$ ピッチの回折格子を用いて、 $m = 2$ の Talbot 距離 $z = 50 \text{ cm}$ に検出器を置いた場合の有効バンド幅は $\Delta\lambda/\lambda = \pm 10\%$ 程度と評価する。Talbot 効果の原理から考えて、このバンド幅は m に反比例することが想定できる。つまり、バンド幅はとして $\Delta\lambda/\lambda = \pm(2/m)10\%$ と評価する。シリコン半導体検出器のエネルギー分解能はファノ限界で 2% 程度である。バンド幅 $\pm 10\%$ に対してファクタ 5 の余裕があり、CCD や CMOS ピクセル検出器を使用したエネルギー選別で十分であることを示している。

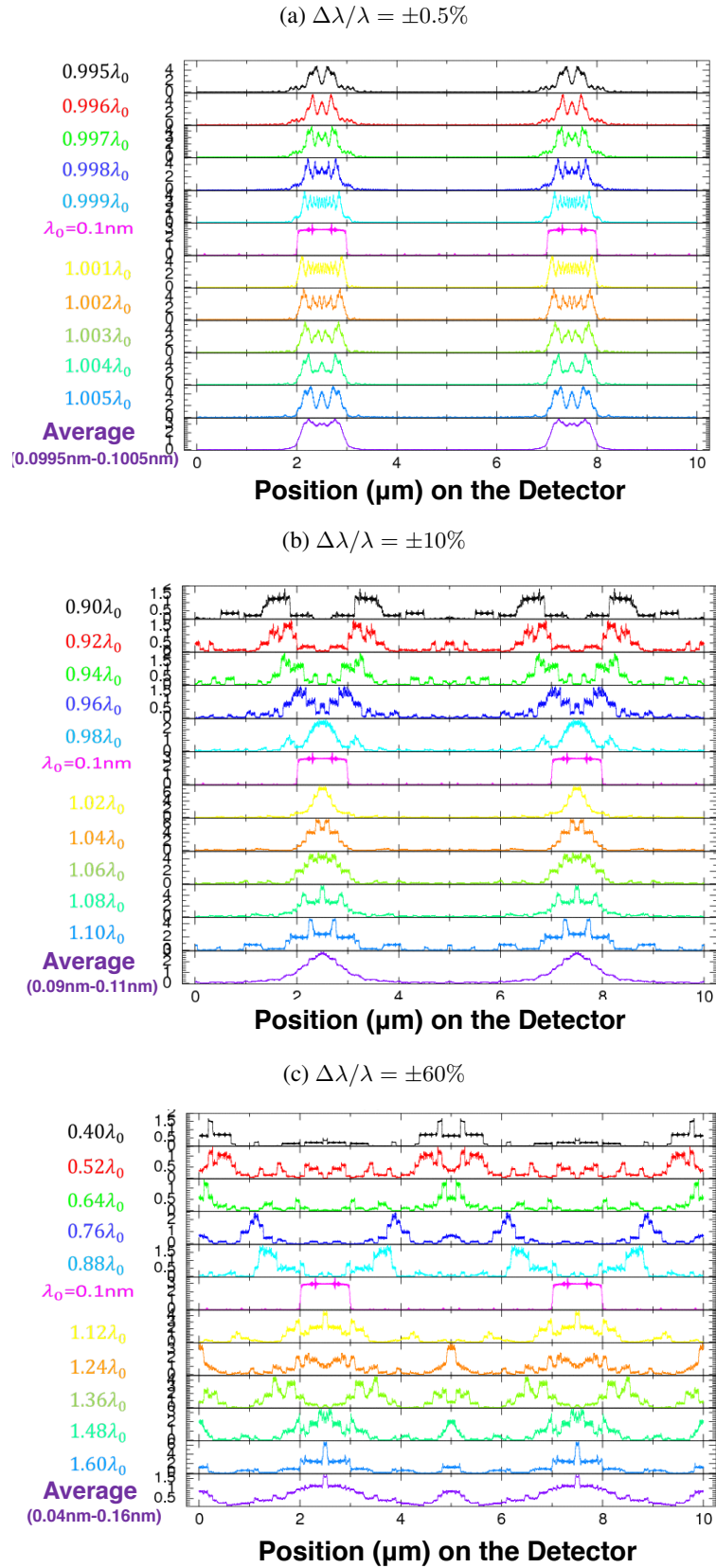


図 4.4: バンド幅をによる強度分布の変化

0.5 秒角離れた独立の点光源からの X 線が入射した場合、干渉は起こさないで光源プロファイルは 2 つの強度分布の足し合わせとして得ることができる。すると、図 4.5 のように 0.5 秒角離れた位置に Talbot 自己像が現れる。このようにして、例えば天体のサイズを知ることができる。

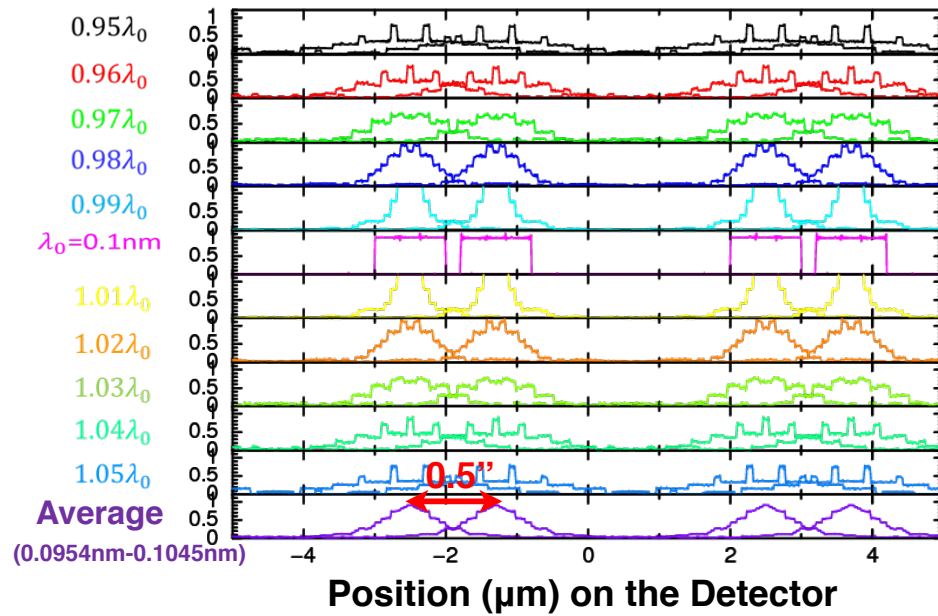


図 4.5: バンド幅 $\Delta\lambda/\lambda = \pm 10\%$ で 0.5 秒角離れた独立の点光源からの X 線が入射した場合に得られる強度分布

第 5 章

マイクロフォーカス X 線源を用いた拡散光による撮像実験

この章では、マイクロフォーカス X 線源と呼ばれる直径数 μm 程度の微小な焦点をもつ X 線発生装置を使用した、大学実験室内での実験に関して記す。

5.1 マイクロフォーカス X 線源

5.1.1 X 線発生装置 (X 線管) の原理 [1]

一般的な X 線発生装置 (X 線管) の基本原理は以下のとおりである。まず空気中のちりなどによる放電を防ぐため X 線発生装置の X 線管内部を真空にする。X 線管内部に設置したカソード (陰極) に (フィラメント) 電流を流し、カソードから熱電子を放出させる。陰極に対して数 kV から数百 kV の高電圧をアノード (陽極) にあるターゲット物質に衝突させ、相互作用により X 線を発生させる。

電子からターゲットに与えられるエネルギーの大半は物質中の原子を振動させる熱エネルギーに変換される。X 線の発生に寄与するエネルギーは衝突前の電子の運動エネルギーのうち 1 % 以下である。発生する X 線の最大エネルギーは管電圧によって決まり、例えば管電圧 10 kV に設定した場合、10 keV 以上の X 線は発生しない。X 線のフラックスはカソードからアノードに流れる電流 (管電流) に比例する。

カソード

カソードには通常タングステンフィラメントが用いられる。タングstenは融点が 3695 K と極めて高く、蒸発速度が遅く消耗しにくい、長期使用により焼き切れたりターゲット表面にタングstenが蒸着したりすることがある。タングstenフィラメントには熱電子を放出しやすくするために、トリウムなどの仕事関数の低い金属が含有していることもある。特殊なカソード物質として、六ホウ化ランタン (LaB_6) が用いられることもある。 LaB_6 の仕事関数は 2.66 eV で、タングsten (4.5 eV) よりも熱電子放出能力が高く、融点も ~ 2800 K と高いためカソード物質として適している。また加工により先のとがった結晶をつくることのできるため、タングstenフィラメントよりも細い電子ビームを出すことができる。このため、電子顕微鏡の電子線源としても用いられている。 LaB_6 は長期使用により先端が摩耗し、これは画像の先鋭さを失わせる原因となる。

アノード (ターゲット)

X 線発生装置のターゲットとしてよく用いられるのは、タングstenやモリブデンなどの金属である。高速電子のエネルギーの大半は熱エネルギーに変換されるため、ターゲットには融点の高い物質が必要でとなる上、さらに、空冷や

水冷によって放熱しなければならない。

ターゲット物質が X 線出射窓に蒸着されている場合、窓の材質に多く用いられるのはベリリウムである。ベリリウムは原子番号が小さいため ($Z = 4$)、放出された X 線を外部に透過しやすいうえに、ある程度の厚みがあれば可視光の透過を防げる。このため X 線検出器の入射窓としてもよく用いられる。

X 線を効率よく外部に放射するためには、ターゲットと出射窓の厚みは小さいほうがよい。しかし、ターゲットおよび出射窓は真空管の内外を隔てる障壁の一部でもあるため、大気圧差に耐えうる強度と厚みが必要となる。

制動放射

荷電粒子が物質中を通過するとき、物質の原子核とのクーロン相互作用によってラザフォード散乱を受け加速される。このとき荷電粒子の持つエネルギーの一部が光子となって放出される。これを制動放射という。

X 線源の場合、カソードから高速で飛び出した電子がターゲット原子核によって減速する際に制動放射が起きる。ここで、電子がターゲット原子核の電場によって放物線運動を行い、制動放射によって周波数 $\nu \ll \nu_{max}$ の範囲で電磁波を発生する場合を考えると、単位周波数あたりの電磁波の強度 I_ν は

$$I_\nu d\nu = (4\pi\epsilon_0)^{-3} \left(\frac{32\pi^2 Z^2 e^6 N}{3\sqrt{3}c^3 m_e^2 v^2} \right) d\nu \quad (5.1)$$

と表わされる。ここで v は電子の入射速度、 Z はターゲット物質の原子番号である。また N はターゲット物質の単位面積当たりの原子数 A と、単位面積当たりの電子数 n を用いて $N = nA$ である。

式 (5.1) は電子とターゲット物質との 1 回の相互作用による放射で、実際には電子はターゲット物質中で何度も相互作用し、制動放射によってエネルギーを失いながら減速していく。この場合 I_ν は近似的に以下の式で書けることが知られている。

$$I_\nu \sim CZ(\nu_{max} - \nu) \quad (5.2)$$

ここで C はターゲット物質に固有の定数である。

入射電子によるターゲットからの制動放射の全強度 I は、 I_ν を全周波数で積分すればよく

$$I = CZ \int_0^{\nu_{max}} (\nu_{max} - \nu) d\nu = \left(\frac{CZ}{2} \right) \left(\frac{eV}{h} \right)^2 \quad (5.3)$$

である。ただし V は管電圧を表し、

$$h\nu_{max} = eV \quad (5.4)$$

なので放射強度は管電圧の 2 乗およびターゲット物質の原子番号に比例することがわかる。

ここで X 線源の X 線発生効率 ϵ を以下の式で定義すると

$$\epsilon = \frac{\text{X 線の全放射エネルギー}}{\text{入射電子のエネルギー}} \quad (5.5)$$

式 (5.3) より ϵ は

$$\epsilon = \frac{\left(\frac{CZ}{2} \right) \left(\frac{eV}{h} \right)^2}{neV} \sim \alpha \times 10^{-1} \left(\frac{Z}{10} \right) \left(\frac{V}{1 \times 10^4 [\text{V}]} \right) \quad (5.6)$$

と表わされる。 α は $Z = 10-80$ に対して 1 程度の値をとることがわかっている。

式 (5.6) より ϵ はターゲット物質の原子番号と管電圧に比例している。従って、X 線を効率よく発生させるにはターゲットに Z の大きい物質を用い、管電圧をできるだけ上げるとよい。しかし、たとえばターゲットにタングステン ($Z = 74$) を用いて管電圧を 50 kV に設定した場合でも、 $\epsilon \sim 0.4\%$ 程度であり、電子のエネルギーの大半は熱放射によって失われることがわかる。

特性 X 線

原子内の軌道電子は、基底状態からより高いエネルギーへ励起されることがある。この励起状態は多くの場合長くは続かず、1 ns 以下の短い時間内に基底状態に戻る。電子が励起状態から基底状態へ遷移する際、2 状態間のエネルギーの差分はオージェ電子あるいは光子として放出される。この際に放射される光子のエネルギーは各原子固有の値を持ち、多くの場合に X 線のエネルギー帯域に入るので特性 X 線と呼ばれる。特性 X 線は遷移する電子の始状態と終状態のエネルギー準位によって区別される。電子が主量子数 $n = 2$ に対応する L 殻から、 $n = 1$ に対応する K 殻へ遷移するときに発する X 線を $K\alpha$ 線と呼び、 $n = 3$ に対応する M 殻から K 殻への遷移には $K\beta$ 線、N 殻から K 殻への遷移には $K\gamma$ 線という呼ばれる。また、M 殻から L 殻への遷移による X 線は $L\alpha$ 線と呼び、N 殻から L 殻への遷移による X 線は $L\beta$ 線と呼ぶ。例えばタングステンの M 殻電子が L 殻へ遷移する際に発生する X 線は、励起原子の元素記号を頭につけて $WL\alpha$ 線などと呼ぶ。

特性 X 線の振動数は Moseley の法則に従う。たとえば原子番号 Z の物質の K 系列の X 線の振動数 ν_K は、以下の式で近似できる。

$$\nu_K = R_{\infty} c \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) (Z - 1)^2 \quad (5.7)$$

ここで R_{∞} は Rydberg 定数 [m^{-1}]、 c は光速 [m/s]、 m と n はそれぞれ始状態と終状態の主量子数を表わす。 $K\alpha$ 線の場合、 $m = 2$ 、 $n = 1$ なので

$$\nu_{K\alpha} = R_{\infty} c \frac{3}{4} (Z - 1)^2 \quad (5.8)$$

である。また同様にして、L 系列の X 線の周波数 ν_L は

$$\nu_L = R_{\infty} c \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) (Z - 7.4)^2 \quad (5.9)$$

と書けることが知られている。

X 線源から放射される X 線には、制動放射による連続 X 線以外に上記の過程による特性 X 線が含まれる。カソードから高速で入射してきた電子がターゲット物質に衝突する際、ターゲット物質中の原子の内殻電子を弾き飛ばすことがある。このとき電子軌道に空孔準位ができて原子はイオン化し励起状態に移る。直後に外殻電子が空孔準位を埋めるように基底状態に戻り、ターゲット物質固有の X 線を発生させる。特性 X 線の放射過程を考えると、入射電子のエネルギー以上の特性 X 線が発生することは起こり得ない。したがって X 線源からどのような特性 X 線が発生するかは、ターゲット物質と管電圧の値によって決まる。たとえばターゲットとしてよく用いられるタングステンの場合、 $K\alpha = 59.3 \text{ keV}$ 、 $K\beta = 67.2 \text{ keV}$ 、 $L\alpha = 8.4 \text{ keV}$ 、 $L\beta = 9.7 \text{ keV}$ であるので、管電圧 60 kV 以上にしなければ K 線は現れない。

5.1.2 マイクロフォーカス X 線源 L8321-01

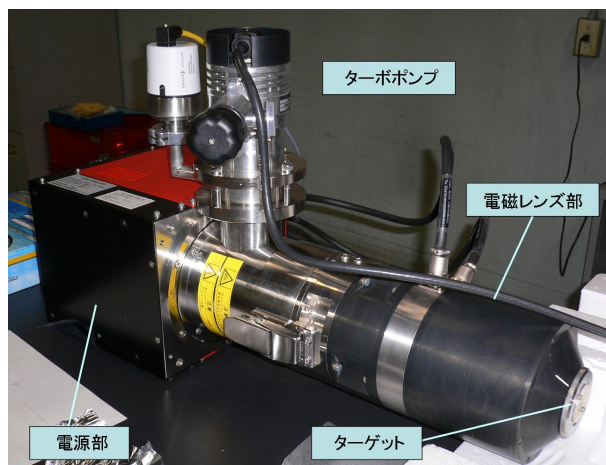


図 5.1: マイクロフォーカス X 線源 L8321-01 全体写真 [1]

本研究では、X 線発生装置として、浜松ホトニクス社製のマイクロフォーカス X 線源 L8321-01 を使用した。X 線発生原理は節 5.1.1 で述べた一般的な X 線管のそれと同じであるが、電子放出領域が狭いカソードを用い、さらに電磁レンズを電極間に設置して電子ビームを収束させ X 線放射領域を微小にする工夫がされている。ターゲット物質は W で、ターゲットは容易に回転でき、消耗した位置を避けて電子ビームをあてることができる。カソードは W と LaB_6 が用意されていて必要に応じて交換することができるが、本研究では W を用いた。カソードとターゲットを含む空間は高真空中に保つ必要があるため、上部にターボポンプが設置され常時排気を行っている。また後部には電源部があり、コントローラーからの信号を受けて高電圧を発生する。装置の操作は本体から切り離されたコントローラーで行い、管電圧は 20 kV – 160 kV、管電流は $0 \mu\text{A}$ – $200 \mu\text{A}$ の範囲で設定することができる。また、焦点サイズも調整可能で、focus1 から focus5 まで選ぶことができる。数字が小さい方が焦点サイズも小さくなる。より小さな光源が望ましい本研究では、focus1 で動作させた。

このマイクロフォーカス X 線源 L8321-01 から放射される X 線スペクトルを CdZn 検出器 (Amptek 社の XR-100T[17]) で測定した結果を図 5.2 に示す。カソードはタングステンフィラメントを使用し、管電圧 60 kV、管電流 $100 \mu\text{A}$ に設定した。60 keV までの連続成分と 10 keV 付近に 3 本の輝線が現れているのが分かる。輝線はターゲット物質であるタングステンの特性 X 線で、エネルギーの低いほうから $\text{WL}\alpha$ (8.4 keV)、 $\text{WL}\beta$ (9.7 keV)、 $\text{WL}\gamma$ (11.3 keV) である。また、17 – 19 keV 付近に現れている 2 つのピークはマイクロフォーカス X 線源の真空管内でグリニッチとして使われているモリブデンによる特性 X 線である。スペクトルは $\text{WL}\beta$ のピークカウントで規格化してある。

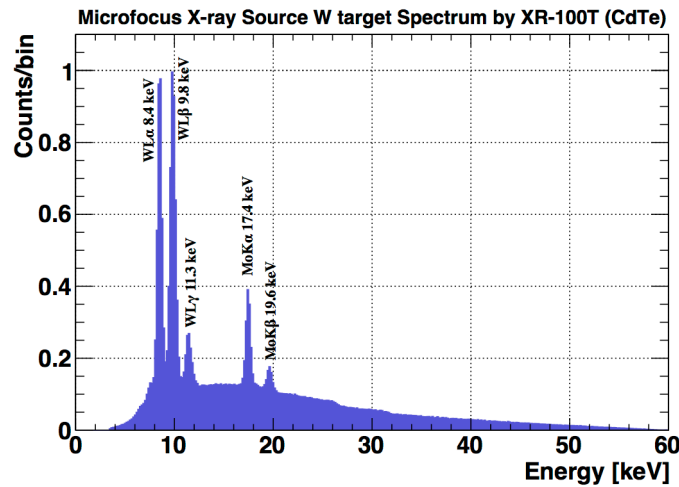


図 5.2: CdZn 検出器で取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル。

5.2 マイクロフォーカス X 線源と回折格子を用いた撮像システム

先行研究 [6] で使用した撮像システムをそのまま使用した。回折格子は、節 2.1.2 で紹介したもので、 $4.8 \mu\text{m}$ ピッチ、開口率 $f = 0.5$ の X 線吸収（振幅）格子である。200 μm 厚みの Si 基板を使い 17 μm 厚の Au でつくられている。ドイツのカールスルーエ工学研究所で LIGA プロセスを使用して製作されたもので、代理店 ASICON 社より入手した。回折格子はシグマ光機社の SGSP26 シリーズ電動ステージに設置されており、XYZ 軸方向に μm スケールで移動できる。図 5.3 に示した真空槽内には XRPIX2b をセットしてあり、0.2 mm 厚の Al 窓を介して X 線が入射する。なお、節 5.6 に述べるように検出器として GSENSE5130 を用いた実験では、真空槽は使用せず大気中に設置している。

