

次期 X 線天文衛星搭載予定透過型 CCD 検出器の
性能評価と冷却システムの研究

京都大学大学院理学研究科
物理学第二教室 宇宙線研究室
高木慎一郎

平成 15 年 1 月 30 日

概要

2010年に打ち上げを予定している日本の次期 X 線天文衛星 NeXT は、集光ミラーの改善により軟 X 線から硬 X 線まで広帯域で大きな集光力を持ち、特に現行の X 線天文衛星では困難であった 10keV 以上で集光を可能にした衛星である。熱的放射に比べ非熱的放射が卓越するこの帯域の初の撮像分光観測により、硬 X 線放射の起源や超高エネルギー宇宙線の加速機構などに注目した「非熱的宇宙」の解明を大きな目標とする。

我々はそのための焦点面検出器としてワイドバンド偏光撮像型ハイブリッドカメラの開発を進めている。本検出器は、前段に比較的低エネルギーの低い X 線を検出する透過型 CCD、後段に CCD で捉えきれなかった高エネルギー X 線を検出するガス検出器を重ねて配置することで、軟 X 線 (約 0.1keV) から硬 X 線 (約 80keV) というこれまでに無い広い帯域で同時に撮像分光と偏光検出を行なうことが可能となる。

透過型 CCD が満たすべき性能として、(1) NeXT の広帯域集光力を活かすため高エネルギーで高い感度を持つこと、すなわち空乏層が十分に厚いこと、(2) 検出できない硬 X 線がロスなく透過出来るよう不感層である中性領域 (及びサポート構造) を除くこと、すなわち完全空乏化すること、の 2 点が挙げられる。この性能を満たすために (1) 従来衛星で用いられている P 型 CCD に対し比抵抗が大きく、(2) 完全空乏化が可能、である N 型 CCD の開発を、大阪大学、国立天文台、浜松ホトニクス社と共同で進めている。

本論文では、開発途上にある N 型 CCD の性能評価および最適化により明らかになった現在の到達点と今後の課題を述べる。また衛星搭載に向けて克服すべき課題を検証するため行った透過型 CCD の冷却試験と機械式冷凍機の駆動試験について述べる。

1. N 型 CCD の性能評価および最適化

N 型 CCD プロトタイプ of 駆動に成功し、X 線照射による性能評価および最適化試験を行なった。焦点である空乏層厚は約 $120\mu\text{m}$ を達成し、現時点で Astro-E2 用 CCD 「XIS」の 2 倍近い厚みに達していることを明らかにした。これは実用化されている X 線 CCD の中で最も厚いクラスである。また読出ノイズの低減によりエネルギー分解能の 2 倍近い向上に成功した。しかし依然読出ノイズは約 $100e^-$ 、エネルギー分解能は約 2.4keV (FWHM@22.1keV) と実用には不十分なレベルにあり、改善が必要である。

2. 透過型 CCD メカニカルモデルの冷却試験

透過型 CCD はハイブリッドカメラの配置の都合上、外枠から CCD 全体を冷却する必要があり、中心まで十分に冷却できるかどうかは重要な問題である。そこで CCD を模したメカニカルモデルを製作し熱的な試験を行なった結果、問題のない冷却が可能であることを示した。

3. 機械式冷凍機の駆動試験

NeXT 衛星では CCD の冷却に機械式冷凍機の使用を検討しているが、日本の X 線グループは使用経験がない。そこで真空中でも使用可能な機械式冷凍機を住友重工社から購入し CCD の冷却試験を行なった。CCD は十分に冷却できたが、冷凍機の動作中に CCD のエネルギー分解能が大幅に悪化する問題が生じた。電源ドライバがノイズ源であることを突き止め、電源系を交換したところ CCD に及ぼす影響は皆無となり、懸念されていた冷凍機自体の電気ノイズや振動の影響がないことを示した。

目次

第 1 章	X 線検出器	4
1.1	X 線、電子と物質の相互作用	4
1.1.1	X 線と物質の相互作用	4
1.1.2	電子と物質の相互作用	5
1.2	X 線検出器	5
1.2.1	比例計数管	5
1.2.2	シンチレーター	5
1.2.3	マイクロチャンネルプレート	6
1.2.4	カロリメータ	6
1.2.5	半導体検出器	6
1.2.6	X 線 CCD	7
第 2 章	X 線 CCD の原理	8
2.1	X 線 CCD の基本的構造	8
2.1.1	MOS 構造	8
2.1.2	空乏層	10
2.1.3	埋込チャンネル型 CCD	10
2.2	電荷の転送	11
2.2.1	転送の原理と駆動方式	11
2.2.2	電荷転送方式	12
2.3	電荷の読出	13
2.3.1	電荷読出口の構造	13
2.3.2	電荷読出方式	14
2.4	CCD の性能を決める様々な因子	15
2.4.1	CCD のエネルギー分解能	15
2.4.2	読出ノイズ	16
2.4.3	暗電流	16
2.4.4	電荷転送非効率	17
2.4.5	Spurious Charge	17
第 3 章	CCD データ処理	18
3.1	CCD の出力イメージ	18
3.2	X 線イベント検出方式	19
3.2.1	グレード判定方式	19
3.2.2	フィッティング方式	21
3.3	性能の指標	21

3.3.1	読出ノイズ	21
3.3.2	暗電流	22
3.3.3	電荷転送非効率 (CTI)	22
3.3.4	Spurious Charge	23
第 4 章	透過型 CCD メカニカルモデルの性能評価	24
4.1	次期 X 線天文衛星搭載用ハイブリッドカメラの概要	24
4.2	透過型 CCD メカニカルモデルの厚さ測定	26
4.2.1	連続 X 線を用いた測定	29
4.2.2	輝線を用いた測定	30
4.3	透過型 CCD メカニカルモデルの冷凍試験	35
4.4	透過型 CCD の冷凍に関する理論的な考察	36
第 5 章	N 型 CCD の性能評価	39
5.1	N 型 CCD	39
5.2	国立天文台での予備実験	41
5.2.1	空乏層厚の測定原理	41
5.2.2	線源強度測定	41
5.2.3	X 線照射試験	42
5.3	京都大 N 型 CCD 駆動システムの整備	48
5.3.1	汎用 CCD 性能評価用真空槽	48
5.3.2	クロック作成回路	49
5.3.3	前置増幅回路 (CCD マウント基板)	51
5.3.4	増幅・積分回路	52
5.4	機械式冷凍機を用いた冷凍試験	55
5.4.1	冷凍能力	56
5.4.2	冷凍機によるノイズ	58
5.5	性能評価と最適化	64
5.5.1	手順	64
5.5.2	動作が確認されている駆動電圧の比較	64
5.5.3	縦転送クロックの最適化	67
5.5.4	横転送クロックの最適化	68
5.5.5	縦転送クロック立下時間との相関	69
5.5.6	横転送クロック立上時間との相関	70
5.5.7	クロック最適値	72
5.6	空乏層厚測定	72
5.6.1	駆動電圧の決定	72
5.6.2	蓄積電圧と空乏層厚の関係	75
第 6 章	まとめ	78

第1章 X線検出器

天体からの情報は主に電磁波という形態で、我々との間にある星間空間を伝播しもたらされるが、人間がその目で捉えられる帯域は唯だ可視光に限られる。そこで直接には見ることの出来ないX線を検出するために、我々は物質との相互作用を介してもたらされる電気情報等を利用する。本章では、まずX線検出の原理について述べた後、種々の実用化されているX線検出器について解説する

1.1 X線、電子と物質の相互作用

1.1.1 X線と物質の相互作用

X線が物質中に入射すると(1)光電吸収、(2)コンプトン散乱、(3)電子対生成の3つの素過程で相互作用を起こす。これらの相互作用は、入射X線のエネルギー、相互作用する物質の原子番号により断面積が異なるが、図1.1に示すように我々が今後扱うX線領域(0.1~20keV)では光電吸収が支配的となる。

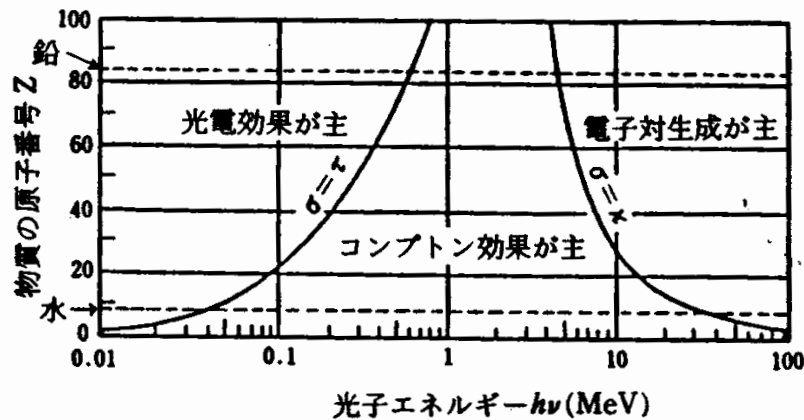


図 1.1: エネルギー $h\nu$ の X 線が原子番号 Z の物質に入射した時支配的になる相互作用 [1]

光電吸収とは、入射 X 線が軌道電子と相互作用を起こし、全エネルギーを電子に与え原子を電離することで、吸収される現象であり、以下の特徴を持つ。

1. X 線エネルギーを $h\nu$ 、軌道電子の殻のポテンシャルを I として電子は $h\nu - I$ の運動エネルギーを持つ。
2. 光電吸収は原子核の束縛が強いほど断面積が大きく、逆に自由電子ではこの効果が起こらない。そのため十分なエネルギーを持った X 線に対しては K 殻電子が光電吸収に寄与する割合が最も高い。

3. 断面積は、吸収体の原子番号 Z の約 5 乗に比例し、入射 X 線のエネルギーの約 3.5 乗に反比例する ($\sigma_{ph} \sim Z^5(h\nu)^{-3.5}$)。

1.1.2 電子と物質の相互作用

X 線が物質中で光電吸収を起こすと原子から電子を剥離する。X 線検出器の多くは、更にこの電子と物質の相互作用を利用して入射 X 線の情報を得る。電子が物質中で起こす相互作用は (1) 電離、励起、(2) 制動放射である。

(1) は電子の持つ電場が物質中の原子の状態に影響を与え、軌道電子にエネルギーを与えることで、電子と原子を引きはがしたり (原子の電離)、原子全体を高いエネルギー状態に引き上げる (原子の励起) 現象である。

(2) は電子が原子核近傍をかすめた時、クーロン力により大きな加速を受け電磁波を放出する現象である。

両者の長さあたりエネルギー損失量 (dE/dx) の比は Bethe、Heitler らの近似式 [2] により、電子のエネルギーを E_0 [MeV]、物質の原子番号 Z 、添字 1 は電離・励起、添字 2 は制動放射を表すものとして

$$\frac{(dE/dx)_2}{(dE/dx)_1} = \frac{E_0 Z}{800} \quad (1.1)$$

と与えられる。この式から keV 程度の X 線と相互作用し、叩き出された電子はほぼ (1) の素過程で相互作用すると考えて良い。

1.2 X線検出器

1.2.1 比例計数管

容器中に Ar などの不活性ガスを詰めておき、入射した X 線と光電吸収を起こした際に生ずる電子、イオン対の量を計測する。図 1.2 のように芯線に高電圧をかけておくと軸対称に電場が発生し、電子が中心方向に加速を受ける。中心付近の強烈な電場により十分な運動エネルギーを得た電子は原子を電離し、生じた電子が新たに運動エネルギーを得て別の分子を電離する。このプロセスを雪崩的に繰り返すことで信号を増幅し、芯線から読み出された電荷量から入射 X 線エネルギーを計測する。吸収体にガスを使っているため軽量かつ大面積化が容易で、また安定した動作が保証されるため初期の X 線天文衛星から現在に至るまで良く用いられている。しかしガス増幅率の不安定性からエネルギー分解能は悪く、それ自身では空間分解能を持たない。

1.2.2 シンチレーター

X 線入射により叩き出された電子により物質中の原子が励起されるが、これが基底状態に落ち着くまでの緩和現象として発生する光を光電子増倍管で捉えることにより X 線を検出する。光量が大きく、光電子増倍管に適した波長の光を出すことが望ましい。また光電吸収は Z^5 に比例するため原子番号の大きいものが良い。シンチレーション光の減衰時間は非常に早く、他の検出器に較べ時間分解能に優れる。硬 X 線検出器として Astro-E2 に搭載される (HXD)。

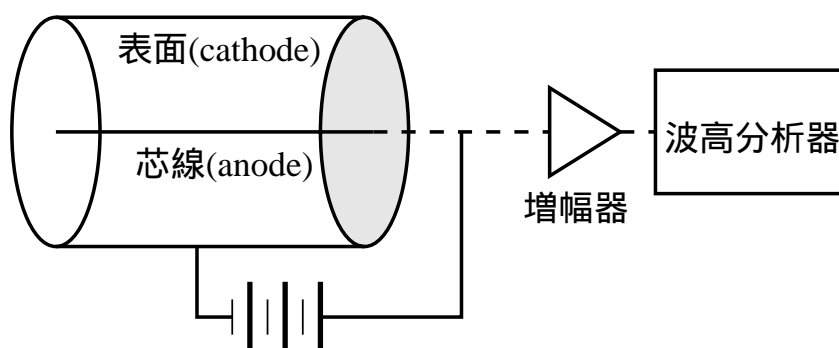


図 1.2: 比例計数管の原理

1.2.3 マイクロチャンネルプレート

入射 X 線によって発生する光電子を多数個束ねた光電子増倍管で検出する。エネルギー分解能はもたないが、空間分解能、時間分解能共に優れ、ROSAT 以降多くの高空間分解能ミッションで用いられる。

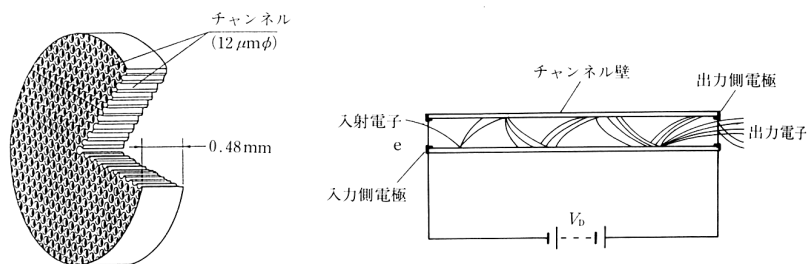


図 6・23 マイクロチャンネルプレートの構造と原理

図 1.3: マイクロチャンネルプレートの原理 [3]

1.2.4 カロリメータ

物質に与えられたエネルギーによる微小な温度変化により入射 X 線を検出する。エネルギー分解能は入射エネルギーに依存せず、素子内のフォノン数の揺らぎで決まり、極低温に冷却することで飛躍的に向上する (表 1.1)。Astro-E2 に初めて搭載される (XRS)。

1.2.5 半導体検出器

半導体中の空乏層に X 線が入射し光電吸収が起こると、価電子帯の電子がエネルギーを獲得しバンドギャップを超え伝導帯に達することで電子 - 正孔対が形成される。入射 X 線エネルギーに比例した個数だけ対が生成されるため、X 線エネルギー測定が可能である。またガス計測器に較べ生成される電子の個数が多いので、相対的な揺らぎが小さく抑えられエネルギー分解能は格段に良くなる。

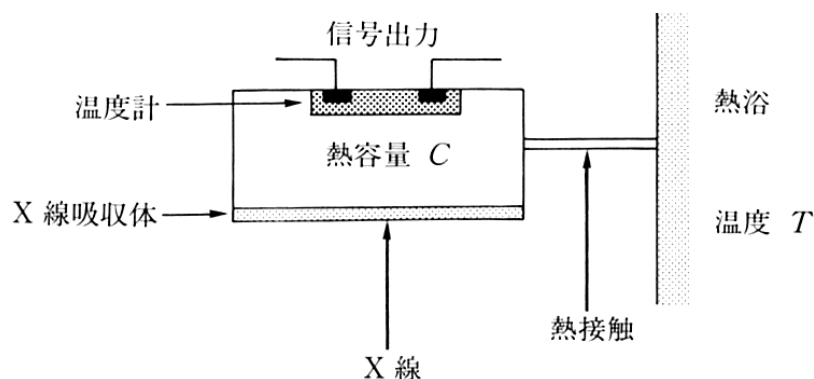


図 6・24 X線ボロメータの模式図

図 1.4: カロリメータの原理 [3]

1.2.6 X線 CCD

半導体検出器を array 状に分割し、位置分解能を持たせた検出器である。X線入射により空乏層内で生じた電子・正孔対を内部に印加した電場で電極に集め、順次転送して読み出す。もともと電荷を転送できる素子として開発されたため電荷結合素子 (Charge Coupled Device) と呼ばれる。表 1.1 に示すように高エネルギー分解能と高空間分解能を持つ上、エネルギー帯域、時間分解能も良好であり大きな弱点がないのが特徴である。ASCA 以降多くの X線天文衛星で採用されている。詳細は次章で述べる。

	帯域 [keV]	エネルギー分解能	位置分解能	時間分解能
比例計数管	0.04–40	18% at 6keV	–	10 μ sec
シンチレーター	>1	78% at 8keV	–	1nsec
半導体検出器	0.2–100	2.5% at 6keV	–	10 μ sec
マイクロチャンネルプレート	0.01–10	–	20–100 μ m	10 μ sec
カロリメータ	0.5–20	0.2% at 6keV	1mm	10msec
X線 CCD	0.04–40	2.5% at 6keV	10–20 μ m	100msec

表 1.1: 各検出器の性能比較 [3]

第2章 X線CCDの原理

2.1 X線CCDの基本的構造

2.1.1 MOS構造

MOS構造とは、表面電極の金属 (Metal)、絶縁層である酸化物 (Oxide)、半導体 (Semiconductor) の順番で並べた半導体デバイスの構造である。それぞれの頭文字をとって MOS 構造といわれる。本論文で用いた浜松ホトニクス社製 Pch CCD は、電極はポリシリコン、絶縁層は SiO_2 、半導体は N 型半導体 (Si) を用いた MOS 構造 (図 2.1) を取る。

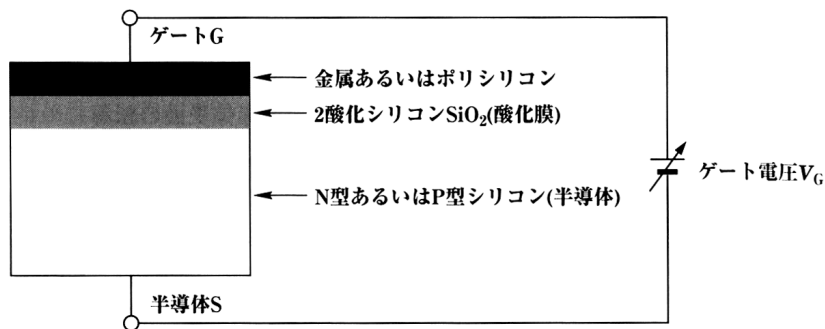


図 2.1: MOS 構造 [4]

MOS 構造は表面にかかる電圧によって (1) 蓄積 (2) 空乏 (3) 反転、の 3 状態をとる (図 2.2)。

- 蓄積

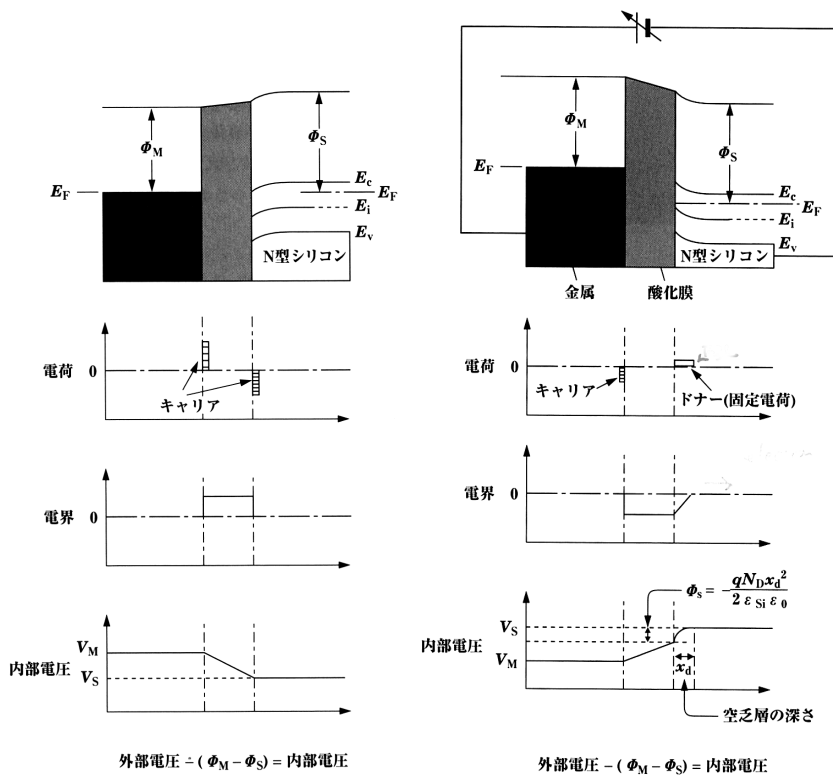
表面電極に正電圧を印加すると N 型半導体の多数キャリアである電子が電極に集められる、即ち蓄積した状態となる

- 空乏

表面電極に負電圧を印加すると、電子が表面から排除され、多数キャリアが少ない、即ち空乏した状態となる。

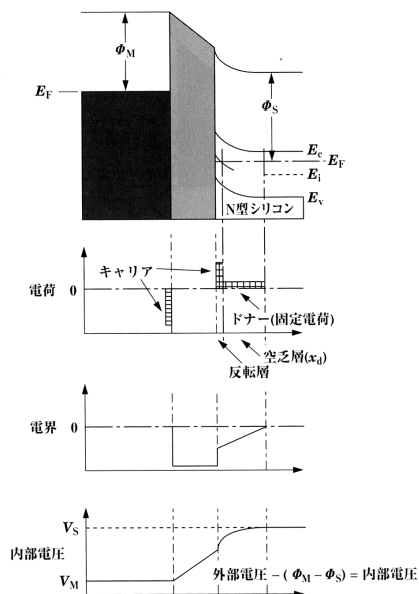
- 反転

表面電極の負電圧を更に小さく (電位差を大きく) していくと空乏領域は広がるが、あるところで成長が止まる。この状態を反転状態という。これは半導体表面に蓄積した電荷が電場を遮蔽することによって起こる。



(a) 蓄積

(b) 空乏



(c) 反転

図 2.2: N 型半導体のエネルギーバンド、電荷、電場、電位分布図 [4]

2.1.2 空乏層

N型半導体の空乏状態においては、キャリアである電子が排斥され、動きにくい正の電荷が取り残される。そしてこの電荷の偏りが電場を作り、それ以上の拡散を抑えることで平衡状態に達する。この領域に放射線が入射して作られた電子正孔対は電場により空乏層外に速やかに移動し、このキャリア数 (N型の場合正孔の数) を計測することで入射放射線の情報を得るのである。したがってこの空乏層の厚さが、検出効率を決めることになる。その空乏層厚 x_d は以下のように求められる。

空乏層全体でドナー電荷 (固定正電荷) が表れるとすると、ドナー濃度を N_D 、単位電荷を q として

$$Q_s = +qN_Dx_d \quad (2.1)$$

の電荷が半導体表面に表れ、この時半導体表面から内部にかけて電位 ϕ が発生する。半導体の深さ方向に x 軸を取り、半導体表面 (酸化物との境界) を $x = 0$ とすると Poisson 方程式より、 ϵ_{Si} を Si の比誘電率、 ϵ_0 を真空の誘電率として、

$$\frac{\partial^2(\epsilon_{Si}\epsilon_0\phi(x))}{\partial x^2} = -qN_D \quad (2.2)$$

と表される。

境界条件として

- $x = x_d$ で電場は 0、即ち

$$\frac{\partial(\epsilon_{Si}\epsilon_0\phi(x_d))}{\partial x} = 0 \quad (2.3)$$

- $x = x_d$ で電位は 0(基準)、即ち

$$\phi(x_d) = 0 \quad (2.4)$$

を課すと式 2.2 は解けて

$$\phi(x) = \frac{-qN_D(x - x_d)^2}{2} \quad (2.5)$$

半導体表面の電位を ϕ_s とすれば、上式 (式 2.5) より空乏層厚 x_d は

$$x_d = \sqrt{\frac{-2\epsilon_{Si}\epsilon_0\phi_s}{qN_D}} \quad (2.6)$$

と求められる。

2.1.3 埋込チャネル型 CCD

上記構造ではポテンシャル井戸は酸化物界面に作られる。電荷はポテンシャル井戸に蓄積され転送される。したがって、界面に沿って転送されることになり、このタイプの CCD を表面チャネル型 CCD と呼ぶ。しかし界面トラップによる電荷損失が起こりやすいという欠点がある。

この短所を補うべく開発されたのが埋込チャネル型 CCD である。N型半導体と酸化物の間に P型半導体を積み重ね、この部分にポテンシャルの底を作る。このポテンシャル構造により信号電荷は半導体内部に蓄積され、界面トラップの影響を受けることなく転送でき、電荷

損失の割合が埋込チャンネル型に較べ格段に減る。本論文で用いた CCD は埋込チャンネルを採用している [5]。

2.2 電荷の転送

CCD は半導体検出器を格子上に並べた検出器であり、各ピクセルに入射した放射線の情報を持つ電荷を読み出し、順に並べ換えることによって位置情報を獲得している。ここでは CCD の電荷転送について解説する。

2.2.1 転送の原理と駆動方式

CCD は一般に各ピクセルに蓄えられた電荷を隣り合うピクセルに転送し、一つの読出口から順次電荷量を読み出す。縦方向の転送 (縦転送) と横方向の転送 (横転送) を組み合わせることにより 2 次元に並ぶピクセル配列からも一つの読出口で読み出し可能である。電荷転送は各ピクセルの電極にかかる電圧クロックを周期的に変化させ、転送したい方向に電圧勾配を作ることによって実現する。電圧勾配を作る方法は主に 2 通りある。

