

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

大阪大学大学院 理学研究科 宇宙地球科学専攻
博士前期課程2年
久留飛 寛之

概 要

X 線は物質を透過する際、光電吸収を受けるだけでなくわずかに位相もずれる。近年、X 線の位相のずれを検出する様々な手法が開発され、生体をはじめとする軽元素を対象にした X 線位相コントラスト撮像が実用化されている。その中で、X 線タルボ効果を利用した干渉計は、急速に開発がすすみ、通常 X 線源と 3 枚の X 線回折格子を用いた X 線タルボロー干渉計は医療分野で実用化されるにいたっている。

本研究は、マイクロフォーカス X 線源とピクセル型 X 線検出器 XRPIX を用いて X 線タルボ干渉計を実現することを目標に開始した。XRPIX は、半導体 SOI(silicon-on-insulator) 技術を用いた SOIPIX 検出器の一種で、各ピクセルに読みだし回路を搭載しているため時間分解能にすぐれ、また信号でトリガー可能という特徴をもつ。通常、X 線タルボ干渉計では、フラックスモードで X 線画像検出器を動作させる。X 線 CCD を用いることで、光子計数モードを実現することも可能であるが、パイルアップを防ぐため X 線強度を低くおさえる必要がある。ところが、XRPIX を使用することでパイルアップ耐性は格段にあがる。

本研究では、XRPIX とそのデータ処理システムを導入し、常温動作、冷却動作で基本性能を測定した。次に $1\mu\text{m}$ の微小焦点をもつマイクロフォーカス X 線源と XRPIX の間に試料を設置するシステムを構築し、もっとも単純な位相コントラスト撮像であるエッジコントラスト撮像に成功した。続いて、この撮像システムに $3\mu\text{m}$ ピッチの $\pi/2$ 位相 X 線回折格子を導入し、X 線タルボ効果による回折格子の自己像を撮像する実験を行った。

この実験結果をふまえた今後の開発の見通しと、研究の過程で発案した天文用途 X 線干渉計（仮称 X 線多重像干渉計）のアイデアに関して紹介する。

目次

第 1 章	序論	6
1.1	X 線イメージング	6
1.1.1	吸収コントラスト法	6
1.1.2	位相コントラスト法	7
1.2	X 線タルボ干渉計	9
1.3	X 線天文学用 CMOS ピクセルセンサー：XRPIX	10
1.3.1	MOSFET[5]	11
	キャリアの反転と閾値電圧	12
	電流電圧特性	13
	バックゲート効果	13
	MOSFET のノイズ	14
第 2 章	X 線タルボ干渉計	15
2.1	Talbot 効果	15
2.1.1	回折格子による Fresnel 回折	15
2.1.2	Talbot 効果	16
2.1.3	球面波による Talbot 効果	17
2.2	Talbot 干渉計	18
2.2.1	物体挿入による自己像の変形	18
2.2.2	X 線 Talbot 干渉計の原理	19
2.2.3	本研究が目指す X 線 Talbot 干渉計	20
第 3 章	X 線検出器 XRPIX	21
3.1	SOI 技術を用いた CMOS センサー：SOIPIX	21
3.1.1	BPW によるバックゲート効果の抑制	21
3.2	X 線天文用 SOIPIX：XRPIX	22
3.3	XRPIX2b の仕様	23
3.3.1	概要	23
3.3.2	ピクセル回路	24
3.3.3	ハードウェア (読み出しボード)	25
3.3.4	ソフトウェア (データ取得プログラム)	26
第 4 章	XRPIX2b 性能評価試験	28
4.1	実験環境	28
4.1.1	電源系	28
4.1.2	真空冷却系	28
4.1.3	X 線源	29

4.2	データ解析プロセス	30
4.3	実験結果	31
4.3.1	エネルギースペクトル	31
4.3.2	ゲインとエネルギー分解能の推定	33
4.3.3	検出部の寄生容量の推定	35
第 5 章	マイクロフォーカス X 線源を用いた撮像試験	36
5.1	マイクロフォーカス X 線源	36
5.1.1	X 線発生原理 [1]	36
5.1.2	本研究で用いたマイクロフォーカス X 線源	39
5.2	X 線撮像システムの構築	40
5.2.1	概要	40
5.2.2	3 軸ステージ	41
5.2.3	除振台	41
5.2.4	焦点寸法と幾何学的半影	42
5.3	X 線エネルギースペクトル	42
5.3.1	パイルアップ	43
5.4	屈折コントラスト撮像	44
5.5	テストチャートを用いた空間分解能評価	45
5.5.1	JIMA チャートの撮像	46
5.5.2	空間分解能の評価	47
5.6	X 線タルボ干渉計の前段階としての撮像試験	54
第 6 章	まとめと今後の展望	57
6.1	まとめ	57
6.2	今後の展望	57
6.2.1	課題と展望	57
6.2.2	X 線天文観測への応用	58

目 次

1.1	X 線に対する鉄とポリスチレンの δ と β の値	7
1.2	屈折コントラスト法の概念図	8
1.3	金魚の X 線画像比較	9
1.4	実用化されている X 線 Talbot-Lau 干渉計	10
1.5	X 線 Talbot-Lau 干渉計による手指の X 線画像	10
1.6	MOSFET(NMOS) の模式図	12
1.7	MOSFET を含む CR 回路図	14
2.1	回折格子の下流での波動場の強さのシミュレーション	17
2.2	X 線 Talbot 干渉計の概念図	19
3.1	SOIPIX の構造	21
3.2	BPW の配置模式図	22
3.3	BPW の有無による MOSFET の特性変化	22
3.4	XRPIX2b のセラミックパッケージ	23
3.5	XRPIX2b 素子の写真	24
3.6	読み出しボードの写真	26
3.7	Frame mode のデータ取得画面	27
4.1	実験装置の概観	29
4.2	CdZnTe 検出器で検出した ^{241}Am のエネルギースペクトル	29
4.3	X 線イベントセレクションの関係図	31
4.4	XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル	32
4.5	XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル (シングルピクセルイベント)	32
4.6	XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル (ダブルピクセルイベント)	32
4.7	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 ^{241}Am スペクトル	33
5.1	マイクロフォーカス X 線源 L8321-01 の全体写真	39
5.2	CdZnTe 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	40
5.3	X 線撮像システムの概略図	40
5.4	自動ステージの写真	41
5.5	焦点の大きさにより生じる幾何学的半影	42
5.6	XRPIX 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	43
5.7	XRPIX で露光時間を長くし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	44
5.8	スチロールコンデンサの可視光の写真	45

5.9 スチロールコンデンサの X 線画像	45
5.10 JIMA チャートの写真と模式図	46
5.11 JIMA チャートのスリット幅の異なるパターンの X 線画像	47
5.12 I_{Max} 、 I_{min} 、 I_{BGD} の定義	48
5.13 $10\mu\text{m}$ のスリットの X 線画像を 5 度回転させた図	49
5.14 回転角とコントラスト値のプロットと二次関数フィッティング	49
5.15 JIMA チャートのスリット幅の異なるパターンの 1 次元プロファイル	50
5.16 波高値の重心解析による X 線入射位置の推定	52
5.17 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ピクセル内での分布	52
5.18 重心解析手法により作成した JIMA チャートのスリット幅の異なるパターンの 1 次元プロファイル	53
5.19 スリット幅とコントラスト値のプロット (コントラスト伝達関数)	54
5.20 通常の解析による回折格子の X 線画像	55
5.21 検出器固有の成分を補正した格子の X 線画像	55
5.22 格子の X 線画像の周期解析	56
5.23 畳みこみの 1 次元プロファイル	56

表 目 次

4.1	^{241}Am の輝線に対するガウシアンフィットの結果	34
4.2	各条件における素子のゲインとエネルギー分解能	35
5.1	JIMA チャートの各スリットのコントラスト値	51
5.2	重心解析手法により求めた JIMA チャートの各スリットのコントラスト値	53

第1章 序論

1.1 X線イメージング

X線イメージングの歴史は1895年、レントゲンが世界初のX線撮像に成功したことからはじまる。それ以来、X線撮像は様々な分野で広く利用されている。X線撮像の大きな特徴は、X線の持つ強い透過力を利用して被写体を破壊することなく内部構造を知ることができることである。この特徴を活かして、たとえば医療分野では骨病変の診断、工業分野では非破壊検査などに利用されている。

X線の撮像方法は被写体によるX線の吸収を利用したものが主流であったが、1996年にWilkinsらがX線の屈折を利用した撮像に成功し、近年X線の屈折、回折、位相を利用した方法が注目を集めている。

1.1.1 吸収コントラスト法

X線が物質に入射し、光子が物質中の原子に吸収される現象を光電吸収といい、レントゲン写真などもこの現象を利用している。X線が光電吸収される確率は透過する物質の原子番号に依存している。

原子番号 Z の物質と振動数 ν のX線が光電吸収を起こす確率を τ とすると、粗い近似で以下の式に従う。

$$\tau \propto \frac{Z^n}{(h\nu)^{3.5}} \quad (1.1)$$

ここで h はプランク定数で、指数 n は光子のエネルギーに依存するがX線領域では4~5の値をとる。

式(1.1)から、エネルギーの低い光子ほど光電吸収を起こしやすいことがわかる。また重要なのは、 τ が吸収物質の原子番号 Z の4~5乗に比例することである。つまり、 Z の大きい重金属などは Z の小さい軽元素に比べてはるかにX線を吸収しやすい。また逆に、金属で簡単に遮蔽できるようなエネルギーの低いX線でも Z の小さい物質ではほとんど吸収されず透過する。

吸収コントラスト法はこの光電吸収の効果を利用した撮像法である。たとえば医療分野の骨病変の診断の場合は、原子番号の大きい骨はX線の吸収率が高く、原子番号の小さい骨周辺の生体軟組織はX線の吸収率が低い。この吸収率の差が、検出器上でX線の強度の濃淡(コントラスト)としてあらわれるのである。こうして骨とその周辺の軟組織とを濃淡で区別することで、診断を可能にしている。しかし原子番号の小さい胃や血管などを撮像する場合は、そのままでは周辺組織と区別することが難しいので、原子番号の大きな造影剤(一般には金属化合物)を投与する必要がある。

このように、吸収コントラスト法を用いれば骨や金属などの原子番号の大きい物質を撮像するの

は容易である。一方、胃などの原子番号の小さい物質の撮像は造影剤が使用できる場合に限られるという欠点がある。

1.1.2 位相コントラスト法

X線とは可視光と同様に電磁波の一種であり、物質を透過する際に位相がずれ、そのずれによってX線は屈折をする。このように位相のずれによるX線の屈折、回折の効果を利用した撮像法が位相コントラスト法である。屈折の効果の原子番号 Z への依存度は小さいので、原子番号の小さい物質の撮像においてもコントラストを検出することは可能である。

一般に波長 λ のX線の屈折率 n は以下のように複素屈折率で表わされる。

$$n = 1 - \delta - i\beta \quad (1.2)$$

ただし

$$\delta = N_a \frac{Z}{A} \cdot \frac{\rho e^2 \lambda^2}{2\pi m_e c^2} \quad (1.3)$$

$$\beta = \frac{\mu \lambda}{4\pi} \quad (1.4)$$

ここで $N_a[\text{mol}^{-1}]$ はアボガドロ定数、 Z は透過物質の原子番号、 A は質量数、 $\rho[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ は密度、 $\mu[\text{cm}^{-1}]$ はX線の線吸収係数を表す。また、 $c[\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$ は光速、 $e[\text{esu}]$ は単位電荷、 $m_e[\text{g}]$ は電子の静止質量である。

式(1.2)で屈折の効果は n の実部 $1 - \delta$ で表わされ、可視光の屈折率に相当する。また吸収の効果は虚部 β で表わされる。図1.1に公開されているデータ[2]より鉄とポリスチレンのX線に対する δ と β の値をそれぞれプロットした。これらの図から軽元素からなるポリスチレンが鉄に比べて、吸収の効果を表す β の値は2,3桁小さいのに対し、屈折の効果に寄与する δ の値はあまり差がないのが分かる。つまり原子番号の小さい物質は原子番号の大きい物質に比べて、X線を吸収しにくいと同程度屈折させるということになる。またこの図から、X線のエネルギーが高いほど吸収よりも屈折の効果が効いてくることが分かる。

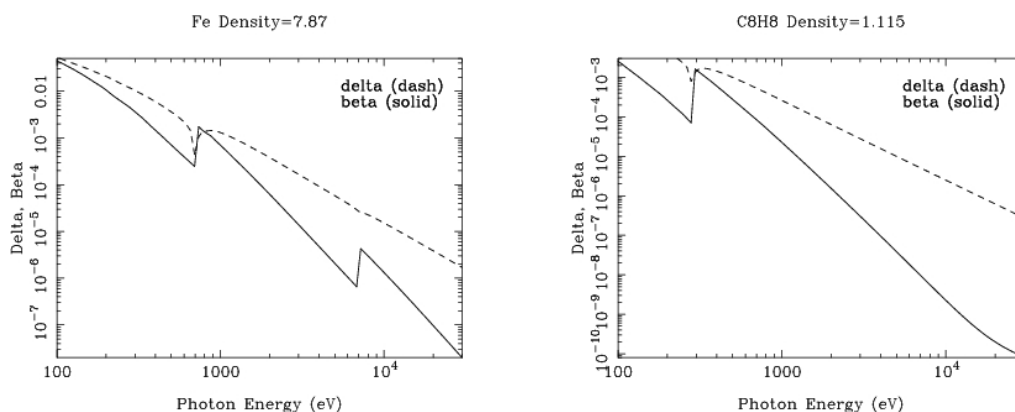


図 1.1: 0.1keV から 30keV までの X 線に対する δ と β の値。左が鉄、右がポリスチレン。([2] より)

X線の屈折において、可視光と大きく異なるのは屈折率が1より小さいことである。これにより、たとえば球状の物体を光が透過する場合、可視光は物体の内側方向に曲げられ焦点で収束するが、X線は逆に物体の外側方向に広がっていく。さらにX線の屈折率は $n \cong 1$ なので屈折角は極めて小さいことが分かる。

屈折コントラスト法はX線の位相のずれによる屈折の効果を利用した撮像法である。図1.2に示すように、被写体の縁のすぐ内側を通るX線は屈折し、縁のすぐ外側を直進するX線と検出器上で重なる。こうして検出器上では、被写体の輪郭部分にコントラストがあらわれる。このように屈折によって被写体の輪郭に明るい縁取りができる効果をエッジ強調効果という。X線の屈折は原子番号の小さな物質でも十分に効果があらわれるので、吸収コントラストのみでは検出が難しい原子番号の小さい被写体でも屈折コントラスト法を用いればその位置と形状を容易に撮像することができる。しかし先ほど述べたようにX線の屈折角は極めて小さいので、コントラストを形成するためには検出器の空間分解能を考慮すると被写体と検出器の距離を十分に離す必要がある。その際、像がボケるのを避けるため、空間的干渉性の高いX線を用いる必要がある。

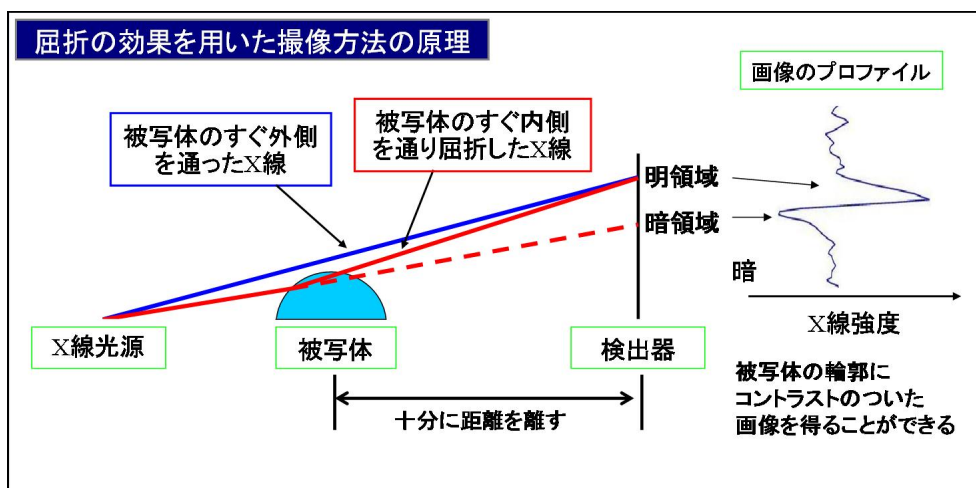


図 1.2: 屈折コントラスト法の概念図 ([1] より)

X線の位相差を利用した撮像法は1960年代から考案、研究されている。1996年にはWilkinsらが、それまで主流となっていたシンクロトロン放射光を用いた撮像システムとは異なる比較的単純な構成の屈折コントラスト撮像法を考案した[3]。彼らは直径 $\sim 20\mu\text{m}$ の焦点をもつX線源と画素サイズ $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ のCCDを用い、焦点から検出器までの距離を十分に離すことで、X線のわずかな屈折を検出できることを示した。この論文でWilkinsらはまずプラスチック板を撮像し、板の端で屈折コントラストによるエッジ強調効果があらわれることを確認した。さらに、金魚の胴体を吸収コントラスト法と屈折コントラスト法の二通りの方法で撮像し、吸収コントラストでは判別の難しい細い脊髄や靱帯を屈折コントラスト法で鮮明に撮像することに成功した(図1.3)。この方式においては、コヒーレントでも単色でもないX線源を使えることが特徴である。しかし、光源と検出器の距離が離れていることによりX線のフラックスが少ないので、露出時間が長くなるという欠点がある。

現在ではWilkinsらの考案した撮像法を応用した装置が工業や医療の分野で実用化されている。本研究においては、後に述べるX線タルボ干渉計として撮像を行う前段階として屈折コントラ

ト撮像を行った。それについては第 5 章で説明する。

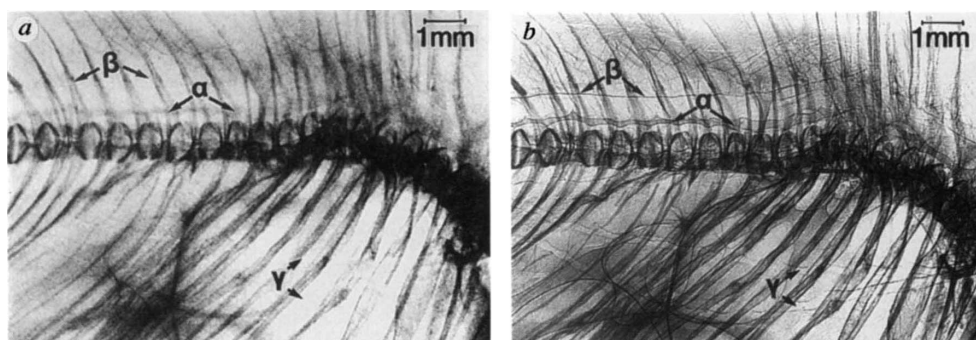


図 1.3: 金魚の吸収コントラスト画像 (左) と屈折コントラスト画像 (右)。図中の α は脊髄、 β は靱帯、 γ は側線管である。

管電圧 60kV、X 線の発光点から被写体までは 300mm、被写体から検出面までは 1mm(左) と 1100mm(右)、露光時間は 2 分 (左) と 110 分 (右) である。([3] より)

1.2 X 線タルボ干渉計

前節で述べたように、X 線の位相差に着目した撮像法は 1960 年代より研究され、シンクロトロン放射光やデジタル X 線画像検出器の発展に伴い 1990 年代より特に発展してきた。X 線の位相シフトに基づくコントラストを生成するためには何らかの光学的工夫が必要であり、1.1.2 で述べた方法もそのひとつである。ここでは透過格子を用いて X 線を干渉させ、X 線の位相シフトを検出し画像を構成する X 線タルボ干渉計を紹介する。[9]