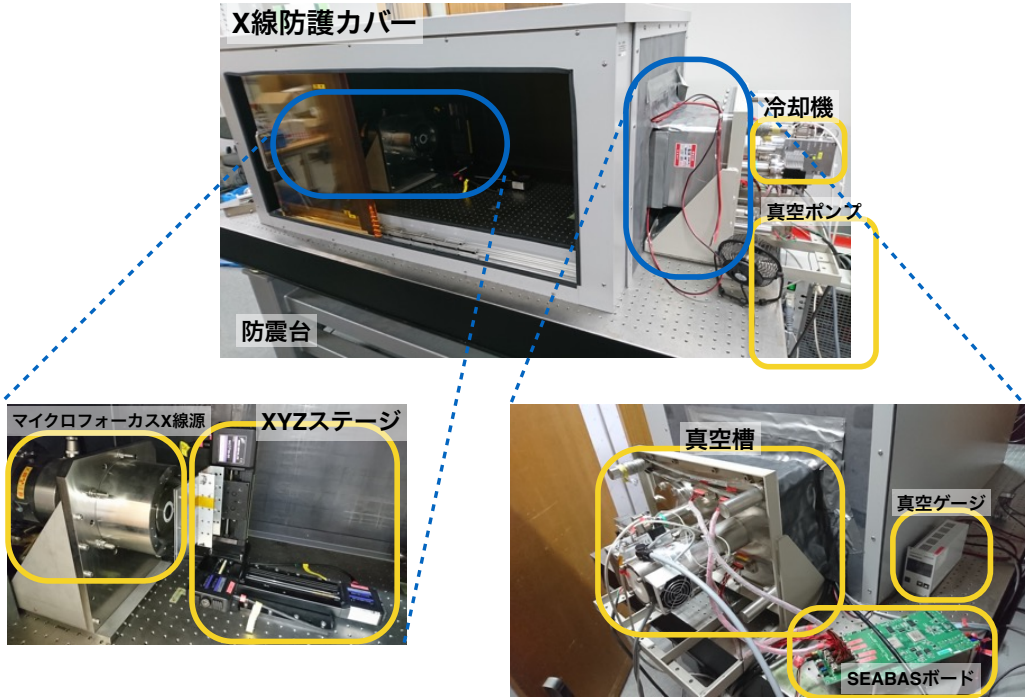


図 5.3: X 線撮像システムの写真。XRPIX2b を検出器として使用した場合のセットアップ。

5.3 マイクロフォーカス X 線源を光源に XRPIX2b を検出器として用いた回折格子の撮像実験

5.3.1 実験セットアップ

実験セットアップの模式図を図 5.4 に示す。マイクロフォーカス X 線源のターゲットから検出器面までの距離を L 、ターゲットから回折格子までの距離を R 、回折格子から検出器面までの距離を z とする。この実験では $L = 1040.5 \text{ mm}$ で固定し、 R とそれに応じて z を変化させた。従って、常に

$$L = R + z \quad (5.10)$$

である。球面波に対する Talbot 干渉条件を満たす回折格子の位置は式 (4.18) から

$$R_T = \frac{L}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4md^2}{\lambda L}} \right) \quad (5.11)$$

となる。この式から、X 線強度の高い $\text{WK}\alpha$ 輝線の波長 $\lambda_{\text{K}\alpha} = 0.148 \text{ nm}$ と $\text{WK}\beta$ 輝線の波長 $\lambda_{\text{K}\beta} = 0.128 \text{ nm}$ に対して R_T と拡大率 M を計算する。格子のピッチ $d = 4.8 \mu\text{m}$ 、次数 $m = 1$ とすると、波長 $\lambda_{\text{K}\alpha}$ に対しては R_T が 849 mm , 191 mm で拡大率はそれぞれ 1.2 倍と 5.4 倍、波長 $\lambda_{\text{K}\beta}$ に対しては R_T が 809 mm , 232 mm で拡大率はそれぞれ 1.3 倍と 4.5 倍となる。一方で、XRPIX2b のピクセルサイズが $30 \mu\text{m}$ なので、検出器面上に現れる格子像を XRPIX2b で分解するには、格子像が最低でも 2 ピクセル分の $60 \mu\text{m}$ 周期、 12.5 倍の拡大率が必要となる。ところが、現在のセットアップでは最大 5.4 倍である。これはサブピクセルの位置分解能を実現する必要があることを示している。今回、電荷分割解析という方法を適用することで格子像の検出を試みた。この解析方法については後述する。

この実験では WK 輝線のうち最も検出強度の高い $\text{K}\beta$ 線に対応する 9.8 keV (波長 $\lambda \simeq 0.13 \text{ nm}$) の X 線が Talbot 条件を満たす位置 $R_T = 235 \text{ mm}$ で干渉縞を得ることを目標にした。X 線イベント選択でバンド幅 $\Delta\lambda/\lambda = 10\%$ に

相当するイベントのみ選んでいる。回折格子を光源に近づけた近接位置でもエネルギーに依らない格子像を得ることができる。近接位置として $R = 42$ mm を、その中間でかつ、干渉条件を満たさない $R = 102$ mm ($m = 1.5$), $R = 72$ mm, 201 mm の計 5 箇所で撮像を行なった。マイクロフォーカス X 線源は管電圧 60 kV、管電流 $100 \mu\text{A}$ で動作させ、XRPIX2b は -40°C に冷却、バックバイアス 200 V に設定した。角位置で、フレーム時間 5 ms、200 kframe のデータ取得を行なった。

回折格子の位置 R と XRPIX2b 上で期待される格子像の周期を表 5.1 にまとめる。

表 5.1: 回折格子の位置 R と格子像の期待周期

R	拡大率 $M = L/R$	期待周期 $M \times d$
42 mm	25 倍	4.0 pixel
72 mm	14 倍	2.3 pixel
102 mm	10 倍	1.6 pixel
201 mm	5.2 倍	0.83 pixel
235 mm	4.4 倍	0.71 pixel

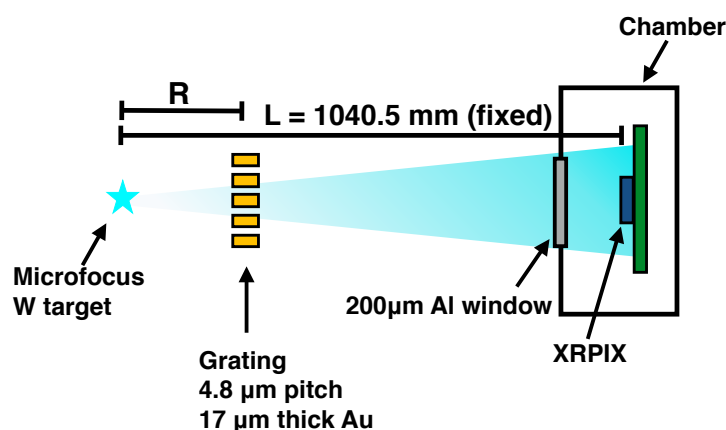


図 5.4: マイクロフォーカス X 線源を光源とした XRPIX2b による格子撮像実験セットアップ

5.3.2 データ解析方法

光源プロファイルを得るまでの流れを簡単に説明する。この実験では 1 次元格子を使用しているため、1 次元の強度分布で光源のプロファイル、格子像を得て、その周期や格子像の鮮明さ（コントラスト値）を評価する。こうして得られた画像データに対して、回折格子のスリットに平行に射影を行い 1 次元の強度分布（プロファイル）を作成する。この強度分布を用いて周期解析（後述）を行い、期待される周期に近い周期構造を探索する。周期構造が発見された場合、その周期で重ねあわせることで、精度のよい 1 周期分の格子像を得ることができる。

電荷分割解析

MIXIM の原理から、検出器の高い位置分解能が要求される。現状使用できる検出器のピクセルサイズには制限があるため、サブピクセルでの位置情報を得る必要がある。そのための電荷分割解析の考え方と方法について説明する。

CMOS ピクセル検出器の空乏層中で光電子が走った飛跡にそって電子・正孔対が生成され、これが電極に収集される間に拡散によって広がる。ピクセル間に収集電荷がまたがる、マルチピクセルイベントが生じる（節 3.3 参照）。電荷分割解析はこれを利用する。本研究では、特に、2 ピクセル間をまたぐダブルピクセルイベントを使う。電荷雲がある一定の半径 r の円形に広がると単純化すると、図 5.6 のようにシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントを生じる X 線吸収位置の領域を決めることができる。X 線がピクセル検出器にほぼ一様に照射されるようにした場合、シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントの計数比は、図 5.6 の赤と青の領域の面積比に等しいはずである。これによって、実験的に r を決められる。ダブルピクセルイベントについては、二つのピクセルに生じた信号波高値の比を使い、重心位置を求めることで、さらに詳細に X 線吸収位置を決めることができる。これを電荷分割解析とよぶ。具体的には、ピクセル座標 x_1, x_2 で波高値 PH_1, PH_2 に分割したダブルピクセルイベントの分割方向の重心位置 x_G は式 (5.12) のように表される。

$$x_G = \frac{PH_1 \left(\frac{x_1 + x_2}{2} - r \right) + PH_2 \left(\frac{x_1 + x_2}{2} + r \right)}{PH_1 + PH_2} \quad (5.12)$$

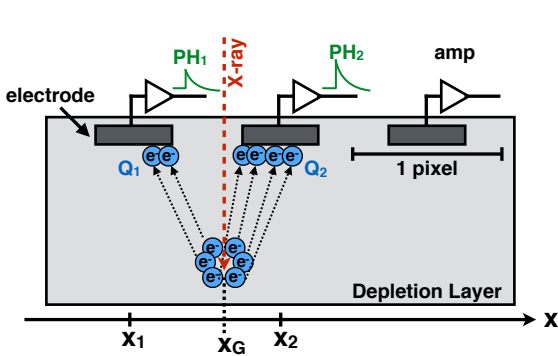


図 5.5: ピクセル間をまたぐ電荷分割の模式図

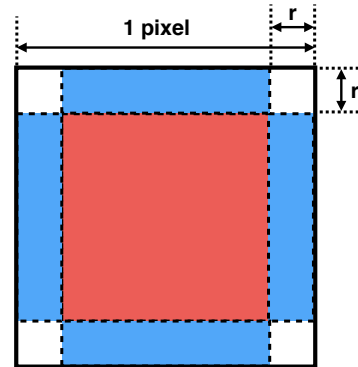


図 5.6: ピクセル内でのシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントが生じる X 線吸収位置。赤がシングルピクセルイベントの領域で青がダブルピクセルイベントの領域。

フォールディング解析

フォールディング（重ね合わせ）解析は X 線天文学ではパルサーの周期解析などによく用いられる方法であるが、ここでは時系列のデータに対してではなく、一次元の位置の関数としての強度プロファイルに適用する。図 5.7 のように 1 次元の強度分布に対して、あるテスト周期で重ね合わせた強度分布を作る。これに対して、フラットなモデル（強度分布の平均値）を仮定し χ^2/dof を計算する。1 次元の強度分布がある周期 p を持っている場合、 p あるいはその整数倍と異なるテスト周期で重ね合わせた強度分布はフラットになり χ^2/dof は 1 に近い値をとるが、周期 p を選ぶと χ^2/dof は 1 より有意に大きい値をとる。 χ^2 の最大値を与える p が、最も確からしい周期として、その有意性ととともに評価する。

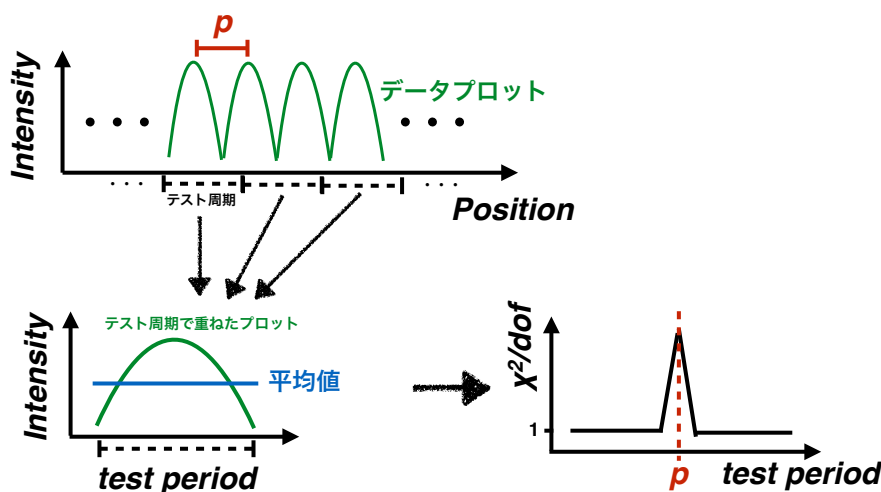


図 5.7: フォールディング解析の概念図

5.4 ナイフエッジを用いた電荷分割解析による位置分解能の評価

電荷分割解析によりサブピクセルの位置分解能が得られているかを確認するために、カッターの刃を撮影した。図 5.8 のように回折格子は用いないセットアップで、真空槽の Al 窓にカッターの刃を固定し、XRPIX2b により撮影を行った。マイクロフォーカス X 線源の管電圧は 60 kV、管電流は 100 μA で、露光時間は 5 ms \times 200 kframe とした。

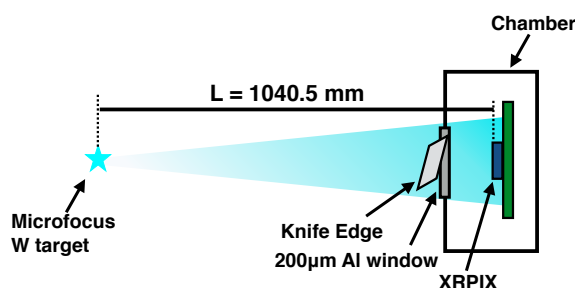


図 5.8: カッターの刃の撮影セットアップ模式図

結果、図 5.9 のようなイベントイメージが得られた。図 5.9a がピクセル単位解析のイメージ、図 5.9b が電荷分割解析のそれである。電荷分割解析を用いると座標が実数の範囲で得られるので 10 \times 10 bin/pixel で表示している。図 5.9a のピクセル単位解析では座標が整数であるが、比較のため 1 ピクセル内で乱数を振って同じように 10 \times 10 bin/pixel で表示している。図 5.9a 電荷分割解析においても、シングルピクセルイベントの位置、及び、ダブルピクセルイベントのピクセル境界に水平な位置も乱数を振って決めている。これに対してカッターの刃に平行に射影した結果が図 5.10 で、黒がピクセル単位解析で赤が電荷分割解析である。位置分解能の指標としてしばしば用いられる、最大強度 I_{\max} に対して 90 % から 10 % となるピクセル数 $N^{0.9-0.1}$ を使用するべきであるが、検出器からカッターの刃までに数 cm 距離があることで強度は緩やかに下がり適当でない。代替として、 I_{\max} に対して 90 % から 50 % となるピクセル数 $N^{0.9-0.5}$ を 2 倍したものを $N^{0.9-0.1}$ として評価する。すると、ピクセル単位解析 $N_{\text{before}}^{0.9-0.1} = 2.4$ pixel であったのに対して、電荷分割解析では $N_{\text{after}}^{0.9-0.1} = 1.8$ pixel となり、後者の解析方法では確かに位置分解能が改善することが確認できた。

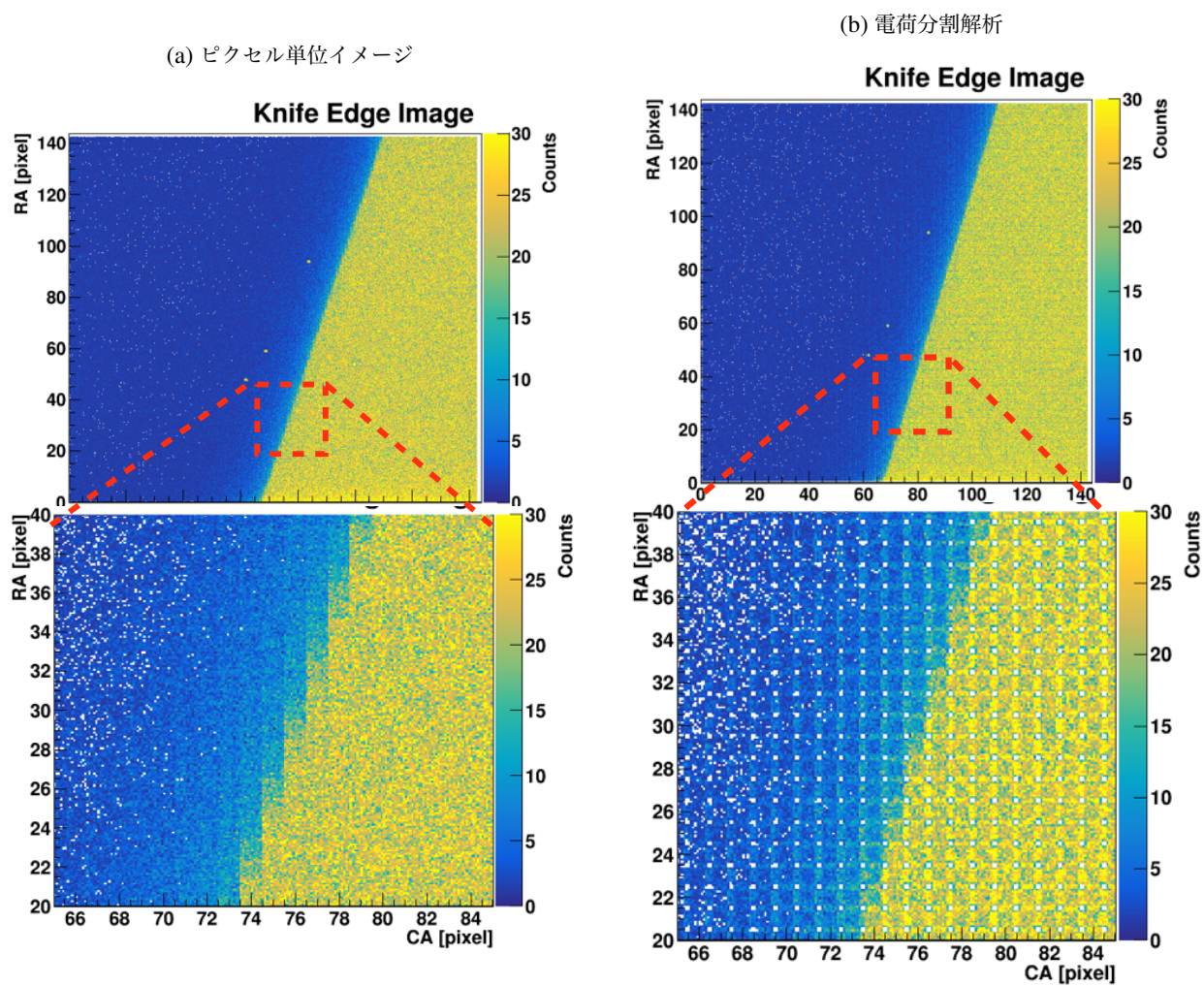


図 5.9: ナイフエッジのイメージ（上）と一部拡大イメージ（下）。 10×10 bin/pixel で表示している

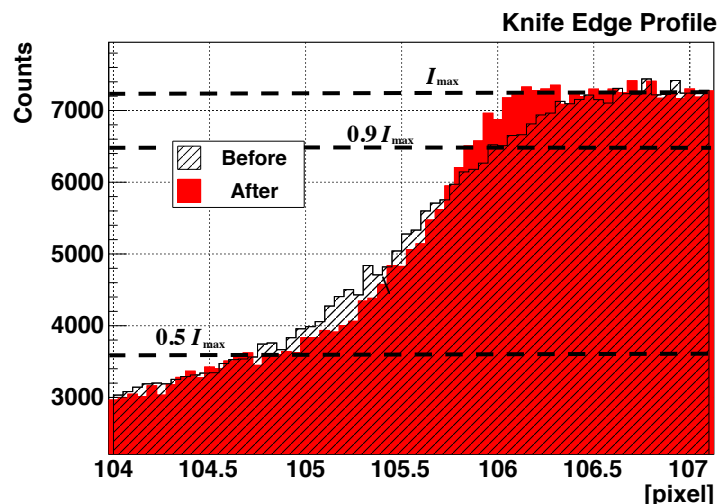


図 5.10: 射影プロファイル。黒がピクセル単位イメージより求めたプロファイルで赤が電荷分割解析を用いたプロファイル。

5.5 XRPIX2b による格子像撮像結果

5.5.1 撮像イメージとスペクトル

$R = 42 \text{ mm}$, 72 mm , 102 mm , 201 mm , 235 mm の 5 箇所での撮影したイメージとスペクトルを図 5.12、図 5.11 に示す。この段階では、電荷分割解析を行っていない 1 ピクセル単位でのイメージを表示している。(a)→(f) は順に $R = 42 \text{ mm}$, 72 mm , 102 mm , 201 mm , 235 mm , 235 mm でのイメージで波高値として 65–80 ADU、8.8–10.8 keV ($\Delta\lambda/\lambda = 10\%$) に対応する範囲を選んでいる。一方、(f) は 9.8 keV の干渉位置だが、干渉条件を外したエネルギー (11.7–14.3 keV) を選んで表示したものである。光源-格子間の距離が短く、拡大率の大きい (a) では鮮明に格子像の縞が現れていることが分かる。一方、他の位置では列方向に模様が現れているように見えるが、XRPIX2b 素子固有の模様かどうかは区別できない。そこで、格子像を CA 軸に射影した 1 次元プロファイルを作り、周期解析を行った。ただし、格子像は完全に列方向に平行ではないため、ここでは簡単のため、素子中央の RA= 51–91 の 40 ピクセル分を選んで射影している。

