

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載予定 CCD 検出器 (SXI) の 性能評価の研究

京都大学大学院 理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室

信川 久実子

2013 年 1 月 28 日

我々は2014年度に完成し、2015年度に打ち上げを予定している次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載する軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) の開発を行っている。SXI は CCD 素子 4 枚を 2×2 に並べ、0.4–12 keV 帯域で 38×38 という広い視野をカバーする。CCD 素子はスターリング式冷凍機を用いておよそ -120°C に冷却する。本研究では開発の一部および機能・性能試験を行った。

SXI では FPC (Flexible Printed Circuits) を用いて、CCD とビデオボードを接続している。SXI ではマルチレイヤー FPC を採用する。過去の衛星搭載品で当初用いたマルチレイヤー FPC では、低温時に断線するという障害が発生し、衛星計画に重大なインパクトを与えた。我々は -130°C から $+70^{\circ}\text{C}$ までの熱サイクルを 40 回かけても FPC が問題なく動くことを確認した。さらに、液体窒素を用いた熱衝撃試験も実施したが、FPC に異常は見られなかった。

我々は SXI のエンジニアリングモデル (EM) を作成し、2012 年 6 月から 10 月にかけて動作試験および性能評価を行なった。EM システムでは試作のエレクトロニクスを用いている。我々は読み出しノイズ (rms) は目標値の $7e^{-}$ を達成することを確認した。SXI ではスターリング冷凍機へは一定の電力を投入したまま、ヒーター出力をフィードバック制御して CCD の温度を -120°C 程度に一定に保持する。我々は EM システムにおいて目標温度の $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ で温度制御が動作することを検証した。またヒーターへのフィードバック制御が与える読み出しノイズへの影響は $1 e^{-}$ 以下であることを確認した。電荷注入機能の動作も確認し、電荷転送効率の向上に有効であることを検証した。さらに 5.9 keV の X 線を照射した結果、単一ピクセル内に収まる X 線イベントについて、エネルギー分解能が目標値の 150 eV (FWHM) を達成した。全 X 線イベントでの解析方法を改良した結果、エネルギー分解能 160–170 eV を得た、要求値の 200 eV を満足することを確認した。

SXI カメラシステムの性能向上のための試験を行う京都システムの立ち上げ、およびフライトモデル (FM) のキャリブレーションのための多色 X 線発生装置の製作と動作検証を行った。京都システムが安定動作しデータ取得ができることを確認し、電荷注入もうまく機能することを検証した。 α 線を用いた多色 X 線発生装置からは 0.7, 1.5, 8.0, 8.6 keV の 4 種類の輝線が放射されていることを確認し、その強度が 3–10 (カウント/1 素子/4 秒) であることを測定した。また、この X 線発生装置を用いて得られたデータから、エネルギー較正およびエネルギー分解能の測定を行い、FM のためのキャリブレーションに使用可能であることを検証した。

目次

概要		i
第 1 章	X 線天文学	1
1.1	X 線天文学のあけぼの	1
1.2	宇宙空間での X 線放射機構	2
1.3	X 線検出の素過程	2
1.4	X 線観測装置	6
第 2 章	日本の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H	12
2.1	ASTRO-H 衛星搭載予定検出器	13
第 3 章	X 線 CCD	16
3.1	CCD の MOS 構造	16
3.2	X 線 CCD の動作	18
3.3	X 線との相互作用	18
3.4	表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD	19
3.5	電荷収集	20
3.6	電極構造	22
3.7	電荷転送	23
3.8	電荷の読み出し	25
3.9	イベント抽出	27
3.10	CCD 素子の性能指標	28
3.11	エネルギー分解能の劣化の要因	30
3.12	電荷転送非効率	33
3.13	unknown な成分	33
3.14	その他の性能劣化の原因	34
第 4 章	軟 X 線撮像検出器 SXI	35
4.1	SXI の開発目標	35
4.2	SXI の開発の現状と本修士論文の位置づけ	35
4.3	SXI システムの構成	38
第 5 章	FPC 熱サイクル・熱衝撃試験	44
5.1	試験目的	44

5.2	熱サイクル試験	44
5.3	液体窒素による熱衝撃試験	53
5.4	FPC 試験のまとめ	60
第 6 章	エンジニアリングモデルによる性能評価	62
6.1	システム概要	62
6.2	EM システムの基本性能	64
6.3	Charge Injection の効果	66
6.4	Split threshold と Grade 0 のエネルギー分解能の関係	68
6.5	even-odd 間のゲイン補正と Split threshold の最適化	72
第 7 章	エンジニアリングモデルによる機能試験	80
7.1	キャリブレーションソースの強度と散乱成分の測定	80
7.2	ヒーターによる温度制御試験	85
第 8 章	CCD 素子のエンジニアリングモデルによるキャリブレーション準備実験	89
8.1	目的	89
8.2	カメラシステム (京都システム) の立ち上げ	89
8.3	基本性能の評価	92
8.4	α 線を用いた多色 X 線発生装置による基礎実験	92
8.5	CCD の性能評価	96
8.6	多色 X 線発生装置の性能評価	99
第 9 章	まとめ	101
	謝辞	102
	参考文献	103

表目次

4.1	SXI のベースライン案とゴール案	36
5.1	抵抗を測定したピンの組み合わせ (1/2)	50
5.3	抵抗を測定したピンの組み合わせ (2/2)	51
5.5	各サイクルにおいて FPC を液体窒素に浸けていた時間と大気中に取り出していた時間	60
6.1	EM システムにおける使用機器	63
6.2	SXI の EM システムにおけるデータ諸元	64
6.3	Charge Injection 無しときのノイズ	66
6.4	5.9 keV の X 線におけるゲイン [eV/ch] とエネルギー分解能 (FWHM) [eV]	70
6.5	Charge Injection をしたときのノイズ (rms)	71
6.6	Split threshold による中心チャンネルと幅 (1σ) の変化 (Grade 0)	72
6.7	全イベントのうち X 線イベントが占める割合 (%)	74
6.8	CCD-2 segAB のゲイン補正	75
6.10	CCD-2 segCD のゲイン補正	76
7.1	ヒーターによる PID 制御で試したパラメーターの組み合わせ	86
7.2	ヒーターによる温度制御でのノイズ調査のデータ諸元	86
7.3	ヒーターによる温度制御をした時としない時のゲイン [eV/ch] とエネルギー分解能 (FWHM) [eV]	87
7.4	ヒーターによる温度制御をした時としない時のノイズの比較	87
8.1	京都システムでの使用機器	90
8.2	ノイズの評価	92
8.3	Grade0 スペクトルの波高値	98
8.4	ゲイン補正後の Grade0+2+3+4+6 スペクトル	100

図目次

1.1	Sco X-1 の発見	1
1.2	Si における光電吸収断面積	3
1.3	蛍光収率	4
1.4	X 線と物質の主な相互作用	4
1.5	世界の X 線観測衛星の歴史	7
1.6	X 線望遠鏡の構造	9
1.7	<i>Suzaku</i> に搭載された X 線マイクロカロリメータ	11
1.8	<i>Suzaku</i> に搭載された硬 X 線検出器	11
1.9	<i>Suzaku</i> に搭載された X 線 CCD カメラ	11
2.1	Astro-H 衛星とその軌道要素	12
2.2	Astro-H 衛星の概観図 [2]	13
2.3	歴代 X 線望遠鏡の有効面積の比較	14
3.1	MOS 半導体の構造	16
3.2	N 型半導体のエネルギーバンド, 電荷, 電場, 電位分布図	18
3.3	表面照射と裏面照射	19
3.4	電荷転送で用いられる電極構造とクロックパターン	22
3.5	浜松ホトニクス社の CCD の電極の並び方	23
3.6	転送方式	24
3.7	FDA による電荷読み出し	25
3.8	MOS-FET の構造	26
3.9	CCD からの出力波形	26
3.10	波高値の算出方式	27
3.11	ASCA grade 方式の定義図	29
3.12	CCD フレームイメージ	32
4.1	SXI システムのブロック図	37
4.2	2×2 pixel のビニングの駆動方式	39
4.3	4 つの CCD 素子と Flexible Printed Circuits (FPC)	39
4.4	SXI-S の外観	40
4.5	PE 法における電荷注入の機構と印加電圧のクロックパターン	43

5.1	2つのFPC熱試験用CCD素子が納められたキャリアケースとFPC	45
5.2	FPC熱サイクル試験システムのブロック図	45
5.3	チャンバー内部のコールドヘッド付近の様子	46
5.4	チャンバー内部の様子	46
5.5	OUT-A, B, C, D周辺の回路構成	48
5.6	信号線がFPCやPackageで分岐している例	49
5.7	FPC熱サイクル試験における1サイクル中の温度変化	52
5.8	全熱サイクル試験期間における温度変化	53
5.9	FPC熱サイクル試験における抵抗測定結果	54
5.9	つづき	55
5.9	つづき	56
5.10	試験前のFPC	56
5.11	試験後のFPC	56
5.12	熱衝撃試験に用いたFPC	56
5.13	ボンディングパッドに金属棒をハンダ付けした様子	57
5.14	FPCを液体窒素に浸けている様子	57
5.15	FPC熱サイクル試験における抵抗測定結果	58
5.15	つづき	59
5.15	つづき	60
5.16	FPC熱衝撃試験終了後のFPCの様子	60
5.17	FPC熱衝撃試験終了後のFPCの様子(ボンディングパッド部分を拡大)	61
6.1	SXIのエンジニアリングモデルシステムの外観	63
6.2	カメラボディ周辺	63
6.3	カメラボディ上部のV100フランジを開けたところ	64
6.4	Charge Injectionをしないときのスタッキングプロット	65
6.5	CCD2系のsegment ABのスペクトル(CI無し)	66
6.6	CCD2系のsegment CDのスペクトル(CI無し)	67
6.7	ISVのlowおよびIG2Vの値を変えて取得したCharge Injection行周辺のフレームイメージ	68
6.8	Charge Injectionをしたときのスタッキングプロット	69
6.9	Charge Injectionをしたときのフレームデータ	69
6.10	CCD2系のsegment ABのスペクトル(CIあり)	70
6.11	CCD2系のsegment CDのスペクトル(CIあり)	71
6.12	CCD2系segmentCD全面から取得したGrade毎のスペクトル	73
6.13	CCD2系segmentABにおけるeven-odd間のゲイン補正によるエネルギー分解能の変化	77
6.14	CCD2系segmentCDにおけるeven-odd間のゲイン補正によるエネルギー分解能の変化	77
6.15	CCD2系segmentABにおけるeven-odd間のゲイン補正によるGrade分岐比の変化	78
6.16	CCD2系segmentCDにおけるeven-odd間のゲイン補正によるGrade分岐比の変化	79
7.1	線源とホルダー	81

7.2	SXI-S のボンネット上部にある V100 フランジに取り付けた較正線源測定用フランジ . . .	82
7.3	キャリブレーションソースによる X 線カウントイメージ	82
7.4	キャリブレーションソースを照射して取得したスペクトル	83
7.5	CCD1 系と 2 系における X 線強度分布	84
7.6	AmpTek 社製 CdTe ダイオード検出器で取得したスペクトル.	84
7.7	温度制御試験中の CCD1 系の温度と runnning mean, 2 系の温度, ヒーターに流れた電流	87
7.8	各パラメーターでの CCD1 系の温度と runnning mean, 2 系の温度, ヒーターに流れた電流	88
8.1	真空チャンバー内の様子	90
8.2	キャリブレーション準備実験のシステム外観	90
8.3	真空チャンバー内の CCD 素子	91
8.4	VG100 フランジに取り付けた Be 窓	91
8.5	電荷注入機能の最適電圧の調査	93
8.6	X 線を照射せずに取得したフレームイメージ	94
8.7	多色 X 線発生装置	95
8.8	X 線発生装置を使用したときのスタッキングプロット (SegmentCD)	96
8.9	⁵⁵ Fe を照射した時のスタッキングプロット (SegmentCD)	97
8.10	⁵⁵ Fe および X 線発生装置による X 線照射で得られた Grade0 のスペクトル	97
8.11	Grade0 のイベントの輝線のエネルギーと波高値の関係性	98
8.12	エネルギー分解能.	99
8.13	Grade0+2+3+4+6 の積算スペクトル.	99

第 1 章

X 線天文学

1.1 X 線天文学のあけぼの

宇宙は、有史以前から今日にいたるまで、人類の知的好奇心を刺激しつづけてきた。天文学者は宇宙のかなたからやってくるわずかな信号を捕らえるため、その時代の最先端の測定技術を用いて宇宙を観測してきた。

宇宙からやってくる各種電磁波の多くは地球を包む大気に散乱、吸収されるため、地表に到達できる電磁波は、可視光、一部の波長の赤外線や電波に限られている。1950年代になると、気球やロケット、人工衛星などの技術が発展し、大気の壁を乗り越えて宇宙空間で観測が行えるようになった。しかし、強力な X 線が宇宙空間で発生しているなど、当時の天文学者の多くは信じていなかった。実際、観測用ロケットを用いて太陽コロナから X 線放射が観測されたが、地球から近いにも関わらず、その強度は大変微弱であった。ブルーノ・ロッシとリカルト・ジャッコニは、「自然は我々人間よりもっと想像に富んでいるかもしれない」という信念のもと X 線観測ロケット Aerobee150 を打ち上げ、ロケット側面に搭載したガイガーカウンターとコリメーターを用いて、見事初めて X 線天体さそり座 X-1 (Sco X-1) を発見した。また彼らの取得したデータは全天方向からやってくる宇宙 X 線背景放射の存在を示していた (図 1.1)。

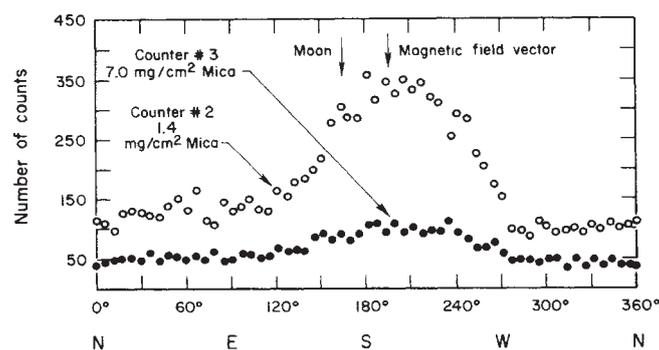


図 1.1 Sco X-1 の発見: シールド厚の異なる 2 つの検出器で計数し、南天から明るい X 線放射を検出した [1].

これ以後、X 線天文学は急速に発展し、可視、赤外、電波天文学に並ぶ観測天文学の一大分野となっている。今日では、X 線は実にさまざまな天体から 原始星から超新星残骸、コンパクト天体から銀河間プラズマ、さらには冷たい分子雲からさえも 放射されていることが知られている。すなわち現代天文学のあらゆる天体種の理解において、X 線観測は必要不可欠となっている。

1.2 宇宙空間でのX線放射機構

1.2.1 熱的X線放射

Thermal bremsstrahlung (熱制動放射)

荷電粒子は加速度を受けると電磁波を放射する。熱平衡にある、低密度の(光学的に薄い)プラズマ中では、電子がイオンとのクーロン相互作用で加速度を受け、制動放射をする。これを電子の熱的分布で重ね合わせたものが熱制動放射である。大質量星からの星風や超新星残骸などでは、ショック加熱によりプラズマ温度が $> 10^6$ K に達し、X線が放射される。多くの場合、プラズマ中の各元素に特有の輝線(特性X線)放射を伴う。輝線強度と中心エネルギーはプラズマ温度のほか、元素組成比、電離度を反映する。

Blackbody radiation (黒体放射)

密度の高い(光学的に厚い)熱平衡プラズマから放射される電磁波は、プラズマによる吸収・放出がつりあい、プラズマと熱平衡状態に達する。このとき光子はプランク分布をとり、これを黒体放射という。高密度天体の降着円盤からの放射は多温度黒体放射の重ね合わせとして表される。中心星がブラックホールまたは中性子星のとき、降着円盤の温度は $> 10^6$ K となりX線を出す。また中性子星表面からも単一温度の黒体放射によるX線が観測される。

1.2.2 非熱的X線放射

Synchrotron radiation (シンクロトロン放射)

荷電粒子が磁場に巻き付いて回転運動することで放射する。荷電粒子のエネルギー分布がベキ型で表される(非熱的である)場合、シンクロトロン放射のスペクトルもベキ型になる。強い磁場をもつパルサーや若い超新星残骸などでは、加速された電子(~ 1 TeV)によるシンクロトロンX線放射が見られる。

Inverse-Compton radiation (逆コンプトン散乱)

高速の電子が長波長の光子(種光子という)を散乱し、高エネルギー光子(X線)を生じる。種光子は宇宙マイクロ波背景放射や星からの光などである。天体の磁場が強く電子密度が高いときには、みずからが発したシンクロトロン放射が種光子となる(Synchrotron-self-Compton radiation)。この場合には種光子がもともと短波長なため、散乱光子は非常に高いエネルギーとなり、硬X線～ガンマ線域に達する。

1.3 X線検出の素過程

X線を検出するのに必要な、X線と物質の相互作用の基礎をまとめる。また検出器内部での反応を理解するために、粒子と物質の相互作用についても述べる。

1.3.1 X線と物質の相互作用

X線帯域の光子と物質との主な相互作用は以下の3つである。

光電吸収

入射 X 線が軌道電子に吸収されることでエネルギーを与え、電離し、光子自身は消滅する。このとき、電離によって発生した自由電子は、

$$E_e = E_\gamma - \phi_a \quad (1.1)$$

のエネルギーをえる。ここで ϕ_a ($a = K, L, M, \dots$) は電子がもっていた殻の結合エネルギーである。図 1.2 に Si 中での光電吸収断面積を示す。図中には K 殻結合エネルギー ϕ_K に対応する位置にエッジが見える。これは $E_\gamma < \phi_K$ では K 殻電子は放出されないためである。逆に、 $E_\gamma \geq \phi_K$ では K 殻電子が放出される確率がもっとも高い。

電離された殻には空孔ができ、原子は一時的に励起状態になる。この空孔は、自由電子の捕獲または軌道電子の再配置によりただちに埋められ、原子は基底状態に戻る。この際、外殻電子を放出（オージェ電子）、または特性 X 線を放射する。オージェ電子と特性 X 線のどちらが放出されるかは競合過程であって、ある確率（蛍光収率）で特性 X 線として解放される。蛍光収率は原子番号に依存し、重い元素ほど大きい 1.3。光電吸収の反応断面積は、光子エネルギー (E) の ~ -3.5 乗、物質の原子番号 (Z) の ~ 5 乗にそれぞれ比例する。

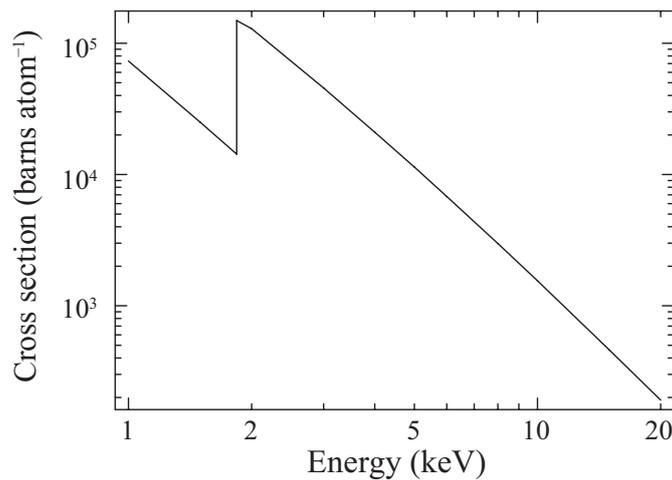


図 1.2 Si における光電吸収断面積

コンプトン散乱

X 線光子が自由電子または軌道電子と弾性散乱し、そのエネルギーの一部を電子に渡す。散乱の前後で光子のエネルギーは変化する (incoherent scattering)。軌道電子の束縛ポテンシャルと速度を無視すれば、散乱光子のエネルギー (E') は、

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \quad (1.2)$$

となる。ここで、 m_e は電子の静止質量、 θ は光子の散乱方向である。散乱断面積は電子密度に比例するので、 Z が大きくなると比例して増加する。

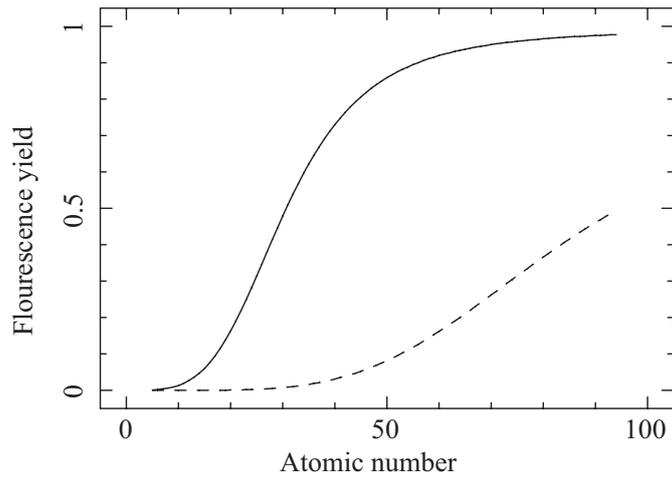


図 1.3 K 殻 (実線) および L 殻 (破線) 電子による光電吸収時の蛍光収率.

電子・陽電子対生成

$E > 2m_e c^2$ の高エネルギー光子が消滅して、電子・陽電子の対を生成する。運動量保存のため複数の光子が必要だが、光子が物質中に入射すると原子核のクーロン場との相互作用で、単一光子でも対生成する。軌道電子のクーロン場と相互作用する場合、生成された陽電子は軌道電子と即座に対消滅し、再び高エネルギー光子が放射される。光子が消滅するには、さらに引き続いて対生成を起こす必要があり、 $E > 4m_e c^2$ でなくてはならない。これは三電子対生成と呼ばれるが、原子核のクーロン場によるものくらべて断面積は小さい。

以上 3 つの相互作用の断面積をそれぞれ、 $\sigma_{ph.abs}$, σ_{comp} , σ_{pair} とすると、これらは相互作用する物質の原子番号 (Z), 入射 X 線エネルギー (E) に応じて変化する。図 1.4 にその依存性を示す。左右 2 本の実線より外側ではそれぞれ、光電吸収、対生成が優位であり、その中間のエネルギー帯域はおもにコンプトン散乱が効く。 $Z = 14$ の Si の場合、 ~ 20 keV までは光電吸収が支配的である。

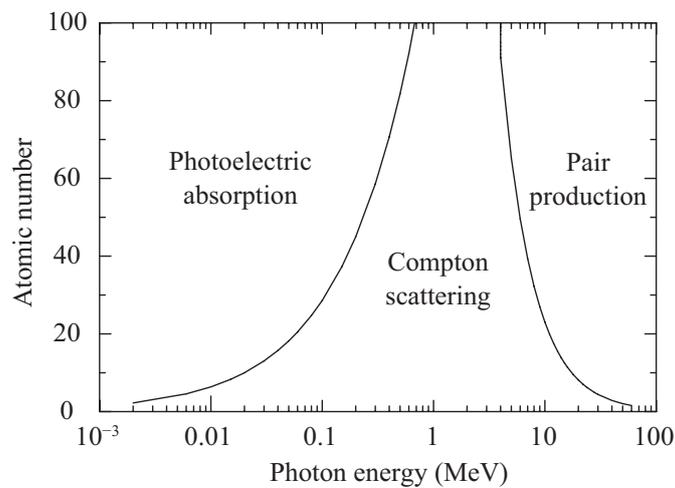


図 1.4 入射 X 線エネルギー・物質の種類に応じて支配的となる相互作用. 左右の実線はそれぞれ全断面積のうち光電吸収および対生成の割合が半分を占める領域を示している.

1.3.2 高エネルギー粒子と冷たい物質の相互作用

荷電粒子は以下の電磁相互作用を通して物質中にエネルギーを落とす。

クーロン散乱による電離損失

荷電粒子はクーロン相互作用により散乱され、物質中の原子の電子を電離または励起する。多数の原子と同時に相互作用しながら、徐々に速度を落とし、最後には停止する。重粒子の場合は、一度の散乱で大きく進行方向を曲げられないため、一様な物質中ではほぼ直線状の飛跡を描く。停止点までの飛跡の長さを飛程と呼び、単位長さあたりのエネルギー損失を阻止能という。クーロン散乱による阻止能は電子に対しては以下のように記述される。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{col}} = \frac{2\pi e^4 z^2 N Z}{m_e c^2 \beta^2} \times NB \left[\ln\left(\frac{m_e c^2 \beta^2 E}{2I^2(1-\beta^2)}\right) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2)\ln 2 + (1-\beta^2) + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 \right] \quad (1.3)$$

一方で、重粒子に対するクーロン散乱による阻止能は以下のように表される。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{col}} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_e v^2} NB \quad (1.4)$$

$$B = Z \left[\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 - \frac{C}{Z} - \frac{1}{2}\delta \right] \quad (1.5)$$

ここで、 E , v , z はそれぞれ入射重粒子のエネルギー、速度、原子番号、 m_e , e は電子質量と素電荷、 N , Z , I は媒体物質の数密度、原子番号、および平均励起ポテンシャルである。この式は Bethe によって計算された理論式に相対論的効果の補正、媒体物質の原子構造を反映した低エネルギー側と高エネルギー側の補正を施したものである。散乱による電離損失には、以下のような重要な性質がある。

1. $\propto v^{-2}$

速度が遅くなると、重粒子は物質電子の付近で長い時間を過ごし、それに比例して激力が増す。よって軌跡の終端点付近で最もエネルギーを落とす。

2. $\propto z^2$

激力の大きさが z に比例することを反映して、電荷が大きいほどエネルギー損失が増す。

3. $\propto NZ$

重粒子は物質の電子と相互作用するので、その密度が大きいほどエネルギー損失が増す。

入射粒子が電子の場合には、特に低エネルギーであるほど一度の散乱で大きく進行を逸らされやすい。そのため飛程の概念は重粒子の場合ほど単純ではない。すなわち、入射方向に飛跡を投影した長さ (projection range) は、飛跡に沿ってその全長を足し合わせたものに比べてやや短くなる。

Bremsstrahlung (制動放射)

荷電粒子が物質中を通過する際、直接散乱されなくても、クーロン力で加速度を受けて放射によってエネルギーを失う。入射粒子が重粒子の場合は散乱による損失と比較してほとんど無視できるが、電子であ

る場合は質量が小さいため、容易に加速度を受ける。制動放射による電子のエネルギー損失は次のように書ける。

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{rad}} = \frac{4NEZ(Z+1)e^4}{137m_e^2c^4} \ln\left(\frac{2E}{m_e c^2} - \frac{1}{3}\right) \quad (1.6)$$

クーロン散乱では、入射電子と物質電子が相互作用し、激力には Z が現れないが、 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{col}}$ では電子密度として Z の 1 次の項が現れる。一方制動放射では、相互作用する相手は原子核であり、電子の受ける加速度は原子核の電荷 Z に比例する。制動放射による損失は受ける加速度の 2 乗に比例するので、 $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{\text{col}}$ は Z^2 の依存性を持つ。それゆえこれらの損失の比を取ると、以下のように $\propto Z$ の依存性がある。

$$\frac{(dE/dx)_{\text{rad}}}{(dE/dx)_{\text{col}}} \simeq \frac{(E/\text{MeV})Z}{1600(m_e c^2/\text{MeV})} \simeq \frac{(E/\text{MeV})Z}{800} \quad (1.7)$$

式 1.7 より、検出器中で X 線の光電吸収で発生した光電子はほぼ 100% のエネルギーを電離・励起で失い、制動放射は無視できることが分かる。

1.4 X 線観測装置

X 線は地球大気を透過できないため、宇宙空間からの X 線を検出するには観測装置を大気圏外に持ち出す必要がある。X 線天文学の黎明期には、観測ロケットや気球による実験が主であったが、1970 年に初の X 線観測衛星 Uhuru が打ち上げられて以来、衛星ミッションが X 線観測の主役である。地球周回軌道を回る衛星へ観測機器を搭載することで、長時間の X 線観測と長期的なミッションが可能になった。Einstein 衛星は X 線望遠鏡を搭載し、撮像観測によって数千もの天体を検出した。さらに、星からの X 線放射の発見、銀河 \odot 銀河団からの広がった X 線放射の確定など重要な成果を挙げた。日本でも、1979 年の Hakucho の打ち上げ成功以降、5 機の X 線観測衛星を打ち上げてきた。図 1.5 に世界の X 線観測衛星の歴史をまとめた。

X 線検出器には多くの種類があるが、それ単体では検出可能な波長帯域の限界がある。1 台の衛星に複数の検出器を搭載することで、広帯域の観測が可能である。以下では X 線検出器の主な性能指標についてまとめた後、一例として、現在運用中の日本の X 線天文衛星 *Suzaku* に搭載されている検出器をその特徴と共に紹介する。

1.4.1 X 線検出器の性能

X 線のもつ情報は、エネルギー、到来方向、到来時刻、偏向度の 4 つである。偏光の検出は技術的に難しく、1970 年代後半にかに星雲で X 線領域の偏光が測定されただけで、それ以降偏光に特化した検出器は打ち上げられていない。到来 X 線の持つエネルギーは、1.3.1 節で述べた相互作用を通じて発生した電子 (1 次電子) に受け渡される。1 次電子は多量の二次粒子 (キャリア) を発生させるが、これを収集することで、到来 X 線の持っていた情報を得ることができる。X 線検出器の性能は、X 線の情報をいかに精度良く再現できるかで決まり、エネルギー分解能、空間分解能、時間分解能で評価される。

- エネルギー分解能

入射 X 線のエネルギー (E) はキャリアの個数の測定によって決定される。すなわち、単体 X 線を測定した際の輝線の広がり、生成されるキャリア数のゆらぎによる。キャリア 1 個を生成するのに要する平均エネルギーを W とすると、平均 E/W 個のキャリアが発生する。Si を用いた CCD

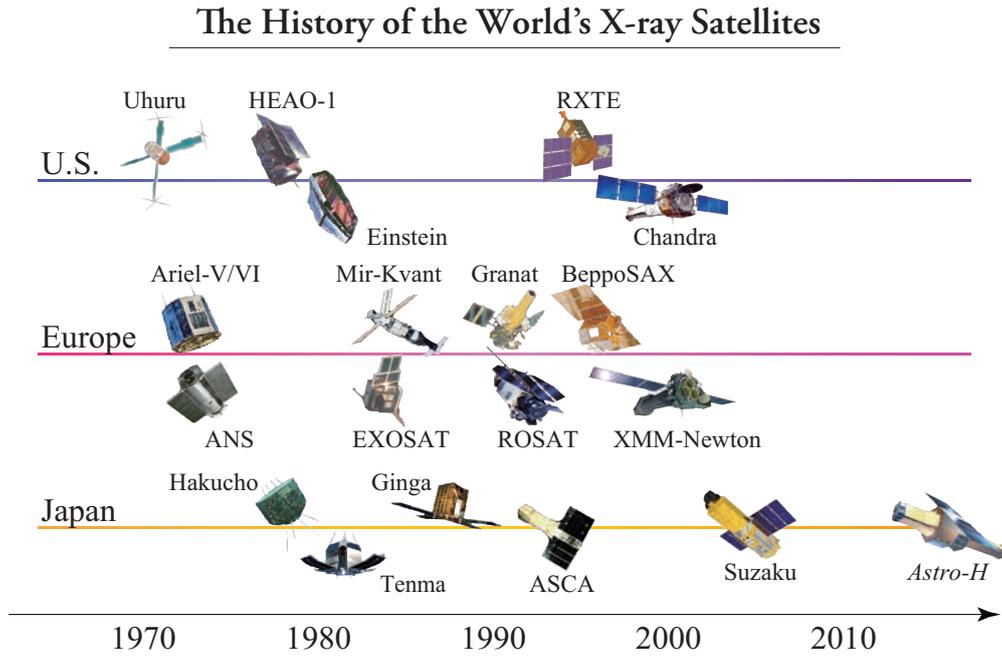


図 1.5 世界の歴代の X 線観測衛星と Astro-h. 国際ミッションは、最も主要な国または地域に含めている。

の場合、 $W = 3.65 \text{ eV}$ であり、Mn の $K\alpha$ 輝線 ($E = 5.9 \text{ keV}$) に対して、生じるキャリアは ~ 1600 個である。キャリアの数の統計的ゆらぎはポアソン分布と比べて有意に小さいことが知られており、ポアソン分布からのずれは物質に固有のファノ因子 F で表される。これを考慮した統計揺らぎの標準偏差は、

$$\sigma = \sqrt{F \times \frac{E}{W}} \tag{1.8}$$

となる。Si の場合 $F = 0.12$ 程度である。読み出し回路など、上記統計揺らぎ以外のノイズを σ_{noise} とすると、

$$\sigma = \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{\text{noise}}^2} \tag{1.9}$$

が実質的な標準偏差である。これより、輝線の広がり (ΔE) を半値幅 (Full width half maximum : FWHM) で評価すれば、

$$\Delta E = 2 \times \sqrt{2 \ln 2} \times W \times \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{\text{noise}}^2} \tag{1.10}$$

と表される。エネルギー分解能はこの ΔE 、またはこれを入射エネルギーで規格化した値 $\Delta E/E$ で表す。 $\sigma_{\text{noise}} = 0$ のときが原理的に達成可能なエネルギー分解能の極限であり、CCD では 5.9 keV の X 線に対し $\approx 120 \text{ eV}$ である。 W 値が小さいほどエネルギー分解能に優れ、また同じ検出器 (すなわち同じ W 値) でも、入射エネルギーに対して分解能 $\Delta E/E$ が $E^{-\frac{1}{2}}$ で変化する。

- 空間分解能

X 線検出器の多くは受光部をアレイ化することにより位置分解能を持たせることができる。初期の

X線観測ではコリメーターを用いることで視野を制限しており、空間分解能は持っていなかった。X線望遠鏡が登場して以降は、特定の方向から飛来するX線を集光して、X線の到来方向と検出器面上の位置を対応させる撮像観測が可能になった。空間分解能を決める要因は、検出器の位置分解能、望遠鏡の角度分解能と焦点距離である。X線望遠鏡は点状のX線放射を見たときでもその像には、ある有限の広がりが生まれる。この広がりをFWHMで評価したものを $\Delta\theta_{\text{tele.}}$ とすると、検出器上での到来光子の位置のゆらぎ $\Delta x_{\text{ph.}}$ は、

$$\Delta x_{\text{ph.}} = \Delta\theta_{\text{tele.}} \times L \quad (1.11)$$

と表される。ここで L は焦点距離である。これに対し、検出器の位置分解能をFWHMで $\Delta x_{\text{det.}}$ とすると、検出されるX線光子の位置決定精度 Δx は

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{ph.}})^2 + \Delta x_{\text{det.}}^2} \quad (1.12)$$

となる。 Δx を天球上に投影したものが空間分解能であり、これを $\Delta\theta$ と書くと、

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{\Delta x}{L} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta x_{\text{ph.}}}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_{\text{det.}}}{L}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\Delta\theta_{\text{tele.}})^2 + \left(\frac{\Delta x_{\text{det.}}}{L}\right)^2} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Suzaku/XISの場合、CCDのpixel sizeは $24 \mu\text{m}$ 、焦点距離4.5 mより $\Delta x_{\text{det.}}/L \sim 1''$ であり、数分角である $\Delta\theta_{\text{tele.}}$ に対して十分無視できる。一方Chandraのような秒角スケールの分解能を持つ望遠鏡では、検出器の位置分解能が制限されることが無いよう、焦点距離を大きく取っている。上では角度分解能をFWHMで評価したが、一般的には、点状天体を観測したときにその50%の光量を含む直径、Half Power Diameter (HPD)で評価することが多く、HPD値が小さいほど結像性能が高い。

- 時間分解能

1個のX線イベントに対し、検出に用いるキャリアの発生が収束するまでの時間、キャリアの収集にかかる時間などで決まる。またCCDのように複数の検出部を1個の読み出し口でまとめて読み出す場合は、その分読み出しに時間がかかり、時間分解能が悪化する。

以上の3つ以外にも、感度を決定する有効面積、検出効率、バックグラウンドレベルも重要である。このうちバックグラウンドレベルは、検出器内部のものと軌道上放射線などによるものがある。後者はシールドや検出器の応答だけでなく、衛星がどのような軌道を取るかということも本質的である。

1.4.2 X線天文衛星 *Suzaku* に搭載されている検出器

X線反射望遠鏡

X線は全反射に対する臨界角が小さいため、光学望遠鏡のような鏡面が入射方向を向いた反射望遠鏡は用いることができない。そのためX線望遠鏡では極薄の反射鏡を同心円上に多数並べ、1 keVで2度以下

という小さい入射角で入射した X 線を全反射させることで結像する。反射鏡に用いられる重金属は、金やプラチナといった反射率の高い物質である。反射鏡の配置に際しては、中心軸（光軸）に平行な X 線に対して開口効率が最大になるよう工夫されている。鏡面形状は、回転双曲面と回転放物面からなる Wolter I 型光学系が多く用いられ、*Suzaku*/XRT では Wolter I 型を 2 段の円錐で近似した鏡を使用している（図 1.6 の左側と右側の鏡）。

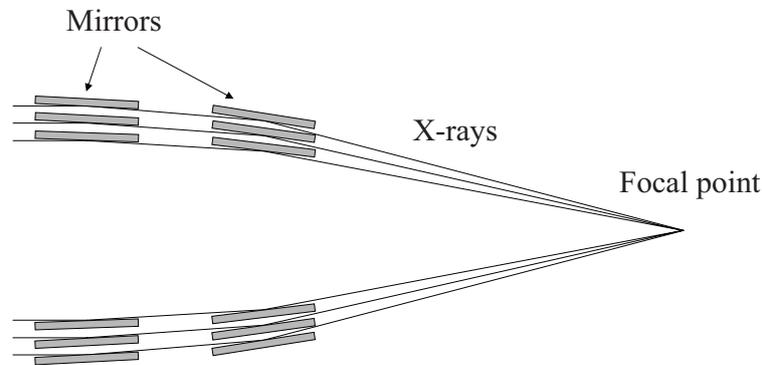


図 1.6 X線望遠鏡の構造

X線マイクロカロリメータ

X線マイクロカロリメータは X線源のエネルギーを高い精度で測定するための X線分光計である。この装置は X線が物質に吸収された際のわずかな温度上昇を測定し、X線のエネルギーを決定する。この X線吸収による温度変化はわずかなものであるため、素子の温度を数十 mK にまで下げ、高感度の温度計を用いて温度変化を正確に測定する。マイクロカロリメータを用いた場合、6 keV でのエネルギー分解能は数 eV となり、このエネルギーにおける世界一の高いエネルギー分解能が発揮できる。図 1.7 が実際に *Suzaku* に搭載された X線マイクロカロリメータ XRS の写真で、衛星に搭載されたものとしてはこれが世界初となる。分光に関しては X線 CCD の約 20 倍の性能を発揮できる予定であった。冷却には高温側から順に機械式冷凍機、固体ネオン、液体ヘリウム、断熱消磁冷却器 (ADR) を用いていたが、現在はヘリウムが全て気化してしまったため、観測は行われていない。温度計として用いられるのは、温度によって抵抗値が変化するものが一般的である。最近では、極低温時に物質が超伝導への遷移状態となり、抵抗値が急激に変化することを利用した超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor : TES) が開発され、非常に高いエネルギー分解能を達成できる検出器となっている。

シンチレーション検出器

X線などの電離放射線が当たったとき、物質の中には蛍光を出すものがある。放射線が物質内を通過するとき、物質を励起する。しかし励起された電子は 10 万 ~ 10 億分の 1 秒という短時間で基底状態に戻る。このときに余剰エネルギーの分が蛍光として出る。シンチレーション検出器は多数のシンチレータとよばれる蛍光 (シンチレーション光) を発する物質からなり、X線のエネルギーに応じて光量の変化するシンチレーション光を検出することで X線を測定する検出器である。シンチレータは、プラスチックの他、蛍光物質の結晶で作られる。通常蛍光物質として、ヨウ化ナトリウムや BGO、ヨウ化セシウムのような原子番号の大きな物質の入った結晶が用いられる。これは、原子番号が大きいほど電子密度が高くなることで、反応効率が良くなるためである。シンチレーション光単体では信号は非常に小さく、測定には不向きである。

そこで検出した光の信号を光電子増倍管で増幅して読み出しを行う。光電子増倍管ではまず、シンチレーション光子を光電面に当て電子に変換する。光電面で発生した電子は光電面と電極の間の電位差によって加速され電極に衝突する。このとき衝突した電子の数倍の電子が電極から放出され、次の電極との間の電位差によって加速され次の電極に衝突、増幅されるというサイクルを繰り返す。最終的に読み出し口では光子が数百万倍の電子となって読み出される。その他に、消費電力を抑えたい場合などでは、光電子増倍管の代わりにフォトダイオードを用いることもある。*Suzaku* には硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector : HXD, 図 1.8) の一部としてシンチレーション検出器が搭載されており、主検出部分に GSO シンチレータ (Gd_2SiO_5)、シールド部分に BGO シンチレータ ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) の計 2 種類が用いられている。また BGO はシールドの役目を果たすとともに、ガンマ線バーストのモニタの役割も同時に果たしている。

半導体検出器

半導体検出器とは主にシリコンやゲルマニウムといった半導体を用いた検出器で、固体検出器 (Solid state detector : SSD) と呼ばれることもある。図 1.8 に示した *Suzaku*/HXD には、GSO シンチレータの前面に、P 型半導体と N 型半導体の間に真性半導体 (i 層) を狭んで空乏層を厚くし、10 keV のエネルギーを越える硬 X 線を検出できるようにした PIN 型半導体検出器があり、10 – 60 keV のエネルギー領域を観測する。

Suzaku の HXD は PIN 型シリコン検出器と BGO シンチレータによって 10 – 600 keV の広領域の観測を行なうことができ、なおかつ 300 keV までの X 線に対する感度は世界最高のものとなっている。また半導体検出器は日本の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H にも搭載予定である。

X 線 CCD カメラ

CCD とは Charge Coupled Device (電荷結合素子) の略であり、小型化した半導体検出器の電極を格子状に多数分割してピクセル化したものである。X 線 CCD は空乏層内で X 線が光電吸収されることで発生したキャリアを読み出す。主に軟 X 線とよばれる、エネルギーが低い X 線に対しての撮像及び分光が可能である。*ASCA* で初めて、イベント検出型の X 線 CCD カメラが宇宙用に開発、搭載された。その後、*Chandra*, *XMM-Newton*, *Suzaku* にも搭載され、X 線天文衛星の標準検出器となっている。*Suzaku* に搭載された 4 つの X 線 CCD (X-ray Imaging Spectrometer : XIS, 図 1.9) は 1024×1024 画素からなり、 $18' \times 18'$ の視野を持っている。X 線 CCD の特性については、第 3 章で詳しく述べる。

