Astro-E2搭載X線CCD(XIS)の機能・性能試験及び電荷注入機能による機上較正方法

中嶋 大

京都大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

概要

X 線 CCD は空間 · 時間 · エネルギー分解能のバランスが取れた検出器であり、Chandra、XMM、そして 2005 年 2 月に打ち上げ予定の Astro-E2 と、現在から近未来の多くの X 線天文衛星に基幹の検出器として搭載されている。Astro-E2 に搭載予定の X 線 CCD(XIS) は、搭載検出器中唯一天体の詳細な位置決定が可能な検出器として重要な役割を持つ。

我々の研究室ではデジタル電気回路系の開発及び、XIS Flight Model の機能試験、高エネルギー領域での較正試験を担当している。機能試験としては、CCD を–90 ° C まで冷却するペルチェ素子の冷却試験を行った。素子にかかる電力を制御して CCD がどこまで冷えるかをモニタした結果、予定電力である ∼4W で目標温度–90 ° C に達することを確認した。また、後述する電荷注入 (CI) 機能について、注入電荷量を制御する電極電圧等のモニタに伴うノイズや干渉の調査を行ったが、ゲインやエネルギー分解能などへの影響は見られなかった。次に CI 機能を組み込むことによる CCD の性能への影響を調べた。その結果ピクセルレベルに 2–3ADU のオフセットが見られたが、その振幅揺らぎがゼロレベルの揺らぎとほぼ変わらないこと、撮像領域の端のみに現れることから実際の運用には問題ないと判断した。

性能試験としては、X 線 CCD としての基本的な性能であるゲイン、エネルギー分解能、量子効率の評価を行った。読みだしノイズは∼2.1electron、エネルギー分解能は∼130eV@5.89keV であり、ほぼ 1 号機と同じ性能を示している。

CI 機能は、電荷転送非効率 (CTI) のモニタを目的として 2 号機から導入された。Chandra/ACIS は軌道上で激しい放射線損傷を受けたために CTI が増加してエネルギー分解能の劣化を招いた。また、ASCA/SIS では較正線源を搭載していなかったために X 線エネルギーの絶対値測定が困難であり、CTI の詳細な補正は不可能だった。そこで XIS2 号機では CCD 撮像領域の最上部にレジスタを新たに設け、そこから一定量の電荷を撮像領域各 column のピクセルに注入する。このときの注入電荷量と、エネルギーの絶対値較正のために搭載した ^{55}Fe のデータと比較することで、column 毎の CTI をモニタ及び補正することができる。これにより衛星軌道上でのエネルギー分解能の劣化をある程度改善することが出来る。

私は CI 機能と較正線源を使った CTI のモニタ及び補正方法を定式化した。また XIS Flight Model の較正試験において CI 機能を使ったデータを取得し、注入電荷量から求めた CTI と X 線データから求めた CTI とが一致するかを確認した。打ち上げ前で CTI が非常に小さく今回のデータのみからは結論づけられなかったが、軌道上で CTI が大きくなってからは両者が一致し、CTI 補正が可能になると予想される。この結果及び ASCA、Chandra の方法を参考に、打ち上げ後の CI 機能を用いた XIS キャリブレーションの計画を提案する。

目 次

第 1 章　X 線天文学と検出器 **1**
1.1 X 線天文学 . . . 1
1.2 X 線検出器 . . . 3
1.2.1 比例計数管 (Proportional Counter) . . . 3
1.2.2 シンチレーター . . . 3
1.2.3 半導体検出器 . . . 4
1.2.4 カロリメーター . . . 4
1.2.5 X 線望遠鏡と X 線分光器 . . . 5

第 2 章　Astro-E2 衛星 **7**
2.1 概要 . . . 7
2.2 X 線望遠鏡 (XRT) . . . 8
2.3 検出器 . . . 11
2.3.1 X 線分光器 (XRS) . . . 11
2.3.2 硬 X 線検出器 (HXD) . . . 13
2.3.3 X 線 CCD カメラ (XIS) . . . 14

第 3 章　X 線 CCD **17**
3.1 X 線 CCD の動作 . . . 17
3.1.1 MOS 構造 . . . 17
3.1.2 X 線との相互作用 . . . 19
3.1.3 X 線照射方式 . . . 19
3.1.4 電荷集積 . . . 19
3.1.5 チャネルデバイス . . . 21
3.1.6 電極構造 . . . 21
3.1.7 電荷転送 . . . 23
3.1.8 データ処理 . . . 24
3.2 性能 . . . 25
3.2.1 ゲイン . . . 25
3.2.2 エネルギー分解能 . . . 25
3.2.3 検出効率 . . . 26
3.2.4 読みだし速度 . . . 26
3.3 問題となるもの . . . 26
3.3.1 読みだしノイズ . . . 26
3.3.2 暗電流 . . . 27
3.3.3 光洩れ . . . 27
3.3.4 電荷転送非効率 . . . 27

3.3.5 パイルアップ . . . 27
3.3.6 Hot Pixel . . . 27

第 4 章 XIS **29**
4.1 概要 . . . 29
4.2 打ち上げ直前から定常状態までのオペレーション . . . 29
4.3 センサー . . . 30
4.3.1 CCD チップ . . . 31
4.3.2 ボンネット · 可視光遮断フィルター (OBF) . . . 32
4.3.3 ベース ·TEC . . . 33
4.3.4 キャリブレーションソース . . . 33
4.3.5 電荷注入機能 . . . 33
4.4 周辺回路 . . . 34
4.4.1 アナログ電気回路系 (AE)/温度制御回路 (TCE) . . . 34
4.4.2 デジタル信号回路 (DE) . . . 35
4.5 データ解析法 . . . 35
4.5.1 補正 . . . 35
4.5.2 イベント抽出 · 解析 . . . 37
4.6 駆動方式 . . . 40
4.6.1 μ-code . . . 40
4.6.2 モード . . . 43

第 5 章 機能試験 **47**
5.1 ドア開け試験 . . . 47
5.2 TEC 冷却性能試験 . . . 48
5.3 圧力センサー出力値の温度依存性 . . . 49
5.4 CI 関連 HK 項目読みだし起源のノイズ調査 . . . 49
5.4.1 ダークレベルに現れるノイズ調査 . . . 51
5.4.2 注入電荷部分に現れるノイズ調査 . . . 51
5.5 μ-code 内で CI 機能有無それぞれでのノイズ . . . 53

第 6 章 性能試験 **57**
6.1 較正試験の目的 . . . 57
6.2 試験の方法 . . . 57
6.2.1 評価システム . . . 57
6.2.2 実験条件 . . . 58
6.3 読みだしノイズの測定 . . . 59
6.4 ゲイン · エネルギー分解能 . . . 60
6.5 検出効率 . . . 63
6.6 Bad Pixel 分布とその影響 . . . 65

第 7 章 電荷注入機能による CTI 補正 **69**
7.1 補正方法 . . . 69
7.1.1 注入電荷量の決定 . . . 69
7.1.2 CTI の決定 . . . 70

第 8 章　FM S1 センサー較正実験データへの CTI 補正の応用 **73**
8.1　注入電荷量の安定性 73
8.2　注入電荷の CTI と X 線の CTI 75

第 9 章　まとめと今後の課題 **79**
9.1　まとめ 79
9.2　今後の課題 79

図 目 次

2.1 Astro-E2 衛星外観 . . . 7
2.2 Astro-E2 衛星内部構造 . . . 8
2.3 X 線望遠鏡有効面積 . . . 9
2.4 XRT 外観 . . . 10
2.5 Wolter I 型 X 線反射鏡 . . . 10
2.6 XRS 冷却システム外観 . . . 12
2.7 マイクロカロリメータ . . . 12
2.8 HXD 外観 . . . 13

3.1 MOS ダイオードのポテンシャル構造 . . . 18
3.2 CCD 断面図 . . . 18
3.3 3 相方式 . . . 21
3.4 2 相方式 . . . 22
3.5 バーチャルフェーズ方式 . . . 22
3.6 Frame Transfer 方式 . . . 23
3.7 Full Frame Transfer 方式 . . . 24
3.8 Interline 方式 . . . 24
3.9 CCD からの出力信号と積分方式の概念図 . . . 25

4.1 XIS センサー構成 . . . 29
4.2 XIS センサー外観 · 構成 . . . 30
4.3 CCD チップ . . . 31
4.4 CCD 断面。(左) チャネルストップ構造。(右) ゲート構造。 . . . 32
4.5 電荷注入レジスタの位置と電荷注入の原理 . . . 34
4.6 Grade 法 (Normal モード) . . . 38
4.7 Grade 法 (P-sum モード) . . . 39
4.8 Normal モード . . . 43
4.9 P-sum モード . . . 43
4.10 Burst モード . . . 44

5.1 通電開始からの時間と白金抵抗値 · 温度 . . . 48
5.2 1 号機でのドア開けまでの時間と今回の試験の比較 . . . 48
5.3 BUS 電源消費電力に対する CCD 温度、及び CCD-heat sink 間の温度差 . . . 49
5.4 圧力センサー出力値と白金抵抗値の関係 . . . 50
5.5 常時 HK 項目のモニタによるノイズの例 . . . 50
5.6 常時 HK に何も含まないときと CI 関連 HK 情報をモニタしたときの PH データの比較 (frame No.30) . . . 51
5.7 注入電荷の配置 (左) と拡大図 (右) . . . 52

5.8 チェッカー部分の PH データの比較 53
5.9 CI ありの μ-code と無しの μ-code でのダークレベルの比較 (frame No.50) . 54
5.10 CI ありの μ-code と無しの μ-code でのイメージの比較 55
5.11 構造のあるピクセルとその上下の列のダークレベルのヒストグラム 56

6.1 京都大学 XIS 較正システム 58
6.2 XIS 応答関数の成分 60
6.3 各エネルギーの K_α ピークのスペクトル fit 61
6.4 FM S1 センサー ゲイン 62
6.5 FM S1 センサー エネルギー分解能 62
6.6 窓無し SSD の検出効率 63
6.7 CCD 各層の厚みによる検出効率の違い 64
6.8 S1 センサーの量子効率 65
6.9 通常のイベントと Bad Column でのイベント 66

8.1 注入電荷のイメージ 74
8.2 注入電荷の揺らぎ 75
8.3 各ピクセルでの注入電荷量 76
8.4 各ピクセルでの ^{55}Fe(Grade0) のピクセルレベル 77
8.5 ^{55}Fe(Grade0) と注入電荷のピクセルレベルの相関 78

表 目 次

2.1 Astro-E2 と ASCA の XRT 性能の比較 11
2.2 Astro-E2 の 3 種類の検出器の性能諸元 15

4.1 XIS センサー諸元 30
4.2 XIS CCD 性能諸元 31
4.3 クロックモードとエディットモードの組合せ 45

5.1 ドア開け試験の結果 47

6.1 各二次ターゲットのエネルギーと X 線発生装置にかける電圧、電流値 . . . 59
6.2 解析での各種パラメタの設定値 60
6.3 FM S1 センサー ゲインと分解能 62
6.4 図 6.7 中の各層の厚みの振り幅 64
6.5 各エネルギーの X 線の XIS、SSD それぞれのカウント数 65
6.6 S0、S1 センサーの Bad Pixel 分布 67

第1章　X線天文学と検出器

1.1　X線天文学

有史以前から夜空の星は人々を魅了し続けてきた。観測天文学は人類の文化と共に発展してきた史上最も古い学問の一つだが、20世紀はじめまでは可視光による観測のみに限られていた。近年、科学技術の発展と共に新たな宇宙への窓が開かれた。1920年Coblentzらによって赤外線観測が初めて行われ、1930年にはJanskyによって銀河中心方向からの宇宙電波が観測され電波天文学が始まった。それに遅れること32年、Giacconiらは月からのX線を観測する目的でX線検出器をロケットで大気圏外に打ち上げ、初めて太陽系外の天体からのX線を発見した。これがX線天文学の先駆けである。

その後のX線観測は70年のUHURU(SAS-1)に始まる衛星観測が主体となった。オランダのANS、アメリカのOSO-8、イギリスのArial5と各国が次々と衛星を打ち上げていったが、大きな変革は78年アメリカのEinstein衛星によってなされたと言えるだろう。Einsteinは初めてX線望遠鏡を搭載してSNRや銀河団等広がった天体の空間構造の議論を可能にし、X線観測を" 天文学" に変えたと言える。日本も1978年Hakucho衛星を打ち上げ数多くのX線バーストを発見した。Einsteinが81年に機能停止してからは衛星観測は一時日本の独壇場となり、Ginga(87年)、ASCA(93年)はX線天文の発展に大きく寄与した。現在ではアメリカのChandra、欧州のXMM両衛星を中心に観測が行われ、X線天文学は可視光(赤外)、電波と並ぶ3本柱の一角になっている。

以下ではこれらの衛星によってなされたX線天文学の成果を簡単に紹介する。

- 前主系列星(PMS)

  PMSはその進化段階に沿って原始星(YSO)、T Tauri型星(TTS)と分類される。どちらも<100Kの低温なガスに覆われているため、∼数千万度もの高温現象をトレースする熱的X線がPMSから観測されたのは驚異的なことであった。X線観測の利点は可視光では吸収により見えないガス雲の内部も、透過力の強いX線では観測可能な事である。ASCA衛星は、原始星の中で比較的成長した段階(class1と呼ぶ)以降PMSの全ての段階(class3まで)でX線を放射していることを発見した。更にChandra衛星の観測では原始星段階の中でもより若い天体(class0と呼ぶ)からもX線が放射されていることが発見され、PMSのX線放射活動が普遍的であることが明らかになった。

  またPMSからのX線は太陽X線と同様フレア的時間変化を示すことから、その放射機構は磁場起源であると考えられている。フレア時の温度とエミッションメジャーの関係、あるいは温度とフレアの立上り時間の関係からフレアループの大きさおよび磁場強度を見積もることが出来る。現在までの観測で、フレアループは星と降着円盤を繋いでいるというよりは星表面から出ているらしいこと、また磁場は1000-数100Gで、class0-3に成長するにつれて弱くなるらしいことが分ってきている。

  以上の事柄は全て小質量PMS(0.08-2.0太陽質量)についての観測結果であり、大質

量 PMS に関しては、表面に対流層がないため太陽や小質量 PMS の様な磁場増幅は行われないと考えられていた。しかし実際観測すると、小質量 PMS と同様のフレアを示しており、大質量 PMS もやはり磁場活動していることが分ってきた。

- 超新星残骸 (SNR)

  超新星爆発による衝撃波で星間物質が加熱された結果、数千万度もの高温プラズマが観測される。セドフ段階にある SNR でかつ距離が既知である場合、SNR の半径、温度、エミッションメジャーから SNR の爆発エネルギー、爆発からの時間、SNR 内外での物質密度が決定できる。また SNR は重元素汚染の現場であり、最近の高空間分解能観測によって SNR 内部の場所毎の元素組成等が明らかになってきた。これは爆発直前の星の内部構造を写していると考えられる。

- X 線連星 (XRB)

  中性子星 · ブラックホール (BH) 等のコンパクト天体と主系列星の連星系は、主星への物質降着で解放された重力エネルギーが放射エネルギーに変換され強力な X 線源となる。これらは X 線パルサーや X 線バースターでもあり、前者のパルス周期の変動からは主星の公転周期が分り、伴星の質量から主星の質量が運動学的に計算できる。後者の X 線温度と光度の時間変化からは中性子星の半径を決定できる。さらにスペクトル中のサイクロトロン吸収線のエネルギーから中性子星の磁場強度も決定できる。

- ブラックホール (BH)

  BH には大きく分けて恒星質量 BH、超大質量 BH がある。前者は連星系をなす主星の軌道と質量から、見えない伴星の質量が 3 太陽質量以上である場合 BH 候補となる。X 線放射の特徴はエディントン光度に近い強い X 線強度と、強度 · スペクトルの時間変動であり、このような天体は銀河系内で複数発見されている。後者は多くの銀河でその存在が示唆されているがその形成過程は謎である。最近ではスターバースト銀河から中質量 BH 候補が発見され、超大質量 BH が中質量 BH の合体で形成されたのではないかとも考えられている。

- 銀河 · 銀河団

  スターバースト銀河や楕円銀河から高温のプラズマが発見された。また銀河団からも、構成銀河の質量の約 10 倍もの質量のプラズマが発見され、その分布から、プラズマを重力で拘束するためには見えている物質以上の質量が必要であることが分り、ダークマターとして大きな問題を提起することになった。

- 宇宙線

  高エネルギー宇宙線の起源は 1912 年の発見以来宇宙物理学の大きな謎の一つである。ASCA 衛星以降、複数の殻型 SNR からシンクロトロン X 線の放射が発見されており、その X 線エネルギーと磁場強度から、宇宙線電子が最大 10^{14}eV まで加速されていることが分った。また SNR は宇宙線陽子の加速源の最有力候補ともなっている。実際殻型 SNR の RXJ 1713-3846 からは、分子雲と宇宙線陽子が衝突して生じる π 粒子の崩壊が起源と思われる TeV ガンマ線が検出され、さらに電波観測によりこの SNR に付随した分子雲の存在が明らかになったことで宇宙線加速の現場であることが強く示唆されている。