1836 年に W.H.F.Talbot は、位相がそろった光源の光路上に一定条件のスリット間隔をもつ透過格子 (G1) を配置すると、格子の各スリットで回折した球面波が互いに干渉することによって格子から一定の周期で格子と同じパターンの自己像が形成されることを報告した。この現象をタルボ効果という。さてこの G1 格子の前に物体を置くと、物体の透過に伴う位相シフトの影響で自己像は変形するだろう。この自己像が発生する位置にもう一つの透過格子 (G2) を配置し、その背後でモアレ画像 (周期のずれにより視覚的に発生する縞模様) を検出するのがタルボ干渉計である。G2 格子によって発生したモアレの縞模様の「ゆがみ」を検出することによって物体の構造を調べることができる。

Talbot により報告されたのは可視光領域における現象であるが、タルボ効果は X 線領域でも起こり得る。2003 年には、百生らが X 線タルボ干渉計による X 線画像撮影に成功している ([13])。しかし X 線タルボ干渉計においては、X 線の空間的干渉性を考慮すると、シンクロトロン放射光またはマイクロフォーカス X 線管を光源とし、数 μm 周期の透過格子を用意する必要がある。この透過格子を製作する金属加工技術の発展は X 線タルボ干渉計の発展の一因であると言ってい

だろう。ところが X 線タルボ干渉計は光源として、大規模な装置のシンクロトロン放射光か一般的に出力の小さいマイクロフォーカス X 線源を用いる必要があり、特に医療分野などでは実用化に壁がある。そこで一般的に広く使われる X 線源でも機能する X 線タルボ・ロー干渉計が開発された。このような通常の X 線源は焦点が大きく、X 線強度は十分であるがそのまま使用してもタルボ効

果はあらわれない。そこで光源の直後にさらにもう一つ透過格子 (G0) を配置することで、G0 のスリットからは可干渉性をもつ X 線が発せられ仮想的な微小光源が並んだものとみなすことができるというロー効果を利用するのが X 線タルボ・ロー干渉計である。これにより数十秒という露光時間で X 線画像撮影ができるので、医療分野で実用化されている。

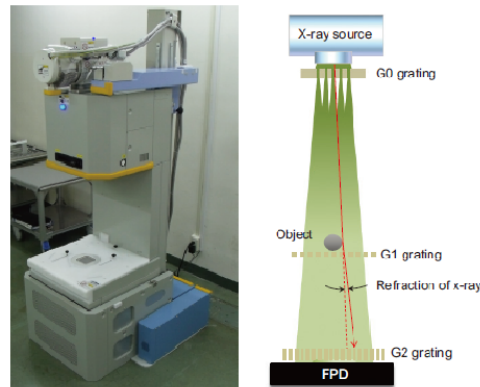


図 1.4: コニカミノルタ製 X 線 Talbot-Lau 干渉計 (縦型)[14]

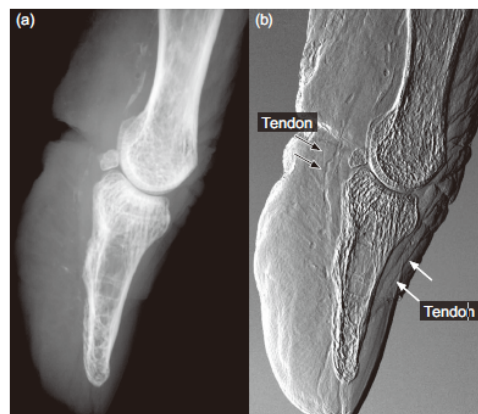


図 1.5: 人体 (手指) の X 線画像 [14]。左 ; X 線吸収画像。右 ; X 線 Talbot-Lau 干渉計による X 線位相コントラスト画像。軟骨表面が検出できている。

本研究ではマイクロフォーカス X 線源を光源として用いるので G0 格子は必要としていない。X 線タルボ干渉計のより詳細な原理については第 2 章で説明する。

1.3 X 線天文学用 CMOS ピクセルセンサー : XRPIX

ここでは本研究で用いた X 線検出器である XRPIX を紹介する。XRPIX とは SOI 技術を用いたピクセル型半導体検出器「SOIPIX」を X 線天文学向けに開発しているものである。

X 線天文学において求められる検出器の性能は (1) 位置分解能 (2) エネルギー分解能 (3) 時間分解能である。現在の X 線観測衛星の主力の一つとなっている CCD 検出器は優れた位置分解能

とエネルギー分解能を備えているが、電荷転送しながら信号を読み出すという構造上、時間分解能に関しては難点がある。これを解決する一つの方法は、各ピクセルに読み出し回路とトリガー機能を備えた CMOS センサーを用いることである。トリガー機能を使って信号が入ってきたピクセルを直後に読み出すことができれば、時間分解能は格段に向上するはずである。

また SOI(Silicon on Insulator) 技術というのは Si ウェハ表面に酸化膜の絶縁層をつくり、さらにその上に別の薄い Si 層 (SOI 層) を形成する技術である。SOI 層につくられた CMOS 回路は各トランジスタが絶縁層により分離されているため、省電力・高速で放射線耐性も高いという利点がある。

この SOI 技術を用いた CMOS 回路 SOI-CMOS は PC やゲーム機器の CPU 等ですでに実用化されているが、通常は使用しない酸化膜下の Si 部を半導体検出器として利用することで、センサー・読み出し回路一体型の放射線用 CMOS センサーを実現したのが SOI PIXel sensor(SOIPIX) である。

2005 年に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) で SOIPIX の研究グループが発足し、2008 年には京都大学宇宙線研究室が主導となり X 線天文学用 SOIPIX である XRPIX の開発がはじまった。大阪大学常深研究室としては 2010 年に XRPIX 研究グループに参加している。ここでは CMOS の基となる半導体技術 MOSFET について述べ、XRPIX のより詳細については第 3 章で説明する。また本研究で行った XRPIX の性能試験については第 4 章で述べる。

1.3.1 MOSFET[5]

MOSFET とは、金属 (Metal)、酸化膜 (Oxide)、半導体 (Semiconductor) からなる電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor) である。電界を発生させ電荷を誘起して電流を制御する。MOSFET は p(もしくは n) 型半導体基盤とそれに注入された二つの n(p) 領域 (ソースとドレイン)、さらに酸化膜上の金属電極 (ゲート) からなる。ゲートの材質にはポリ Si などが使われることもある。ソース・ドレインが n であるものを NMOS、p であるものを PMOS とよぶ。これはキャリアがそれぞれ電子とホールであることに対応している。CMOS(Complementary MOSFET) 回路とは、PMOS と NMOS を相補的に組み合わせて構成する回路のことである。

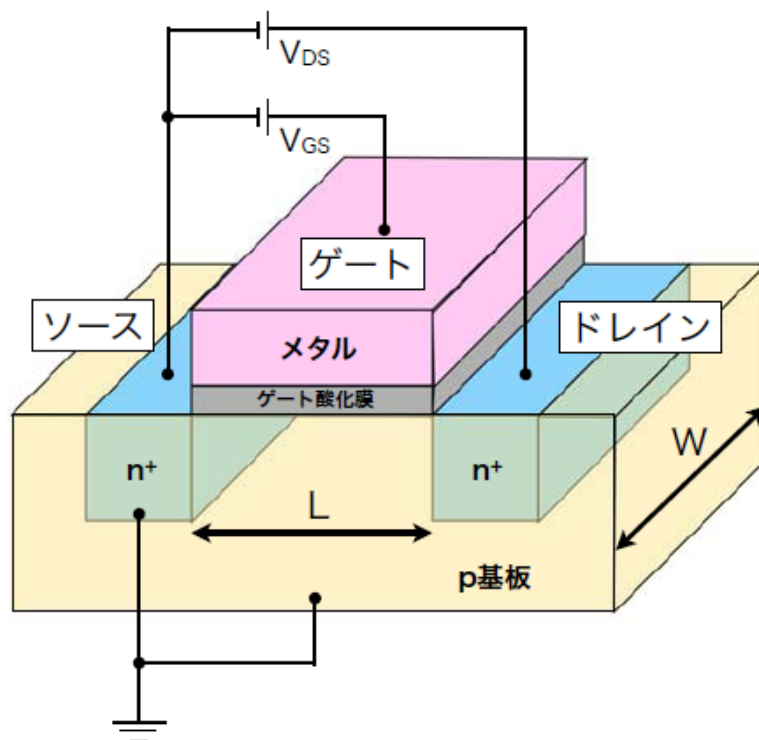


図 1.6: MOSFET(NMOS) の模式図 [5]。n と p を入れ替えると PMOS となり、電圧の極性が逆になる。

キャリアの反転と閾値電圧

ゲートに印加する電圧 V_{GS} によって、酸化膜下の半導体は次の 3 つの状態をとる。(NMOS の場合)

蓄積 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。

空乏 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ない領域が残されており、これを中性領域という

反転 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くなるため、これを反転領域という

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。このため反転領域はチャンネルとよばれる。また、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)の電圧を閾値電圧 V_{th} とよぶ。

このように MOSFET はゲートに加える電圧を調整することで、スイッチのように使用することもできる。

電流電圧特性

MOSFET は印加する電圧によって、電流電圧特性は変化する。各状態について説明する。

空乏状態のとき $V_{GS} < V_{th}$ であるから、チャンネルが形成されず、ソース・ドレイン間に電流はほとんど流れない。しかし、熱運動により、ソースの電子が基盤に形成されているポテンシャルをこえてドレイン側に流れだすことがある。このときの電流 I_{DS} はボルツマン分布で近似できて、

$$I_{DS} \approx I_0 \exp\left(\frac{V_{GS} - V_{th}}{k_B T / e}\right) \quad (1.5)$$

とかける。 I_0 は $V_{GS} = V_{th}$ のときの電流値、 e は電気素量、 k_B はボルツマン定数、 T は温度である。

反転状態のとき チャンネルが形成されて、 V_{DS} を与えると電流が流れるようになる。このとき V_{DS} の大きさによってさらにリニア領域と飽和領域の二つに分けられる。

(a) リニア領域 V_{DS} が小さい ($V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$) とき、チャンネルはソースからドレインまでつながっている。このとき流れる電流値は近似的に

$$I_{DS} \cong \frac{W}{L} \mu C_{OX} (V_{GS} - V_{th}) V_{DS} \quad (1.6)$$

とかけて、 V_{DS} に比例するため、リニア領域とよばれる。 μ は電子 (または正孔) の移動度、 C_{OX} は単位面積当たりのゲート容量である。

(b) 飽和領域 V_{DS} を大きくしていくとドレイン側の反転領域が薄くなっていき、 $V_{DS} = V_{GS} - V_{th}$ のとき厚さが0となる。この点をピンチオフ点という。ピンチオフ点での電圧は V_{DS} をあげてもほぼ一定の値をとるため、 I_D は V_{DS} によらず、近似的に以下の式で表わされる。

$$I_{DS} \cong \frac{W}{2L} \mu C_{OX} (V_{GS} - V_{th})^2 \quad (1.7)$$

したがって、 $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$ のとき I_D は V_{GS} のみに依存し、飽和領域とよぶ。アナログ回路はこの領域で動作させる。

バックゲート効果

多くの場合、MOSFET のソースと基板は接続されているので同電位になる。しかし、ソース・基板間に電圧が加わると、MOSFET の閾値電圧 V_{th} が変化してしまう。たとえば NMOS の場合、ソースに対して基板に負の電圧をかけると、空乏層境界面の電荷 Q_{dep} が増加し、 V_{th} が上昇する。これをバックゲート効果とよぶ。MOSFET を正常に動作させるためには、バックゲート効果に留意する必要がある。

MOSFET のノイズ

MOSFET で発生するノイズは、熱ノイズとフリッカ (1/f) ノイズの 2 種類に大別できる。低周波数領域ではフリッカノイズが、高周波数領域では熱ノイズが支配的となる。

熱ノイズ 電子のランダムな熱運動により導体中に電圧の変動が誘起される。これを熱ノイズという。抵抗 R があるとき、単位周波数あたりの熱ノイズのパワーは $V^2 = 4k_B T R [\text{V}^2/\text{Hz}]$ と表われ、周波数に依存しない。このような周波数に依存しないノイズをまとめて white noise と呼ぶ。MOSFET も抵抗 R とみなすことができるので熱ノイズが発生する。

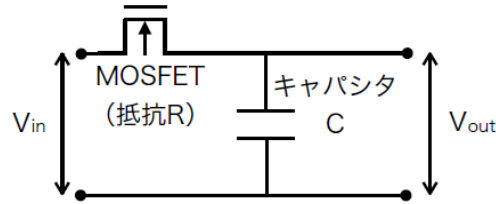


図 1.7: MOSFET を含む CR 回路図 [5]。

ここで MOSFET とキャパシタが並列に接続されている回路 (図 1.7) について V_{out} で観測される熱ノイズを考える。RC 回路とみなせるのでローパスフィルタとして働き、その周波数特性は、

$$\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f C R)^2}} \quad (1.8)$$

とかける。したがって、熱ノイズを全周波数で積分したパワーは

$$P_{noise} = \int_0^\infty 4k_B T R \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f C R)^2}} \right)^2 df = \frac{k_B T}{C} [\text{V}^2] \quad (1.9)$$

となる。これから、抵抗値 (MOSFET の特性) によらず温度とキャパシタの容量だけでノイズのパワーが決まることが分かる。このノイズは kT/C ノイズと呼ばれる。抵抗値に依らないのは、 R が大きくなると熱ノイズが大きくなる一方で RC 回路による周波数フィルタが狭くなるためである。また XRPIX 内では MOSFET をスイッチとして機能させている部分があり、ON/OFF の切り替え時に kT/C ノイズが問題となるためリセットノイズとも呼んでいる。

フリッカノイズ MOSFET の基板と酸化膜の境界面では、シリコン結晶と酸化膜結晶の格子定数の違いから Si 原子が格子を作れず未結合ボンド (ダングリングボンド) が発生する。この未結合ボンドがチャンネル内の電子を捕捉または放出するため、ドレイン電流がランダムで減少または増加する。これをフリッカノイズという。単位周波数あたりのフリッカノイズのパワーは

$$\Delta V_f^2 = \frac{K}{C_{ox} W L} \times \frac{1}{f} [\text{V}^2/\text{Hz}] \quad (1.10)$$

とかける。 K は製造プロセスに依存する量で、NMOS は PMOS より約 3 倍大きいことが知られている。これは、PMOS においてはシリコンと酸化膜の境界面から少し離れたところでホールが移動するためである。フリッカノイズは周波数に反比例するので、1/f ノイズとも呼ばれる。

第2章 X線タルボ干渉計

ここでは1.2で述べたX線タルボ干渉計の原理と、本研究が目指すX線タルボ干渉計の概要について説明する。この章では[8][11][12]を多く参照した。

2.1 Talbot 効果

Talbot 効果とは、光の波長を λ 、回折格子の周期を d としたとき、光が回折格子を透過した後 $2md^2/\lambda$ だけ離れた位置で回折格子と同じパターンを形成する現象である。

2.1.1 回折格子による Fresnel 回折

z 方向に伝播してきた波長 λ の単色平面波が周期 $d(\gg \lambda)$ の回折格子に入射したときの、回折格子による Fresnel 回折を考える。回折格子の周期方向を x 軸、光軸方向を z 軸とする。

回折格子の振幅透過率を $T(x)$ とすると、この単色平面波が回折格子を透過した後、距離 z だけ伝播したときの複素振幅分布 $E(x, y, z)$ は

$$E(x, z) = \frac{1}{\sqrt{i\lambda z}} \int T(x') \exp\left(\frac{i\pi}{\lambda z}(x - x')^2\right) dx' \quad (2.1)$$

と表わされる Fresnel 回折積分を解くことによって求めることができる。回折格子が x 方向に周期的である場合、振幅透過率 $T(x)$ は

$$T(x) = \sum_n a_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \quad (2.2)$$

という Fourier 級数展開で表わされる。 a_n は回折格子の透過関数の n 次の Fourier 係数である。この式を用いると式 (2.1) は解析的に解けて

$$E(x, z) = \sum_n a_n \exp\left(-i\pi\lambda \frac{n^2}{d^2}z\right) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \quad (2.3)$$

となる。式 (2.3) において、 $a_n \exp(-i\pi\lambda n^2/d^2)$ をまとめて Fourier 係数とみなすと、この式は光の複素振幅分布の Fourier 係数が伝播によって変化していくことを表している。また回折格子から z だけ伝播したときの強度分布は

$$\begin{aligned} I(x, z) &= |E(x, z)|^2 \\ &= \sum_n b_n(z) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

となる。ここで

$$b_n(z) = \sum_{n'} a_{n'+n} a_{n'}^* \exp\left(-i\pi\lambda \frac{(n' + n)^2 - n'^2}{d^2}z\right) \quad (2.5)$$

であり、 $b_n(z)$ は強度分布の n 次の Fourier 係数となっている。

2.1.2 Talbot 効果

式 (2.3) において

$$z = p \frac{d^2}{\lambda} \quad (2.6)$$

である場合について考える。 p は Talbot 次数と呼ばれる。 p が偶数の場合、式 (2.3) は

$$\begin{aligned} E\left(x, p \frac{d^2}{\lambda}\right) &= \sum_n a_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \\ &= T(x) \end{aligned} \quad (2.7)$$

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。また $p = 2$ のときの $z = z_T$ は特に Talbot 距離という。

p が奇数の場合、式 (2.3) は

$$\begin{aligned} E\left(x, p \frac{d^2}{\lambda}\right) &= \sum_n a_n \exp(-i\pi n^2) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \\ &= \sum_n a_n \exp(i\pi n) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \\ &= \sum_n a_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}\left(x + \frac{d}{2}\right)\right) \\ &= T\left(x + \frac{d}{2}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

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 効果というので、Talbot 効果は回折格子からの距離が

$$z = p \frac{d^2}{\lambda} (p = 1, 2, \dots) \quad (2.9)$$

の面で起こることがわかる。

回折格子として、開口比が 1:1、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

$$I_R\left(x, p \frac{d^2}{\lambda}\right) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left(2\pi \frac{2n+1}{d}x\right) \quad (2.10)$$

となる。

以上のように、回折格子から $z = pd^2/\lambda$ だけ離れた位置で Talbot 効果が生じることがわかったが、実際には多少ずれた位置でも 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、 $z = (p - 1/2)d^2/\lambda$ 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。

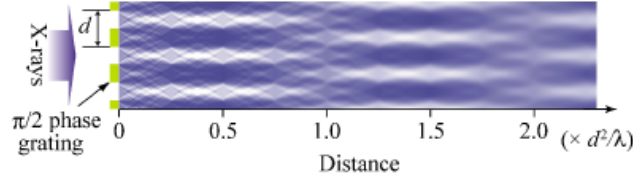


図 2.1: 回折格子の下流での波動場の強さのシミュレーション [8]。 $\pi/2$ 位相格子について平行光を照射したときの格子の下流での波動場の強さを再現している。

なお Talbot 効果が生じる条件として、格子に入射する光の空間的可干渉距離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 a とすると、空間的可干渉距離はおおよそ $\lambda R/a$ で与えられる。

2.1.3 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

$$E(r) = \frac{1}{r} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} r\right) \quad (2.11)$$

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

$$E(x, y, R) \cong \frac{1}{R} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} R\right) \exp\left(i\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda R}\right) \quad (2.12)$$

とかける。回折格子透過直後の複素振幅分布は、回折格子の透過関数 $T(x)$ と $E(x, y, R)$ 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

$$\begin{aligned} E(x, y, R+z) &= \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z\right) \iint T(x') E(x', y', R) \exp\left(i\pi \frac{(x-x')^2}{\lambda z}\right) dx' dy' \\ &= \frac{1}{\sqrt{i\lambda R z (R+z)}} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} (R+z)\right) \int T(x') \exp\left(i\pi \frac{x'^2}{\lambda R}\right) \exp\left(i\pi \frac{(x-x')^2}{\lambda z}\right) dx' \end{aligned} \quad (2.13)$$

となる。透過関数 $T(x)$ は式 (2.2) のように書けるので、式 (2.13) は解析的に解けて

$$E(x, z) = \frac{1}{R+z} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} (R+z)\right) \sum_n a_n \exp\left(-i\pi \lambda \frac{n^2}{d^2} \frac{Rz}{R+z}\right) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d} \frac{R}{R+z} x\right) \quad (2.14)$$