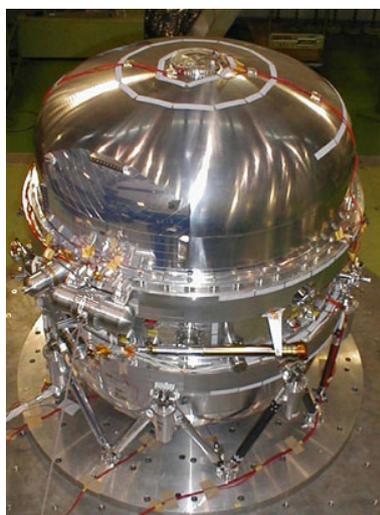


図 1.7 *Suzaku* に搭載された X 線マイクロカロリメータ



図 1.8 *Suzaku* に搭載された硬 X 線検出器

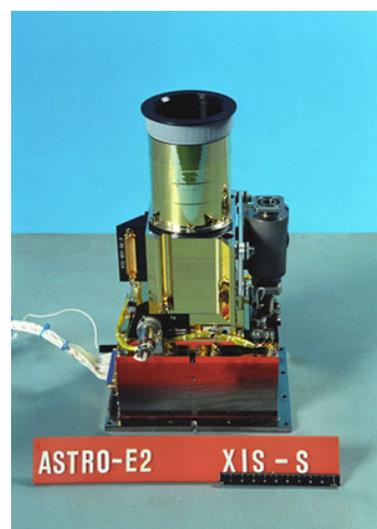


図 1.9 *Suzaku* に搭載された X 線 CCD カメラ

第 2 章

日本の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H は *Suzaku* に次ぐ日本の X 線天文衛星である。2015 年度に種子島宇宙空間観測所から H-IIA ロケットにより高度 ~ 550 km, 軌道傾斜角 $\sim 31^\circ$ の円軌道に打ち上げられる予定で (2.2), 軌道上での全長は 14 m, 重量は 2.7 t と日本の科学衛星としては過去最大である (*Suzaku* 衛星は全長 6.5 m, 重量 1700 kg である)。2 種類の X 線望遠鏡 (軟 X 線望遠鏡, 硬 X 線望遠鏡) と 3 種類の焦点面検出器 (軟 X 線撮像検出器, 軟 X 線分光器, 硬 X 線撮像検出器), 及び軟ガンマ線検出器を搭載予定である。10 keV 以下の軟 X 線領域では, 6 keV の X 線に対して 7 eV 以下という超高分解能での分光観測を, マイクロカロリメータを用いて行う。これにより銀河団の中で毎秒数百 km もの速度で渦巻いていると言われる超高温のガスのドップラー偏移を検出できるので, その速度が実測できる。また元素の微細構造を反映した resonance line, forbidden line, intercombination line, satellite line の分離も可能となるため, 天体の温度や密度, エネルギーなどの物理状態をこれまでにない高い精度で測定できる。

また世界で初めて 80 keV までの硬 X 線領域で撮像観測を行う。高エネルギー天体からの非熱的 X 線放射の観測に威力を発揮する。また 0.3 – 600 keV という過去最高の広帯域観測を行うことで, 非熱的放射と熱的放射との関わりを明らかにすることができる。

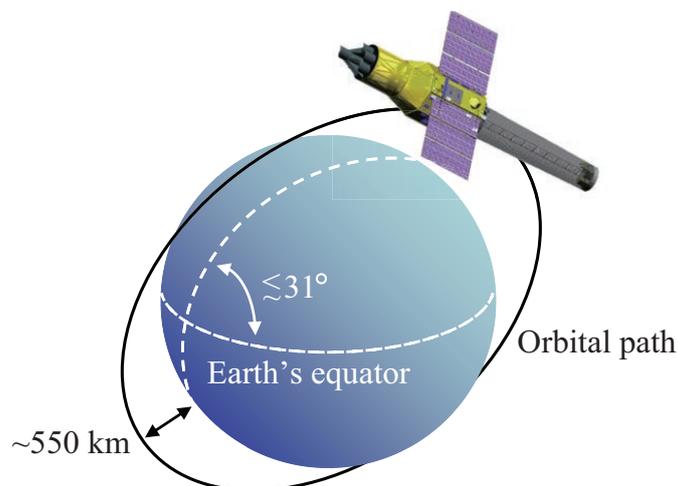


図 2.1 Astro-H 衛星とその軌道要素

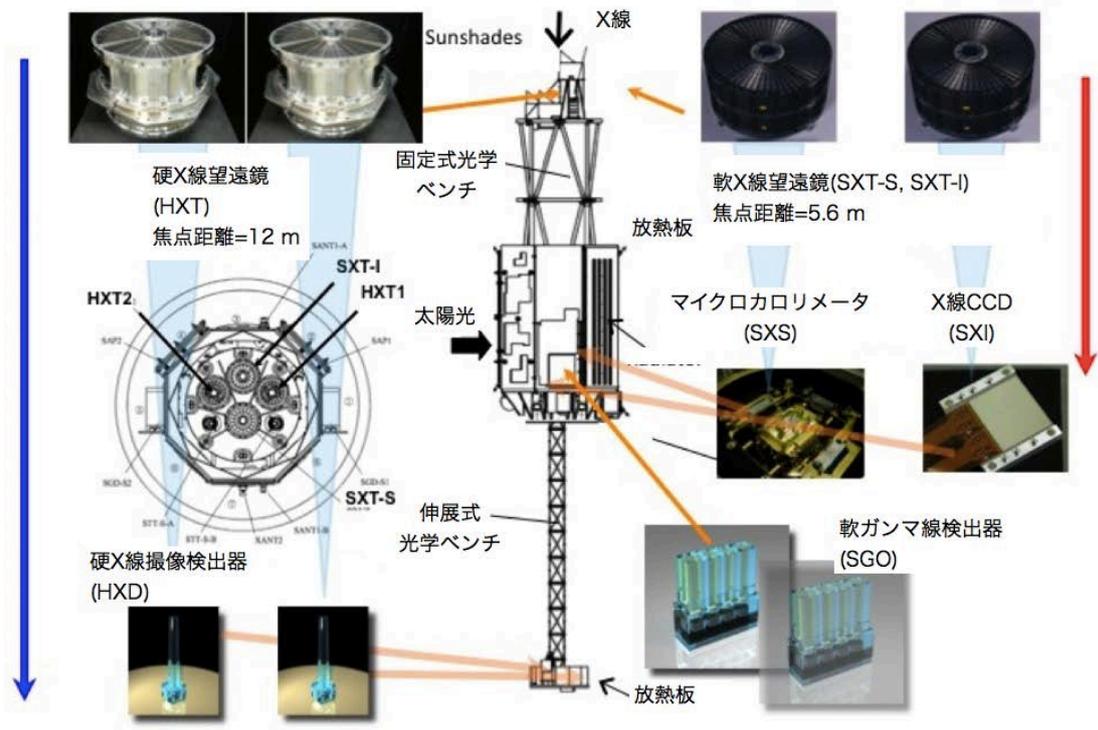


図 2.2 Astro-H 衛星の概観図 [2]

2.1 ASTRO-H 衛星搭載予定検出器

2.1.1 軟 X 線望遠鏡, 硬 X 線望遠鏡

ASTRO-H 衛星では、軟 X 線から硬 X 線領域までの広帯域な撮像を行うため、従来の X 線衛星が搭載してきた軟 X 線望遠鏡とともに、硬 X 線望遠鏡の搭載を予定している。

軟 X 線領域での集光を行う軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) は、軟 X 線分光器 (SXS) と軟 X 線撮像器 (SXI) (両者とも後述) 用に 2 台搭載される。反射面には、*Suzaku* に搭載した軟 X 線望遠鏡でも用いた金を用いている。

硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope : HXT) 用として、名古屋大学を中心にスーパーミラー望遠鏡の開発が進められている。スーパーミラー望遠鏡は反射鏡表面に白金と炭素からなる多層膜を蒸着させており、10 keV 以下の軟 X 線に対しては全反射、10 keV 以上の硬 X 線に対してはプラグ反射を行うことで、3 – 80 keV の X 線を集光することが可能である。図 2.3 は、*ASCA*、*Suzaku*、SXT と HXT の有効面積を歴代の X 線望遠鏡と比較したものであり、ここに示すとおりスーパーミラー望遠鏡は 10 keV を超えるエネルギーに対して高い有効面積を持っている。例えば 20 keV での有効面積は 500 cm^2 と *Suzaku* の約 10 倍高い。ASTRO-H 衛星ではこのスーパーミラー望遠鏡を用いて 80 keV までの X 線を集光し、低バックグラウンドで撮像観測することを目指す。

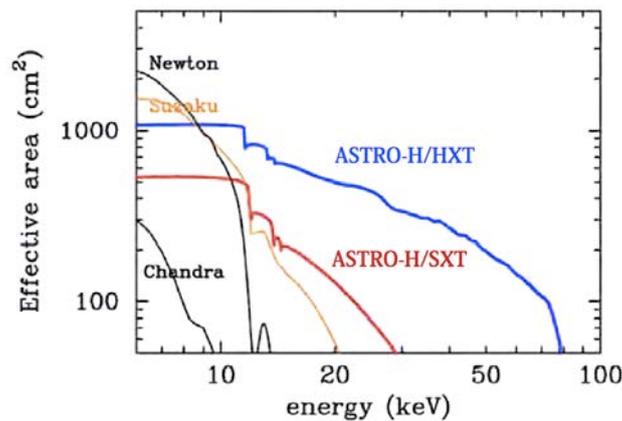


図 2.3 *Chandra*, *XMM-Newton*, *Suzaku* にそれぞれ搭載された X 線望遠鏡と, ASTRO-H/HXT, ASTRO-H/SXT の有効面積の比較

2.1.2 軟 X 線分光器 (Soft X-ray Spectrometer : SXS)

SXS は 10 keV 以下の軟 X 線領域で分光を行うマイクロカロリメータ検出器である。SXS は *Suzaku*/XRS の確立された技術を開発のベースラインとしているが、吸収体の仕様変更にともない、ピクセルサイズが $624 \mu\text{m}$ 角であった XRS より $815 \mu\text{m}$ 角に変更されている。815 μm 角の素子も $624 \mu\text{m}$ 角と同程度の分解能 (6 keV の X 線に対して 8 eV) を達成している。

2.1.3 軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI)

SXI は 0.4 – 12 keV の軟 X 線領域の撮像分光を受け持つ焦点面検出器である。高い位置分解能とエネルギー分解能を兼ね合わせている X 線 CCD カメラが用いられ、日本の衛星としては、*ASCA*/SIS, *Suzaku*/XIS に次ぎ 3 例目となる。過去の 2 つの検出器は MIT と JAXA の共同開発であったが、SXI は大阪大学と京都大学他が主導し、浜松ホトニクス社などの協力を得て開発した純国産品である。我々はこの SXI の開発を担当している。ASTRO-H には軟 X 線分光器 SXS も搭載されているが、撮像能力がなく、視野が狭い ($\sim 3' \times 3'$) ため、SXI は SXS と相補的な役割を担う。*Suzaku*/XIS と比べて以下のような改良が加えられている。

- XIS では 4 素子中 1 素子が裏面照射型であったが、SXI では 4 素子すべてで裏面照射型を採用し、低エネルギー側の感度、および表面照射型に比べて 0.8 keV での検出効率の向上を実現した。
- 空乏層厚が $70 \mu\text{m}$ から $200 \mu\text{m}$ の完全空乏素子を実現し、高エネルギー側の検出効率が XIS に比べて 2–4 倍に増加した。
- 動作温度を -90°C から -120°C へ下げることによって暗電流を大幅に押え、電荷転送非効率 (CTI) を減少させた。
- 4 枚の CCD をモザイク状に配置し、視野が $17.8' \times 17.8'$ から過去最大の $38' \times 38'$ を実現した。

4 章でシステムを詳述する。

2.1.4 硬 X 線撮像検出器 (Hard X-ray Imager : HXI)

HXI も焦点面検出器の一つであり, 数 keV–80 keV の硬 X 線に対して撮像分光観測を行う. 10–80 keV の X 線を担当するテルル化カドミウム (CdTe) 両面ストリップ検出器の上部に, 5 keV 前後から 30 keV まで担当する多層化両面シリコンストリップ検出器 (DSSD) を持つ. 軟 X 線光子は DSSD で検出されるのに対し, 硬 X 線光子は DSSD をつき抜けて CdTe の両面ストリップ検出器で検出される. このような構造をとることで, 極めて広いエネルギー範囲で高感度な撮像検出器が実現できる.

HXI は撮像観測を行うために必要な位置検出能力を持つとともに, 硬 X 線望遠鏡の有効面積を十分に活かすための高い検出効率が必要となる. しかし 10 keV を越えるエネルギー帯域では, バックグラウンドが感度に影響する. そのため検出器を低バックグラウンドにすることが必須である. HXI では検出部を井戸型の BGO に覆われた形にすることで, 低バックグラウンドを実現している. HXI によって今まで行われていなかった 10 keV 以上での X 線撮像観測を行うことができるようになる.

2.1.5 軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD)

軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD) は, 軟ガンマ線領域での高感度観測を実現するための半導体コンプトンカメラである. *Suzaku*/HXD に比べて小型であるが, 600 keV までのエネルギー範囲において優れた感度を持ち, 100 keV 前後でのバックグラウンドを極限にまで下げることによって, HXD の感度を 1 桁上回ることを目標としている. そこで, エネルギー分解能の高い DSSD とガンマ線に対して高い検出効率を持つ CdTe 半導体検出器を, *Suzaku*/HXD で実現した狭い視野を持つ井戸型 BGO シールドと合わせることで, 「狭視野を持つ半導体多層コンプトンカメラ」という新しい概念に基づく高感度ガンマ線検出器を採用する.

第3章

X線 CCD

1969年, CCDはBell電話研究所のBoyleとSmithによってメモリー素子として発明された. 同研究所のTompsettは, これを撮像素子として利用することを提案し, 1973年にBertramらとSéquinらのグループがその開発に成功した. 以後急速に発展し, 今日では 10^6 個を超えるpixel数を持った大型の素子が作られ, さまざまな分野で利用されている.

天文学においては, 高感度の2次元センサーとして感光フィルムに取って代わり, まず可視光観測で, 次に赤外線観測用いられた. X線天文学においても, 半導体検出器のエネルギー分解能を保ちながら, 同時に高い位置分解能を有する, バランスの取れた観測装置として, *ASCA*, *Suzaku*, *Chandra*, *XMM-Newton*といった多くの衛星に搭載されている. X線CCDがデジタルカメラ等に使われる可視光用CCDと大きく異なる点は, エネルギーの高い, 即ち透過性の高いX線を検出可能にするための厚い空乏層と, 電荷の少ないイベントを認識するための低いノイズレベルである.

X線CCDの各pixelの構造はMOSダイオード型とpn接合型の2つに大きく分けられる. ここではSXIで用いられているMOSダイオード型CCDについて説明する. これはMOSダイオードをモザイク状に並べたもので, *ASCA*/SISで初めて衛星搭載検出器として使用された.

3.1 CCDのMOS構造

MOS型半導体とは, 電極金属 (Metal), 酸化物 (Oxide), 半導体 (Semiconductor) を積層した構造 (MOS構造) を持つ半導体デバイスである (図3.1. 通常半導体部分にはSiが用いられる. Si表面は空气中で酸化するため, 安定な酸化膜の形成が容易にできることが利点である. SXIでは, この上にポリシリコンを電極層として堆積させたものを利用している).

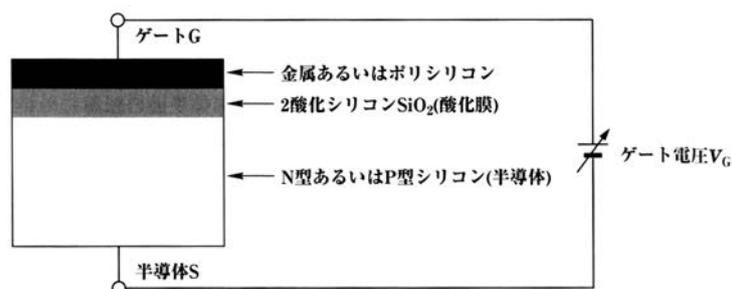


図 3.1 MOS 半導体の構造

SXIは検出部がN型半導体なので、以下ではN型半導体の場合のMOS型半導体素子を説明する [3][4].

不純物がdopeされていない状態でのフェルミ準位を真性フェルミ準位 (E_I) と呼び、これは価電子帯 (E_V) と伝導帯 (E_C) のちょうど中間に位置する。N型半導体では4価のSiに5価のドナー原子をdopeして作られる。原子1個につき電子が1個あまることになり、電子が多数キャリア、正孔が少数キャリアとなる。余剰の電子は原子にゆるく束縛されているだけであり、通常のSi結晶中の電子にとっては禁止された、価電子帯の少し下の準位 (ドナー準位) に位置していて、容易に価電子となることができる。このドナー準位が存在するため、N型半導体中のフェルミ準位 (E_F) は、真性フェルミ準位よりも高くなる。

MOS構造は、表面電極に印加する電圧によって (1) 蓄積, (2) 空乏, (3) 反転の3つの状態をとる (図3.2).

1. 蓄積

表面電極に正の電圧を印加する。電極側の酸化膜表面には負の、半導体側の酸化膜表面には正の電荷が誘起され、N型半導体の多数キャリアである電子が電極付近に集まる。

2. 空乏

表面電極に負の電圧を印加する。電極側の酸化膜表面には正の、半導体側の酸化膜表面には負の電荷が誘起されるため、酸化膜側の半導体表面には正孔が誘起されるとともに電子は電極付近から排斥され、キャリアの少ない空乏領域が形成される。半導体の逆側には、電子が排斥されていない領域が残されており、これを中性領域と呼ぶ。

3. 反転

空乏状態からさらに負電圧の絶対値を増していくと、それに従い空乏領域も広がる。しかし、酸化膜側の半導体表面で誘起された正孔によって電場が遮蔽されるようになり、空乏層の成長が止まる。このとき、フェルミ準位と真性フェルミ準位の大小が逆転し、本来少数キャリアであった正孔の濃度が電子濃度よりも高くなるため、これを反転状態と呼ぶ。

N型の場合のMOS型半導体の空乏層の厚み (x_d) を求めてみる。半導体の深さ方向に x 軸をとり、半導体表面を $x = 0$ にとるものとする。空乏層全体でドナー電荷 (固定された正の電荷) が現れるとすると、ドナー濃度を N_D 、素電荷を e として、

$$Q_S = +eN_D x_d \quad (3.1)$$

の電荷が半導体表面に一樣に現れ、このとき半導体表面 ($x = 0$) から内部に向かい電位 ϕ が発生する。その大きさは、 ϵ_{Si} をSiの誘電率としたとき、Poisson方程式より、

$$\frac{\partial^2(\epsilon_{Si}\phi(x))}{\partial x^2} = -eN_D \quad (3.2)$$

と表される。2つの境界条件、

- $x = x_d$ で電場は0, すなわち

$$\left. \frac{\partial^2(\epsilon_{Si}\phi(x))}{\partial x^2} \right|_{x=x_d} = -eN_D \quad (3.3)$$

- $x = x_d$ で電位を0にとる, すなわち

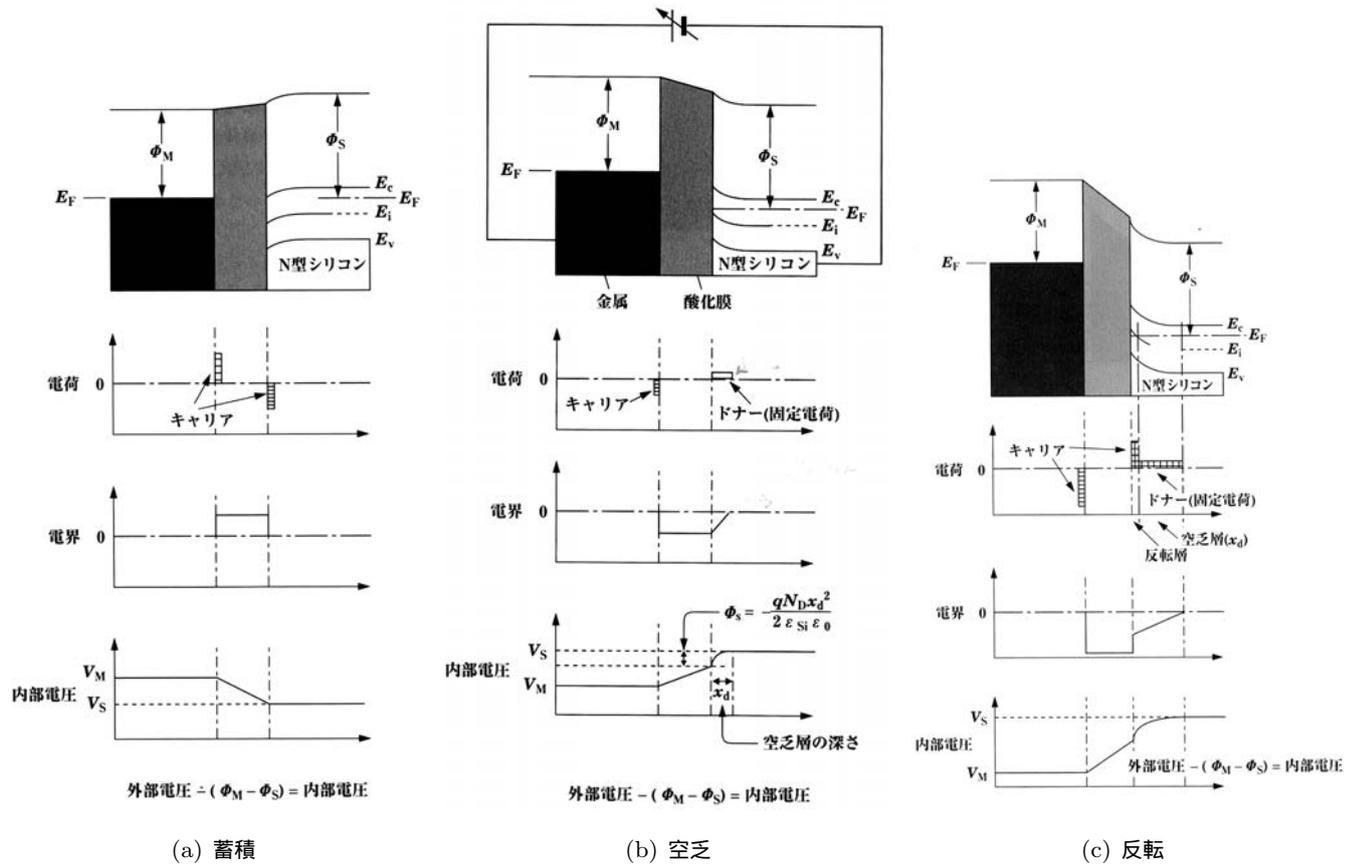


図 3.2 N 型半導体のエネルギーバンド、電荷、電場、電位分布図

$$\phi(x_d) = 0 \tag{3.4}$$

を課してこれを解けば、

$$\phi(x) = -\frac{eN_D(x - x_d)^2}{2\epsilon_{Si}} \tag{3.5}$$

が得られる。半導体表面の電位を $\phi(x = 0) = \phi_s$ と書くと、空乏層の厚みは

$$x_d = \sqrt{-\frac{2\epsilon_{Si}\phi_s}{eN_D}} \tag{3.6}$$

と表されることがわかる。これより、空乏層を厚くするためには、不純物濃度 N_D の小さな素子を作ればよいことがわかる。

検出できる X 線のエネルギー範囲は各層の厚みに依存するため、電極、絶縁層、中性領域等の不感層は薄く、空乏層は厚くするのが理想であり、現在の X 線 CCD の構造ではエネルギー帯域は $\sim 0.1\text{--}15\text{keV}$ である。

3.2 X 線 CCD の動作

3.3 X 線との相互作用

X 線はチップを構成する全ての物質と相互作用するが、このうち有感領域は空乏層である。空乏層に入射した X 線は光電効果により Si 原子の内核電子をたたき出す（一次電子）。この電子によって周囲の電子

が次々と電離して～1600個の電子・正孔対を形成する(1.4.1を参照)。

Si原子の蛍光収率は5%と小さいので、ほとんどの場合、内核電子の束縛エネルギー分のエネルギーを持つ Auger 電子を放出し、これによりさらに電子・正孔対が生成される。Auger 電子は光電子の飛程の内側で停止する。最初になされた電子雲(正孔雲)は入射 X 線の偏光に沿って平行に伸びて広がる。その広がりには光電子の最大飛程と同程度であり、0.1–20 keVの間では近似的に

$$\sigma = 0.0171 \times \left(\frac{E}{\text{keV}} \right)^{1.75} (\mu\text{m}) \quad (3.7)$$

と表される。たとえば 10 keV の光子に対しては～1 μm である。これは CCD の pixel サイズ(10–30 μm)に比べて十分小さい。Si-Kα線が放出された場合は、入射 X 線と同様、ほかの Si 原子と相互作用するが、他の pixel で吸収された場合、エスケープイベントと Si-Kα イベントの2つのイベントとして認識される。吸収されないまま空乏層の外部へと逃げてしまった場合には、エスケープイベントのみが受かる。

3.4 表面照射型 CCD と裏面照射型 CCD

CCD 断面構造を図 3.3 に示す。電極のある側に対し、表裏どちらの面から X 線を照射するかで、特性が異なる。

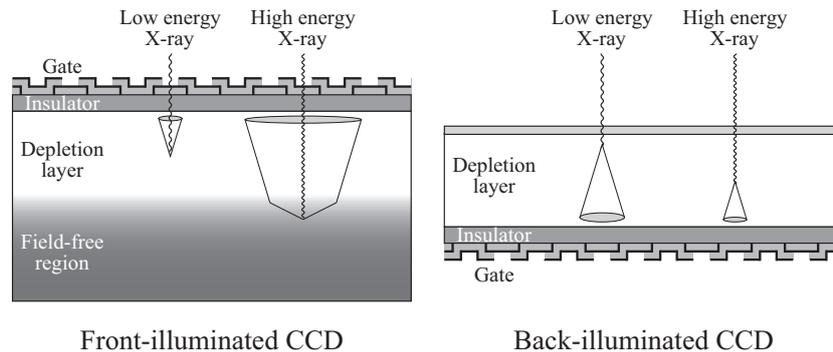


図 3.3 表面照射と裏面照射

3.4.1 表面照射型 CCD (Front-illuminated; FI)

従来から使用されている一般的な方式で、電極側から X 線を照射する。FI CCD では電極で X 線が吸収され得るため、特に低エネルギーの X 線に対する感度が低下するという欠点がある。FI CCD では空乏化されていない中性領域は不感層となる。この影響を小さくするため、電極と反対側から正の電圧(N型半導体の場合)を印加し、中性領域で発生した正孔を CCD の裏面へ排除する。この電圧を Back bias という。

3.4.2 裏面照射型 CCD (Back-illuminated; BI)

電極のない裏面から X 線を照射する方式で、低エネルギー X 線に対する検出効率が向上する。この場合、CCD の支持基板(substrate; 図 3.3 の下方)に電極構造を設けることになり、これにあわせて支持基

板を加工し、接着するプロセスが必要となる。また、電極が光子の入射面と反対側に位置するため、中性領域を削るなどして中性領域をなくし、完全空乏化する必要がある。BI CCD の短所はこれらの加工プロセスは容易でない点である。

XIS では4つの CCD 素子のうち3つが FI、残りが BI であった。SXI では4つの素子すべてが BI である。

3.5 電荷収集

N 型半導体の空乏層内で生じた正孔雲は、半導体表面にかけられた負電圧でできた電場によって電極方向にドリフトしながら、自らの熱運動によって拡散もする。(P 型では正電圧をかける。)以下では、それぞれの運動について述べる。

ドリフト

式 3.5 より、半導体の深さ x の電場 $E(x)$ は、

$$E(x) = \frac{eN_D}{\epsilon_{Si}}(x - x_d) \quad (3.8)$$

と表され、この位置でできた正孔 1 個は

$$m_* \frac{d^2x}{dt^2} = +eE(x) = +\frac{e^2 N_D}{\epsilon_{Si}}(x - x_d) \quad (3.9)$$

の力を受け、電場に沿って電極側へ移動する。これをドリフトと呼ぶ。ここで m_* は正孔の有効質量である。正孔は、半導体中の原子から原子へと次々移動していく。原子間の移動にかかる時間(平均緩和時間) τ_c を用いて、平均速度 \bar{v} は

$$\bar{v} = +\frac{eE(x)\tau_c}{m_*} \equiv \mu E = \mu \frac{eN_D}{\epsilon_{Si}}(x - x_d) \quad (3.10)$$

と書ける。ここで、電場に対するドリフト速度の比例係数 μ を移動度と呼ぶ。深さ x で X 線によって最初にできた正孔雲が電極 ($x=0$) にたどり着くのに要する時間 t は、

$$t = \frac{\epsilon_{Si}}{\mu e N_D} \ln \frac{x_d}{x_d - x} \quad (3.11)$$

となる。

拡散

正孔雲の発生で局所的にキャリアが過剰になると、周囲との濃度差を減少させるため、正孔雲は拡散する。正孔の密度を ρ とすると拡散方程式

$$\frac{d\rho}{dt} = D\Delta\rho \quad (3.12)$$

にしたがって広がっていく。この運動の大きさの度合 (拡散定数 D) はアインシュタインの関係式により、

$$D = \frac{kT}{e} \mu = \frac{kT \tau_c}{m_*} \quad (3.13)$$

と表される。ここで k はボルツマン定数である。拡散の本質は熱運動なので*¹、高温であるほど拡散定数は大きくなる。 x 軸に垂直な面で拡散方程式を解くと、電荷密度は

$$\rho(x, y, t) = \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad (3.14)$$

ここで r は、この面内の電荷を中心とする動径方向の距離である。これより、正孔雲の広がり σ は、

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D \frac{\epsilon_{Si}}{\mu e N_D} \ln \frac{x_d}{x_d - x}} \quad (3.15)$$

と表されることがわかる。

再結合

正孔雲として発生した少数キャリアは上記のように拡散していく。この過程で電子と再結合し、熱平衡状態へ戻る。再結合には、伝導帯と価電子帯の間で一度に起こる直接再結合と、不純物を介した間接再結合とがある。Si では間接再結合がほとんどで、そのタイムスケールは、

$$\tau_p = \frac{1}{\bar{v} \sigma_p N_D} \quad (3.16)$$

と表される。ここで σ_p は捕獲断面積である。通常は τ_p はドリフト時間より十分長い。

表面チャネル型 CCD と埋込チャネル型 CCD

3.2 のポテンシャル井戸は電荷を転送するのに用いられ、チャネルと呼ばれる。図 3.2 のように、半導体と酸化膜の境界付近にチャネル構造を持つ CCD を表面チャネル型 CCD と呼ぶ。この方式の問題点は、酸化膜表面に誘起された負電荷により正孔がトラップされ (界面トラップ)、電荷損失が起こりやすいことである。

これを改善するために埋込チャネル型 CCD が開発された。検出部の N 型半導体と酸化膜の間に極性が反対の P 型半導体を埋め込むことで、ポテンシャルの頂点を酸化膜から遠ざける方法である。SXI はもちろん、今日使われている CCD のほとんどで用いられている。埋込チャネル型 CCD は、その半導体の型 (SXI の場合 N 型) で呼ばれることもあれば、そのチャネル (SXI の場合 P チャネル) で呼ばれることもあり、注意が必要である。

*¹ 電荷間の電気的な反発力もあるが、MOS CCD では効かない [5], [6]

3.6 電極構造

3.6.1 電極構造の種類

電荷転送は、電極ごとに電圧を変化させて次々に隣へ電荷を受け渡していく方法で行われる。これには、次の3つの方式があり、図3.4の(a)–(c)にそれぞれの場合の電荷転送で用いられる電極構造とクロックパターンを示す。

- 2相方式 1pixel を2本の電極 (gate) で構成し、電極の一部に正の電荷を持つ不純物をドーピングすることで電極内にポテンシャルの階段を設けている。SXI ではこの方式を用いている (3.6.2 節参照)。
- 3相方式
1pixel を3つの電極で構成し、順番に電圧をかけることでポテンシャルの井戸を移動させていく。電圧のかけ方によって電荷を逆方向に転送したり、蓄積する電極の位置を変えたりすることができる。
- バーチャルフェーズ方式
不純物をドーピングさせ、1pixel あたり1つの電極で転送を行えるようにしたものである。電荷転送方向を変えることは出来ないが、一部分で電極が無いため軟X線に対する量子効率が高くなるという利点を持つ。

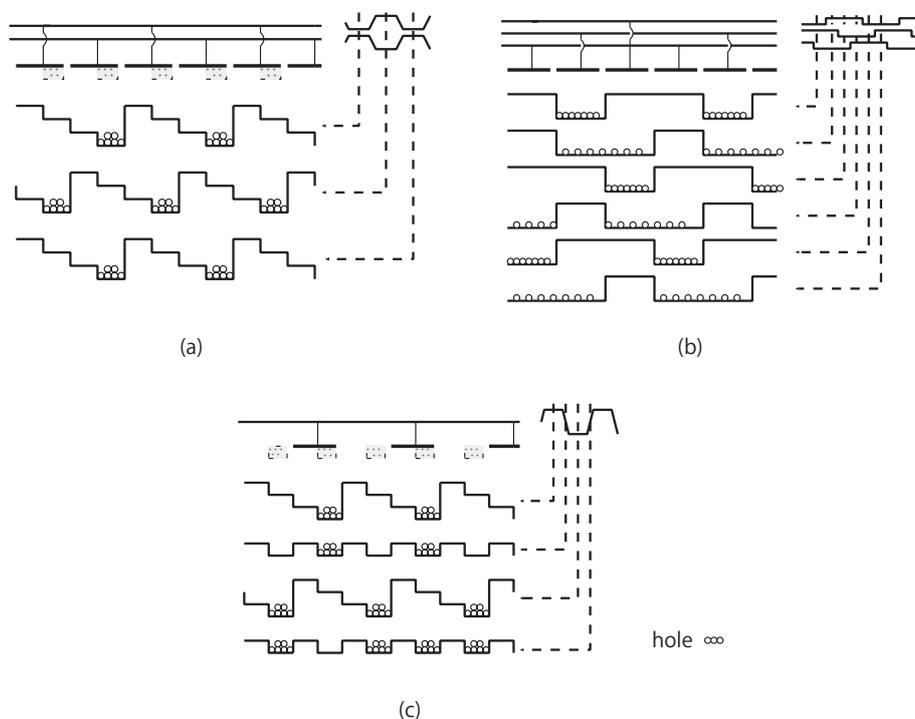


図3.4 電荷転送で用いられる電極構造とクロックパターン。(a) 2相方式, (b) 3相方式, (c) バーチャルフェーズ方式。

3.6.2 浜松ホトニクス社 CCD における電極の並び方

図 3.5 に SXI で使用する浜松ホトニクス社の CCD の電極の並び方を示す。受光部には P1V, P2V と呼ばれる縦転送用の 2 相の電極が順番に並び、蓄積領域から横転送レジスタに転送する最後に TG (Transfer Gate) と呼ばれる他の縦転送用電極とは独立した電極がある。通常 TG は P2V とショートさせ、同じクロックで動作させることによって、電荷を横転送レジスタに転送する。横転送レジスタにも受光面と同様に横転送用の電極として P1H, P2H の 2 つの電極が順番に並んでいる。横転送レジスタの最後には SG (Summing Gate) と呼ばれる独立した電極がある。SG は P2H と同じタイミングのクロックで動作させることによって 1pixel の電荷を読み出すことができる。

ISV, IG1V, IG2V, ISH, IG1H, IG2H は電荷注入法を行う時に使用する電極である (4.3.7 節参照)。電荷注入法とは、電荷を CCD に注入することでシリコン内部に存在する電荷トラップを埋め、電荷転送効率を回復させるものである。通常は ISV, ISH は RD に、他はグランドにショートさせる。

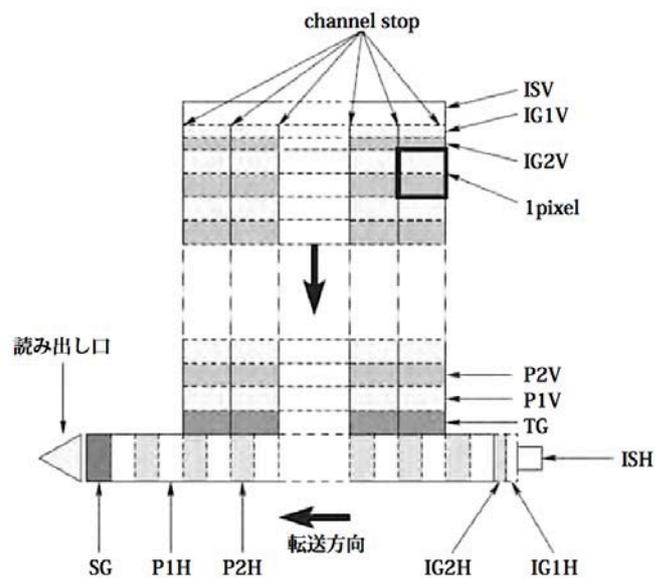


図 3.5 浜松ホトニクス社の CCD の電極の並び方

3.7 電荷転送

CCD の転送方式は以下の 3 つに分類される。

3.7.1 Frame Transfer

Frame Transfer (FT) 方式では、チップは図 3.6(b) のように露光領域と同じ数の pixel を配置した蓄積領域を持つ。蓄積領域にはカバーがかぶせられ、X 線が入射しないようになっている。読み出しは、

1. まず一定時間露光した後で、縦の pixel 数分縦転送することで露光領域の電荷全体を蓄積領域に移動させる。

2. 蓄積領域全体を 1pixel 分縦転送する。これにより蓄積領域一番下の列の電荷は、読みだしのシリアルレジスタに移動する。
3. シリアルレジスタを 1pixel ずつ横転送しながら電荷を読み出す。横の pixel 数分繰り返す。
4. 2., 3. を縦の pixel 数分繰り返すことで全 pixel の電荷を読み出す。

のように行う。後述の FFT 方式に比べて、露光中に読み出しができる利点がある。また、蓄積領域への転送中に露光領域に入射した X 線は正しい位置情報を含まなくなることもある (Out of time event という)。

3.7.2 Full Frame Transfer

FT 方式の場合から蓄積領域を取り去り、撮像領域と蓄積領域の区別を無くした方式である。FT 方式では露光領域に加えて同ピクセル分の蓄積領域の面積が必要になるが、Full Frame Transfer (FFT) 方式では蓄積領域が不要なので、大きな受光面が可能となる。一方で、露光と読み出しが同時にできず、読み出し中にはシャッターが必要となる欠点もある。

3.7.3 Inter-line Transfer

Inter-line Transfer (IT) 方式では図 3.6(c) のように各 column 間に蓄積領域を設けていて、読み出し時間を前者 2 通りに対して小さくしている。現在のデジタルカメラにはこの方式が使われている。可視光に対してはアルミなどで蓄積領域を遮光できるが、X 線に対しては難しいので、X 線 CCD ではこの方式は使用されていない。一方、天文では暗い天体でも検出する大きい有効面積が重要なため用いられない。

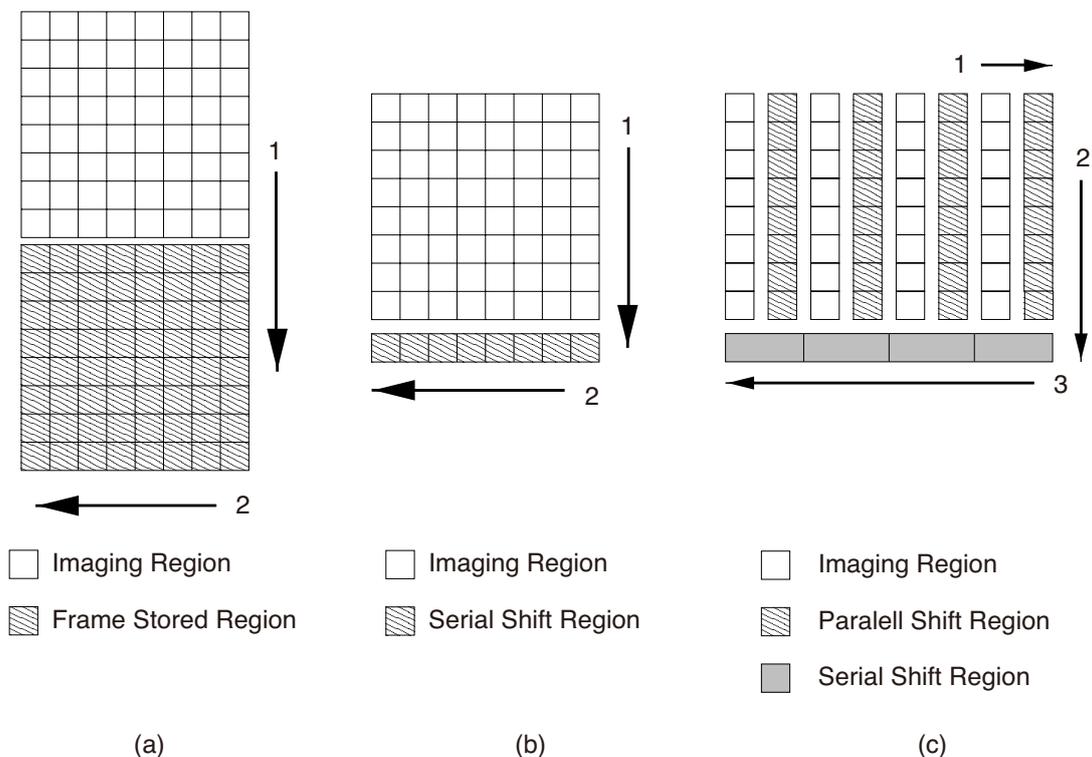


図 3.6 CCD の転送方式. (a) FT, (b) FFT, (c) IT.