- 電極の複数化

一つのピクセルに電極を複数取り付け、独自に電圧を制御することで、電圧勾配を作る。クロックパターンが複雑になるが、自由な転送が可能である。

- 不純物の添加

一つのピクセルに空間勾配を持たせて不純物を添加し、電圧勾配を作る。電極が一つで済むのでクロックパターンは単純になるが、転送方向に制限がある。

こうして実現した電圧勾配により電荷転送を行なう。本論文で用いた CCD の電荷転送は両者を組み合わせた 2 相方式と呼ばれる方法が採用されている。

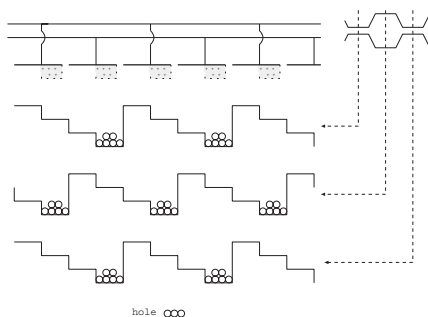


図 2.3: 2 相方式の電荷転送

図 2.3 に示すように 1 ピクセルに独立に電圧を変えられる 2 つの電極があり、さらに各電極には不純物が添加されている。図 2.3 のような電圧のパターン (クロックという) により、CCD 内のポテンシャルが周期性をもって変化し電荷が転送される。

比較のため、他の駆動方式を紹介する。

- 単相方式

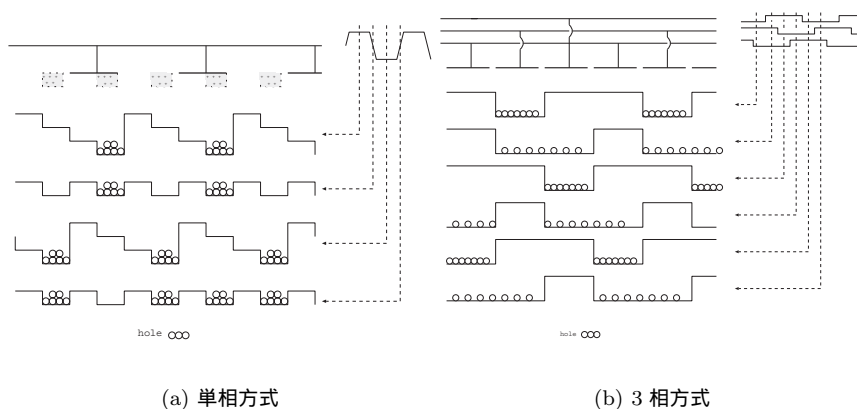


図 2.4: (a) 単相方式 (b) 3 相方式の電荷転送

図 2.4(a) に示すように 2 相方式の二つの電極のうち片方を外した構造をとる。電圧のかけ方は制限されるが、ピクセルの半分には電極がないため、電極を透過できないような低エネルギー X 線に対する感度が上がる。

- 3 相方式

図 2.4(b) に示すように 1 ピクセルにつき 3 つの電極を取り付ける。不純物の添加は不要であり、クロックにより転送方向を自由に変えられる。

2.2.2 電荷転送方式

現在実用化されている CCD の転送方式は主に以下の 3 つである (図 4.10)。

1. フレームトランスファ型 (FT: Frame Transfer)

放射線を受ける受光部と、遮光された同じサイズの蓄積部からなる。露光後、受光部の電荷はまず蓄積部に垂直転送される。蓄積部の電荷はその後 1 列ずつ読み出されるが、その間、受光部では露光が可能である。露光時間のロスが少なく、垂直転送は十分早い (受光部のサイズを $N \times N$ [pixel] とすれば読出時間に比べ垂直転送時間は $1/N$ で済む) のでシャッターが不要というメリットがあるが、CCD のほぼ半分が蓄積部になるため有効面積は小さくなるデメリットがある。

2. フルフレームトランスファ型 (FFT: Frame Transfer)

FT 型の蓄積部がない構造である。そのため有効面積を大きくできるメリットがある。反面、読出中の放射線入射の影響を抑える必要があり、露光時間を転送時間に比べ十分長くするか、遮光のためのシャッター機構が必要となるデメリットがある。

3. インターライントランスファ型 (IT: Interline Transfer)

受光領域の縦方向の 1 列毎に遮光された転送部を持つ。露光が終ると一度の横転送で転送部に送られ、転送部の電荷を読み出している間、受光部では露光が可能である。FT 同様のメリット、デメリットがある。一般に用いられている ITCCD の遮光部はアルミで遮光されているが X 線は透過してしまうので X 線検出器としては実用的でない。

本論文で用いた CCD は FFT 型である。ただし装置の都合上シャッターは取り付けしていない。

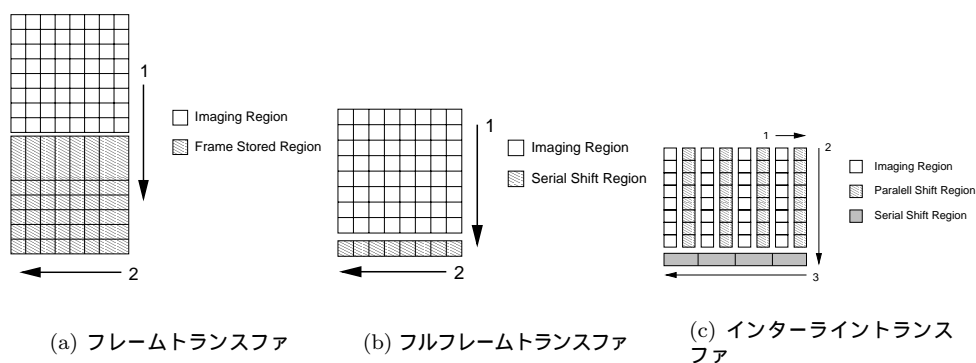


図 2.5: 各電荷転送方式の模式図

2.3 電荷の読出

2.3.1 電荷読出口の構造

上記方式で転送を経た電荷は最終的に読出口において信号電荷に対応した電圧に変換され出力される。CCD の電荷検出の方法として広く使われている方式に FDA(Floating Diffusion Amplifier) があり、本論文で使用した CCD も採用している。

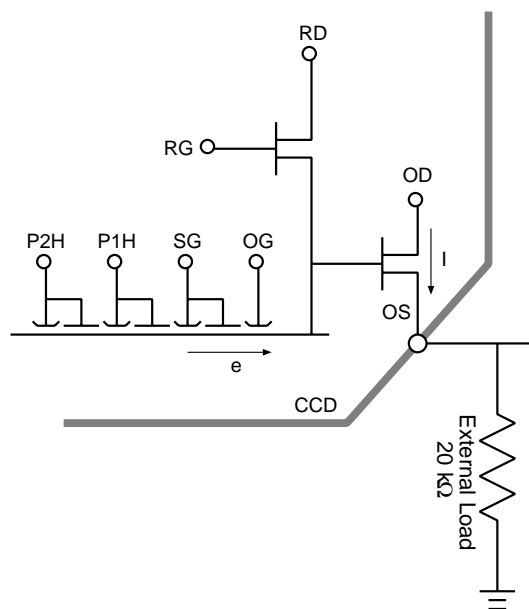


図 2.6: CCD 読出口の構造 (FDA 方式)

この方式での信号読み出しについて順をおって説明する (図 2.6 参照)。

1. SG-Low, RG-Low (Reset)

RG が Low になると MOSFET1 のドレイン電圧 (RD) とソース電圧 (読出口) が等電位となり、蓄積されていた電荷は RD 側に捨てられる。

2. SG-Low, RG-High (Floating Level)

SG からの電荷転送待ち状態となる。この時の読出口の電位を floating level と言う。

3. SG-High, RG-High (Signal Level)

SG から電荷が転送され、読み出し口の電位が上昇する。この時の読出口の電位を signal level と言う。これで1ピクセルの電荷量が読み出される。この後1に戻り、次ピクセルの信号読み出しに移る。

この結果 CCD の出力波形は図 2.7 のようになる¹。

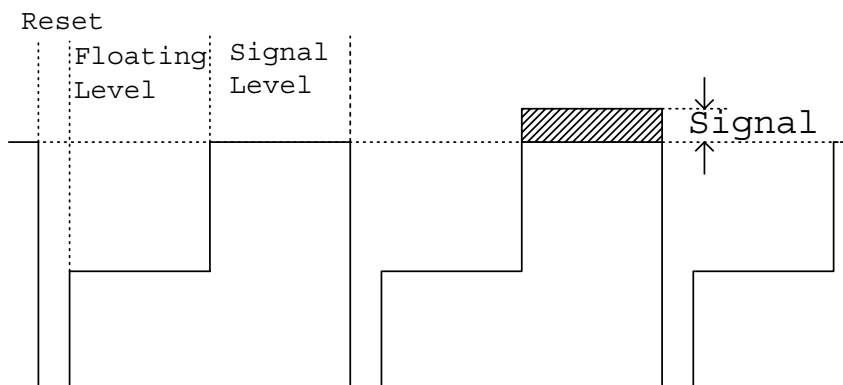


図 2.7: CCD の出力信号

2.3.2 電荷読出方式

上で述べたように各ピクセルの蓄積電荷は floating level と signal level の差に反映される。本節ではこの差を検出するための方式について述べる。

1. 遅延方式

出力信号を2つに分け、一方の信号を遅らせ、floating level と signal level が時間的に重なるよう調整しておく。その後両者の差分をとることにより差を ADC に出力する方式。

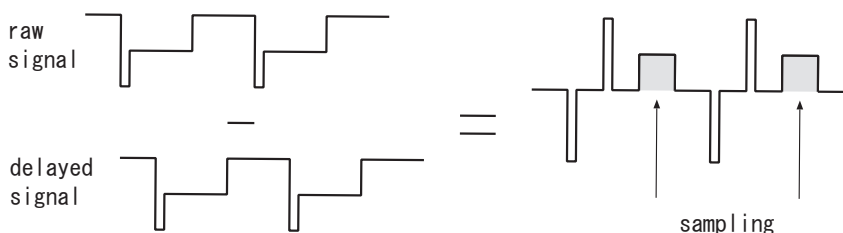


図 2.8: 遅延方式

2. 多重相関サンプリング方式

floating、signal 両レベルの値をそれぞれサンプリングしておいて ADC に通した後デジタル的に差分をとる方式。単純な回路系で済むがノイズを抑えるため多数回のサンプリングが必要であり、高速の ADC が必要となる。

¹P 型 CCD のそれとは逆であることに注意されたい

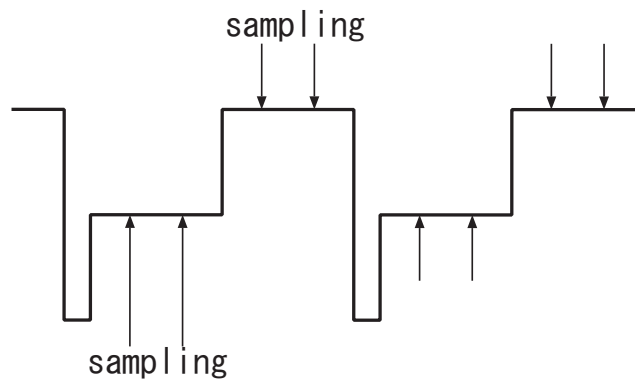


図 2.9: 多重相関サンプリング方式

3. 積分方式

floating、signal 両レベルを同じ時間ずつ積分することで両レベルの差に相当する量を得る方式。ランダムノイズの影響が抑えられ、高速の ADC も必要でないが、複雑な回路系が要求される。

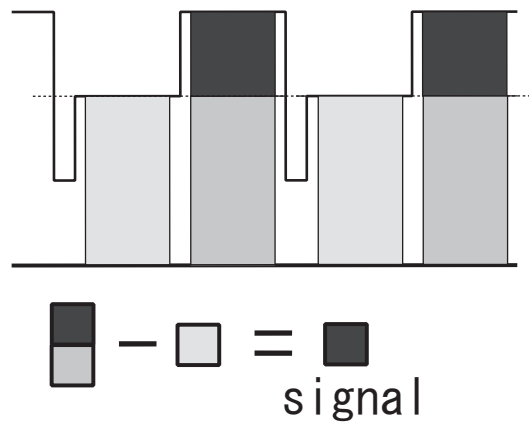


図 2.10: 積分方式

2.4 CCD の性能を決める様々な因子

2.4.1 CCD のエネルギー分解能

入射 X 線のエネルギーは、空乏層中で生成された電子-正孔対の個数を測定することで決定される。したがってエネルギー分解能はこの個数がどの程度の精度で測定されるか、によって決まる。

空乏層に X 線が入射すると光電吸収により一次電子が叩き出され、その飛跡に沿って電子-正孔対が生成される。一つの電子-正孔対を作るのに必要なエネルギーを W 、入射 X 線のエネルギーを E とすると生成される電子-正孔対の個数は E/W 個となる。Si の場合 $W = 3.65\text{eV}$ なので、たとえば $5.9\text{ keV}(\text{MnK}\alpha)$ の X 線が入射すると約 1600 個の電子-正孔対が生じることとなる。電子-正孔対の個数揺らぎは実験的にポアソン分布からのずれがあることが知られており [7]、Fano 因子 F を用いて、

$$\sigma = \sqrt{F \times \frac{E}{W}} \quad (2.7)$$

と補正される。 F は物質に固有の値で Si の場合 0.12 [7] である。

最終的に得られる電荷量は半導体自体に起因しないノイズを σ_{noise} として

$$\sigma = \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{noise}^2} \quad (2.8)$$

だけの標準偏差を持ったガウス分布になる。

本論文では以降、エネルギー分解能は半値幅で評価し、eV 単位で示す。式 2.8 だけの揺らぎを持つ場合、

$$\Delta E(FWHM) = \sqrt{8 \log 2} \times W \times \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{noise}^2} \text{ [eV]} \quad (2.9)$$

と換算される。 $\sigma_{noise} = 0$ の理想的な場合が CCD の原理的な分解能となり 5.9keV で約 120eV である。

2.4.2 読出ノイズ

読出ノイズとは CCD から信号を読み出す際に加わるノイズであり、原因としては

1. CCD の最終段 FET とそれにつながる CCD の浮遊容量に起因するノイズ
2. 横転送中の暗電流、Spurious Charge 等
3. 外部回路のノイズ

が挙げられる。(1) は CCD 自体の性能なので手出し出来ないが、(2)(3) は実験的に低減が可能である。

2.4.3 暗電流

CCD では光入力がない状態でも信号出力があり、それを暗電流と言う。主な発生原因は

1. 空乏化していない領域での熱励起とその拡散
2. 空乏層内の熱励起
3. 界面での表面準位による熱励起

が挙げられ、(3) がもっとも支配的である。界面の影響を低減するために MPP 動作 [5] を行なうと著しく暗電流が減少することが知られている。いずれも熱励起に起因するため、CCD の冷却が非常に効果的である。

2.4.4 電荷転送非効率

蓄積された電荷は 2.2.1 で述べたように逐一転送されるが、一度の転送で全て転送されずに取り残されることがある。電荷転送非効率はこの量を規定するもので一ピクセルあたり、即ち一度の転送で転送できない電荷数を示す。電荷転送中にトラップへの電子捕獲や再結合が起こり、電荷が失われるために起こる。

2.4.5 Spurious Charge

Spurious Charge は反転させて駆動させる CCD に起こる現象であり Janesick[6] らにより研究されている。CCD が反転状態にある時、多数キャリアである電子 (p 型 CCD ならば正孔) の一部分は酸化物界面に沿ってトラップされる。信号電荷が転送される時 CCD が非反転状態になるとこのトラップは逆方向の電場を受けて解放され、更に加速を受ける。この加速により衝突電離を起こすほどに大きいエネルギーを獲得すると空乏層内で新たな電子-正孔対を作り、信号電荷に混入する。Spurious Charge を減少させるには、トラップされた電子に大きなエネルギーを付与することになる電場の変化を小さくしてやれば良く

- (1) クロック電圧の差を小さくする
- (2) クロック電圧の立下を緩やかにする。

という方法が一般的である。

さらに電子が界面から放出されるまでには一定の時間がかかるので、

- (3) クロックの反転時間を短くする ~ 駆動周波数を早くする。

という手段もあるが、クロックを短くすると (2) の立下時間も制限されるので両者のトレードオフになるだろう。

また衝突電離は低温ほど有効ゆえ

- (4) CCD を高温にする。

という方法もあるが、温度増は暗電流増につながるので (1) ~ (3) の手法で解決するべきである。

第3章 CCD データ処理

CCD の出力信号は X 線入射により生成した電荷だけでなく、前章までで述べたような様々な過程でオフセットやノイズを含んだ状態で ADC を通りデジタル化され計算機に取り込まれる。本章では得られたデジタル情報から

1. X 線イベントを検出する方式
2. CCD 性能を評価する諸量を測定する方式

について述べる。

3.1 CCD の出力イメージ

CCD から読み出された各ピクセルの出力信号を 2 次元に配置し直すことで、CCD が撮像したイメージを再構成できるが、一般に転送回数を CCD の総ピクセル数より多くとること(オーバークロックという)で CCD の性能評価に必要な情報を得ることが出来る(第 3.3 節で述べる)。

一般に図 3.1 のように、水平転送、垂直転送ともに一定の空読み回数を課して撮像 (Active) 領域と Horizontal-overclocked(HOC) 領域、vertical-overclocked(VOC) 領域からなるイメージを取得する。

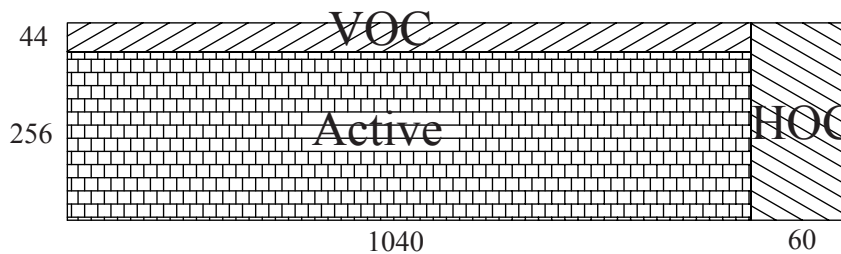


図 3.1: CCD 出力イメージの模式図。ピクセル数 1040×256 の CCD に水平方向、垂直方向にそれぞれ 160,44 ピクセル分のオーバークロックを加えて取得したものである。

3.2 X線イベント検出方式

はじめに CCD 出力に含まれる、暗電流や spurious charge などにより X 線が入射していなくても存在する信号出力 (ダークレベル) を差し引いて、各ピクセルの出力 (波高値) を決定する。ダークレベルは複数の取得イメージを集積し、平均化することで決定する [9]。

次に各ピクセルの波高値から X 線と CCD が相互作用して検出された X 線イベントを検出する。X 線は CCD 中で光電効果を起こし、エネルギーに比例した電子-正孔対を形成する。しかし正孔 (電子) 群は拡散によって CCD 表面に達するまでに拡がり、複数のピクセルに跨ることがある。そのため単純にイベント閾値を決め、それを越えたピクセルをイベントと認定する手法では電荷を読み落とし、正しく入射 X 線のエネルギーを再現できないことがある。したがって、閾値を越えたピクセルに、電荷が洩れだしたピクセルの波高値を足し合わせることで一つのイベントを再現する必要がある。本節では現在一般に用いられている方式について述べる。

3.2.1 グレード判定方式

グレード判定方式は ASCA、Astro-E2 搭載 X 線 CCD に採用されており、X 線検出法において標準的な形式である。以下のプロセスにより X 線が検出される。

1. 波高値がイベント閾値を越えたピクセルを選び出す。更にそのピクセルがその周りの 3×3 ピクセルの波高値の中で最大の時、それをイベントとして認定する。
2. 周囲 8 ピクセルのうちスプリット閾値を越える波高値を持つものを選び出す。スプリット閾値以下の波高値はノイズ成分として以降扱わない。
3. イベント閾値を越えたピクセルとスプリット閾値を越えたピクセルの位置関係からイベントにグレードをつける (図 3.2)。
4. グレードにしたがってイベントを抽出する。一般的にはグレード 02346 を X 線に起源を持つイベント (X 線イベント) とし、それ以外のイベントはバックグラウンド (荷電粒子など) と判定する。
5. グレードに従って波高値を足し合わせて (スプリット閾値を越えても加算されないピクセルもある)、X 線イベントの全エネルギーとする。

この方式はロジックが単純なためデータ処理にかかる時間が少なく、簡単に入射 X 線のエネルギーを見積もることができる。また X 線以外のイベントを除く background reduction の意味もある。しかし一方で、

1. 3×3 以上に拡がったイベントが検出できない。現在よりピクセルサイズが小さい CCD には適用できない。更に複雑なグレード判定が必要になりメリットが失われる。
2. 周囲に洩れだした電荷量のうちスプリット閾値を越えないものは加算されないので入射エネルギーを正しく再現できない場合がある。とくにノイズが大きい場合はスプリット閾値を高めにとる必要があり影響が大きい。またスプリット閾値には物理的な根拠がなく経験に頼らざるを得ない。

といった弱点がある。

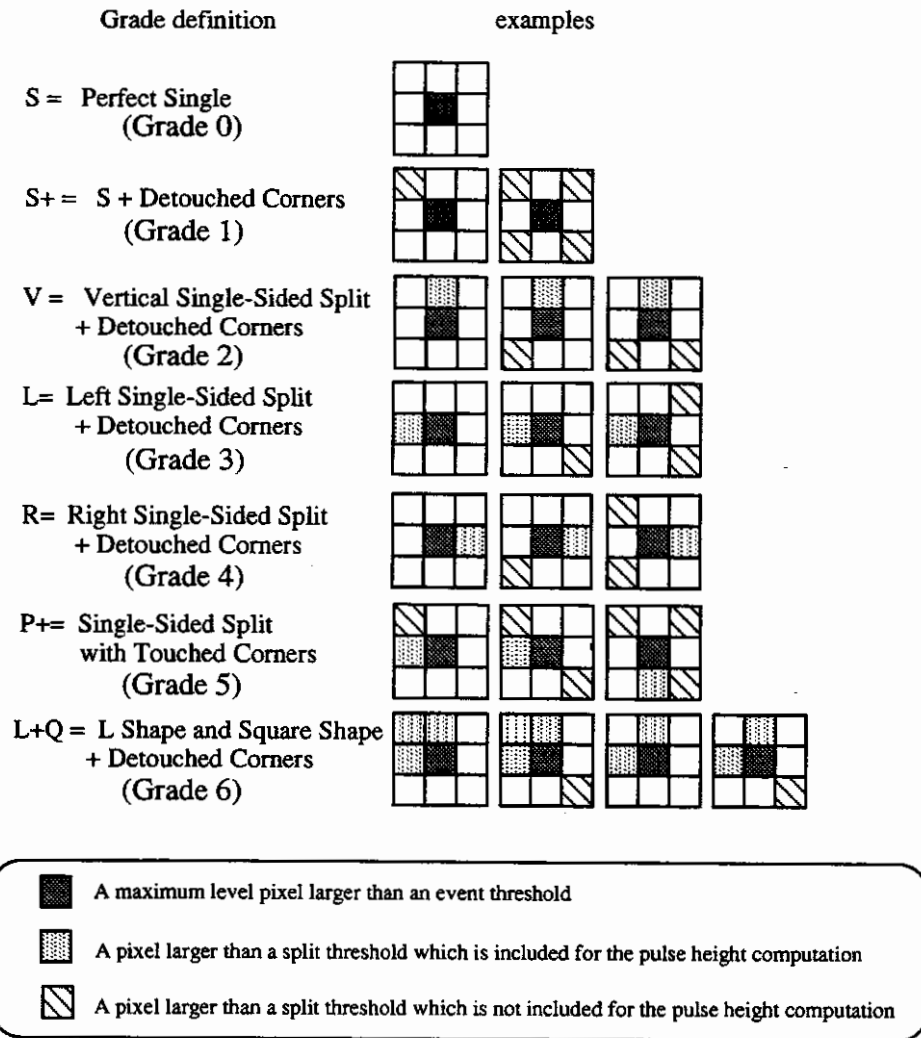


図 3.2: グレード判定法による分類

3.2.2 フィッティング方式

イベント閾値を越えたピクセルを中心に周囲のピクセルの波高値を2次元ガウシアンでフィッティングして、その積分値を以ってそのイベントの全波高値とする手法 [8] である。

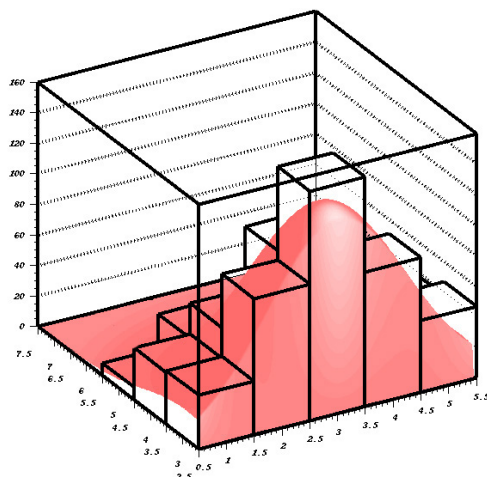


図 3.3: フィッティング方式による電荷量測定

この手法は (1) 広がったイベントが取得でき、(2) スプリット閾値の設定が不要であるので、グレード方式の弱点を補っている。一方でグレード法に較べフィッティングに時間がかかるという弱点がある。

3.3 性能の指標

本節では 2.4 節で述べたような CCD の性能を決める指標を、CCD の出力信号から決める手法について述べる。特記のない限り以降の章で行なった性能評価はこの手法に基づく。

CCD のイメージに現れる各領域は、

- Active 領域...読出ノイズ (横転送)+Spurious Charge(縦転送)+CTI(縦転送)+暗電流 (露光)
- VOC 領域...読出ノイズ (横転送)+Spurious Charge(縦転送)
- HOC 領域...読出ノイズ (横転送)

といったノイズにさらされている。これらの性質を調べたり、差をとったりすることで個別の性能指標を求めることが出来る。

3.3.1 読出ノイズ

読出ノイズは蓄積や転送を出来るだけ行っていない部分でのピークの広がりで見ることが出来る。ここでは HOC 領域の標準偏差 σ を読み出しノイズとして評価する。

$$\begin{aligned} (\text{読み出しノイズ}) = & (\text{HOC 領域 0 ピークの標準偏差}) \\ & \times \frac{(\text{1チャンネルあたりのエネルギー})}{3.65 \text{ eV}} \quad [\text{electron}] \quad (3.1) \end{aligned}$$

3.3.2 暗電流

読み出しノイズ、転送ノイズなどから暗電流だけを取り出して評価するために、VOC 領域と Active 領域の 0 ピークの中心チャンネルを比べる。この二つの領域は蓄積したかどうか異なるだけなので、その差を暗電流として評価する。

$$\begin{aligned} (\text{暗電流}) \\ = & \frac{(\text{VOC 領域 0 ピークの中心チャンネル}) - (\text{Active 領域 0 ピークの中心チャンネル})}{(\text{露光時間})} \\ & \times \frac{(\text{1チャンネルあたりのエネルギー})}{3.65 \text{ eV}} \quad [\text{electron/sec/pixel}] \quad (3.2) \end{aligned}$$