また、複数の SNR と OB 型星からの激しい星風によって形成される Super Bubble からもシンクロトロン X 線が発見され、宇宙線が加速されている現場であることが分っている。単独の SNR よりも加速時間が長いため、さらに高いエネルギーまで陽子が加速されると予想されるがまだ詳細観測がなされていない。

以上のようにわずか 40 年程で X 線天文は大きな進展を見せてきたが、将来も引続き衛星観測が予定されている。日本が 2005 年に Astro-E2、2010 年に NeXT を、2010 年以降では欧州が XEUS、アメリカが Constellation-X の打ち上げを目指している。

1.2 X 線検出器

X 線はその高いエネルギーのため当然肉眼で見ることは出来ず、X 線を認識するためには、物質と何らかの相互作用をさせて電気信号などに変換しなければならない。そのため X 線天文学の発展は検出器の発展によって支えられてきた。ここでは以下に代表的な X 線検出器の原理と特徴についてまとめる。また、X 線検出器に限らず、放射線検出器の性能としては主に、エネルギー帯域、エネルギー分解能、時間分解能、位置分解能 (さらに将来的には偏光検出効率も考えられる) がある。これらの指標についての各検出器の能力もあわせて説明する。([1]、[2])

1.2.1 比例計数管 (Proportional Counter)

PC は、ガスを入れた箱の中に金属の芯線をはり、芯線を高電圧にして箱をグラウンドに落すことで、ガス中を高電場にしてある。通常 X 線が入射するための窓が設けられ、入射した X 線はガス中分子の電子を光電効果により電離する。飛び出した電子は高電場により加速されながら周りの分子を電離して行き、二次電子雲を形成する。この電子 · イオン対の総数、即ち得られる電気信号の大きさが入射 X 線のエネルギーに比例することから比例計数管と呼ばれる。また芯線を複数張ることで位置検出能力を持つことも可能である。一般的に用いられる材質は、ガスが P10 ガス (Ar90%、$CH_4$10%)、芯線が Au、入射窓が Be である。ガスを用いた電離型検出器一般に言えることだが、イオン化エネルギーが大きいためエネルギー分解能はそれほど良くないが、大面積の検出器を作りやすい。そのため国際宇宙ステーション搭載の全天 X 線監視装置 (MAXI) に主検出器の 1 つとして用いられる予定である。

1.2.2 シンチレーター

シンチレーター物質に X 線が入射すると光電効果等の相互作用によって自由電子を作り、それが物質中の原子を励起して微弱な光を出す。この光は後段に取り付けられた光電子増倍管 (PMT) に入射し、入射面である光電面で電子をたたき出す。PMT 内部は複数のダイノードを用いて高電圧がかけられており電子は各ダイノードで増幅されて信号として取り出される。当然電子数は入射 X 線エネルギーに比例する。シンチレーター物質には無機、有機物質、固体、液体と様々な材質のものがあり、検出したい X 線エネルギーに対して量子効率の高いもの、また蛍光減衰時間が短いものを選ぶ。特に NaI、CsI、BGO、GSO 等が宇宙観測に用いられている。

シンチレーターと光電子増倍管の利点は、応答時間が速いため高い計数率の測定が可

能なことと、∼1keV の軟 X 線から数百 keV の軟ガンマ線までの広いエネルギーレンジを持つことである。一方、エネルギー分解能はガス検出器に比べ約一桁悪いという欠点もある。これらの特性から、Anti 検出器として用いられることが多い。

1.2.3　半導体検出器

半導体結晶は共有結合した原子が格子状に近接して並んでいる。この状態になると電子のエネルギー縮退が解けて連続的な 2 つのバンド、伝導帯と価電子帯ができる。この 2 つのバンド間のエネルギーギャップは絶縁帯に比べて狭いため熱運動などにより容易に共有結合が切れて自由電子 · 正孔対ができる。このため電気伝導度が金属と絶縁体の間の値を取る。この半導体を検出器として用いる場合に重要となる空乏層について、代表的な pn 接合の場合について説明する。結晶原子に対して価電子数が一つ多い不純物をドープしたのが n 型、一つ少ない不純物をドープしたのが p 型である。両者の接合部では、電子の密度差があるため diffusion により p 側に電子が移動し、正孔にも逆の効果が起きる。移動前はどちらも電気的に中性であるためこの効果により n 側は+、p 側は–の電荷を帯びる。このため接合部に電界が生じ、diffusion がとまる。このとき電界の存在する場所は自由電子も正孔も無く、空乏層と呼ばれる。

空乏層に X 線が入射すると光電効果で一次電子が生じ、さらにその電子の運動により二次電子 · 正孔対が生成され、電子は n 側へ、正孔は p 側へ移動し電気信号として取り出される。半導体検出器の特徴は電子のイオン化エネルギーが小さいためエネルギー分解能に優れていることである。衛星搭載機器としては、X 線 CCD が太陽観測衛星「ようこう」に搭載されて以降多くの衛星に用いられている。また Astro-E2 の硬 X 線検出器 (HXD) には低エネルギー X 線検出用に PIN フォトダイオードが用いられ、さらに次期 X 線天文衛星 NeXT には硬 X 線撮像機器として CdTe 検出器が候補になっている。

1.2.4　カロリメーター

カロリメーターは X 線吸収体と温度計、熱浴からなり、X 線エネルギーを熱エネルギーに変換し吸収体の温度変化を測定する。この熱はすぐに熱浴に逃げて行く。このため吸収体としては温度変化が速くかつ熱容量の小さい材料が望まれる。HgTe 等が用いられている。X 線エネルギーを検出するためには素子を極低温まで冷却し熱揺らぎを抑えなければならないが、そのエネルギー分解能はフォノン数の揺らぎなどで決まるため非常に優れている。また約 0.1-10keV という広いエネルギーレンジに渡って検出効率がほぼ 100%であるので統計的に有利である。一方応答速度が遅く高計数率測定には向かないのが欠点である。衛星搭載機器としては、Astro-E2 の XRS が初めて宇宙に打ち上げられる予定である。

近年、この欠点を克服するため開発されているのが Transition Edge Sensor(TES) である。TES カロリメータは、超伝導薄膜が X 線を吸収しその温度が上昇して超伝導から常伝導に相転移する際抵抗値が急激に変化することを温度計として利用している。このため半導体サーミスタを用いたカロリメータに比べ分解能も応答速度も約 1 桁改善される予定である。現在 4eV の分解能を達成している。

1.2.5 X 線望遠鏡と X 線分光器

上記の検出器はいずれもワイヤーを張る、あるいはピクセル化するなどして X 線の入射位置が分る構造になっている。従って検出器上に X 線を集光することで X 線の撮像観測が可能になる。しかし、X 線に対する物質の屈折率は 1 よりも小さいため光学望遠鏡のようにレンズを使って集光することは出来ない。そこで X 線望遠鏡では全反射を利用した斜入射光学系が用いられる。この技術は Astro-E2 衛星 XRT でも応用されており、詳しい構造や特徴は 2 章で述べる。

また回折 X 線を入射させることで X 線の分光観測が出来る。即ち回折格子を検出器の前段に配置し分散させ、入射 X 線の検出器上の座標から X 線エネルギーを知る。非常に優れたエネルギー分解能を達成できる一方、広がった天体を分光出来ない、軟 X 線領域でしか感度を持たない、等の欠点も持つ。ただし Chandra 衛星搭載の HETG のように ∼7keV まで感度を持つものも開発されている。

第2章　Astro-E2衛星

2.1　概要

Astro-E2 衛星は日本が打ち上げる第 5 番目の X 線天文衛星であり、2000 年 2 月に軌道投入に失敗した Astro-E 衛星の 2 号機である。2005 年 2 月に鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) から M-V 型ロケット 8 号機によって高度約 500km の楕円軌道に打ち上げられる予定である。

衛星には、X 線天文衛星 ASCA の性能をさらに向上させた X 線反射望遠鏡 (XRT) が 5 台と、その焦点面には 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) と 1 台の高精度 X 線分光装置 (XRS) が置かれる。またこれに加え、硬 X 線帯域 (10–700keV) を観測する硬 X 線検出器 (HXD) が 1 台搭載される。これら計 6 台の検出器で同じ天体を同時に観測することが出来る。([3])

図 2.1: Astro-E2 衛星外観

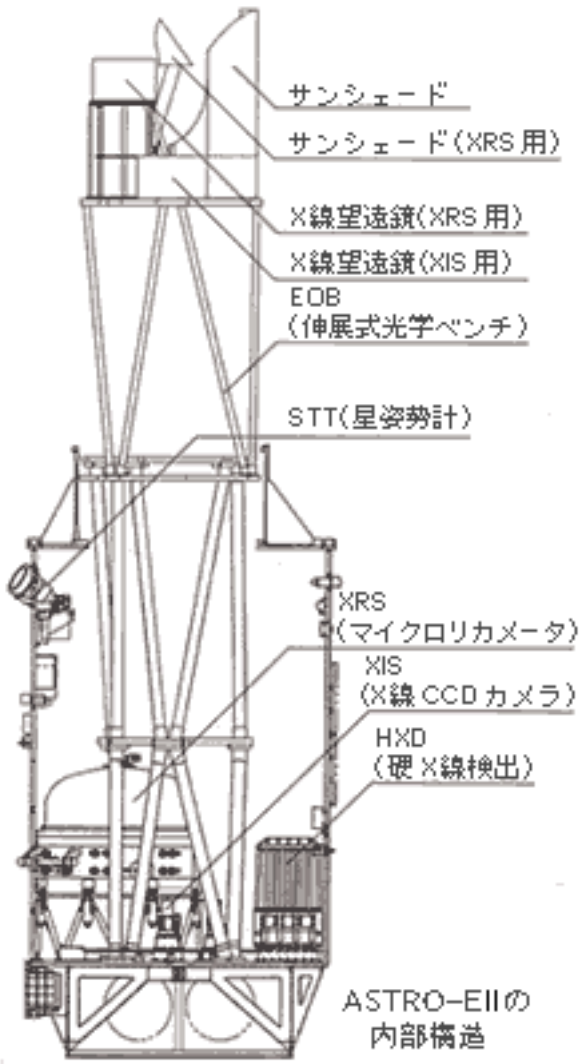

図 2.2: Astro-E2 衛星内部構造

2.2 X 線望遠鏡 (XRT)

Astro-E2 搭載用 XRT は、ASCA/XRT を改良した薄板多重 X 線望遠鏡 5 台からなり、焦点に XIS を置くもの (XRT-I) が 4 台、 XRS を置くもの (XRT-S) が 1 台ある。原理としては、斜入射角が十分小さければ (0.5-1.0 度)X 線が全反射することを利用している。基本構造は、極薄の鏡面基板をもつ反射鏡を同心円状に光軸光に対する開口効率を最大にするように多数配置している。鏡面形状としては、回転双曲面と回転放物面からなる WolterI 型光学系を円錐 2 段で近似している (図 2.5)。

薄板多重型 X 線望遠鏡は、Chandra/HRMA のような基板を直接研磨する方式に比べ結像性能では劣るが、小型軽量でかつ開口率が高い、という特徴を持つ。XRT は特に >11 keV の硬 X 線領域で現行の XMM や Chandra を凌ぐ有効面積を有する。図 2.3 に各衛星搭載望遠鏡の有効面積を示す。

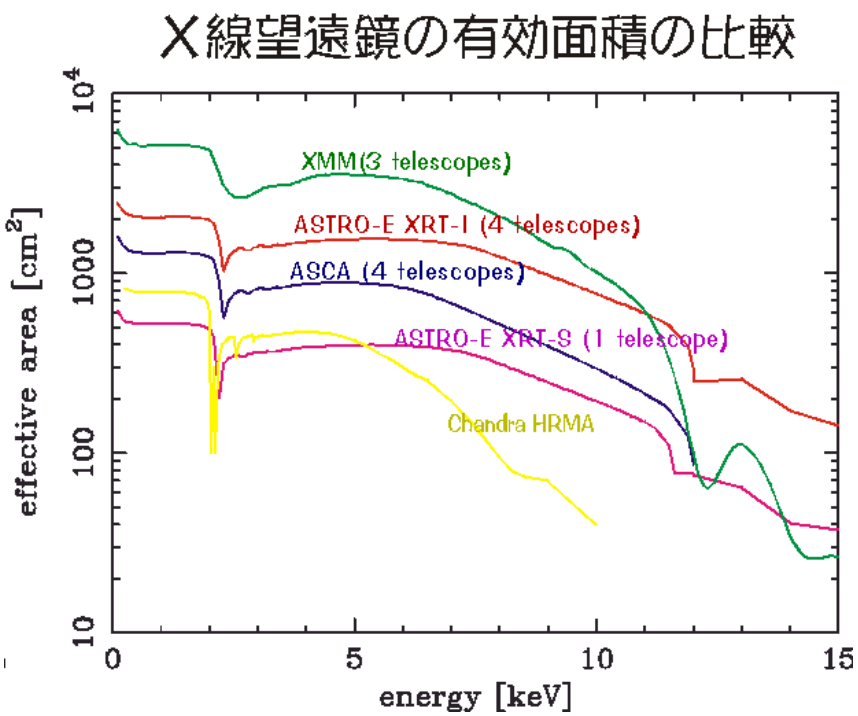

図 2.3: X 線望遠鏡有効面積

Astro-E2 では、ASCA/XRT に比べ以下の改良がなされた。

- 鏡面形成にレプリカ法を用いることで角分解能が約 2 倍向上した
- 口径を大きくしたことで開口面積が約 1.5 倍に増加した
- 焦点距離を伸ばし斜入射角を小さくすることで高エネルギー側での感度を向上した
- 望遠鏡前面にプリコリメーターを搭載することで多重薄板型 X 線望遠鏡の問題であった迷光を約 1 桁小さく抑えている

図 2.4: XRT 外観

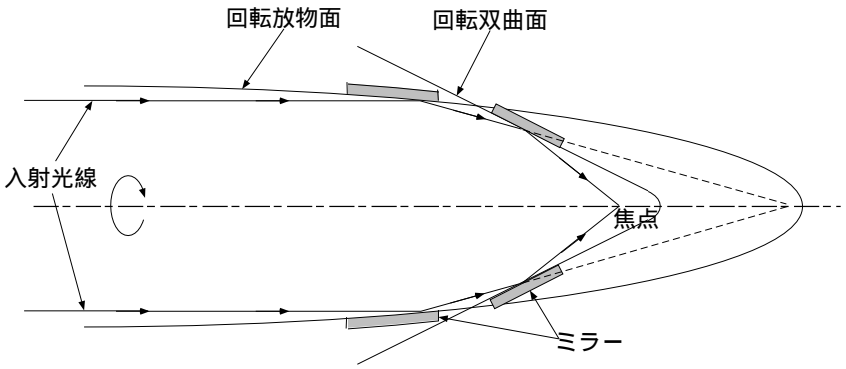

図 2.5: Wolter I 型 X 線反射鏡
[13] より抜粋

表 2.1: Astro-E2 と ASCA の XRT 性能の比較

	Astro-E2 XRT-I	Astro-E2 XRT-S	ASCA XRT
台数	4	1	4
反射材	Au	Pt	Au
直径	399mm	400mm	345mm
鏡面数	1400	1344	960
焦点面距離	4.75m	4.50m	3.50m
斜入射角	0.18-0.60°	0.19-0.63°	0.24-0.70°
視野@1keV/7keV	19′/19′	19′/19′	24′/16′
有効面積 †@1.5keV/7keV	450cm^2/250cm^2	450cm^2/250cm^2	300cm^2/150cm^2
角度分解能 (HPD)	2.0′	2.0′	3.5′

†: 検出器 1 台当たり

2.3 検出器

2.3.1 X 線分光器 (XRS)

XRS(X-ray Spectrometer) は、世界初の衛星搭載 X 線マイクロカロリメータを使って X 線天体の観測を行う装置である。X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線のエネルギーを素子の温度上昇として測定する。エネルギー分解能は素子内のフォノン数の揺らぎ等によって決まり、極低温に冷却することで向上する。

XRS では素子に化合物半導体の HgTe を用い (図 2.7)、これを巨大な真空断熱容器 (Dewar; 図 2.6) に収め約 60mK の極低温で動作させることで入射 X 線エネルギーによらず 6-7eV のエネルギー分解能を達成している。これは ASCA/SIS の実に 20 倍優れた値である。また Astro-E の時点では、寿命が 1.9 年と短いことや、2 次元アレイを断念したことにより撮像能力が低いことが欠点であったが、それぞれ改良がなされた。前者については、XRS の寿命は冷媒である固体ネオンの量で決まるが、機械式冷凍機でデュワー内の放射シールドを冷却することで 2.5-3.5 年まで寿命が延びた。後者については製造技術の向上により、6×6 ピクセルの 2 次元アレイを搭載可能になった。

以上の性能によりこれまで分解できなかった輝線の resonance line、forbidden line、intercombination line、satellite line などを分光することが可能になる。プラズマの温度、密度、電離度などの物理状態の高精度測定のための極めて強力な観測手段になるだろう。また grating 分光器と異なり広がった天体でもエネルギー分解能を悪化することなく分光出来るため、例えば銀河団の高温プラズマの元素比や物理状態が明らかになると期待される。