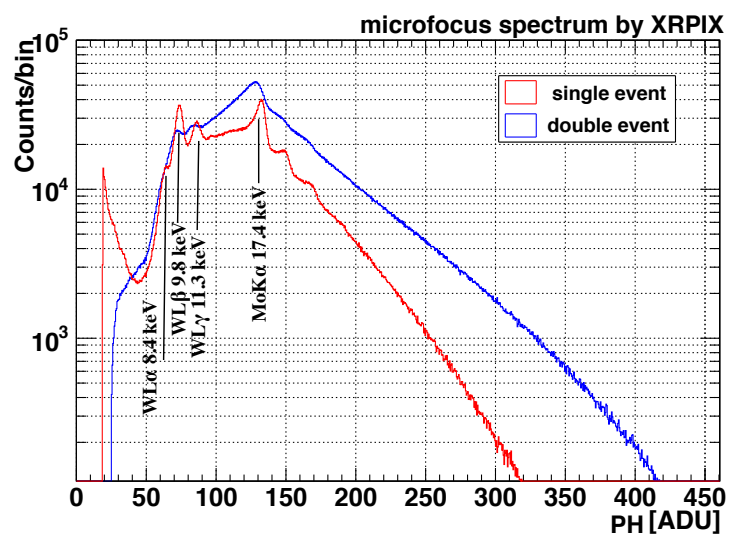


図 5.11: XRPIX2b で取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル

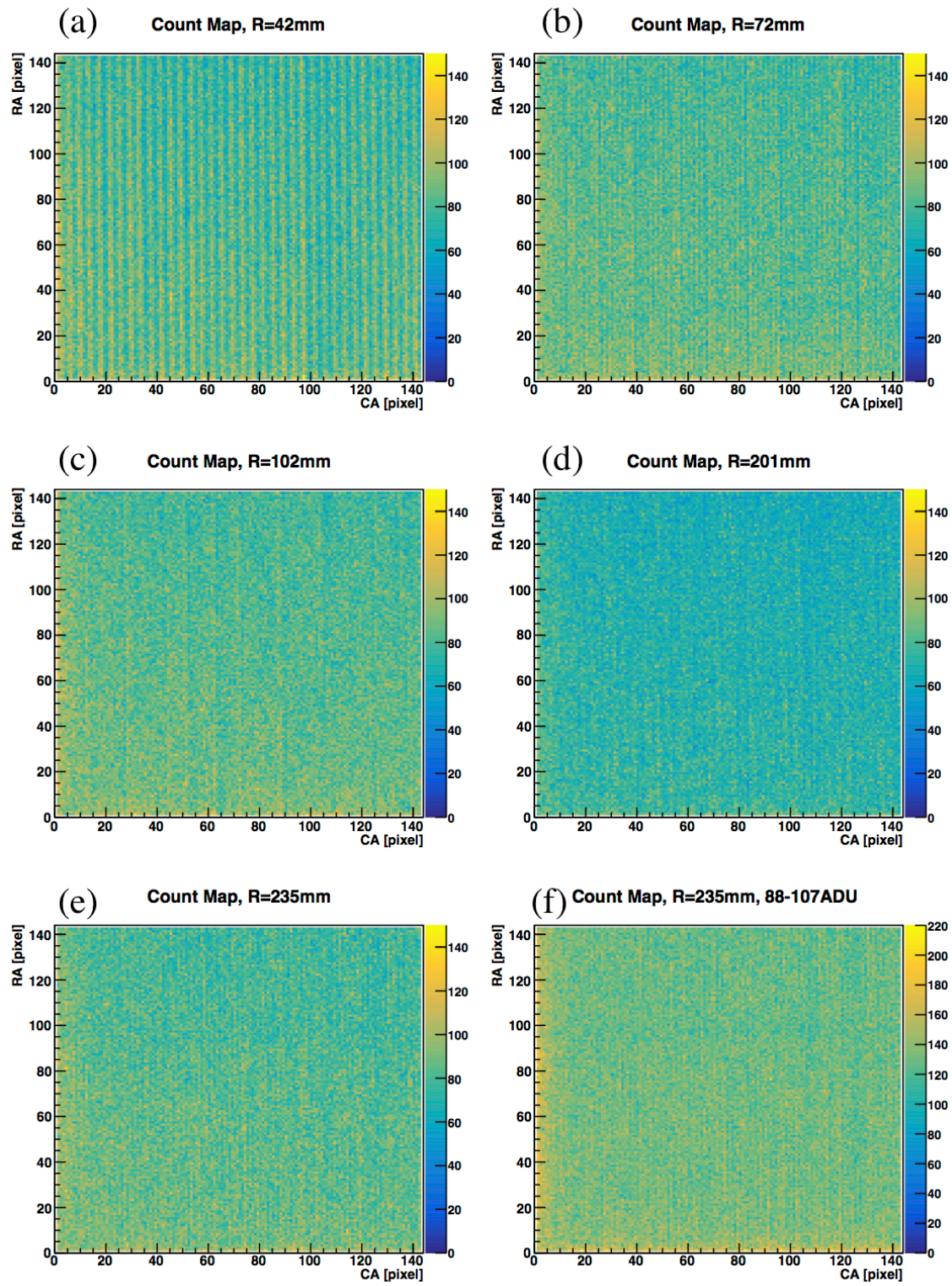


図 5.12: XRPIX2b で取得した格子撮像イベントイメージ。ピクセル単位イメージを表示している。

5.5.2 周期解析結果

次に、電荷分割解析を適用した上で、CA 軸に射影したプロファイルを作成した。XRPIX2b の垂直 (CA 軸) 方向と回折格子のスリットが平行になるようにを揃えており、水平方向の位置分解能が重要となる。そこで、水平方向のダブルピクセルイベントのみを使用したもの (赤) と水平方向のダブルピクセルイベント + シングルピクセルイベントを使用したもの (黒) の結果を図 5.13 に示す。

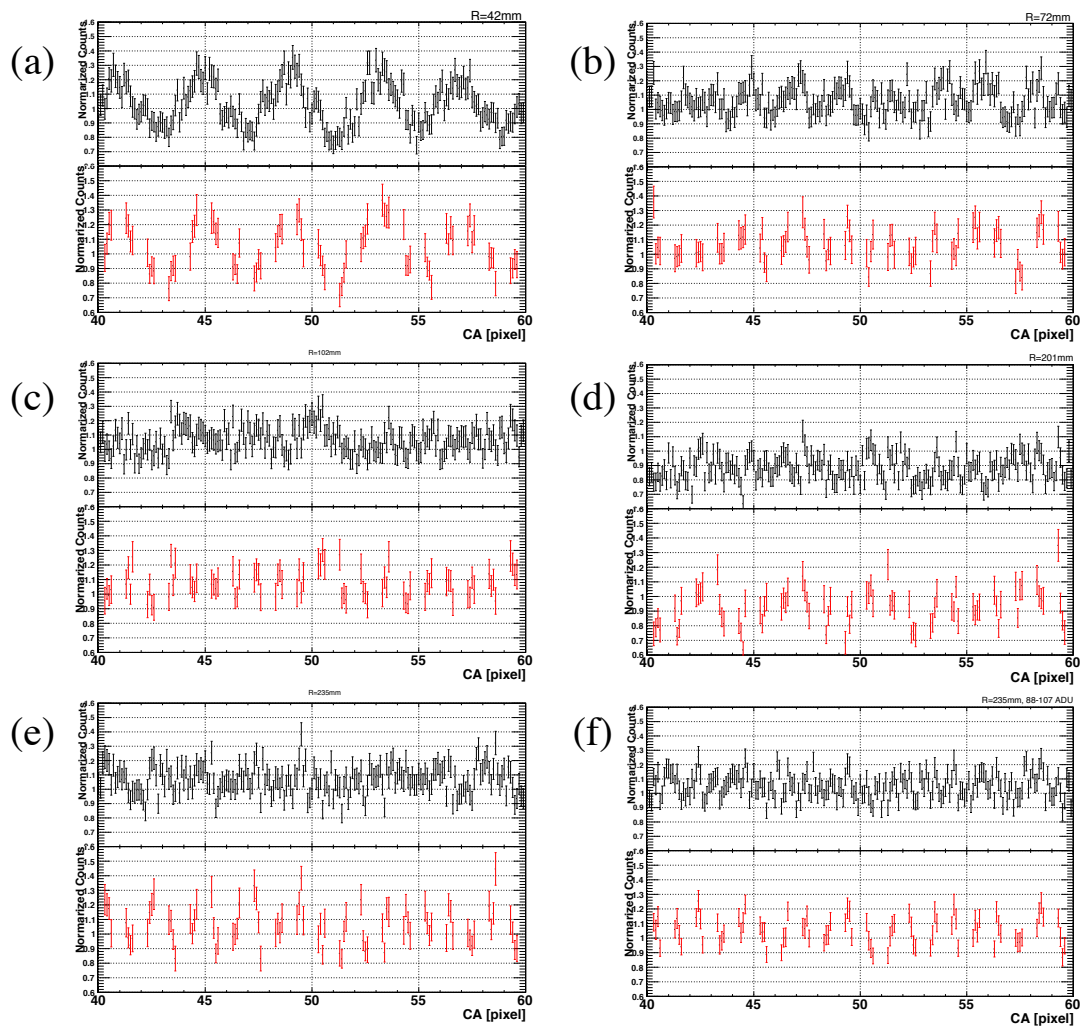


図 5.13: CA 軸へ射影した 1 次元プロファイルの一部 (CA: 40–60 pixel) 拡大。赤は水平方向のダブルピクセルイベントのみを使用したもので、黒は水平方向のダブルピクセルイベントとシングルピクセルイベントを使用したもの。(a) $R = 42$ mm, (b) $R = 72$ mm, (c) $R = 102$ mm, (d) $R = 201$ mm, (e) $R = 235$ mm, (f) $R = 235$ mm @ 88–107 ADU。

こうして得られた 1 次元プロファイルに対して、フォールディング解析を行い、0.5–8.5 pixel 周期の範囲を 0.002 pixel 刻みで周期解析した。結果を図 5.14 に示す。鋭いピークの位置が周期構造の検出を示している。格子像として期待される周期とその整数倍の周期以外の位置でもピークが複数見られる。例えば、ピクセルと格子像によるモアレ周期 (図 5.14(e)(f) の 2.36 pixel 周期のピーク位置) や、サブピクセル解析の結果残存した整数ピクセル単位の周期構造と考えられる。 $R = 102$ mm の図 5.14(c) を除き、格子像として期待される周期付近で周期構造を検出できている。

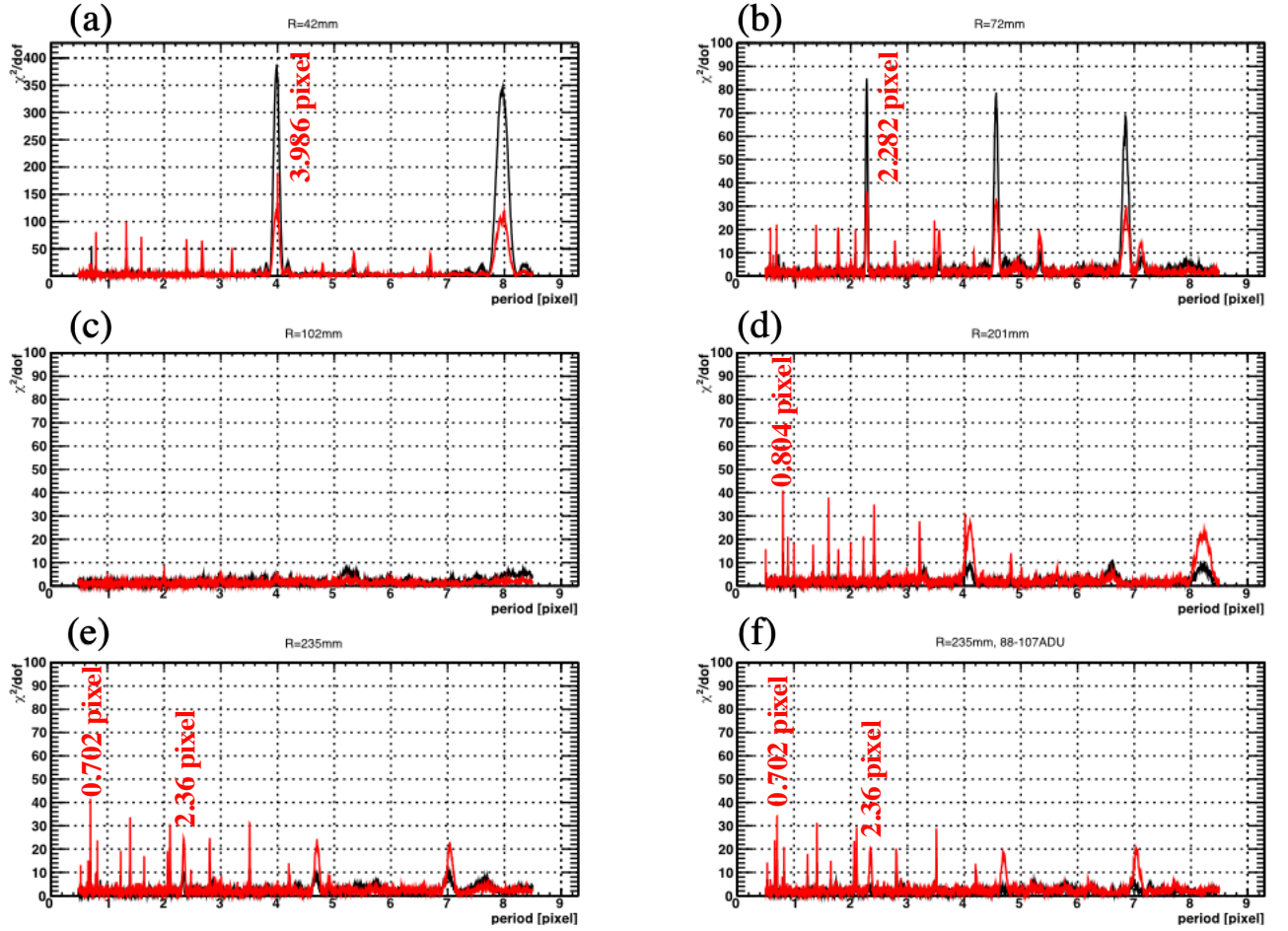


図 5.14: フォールディング解析による周期解析結果。ピーク位置が周期構造の検出位置に対応する。赤と黒の意味は図 5.13 と同じ。(a) $R = 42$ mm, (b) $R = 72$ mm, (c) $R = 102$ mm, (d) $R = 201$ mm, (e) $R = 235$ mm, (f) $R = 235$ mm @ 88 – 107 ADU。

5.5.3 光源プロファイル

フォールディング解析により検出した周期でプロファイルを重ね合わせ、それを 2 周期分プロットしたものを図 5.15 に示す。期待周期付近にピークの現れなかった (c) は期待周期で重ねたプロファイルである。

ここで、得られた格子像の鮮明さ（コントラスト）を評価するためにコントラスト値を以下のように定義する。

$$Contrast \equiv \frac{\text{格子像プロファイルの全振幅}}{\text{格子像プロファイルの平均値}} \quad (5.13)$$

得られた格子像プロファイルに対して、振幅 A 、周期 p 、定数成分 $const$ の正弦関数

$$I = A \sin \left[\frac{2\pi}{p} (x - \alpha) \right] + const. \quad (5.14)$$

でフィッティングを行い、コントラスト値を $2A/const$ で計算する。コントラスト値の計算結果を表 5.2 にまとめる。

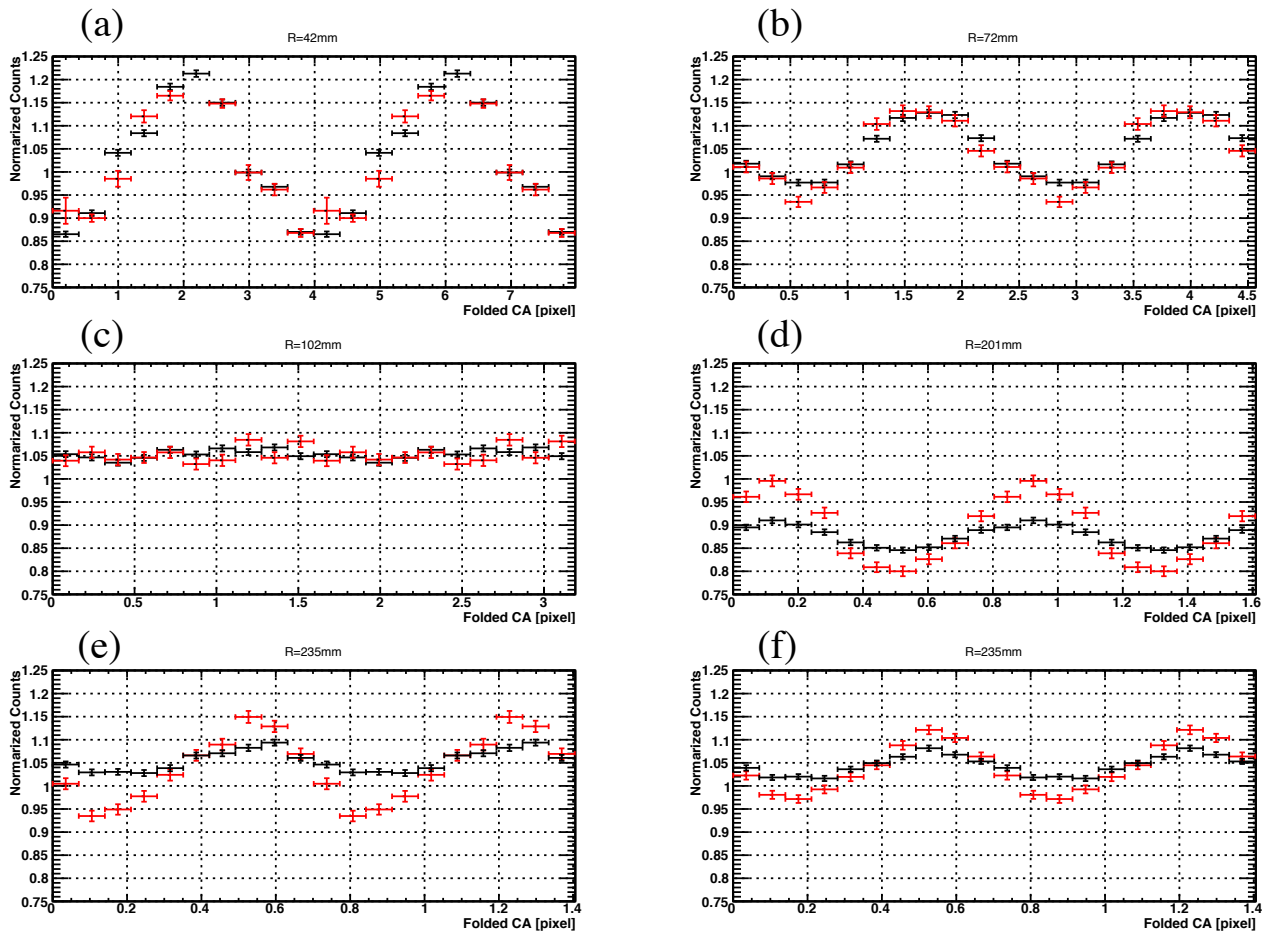


図 5.15: 1 周期で重ね合わせたプロファイル。(a) $R = 42$ mm, (b) $R = 72$ mm, (c) $R = 102$ mm, (d) $R = 201$ mm, (e) $R = 235$ mm, (f) $R = 235$ mm @88–107 ADU。