となり、強度分布は

$$I(x, z) = |E(x, z)|^2 = \frac{1}{(R+z)^2} \sum_n b_n \left(\frac{Rz}{R+z}\right) \exp\left(i2\pi \frac{n}{d} \frac{R}{R+z} x\right) \quad (2.15)$$

となる。式 (2.14) より、平面波の場合と同様に考えると

$$z = z_p = \frac{pd^2}{\lambda} \frac{R}{R - \frac{pd^2}{\lambda}} \quad (p = 1, 2, \dots) \quad (2.16)$$

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

$$E(x, z_p) \propto \sum_n a_n \exp \left(i2\pi \frac{nx}{(1 + z_p/R)d} \right) \quad (2.17)$$

であり、自己像の周期は回折格子の周期 d の $1 + z_p/R$ 倍に拡大される。

2.2 Talbot 干渉計

Talbot 干渉計とは Talbot 効果により自己像が生じる位置にもう一枚の回折格子を置くことによりモアレ縞を発生させ、被写体を挿入したときのモアレ縞の変形から被写体の微分位相を求めるものである。

2.2.1 物体挿入による自己像の変形

1 枚目の回折格子の上流に物体を挿入した場合について考える。物体による位相変化を $\Phi(x, y)$ とすると、観測面上の点 $P(x, y, z)$ における n 次回折光は $\Phi(x - n\lambda z/d, y)$ だけ位相が変化している。このとき、観測面上での複素振幅分布は

$$E(x, y, z) = \sum_n a_n \exp \left(-i\pi\lambda \frac{n^2}{d^2} z \right) \exp \left(i \left(2\pi \frac{n}{d} x + \Phi \left(x - \frac{n\lambda}{d} z, y \right) \right) \right) \quad (2.18)$$

となる。 $\Phi(x, y)$ の変化が緩やかであると仮定すると、 $x = n\lambda z/d$ の近傍において

$$\begin{aligned} \Phi \left(x - \frac{n\lambda}{d} z, y \right) &\cong \Phi(x, y) - \frac{n\lambda}{d} z \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \\ &= \Phi(x, y) - 2\pi \frac{n}{d} z \phi_x(x, y) \end{aligned} \quad (2.19)$$

とテイラー展開できる。ただし $n\lambda z/d$ は十分小さいとし、2 次以上の項は無視できるとする近似を用いた。ここで $\phi(x, y)$ は物体透過後の x 方向の屈折角分布を表し

$$\phi_x(x, y) = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \quad (2.20)$$

である。式 (2.18) と式 (2.19) より、観測面上での強度分布は

$$I(x, y, z) = |E(x, y, z)|^2 = \sum_n b_n(z) \exp \left(i2\pi \frac{n}{d} (x - z\phi_x(x, y)) \right) \quad (2.21)$$

となり位相シフト量の x 方向の 1 階微分に比例した分だけ元の自己像の強度分布より位相が変化していることがわかる。式 (2.4) の物体を挿入しない場合と比べると、観測面上で像が x 方向に $z\phi_x(x, y)$ だけ平行移動したものとなっている。これは X 線が物体を透過することにより波面が屈折した分だけ像が変位したことを表している。ただし、式 (2.19) において $n\lambda z/d$ が十分に小さいという仮定をしているために空間分解能は回折格子の周期長程度に制限される。

2.2.2 X 線 Talbot 干渉計の原理

2.2.1 で述べたような自己像の変化をそのまま解像するには、自己像の周期長よりも十分に小さい空間分解能をもつ検出器が必要となる。一般に回折格子の周期は数 μm のものを用いるので、検出器にはサブ μm オーダーの空間分解能が求められる。しかし X 線 Talbot 干渉計では自己像のできる位置にもう一枚回折格子を置くことでモアレ縞を発生させるので、検出器に要求されるのはモアレ縞より小さい空間分解能でよく、これは容易に実現可能である。

2.2.1 のように第 1 格子の上流に物体が挿入されている場合を考える。第 2 格子の振幅透過率 $T_a(x)$ を

$$T_a(x) = \sum_n c_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}x\right) \quad (2.22)$$

とすると、最終的に得られるモアレ画像の強度分布は

$$I(x, y, z) = \sum_n b_{-n}(z) c_n \exp\left(i2\pi \frac{n}{d}z\phi_x(x, y)\right) \quad (2.23)$$

で与えられる。 $z = z_T$ に第 2 格子を置くのが理想的であるが、その位置から多少ずれてもモアレ縞は十分に観察できる。

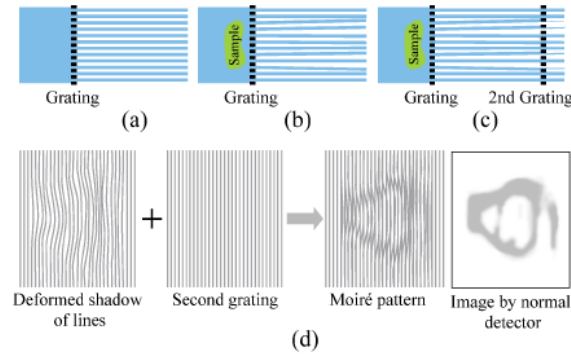


図 2.2: X 線 Talbot 干渉計の概念図 [8]。物体により位相がずれ歪んだ第 1 格子の像を第 2 格子を通してモアレ画像として検出する。

以上のようにしてモアレ縞の強度分布が得られたが、そこから試料の情報をもつ $\phi_x(x, y)$ を決定する必要がある。その方法としては、縞走査法とフーリエ変換法がある。縞走査法は、格子のどちらか一方を x 軸方向に並進させ、複数のモアレ画像から $\phi_x(x, y)$ を決定する方法である。取得するモアレ画像は少なくとも 3 枚以上あればよく、数が多ければ誤差を軽減できる。また試料を回転させてこの計測を繰り返すことで X 線位相 CT が可能となり、試料の内部も含めた 3 次元構造を再構成することができる。

フーリエ変換法は 1 枚の画像から微分位相像を取得できる。格子の一方を z 軸周りに回転させて回転モアレと呼ばれるモアレ縞を生成し、その画像をフーリエ変換することで $\phi_x(x, y)$ を得る。こちらの方法でも試料を回転して複数の投影方向から計測を繰り返せば、X 線位相 CT 画像を得ることができる。一般にフーリエ変換法は縞走査法に比べ撮影回数が少なく済むので、速い撮影に適している。一方、空間分解能を重視するときは縞走査法が用いられる。

ところで、X 線 Talbot 干渉計の第 2 格子は原理的に振幅格子でなければならないが、透過力の

高い X 線に対して機能する振幅格子の製作は容易ではない。すなわち、数十 μm 以上の十分な厚さをもつ膜にスリット構造を形成する必要がある一方で、空間的干渉性を考慮すると格子の周期長は数 μm でなければならない。つまり非常にアスペクト比の高いスリット構造が要求される。第 1 格子は位相格子もしくは振幅格子のどちらも使用することができ、アスペクト比も低くてよいので製作は第 2 格子よりは容易である。

2.2.3 本研究が目指す X 線 Talbot 干渉計

一般的な X 線 Talbot 干渉計の構成は、シンクロトロン放射光またはマイクロフォーカス X 線源を光源とし、2 枚の回折格子と X 線検出器を用いるものである。光源に平行性や単色性は必ずしも必要ではなく、検出器に要求される空間分解能は高くなくてよい。さらに高い機械的安定性も必要ではなく、単純な光学系で構成できるという利点がある。さらにもう一枚回折格子を用いることで通常の X 線源も使用可能となる X 線 Talbot・Lau 干渉計にも発展できる。

本研究の目指す X 線 Talbot 干渉計は一般的なものとは若干異なる。光源には焦点直径 $1\mu\text{m}$ のマイクロフォーカス X 線源を使用し、検出器には X 線天文用に開発されている XRPIX を用いる。マイクロフォーカス X 線源は点光源とみなせるので、2.1.3 で述べたように球面波による Talbot 効果で生じる回折格子の自己像は周期が拡大される。つまり、拡大率を調節すればピクセルサイズ $30\mu\text{m}$ の XRPIX でもモアレ縞を十分観察できるので、製作が難しい第 2 格子は必要ではない。また XRPIX を使用することで、CCD 等に比べて格段に速い読み出し速度で X 線光子の入射位置とエネルギーを測定できるため、X 線源の強度を強く設定できるという利点がある。

第3章 X線検出器 XRPIX

ここでは SOIPIX の特徴と、本研究で使用した XRPIX 素子の基本的な仕様等について説明する。この章は [4][5][6] を参照した。

3.1 SOI技術を用いた CMOS センサー：SOIPIX

SOIPIX とは先にも述べたように、Silicon On Insulator(SOI) 技術を用いた CMOS ピクセルセンサー (PIXel sensor) である。SOI 技術とは Si ウェハ上に酸化膜 (SiO_2) をつくり、その上に別の Si 薄膜 (SOI 層) をつくる技術であり、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 X 線検出部として利用し、抵抗率の低い SOI 層に CMOS 回路を搭載し読み出し部として利用することで検出・読み出し一体型の検出器として利用できることである (図 3.1)。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。

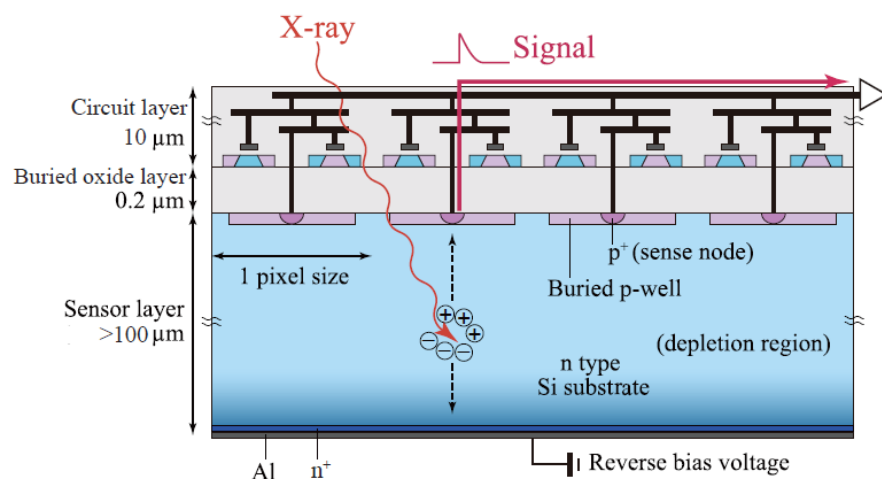


図 3.1: SOIPIX の構造 [4]

3.1.1 BPW によるバックゲート効果の抑制

SOIPIX はセンサー層を空乏化させるために基板に高いバックバイアス電圧を印加する必要があるため、1.3.1 で述べたバックゲート効果が無視できない。そこで SOIPIX では CMOS 回路の直下

のセンサー層の部分に Buried P-Well(BPW) と呼ばれる薄い p 層を形成している。BPW の電位を一定に固定することでバックゲート効果を抑制している。図 3.3 に BPW の有無による MOSFET の特性の変化を示す。BPW が無い場合は、MOSFET の電流電圧特性が変化していることが分かる。

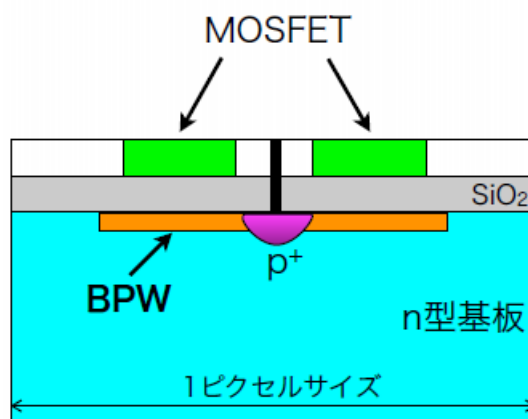


図 3.2: BPW の配置構造の模式図 [5]

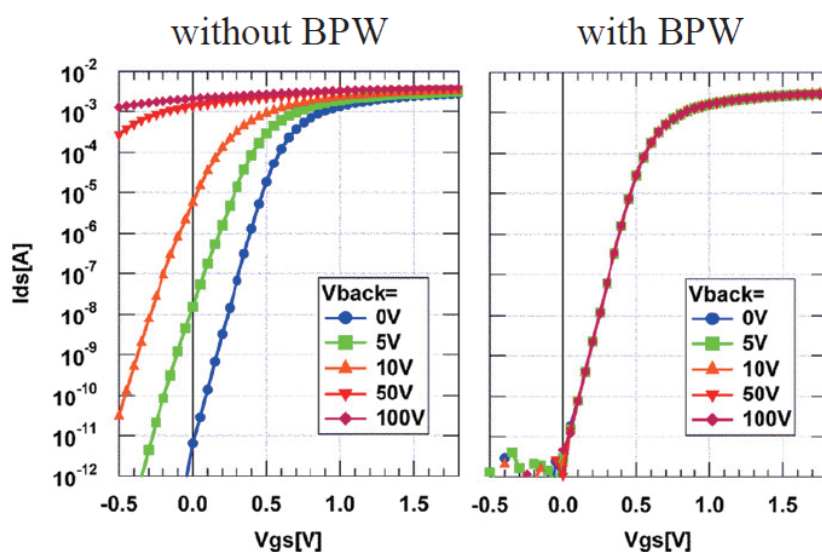


図 3.3: BPW の有無による MOSFET(NMOS) の電流電圧特性変化 [4]。左は BPW なし、右は BPW あり。横軸はゲート・ソース間電圧で、縦軸はドレイン・ソース間電流。

3.2 X 線天文用 SOIPIX : XRPIX

SOIPIX が CCD に変わる次世代の X 線天文学用撮像分光器として性能面と消費電力や放射線耐性などの特徴面から見てもその要求に合致しうるのは先にも述べた。2005 年に高エネルギー

加速器研究機構 (KEK) で発足した SOIPIX 研究グループは 2008 年には京都大学宇宙線研究室が参加し、高エネルギー実験用 SOIPIX である INTPIX2、INTPIX3 を用いて SOIPIX が X 線を撮像分光できることを確かめた。その後、京都大学が主導となり初の X 線天文学用 SOIPIX である XRPIX1 を完成させ、実用化に向けいろいろなタイプの XRPIX シリーズが開発・研究されている。大阪大学常深研究室は 2010 年に XRPIX 研究グループに参加している。今研究で用いたのは XRPIX2b という素子でそれ以前のシリーズよりも撮像面積が大きく動作実績があることから採用した。以下で XRPIX2b の基本的な仕様と動作に必要なハードウェア・ソフトウェアについて説明する。

3.3 XRPIX2b の仕様

3.3.1 概要

XRPIX2b は XRPIX シリーズ 4 番目の素子であり、2012 年に完成した。前作までと同様にイベント検出のタイミングと位置情報を出力するトリガー情報出力機能を搭載しており、今後の大面積化を進める上での性能評価のため撮像面積が多少大きくなっている。素子は 176 ピンのセラミックパッケージに搭載され、ワイヤーボンディングされている。素子のサイズは 6.0mm 角、一つのピクセルは $30.0\mu\text{m}$ 角で全部で 152×152 個のピクセルがある。ただし周辺回路側の 8 ピクセルはダミーピクセルとなっており、実際の有効ピクセルは $144\times 144 (=20,736)$ 個で有効撮像面積は 4.3mm 角である。センサー層のウェハは Si の結晶生成法の違う二種類があり、Czochralski 法を用いた CZ ウェハ (抵抗率 $1.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) と、Floating zone 法を用いた FZ ウェハ (抵抗率 $5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) がある。CZ ウェハによりプロセスされた素子を XRPIX2b-CZ、FZ ウェハによるものを XRPIX2b-FZ と表記する。センサー層の厚みは XRPIX2b-CZ が $250\mu\text{m}$ 、XRPIX2b-FZ が $500\mu\text{m}$ である。

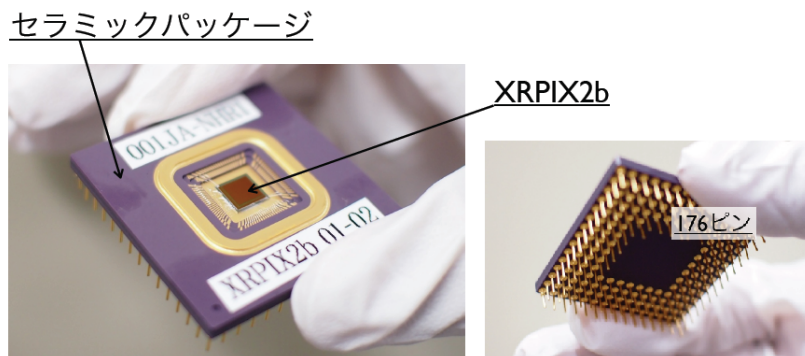


図 3.4: XRPIX2b のセラミックパッケージ写真 [6]

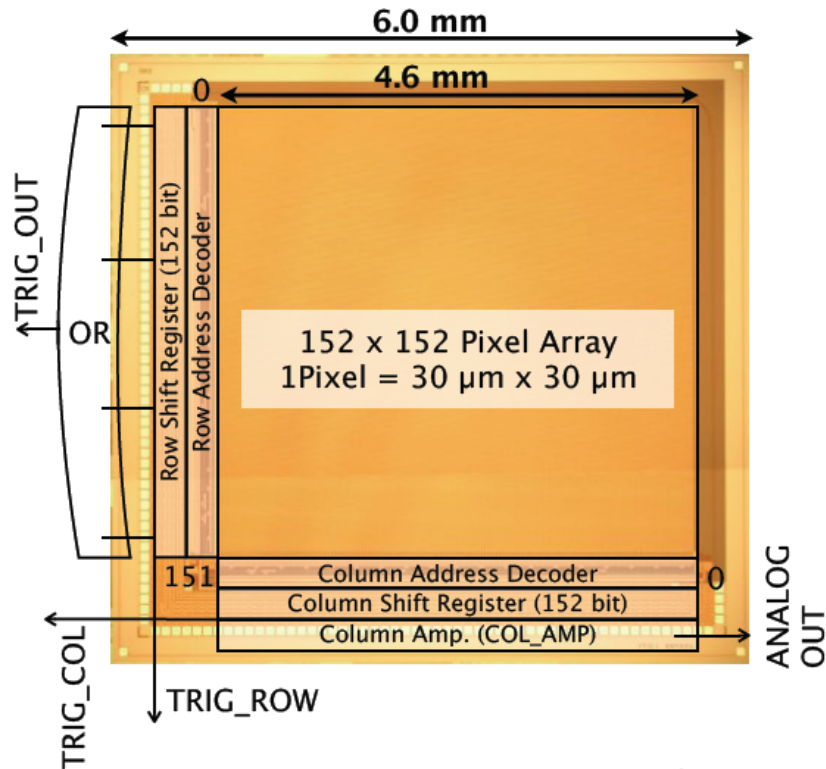


図 3.5: XRPIX2b 素子の写真と簡易ブロック図 [6]

3.3.2 ピクセル回路

XRPIX2b のピクセル回路について説明する。ピクセル回路は大きく分けて、ノイズ低減のための CDS(Correlated Double Sampling) 機能をもつ部分と、X 線の入射判定を行うトリガー機能をもつ部分がある。

CDS 読み出し回路 X 線を検出するには、X 線とセンサー部との相互作用により発生した電荷を集積して読み出した後溜まった電荷をリセットするという動作を繰り返すことになるが、リセットする際にセンサー部分に $k T/C$ ノイズ (リセットノイズ) が発生する。ゲインを大きくするためにはセンサー部の容量を小さくする必要があるが、そうすると式 (1.9) よりリセットノイズは大きくなってしまいます。そこでセンサー部の容量は小さくしたまま、リセットノイズを低減させるために考案されたのが CDS 機能である。CDS 機能は、CDS キャパシタを用いることでセンサー部の容量に依存するノイズをキャンセルし、読み出す信号には CDS キャパシタの容量に依存するノイズのみを残すというものである。これによりセンサー部の容量よりも十分大きな容量の CDS キャパシタを用いることで信号へのリセットノイズを軽減させることができる。XRPIX2b ではセンサー部容量が 22fF に対し、CDS キャパシタの容量が 240fF であるのでリセットノイズを～10% に低減できる。