ただし、(1) 素子の応答速度が 100msec と遅いため、明るい天体を観測する場合は専用のフィルターでカウントレートを落してパイルアップを防がなくてはならない、(2) 視野が狭く空間分解能も低い、というような欠点もある。

図 2.6: XRS 冷却システム外観

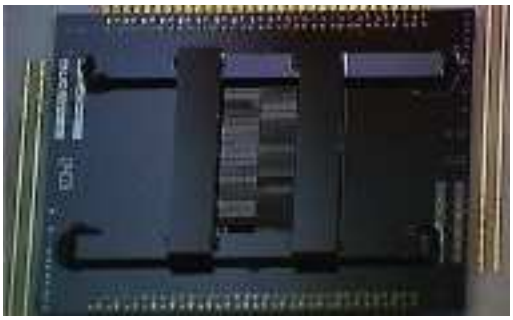

図 2.7: マイクロカロリメータ

時定数とエネルギー分解能

吸収体素子の温度上昇 ΔT はほぼ入射 X 線エネルギー E に比例し、

$$\Delta T = E/C \tag{2.1}$$

と書ける。ただし C は素子の熱容量である。よって素子の温度上昇の測定によって入射 X 線のエネルギーが分ることになる。一方、素子が定常状態に戻るまでの時定数 τ は C と、素子と熱浴の間の熱伝導度 G の兼ね合いで決まり、

$$\tau = C/G \tag{2.2}$$

となる。XRS では約 3msec である。

素子の温度を T とすると、素子全体の内部エネルギーは CT、フォノン 1 つあたりのエネルギーは kT と考えられるので、フォノン数は $CT/kT = C/k$ となる。よってフォノン数のゆらぎによる素子のエネルギーのゆらぎは、

$$\Delta E = \sqrt{C/k}kT = \sqrt{kT^2C} \tag{2.3}$$

となる。実際はこれに加え素子の熱ゆらぎとサーミスタによる熱雑音があるため、補正項 ξ ($\sim$2) を含めてエネルギー分解能は、

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35\xi\sqrt{kT^2C} \tag{2.4}$$

と求められる。動作温度を極低温にすることによりこの値を極限まで小さくすることが可能である。XRS ではカロリメータ自身の固有ノイズによって決まるエネルギー分解能は $\sim$4eV と見積もられる。しかし実際にはセンサーの読みだし回路や熱浴の温度揺らぎの寄与もあるため $\sim$6eV となっている。

2.3.2 硬 X 線検出器 (HXD)

HXD (Hard X-ray Detector) は、井戸型複眼フォスイッチ結晶シンチレータを基本としてさらに Si PIN フォトダイオードを組み合わせることで、X 線反射鏡を用いない非イメージング検出器として 10-600keV という広帯域硬 X 線観測を行う。最大の特徴は、超低バックグラウンドを実現することで過去のいかなる宇宙 X 線装置より高い検出感度を有している点である。

図 2.8: HXD 外観

Well 検出器ユニット

観測対象天体からの X 線は 4×4 のマトリックス状に配置された 16 ユニットの Well 検出器により検出される。1 本の Well 検出器は重量約 4.63kg で、4.6 ° ×4.6°(FWHM) の視野を覆う。

Well 検出器は BGO 結晶によって放射線アクティブシールドされていて、この BGO 結晶はボトム部と 4 分割の断面をもつ細長い井戸部からなる。井戸のそれぞれの底には 2mm 厚のシリコン PIN フォトダイオードと 5mm 厚の GSO 結晶シンチレータが上下に重なっており、前者で 10-60keV の X 線を検出し、前者を透過するような高エネルギー X 線は GSO により検出される。また井戸部にはファインコリメータが挿入されており低エネルギーでの視野は 0.56° ×0.56°(FWHM) に絞られている。

以上の構造によりバックグラウンド (ガンマ線、荷電粒子) や視野外からの X 線は BGO によって効率良く除去され、PIN、GSO のバックグラウンドは非常に低くなる。

Anti 検出器ユニット

Anti 検出器は平均 2.6cm 厚の BGO 結晶シンチレータとフォトチューブを組み合わせた検出器で、Well 検出器のアクティブシールドとして 20 ユニットが周りを囲んでいる。1 ユニットの有効面積は 1200cm^2 にもなり、1MeV でも 600cm^2 である。このため Anti 検出器は非常に優れたガンマ線バースト検出器となり、$\sim$5° の精度でバースト源の 1 次元の位置を決定できる。またトランジェント天体のモニターとしても利用できるが、全方向からの放射線に感度を持つため非常にバックグラウンドが高い。

2.3.3　X 線 CCD カメラ (XIS)

XIS (X-ray Imaging Spectrometer) は X 線検出用 CCD カメラである。エネルギー · 時間 · 空間分解能のバランスが良いのが特徴で、特に天体の精密な位置決定は 3 種の検出器のうち XIS でしか行なえない。

同じ CCD カメラである ASCA/SIS に比べ以下のような改良点が加えられており、性能としては飛躍的に向上している。

- 空乏層厚が 30μm から 70μm に増加したため、高エネルギー側 ($\geq$7keV) での検出効率が約 2 倍向上した。
- 動作温度を $-60°$ から $-90°$ に下げることにより暗電流を大幅に押え、電荷転送非効率 (CTI) を減少させた。
- SIS で特に問題になった打ち上げ後の放射線損傷による性能劣化に対応するための対策として、軌道上較正線源 (^{55}Fe) を設ける、また電荷注入端子を備えていて、人工的に電荷を注入することでコラム毎の CTI をモニタする、といった対策がなされた。
- SIS ではメモリー制限のため、ダークフレームメモリーを画素毎に持つことが出来なかった。そこで XIS では十分なメモリーを持ちダークアップデートロジックの改良を行い、光洩れなどによる予想外のダークレベルの変動に対処できる。
- SIS では 4 枚の素子を合わせて 1 センサーにしたため、すき間ができてしまい観測上の不都合が生じていた。XIS は 1 センサー 1 素子で構成されるのでこのようなすき間は存在しない。

XIS については 4 章でより具体的に紹介する。

表 2.2: Astro-E2 の 3 種類の検出器の性能諸元

	XRS	HXD	XIS
台数	1	1	4
有効感度帯域	0.5–10keV	10–600keV	0.4–12keV
素子数	6×6–4	4×4(Well) 20(Anti)	1024×1026
素子サイズ	624μm×624μm	21.5×21.5mm(PIN) 24×24mm(GSO)	24×24μm
有効面積 (1 台)	150cm^2@1keV 130cm^2@7keV	160cm^2(@<30keV) 330cm^2(@>40keV)	300cm^2@1keV 250cm^2@7keV
視野	2.92′ ×2.92′	0.56° ×0.56°@60keV 4.6° ×4.6°@500keV	17.4′ ×17.4′
エネルギー分解能	6eV	3keV@10-40keV 9%@662keV	130eV@6keV
空間分解能 (HPD)†	2.0′	–	2.0′
時間分解能	–	61μsec	8msec(P-sum)
動作温度	65mK	~ -20°C	-90°C

†: XRT の分解能で決まっている

第3章　X線CCD

3.1　X線CCDの動作

CCDは1970年代から開発されている半導体を用いた撮像素子であり、普通数～数十μm四方の画素が数百万個並べられ1つのチップを構成している。各画素に放射線が入射すると、チップ中の物質との相互作用の結果、電荷が生じる。画素毎にこの電荷が集められ、電荷読みだし口へ向かって画素間をバケツリレーの要領で転送する。読みだし口は通常チップの端に用意されている。従って、大量の画素数を持ちながら小数の読みだし回路で撮像が可能である。

デジタルカメラ等に使われる可視光用CCDとX線CCDとの大きな違いは、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の各画素の構造は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XIS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、現在のChandra ACISやXMM EPICに使われ、Astro-E2 XISやMAXI SSCに採用が決まっている。

3.1.1　MOS構造

MOSはMetal(金属)、Oxide(絶縁体)、Semiconductor(半導体)を接続したものである。材質は、ACISやXISでは金属にポリSi、絶縁体にSiO_2、半導体にSiを使っている。また半導体の不純物としては現在n型CCDとp型CCDの両方が存在するが、微細加工のしやすさやなどから、実用化されているのは全てp型CCDである。しかしn型CCDにも利点はある。多数キャリアが電子であるため移動度が高い。空乏層の厚みは移動度の1/2乗に比例するため、硬X線まで高い検出効率を持ったCCDが作成可能であり、現在開発が進められている。以下ではp型CCDの場合について説明する。図3.1左は1画素のMOS構造を簡略化した模式図で、金属層に電圧をかけない(V=0)ときのポテンシャル構造を示している。金属層に正電圧(V>0)をかけると、エネルギーバンドは図3.1右のように下に曲がる。このため多数キャリアである正孔は奥(図右方向)に追い込まれ、半導体表面に空乏層が出来る。この状態を" 空乏" と呼ぶ。また空乏層のさらに奥の電界のかかっていない部分を中性領域と呼ぶ。図3.2に実際のCCDの電極を含めた構造を示す。

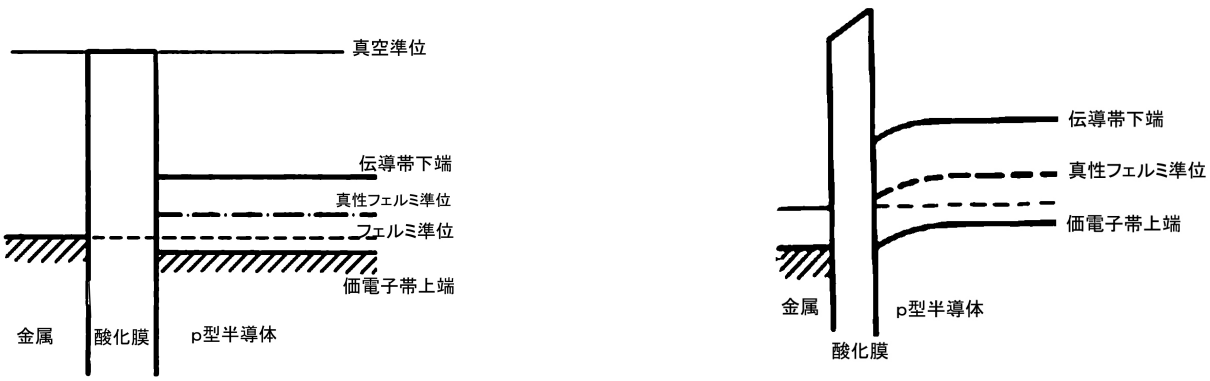

図 3.1: MOS ダイオードのポテンシャル構造

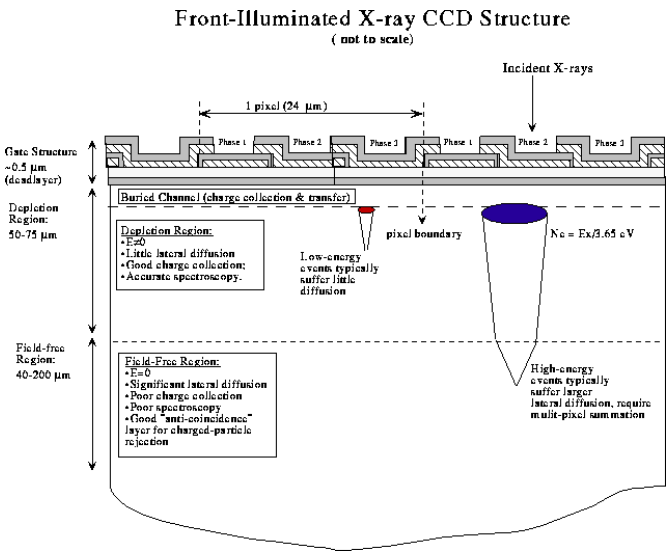

図 3.2: CCD 断面図

この状態では時間が経つと空乏層で熱励起により生じた電子が半導体表面に集まって定常状態になる。検出器としての CCD は、この定常状態までの過渡期を利用して負電荷を集めて転送する。

さらにかける電圧を大きくすると空乏層幅は広くなるが、あるところで真性フェルミ準位がフェルミ準位と交わるようになる。つまり小数キャリア (電子) の数と多数キャリア (正孔) の数が逆転する。この状態を” 反転” と呼ぶ。一旦反転状態になると、かける電圧を大きくしても半導体表面に負電荷が溜ることで電位を支えるため、空乏層幅はこれ以上広がることはない。

3.1.2 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し、一次電子を発生させる。この電子によって周囲の電子が次々と電離して電子 · 正孔対を形成する。電子は空乏層内に存在する電界により電極付近へと集められる。一方 Si 原子はほとんどの場合、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。数%の確率で、Si-Kα 線を放出する場合がある。Si-Kα 線は入射 X 線と同様他の Si 原子と相互作用するが、他のピクセルで吸収された場合、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たり、あるいは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、エスケープイベントのみが受かる。

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$0.1-15keV である。

3.1.3 X 線照射方式

前面照射型

電極側から X 線を入射させる。利点としては X 線が電極近くで吸収されるので、Si 中を電荷が電極へ向かう際起こす拡散や再結合の効果が小さくエネルギー分解能に優れる。一方欠点としては低エネルギーの X 線が前面の電極や絶縁層で吸収されやすいため検出効率が悪くなる。XIS は全てこの方式のチップである。

裏面照射型

電極の反対側から X 線を入射させる。利点、欠点は前面照射型の逆で、低エネルギー X 線に対する検出効率が高い一方で、X 線の吸収点が電極から遠いので拡散や再結合の効果が大きくエネルギー分解能が悪くなる。最近では Chandra/ACIS チップの一部 (ACIS-S)、XMM/EPIC pn がこの方式を採用している。

3.1.4 電荷集積

半導体結晶内の電荷の運動は、電界によるドリフト運動と拡散運動とに分けられる。

電界が存在しない場合、電荷はランダムな熱運動をしている。即ち、高速運動ではあるが格子原子との衝突、散乱のため長時間で見た場合の電荷の移動はゼロになる。衝突してから次の衝突までの時間 τ_c を平均緩和時間と呼ぶ。この状態に E の電界がかけられると電荷は qE の力を受け、熱運動とドリフト運動の合成運動をする。

$$m_p \frac{d\bar{v}}{dt} = -\frac{m_p \bar{v}}{\tau_c} + qE \tag{3.1}$$

ここで m_p は電荷の質量、q は電荷量、$\bar{v}$ は電荷の平均速度である。よって定常状態での電荷のドリフト速度は左辺をゼロとして

$$\bar{v} = -\frac{\tau_c q E}{m_p} = \mu E \tag{3.2}$$

と表せる。ドリフト速度が電界の強さに比例する形で表したときの比例計数 μ を移動度と呼ぶ。移動度は、電荷の移動が外部の電界によりどのように影響されるかを知るための指標となる。

つぎに拡散であるが、拡散は半導体中の電荷密度に勾配があるときに現れる。ある一定の電荷密度勾配を持つ面 (x=0 とする) を考える。この時拡散電流は、面を通過する電荷の flux である。l を平均自由行程、$n(x)$ を電荷数密度とすると、x=–l にあった電荷が単位時間単位面積あたりに面を通過する数は

$$N(-l) = \frac{\frac{1}{2} n(-l) l}{\tau_c} = \frac{n(-l) v_{th}}{2} \tag{3.3}$$

となる。ここで v_{th} は熱運動の速度である。x=l にあった電荷の場合も同様に考えて差引をすると、拡散電流は

$$J = q\{N(-l) - N(l)\} = q v_{th} l \frac{dn}{dx} = qD\frac{dn}{dx} \tag{3.4}$$

と表せる。D は拡散係数と呼ばれる。ここでエネルギー等分配則

$$\frac{1}{2} m_p v_{th}^2 = \frac{1}{2} kT \tag{3.5}$$

及び

$$l = v_{th} \tau_c \tag{3.6}$$

の関係を用いると、ドリフトと拡散それぞれの運動を特徴づける係数である移動度と拡散係数との関係が

$$D = \frac{kT}{q} \mu \tag{3.7}$$

と表せる。これをアインシュタインの関係式と呼ぶ。

以上では、半導体結晶は欠損が無い理想的な結晶を前提としてきたが、実際は製造過程や放射線による損傷を受ける等の理由から結晶欠損が存在するし、半導体原子の熱運動によって原子間結合は常にある割合で切れたりつながったりを繰り返している。これらにより半導体中の電荷は再結合の影響を受ける。

Si の場合、間接バンドギャップ半導体のため再結合は間接再結合のみであり、そのタイムスケール τ_r は

$$\tau_r = \frac{1}{v_{th} \sigma N_t} \tag{3.8}$$

と表せる。ここで σ は再結合中心の捕獲断面積、N_t は再結合中心密度である。

3.1.5 チャネルデバイス

表面チャネルデバイス

図のように空乏層の表面に出来るポテンシャルの溝に電荷を蓄積してそのまま転送する CCD のこと。絶縁層と空乏層の界面に存在するトラップにより電荷損失を受け易く、エネルギー分解能は悪くなる。