表 5.2: コントラスト値。H Double は水平方向のダブルピクセルイベント。

R	Contrast	
	Single + H Double	H Double
42 mm	0.176 ± 0.008	0.172 ± 0.015
72 mm	0.078 ± 0.004	0.097 ± 0.007
102 mm	0.012 ± 0.003	0.011 ± 0.006
201 mm	0.031 ± 0.003	0.097 ± 0.007
235 mm	0.031 ± 0.003	0.100 ± 0.007
235 mm@88 – 107 ADU	0.030 ± 0.003	0.073 ± 0.006

5.5.4 結論

$R = 42 \text{ mm}$, 72 mm の場合には、期待される周期 4.0 pixel , 2.3 pixel が射影プロファイルでも重ね合わせプロファイルでも確認できた。これらは近接位置の格子像と判断する。 $R = 102 \text{ mm}$ の拡大率 10 倍では明らかな周期構造は見られない。一方、拡大率が 4.4 倍とより小さい $R = 235 \text{ mm}$ の位置では、期待される 0.7 pixel の周期構造が観測されている。 $R = 235 \text{ mm}$ の位置は Talbot 干渉条件を満たした位置で、得られた 0.7 pixel の周期構造が Talbot 効果により干渉縞であると判断する。また、拡大率が小さいケースでは、シングルピクセルイベントと水平方向のダブルピクセルイベントを使ったものに比べて水平方向のダブルピクセルイベントのみを使ったものの方がコントラスト値が大きく、位置検出能力を追求する場合には、水平方向のダブルピクセルイベントのみを活用するのが望ましいことが分かった。射影プロファイルにはギャップが生じるが、重ね合わせプロファイルをとることで（周期が整数ピクセルでなければ）ギャップは生じない。

この実験では $30 \mu\text{m}$ ピクセルの XRPIX2b のデータに対して電荷分割解析により、 0.7 pixel 周期 $21 \mu\text{m}$ に相当するサブピクセル位置分解能が実証できた。これは、天体からの平行光に対して、開口率 0.5 の格子と検出器 (XRPIX2b) 間を $L = 1 \text{ m}$ の距離にとった時に 2.8 秒角の像幅が得られることを示している。しかし、ピッチ $d = 4.8 \mu\text{m}$ の格子を使う限り、平行光に対しては同じ周期（拡大率 1）の周期の Talbot 干渉縞が現れるため、さらに 5 倍の位置分解能の改善が必要となる。これが、ピクセルサイズ $4.25 \mu\text{m}$ の可視光用 CMOS 検出器を導入し、節 3.6 の X 線分光性能試験を行なった動機である。

5.6 マイクロフォーカス X 線源を光源とした GSENSE5130 による回折格子の撮像実験

節 3.6 で、ピクセルサイズ $4.25 \mu\text{m}$ 可視光用 CMOS ピクセル検出器 GSENSE5130 が X 線光子計測に利用できることが分かったので、マイクロフォーカス X 線源を使用して撮像実験を行なった。

5.6.1 実験セットアップ

実験セットアップの模式図と写真を図 5.16、図 5.17 に示す。上記のように、この実験では GSENSE5130 を用いた X 線撮像機能の確認が目的であるので、拡大率が十分大きい位置に回折格子を設置して格子像を撮影する。マイクロフォーカス X 線源から回折格子間の距離が $R = 42 \text{ mm}$ の位置に回折格子を固定して実験を行なった。マイクロフォーカス X 線源から GSENSE5130 までの距離は $L = 809 \text{ mm}$ となっている。拡大率は $M = L/R \simeq 19.3$ 倍であり、GSENSE 素子面で期待される格子像の周期は $92.5 \mu\text{m}$ で、 21.8 pixel に対応する。マイクロフォーカス X 線源は管電圧 60 kV 、管電流 $100 \mu\text{A}$ で動作した。図 5.17 に示すように、GSENSE5130 は常温大気中に設置しており、遮光幕を通して X 線が入射する。露光時間 $500 \text{ ms} \times 2000 \text{ frame}$ でデータ取得を行なった。

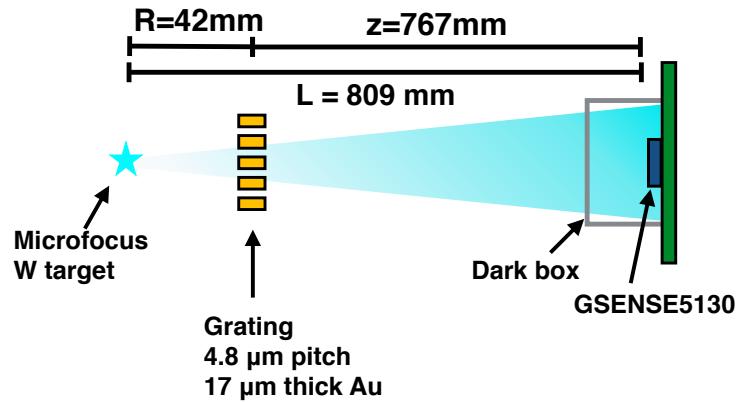


図 5.16: GSENSE5130 による格子像の撮影セットアップ

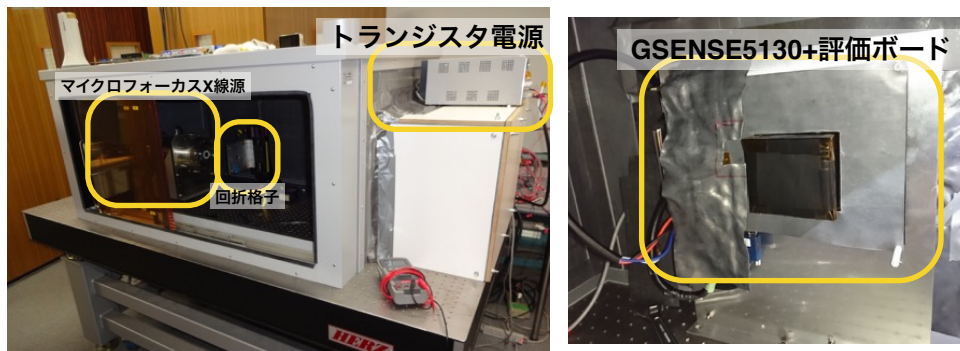


図 5.17: GSENSE5130 による格子像の撮影セットアップの写真

5.7 GSENSE5130 による撮像実験結果

5.7.1 撮像イメージとスペクトル

図 5.18 に X 線イベント選別後のカウントマップを示す。3 × 3 ピクセルでビンまとめをしているが、GSENSE5130 を用いて格子像のイメージを得ることに成功した。

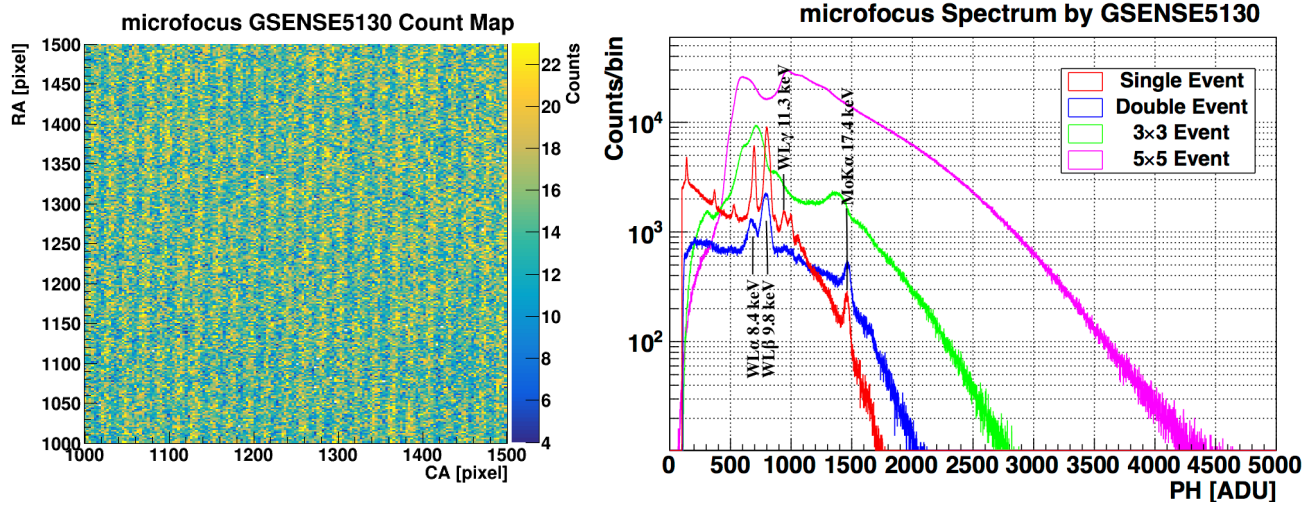


図 5.18: GSENSE5130 で撮影した格子像。検出器面

500 × 500 ピクセルの部分を 3 × 3 ピクセルでビンま
とめをしている。

図 5.19: GSENSE5130 によって取得したマイクロフォー
カス X 線源のエネルギースペクトル

5.7.2 マイクロフォーカス X 線源の焦点サイズの評価

この実験で得られた格子像は約 20 pixel 周期であり、検出器の位置分解能によるコントラスト劣化は無視でき、検出器面上にの格子像のコントラストを直接反映しているはずである。さらに、回折の効果が無視できるとすると、光源の大きさのみがコントラストの劣化に寄与していることになる。得られた像の強度分布は完全な点光源の作る格子像と光源の検出器面上での強度分布の畳み込み積分で計算することができる。これを用いて光源サイズを評価する。光源が大きさ σ のガウス関数で広がっていると仮定すると、検出器面上に現れる強度分布 $I_d(x)$ は

$$I_d(x) = \int I_g(\xi) \cdot G(x - \xi) d\xi \quad (5.15)$$

のように計算することができる。 $I_g(x)$ は開口率 0.5、4.8 μm ピッチの回折格子を反映した矩形関数（完全な点光源による検出器面上での強度分布）で、 $G(x)$ は検出器面上での光源の広がりである。解析的には解くことができないため、数値的に計算した結果を図 5.20 に示す。

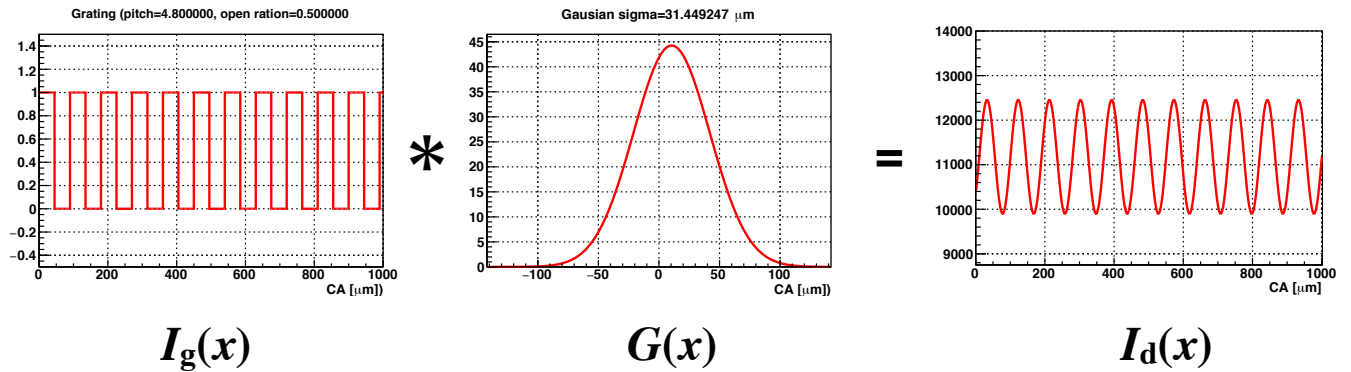


図 5.20: 回折格子と光源プロファイルの畳み込み積分

この $I_d(x)$ を用いて、得られた 1 次元プロファイルに対してフィッティングを行った結果を図 5.21 に示す。フィッティングによって得られたガウス関数 $G(x)$ の広がり σ_d は検出器面上での光源の広がりであり、実際の大きさは回折格子から検出器面までの距離を z とすると

$$\frac{\sigma}{\sigma_d} = \frac{z}{R} = \frac{L - R}{R} \quad (5.16)$$

である。これを計算すると $\sigma \simeq 1.7 \mu\text{m}$ となり、カタログ値の $1 \mu\text{m}$ に近い結果となった [20]。

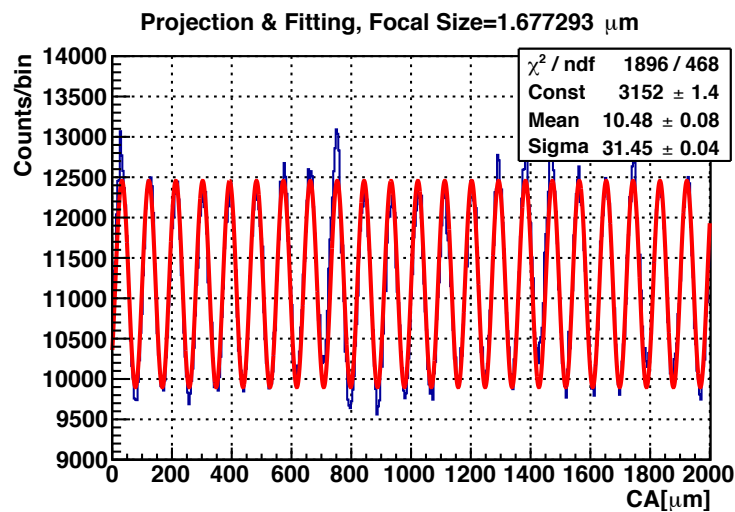


図 5.21: GSENSE5130 $R = 42 \text{ mm}$ で得た強度分布（青）と畳み込み積分を用いたプロファイルのベストフィットモデル（赤）

第 6 章

SPring-8 ビームラインを使用した準平行光による撮像実験

MIXIM が平行光に対して有効であるかどうかを地上で検証するには、光源から十分に遠い距離で十分な X 線強度が得られる放射光施設のビームラインを利用する必要がある。

そこで我々は大型放射光施設 SPring-8 の中尺ビームライン BL20B2 を利用し、12.4 keV と 24.8 keV の単色 X 線を回折格子を通して GESENSE5130 に照射し、Talbot 干渉縞の撮像実験を行なった。本章では実験の方法と結果についてまとめる。

6.1 大型放射光施設 SPring-8: BL20B2

BL20B2 は兵庫県佐用町にある日本最大の放射光施設 SPring-8 の偏向電磁石によって取り出した電子からのシンクロトロン放射を光源としている。シンクロトロン放射自体は様々な波長の X 線を含んだ白色光（連続スペクトル）であるが、ビームライン上流に設置された二結晶分光器で 5–113 keV の範囲の単色 X 線を利用できる。光源から約 200 m 離れた実験ハッチ 2 の上流側にビーム出口があり、ここで X 線ビームが大気中に出射される。今回の実験では、回折格子と X 線ピクセル検出器は最下流の実験ハッチ 3 内に設置している。発光点の大きさは水平方向に 0.29 mm、鉛直方向に 0.04 mm となっており、全長 215 m として角度に換算すると水平方向に 0.28 秒角、鉛直方向に 0.04 秒角である [21]。

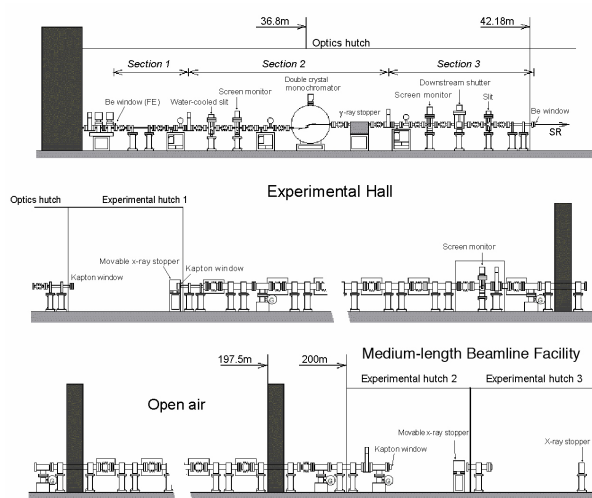


図 6.1: SPring-8 の中尺ビームライン BL20B2 の模式図 [7]

6.2 実験概要

図 6.2、図 6.3 に実験セットアップの模式図と写真を示す。図 6.2 の左がビーム上流側で、実験ハッチ 2 で大気中に射出した X 線を 4 極スリットで $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ に絞りビーム全体が検出器面内に含まれるようにするとともに、検出器面上でイベントがパイルアップしないように減衰板で X 線強度を調整する。減衰板は 4 極スリットの支持体にはりつけ、実際に GSENSE5130 で取得したフレームイメージをみながら材質と厚みを調整した。基本的に、12.4 keV の実験では Al 1 mm 厚、24.8 keV の実験では Cu 0.1 mm 厚と Sn 0.1 mm 厚を重ねて使用した。実験ハッチ 3 では $4.8\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの回折格子と GSENSE5130 をそれぞれ独立のステージに設置し、アライメントと距離の調整を行った。回折格子はスリット方向が鉛直向きになるようにステージに固定した^{*1}。GSENSE5130 は CA 方向（長手方向）が水平になるように設置している。GSENSE5130 評価ボードと接続するトランジスタ電源とカメラリンク I/F つき PC は、実験ハッチ 3 内に設置した。PC の操作は、キーボードとディスプレイをハッチ外に設置して、そこから行っている。