3.8 電荷の読み出し

3.8.1 FDA と MOSFET

各 pixel に蓄えられた電荷は、電荷転送によって読み出し口まで運ばれ、電圧レベルに変換される。読み出し口での電荷-電圧変換の方法として、FDA (Floating Diffusion Amplifier) が広く使われている。FDA は電荷リセット用 MOSFET (MOS FET 1) と電荷-電圧変換用 MOSFET (MOS FET 2) で構成される (図 3.7)。

MOS-FET (MOS 型電界効果トランジスタ) とは、印加する電圧により MOS 型半導体のポテンシャルが変化する性質を利用したトランジスタで、図 3.8 のような構造をしたものである (P-channel MOS-FET の場合)。

ゲートに電圧がかかっていないとき、ゲートの両端のチャンネル (ソースとドレイン) の間には電流は流れないが、ゲートに負の電圧をかけると、ソース・ドレイン内の正孔がゲートに引き寄せられ、チャンネル間の N 型半導体に入る。この正孔によりソース-ドレイン間に電流が流れる。ゲート電圧を変化させることで電流の大きさを制御することができ、スイッチや電荷-電圧変換に利用できる。

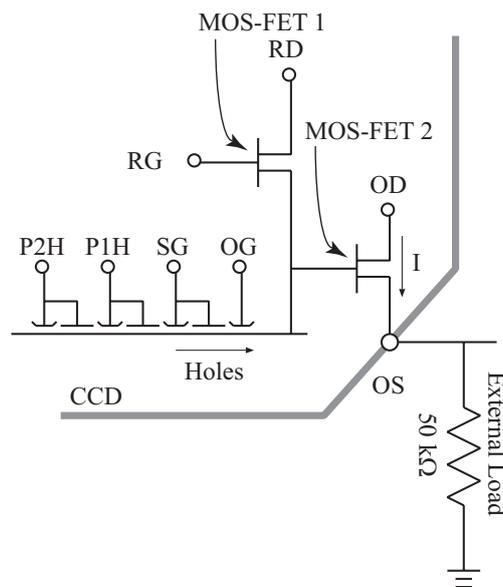


図 3.7 FDA による電荷読み出し

3.8.2 FDA の動作

図 3.7 に示した FDA の構造からわかるように、FDA に用いられる 2 つの MOS-FET のうち一方 (MOS-FET1) は、FDA の入力 (Output gate: OG) をソースとする位置に設置され、OG の電荷をリセットするスイッチとしての役割を果たす。他方 (MOS-FET2) は OG をゲートとする位置に設置され、OG の電荷を電圧に変換する素子として働く。MOS-FET1 のゲート、ドレインをそれぞれ Reset gate (RG), Reset drain (RD)、MOS-FET2 のドレイン、ソースをそれぞれ Output drain (OD), Output source (OS) と呼ぶ。

FDA 方式では、(1) Reset, (2) Floating level, (3) Signal level の 3 段階で 1 pixel 分の読み出しとな

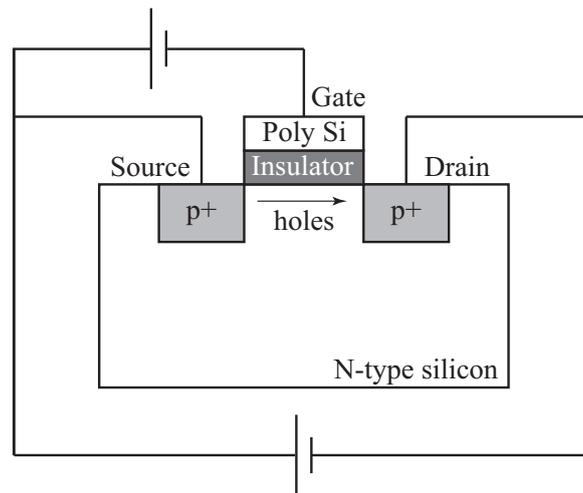


図 3.8 MOS-FET の構造

る。以下では N 型 CCD の信号の読み出し方を順に述べる。

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

RG が Low になると, RD と読み出し口が等電位になり, 蓄積されていた電荷は RD 側へ捨てられる。

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

SG からの電荷転送待ち状態となる。このときの読み出し口の電位を floating level という。

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

SG から電荷が転送され, N 型 CCD の場合は読み出し口の電位が上昇する。このときの読み出し口の電位を signal level という。これで 1 画素の電荷量が読み出される。

これをまた 1 から繰り返し, 次々と読み出していく。FDA によって変換された CCD 出力波形は, 図 3.9 のようになる。floating Level から signal Level に移り変わるところで, シリアルレジスターから読み出し口に電荷が送り込まれている。floating Level と signal Level の差は, 各 pixel に蓄えられた電荷量に比例しており, これを外部回路で測ることによってその pixel の信号波高値が分かる。ただし, 光が CCD に入射していないときも floating Level と signal Level の差はゼロにはならない。これは, 主に暗電流と既成容量による電氣的なオフセットがあるためで, この成分をゼロレベルと呼んでいる。

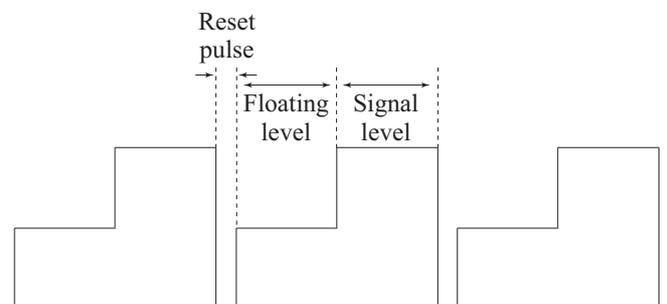


図 3.9 CCD からの出力波形

3.8.3 波高値の算出方式

CCD の各 pixel の出力信号, つまり signal Level と floating Level の差を, 波高値 (pulse height; PH) と呼ぶ. 波高値の算出には以下のような方法がある (図 3.10).

- 多重相関サンプリング方式

Signal / floating level それぞれの波高値を Analog-digital converter (ADC) に通してサンプリングし, デジタル信号にしてから差し引く方式. アナログ回路が単純で済むという利点があるが, ノイズをキャンセルするために何度もサンプリングする必要があり, 高速の ADC を要する. SXI ではこの方式を採用する.

- 積分方式

Signal / floating level を積分回路でそれぞれ等しい時間ずつ積分してから差し引く方式. 時間積分によりランダムノイズが鈍され, かつ高速 ADC も必要ないという利点を持つが, 積分のため複雑なアナログ回路が必要となる. XIS はこの方式を採用している.

- 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.

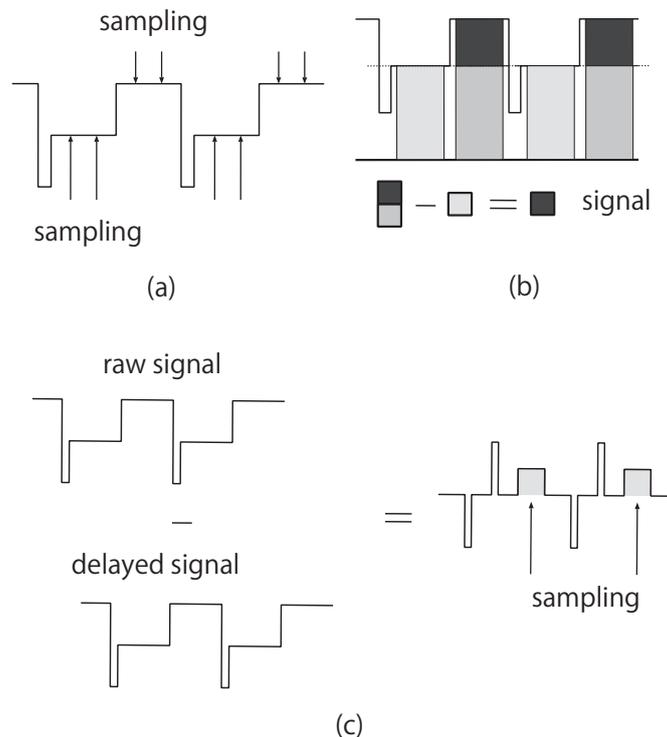


図 3.10 波高値の算出方式. (a) 多重相関サンプリング方式, (b) 積分方式, (c) 遅延方式.

3.9 イベント抽出

X 線による電荷が全く無い場合にも, 前節で述べた読み出しノイズや暗電流などに由来する信号出力がある. これを dark level と呼び, X 線イベントを検出するためにまず各 pixel の dark level を決定しなく

てはならない。これは複数の frame image を集積し、平均化して求められる。

dark level を差し引いた各 pixel の波高値に対し、ある閾値を設け、それを基準に X 線イベントを検出する。しかしながら、X 線が空乏層で電荷雲に変換されると、3.5 節で述べたように拡散によりある広がりをもって検出される。このとき複数のピクセルに電荷がもれだすことがあるので、X 線のエネルギーを正しく再現するためには、電荷の洩れた周囲の pixel の波高値も足し合わせてやる必要がある。特に、空乏層の厚い SXI では、電荷がどれほど広がっているか正しく見積もることが非常に重要である。そのための手法として SXI では Grade 判定法を採用している。

3.9.1 Grade 判定法

Grade 判定法は ASCA 以降の CCD 搭載衛星で実際に用いられているイベント検出法である。イベントの周囲の電荷分布を、図 3.11 にある 7 種類、およびそのいずれにも該当しない場合の計 8 種類のパターン（これを Grade と呼ぶ）に分類して識別する。その手順は以下の通りである。

1. Event threshold lower と Event threshold upper を決め、lower から upper に収まる波高値の pixel をリストアップする。ここで、Event threshold upper を設定している理由は、パイルアップを除去するためである。この pixel の周囲 3×3 pixel 以内でこの pixel の波高値が最大するとき、これをイベント中心と認定する。
2. イベント中心の周囲 3×3 pixel に対しては Split threshold を設定し、波高値がこれを越えた pixel はイベント中心から電荷が洩れだしたものとしてリストアップする。
3. Split threshold を越えた pixel の配置に従い、このイベントの Grade を判定する。
4. Grade に従い波高値を合算する。このとき Grade によっては Split threshold を越えても足し合わされない pixel もある。合算結果を入射 X 線に対応する波高値とみなす。

この Grade 判定法は、ASCA 衛星の時代から使用されていた。周囲 3×3 pixel を使用して判別するこの方式を ASCA grade 方式と呼ぶ。この方式では、Grade 0, 2, 3, 4, 6 を X 線イベントとみなし、これらをまとめて X 線 Grade と呼ぶ。Grade 0-6 のいずれにもあてはまらないものを Grade 7 と呼び、これは 3×3 pixel よりも大きな広がりを持っている。X 線 Grade 以外の 3 種類、すなわち Grade 1, 5, 7 を非 X 線バックグラウンドによるイベントとみなす。

3.10 CCD 素子の性能指標

CCD を用いた観測を行う場合、いかに正確に集めた電荷量を読みだせるか、いかに効率良く、速く電荷を転送できるかが重要である。そのための性能指標としてゲイン、エネルギー分解能、量子効率、転送速度がある。これらを出来るだけ正確に知ることが、天体のデータ解析時に必要である。

3.10.1 ゲイン

入射 X 線のエネルギーとイベント値との関係である。近似的に一次関数で表されるが、厳密には ADC の非線形性や W 値の変化などにより、エネルギーによるばらつきがある。ばらつきを含めたゲインを精度良く見積もることが入射 X 線エネルギーの決定において重要である。

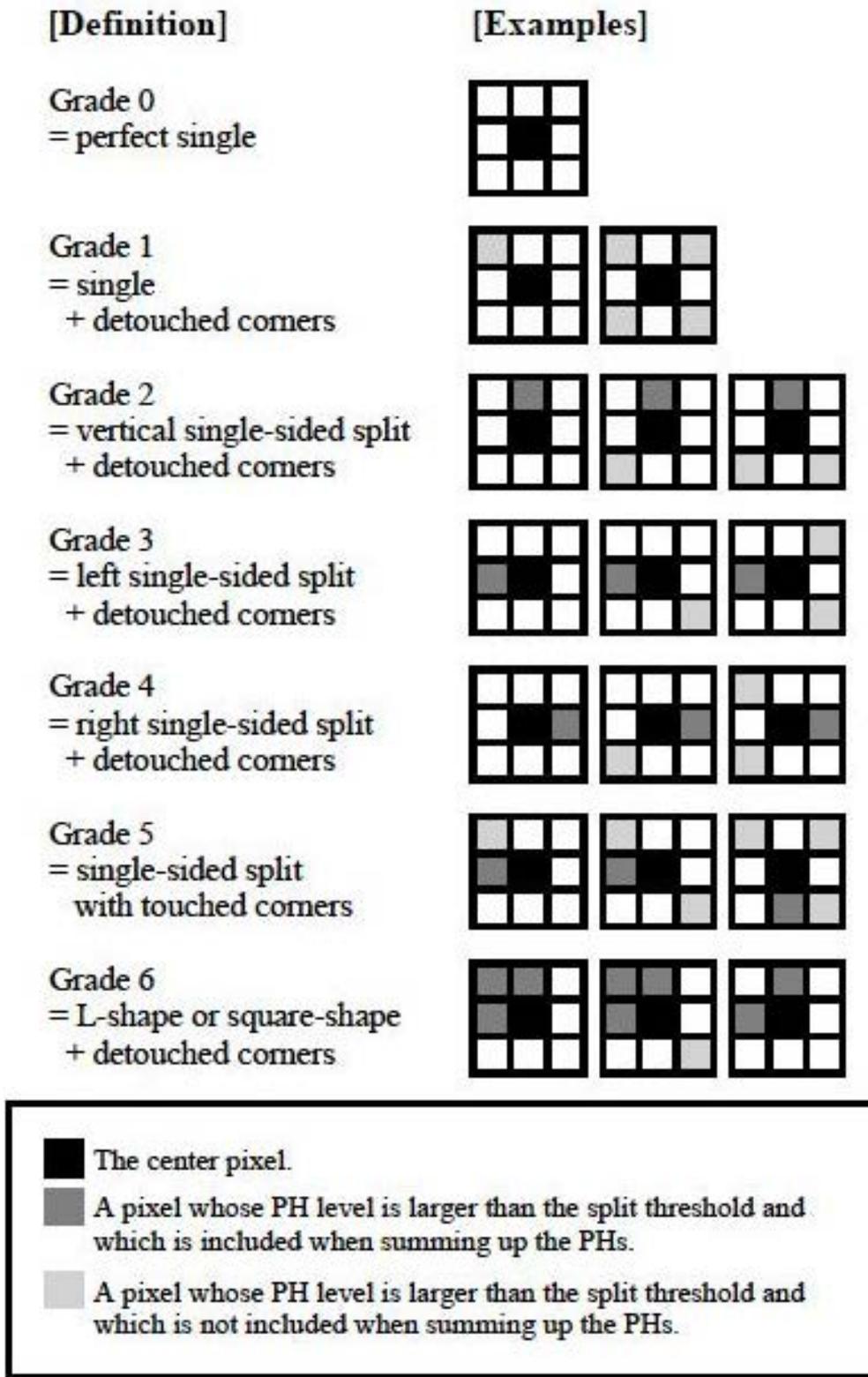


図 3.11 ASCA grade 方式の定義図

3.10.2 エネルギー分解能

1.4.1 節ですでに述べたように、CCD 検出器のエネルギー分解能は、読みだした電荷量のゆらぎとノイズによって決まり、FWHM で表すと、

$$\Delta E = 2 \times \sqrt{2 \log 2} \times W \times \sqrt{F \times \frac{E}{W} + \sigma_{\text{noise}}^2} \quad (3.17)$$

となる。実験的には、輝線スペクトルを取得し、シングルガウシアンでフィッティングし、

$$\Delta E[\text{eV}] = 2 \times \sqrt{2 \log 2} \times \text{ゲイン} [\text{eV/ch}] \times \text{標準偏差} [\text{ch}] \quad (3.18)$$

で評価する。

3.10.3 検出効率

CCDに入射したあるエネルギーのX線のうち、X線として検出されたイベントの割合である。CCDの各エネルギーに対する検出効率は、低エネルギー側では空乏層までの光学的厚み、高エネルギー側では空乏層の光学的厚みに依存する。空乏層で吸収されたX線と、X線として認識されたイベントが完全にイコールであるとする検出効率は

$$Q(E) = \exp\left(-\int \lambda(E, l) dl\right) \times [1 - \exp(-\lambda_{\text{Si}}(E)D)] \quad (3.19)$$

と表せる。但し λ は電極、絶縁層など空乏層までの不感領域の吸収係数、 l は空乏層に達するまでの光子の軌跡に沿った長さ、 λ_{Si} はSiの吸収係数、 D は空乏層の厚さである。

3.10.4 読み出し速度

現在のX線CCDの多くは 1024×1024 かそれ以上のpixelを持つ。1 pixelの読みだし時間は $\sim 10 \mu\text{sec}$ であるからCCD全体の読み出しには数secかかる。時間分解能を考えると読みだし速度はさらに速い方が良いが、実際はADCのAD変換速度やノイズなどの性能によって決定される。

3.11 エネルギー分解能の劣化の要因

エネルギー分解能の劣化をもたらす大きな要因は、ノイズと電荷転送非効率(CTI)である。

3.11.1 ノイズの原因

暗電流

CCDでは、光子の入力が全くない状態でも、Si結晶のバンドギャップ1.1 eVを越えて電子が伝導帯に励起されることがある。こうして蓄積される電荷を、1pixelあたり単位時間中に発生する数($e^-/\text{pixel}/\text{秒}$)でその大きさを表し、暗電流と呼ぶ。暗電流の原因には、大きく分けて以下の3つが考えられる。

1. 空乏化していない領域からの熱励起電子の拡散(拡散電流)
2. 空乏層内での媒介中心による再結合-発生(発生電流)
3. 界面での表面準位を介した熱励起(表面リーク電流)

いずれも熱励起によるため、素子を冷却することで低減できる。暗電流と温度の関係は、

$$\text{暗電流} \propto T^{1.5} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (3.20)$$

で表せる [7][8]. T は絶対温度, E_g は Si のバンドギャップエネルギーであり, k_B はボルツマン定数である. イベントを抽出する際に dark level を差し引くので (3.9 節参照), ノイズとしてエネルギー分解能に影響するのは, 暗電流のゆらぎ (つまり熱励起で発生した電荷の個数のゆらぎ) である.

読み出しノイズ

CCD から信号を読み出す際には, CCD 素子 (および FPC 上) の FET に起因するノイズと, 読み出し回路に起因するノイズ (SXI の場合はビデオボードに搭載された ASIC からのノイズ) が加わる. これら 2 つを合わせて読み出しノイズと呼ぶ. ノイズの中ではエネルギー分解能に与える影響が最も大きい.

縦転送ノイズ

縦転送を行っている間には, spurious charge と呼ばれる電荷によるノイズが発生する.

spurious charge に関しては, Janesick [9] らによって次のような説明がなされている通常の CCD の動作クロックは high の時の電圧が正の電圧, low の時が負の電圧がかかっている. したがって, クロック電圧が low の時に CCD は反転状態になり, 界面の正孔の濃度が増加して表面準位に正孔がトラップされる. クロックが high になる時に CCD は反転状態から非反転状態になる. トラップされていた正孔は放出され, 電場により加速を受ける. そして衝突電離によって spurious charge を発生させる.

暗電流の場合と同様, エネルギー分解能に影響するのは spurious charge のゆらぎであり, これを縦転送ノイズと呼ぶ.

3.11.2 オーバークロックによるノイズ測定

ノイズを評価するときに用いるのがオーバークロック領域と呼ばれるもので, CCD のピクセル数に対し, 転送回数を一定量多くとって空読みしたものである. CCD の出力イメージ例を図 3.12 に示す. 実際に受光を行った部分を有効画素領域 (Effective Region), 横方向の空読みによるものを水平オーバークロック領域 (Horizontal Overclocked Region; HOC), 縦方向の空読みによるものを垂直オーバークロック領域 (Vertical Overclocked Region; VOC) と呼ぶ.

各領域において, 波高値は読み出し電荷が 0 のときでもあるオフセットを持って出力される. よって波高値のヒストグラムを作成すると, このオフセットの位置にピークができる. これを 0 ピークと呼ぶ. 検出器由来のさまざまなノイズが, ピークの広がりや位置に寄与する. 各領域に含まれるノイズ成分は異なるため, 0 ピークを比較することで, ノイズの大きさを成分ごとに評価できる.

HOC に含まれるのは, 横転送中のノイズ, CCD 素子 (および FPC 上) の FET に起因するノイズ, そして読み出し回路のノイズである. VOC に含まれるのは, HOC に含まれるものの他に縦方向に転送される間のノイズである. 有効画素領域には, 更に受光中に発生した暗電流が含まれる. まとめると以下のようになる.

HOC 横転送中のノイズ + CCD 素子 (および FPC 上) の FET に起因するノイズ + 読み出し回路のノイズ

VOC-HOC 縦転送中のノイズ

Effective-VOC 蓄積中の暗電流

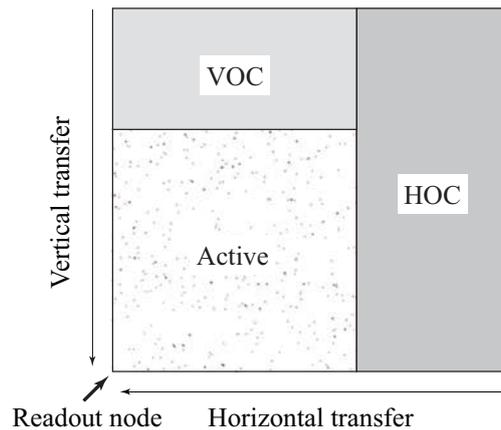


図 3.12 CCD フレームイメージ

3.11.3 ノイズの評価方法

暗電流 (のゆらぎ), 縦転送ノイズ, 読み出しノイズを実際に評価する方法を述べる. 本修士論文の第 6, 7, 8 章のノイズ評価も以下の方法で行っている.

暗電流

暗電流を評価するために, VOC 領域と有効画素領域の 0 ピークの中心チャンネルを比べる. この二つは蓄積をしたかどうか異なるだけであるので, その差を蓄積中の暗電流として評価する.

$$\text{暗電流 [e}^-/\text{s]} = \frac{\text{有効画素領域の 0 ピークの中心チャンネル} - \text{VOC の 0 ピークの中心チャンネル}}{\text{露光時間 [s]}} \times \frac{\text{ゲイン [eV/ch]}}{W[\text{eV/e}^-]} \quad (3.21)$$

とする. W は平均電離エネルギーで, Si の場合 3.65 eV/e^- である. エネルギー分解能に影響するのは蓄積中に熱励起で発生した電荷の個数のゆらぎであるので, 電荷数の平方根を取って,

$$\text{暗電流ノイズ [e}^-/\text{s]} = \sqrt{\text{暗電流 [e}^-] \times \text{露光時間 [t]}} \quad (3.22)$$

をノイズとして評価する.

縦転送ノイズ

縦転送中に生ずるノイズは VOC と HOC のスペクトルの 0 ピークの差に現れる. spurious charge のゆらぎがノイズとなるので, 縦転送ノイズを, 0 ピークの差の平方根を取って評価する.

縦転送ノイズ [e^-]

$$= \sqrt{(\text{VOC の 0 ピークの中心チャンネル} - \text{HOC の 0 ピークの中心チャンネル}) \times \frac{\text{ゲイン [eV/ch]}}{W[\text{eV}/e^-]}} \quad (3.23)$$

読み出しノイズ

読み出しノイズ (CCD 素子 (および FPC 上) の FET に起因するノイズ + 読み出し回路のノイズ) を評価するには, HOC のスペクトルを用いる. HOC には横転送中の暗電流も含まれるが, 横転送は転送時間が数 ms と短いため暗電流の影響は小さい. 読み出しノイズは HOC スペクトルの 0 ピークの標準偏差 σ_{HOC} を用いて次のように定義する.

$$\text{読み出しノイズ [e}^-] = \sigma_{\text{HOC}}[\text{ch}] \times \frac{\text{ゲイン [eV/ch]}}{W[\text{eV}/e^-]} \quad (3.24)$$

3.12 電荷転送非効率

半導体結晶には製造時点で, あるいは製造後の放射線損傷によって格子欠陥が生じる. 特に半導体層と絶縁層の境界には多く存在している. これらは転送される電荷にとってトラップとなり, 転送途中で電荷が失われてしまう. 電荷量全体に対する, 1 回の転送で失われる電荷量の割合を電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency; CTI) と呼ぶ. あるいはトラップされず転送される電荷の割合を電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency; CTE) と呼ぶ. CTI を補正する方法については 4.3.7 節で詳しく述べる.

3.13 unknown な成分

実際の実験においては, ファノ因子による分解能の限界 (Si の場合 120 eV), 読み出しノイズ, 暗電流によるノイズ, 縦転送ノイズ, および CTI だけでは, エネルギー分解能の測定値 (式 3.10.2) を説明できないことがある. つまりこの場合

$$\begin{aligned} (\Delta E [\text{eV}])^2 &= (\text{ファノ限界 [eV]})^2 \\ &+ (\text{読み出しノイズ [eV]})^2 + (\text{暗電流ノイズ [eV]})^2 + (\text{縦転送ノイズ [eV]})^2 \\ &+ (\text{CTI による劣化 [eV]})^2 + (\text{unknown な成分 [eV]})^2 \quad (3.25) \end{aligned}$$

と書き表せる. unknown な成分は, ハードウェアだけでなく, データの解析方法を改善することで減少することがあり, エネルギー分解能の改善のためには, 解析方法は重要なポイントとなる.

3.14 その他の性能劣化の原因

3.14.1 光もれ

X線 CCD は可視光にも感度を持つ。通常撮像領域には可視光が入り込まないように設計がされたり、可視光遮断フィルタが用いられたりするが、それでも洩れ込んでしまう場合は、光洩れの領域をデータ解析で用いないか、あるいは微量であれば光洩れ成分をゼロレベルに含めて解析を行う。

3.14.2 Hot pixel

X線が入射していなくても常に高い波高値を示す pixel がいくつか存在し、Hot Pixel と言う。これは製造過程上生じたり、あるいは激しい放射線損傷によって格子欠陥ができたときに生じる。解析の際にはこの pixel は除く必要がある。

3.14.3 パイルアップ

露光中 1 つの pixel に 2 つ以上のイベントが入射すると、電荷が足し合わされて 1 つのイベントとして見なされ、各入射 X 線のエネルギーを知ることは不可能である。X 線強度の非常に強い天体を観測する場合、対象の X 線強度から、このようなパイルアップがどの程度の確率で起きるかを見積もり、最も適したクロックパターンを選ぶことが必要である。

第4章

軟 X 線撮像検出器 SXI

4.1 SXI の開発目標

軟 X 線分光器 (SXS) はエネルギー分解能 ~ 7 eV を達成するが視野が狭い ($\sim 3' \times 3'$) のが欠点である。SXI は広い視野をカバーすることが可能であり、スペクトルの連続成分を測定し SXS と相補的な役割を果たす。また、硬 X 線撮像検出器 (HXI) と合わせて正確な広帯域スペクトルを同時に取得する。

例えば ASTRO-H のサイエンストピックの一つである、銀河団という宇宙最大の天体の観測を行うためには、広い視野は必要不可欠である。赤方偏移 $z \sim 0.1$ 以遠の銀河団において、その X 線ガスの広がり (ピリアル半径) を一度に観測でカバーし、熱的エネルギーの総量を測定するには、18 分角の視野が必要である。焦点距離が 5.6 m であるので、焦点面検出器は 30 mm \times 30 mm より大きいことが要求される。我々は 31 mm \times 31 mm の CCD 素子を 4 枚並べることですでに 62 mm \times 62 mm を達成している。

また別のサイエンストピック、ブラックホールにおいて、その重力の影響を求めるには軟 X 線から硬 X 線領域までの連続スペクトルの形を決める必要がある。そのためにエネルギー範囲が 5–80 keV の HXI と十分な重なりを確保することが求められる。また 5 keV 以上には鉄などの輝線があり (後述), HXI では分解能が不足している。そこで SXI は、鏡表面の金の L 吸収端がある 12 keV までカバーする必要がある。また 12 keV で大きな有効面積を確保するために、空乏層厚 $> 200 \mu\text{m}$ が要求される。我々はすでに $\sim 200 \mu\text{m}$ の空乏層厚を達成している。

このように、ASTRO-H プロジェクトの目的から導きだされる SXI への要求値を表 4.1 の「要求値」の欄にまとめた。しかし ASTRO-H が汎用の X 線天文台であることを鑑み、SXI チームではさらに高い性能を追求するための目標値を設定している。

エネルギー分解能は、打ち上げ直後では 150 eV、打ち上げから 3 年後で 200 eV (*Suzaku*/XIS と同程度) を目指す。たとえば、中性鉄、ヘリウム状イオン鉄、水素状イオン鉄からそれぞれ出る $K\alpha$ 輝線 (エネルギーはそれぞれ 6.40 keV, 6.68 keV, 6.97 keV) は、鉄の存在量が多いことと、輝線として比較的孤立しているため、プラズマの温度を決める際に重要な特性 X 線である。150 eV の分解能があればこれらの輝線を容易に分離できる。現状では要求値の 200 eV (3 本の鉄輝線を分離できる最低ライン) は達成しているが、目標値を達成するためには改善が求められる。

4.2 SXI の開発の現状と本修士論文の位置づけ

通常、衛星の開発は Bread Board Model (BBM) \rightarrow Engineering Model (EM) \rightarrow Flight Model (FM) の順に進められる。BBM とは衛星開発の一番最初の段階で試作されるモデルのことで、機能を確認する

表 4.1 SXI のベースライン案とゴール案

	要求値	目標値	現状
撮像領域サイズ	30×30 mm		62×62 mm
空乏層厚	> 200 μm	200 μm	~ 200 μm
有効エネルギー帯域	0.5–12 keV	0.4–12 keV	0.5–12 keV
エネルギー分解能 (FWHM@5.9 keV)	200 eV	150 eV	150–200 eV
読み出しノイズ	10 e^- 以下	7 e^- 以下	7 e^-

ためのものである。EM はほとんど FM と同じものであり、地上でさまざまな試験を行って性能を確認する。FM は実際に宇宙に飛ばすもので、地上で実験も行うが、過酷な試験は行わない。

我々 ASTRO-H/SXI チームは、2011 年度に EM 品の設計・製作を開始した。

本修士論文ではまず、CCD 素子に接続する Flexible Printed Circuits (後述) に対しては製造・設計に問題ない事を確認するため、FM と同じ製造ロットで作られた供試体を用いて過酷な試験を行った (第 5 章)。また EM 素子の性能を確かめ、エネルギー分解能を目標値に近づけるため、Charge Injection を行い、動作条件のパラメーターを最適化した。また解析方法の検討を行った (第 6 章)。さらに、ヒーターによる温度制御や、キャリブレーションソースの EM 品に対して、機能試験を行った (第 7 章)。

以下では、SXI システムの構成について述べる。図 4.1 には SXI システムにおけるブロック図を示す。

4.3 SXI システムの構成

SXI は軟 X 線望遠鏡 (SXT-I) から 5.6 m 離れた焦点面に配置される。大きく分けて, SXI-S (S: Sensor), SXI-PE (PE: Pixel processing Electronics), SXI-DE (DE: Digital Electronics), SXI-CD (CD: Cooler Driver), SXI-MXS (MXS: Modulated X-ray Source) の 5 つから構成される。以下では SXI に搭載する CCD 素子と, 5 つの構成要素についてそれぞれ述べる。

4.3.1 CCD 素子

SXI では, 新たに開発した P チャンネル型裏面照射 CCD 素子 (PchNexT4) を採用する。表面照射型では, 電極構造により低エネルギー側の X 線が吸収されてしまい検出効率が低くなるが, 裏面照射型を用いることで軟 X 線の検出効率を向上できる。さらに裏面照射型のほうが, デブリに強いという利点がある。

素子は 1pixel あたり $24 \mu\text{m}$ 四方で, 1 枚あたり 1280×1280 pixel で構成される。空乏層厚が $\sim 200 \mu\text{m}$ と非常に厚く, 3.5 節で述べた拡散による電荷の広がりが大きいので, 信号は縦方向に 2pixel, 横方向に 2pixel を加算 (ピニングという) して処理する (図 4.2)。ピニングの駆動方式としては

1. 縦転送を 2 度続けて行い, 横転送レジスタそれぞれに縦 2pixel 分の信号電荷を加算する (図 4.2 の (a))。
2. 1 回横転送を行って, 縦 2pixel 分の信号電荷を転送する (図 4.2 の (b))。
3. SG をクロッキングせずにもう 1 回横転送を行う。SG がクロッキングしなければ, 読み出し口直前 (アンダークロックピクセル) にあった信号電荷は読み出し口に転送されず, 新たに転送された縦方向 2pixel 分の信号電荷が加算される。つまり, 縦方向 2pixel, 横方向 2pixel の計 4pixel 分を加算したことになる (図 4.2 の (c))。
4. P1H, P2H と同期して SG をクロッキングすることで, 加算した信号電荷を 1 度に読み出す (図 4.2 の (d)(e))。
5. 横転送レジスタに蓄積した電荷を全て読み出すまで, (3), (4), (5) を繰り返す。

これを有効画素領域の信号電荷の全てを読み出すまで繰り返す。

1 個の CCD 素子の有効画素領域はおよそ 3 cm 四方で, 2 個の segment (segment AB と segment CD) から構成される。各 segment は 2 個の出力ノード (それぞれノード A と B, ノード C と D) を持っている。CCD 素子は 4 枚モザイク状に並べる (図 4.3)。

CCD 素子は図 4.3 のように Flexible Printed Circuits (FPC) に接続され, 各 pixel の信号を読み出す。FPC は我々が熱サイクルおよび熱衝撃試験を行った。5 章で詳述する。

CCD は可視光や紫外線にも感度を持つため, これらを遮断し X 線のみを通すフィルタが必要である。XIS では, 可視光と紫外線を遮断するために Optical Blocking Filter (OBF) を素子の上部に装着したが, 打ち上げ時の振動で OBF が割れないように, センサハウジングを真空にしておく必要があった。SXI では, アルミニウムとポリイミド ($\text{C}_{22}\text{H}_{10}\text{O}_4\text{N}_2$) の薄膜 Optical Blocking Layer (OBL) を CCD 素子表面に蒸着し, 可視光と紫外線を反射させる [10][11]。

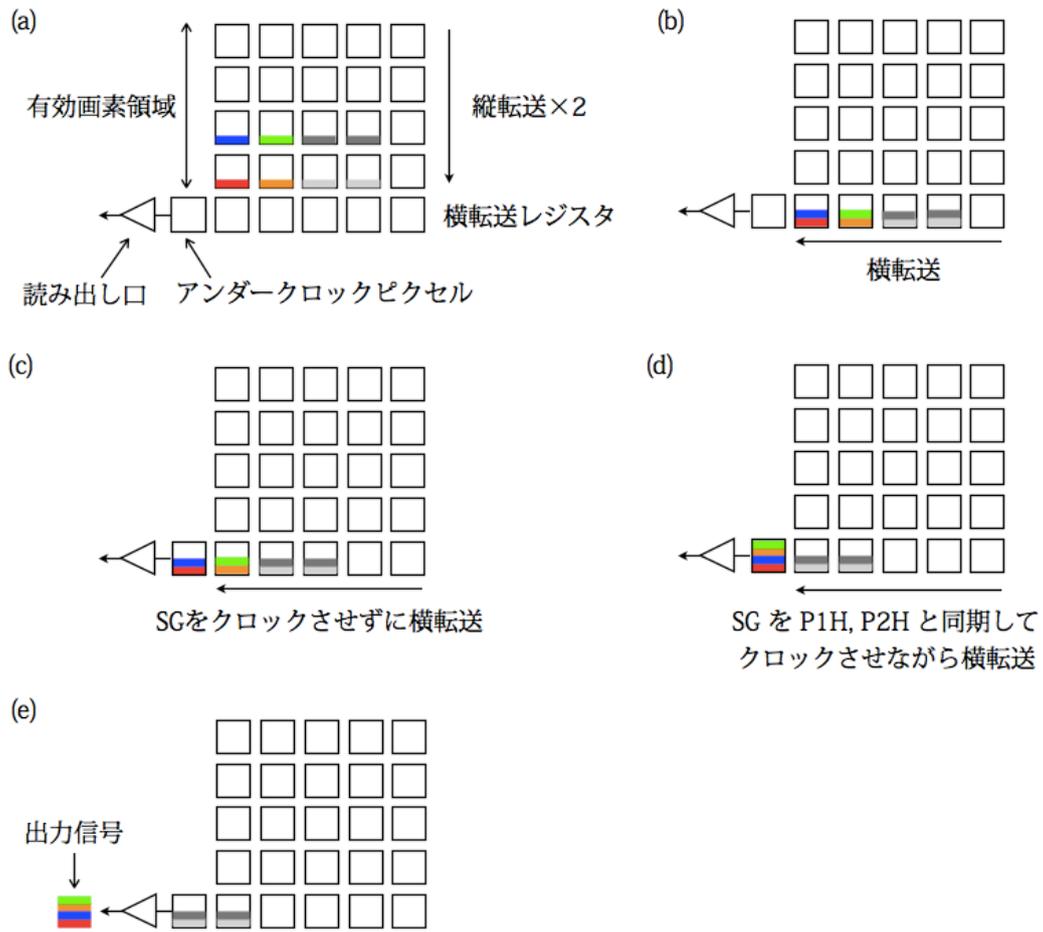


図 4.2 2 × 2pixel のビニングの駆動方式

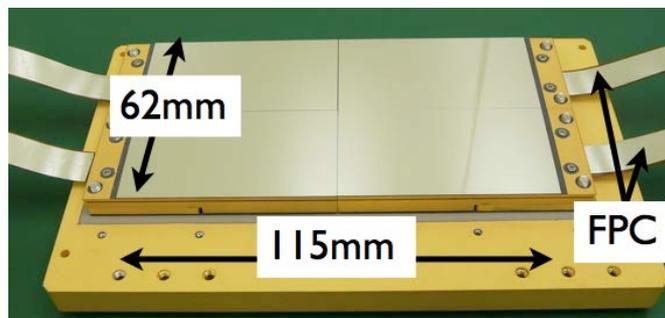


図 4.3 4つの CCD 素子と Flexible Printed Circuits (FPC)

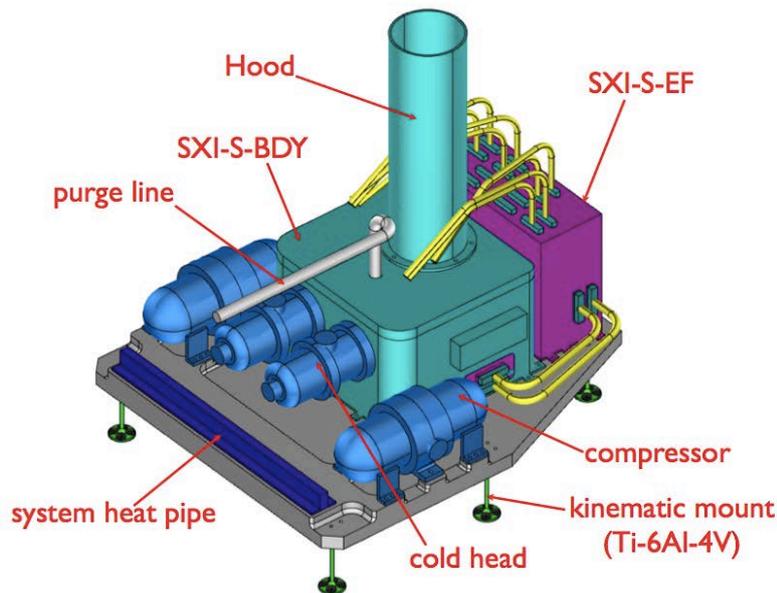


図 4.4 SXI-S の外観. SXT で集光した X 線は図の上方から Hood を通って素子に入射する. SXI-S-BDY に CCD 素子とビデオボードが格納されている. ドライバーボードはボディ横の SXI-S-FE に配置される. 冷凍機 (SXI-S-1ST) は側面に取り付けられる.

4.3.2 SXI-S

SXI-S は焦点面に置かれ, X 線を検出する役割をもつ. カメラボディとアナログ回路, 機械式冷凍機から成る. 図 4.4 に SXI-S 全体の構造を示す. 中央部がカメラボディ (SXI-S-BDY) であり, CCD 素子が格納される. ボディには厚さ 10 – 35 mm のアルミニウムを使用し, 軌道上の放射線をシールドする.

冷凍機とヒーター

宇宙線陽子が衝突すると, シリコン結晶には格子欠陥が生じてしまい, 性能が劣化する. 劣化の性能への影響 (暗電流と CTI) は CCD の動作温度によって変わる. XIS では -90°C で動作させているが, 1 年ほどで CTI が無視できないほど低下してしまった. 冷却温度を -120°C にすると, CTI の補正のために人工的に注入した電荷 (4.3.7 節参照) がトラップから放出されるタイムスケールが長くなる. そのため SXI では素子を -120°C まで冷却する. 冷却にはスターリング冷凍機を利用する. 冷凍機は, 冷却性能としては 1 台で充分であるが, 2 台搭載し, 待機冗長を形成している. また温度制御用のヒーターも取り付け. 我々はヒーターによる温度制御試験を行った. 7 章で詳述する.

アナログ回路

アナログ回路はドライバーボードとビデオボードの 2 つから成る.

ドライバーボード (SXI-S-FE) ドライバーボードは SXI-PE からの信号を受け, CCD を駆動するためのアナログ信号を出力する. ドライバーボードはカメラボディ隣の SXI-S-FE に収納される.