埋め込みチャネルデバイス

空乏層と絶縁層の間に、半導体基板と逆の極性の部分を作ることによりポテンシャルの底を半導体内部へと変えたもの。一般に半導体と絶縁層の界面に比べ半導体内部の方がトラップが少ないため電荷転送効率が良くエネルギー分解能の劣化も少ない。XIS はこの方式を用いている。

3.1.6 電極構造

3 相方式

図 3.3 のように 1 ピクセルを 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出来て融通が効く。XIS はこの方式を用いている。

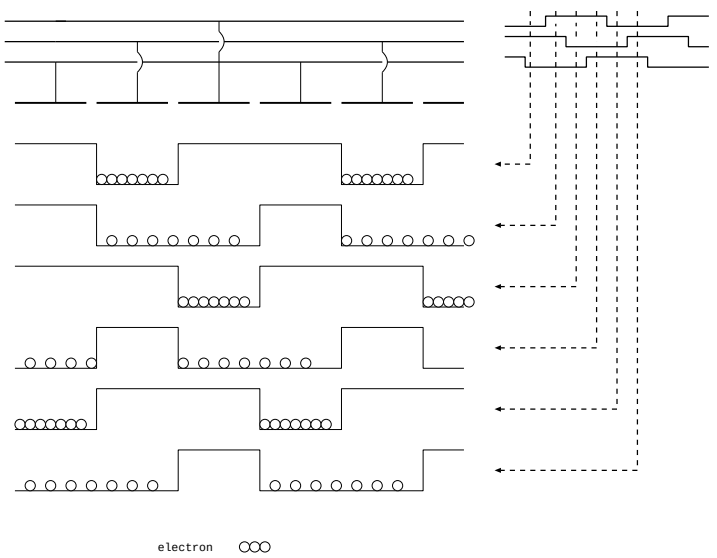

図 3.3: 3 相方式

2 相方式

1 ピクセルを二つの電極で構成し、電極の一部に正の電荷を持つ不純物をドープさせることで電極内にポテンシャルの階段を設けている。駆動が簡単であるのが利点である。

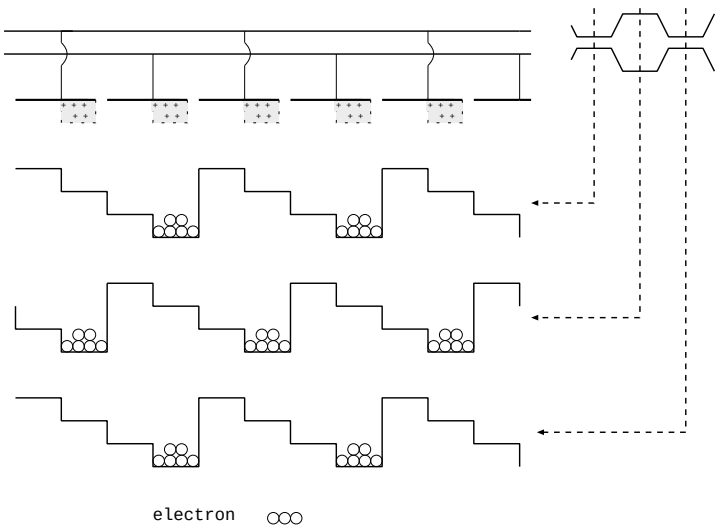

図 3.4: 2 相方式

バーチャルフェーズ方式

やはり不純物をドープさせ、1 ピクセルあたり 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。

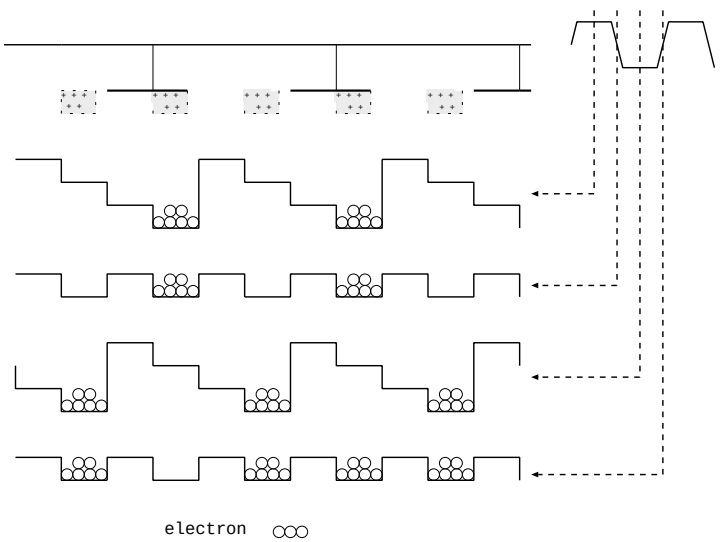

図 3.5: バーチャルフェーズ方式

3.1.7 電荷転送

Frame Transfer

Frame Transfer 方式では、チップは図 3.6 のように露光領域と同じ数のピクセル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。読みだしは、

1. まず一定時間露光した後で、縦のピクセル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 1 ピクセル分縦転送する。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 1 ピクセルずつ横転送しながら電荷を読み出す。横のピクセル数分繰り返す。
4. 2.、3. を縦のピクセル数分繰り返すことで全ピクセルの電荷を読み出す。

のように行う。従って全体の縦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。

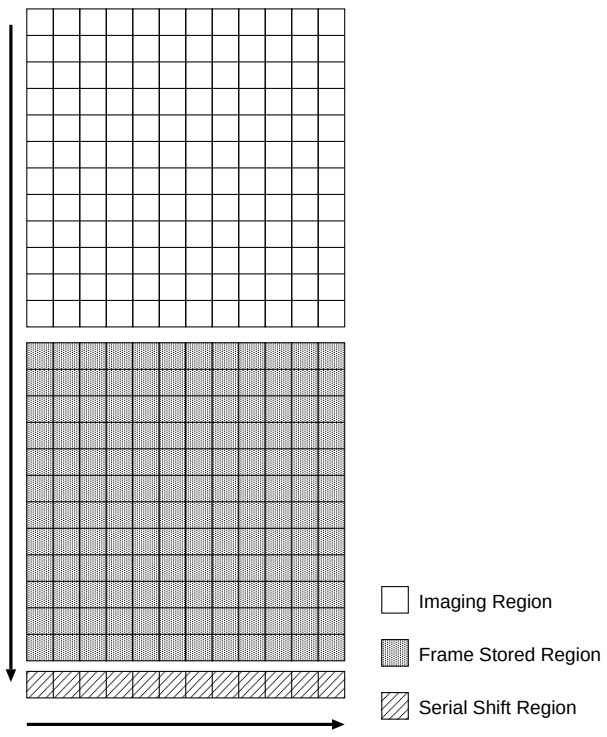

図 3.6: Frame Transfer 方式

Full Frame Transfer

Frame Transfer 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。読みだし口までの転送経路は Frame Transfer 方式と同じため、位置情

報を持たない X 線の入射する確率が高い。

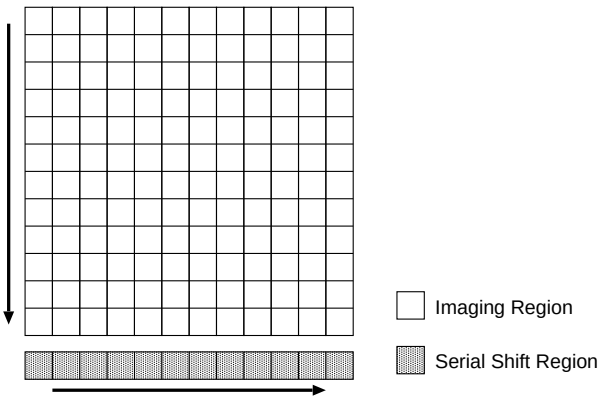

図 3.7: Full Frame Transfer 方式

Inter Line

Inter Line 方式では図 3.8 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。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。

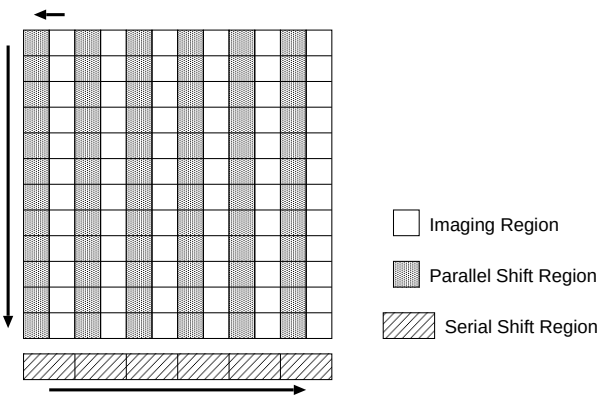

図 3.8: Interline 方式

3.1.8　データ処理

読みだし口まで転送された電荷は FET により電圧に変換される。CCD からのアナログ出力信号には図 3.9 左のように reset、floating、signal の各レベルからなり、floating–signal を信号波高値としてとりだす。XIS では、floating、signal それぞれのレベルを一定時間積分してその差を読み出す積分方式 (図 3.9 右) を用いている。

この後 ADC により変換されたデジタル信号値には、X 線による成分の他に FET 固有のバイアス値や暗電流成分等も含まれる。そこで解析時には、X 線が入射していない場合

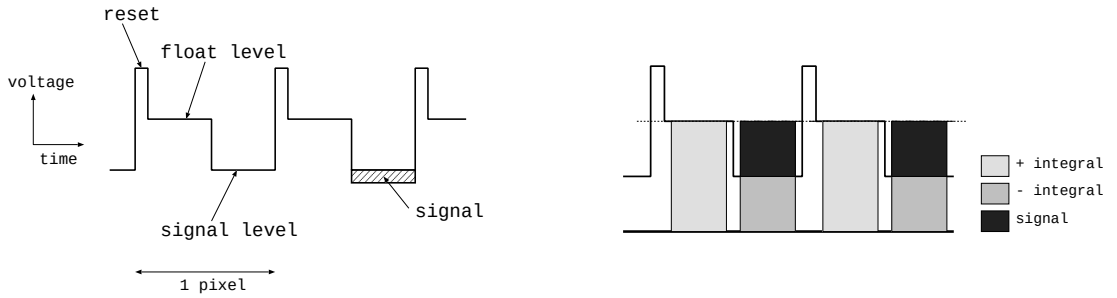

図 3.9: CCD からの出力信号と積分方式の概念図

の出力、即ちゼロレベルを測定しておき、波高値からゼロレベルを引いた値を X 線による成分の値として用いる。

また、二次電子雲の大きさと CCD のピクセルの大きさによっては、電極までのドリフトの間に拡散を受けた結果、電子雲が複数のピクセルに跨ることがある。したがって X 線 CCD では、分散した電荷を足し合わせて X 線のエネルギーを決定する。ここで注意しなければならないことは、分散した電荷とゼロレベルの揺らぎとを正確に区別すること、また荷電粒子と X 線とを区別すること、即ちバックグラウンドの除去である。これらをイベント抽出と言い、ピクセルレベルを正しく足し合わせた結果の波高値をイベント値と呼ぶことにする。

3.2 性能

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になってくる。

3.2.1 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。

3.2.2 エネルギー分解能

CCD 検出器のエネルギー分解能は読みだした電荷量の揺らぎである。エネルギー E の X 線が入射して生成される電荷の数は原理的には E/W_0 である。ここで W_0 はイオン化エネルギーで、Si の場合 3.65eV である。この電荷数はポアソン統計による揺らぎを持つ。しかし、実際には様々な要因により分布がポアソン分布からずれる。このずれをある定数 F に押し込めると、統計による揺らぎは

$$\sigma_e = \sqrt{F\frac{E}{W_0}} \tag{3.9}$$

と表せる。F はファノ因子と呼ばれ、Si の場合 F=0.12 である。また CCD の読みだしノイズ σ_{read} も考慮する必要があるので、最終的な電荷の揺らぎは

$$\sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{E}{W_0}} \tag{3.10}$$

と表せる。したがってエネルギー分解能 ΔE を FWHM で書くと以下のようになる。

$$\Delta E = W_0 \cdot \sqrt{8ln2} \cdot \sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{E}{W_0}} \tag{3.11}$$

3.2.3　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。3.1.2 で述べたように 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と検出効率は

$$Q(E) = \exp(-\int \lambda(E,l)dl) \times [1 - \exp(-\lambda_{\rm Si}(E)D)] \tag{3.12}$$

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。

3.2.4　読みだし速度

現在の X 線 CCD の多くは 1024×1024 かそれ以上のピクセルを持つ。1 ピクセルの読みだし時間は $\sim$10μsec 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。

3.3　問題となるもの

以上の CCD の性能は熱環境、放射線環境、あるいは製造過程やシステムにより性能の劣化を受けてしまう。以下に性能劣化につながる問題点を述べておく。

3.3.1　読みだしノイズ

電子回路起源のノイズであり、放射線による電荷がなくても乗る成分である。その大きさを知るためには CCD からの信号がゼロのときの出力を見れば良い。そこで CCD の実際のピクセル数よりも多く読み出しを行い架空のピクセルデータを得る。この領域を Over Clock Region と呼び、水平方向の読みだしを HOC(Horizontal Over Clock)、垂直方向の読み出しを VOC(Vertical Over Clock) という。

3.3.2 暗電流

半導体結晶は絶縁体に比べイオン化エネルギーが非常に小さく、熱運動によって共有結合が切れることがある。このためにCCDにX線が入射していなくても電荷が生成される。これを暗電流と呼ぶ。X線が入射しないピクセルデータには読みだしノイズと暗電流が含まれ、これらの足し合わせをゼロレベルとして引いた残りがピクセルレベルである。

3.3.3 光洩れ

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な設計がされたり、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。

3.3.4 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)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)と呼ぶ。CTIについて、及びその補正に付いては7、8章で詳しく述べる。

3.3.5 パイルアップ

露光中1つのピクセルに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

3.3.6 Hot Pixel

X線が入射していなくても常に高い波高値を示すピクセルがいくつか存在し、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出来たときにも生じる。解析の際にはこのピクセルは除く必要がある。

第4章　XIS

4.1　概要

Astro-E2 衛星には 4 台の XIS が搭載され、各々はセンサー、アナログ電気回路系 (AE)、デジタル電気回路系 (DE) から構成される。図??には、センサーから DE までの構成を示す。本章ではそれぞれの役割及び、観測時のモードとデータ処理法について説明する。

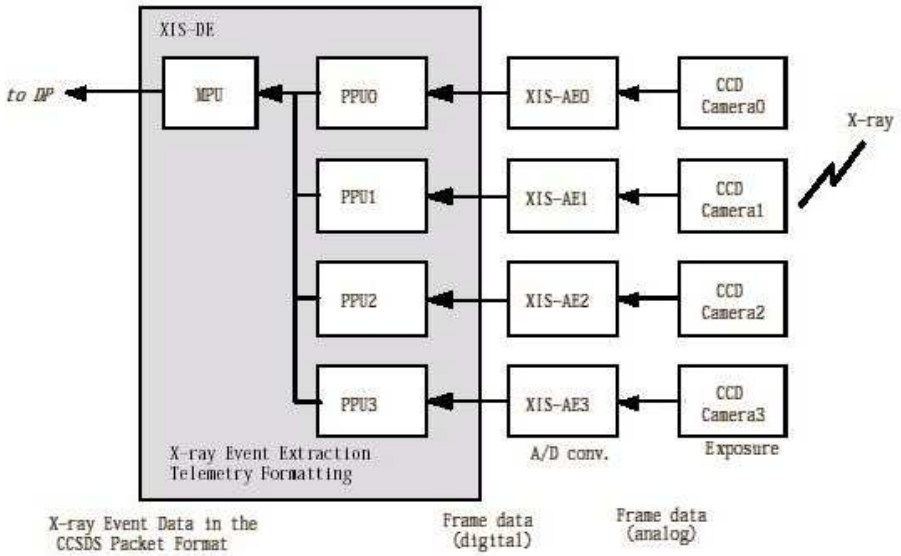

図 4.1: XIS センサー構成

4.2　打ち上げ直前から定常状態までのオペレーション

以下、衛星打ち上げ直前から打ち上げ後の定常状態までの主なオペレーションで特に 5 章の機能試験項目に関連する部分を中心に記す。

1. 打ち上げ前:ボンネット (4.3.2 節) とベース (4.3.3 節) を組み立てた状態で気密構造になっている。打ち上げ時の OBF への音響負荷低減のため CCD·OBF(4.3.2 節) 周辺を真空状態にする。打ち上げまでの間真空状態が保たれていることを確認するため圧力センサーの出力をモニタ。