ピッチ $d = 4.8\text{ }\mu\text{m}$ の回折格子を用いたい場合、12.4 keV ($\lambda = 0.1\text{ nm}$) の平面波による Talbot 距離は式 (4.10) より、 $z_T = m \times 0.2304\text{ m}$ ($m = 1, 2, \dots$) となる。今回 12.4 keV 入射の実験では、回折格子と X 線ピクセル検出器 GSENSE5130 間の距離 z として、Talbot 次数が $m = 1, 2$ の Talbot 距離 $z = 230\text{ mm}, 460\text{ mm}$ に加え、その間で干渉縞が見えないことが期待される $z = 350\text{ mm}$ ($m = 1.5$)、さらに、近接位置 $z = 37\text{ mm}$ の 4 箇所で撮影を行なった。移動させるのは GSENSE5130 のステージのみで、回折格子のステージはビームアライメント後に固定している。一方、24.8 keV ($\lambda = 0.05\text{ nm}$) 入射の実験では Talbot 距離 $z = 460\text{ mm}$ での実験も行なった。

実験は 2017 年 11 月 23 日–24 日、11 月 30 日–12 月 1 日、それぞれ約半日の期間に実施した。11 月 23 日–24 日の初回の実験では装置のセットアップや減衰板の調整を行い、さらに、X 線偏光検出の実験等も行なったため、全ての実験項目を網羅できておらず取得フレーム数も少ない。本論文では、11 月 30 日–12 月 1 日の実験データの解析結果を記す。使用した実験データは表 6.1 にまとめる。

^{*1} 今回の実験では結果的に支障はないものの、BL20B のビームの広がり鉛直方向に小さいことを考えると、今後、さらに高い角度分解能の実験をめざす場合には、回折格子のスリットは水平方向に設置すべきである。

表 6.1: 使用した実験データ

z [mm]	Energy [keV]	Integration Time [ms]	Frames	Attenuation Plate	DAQ start	DAQ stop
No Grating (Dark)	–	100	200	Al 1 mm	2017/12/1 0:12	2017/12/1 0:13
37	12.4	100	1000	Al 1 mm	2017/12/1 1:05	2017/12/1 3:43
230	12.4	100	1000	Al 1 mm	2017/12/1 3:50	2017/12/1 4:26
350	12.4	100	1000	Al 1 mm	2017/12/1 5:27	2017/12/1 6:07
460	12.4	100	1000	Al 1 mm	2017/12/1 6:32	2017/12/1 7:12
460	24.8	100	1000	Cu 0.1 mm + Sn 0.1 mm	2017/12/1 7:36	2017/12/1 8:17
No Grating (Dark)	–	100	200	Al 1 mm	2017/12/1 10:00	2017/12/1 10:02

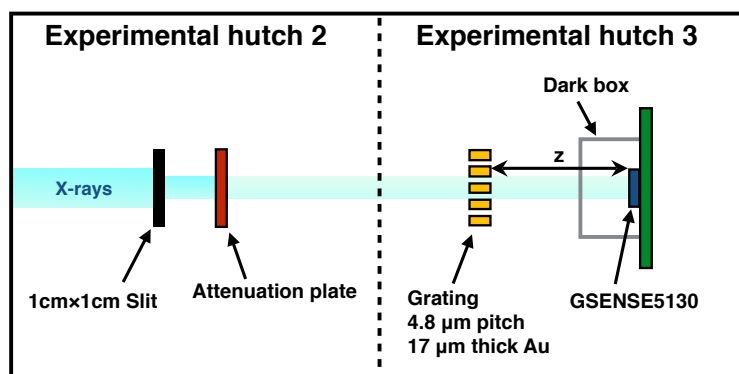


図 6.2: 実験ハッチ内のセットアップ模式図。回折格子はスリット方向が、ほぼ鉛直方向になるように設置している。4 極スリットから回折格子までの距離は約 220 m である。

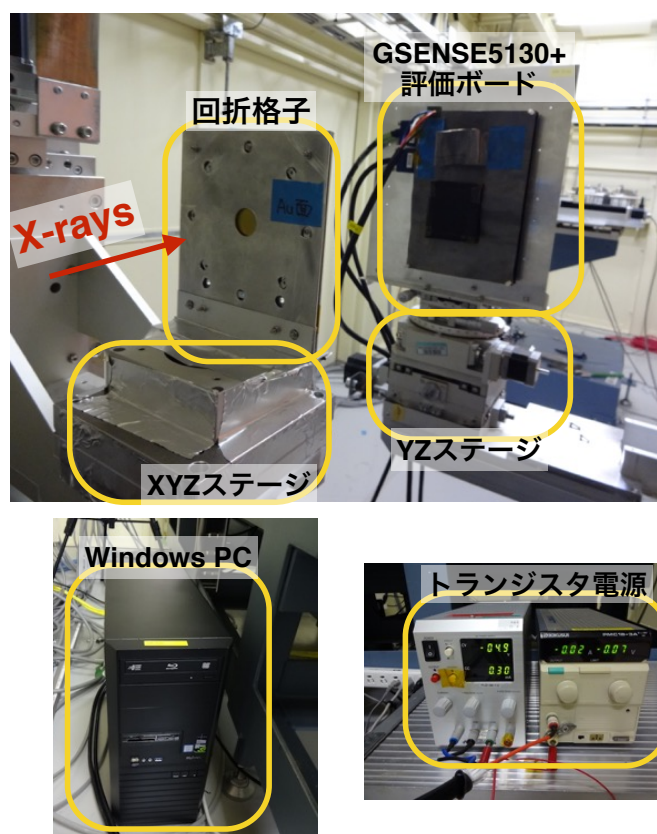


図 6.3: 実験ハッチ 2 内のセットアップの写真

6.3 解析プロセス

解析の流れは節 5.3.2 と同様である。1) 取得したフレームデータからイベント抽出を行い、イベント波高値でデータ選別、電荷分割解析を行い X 線イベントイメージを作成する。2) 作成した X 線イメージを格子の縞に平行に射影した 1 次元プロファイルを作成、フォールディング解析を行い、像周期を求め、その周期で重ね合わせた 1 次元プロファイ

ルにおいて格子自己像（X 線干渉縞）を検出する。回折格子はスリット方向がほぼ鉛直向きになるように設置しているため、おおよそ GSENSE5130 の RA 方向のピクセル配列と平行に縞が現れることが期待される。しかし、期待される像周期はわずか 1.13 pixel で、射影の方向を 0.01° 誤っただけで隣接する格子像と被ってしまい、縞が検出ができなくなる。回転させて射影を行い、フォールディング解析をする走査を 0.01° 刻み、 $\pm 3^\circ$ の範囲で行なった。フォールディング解析では、各角度に対して、周期も 0.9–1.3 pixel の範囲を 0.001 pixel 刻みで走査している。期待される像周期 1.13 pixel はピクセル単位のイメージでは空間分解できないので、イベント抽出後に、節 5.3 でも使用した電荷分割解析を適用している。ただし、ダブルピクセルイベントに関して、スプリット方向の位置を重心位置によって求める操作をするとダブルピクセル領域、シングルピクセル領域の境界付近に集中する傾向が表れたので、図 5.6 のダブルピクセルイベント領域の中で乱数を振って X 線入射位置と決めた。

6.4 実験結果

6.4.1 X 線ビームのスペクトルとイメージ

回折格子を $z = 230$ mm に置いた状態で、X 線エネルギー 12.4 keV あるいは 24.8 keV に分光器を設定し、GSENSE5130 に照射して得た X 線スペクトルを図 6.4 に示す。露光時間はそれぞれ $100 \text{ ms} \times 1000 \text{ frames}$ である。取得したフレームデータから、節 6.3 に記したイベント抽出の処理を施し、その波高分布を X 線スペクトルとする。シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントのスペクトルを図 6.4 左側に、 3×3 イベントと 5×5 イベントのスペクトルを図 6.4 右側に示す。図 6.4a、図 6.4b ではそれぞれ 1100 ADU、1000 ADU 付近に、図 6.4c、図 6.4d では 2000–2200 ADU の範囲にピークが見えており、 ^{55}Fe 線源照射で測定したゲインから、それぞれ入射 X 線のエネルギー 12.4 keV、24.8 keV に対応している。ただし、24.8 keV 入射の場合のシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベント（図 6.4c）では十分な統計が得られなかったため、今回の解析には使用していない。イベント閾値は約 5 keV に相当する 500 ADU としている。

実験にあたっては、パイルアップを防ぐため 1 フレームあたりの露出時間と減衰板を調整した。1 フレームあたりの検出イベント数を、ビーム照射領域のピクセル数で割り算して評価すると、12.4 keV 入射に対して、シングルピクセルイベント 0.004 c/pixel/frame、ダブルピクセルイベント 0.0009 c/pixel/frame、 3×3 イベント 0.007 c/pixel/frame、 5×5 イベント 0.06 c/pixel/frame となっている。図 6.4a を見ると 12.4 keV 入射のシングルピクセルイベント、ダブルピクセルイベントでは、パイルアップの影響がみられない一方、図 6.4b の 5×5 イベントではこれがみえている。大きくひろがった 5×5 イベントを重視する場合は、露出時間をさらに短く、あるいはビーム強度を弱くする必要がある。

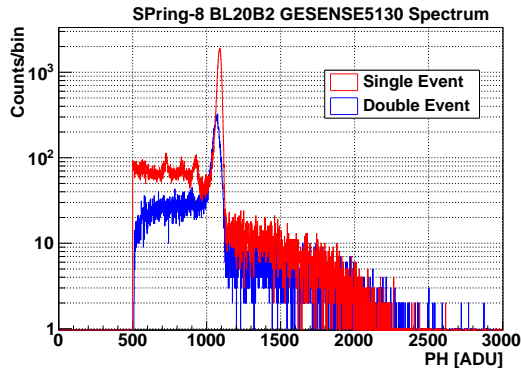
12.4 keV 入射に対して、イベント抽出の方法によってピーク位置が 10 % 程度異なること、24.8 keV 入射の場合、特に 5×5 イベントに対して、エネルギー分解能が劣化していることは、電荷収集あるいはイベント処理方法に改善の余地があることを示している。

X 線エネルギー 12.4 keV のビームを照射した場合、波高値が 1000–1200 ADU のシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントを足した X 線イベントイメージを図 6.5 に示す。正方形に見える領域がビームが当たっている領域で、スリットで絞った $1 \times 1 \text{ cm}^2$ と一致している。ビームの領域中に"井"の字形の模様が見えるが、格子を移動させるとこの模様も動いたことから回折格子固有の構造と思われる。格子像は約 1.1 ピクセル周期が期待値で、また、このイメージにおいて X 線強度は高々 1 count/pixel 程度であるので、図 6.5 で直接、格子像を判別できないのは当然である。そのためにフォールディング解析を行う。

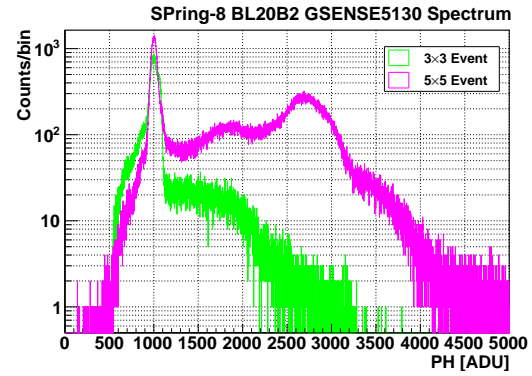
フォールディング解析では、一次元プロファイルを作成するための回転角と、それを重ねあわせる周期を走査する。そのために、X 線ビームが当たっている $\text{CA}=2000\text{--}3000 \text{ pixle}$ 、RA は全領域の約 $1000 \times 2500 \text{ pixle}$ の領域のイベントを使用する。また、バンド幅は節 4.2 で決めた $\Delta\lambda/\lambda = \pm 10\%$ で選んだ。具体的には、12.4 keV に対して、シングルピクセルイベントでは 1038–1148 ADU の範囲、スペクトルのピーク位置がシングルピクセルイベントに比べて低く

なっているダブルピクセルイベントでは 1002–1112 ADU の範囲である。

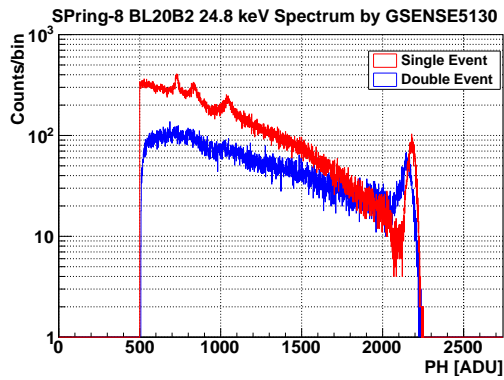
(a) シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベント、12.4keV



(b) 3×3 イベントと 5×5 イベント、12.4keV



(c) シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベント、24.8keV



(d) 3×3 イベントと 5×5 イベント、24.8keV

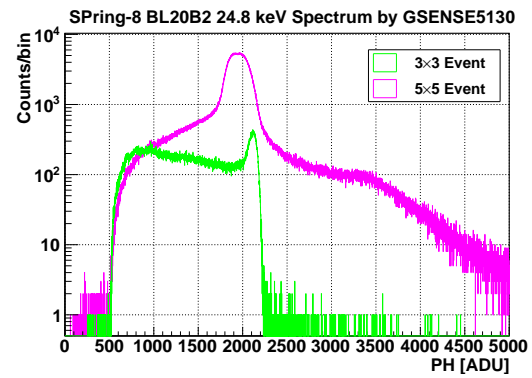


図 6.4: エネルギー 12.4 keV (上) と 24.8 keV (下) の X 線ビームを照射した際に GESENSE5130 で取得した X 線エネルギースペクトル。左の赤はシングルピクセルイベントで青がダブルピクセルイベントのスペクトル、右の緑が 3×3 イベントでマゼンタが 5×5 イベントのスペクトルである。回折格子の位置は $z = 230$ mm。

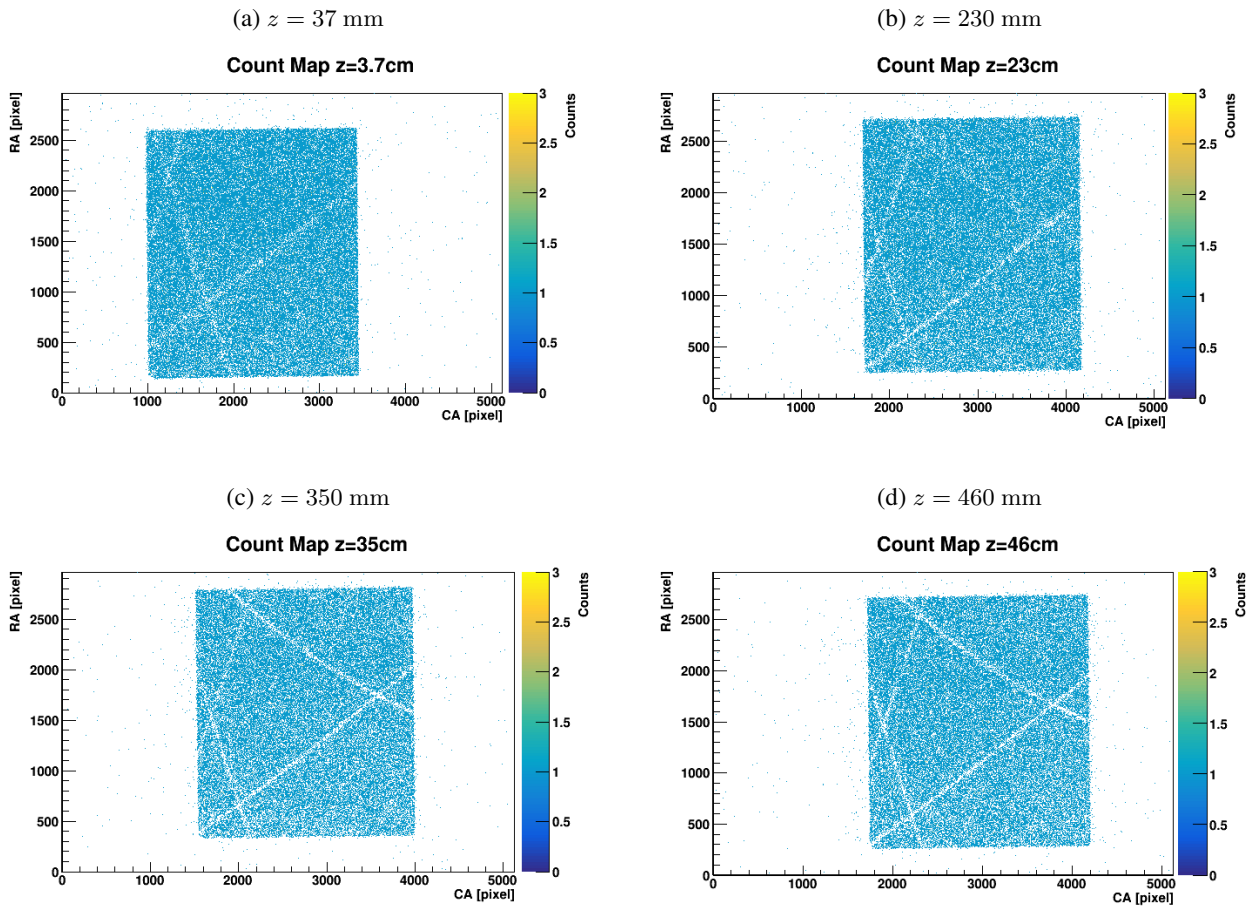


図 6.5: エネルギー 12.4 keV の X 線ビームを照射した場合の、シングルピクセルイベント + ダブルピクセルイベントのイメージ。波高値範囲は 1000–1200 ADU。(a) は格子・検出器間距離 $z = 37$ mm、(b) は $z = 230$ mm、(c) は $z = 350$ mm、(d) は $z = 460$ mm。

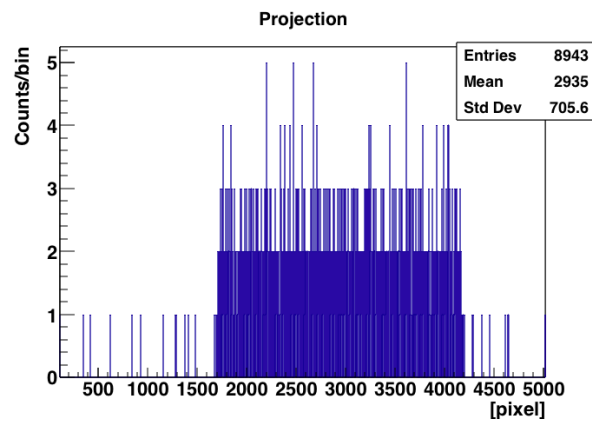


図 6.6: $z = 230$ mm (図 6.5b) のイメージを 0.37° 回転させて射影した 1 次元プロファイル

6.4.2 回転角度と周期の走査

シングルピクセルイベント + ダブルピクセルイベントのイメージを用いて射影とフォールディング解析を実施する。射影する際の回転角度と、射影した 1 次元プロファイルを重ね合わせる周期をかえて、重ねあわせプロファイルの χ^2/dof を計算する。走査した範囲は回転角度が $-3^\circ - +3^\circ$ まで、周期が 1.129–1.138 pixel の範囲である。走査結果のうち、 χ^2/dof の最大値付近の拡大を図 6.7 に示す。なお、重ねあわせプロファイルのビン数は 12 にとっているため、 dof は 11 である。 χ^2/dof が大きい箇所が最適な回転角度と、像周期を示している。図 6.7b、図 6.7c、図 6.7d はそれぞれ $z = 230$ mm, 350 mm, 460 mm の結果で、 χ^2/dof の最大値（黄色く見える）をとる回転角度はそれぞれ $0.37^\circ, 0.07^\circ, 0.21^\circ$ に対応している。図 6.7a の $z = 37$ mm では χ^2/dof の最大値は高々 2.5 程度で、しかも同定程度の値が複数の（回転角度、周期）でみられているが、最大値をとる 0.14° を採用した。各 z に対して、以上のようにして決定した回転角度と検出周期を表 6.2 にまとめる。

表 6.2: 走査によって決めた最適回転角度と検出された周期

z	Rotation angle	Period
37 mm	0.14°	1.129 pixel
230 mm	0.37°	1.131 pixel
350 mm	0.07°	1.130 pixel
460 mm	0.21°	1.133 pixel