トリガー機能 X 線がいつどこに入射したかを検出するためには、X 線が入射したピクセルの位置情報を出力するトリガー機能が必要となる。トリガー信号は、ヒットタイミング信号とヒット

パターン信号の二種類からなる。ヒットタイミング信号は、各ピクセルで閾値電圧を超えたかどうか判定し、すべてのピクセルで論理和をとり外部に出力する。つまりどれか一つのピクセルがヒットすると出力される。ヒットパターン信号はどのピクセルでヒットしたか、行と列の位置の射影情報をそれぞれ出力する。このトリガー機能は各ピクセル内で、二つの反転増幅器 (インバーターチョッパ型コンパレータ) で構成されている。

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

3.3.3 ハードウェア (読み出しボード)

XRPIX2b 素子の動作制御とデータの出力には読み出しボードを用いる。読み出しボードは XRPIX シリーズの汎用読み出しボード SEABAS(Soipix EvAluation BoArd with Sitcp) と素子に合わせて設計された Sub board に分かれる。また本研究では後述の真空チャンバを用いるための 2 枚の変換基板 INSIDE/OUTSIDE board を製作した。

SEABAS SEABAS には、素子制御用の User FPGA とネットワークでのデータ転送用の SiTCP FPGA が搭載されている。使用する素子に合わせて User FPGA でデジタル回路を組みかえることで各制御が行える。SiTCP FPGA は User FPGA で出力された信号を Ethernet を通して転送できる形式に変換するものである。SEABAS と PC を LAN ケーブルで接続することで簡単にデータのやり取りができる。

また SEABAS には DAC と ADC が搭載されており、各信号のデジタルーアナログ (アナログーデジタル) 変換を行っている。ADC の分解能は $1\text{V}/12\text{bit}$ であり、1 ADU(Analog to Digital Unit) の幅は $244\mu\text{V}$ である。また DAC の分解能は $3.3\text{V}/12\text{bit}$ である。

Sub board Sub board には素子を装着するソケット、SEABAS に接続するための端子 (Mezzanine コネクタ 64pin \times 3) などがあり、SEABAS(FPGA) と素子との間で信号をつなぐ役割を果たしている。また Sub board には素子に印加するバックバイアス電圧を供給するための入出力端子も搭載されている。

変換基板 INSIDE/OUTSIDE 本研究では、後にも述べるが XRPIX2b 素子を真空中において実験を行うために真空チャンバを使用した。真空槽内部の物理的な大きさの制限と、真空槽内外を繋ぐ端子 (D-sub コネクタ 25pin \times 4) の都合上、SEABAS と Sub board をそのまま真空槽内部に設置することはできない。そこで、Mezzanine コネクタと D-sub コネクタを搭載した 2 枚の基板 INSIDE と OUTSIDE を製作し、それぞれ真空槽内部では Sub board と INSIDE を接続、真空槽外部では SEABAS と OUTSIDE を接続して D-sub ケーブルを用いることで真空槽の内外を中継できるようにした。

基板内の回路は Mezzanine コネクタと D-sub コネクタのピンを結線してあるだけの単純なものであるが、デジタル信号用のデジタル GND とアナログ信号用のアナログ GND がそれぞれあり、

この2つの GND は基板上で任意に接続することができる。また今回製作した2枚の変換基板はピンの数の都合上、XRPIX2b/3/3b まで対応できるようデザインしてある。

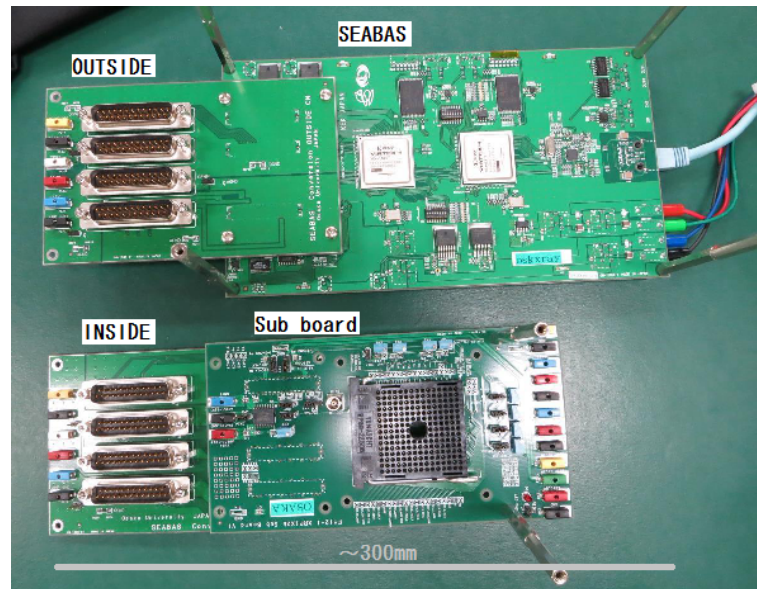


図 3.6: 読み出しボードの写真

3.3.4 ソフトウェア (データ取得プログラム)

XRPIX2b を用いたデータ取得は User FPGA により 2 つのモードが用意されている。全ピクセルを 1 フレームとして読み出しを行う Frame mode(フレーム読み出し) と、X 線入射判定のあったピクセルのみを読み出す Event-driven mode(イベント駆動読み出し) である。どちらのモードも cern の ROOT ライブラリを用いたソフトウェアであり、Ethernet を通じて SEABAS と通信するようになっている。制御信号を設定するとともに出力されたデータをファイルに格納する役割がある。本研究では主に Frame mode を使用してデータ取得をしている。

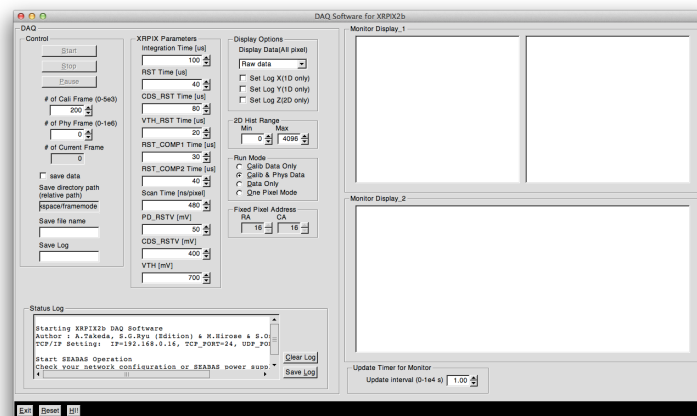


図 3.7: Frame mode のデータ取得画面。GUI ベースとなっており、画面上でパラメータの変更やリアルタイムでのデータを見ることができる。

第4章 XRPIX2b 性能評価試験

本研究ではまず、XRPIX2b 素子の基礎特性を測定する試験を行った。真空中において、温度と印加するバックバイアス電圧を変えて X 線を照射し、素子のゲインとエネルギー分解能等を測定した。

4.1 実験環境

本実験は XRPIX2 b-FZ 素子を Frame mode で動作させデータを取得した。周辺の機器等について各部分の詳細を説明する。

4.1.1 電源系

回路への電源供給にはトランジスタ電源 PW18-1.3AT(KENWOOD) を使用した。また素子へのバックバイアス用として、2400 ソースメーター (KEITHLEY) を使用した。このソースメーターは、素子に流れる電流を 0.01nA の精度で計測することができる。

4.1.2 真空冷却系

真空槽はもともと X 線 CCD 用に製作 (堀口鉄工所) されたものを使用した。そこにロータリーポンプ TSH071(PFEIFFER) とターボ分子ポンプ TMH071P(PFEIFFER) を接続しており、実験を行った -40 °C における飽和水蒸気圧 1.35×10^{-1} Torr を十分に下回る真空度 ($\sim 10^{-6}$ Torr) を達成する。また真空槽の蓋には X 線照射用に 200 μ m 厚のアルミニウムの窓が設置されている。

冷却には He コンプレッサー SRS2110(住友重機械) を使用し、コールドヘッドの先からアルミ板で挟んだ編組線を介して素子を冷却するためのコールドプレートに接続している。コンプレッサーへの電力供給は PCR500M(菊水電子工業) を用いて、電圧を変えることで温度を調節した。コールドプレートは 5mm 厚の銅を加工して製作し、素子のセラミックパッケージに接している。また密着度を高くし熱伝導をよくするために、コールドヘッドから素子まですべてのパーツの間に薄いインジウム板を挟んでいる。またコールドプレートとコールドヘッドには測温計 (Pt1000) が取り付けられており、マルチメーター 34401A(Hewlett Packard) を用いて測定した。

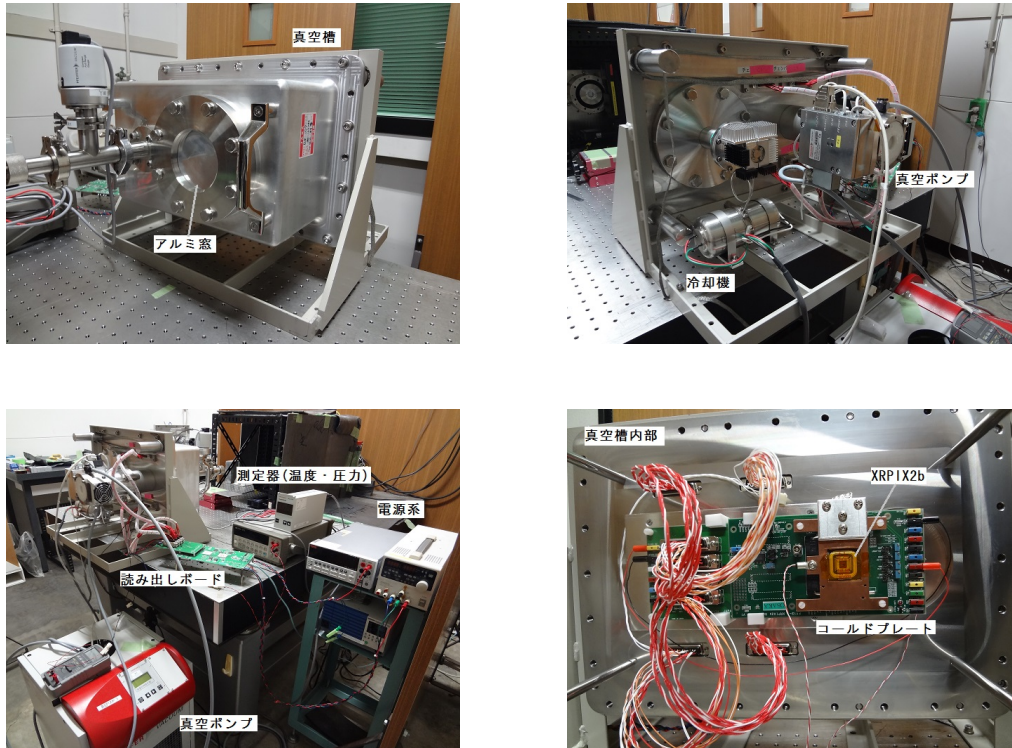


図 4.1: 実験装置の概観

4.1.3 X 線源

X 線源として ^{241}Am を用いた。CdZnTe 検出器 XRT-100T-CZT(Amptek) を用いて検出した X 線スペクトルを図に示す。CdZnTe 検出器は、原子番号の大きいカドミウム ($Z=48$)、亜鉛 ($Z=30$)、テルル ($Z=52$) を用いているため硬 X 線領域まで高い検出効率をもつ半導体検出器である。XRT-100T-CZT の場合、厚さ $250\mu\text{m}$ のベリリウム窓の中に、 $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、厚さ 2mm の素子が搭載されている。

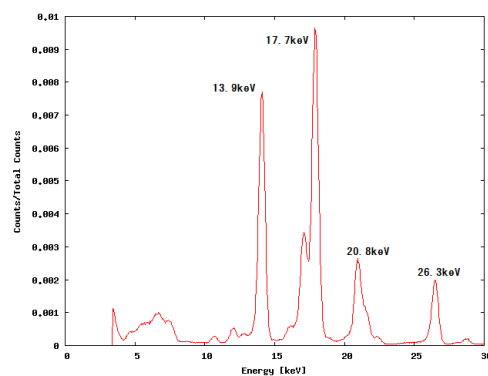


図 4.2: CdZnTe 検出器で検出した ^{241}Am のエネルギースペクトル (0~30keV)。全カウント数でノーマライズしてある。

図 4.2 から ^{241}Am の 13.9keV、17.7keV、20.8keV、26.3keV の輝線が現れているのがわかる。

4.2 データ解析プロセス

Frame mode で取得したデータの解析プロセスについて説明する。Frame mode とはある一定の時間露光した後、すべてのピクセルの波高値を読み出し再び露光を始めるという動作を繰り返してデータを取得する方法である。1 フレームというのは 1 回の露光における全ピクセルのことをいう。

1. ペDESTAL補正

XRPIX は X 線が入射していない時でも、リセット電圧やリーク電流に起因した一定の出力が存在し、それをペ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、各ピクセルである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としている。このペDESTAL値はオフセット成分に相当する。そして各フレームの各ピクセルからこのペDESTAL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 となるガウシアンを描く。このガウシアンをゼロピークと呼び、ゼロピークの幅はノイズ成分に相当すると考えられ、これを読み出しノイズと定義する。

2. バッドフレームの除去

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はバッドフレームと呼び、解析プロセスでは除去している。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_{frm}) を求め、平均値よりも $3\sigma_{frm}$ 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. X 線イベントセレクション

ペDESTAL補正後の波高値をもとに X 線イベントの検出を行う。XRPIX のような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。

(a) 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 (ここでは読み出しノイズの 15 倍) を超えているとき、X 線イベントと定義する。

(b) シングルイベントの判定 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値が、任意のスプリット閾値 (読み出しノイズの 3 倍) 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。

(c) ダブルピクセルイベントの判定 先ほど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。

- (d) 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。これらは中心ピクセルの周囲のピクセルのうち二つ以上がスプリット閾値を超えたものである。このように 3 つ以上のピクセルにまたがるようなマルチピクセルイベントは、XRPIX の読み出しノイズが大きいため 3 つ以上の出力値を足し合わせることでエネルギー分解能が悪くなる。

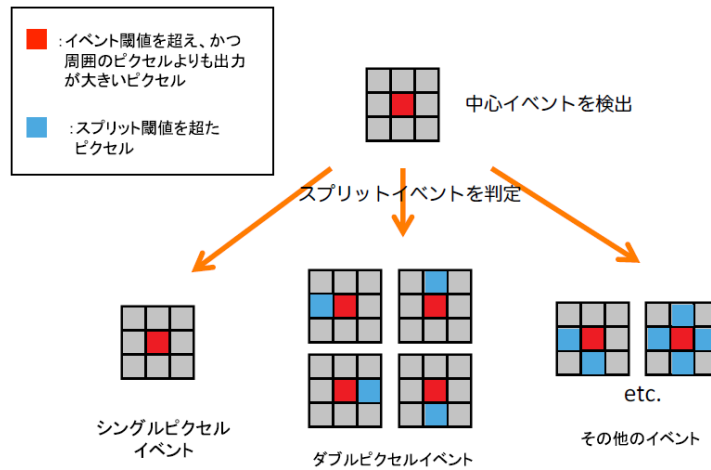


図 4.3: X 線イベントセレクションの関係図 [4]

4.3 実験結果

本実験は XRPIX2b-FZ 素子を真空中に設置し、温度条件と、素子に印加するバックバイアス電圧 V_{bias} を変えながら X 線を照射した。温度条件はコールドプレートの温度が室温 (15 °C)、-20 °C、-40 °C の場合の 3 つで、印加した電圧は 5V、50V、100V、200V である (室温の時は 5V のみ)。データ取得は積分時間 0.1ms、10000 フレームに設定を行った。統計数を上げるため、5V と 50V は 10 回分、100V と 200V は 5 回分のデータを足し合わせている。

4.3.1 エネルギースペクトル

取得したエネルギースペクトルを示す。スペクトルは全カウント数でノーマライズした。

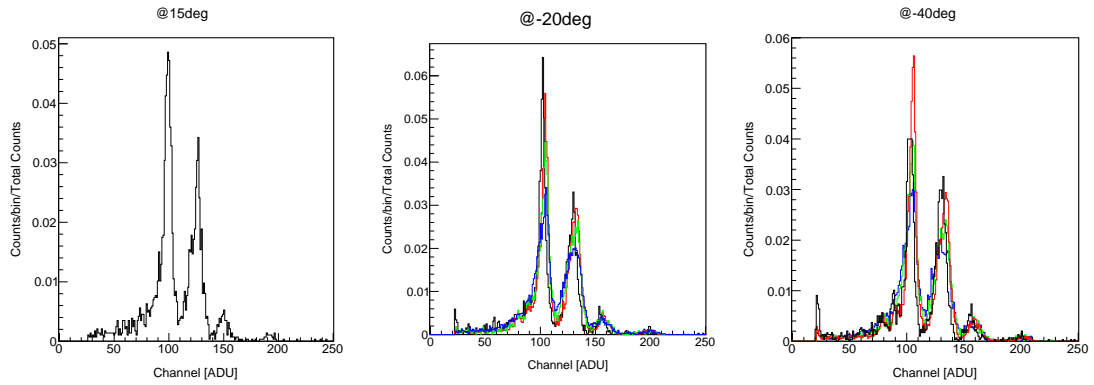


図 4.4: XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。シングルピクセルイベントとダブルピクセルイベントを足し合わせている。左から室温 (15 °C)、-20 °C、-40 °C の温度条件。バックバイアス電圧は 5V(黒)、50V(赤)、100V(緑)、200V(青)

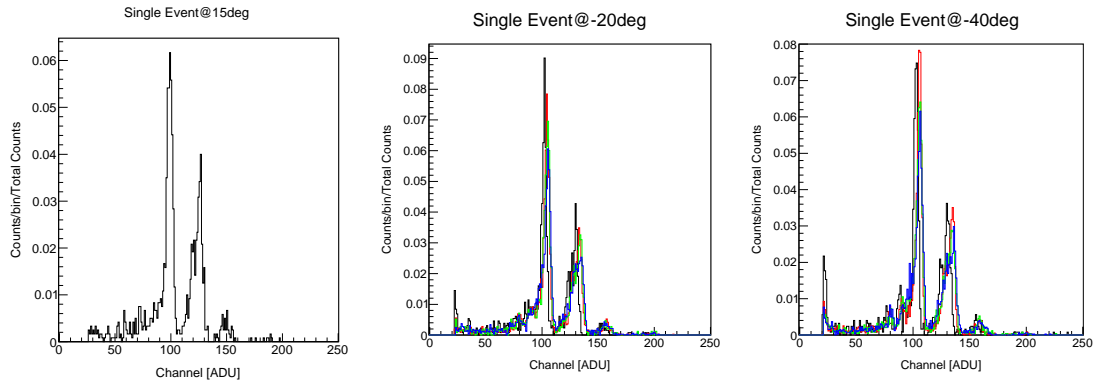


図 4.5: XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。シングルピクセルイベントのみ。左から室温 (15 °C)、-20 °C、-40 °C の温度条件。バックバイアス電圧は 5V(黒)、50V(赤)、100V(緑)、200V(青)