SXI-S-FE では CCD 素子の温度計測やヒータ制御, SXI-S 各部の温度および電圧 (HK) 情報の取得も行う。

ビデオボード ビデオボードでは, CCD 素子からの微弱なアナログ信号を増幅・整形し, デジタル信号に変換して出力する。CCD 出力信号への雑音混入を極力防止するため, ビデオボードは SXI-S-BDY 内に置く。CCD 素子 2 つに対して 1 枚搭載される。ビデオボードは Video ASIC と Video FPGA からなり, $\Delta\Sigma$ 型 AD 変換の前半と後半をそれぞれが担う。

Video ASIC は CCD2 素子に対して 4 系統搭載されている。先述のように, 1 個の CCD 素子は 2 個の segment で構成され, 各 segment は 2 個の出力ノードを持っている (出力する際は各 segment ごとに 1 個のノードしか用いない。もう 1 個のノードは冗長系である。)。各出力ノードは 2 系統の ASIC で同時にサンプリングされる (後段の video FPGA でこの 2 系統の ASIC からの波高値を平均化すると, 読み出しノイズの低減が可能になる。)。各系統は奇数番目と偶数番目のサンプリングデータを独立した 2 個の ADC (even-ADC と odd-ADC) で処理する。2 個の ADC が独立かつ同時に駆動することによって, CCD 出力信号を 1pixel ずつ交互に信号処理を行うことができ, ADC が 1 個のみの場合に比べて, 2 倍のピクセルレートで読み出すことが出来る。

こうして 1 個の CCD 素子からは 16 個の 155bit のデータストリームが生じ, Video FPGA に供給される。Video FPGA は 155 ビットの ADC 出力を 12 ビットの波高値に変換され (SXI ではこの機能のことを, デシメーションフィルタと呼んでいる), その結果は MIO ボード (4.3.4 節参照) に送られる。

キャリブレーションソース

キャリブレーションソースには ^{55}Fe を用い, SXI-S ボンネットに開けたキャリブレーションソース搭載用の貫通孔に搭載する。直接触れないようにホルダーに入れた上で, SXI-S ボンネット上部から挿入し固定する。我々はキャリブレーションソースの強度と散乱成分を測定した。7 章で詳述する。

4.3.3 Cooler Driver (SXI-CD)

SXI-CD は衛星のサイドパネルに置かれる。ここでは機械式冷凍機の制御を行う。

4.3.4 SXI-PE

SXI-PE は衛星のサイドパネルに置かれ, 必要なデータ処理の一部をハードウェアで高速処理する。SXI-S-FE に対し CCD 駆動のための指令を出し, AD 変換後のイメージデータを受け取る役割を持つ。加えて, イメージに対しダークレベルの補正を行い, X 線イベント候補を抽出し SXI-DE へ情報を送る。また HK 情報を SXI-S-FE から取得し, ヒータ制御の指令もここから発行する。SXI-S への電源供給も SXI-PE が担う。SXI-DE とは機上情報ネットワーク SpaceWire で接続される。SXI-PE には FPGA を搭載したデジタル基板 MIO (Mission I/O) ボードが用いられ, CCD 素子 2 つに対して 1 枚搭載される。

4.3.5 SXI-DE

MDE

SXI-DE は衛星のサイドパネルに置かれる。ここでは SXI-PE が行わない処理をソフトウェアで柔軟に行う。SpaceWire を通じて、ASTRO-H の SMU (Satellite Management Unit) や記憶装置 DR (Data Recorder) と繋がっており、SXI の衛星全体に対するインターフェースとなっている。SXI-DE は外部からのコマンドを受けテレメトリを出力する。また SXI-PE に対してデータ収集の指令を発生し、受け取った CCD 画像やイベント候補から X 線の情報を抽出する。ほかにも HK 情報や CCD の温度情報の収集、ヒータ制御に必要な演算などもここで行う。SXI-DE には CPU と FPGA を搭載する Mission-DE ボード (MDE ボード、別名 SpaceCard) が用いられ、MIO2 枚に対し MDE が 1 枚搭載される (つまり SXI で 1 枚)。

また SXI-DE が故障した際に備え、バックアップ用に MDE ボード (X-MDE) が全観測装置共用で搭載される。

地上での CCD 駆動

地上で実験を行う際には、CCD の駆動およびデータ取得を行うために、sxiDRsim と呼ばれるソフトウェアを用いて MIO ボードと通信を行う。sxiDRsim は MDE、DR、SMU 等の役割を果たし、パーソナルコンピュータ (Linux) 内に装備する。SpaceWire と Linux コンピューター間の通信のために、SpaceWire-TCP/IP プロトコル変換機 (SpWtoGbE と呼ぶ) を用いる。

4.3.6 CCD 駆動のための μ -code

SXI の駆動パターンはマイクロコードで定義する。マイクロコードは sRAM と pRAM に分けられ、sRAM では 1 行ごとにどのような処理を行うか (横転送するか縦転送するか等) を定義する。pRAM では sRAM の再生回数と、その画素がどのような pixel を持つかを表す pCODE (ピクセルコード) を定義する。ピンングする pixel 数やイメージの縦・横の全画素数、Charge Injection (4.3.7 節参照) の有無などは pRAM で指定される。SXI の駆動タイミングは 1 クロック 100 ns を最小単位とし、1pixel あたり 14.4 μ s (= ピクセルレート 69 kHz) で読み出しを行う。

4.3.7 Charge Injection

CCD はその製造過程や宇宙放射線等による損傷を受けることで内部に結晶欠損などの「トラップ」ができてしまう。すると信号電荷が転送中に「トラップ」に捕らえられ、失われてしまうため、ゲインが劣化する。さらに「トラップ」に捕らえられるかどうかは確率過程のため、失われる電荷量にばらつきが生じ、エネルギー分解能が悪化する。もし信号電荷を転送する前に、人工電荷で「トラップ」を埋めてしまえば信号電荷は失われず、ゲインもエネルギー分解能の回復する。この電荷注入法 (Charge Injection; CI) と呼ばれる方法は、*Suzaku* が世界で初めて軌道上で実現した方法で、打ち上げから 7 年経った現在も XIS が世界最高性能を維持できている理由である。電荷注入の方法としては、Dynamic current Injection (DI) 法、Diode Cut off (DC) 法、Potential Equilibration (PE) 法などがあるが、SXI では PE 法を採用する。PE 法では、図 4.5 に示すように IG1V、IG2V に定電圧を供給し (両者の電位差で電荷注入量が決まる)、ISV にパルス信号を供給することで電荷が注入する。図中の縦軸は各電極下の電位を、横軸は CCD

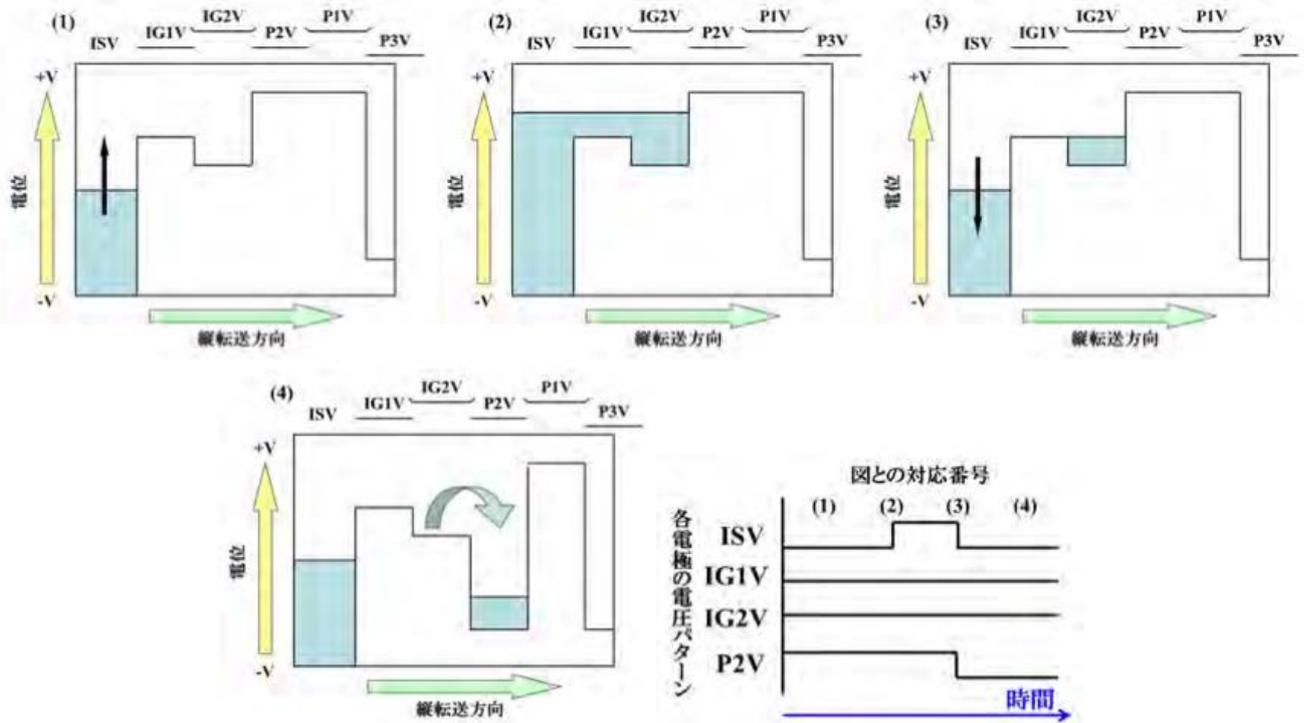


図 4.5 PE 法における電荷注入の機構と印加電圧のクロックパターン。

の転送方向を示す。まず ISV を Low にしたあと (図 4.5 (1)), ISV を High にして IG1V 電圧と IG2V 電圧によって生成されるポテンシャルの井戸に電荷を蓄積する (図 4.5 (2)). 次に再び ISV を Low にして (図 4.5 (3)), P2V を Low にすることで電荷が縦転送電極に注入される (図 4.5 (4)). 我々は SXI のエンジニアリングモデルで CI の電荷量を調整し, またその効果を検証した. 7 章で詳述する.

第5章

FPC 熱サイクル・熱衝撃試験

5.1 試験目的

SXI では CCD 素子とビデオボードの接続にマルチレイヤー FPC を採用している。過去の衛星搭載品で当初用いたマルチレイヤー FPC では、低温時にビアが断線するという障害が発生した。常温時には導通することから原因の特定が遅れ、衛星計画に重大なインパクトを与えた。最終的にその衛星搭載品ではシングルレイヤー FPC を採用した。SXI でもマルチレイヤー FPC を用いており、EM システムで実際に使用する前に、CCD の動作温度 ($\sim 120^{\circ}\text{C}$) でも、CCD カメラの保管温度の上限 (60°C) でも、問題なく使用できるか熱サイクルをかけて確かめる必要がある。

この種の試験は Qualification Test と呼ばれ、供試体に過酷な試験を課して、設計と製造の段階でミスがないか確かめるものである。そのため供試体はフライトさせることはできない。^{*1} 設計ミスだけでなく、製造段階でミスがないか調べるには、供試体の材料、製造時期、製造過程、作業者などが、FM と同じでなければならない。

そこで FM と同じ製造ロットの FPC を供試体として熱サイクル試験を行う。また熱サイクル試験よりも温度の時間変化をより厳しくした、液体窒素による熱衝撃試験も行い、問題がないことを確認する。

5.2 熱サイクル試験

5.2.1 概要

本試験は、2012 年 6 月 19 日 15:00 から 7 月 4 日 10:00 までの土日を除いた 12 日間、京都大学宇宙線研究室の実験室 (クリーンルーム外) で行った。CCD 素子の動作温度が最低 -120°C 、また CCD カメラの保管温度の上限が 60°C であるので、 10°C のマージンを取って、本試験では熱サイクルを CCD 素子の温度を -130°C から 70°C まで変化させる。サイクルの回数は、FM 品が地上試験から衛星の運用終了までに経験すると想定される熱サイクルの回数分 (40 回) かける。本試験にはウェハ上のボンディングパッドをすべて導通させた FPC 熱試験用 CCD 素子 (PchNeXT4) を用いた。図 5.1 のように、2 つの CCD 素子がキャリア ケースに納められている。図 5.2 に試験システムのブロック図を示す。キャリアケースに納められた FPC 熱試験用 CCD 素子は、銅製のサーマルリンクを通して冷凍機のコールドヘッドおよびヒーターと熱接触している。冷凍機の ON/OFF はパソコンとつないだリモジュールを用いて制御し、ヒーターの出力は温調器によって制御する。CCD 素子と接続した FPC は、もう一端のコネクタをプリン

^{*1} 実際にフライトするものに対しては Acceptance Test を行い、正しく作られているかを確かめる。過酷な試験は行わない。



図 5.1 2 つの FPC 熱試験用 CCD 素子が納められたキャリアケースと FPC

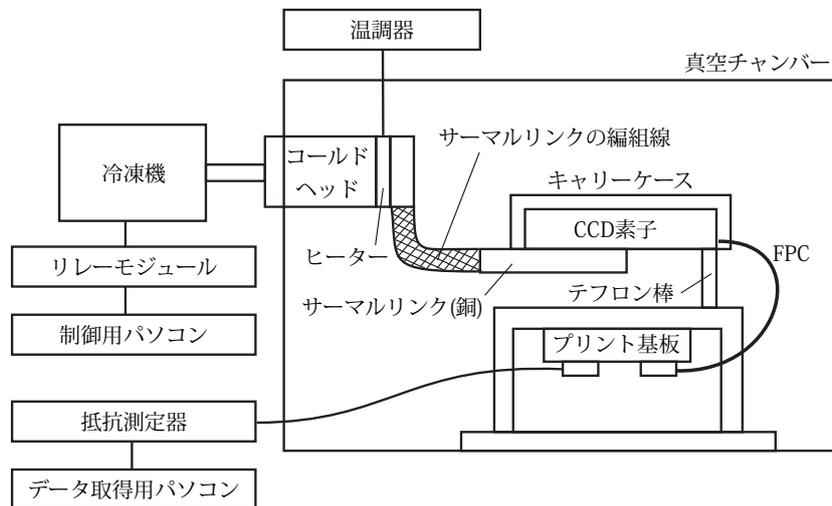


図 5.2 FPC 熱サイクル試験システムのブロック図

ト基板に接続する。プリント基板を室温程度に保つため、キャリアケースとプリント基板の間はテフロン棒で支える。熱サイクルによって FPC に断線が起きていないか確認するため、FPC のコネクタ側出力ピンの間で抵抗を常時測定する。

5.2.2 真空系と冷却系

CCD 素子を大気圧で冷却すると、空気中の水蒸気が素子表面に結露しが破損する可能性があるため、チャンバー内を真空にしてから熱サイクルを開始する。使用する真空チャンバーは、大阪真空機器製作所製の特注品である。真空ポンプは、ドライロータリーポンプ ISP-250 (ANEST IWATA) とターボ分子ポンプ TH520 (大阪真空機器製作所) を組み合わせて用いた。真空度は、常温かつチャンバーが空の状態、 1×10^{-6} Torr に到達する。チャンバー内のセットアップを終えた状態で、CCD 素子の温度が -120°C および 70°C のときの真空度はそれぞれ、 8×10^{-7} Torr, 3×10^{-6} Torr である。

CCD の冷却には、クライオミニコンプレッサー SA101 型とクライオミニパルスチューブ冷凍機 P007



図 5.3 チャンバー内部のコールドヘッド付近の様子

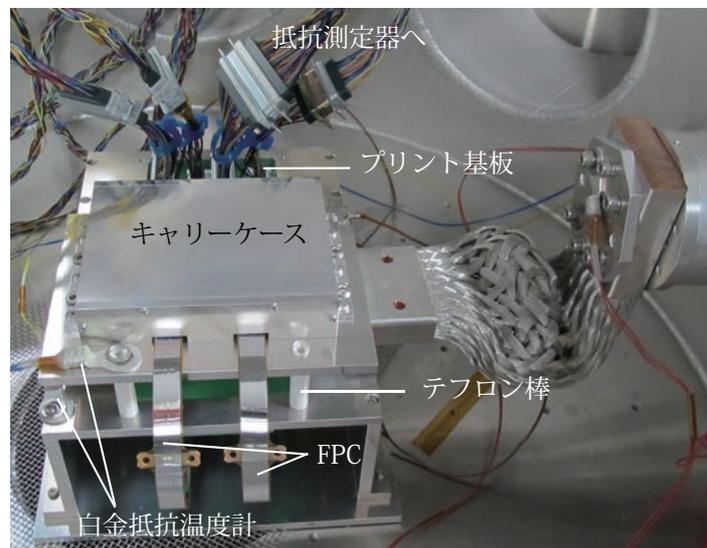


図 5.4 チャンバー内部の様子

型 (いずれも岩谷瓦斯) を用いた。真空チャンバー内に冷凍機のコールドヘッドを設置し、図 5.3 のように、CCD キャリーケースを冷却するための銅製のサーマルリンクを取り付けた。サーマルリンクとキャリーケースの間にはインジウムシートをはさんだ。放射による熱の流入を防ぐため、コールドヘッド、サーマルリンク、キャリーケースは多層断熱材 MLI (Multi Layer Insulation) で作成したラディエーションシールドで覆った。

コールドヘッド、キャリーケース、およびプリント基板の温度は、図 5.3 および図 5.4 のように白金抵抗温度計 (Pt1000) を取り付けてモニターする。一方、CCD の温度は CCD に内蔵された白金抵抗温度計を用いて測定する。

ヒーター (10Ω) はコールドヘッドを覆うように取り付け、間にインジウムシートをはさんだ。ヒーターへの電流供給には、ソリッドステートリレー G3PA-210B とサイクルコントロールユニット G32A-EM (いずれもオムロン)、および交流電源 SR500 (松定) を用いた。プログラム温度調節器 REX-P250 (理化学工業) を用いてヒーター出力を調整し、CCD の温度を制御した。温度調節器はキャリーケースに取り付けた熱電対 (図 5.3) で測定した温度をもとにヒーター制御を行う。

5.2.3 測定系

FPC の μ D-sub 51pin コネクタ (Amphenol, 100RN51P-C16M53) からの出力は, プリント基板によって D-sub 37pin と 15pin に変換する. ピン間の抵抗値は, 2 分に 1 回, 3706A 型 6 スロット・システムスイッチ DMM (KEITHLEY) (以降, DMM) を用いて測定する. また CCD の温度や白金抵抗温度計 (5.2.2 節参照) の値も, 同様に DMM を用いて同時に測定する. 表 5.1, 5.3 に, FPC の μ D-sub のピン一覧と抵抗を測定したピンの組み合わせを示す.

表 5.1, 5.3 の備考欄にあるように, 出力信号のうち OUT-A, OUT-B, OUT-C, OUT-D では, 信号線が J-FET のソース・ゲートに接続している. 図 5.5 は OUT-A, B, C, D 周辺の回路構成である. 一方, 図 5.6 に示すように, FPC やパッケージ上で結線している出力信号がある. この場合, 結線している信号線の片方がもし断線しても, もう一方の信号線が導通していれば断線を検出できない. また出力信号のうち TAPE, PACKAGE は, ボンディングバッドに接続していないため導通しておらず, 断線があっても検出できない.

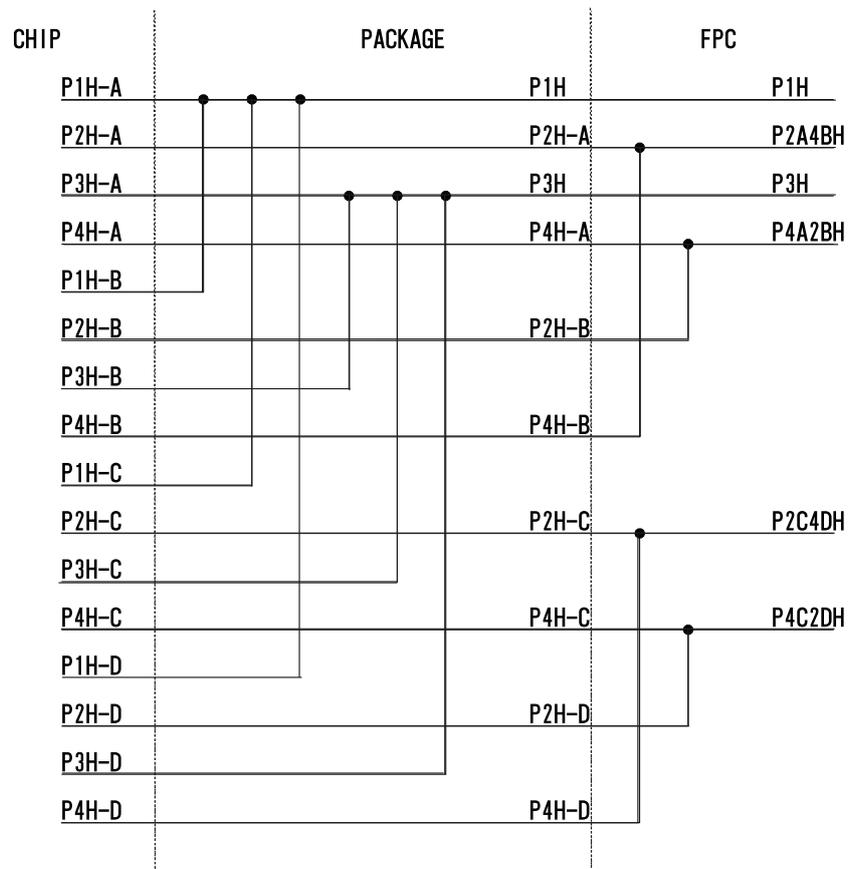


図 5.6 信号線が FPC や Package で分岐している例

表 5.1 抵抗を測定したピンの組み合わせ (1/2)

μD-sub PIN NO.	Symbol	組み合わせ ¹	備考 ²	抵抗値 [Ω] ³			ビア数 ⁴
				FPC-1	FPC-2	コネクタ側 ボンディングパッド側	
1	VBB	多数	Package で結線	—	—	0	0
2	GND	VBB	47 kΩ × 4 の並列	117560	117550	40 (並列 ⁵)	17 (並列 ⁵)
3	P1VS	VBB	Package で結線	4.6	4.9	0	1
4	TH+	TH-	白金抵抗温度計 (Pt1000)	1091	1094	1	0
5	P2VS	VBB	Package で結線	4.5	4.0	0	1
6	OD-B	VBB	J-FET	4.6	4.7	1	0
7	OUT-B	VBB	SS, MESH, RTN-D と混線 (Package で結線)	67.0	67.6	0	0
8	RTN-B	VBB		5.5	6.2	1	0
9	OG-B	VBB		4.9	4.6	1	0
10	RD-B	VBB		4.6	4.7	0	0
11	P4A2BH	ISV	FPC で結線	4.3	4.4	0	2
12	OG-A	ISV		4.3	4.9	1	0
13	P2A4BH	ISV	FPC で結線	4.5	4.4	0	2
14	RG-A	ISV		5.2	5.4	1	1
15	P1H	ISV	Package で結線	4.1	4.9	0	1
16	RD-A	ISV		4.9	4.8	0	0
17	OUT-A	ISV	J-FET	68.0	70.9	0	0
18	OD-A	ISV		4.6	5.0	0	0
19	VGR	VBB	Package で結線	4.5	4.0	1	0
20	SS	VBB	Package で結線	4.5	3.8	1	0
21	IG1V	VBB	Package で結線	4.7	3.7	1	1
22	P1IV	VBB	Package で結線	4.4	3.9	1	1
23	TH+	TH-	白金抵抗温度計 (Pt1000)	1091	1094	1	0
24	P2VI	VBB	Package で結線	4.5	4.6	1	1
25	RTN-C	VBB	SS, MESH, RTN-A, RTN-B, RTN-D と混線 (Package で結線)				

¹ 組み合わせで抵抗値測定をした出力ピン。例えば、2 GND は 1 VBB との間で抵抗を測定した。

² 備考欄詳細;

結線: Package あるいは FPC において 2 つ以上の信号線が結合している。

混線: お互いの信号線が導通している。

J-FET: J-FET のソース・ゲートを通して導通している。

47 k : 47 k の抵抗を通して導通している。測定不可: 導通していない。

³ 常温での値。

⁴ FPC に含まれるビアの数。

⁵ ビアが並列に位置する。

表 5.3 抵抗を測定したピンの組み合わせ (2/2)

μD-sub PIN NO.	Symbol	組み合わせ ¹	備考 ²	抵抗値 [Ω] ³		コネクタ側	ビア数 ⁴
				FPC-1	FPC-2		
26	RG-B	VBB		5.0	4.7	1	1
27	RG-C	VBB		5.0	5.2	1	1
28	SG-B	ISV		5.1	5.4	1	1
29	SG-C	ISV		5.2	5.3	1	1
30	SG-A	ISV		5.2	5.3	1	1
31	SG-D	ISV		5.2	5.3	1	1
32	RTN-A	ISV	SS, MESH, RTN-A, RTN-B, RTN-C, RTN-D と混線 (Package で結線)	5.4	6.1	1	0
33	OD-D	ISV		4.6	4.8	1	0
34	TAPE	ISV	測定不可	Overflow	Overflow	1	0
35	MESH	ISV	SS, RTN-A, RTN-B, RTN-C, RTN-D と混線 (Package で結線)	3.2	3.3	0	6 (並列 ⁵)
36	ISV	多数	Package で結線	-	-	0	1
37	IG2V	ISV	Package で結線	4.7	4.6	0	1
38	TG	多数	Package で結線	-	-	0	1
39	OUT-C	TG	J-FET	69.5	70.3	0	0
40	OD-C	TG		5.2	5.3	1	0
41	RD-C	TG		5.1	5.2	0	0
42	P2C4DH	TG	FPC で結線	4.8	4.8	0	0
43	OG-C	TG		5.0	5.2	1	0
44	P4C2DH	TG	FPC で結線	4.7	5.0	0	2
45	OG-D	TG		4.9	5.3	1	0
46	P3H	TG	Package で結線	4.7	4.7	0	1
47	RD-D	TG		5.1	5.2	1	0
48	RTN-D	TG	SS, MESH, RTN-A, RTN-B, RTN-C と混線 (Package で結線)	6.1	6.4	1	0
49	OUT-D	TG	J-FET	66.3	69.3	0	0
50	RG-D	TG		5.7	5.8	1	1
51	PACKAGE	TG	測定不可	Overflow	Overflow	0	0

¹ 組み合わせで抵抗値測定をした出力ピン。例えば、2 GND は 1 VBB との間で抵抗を測定した。

² 備考欄詳細;

結線:Package あるいは FPC において 2 つ以上の信号線が結合している。

混線:お互いの信号線が導通している。

J-FET:J-FET のソース・ゲートを通して導通している。

47 k : 47 k の抵抗を通して導通している。測定不可:導通していない。

³ 常温での値。

⁴ FPC に含まれるビアの数。

⁵ ビアが並列に位置する。

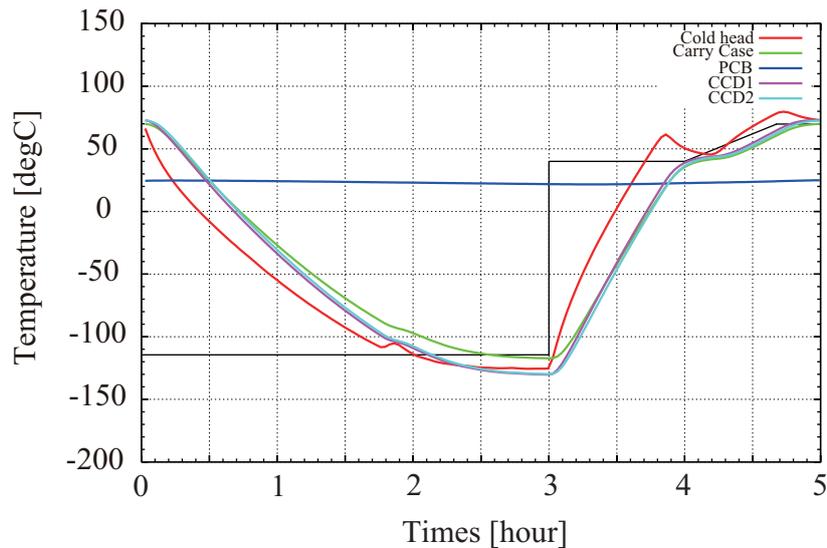


図 5.7 1 サイクル中の温度変化. 黒色の実線は温調器の設定温度. 赤色, 緑色, 青色の実線はそれぞれ, 白金抵抗温度計で測定したコールドヘッド, CCD のキャリーケース, プリント基板の温度. ピンク色と水色の 実線はそれぞれ, 内蔵された白金抵抗温度計で測定した CCD1 系および 2 系の温度.

5.2.4 熱サイクルの設定とデータ取得

図 5.7 の黒色の実線は温調器の設定温度である. はじめの 3 時間は -115°C , 続く 2 時間は 40°C , その後 40 分かけて設定温度を 70°C まで徐々に上げ, 20 分間は 70°C に設定した. また Super4 USB Relay module (tctec) を用いてコンプレッサーを制御し, 3 時間運転したのち 2 時間停止するように設定した. その結果, CCD の温度は 3 時間で -130°C に, 2 時間で 70°C に到達した (図 5.7 のピンク色と水色の実線). 図 5.7 に 1 サイクル中の各温度計の測定値を示す.

FPC の μ D-sub 51pin コネクタ (Amphenol, 100RN51P-C16M53) からの出力をは, プリント基板によって D-sub 37pin と 15pin に変換し, 熱サイクル中は 12–13 秒に一回, 抵抗値を 3706A 型 6 スロット・システムスイッチ DMM (KEITHLEY) を用いて測定し, FPC に断線が起きていないか確認する.

5.2.5 試験中の熱サイクル

図 5.8 は全試験期間中の各温度計の測定値である. 6 月 19 日 15 時より 1 サイクル目を開始した. 21 日の 20 時頃測定系のケーブルに接触不良が見つかったため (後述), 熱サイクルを 11 サイクル目の昇温の途中で停止させ, データ取得も停止した. 修復したのち, 25 日の 9 時より 12 サイクル目を開始した. 同日 11 時から 14 時 40 分まで, DMM からパソコンへのデータ取得が停止してしましたが, その間も熱サイクルは続いていた. 26 日 0 時から 14 サイクル目が始まる予定であったが, 冷凍機が運転しなかった. 同日 8 時に運転を開始した. 6 月 30 日と 7 月 1 日は週末のため熱サイクルを停止した (データ取得は継続). 2 日 9 時より再開し, 4 日 5 時に 40 サイクルに到達した. 11 サイクル目が途中で終わってしまっていたため, 41 サイクル目まで続けることにし, 同日 10 時に試験を終了した.

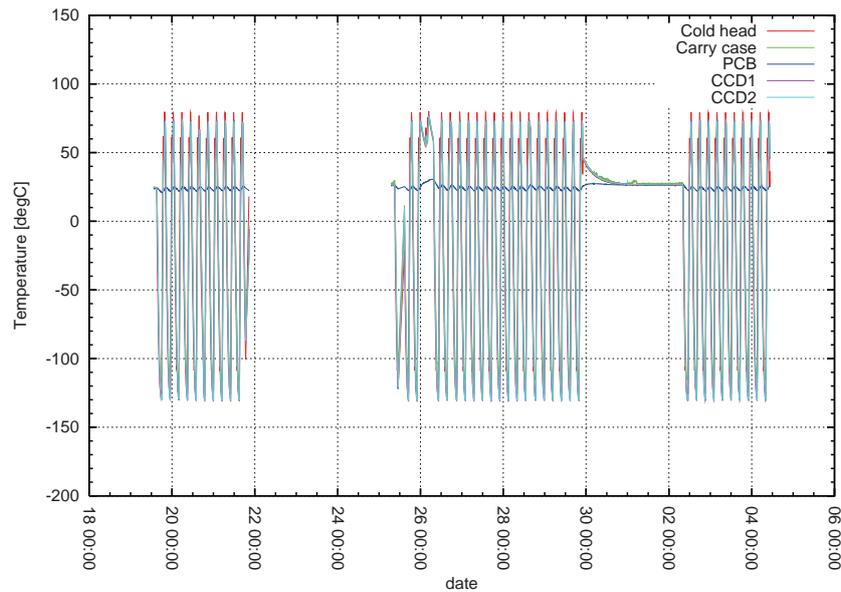


図 5.8 全試験期間における温度変化. 横軸は日にちと時刻. 赤色, 緑色, 青色の実線はそれぞれ, 白金抵抗温度計で測定したコールドヘッド, CCD のキャリアケース, プリント基板の温度. ピンク色と水色の実線はそれぞれ, 内蔵された白金抵抗温度計で測定した CCD1 系および 2 系の温度.

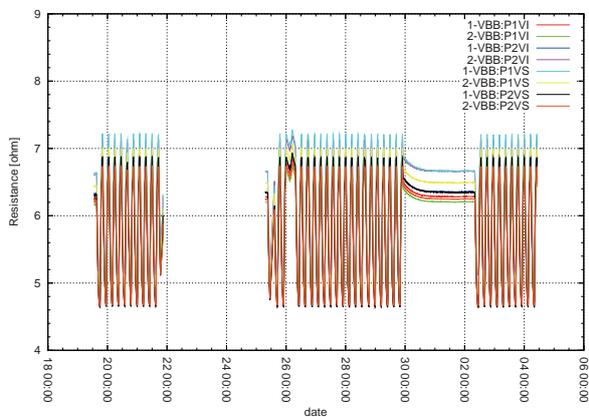
5.2.6 試験結果

図 5.9 に全試験期間中の抵抗測定値を示す. 横軸は日にちと時刻である. 凡例は抵抗を測定したピンの組み合わせで, FPC-1 と FPC-2 のそれぞれの結果を「1-」および「2-」で区別している. 試験を通して FPC に断線はなかった. 図 5.9(d), 5.9(h), 5.9(j) において, 19 日から 21 日までの抵抗値がやや大きいものがある. これは供試体側の抵抗値そのものであるのか測定装置側の異常であるか, 当初は分からなかった. しかし FPC-1 側の大気中の配線ケーブルを手で軽く動かすと抵抗値が変化したことから測定装置側の問題である. さらにテスターで調べると, DMM につないでいる FPC-1 側の 104 ピンのコネクタを通る前の (D-sub コネクタの) 出力は正常な抵抗値であるのに対し, 104 ピンのコネクタを通った後は異常な値となることが分かった. この 104 ピンのコネクタは DMM の製造元である KEITHLEY 社独自の仕様で, ハンダ付けでコネクタピンと配線を接続する. ハンダ付けの不良で抵抗値の異常が出ていた可能性がある. 実際ハンダ付けをやり直したところ, 正常な抵抗値に戻った. 図 5.9(n) の TAPE と PACKAGE は, ボンディングパッドに接続していないため絶縁している. DMM の仕様で, Overflow すると測定値が $9.9 \times 10^{37} \Omega$ となる. 熱サイクル試験終了後, FPC 試験用 CCD を真空チャンバーから取り出し, FPC を目視でチェックしたが, 試験前と変化は見られなかった. 図 5.10 は試験前の, 図 5.11 は試験後の FPC の写真である.

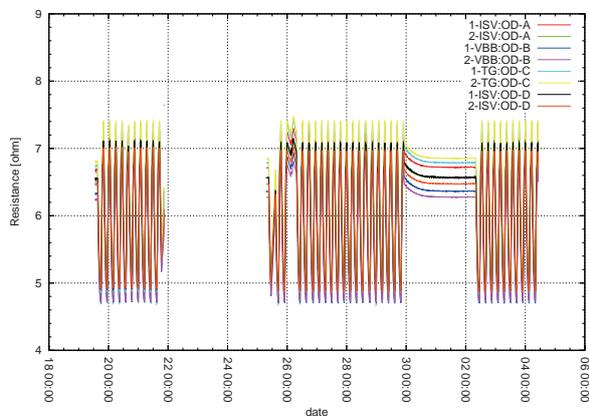
5.3 液体窒素による熱衝撃試験

5.3.1 概要

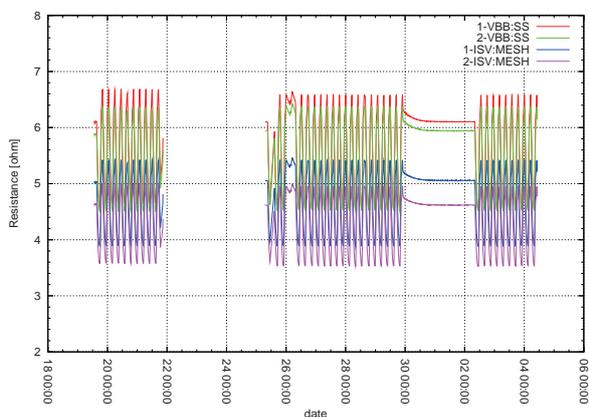
本試験には, 図 5.12 のような FPC (単体) を用い, 図 5.13 のように, ボンディングパッドに金属棒をハンダ付けして導通させた. FPC を液体窒素に浸し大気中に取り出すというサイクルを 50 回かけた. 本試



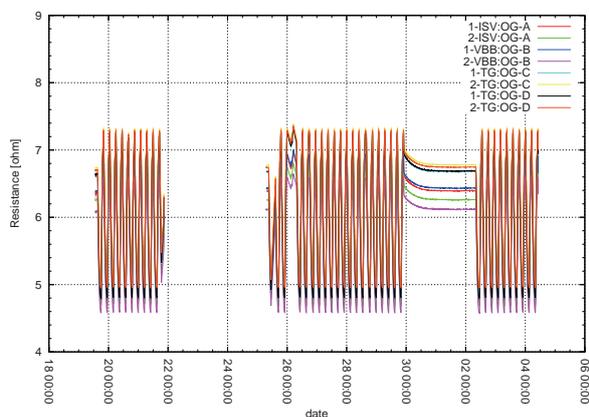
(a) 抵抗測定結果 1



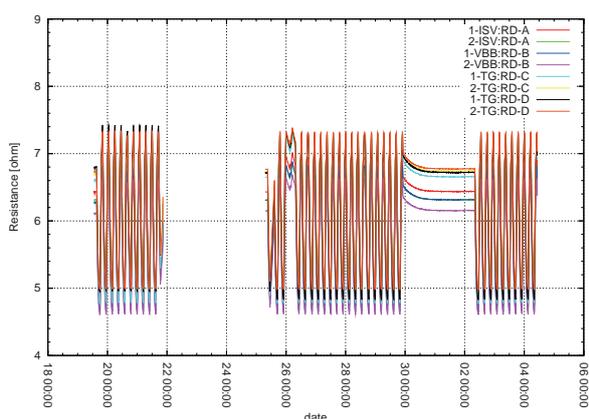
(b) 抵抗測定結果 2



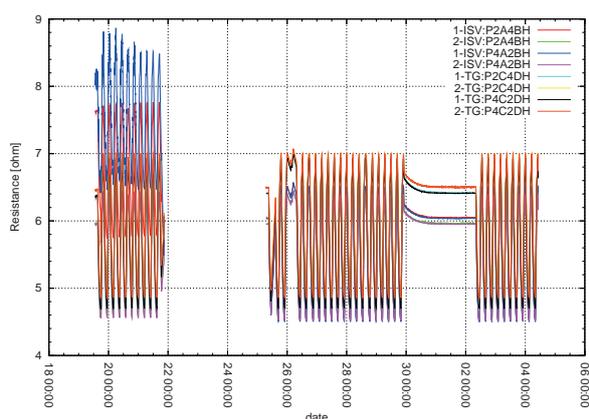
(c) 抵抗測定結果 3



(d) 抵抗測定結果 4

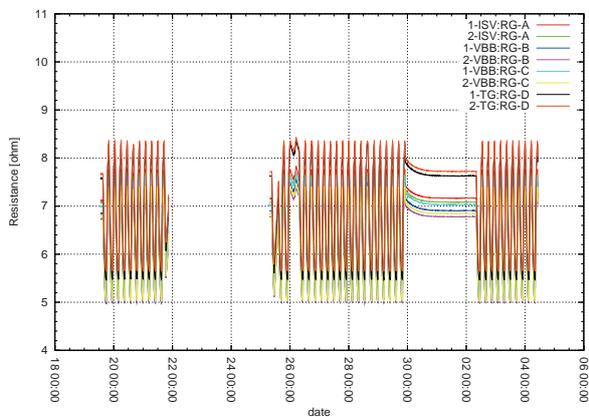


(e) 抵抗測定結果 5

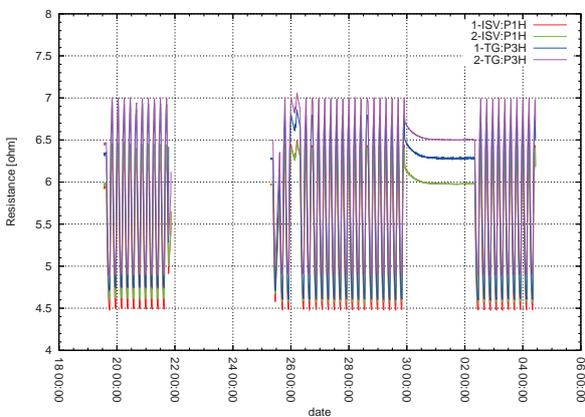


(f) 抵抗測定結果 6

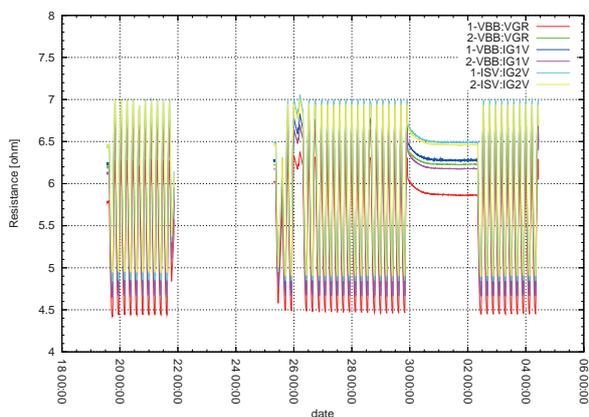
図 5.9 FPC 熱サイクル試験における抵抗測定結果



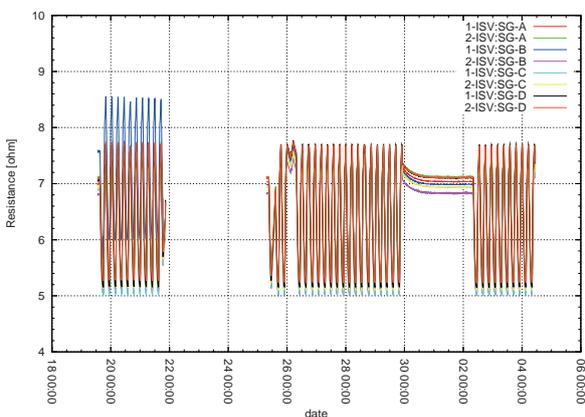
(g) 抵抗測定結果 7



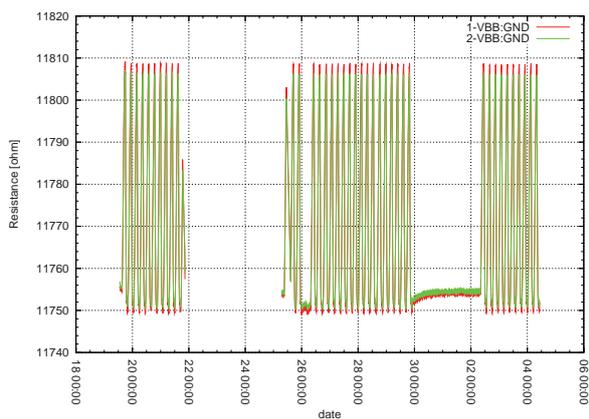
(h) 抵抗測定結果 8



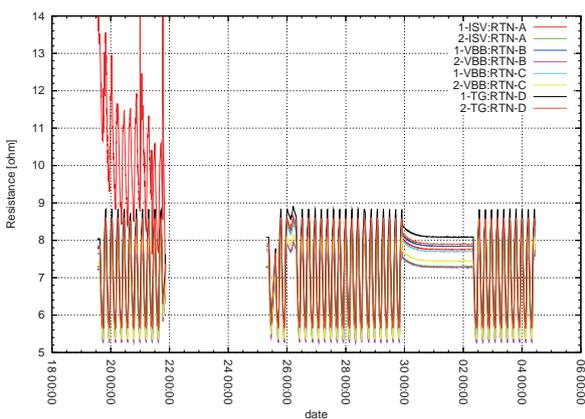
(i) 抵抗測定結果 9



(j) 抵抗測定結果 10

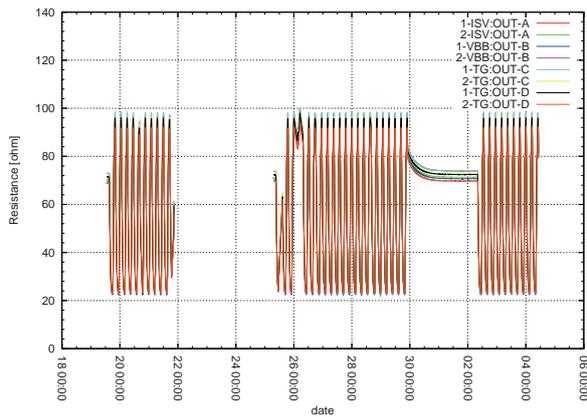


(k) 抵抗測定結果 11

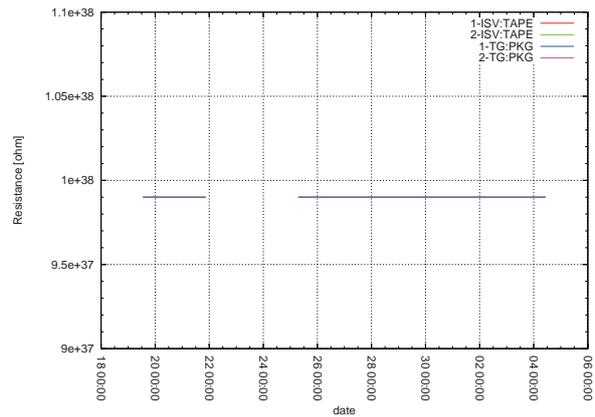


(l) 抵抗測定結果 12

図 5.9 つづき



(m) 抵抗測定結果 13



(n) 抵抗測定結果 14

図 5.9 つづき

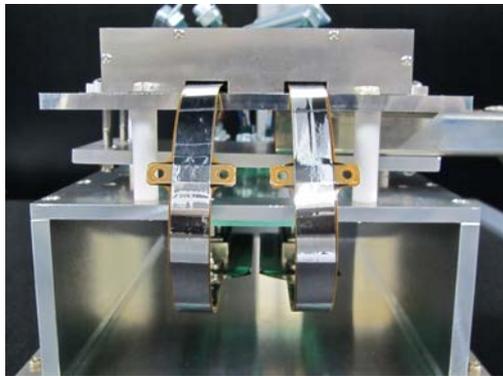


図 5.10 試験前の FPC

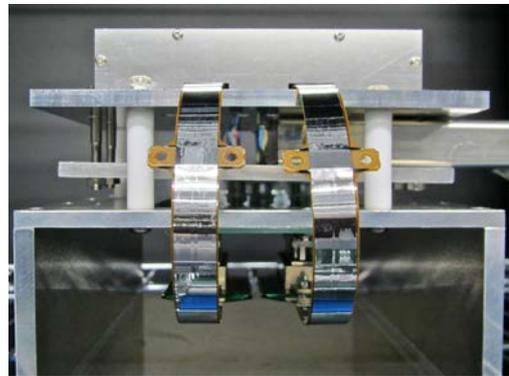


図 5.11 試験後の FPC



図 5.12 熱衝撃試験に用いた FPC

験は、2012 年 7 月 5 日に京都大学宇宙線研究室の実験室（クリーンルーム外）で行った。図 5.14 に試験システムの写真を示す。FPC のボンディングパッドから中央補強板部までを液体窒素に浸し、窒素の泡が出なくなるまで待ってから取り出し、霜が消えるようにドライヤーで温める、というサイクルを 50 回行う。大気中に取り出すたびに、ボンディングパッド部分に異常がないか目視確認し撮影も行う。試験中は常時コネクタ側の出力ピン間の抵抗を測り、断線が起きていないか確認する。FPC の μ D-sub 51pin コネクタ (Amphenol, 100RN51P- C16M53) からの出力は、プリント基板によって D-sub 37pin と 15pin に変換し、12–13 秒に一回、抵抗値を DMM を用いて測定する。FPC のの抵抗を測定した μ D-sub のピンの組み合わせは熱サイクル試験時と同じである (表 5.1, FPC ピン一覧 2 参照)。