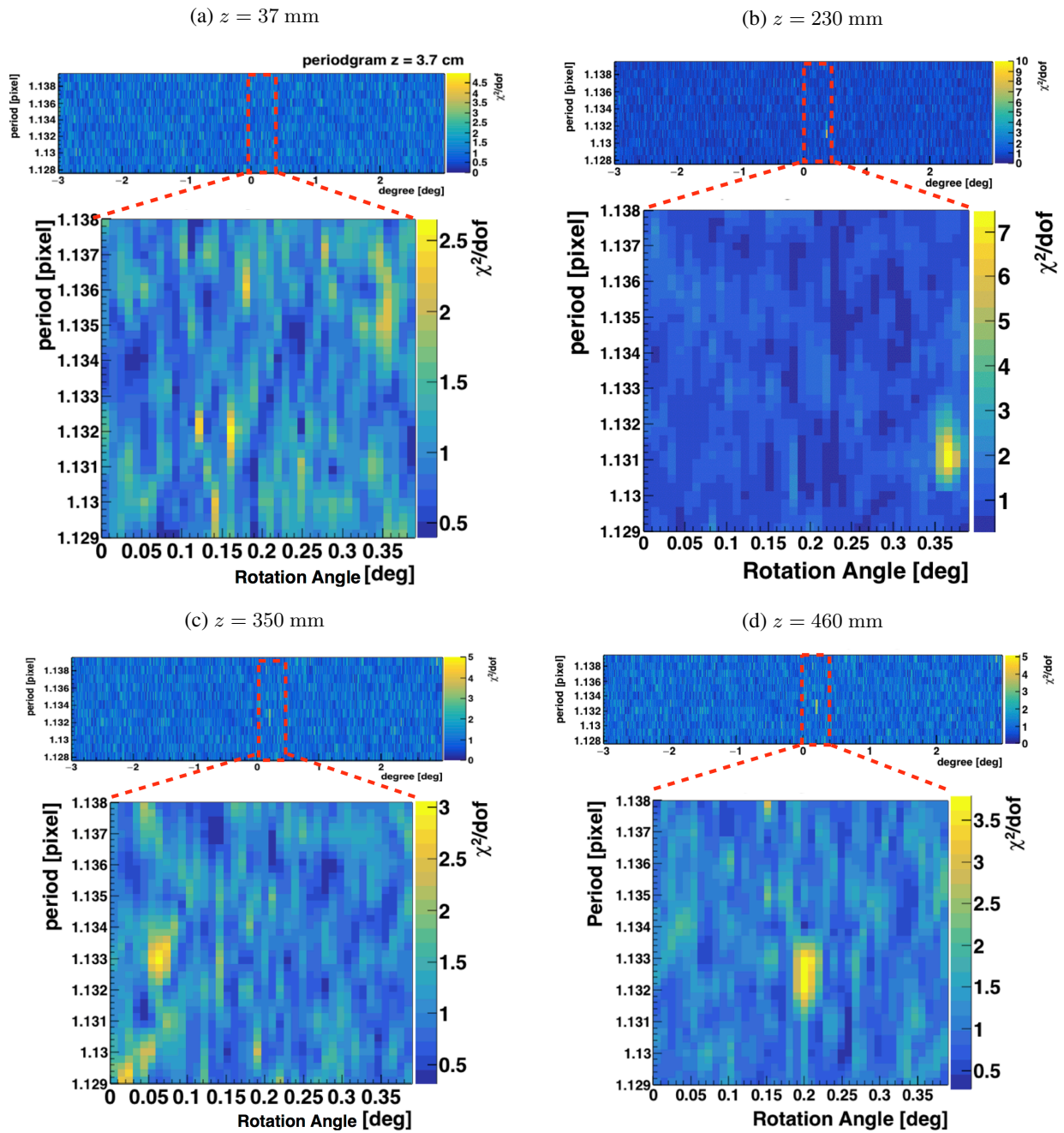


図 6.7: イメージを射影する際の回転角度とフォールディング解析する際の重ねあわせ周期の走査結果。入射 X 線のエネルギーは 12.4 keV で、シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントを用いている。横軸は回転角度で、縦軸はフォールディング解析の重ね合わせ周期で、 χ^2/dof の値をカラーコードで示している。走査を実施した範囲は $-3^\circ - +3^\circ$ であるが、 χ^2/dof の最大値付近を 2 段階に拡大表示している。

6.4.3 重ね合わせプロファイルと検出された周期

前節で求めた最適回転角度で一次元射影プロファイルを作成し、フォールディング解析で重ねあわせ周期を走査した。重ねあわせ周期に対する χ^2/dof の値を図 6.8 左に示す。図 6.7 の断面図に相当するが、周期走査のステップは*ピクセルで図 6.7 と同じである。また、 χ^2/dof 最大に対応する周期で重ねたプロファイルを図 6.8 右に示し、このプロファイルに対して正弦関数でフィッティングしたカーブとともに図 6.9 に示す。図 6.8 右、図 6.9 では重ね合わせプロファイルを見やすくするため 2 周期分を表示している。図 6.8 の (a), (b), (c), (d), (α), (β), (γ), (δ) の順に $z = 37 \text{ mm}$, 230 mm , 350 mm , 460 mm で、青がダブルピクセルイベントのみを使って解析したもの、緑がシングルピクセルイベントのみを使って解析したもの、黒がシングルピクセルイベントと水平方向 (CA 方向) にスプリットしたダブルピクセルイベントを使って解析したもの、赤が水平方向にスプリットしたダブルピクセルイベントのみを使って解析したものである。今回の実験の配置では、GSENSE5130 検出器面上で、水平軸 (CA 軸) をわずかに回転した軸に投影したプロファイルをみている。この方向でもっとも位置分解の高いのが水平方向にスプリットしたダブルピクセルイベントである。このため、特にそのようなイベントに着目した解析も行った。フィッティング結果を用いてコントラスト値 (振幅/平均値) を計算した結果を表 6.3 にまとめる。

図 6.8(α) $z = 230 \text{ mm}$ 、(β) $z = 460 \text{ mm}$ では統計誤差に対して有意なコントラストが現れている。検出された周期も期待されるそれに等しく、格子像に対応する周期構造が検出されたと結論できる。(γ) $z = 350 \text{ mm}$ では、青のダブルピクセルイベントと赤の水平方向ダブルピクセルイベントでのみ、格子像に対応する周期構造が現れているが、コントラスト値は $z = 230 \text{ mm}$, 460 mm と比較すると低い。一方、(δ) $z = 37 \text{ mm}$ では統計誤差の範囲 (3σ 以下) でコントラスト値はゼロ、つまり一様な強度分布となった。以上の結果は $z = 230 \text{ mm}$, 460 mm が Talbot 干渉縞であることを支持する。 $z = 460 \text{ mm}$ での像幅 (ここでは開口率 0.5であることを考慮して像周期の半分をとった) は 1 秒角に対応する。 $4.8 \mu\text{m}$ ピッチ、開口率 0.5 の回折格子で波長 $\lambda = 0.1 \text{ nm}$ の X 線に対して少なくとも 1 秒角の角度分解能を達成できることが分かった。

$z = 37 \text{ mm}$ は回折格子を GSENSE5130 に可能な範囲で近づけた距離 (近接位置) で、原理的に密着位置では、波長によらずに高いコントラストの縞が現れるはずである。 $z = 37 \text{ mm}$ では十分な近接位置にはなっていないことを意味している。治具の製作などでどこまでの近接が可能か今後検討したい。

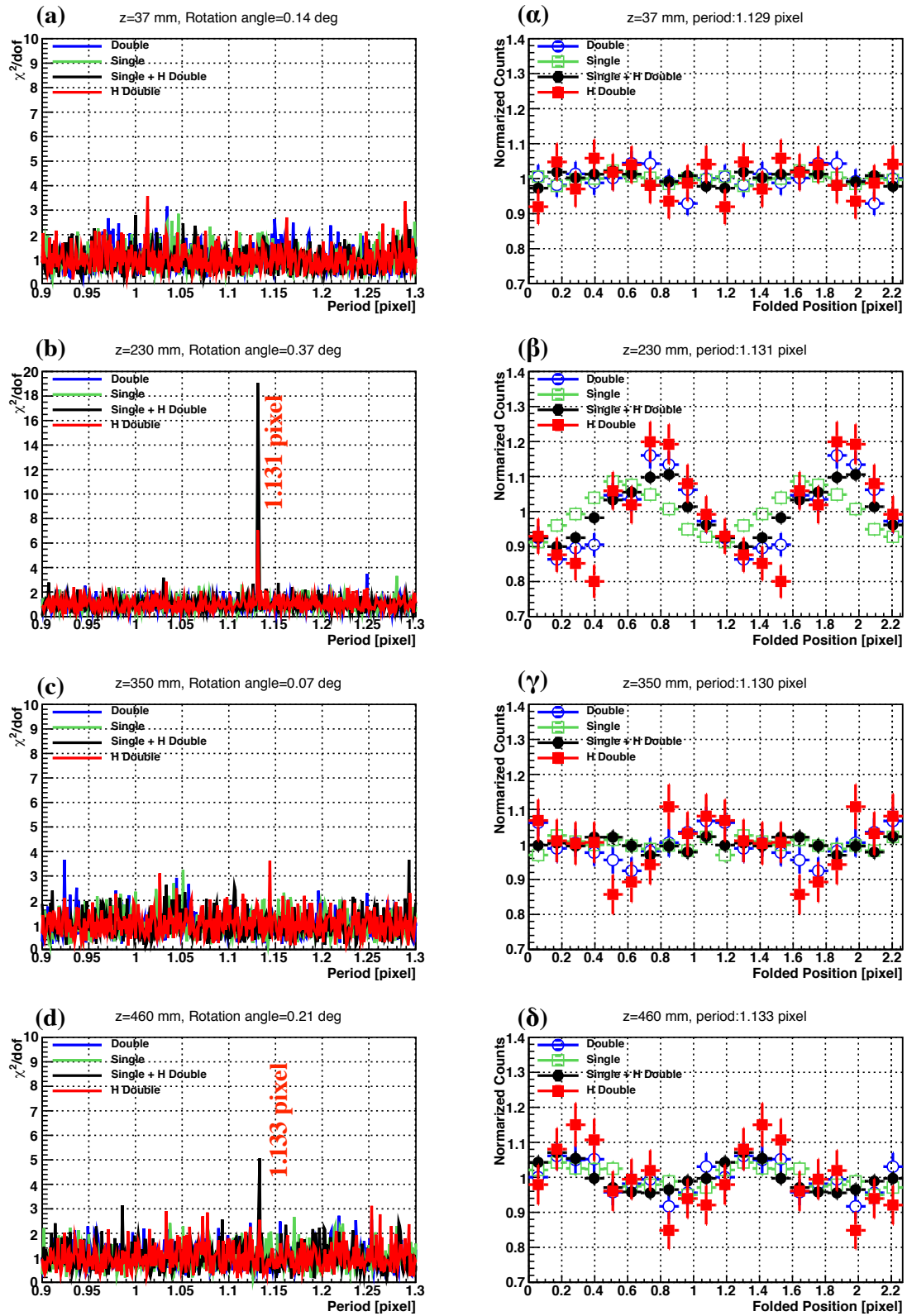


図 6.8: 周期解析結果 (左) と検出周期で重ねた 2 周期分のプロファイル (右)

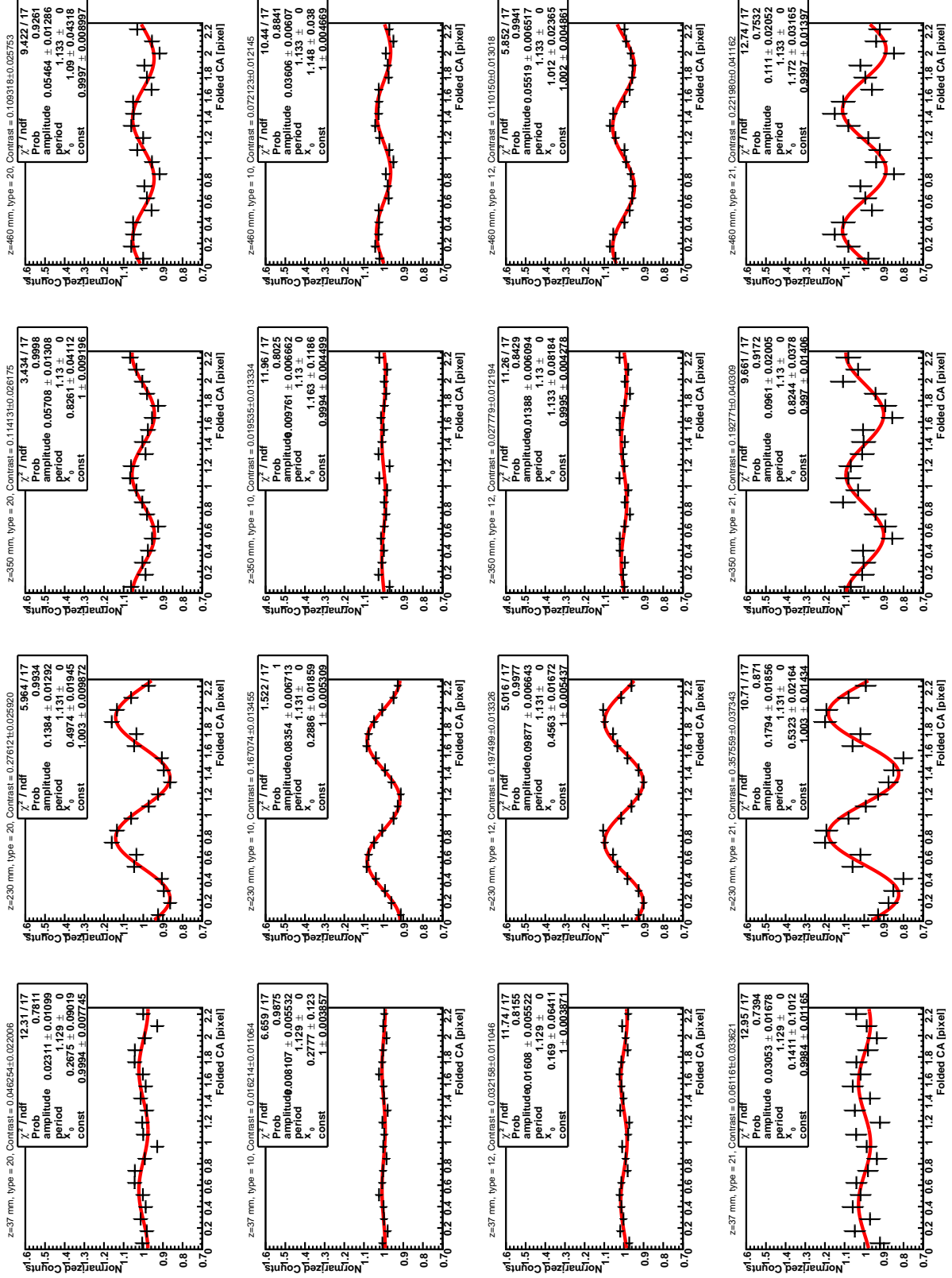


図 6.9: 重ね合わせプロファイルと正弦関数によるフィッティング結果。左から右に向かつて $z = 37$ mm, 230 mm, 350 mm, 460 mm。上から順にダブルピクセルイベント、シングルピクセルイベント + 水平方向のダブルピクセルイベント、水平方向のダブルピクセルイベントの 1 次元プロファイル。

表 6.3: 重ね合わせプロファイルのコントラスト値と解析に使用したイベント数。H Double は水平方向のダブルピクセルイベント。図 6.9 の正弦関数によるフィット結果から求めた。ただし、図 6.9 は 2 周期分を表示しているが、1 周期分に対するフィットで誤差を求めている。

z		Single	Double	Single + H Double	H Double
37 mm	Contrast value	0.016 ± 0.011	0.046 ± 0.022	0.032 ± 0.011	0.061 ± 0.034
	Counts	34010	8534	37757	3747
230 mm	Contrast value	0.167 ± 0.013	0.276 ± 0.026	0.197 ± 0.013	0.358 ± 0.037
	Counts	31890	8356	35577	3687
350 mm	Contrast value	0.020 ± 0.013	0.114 ± 0.026	0.028 ± 0.012	0.193 ± 0.040
	Counts	24980	6519	27798	2818
460 mm	Contrast value	0.072 ± 0.012	0.109 ± 0.026	0.110 ± 0.013	0.222 ± 0.041
	Counts	26740	6776	29767	3027

いずれも水平方向のダブルピクセルイベントのみを使用した場合に最もコントラスト値が大きくなっている。ところが、水平方向のダブルピクセルイベントのイベント数は、全イベント中の一部をしめるだけなので、実際に光源プロファイルを測定した際の統計誤差は大きくなる懸念がある。そこで、性能指標 (figure of merit) f_m を導入して比較を行なった。 f_m は解析に使用するイベント数 N とコントラスト値 C に対して $f_m \equiv \sqrt{NC}$ と定義する。 f_m は、バックグラウンドが無視できる場合に、光源プロファイルの S/N に比例する量になる。これを最大値で規格化してプロットしたものが図 6.10 である。

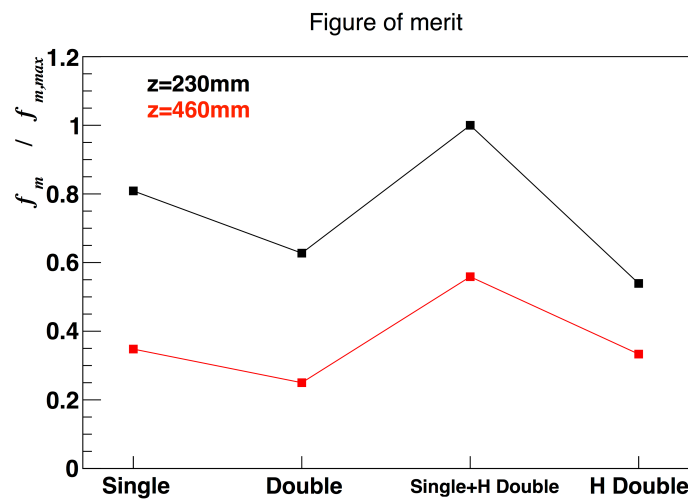


図 6.10: 性能指標による評価。Single がシングルピクセルイベント使用、Double がダブルピクセルイベント使用、Single+H Double がシングルピクセルイベントと水平方向のダブルピクセルイベント使用、H Double が水平方向のダブルピクセルイベント使用。

ここまでの解析では 1000 pixel 幅の領域を切り出して、そのプロファイルを使用してきた。もし、検出器面上の格子像が何らかの理由 (例えば回折格子のピッチが場所によって異なる、X 線ビームの入射角が検出器中心と周辺でわずかに異なる) によって、検出器面上での格子像の周期がグローバルな場所によって異なっていると、重ねあわせによって像がなまされてコントラスト値が低下している懸念がある。そこで、最もコントラスト値の大きい $z = 230\text{ mm}$ の水平方向の

ダブルピクセルイベントを使ったプロファイルに対して、この領域幅を $w = 100$ pixel, 500 pixel, 1000 pixel, 2000 pixel と変えて、1.131 pixel 周期で重ねたプロファイルとコントラスト値がどう変化するか調べた。結果を図 6.11、図 6.12 に示す。 $w = 100$ pixel では誤差が大きく上限値でしか決まらないが、 $w = 500$ pixel, 1000 pixel, 2000 pixel を比較すると $w = 1000$ pixel で最もコントラスト値が大きくなる結果となった。この原因に関しては、さらに調査が必要で、場合によっては、解析方法にも反映する必要があるかもしれない。