3.3.3 電荷転送非効率 (CTI)

電荷転送の際、電荷の取りこぼしがあると、読み出し口から遠いところのイベントほど多くの電荷を失い、その結果パルスハイトが低くなることが予想される。したがって、例えば図 3.4 のように Active 領域を 2×2 に分割し、それぞれの領域での X 線によるイベントのピークの中心チャンネルの変化を調べることで CTI が評価が出来る。

垂直方向の CTI (vertical CTI) については領域 1 と 3 および 2 と 4、水平方向の CTI (horizontal CTI) については領域 1 と 2 および 3 と 4、を比較することで求めることが出来る。

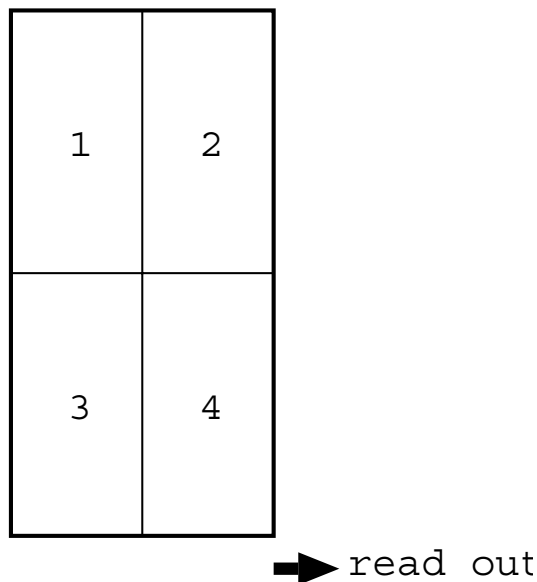


図 3.4: Active 領域の分割。

$$\text{CTI}_{\text{vertical}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\text{縦方向のピクセル数}} \left[\frac{(\text{peakchannel}(3) - \text{peakchannel}(1))}{(\text{peakchannel}(3))} + \frac{(\text{peakchannel}(4) - \text{peakchannel}(2))}{(\text{peakchannel}(4))} \right] [\text{pixel}^{-1}] \quad (3.3)$$

$$\text{CTI}_{\text{horizontal}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\text{横方向のピクセル数}} \left[\frac{(\text{peakchannel}(2) - \text{peakchannel}(1))}{(\text{peakchannel}(2))} + \frac{(\text{peakchannel}(4) - \text{peakchannel}(3))}{(\text{peakchannel}(4))} \right] [\text{pixel}^{-1}] \quad (3.4)$$

3.3.4 Spurious Charge

縦転送で発生する spurious charge を評価するためには縦転送の有無のみが問題になるので VOC 領域と HOC 領域の比較を行えばよい。

$$\begin{aligned} & (\text{Spurious charge}) \\ = & [(\text{VOC 領域 0 ピークの中心チャンネル}) - (\text{HOC 領域 0 ピークの中心チャンネル})] \\ & \times \frac{(1 \text{ チャンネルあたりのエネルギー})}{3.65 [\text{eV}]} \quad [\text{electron}] \quad (3.5) \end{aligned}$$

第4章 透過型 CCD メカニカルモデルの性能評価

4.1 次期 X 線天文衛星搭載用ハイブリッドカメラの概要

2010 年頃の打ち上げを予定している日本の次期 X 線天文衛星「NeXT」は、多層膜スーパーミラーを搭載予定であり、軟 X 線から約 50keV の硬 X 線まで集光する能力を持つ (図 4.1)。

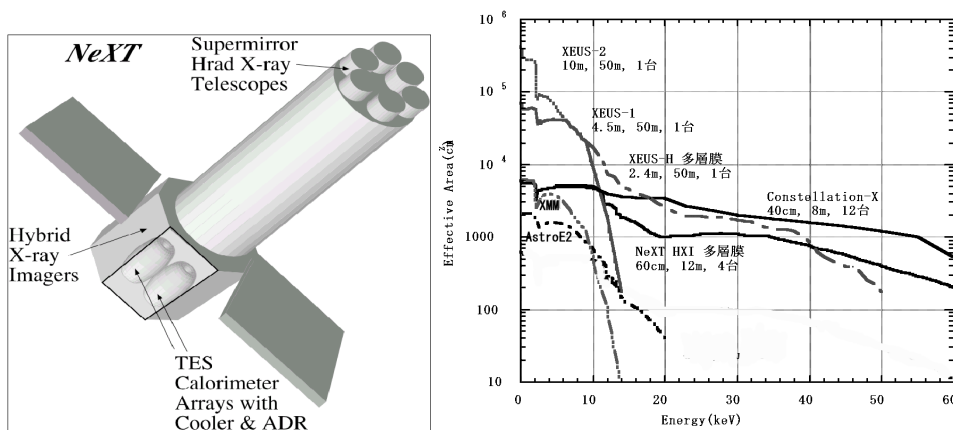


図 4.1: (左)NeXT 衛星の概観。(右)NeXT 衛星の有効面積。XMM、AstroE2 に比べ高エネルギー側の集光力が格段に高い。

NeXT の高エネルギー集光力を生かすために高エネルギーに感度を持つ検出器が要求される。そのための焦点面検出器として開発が進められているのがワイドバンド偏光検出型ハイブリッド X 線撮像分光器である (図 4.2)。本検出器は透過型 X 線 CCD と偏光検出型 X 線撮像分光器からなる。

透過型 CCD は入射面にアルミニウムの遮光コーティングを施した裏面照射型で、0.1keV という低エネルギーの軟 X 線まで検出する。一方空乏層厚は $300\mu\text{m}$ を目指しており、実現されれば 20keV、あるいはそれ以上まで撮像分光が可能になる (4.3 図参照)。さらに完全空乏化させた空乏層のみ残し不感領域とサポート構造を除いた構造にすることで、従来は CCD で検出が出来ず不感領域とサポート構造で吸収され無駄になっていた硬 X 線 (20keV 以上) を、そのまま透過させ下においた硬 X 線検出器である偏光検出型 X 線撮像分光器に入射させる。このような構造にすることで軟 X 線 (約 0.1keV) から硬 X 線 (約 40keV) という広い帯域で撮像分光と偏光検出が可能になるのである。

このハイブリッドカメラの中核を担う透過型 X 線 CCD の開発を我々は行なっている。本章では実用化に前だって透過型 X 線 CCD メカニカルモデル (図 4.4) を用いて行なった基礎実験について述べる。

メカニカルモデルは $30\mu\text{m}$ のシリコン板 (CCD に対応) を $300\mu\text{m}$ のアルミナイトライド

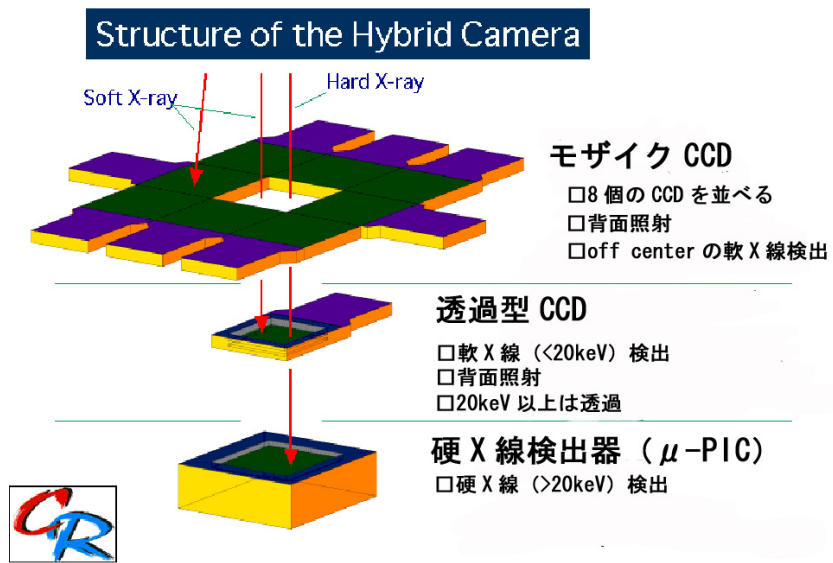


図 4.2: ハイブリッドカメラ概観。

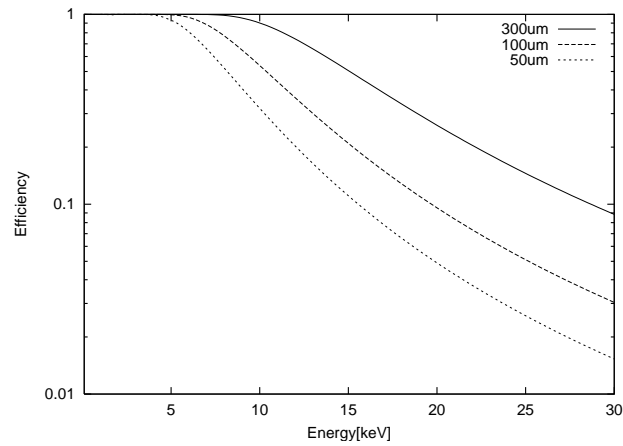


図 4.3: CCD の X 線検出効率。

(サポート構造)の上に固定したものである。また、熱的な試験を行なうために温度センサ (Pt1000Ω) を取り付けてある。

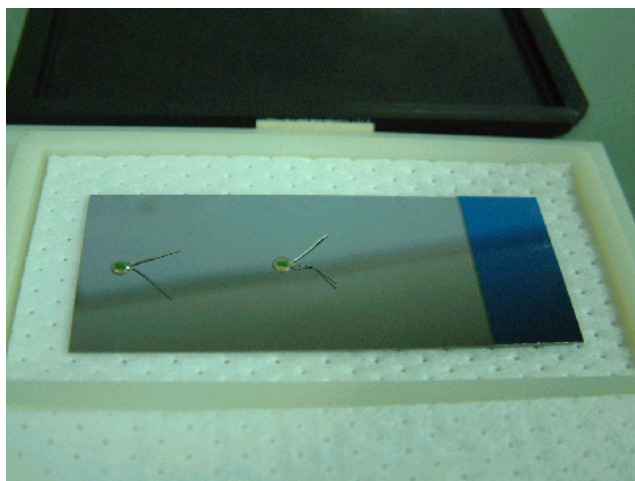


図 4.4: 透過型 CCD メカニカルモデル。シリコン板表面に温度センサ (Pt1000Ω) がある。

本モデルを用いて

1. 設計通りに加工されているかを確認するための厚さ測定
2. 冷凍試験

を行った。

4.2 透過型 CCD メカニカルモデルの厚さ測定

メカニカルモデルに X 線を照射し、入射 X 線の強度と透過 X 線の強度から吸収量を求め、以下の方法で厚さを推定する。

1.1.1 節で述べたように X 線が物質中で相互作用する時、そのほとんどは光電吸収である。吸収確率 (P) は、密度 (ρ)、質量吸収係数 (μ) 及び厚み (z) から、

$$P = 1 - e^{-\mu_{\text{Si}} \rho_{\text{Si}} z_{\text{Si}}} e^{-\mu_{\text{AlN}} \rho_{\text{AlN}} z_{\text{AlN}}} \quad (4.1)$$

と与えられる (添字 Si、AlN はそれぞれシリコン、アルミナイトライドを表す)。メカニカルモデルの材質は既知ゆえ、入射 X 線強度と透過 X 線の強度 ($1 - P$ に相当) がわかれば厚みの推定が可能である。

実験システム

実験システムの概略を図 4.5 に示す。

X 線源には KeveX 社製 X 線発生装置を用いた。この装置は、高電圧により加速された電子をタングステンのターゲットに照射し、電子の制動輻射による連続 X 線と 10keV 付近にタングステンの特性 X 線 (表 4.8) を発生する (図 4.7)。5keV 以下の強度の減衰は大気による吸収である。

X 線検出器は Ortec 社製 Ge 半導体検出器を用いた。実験に前だって ^{55}Fe と ^{109}Cd を照射して得られたスペクトルの各輝線をガウス関数でフィットして中心チャンネルを求めた。X 線工

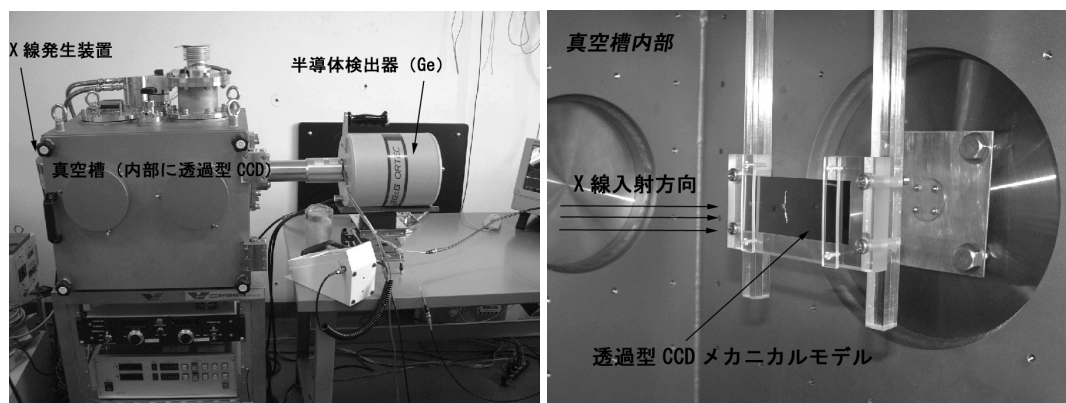


図 4.5: (左) 測定装置の外観。(右) 真空槽内部。透過 X 線は後ろ (図中右側) のコリメータを通った後、半導体検出器で検出される。

エネルギーと出力チャンネルの相関を示したのが図 4.6 であり、この相関から検出器のゲインを決定した。図中のデータ点は低エネルギーから順に $^{55}\text{FeK}\alpha$ 、 $^{55}\text{FeK}\beta$ 、 $^{109}\text{CdK}\alpha$ の GeK α エスケープ、 $^{109}\text{CdK}\alpha$ 、 $^{109}\text{CdK}\beta$ 、 $^{109}\text{CdK}\gamma$ を表す。本実験では全てここで決めたゲインを用いチャンネル-エネルギー換算を行なっている。

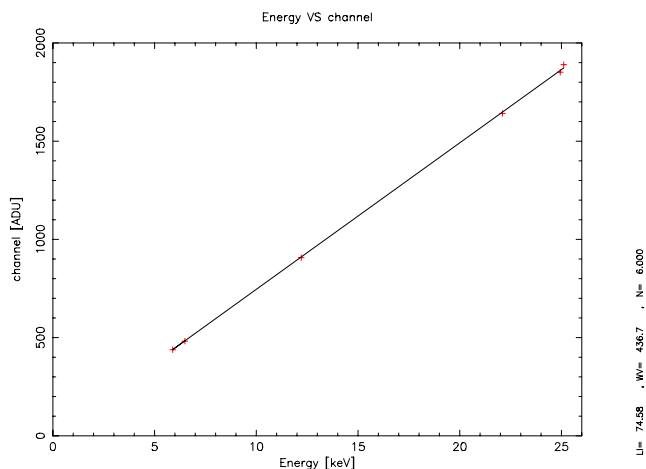


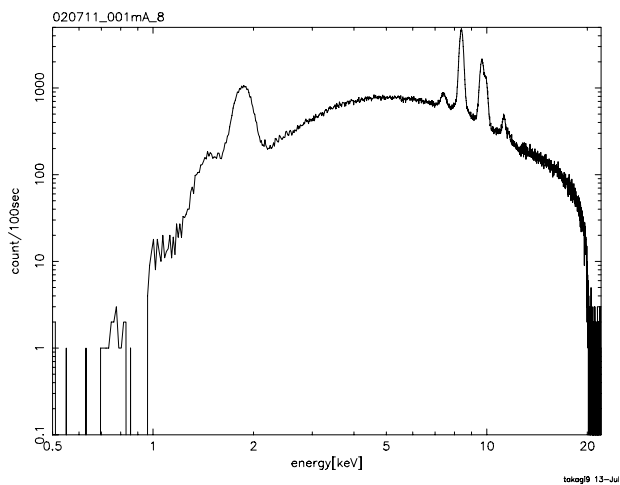
図 4.6: SSD 出力チャンネルと X 線エネルギーの関係。

この X 線をメカニカルモデルに照射し、透過 X 線強度を測定した結果、図 4.9(下段)のような吸収を受けたスペクトルが得られた。上段の入射 X 線との強度の差がメカニカルモデルの吸収量である。また 17keV 辺りに見える構造はイットリウムの吸収端である。

この両スペクトルから、

1. 連続 X 線を用いる方法
2. タングステン特性 X 線輝線を用いる方法

の 2 通りの方法で透過型 CCD の厚みを求める。



呼称	エネルギー [keV]
$W-L_{\alpha 1}$	8.389
$W-L_{\alpha 2}$	8.335
$W-L_{\beta 1}$	9.672
$W-L_{\beta 2}$	9.962
$W-L_{\gamma 2}$	11.286

図 4.8: タングステン特性 X 線のエネルギー

図 4.7: Ortec 社製 Ge 半導体検出器で得た Kevex 社製 X 線発生装置の X 線出力スペクトル。加速電圧:20kV、出力電流 0.01mA。

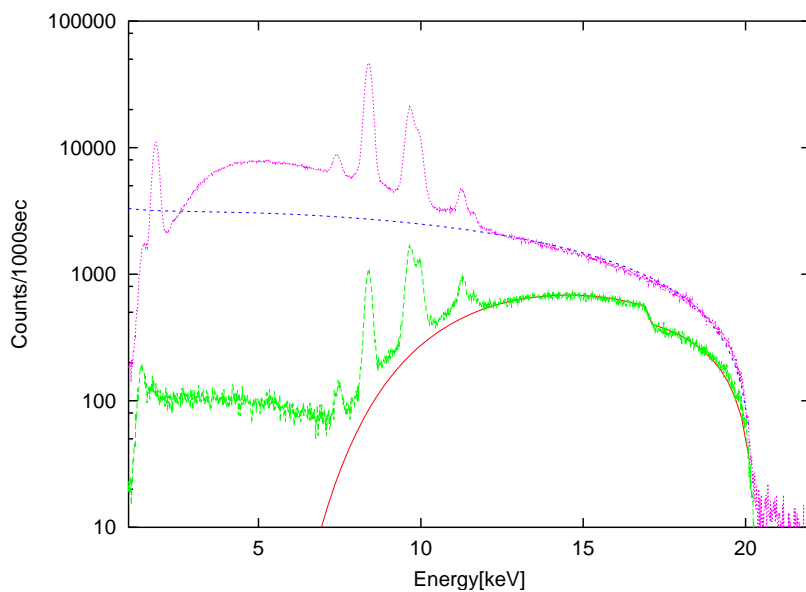


図 4.9: 入射 X 線 (上) とメカニカルモデルを通した透過 X 線 (下)。17keV 辺りに見える構造はイットリウムの吸収端である。

	質量柱密度 [g cm ⁻²]	密度 [g cm ⁻³]	厚さ (公称値) [μm]	含有比 (公称値) [%]
AlN	0.110	3.26	340(307)	–
Y	0.036	–	–	3.3(3.4)

表 4.1: 連続 X 線によるメカニカルモデル厚・組成測定結果

4.2.1 連続 X 線を用いた測定

測定手順

1. 入射 X 線のスペクトルを制動放射の理論曲線でフィットする。但し 12keV 以下はタングステンの特性線や大気による吸収等でずれが顕著になるため 12keV 以上のデータを用いる。
2. AlN とイットリウム の質量柱密度 (ρz に対応) をフリーパラメータとした吸収を上で求めた入射 X 線のモデルに乗じて透過 X 線のフィッティングを行ない、それぞれの質量柱密度を求める。Si は公称値通りの 30μm に固定する。これは Al と Si は原子番号が近く質量吸収係数にほとんど差がないためフィッティングでは区別できないからである。
3. AlN の質量柱密度を密度 (理論値) で割り、AlN 厚さを求める。

測定結果

上記手順でフィッティングした結果、図 4.9、表 4.1 の結果になった。AlN の密度を理論値である 3.26g/cm³ と仮定すると最尤値は厚み 340μm、イットリウムの含有比も約 3.3%となった。いずれも公称値に近い値であることが確かめられた。

number	CCD なし			CCD 有り			ID
	c (eV)	σ (eV)	N	c (eV)	σ (eV)	N	
1	7418_{-2}^{+3}	$111.9_{-3.0}^{+3.1}$	2588_{-53}^{+53}	7470_{-12}^{+12}	$92.96_{-12.27}^{+14.24}$	$57.19_{-6.81}^{+6.99}$	Ni-K α_1 (7478 eV) + Ni-K α_2 (7461 eV)
2	8392_{-1}^{+0}	$107.8_{-0.2}^{+0.3}$	40780_{-104}^{+105}	8390_{-1}^{+2}	$98.31_{-1.77}^{+1.79}$	$903.4_{-16.6}^{+16.7}$	W-L α_1 (8398 eV) + W-L α_2 (8335 eV)
3	9663_{-1}^{+2}	$123.0_{-1.1}^{+1.1}$	16123_{-96}^{+91}	9671_{-4}^{+4}	$115.1_{-3.1}^{+3.0}$	1307_{-21}^{+21}	W-L β_1 (9672 eV)
4	9952_{-3}^{+3}	$114.9_{-1.9}^{+1.9}$	7976_{-105}^{+105}	9962_{-6}^{+5}	$101.6_{-4.1}^{+5.4}$	$842.6_{-23.1}^{+22.7}$	W-L β_2 (9962 eV)
5	11260_{-0}^{+0}	$96.23_{-3.23}^{+3.05}$	1607_{-40}^{+41}	11272_{-0}^{+8}	$92.31_{-5.88}^{+6.41}$	$340.5_{-18.3}^{+18.4}$	W-L γ_1 (11286 eV)

表 4.2: Gauss 関数によるラインの フィッティング 結果。エラーは 90% 信頼区間。

4.2.2 輝線を用いた測定

測定手順

1. 特性 X 線を Gauss 関数で fit して、中心値、分散、normalization を求める。fitting は、特性 X 線の前後の区間を適当に切り出して、

$$y = ax + b + N \exp \left[-\frac{(x - c)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4.2)$$

の式を用いて行なう。最初の 2 項は DC 成分 (制動放射の成分) を表している。

2. $E = 17$ keV に吸収端が見えている。これは Y K 吸収端 (17.308 keV) と考えられる。この吸収の深さを使用すれば Y の含有量が求まるが、図からもわかるようにエッジは検出器の分解能によってなまされて、シャープではなくなっている。そこで、 $E = 18$ keV - 19 keV の範囲のカウント数の比較で Y の量を出す事にする。
3. メカニカルモデル中の Si、Al、N、Y、O の量を上で得られる方程式 (透過 = $(1 - \text{吸収}) \times \text{入射}$) から求める。

測定結果

タングステン特性 X 線のフィッティングにより得られた結果 (ガウス関数の部分のみ) を表 4.2 に示す。この結果を用いてラインの起源も再確認した。ラインの中心値を見てみると、CCD 無しの場合の Ge 検出器のゲインが若干ずれているように思われる。

この結果を元に、各ラインに含まれているカウント数 ($S = \sqrt{2\pi Nc}$) を求め、透過率 $T = S(\text{CCD 有り})/S(\text{CCD 無し})$ を求めた (表 4.3)。

一方、手順 (2) の Y 吸収端前後の X 線については表 4.4 のように求められる。

次に Si、Al、N、O、Y の量の光電吸収係数を調べ、吸収率を定式化する。

はじめに atomic scattering factor の表 [10] からを見て、表 4.2 の各ラインのエネルギーにおける係数 f_2 を調べる。このとき、直線内挿を使用して希望エネルギーでの f_2 を求めた (表 4.5)。

この係数 f_2 は、光電吸収断面積 σ とは次のように関係している。

$$\begin{aligned} \sigma &= 2 \times r_e \times \lambda \times f_2 \\ &= 6.9936 \times 10^{-17} \text{ cm}^2 \times \left[\frac{E}{1 \text{ eV}} \right]^{-1} \times f_2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

number	S (counts)		T
	CCD 無し	CCD 有り	
1	$(7.259 \pm 0.250) \times 10^5$	$(1.333 \pm 0.249) \times 10^4$	$(1.84 \pm 0.35) \times 10^{-2}$
2	$(1.102 \pm 0.004) \times 10^7$	$(2.226 \pm 0.058) \times 10^5$	$(2.02 \pm 0.05) \times 10^{-2}$
3	$(4.971 \pm 0.053) \times 10^6$	$(3.771 \pm 0.118) \times 10^5$	$(7.59 \pm 0.25) \times 10^{-2}$
4	$(2.297 \pm 0.049) \times 10^6$	$(2.146 \pm 0.117) \times 10^5$	$(9.34 \pm 0.55) \times 10^{-2}$
5	$(3.876 \pm 0.161) \times 10^5$	$(7.879 \pm 0.676) \times 10^4$	$(20.3 \pm 1.9) \times 10^{-2}$

表 4.3: 各ラインに含まれるカウント数およびその透過率。

エラーは 90 % 信頼区間。

カウント数		T
CCD 無し	CCD 有り	
40543 ± 201.4	20202 ± 142.1	0.498 ± 0.0043

表 4.4: $E = 18 - 19$ keV のカウント数、および透過率。エラーは 1σ 信頼区間。

Energy (eV)	Si	Al	N	O	Y
7461	0.3756	0.2796	0.02163	0.03961	2.393
7478	0.3740	0.2784	0.02153	0.03942	2.384
8335	0.3038	0.2257	0.01701	0.03127	1.976
8398	0.2994	0.2224	0.01674	0.03077	1.948
9672	0.2279	0.1689	0.01227	0.02269	1.487
9962	0.2151	0.1593	0.01150	0.02127	1.407
11286	0.1685	0.1245	0.008705	0.01619	1.129
18000	0.06623	0.04847	0.003006	0.005696	3.436
19000	0.05929	0.04333	0.002655	0.005042	3.160