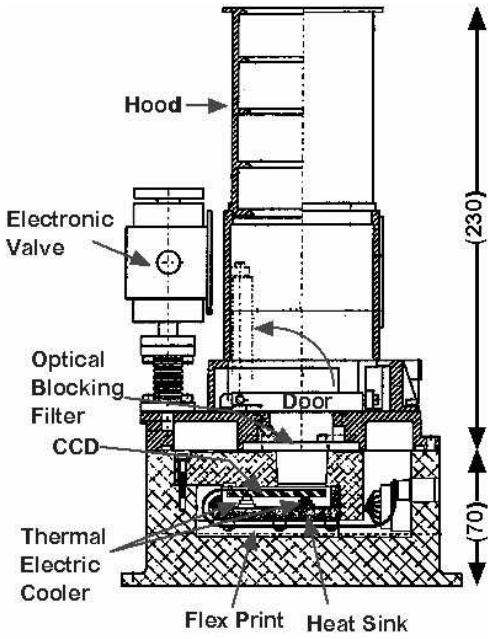

図 4.2: XIS センサー外観 · 構成

2. 打ち上げ直後:圧力を測定後、センサー内部での結露を防ぐためなるべく早くボンネットの電磁バルブを開けて排気。
3. AE、DE の電源を投入。
4. XIS データ取得開始。
5. TEC(4.3.3 節) の電源を投入して冷却開始。
6. 圧力が十分下がったことを確認した後、ドア (4.3.2 節) を開ける。
7. 排気系からの光洩れを防ぐため電磁バルブを閉める。
8. 温度が十分下がったことを確認した後、各種テスト、較正試験後に定常観測モードに入る。

4.3 センサー

センサー部は、CCD、可視光遮断フィルター、ベース、TEC から構成される。Flight sensor の各部の ID を表 4.1 にまとめ、センサー外観及び構成を図 4.2 に示す。

表 4.1: XIS センサー諸元

センサー	XIS0	XIS1	XIS2	XIS3
CCD	w1.3c6	x1.7c5	w1.7c6	w1.14c7

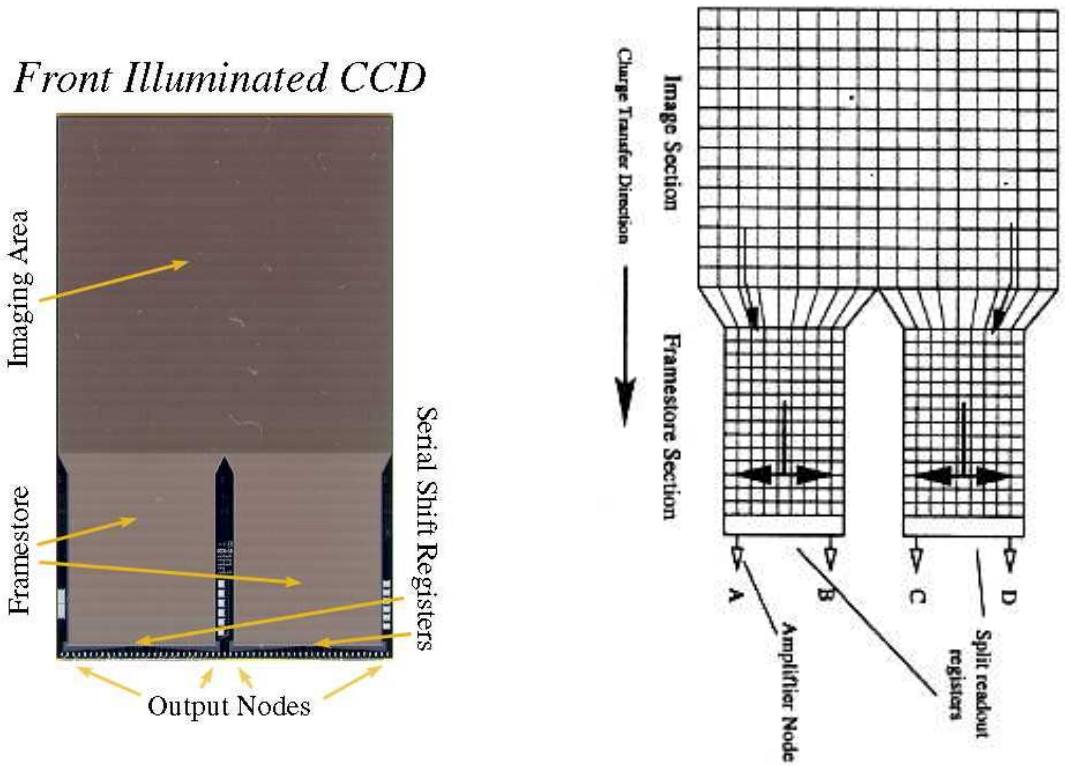

図 4.3: CCD チップ

4.3.1 CCD チップ

チップはマサチューセッツ工科大学リンカーン研究所製の CCID41 である。全体図を図 4.3 に、主な性能を表 4.2 に示す。ASCA SIS やチャンドラ ACIS と同じ MOS ダイオード型である。ASCA SIS では 4 枚のチップを調密に並べて 1 センサーを構成していたが、XIS では 2.5mm 四方の 1 チップで 1 センサーを構成している。表面照射型の 3 相方式で、Frame Transfer 方式を取っている。図上方が露光領域、下方が蓄積領域であり後者のピクセルサイズは 21μm 四方とわずかに小さい。チップ全体で 1024columns であるが、読みだし時間を短くするため 256column ごと 4 セグメントに分けられ、各々が独立の回路で読み出される。以下では図左からセグメント A、B、C、D と呼ぶ。また図中縦方向を parallel 方向、横方向を serial 方向と定義する。

表 4.2: XIS CCD 性能諸元

ピクセルの大きさ	24μm×24μm
ピクセル数	1024(横)×1026(縦)
有効面積	∼25mm×25mm
ウエハ厚	600μm
読みだしノイズ	3 electrons(RMS)
読みだし時間	8 sec (Normal mode)
	8 msec (P-sum mode)

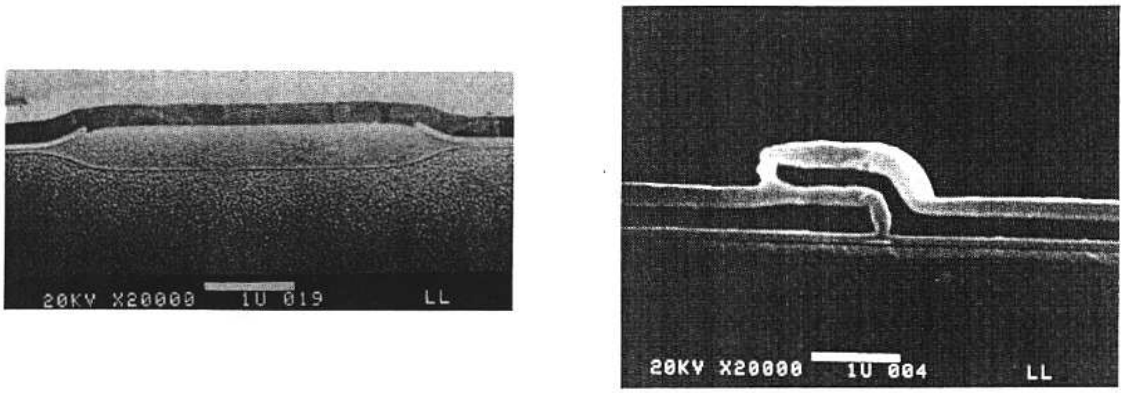

図 4.4: CCD 断面。(左) チャネルストップ構造。(右) ゲート構造。

CCD の 1 ピクセルの断面図を図 4.4 に示す。転送方向については 3 つの電極の各電圧を変えることで電荷をトラップすることが出来るが、転送方向と垂直な方向には複数の電極を持たないため電圧でトラップすることが出来ない。そこで半導体部分に不純物を周囲より多くドープさせたチャネルストップと呼ばれる構造を用いて、隣のピクセルとの間にポテンシャル障壁ををを作り電荷が洩れ出ないようになっている。この構造により、1 ピクセル内でも入射位置によって波高が異なり、応答関数に影響が現れる。

4.3.2 ボンネット · 可視光遮断フィルター (OBF)

ボンネットは XRT 以外の方向からの X 線を遮断し、集光された X 線のみを入射させるために取り付けられる。また集光されない X 線の入射を防ぐために、X 線や可視光がボンネット内壁での 1 回反射では CCD に決して入射しない設計になっている。

CCD は一般に可視光にも感度を持つため、XRT の方向から来る光を遮断するために OBF(Optical Blocking Filter) を前段に置く。OBF は厚さ 1000Å のポリイミドに合計 1200Å の Al を両面に蒸着させたもので、これにより可視光の透過率は 5×10^{-5} 以下に抑えられる。一方 O の KX 線の透過率は 70% である。X 線透過率は各 OBF でわずかに異なるため応答関数の作成において十分注意が必要である。

CCD 前面にはドアが取り付けられている。このドアは打ち上げ直後まで閉じられており、ドアに付けられた ^{55}Fe キャリブレーションソースにより打ち上げ直後の CCD の特性が調べられる。その後軌道上でドアを開けると、キャリブレーションソースによる X 線は入射しなくなり観測が開始される。ドア開けは地上からのコマンドでパラフィンアクチュエーターに通電させることで行う。パラフィン温度を上げるとアクチュエーターがドアロックのロッドを押し出して、十分に押し切るとドアがばねの力で開く仕組みになっている。ドアが開いたことの確認は、アクチュエーターのマイクロスイッチによって確認する。

またボンネット内部の真空度をモニタするために圧力センサーが取り付けられている。これは、打ち上げ時にボディ内が真空になっているかの確認が主要な目的である。

4.3.3 ベース·TEC

XIS ベースは、CCD を放射線から守るシールド、また CCD の支えとしての役割を持つ。CCD は軌道上特に South Atlantic Anomaly(SAA) 通過時に激しい放射線損傷を受ける。ASCA の経験などから、CCD が数年間性能を保ったまま動作するためには Al 換算で 10g cm^{-2} 程度のシールドが必要である。XIS ではベースの側面や熱浴、さらにボンネットのフード部の厚みを 3mm にすることで、視野方向以外の厚み 10g cm^{-2} を達成している。

CCD が設置されている Focal Plane Assembly には TEC(Thermo Electric Cooler) が配置されている。TEC は CCD を冷却するためのペルチェ素子である。ペルチェ素子とは異なる金属の接合部に電流を流すときに熱が発生するペルチェ効果を利用した冷却素子である。コマンドにより CCD の目標温度を設定すると、その温度に到達するまで TEC に電流が流れ続ける仕組みになっている。XIS は通常 $\sim -90\,^\circ$ C まで冷却され、暗電流は $\sim$0.4/frame/pixel と、SIS の 20 分の 1 以下に抑えられている。ただし、TEC はそれ自身の抵抗によって電流の 2 乗に比例したジュール熱を発生する。この熱が冷却で運ばれる熱量を越えると、加熱が起こってしまう。従って TEC に流す電流に上限値 (Soft Current Limit) を設定し、通常は SCL よりも低い電流を流している。

4.3.4 キャリブレーションソース

XIS2 号機からは、CCD チップ露光領域の左上端、右上端をそれぞれ常時照射するように ^{55}Fe の較正線源がつけられている。これは、エネルギーが既知である X 線を使うことで CTI をモニタし、機上でのゲインの較正を行うためである。またドアにも 1 つ線源が取り付けられており、軌道に乗りドアが開けられるまでの間、チップ全体に X 線が照射されるようになっている。またドアが開いた後は、この線源からの X 線が CCD に入射しないような設計になっている。

4.3.5 電荷注入機能

XIS2 号機には撮像領域の最上部、読みだし口から最も遠い部分に新たにシリアルレジスタを設けており (図 4.5 左)、ここから CCD へ電荷の注入が可能になっている。このレジスタは撮像領域全体 1024 ピクセル分の長さがあり、読みだしのためのシリアルレジスタと結線されていて同期した横転送が可能になっている。即ち読みだし用のシリアルレジスタを 1 回横転送して 1 ピクセル読み出すと、同時に CI 用シリアルレジスタが Input Diode から右方向に 1 ピクセル分横転送される。電荷注入時には、横転送と注入を繰り返すことでレジスタ全体に渡って電荷を用意することが出来る。例えば「横転送 $\times$4 回、電荷注入」を 256 回繰り返すことで、レジスタ全体に 3 ピクセル置きの電荷を配置することになる。その後レジスタの電荷を撮像領域最上列に縦転送することで電荷注入が完了する。

電荷の注入には"fill and spill" という方法が用いられる。図 4.5 右は CI 用レジスタの注入口付近のポテンシャルを示している。Input Diode(ID) が注入電荷の源である。ID のポテンシャルを高くすることで電荷を Input Gate(IG) と電極 Φ1 に貯めるのが"fill" 状態である。このとき IG と Φ1 のポテンシャルの高低関係は図の様にしておく。その後 ID のポテンシャルを低くする ("spill") と、電荷が IG 方向に戻り、IG と Φ1 のポテンシャルの差の分だけ電荷が Φ1 に残る。このように注入電荷量は IG と Φ1 の電位差で決まるが、コマンドでこの電位差を 1mV 単位で制御することが出来る。ここまでがレジスタ左端のピクセルに電荷を注入する方法であり、この後通常の横転送でレジスタのある列まで電荷を運

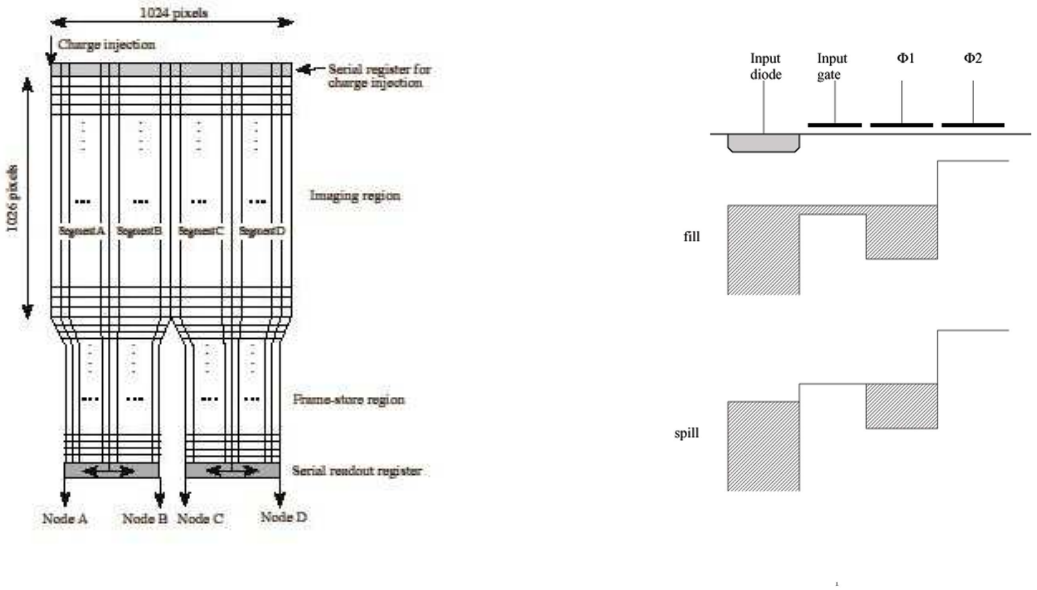

図 4.5: 電荷注入レジスタの位置と電荷注入の原理

び縦転送して撮像領域へと注入する。

この機能の目的は CTI をモニタし、エネルギー分解能の補正を行うことである。詳細は 7 章で述べるが、キャリブレーションソースのイベントと注入電荷量を比較することで CI 用シリアルレジスタの CTI を切り離して考えることが出来るため、撮像領域から読みだし口までの CTI を column 毎に知ることが出来る。

4.4 周辺回路

4.4.1 アナログ電気回路系 (AE)/温度制御回路 (TCE)

AE(Analog Electronics)/TCE(Thermal Controller Electronics) は、CCD から送られる各ピクセルの波高値信号の AD 変換や CCD の制御を行うアナログ電気回路系と、CCD を冷却する TEC の温度を制御する回路系の総称である。AE/TCE は以下の 4 枚の回路基板から構成される。

- Controller Card

  AE/TCE を制御するカード。DE からのコマンドはまず Controller Card に送られ、読みだしコマンドであれば指定された Card の特定の channel の HK (House Keeping) データを取得して DE に送る。この HK データは Controller Card で AD 変換される。また Sequencer から CCD のクロックパターン信号を発生し、Driver 回路、Video 回路を制御する。さらに TCE Card に対してもクロックを送る。

- Driver Card

  CCD を動作させるためのドライブ信号を発生するカード。ドライブ信号には、電荷転送時の撮像 · 蓄積それぞれの領域の駆動電圧や、電荷注入用の Input Gate と Input Diode の電圧差、また各セグメントのドレイン電圧等が含まれる。これらの値は Driver Card 上の DAC に設定された値により決まる。

- Video Card

  CCD からのアナログ信号を処理し、各ピクセルの信号レベルの AD 変換を行うカード。各ピクセルの電荷量は floating level と signal level の差で決まる。XIS では積分方式 (3.1.8 節) で電荷量を求めているが、積分時間やリセットのタイミングは後述する μ-code によって決められる。

  この電荷は Video Card 上の 16bit ADC により AD 変換される。ゲインは μ-code で積分時間を変更することで変えることも可能であるが、次のように 12bit の pixel data を使うことでゲインの切り替えをしている。

  - Gain High: 15bit(MSB)-0bit(LSB) のうち 13-2bit 目を選ぶ
  - Gain Low : 15bit(MSB)-0bit(LSB) のうち 15-4bit 目を選ぶ