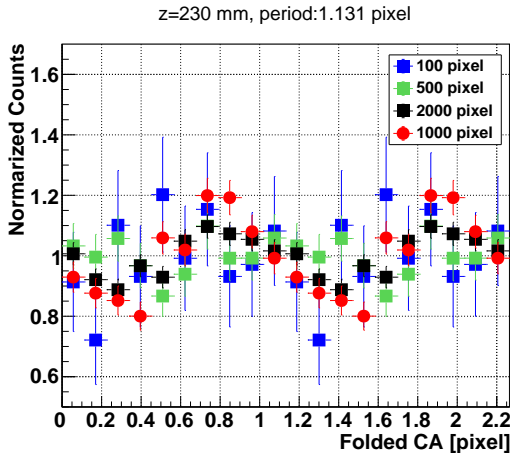


図 6.11: 解析に使用する領域の幅を変えて作成した重ね合わせプロファイル

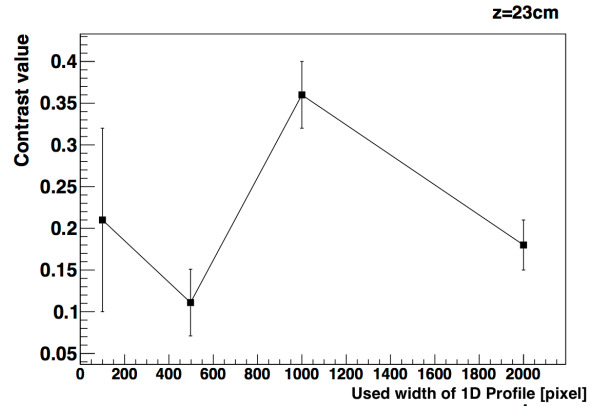


図 6.12: 解析に使用する領域幅によるコントラスト値の変化

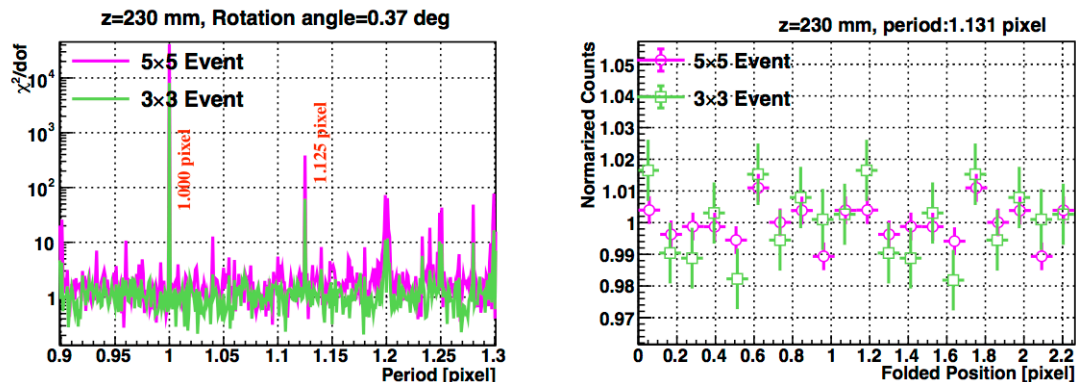
6.4.4 複数ピクセルに広がったイベントを用いた解析

GSENSE5130 ではシングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントの数に比べて、複数ピクセル (3×3 ピクセル以上) に広がったイベントの方が数桁多い。また、サブピクセルでの位置分解能を得るために電荷分割解析を行ってきたが、現状のダブルピクセルイベントを使用した方法では 1 次元方向の位置分解能の向上しか見込めない。一方、複数ピクセルに広がったイベントでは 2 次元に分布した波高値情報を持つため、これを利用することで 2 次元の X 線入射位置の特定が期待される。ここでは広がった X 線イベントの波高値分布の重心位置を求め、それを X 線入射位置と推定する方法を試みた。X 線入射座標 x_G は、ピクセル座標 x_i の波高値を PH_i とすると式 (6.1) で決まる。

$$x_G = \frac{\sum PH_i x_i}{\sum PH_i} \quad (6.1)$$

この重心法による解析を、前節で最もコントラスト値の大きかった $z = 230$ mm の 3×3 イベント、 5×5 イベントデータを使用して行なった。重心位置をとった場合と最も波高値の高いピクセルを X 線入射位置とする方法も実施した。前節で最適値として求めた回転角度 0.37° でイメージを回転し、1 次元プロファイルを作成、フォールディング解析を行なった。結果を図 6.14 に示す。図 6.13a の最大波高値のピクセル位置を使用した解析や、図 6.13b の 3×3 イベントの重心位置解析では、有意なコントラスト値は得られなかった。しかし、図 6.13b の 5×5 イベントを用いた重心位置解析ではシングルピクセルイベントやダブルピクセルイベントと同じ 1.131 pixel 周期の周期構造が検出できた。全 X 線検出イベントに相当する、 5×5 イベントでも、重心位置解析をすることで、Talbot 干渉縞を検出できることが分かった。ただし、正弦関数でのフィッティングから求めたコントラスト値は 0.040 ± 0.003 と小さい値である。前節で導入した性能指標 f_m を計算すると 0.13 である。この指標でも、 $z = 230$ mm, 460 mm の場合に比べて劣ることが分かる。

(a) 最大波高値ピクセル位置



(b) 重心位置解析

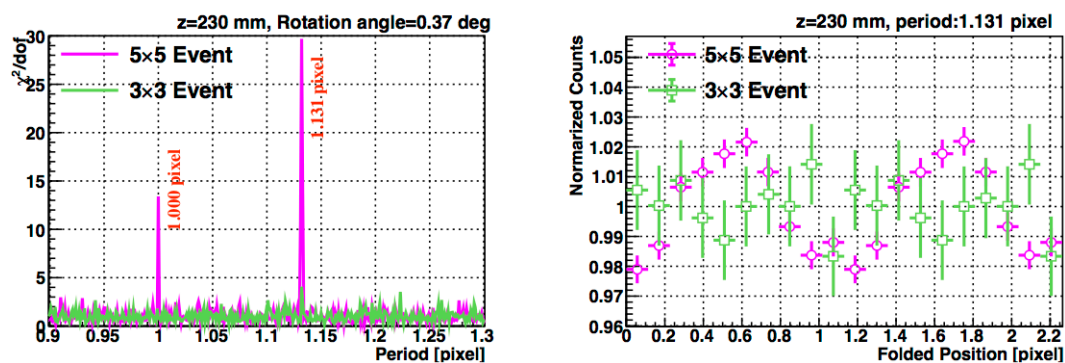


図 6.13: 広がったイベントに対する周期解析結果 (左) と 2 周期分の重ね合わせプロファイル (右)。緑が 3×3 イベントでマゼンタが 5×5 イベント。

最後に、シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントで十分な強度を得られなかった 24.8 keV、 $z = 46$ cm のデータに対して、 5×5 イベント重心位置を用いた解析を行う。波高値が 1800–2200 ADU の 5×5 イベントを使用したイメージを図 6.14 に、回転角度、周期走査結果を図 6.15 に示す。 χ^2/dof が 5 を超えるような周期構造は見つからなかったが、 χ^2/dof が最大となる 0.66° を回転角度として選んだ。この角度で改めて周期解析を行った結果を図 6.16a に、検出周期で重ねた 2 周期分のプロファイルを図 6.16b に示す。結果として、有意な周期構造を得ることはできなかった。前にも述べたように、24.8 keV 入射に対しては 5×5 イベントのスペクトルのエネルギー分解能が悪く電荷のとりこぼしが起こっていることが一つの原因かもしれない。24.8 keV 入射の場合にシリコン中で生成される約 23 keV の光電子の飛程が約 $1.5 \mu\text{m}$ [22] と大きく、それが X 線の入射位置推定の誤差になっているかもしれない。

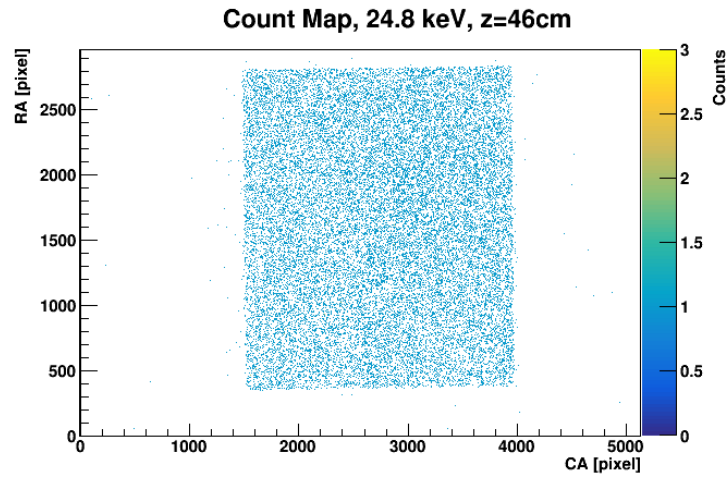


図 6.14: 24.8 keV 入射の場合の 5×5 イベント (1800–2200 ADU) のイメージ

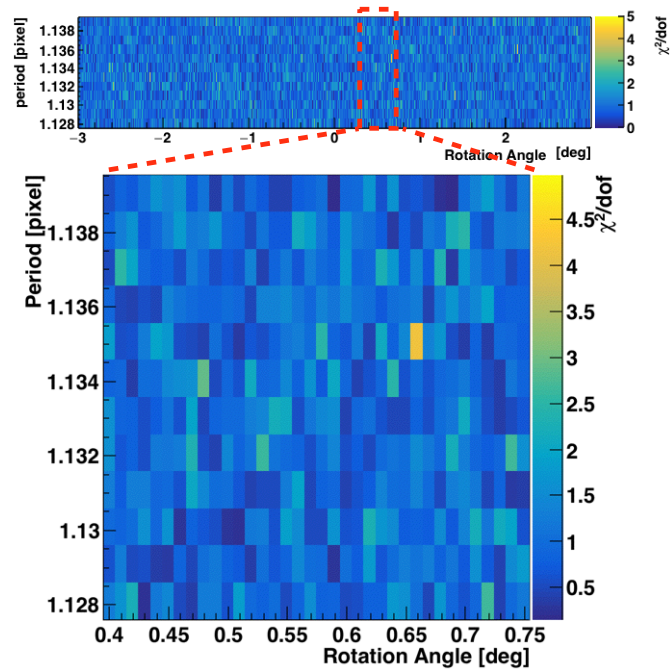
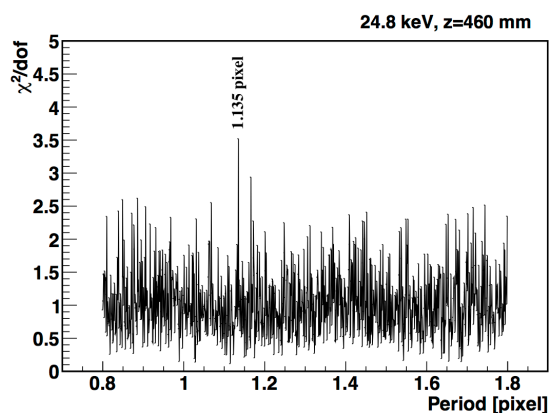


図 6.15: 24.8 keV 入射、 5×5 イベント重心位置のイメージを使用したフォールディング解析。回転角度と周期による χ^2/dof の走査結果を示している。全範囲と一部拡大。横軸は回転角度で、縦軸はフォールディング解析のテスト周期。

(a) フォールディング解析の結果



(b) 検出周期で重ねた 2 周期分のプロファイル

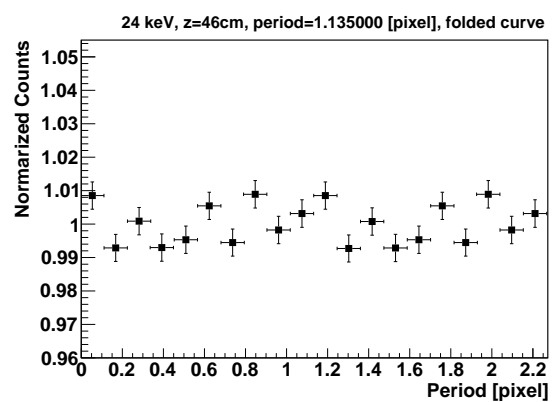


図 6.16: 図 6.15 の走査から最適な回転角度を 0.66° と判定して、周期を細かく変えてフォールディング解析を行なった結果。5 × 5 イベント重心解析でも 24.8 keV 入射のデータに対しては、周期構造は検出できなかった。

第 7 章

まとめと今後の展望

7.1 まとめ

本研究では多重像 X 線干渉計 *MIXIM* の基礎開発として、フレネル回折積分によるシミュレーションと可視光用 CMOS 検出器 GSENSE5130 での X 線分光性能評価試験、拡散光と準平行光を用いた Talbot 干渉縞の撮像実験を行った。以下に内容を要約する。

■フレネル回折積分による Talbot 効果シミュレーション

開口率 0.2、5 μm ピッチの回折格子、0.1 nm (12.4 keV) の X 線に対する次数 $m = 2$ の、その Talbot 距離 $z = 50$ cm に検出器を置いた場合のシミュレーションを実施した。多数のスリットからなる回折格子を用いることが本質的であること、0.5 秒角離れた 2 方向から入射した X 線を区別できることを示した。また、あるバンド幅で積分した強度分布プロファイルも計算した。結果、 m を次数としてバンド幅 $\Delta\lambda/\lambda$ ($1/m$) = 10 % であれば十分なコントラストの Talbot 自己像が保証されることが分かった。

■可視光用 CMOS 検出器 GSENSE5130 の X 線分光性能評価試験

ピクセルサイズ 4.25 μm の可視光用 CMOS 検出器 GSENSE5130 を導入し、 ^{55}Fe 線源を用いて X 線に感度を持つことを確認した。広がったイベントが多いという特徴を持つが、シングルピクセルイベントを取り出すと、常温で FWHM = 220 eV @ 5.9 keV のエネルギー分解能を達成した。検出効率はシングルイベントだけで 3 %、広がったイベントも合わせて 55.4 % で空乏層と X 線に感度を持つ有効厚を見積もるとそれぞれ 1 μm と 26 μm であることが分かった。検出効率は例えば空乏層 200 μm をもつ X 線 CCD に比べて劣るが、X 線 CCD が -100°C 程度まで冷却する必要があるのに対して常温動作可能であるのは大きな利点である。*MIXIM* にとっては、ピクセルサイズが X 線 CCD の 20 μm –100 μm 、XRPIX の 30 μm と比べて小さい点が本質的に重要になる。

■拡散光を用いた Talbot 干渉縞の撮像実験

焦点サイズが 1 μm 程度のマイクロフォーカス X 線源を光源に用いた、拡散光での回折格子の撮像実験では、4.8 μm ピッチ、17 μm 厚 Au、開口率 0.5 の X 線吸収格子と X 線天文用 SOIPIX の XRPIX2b (ピクセルサイズ 30 μm) を使用して Talbot 干渉縞を検出した。また、電荷分割解析によりサブピクセルでの位置分解能が得られることを示した。

■準平行光を用いた Talbot 干渉縞の撮像実験

大型放射光施設 SPring-8 の BL20B2 を使用した準平行光での回折格子の撮像実験では、新たに導入した GSENSE5130 を使用して、X 線エネルギー 12.4 keV 入射の場合、Talbot 干渉条件を満たす 23 cm, 46 cm の位置で Talbot 干渉縞の検出に成功した。後者の位置では、像幅が 1 秒角に対応し、少なくとも秒角の角度分解能を達成できることを実証した。

7.2 今後の課題と展望

MIXIM の開発における今後の課題と展望について述べる。

■有効面積の確保

MIXIM では原理的に集光を行わないため、反射望遠鏡を使用したシステムに比べて有効面積を大きくできない。伝統的なコリメータつき検出器と同様に、検出器の有効面積が装置としての有効面積の上限となる。さらに、有効面積は回折格子の開口部分に絞られ、バンド幅 10 % 程度を取り出すことでさらに有効なイベント数は減る。例えば有効面積 10 cm^2 程度の検出器を用いてもその $1/10$ くらいになってしまう。*MIXIM* の最初の目標である超小型衛星では例えば 10 ユニット程度の *MIXIM* ユニットの搭載し数 cm^2 の干渉計としての有効面積を確保したい。

ただし、本研究で新たに導入した可視光用 CMOS 検出器 GSENESE5130 では空乏層厚が $1\text{ }\mu\text{m}$ 、有効厚でも $26\text{ }\mu\text{m}$ と薄く、検出効率が小さいという問題がある。既に、同じ Gpixel 社の GSENSE シリーズで裏面照射型、完全空房で空乏層厚 $10\text{ }\mu\text{m}$ の GSENESE2020BSI (ピクセルサイズ $6.5\text{ }\mu\text{m}$) を既に導入しており、検出効率の改善が期待される。

■検出器位置分解能のさらなる向上

一方で、本研究でも使用した XRPIX をはじめとした SOIPIX の一貫として数 μm ピクセルサイズの素子の開発も期待される。本研究では像幅 1 秒角の Talbot 干渉縞の検出に成功し、コントラスト値は最大で 22 % で、理想的なケースには達していない。この原因としては、 $4.25\text{ }\mu\text{m}$ のピクセルサイズの今回の検出器でも、 $4.8\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの回折格子に対しては位置分解能が十分でないことが原因と考えられ、さらなる位置分解能の向上が求められる。ピクセルサイズの微細化は、各方面の用途で求められていることで、その成果を利用するのがひとつの方向である。

また、本研究で使用した電荷分割解析の改善や新たなサブピクセル位置検出アルゴリズムの開発も有効であろう。今回使用した GSENESE5130 では大きく広がった X 線イベントが多く確認できた。本研究では広がったイベントに対して、単純に波高値の重心位置を計算することでサブピクセルでの X 線入射位置を特定する方法を試したもののダブルピクセルイベントの方法に匹敵する位置分解能は得られなかった。例えば、2 次元のガウス関数で波高値分布にフィッティングを行う Fitting 法を用いるといった方法などが考えられる。

■格子デザインの変更による角度分解能の向上

角度分解能の向上、より狭い像幅の干渉像を得ることにに対しては、回折格子の変更を計画している。本研究では開口率 0.5 の吸収型回折格子を使用した。開口率 0.2、 $4.8\text{ }\mu\text{m}$ ピッチの回折格子を導入する。これを用いて、回折格子から検出器までの距離 z を波長 $\lambda = 0.1\text{ nm}$ 、次数 $m = 2$ の Talbot 距離 $z_T = 46\text{ cm}$ で Talbot 干渉縞を検出することができれば、*Chandra* 衛星を超える 0.4 秒角の角度分解能 (正確には像幅) を得られる見込みとなる。この際、 $m = 1$ ($\lambda = 0.05\text{ nm}$), $m = 3$ ($\lambda = 0.15\text{ nm}$), $m = 4$ ($\lambda = 0.2\text{ nm}$) といった波長付近のバンドも同時に利用できることに注意したい。

■反同時計数シールド、マイクロコリメータ

MIXIM は非常に単純な構造をしているが、実際に超小型衛星に搭載して観測するためには、視野をしぼるコリメータやバックグランド除去の反同時計数シールドが必要になる。後者には 50 cm 長さ、 3 cm 角程度のシールド箱をシンチレータで構成することは可能で、それを使用したい。前者には、開口率の異なる 2 枚の格子を近接して設置しコンパクトなコリメータとすることを考えている。

■2次元化の方策

本研究では 1 次元格子を使用することで 1 次元の光源プロファイルを得ていたが、最終的にイメージを得るには 2 次元化が必要である。2次元化の方法として、1 次元格子を用いたユニットを複数製作し、角度を変えて使用すること

で2次元の情報を得る方法、多数のピンホールを開けたような2次元格子を使用する方法が挙げられる。ただし、前者ではユニット数（回折格子と検出器の組み合わせの数）が倍以上となり、後者では開口部分が減る分だけ有効面積が減るという問題がある。いずれも角度分解能と有効面積がトレードオフの関係となっている。これを最適化することを検討している。

■X線偏光検出の機能

なお、微小ピクセルのCMOS検出器を使用することで偏光検出が可能になる。CCDを使用した実験で実証されている[23][24]。本文では触れなかったが、SPring-8実験においてGSENSE5130に偏光X線を照射する実験を実施しており、偏光検出に成功している。高い角度分解能と偏光検出を同時に達成できれば、例えば、活動銀河核のトーラスのX線空間分解、偏光測定などが期待される。独自のアイデアで、かつ目標をしぼることで超小型衛星でも第一級の成果が期待できる。