表 4.5: 各元素の f_2 。

Energy (eV)	Si	Al	N	O	Y
7461	3.521	2.621	0.2028	0.3713	22.43
7478	3.498	2.604	0.2013	0.3687	22.29
8335	2.549	1.894	0.1427	0.2624	16.58
8398	2.494	1.852	0.1394	0.2563	16.22
9672	1.648	1.221	0.08875	0.1640	10.75
9962	1.510	1.119	0.08071	0.1494	9.881
11286	1.044	0.7717	0.05394	0.1003	6.994
18000	0.2573	0.1883	0.01168	0.02213	13.35
19000	0.2182	0.1595	0.009773	0.01856	11.63

表 4.6: 各元素の光電吸収断面積。単位は 10^{-21} cm^2 。

Energy (eV)	Si	AlN	O	Y
平均 7461, 7478	3.510	2.815	0.3700	22.36
平均 8335, 8398	2.522	2.015	0.2594	16.40
9672	1.648	1.310	0.1640	10.75
9962	1.510	1.200	0.1494	9.881
11286	1.044	0.8256	0.1003	6.994
平均 18000, 19000	0.2378	0.1846	0.02035	12.49

表 4.7: 解析に使用する各元素の光電吸収断面積。単位は 10^{-21} cm^2 。

ここで、 $r_e = 2.82 \times 10^{-13} \text{ cm}$ は古典電子半径、 λ はそのエネルギーの X 線の波長。この式に基づいて計算した光電吸収断面積を表 4.6 に示す。

Ni- $K\alpha_1$ と Ni- $K\alpha_2$ 、W- $L\alpha_1$ と W- $L\alpha_2$ は Ge 検出器では区別できないので、解析にはこれらのエネルギーでの断面積の平均値を使用する。また、18 – 19 keV の連続成分の解析にも、18 keV と 19 keV での断面積を平均した値を使用する事にする。このようにして求めた各元素の光電吸収断面積が表 4.7 である。

10^{21} cm^{-2} を単位とした各元素の柱密度を N で表すと、解くべき方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
& \exp(-3.510 \times N_{\text{Si}} - 2.815 \times N_{\text{AlN}} - 0.3700 \times N_{\text{O}} - 22.36 \times N_{\text{Y}}) \\
& \quad = (1.84 \pm 0.21) \times 10^{-2} \\
& \exp(-2.522 \times N_{\text{Si}} - 2.015 \times N_{\text{AlN}} - 0.2594 \times N_{\text{O}} - 16.40 \times N_{\text{Y}}) \\
& \quad = (2.02 \pm 0.03) \times 10^{-2} \\
& \exp(-1.648 \times N_{\text{Si}} - 1.310 \times N_{\text{AlN}} - 0.1640 \times N_{\text{O}} - 10.75 \times N_{\text{Y}}) \\
& \quad = (7.59 \pm 0.15) \times 10^{-2} \quad (4.4) \\
& \exp(-1.510 \times N_{\text{Si}} - 1.200 \times N_{\text{AlN}} - 0.1494 \times N_{\text{O}} - 9.881 \times N_{\text{Y}}) \\
& \quad = (9.34 \pm 0.33) \times 10^{-2} \\
& \exp(-1.044 \times N_{\text{Si}} - 0.8256 \times N_{\text{AlN}} - 0.1003 \times N_{\text{O}} - 6.994 \times N_{\text{Y}}) \\
& \quad = (20.3 \pm 1.2) \times 10^{-2}
\end{aligned}$$

N_{Si}	N_{AlN}	N_{O}	N_{Y}
0.15 (fix)	1.51 ± 0.01	0 (fix)	$(3.07 \pm 0.13) \times 10^{-2}$

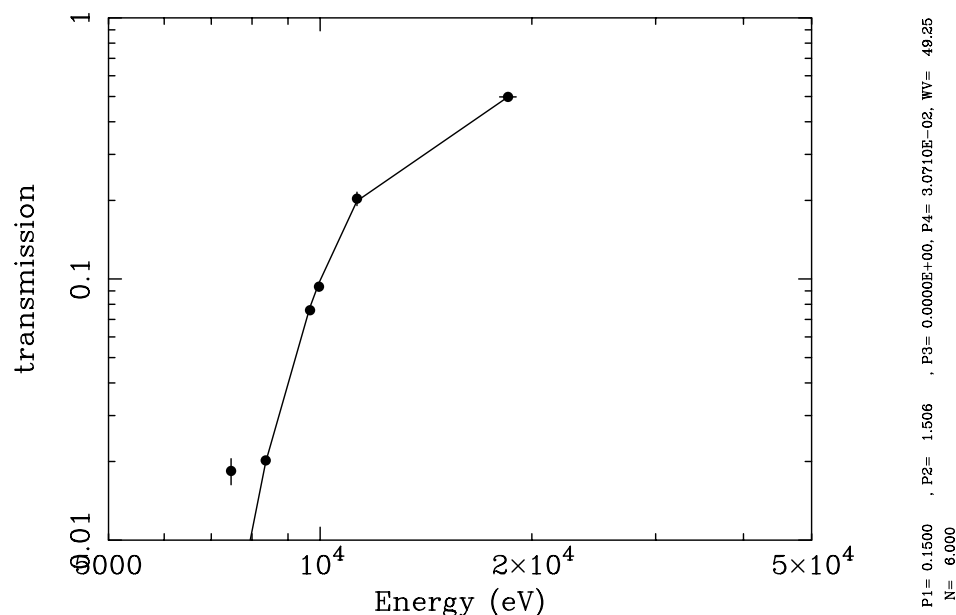
表 4.8: CCD に含まれる各元素の柱密度。 10^{21} cm^{-2} 単位。エラーは 90 % 信頼区間。

図 4.10: エネルギー vs 透過率関係。直線は、Ni ラインのデータ点を除いて、式 4.5 を用いた時のベストフィット。

$$\begin{aligned} \exp(-0.2378 \times N_{\text{Si}} - 0.1846 \times N_{\text{AlN}} - 0.02035 \times N_{\text{O}} - 12.49 \times N_{\text{Y}}) \\ = (49.8 \pm 0.43) \times 10^{-2} \end{aligned}$$

ただし、右側のエラーは 1σ 信頼区間に修正している。

これらを解析的に解くのは難しいので、エネルギー vs 透過率のグラフを作り (図 4.10)、そのデータ点を式 4.4 でフィッティングすることにより、解を求める。その際、おそらく Ni のラインは、半導体検出器前のコリメーターなどから出ており、CCD の組成を反映していないと思われるので、このデータ点は解析から除外した。

最初、 N_{Si} 、 N_{AlN} 、 N_{O} 、 N_{Y} を全てフリーパラメータとしてフィッティングを行なったが、うまく解が求まらなかった。 N_{O} がうまく求まらない理由は、O の含有量が少なく、またこのエネルギー範囲では断面積も小さいからである。そこで $N_{\text{O}} = 0$ に固定した。Si と Al の断面積が似ているので、 N_{Si} と N_{AlN} を独立に求める事も困難である。そこで、Si の層は公称値通り $30 \mu\text{m}$ であると仮定した。質量密度 ρ 、原子量 A 、厚さ l の物質の柱密度 N はアボガドロ数を N_A として、 $N = \rho l N_A / A$ と書けるので、

$$N_{\text{Si}} = (2.33 \text{ g cm}^{-3}) \times (3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}) \times (6.02 \times 10^{23}) / 28.1 = 1.50 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$$

となる。結局、フリーパラメータは N_{AlN} と N_{Y} のみにして、式 4.4 を用いてフィッティングを行なうと、次の結果が得られた (表 4.8、図 4.10)。

図 4.10 を見ると、Ni ラインのデータ点はベストフィット曲線からずれていることがわかる。これは Ni ラインは半導体検出器前のコリメーターなどからやってきて、正しく CCD の組成を

反映していないという仮定を裏付ける。

得られた N_{AIN} から AIN の厚みを計算してみると、 $\rho_{\text{AIN}} = 3.26 \text{ g cm}^{-3}$, $A_{\text{AIN}} = 41.0$ として、 $315 \pm 2 \text{ }\mu\text{m}$ となった。公称値 $300 \text{ }\mu\text{m}$ にかかなり近い値である。

Y は AIN に対し、質量密度にして 4.4 % 入っていることになり、公称値 3.4 % に近い。

4.3 透過型 CCD メカニカルモデルの冷凍試験

X線は可視光、赤外線などに比べエネルギーが非常に高いため、検出するためには CCD の空乏層厚を格段に大きくする必要がある。空乏層厚の増加は熱雑音の増加をもたらす。そこで通常 X 線 CCD は検出面に対し裏面に冷却装置を取り付けて -100°C 程度まで冷却して用いる。しかし、透過型 CCD は透過後に別の検出器があるため、遮蔽物となる冷却装置を背面にとりつけることが出来ず、外枠から冷却することになる。そのため CCD に中心部まで X 線 CCD として機能する程度まで冷却できるかどうか検証することは重要である。そこで、CCD 端を冷却した時、CCD 端と CCD 中心の温度差を調べる目的で以下の実験を行なった

実験システム

図 4.11 に示すように、冷凍器から伸びるコールドフィンガーと繋いだ銅板でメカニカルモデルの端を挟み、中心部との温度差を測定する。

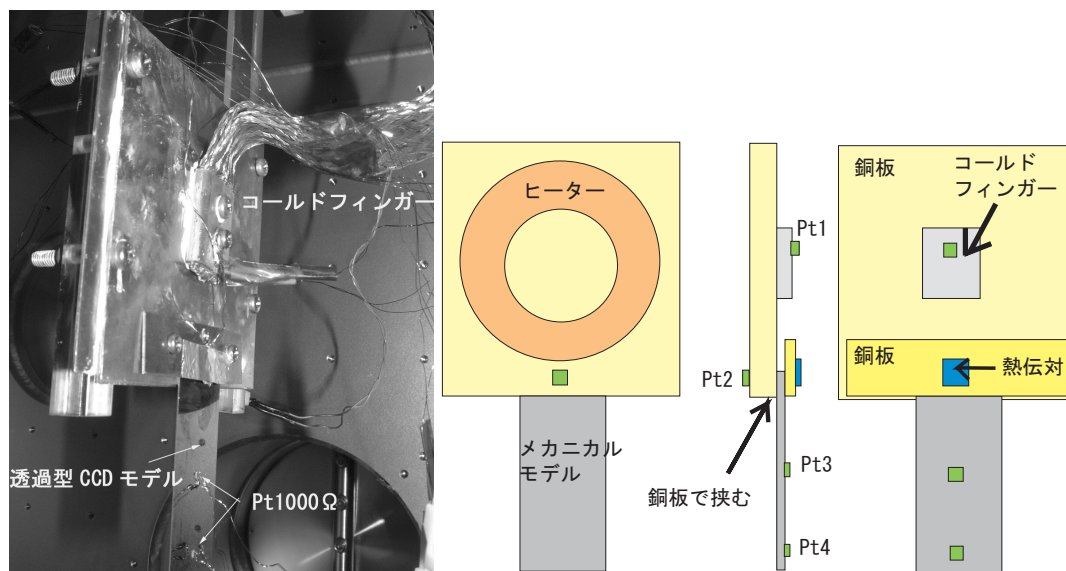


図 4.11: メカニカルモデル冷凍試験のセットアップ。銅板を介して CCD の端を掴み、コールドフィンガーで冷却する。右図の Pt1 ~ Pt4 は温度測定用に取り付けられた白金抵抗 1000Ω を指す

測定手順

まず、図 4.11 の状態で温度平衡に達するのを待ち、CCD 端の温度 (熱電対、図 4.11 右参照) と CCD 中心の温度 (Pt3、図 4.11 右参照) を測定する。

次にメカニカルモデルの片面 (アルミナイトライド側) アルミテープを貼り付ける。これは真空槽外部は室温 (20°C) のため、熱輻射による温度流入が大きいことが予想されるからである。ルミは赤外線に対する反射率が高い ($0.8[11]$) ため、輻射による熱流入の大幅な減少が期待できる。温度平衡に達したら CCD 端、CCD 中心の温度を測定する。

測定結果

CCD 端の温度 (熱電対、図 4.11 右参照) と CCD 中心の温度 (Pt3、図 4.11 右参照) を比較した (表 4.3)。

考察

表 4.3 に見られるように、

	CCD 根本 [C°]	CCD 中心 [C°]	温度差 [K]
アルミテープ有	-85.6	-79.8	5.8
アルミテープ無	-87.2	-76.7	10.5

表 4.9: シリコン板上各点の温度

- アルミテープの有無で温度勾配が大幅に改善した。これは輻射による熱流入が大きな影響を及ぼすことを意味しており、周辺の熱環境が無視できない影響を与えることを実証した。
- 一方、端部と中心で極端な温度差はなく、X 線 CCD として十分機能するだけの冷凍が可能であることを示した。

4.4 透過型 CCD の冷凍に関する理論的な考察

物体の一部を冷やした時に発生する温度勾配は物体の熱伝導係数が大きいほど小さくなる。熱伝導係数は(熱伝導率)×(断面積)で決まる。

透過型 CCD を考えた時、CCD として機能させるには温度勾配は小さければ小さいほど良い。しかし硬 X 線を透過させるという特性のためには CCD 以外のサポート構造(ここではアルミナイトライド)の厚み、すなわち断面積は極力減らしたい。しかし断面積の減少は熱伝導係数の減少に直結し温度勾配の増加に繋がってしまうので、今よりも薄くするのは難しい。

一方、温度勾配は物体に流入する熱量にも依存し、流入量を小さくすれば温度勾配も小さくなる。そして、前の実験では周辺の熱環境からの熱流入が大きいことを示した。従って、これを更に減少させれば CCD の温度勾配は減少するし、CCD の温度勾配を現状に保ちながら CCD サポート構造の断面積を減らすことが可能になるだろう。

そこで理論計算により CCD 周辺からを低温に保ち輻射による熱流入を抑えた場合の温度勾配の考察を行なった。

用いた計算モデル

- 長さ L 、幅 W 、厚 h_{AIN} のアルミナイトライドと、同じサイズで厚 h_{Si} のシリコンの貼合からなる板(図 4.12)

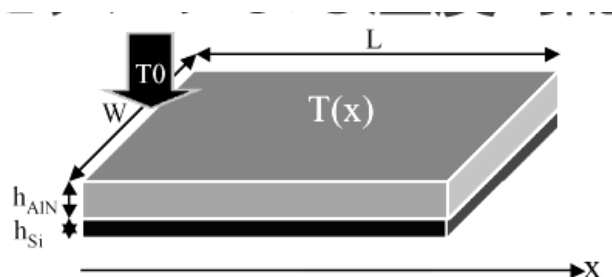


図 4.12: 透過型 CCD メカニカルモデルの計算モデル

- $x = 0$ (CCD 端) が温度 T_0 に保たれ室温(温度 T_R) にさらされる。

この時、熱伝導方程式から、

$$(k_{\text{AIN}} \cdot h_{\text{AIN}} + k_{\text{Si}} \cdot h_{\text{Si}}) \frac{d^2 T}{dx^2} + (\alpha_{\text{AIN}} + \alpha_{\text{Si}}) \sigma T_{\text{R}}^4 = (\epsilon_{\text{AIN}} + \epsilon_{\text{Si}}) \sigma T^4 \quad (4.5)$$

(但し k :熱伝導率、 α :吸収係数、 ϵ :放射係数)

非線形方程式ゆえ解析的には解けない。そこで、実験結果から温度勾配は劇的に変化しないと予測して、CCD 全面を等温 (T_0) だと仮定する。式 4.5 の右辺を変更して、

$$(k_{\text{AIN}} \cdot h_{\text{AIN}} + k_{\text{Si}} \cdot h_{\text{Si}}) \frac{d^2 T}{dx^2} + (\alpha_{\text{AIN}} + \alpha_{\text{Si}}) \sigma T_{\text{R}}^4 \sim (\epsilon_{\text{AIN}} + \epsilon_{\text{Si}}) \sigma T_0^4 \quad (4.6)$$

境界条件として

- 端部 ($x = 0$) は一定温度 T_0

$$T(0) = T_0 \quad (4.7)$$

- 端部 ($x = L$) で熱伝導は途切れる

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (4.8)$$

を課して解くと、

$$T(x) = T_0 + \frac{\sigma((\alpha_{\text{AIN}} + \alpha_{\text{Si}})T_{\text{R}}^4 - \epsilon_{\text{AIN}} + (\epsilon_{\text{Si}})T_0^4)}{k_{\text{AIN}} \cdot h_{\text{AIN}} + k_{\text{Si}} \cdot h_{\text{Si}}} x(L - \frac{x}{2}) \quad (4.9)$$

と解ける。

具体的に数値を代入すれば温度勾配が予測できるのだが、アルミナイトライド、シリコンともに放射係数 α 、吸収係数 ϵ が不明である。そこで、上記実験結果から両係数を見積もる。

- アルミテープ貼付試験の結果より。アルミテープの係数は既知ゆえ ($\alpha = \epsilon = 0.3$)、CCD 根元と中心の温度差を 2 点間の距離で割ったものを温度勾配とすれば未知数はシリコンの α 、 ϵ のみである。両者を等しいと仮定すると $\alpha_{\text{Si}} = \epsilon_{\text{Si}} = 0.2$ となる。
- CCD 剥出試験の結果より。上でシリコンの α 、 ϵ を求めたので、未知数はアルミナイトライドの α 、 ϵ のみである。同様に両者を等しいとし $\alpha_{\text{AIN}} = \epsilon_{\text{AIN}} = 0.7$ となる。

以上から CCD の温度勾配を予測する。CCD 根元を 200K、環境温度を 300K と仮定して式 4.9 を解くと図 4.13 の温度勾配が得られた。これは実験結果と良く一致する。

熱輻射は Stefan-Boltzmann 方程式より T^4 に比例する。外部環境が室温 (300K) であると、200K 以下に保つ必要のある CCD に大きな熱流入をもたらす、CCD 冷却及び温度の一様性の維持を困難にすることが予想される。そこで外部環境の温度を 280K から 20K 刻みに 200K まで変化させるた時の温度勾配を計算式に基づき予測した。(図 4.13、表 4.14)。

環境を十分低温にすれば CCD の温度勾配は大幅に改善することがわかる。温度勾配は式 4.9 にみられるように伝導体の厚さ (h) に反比例する。もしも CCD の温度差を 2K 程度許すのならば、環境が常温ならば h は更に厚くする必要があるが、環境を 220K まで冷却出来るとすれば h は現在の半分に、更に 200K まで下げられれば h は 1/4 まで削ることが出来る。サポート構造を薄くすればするだけ、検出できなかった X 線が透過しやすくなるため透過型 CCD としての性能は向上する。しかし一方で冷却対象が大きくなるので冷凍機の負担が次第に大きくなる。衛星搭載に当たっては透過型 CCD だけでなく衛星全体で考えて最適な環境を検討する必要があるだろう。

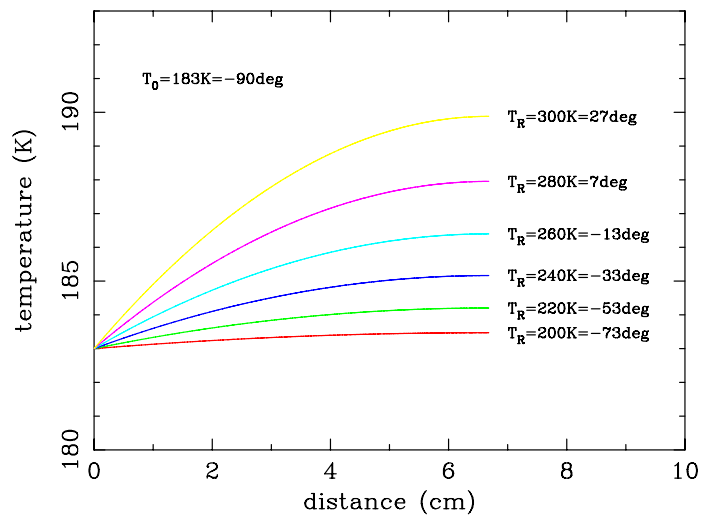


図 4.13: CCD の温度勾配 (式 4.9 による)

環境温度 [K]	温度差 [K]
280	5.0
260	3.4
240	2.2
220	1.2
200	0.5

図 4.14: CCD 温度の差異

第5章 N型CCDの性能評価

5.1 N型CCD

N型CCDは透過型CCDとしてハイブリッドカメラ搭載を目指し開発が進められている。第4章で述べたようにハイブリッドカメラ搭載予定透過型CCDが満たすべき性能として、(1) NeXTの広帯域集光力を活かすため高エネルギーで高い感度を持つこと、すなわち空乏層が十分に厚いこと、(2) 検出できない硬X線がロスなく透過出来るよう不感層である中性領域(及びサポート構造)を除くこと、すなわち完全空乏化すること、の2点が挙げられる。この性能を満たすために(1)従来のP型CCDに対し比抵抗が大きく、(2)完全空乏化が可能、であるN型CCDの開発を、大阪大学、国立天文台、浜松ホトニクス社と共同で進めており、プロトモデル(図5.1)が完成した。本章ではN型CCDの駆動試験および性能評価の結果について述べる。

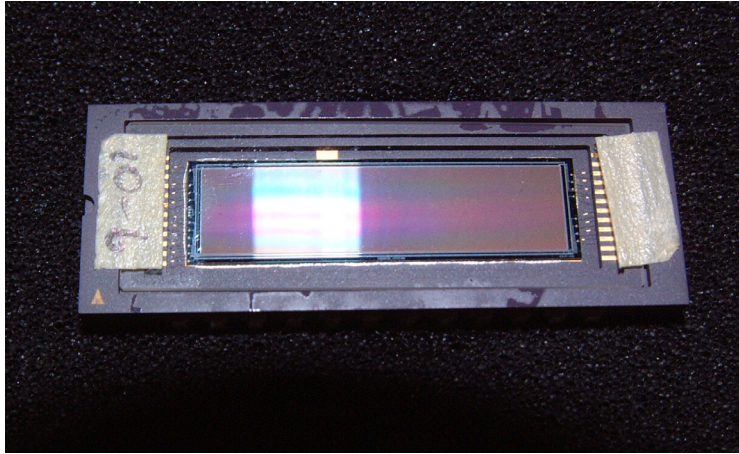


図 5.1: N型CCDプロトタイプの外観。着脱可能なガラスにより表面は保護されている。表5.1に示すCCDのパッケージは全て共通である

名称	予定空乏層厚	所属、状況
Pch3-4-5	50 μ m	国立天文台 最適化・空乏層厚測定 (第 5.2 節)
Pch3-4-6	50 μ m	京都大 未駆動
Pch3-4-8	50 μ m	京都大 性能評価・最適化 (第 5.5 節)
Pch3-10-5	100 μ m	国立天文台 最適化・空乏層厚測定 (第 5.2 節)
Pch3-10-6	100 μ m	京都大 未駆動
Pch3-10-8	100 μ m	京都大 空乏層厚測定 (第 5.6 節)

表 5.1: N 型 CCD プロトタイプ動作状況

5.2 国立天文台での予備実験

本節では、国立天文台で行なった空乏層厚測定について述べる。N型 CCD は京都大学より前に国立天文台に納入されており、本節の CCD 実験は、京都大学での駆動試験に備えての基礎事項の取得を目標にしている。

N型 CCD の大きな特徴の一つは空乏層を厚くできることである。浜松ホトニクス社の製作した N型 CCD プロトタイプに放射線同位体 ^{55}Fe および ^{109}Cd から出る X 線を照射して空乏層厚を測定することにした。

京都大学に納入された N型 CCD については第 5.3 節以降で述べる。

5.2.1 空乏層厚の測定原理

1.1.1 節で述べたように X 線と CCD の相互作用を考えると数 keV ~ 数 10keV 領域では光電吸収が支配的になる。したがって X 線イベントの個数は光電吸収の頻度を反映する。光電吸収の起こる確率は X 線エネルギー、材料、その厚みによって定まるので、強度既知の X 線源を CCD に照射し、その検出効率を求めれば空乏層の厚みが計算できる。

手順として

1. 比例計数管を用いた放射線源の絶対強度測定
2. 同じ線源を CCD に照射し検出効率の測定

の順に行う。

5.2.2 線源強度測定

実験システム

比例計数管は、ガス厚、窓材質等が既知であるので検出効率の正確な見積もりが可能であり、安定に動作するため強度測定には最適である。

比例計数管に専用の治具を取り付け (図 5.2) コリメータで入射 X 線の立体角を制限する。コリメータの立体角は国立天文台の実験装置にとりつけた時スポットサイズが CCD の露光領域に収まるよう調整した。用いた比例計数管の諸元を表 5.2 に示す。

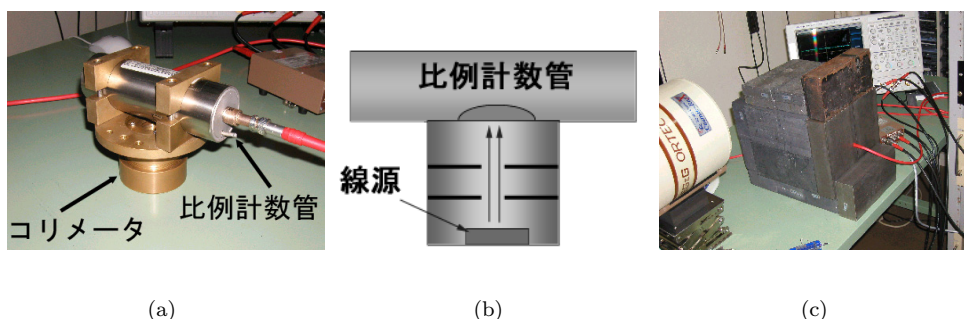


図 5.2: (a)(b) 比例計数管と専用治具の外観。コリメータと X 線源は治具の中に納められている。(c) バックグラウンドの影響を極力減らすため、測定時は鉛ブロックで全面を遮蔽した。

この測定での検出効率を求める。検出効率は

1. 大気の透過率
2. 比例係数管 Be 窓の透過率
3. 比例係数管ガスの吸収率

の積である。本測定では、線源と Be 窓の距離は 26mm に固定してあるので大気の透過率も求められる。表 5.2 に示す成分を元に検出効率を算定すると ^{55}Fe で 80%、 ^{109}Cd で 4.9% という検出効率が求められる。内訳も合わせて示した。

組成		吸収確率 (%)	
		$^{55}\text{Fe}(5.9\text{keV})$	$^{109}\text{Cd}(22.1\text{keV})$
大気	N_2 80%+ O_2 20%(1atm: 26mm)	6%	2%
窓	Be (柱密度 23mg cm^{-2})	8%	~0%
ガス	Ar 97% + CO_2 3% (1atm 封切)	92%	5.0%
検出効率		80%	4.9%