5.3.2 試験中の熱衝撃サイクル

各サイクルにおいて、FPC を液体窒素に浸していた時間を大気中に取り出していた時間を表 5.5 に示す。表面の霜を解かしてボンディングパッドの状態が確認するため、23 回目および 50 回目に大気中に取り

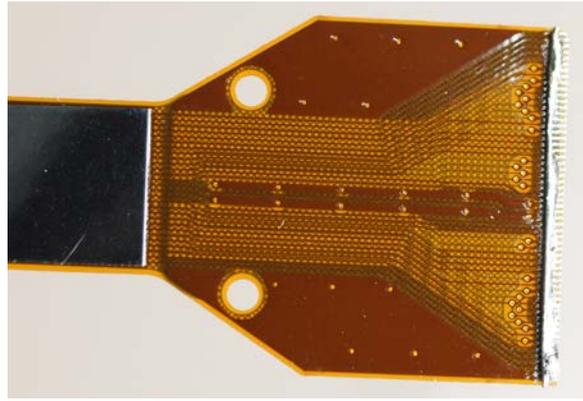


図 5.13 ボンディングパッドに金属棒をハンダ付けした様子

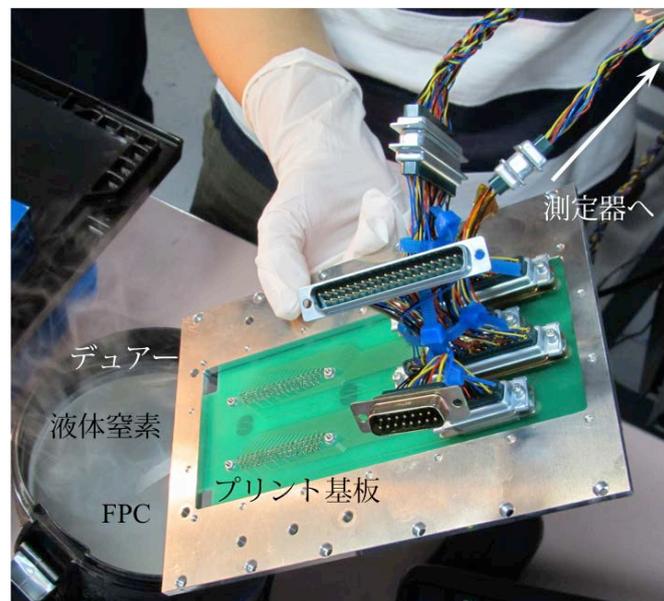


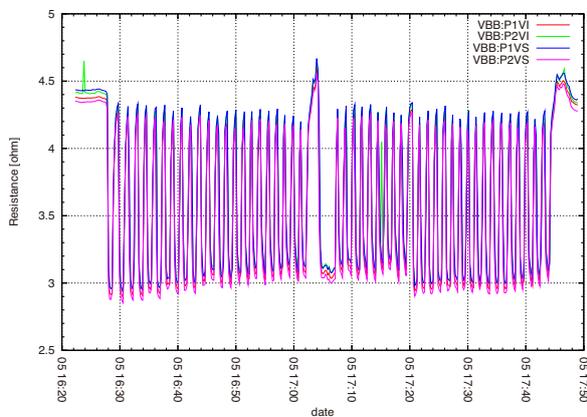
図 5.14 FPC を液体窒素に浸けている様子

り出した際にドライヤーを当てた。

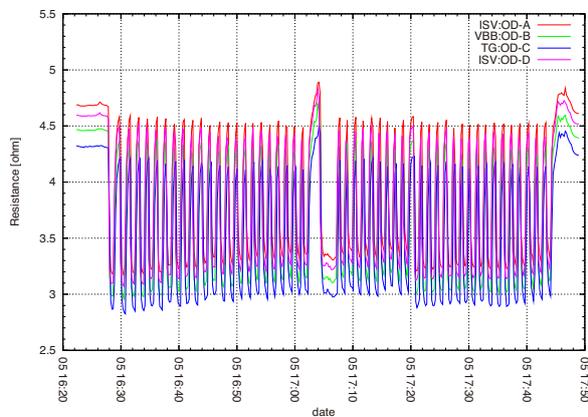
5.3.3 試験結果

図 5.15 に試験中の抵抗測定値を示す。横軸は日にちと時刻である。凡例は抵抗を測定したピンの組み合わせで、CCD1 系と 2 系それぞれの結果を「1-」および「2-」で区別している。23 サイクル目と 24 サイクル目の間でドライヤーを当てたので、抵抗値がほかよりやや高くなっている。図 5.15(m) の ISV:TAPE は、TAPE が導通していないため絶縁している。DMM の抵抗値測定範囲は $1.2 \times 10^8 \Omega$ までで、Overflow すると測定値が $9.9 \times 10^{37} \Omega$ となる。しかしドライヤーを当てたとき (23 回目と 24 回目の間、試験終了後) に、一時的に $\sim 10^7 \Omega$ となった。いずれも大気中に取り出している際の測定値であるため、FPC を冷却することで生じた問題ではないと考えられる。

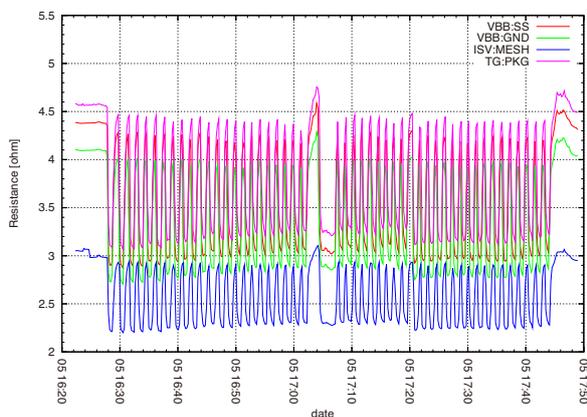
FPC を大気中に取り出すたびに目視でチェックを行ったが、変化はなかった。試験終了後、霜が解けてから FPC を目視でチェックしたが、試験前と変化は見られなかった。図 5.16、図 5.17 の写真はそれぞれ、試験後の FPC (表裏) とボンディングパッド部分 (表裏) を拡大したものである。



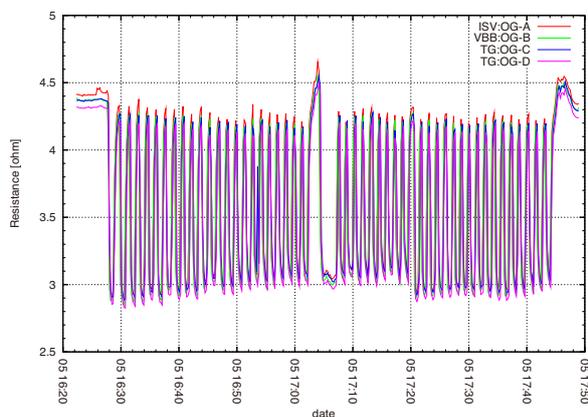
(a) 抵抗測定結果 1



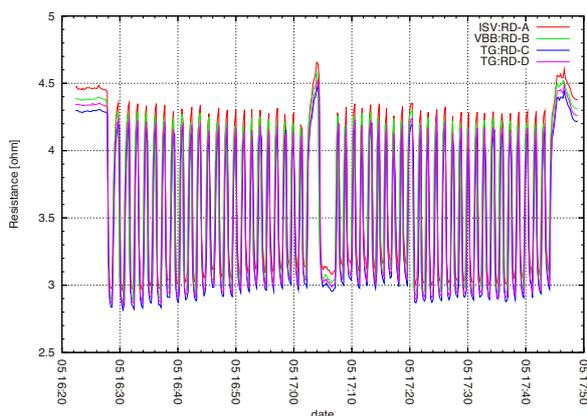
(b) 抵抗測定結果 2



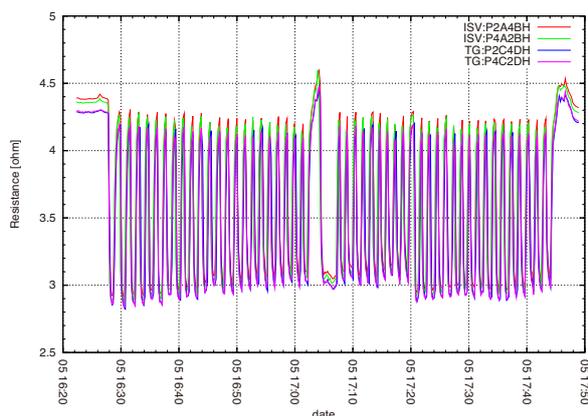
(c) 抵抗測定結果 3



(d) 抵抗測定結果 4

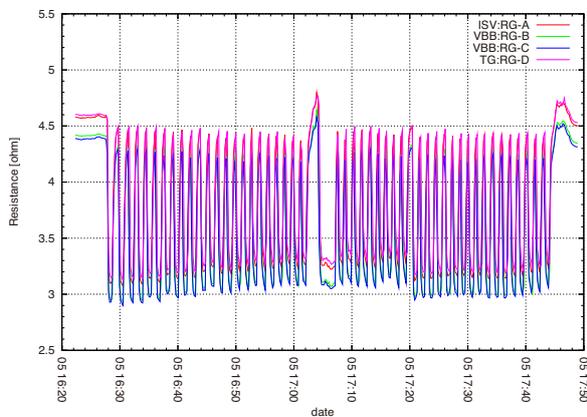


(e) 抵抗測定結果 5

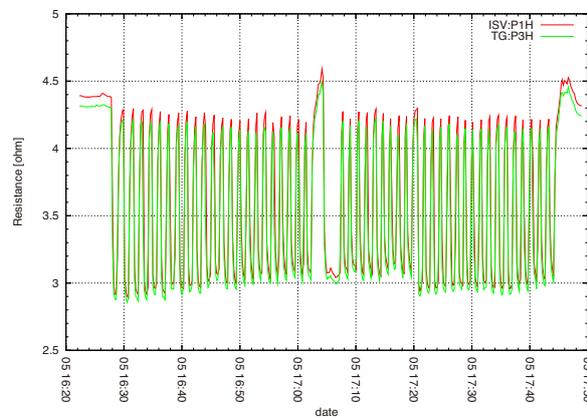


(f) 抵抗測定結果 6

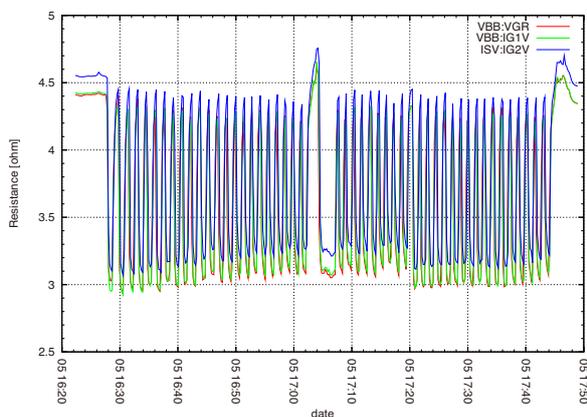
図 5.15 FPC 熱サイクル試験における抵抗測定結果



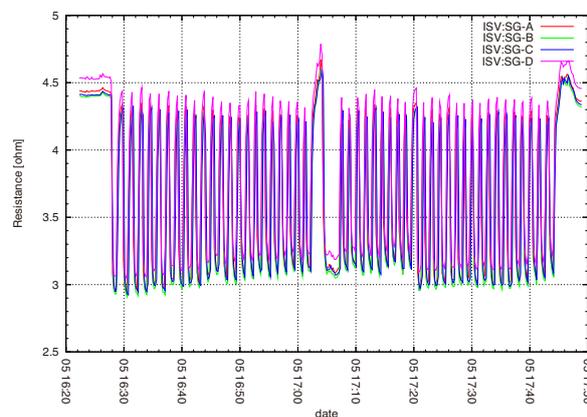
(g) 抵抗測定結果 7



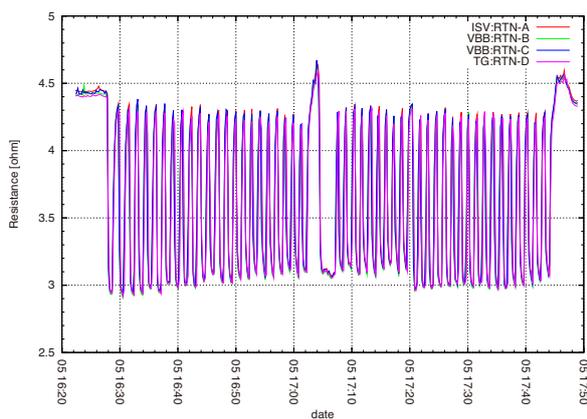
(h) 抵抗測定結果 8



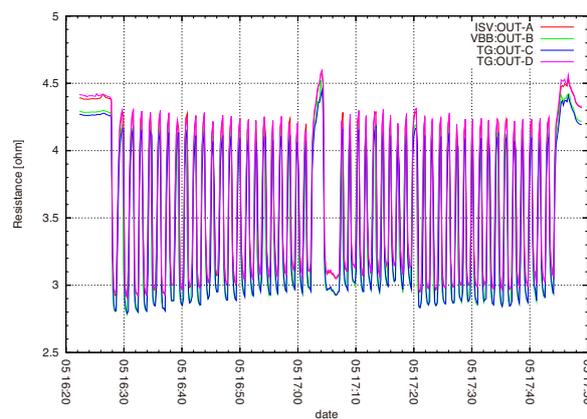
(i) 抵抗測定結果 9



(j) 抵抗測定結果 10



(k) 抵抗測定結果 11

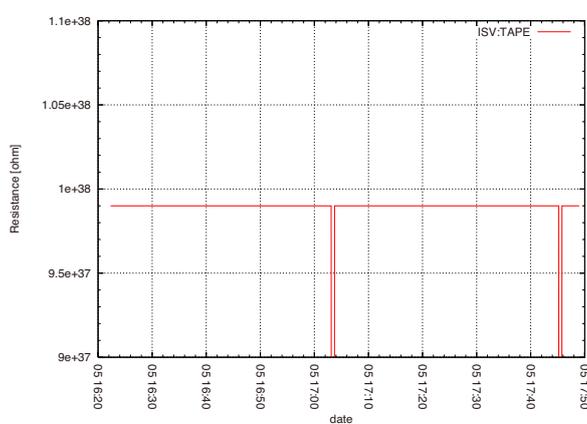


(l) 抵抗測定結果 12

図 5.15 つづき

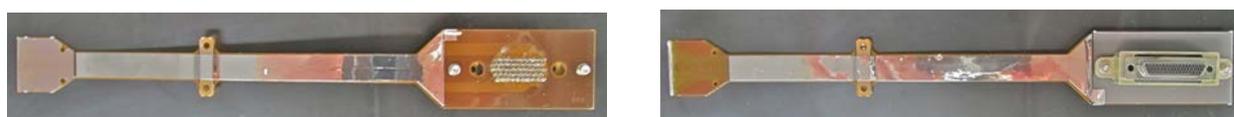
表 5.5 各サイクルにおいて FPC を液体窒素に浸けていた時間と大気中に取り出していた時間

サイクル	液体窒素に浸していた時間 (秒)	大気中に取り出していた時間 (秒)
1 回目	50	70
33 回目	50	60
2 回目	50	55
3, 5, 10, 12 回目	50	45
4, 6, 7-9, 11, 13-15, 17, 26, 28, 37, 43, 44, 47, 48 回目	50	40
18-21, 35, 36, 41, 42, 45, 46, 49 回目	50	35
17, 22, 25, 27, 29-32, 34, 38-40 回目	50	30
23 回目	50	130
24 回目	170	30
50 回目	50	—



(m) 抵抗測定結果 13

図 5.15 つづき



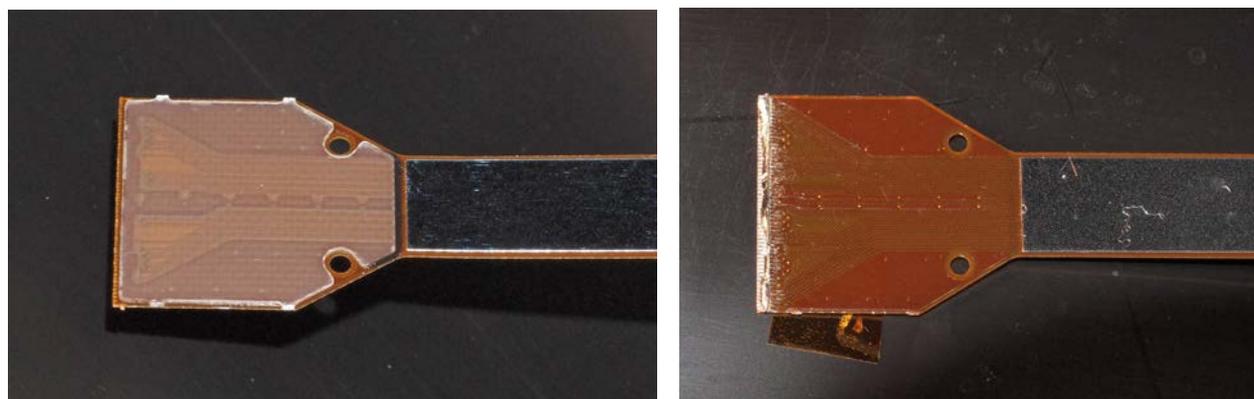
(a) 表

(b) 裏

図 5.16 試験終了後の FPC の様子. (a) 表, (b) 裏.

5.4 FPC 試験のまとめ

SXI に使用する CCD 素子の FPC に対する熱サイクル試験および液体窒素による熱衝撃試験を行った結果、FPC の断線は確認されなかった。またいずれの試験も、試験中および試験終了後に FPC の目視によるチェックを行ったが、変化は見られなかった。したがって、本 FPC は熱サイクル・熱衝撃に対し SXI に使用する上で十分な信頼性を持っていると考えられる。



(a) 表

(b) 裏

図 5.17 試験終了後の FPC の様子. ボンディングパッド部分を拡大. (a) 表, (b) 裏.

第 6 章

エンジニアリングモデルによる性能評価

本章では SXI の EM システムの性能を調査する。まず、基本性能として、読み出し回路におけるノイズと EM 素子自体の暗電流由来のノイズ、および電荷転送非効率 (CTE) を測定する。また、軌道上では CCD 素子に Charge Injection(CI) を施す (4.3.7 節)。電荷注入のための駆動電圧設定は CCD 毎に個性があるため、まず適切な値を調査する。また、CI の有無で、どのような性能の違いがあるかを測定する。さらに取得したデータの解析において、エネルギー分解能と検出効率を最大化するために threshold の最適化を行う。

6.1 システム概要

実験は 2012 年 5 月から 8 月にかけて、京都大学宇宙線研究室内クリーンルームで行った。システムの外観を図 6.1 に示す。図 6.1 の右端にある真空ポンプから真空配管が BBM のカメラボディ (SXI-S-BDY) につながっている。カメラボディ周辺を図 6.2 に示す。

真空ポンプには PFEIFFER VACUUM の排気システム TSH071 を用いた。これはターボ分子ポンプとダイアフラムポンプを組み合わせたユニットである。真空ゲージで測定した真空度は常時パソコンに取り入れて記録する (図 6.2)。カメラボディには、4 つの CCD 素子 (2 つは EM 品 (EM03), 残り 2 つは撮像能力のないダミー品) とビデオボード (駆動している CCD は 2 素子なので 1 枚) が入っている。他機関において 2 素子を用いた BBM システムは試験が行われてきたが、4 素子を用いて EM システムを構築したのは本研究が初めてである。またビデオボードをカメラボディ内に入れた状態での性能評価も本研究が初めてである。

CCD 素子は機械式冷凍機 SRS-2110 (住友重機械工業) を用いて冷却する。この冷凍機は出力電圧を調節することで、任意の温度に制御できる。冷凍機の放熱部を冷やすため、隣にファンを置いた (図 6.1, 図 6.2)。

カメラボディのカバーは GSE(Ground Support Equipment) であり、V100 フランジが取り付けられるようになっている。ここに Be 窓を取り付けて線源を外から当てることができる。V100 フランジの中心軸方向は、4 素子の撮像領域全体のほぼ中央で CCD 受光面と直交する (図 6.3)。

ビデオボード、ドライバーボード、MIO ボードは BBM 品である。MIO ボードは 4.3.5 節で述べたように、地上実験においては SpWtoGbE を通して、LAN ケーブルでコンピューターと通信し、sxiDRsim と呼ばれるソフトウェアを用いて CCD の駆動およびデータ取得を行う。本実験に用いたビデオボードに搭載されている video FPGA のロジックでは、信号電圧を 0-4095 channel に振り分ける際に、4095 channel に対応する電圧を超える信号の場合は、4095 channel ではなく、4095 で割った余りが出力される仕様に

表 6.1 EM システムにおける使用機器

	CCD	ビデオボード	ドライバーボード
1 系	EM03-03 (CM2-2-13-CP01-1)	Video Board-BBM2 (SN=1)	BBM2/Master (SN=10)
2 系	EM03-01 (CM2-1-04-CP01-1)	Video Board-BBM2 (SN=2)	BBM2/Slave (SN=11)

なっている（回り込み）。本試験の設定では、ゲインが ~ 6 eV/ch であるので、24 keV 以上に相当する波高値を持つイベントでは回り込みが起こる。使用する X 線のエネルギーは 5.90 (Mn $K\alpha$), 6.49 keV (Mn $K\beta$) であるので、対象とする X 線イベントについては回り込みの影響はない。

エレクトロニクス系の電源と真空系の電源は、電源ラインからノイズが混入しないよう、AC100V のコンセントからノイズカットトランスを介して供給した。また真空系からのノイズがエレクトロニクスにならないよう、真空系のグラウンドはエレクトロニクス系のグラウンドから分離させた。

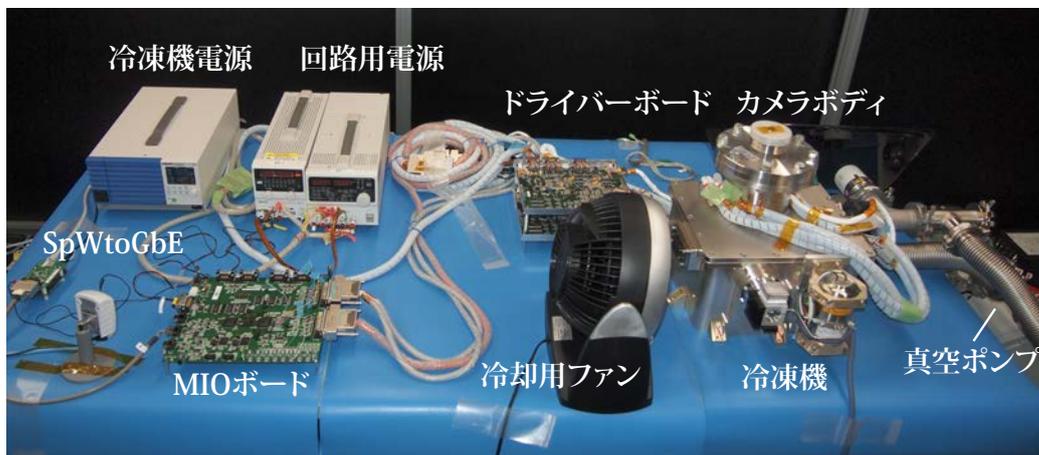


図 6.1 SXI のエンジニアリングモデルシステムの外観

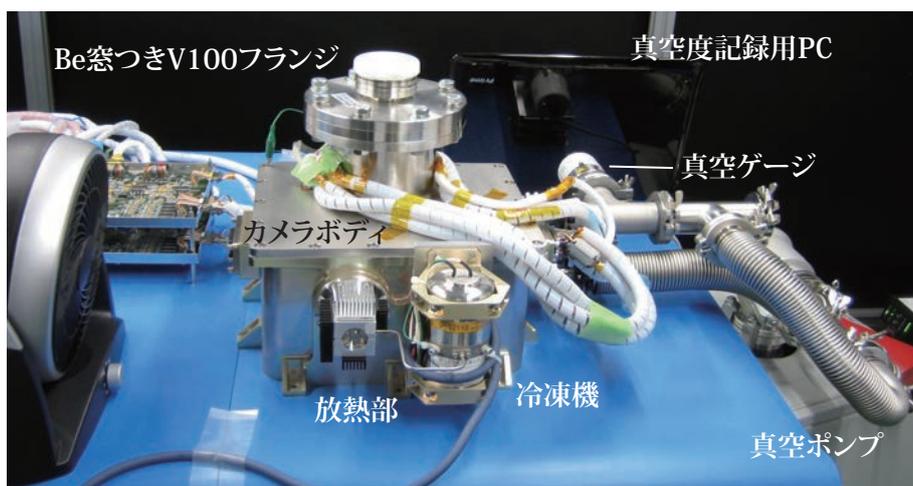


図 6.2 カメラボディ周辺



図 6.3 カメラボディ上部の V100 フランジを開けたところ。CCD 素子が 4 枚見える (素子の OBL(アルミ蒸着) に実験室の天井が映っている)。

表 6.2 SXI の EM システムにおけるデータ諸元

	データ取得日	測定時間 (Frame 数)	CCD 温度
CI あり	2012 年 8 月 9 日	90 分間 (4860 フレーム)	-120 度
CI なし	2012 年 8 月 9 日	90 分間 (4860 フレーム)	-120 度

6.2 EM システムの基本性能

CCD 素子にカメラボディ上部の Be 窓から ^{55}Fe を照射して 90 分間撮像を行った (表 6.2)。Charge Injection は行っていない。CCD 素子の出力ノードは B と D を用いた。また 2 系統の ASIC で平均化を行った (4.3.2)。以下では Event threshold は (upper も bottom も) 30 ch に、Split threshold は 18 ch にして X 線イベントを抽出し、評価しやすくするため、Grade 0 のみ解析を行った。Hot pixel は除いている。

まず CCD の電荷転送非効率 (CTI) を調べるため、スタッキングプロットを作成した (図 6.4)。スタッキングプロットとは水平方向に対して各ラインの信号を重ねてプロットしたもので、横軸が縦転送回数、縦軸が波高値となる。理想的な CCD では $\text{CTI} = 0$ なので、縦転送回数に関係なく、信号の高さは同じになる。実際の CTI は 0 より大きいので、縦転送回数が増えるほど信号の高さは徐々に低くなる。初めの信号の高さから最後尾の信号の高さを引くと、転送回数 $\times \text{CTI}$ となる。また CCD1 系の segment CD では RAW-Y \sim 200 から図 6.4 ではそれぞれの segment で PH \sim 1000 と PH \sim 1100 に信号が見えるが、これらはそれぞれ Mn $K\alpha$ と $K\beta$ によるものである。Mn $K\alpha$ の信号の高さの傾きから CTI を求めると、 $\sim 4 \times 10^{-5}$ 転送回数 $^{-1}$ となる。CCD1 系の segment CD のスタッキングプロットでは RAW-Y \sim 200 から信号がテールを引いている。図 6.9 で、CCD1 系の segment CD のフレームイメージを見てみると、RAW-X=80-130, RAW-Y=200-240 に輝点が見えており、これが原因になっていると考えられる。

さらに、読み出し口に近い領域と遠い領域 (図 6.9 の黄色四角領域と、緑色四角領域) のスペクトルを取

得した。図 6.5, 6.6 にそれぞれ CCD2 系の segment AB と CD のスペクトルを示す。4.3.2 節で述べたように各 segment からの出力は 2 個の ADC (even-ADC と odd-ADC) で独立かつ同時に処理する。そのため偶数行目 (even) と奇数行目 (odd) でゲインが異なる。そこでここでは even と odd のスペクトルは別々に解析する。図 6.5, 6.6 から分かるように、同じ segment でも読み出し口に近い領域より遠い領域のほうが、輝線中心チャンネルは小さくなり、輝線の幅も広がっている。読み出し口に近い領域と遠い領域からそれぞれ取得した Mn $K\alpha$ 輝線のスペクトルを 1 つのガウシアンでフェッティングし、エネルギー分解能、ゲインを求めた。結果を表 6.4 に示す。CTI が大きいためにエネルギー分解能が読み出し口に遠いところでひどく劣化していることがわかる。CCD1 系と同様に CTI を求めると、 $\sim 1 \times 10^{-5}$ 転送回数⁻¹ となる。読み出しノイズ、縦転送ノイズは、表 6.3 に示すように読み出し口に遠い/近いで差はなかった。暗電流に関しては、どの segment, どの領域においても [有効画素領域の 0 ピークの中心チャンネル] - [VOC の 0 ピークの中心チャンネル] < 1ch であり、ゲインを 6 [eV/ch] とすると暗電流は < 1 e⁻ である。したがってノイズとして評価する暗電流のゆらぎも < 1 e⁻ と考えられる。

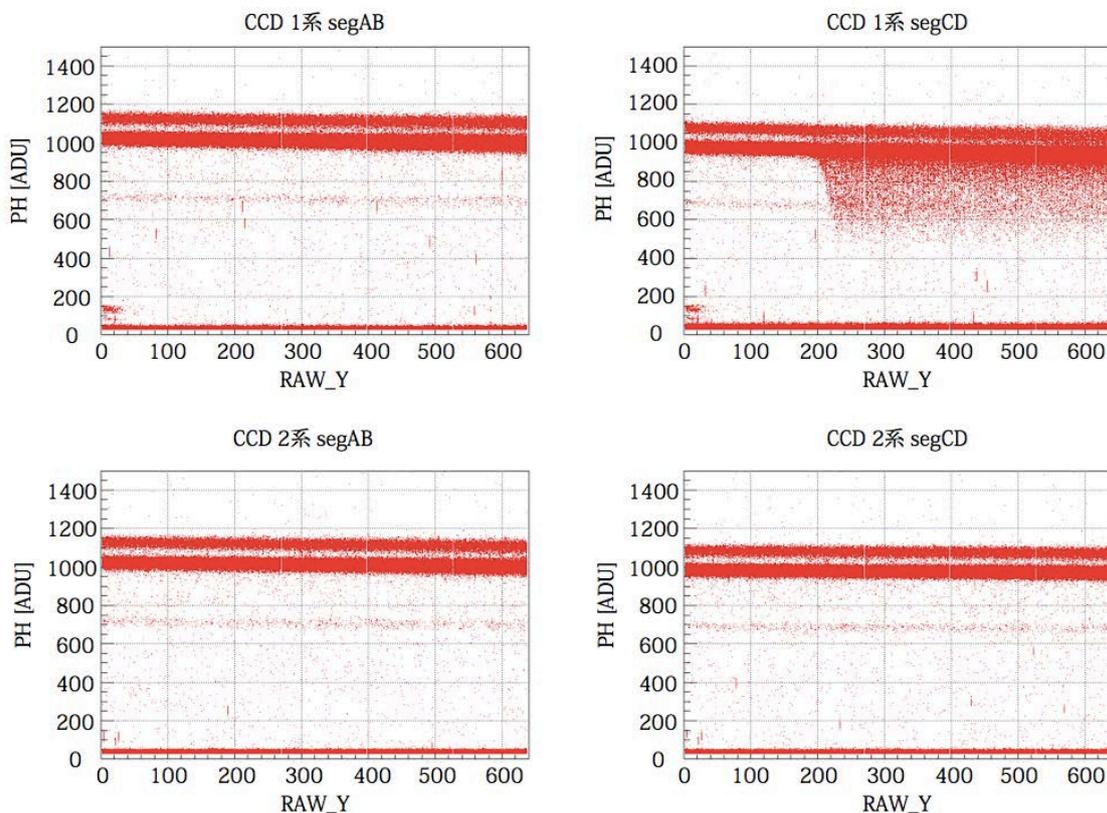


図 6.4 Charge Injection をしないときのスタッキングプロット

性能向上のために、以下の流れに沿ってデータ取得と解析を行うこととする。

- Charge Injection 機能を使用し、CTI の向上を図る。そのための設定電圧の最適化を行う。
- 得られたイベント判定のための threshold (split threshold) の最適化を行う。
- even/odd のゲイン違いを補正し、全体のスペクトルを作成し、性能を評価する。

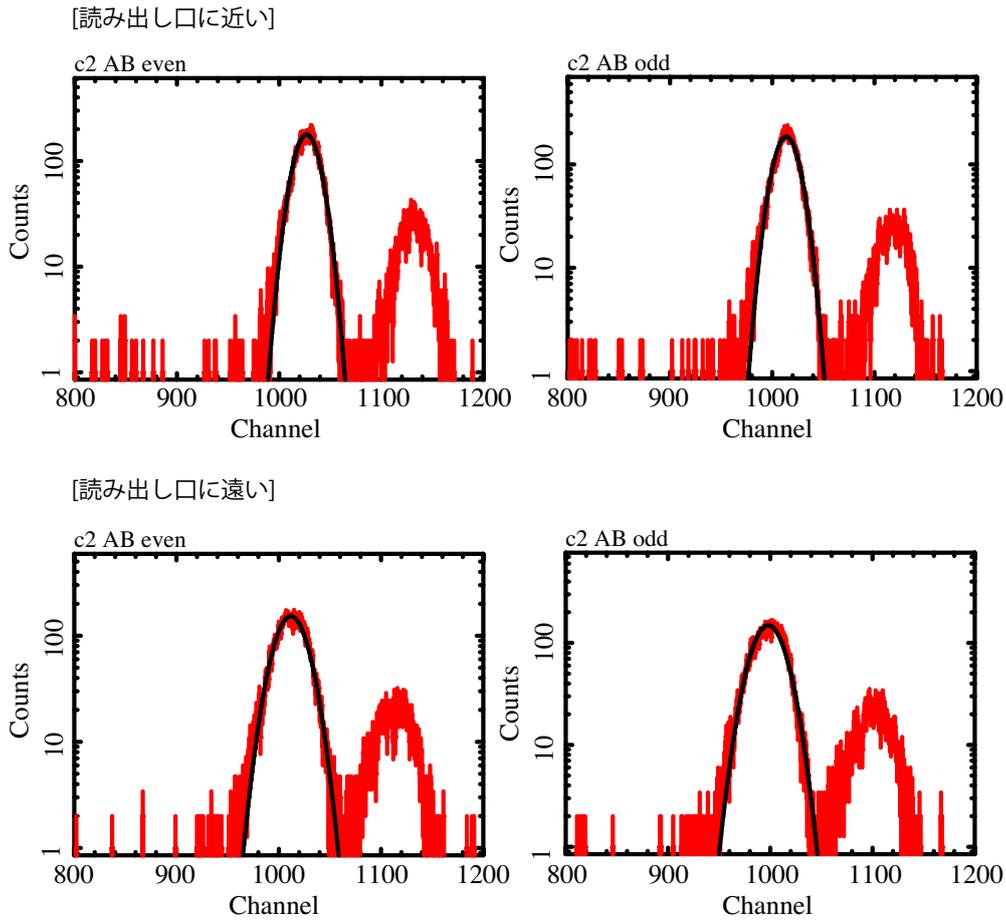


図 6.5 CCD2 系 segment AB において読み出し口に近い領域と遠い領域からそれぞれ取得したスペクトル (Charge Injection なし).

表 6.3 Charge Injection 無しの際のノイズ

			読み出し口遠い			読み出し口近い		
			読み出しノイズ rms [e ⁻]	縦転送ノイズ rms [e ⁻]	暗電流ゆらぎ rms [e ⁻]	読み出しノイズ rms [e ⁻]	縦転送ノイズ rms [e ⁻]	暗電流ゆらぎ rms [e ⁻]
1 系	AB	even	6.41	1.53	< 1	6.70	2.73	< 1
		odd	6.65	2.20	< 1	6.56	1.85	< 1
	CD	even	6.75	1.48	< 1	6.90	2.96	< 1
		odd	7.43	1.78	< 1	7.18	1.87	< 1
2 系	AB	even	7.62	1.48	< 1	7.47	1.46	< 1
		odd	8.12	1.84	< 1	7.98	1.83	< 1
	CD	even	6.62	1.44	< 1	6.77	1.76	< 1
		odd	7.14	1.76	< 1	7.08	1.75	< 1

6.3 Charge Injection の効果

Charge Injection によって、エネルギー分解能、ゲイン、読み出しノイズがどの程度変化するか調査する。4.3.7 節で述べたように、Charge Injection に関係する電圧は、ISV, IG1V, IG2V であるが、これらの電圧の値をうまく調節しないと、電荷が Charge Injection 行より後列にもれ出したり、Charge Injection 行内のすべての列に入らなかったりする。そこで、ISV が low のときの電圧値 (ISVLO) と、IG2V の電圧

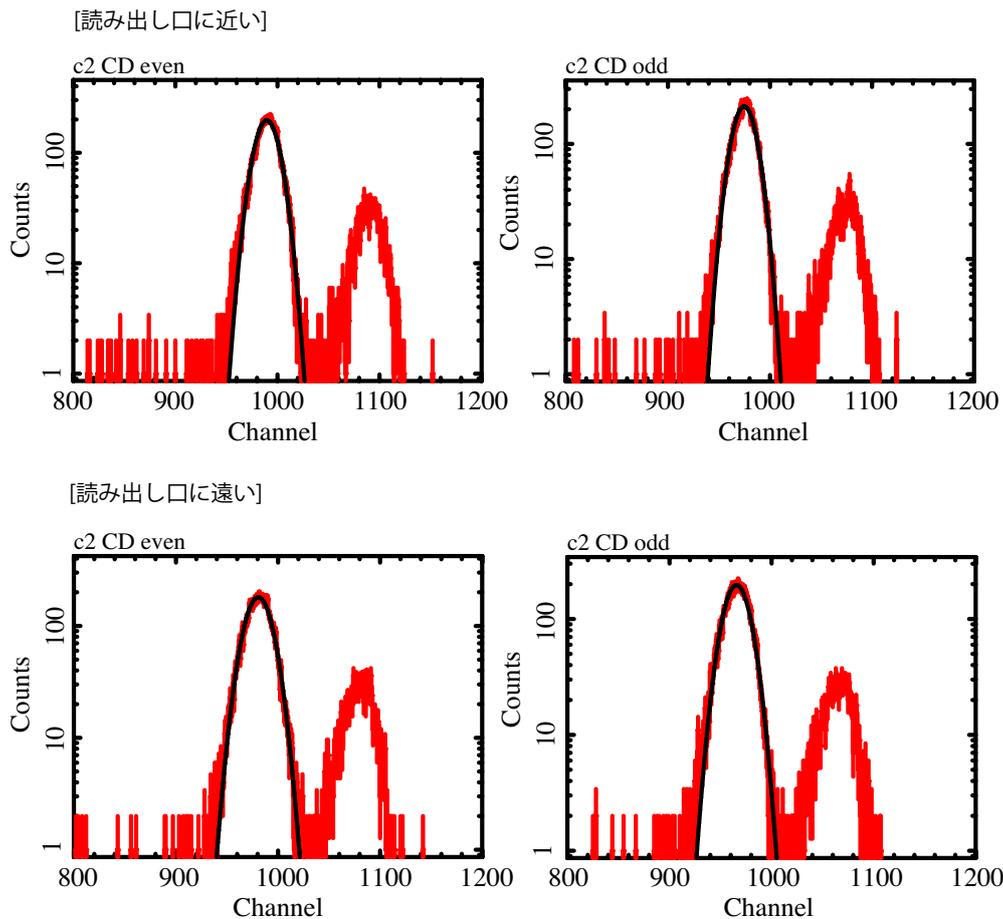


図 6.6 CCD2 系 segment CD において読み出し口に近い領域と遠い領域からそれぞれ取得したスペクトル (Charge Injection なし).

値の最適化を行った. 図 6.7 は Charge Injection 行周辺のフレームイメージである. 図中の緑色の箇所に電荷を注入した. 上段左と中では電荷が後列に漏れだしている. このとき 70 keV に相当する電荷を注入しており, 波高値が video FPGA の仕様で回り込んでしまったために (6.1 を参照), 注入行の波高値が低く見えている. 一方で上段右および下段左では ISVLO が高いため, 電荷が注入できていない. 下段中では IG2V を調整することで, 後列への電荷漏れがなくなった. 下段左は最終的に電荷量を調整した電圧設定 (ISVLO = -8.2 V, IG2V = -1.9 V) で得たフレームイメージである.

このようにして電圧の最適化を行ったあと, Charge Injection を行いながら ^{55}Fe を照射して 90 分間撮像した. 図 6.9 が CCD1 系と 2 系のそれぞれの segment AB, CD におけるフレームイメージである. 白色破線で囲んだ領域が有効画素領域で, Charge Injection は 256 行毎に 1 回, 計 4 回行った (2×2 ピンニングを行っているので, 実際には 128 行毎に見える).