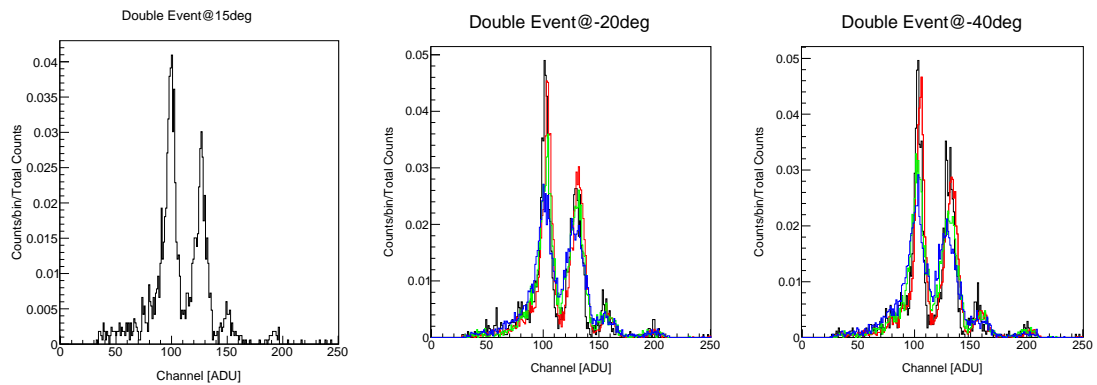


図 4.6: XRPIX2b-FZ で取得した ^{241}Am のエネルギースペクトル。ダブルピクセルイベントのみ。左から室温 (15 °C)、-20 °C、-40 °C の温度条件。バックバイアス電圧は 5V(黒)、50V(赤)、100V(緑)、200V(青)

図 4.4 より ^{241}Am の 13.9keV、17.7keV、20.8keV の輝線が確認できた。ダブルピクセルイベントのスペクトルを見ると、ノイズが大きく 17.7keV 付近の輝線を分離できていないことがわかる。わかりやすくするため図 4.7 に -40℃でのバックバイアス電圧 5V と 200V 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重ねたものを表示する。また素子の温度が低く、印加するバックバイアス電圧が大きいほどカウント数は大きくなり、-40℃でバックバイアス電圧が 200V の時にカウントレートが 2014.4counts/s である。

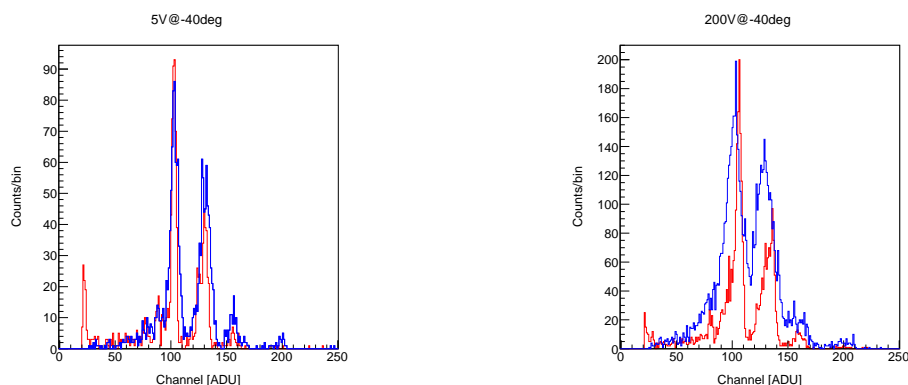


図 4.7: ^{241}Am のエネルギースペクトル。シングルピクセルイベント (赤) とダブルピクセルイベント (青) を重ねて表示している。温度は -40℃で、左がバックバイアス電圧 5V、右が 200V。

4.3.2 ゲインとエネルギー分解能の推定

4.3.1 で得られたシングルピクセルイベントのエネルギースペクトルの輝線をガウシアンでフィットし、その中心値からエネルギー較正を行った。それぞれの輝線のエネルギーとピークの中心値を表に示す。これらの値を一次関数で近似してその傾き (ADU/keV) から素子のゲインを求めた。素子のゲインとは、X 線の入射により発生した電子 1 個がどのくらいの電圧に変換されるかを示す値である。1ADU = 244μV であり、かつ Si の平均電離エネルギーが $3.65 \times 10^{-3}\text{keV/e}^-$ であるので、素子のゲインは

$$(\text{素子のゲイン } [\mu\text{V/e}^-]) = (\text{一次関数の傾き } [\text{ADU/keV}]) \times 244 \times (3.65 \times 10^{-3}) \quad (4.1)$$

で求めることができる。

次に素子のエネルギー分解能 (FWHM) を求めた。上で述べたスペクトル輝線にフィットしたガウシアン標準偏差 σ [ADU] の値と一次関数の傾きから以下の式で求めることができる。

$$\Delta E_{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \div (\text{一次関数の傾き } [\text{ADU/keV}]) \quad (4.2)$$

式 (4.1) と式 (4.2) を用いて、各条件における素子のゲインとエネルギー分解能を求めた。

各条件での輝線のガウシアンフィットの結果と、それを基に計算した素子のゲインとエネルギー分解能を示す。

条件	輝線のエネルギー [keV]	ピーク中心 [ADU]	ピークの幅 (標準偏差 σ)[ADU]
@15 °C, $V_{\text{bias}} = 5\text{V}$	13.9	98.79 \pm 0.14	2.71 \pm 0.13
	17.7	125.66 \pm 0.27	2.62 \pm 0.23
	20.8	148.15 \pm 0.93	4.96 \pm 1.22
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 5\text{V}$	13.9	101.98 \pm 0.10	1.99 \pm 0.09
	17.7	130.22 \pm 0.15	1.79 \pm 0.14
	20.8	154.04 \pm 0.96	3.87 \pm 1.22
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 50\text{V}$	13.9	104.36 \pm 0.08	2.20 \pm 0.08
	17.7	132.59 \pm 0.15	2.86 \pm 0.14
	20.8	157.24 \pm 0.42	4.17 \pm 0.53
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 100\text{V}$	13.9	104.49 \pm 0.10	2.55 \pm 0.08
	17.7	133.37 \pm 0.18	2.69 \pm 0.14
	20.8	156.52 \pm 0.54	4.39 \pm 0.56
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 200\text{V}$	13.9	104.83 \pm 0.10	2.89 \pm 0.10
	17.7	134.23 \pm 0.26	2.76 \pm 0.18
	20.8	156.38 \pm 0.53	1.21 \pm 0.49
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 5\text{V}$	13.9	102.67 \pm 0.09	1.87 \pm 0.08
	17.7	130.68 \pm 0.22	2.41 \pm 0.22
	20.8	155.78 \pm 0.98	4.47 \pm 1.30
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 50\text{V}$	13.9	105.30 \pm 0.08	2.33 \pm 0.07
	17.7	134.57 \pm 0.12	2.08 \pm 0.09
	20.8	158.11 \pm 0.35	3.25 \pm 0.49
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 100\text{V}$	13.9	105.13 \pm 0.12	2.75 \pm 0.09
	17.7	134.92 \pm 0.22	2.31 \pm 0.15
	20.8	159.26 \pm 0.61	3.24 \pm 0.89
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 200\text{V}$	13.9	105.98 \pm 0.10	2.79 \pm 0.11
	17.7	135.75 \pm 0.28	2.58 \pm 0.23
	20.8	159.48 \pm 0.47	4.35 \pm 0.49

表 4.1: ^{241}Am の輝線に対するガウシアンフィットの結果

条件	一次関数の傾き [ADU/keV]	素子のゲイン [$\mu\text{V}/e^-$]	FWHM@13.9keV[%]
@15 °C, $V_{\text{bias}} = 5\text{V}$	7.12 ± 0.05	6.34 ± 0.05	$6.43^{+0.36}_{-0.36}$
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 5\text{V}$	7.46 ± 0.05	6.65 ± 0.04	$4.50^{+0.23}_{-0.23}$
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 50\text{V}$	7.54 ± 0.14	6.71 ± 0.12	$4.92^{+0.27}_{-0.26}$
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 100\text{V}$	7.61 ± 0.01	6.78 ± 0.01	$5.65^{+0.19}_{-0.19}$
@-20 °C, $V_{\text{bias}} = 200\text{V}$	7.65 ± 0.12	6.81 ± 0.11	$6.37^{+0.32}_{-0.31}$
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 5\text{V}$	7.45 ± 0.14	6.63 ± 0.12	$4.25^{+0.27}_{-0.26}$
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 50\text{V}$	7.72 ± 0.01	6.87 ± 0.01	$5.09^{+0.15}_{-0.15}$
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 100\text{V}$	7.87 ± 0.02	7.01 ± 0.02	$5.91^{+0.22}_{-0.22}$
@-40 °C, $V_{\text{bias}} = 200\text{V}$	7.83 ± 0.02	6.97 ± 0.02	$6.01^{+0.27}_{-0.26}$

表 4.2: 各条件における素子のゲインとエネルギー分解能

表 4.2 より XRPIX2b-FZ 素子のゲインは温度が低くバックバイアス電圧が高いほど大きくなり、200V@-40 °C の場合に $6.97 \pm 0.02 \mu\text{V}/e^-$ であることがわかった。またエネルギー分解能は、室温時に比べると低温時の方が性能が良いが、バックバイアス電圧を上げると悪くなってしまうことがわかった。

4.3.3 検出部の寄生容量の推定

上で算出した素子のゲイン G を用いて検出部の寄生容量 C_{sens} を推定できる。回路ゲインを A_{cir} 、電荷素量を $e (= 1.6 \times 10^{-19} \text{C})$ とすると、

$$C_{\text{sens}} = \left(\frac{G}{eA_{\text{cir}}} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

となる。ピクセル回路において、センサー部分から信号が出力されるまでの経路にはソースフォロアや読み出し用のアンプなどが存在するため、センサー部での信号と出力される信号は等しくない。この入出力応答を回路ゲインと呼び、XRPIX2b 素子では $(0.95)^2 = 0.9025$ である。 $G = 0.70 \mu\text{V}/e^-$ として計算すると、 $C_{\text{sens}} = 20.6 \text{fF}$ と算出される。これは先行研究の値と矛盾しない結果である [6]。

第5章 マイクロフォーカス X 線源を用いた撮像試験

微小焦点をもつマイクロフォーカス X 線源と XRPIX2b-FZ を用いて撮像システムを構築し、いくつかの撮像試験を行った。

5.1 マイクロフォーカス X 線源

X 線干渉計においては X 線の空間的干渉性を考慮して、シンクロトロン放射光が焦点の微小な X 線源を光源とする必要がある。本研究では、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。

5.1.1 X 線発生の原理 [1]

X 線発生の基本的な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。そして真空管の両端にそれぞれ数 kV から数 100kV の電圧をかける。ここでカソード (陰極) に電流を流すとカソードから熱電子放出によって電子が飛び出す。この電子をアノード (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 線を生じさせる。

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が、一部の電子はターゲット原子と相互作用して X 線を生じさせる。X 線の発生に寄与するのは電子線の電力のうち 1% 以下である。X 線源が放射できる X 線の最大エネルギーはターゲットに衝突する電子のエネルギーによって決まる。つまり、電極間の電圧 (管電圧) によって制限され、たとえば管電圧 10kV に設定した場合、10keV 以上の X 線は発生しない。また 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) に依存し、管電流を 2 倍にすれば発生する X 線のフラックスもおおよそ 2 倍になる。

カソード 電子の発生源である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。タングステンは融点が 3695K と極めて高いため、真空管内で使用しても蒸発速度が遅く消耗しにくい。また熱電子を放出しやすいように、トリウム等の仕事関数の低い金属を含有させることがある。タングステンフィラメントは長期使用により、焼き切れたりターゲット表面にタングステンが蒸着したりすることがある。

他にカソード物質としては、六ホウ化ランタン (LaB_6) が用いられる。 LaB_6 の仕事関数は 2.66eV で、タングステン (4.5eV) よりも熱電子放出能力が高く、融点も $\sim 2800\text{K}$ 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、タングステン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。LaB₆ 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。

ターゲット X 線源のターゲットとしてよく用いられるのは、タングステン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ので、ターゲットには融点の高い物質が必要である。またターゲットの熱負荷を抑えるため、アノードは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 荷電粒子が物質と相互作用するとき、物質の原子核でつくられるクーロン場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の場合に成り立つもので、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 $Z = 10 \sim 80$ 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。したがって X 線源を扱う場合、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 50kV 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、何らかの過程によって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。通常この励起状態は長くは続かず、1ns 以下の短い時間内に基底状態に戻り、原子は再び安定した電子配置になる。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は電磁波として放出される。原子のエネルギー準位はその原子固有のものであるので、放射される電磁波のエネルギーもまた原子固有の値をもつ。このうち X 線のエネルギー帯域に入るものを特性 X 線と呼ぶ。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異なる名称となる。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は発する 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 $K\gamma$ 線という呼称が与えられる。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。このような規則に従い特性 X 線の呼称は決まり、たと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 線の周波数はモズリーの法則に従う。たとえば原子番号 Z の物質の K 系列の X 線の周波数 ν_K は、以下の式で表わされる。

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

ここで R_{∞} はリュードベリ定数 [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 60kV 以上にしなければ K 線は現れない。

5.1.2 本研究で用いたマイクロフォーカス X 線源

本研究では、光源としてマイクロフォーカス X 線源 L8321-01(浜松ホトニクス) を用いた。X 線発生原理は 5.1.1 で述べた通りであるが、電子放出領域の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という工夫がされている。ターゲット物質はタングステンが用いられており、ターゲットが消耗した場合は容易にターゲットを回転でき、別の位置に電子ビームをあてることができる。カソードは必要に応じて交換することができるが、本研究ではタングステンフィラメントを用いた。装置の操作には本体から切り離れたコントローラーを用い、管電圧は 20-160kV、管電流は 0-200 μ A の範囲で設定することができる。

カソードとターゲットの間は高真空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。コントローラーを用いて、本体から離れた場所で X 線の射出を行うことができる。コントローラーでは管電圧、管電流の設定や、電磁レンズの調整などを行うことができる。

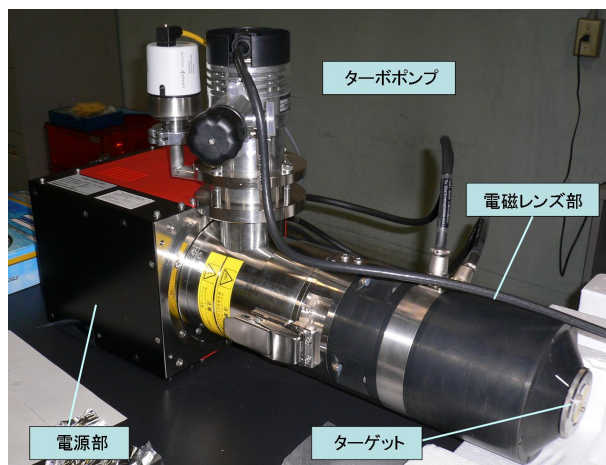


図 5.1: マイクロフォーカス X 線源 L8321-01 の全体写真 [1]。全長は 710mm である。

このマイクロフォーカス X 線源から放射される X 線を 4.1.3 と同様に CdZnTe 検出器を用いて検出した。図 5.2 は検出した X 線スペクトルである。カソードはタングステンフィラメントを使用し、管電圧 20kV 管電流 2 μ A に設定した。20keV までの連続成分と 10keV 付近に 3 本の輝線があらわれているのがわかる。これ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 $WLa(8.4keV)$ 、 $WL\beta(9.7keV)$ 、 $WL\gamma(11.3keV)$ である。スペクトルは全カウント数でノーマライズしてある。

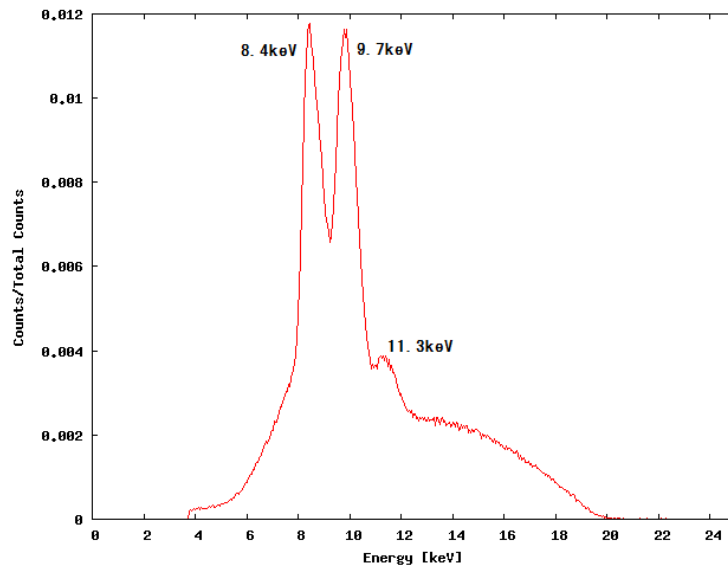


図 5.2: CdZnTe 検出器で取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル

5.2 X 線撮像システムの構築

5.2.1 概要

マイクロフォーカス X 線源と XRPIX を用いて、X 線撮像システムを構築した。システムの概略図を図 5.3 に示す。

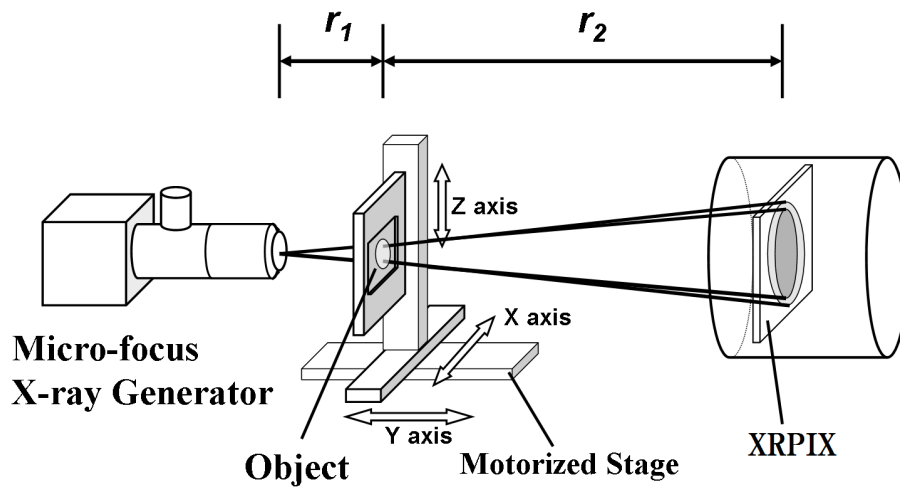


図 5.3: X 線撮像システムの概略図 [1]

r_1 は X 線焦点から被写体までの距離、 r_2 は被写体から XRPIX までの距離である。本システムは後述する除振台の上で構築されており、マイクロフォーカス X 線源と XRPIX の位置は固定して

いるので X 線焦点から X 線検出面までの距離 $L = r_1 + r_2$ は 1040.5mm で一定となっている。拡大率 M は

$$M = \frac{L}{r_1} = 1 + \frac{r_2}{r_1} \quad (5.10)$$

で定義され、 r_1 を変えることで任意の拡大率に変更できる。

また被写体のすぐ後ろに X 線回折格子を導入することで、本研究の目指す X 線タルボ干渉計を実現することができる。

5.2.2 3 軸ステージ

XRPIX の有効撮像面積は $4.3\text{mm} \times 4.3\text{mm}$ であり、拡大率を上げれば被写体上での XRPIX の視野はさらに非常に狭い領域となるので、およそ 1mm 以下の精度で被写体を動かす必要がある。これを手動で正確に行うのは困難なので、軸方向にモーターステージを導入しステージ上に被写体を固定して撮像を行った。

使用したのは自動ステージ SGSP26 シリーズ (シグマ光機) である。X 線の射出方向に対して垂直な軸 (X 軸、Z 軸) には SGSP26-50(最大移動量 50mm) を、X 線の射出方向に平行な軸 (Y 軸) には SGSP26-200(最大移動量 200mm) を使用した。この装置は、コントロールソフトウェアを用いて PC からケーブルを通じてパルスを送信することで、1 パルスあたり $0.1\mu\text{m}$ だけ任意の軸方向にステージを動かすことができるステッピングモーター式のステージである。ステージから数 m 離れた遠隔から制御が可能なので、X 線を射出したまま撮像領域を変えることができる。

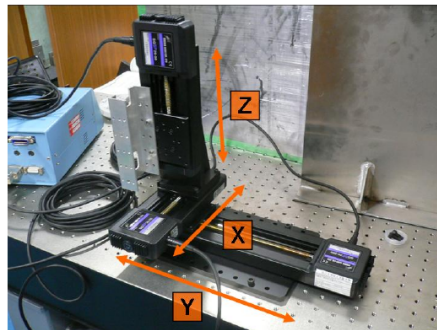


図 5.4: 自動ステージの写真 [1]