表 5.2: 比例計数管の構造と検出効率

測定結果

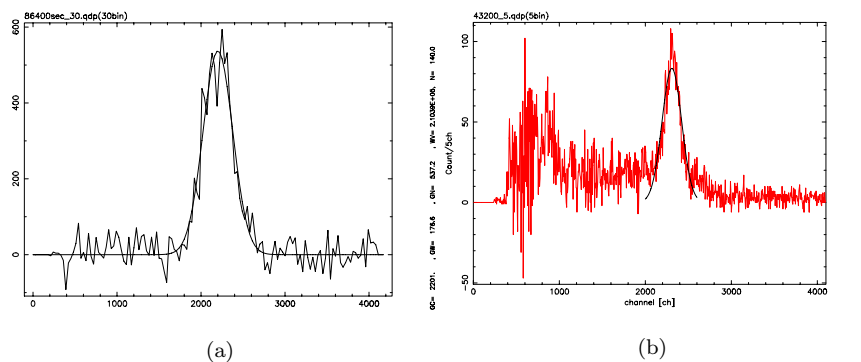


図 5.3: (a) ^{55}Fe 、(b) ^{109}Cd のスペクトル

X線を照射し、データを取得した。バックグラウンド測定として、X線源のみ取り外し、同時間データ取得を続けて行った。両者を減算することでX線イベントのスペクトルを作り(図 5.3)、輝線をフィッティングすることにより強度を求めた。結果を表 5.3 に示す。

5.2.3 X線照射試験

上で絶対強度を測定したX線源を用いて Pch3-4-5 および Pch3-10-5 にX線を照射し検出効率を測定した。

実験システム

上の絶対強度測定で用いたコリメータ及び治具を同じジオメトリで CCD 前面にとりつけ(図 5.4)、同じ強度で照射する。X線像は CCD 撮像領域に十分納まるようコリメートしてあ

線源	照射時間	イベント数	絶対強度 [cts/sec]
^{55}Fe	24hr	7943	0.11
^{109}Cd	12hr	4748	2.3

表 5.3: X 線源の絶対強度測定結果

るので上で算出した絶対強度の分だけ CCD に X 線入射があるとして良い。図 5.5 に X 線像を示す。

CCD は液体窒素により約 -55°C に冷却されている。

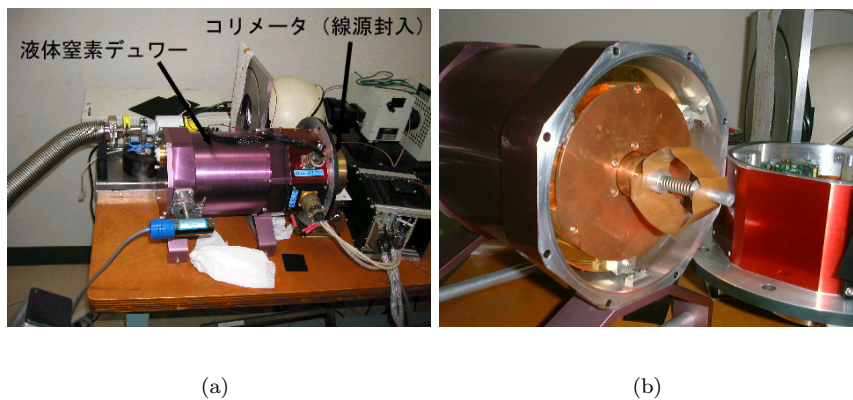


図 5.4: (a) 国立天文台 CCD 駆動システム。(b) 液体窒素デュワーから延びるコールドフィンガーにより CCD を冷却する。

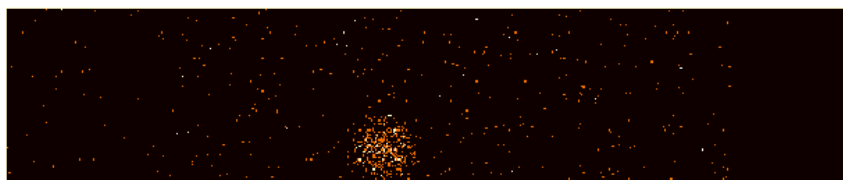


図 5.5: コリメートした X 線像。照射線源 ^{55}Fe 。露光時間 30 分

測定結果

Pch 3-4-5、Pch 3-10-5 それぞれの照射実験の結果と、空乏層厚を示す。

なお、連続取得したデータを1つのシーケンスとする。測定条件が変化しダークレベル補正などに影響を及ぼす可能性を排除するため、取得間に大きく時間が隔たっていたり、CCDを常温に戻すなどしてデータ取得をやり直した場合は別シーケンスとする。各シーケンス毎に独立にイベント抽出を行ない、空乏層厚を求めた。

イベント抽出は特記のない限り以下の方法に統一する。

- 取得した全 frame のうち最初の 5frame は取得前に CCD に蓄積されていた電荷が残っている可能性があるため棄てる。次の 16frame をダーク推定に用いる。ダーク推定したものも含め、残りの全 frame から grade 判定法により event 抽出¹を行なう。そのなかから grade0,2,3,4,6 のみを X 線イベントとして認定する。
- split 閾値は露光領域 0peak の標準偏差の 4 倍とする。

Pch 3-4-5(予定空乏層厚 50 μm)

測定条件を表 5.4 に、結果を表 5.5 に Seq.1 と Seq.2 で得られたスペクトルを図 5.6 にしめす。

使用 CCD	HPK Pch 3-4-5
クロック電圧値	
RG , RD, OD, OG[V]	+8/-6 , -12 , -20 , -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+4/-6
縦蓄積中電圧 (P*V,TG)	+4
横転送電圧 (P*H,SG)	+6/-7
転送時間	15sec
CCD 温度	-55C°

表 5.4: Pch 3-4-5 空乏層厚測定実験での駆動環境

Seq.	X 線源	露光 [秒]	取得枚数	露光総計 [秒]	イベント数	検出効率 [%]	空乏層厚 [μm]
1	⁵⁵ Fe	150	75	23300	1857	72	39
	⁵⁵ Fe	270	45				
2	⁵⁵ Fe	390	26	20340	1465	57	34
	⁵⁵ Fe	510	46				

表 5.5: Pch 3-4-5 の X 線照射試験

結果

空乏層厚はそれぞれ 39,34 μm であり、予定空乏層よりやや薄い結果である。本実験では、本来蓄積中電圧として負電圧をかけるべきところを正電圧をかけており²十分空乏層が発達していなかった可能性ある。

¹event 抽出法については第 3.2.1 章参照

²未検証であるが MPP モードで動作していた可能性が高い。

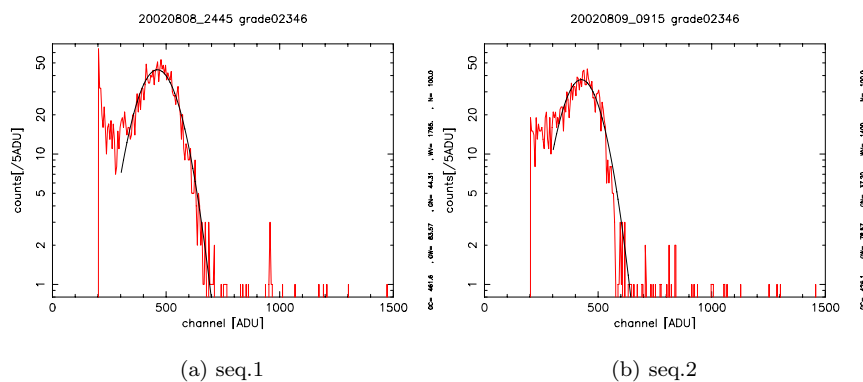


図 5.6: Pch 3-4-5 の ^{55}Fe のスペクトル。いずれも $K\alpha$ 、 $K\beta$ が分離できていない

Pch 3-10-5(予定空乏層厚 $100\mu\text{m}$)

測定条件を表 5.6 に、結果を表 5.7 に Seq.1 ~ Seq.4 で得られたスペクトルを図 5.7 にしめす。

使用 CCD HPK Pch 3-10-6	
クロック電圧値	
RG , RD, OD, OG[V]	+8/-6 , -12 , -20 , -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+4/-6
縦蓄積中電圧 (P*V,TG)	+4
横転送電圧 (P*H,SG)	+6/-7
転送時間	15sec
CCD 温度	-55C°

表 5.6: Pch 3-10-5 空乏層厚測定実験での駆動環境

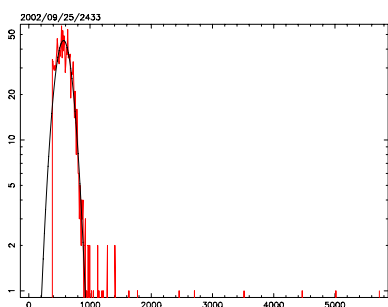
結果

測定結果にはバラつきが見られる。シーケンス 1 とシーケンス 3 は、シーケンス 2、シーケンス 4 に比べ、イベント抽出方法は同一であるのにエネルギー分解能が悪い。図 5.8 に示すようにシーケンス 1、3 は CCD がほぼ温度平衡に達した時点で測定を始めている。しかし CCD の一点の温度しかモニターしていないので、この時 CCD 全体では十分冷え切っておらず、熱平衡に達していない部位がある可能性がある。そのため暗電流がシーケンスの中で変化し、エネルギー分解能を悪化させているかもしれない。それに対しシーケンス 2、4 は熱平衡に達してから十分時間が経過しているため CCD 全体で等温になっており、暗電流も安定していると考えられる。

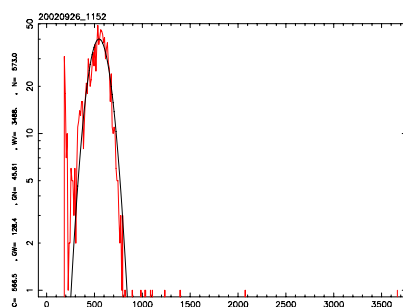
エネルギー分解能の高いシーケンス 2、4 を信頼すると空乏層厚は約 $70\mu\text{m}$ である。予定空乏層厚の $100\mu\text{m}$ と較べ薄いのが、Pch3-4-5 と同様の蓄積中電圧が +4V であり空乏層が十分発達していなかった可能性がある。

Seq. ID	X線源	露光時間 [sec]	取得枚数	露光総計 [sec]	イベント数 [cnt]	検出効率 [%]	空乏層厚 [μm]	エネルギー分解能 [keV]
1	^{55}Fe	150	46	17100	1521	81	55	3.2
	^{55}Fe	300	25					
	^{55}Fe	150	18					
2	^{55}Fe	150	24	9900	1078	~100	-	2.7
	^{55}Fe	300	21					
3	^{109}Cd	150	27	4050	460	5.2	80	5.6
4	^{109}Cd	150	121	18150	1845	4.6	70	4.6

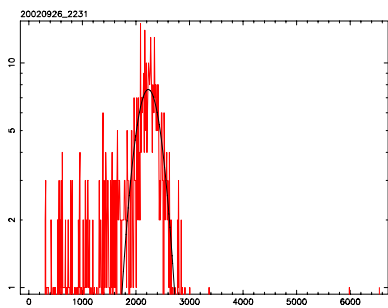
表 5.7: Pch 3-10-5 の X 線照射試験



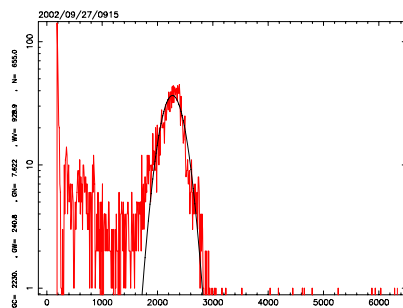
(a) seq.1



(b) seq.2



(c) seq.3



(d) seq.4

図 5.7: 各シーケンスのスペクトル。Seq.1、Seq.3 のエネルギー分解能が悪い

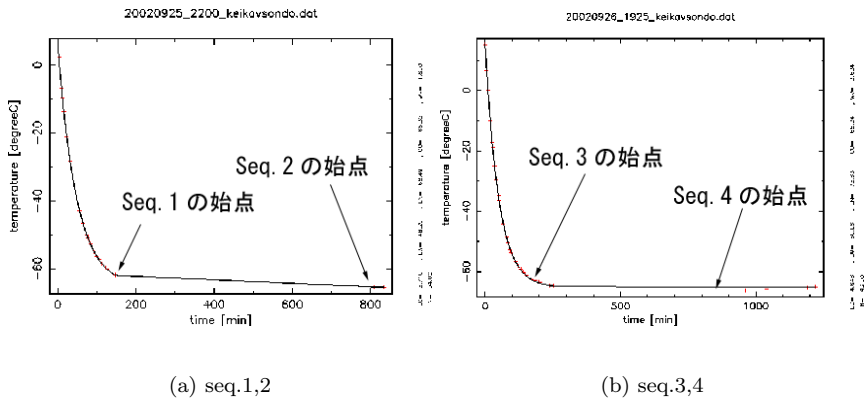


図 5.8: 各シーケンスの温度変化。

5.3 京都大 N 型 CCD 駆動システムの整備

本節では N 型 CCD の駆動試験のために整備、開発した性能評価システムについて解説する

5.3.1 汎用 CCD 性能評価用真空槽

N 型 CCD の評価のため、真空槽を新たに製作した (図 5.9、5.10)。

- 従来の京都大の真空槽 [13] に比べ格段に小型化、軽量化し自由に持ち運びが出来る。
- 浜松ホトニクス社 P 型 CCD の評価も可能。
- 住友重工社製機械式冷凍機 (第 5.4 節参照) の取付が可能。

という特長を持つ。

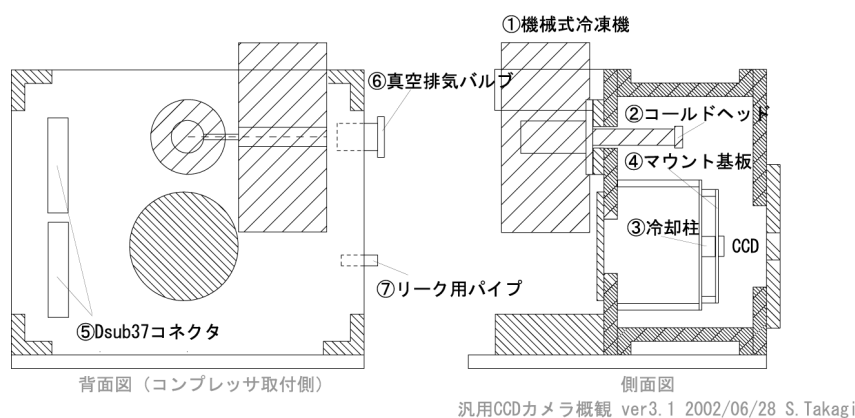


図 5.9: 汎用 CCD 性能評価用真空槽概観。(左) 背面 (コンプレッサ取り付け側) 図。(右) 側面図)

図 5.9 に示した番号にしたがって、各部の役割を説明する。機械式冷凍機 (1、以下番号は図 5.9 中のものを指す。詳細は 5.4 節参照) はコンプレッサ部は大気中で運用し、コールドヘッド (2) のみ真空槽内部に入る構造をとる。コンプレッサ部も真空中でも駆動は可能であるが、かなりの熱を持つためなんらかの冷却機構を取り付ける必要がある。そこで今回の実験では大気中で運用することにし、送風して空冷することにした。コールドヘッドと冷却柱 (3) は Cu 製のブレードでつなぐれ、冷却柱が CCD マウント基板 (4) に固定された CCD と接触することで CCD を冷凍する。

CCD の駆動クロック、出力信号は真空槽下部に取り付けられた Dsub37 コネクタ (5) を通して入出力される。またコールドヘッド及び冷却柱には温度測定のため白金抵抗 (1kΩ) が取り付けられており、その制御も Dsub37 コネクタを介して行なわれる。Dsub37 コネクタはハーメチックシールであり、大気漏洩の恐れはない。真空排気バルブ (6) を通して真空ポンプにつながり排気される。リーク用パイプ (7) にはバルブが取り付けられており、ここを介して大気導入を行なう。

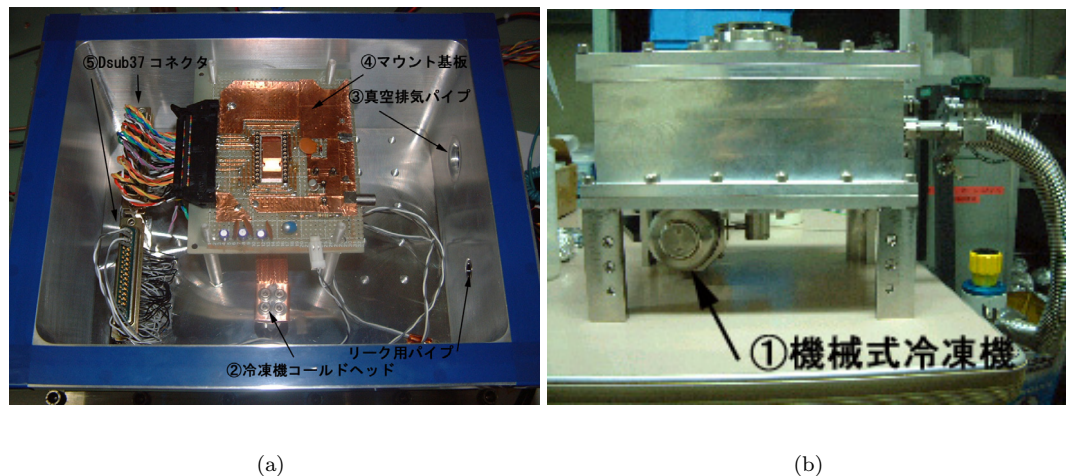


図 5.10: 汎用 CCD 性能評価用真空槽。(a) 内部の様子。中心のソケットに CCD を取り付ける。(b) 側面。右の蛇腹パイプで真空ポンプにつながる。

5.3.2 クロック作成回路

以降の実験で用いたクロック作成回路について述べる。

CCD を駆動させるための電圧クロックについては第 2 章で述べた。本システムではクロックの High/Low 情報はクロックジェネレーターから与え、クロック作成回路で High, Low 時の電圧値とクロックの立上/立下時間を与えることで得たいクロックを実現する。

クロック発生回路図を図 5.11 に示す。以下、この図を参照しながらクロック作成の流れを順を追って説明する (詳細は [12] 参照)。

1. クロックジェネレータは 0,1 の 2 値を与えることが出来る。まず 1A,2A を通してフォトカプラ HCPL-2630 に信号が入る。1B,2B は 1A,2A のリターンである。フォトカプラはクロックジェネレータの電気的なノイズをクロック発生回路に伝えないために導入されており、出力信号はクロックジェネレータの信号と本質的な差異はない。1A,2A の情報はノイズのみ落としそのまま V01,V02 に出力される
2. V01,V02 を通してマルチプレクサ 74138 に入った信号は表 5.8 にしたがった変換を受ける。ただし本回路では C は GND に短絡してあるので常に Low level である。
3. Y0-Y3 からの信号出力は二つに分けられる。一方は Bus Buffer である 74125 でバッファリングされ、+T1 - +T4 という出力になる。もう一方は並列に 74366 という Bus Inverter に入力される。74366 は反転回路であり、反転した信号は、+T1 - +T4 とは逆位相の -T1 - -T4 となる。
4. +T1 - +T4, -T1 - -T4 は LM6144 の直後にあるダイオード群でスイッチの役割を果たす。例えば +T1=High (\leftrightarrow -T1=Low) の時はダイオードに電流が流れ、VR1 で調節した電圧が出てくる。表 5.8 を見るとわかるように、この時 T1 以外は Low ゆえ電流は流れず、VR1 のみで電圧調整が可能である。こうしてクロックの High/Low 時の電圧を決定できる。4 パタンの電圧値がとれるので駆動中のクロック電圧とは独立に蓄積中のクロック電圧も変更できる。

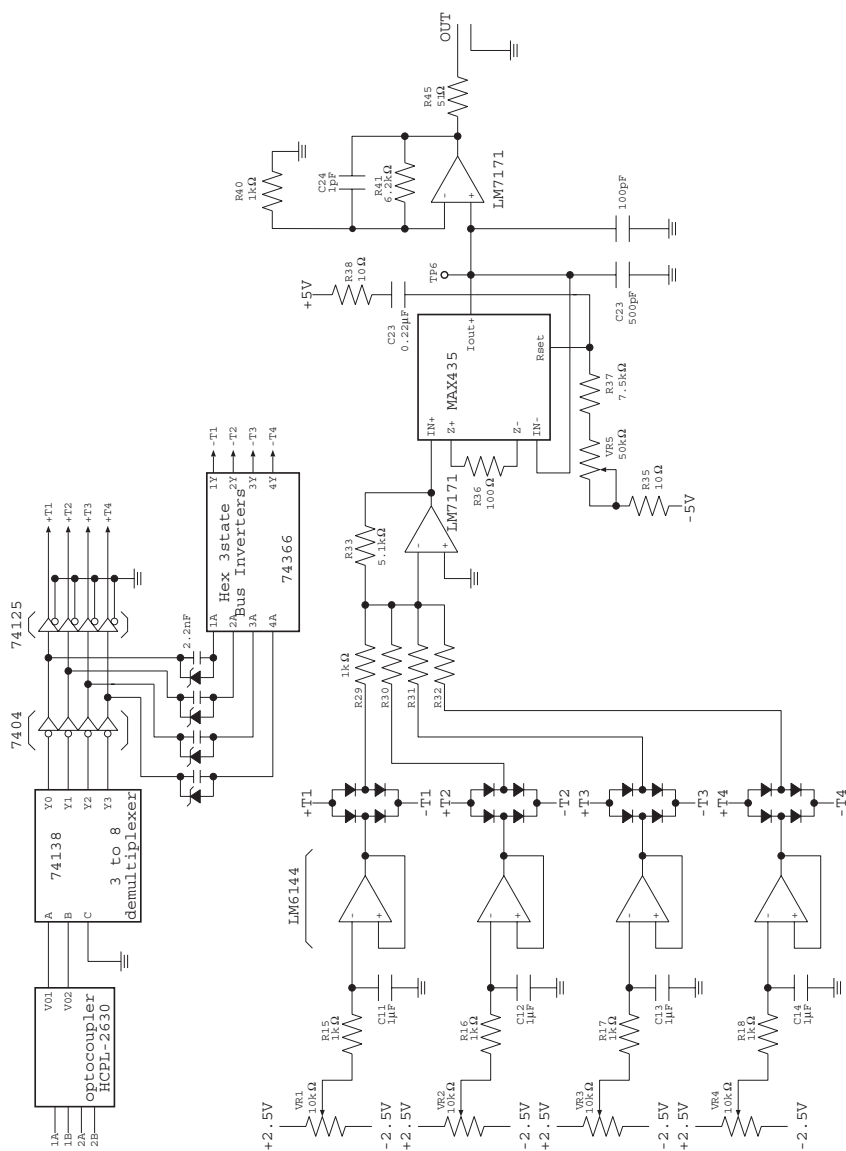


図 5.11: クロック作成回路

INPUT			OUTPUT							
A	B	C	Y0	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7
L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H
H	L	L	H	L	H	H	H	H	H	H
L	H	L	H	H	L	H	H	H	H	H
H	H	L	H	H	H	L	H	H	H	H
L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	H
H	L	H	H	H	H	H	H	L	H	H
L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H
H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L

表 5.8: 74138 Truth table(Hは High を、Lは Low を表す)

5. 高速 OP アンプ LM7171[17] で buffering された電圧は、MAX435 に入る。これは Wide-band Transconductance Amplifier(WTA) と呼ばれるもので、二つの入力 IN+および IN-の電圧差 V_{in} を電流に変換する [15]。出力電流は C23 に蓄積され電圧に変換されるがこの際の過渡現象を利用してクロックの立上/立下時間を制御する。出力電流は R_{set} で制御されるので (図 5.12)VR5 により調整可能である。また C23 自体の換装でも立上/立下時間を変えられる。

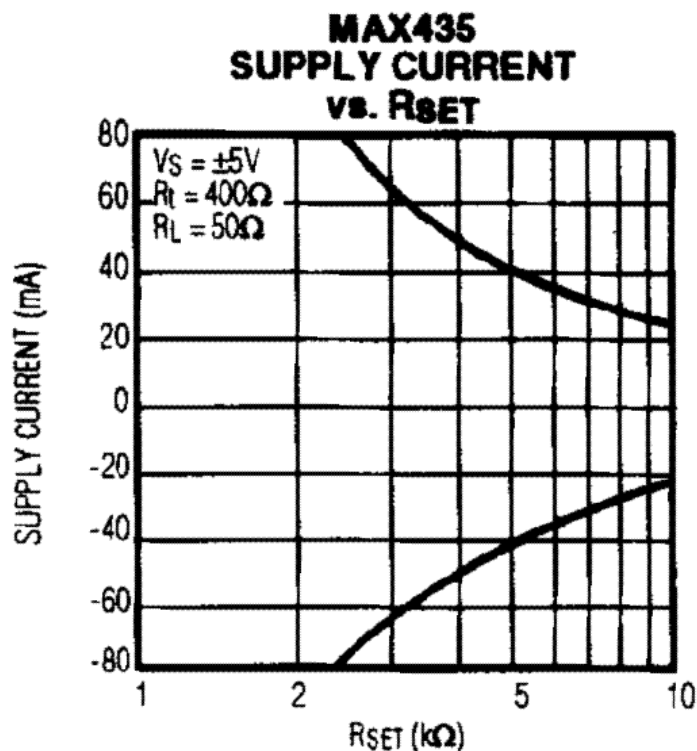


図 5.12: R_{set} と supply current の関係

6. LM7171 を用いたバッファアンプを通して、 51Ω の出力インピーダンスでクロックが出力され、CCD へと伝わる。

5.3.3 前置増幅回路 (CCD マウント基板)

図 5.13 は CCD 出力からの出力を真空内で受ける前置フォロワ部の回路図である。本論文で用いた N 型 CCD からの出力には外付 JFET が付けられていないため、外部回路によって external load と FET をつけておく必要がある。今回の設計では external load は $22k\Omega$ とした。外付の JFET に採用したのは、高速低雑音の 2SK112[14] である。JFET のソース側にツェナーダイオードが付けられているのは、2SK112 に異常電圧がかかるのを防ぐためである。JFET の出力は $4.3k\Omega$ によって再び電圧に変換され、レモケーブルを通して真空外に出て、フィルタアンプへと入力される。