  Gain High で約 4eV/ch になっている。

- TCE Card

  TEC に流れる電流を制御して CCD の温度制御を行うカード。具体的には TEC の CCD 側温度と heat sink 側温度を常にモニタしており、それとコマンドで設定した CCD の到達目標温度を比較して、電流制御を行う。Cooling mode と Annealing mode があり、それぞれ CCD を冷やす方向、温める方向に TEC 電流を流すモードである。TEC 電流の最大値を制御するためのパラメタ、電流リミットがある。これが小さすぎると目標温度に到達できなくなり、大きすぎると温度が不安定になる。

4.4.2 デジタル信号回路 (DE)

AE で AD 変換された CCD の PH データは DE に送られ X 線イベント判定が行われる。さらにイベント情報はテレメトリフォーマットに編集され、XIS、HXD、XRS 共通の DP(データプロセッサ) へ送られる。前者は PPU(Pixel Processing Unit)、後者は MPU(Main Processing Unit) が行う。この他にも DE は AE へのコマンドや HK 情報のインターフェースをとったり、AE の μ-code を保持するなどの役割を持つ。

4.5 データ解析法

4.5.1 補正

CCD 各ピクセルの信号を AD 変換した値 (PH データ) は、X 線の電荷による値にオフセットがかかっているため、まずそれを差引する補正が以下のように加えられる。

$$(\text{ピクセルレベル}) = (PH\ \text{データ}) - (\text{ダークレベル}) - (\text{光洩れ量}) \tag{4.1}$$

以下でこの補正に付いて説明する。

ダークレベル補正

ダークレベルはピクセルに放射線が何も入射していないときのレベル、つまりゼロレベルであり、読みだしノイズの揺らぎと暗電流を足し合わせたものである。ASCA SIS では

放射線損傷によるピクセル毎のダークレベルのばらつきによってエネルギー分解能が悪化して問題となった。XIS ではこれを防止するためピクセル毎にダークレベルを求める。

ダークレベルの設定には Dark Init、Dark Update の 2 つのモードがある。前者は以前のダークレベルの情報を一度破棄してから決定するのに対し、後者は以前のダークレベルをもとに新しいダークレベルを決定する。いずれのモードも、Normal/Burst モードでは指定した frame 数 (通常は 16) のデータから、P-sum モードでは指定したピクセル上のライン数 (通常は 8) のデータから決定される。n 回目の exposure のあるピクセルの波高値を PH(n)、n-1 回目の exposure 時でのダークレベルを D(n-1) とすると、D(n) の決め方は、

$$\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} > \mathrm{DarkUpper} \text{ の時、} \mathrm{D(n)} = \mathrm{D(n-1)} \tag{4.2}$$

$$\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} < \mathrm{DarkLower} \text{ の時、} \mathrm{D(n)} = \mathrm{PH(n)} \tag{4.3}$$

$$\mathrm{DarkLower} < \mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} < \mathrm{DarkUpper} \text{ の時、}$$
$$D(n) = D(n-1) + \frac{(PH(n) - D(n-1))}{h} \tag{4.4}$$

ここで DarkUpper/Lower はダークレベル閾値の上下限値であり、h はヒストリーパラメタ (通常は 8) である。また Dark Init/Update モードの最後に各ピクセルのダークレベルを Hot pixel 閾値と比較し、前者が大きい場合は Hot pixel と認識して地上にその情報が送られる。

なお XIS では SAA 通過後にダークレベルがジャンプすることが経験的に分っている。したがって観測モード変更後及び SAA 通過後にダークレベルが更新される。

光洩れ量補正

光洩れは、可視光などの入射による信号レベルの一様な変動であり、衛星が日陰から日向、あるいはその逆に移ったときに特に変動する。XIS では光洩れによる観測への影響を抑えるため Normal/Burst モード (4.6.2 節参照) では光洩れ量を撮像毎に計算、更新している。なお P-sum モードの場合、ダークレベル更新が常に行われているため光洩れ補正は行う必要は無い。

光洩れ量はセグメントを区分けした区分毎に定義され、区分けは 1×1 から 4×16 まで (通常は 4×16) 選ぶことが出来る。ある区分について、n 回目の撮像時の光洩れ量 L(n) は、

$$\mathrm{LightLow} < \mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n)} - \mathrm{L(n-1)} < \mathrm{LightUppr} \tag{4.5}$$

であるピクセルについてピクセルレベルの平均を取り L(n-1) に加えた値、

$$\mathrm{L(n)} = \mathrm{L(n-1)} + < \mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n)} - \mathrm{L(n-1)} > \tag{4.6}$$

と計算される。ここで LightLow/Uppr は光洩れ閾値の上下限値である。また L(n) が maxLight とよばれる値を越えた場合は L(n)=maxLight として次の撮像時にはこの L(n) を光洩れ量として与える。

4.5.2 イベント抽出 · 解析

Grade 法

Grade 法では、イベント中心ピクセルの周囲 3×3 ピクセル内でのイベントの広がりから、Grade を定義することによって X 線イベントとバックグラウンドイベントを区別している。イベントとして定義されるのは以下の条件を満たしたものである。

- ピクセルレベルがイベント閾値の上下限値の間であること。
- ピクセルレベルが周辺 3×3 ピクセルのピクセルレベルよりも高いこと。

イベントと認識されると、周囲 3×3 ピクセルの領域内でスプリット閾値と呼ばれる値を越えたピクセルの分布のパターンから、図 4.6 のように Grade が定義される。スプリット閾値は当該ピクセルのピクセルレベルがダークレベルの揺らぎなのか隣のピクセルの電荷の洩れ出しなのかを判断する閾値であり、XIS1 号機 ·2 号機ともダークレベルの 4σ(20 ch) に設定してある。

X 線イベントは広がっても高々2×2 ピクセルであるのに対し、荷電粒子によるイベントは 3×3 一杯あるいはそれ以上に広がる。このため Grade7 のイベントはバックグラウンドとして取り除く。また、Grade1 と 5 の広がり方は、電荷の洩れ出しではなくパイルアップと考えられるので取り除く。これら以外の Grade02346 のイベントを X 線とみなす。Grade02346 のイベントについては、3×3 の領域内でスプリット閾値を越えるピクセルは電荷が洩れ込んでいるものとみなせるのでこれらのピクセルレベルを中心ピクセルのピクセルレベルに足すことで、X 線のエネルギーに対応する電荷量を集めることが出来る。

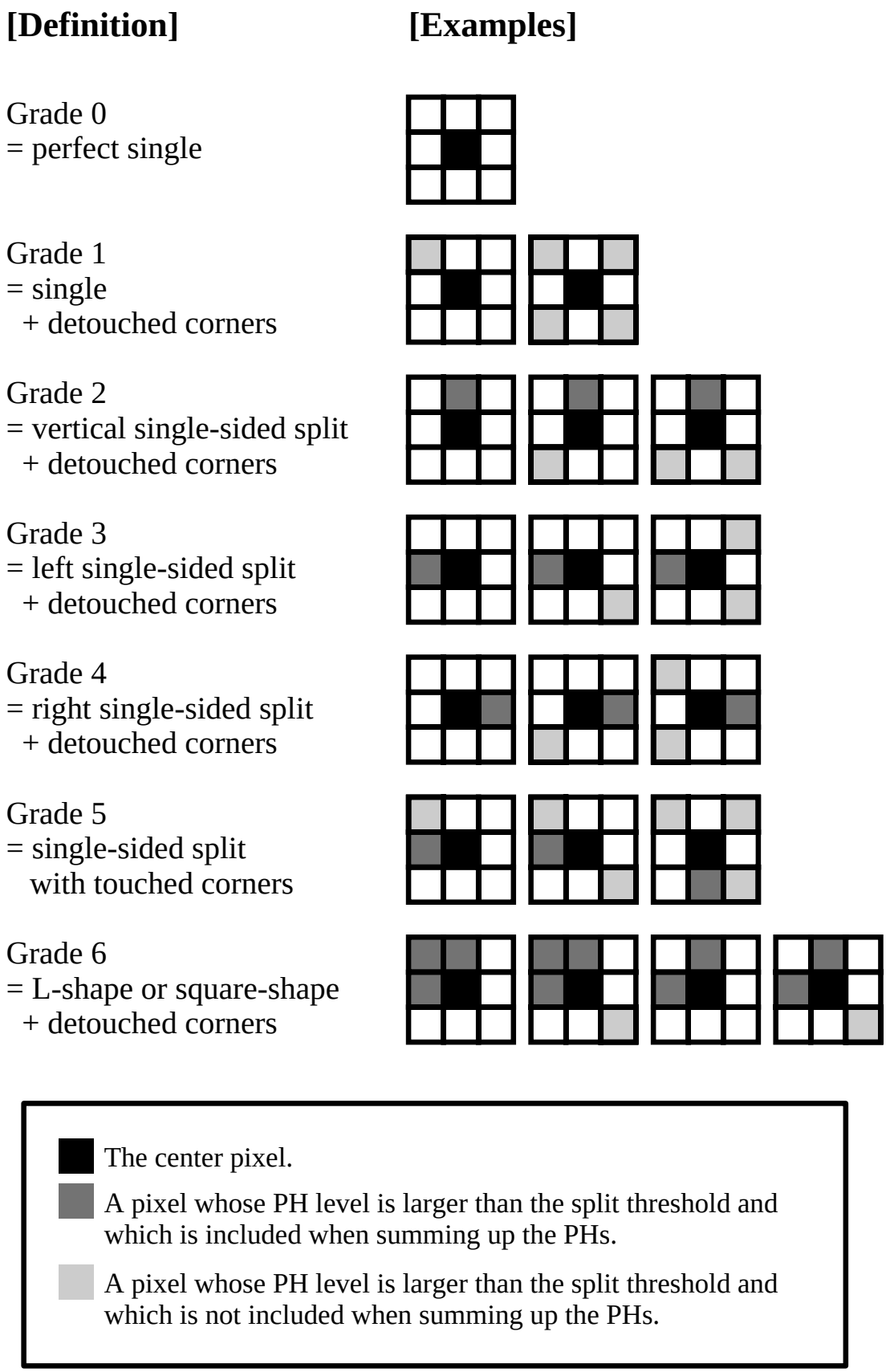

図 4.6: Grade 法 (Normal モード)

P-sum モードの場合、図 4.7 のようにイベント中心とその左右のピクセルでの値から X 線イベントがどうかを判断している。

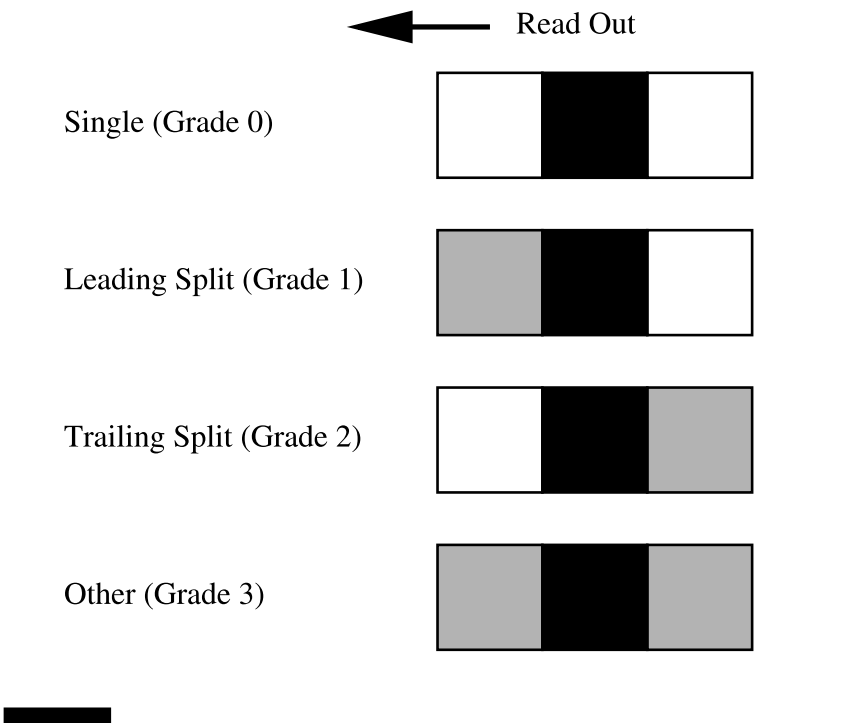

図 4.7: Grade 法 (P-sum モード)

fitting 法

fitting 法は硬 X 線に対する検出効率を上げるために開発中のイベント解析法である。硬 X 線が入射した場合、軟 X 線に比べウェハ中の吸収される位置が深いため電極上で 3×3 ピクセル以上に広がってしまう場合がある。したがって Grade 法では X 線として認識されず検出効率が下がってしまっている。

このようなイベントを救うためには 3×3 ピクセル以上の広がりを考慮しなければならない。XIS では ASCA SIS に比べメモリー、記憶装置、データ転送量の制限が無く、5×5 ピクセルのデータを転送している。そこで fitting 法では 5×5 ピクセル領域内のイベントの広がりを 2 次元のガウス関数で fitting し、ガウス関数を 7×7 ピクセル分積分することで、ガウシアンの幅と積分値の 2 つのパラメタを決める。荷電粒子のイベントはガウス幅が大きく、X 線によるイベントと区別できる。さらに積分値とガウス幅の関係から、CCD の中性領域で吸収されたイベントも救うことが出来る。

4.6 駆動方式

4.6.1 μ-code

XIS の駆動方式は μ-code によって決まる。μ-code は大きく S-ram と P-ram とに分けられる。前者は 1/40960 秒単位での CCD の基本的な動作クロックを決定し、後者は前者の組合せで様々な観測モードを決定する。以下に今回の実験で用いた μ-code の例を示しながら説明する。

S-ram

横転送して 1 ピクセル分の電荷を読み出す S-ram を次に示す。横軸は時間で、最小時間分解能 (500ns) 毎の各 bit の High(-)/Low(.) レベルを指定している。bit0 から bit2 はシリアルレジスタの電極の電圧状態を指定していて、下の場合、電荷を S3 レジスタへと導いている。また bit3 が Low になることで floating level が積分され、bit4 が Low になることで signal level が積分される。

cal_serial

```
time:                   000000000011111111112222222222333333333344444444
                        012345678901234567890123456789012345678901234567

b0    S1.OR     Driver  ------------------------..........................
b1    S2.OR     Driver  ................------------------------........
b2    S3.OR     Driver  --------........................----------------
b3    ~VINT-    Video   --------------------............----------------
b4    ~VINT+    Video   --------------------------------............----
b5    ~VTRACK   Video   ................-------------...................
b6    VRST      Video   ................----............................
b7    (ID)              ................................................
b8    S1.IA     Driver  ------------------------------------------------
b9    S2.IA     Driver  ------------------------------------------------
b10   S3.IA     Driver  ................................................
b11   S1.FS     Driver  ................................................
b12   S2.FS     Driver  ------------------------------------------------
b13   S3.FS     Driver  ................................................
b14   SRG       Driver  ----......------------------------------------
b15   (unused)          ................................................
```