6.2 節と同様に, CTI を評価するためにスタッキングプロットを作成した (図 6.4). Charge Injection 行の前後で信号がわずかに鋸型になっており, CTI が改善されている. CTI を計算すると 1 系では $\sim 1 \times 10^{-6}$ 転送回数 $^{-1}$ となり, 2 系では CTI はさらに小さいことがわかった ($< 10^{-6}$ 転送回数 $^{-1}$).

読み出し口に近い領域と遠い領域 (それぞれ図 6.9 の黄色四角領域と緑色四角領域) からスペクトルを取得して解析を行った. 図 6.10, 6.11 はそれぞれ CCD2 系の segment AB と CD のスペクトルで, 読み出し口に近い領域と遠い領域を比較したもので, 電荷転送による, 輝線中心チャンネルの値や幅の変化はほとんどない. Mn $K\alpha$ 輝線のスペクトルを 1 つのガウシアンでフェッティングし, エネルギー分解能, ゲ

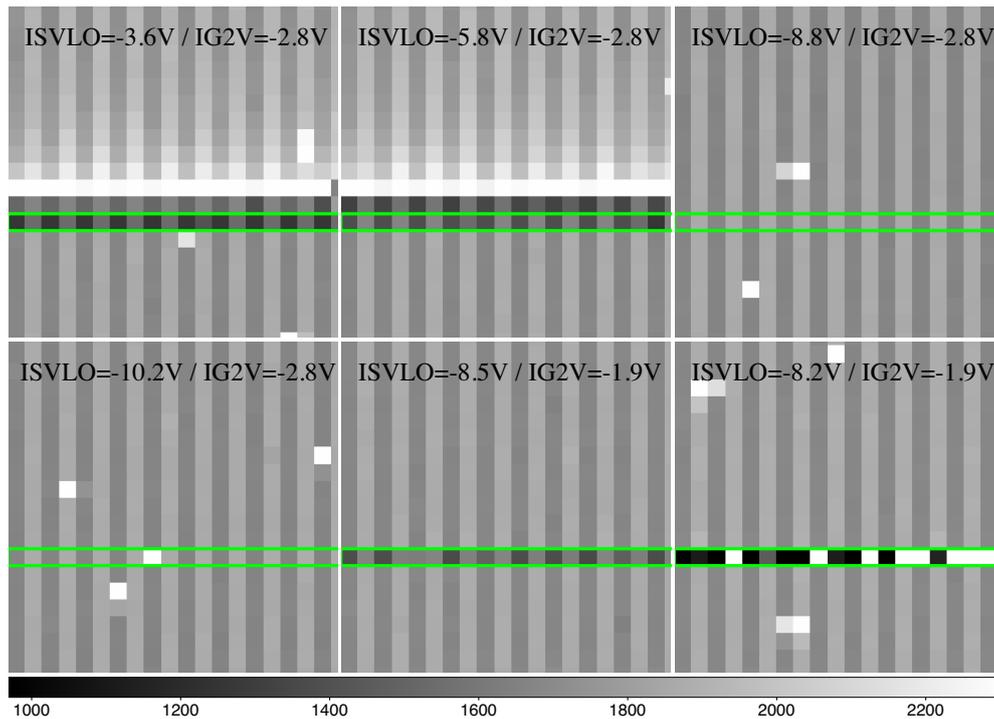


図 6.7 ISV の low および IG2V の値を変えて取得した Charge Injection 行周辺のフレームイメージ。下段左は最終的に電荷量を調整した電圧設定で得たフレームイメージ。

インを求めた結果を表 6.4 に示す。

読み出しノイズ, 暗電流のゆらぎ, 縦転送ノイズは, 表 6.5 に示すように読み出し口に遠い/近いで差はなく, Charge Injection をしないとき (表 6.3) と比べても変わらない結果であった。

3.13 節で述べたようにエネルギー分解能の内訳は,

$$(\Delta E[\text{eV}])^2 = (\text{ファノ限界}[\text{eV}])^2 + (\text{読み出しノイズ}[\text{eV}])^2 + (\text{暗電流ノイズ}[\text{eV}])^2 + (\text{縦転送ノイズ}[\text{eV}])^2 + (\text{CTIによる劣化}[\text{eV}])^2 + (\text{unknownな成分}[\text{eV}])^2 \quad (6.1)$$

で表される。いまは Charge Injection を行っており, CTI がほとんど無視できるほど小さい。表 6.5 における各ノイズの大きさを rms から FWHM に変換し, Si におけるファノ限界 120 eV を代入すると CCD1 系では unknown な成分が ~ 100 eV, CCD2 系では ~ 65 eV 残る。

unknown な成分の原因として 1 つ考えられるのは, CCD 素子自体ではなくデータ解析の方法である。SXI は空乏層が厚く電荷が広がりやすいので, 電荷雲の広がりを考慮するパラメーターである Split threshold の値は Grade 分岐比やエネルギー分解能に大きく影響を与えられられる。そこで次節では, Split threshold を現状の 18 ch から変化させて解析を行う。

6.4 Split threshold と Grade 0 のエネルギー分解能の関係

Split threshold の与える影響を調べるため, CTI の影響をほぼ無視できてエネルギー分解能がより良い, CCD2 系 segment CD のデータ (Charge Injection あり) を用い, segment 全面で解析を行った。Hot pixel と, Charge Injection 行およびその前後 1 行ずつは解析の際除いた。

Event threshold は 30 ch のままで, Split threshold を 18, 15, 12, 9, 6 ch と変えて, 全イベント数

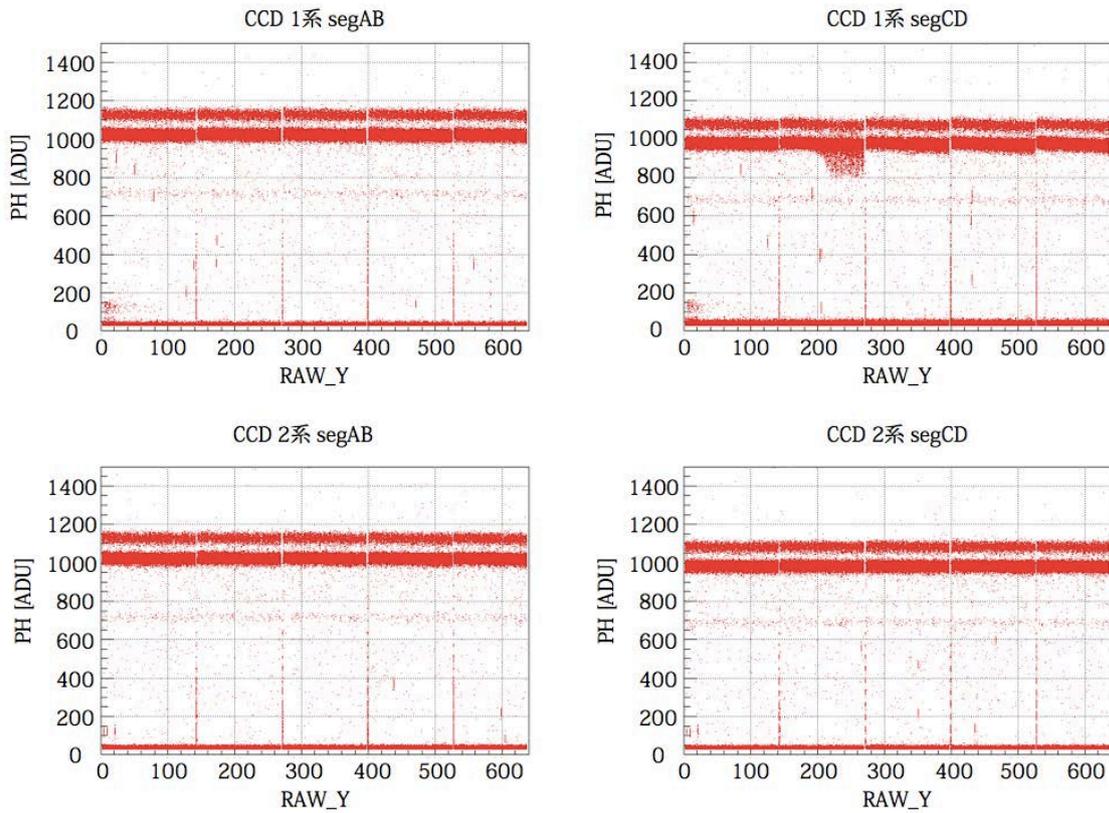


図 6.8 Charge Injection をしたときのスタッキングプロット

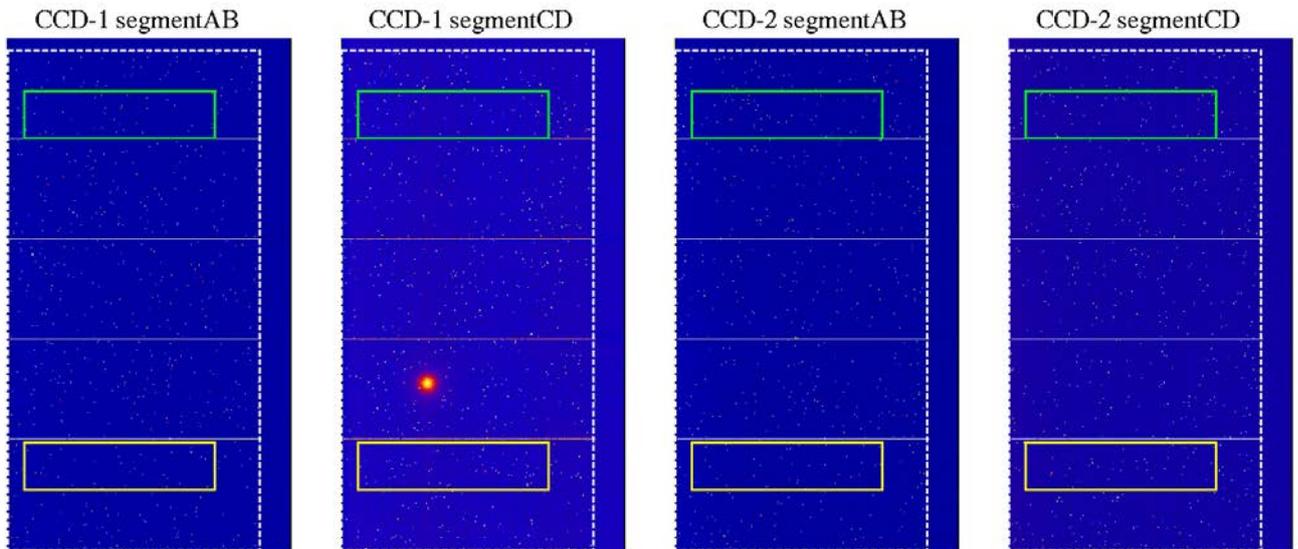


図 6.9 Charge Injection をしたときの CCD1 系と 2 系のフレームデータ。白色破線で囲んだ領域が有効画素領域。それぞれの segment の左下側が読み出し口。4 本の Charge Injection 行が見える。黄色四角領域と緑色四角領域を、それぞれ読み出し口に近い、遠い領域として解析した。CCD1 系の segment CD には輝点のようなものが見えており、スタッキングプロットで信号がテールを引く原因と考えられる。

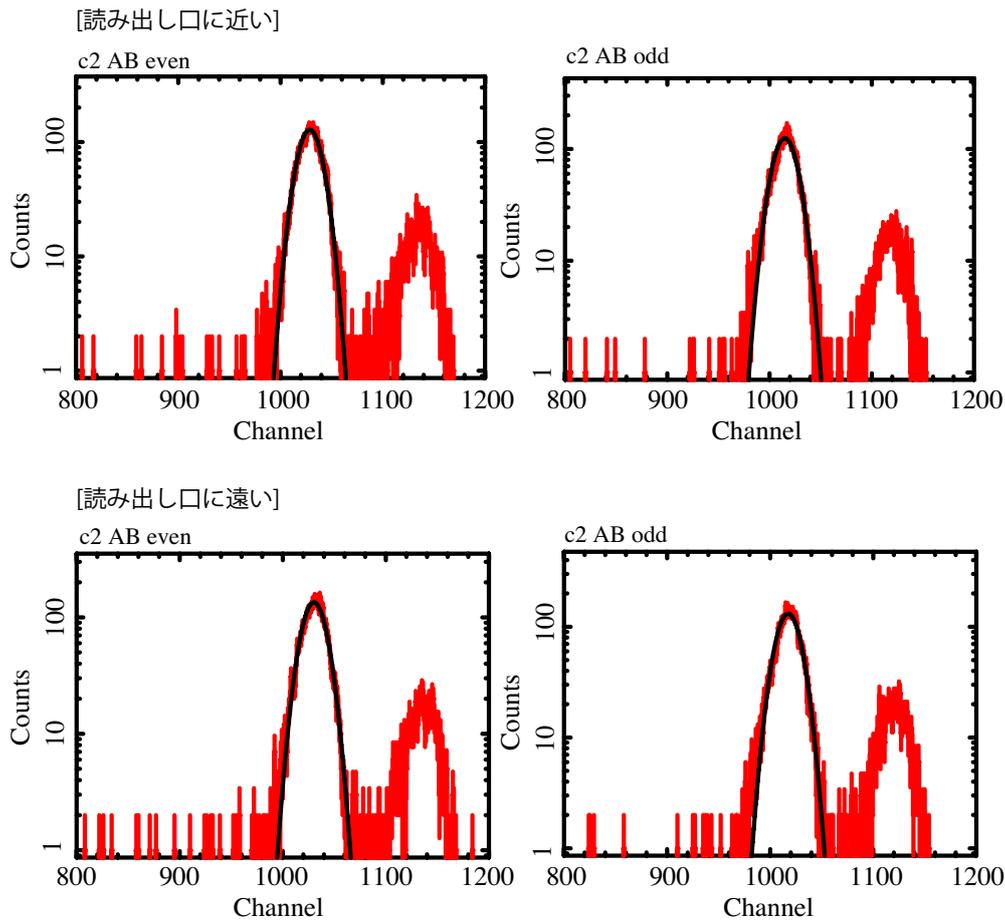


図 6.10 Charge Injection をしたときの CCD2 系 segment AB において読み出し口に近い領域と遠い領域からそれぞれ取得したスペクトル。

表 6.4 5.9 keV の X 線におけるゲイン [eV/ch] とエネルギー分解能 (FWHM) [eV]

			CIoff				CIon			
			読み出し口遠い		読み出し口近い		読み出し口遠い		読み出し口近い	
			ゲイン [eV/ch]	分解能 [eV]	ゲイン [eV/ch]	分解能 [eV]	ゲイン [eV/ch]	分解能 [eV]	ゲイン [eV/ch]	分解能 [eV]
1 系	AB	even	5.831	211	5.741	180	5.727	172	5.737	172
		odd	5.902	199	5.821	162	5.789	151	5.810	156
	CD	even	6.266	346	6.023	182	5.989	177	6.000	175
		odd	6.296	332	6.096	171	6.071	167	6.082	168
2 系	AB	even	5.827	199	5.741	155	5.722	151	5.731	151
		odd	5.907	208	5.815	155	5.794	152	5.808	154
	CD	even	6.012	176	5.957	157	5.948	147	5.955	149
		odd	6.104	171	6.048	154	6.044	159	6.044	153

(Grade 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7) のうち Grade0 の占める割合がどのように変化するかを調査した。また各 Split threshold の Grade 0 のイベントについて、Mn K α 輝線の中心チャンネルと幅を even と odd ごとに調査した。結果を表 6.6 にまとめる。Split threshold を下げると、輝線の中心チャンネルは高くなり、幅は狭くなる。また Grade 0 の割合は減少する。Split threshold を読み出しノイズの値 (~ 4 ch) に近い 6 ch まで下げると、Grade0 の even, odd の分解能はそれぞれ 131 eV, 137 eV となるが、これはファノ限界 (120 eV) + 読み出しノイズ (~ 55 eV) + 縦転送ノイズ (~ 15 eV) ~ 133 eV ですべて説明でき、

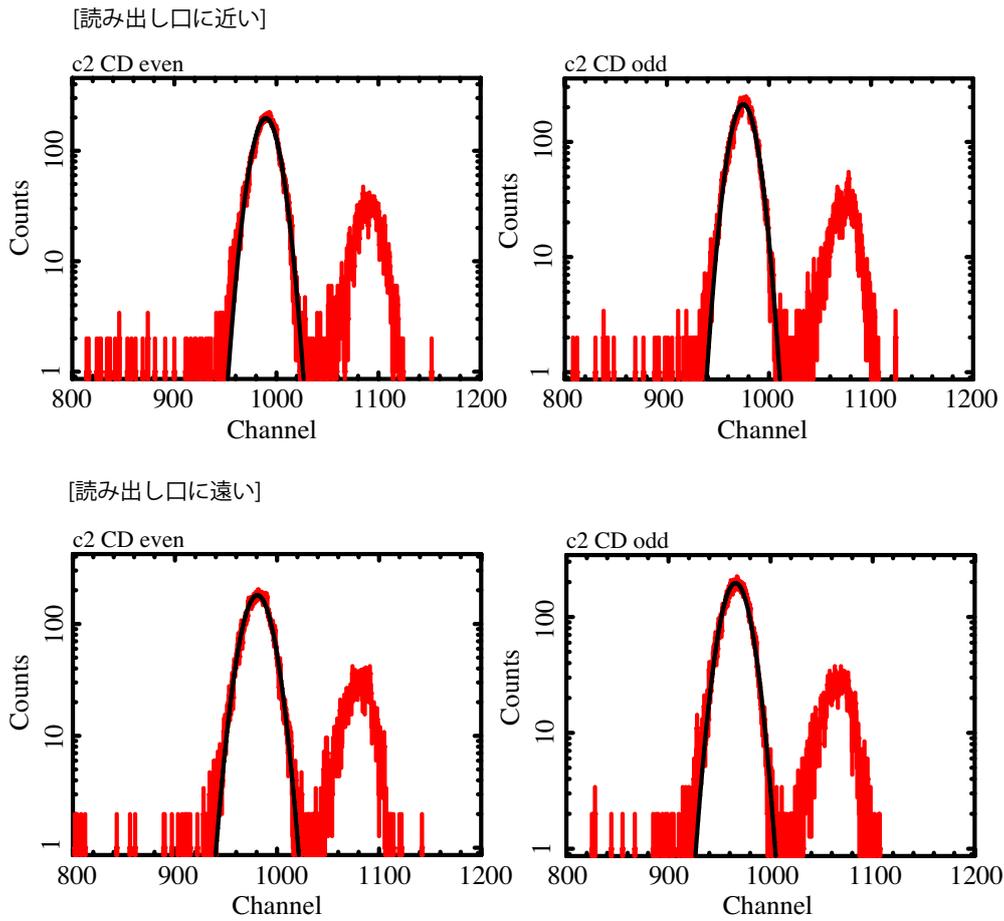


図 6.11 Charge Injection をしたときの CCD2 系 segment CD において読み出し口に近い領域と遠い領域からそれぞれ取得したスペクトル。

表 6.5 Charge Injection をしたときのノイズ (rms)

			読み出しノイズ	縦転送ノイズ	暗電流ゆらぎ
			[e ⁻]	[e ⁻]	[e ⁻]
1 系	AB	even	6.70	2.75	< 1
		odd	6.51	2.00	< 1
	CD	even	6.76	2.60	< 1
		odd	6.93	1.95	< 1
2 系	AB	even	7.54	1.51	< 1
		odd	7.97	1.88	< 1
	CD	even	6.60	2.27	< 1
		odd	6.91	1.76	< 1

unknown な成分は残らない。

これは電荷雲の広がり方で説明ができる。5.9 keV の X 線のシリコン中の平均吸収距離は $\sim 30 \mu\text{m}$ である。空乏層厚 $200 \mu\text{m}$ の裏面照射型 P チャンネル CCD 素子において入射面から $\sim 30 \mu\text{m}$ のところで吸収されたとして、式 3.5 から電極付近での正孔雲の半径を計算すると*1 半径 $\sigma \sim 6.6 \mu\text{m}$ になる。

6 keV の X 線イベントの波高値が $\sim 1000\text{ch}$ なので、split threshold が 6ch の場合、0.6% の広がりに相当する。電荷雲の形状がガウス分布だとすると、全体の 99.4% の電荷が 1 ピクセルに収まっている場

*1 典型的な値として、 $D = 35.0 [\text{cm}^2 \text{s}^{-1}]$, $\mu = 1500 [\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}]$, $N_A = 3.5 \times 10^{12} [\text{cm}^{-3}]$, $d = 70 [\mu\text{m}]$ を用いた。

合は Grade 0 と判定されることになる。電荷雲の半径 $\sigma \sim 6.6 \mu\text{m}$ と、ピクセルサイズ $48 \mu\text{m} \times 48 \mu\text{m}$ *2から、そのような確率を面積比によって求めると $\sim 10\%$ になる。これは split threshold が 6ch の場合の Grade 0 が占める割合 11% と一致する。

表 6.6 CCD2 系 segment CD の Grade 0 のイベントにおいて、Split threshold による、Mn $K\alpha$ 輝線の中心チャンネルと幅 (1σ) の変化

Split threshold [ch]	Grade0 の占める割合 [%]	even		odd	
		中心チャンネル [ch]	幅 (1σ) [ch]	中心の波高値 [ch]	幅 (1σ) [ch]
18	33.5%	991.44	10.473	976.39	11.026
15	31.6%	991.99	10.095	977.04	10.545
12	28.6%	992.58	9.7514	977.69	10.175
9	22.3%	993.20	9.4495	978.33	9.8391
6	11.0%	993.73	9.4167	979.04	9.6529

6.5 even-odd 間のゲイン補正と Split threshold の最適化

6.5.1 even と odd 間のゲインの違いの補正

Grade 0 以外のデータも積分するためには、even と odd のゲインの違いを考慮し、補正しなければならない。事実、そのまま積算すると非常に悪いエネルギー分解能 ($\sim 200 \text{ eV}$) になってしまう。例として CCD2 系の segment AB および CD を用いて、even と odd のゲインの違いを補正することで、どれほど分解能が向上するかを調査する。

まず各 X 線 Grade (Grade 0, 2, 3, 4, 6) において、even と odd のゲインの違いを何も考慮せずそのまま積算したスペクトルから、Mn $K\alpha$ 輝線の分解能を求めた。またすべての X 線 Grade を積算した (Grade 0 + 2 + 3 + 4 + 6) スペクトルからも分解能を求めた。図 6.12 の上段は Split threshold=18 において、ゲインの違いを補正していない CCD2 系の segment CD のスペクトルである。左側は全体の、右側は Mn $K\alpha$ と $K\beta$ 輝線付近の拡大である。すべての X 線 Grade を積算したときの分解能は segment AB も CD も $\sim 200 \text{ eV}$ であった。また同じ解析を Split threshold=15, 12, 9, 6 においても行ったところ、Split threshold を下げることで各 Grade の分解能は少し改善するものの、すべての X 線 Grade を積算したときの分解能は改善せず概ね $\sim 200 \text{ eV}$ だった。表 6.8 および 6.10 の「補正前」の欄にそれぞれ、segment AB と CD の分解能をまとめた。

次に even と odd のゲインの違いを補正する。まず Grade 0 の even と odd のスペクトルから、Mn $K\alpha$ 輝線におけるゲインを求める。そして even と odd のゲインがどちらも 6 eV/ch になるように、それぞれの波高値を定数倍して補正する。こうして先ほどと同じように、各 X 線 Grade (Grade 0, 2, 3, 4, 6) およびすべての X 線 Grade を積算した (Grade 0 + 2 + 3 + 4 + 6) スペクトルから Mn $K\alpha$ 輝線の分解能を求めた。図 6.12 の下段は Split threshold=18 において、ゲインの違いを補正した後の CCD2 系の segment CD のスペクトルである。左側は全体の、右側は Mn $K\alpha$ と $K\beta$ 輝線付近の拡大である。上段の補正前のスペクトルと比べると、すべての Grade で輝線の幅が狭くなっていることが分かる。実際、Grade2/segment AB では 208 eV だった分解能が 176 eV になるなど、どの Grade においても、segment AB で $\sim 15 \text{ eV}$ 、segment CD で $\sim 25 \text{ eV}$ 程度、分解能が改善した。

*2 CCD 素子のピクセルサイズは $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$ であるが、 2×2 ピンニングを行っているため

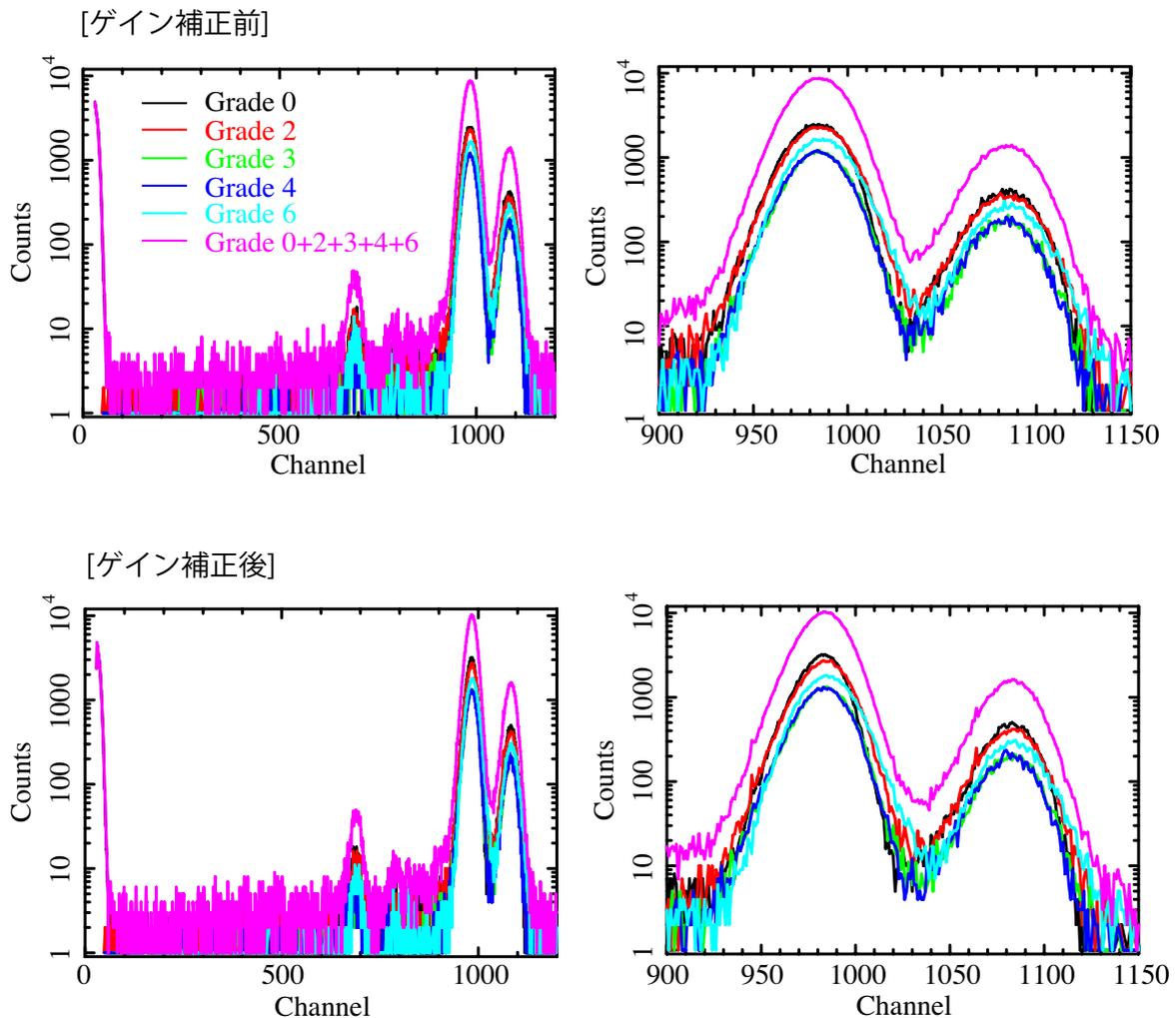


図 6.12 CCD2 系 segmentCD 全面から取得した各 Grade 毎のスペクトル. 上段が even-odd 間のゲイン補正前, 下段が補正後. Grade 0 (黒), 2 (赤), 3 (緑), 4 (青), 6 (水色), すべての X 線イベントの積算 (マゼンタ).

6.5.2 Split threshold の最適化

ゲインを補正した解析を Split threshold=15, 12, 9, 6 で行い, どの Split threshold でエネルギー分解能が最も良いかを調べた. 図 6.13 および 6.14 は, 横軸を Split threshold とし, そのときのエネルギー分解能を segment ごとにプロットしたものである. 赤色三角が even/odd のゲインの違いを補正した後の値で, 参考に補正前の値を黒色の丸で示した. segment AB でも CD でも Split threshold=12 のときが最も分解能が良く (それぞれ 171.07 eV, 162.37 eV), その次に良いのが, 9 あるいは 15 であった.

Split threshold は, エネルギー分解能が最も良くなるものが必ずしも最適値というわけではない. たとえば threshold が低すぎると, ダークレベルのゆらぎがスプリットスレッシュを越えてしまい, 本来電荷の広がりが 1pixel 内に収まっていたイベント (Grade 0) を, 広がった X 線イベント (Grade 2, 3, 4, 6) に誤認する事がある. このようなイベントでは, 本来より高い波高値を算出してしまう. 読み出しノイズは ~ 4 ch なので, Split threshold はその 3-4 倍, 12-16 ch 程度必要である.

Split threshold が低いほど全体のスペクトルのエネルギー分解能は良いが, 全イベントのうちの X 線

表 6.7 全イベントのうち X 線イベントが占める割合 (%)

Split threshold	segAB	segCD
18	95.1	95.3
15	94.0	94.5
12	91.1	92.7
9	82.8	86.5
6	63.6	68.5

イベントが占める割合が低くなる。各 threshold 毎の X 線イベントの割合を表 6.7 に示す (even-odd 間のゲイン補正後)。両者の兼ね合いを考え、X 線イベントの占める割合を $\sim 95\%$ 以上とするならば、Split threshold は 15 ch 程度にすることが望ましい。

6.5.3 ゲインの補正と Split threshold の違いによる Grade 分岐比の変化

Grade 分岐比をゲインの補正前と補正後で比較したが、Split threshold=12–18 においては、ほとんど違いはなかった。一方 Split threshold=6–9 では補正前より補正後のほうが Grade 0 の割合が増加し、Grade 7 の割合は減少している。この傾向は特に segment AB で顕著である。ゲインを補正する前、segment AB では even, odd どちらも、segment CD では even で、ゲインが 6 eV/ch よりも小さく Grade 0 の even と odd のゲインを 6 eV/ch に補正する際、これらの波高値は元の値より低い値へシフトした。そのため、補正前には Split threshold 以上だった pixel が threshold を超えなくなり、結果 1pixel に収まるイベント (Grade 0) が増加し、広がったイベント (Grade 7) が減少した。

SXI の解析において正しい結果を得るためには、even と odd のゲインを揃えた上で Grade 判定をすることが重要である。

表 6.8 CCD2 系 segment AB における, even-odd 間のゲイン補正による Mn K α 輝線のゲインとエネルギー分解能の変化

Split threshold = 18													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		1022.8	982.90	1024.0	983.76	1023.4	983.29	1022.6	982.52	1025.0	984.97	1023.5	983.42
標準偏差 [ch]		13.508	10.577	15.393	12.523	14.209	12.705	14.362	12.664	15.237	13.548	14.550	12.197
ゲイン [eV/ch]		5.7673	6.0014	5.7607	5.9961	5.7641	5.9990	5.7686	6.0037	5.7550	5.9896	5.7631	5.9982
エネルギー分解能 [eV]		183.08	149.17	208.39	176.47	192.47	179.11	194.69	178.67	206.07	190.69	197.05	171.93
Split threshold = 15													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		1023.4	983.04	1024.6	983.86	1024.0	983.29	1023.2	982.48	1025.5	984.64	1024.2	983.47
標準偏差 [ch]		13.229	10.757	15.171	12.672	14.019	12.470	14.171	12.393	15.449	13.643	14.440	12.259
ゲイン [eV/ch]		5.7636	6.0005	5.7570	5.9955	5.7605	5.9990	5.7651	6.0040	5.7522	5.9908	5.7595	5.9979
エネルギー分解能 [eV]		179.18	151.68	205.25	178.54	189.77	175.80	191.99	174.85	208.84	192.07	195.44	172.80
Split threshold = 12													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		1024.1	982.76	1025.5	983.78	1024.8	983.40	1024.0	982.55	1026.2	984.69	1025.0	983.46
標準偏差 [ch]		13.018	10.251	15.043	12.370	13.909	12.375	14.076	12.255	15.712	13.840	14.466	12.137
ゲイン [eV/ch]		5.7600	6.0022	5.7522	5.9960	5.7558	5.9983	5.7607	6.0035	5.7479	5.9905	5.7548	5.9980
エネルギー分解能 [eV]		176.21	144.59	203.35	174.30	188.14	174.43	190.55	172.90	212.23	194.83	195.64	171.07
Split threshold = 9													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		1024.7	983.04	1026.5	984.41	1025.8	983.70	1025.0	982.86	1027.3	985.10	1026.0	983.95
標準偏差 [ch]		12.802	9.9582	14.761	12.227	13.861	12.137	13.945	12.057	15.844	13.936	14.537	12.188
ゲイン [eV/ch]		5.7567	6.0005	5.7579	5.9922	5.7503	5.9965	5.7551	6.0016	5.7421	5.9880	5.7488	5.9950
エネルギー分解能 [eV]		173.19	140.53	199.74	172.18	187.31	171.03	188.60	170.05	213.80	196.11	196.39	171.70
Split threshold = 6													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		1025.2	982.84	1027.2	984.70	1026.8	984.12	1025.8	982.97	1028.0	985.41	1027.1	984.38
標準偏差 [ch]		12.779	9.9191	14.301	12.113	13.624	11.883	13.810	11.882	15.771	13.871	14.636	12.424
ゲイン [eV/ch]		5.7536	6.0018	5.7424	5.9904	5.7446	5.9939	5.7503	6.0010	5.7381	5.9861	5.7431	5.9923
エネルギー分解能 [eV]		172.78	139.90	192.99	170.52	183.92	167.38	186.02	167.57	212.66	195.13	197.52	174.96

表 6.10 CCD2 系 segmentCD における, even-odd 間のゲイン補正による Mn K α 輝線のゲインとエネルギー分解能の変化

Split threshold = 18													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		983.69	983.33	984.83	984.72	984.73	984.12	984.10	984.47	986.21	985.46	984.64	984.13
標準偏差 [ch]		13.810	10.826	14.431	12.332	13.725	12.243	13.653	12.335	14.409	13.119	14.061	12.013
ゲイン [eV/ch]		5.9966	5.9986	5.9896	5.9903	5.9903	5.9939	5.9941	5.9979	5.9812	5.9858	5.9908	5.9939
エネルギー分解能 [eV]		194.61	152.62	203.12	173.60	193.21	172.45	192.32	173.86	202.53	184.54	197.95	169.21
Split threshold = 15													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		984.37	982.91	985.27	984.10	985.23	984.03	984.58	983.37	986.37	985.07	985.14	983.78
標準偏差 [ch]		13.451	10.386	14.215	12.061	13.507	11.960	13.440	12.042	14.506	13.170	13.872	11.780
ゲイン [eV/ch]		5.9924	6.0013	5.9869	5.9940	5.9872	5.9945	5.9911	5.9985	5.9802	5.9881	5.9878	5.9960
エネルギー分解能 [eV]		189.41	146.47	199.99	169.90	190.05	168.48	189.22	169.75	203.87	185.33	195.20	165.99
Split threshold = 12													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		985.01	983.00	985.84	984.06	985.94	984.06	985.20	983.29	986.64	984.73	985.73	983.75
標準偏差 [ch]		13.155	9.8166	14.005	11.620	13.401	11.738	13.304	11.813	14.609	13.241	13.752	11.523
ゲイン [eV/ch]		5.9885	6.0074	5.9835	5.9943	5.9828	5.9943	5.9874	5.9990	5.9786	5.9902	5.9842	5.9962
エネルギー分解能 [eV]		185.13	138.43	196.93	163.69	188.42	165.35	187.19	166.54	205.25	186.39	193.39	162.37
Split threshold = 9													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		985.64	983.16	986.46	984.48	986.84	984.24	985.81	983.23	987.31	984.77	986.46	984.00
標準偏差 [ch]		12.917	9.7100	13.853	11.621	13.334	11.453	13.204	11.596	14.869	13.374	13.770	11.599
ゲイン [eV/ch]		5.9847	5.9998	5.9797	5.9917	5.9774	5.9932	5.9836	5.9993	5.9746	5.9900	5.9797	5.9946
エネルギー分解能 [eV]		181.66	136.90	194.66	163.62	187.31	161.30	185.67	163.49	208.76	188.26	193.50	163.40
Split threshold = 6													
		Grade0		Grade2		Grade3		Grade4		Grade6		Grade0+2+3+4+6	
		補正前	補正後	補正前	補正後								
中心チャネル [ch]		985.99	982.70	987.10	984.57	987.80	984.56	986.56	983.41	988.07	985.19	987.30	984.30
標準偏差 [ch]		12.712	9.4365	13.613	11.285	13.365	11.075	13.149	11.257	14.892	13.184	13.867	11.612
ゲイン [eV/ch]		5.9826	6.0026	5.9759	5.9912	5.9716	5.9912	5.9791	5.9983	5.9700	5.9874	5.9746	5.9928
エネルギー分解能 [eV]		178.72	133.11	191.17	158.88	187.55	155.93	184.76	155.68	208.92	185.50	194.69	163.53

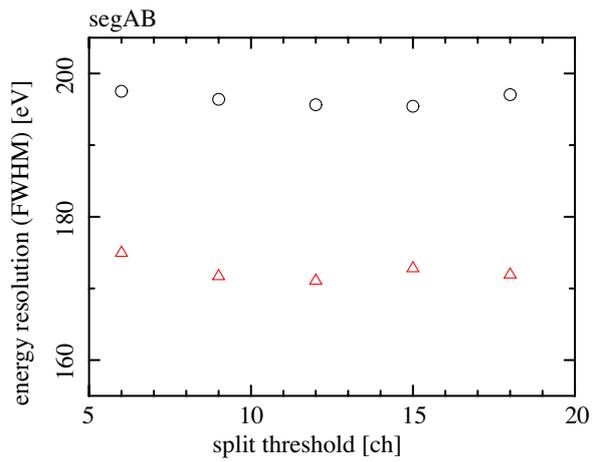


図 6.13 CCD2 系 segmentAB における, even-odd 間のゲイン補正によるエネルギー分解能の変化. 黒丸が補正前. 赤色三角が補正後.

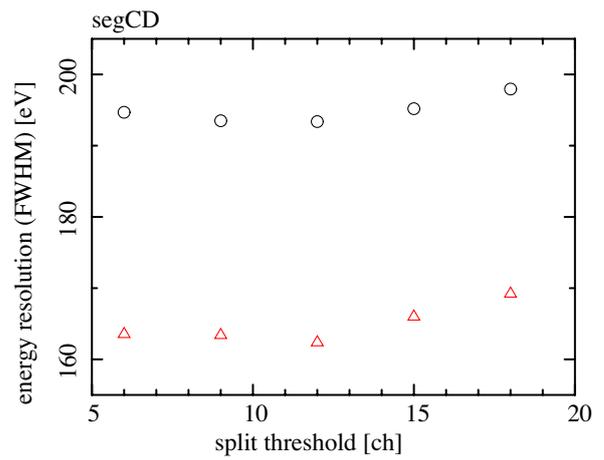


図 6.14 CCD2 系 segmentCD における, even-odd 間のゲイン補正によるエネルギー分解能の変化. 黒丸が補正前. 赤色三角が補正後.

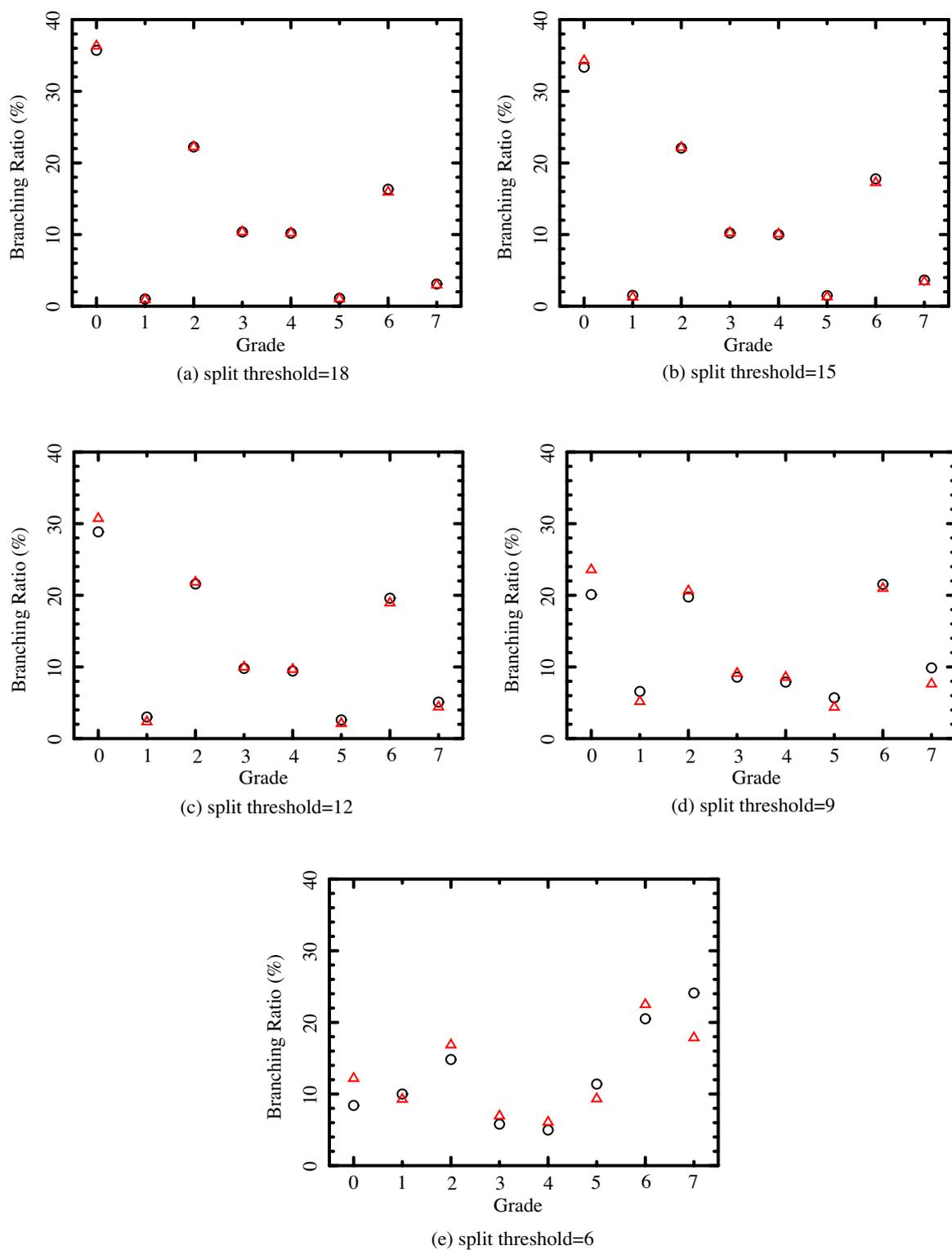


図 6.15 CCD2系 segmentAB における, even-odd 間のゲイン補正による Grade 分岐比の変化. 黒丸が補正前, 赤色三角が補正後.