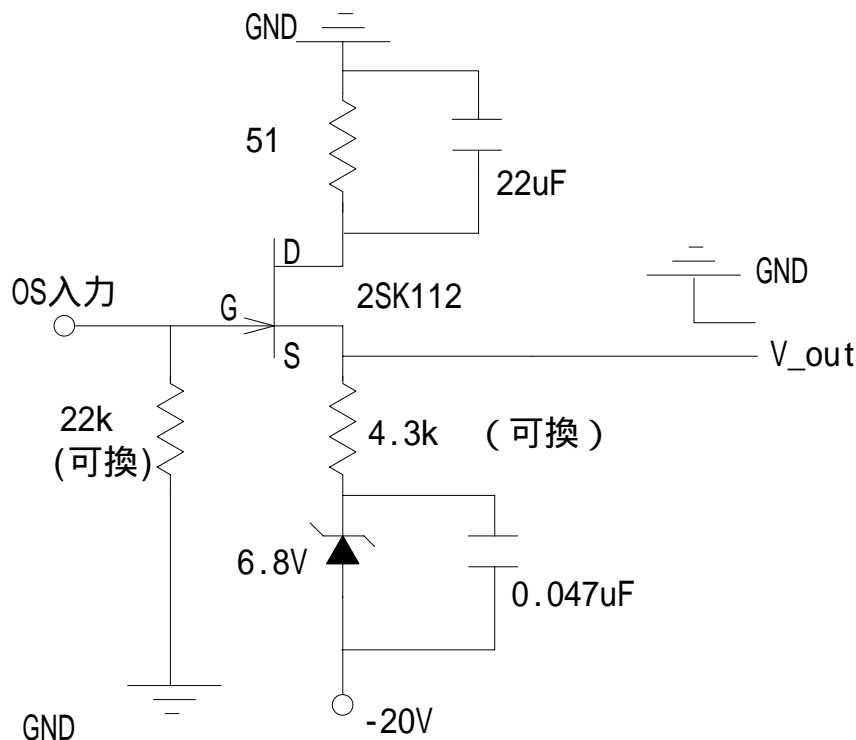


図 5.13: 前置増幅回路図。

5.3.4 増幅・積分回路

京大システムでは CCD 読出方式に積分方式を採用した。本回路は前置増幅回路からの出力信号を、増幅、積分し ADC に入力する役割を担う。

図 5.14 に回路図を示した。信号処理の過程を順を追って説明する。また、CCD 出力信号波形の変遷を追うために各テストポイント (TP) での波形を図 5.15、5.16 に示す。

1. A 部はハイパスフィルターは CCD からの入力信号を AC 化する。時定数 τ_1 は

$$\tau_1 = C_1 \times R_1 = 0.2 \text{ [sec]} \quad (5.1)$$

CCD からの信号は 100 kHz 程度であるので、これは十分遅い値であり、信号には全く影響を与えない。

2. B 部で 11 倍の非反転増幅を行なう。なお P 型 CCD(信号出力の極性が N 型の逆) での使用も考慮してこの部分は取り外して反転回路に換装が出来る仕様にしてある。出力波形は図 5.15 の 1 段目である
3. C 部で反転増幅と reset pulse の除去を行なう。反転増幅の倍率は可変抵抗 VR1 で調整が可能である。出力を図 5.15 の 2 段目に示す。reset pulse は (1) 高周波であるため不安定でありこの部分からのノイズが入ってくる可能性があること、(2) 大きな reset pulse の出力がクリップすることでその後の増幅過程で信号成分に影響を及ぼすこと、を避けるためである。T1 に reset pulse と同期した信号を送ることで、reset の時だけ信号は U1 を通して GND に流れ、reset pulse の除去が出来る。TP3(図 5.15 の 3 段目) をみるとリセットパルス部が GND に落ちていることが見てとれる。
4. D 部では非反転増幅と DC 成分の調節を行なう。非反転増幅の倍率は可変抵抗 VR4 で調整が可能である。DC 成分の調整は、の E 部で signal level と floating level の積分を

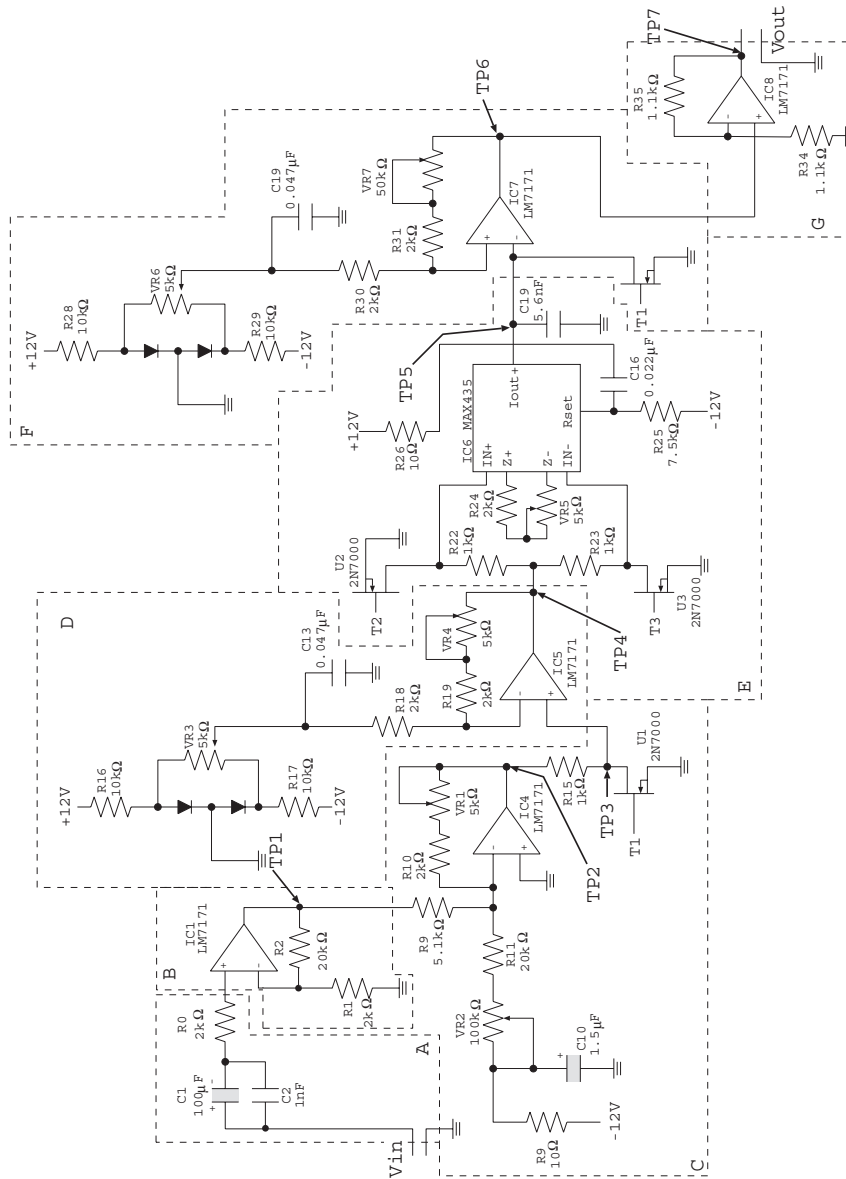


図 5.14: 増幅・積分回路

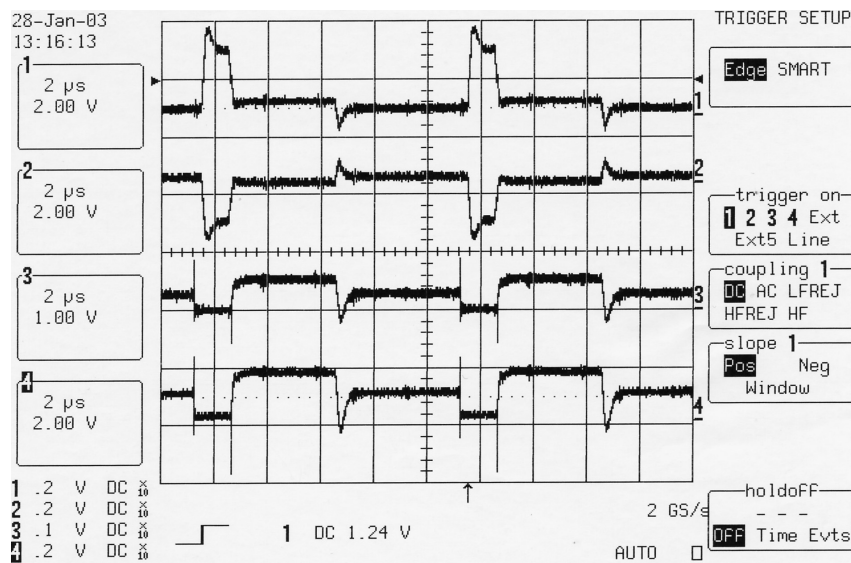


図 5.15: Tp1、2、3、4 の出力波形

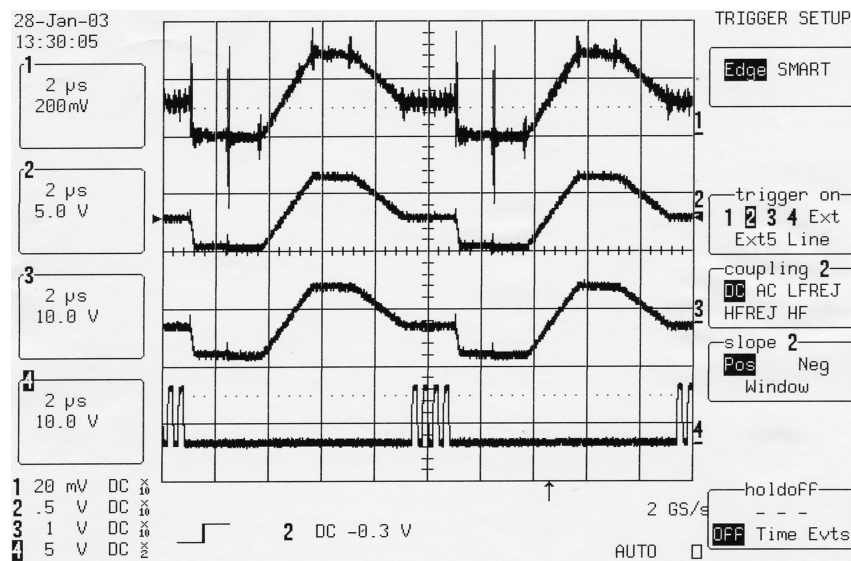


図 5.16: Tp5、6、7、T4 の出力波形

行うため両者とも正の電圧を与えておく必要があるからである。TP4 (5.15 の 4 段目) では両者とも正になるよう調整してある。

5. E 部は実際の積分を行なう部分である。ここで用いられている MAX435 はクロック作成部で用いたのと同じ電圧差を電流差に変換する役割を果たす。積分の符号は T2、T3 に入ってくる TTL 信号によって決定される。普段はどちらの FET(U2,U3) も close になっているため、信号は全て GND に流れて行ってしまい、MAX435 には何も入力されない。しかし、T2 が Low になれば信号は R22 側に、T3 が Low になれば信号は R23 側に流れ、それぞれ MAX435 の正または負の入力に入る。もう一方は GND になっているため、MAX435 への入力 V_{in} は出力そのまま、または逆転した出力、になる。 I_{out} には V_{in} に比例した電流が流れ、C19 に蓄積される。R24+VR5 は Z_t となっているので、(5.3.2 節参照) を考えると、この部分でゲインの調節が出来る。

Tp5(図 5.16 の一段目) は積分の様子を表している。floating level においてはコンスタント成分がプラス側に積分されるので電圧が直線的に上がり、signal level では入力が反転するのでマイナス側に積分され直線的に電圧が降下する。積分時間は同じなので、積分終了後の電圧が信号電荷量に比例するのである。

6. F 部では、積分コンデンサの reset を行なう。T1 (reset pulse に同期) によって reset pulse のタイミングで FET が open になり C19 にたまった電荷は GND へと捨てられる。さらに IC7 により非反転増幅と DC 成分の調節がなされる。非反転増幅の倍率は可変抵抗 VR7 により調節が可能である。DC の調節は ADC 入力が $-1 \sim +1V$ に限られているので ADC 入力が $-1 \sim +1V$ に限られているのでここで DC 成分を調整しておく。(図 5.16 の 2 段目)
7. G 部で 2 倍の非反転増幅を課したのち ADC に入力する (図 5.16 の 3 段目)。

ADC でデータをサンプリングするタイミングは、やはりデジタルジェネレーターの TTL 信号で制御している。図 5.16 の 4 段目が T4 であり High の時 AD 変換が行なわれる。短い時間に 4 回サンプリングを行ない、その平均をとることで精度をあげる。データは最終的に SUN WS 上に落とされ、fits 形式に書き換えられる。

5.4 機械式冷凍機を用いた冷凍試験

X 線 CCD は暗電流を十分抑えるために $-80^{\circ}C$ 程度まで冷却して使用されるので衛星搭載に際し冷凍手段も考慮する必要がある。

2003 年打ち上げ予定の Astro-E2 衛星はラジエータによる放熱でカメラボディを冷やし、CCD のみペルチェ素子で約 $-90^{\circ}C$ まで冷凍する。一方 NeXT では Astro-E2 ではカメラあたり一枚だった CCD が 9 枚と大きく増える上、ハイブリッド化により硬 X 線検出器側からの熱流入も増加することが予想される。そこでハイブリッドカメラの冷却には冷凍効率の高い機械式冷凍器の採用を検討している。日本の X 線グループは機械式冷凍器の使用経験がない³。そこで市販の機械式冷凍器を購入し CCD の冷凍試験を行ない、冷凍能力、影響等を研究することにした。

衛星搭載を目標とするので満たすべき基本性能として

³日本の赤外線天文衛星 Astro-F には搭載される

1. 真空中で使用可能であること
2. 小型・低消費電力であること
3. 低振動であること

が挙げられる。これらの性能を満たすものとして住友重工社製 SRS2110 を購入した。逆スターリング方式で冷凍を行なう。図 5.17(左) のコンプレッサ部に対向ピストンが封入されている。コンプレッサ自身はあまり振動しないがコールドヘッドはかなり振動するので、CCD に直接繋ぐことは出来ず、銅の網線を用いたブレードを介して熱接触させることにする。駆動はコンプレッサに駆動ドライバ (図 5.17(右)) を介して交流電流を入力する。ドライバ出力を変化させることで吸熱量を調整できる。

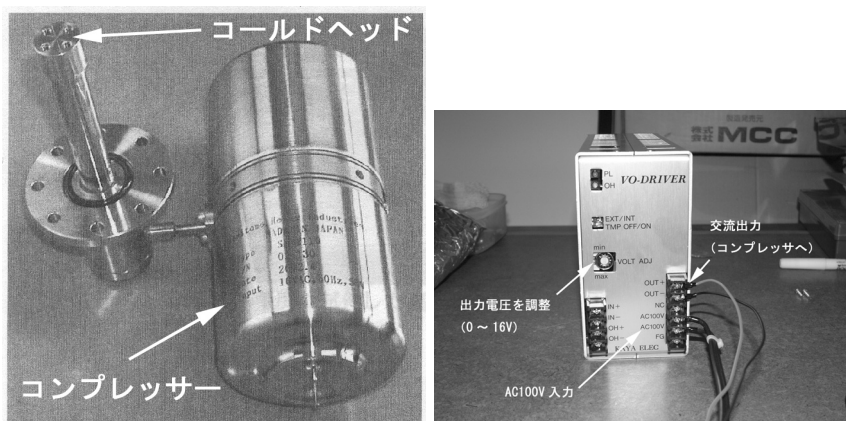


図 5.17: (左) 機械式冷凍機 SRS2110 外観と各部の名称。(右)SRS2110 用駆動ドライバ

5.4.1 冷凍能力

住友重工社製 SRS2110 は仕様書 [21] によれば -100°C で 4.5W の冷凍能力を持つ。CCD の駆動温度で一般に十分とされる -100°C までの冷却が可能かどうか見積もりをおこなう。

熱収支

- 黒体輻射による CCD への熱流入。

真空槽の温度を室温の 20°C 、CCD 温度を -100°C と仮定する。第 4.3 で求めた $\alpha_{\text{Si}} = \epsilon_{\text{Si}} = 0.2$ を用いて熱流入を求めると

$$Q_{\text{CCDin}} = \alpha_{\text{Si}}\sigma T_{\text{room}}^4 - \epsilon_{\text{Si}}\sigma T_{\text{CCD}}^4 = 0.0081 \text{ W} \quad (5.2)$$

となる。

- Dsub ケーブルからの熱流入量

クロックを与えるために CCD マウント基板には真空槽に取り付けられた Dsub37 を通して 37 本のケーブルが繋がっている。用いたのはジュンフロン線であり、直径 0.35mm 、長さ (l) 15cm の被覆のついた銅線である。ジュンフロン線の一端が室温の 20°C 、一端が -100°C と仮定しよう。熱抵抗は、

$$R_{\text{cable}} = \frac{1}{\lambda_{\text{Cu}}} \frac{l}{S} = 108 \text{ K W}^{-1} \quad (5.3)$$

但し、銅の熱伝導率 $\lambda_{\text{Cu}} = 420 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [22]、表面積を 37 本の合計 $S = 37 \times \pi \times (0.035/2)^2 = 0.073 \text{ cm}^2$ とした。

熱流入量は、室温との差 $\delta T = 120 \text{ K}$ として

$$Q_{\text{cablein}} = \frac{\delta T}{R_{\text{cable}}} = 1.11 \text{ W} \quad (5.4)$$

となる。

- CCD マウント基板を支える 4 本の足からの熱流入を考える。材質はポリカーボネート、直径 8mm、長さ 6cm である。上と同様に一端が室温、一端が -100°C と仮定して、熱抵抗は

$$R_{\text{supportin}} = \frac{1}{\lambda_{\text{PC}}} \frac{l}{S} = 1.2 \times 10^4 \text{ K W}^{-1} \quad (5.5)$$

但し、ポリカーボネートの熱伝導率 $\lambda_{\text{PC}} = 0.261 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [23]、表面積を 4 本の合計 $S = 4 \times \pi \times (0.8/2)^2 = 2 \text{ cm}^2$ とした。

熱流入量は、

$$Q_{\text{supportin}} = \frac{\delta T}{R_{\text{cable}}} = 0.01 \text{ W} \quad (5.6)$$

以上のように典型的な熱流入は総和をとって $\sim 1.1 \text{ W}$ 程度である。ゆえ SRS2110 を用いれば十分冷えるはずである。

実験

5.3.1 で述べた真空槽に CCD 駆動時と同じ状況で冷凍試験を行なった。ただし CCD 表面の温度もモニターするためメカニカルモデルを用いた (図 5.18)。電氣的に駆動しないという点以外はほぼ同一であり前に述べた熱流入の議論に影響はない。CCD 表面の他に CCD の底を冷やす冷却柱の温度もモニターしている。いずれも白金抵抗 ($1 \text{ k}\Omega$) を用いた。AC15V (定格出力内) の駆動電圧を与え冷凍した。

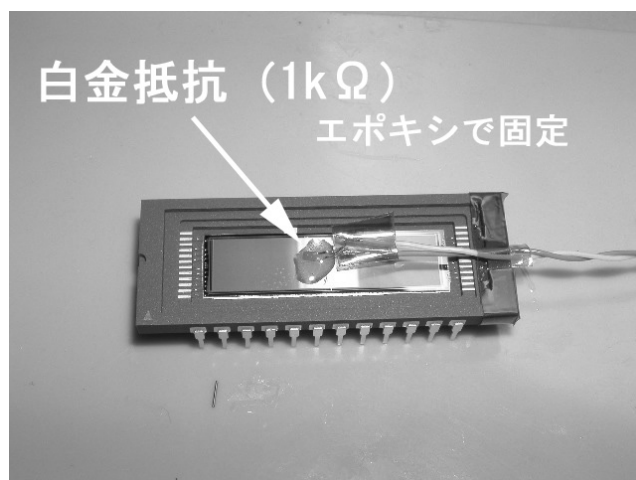


図 5.18: 冷凍試験用 N 型 CCD メカニカルモデル。表面温度測定のため Pt 抵抗を接着した。

測定結果

図 5.19 に示すように最大出力以下の 15V で CCD 温度は -100°C に到達した。

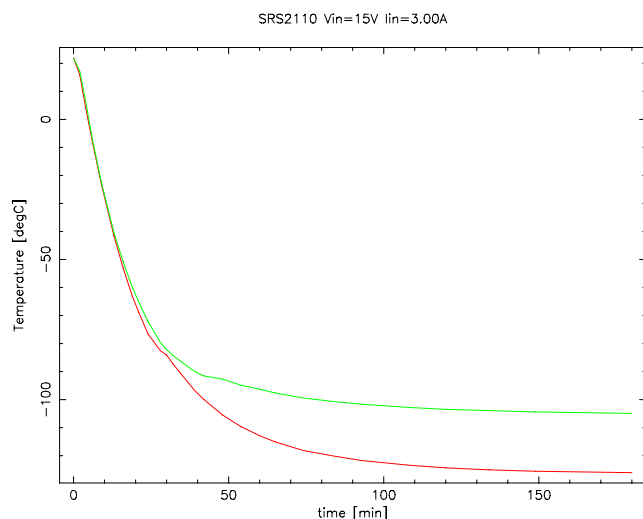


図 5.19: 冷凍試験結果。入力電圧は AC15V。上段が CCD 表面の温度、下段が CCD 直下の冷却柱の温度を示す。

5.4.2 冷凍機によるノイズ

実験

次に冷凍試験用 CCD を実際に駆動する CCD、Pch3-4-8 に換装して冷凍した。冷凍機の CCD 出力への影響を調べるため、冷凍機 on 時と off 時で出力イメージを比較した。図 5.20(上)が冷凍機駆動中(駆動電圧 10V)、図 5.20(下)が冷凍機停止である。一見して冷凍機駆動中のイメージが乱れていることがわかる。

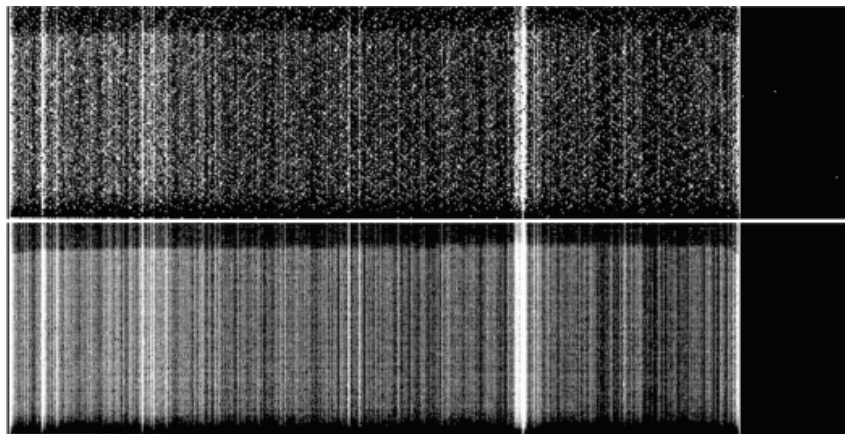


図 5.20: 冷凍機駆動(上)時と冷凍機停止(上)時の CCD の取得イメージ。温度はいずれも常温である。

図 5.21 表 5.9 に示すように Avtive,HOC,VOC 各領域の波高分布の幅が冷凍機駆動により大きく広がっていることがわかる。

ノイズの原因として、

(1) コンプレッサの駆動で生ずるコールドヘッドの振動がブレードを通して CCD に伝わり信号に影響を及ぼす物理的要因と(2) 冷凍機駆動のための交流電源から出るノイズが信号に影響を及ぼす電気的要因の二つを考え、実証するために以下の実験を行なった。

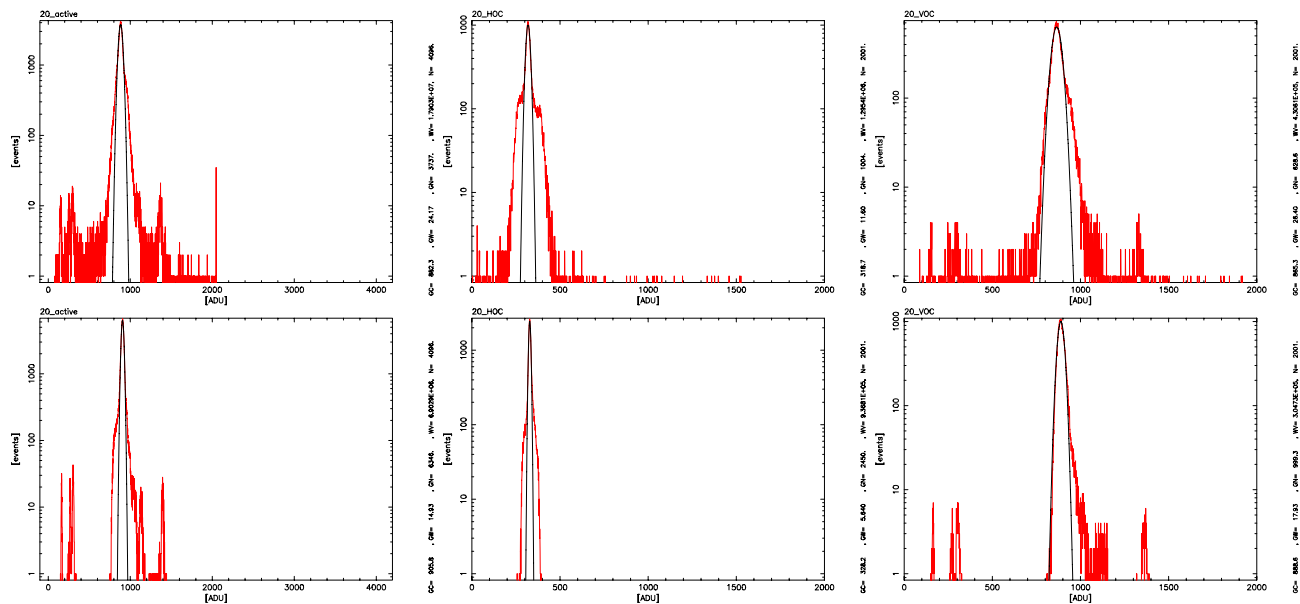


図 5.21: 冷凍機駆動 (上) 時と冷凍機停止 (下) 時の波高分布。右から Active 領域、HOC 領域、VOC 領域の順に示す。

冷凍器	Active 領域		HOC 領域		VOC 領域	
	中心チャネル	σ	中心チャネル	σ	中心チャネル	σ
ON	882.3	24.17	318.7	11.6	865.3	26.4
OFF	905.8	14.93	328.2	5.640	888.6	17.83