5.2.3 除振台

一般に撮像システムの拡大率を上げていくと、装置のわずかな振動でも解像度に悪影響を及ぼす。たとえば拡大率 50 倍で撮像する場合、XRPIX2b の画素サイズは $30\mu\text{m}$ なので、被写体上では $0.6\mu\text{m}$ に対応する。このとき撮像中に被写体が $\sim 1\mu\text{m}$ 動いたとすると、検出面上では約 2 画素分ずれることになり画像がぶれてしまう。被写体の鮮鋭さを向上させるには振幅 $1\mu\text{m}$ 以上の振動を抑える必要がある。

そこで除振台を導入し、この台上で撮像システムを構築した。本研究では三次元空気ばね式除振台 TDIS-2012LA(Herz) を使用した。装置の上部には $L2\text{m} \times W1.2\text{m} \times H15\text{cm}$ の金属製ベンチが

あり、総重量 300kg まで積載できる。ベンチ内部は鉄のハニカム構造で、上面に非磁性ステンレス版が貼り付けてあり、装置の下部から空気ばねによって支えられている。空気ばねは除振台の脚の部分に設置され、外部のボンベから供給される約 2 気圧の高圧の空気の膨張力を利用して金属製ベンチをもち上げている。

金属製ベンチは空気ばねによって浮いた状態にあるため、地面からの振動を防ぐことができる。ただし、金属製ベンチは地面と無関係に振動できる状態にあるともいえるので、台上に固定されていない物体は台自体の振動の影響を受けることになる。したがって台上の装置はなるべく固定して使用することが望ましい。

5.2.4 焦点寸法と幾何学的半影

このような撮像システムを用いた場合、画像の鮮鋭さは X 線源の焦点の大きさに依存する。ここで X 線焦点を表面輝度一様な円と仮定し、その直径を D_f とする。このとき焦点から被写体までの距離 r_1 、被写体から検出面までの距離 r_2 とすると、画像の輪郭のぼけ幅 w は以下の式で近似できる。

$$w = D_f \times \frac{r_1}{r_2} \quad (5.11)$$

このように発光点が有限の大きさをもつために生じる画像のぼけのことを幾何学的半影という。式 (5.11) より焦点寸法 D_f が小さいほど鮮鋭な画像が得られることがわかる。本研究で用いた X 線源の焦点寸法は $\sim 1\mu\text{m}$ である。

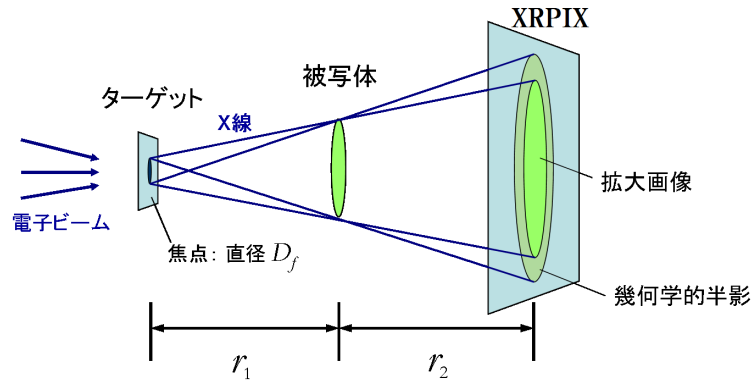


図 5.5: 焦点の大きさにより生じる幾何学的半影 [1]

5.3 X 線エネルギースペクトル

まず被写体を何も置かずに、マイクロフォーカス X 線源から放射される X 線を XRPIX で検出した。以下すべての実験に共通して、マイクロフォーカス X 線源のカソードにはタングステンフィラメントを使用し、XRPIX 素子はコールドプレートの温度を -40°C に設定している。また、データ取得は Frame mode で行った。得られたエネルギースペクトルを図 5.6 に示す。X 線源の管電流は 20kV、管電流は $20\mu\text{A}$ であり、露光時間は $50\text{ms} \times 2000\text{Frame} = 100\text{s}$ とした。

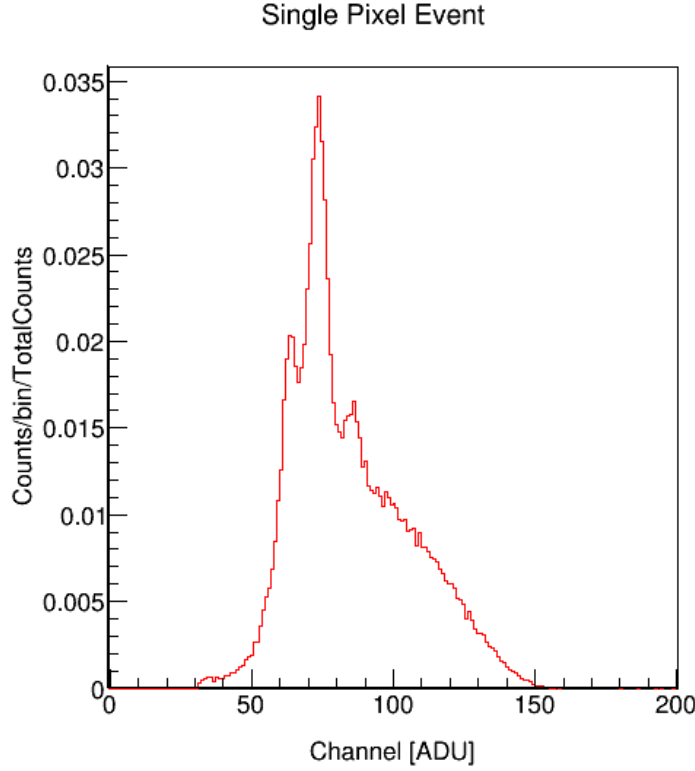


図 5.6: XRPIX で取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル
シングルピクセルイベントによるもので、全カウント数でノーマライズしてある。

4.3.2 で求めたエネルギー較正より、図 5.6 の 3 本のピークはそれぞれ 8.4keV、9.7keV、11.3keV の特性 X 線であることがわかる。200 μ m 厚のアルミ窓により減衰を受けている。

5.3.1 パイルアップ

1 回の露光時間の間に、同一の画素もしくは隣接する画素に 2 つ以上の X 線光子が入射してしまうことをパイルアップという。パイルアップが起きると、本来 2 つ以上のはずの X 線光子を 1 つの X 線光子としてエネルギーと入射位置を読み取ってしまうことになる。そのため正確に測定を行うためには X 線源のフラックスと、露光時間を制限する必要がある。

N 個の画素をもつ XRPIX で 1 回の露光時間 (1Frame) に n 個の光子が入射したとする。その時に XRPIX のある画素に m 個の光子が入射する確率 $P_{\frac{n}{N}}(m)$ はポアソン分布に従い

$$P_{\frac{n}{N}}(m) = \frac{n^m}{m!} e^{-\frac{n}{N}} \quad (5.12)$$

のように書ける。Frame mode の解析プロセスより、X 線が入射した画素を中心とする上下左右のピクセルに 2 つ以上の X 線が入射するとパイルアップが起きる。

パイルアップが起こる確率 k は、ある 1 ピクセルで X 線光子が 1 個だけ検出されたときに、周囲の 4 ピクセルでは X 線光子が検出されない確率を 1 から引けばよいので

$$k = 1 - \frac{P_{\frac{n}{N}}(1) \times P_{\frac{n}{N}}(0)^4}{P_{\frac{n}{N}}(1) \times 1^4} \quad (5.13)$$

$$= 1 - e^{-4\frac{n}{N}} \quad (5.14)$$

となる。画素数の 1% 程度の X 線光子が入射したときパイルアップが起こる確率は 3.92% である。

露光時間を 200ms/1Frame として、先ほどと同様にマイクロフォーカス X 線源の X 線を検出したスペクトルを図 5.7 に示す。1 Frame 当たりの X 線イベント数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合わせて 398.374counts であり、20keV 以上にも X 線イベントが確認できることから、パイルアップが起きていると考えられる。

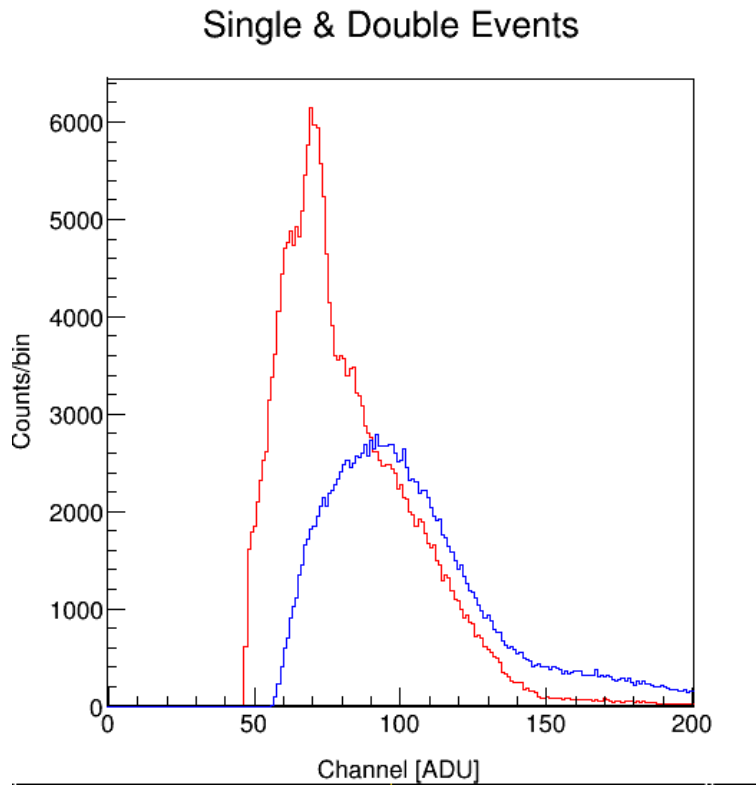


図 5.7: XRPIX で露光時間を長くして取得したマイクロフォーカス X 線源のエネルギースペクトル

赤がシングルピクセルイベント、青がダブルピクセルイベント。ダブルピクセルイベントにおいてパイルアップの影響が顕著に現れている。

5.4 屈折コントラスト撮像

次に 1.1.2 で述べた屈折コントラスト撮像を行った。被写体にはスチロールコンデンサを用いた。スチロールコンデンサは 2 枚の金属板とスチロールを何重にも巻いた構造になっており、X 線透過率の異なる物質が含まれている。以下にスチロールコンデンサの可視光の写真と XRPIX で撮像した画像を示す。屈折コントラストを検出するには被写体と検出面の距離を十分に離す必要があり、その分被写体の像は拡大される。ここでは $r_1 = 260.125\text{mm}$ 、 $r_2 = 780.375\text{mm}$ (拡大率 $M = 4$) で撮像を行った。すなわち XRPIX の被写体上での視野は $1.08\text{mm} \times 1.08\text{mm}$ である。

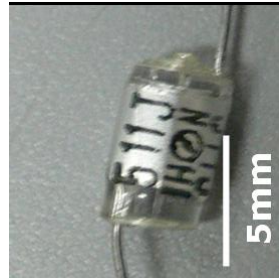


図 5.8: スチロールコンデンサの可視光の写真 [1]

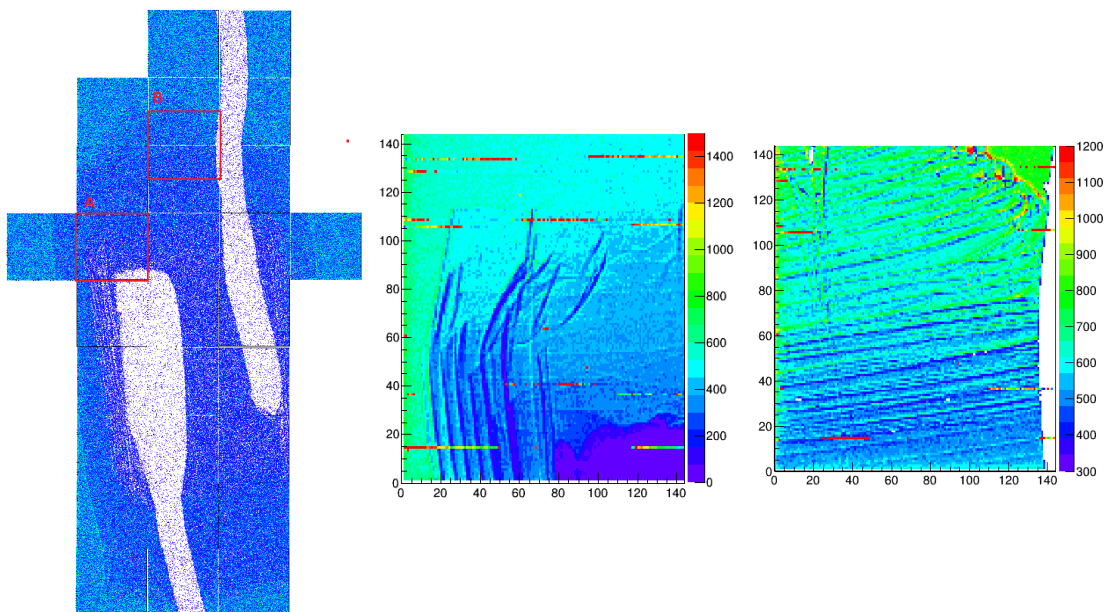


図 5.9: スチロールコンデンサの X 線画像。左は露光時間 $50\text{ms} \times 500\text{Frame} = 25\text{s}$ で撮像したものを繋ぎ合わせている。左図における A と B の部分を拡大したのが中 (A) と右 (B)。露光時間はともに 4000s 。

図 5.9 を見ると、A では金属部分、B ではスチロール部分の重なった構造が確認できる。原子番号の小さいスチロール部分においてもエッジ強調効果による輪郭部分でのコントラストが確認できた。

5.5 テストチャートを用いた空間分解能評価

次にテスト用のチャートを用いて、空間分解能の評価を行った。

5.5.1 JIMA チャートの撮像

一般に、撮像システムの空間分解能を評価するにはテストチャートが用いられる。本実験では、日本検査機器工業会 (JIMA:Japan Inspection Instruments Manufacturers's Association) の X 線用解像度テストチャート RT CT-01(以下、JIMA チャートと呼ぶ) を使用して評価を行った。JIMA チャートは厚さ $1\mu\text{m}$ のタンタルの吸収体に、半導体リソグラフィを用いて様々なサイズのテストパターンを描いたものである。スリット幅 $0.4\mu\text{m}$ から $15\mu\text{m}$ まで 16 種類のパターンがあり、それぞれ縦横 3 本ずつのスリットから構成されている。スリット同士の間隔はスリット幅と同じである。

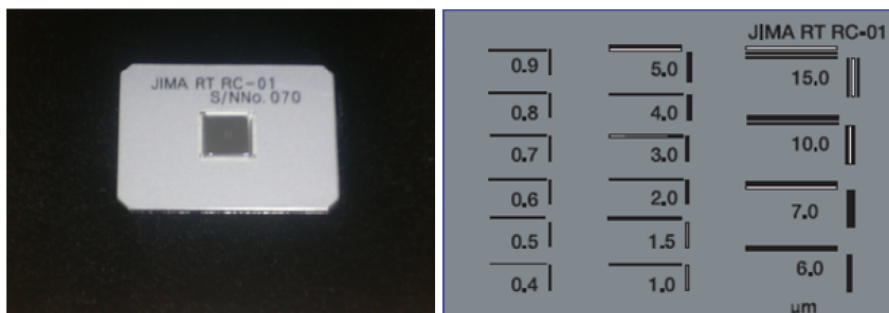
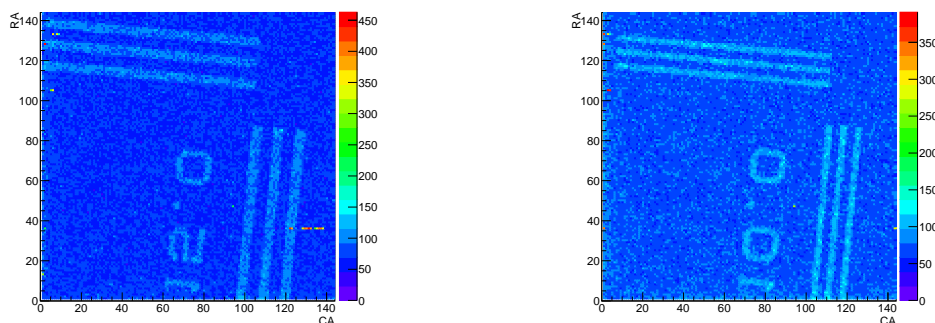


図 5.10: JIMA チャートの写真と模式図 [1]

本実験ではまず、この JIMA チャートを被写体としてスリット幅の異なるいくつかのパターンの撮像を行った。撮像したのは $15\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ のスリットであり、拡大率を 10 倍にして撮像したので検出器上ではスリット幅はそれぞれ 10 倍になって撮像される。X 線源は管電圧 20kV、管電流 $20\mu\text{A}$ とし、露光時間は $50\text{ms} \times 10000\text{Frame} = 500\text{s}$ で $3\mu\text{m}$ と $2\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ のスリットは 4 回分足し合わせた。以下にそれぞれのスリットの X 線画像を示す。



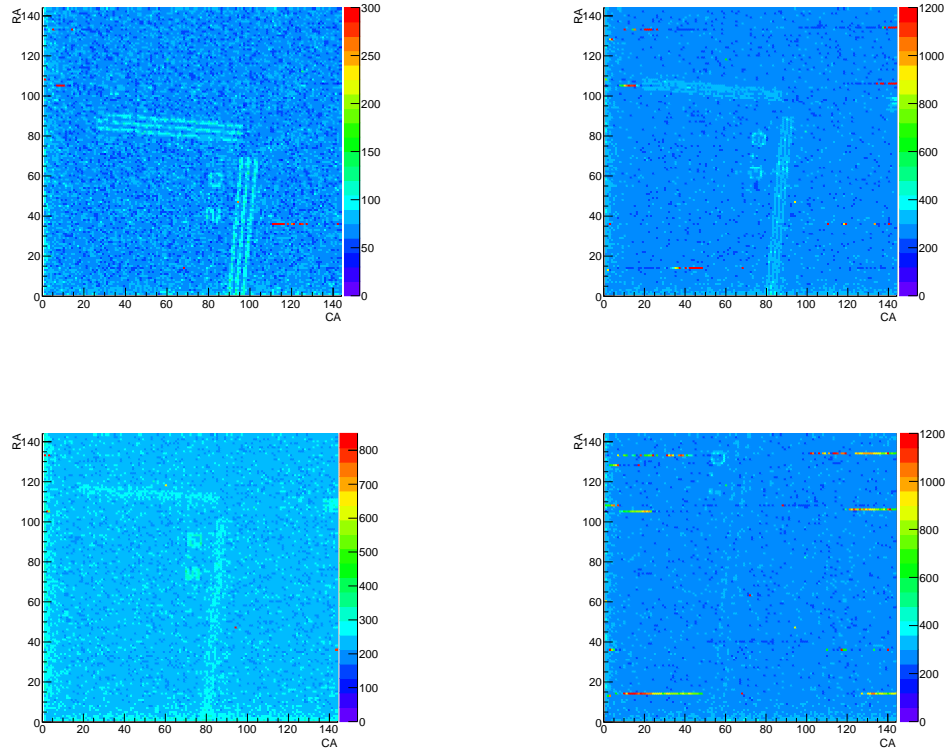


図 5.11: JIMA チャートのスリット幅の異なるパターンの X 線画像。左上から $15\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ のスリット

5.5.2 空間分解能の評価

X 線画像を見て、スリットが見えているか確認することができるがより定量的に評価を行うため、各スリットのコントラスト値を求めた。まず取得した画像をスリットの傾きに応じて回転させ、縦方向に射影し 1 次元のプロファイルを作成した。この 1 次元プロファイルから、以下のように定義される I_{Max} 、 I_{min} 、 I_{BGD} を求めて、コントラスト値を計算した。