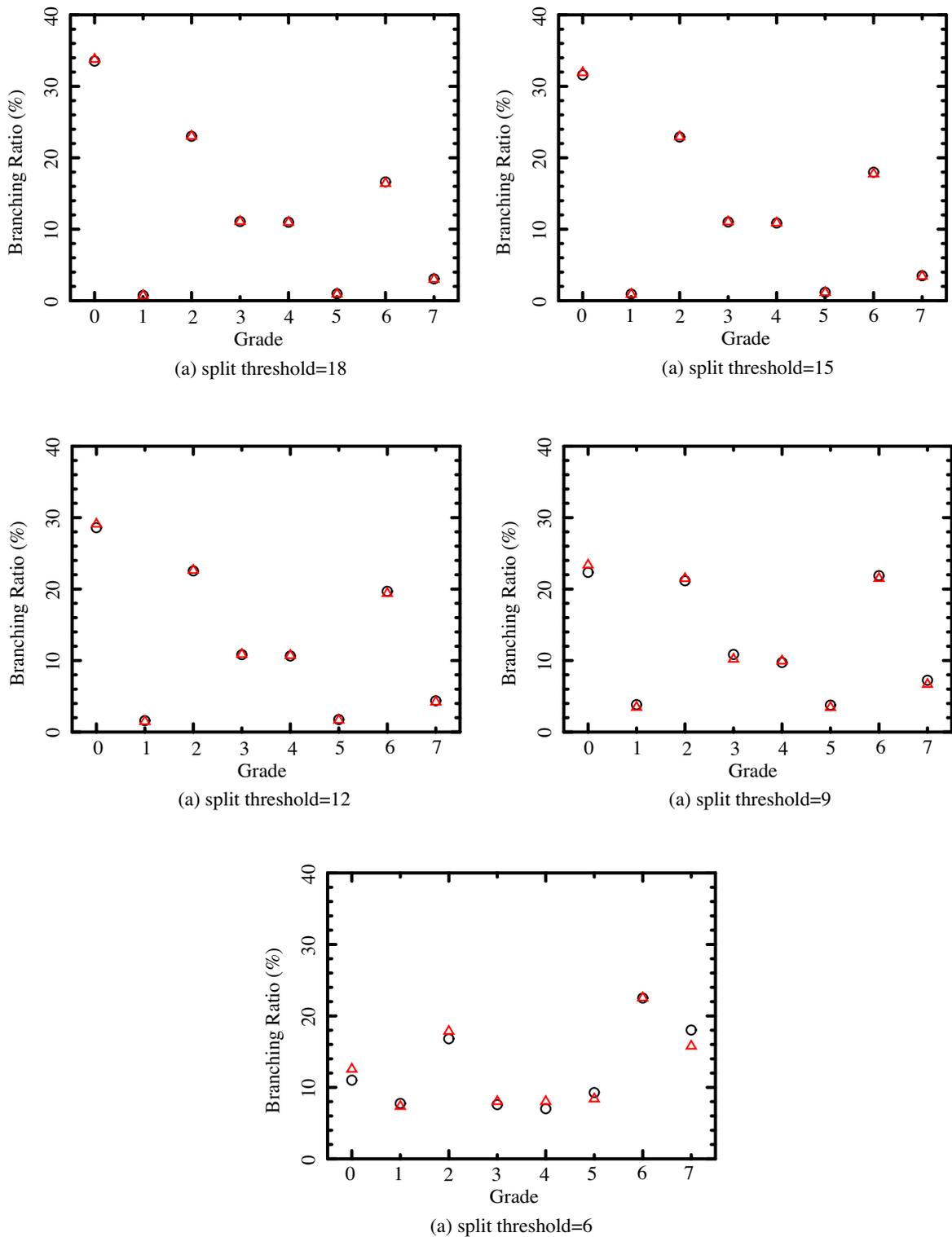


図 6.16 CCD2 系 segmentCD における, even-odd 間のゲイン補正による Grade 分岐比の変化. 黒丸が補正前, 赤色三角が補正後.

第7章

エンジニアリングモデルによる機能試験

第6章で用いた SXI の EM システムを用いて, SXI のセンサー部 (SXI-S) に搭載するキャリブレーションソースの EM 品, およびヒーターの PID 制御のパラメーターの最適化とヒーター制御中のノイズ測定を行った。

7.1 キャリブレーションソースの強度と散乱成分の測定

本節においては, SXI のセンサー部 (SXI-S) に搭載するキャリブレーションソースの試験結果を報告する。

7.1.1 試験目的

キャリブレーションソースは直接触れることがないようにホルダーに入れる。ソースとホルダーを組み立てた後, 接着剤で固定する。本試験においてこの組み立ての手順を確立する。また, ソースがボンネット内で脱落しないことを確認し, CCD 素子を用いて強度を測定する。ホルダーの内壁による散乱, および蛍光 X 線が生じるためその見積もりも行う。

7.1.2 試験概要

銅ピンに直径 2.6 mm, 深さ 0.2 mm のくぼみを作り, そこへ ^{55}Fe を電着する。さらにその上にニッケルを電着してカバーし, 上から触っても ^{55}Fe が落ちることのないようにする。ここで材質は実機のボンネットと同じ素材のアルミ合金 A6061 にし, くぼみも実機で計画しているものと同じ形状にしている。完成品には 0.15 mm から 0.2 mm のくぼみになる。 ^{55}Fe 層は極めて薄く, ニッケル層の厚さも $2\ \mu\text{m}$ から $4\ \mu\text{m}$ である。ホルダーは図 7.1(a) にあるようにネジ部とその先端に付ける線源格納部からなる。図 7.1 (b) の線源を入れた格納部をネジ部に接着することで固定を行う。図 7.1 (c) にあるようにネジ部と線源格納部の間には 0.3 mm 程度の隙間が開く。ここに接着剤を塗布し, 硬化させた。

以上の工程を, ^{55}Fe が電着されていないダミー品を用いた試験が実施済みであり, 手順は確立している。本試験では, 組み立てたホルダーを真空中に入れて問題ないことを確認した。



(a) 組み立て前のホルダー



(b) 線源



(c) 組み立て後のホルダー

図 7.1 線源とホルダー

7.1.3 EM システムによる測定

2012年9月10日に、京都大学宇宙線研究室内クリーンルームにあるEMモデルを用いて、キャリブレーションソースの強度および放射形状の測定を行った。SXI-Sのボンネット上部についているV100フランジ(図7.2)にキャリブレーションソース測定用フランジを取り付けた。ホルダー円筒の中心軸方向は、4素子全体のほぼ中央でCCD受光面と直交する。SXIシステムの駆動は、MIOボードからSpW2Gbitイーサネットケーブルを介してsxiDRsimを用いて行った。Charge Injectionを行っている。合計取得フレーム数はCCD1系、2系ともに2740フレームであった。取得データからイベント判定を行い、Grade0, 2, 3, 4, 6のみを抽出した。スペクトルを作成する時はCharge Injection行の前後それぞれ1行とHot pixelは除去した。また6.5.1節で行ったように、evenとoddのスペクトルを積算する際は、evenとoddのゲインが6 eV/chになるように補正した。

7.1.4 測定結果

カウントマップ

図7.3は5.9 keVのX線カウントイメージである。左から2系のsegment AB, CD, 1系のsegment AB, CDである。横線はCharge Injection行に対応している。線源が明るく主に当たっている1系のsegment ABと2系のsegment CDでは、読み出し口に近い領域で少し明るくなっている。これはフレームが撮像領域に転送される際に生じるout of time eventと考えられる。

カウントレート

各segmentごとにスペクトルを作成し、Mn K α 輝線をGaussianでフィットしてカウント数を求めた。CCD1系と2系で合計したカウント数は 3.96×10^6 countsであった(内訳はCCD1系で 2.30×10^6 counts, 2系で 1.66×10^6 counts)。露光時間で割ると1CCD素子あたりのカウントレートは、 3.96×10^6 counts/2CCD/ 1.21×10^4 sec = 165 counts/CCD/secとなる。実験時点における線源強度と、実験のジオメトリを考慮すると、この時のカウントレートは、 1×10^4 counts/CCD程度になると予想される。したがって、カウントレートは想定の2桁程度高い値となった。この結果を受けて、AmpTek社

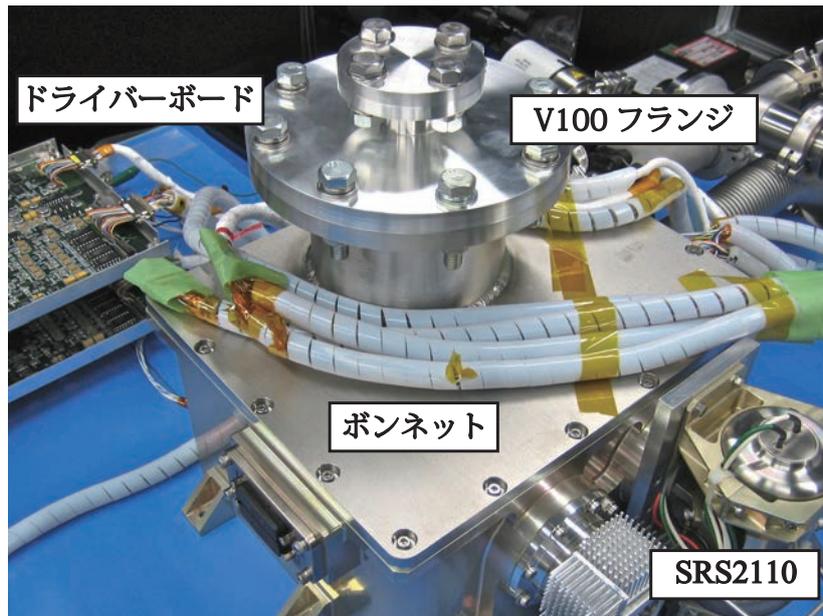


図 7.2 SXI-S のボンネット上部にある V100 フランジに取り付けた較正線源測定用フランジ

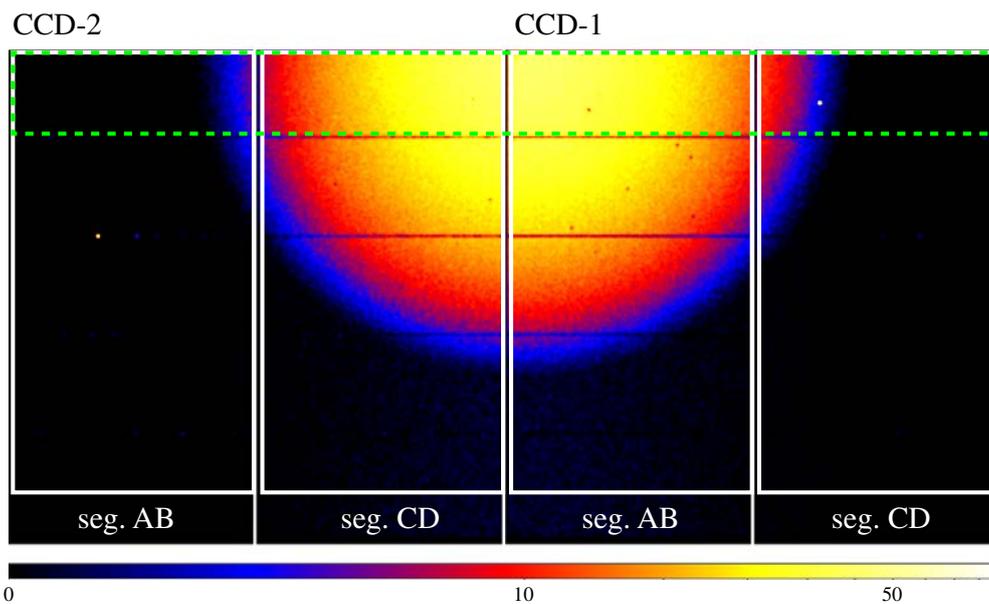


図 7.3 Mn $K\alpha$ (5.9 keV) の X 線カウントイメージ。横線は Charge Injection 行に対応している。白色で囲んだ領域からそれぞれスペクトルを、緑色破線で囲んだ領域から radial profile を作成した。

製の CdTe ダイオード検出器を用いた強度測定を行った。詳細は 6 章を参照のこと。

スペクトル

図 7.3 の白色四角で囲んだ領域からそれぞれスペクトルを作成した (図 7.4)。すべてのセグメントにおいて、950 から 1200 チャンネルにかけての 2 つの輝線はそれぞれエネルギーが 5.89, 6.49 keV であり Mn $K\alpha$ と $K\beta$ であることがわかる。また、250 チャンネルの輝線は 1.45 keV に相当し、Al の $K\alpha$ ラインがあると同定できる。これは鉄の K 殻特性輝線がアルミ製のフランジで光電吸収されて生じたものであると考えられる。線源が明るく当たっていた CCD1 系のセグメント AB および 2 系のセグメント CD で

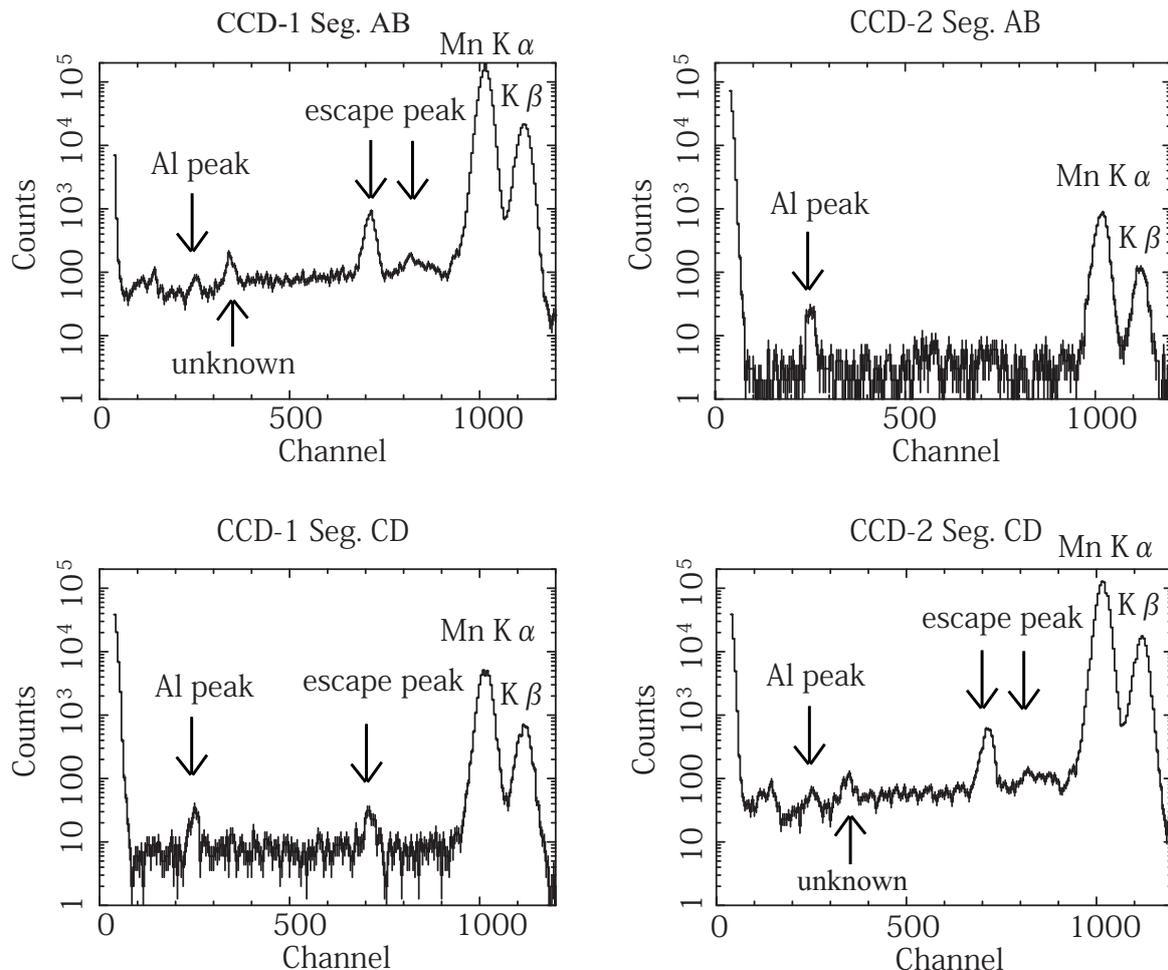


図 7.4 図 7.3 の白色四角で囲んだ領域からそれぞれ取得したスペクトル。(左上) CCD1 系セグメント AB, (左下) CCD1 系セグメント CD, (右上) CCD2 系セグメント AB, (右下) CCD2 系セグメント CD.

は、650 から 850 チャンネルの輝線は Mn $K\alpha$ と $K\beta$ ラインのエスケープピークであろう。さらに、300 から 400 チャンネルで見える輝線のようなものは、2.00 keV に相当する。そのエネルギーからリンからの K 殻特性 X 線のエネルギーと矛盾しない。Al の $K\alpha$ ラインと違って、Mn $K\alpha$ 輝線の強度と相関しており、外壁での散乱によるものではなく、キャリブレーションソースと同じところから発生していると考えられる。キャリブレーションソースの近くに存在する物質が Mn $K\alpha$ 線を光電吸収して特性 X 線を出している可能性があるが、さらなる検証が必要である。今後さらに詳しい調査を行って原因を明らかにする。

radial profile

図 7.5 の (左) と (右) はそれぞれ、図 7.3 の緑色破線で囲んだ領域で作成した CCD1 系と 2 系の radial profile である。この領域では、フレームが撮像領域に転送される際に生じる out of time event の影響はとても小さいと考えられる。図の黒色の点は Mn $K\alpha$ バンドのカウント数を数えたもので、青色の点はスペクトルから Al のラインを Gaussian+constant でフィットし見積もったカウント数である。1 系の segment CD と 2 系の AB では Al のラインがはっきりと見えなため、フィット結果から upper limit のみが求まった。Geant4 を用いてモンテカルロで計算した Mn $K\alpha$ と Al $K\alpha$ それぞれの profile (緑色の四角と水色の丸) と実際に得られた結果は矛盾しない。

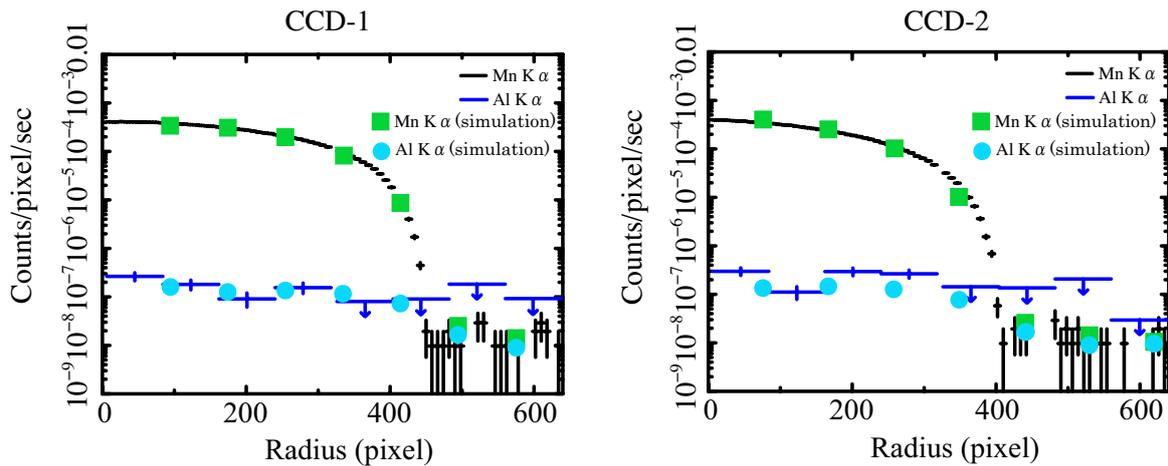


図 7.5 図 7.3 の緑色破線で囲んだ領域から作成した, CCD1 系 (左) と 2 系 (右) の X 線強度分布. 黒色と青色のデータ点はそれぞれ Mn K α と Al K α のカウントレート. 緑色の四角と水色の丸はそれぞれ Giant 4 を用いてシミュレーションした, Mn K α と Al K α の予測されるカウントレート.

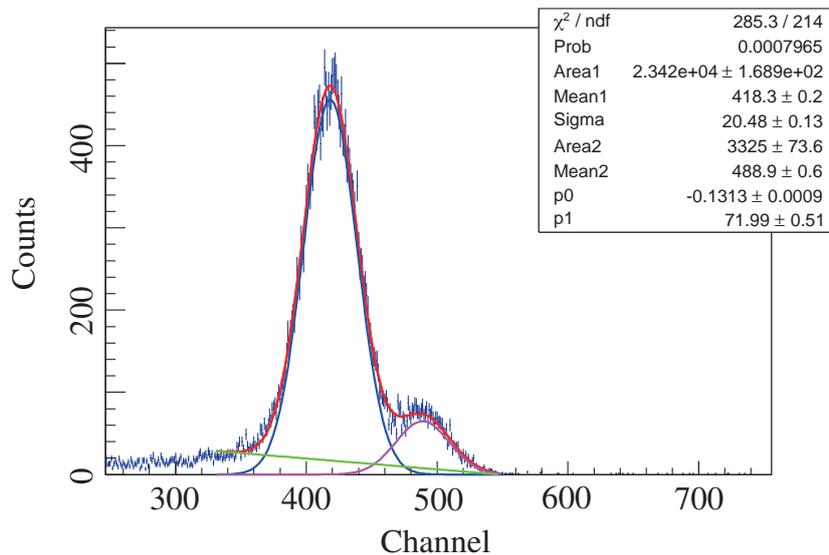


図 7.6 AmpTek 社製 CdTe ダイオード検出器で取得したスペクトル.

AmpTek CdTe ダイオード検出器を用いた強度測定

CCD を用いた強度測定によって, 線源強度が想定より 2 桁程度高いことがわかった. これを確認するために, AmpTek 社製の CdTe ダイオード検出器 XR-100T を用いて追試を行った. XR-100T で用いられている CdTe 素子の大きさは $5 \times 5 \text{ mm}^2$ で厚さは 1 mm である. CdTe 素子と線源との距離は 112 mm となるように配置した. 測定の結果得られたスペクトルを図 7.6 に示す. 積分時間は 429 sec である. このスペクトルを 2 つの Gaussian + constant でフィットした. その結果得られた Mn K α ピークのカウント数は 23922 counts であった. 厚さ 1 mm の CdTe 素子の 5.9 keV に対する QE は 100% である. また, 5.9 keV に対する CdTe XR-100T の 250 μm 厚の Be ウィンドウによる透過率と, 112 mm 厚の空気透過率はそれぞれ 89.0% および 70.7% である. これらを考慮して線源強度を求めると, CCD による測定とおおよそ一致する. したがって各線源が公称値の 100 倍の強度を持つことがわかった.

7.1.5 試験のまとめ

キャリブレーションソースのダミー品をホルダーに入れて組み立て、接着剤で固定した。真空槽に入れたが問題はなかった。ダミー品で確立した組み立て手順にしたがって線源を組み立て接着し、京都大学のEMシステムを用いて測定を行った。得られた radial profile はシミュレーション結果を矛盾しなかったが、線源の絶対強度は公称値より約 100 倍大きい値であった。この結果は AmpTek 社の CdTe ダイオード検出器を用いても確認することができた。

7.2 ヒーターによる温度制御試験

7.2.1 試験目的

SXI-S 内で、CCD 素子が載ったコールドプレートは機械式冷凍機 (SXI-1ST) を用いて冷却される。1ST は一定の電圧値で駆動するので、温度制御はコールドプレートにつけた 2 つのヒーターで行う。ヒーターは CCD に内蔵された白金抵抗で測定した値をもとに SXI-DE によって PID 制御され、ドライバーボードから電圧が供給される。本試験では、目標温度の $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で温度制御が動作するように、PID 制御の 3 つのパラメーターの最適値を見つける。またヒーターの on/off で読み出しノイズが変化しないことを確認する。

7.2.2 試験概要

PID 制御において、目標温度を T_o [$^\circ\text{C}$]、測定温度を $T(t)$ [$^\circ\text{C}$] とすると、ヒーターの電力 $P(t)$ [W] は、

$$P(t) = K_p(T_o - T(t)) + K_i \int_0^t (T_o - T(t')) dt' + K_d \frac{dT}{dt} \quad (7.1)$$

で表される。3 つのパラメーター、 K_p 、 K_i 、 K_d を調節することで、最適な応答を得る。2012 年 6 月 22 日に PID 温度制御ソフトを組み込んだ sxiDRsim を用い、最適なパラメーター値を調べるために、温度制御試験を行った。

まず CCD の温度を -120°C (T_{\min} と呼ぶ) で安定させたあと、目標温度を $T_{\min} + 8^\circ\text{C}$ ($= -120^\circ\text{C}$) に設定して PID 制御を開始した。その後パラメーターの値を変えながら、 -114°C と -112°C を交互に目標温度に設定し、その応答とヒーターの電流値から、パラメーターの最適値を調査した。表 7.1 に試験を行ったパラメーターの組み合わせを示す。

また 2012 年 8 月 15 日に、ヒーター制御を行った時と行っていない時で、ゲイン、エネルギー分解能、読み出しノイズが変化するかどうかを確かめるため、PID 温度制御ソフトを組み込んだ sxiDRsim を用いながら ^{55}Fe を照射しフレームデータを取得した (表 7.2)。Charge Injection は行っている。

7.2.3 試験結果

PID 制御パラメーターの最適化

図 7.7 は試験中の CCD1 系および 2 系の温度と、ヒーターに流れた電流のプロットである。一番初めに試したパラメーターは目標温度を初め -110°C にしていたが、途中で -112°C に変更している。図 7.8 に、各パラメーターにおいて目標温度に達したときの、CCD1 系および 2 系の温度と、ヒーターに流れた

表 7.1 ヒーターによる PID 制御で試したパラメーターの組み合わせ

K_p	K_i	K_d	目標温度 [°C]
10.0	0.2	0.01	-112 ¹
5.0	0.2	0.01	-114
20.0	0.2	0.01	-112
40.0	0.2	0.01	-114
10.0	0.5	0.01	-112
20.0	0.5	0.01	-114
20.0	1.0	0.01	-112
40.0	1.0	0.01	-114
20.0	0.1	0.01	-112
20.0	0.5	0.1	-114

¹ 初めは目標温度を -110°C に設定していたが、途中で -112°C へ変更した。

表 7.2 ヒーターによる温度制御でのノイズ調査のデータ諸元

	データ取得日	測定時間 (Frame 数)	CCD 温度
温度制御あり	2012 年 8 月 15 日	60 分間 (3420 フレーム)	-115 度
温度制御なし	2012 年 8 月 15 日	60 分間 (3260 フレーム)	-115 度

電流のプロットを示す。どのパラメーターでも、目標温度の $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で温度制御を行うことができた。しかしパラメーターによっては、ヒーターに流れる電流にばらつきが見られる。10 通りのパラメーターの組み合わせのうち、最も電流のばらつきが小さかったのは、 $(K_p, K_i, K_d) = (20, 0.2, 0.01)$ のときで、この値を最適値とする。

ヒーター制御によるノイズ

評価を簡単にするため、読み出し口に近い領域 (図 6.9 参照) の Grade 0 のみを解析した。表 7.3 はヒーターによる温度制御をする時としない時のそれぞれにおける、ゲイン、エネルギー分解能を、表 7.4 は読み出しノイズ、縦転送ノイズ、暗電流のゆらぎをまとめたものである。温度制御によるエネルギー分解能への影響はないと言える。ノイズは、温度制御をするほうがわずかに増える傾向があるが、その差は $< 1 e^-$ である。

温度制御試験のまとめ

ヒーターの PID 制御のパラメーターの最適値を見つけるため、10 通りのパラメーターの組み合わせで温度制御を行った。どの組み合わせにおいても目標温度の $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で温度制御が動作した。ヒーターに流れる電流のばらつきがもっとも小さい $(K_p, K_i, K_d) = (20, 0.2, 0.01)$ を最適値とした。またヒーターの制御がエネルギー分解能とノイズに与える影響を調べた結果、エネルギー分解能には影響を与えず、ノイズに与える影響は $< 1 e^-$ であることが分かった。

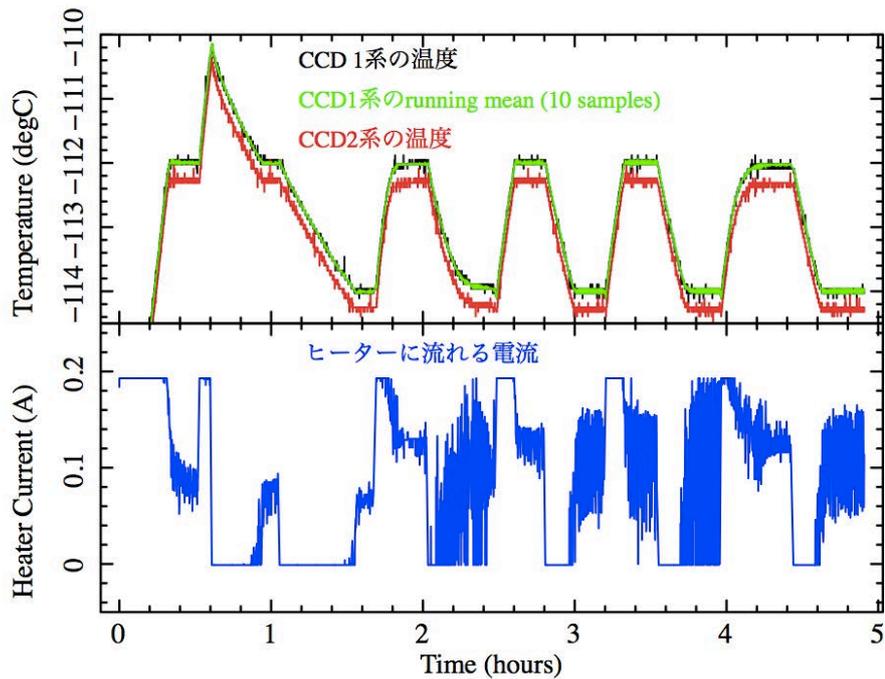


図 7.7 温度制御試験中の CCD1 系の温度と running mean, 2 系の温度, ヒーターに流れた電流

表 7.3 ヒーターによる温度制御をした時としない時のゲイン [eV/ch] とエネルギー分解能 (FWHM) [eV]

			温度制御あり		温度制御なし	
			ゲイン [eV/ch]	分解能 [eV]	ゲイン [eV/ch]	分解能 [eV]
1 系	AB	even	5.747	166	5.748	180
		odd	5.813	158	5.808	162
	CD	even	6.004	167	6.000	182
		odd	6.087	168	6.075	171
2 系	AB	even	5.741	163	5.732	159
		odd	5.818	150	5.822	153
	CD	even	5.950	155	5.950	155
		odd	6.054	154	6.048	154

表 7.4 ヒーターによる温度制御をした時としない時のノイズの比較

			温度制御あり			温度制御なし		
			読み出しノイズ [e ⁻]	縦転送ノイズ [e ⁻]	暗電流のゆらぎ [e ⁻]	読み出しノイズ [e ⁻]	縦転送ノイズ [e ⁻]	暗電流のゆらぎ [e ⁻]
1 系	AB	even	7.57	2.99	< 1	6.71	2.63	< 1
		odd	6.86	1.35	< 1	6.49	1.37	< 1
	CD	even	7.22	3.50	< 1	6.97	3.81	< 1
		odd	7.44	1.27	< 1	6.87	-	< 1
2 系	AB	even	7.86	1.72	< 1	7.07	2.29	< 1
		odd	8.60	1.95	< 1	7.03	1.85	< 1
	CD	even	7.22	3.23	< 1	7.24	3.06	< 1
		odd	7.98	1.88	< 1	7.09	1.84	< 1

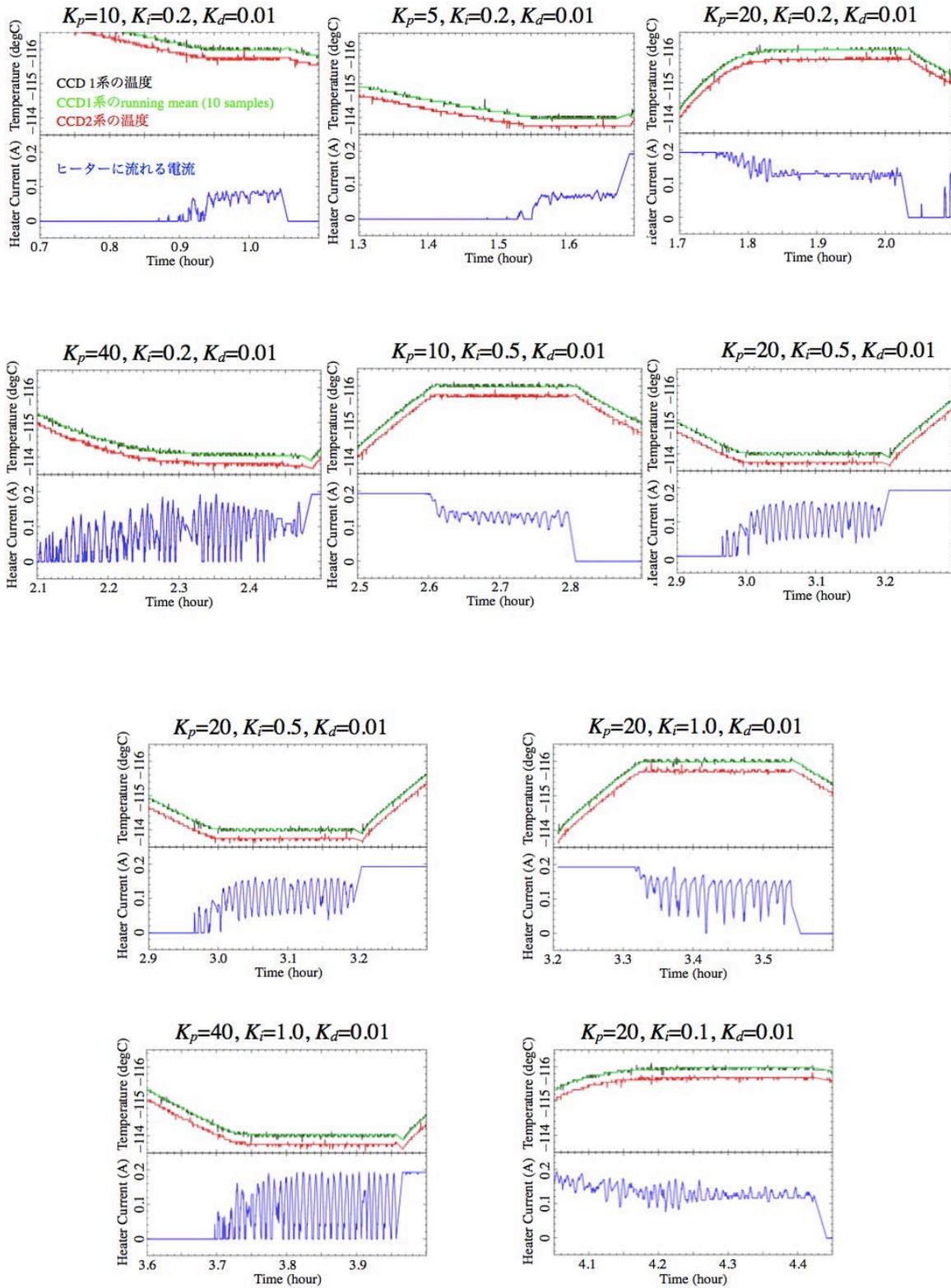


図 7.8 各パラメーターでの CCD1 系の温度と running mean, 2 系の温度, ヒーターに流れた電流

第 8 章

CCD 素子のエンジニアリングモデルによるキャリブレーション準備実験

8.1 目的

これまでの章で EM システムのデータ解析により性能（エネルギー分解能）が向上することがわかった。しかしながら、駆動電圧などの最適化は未検証である。そこで、動作条件の最適化など性能向上のための試験、および多色 X 線によるキャリブレーション方法の確立、を目的として、新たに試験用カメラシステムを構築する。その結果をもとに、現在開発中の FM カメラシステムに適用し、地上キャリブレーションの効率化、および機上較正で必要な項目の選定を行う。本修士論文では、(1) カメラシステムの立ち上げ、(2) キャリブレーション用に試作した多色 X 線発生装置による基礎実験を行った。

8.2 カメラシステム（京都システム）の立ち上げ

8.2.1 システムの構成

本章で立ち上げるカメラシステムを「京都システム」と名付ける。試験の利便性や、クリーンルームは FM 品の試験に使用することから、クリーンルーム外で構築した。

京都システムでは、動作条件の最適化など性能向上のための試験を行いたいので、性能に影響するエレクトロニクス（ビデオボード、ドライバーボード）は FM と同等品（BBM2）を用いる。

真空チャンバ内には 2 素子を格納し（図 8.1）、ビデオボードは真空チャンバーの外に置く。本章で用いる素子（EM02）は開発初期に作ったもので性能が低い。しかしここでは、システム立ち上げや多色 X 線発生装置の基礎実験が目的なので、性能が低くても問題はない。本章では 1 素子のみ撮像に用いた。使わない 1 素子と接続した FPC の先のコネクタには静電防止のため、ショートコネクタを取り付ける。

図 8.2 にシステムの外観を示す。真空チャンバーには真空ポンプにつながる排気パイプと、コールドヘッド、および CCD とビデオボードを接続するためのケーブルがつながっている。ビデオボードはさらにドライバーボードと MIO ボードに接続している。パソコンで MIO ボードと通信するため、SpWtoGbE を MIO ボードにつなぐ。使用した機器の個体名称を表 8.1 にまとめた。

エレクトロニクス系の電源と冷却系の電源は、電源ラインからノイズが混入しないよう、AC100V のコンセントからノイズカットトランスを介して供給した。また真空系や冷却系からのノイズがエレクトロニクスにのらないよう、エレクトロニクス系のグラウンドから分離させた。

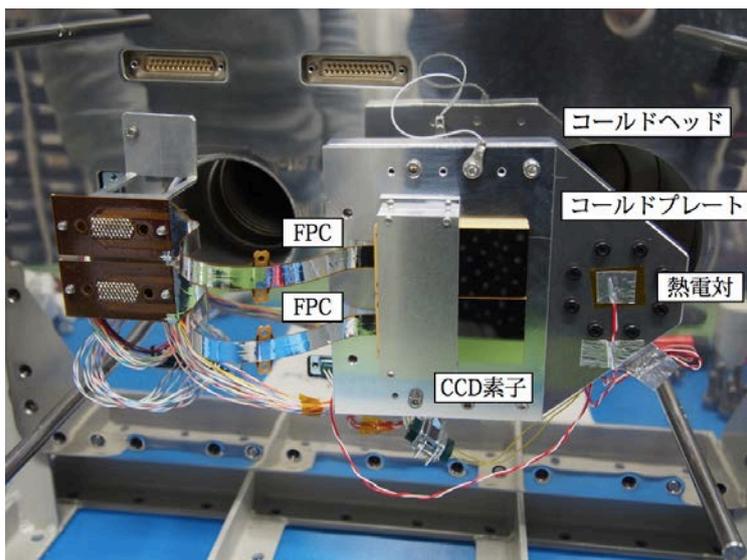


図 8.1 真空チャンバー内の様子

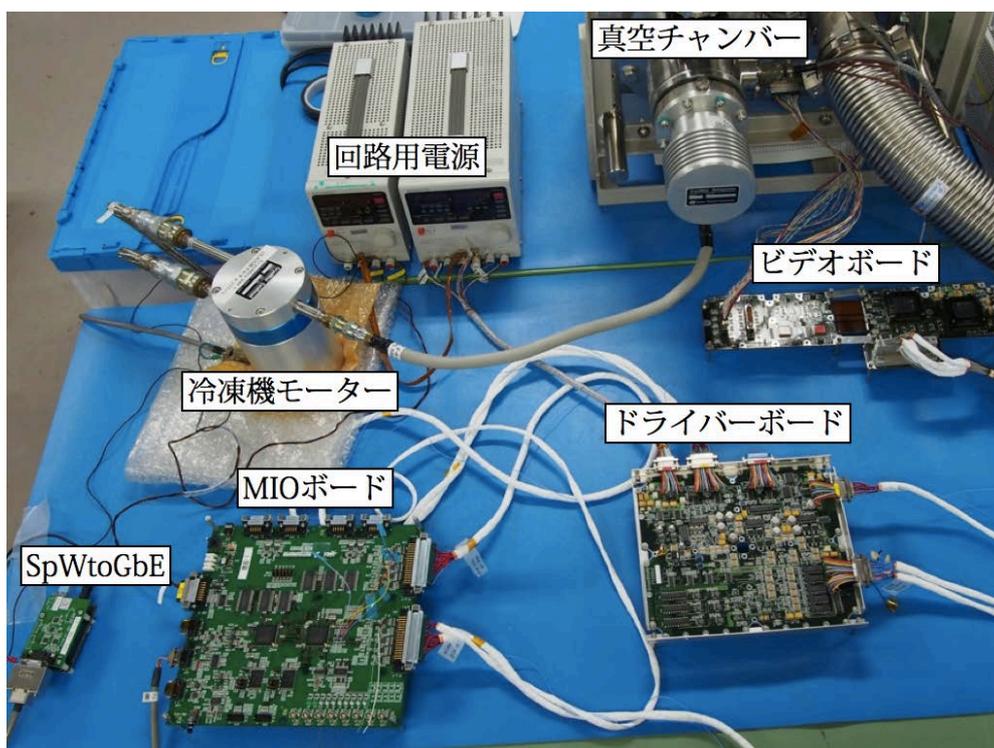


図 8.2 キャリブレーション準備実験のシステム外観

表 8.1 京都システムでの使用機器. 2系は使用していないため、ビデオボードとドライバーボードを接続していない。

	CCD	ビデオボード	ドライバーボード
1系	EM02-01 (SN=CM1-3-02-CP01-2)	Video Board-BBM2 (SN=NE-90102A)	BBM2 (SN=12)
2系	EM02-02 (SN=CM1-3-08-CP01-2)	—	—

8.2.2 真空系と冷却系

真空チャンバーには VG100 のフランジが取り付けられるようになっており (図 8.3) , Be 窓付きフランジ (図 8.4) や α 線による多色 X 線発生装置 (8.4 節, 図 8.7(c) 参照) を取り付け. CCD は撮像領域が VG100 フランジの中心軸上にくるように, コールドプレート上に取り付ける (図 8.3 は真空チャンバーから VG100 フランジを外したところ).