表 5.9: 波高分布のフィッティング結果 (1)。ブレードは取り付け有る。

● 物理的要因の除去

実験システム

コールドヘッドの振動と CCD を切り離すため、両者を熱的に繋ぐブレードを外した。
この状態で冷凍機、CCD ともに駆動させ、データを取得した。

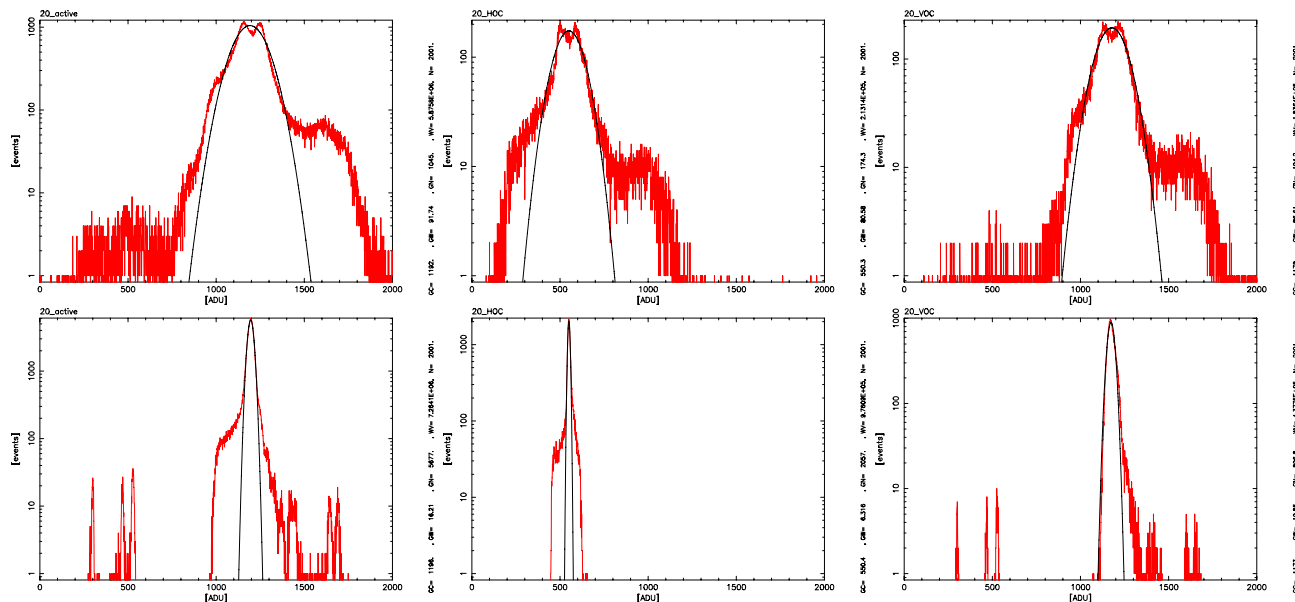


図 5.22: 冷凍機駆動 (上) 時と冷凍機停止 (下) 時の波高分布。いずれもブレードは取り外してある。右から Active 領域、HOC 領域、VOC 領域の順に示す。

結果

図 5.22 に CCD の波高分布を示す。CCD 駆動中の波高値はどの領域も大きく広がった分布を示した。ブレードを外してコールドヘッドの振動を除くだけではノイズを完全に減らすことは出来ないことがわかる。前の実験 (1) に較べ出力チャンネルの位置が著しくずれているのは実験 (1) のあとで増幅回路のゲインを変えたのが原因だと思われる。

冷凍器	Active 領域		HOC 領域		VOC 領域	
	中心チャンネル	σ	中心チャンネル	σ	中心チャンネル	σ
ON	1192	91.74	550.3	80.58	1178	86.61
OFF	1196	16.21	550.4	6.316	1173	19.85

表 5.10: 波高分布のフィッティング結果 (2)。ブレードを取り外した。

● 電氣的要因の除去

冷凍機の駆動が信号にノイズを及ぼす可能性を考え、冷凍機駆動ドライバの出力を調べた。冷凍機駆動ドライバ(図 5.17 右)は冷凍機本体への入力電流の制御により駆動能力を変更する。出力電圧をオシロスコープで見たところ図 5.23 のような交流信号に載った鋭いサージノイズを見つけた。冷凍機への入力電流にも同期したノイズが見られる。

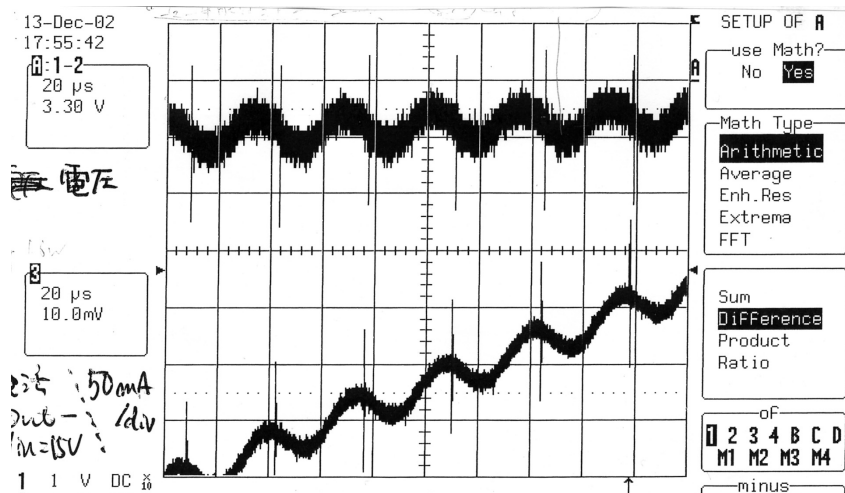


図 5.23: 冷凍機ドライバの出力。冷凍機駆動電圧は 15V。横軸は $20\mu\text{sec}/\text{div}$ 。(上) 出力電圧 ($10\text{V}/\text{div}$)。(下) 出力電流 ($50\text{mA}/\text{div}$)。

CCD からの信号が出力される OS 端子の変化を同時に見たのが図 5.24 である。入力電圧に載るサージノイズが CCD 信号に大きな影響を与えていることがわかった。

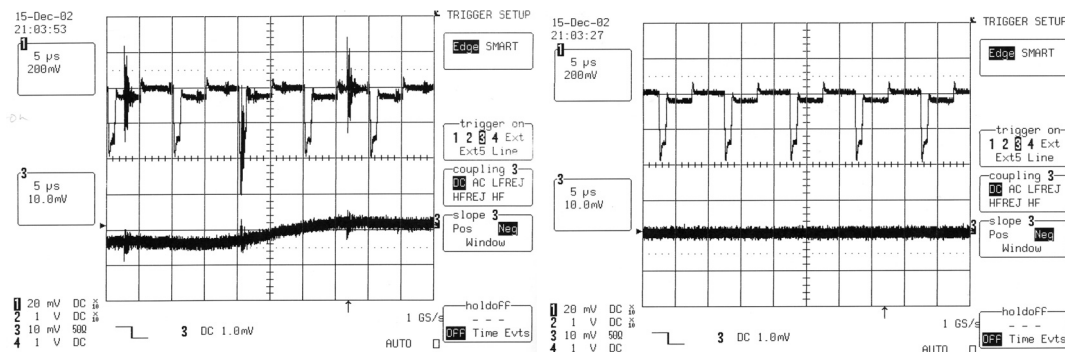


図 5.24: サージノイズの影響。(左) 冷凍機駆動時の出力。冷凍機駆動電圧は 15V。横軸は $5\mu\text{sec}/\text{div}$ 。(右) 参考のため冷凍機停止時の出力を載せる。(上) OS 出力 ($200\text{mV}/\text{div}$)。(下) 出力電流 ($50\text{mA}/\text{div}$)。

ドライバからのサージノイズを落すため、

- (1) ドライバ出力口にノイズカットトランスを噛ませる。
- (2) 研究室電源からのサージノイズ混入の可能性を考え暫定的に駆動ドライバ電源にUPS(無停電電源)を用いる。

と二つの対策を施したがいずれもサージノイズを落すことは出来なかった。

しかし特に(2)の結果からサージノイズが研究室の電源起源ではなく、駆動ドライバ起源であることが明らかになった。駆動ドライバは、要は電圧値可変の交流電源なので、市販の交流電源で代用できる。

そこで交流電源を駆動ドライバから松定プレジジョン社製安定化交流電源SR-500に交換したところ図5.25のようにサージノイズは消失した。

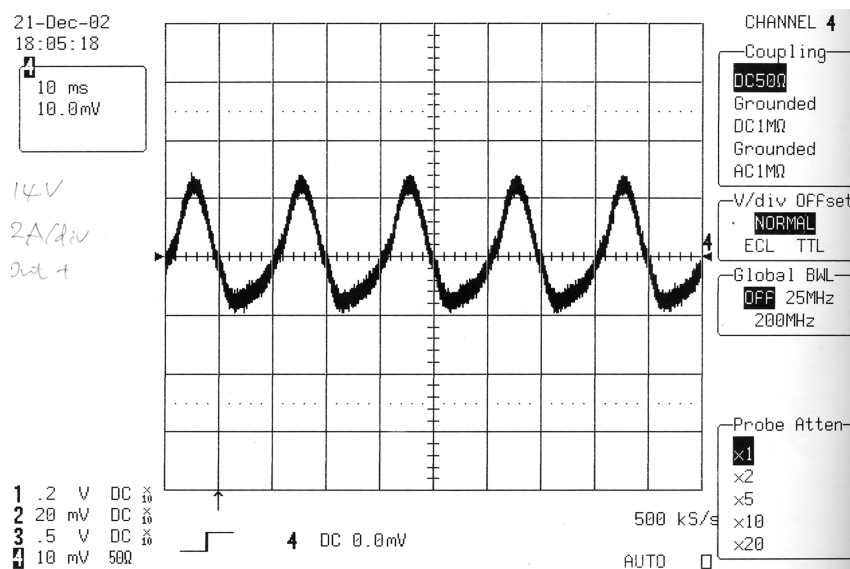


図 5.25: 市販交流電源に換装後の冷凍機ドライバの出力電流 (50mA/div)。冷凍機駆動電圧は14V。横軸は10msec/div。

サージノイズ消失後、冷凍機駆動中と停止中の波高分布を比較した結果を図5.26、表5.11に示す。表中の σ から判断して、冷凍機駆動の影響はほぼ完全に消えたといって良い。すなわち、コールドヘッドの振動はブレードを介せばほとんどCCD出力に影響を与えず、また駆動ドライバ以外の電氣的なノイズもCCD出力に影響を及ぼすものはないと言って良い。

	Active 領域		HOC 領域		VOC 領域	
冷凍器	中心チャンネル	σ	中心チャンネル	σ	中心チャンネル	σ
ON	3097	79.47	735.2	24.89	3041	77.23
OFF	3107	76.68	727.1	25.11	3054	73.88

表 5.11: 波高分布のフィッティング結果 (3)。低ノイズ交流電源を使用。ブレードは取り付けられている。

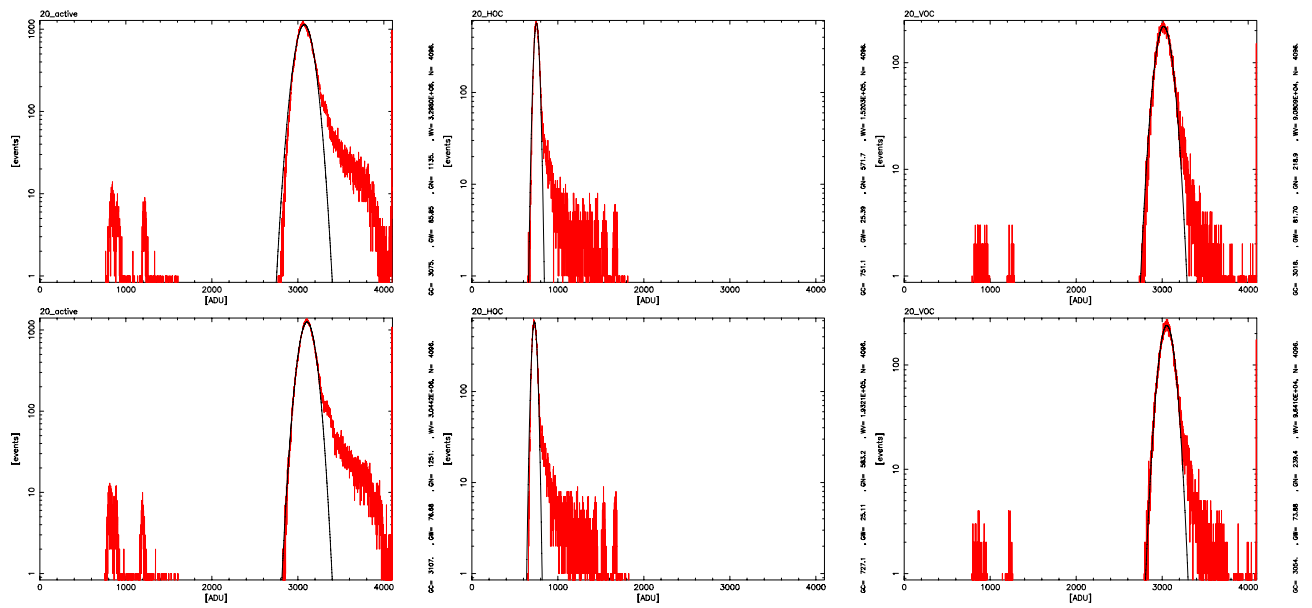


図 5.26: 冷凍機駆動(上)時と冷凍機停止(下)時の波高分布 (3) 低ノイズ交流電源を使用。プレートは取り付け有。入力電源 15V。右から Active 領域、HOC 領域、VOC 領域の順に示す。

5.5 性能評価と最適化

5.5.1 手順

本実験では CCD の性能を決める指標である

- エネルギーゲイン
- エネルギー分解能
- 読出ノイズ
- spurious charge
- 電荷転送非効率 (CTI)⁴

を求め性能評価を行ない、その値を元に駆動電圧を最適化することを目標とする。
データ取得は特記のない限り以下の方法に統一する。

- ¹⁰⁹Cd を CCD 全面に照射する。
- CCD 温度は-100°C⁵
- 100frame 取得。うち最初の 5frame は棄てる。次の 16frame を dark 推定に用いる。dark 推定したものも含め 95frame から grade 判定法により event 抽出⁶を行ない、grade0,2,3,4,6 のみを X 線イベントとして認定する。

5.5.2 動作が確認されている駆動電圧の比較

実験

はじめに Pch3-4-8 にかかる駆動電圧を大まかに決定する。

1. Pch3-4-8 の駆動は出荷時に浜松ホトニクス社で確認されており、まずその駆動電圧 (以下 HPK と称す) で性能評価を行なう。
2. 5.2 節で用いた Pch3-4-5 は Pch3-4-8 と同じウエハ材を用い、同じプロセスで製造されているため同様の動作が期待できる。そこで 5.2 節で用いた駆動電圧 (以下 NAOJ50 と称す) で性能評価を行なう。
3. 両者の駆動電圧を適当に組み合わせて性能評価を行ない、最もエネルギー分解能の良い組を暫定的な最適値とする。

測定結果

表 5.13 に駆動電圧の一覧と性能評価結果について示す。

考察

図 5.27 に各駆動電圧毎のイメージを示す。

⁴ 今回の実験ではエネルギー分解能が非常に悪いため、各領域のピーク位置が CTI 以上に揺らいでしまい、有効な値は求められなかった

⁵ 推定値。冷却柱温度を約 120°C に保った。冷却柱と CCD 温度の関係は 5.4.1 節参照

⁶ event 抽出法については第 3.2.1 節参照

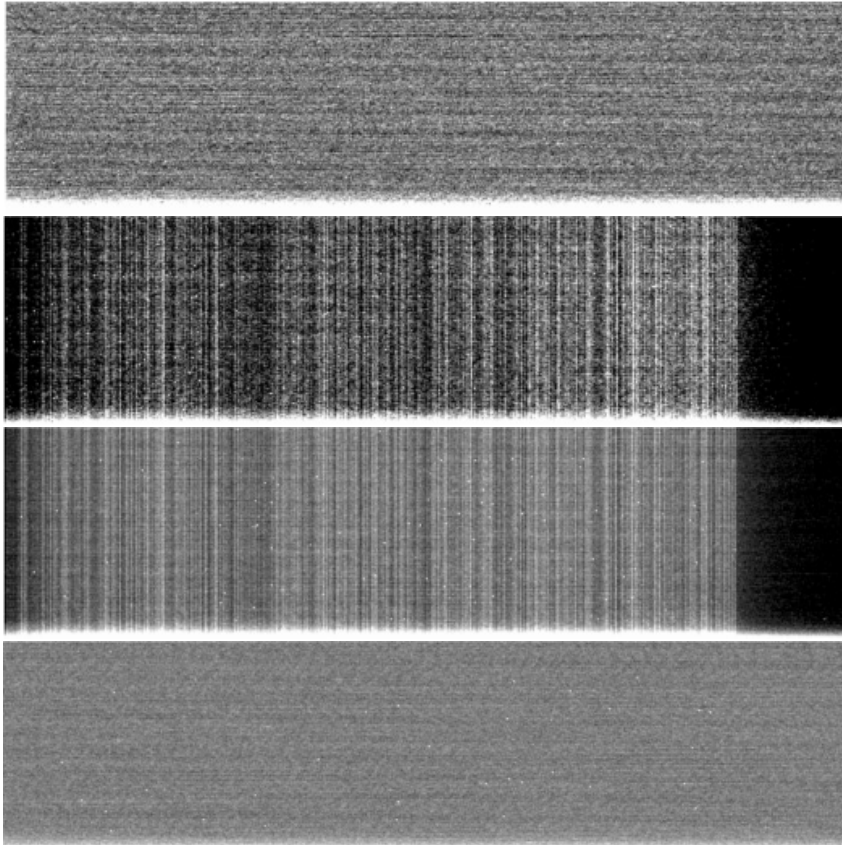


図 5.27: 取得イメージ一覧。上から順に HPK、NAOJ50、CR1228、NAOJ100 の結果である。読み出し口は左下角に位置する。

使用 CCD	HPK Pch 3-4-8
クロック電圧値	
RG , RD, OD, OG[V]	下欄参照 , -12 , -20 , -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	下欄参照
横転送電圧 (P*H,SG)	+4/-6
使用線源	$^{109}\text{Cd}(22.1\text{keV})$
露光/転送時間	10sec/3sec
取得枚数	100 frame
駆動温度	-100°C

表 5.12: 最適化実験 (1) の駆動電圧・状況

呼称	RG [V]	縦転送 [V]	ゲイン [ch/keV]	エネルギー 分解能 [keV]	読出ノイズ [e-]	暗電流 [e-/sec/pix]	spurious charge [e-]
HPK	+4/-6	+4/-6	26.0	13.4	271	2.11	(-10.56)
NAOJ50	+8/-6	+6/-7	45.8	5.6	241	2.14	557
CR1228	+4/-6	+6/-7	50.2	3.9	257	1.09	1218
NAOJ100	+8/-6	+4/-6	26.5	14.1	229	3.10	(-32)

表 5.13: 駆動電圧の最適化 (1)

HPK と NAOJ100⁷では横方向に縞模様が出来、イメージが流れていることがわかる。これは縦転送と横転送が同電圧のため、ポテンシャル差が小さく電荷転送が上手く行なわれていないことを示す。ゲインが小さいのもそれが原因であろう。

一方 NAOJ50、CR1228 では横方向の縞が消え X 線イベントがはっきり視認できる。縦方向の縞は固定パタンでありホットピクセルが原因だと考えられる。

ここではより分解能の高かった CR1228 を暫定的な最適化電圧として今後の最適化を進める。

⁷この電圧値は国立天文台で Pch3-10-5 の最適化試験の結果得られた値である

5.5.3 縦転送クロックの最適化

実験

縦転送以外のクロックは全て上で決めた CR1228 電圧に固定し、縦転送クロックを

1. Low Level を-7V に固定し High Level を変化させる
2. High Level を 6V に固定し Low Level を変化させる

の2通りで1V刻みで変化させ性能評価を行なった。ただし上の最適化実験で見たように縦転送の Low Level は横転送の Low Level より電圧が低くないと縦横転送への電荷の受渡がうまくいかないの Low Level は-7V 以下で変化させた。

使用 CCD	HPK Pch 3-4-8
クロック電圧値	
RG, RD, OD, OG[V]	+4/-6, -12, -20, -3
縦転送電圧 (P*V, TG)	下欄参照
横転送電圧 (P*H, SG)	+4/-6
使用線源	$^{109}\text{Cd}(22.1\text{keV})$
露光/転送時間	10sec/3sec
取得枚数	100 frame
駆動温度	-100°C

表 5.14: 縦転送最適化実験の駆動電圧・状況

測定結果

縦転送 [V]	ゲイン [ch/keV]	エネルギー 分解能 [keV]	読出ノイズ [e-]	暗電流 [e-/sec/pix]	spurious charge [e-]
+6/-7	50.2	3.9	257	1.09	1218
+6/-8	50.5	3.3	211	0.54	3166
+6/-9	51.1	3.6	199	0.54	4637
+5/-7	47.8	5.2	230	< 0.54	829
+7/-7	50.0	4.0	226	< 0.54	363

表 5.15: 縦転送電圧の最適化

縦転送電圧は+6/-8V のときが最もエネルギー分解能が良い。以降の実験での縦転送クロックはこの値を用いることとする。+6/-9V の時、読出ノイズは最も小さいが spurious charge が逆に増加している。

一方、High Level を振った結果では、6/-7V の性能を基準にすると、読出ノイズ、spurious charge とともに減少しているのでエネルギー分解能は改善するはずなのだが、逆に悪化する結果となっている。原因は現在のところ不明であり、何か他にエネルギー分解能を決める要因があるのかが今後の究明課題である。

5.5.4 横転送クロックの最適化

実験

横転送クロックの最適化を行なう。縦転送電圧は上の実験で決めた値、それ以外は CR1228 電圧である。

1. Low Level を-6V に固定し High Level を変化させる
2. High Level を 4V に固定し Low Level を変化させる

の 2 通りで変化させ性能評価を行なった。縦転送最適化と同様に横転送の Low Level は縦転送の Low Level を下回らないよう-7V 以上とした。

使用 CCD	HPK Pch 3-4-8
クロック電圧値	
RG , RD, OD, OG[V]	+4/-6 , -12 , -20 , -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+6/-8
横転送電圧 (P*H,SG)	下欄参照
使用線源	$^{109}\text{Cd}(22.1\text{keV})$
露光/転送時間	10sec/3sec
取得枚数	100 frame
駆動温度	-100°C

表 5.16: 横転送最適化実験の駆動電圧・状況

測定結果

横転送電圧は+4/-7V のときが最も読出ノイズが小さく、エネルギー分解能が良い。

縦転送最適化時と同様に、基準に較べて読出ノイズ、spurious charge とともに減少しているのにエネルギー分解能が悪くなっているケースがある。この場合若干ゲインが悪いので横転送のポテンシャル差が小さく転送がうまく行っていない可能性が挙げられる。

横転送 [V]	ゲイン [ch/keV]	エネルギー 分解能 [keV]	読出ノイズ [e-]	暗電流 [e-/sec/pix]	spurious charge [e-]
+4/-6	50.5	3.3	211	0.54	3166
+3/-6	46.0	4.4	195	< 0.60	2370
+5/-6	52.7	4.1	236	0.52	2549
+6/-6	49.1	4.7	245	< 0.59	2737
+4/-5	51.2	3.7	217	1.07	2776
+4/-7	52.2	3.2	179	< 0.52	2938

表 5.17: 横転送電圧の最適化

5.5.5 縦転送クロック立下時間との相関

前のクロック電圧最適化試験では、非常に大きい spurious charge の存在が明らかになった。spurious charge の低減には第1章で述べたように、(1) 転送クロックの電位差を小さくする、(2) 転送クロックの立上/立下を滑らかにする、の主に2通りの方法で酸化物から放出する正孔の感ずる電場を小さし、獲得する運動エネルギーを減らせば良い。(1)の電位差を変更すると再び電圧最適化をやり直す必要があるため、ここでは(2)の方法で spurious charge 低減を行なう。

実験

縦転送クロックと横転送クロックは上までの最適化で決めた値、それ以外は CR1228 電圧を用いる。前の実験までは縦転送の立ち上がり時間は $0.35\mu\text{sec}$ である。

また 100kHz 駆動の場合クロックの持続時間がおよそ $6\mu\text{sec}$ のためクロックの立上/立下時間は $3\mu\text{sec}$ が限界になる。そこでクロック周波数を落してクロックの持続時間を伸ばすことで更に長い立上/立下時間を実現することにする。

使用 CCD	HPK Pch 3-4-8
クロック電圧値	
RG, RD, OD, OG[V]	+4/-6, -12, -20, -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+6/-8
横転送電圧 (P*H,SG)	4/-7
使用線源	$^{109}\text{Cd}(22.1\text{keV})$
露光/転送時間	10sec/3sec(100kHz)、12sec(25kHz)、18sec(17kHz)、30sec(10kHz)
取得枚数	100 frame
駆動温度	-100°C

表 5.18: 縦転送クロック立下時間変更実験の駆動電圧・状況

測定結果

駆動周波数が遅くなるほど読出ノイズが小さくなり、結果的にエネルギー分解能を向上させている。駆動周波数を遅くするとクロックの反転時間すなわち spurious charge の原因となる電子の放出時間も長くなるため spurious charge も増加する。したがって最適駆動周波数は両者のトレードオフとなる。今回の実験から駆動周波数は 25kHz、立下時間は $17\mu\text{sec}$ を最適値とした。以降この値で駆動させる。駆動周波数を遅くすると読み出しノイズが減少する原因は今のところ良くわからない。入力信号の積分時間が長くなるので、例えば 100kHz 程度のノイズが載っていた場合、100kHz の駆動周波数では積分により落すことは難しいが、これより小さい周波数で駆動させた今回のようなケースでは積分により相殺が可能になり、その効果でノイズが減っているかもしれない。今後検証が必要である。