I_{Max} 、 I_{min} 、 I_{BGD} の定義 I_{Max} 、 I_{min} はそれぞれ 1 次元プロファイルのピークもしくはその間の谷の部分とバックグラウンドレベル I_{BGD} との X 線強度の差を表わす。XRPIX の画素サイズ $30\mu\text{m}$ よりスリットが XRPIX 上で何画素分広がっているかがわかるので、山と谷の広がった画素の強度を平均して I_{Max} 、 I_{min} とした。またスリットは 3 本あるので I_{Max} は 3 つの平均、 I_{min} は 2 つの平均をとった。 I_{BGD} はスリットのない平坦な部分に 0 次関数をフィッティングして求めた。

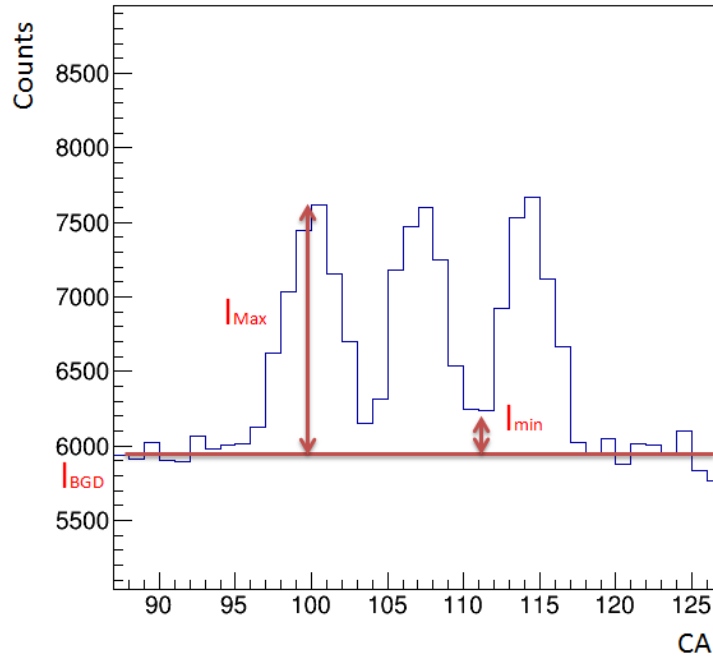


図 5.12: I_{Max} 、 I_{min} 、 I_{BGD} の定義

コントラスト値 コントラスト値は I_{Max} 、 I_{min} の値を用いて以下の式で定義する。

$$Contrast = \frac{I_{Max} - I_{min}}{I_{Max} + I_{min}} \quad (5.15)$$

この式から、コントラスト値は 0 から 1 の値をとることがわかる。たとえば、スリット幅が検出器の空間分解能よりも十分大きくはっきりと 3 本のスリットを分離できる場合、 $I_{min} = 0$ すなわち $Contrast = 1$ となる。一方、スリット幅が検出器の空間分解能より小さく、3 本のスリットを分離できない場合 $I_{Max} = I_{min}$ すなわち $Contrast = 0$ である。つまりコントラスト値が 1 に近いほどコントラストが高いということになる。一般に、 $Contrast \geq 0.1$ であれば、十分なコントラストがついているとみなせる。

回転角の決定 図 5.11 を見てもわかるように、スリットは XRPIX の画素の列に対して傾いているのでそのまま射影しても正確な 1 次元プロファイルは得られない。ある最適な角度で画像を回転させて射影する必要がある。そのためにまず、 $10\mu\text{m}$ のスリットの画像を 1 度ずつ回転させてそれぞれ 1 次元プロファイルを作成した。それらからそれぞれコントラスト値を求め、回転角に対してプロットし 2 次関数をフィッティングして最もコントラスト値の高くなる角度を求めた。

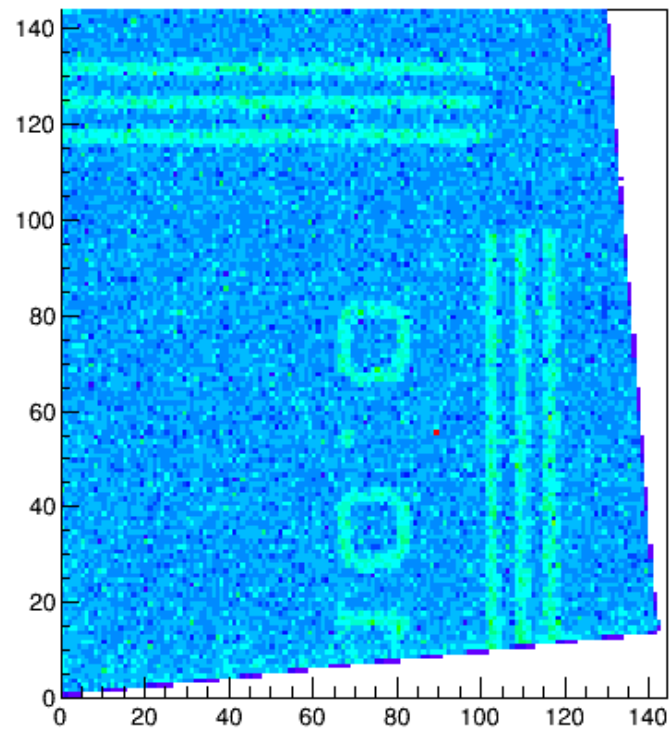


図 5.13: (例)10 μ m のスリットの X 線画像を 5 度回転させた図

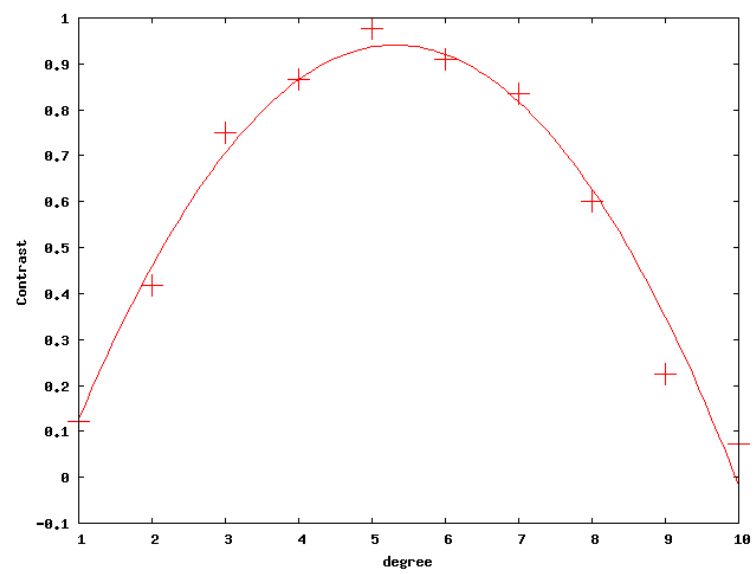


図 5.14: 回転角とコントラスト値のプロットと二次関数フィッティング

この結果から最適角度を 5.313 度と決定した。以下 $2\mu\text{m}$ 以外のスリットの画像を最適角度で回転させて 1 次元プロファイルを作成した。 $2\mu\text{m}$ のスリットは別の日に試験を行った (JIMA チャートをステージから一度外している) ので、同じ日に撮像した $5\mu\text{m}$ のスリットの画像を用いて同様に最適角度を求めている。最適角度は 4.259 度。

空間分解能の評価 以上のようにして、1 次元プロファイルを作成し、各スリット幅に対してコントラスト値を求めた。各スリット幅の 1 次元プロファイルとコントラスト値を以下に示す。

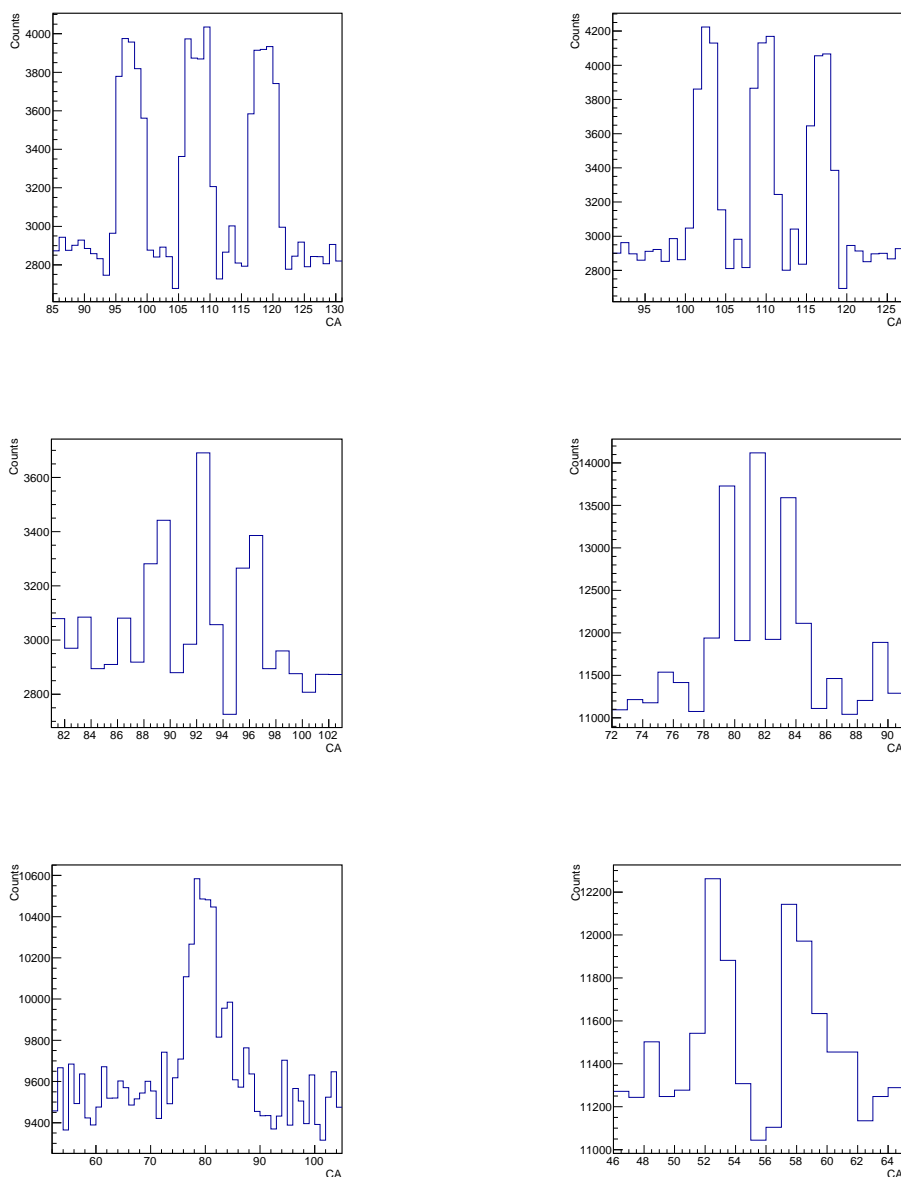


図 5.15: 各スリットの 1 次元プロファイル。左上から $15\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ のスリット。

スリット幅	コントラスト値
15 μm	0.9958
10 μm	0.9976
5 μm	0.4678
3 μm	0.4589
2 μm	0
1 μm	0

表 5.1: 各スリットのコントラスト値

10 μm と 15 μm のスリットは X 線画像を見ても 3 本のスリットをはっきりと分離できているので、 $Contrast \sim 1$ である。また、検出器上で XRPIX の画素サイズ 30 μm と同じ大きさになる 3 μm のスリットも $Contrast = 0.4589$ で十分コントラストがついていると言える結果になった。また 5 μm の 1 次元プロファイルのように、1 つのピークの山が他 2 つよりも大きい場合は大きいピークの強度を I_{Max} 、他 2 つのピークの強度の平均を I'_{Max} として、 $Contrast = (I'_{Max} - I_{min}) / (I_{Max} + I_{min})$ としてコントラスト値を求めた。XRPIX の画素サイズよりも小さい 2 μm と 1 μm のスリットはやはり 3 本を分離することができず $Contrast \sim 0$ となった。以上より XRPIX の空間分解能は画素サイズ程度であるといえる。

イベント波高値の重心解析による空間分解能の向上 たとえば図 5.16 のようなダブルピクセルイベントで中心のピクセルの波高値が 60 で隣のピクセルの波高値が 40 だったとする。するとこの 2 つのピクセルイベントの X 軸方向の重心は $x = A_x + 0.4$ ということになる。 A_x は中心のピクセルの X 軸のアドレスである。隣のピクセルの波高値が中心ピクセルの波高値を超えることはないので、重心は -0.5 \sim +0.5 の範囲に収まる。たとえばピクセルを 10 分割して、求めた重心の位置をイベントの新たなアドレスとすれば、X 線の入射位置をピクセルサイズの 1/10 の大きさで推定できる。またこの場合の Y 軸方向のアドレスは中心ピクセルのアドレス A_y に -0.5 \sim +0.5 の範囲でランダムな値を加える処理を行っている。つまり、上下方向に分かれたダブルピクセルイベントの場合では、Y 軸のアドレスは 2 つのピクセル波高値の重心から求め、X 軸のアドレスはランダムな値をとる。

シングルピクセルイベントについても、X 線が必ずピクセルの中心に入射しているとは考えにくいので、隣のピクセルに電荷が広がらない程度の範囲で入射していると仮定し、入射位置を推定した。具体的には $-1/2\sqrt{2} \sim +1/2\sqrt{2}$ の範囲でランダムな値をとるようになっている。これらの処理によりピクセル内でどのような分布になるのか、一様な強度分布の X 線画像を用いて検証したところ、図 5.17 より意図通りの分布になっていることがわかった。

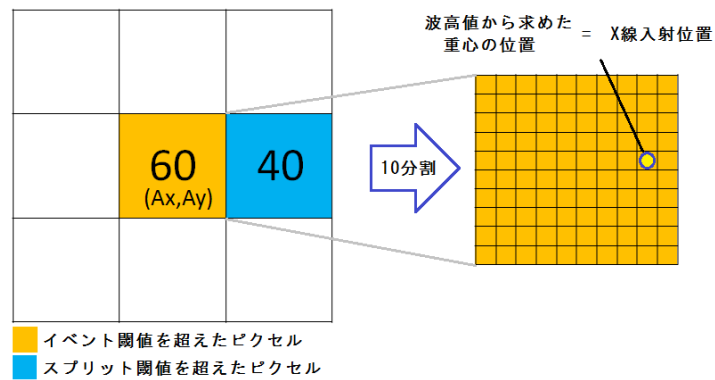


図 5.16: 波高値の重心解析による X 線入射位置の推定

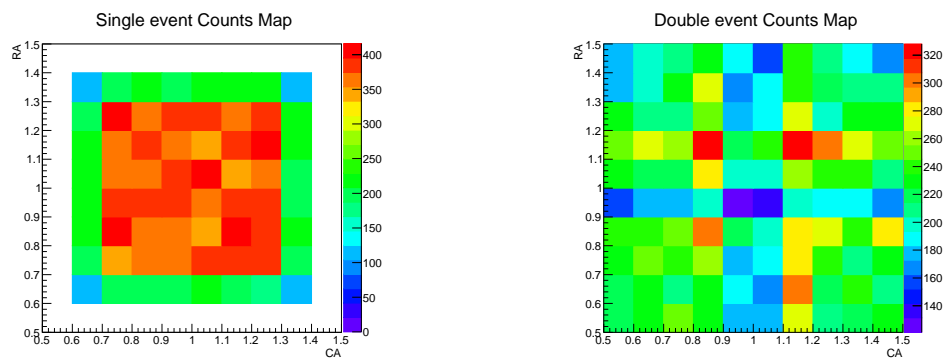
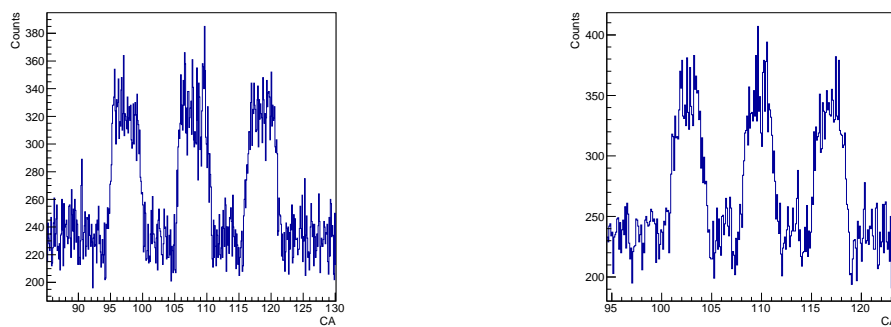


図 5.17: シングルピクセルイベント (左) とダブルピクセルイベント (右) のピクセル内での分布。
(CA,RA)=(1.0,1.0) がピクセルの中心に対応する。

この解析手法を用いて、JIMA チャートの各スリットを再解析してコントラスト値を求めた。この解析手法により作成した 1 次元プロファイルと求めたコントラスト値を以下に示す。



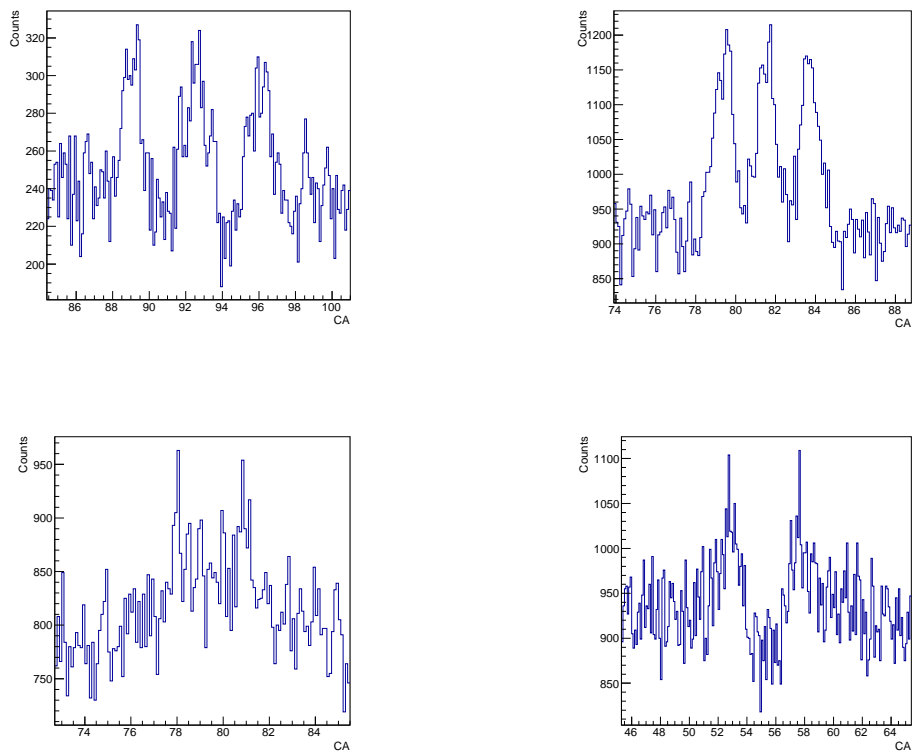


図 5.18: 再解析した各スリットの 1 次元プロファイル。左上から $15\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ のスリット。

スリット幅	コントラスト値
$15\mu\text{m}$	0.9930
$10\mu\text{m}$	0.9804
$5\mu\text{m}$	0.8775
$3\mu\text{m}$	0.5405
$2\mu\text{m}$	0
$1\mu\text{m}$	0

表 5.2: 再解析により求めた各スリットのコントラスト値

図 5.15 と図 5.18 を比べると重心解析手法により 3 つのピークが、均されて同じ強度になっていることがわかる。また、 $2\mu\text{m}$ と $1\mu\text{m}$ のスリットはこの解析手法を用いてもピークを分離することができずコントラストが得られないという結果になった。

コントラスト伝達関数 (CTF) 上の 2 つの解析手法により求めたコントラスト値とスリット幅をプロットしたものを以下に示す。これは一般にコントラスト伝達関数 (CTF: Contrast Transfer Function) と呼ばれるもので、撮像システムの解像度を評価する指標として用いられる。