P-ram

Normal モードで、4 列だけ電荷注入をする P-ram を次に示す。この P-ram で 1frame 分のクロックパターンを表している。概要を説明すると、左端の列にコマンドの種類、その右に S-ram の種類、さらに右に読みだしたピクセルがどの領域のものか (AP は Active Pixel、HO は Horizontal Overclock、IA は Inactive など)、が示されている。このように数種類の S-ram のみを組合せネスト構造を取ることで、1 セグメントの読み出しを実現している。

```
Start: SEQE 1                cal_serial      IA # Dummy
SEQI 1                       cal_serial      IA (D_WRITE_DAC to D_DAC_CHAN5 with 250)
SEQ 1                        cal_serial      IA # wait for IA(low)= 100 - 250 = -150
SEQI 1                       cal_serial      IA (D_WRITE_DAC to D_DAC_CHAN3 with 50)
SEQ 1                        cal_serial      IA # wait for IA(high)= +50
SEQ 4                        cal_parallel    IA # 4 of 1026 total transfers
SEQE 1022                    cal_parallel    IA # 1022 of 1026 total transfers
SEQE 128                     cal_serial_ci   IA #warm up ci capacitor, fill IR traps
DO 256
SEQE 1                       cal_serial_ci   IA # x000
SEQE 3                       cal_serial      IA
ENDDO
SEQE 1                       cal_inj_ci      IA # Load IA2
SEQE 4                       cal_image       IA # Move 4 rows
DO 256
SEQE 1                       cal_serial      IA # 0x00
SEQE 1                       cal_serial_ci   IA
SEQE 2                       cal_serial      IA
ENDDO
SEQE 1                       cal_inj_ci      IA # Load IA2
SEQE 4                       cal_image       IA # Move 4 rows
DO 256
SEQE 2                       cal_serial      IA # 00x0
SEQE 1                       cal_serial_ci   IA
SEQE 1                       cal_serial      IA
ENDDO
SEQE 1                       cal_inj_ci      IA # Load IA2
SEQE 4                       cal_image       IA # Move 4 rows
DO 256
SEQE 3                       cal_serial      IA # 000x
SEQE 1                       cal_serial_ci   IA
ENDDO
SEQE 1                       cal_inj_ci      IA # Load IA2
SEQE 4                       cal_image       IA # Move 4 rows
SEQI 1                       cal_serial      IA (D_WRITE_DAC to D_DAC_CHAN3 with 255)
SEQ 1                        cal_serial      IA # wait for IA(high)= +255
SEQI 1                       cal_serial      IA (D_WRITE_DAC to D_DAC_CHAN5 with 52)
SEQ 1                        cal_serial      IA # wait for IA(low)= 100 - 52 = +48

# Flush OR 2 times
SEQ 2                        cal_frame       IA # Dump 2 rows
SEQ 2                        cal_serial      IA # 2 of 260
SEQE 258                     cal_serial      IA # 258 of 260

SEQE 260                     cal_serial      IA

# Clock out 1st Row
SEQE 1                       cal_frame       IA # Transfer 1 FS row to OR
SEQE 4                       cal_serial      IA # Clock out underclocks
SEQE 1                       cal_serial      FS # Clock out FrameStart
SEQE 255                     cal_serial      AP # Clock out ActivePixels
SEQE 15                      cal_serial      HO # Clock out Horiz. O'clks
SEQE 1                       cal_serial      LE # Clock out Line End
# Clock out next 1022 rows
DO 1022
SEQE 1                       cal_frame       IA # Transfer 1 FS row to OR
SEQE 4                       cal_serial      IA # Clock out underclocks
SEQE 1                       cal_serial      LS # Clock out Linestart
SEQE 255                     cal_serial      AP # Clock out ActivePixels
SEQE 15                      cal_serial      HO # Clock out Horiz. O'clks
SEQE 1                       cal_serial      LE # Clock out Line End
ENDDO

# Clock out last row

SEQE 1                       cal_frame       IA # Transfer 1 FS row to OR
SEQE 4                       cal_serial      IA # Clock out underclocks
SEQE 1                       cal_serial      LS # Clock out FrameStart
SEQE 255                     cal_serial      AP # Clock out ActivePixels
SEQE 15                      cal_serial      HO # Clock out Horiz. O'clks
SEQE 1                       cal_serial      FE # Clock out Line End
# Idle waiting for next start sequence command (Integrate IA)
Idle: SEQE 1                 cal_serial      IA # Flush OR while waiting
JMP Idle
```

4.6.2 モード

XIS には、読みだし方式を決めるクロックモード (前節の μ-code によって決められる) と、1frame で出力される情報を決めるエディットモードの 2 種類がある。以下、両者について説明した後、両者の組合せで可能なものを表に示す。

クロックモード

1. Normal モード

   Normal モードは CCD の全てのピクセルを読み出すモードであり、読み出しには約 8sec かかる。

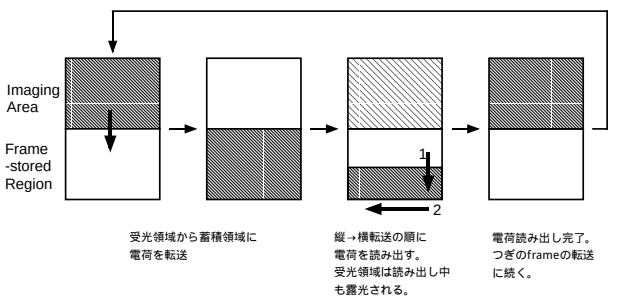

図 4.8: Normal モード

2. P-sum モード

   P-sum モードはピクセルの電荷量を縦方向に適当な数のライン分足し合わせてから読み出すモードである。足し合わせるライン数は 64、128、256 ラインから選ぶことが出来る。X 線イベントの空間情報は失われるが、読みだし時間が約 8msec と短いため時間分解能に優れる。

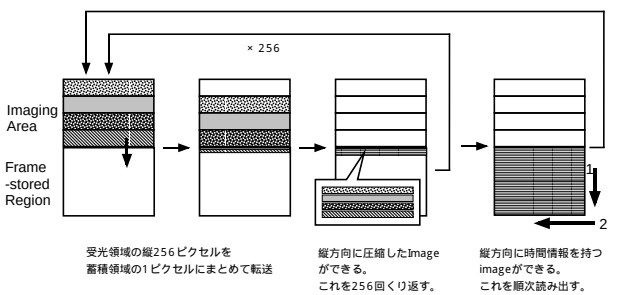

図 4.9: P-sum モード

3. Burst モード

Burst モードは Normal モードに比べ露出時間が短いモードである。露出の途中で一度露光領域の一番下の段に転送して再度露出する。Burst モードの露出時間は 0.1 から 2sec の間の数種類から選べる。パイルアップが起こるような明るい X 線源に対しても有効な観測が行えるが、実効的観測時間は全観測時間の数分の一から数百分の一になってしまう。

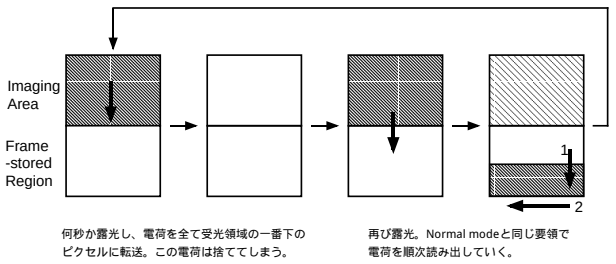

図 4.10: Burst モード

4. Window オプション

   CCD の特定の領域のみを繰り返し読むオプションである。Window サイズは CCD の縦のサイズの 1/4、1/8、1/16 から選べる。露光時間を短くしてパイルアップを防ぐというでは Burst モードと同じだが、Window オプションでは全観測時間に対する実効観測時間の比を Burst モードに比べ大きくできる。

エディットモード

DE はある決められた書式でテレメトリを出すが、テレメトリの容量に制限があるため 1 イベントに付いて送信できる情報には制限がある。XIS では以下のようなエディットモードを用意しており、X 線天体の明るさに応じて使い分けることにしている。

1. 5×5 モード

   イベント中心ピクセルの位置と、周囲の 5×5 全ピクセルのピクセルレベルを送信する。1 イベント当たりのデータ量はもっとも多く、明るい天体の観測の場合データ量の飽和に注意が必要である。

2. 3×3 モード

   イベント中心ピクセルの位置と、周囲の 3×3 ピクセルのピクセルレベル、また周囲の 16 ピクセル各々がスプリット閾値を越えているかどうか、さらに 16 ピクセルのうちスプリット閾値を越えていないピクセルのピクセルレベルの和を送信する。

3. 2×2 モード

   イベント中心ピクセルと 2 番目に波高値の高いピクセルを含む 2×2 ピクセルの Pixel level、3×3 ピクセル中の 2×2 ピクセルの位置、2×2 ピクセルの周囲の 8 ピクセル各々がスプリット閾値を越えているかどうかの情報を送信する。2×2 ピクセルの選び方は以下の通りである。

(a) 中心ピクセルの上下左右の 4 ピクセルのうち、最も波高値の高いピクセルを選びその反対側のピクセルを考慮から外す。

(b) 残った 2 ピクセルのうち波高値の高いピクセルを選ぶ。

(c) 中心ピクセルと、1.、2. で選んだピクセルを含む 2×2 ピクセルを選ぶ。

4. Timing モード

P-sum モードで用いられる。イベント中心とその左右のピクセルで、スプリット閾値を越えているものについてのピクセルレベルの和を出力する。またイベントの Grade(後述) も出力する。

5. Dark Init/Update モード

前者はダークレベルを更新し、その後 Hot Pixel の座標とそのダークレベルが出力される。P-sum モードの場合、Dark Update はイベント検出と並行に行うため出力されるデータは Timing モードのままである。

6. Frame モード

1frame 分の全ピクセルの波高値が出力される。ただし Window オプションを使用中の場合は、選択した領域のみの波高値が出力される。

7. Dark Frame モード

全ピクセルのダークレベルが出力される。

クロックモードとエディットモードで可能な組合せを表 4.3 に示す。

表 4.3: クロックモードとエディットモードの組合せ

	Normal	P-sum	Burst
5×5	◎	×	◎
3×3	◎	×	◎
2×2	◎	×	◎
Timing	×	○	×
Dark Init	◎	○	◎
Dark Update	◎	×	◎
Frame	◎	○	◎
Dark Frame	–	–	–

◎ :Window オプション対応可、○ :使用可だが Window オプションは対応不可、–:クロックモードとは無関係な処理

第5章　機能試験

本章ではXISが正しく動作することを確認するための機能試験の結果を述べる。ドア開け試験、TECの冷却性能試験、圧力センサ出力値の温度依存性、XIS2号機から加わったCI機能に関連したHK情報のモニタによるノイズや干渉の調査、CI機能を組み込むことによるピクセルレベルに現れる構造の調査結果について説明する。

5.1　ドア開け試験

4.3.2節で述べたようにドアはパラフィンを加熱することで開くため、パラフィン周辺の温度環境によって通電開始からドアが開くまでの時間が変化する。今回の地上試験では、ドアが実際に開くことの確認及び通電開始からドアが開くまでの時間の測定を行い、パラフィンアクチュエーターが予定通り動作するのを確認することが目的である。

実験はFlight Model AE/TCE 01とFM用EGSE(Electric Ground Support Equipment)を用いてS0、S1両センサーについて行った。EGSEの通電開始スイッチを押してから、パラフィンアクチュエーター部の白金抵抗(Pt1000)の出力値をモニタした。このときのパラフィンアクイチュエーター温度、通電開始後ドアが開くまでの時間、開いたときの消費電流の大きさを表5.1に示す。また通電開始からの時間と白金抵抗(Pt1000)の値の関係、及び抵抗値を温度に変換したものを図5.1に示す。抵抗値と温度の変換式はT=273.25/1000 × R-273.25である。

表 5.1: ドア開け試験の結果

	アクチュエーター温度 (° C)	ドア開までの時間 (sec)	PSU 消費電流 (mA)
S0	–44	375	340
S1	–42	358	350

図5.2に、1号機Flight Modelとの比較を示す。ドアが開くまでの時間はほぼ1号機のときと同等であり、機上でのドア開け作業には問題ないことが確認できた。

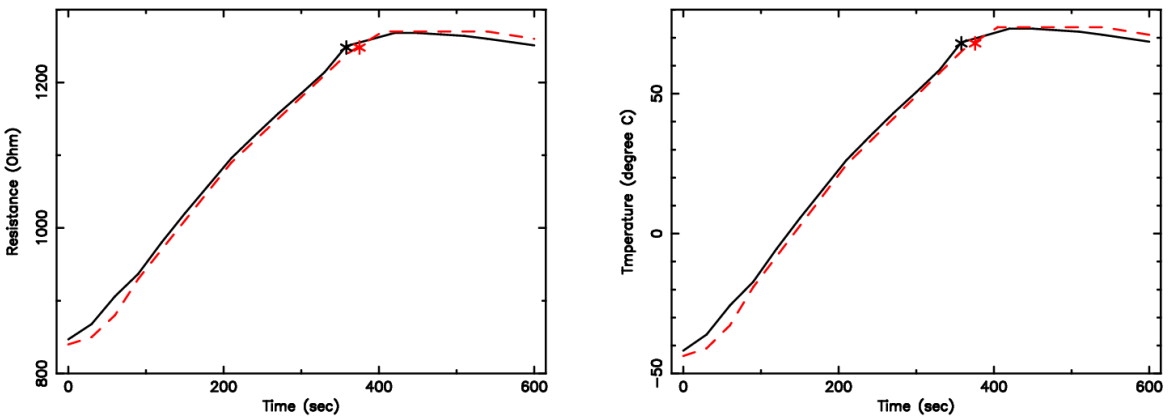

図 5.1: 通電開始からの時間と白金抵抗値 · 温度
点線が S0、実線が S1 センサーの結果。印でドアが開いた時刻を示している。

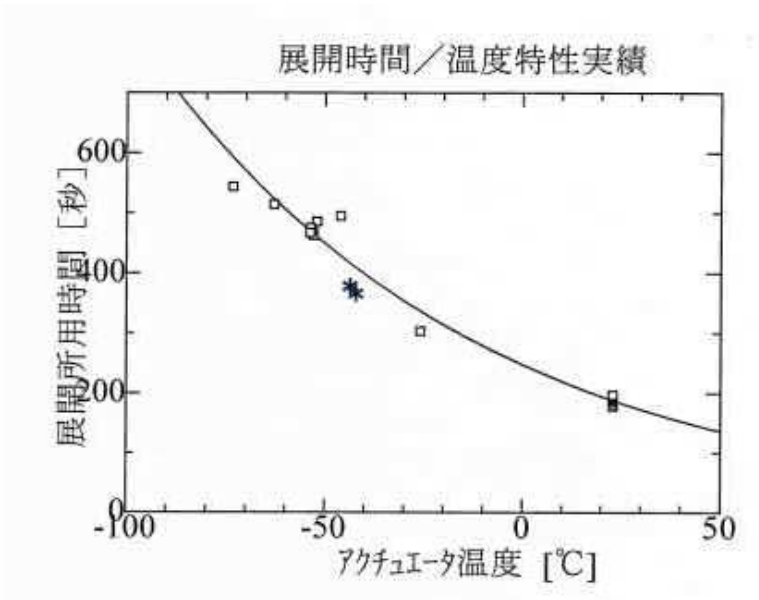

図 5.2: 1 号機でのドア開けまでの時間と今回の試験の比較
四角が 1 号機 Flight Model の結果 (ボンネット製作担当の NTspace による)。
印が今回の機能試験の結果。

5.2　TEC 冷却性能試験

TEC の冷却性能を調べるために XIS ベースプレートの熱浴側を ∼–40 ° C に固定し、BUS 電源の供給電力による CCD 到達温度の変化を調査した。供給電力を一定に保つために CCD 目標温度を低く設定し、電流を SCL の 110%、100%、80%、60%、40%に制限した。

図 5.3 は BUS 電源の供給電力に対して、CCD 温度を示したもの及び heat sink と CCD

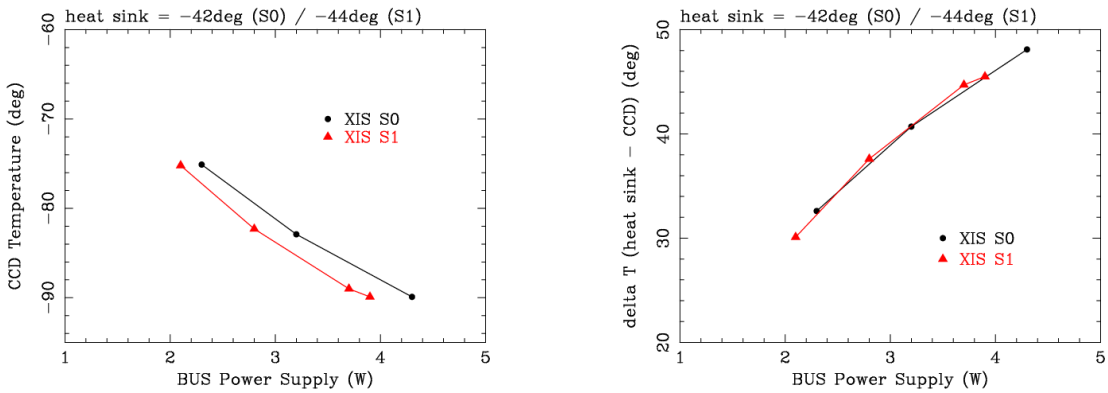

図 5.3: BUS 電源消費電力に対する CCD 温度、及び CCD-heat sink 間の温度差

の温度差を示したものである。S0 と S1 では熱浴の温度が異なっていたため、右図の方がより TEC の冷却性能の比較に適しているが、S0 と S1 でほとんど変わらない。ただし、今回 S0 の試験のときはドアが開いていたが S1 の時は閉じていた。それでも冷却性能に差が無かったことからドアの熱環境に与える影響は小さいことが分る。S0 では ∼4.3W で、S1 では ∼3.9W で CCD 温度が目標の-90 ° C に到達している。予定電力の 4W にほぼ近い結果になり TEC の冷却性能に問題が無いことを確認した。

ここで、実際は BUS 電源からの電流は全て TEC に流れているわけではなく一部は他のコンポーネントに流れている。例えば、S0 センサーで SCL の 110%の時 BUS 電流は 97.5mA 流れていたが、うち 10.2mA は PSU 電源を ON にしただけでも流れている成分である。つまり横軸の値は正確な TEC の消費電力ではないことに注意されたい。もう一つ注意すべきなのは、今回の実験では CCD に OBF が付いていないことである。また X 線入射方向の温度は室温である。このため打ち上げ後とは熱流入量が異なる点に注意しなければならない。機上では今回の実験時より低電力で目標温度に達すると思われる。

5.3 圧力センサー出力値の温度依存性

ボンネットの真空度モニタのために取り付けられている圧力センサーには温度度リフトが存在する。そのため正確な真空度を知るためにはあらかじめそれを較正しておく必要がある。そこで圧力センサーの出力電圧の温度依存性を調べた。

S0 及び S1 センサーの機能試験終了後に CCD を ∼–60 ° C から常温に戻す際圧力センサーの温度と出力電圧値を同時にモニタした。温度は圧力センサーの隣にある白金抵抗 (Pt1000) の抵抗値から求める。このときの圧力センサーの出力値と白金抵抗値の関係を図 5.4 に示す。