駆動周波数	立下時間	ゲイン	エネルギー 分解能	読出ノイズ	暗電流	spurious charge
[kHz]	[μ sec]	[ch/keV]	[keV]	[e-]	[e-/sec/pix]	[e-]
100	0.37	51.3	3.8	194	0.53	3094
	0.65	51.4	3.7	187	0.53	3166
	1.10	51.0	3.8	190	0.53	2608
	2.8 ¹	51.3	4.0	191	0.52	2592
	3.3	51.1	3.6	188	0.53	1661
	3.8 ¹	49.3	4.5	195	1.12	689
25 ²	3.8	44.4	4.3	197	1.85	6131
	9.5	45.8	3.0	115	1.80	4858
	13	46.2	2.6	108	1.78	4153
	17	46.7	2.5	114	1.76	3649
17 ³	3.8	51.8	4.3	210	1.57	6403
	9.5	52.9	2.6	153	1.55	5527
	13	53.3	2.6	109	2.06	4886
	17	52.9	2.7	107	1.55	4527

表 5.19: 読出周波数、縦転送クロック立下時間と諸量の相関¹:C23 を 2.2nF に換装。²:C23 を 10nF に換装。読出時間 12sec。³:C23 を 10nF に換装。読出時間 18sec。

5.5.6 横転送クロック立上時間との相関

非常に大きな読出ノイズの原因として横転送の spurious charge の可能性を考えた。もしも spurious charge ならば立下時間を調整することで変化するはずである。

実験

上記実験までは横転送立下時間は一律 300nsec であった。今までに最適化したクロックを用いて横転送の立下時間のみを変化させ、読み出しノイズ等諸パラメータの変遷を追う。

測定結果

結果を表 5.5.6 に示す。横転送立下時間を変化させても読出ノイズに大きな変化はみられず、大きな影響はないと考えられる。よって横転送立下時間は今までどおり 0.3 μ sec とする。

なお横転送立下時間と CCD 性能の比較は今まであまり行なわれて来なかったが、浜松ホトニクス社製の P 型 CCD でもクロックの立上時間との相関がないという同様の結果が得られている [24]

使用 CCD HPK Pch 3-4-8	
クロック電圧値	
RG , RD, OD, OG[V]	+4/-6 , -12 , -20 , -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+6/-8
横転送電圧 (P*H,SG)	+4/-7
縦転送電圧立下時間	17 μ sec
駆動周波数 (読出時間)	25kHz(12sec)
使用線源	¹⁰⁹ Cd(22.1keV)
露光/転送時間	10sec/12sec
取得枚数	50 frame
駆動温度	-100°C

表 5.20: 横転送クロック立下時間変更実験の駆動電圧・状況

立下時間	ゲイン	エネルギー 分解能	読出ノイズ	暗電流	spurious charge
[μ sec]	[ch/keV]	[keV]	[e-]	[e-/sec/pix]	[e-]
0.3	44.7	2.4	105	1.23	4601
0.8	44.4	2.4	104	1.80	4644
3.0	44.3	2.5	108	1.86	4747
6.0 ¹	44.4	2.4	110	2.47	4765
13 ¹	31.4	3.2	170	1.74	4139

表 5.21: 横転送立下時間と諸量の相関。¹:C23 を 22nF に換装。

5.5.7 クロック最適値

以上の最適化試験から、Pch3-4-8 の最適クロックは表 5.22 のように決まる。

使用 CCD	HPK Pch 3-4-8
最適クロック電圧値	
RG , RD, OD, OG[V]	+4/-6 , -12 , -20 , -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+6/-8
横転送電圧 (P*H,SG)	+4/-7
縦転送立下時間	17 μ sec
横転送立下時間	0.3 μ sec
駆動周波数 (読出時間)	25kHz(12sec)

表 5.22: Pch3-4-8 の最適クロック

表 5.23 に示すように実験開始当初のエネルギー分解能 5.6keV(NAOJ50、表 5.27) に比べ、最適化実験により 2.4keV と 2 倍以上のエネルギー分解能向上に成功したことになる。また読出ノイズも半減している。

	ゲイン	エネルギー 分解能	読出ノイズ	暗電流	spurious charge
	[ch/keV]	[keV]	[e-]	[e-/sec/pix]	[e-]
最適化前	45.8	5.6	241	2.14	557
最適化後	44.7	2.4	105	1.23	4601

表 5.23: 最適化前と最適化後の諸指数の差異

spurious charge のみ増加したが、(1) エネルギー分解能の向上のため縦転送の電位差を大きくした。(2) 読出ノイズの低減のため積分時間を長くした。の副産物であり、今回の実験方針ではやむを得ない。しかし従来の浜松ホトニクス社製 P 型 CCD の spurious charge に較べると格段に大きい。例えば馬場修論 [12] で報告されている CCD-CREST の spurious charge の値は 0.4e- である。この極端な差異がどのように生じているのかは不明であり、今後の課題である。同様に改善したとはいえ読出ノイズの 100e- は非常に大きくエネルギー分解能の向上を妨げている。馬場修論で評価した CCD-CREST の読出ノイズは約 8e- であり、改善のためには今後この違いの原因を究明する必要がある。

5.6 空乏層厚測定

Pch3-10-8 の空乏層厚測定を行なった。本 CCD の予定空乏層厚は 100 μ m である。

5.6.1 駆動電圧の決定

まず、前節までの実験により決定した Pch3-4-8 の最適クロック電圧値で駆動させたところイメージが縦方向に流れ、イベント取得が出来なかった (図 5.28)。

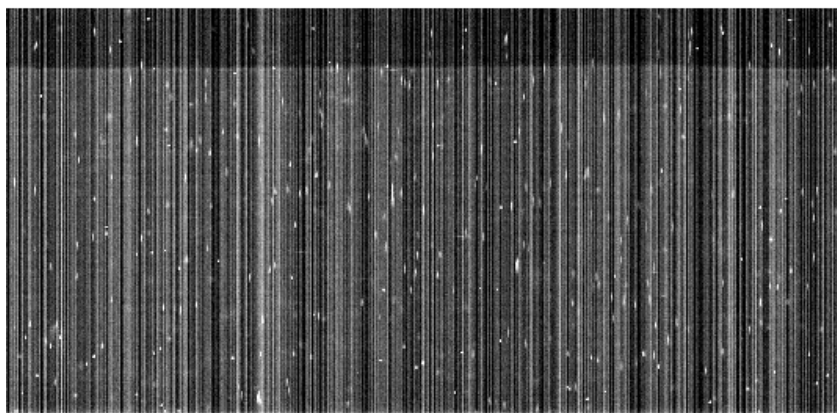


図 5.28: 京大最適化クロックで Pch3-10-8 を駆動した。イベントが縦方向に流れている。特に縦転送回数が増えると大きく伸びる傾向にある。

次に、国立天文台で Pch3-10-5 を最適化した値 (NAOJ100、表 5.13) を用いたが横方向に流れた。(図 5.29)。

横方向に流れる症状は縦転送から横転送に移る際、電荷の受渡しが上手く行なわれず取りこぼしているため尾を引くと考えられる。そこで NAOJ100 電圧を基準に縦転送、横転送の電圧の組み合わせを 3 パタン試したが、いずれもイベントが流れた。(表 5.24 の下 3 段)

使用 CCD		HPK Pch 3-10-8	
最適クロック電圧値			
RG , RD, OD, OG[V]		+4/-6 , -12 , -20 , -3	
縦転送立下時間		17 μ sec	
横転送立下時間		0.3 μ sec	
駆動周波数 (読出時間)		25kHz(12sec)	
縦転送電圧 [V]	横転送電圧 [V]	症状	備考
+6/-8	+4/-7	縦方向に流れる	Pch3-4-8 最適化電圧 (本論文)
+4/-6	+4/-6	横方向に流れる	Pch3-10-5 最適化電圧 (国立天文台) この時のみ RG は+8/-6
+5/-6	+4/-6	横方向に流れる	
+4/-6	+4/-7	横方向に流れる	
+4/-6	+6/-7	横方向に流れる	

表 5.24: クロック電圧値の調整と症状

イベントが縦方向にながれる様子を見ると電荷を取りこぼしているというよりも転送の前後方向にながれている様子が見てとれる (図 5.28)。また読出口から遠くなるにつれて縦方向にながれる傾向があることから縦転送電圧に原因があると考えられる。そこで縦転送クロックの立上/立下時間が長いとクロックが切り替わる際、隣り合うピクセルでポテンシャルが近くなる時間

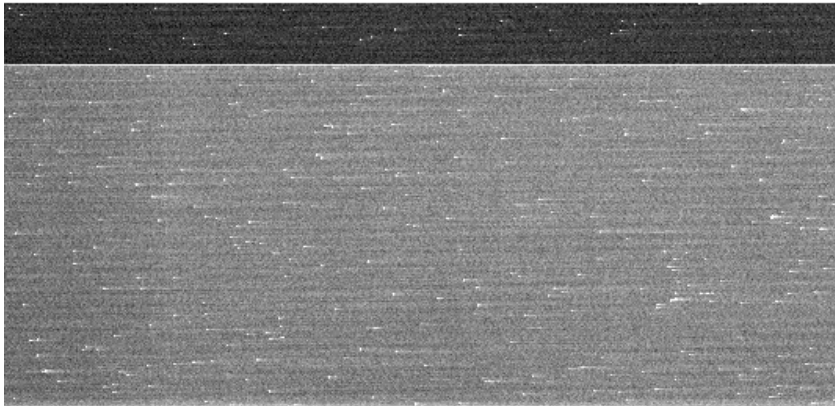


図 5.29: 国立天文台最適化クロックで Pch3-10-8 を駆動した。イベントが横方向に流れている。

が増える。その時に蓄積電荷が流出しているという仮説を考えた。転送のたびに電荷が漏れ出すので、転送が多いほどイベントが縦方向に大きく拡がって見える特徴にこの仮説は良く合う。そこでクロックの立ち上がり時間を $0.4\mu\text{sec}$ に短縮し、駆動させてみた。その結果、縦方向のイベントの流れが抑えられた。取得画像をみながら最適電圧を探ると縦転送は $+5/-7\text{V}$ 、横転送は $+4/-6\text{V}$ でほぼ完全に縦流れが収まり、イベント検出が可能になった (図 5.30)。

以降、縦転送クロックは $+5/-7\text{V}$ 、立下時間は $0.4\mu\text{sec}$ 、横転送クロックは $+4/-6\text{V}$ 、それ以外は今まで最適化した値 (表 5.25) を用いて空乏層厚の評価を行なった。

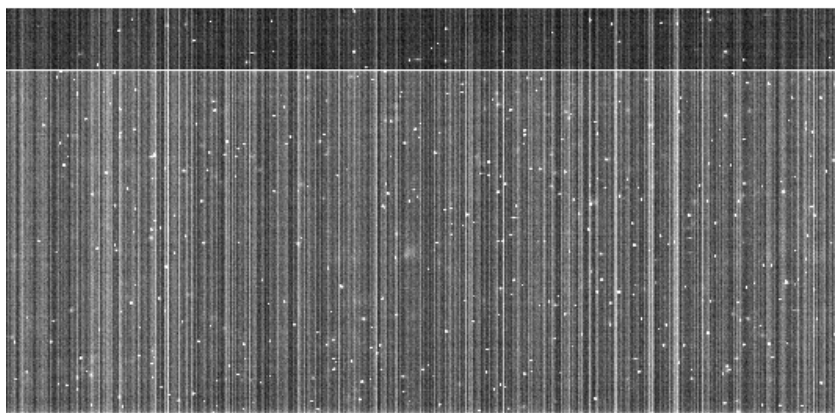


図 5.30: 縦転送クロック立上/立下時間の短縮によりイベントが流れなくなった。電圧は表 5.25。蓄積時間 10sec。

5.6.2 蓄積電圧と空乏層厚の関係

2.1.2 節で見たように空乏層厚は電極に印加する電圧の $1/2$ 乗に比例して増大する。本実験では露光中の蓄積電圧と空乏層厚の関係について調べた。

実験

CCD 評価用真空槽に 5.2.2 節で絶対強度測定をした際に用いた同じ線源、同じコリメータを図 5.31 のように真空槽に取り付け CCD に照射した。5.2 節と同様、絶対強度と同数の X 線入射が期待できるので CCD で検出されたイベント数から吸収確率を求め空乏層厚を算定する。本実験の駆動電圧は前節で決めた電圧を用いる (表 5.25)。

使用 CCD	HPK Pch 3-10-8
クロック電圧値	
RG, RD, OD, OG[V]	+4/-6, -12, -20, -3
縦転送電圧 (P*V,TG)	+5/-7
横転送電圧 (P*H,SG)	+4/-6
使用線源	$^{109}\text{Cd}(22.1\text{keV})$
露光/転送時間	60sec/12sec
取得枚数	下欄参照
駆動温度	-100°C

表 5.25: 空乏層厚測定実験の駆動電圧・状況

イベント抽出は 5.5 節で定義したものと同様の方法で行なう。ただし今回はコリメータで X 線照射範囲を絞っているため、X 線入射が期待される領域を含む 200×200 ピクセルのなかのイベントのみを数えることにする (図 5.32)。

結果

表 5.26 に見られるように、蓄積電圧の増加とともに空乏層厚が広がっているのが分かる。

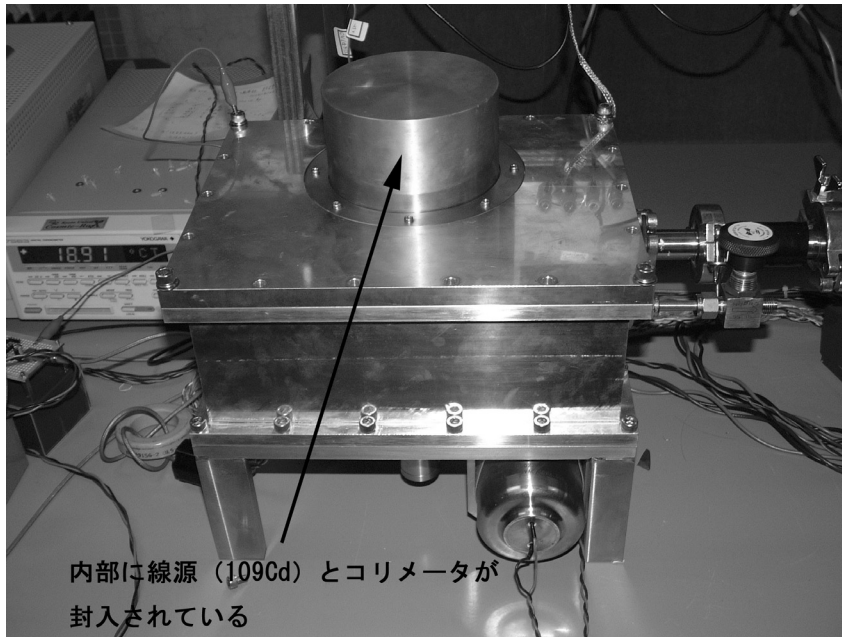


図 5.31: 空乏層厚測定の設定アップ。

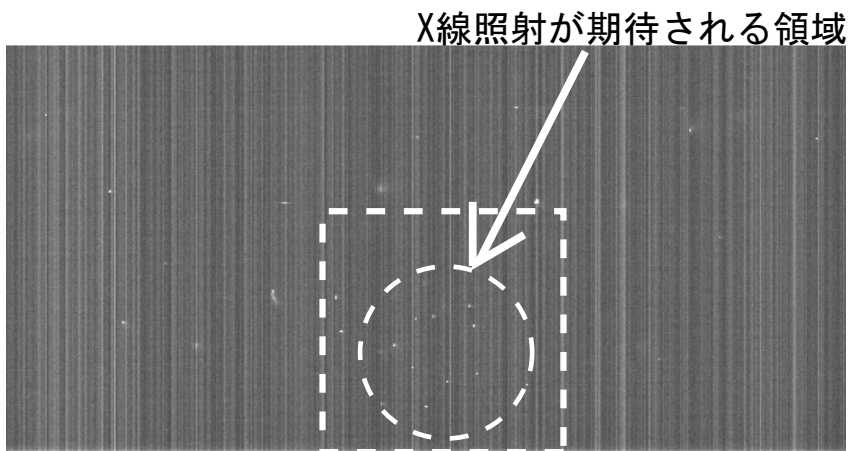


図 5.32: X線イベントの抽出範囲 (四角の点線で囲まれた領域)。点線で囲まれた円領域がコリメータの立体角から予想される照射範囲である。

蓄積中電圧 [V]	露光 時間 [sec]	取得 枚数	露光 総計 [sec]	イベント数 [cnt]	検出 効率 [%]	空乏層厚 [μm]	エネルギー 分解能 [keV]
-2	72	200	14400	1843	5.6	89	6.7
-4	72	195	13040	1245	4.7	74	5.0
-6	72	125	9000	1330	6.4	103	6.3
-8	72	170	12240	1904	6.8	109	6.5
-12	72	145	10440	1840	7.7	124	6.9

表 5.26: 蓄積中電圧と空乏層厚の相関

空乏層厚は最大で $124\mu\text{m}$ となり予定空乏層の $100\mu\text{m}$ を上回った。また、転送中の X 線イベントの区別ができなかったため、X 線のカウンtrateを求める際、実際の蓄積時間 (60sec) に転送時間 (12sec) を加えた 72sec を実質的な露光時間とした。そのためややカウンtrateを少なく見積もっており、求めた空乏層厚は更に厚い可能性がある。

一方、エネルギー分解能は Pch3-4-8 の 2.4keV に較べかなり悪く、今後 Pch3-4-8 のような系統的な最適化が必要である。

また前節で問題であった、イベントが縦方向、横方向に流れるメカニズムは仮説こそ立てたが未解決であり、今後詳しい検証が必要である。

第6章 まとめ

本論文では次期線天文衛星搭載に向け開発が進められている透過型 CCD について、現時点での到達点を様々な角度から明らかにする諸実験を行なった。

1. 透過型 CCD メカニカルモデルの特性評価

X 線照射試験により設計通りの加工がされていることを確認した。また実際の衛星搭載の状況を模して冷凍試験をおこない、温度特性を調べた結果、CCD 全体が十分に冷えることを示した。また CCD 周辺の熱環境を改善することで、CCD を更に効率的に冷却できることを理論計算から示した。

2. 機械式冷凍機の駆動試験

次期 X 線天文衛星に搭載を予定している機械式冷凍機の駆動試験を行い、冷凍能力や CCD に及ぼす影響を調べた。冷凍器の電源である駆動ドライバ以外からは CCD に大きな影響を及ぼすノイズ源はなく、電源を低ノイズのものに交換すれば冷凍器駆動による影響はほとんど消失することを確認した。

3. N 型 CCD の性能評価環境の整備

次期 X 線天文衛星搭載用 N 型 CCD プロトタイプ納入に備え、評価用真空槽を設計、開発した。機械式冷凍器の取り付けも考慮してある。また従来の P 型 CCD 駆動・読出システムを N 型 CCD を駆動できるよう改良を加えた。

4. N 型 CCD の駆動試験・性能評価

上記システムを用いて N 型 CCD の駆動に成功した。性能評価・最適化を行いエネルギー分解能を実験開始当初の 2 倍まで引き上げ、読出ノイズを半減させることに成功した。また空乏層厚測定を行い、蓄積中電圧を上げることで予定より 20% 程度厚い最大 $120\mu\text{m}$ という空乏層厚を持つことを明らかにした。この空乏層厚は世界トップクラスである。

一方、読出ノイズは最適化してもおよそ $100e^-$ と相当に大きく、また spurious charge も従来の浜松ホトニクス社製 P 型 CCD に見られないほど大きい。結果としてエネルギー分解能は $2.4\text{keV} (@22.1\text{keV})$ に留まっており、実用化にはまだ遠いレベルにある。また、Pch3-10-8 の駆動試験では縦転送の立ち上がり時間に依存するイベントの縦流れ現象を発見した。これは空乏層厚が異なるだけの Pch3-4-8 には起こらなかった現象であり、原因がまだ特定できておらず、今後実験的に究明する必要がある。

関連図書

- [1] 石川 友清、「放射線概論」(通商産業研究社 1999)
- [2] 三浦 功、菅 浩一、 俣野 恒夫、「放射線計測学」(裳華房 1972)
- [3] 浜岡 武、山下広順、「X 線結像光学」(培風館 1999)
- [4] 堀田厚生、「半導体の基礎理論」(技術評論社 2000)
- [5] 浜松ホトニクス社技術資料、「FFT-CCD エリアイメージセンサの特性と使い方」
- [6] Janesick, J.R., Hyncecek, J., and Blouke, M.M., “Solid State Imagers for Astronomiy” (1981)
- [7] F. ノル、「放射線計測ハンドブック 第 2 版」(日刊工業新聞社 1996)
- [8] 村上 弘志、 修士論文(京都大学 1999)
- [9] 今西 健介、 修士論文(京都大学 2000)
- [10] X-Ray Interaction with Matter, http://cindy.lbl.gov/optical_constants/
- [11] 小林繁夫、「宇宙工学概論」(丸善株式会社 2001)
- [12] 馬場 彩、 修士論文(京都大学 2001)
- [13] 河野 誠、 修士論文(京都大学 2001)
- [14] CQ 出版社、FET 規格表 (2000)
- [15] MAX435 data sheet, <http://pdfserv.maxim-ic.com/arpdf/1564.pdf>
- [16] LM6144 data sheet, <http://www.national.com/pf/LM/LM6144.html>
- [17] LM7171 data sheet, <http://www.national.com/pf/LM/LM7171.html>
- [18] AD830 data sheet, <http://www.analog.com/pdf/ad830.pdf>
- [19] HCPL-2630 data sheet, <http://www.agilent.co.jp/spg/products/optocoupler/HCPL2630.pdf>
- [20] SST309 data sheet, <http://www.vishay.com/docs/70237.pdf>
- [21] 住友重機械工業 精密事業部 クライオユニット部 「スターリング冷凍機仕様書 型式: SRS2110 (平成 13 年 5 月)」
- [22] 国立天文台 編、「理科年表 平成 15 年」(丸善株式会社 2002)

- [23] Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Polymer Melts and Short-Hot-Wire Method, <http://www.symp14.nist.gov/PDF/POL01ZHA.PDF>
- [24] 夏苺 権、修士論文 (大阪大学 2002)

謝辞

本修士論文は多くの方々の助けをお借りして作成されました。ここに深く御礼申し上げます。

小山勝二教授には大学院入学以来、本論文のテーマである CCD 実験を始め、物理学、天文学、研究者としてのあるべき態度、更に英語、日本語に至るまで数え切れない御指導を頂きました。また、私が X 線天文学を専攻に選んだきっかけは、レポートのテーマを探していた 2 回生の夏に小山先生の「X 線で探る宇宙」を読んで深い感銘を受けたことでした。鶴剛助教授には私が 4 回生で選択した課題研究での実験、ゼミ以来、懇切丁寧に指導して頂きました。特に本修士論文のほとんどは鶴さんの御助言なくしてはやり遂げられなかったかもしれません。11 月の中旬、ADC が動かなかったときに、夜の 2 時まで一緒に考えて下さったことなど、いくら感謝してもしきれないほど暖かい御指導を頂きました。松本浩典助手には実験で切羽詰まった時にあたかも救世主のように現れては幾度となく助けて頂きました。本論文中での透過型 CCD メカニカルモデルの冷凍効率の理論計算は主に松本さんによるものです。またお忙しい中、私の修士論文に多くの重要なコメントを頂きました

国立天文台の宮崎聡助手、鎌田有紀子さんには N 型 CCD の空乏層厚測定の際、大変お世話になりました。N 型 CCD を共同開発している大阪大学常深研究室、浜松ホトニクス社固体開発事業部の方々にも大変お世話になりました。特に浜松ホトニクス社の鈴木久則さんには N 型 CCD の研究が行き詰まるたび的確なアドバイスを頂きました。また初歩的な質問にも丁寧に答えて頂き、時には文献を FAX で送って頂いたりしました。

宇宙線研究室の方々にも大変お世話になりました。

まず、本修士論文で用いた CCD 駆動システムは D2 の馬場彩さんの修士論文の成果です。N 型 CCD の試験に備えて CCD 駆動システムの初歩の初歩から教えて頂きました。また N 型 CCD の京大でのファーストライトを同時に目にし、感動を分かちあうことが出来ました。

谷森達教授、田澤雄二助手、窪秀利助手にはコロキウムや学会での発表練習のたびに的確で、また少し違った点からアドバイスを頂き強い刺激になりました。特に 3 回生の時の課題演習の指導教官であった田澤さんに本修士論文の基礎となる X 線検出器の原理を教えて頂きました。またスエジロックの使い方を教えて頂きました。

PD の身内賢太郎さんには実験のことを良く教えて頂きました。中国の不思議な男の話も聞かせて頂きました。原敏さんには計算機のことをいろいろ教えて頂きました。またよくお菓子の差入れを頂きました。D3 の今西健介さんには 4 回生の課題研究での RA でお世話になって以来、CCD 解析ソフトである XISDL の設定から使い方に至るまでをみっちり教えて頂きました。将来のことや研究生活のことでも良く相談にのって頂きました。辻本匡弘さんには 3 回生の課題演習での TA でお世話になって以来、実験、解析、株価を問わず目から鱗が落ちるような説得力のある御助言を頂いています。また修士論文締切前夜おにぎりの差入れを頂きました。またお二人には修士論文の添削をして頂き、多くの貴重な御助言を頂きました。櫛田淳子さんには良く美味しいお茶を入れて頂きました。猫舌のぼくですが櫛田さんのお茶だけは熱いうちからなんとか飲もうとしてしまいます。D2 の浅原明広さんには良く夜食の買いだしにつきあって頂きました。永吉さんにはいろいろ実験器具をお借りしました。D1 の植野優さんにはよく実験の相談に乗って頂きました。実験で良い結果が出るとつい植野さんに見せたくなくなってしまいます。千田篤史さんには私が並行して進めている銀河中心領域の研究についていろいろ教えて頂きました。折戸玲子さんには鉛ブロックを貸して頂きました。M1 の中嶋大君にはたびたび実験を手伝ってもらいました。高田淳史君からはサッカー大会の度に良いパスを供給してもらいました、(が決められませんでした)。谷村英樹君には熱縮チューブや導電テープを探してもらいました。秘書の古守亜矢子さんには旅費の精算や様々な事務手続きをして頂

きました。

同輩の西田大輔君、渡部至緒さんとは共に励まし合って修士論文の完成に漕ぎ着けました。趣味の合う西田君にはよく MD を借りました。ぼくの実験室のはず向かいに居室のある渡部さんのところには、実験がひと段落する度に何か用事を作っては雑談に行きました。

上に挙げた以外の方々にもとにかくお世話になりました。列挙するとキリがありませんが、地元の友人、特に教育実習で知り合った友人はぼくが帰省する度に飲み会を開いて、励ましてくれました。

最後に私が選んだ大学院という道を理解し、暖かく支えてくれている両親と弟に改めて感謝します。