付録

A クロストーク補正

A.1 スペクトル

GSENSE5130 で得られた 12.4 keV のスペクトルを図 A.1 に示す。ダブルイベントには、X 線の入射ピクセルに対して、上下左右それぞれに広がる 4 パターンが考えられる。図 A.1 より、左右のダブルイベントが多く、上下のダブルイベントは少ないことが分かる。この原因はクロストークであるとして、以下調べていく。

CMOS イメージセンサは回路が複雑なため、クロストークと呼ばれる現象が起こりやすい。クロストークとは、ある伝送路の信号波形が他の伝送路の信号波形の干渉を受け、本来の信号波形とは異なる信号波形を出力してしまう現象のことである。CMOS イメージセンサは CCD イメージセンサに比べて回路が複雑なため、クロストークはより発生しやすいとされている。

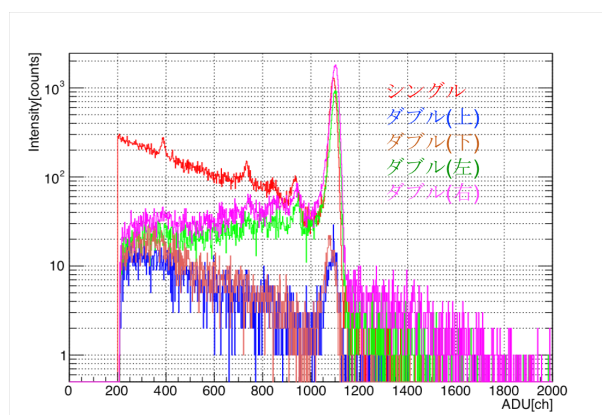


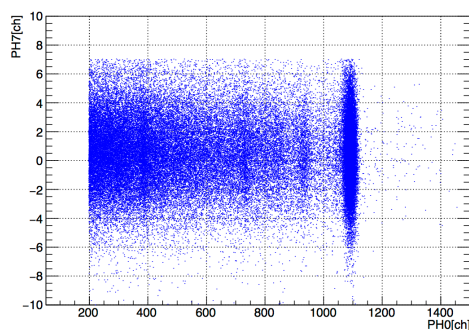
図 A.1: GSENSE5130 で得られた 12.4 keV の X 線スペクトル

A.2 補正

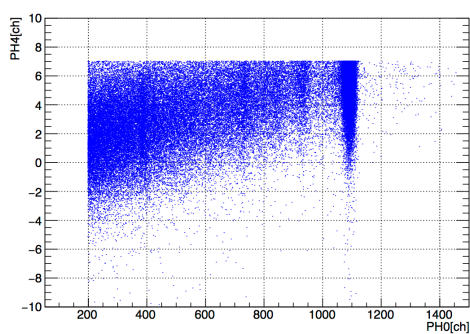
GSENSE5130 でのクロストークの有無を調べるため、シングルイベントと隣接する上下左右のピクセルについて調べた。具体的には、シングルイベントの波高値を横軸に、隣接する上下左右のピクセルの波高値を縦軸にプロットした。

シングルイベントの場合、隣接するピクセルの波高値はバックグラウンドレベルで揺らいでいるので、図 A.2 の上下のピクセルのような関係になる。しかし、左右のピクセルの波高値はシングルイベントの波高値につられて大きくなっていることが分かる。つまり、あるピクセルに X 線が入射すると、そのエネルギーに応じて左右のピクセルにも X 線が入っている (正確には信号電荷が広がっている) とみなされてしまっている。これは、図 A.1 で左右のダブルイベントのスペクトルが右肩上がりであることと一致している。そこで、左右のピクセルについては図 A.2 からその傾きを

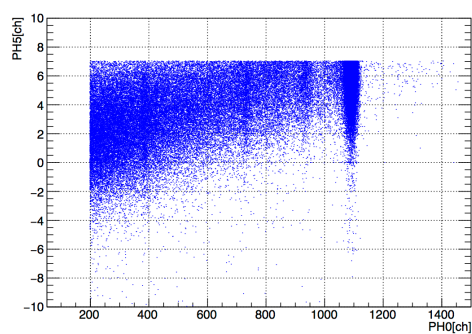
(a) 上



(b) 左



(c) 右



(d) 下

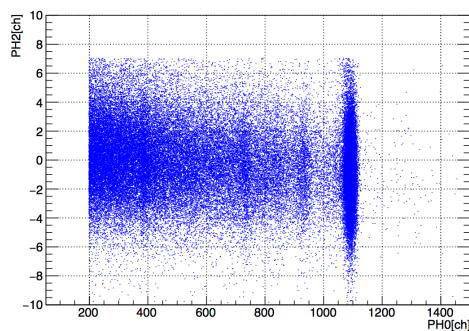


図 A.2: シングルイベントの波高値とその周囲のピクセルの波高値

調べ、補正をかけた上でイベント抽出する必要がある。

図 A.3 のように横軸を 50 ch ずつの領域に区切り、その領域内で横軸にプロジェクションをしてヒストグラムを作成した。さらに、そのヒストグラムをガウスフィッティング (図 A.4) をし、各領域でのピーク位置をプロットし、その傾きを調べた (図 A.5)。比較として、各領域で単純に平均値をとったプロットもした。

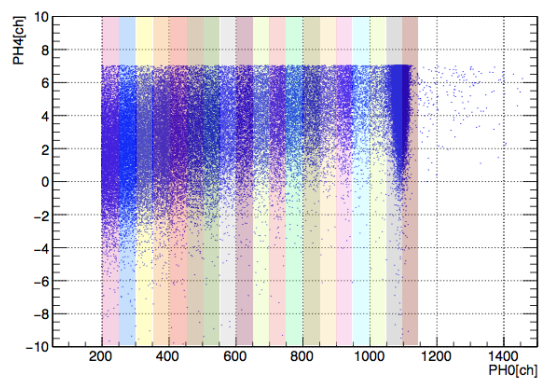
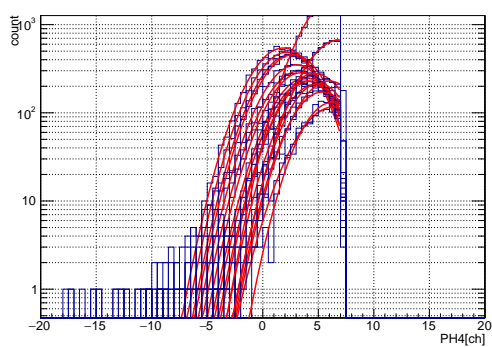


図 A.3: 図 A.2 の左を 50 ch ずつの領域に分けた様子

(a) 左



(b) 右

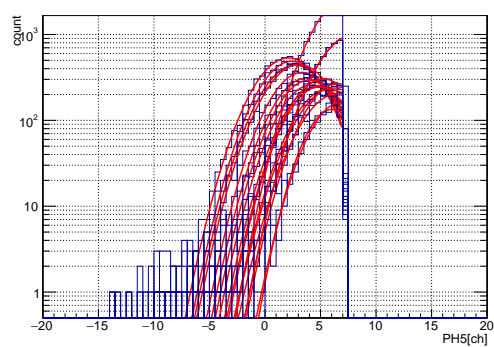


図 A.4: 各領域でのガウスフィッティング

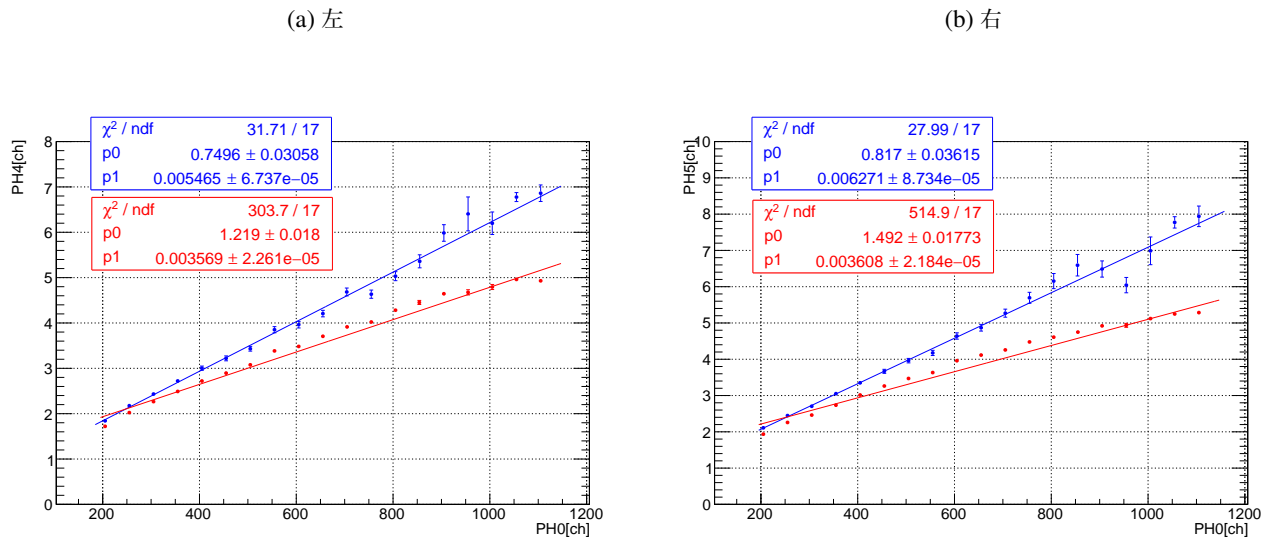


図 A.5: シングルの波高値とその左右のピクセルの波高値。赤:平均値、青:ガウスフィッティング

図 A.5 より、PH 左[ch] と PH 右[ch] に対して、

$$\text{PH 左}' [\text{ch}] = \text{PH 左} [\text{ch}] - \text{PH 中心} [\text{ch}] \times 0.005465$$

$$\text{PH 右}' [\text{ch}] = \text{PH 右} [\text{ch}] - \text{PH 中心} [\text{ch}] \times 0.006271$$

と補正をかけた上で、イベント抽出をする必要がある。補正をかけてイベント抽出し直したスペクトルを図 A.6 に示す。図 A.6 より、上下左右のいずれのダブルイベントも同程度のカウント数になっていることが分かる。

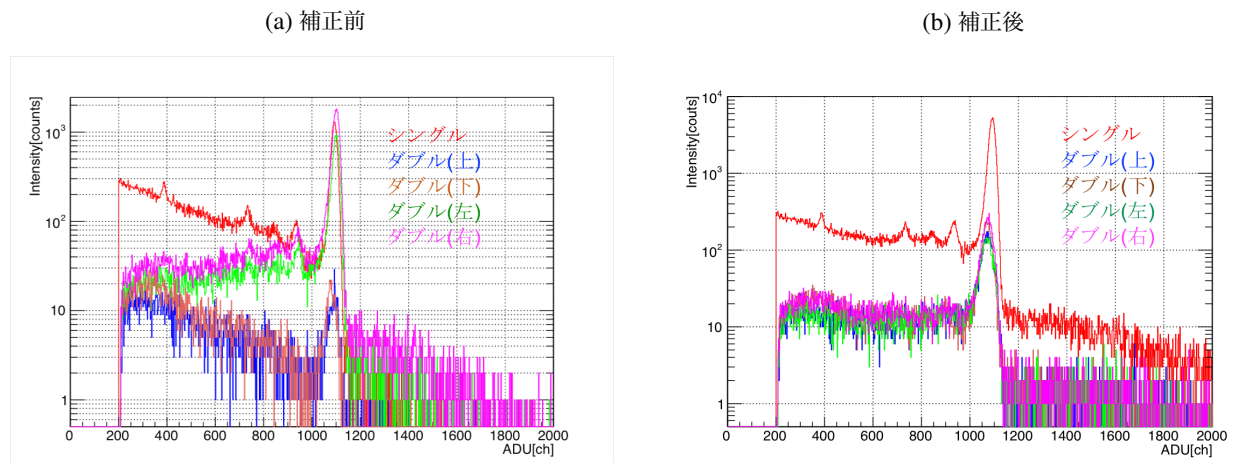


図 A.6: 補正前のスペクトル (左) と補正後の 12.4 keV のスペクトル (右)

謝辞

修士課程での研究活動を行い、本修士論文を執筆するにあたって支えてくださった皆様に感謝を申し上げます。

松本研究室の皆様には大変お世話になりました。私の研究を直接指導していただいた林田清先生には、何につけても至らなかった私を導いてくださりました。なにより、私の研究テーマである *MIXIM* の基礎開発は X 線天文衛星の観測機器としては全く新しい原理であり、ゼロの状態から新しいものを作るという貴重な経験ができたことは林田先生の発案ありきのもので、大変感謝しております。今後の *MIXIM* の進捗は陰ながら確認したいと思います。

松本浩典先生には、1 年と短い間でしたが発表毎に鋭い質問をしていただき、大変勉強になりました。松本先生が阪大に来られるまでは馴染みの薄かった望遠鏡でしたが、先生の分かりやすい説明で理解が捗り、望遠鏡への関心が増しました。

中嶋大先生には、私が質問に伺った際には一緒になって考えてくださりました。ASIC 開発の経験がある方はなかなかいない上、個人的に興味のあったことなので、ほとんどその話を聞くことができなかったのは残念に思っています。実験 TA としてもお世話になりました。

昨年度ご退職された常深博先生には、私が学部生のころ研究室を伺った際に X 線天文学についてお話しいただき、修士課程から松本研究室（旧常深研究室）でお世話になるきっかけになりました。実験ミーティングでのスライドの作り方を始めとした基本的なことから厳しい口調でご指導いただきました。

秘書の澤本茂美さんには出張の手続きや備品の購入など多くの面でサポートいただきました。大変お世話になりました。同じく秘書の高比良さんには澤本さんがいない間、研究室を支えていただきました。

博士課程の井上さんには同室で質問に行くたびに丁寧に答えていただきました。どの発表の場においても積極的に質問・コメントをされていたのが印象的で、私も見習うべき点であります。また、研究で夜遅くなってしまった時や本論文執筆時などは 2 人で食堂やラーメンを食べに行ったのが今となってはいい思い出です。

同期の 3 人には、就職活動や研究で行き詰っているとき、本論文で苦難しているときに何度も励まされました。池山くんとは M1 のとき同室で、特に就職活動で行き詰っている時に色々アドバイスをくれて助かりました。論文執筆中も大西さんと 3 人で遅くまで残っていたことがあり、それが最後まで書き上げるモチベーションにもなりました。大西さんは私と同じ観測機器開発が研究テーマで M1 のころから実験ミーティングに同席しました。CCD について分からないことを何度も質問しましたが、いつも丁寧に教えてくれて勉強になりました。米山くんは自分の発表のたびに質問をしてくれて、自分自身の理解の助けにもなりました。同期で博士課程に進むのは米山くんだけですが、是非、これからの X 線天文学をリードして行ってください。楽しみにしております。

後輩にもたくさん励まされました。特に花坂くんと朝倉くんには SPring-8 での準備から実験までを手伝ってもらい、おかげで期待する結果を得ることができました。M1 の花坂くんは同じ *MIXIM* の研究で、学部で可視光用 CMOS センサーに X 線を当てていた経験を活かして何度も助けてもらいました。岩垣くんは実験室を行き来する姿を居室で見かけることが多かったですね。みかん美味しかったです。シェイクハンズ岡崎こと岡崎くんは、よく話しかけてくれて楽しかったです。セミナーでの資料のまとめ方はとても分かりやすく、修論を書く上でもすごく参考になりました。古市くんはこの 1 年間同室で楽しい話をしてくれました。レクレーション係でも毎度、古市くんのセンスが光るお店のチョイスをしてくれていました。B4 の朝倉くんは同室の向かいの席で、何度も質問をしてくれました。今後の躍進に

期待しています。その躍進のためにもまず、キーボードを買いましょう。泉くん、中田くんも同時期に卒業研究で頑張っている姿を見て何度も励まされました。

大阪大学工学研究科の志村考功先生と M2 の細野くんには回折格子をお借りしたり、Talbot 効果についてヒントを頂いたりしました。細野くんには M1 の時に実験の手伝いをさせてもらって、X 線イメージングの実験方法の基本的なところから教わりました。また、研究会の度にコメントをくれて、有意義な議論ができました。ありがとうございます。

また、SOIPIX 研究会という議論する場を与えてくださった高エネルギー加速器機構の新井康夫先生、XRPIX2b 素子を提供してくださった京都大学の鶴剛先生、GSENSE5130 素子購入の手配をしていただいた兼松の松永様、ここには書ききれなかったお世話になった家族・友人・その他諸々の方々にこの場を借りて感謝を申し上げます。

引用文献

- [1] 文原篤史. マイクロフォーカス X 線源と大面積 X 線 CCD を用いた光子計数モードでの屈折コントラスト拡大撮像. Master's thesis, 大阪大学, 2009.
- [2] Hayashida Kiyosi, et al. A New Type of Multiple Image X-ray Interferometer for arcseconds and sub-arcseconds sources. In *Space Telescopes and Instrumentation 2016*, Vol. 9905. Proc. SPIE, 2016.
- [3] Jianming Wen, Yong Zhang, and Min Xiao. The talbot effect: recent advances in classical optics, nonlinear optics, and quantum optics. *Adv. Opt. Photon.*, Vol. 5, No. 1, pp. 83–130, Mar 2013.
- [4] SOIPIX Web page. <http://rd.kek.jp/project/soi/>.
- [5] Takeda Ayaki, et al. XRPIX2b Technical Description. Technical report, Kyoto University Cosmic Ray Group, 2016.
- [6] 久留飛寛之. ピクセル型 X 線検出器 XRPIX を用いた X 線タルボ干渉計の開発. Master's thesis, 大阪大学, 2015.
- [7] SPring-8 BL20B2 概要. http://www.spring8.or.jp/wkg/BL20B2/instrument/lang/INS-0000000470/instrument_summary_view.
- [8] Gpixel Inc. GSENSE5130 Datasheet V1.2.0, 2017.
- [9] S. Komossa, et al. Discovery of a Binary Active Galactic Nucleus in the Ultraluminous Infrared Galaxy NGC 6240 Using Chandra. *The Astrophysical Journal*, Vol. 582, , 2003.
- [10] P.Cloetens, et al. Fractional Talbot imaging of phase gratings with hard X-rays.
- [11] Atsushi Momose, Shinya Kawamoto, Ichiro Koyama, Yoshitaka Hamaishi, Kengo Takai, and Yoshio Suzuki. Demonstration of x-ray talbot interferometry. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 42, No. 7B, p. L866, 2003.
- [12] Pfeiffer, Franz, Weitkamp, Timm, and David, Christian. X-ray phase contrast imaging using a grating interferometer. *Europhysics News*, Vol. 37, No. 5, pp. 13–15, 2006.
- [13] Thomas Duttchenhofer, et al. Technical documentation Project: mw401. Technical report, Microworks, 2016.
- [14] 堀田厚生. 半導体の基礎理論. 技術評論社, 2000.
- [15] 米本和也. CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用. CQ 出版社, 2003.
- [16] Gpixel Inc. *GSENSE5130 Evaluation System Manual*, V1.2 edition, 6 2017.
- [17] AMPTEK INC. XR-100T-CdTe Specifications.
- [18] http://henke.lbl.gov/optical_constants/.
- [19] Joseph W. Goodman. フーリエ光学, 第 3 版. 森北出版株式会社, 1968.
- [20] 浜松ホトニクス. 開放型マイクロフォーカス X 線源 L8321 シリーズ取扱説明書, 第 Ver.2.1.a 版.
- [21] 鈴木芳生. SPring-8 BL20B2 ユーザーマニュアル. <http://www-bl20.spring8.or.jp/bl20b2/>.
- [22] estar. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>.
- [23] Tsunemi Hiroshi, et al. Detection of X-ray polarization with a charge coupled device. *NIMPA*, Vol. 321, No. 629L, 1992.

-
- [24] Hayashida Kiyosi, et al. Optimization of polarimetry sensitivity for X-ray CCD. *NIMPA*, Vol. 436, No. 96L, 1999.