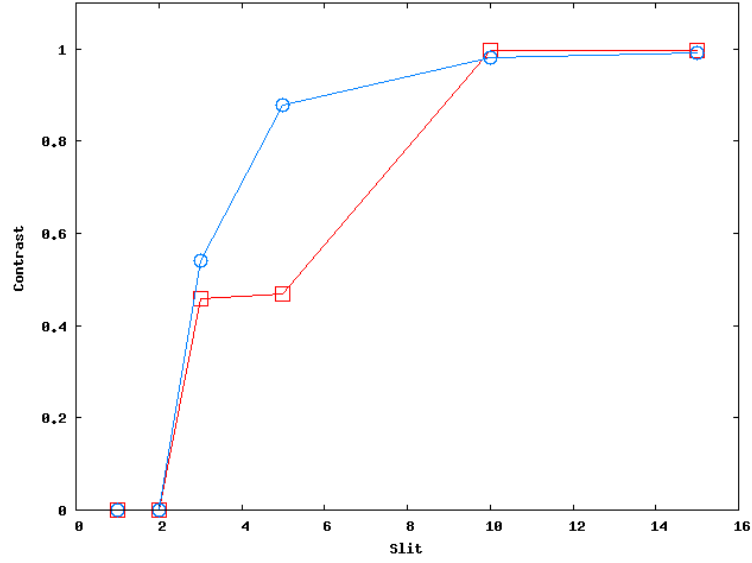


図 5.19: コントラスト伝達関数。赤が通常の解析手法。青が重心解析手法

図 5.19 より、スリット幅が狭くなるにつれてコントラストが低下していくことがわかる。また、重心解析手法によりコントラストがよくなっていることがわかる。具体的には、 $5\mu\text{m}$ で 1.88 倍、 $3\mu\text{m}$ で 1.18 倍となっている。

5.6 X 線タルボ干渉計の前段階としての撮像試験

本実験では、被写体の代わりに回折格子を置き X 線タルボ干渉計として格子の自己像を撮像する試験を行った。回折格子は大阪大学工学部の志村先生より拝借したもので、 $60\mu\text{m}$ 厚の Si 結晶の $3\text{mm} \times 5\text{mm}$ の範囲に周期長 $3\mu\text{m}$ 、深さ $5.3\mu\text{m}$ のスリットが形成されており、 $\sim 8\text{keV}$ の X 線が透過したときに位相が $\pi/2$ ずれるような位相格子となっている。本研究の X 線タルボ干渉計の構成では 5.2.1 にもあるように X 線焦点と検出面の距離 L 、すなわち X 線焦点から回折格子までの距離 R と回折格子から検出面までの距離 z の和が一定になっている。

$$L = z + R \quad (5.16)$$

式 5.16 と球面波の場合のタルボ効果が起きる位置を表した式 (2.16) を連立して解くと

$$R = \frac{L}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{4md^2}{\lambda L}} \right) \quad (5.17)$$

となり、 m の値に応じて回折格子を置く位置が決まることがわかる。 λ は X 線源から放射される X 線のうちの 8.4keV の X 線の波長 0.148nm 、 d は回折格子の周期長 $3\mu\text{m}$ 、 L は 1040.5mm である。また式 (5.17) より、回折格子を置くべき位置は 2 箇所候補があることがわかるが、これは生じる自己像の周期がより大きく拡大されるように X 線焦点に近いほうの位置を採用した。2.1.3 にもあるように、タルボ効果により生じる自己像は周期長の $(1+z)/R (= L/R)$ 倍となる。

本実験では m の値、すなわち格子の位置 R をいくつか変えて X 線を照射し X 線画像を取得し

た。X 線源は 20kV60 μ A に設定し、露光時間は 50ms \times 10000Frame \times 5 回 でデータを取得した。 m の値が $m = 0.5, 1.2, 1.5$ に対応する位置に格子を置きそれぞれ撮像を行った。倍率はそれぞれ 30.2 倍、13.7 倍、10.3 倍となる。取得した X 線画像を以下に示す。また解析の際、エネルギースペクトルの 8.4keV のピークの幅のエネルギーを選別した。

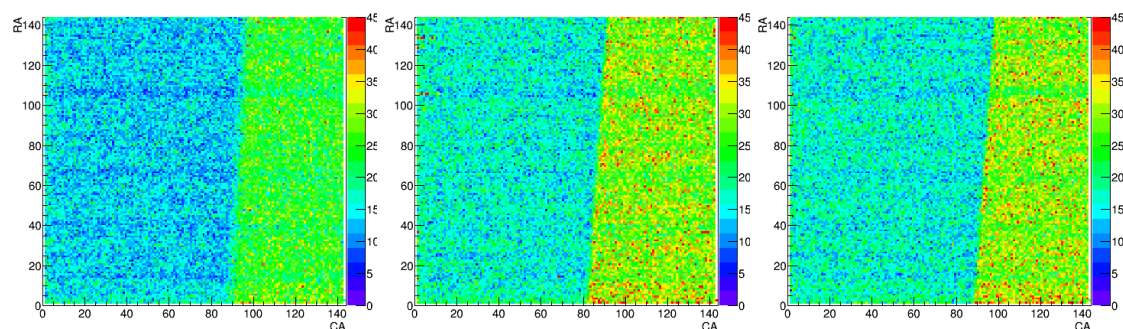


図 5.20: 通常の解析による回折格子の X 線画像。左から $m = 0.5, 1.2, 1.5$ 。格子のエッジの部分撮像している。

画像を見るとうっすらと縞のようなものが見えるが、格子の位置を変えても縞の位置が変わらないことと、エッジの外側の格子がない部分にも縞が見えることから、この縞のようなものは検出器由来のものであると判断した。ピクセル毎のゲインが多少違うためと考えられる。本実験で用いた回折格子は $\pi/2$ 位相格子なので $m = 0.5, 1.5$ のときに強く干渉するはずであり、XRPIX の空間分解能を考慮すると拡大率 30 倍の $m = 0.5$ の画像で ~ 3 pixel 周期の自己像が現れると考えられる。 $m = 0.5$ の画像について、格子のない部分のデータを用いて検出器固有のコントラストを補正し格子の向きに合わせて回転させたものを図 5.21 に示す。

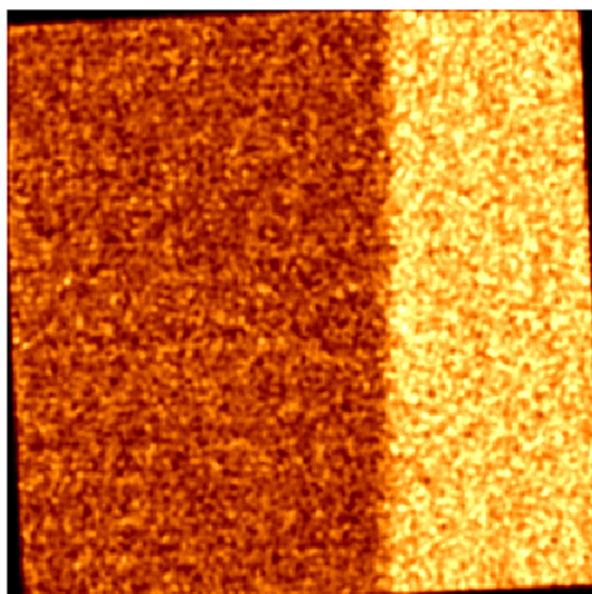


図 5.21: 検出器固有の成分を補正し、回転させた格子の X 線画像

さらに定量的に評価するため、格子のある部分とない部分から適当な範囲を抽出し 1 次元プロファイルを作成して周期解析を行った。すると格子の部分において何らかの周期構造を示唆する結果が得られた (図 5.22)。期待値に近い 3.162pixel で畳みこんだ 1 次元プロファイルを作成すると、格子のない部分ではほぼフラットな構造であるのに対し、格子の部分では明らかに周期構造をもつことがわかった (図 5.23)。

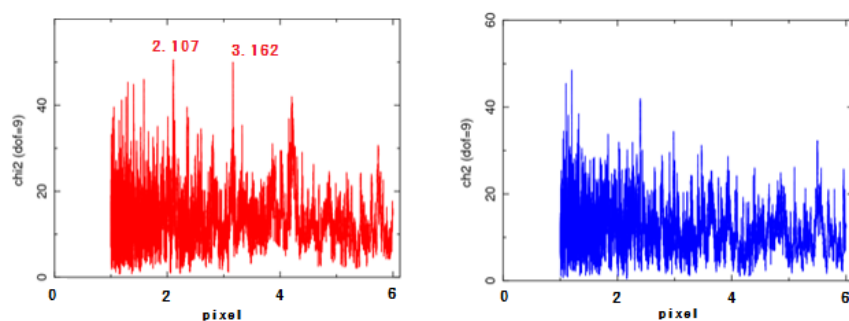


図 5.22: 格子の X 線画像から作成した 1 次元プロファイルの周期解析。左 (赤) が格子のある部分。右 (青) が格子のない部分

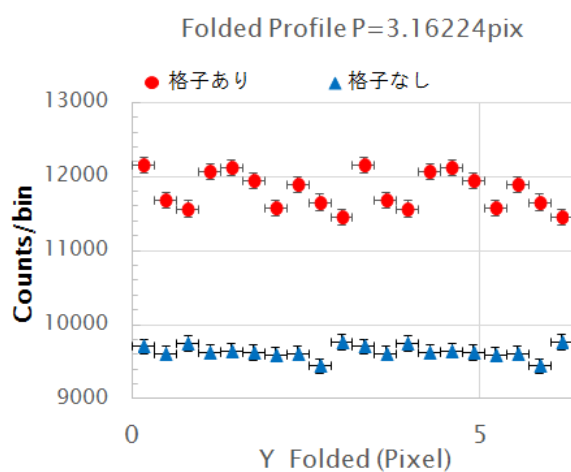


図 5.23: 3.162 周期で畳みこんだ 1 次元プロファイル。赤が格子のある部分。青が格子のない部分。

第6章 まとめと今後の展望

6.1 まとめ

本研究は、近年注目されている X 線の位相コントラストを検出する手法として、タルボ効果を利用した X 線タルボ干渉計の開発を目指して X 線撮像システムを構築した。タルボ効果とは回折格子を透過した光がある一定の距離で格子と同じパターンの干渉縞を形成する現象であり、これを利用した X 線タルボ (ロー) 干渉計は医療分野などで実用化が進んでいる。本研究で構築した X 線撮像システムは、X 線源として焦点寸法が $1\mu\text{m}$ のマイクロフォーカス X 線源を使用し、X 線検出器には X 線天文用に開発されている XRPIX を用いた。システムの全長は $\sim 2\text{m}$ のデスクトップサイズであり、モーターステージの導入により被写体の微細な移動を可能にした。

本研究ではまず、XRPIX2b 単体での常温動作、冷却動作試験を行い性能評価を行った。その結果、素子を -40°C に冷却し 200V のバックバイアス電圧を印加した状態で、素子のゲイン $6.97 \pm 0.02\mu\text{V}/\text{e}^-$ 、エネルギー分解能 $6.01^{+0.27}_{-0.26}\% @ 13.9\text{keV}$ を達成した。また XRPIX2b は読み出し速度が CCD よりも格段に速く、パイルアップ耐性が高いという利点がある。

この XRPIX とマイクロフォーカス X 線源を用いて X 線撮像システムを構築し、X 線撮像を行った。まず被写体として金属とスチロール樹脂からなるスチロールコンデンサを用いて、X 線を照射し X 線画像を取得した。画像からは、X 線透過率の高いスチロール部分の構造を確認することができ、X 線位相コントラスト撮像に成功した。

次に XRPIX の空間分解能を評価するため JIMA チャートを用いて、スリット幅の異なるいくつかのパターンを撮像した。撮像した X 線画像から 1 次元プロファイルを作成し、各スリット幅のコントラスト値を算出して空間分解能を評価した。その結果、XRPIX2b のピクセルサイズ ($30\mu\text{m}$) 程度のスリットを分離することができ、ピクセルサイズ程度の空間分解能であることがわかった。またピクセルの波高値から X 線入射位置をピクセルサイズの $1/10$ で推定する解析方法では、コントラスト値を最大で 1.88 倍に向上することができた。

最後に $\pi/2$ 位相格子を導入し、本研究の目指す X 線タルボ干渉計の前段階として、被写体は挿入せずに回折格子の自己像を検出する試験を行った。撮像したデータからエネルギーを選別して X 線画像を作成し周期解析を行った結果、タルボ効果による干渉縞のヒントを得た。

6.2 今後の展望

6.2.1 課題と展望

本研究の結果より、残された課題と今後の開発の展望を述べる。

1. XRPIX2b 素子の単体試験においてバックバイアス電圧が高いほどエネルギー分解能が悪くなる結果となった。本来ならば素子のゲインが大きいほど分光性能は良くなるはずである。冷却によりノイズの原因となるリーク電流は抑えられると考えられるので、別の要因が考えられる。今後、検討と改善が求められる。

2. 本研究で用いた XRPIX2b 素子は有効撮像面積が $4.32\text{mm} \times 4.32\text{mm}$ であり、X 線画像を撮像するうえでは必ずしも大きいとはいえなかった。撮像面積が小さいと何度も被写体を動かす必要があるので、撮像に時間がかかり、ずれも大きくなる。今後は XRPIX シリーズから撮像面積の大きい素子を用いるなどして、撮像システムの大面積化を図る必要がある。
3. 回折格子の X 線画像を周期解析することによって、自己像と考えられる周期構造を検出することができたが振幅が小さく画像だけでははっきりと縞模様を確認することはできなかった。また像が位相のずれにより生じたコントラストではなく、吸収の効果によるものである可能性も考えられる。
4. 検出器の空間分解能を考慮すると、より拡大率をあげて撮像したいがシステムの限界があるので周期の大きい回折格子を用いて自己像の検出を試みる。(2016 年 2 月に $17\mu\text{m}$ 厚 Au の $4.8\mu\text{m}$ 周期の振幅型回折格子が納入。)

6.2.2 X 線天文観測への応用

最後に、タルボ効果を用いた X 線干渉計を天文学に応用するアイデアを紹介する。

天文学の歴史において、ガリレオ以来、角度分解能の向上は常に新たな世界を開くカギになってきた。X 線観測においても、1999 年打ち上げの Chandra 衛星は 0.5 秒角の角度分解能をもち、バイナリ超巨大ブラックホールなど多くの新発見を生み出した。しかし、Chandra 衛星を超える分解能の望遠鏡は困難とされており、2028 年度打ち上げ目標のヨーロッパの大型 X 線天文台 Athena でも角度分解能は 5 秒角とされている。

X 線干渉計はこれを打破できる見込みがあるとして、いくつかのデザインが提案されている。MAXIM Pathfinder という衛星計画の平面鏡を用いて二本の X 線ビームの光路を曲げ一つの検出器上で干渉させるデザインや、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などである。いずれのデザイン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、本研究でも述べた X 線タルボ効果を利用することで、光学系を用いない形式の X 線干渉計の実現を見込んでいる。我々は、この X 線天体等の光源サイズ測定のための干渉計を、生体等の位相コントラスト撮像が目的の X 線タルボ干渉計と区別して、X 線多重像干渉計と仮称している。

天体からやってくる X 線を回折格子 (吸収格子) に透過させ、タルボ効果による自己像を発生させる。自己像が生じる位置は透過する光の波長すなわちエネルギーによって異なるので、目標波長に対応する位置に検出器を置き目標波長の X 線イベントのみをとりだす。こうして作成した各波長の自己像のプロファイルから、光源のプロファイルを測定することができるはずである。そのため検出器としてはエネルギー分光が可能で、かつ格子の自己像を解像 (モアレ縞でもよい) できる検出器が要求される。

波長 $\lambda=0.1\text{nm}$ (12keV) の平行光を想定し、格子の周期 $d = 5\mu\text{m}$ ピッチと仮定すると、格子と検出器の距離 z は

$$z = m \frac{d^2}{\lambda} = 25[\text{cm}]m \left(\frac{d}{5\mu\text{m}} \right)^2 / \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}} \right) \quad (6.1)$$

であり、自己像の幅 θ は

$$\theta = \frac{fd}{z} = \frac{f\lambda}{dm} = 2'' \left(\frac{f}{0.5} \right) \left(\frac{\lambda}{0.1\text{nm}} \right) / \left(\frac{d}{5\mu\text{m}} \right) m \quad (6.2)$$

となる。 f は格子の開口率である。像の幅の $1/4$ の精度で測定することができれば角度分解能 $\Delta\theta$ は Chandra に匹敵する見込みである。

謝辞

本論文の執筆に関して、常深研の方々をはじめ多くの方にお世話になりました。ここに感謝の意を述べさせていただきます。

常深先生には毎回のミーティングで、時には厳しく、鋭い指摘で丁寧に指導していただきました。林田先生には1から10まで指導いただき、自分一人では解決できず煮詰ったときなどに何度も助けていただきました。先生の助言によりなんとか研究を進めることができました。中嶋さんも実験装置に関することなど丁寧に指導していただきました。薙野さんは同じ居室できさくに話しかけていただいて居心地が良かったです。就職活動の話や資格の話で盛り上がりました。穴吹さんは先日の送別会で最後にお話されたことがとても印象に残りました。僕も今後、物事が上手くいくかどうかにかかわらず自主性を大事にしようと思います。澤本さんと渡邊さんは完璧な秘書さんだったので、自分の必要な手続きなど忘れてたり滞ったりすることなく行うことができました。お二人にはいつも癒されていました。今年度はASTRO-Hの打ち上げ予定だったのでスタッフの方々は特にお忙しい中、指導してくださり本当に感謝しています。

同期の今谷さんとキムは研究で遅くまで残っているときなど、声を掛け合って励ましあいながら乗り越えてきました。M1の3人には研究室の雑務など引き受けてくれてとても感謝しています。今年は行事にあまり参加できず申し訳なかったです。

XRPIXグループの方々にもとてもお世話になりました。メーリングリストで何度も質問させていただき、初歩的な内容であってもきちんと回答してくださりとても感謝しています。また工学研究科の志村先生には回折格子を貸していただき、実験を行うことができました。とても感謝しています。干渉計としての成果を満足に出すことができず本当に残念です。

その他多くの方にお世話になり、論文を執筆することができました。この場をかりて改めて御礼を申し上げたいと思います。

関連図書

- [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』 修士論文, 大阪大学, 2009
- [2] http://henke.lbl.gov/optical_constants/
- [3] S.W.Wilkins, T.E.Gureyev, D.Gao, A.Pogany and A.W.Stevenson: Nature 384 (1996) 335
- [4] 松村英晃 『宇宙 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における電荷収集効率の改善』 修士論文, 京都大学, 2015
- [5] 中島真也 『SOI 技術を用いた広帯域 X 線撮像分光器「XRPIX1」の評価試験と性能向上の研究』 修士論文, 京都大学, 2011
- [6] A.Takeda, T.G.Tsuru 『XRPIX2b Technical Description』 Kyoto University, 2014
- [7] R.G.Syukyo, T.G.Tsuru 『XRPIX1 Technical Description』 Kyoto University, 2011
- [8] 百生敦 『Talbot 効果を利用した X 線位相イメージング』 放射光, 2010, vol.23, No.6, 382
- [9] 百生敦 Isotope News, 2013, 705, 8
- [10] 木戸一博, 巻渕千穂, 清原淳子, 米山努, 長束澄也 『タルボ・ロー干渉計による X 線画像技術』 KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, vol.8, 82(2011)
- [11] 河端克幸 『X 線 Talbot 干渉計における Visibility 低下のイメージング応用』 修士論文, 東京大学, 2010
- [12] 名越健誠 『連続 X 線を用いた X 線 Talbot 干渉計の光学系の検討』 修士論文, 東京大学, 2014
- [13] A.Momose, S.Kawamoto, I.Koyama, Y.Hamaishi, K.Takai, and Y.Suzuki ;Jpn.J.Appl.Phys 42, L866 (2003)
- [14] 星野嘉秀, 清原淳子, 木戸一博, 長束澄也 『X 線タルボ・ロー撮影装置における臨床研究』 KONICA MINOLTA TECHNOLOGY REPORT, vol.11, 53(2014)