真空ポンプには, ロータリーポンプ M2005 (アルカテル) とターボ分子ポンプ TH162 (大阪真空機器製作所) を用いた. チャンバー内の真空度は, 常温で 2×10^{-6} Torr に, CCD 素子の温度を -120°C に冷却したときは 3×10^{-7} Torr に到達する.

CCD の冷却にはクライオミニコンプレッサー CA101 型とクライオミニパルスチューブ冷凍機 P050 型 (いずれも岩谷瓦斯) を用いた. 真空チャンバー内に冷凍機のコールドヘッドを設置し, コールドプレートを通じて CCD を冷却する.

ヒーターには HK 913E (ミンコ) を用い, コールドプレート (CCD を取り付け面と反対の面) に取り付ける. 輻射熱入力を避けるためにヒーターをアルミ粘着テープ スコッチ 425 (3M) で覆う. 直流電源 PA70-1A (KENWOOD) とデジタル指示調節計 DB2000 (チノー) を用いて, ヒーターへの電圧供給と出力の PID 制御を行う. 指示調節計はコールドプレートに取り付けた熱電対で測定した温度をもとに制御を行う. CCD の温度は CCD に内蔵された白金抵抗温度計で測定し, sxiDRsim を用いて取得する.

またコールドヘッドにも熱電対を取り付け (図 8.1), 温度をデジタルマルチ温度計 7563 (横河電機) で測定した.

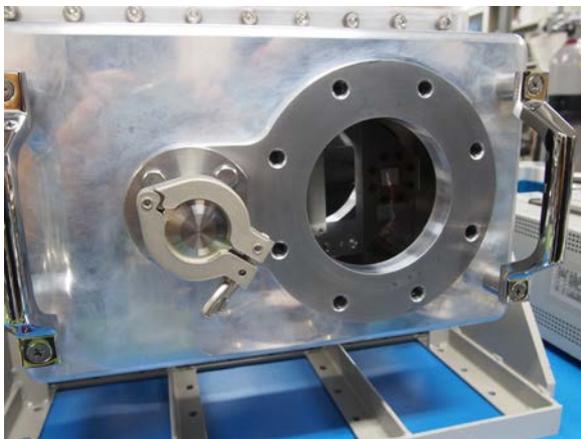


図 8.3 真空チャンバーから VG100 フランジを外した様子. CCD の撮像領域が見えている.

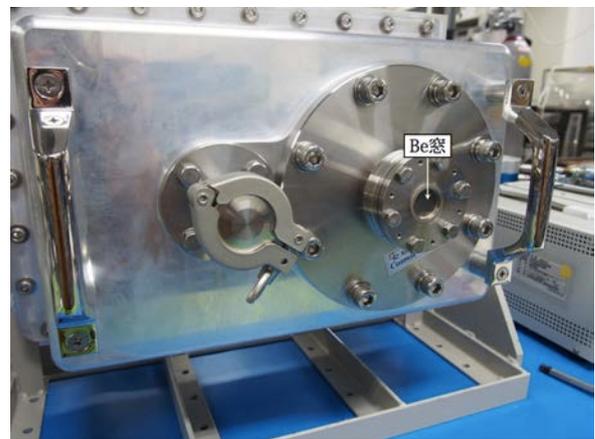


図 8.4 VG100 フランジに取り付けた Be 窓

8.2.3 電荷注入機能の最適化

X 線データ取得に先立ち, 電荷注入機能の駆動電圧を最適化した. すでに第 6 章で 2 種類の電圧 ISVLO と IG2V を調整することで注入電荷量と漏れだしの調整が可能であることを示した.

本試験では $\text{ISVLO} = (-10.7 \sim -6.3 \text{ V})$ の間で調査した (図 8.5). その結果, $\text{ISVLO} < -8.2 \text{ V}$ では電荷が注入できないことが分かった. しかし, $\text{ISVLO} = -8.2 \text{ V}$ の場合でも電荷は一列に収めることができず, 隣の列に漏れてしまっている. そこで, IG2V を変化させたところ, $\text{IG2V} = -1.3 \text{ V}$ とすると注入電荷を

一列に収めることができることがわかった。したがって本試験では ISVLO=8.2 V, IG2V= -1.3 V で電荷注入を行うこととする。

図 8.9 は ^{55}Fe 照射して得たイベントデータから Grade0 のみを抽出して作成したスタッキングプロットである。図 8.9 左は縦転送方向の波高値分布である。2 本の濃い部分がそれぞれ、5.9 keV と 6.5 keV の X 線 (Mn $K\alpha$ と $K\beta$) に対応する。Charge Injection 行で波高値がのこぎり状になっていることがわかる。すなわち、Charge Injection により CTI が回復していることを示している。しかし、Charge Injection 行から離れるとまた悪化していることから読み出し口からの距離に対応したゲインの補正が必要である。

8.3 基本性能の評価

8.3.1 フレームイメージ

図 8.6 は X 線を照射せずに取得したフレームイメージである。横方向の筋は電荷注入列に対応しており、一列に収まっていることが分かる。一方で、SegmentAB では縦に 3 本の筋が見えるが、これは電荷注入機能とは別の要因で電荷で埋まってしまっているものである。これはその列の中に電荷を大量に生じさせるデッドピクセルが存在し、縦転送の間に列を電荷で埋め尽くしてしまうことが原因である (デッドコラム)。SegmentCD にはこのようなデッドコラムは見られない。

8.3.2 読み出しおよび縦転送ノイズ

表 8.2 ノイズの評価

			読み出しノイズ	縦転送ノイズ	暗電流ゆらぎ
			[e^-]	[e^-]	[e^-]
Segment	AB	even	23.0	5.5	< 1
		odd	22.8	2.7	< 1
	CD	even	20.6	2.5	< 1
		odd	20.6	1.2	< 1

6.2 節と同様に読み出しおよび縦転送に伴うノイズの評価を行った。その結果を表 8.2 に示す。読み出しノイズは EM システムのもの ($\sim 6-8 e^-$) より 3 倍程度大きい。また縦転送ノイズは SegmentAB では $\sim 3-5 e^-$ であり、EM システムの値 $\sim 1.5-2.2 e^-$ よりも高い。SegmentCD では EM システムと同程度である。

以上から、SegmentCD に比べて SegmentAB ではデッドコラムがあることと、ノイズが高いことから、以後の試験では性能の良い SegmentCD のみを使用することにする。

8.4 α 線を用いた多色 X 線発生装置による基礎実験

8.4.1 α 線を用いた多色 X 線発生装置の製作

FM では多色 X 線によるキャリブレーションが必要である。2 keV 以上の X 線を発生させる場合は 2 次 X 線発生装置を用いることができるが、それよりエネルギーが低くなると蛍光収率が小さくなる。その結果 1 次 X 線のトムソン散乱成分が相対的に増えてしまい、きれいな輝線が得られない。SXI のエネル

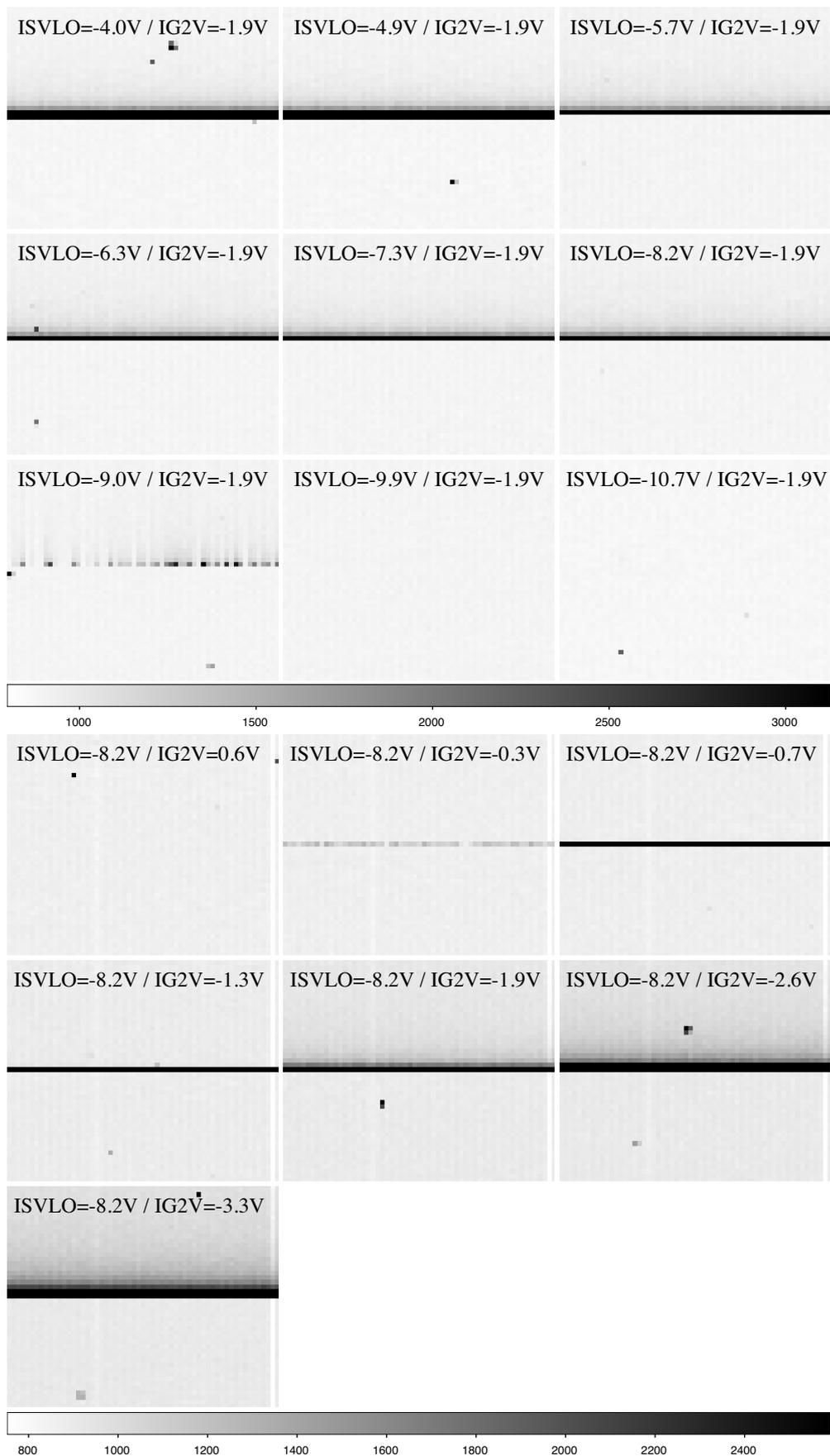


図 8.5 電荷注入機能の最適電圧の調査. 上図は IG2V = -1.9 V で固定し, ISVLO を変化させた時の Charge Injection 行付近のフレームイメージ. ISVLO < -8.2 V では十分に電荷が入らないことがわかる. 下図は ISVLO = -8.2 V で固定し, IG2V を -1.3 - 3.3 V で変化させた時の Charge Injection 行付近のフレームイメージ. IG2V < -1.9 V では電荷が 1 列に収めることができない.

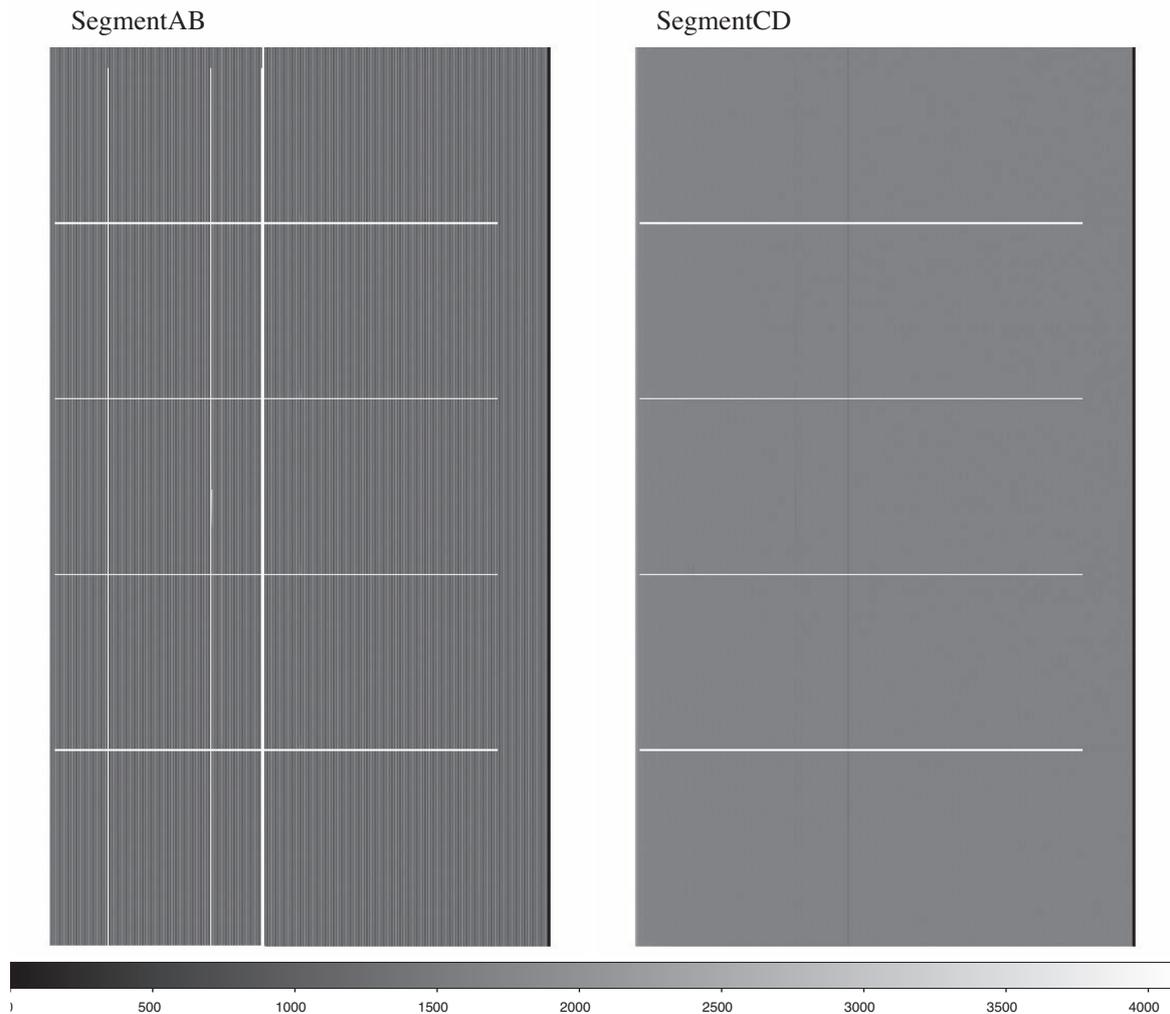
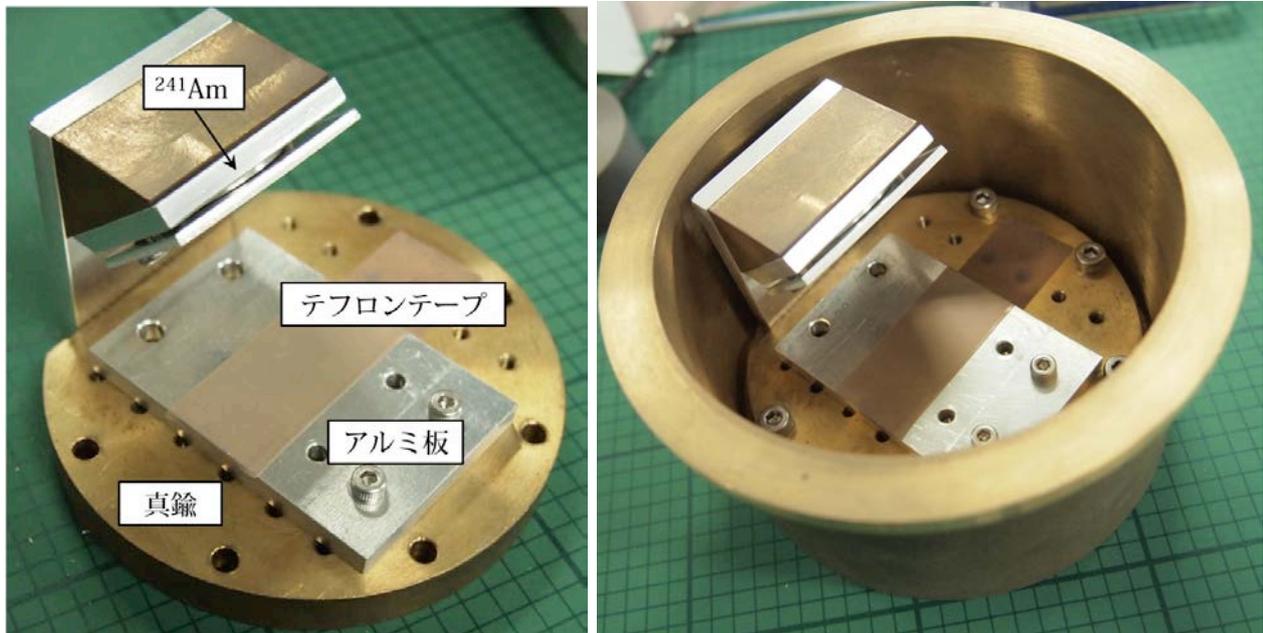


図 8.6 X 線を照射せずに取得したフレームイメージ。左が SegmentAB, 右が SegmentCD のものである。横方向の 4 本の電荷注入列の他に SegmentAB には多量の電荷で埋められた縦の筋 (デッドコラム) が 3 本見える。一方で SegmentCD では見られない。

ギー範囲を考えると, 2 keV 以下の X 線も発生させてキャリブレーションを行いたい。そこで我々は α 線を用いた多色 X 線発生装置を試作した。

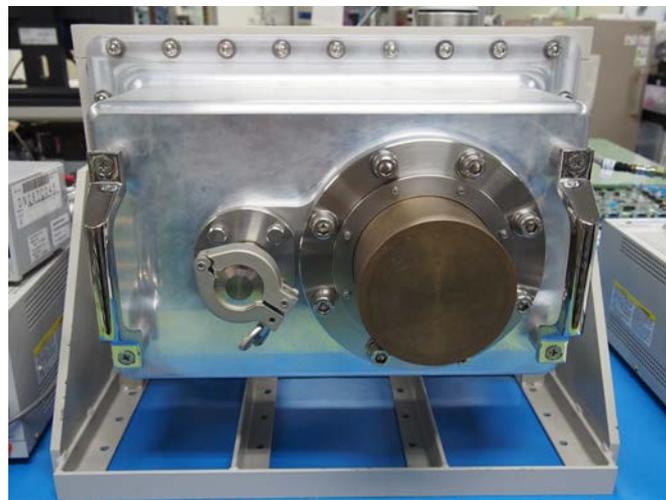
多色 X 線発生装置は図 8.7(a) のように, ^{241}Am からの α 線 (5.49 MeV の) をターゲットに照射して X 線を生じさせる。低エネルギー X 線を生じさせるため, ターゲットにはアルミ板 (厚さ 5 mm) とテフロンテープ (ふっ素樹脂粘着テープニトフロン No.903UL 厚さ 0.18 mm, 日東電工) を用いた。Al と F の $K\alpha$ 線のエネルギーはそれぞれ, 1.48 keV および 0.68 keV である。またターゲットの土台には真鍮でできているため, Cu と Zn の $K\alpha$ 線 (エネルギーはそれぞれ 8.05 keV と 8.64 keV) も発生する。また ^{241}Am からは α 線の他に 59.5keV, 13.9keV の X 線も照射される。

多色 X 線発生装置は真鍮でできた帽子型のジグに固定し (図 8.7(b)), ジグを VG100 のフランジに固定して, 真空チャンバーに取り付ける (図 8.7(c))。



(a) 多色 X 線装置に取り付けたターゲット

(b) 多色 X 線装置を帽子型のジグに取り付ける



(c) 真空チャンバーに取り付けた多色 X 線発生装置

図 8.7 多色 X 線発生装置. ^{241}Am からターゲットに α 線を照射して特性 X 線を発生させる. Al と F の $K\alpha$ 線 (エネルギーはそれぞれ 1.48 keV, 0.68 keV) を発生させるため, ターゲットにはアルミ板とテフロンテープを用いた. また土台の真鍮から, Cu と Zn の $K\alpha$ 線 (エネルギーはそれぞれ 8.05 keV と 8.64 keV) が発生する. 多色 X 線発生装置は帽子型のジグに取り付け, ジグは VG フランジに固定して真空チャンバーに取り付ける

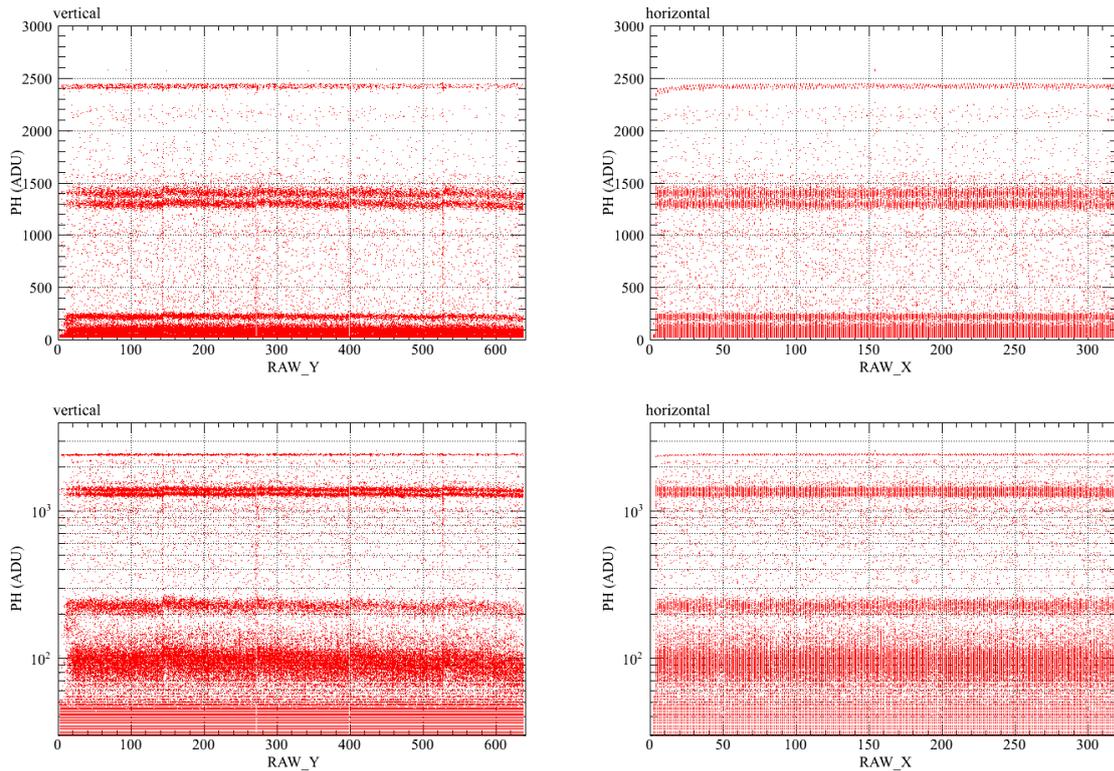


図 8.8 X 線発生装置を使用したときのスタッキングプロット (SegmentCD). 左上は縦転送方向と平行の波高値分布. 左下は同じ図であるが、縦軸を log 表示にしたもの. 右上はそれとは垂直な方向の波高値分布. 右下は同じ図であるが、縦軸を log 表示にしたもの.

8.4.2 多色 X 線発生装置による照射実験

X 線発生装置を用いて X 線照射しながら 180 分間 (2430 フレーム) 撮像を行った. 図 8.9 は X 線発生装置を使用した Grade0 のイベントデータから作成したスタッキングプロットである. 100, 230, 1400, および 1500 ch 付近に 4 つの輝線が見える. X 線発生装置の構成から、これらはそれぞれ, F, Al, Cu, Zn からの K 殻特性 X 線であると考えられる.

8.5 CCD の性能評価

本実験で用いた CCD 素子の性能が低いのはおもに CTI が悪いためと考えられる. 一方, ゲインやその線形性といった性能特性は, アンプで決まるため CTI とは関係がなく, 本実験で用いている素子でも十分検証できる. そこで本節では, CTI を測定して CTI がエネルギーがエネルギーに依存するかを調査する. また多色 X 線を照射した結果から, ゲインに線形性があるかどうか調査する.

8.5.1 CTI の測定

図 8.8 は読み出し口から遠いほど波高値が下がっている. これから F 輝線 (PH \sim 100 ch) について CTI を求めると $\sim 5 \times 10^{-4}$ 転送回数 $^{-1}$ であった. 一方で, 図 8.9 の 5.9 keV の X 線イベントの波高値分布の傾きから求めた CTI は $\sim 1 \times 10^{-4}$ 転送回数 $^{-1}$ である.

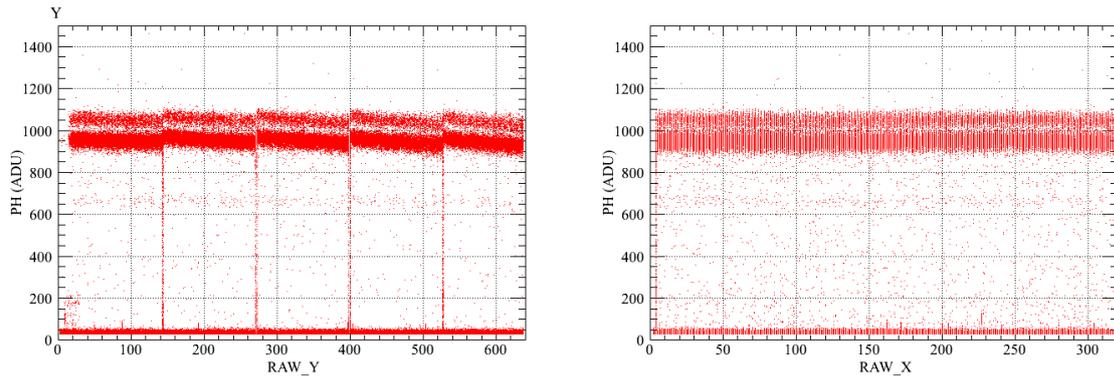


図 8.9 ^{55}Fe を照射した時のスタッキングプロット (SegmentCD). 左は縦転送方向と平行の波高値分布. 右はそれとは垂直な方向の波高値分布. 左図から Charge Injection した箇所では波高値が高くなっていることがわかる. 一方で横転送では波高値は一定である.

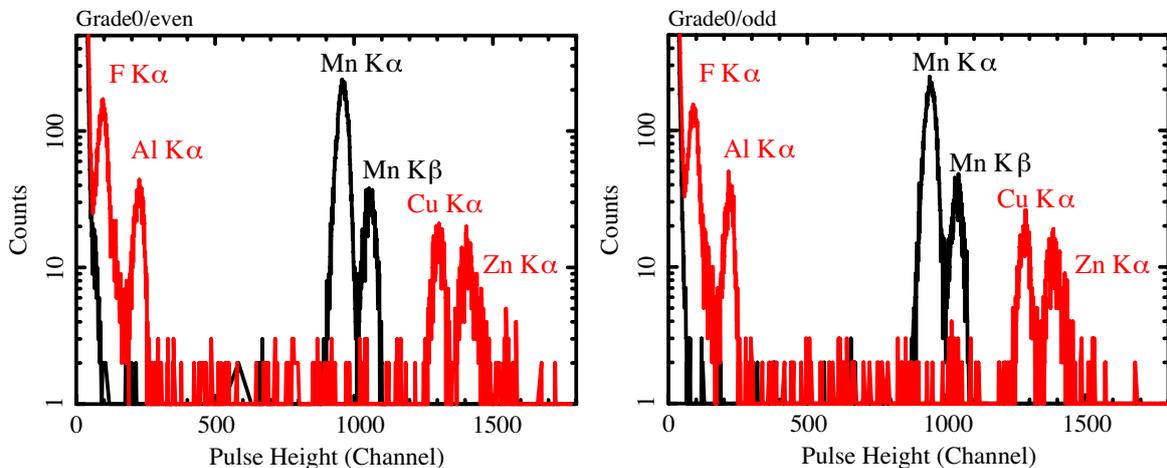


図 8.10 ^{55}Fe および X 線発生装置による X 線照射で得られた Grade0 のスペクトル (左: even, 右: odd).

5.9 keV (PH ~ 1000 ch) と比べると ~ 5 倍大きく, CTI が波高値に依存していることがわかる. これまでの X 線 CCD 検出器でも, 波高値に依存することが報告されている. 例えば, すざく衛星搭載 XIS では, $\text{CTI} \propto \text{PH}^{-\beta}$, $\beta = 0-0.5$ と測定されている [12]. 本実験で得られたデータから概算すると $\beta \sim 0.7$ であり, XIS の依存性とは少し異なる.

本試験では CTI の補正が主目的ではないが, CTI に関する調査は今後の課題である. 以後の解析では CTI による影響を低減するために, 読み出し口に近い領域 RAWY = 0-140 に限定することにする.

8.5.2 ゲインとエネルギー分解能

^{55}Fe と X 線発生装置を照射して得られたデータから Grade0 のみを抽出し, スペクトルを作成した. even と odd でゲインが異なるため, 別々に表示している. 図 8.10 の黒データは ^{55}Fe を照射した時のスペクトルである. 2 本の輝線はそれぞれ, Mn K α (5.895 keV) と K β (6.490 keV) である. また, X 線発生装置で得られたスペクトルを赤色で示した. 前節のスタッキングプロットでも見られたように, 波高値が 100, 220, 1300, 1400 ch 付近に輝線が見られる. これらはそれぞれ F, Al, Cu, Zn の K 殻特性 X 線に対応する.

表 8.3 Grade0 スペクトルの波高値

輝線	エネルギー (eV)	even		odd	
		波高値 (ch)	幅 (1σ)	波高値 (ch)	幅 (1σ)
F Kα	676.8	96.17±0.25	12.35±0.29	91.21±0.45	13.06±0.49
Al Kα	1486	226.68±0.70	14.00±0.76	220.18±0.76	12.90±0.84
Mn Kα	5895	959.47±0.14	16.96±0.14	943.75±0.15	17.49±0.15
Mn Kβ	6490	1056.88±0.97	18.75±0.98	1039.59±0.90	17.90±0.91
Cu Kα	8038	1304.91±0.67	20.24±0.70	1282.77±0.51	18.09±0.52
Zn Kα	8627	1408.71±1.00	26.25±1.06	1384.54±0.89	24.95±0.92

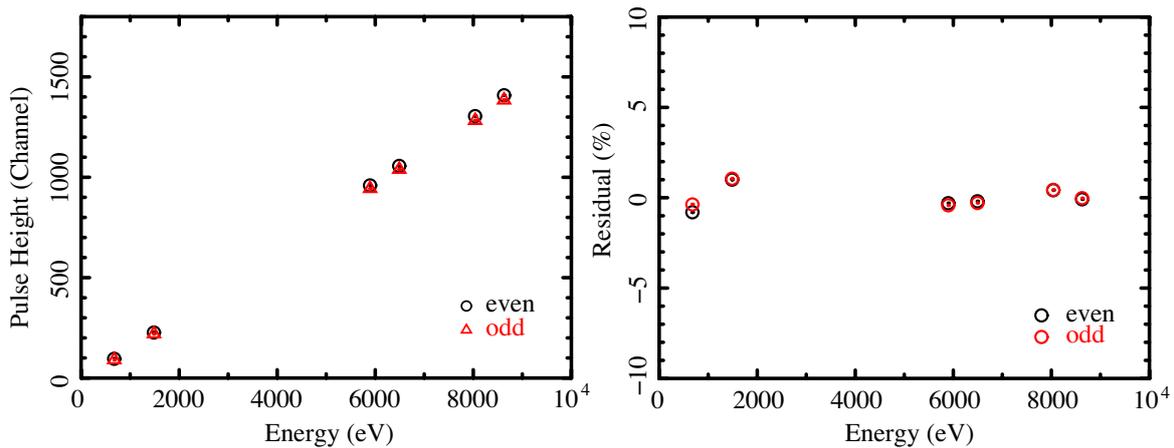


図 8.11 左図は X 線発生装置, および ⁵⁵Fe の照射で得られた Grade0 のイベントの輝線のエネルギーと波高値の関係性. 黒は even, 赤は odd で得られたデータ点を示す. 右図は一次関数で表した時のデータとモデルとの差を示したもの.

Grade 0 スペクトルから各輝線の波高値と幅 (1σ) を求めた結果を表 8.3 にまとめた. 図 8.11 上にエネルギーと波高値の関係をプロットしたところ, 一次関数で良く再現できることが分かる. 定量的に評価するために, 一次関数でフィットしたところ,

$$PH = 6.059(\pm 0.017) \times E + 98.8(\pm 16.7)(\text{eV}) \quad (\text{even}) \quad (8.1)$$

$$PH = 6.147(\pm 0.020) \times E + 118.2(\pm 19.2)(\text{eV}) \quad (\text{odd}) \quad (8.2)$$

のように係数を求めることができた. 図 8.11 に求めたモデルとデータとの residual を示した. この一次関数モデルは各エネルギー点で 1% 以下の再現性があることがわかった.

8.5.3 エネルギー分解能

エネルギー分解能は

$$FWHM (\text{eV}) = W \times \sqrt{8 \ln 2} \times \sqrt{\sigma^2 + F \frac{E}{W}} \quad (8.3)$$

で表される. ここで Si の平均電離エネルギー $W=3.65$ eV, 読み出しノイズ σ , ファノ因子 $F=0.12$, X 線のエネルギー E (eV) である. 図 8.12 の実線で読み出しノイズ $\sigma = 20.6 \text{ e}^-$ での計算値をプロットした. この予想モデルよりも実データの方が分解能が大きくなっている. 6 keV でモデルが FWHM ~ 200 eV なのに対し, 測定データは ~ 240 eV である. およそ 100–150 eV の余分なノイズが存在することになる.

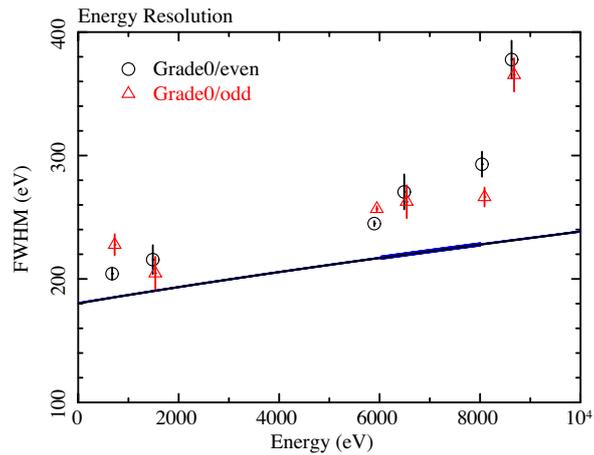


図 8.12 エネルギー分解能.

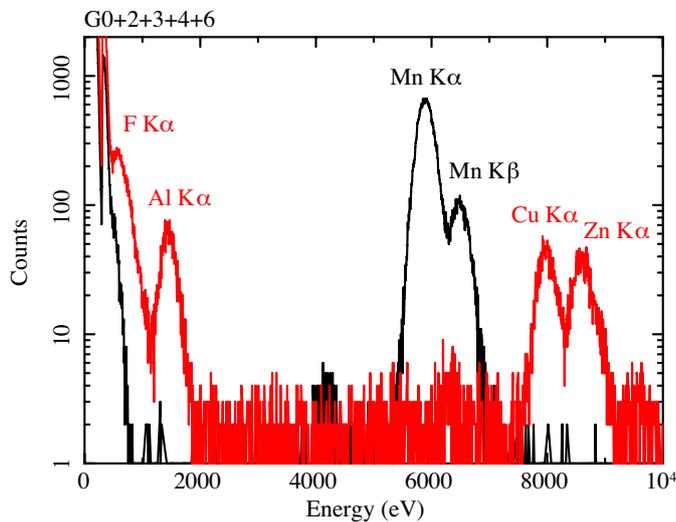


図 8.13 Grade0+2+3+4+6 の積算スペクトル.

読み出しノイズの他に分解能に寄与する要因としては、縦転送や暗電流によるノイズ、あるいは CTI による影響が考えられる。縦転送と暗電流によるノイズは数 e^- 程度なので、これほどの分解能の違いには寄与しない。6 keV では CTI $\sim 1 \times 10^{-4}$ 転送回数 $^{-1}$ なので、100 回転送をする間に平均しておよそ 1% の電荷を失うことになる。これは 60 eV 分に相当するが、これだけではモデルとの不一致は説明ができない。第 6 章で評価したように、split threshold 以下の電荷雲の広がりを検出できていないことも考えられる。しかし、本データ処理では Split threshold を 18 ch = 30 e^- に設定しており、これよりも Split threshold を下げると、読み出しノイズをひろうことになってしまうため、これ以上の検討は行わない。

8.6 多色 X 線発生装置の性能評価

ここまでは Grade0 のみを扱ってきたが、X 線発生装置からの X 線強度を測るために、全 X 線 Grade (0, 2, 3, 4, 6) でスペクトルを作成する (図 8.13)。6.5.1 節の方法に従って、even-odd 間のゲイン補正を行い、エネルギーに直した。広がったイベント (Grade2, 3, 4, 6) についてはゼロピークの幅が広がってし

表 8.4 ゲイン補正後の Grade0+2+3+4+6 スペクトル

輝線	エネルギー		エネルギー分解能 FWHM (eV)	強度	
	理論値 (eV)	測定値 (eV)		カウント	カウントレート ¹
F K α	676.8	676.8 (固定)	300 (固定)	18500	15
Al K α	1486	1446 \pm 18	300 \pm 56	3336	3
Mn K α	5895	5894 \pm 1	325 \pm 2	37800	100
Mn K β	6490	6470 \pm 5	401 \pm 12	7170	20
Cu K α	8038	7976 \pm 3	332 \pm 6	2680	3
Zn K α	8627	8602 \pm 4	423 \pm 10	2774	3

¹ カウント/Segment/(フレーム =4 sec)

まい、一番低いエネルギーの F K α 輝線にまでかかってしまっている。各輝線のエネルギー中心値と幅、強度は表 8.4 のように測定することができた。

X 線イベントデータと取得した領域は RAWX=10-309, RAWY=0-639 の $300 \times 640 = 1.92 \times 10^5$ ピクセルである。また、X 線発生装置の照射時間は 3 時間、2430 フレームであり、⁵⁵Fe は 1 時間、800 フレームであった。従って、CCD 素子 1segment あたりの X 線の強度は 3-15 カウント/フレームであることがわかった。

第9章

まとめ

本研究では, ASTRO-H 搭載 SXI の試験および性能評価を行った。得られた結果は以下の通りである。

- CCD とビデオボードを接続するための FPC (flexible printed circuit) が真空かつ低温環境下において問題なく動作することを試験で確かめた。我々は -130°C から $+70^{\circ}\text{C}$ までの熱サイクルを 40 回かけても FPC が問題なく動くことを確認した。さらに、液体窒素を用いた熱衝撃試験も実施したが、FPC に異常は見られなかった。
- SXI のエンジニアリングモデル (EM) の動作試験および性能評価を行なった。読み出しノイズ (rms) は目標値の $7e^{-}$ を達成することを確認した。さらに、SXI ではヒーターを用いた温度制御が目標温度の $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ で安定動作することを検証した。ヒーターへのフィードバック制御が与える読み出しノイズへの影響は $1e^{-}$ 以下であることを確認した。電荷注入機能の動作も確認し、電荷転送効率の向上に有効であることを検証した。さらに 5.9 keV の X 線を照射した結果、単一ピクセル内に収まる X 線イベントについて、エネルギー分解能が目標値の 150 eV (FWHM) を達成した。全 X 線イベントでの解析方法を改良した結果、エネルギー分解能 $160\text{--}170\text{ eV}$ を得た、要求値の 200 eV を満足することを確認した。
- SXI カメラシステムの性能向上のための試験を行う京都システムの立ち上げ、およびフライトモデル (FM) のキャリブレーションのための多色 X 線発生装置の製作と動作検証を行った。京都システムが安定動作しデータ取得ができることを確認し、電荷注入もうまく機能することを確認した。 α 線を用いた多色 X 線発生装置からは $0.7, 1.5, 8.0, 8.6\text{ keV}$ の 4 種類の輝線が放射されていることを確認し、その強度が $3\text{--}10$ (カウント/1 素子/4 秒) であることを測定した。また、この X 線発生装置を用いて得られたデータから、エネルギー較正およびエネルギー分解能の測定を行い、FM のためのキャリブレーションに使用可能であることを検証した。

謝辞

修士論文の執筆はもとより研究・大学生活全てにおいて、たくさんの方々に支えられてきました。この場を借りて感謝の意を述べさせていただきます。

鶴先生には、研究や実験の方針や進め方、実験結果の考察など、さまざまにご指導いただきました。田中さんは、SXI システムに関することや、実験のセットアップ、解析ツールに関して分からないことがあれば、丁寧に教えてくださいました。内田さんは、実験計画の立て方から論理的な文章の書き方にいたるまで、良きお手本をたくさん示してくださいました。また先輩、後輩の大学院生の方々にもお世話になりました。特に中島さんには、実験をする際に小さなことでもたくさん相談にのっていただきました。

さらに ASTRO-H/SXI チームの皆さま、特に常深先生、林田先生、穴吹さん、中嶋さんはじめ阪大の皆さまには EM システムを構築するに当たって、非常にお世話になりました。

最後に、研究面でも生活面でも全面的に協力し支えてくれる夫に感謝します。

ありがとうございました。

参考文献

- [1] Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., & Rossi, B. B. 1962, *Physical Review Letters*, 9, 439
- [2] ASTRO-H Quick Reference, <http://astro-h.isas.jaxa.jp/doc/ahqr.pdf>
- [3] 高木 慎一郎. 「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開発」 京都大学 修士論文 (2002)
- [4] 澤田 真理. 「次期 X 線天文衛星 Astro-H 搭載 CCD カメラ SXI の軌道上バックグラウンドの評価およびカメラボディの設計」 京都大学 修士論文 (2008)
- [5] Hiraga, J., Tsunemi, H., & Miyata, E. 2001, *Japanese Journal of Applied Physics*, 40, 1493
- [6] Kimmel, N., Hiraga, & Strüder, L. 2006, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 568, 128
- [7] I. S. McLean. “*Electronic Imaging in Astronomy*”, Praxis Publishing (1997)
- [8] I. S. McLean. 1981, in *proc. SPIE* 290, 155
- [9] J.Janesick, T.Elliott, S.Collins, T.Daud, D.Campbell, and A.Dingizian. in *proc. SPIE* 597, 364
- [10] 幸村孝由 ほか. 「X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) の紫外線対策」 2009 年日本天文学会春季年会スライド
- [11] Watanabe, T., et al. 2009. in *proc. “The Energetic Cosmos-from Suzaku to ASTRO-H”*, 418
- [12] Ozawa, M. et al. 2009, *PASJ*, 61, S1