5.4 CI 関連 HK 項目読みだし起源のノイズ調査

ドライバー信号の電圧値は HK 情報として測定中もモニタすることが出来るが、信号の項目によっては HK 情報を読み出すこと自体によってピクセルレベルにノイズや干渉がのってしまうことが知られている。図 5.5 は 1997 年 9 月の 1 号機 EM1 センサーを使った実験で各セグメントの Active 領域と HOC 領域のある frame の PH データを parallel 方向に射影したものである。y=100、400、700 付近に見られるセグメント共通のノイズは、ある特定の HK 情報をモニタすることで乗ることが分っている。ノイズが等間隔に並ん

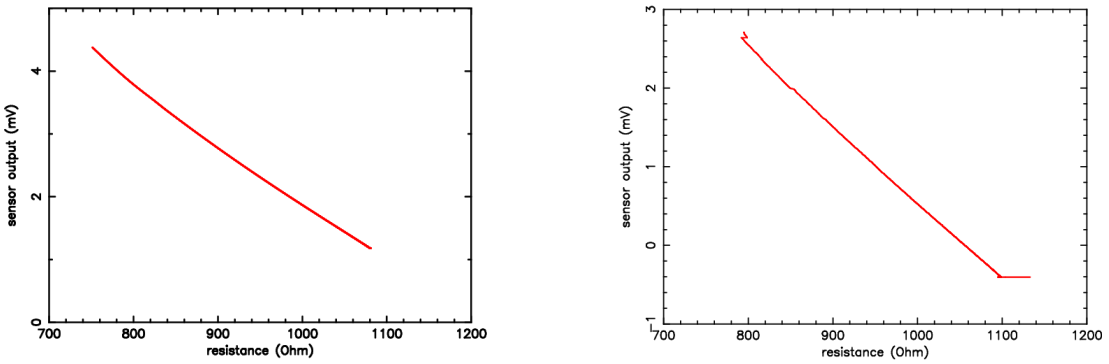

図 5.4: 圧力センサー出力値と白金抵抗値の関係
(左):S0 の結果。(右):S1 の結果。

でいるのは、HK 情報をモニタするコマンドが一定の時間間隔で自動的に打たれているためである。以下では一定間隔で自動的にモニタする HK 項目を常時 HK と呼ぶ。図 5.5 の場合 2sec 毎にコマンドを打っているが、1 列の読みだしに 276 クロック、1 クロックに 1/40960sec かかるので、実際 2×40960/276≃297 列間隔でノイズが見える。このようにノイズを発生させる HK 項目は読み出さないことにしている。

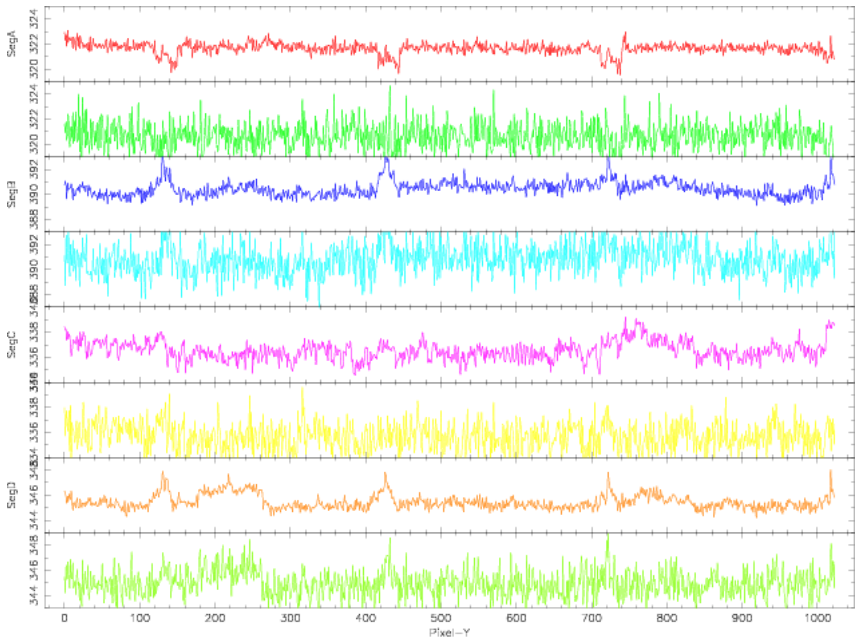

図 5.5: 常時 HK 項目のモニタによるノイズの例
1 号機 EM1 センサー実験時のデータ。上からセグメント A の Active 領域、HOC 領域、セグメント B の Active 領域、... の順で、PH データを parallel 方向に射影している。

XIS2 号機では CI 機能が加わったことで、HK 情報にも以下の項目が追加された。

1. Input Gate の DAC 電圧値 (Driver Card HK ch28)
2. Input Diode の電圧値 (Driver Card HK ch39)

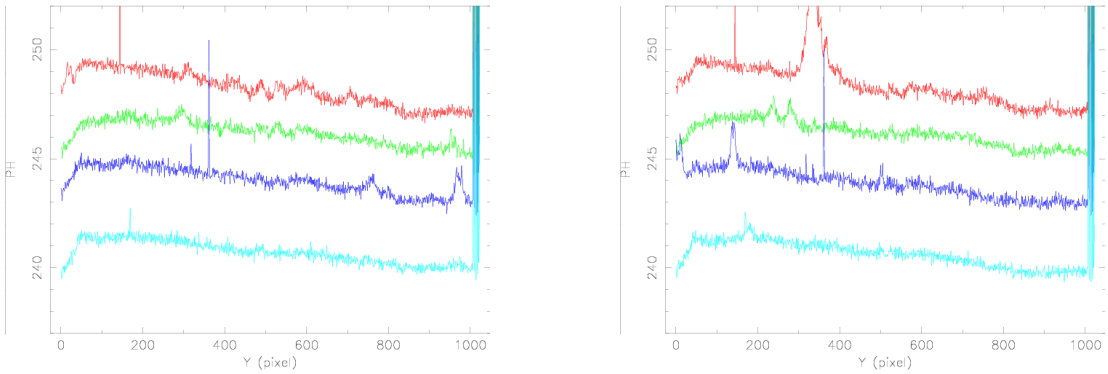

図 5.6: 常時 HK に何も含まないときと CI 関連 HK 情報をモニタしたときの PH データの比較 (frame No.30)
(左):常時 HK に何も含まない場合。(右):CI 関連 HK 情報をモニタした場合。いずれも上からセグメント A、B、C、D の順に示している。

これらの HK 情報を読みだす際図 5.5 のようなノイズが乗るかどうかを調べる実験を EU センサーを用いて行った。まず (1) 常時 HK に何も含まない場合、つまり空のルーチンを走らせた場合と、(2) 上記 2 項目のみを常時 HK としてモニタした場合とでそれぞれ 30frame ずつデータを取得し、生の PH データを比較した。

5.4.1 ダークレベルに現れるノイズ調査

図 5.6 は (1) 及び (2) の場合の 30frame 目の PH データを parallel 方向に射影したものである。セグメント同士の比較がしやすいように波高値をずらしてあるため縦軸の絶対値は意味を為さない。上からセグメント A-D の順に示してある。y>1000 で PH が高くなっているのは CI 機能により電荷が注入されているためである。またセグメント A、C で波高値が 1 ピクセルだけ飛び抜けて高くなっているのは、後述する Bad Pixel が存在するためである。数十ピクセルに渡って波高値が高くなっているのは、荷電粒子によると思われる大きく広がったイベントである。y<50 にも PH データの勾配が見られるが、常に同じ領域に同じ PH レベルが見られるため各座標でのダークレベルの揺らぎにはならない。(1) ではとうぜんであるが、(2) の場合でも図 5.5 に見られたようなセグメントに共通する構造は (少なくともピクセル毎のばらつきである ∼0.5ADU のレベルでは) 見られない。つまり (1) と (2) で有意な差が無い。この結果から、上記 2 つの HK 項目はダークレベルの揺らぎに匹敵するようなノイズの原因にはならないことが分った。

5.4.2 注入電荷部分に現れるノイズ調査

次に CI 機能を有効にしたとき上記 HK 情報のモニタによって注入電荷量に影響が出ないかを調査した。電荷をチェッカーフラグ状に配置させ、上記 (1) と (2) の場合とで PH データを比較した。図 5.7 に注入電荷が配置されているイメージを示す。撮像領域全体のうち上部 ∼1/4 に 1 ピクセル間隔に注入電荷が配置されている。この状態で (1) と (2) の場合各 30frame ずつデータを取得した。チェッカーフラグ部分の PH データを、(2) の場合から (1) を引き算した結果を図 5.8 に示す。この時、ノイズの判別がしやすいよう 0.5sec に一度常時 HK をモニタしたので、∼85 列毎にノイズが乗る可能性があったがそのよう

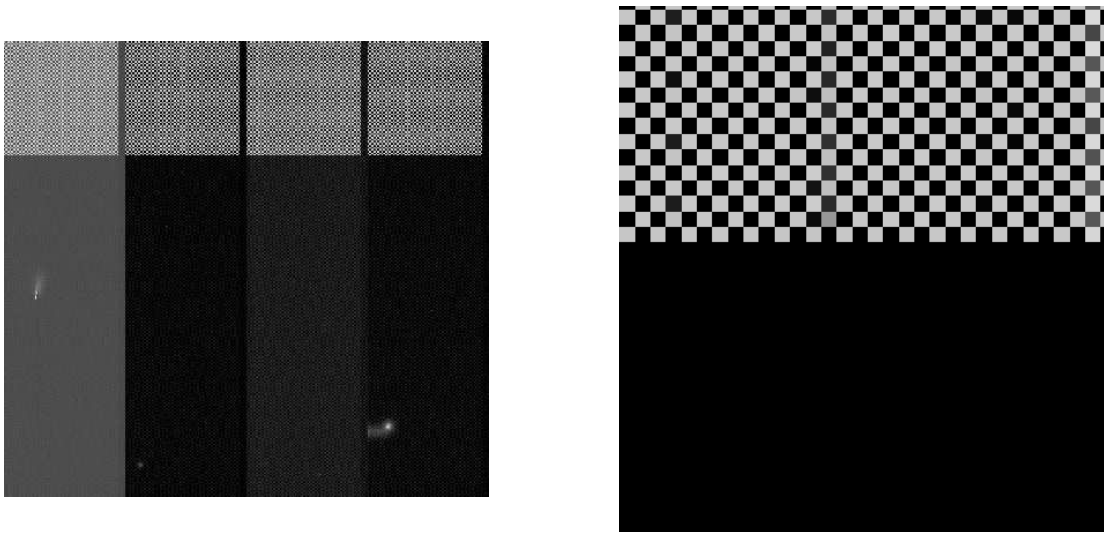

図 5.7: 注入電荷の配置 (左) と拡大図 (右)
グレースケールで白い程波高値が高くなる。左図の上 1/4 白くなっている部分がチェッカーフラグ部分。右図はセグメント A のチェッカー部分の左下を拡大したもの。

な構造は見られない。またセグメント共通の構造も無い。したがって上記 CI 機能関連の HK 項目による注入電荷量への影響は無視できるとして良い。この結果を受け、上記 HK のうち特に Input Gate の DAC 電圧値 (Driver Card HK ch28) については常時 HK 項目に追加し軌道上でも常にモニタすることに決定した。

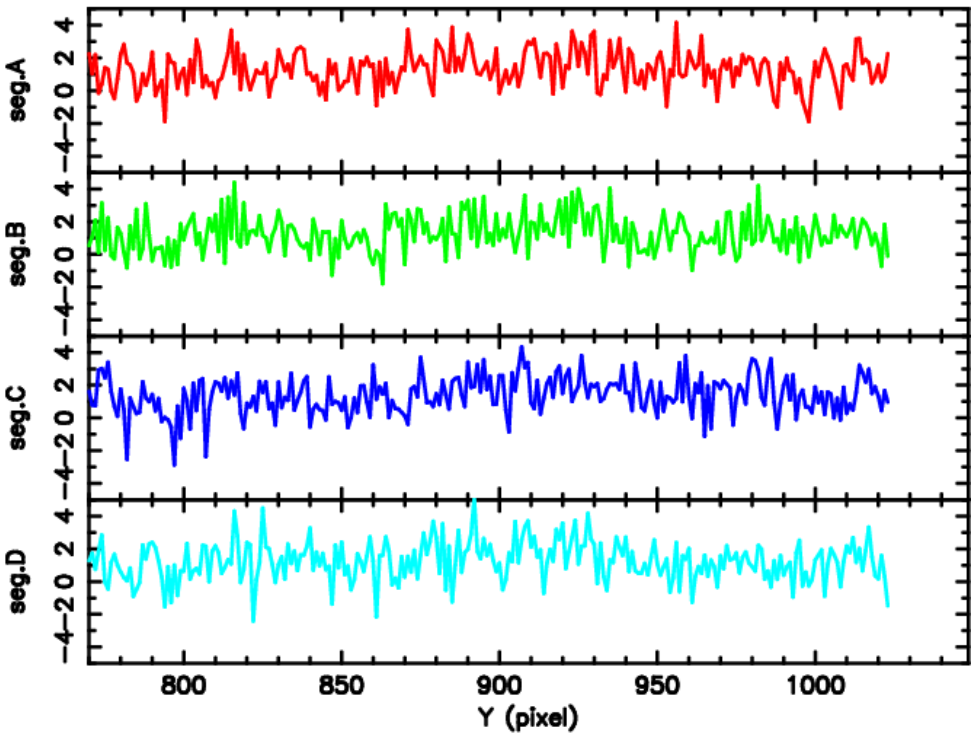

図 5.8: チェッカー部分の PH データの比較
(2) の PH データから (1) の PH データを引き算した結果。
上からセグメント A、B、C、D。

5.5 μ-code 内で CI 機能有無それぞれでのノイズ

CI 機能による注入電荷のイベントは毎 frame1024 個あるため軌道から地上へ送るテレメトリ容量をほぼ使い尽くしてしまう。そのため通常の観測時には CI 機能を無効にして電荷を注入せず、定期的に行う機上較正の時のみ CI 機能を有効にする、という使い分けをする。

CI 機能の有効/無効それぞれの状態を具体的に説明すると、CI 機能で実際に電荷を注入する場合、4.6.1 節で示した μ-code を用いてシリアルレジスタの横転送とレジスタから撮像領域への縦転送を行い、かつ DAC の設定で CI On として電荷を送り込ませる。一方 CI 機能を無効にする場合は、2 通りの方法がある。(1)μ-code ではシリアルレジスタから撮像領域への縦転送をしながらも DAC の設定で CI Off にして電荷を送り込ませない。(2) そもそもレジスタの横転送と撮像領域への縦転送の動作を含まない μ-code を使う。このとき DAC 設定は当然 CI Off にしておく。

(1) の方法の場合、CI 有効/無効で用意する μ-code の数が少ない、という点で運用に適している。しかし、CI 用シリアルレジスタから撮像領域への縦転送を行っているためピクセルレベルに何らかの痕跡が現れる可能性がある。一方 (2) では、μ-code を 2 種類用意しなくてはならないが、ノイズが乗る心配は少ない。そこで CI 無効のための 2 通りの方法でデータに違いがあるか、そしてどちらが運用に適しているかを調べるために比較実験を S0 センサーを用いて行った。図 5.9 は前節の図と同様 PH データを parallel 方向に射

影した平均値で、セグメント A のみ示している。3 ピクセル間隔でオフセットが見えている方が、(1) の方法でとったデータである。図 5.10 は撮像領域の最上部のみを示していて、左側が (1)、右側が (2) の frame イメージである。黒い程波高値が高いが、左半分では μ-code で電荷が注入される予定の列全体に渡ってオフセットが見られるのが分る。

つまり DAC 設定で CI 機能を無効にしても、何らかの理由で CI 用のシリアルレジスタにわずかな電荷が溜り、それらが撮像領域に縦転送されることで図 5.10 のようなオフセットの構造になると想像される。問題はこの構造が運用に支障をきたすものかどうかである。

図 5.9 よりオフセットの振幅はおよそ 2ADU と、読みだしノイズとほぼ同じかそれ以下のレベルであるが、図 5.9 で分るのはセグメント全体での平均値のため、ピクセル毎による揺らぎを調べる必要がある。図 5.11 は、オフセットがある 4 列の各ピクセルの PH データをサンプルしてヒストグラムにしたものである。該当列の 1 列上の列、下の列についてもヒストグラムを作り比較している。実線がオフセットのある列、点線 · 破線がそれぞれオフセットの列の上 · 下の列である。実線のヒストグラムの σ がオフセットの揺らぎになるわけだが、上下の列の波高値の揺らぎ 3.1、3.5ch よりわずかに高く 3.7ch であった。これは読みだしノイズの揺らぎよりわずかに大きい程度である。またこのオフセットは CI 機能を有効にした際電荷が注入されるピクセルのみに生じるので、撮像領域全体に比べると、わずかな領域であり、しかも最も光軸から離れている。つまり観測時にこの領域を重要視する場合は極めて稀であることから、このオフセットは運用上問題ないと判断した。

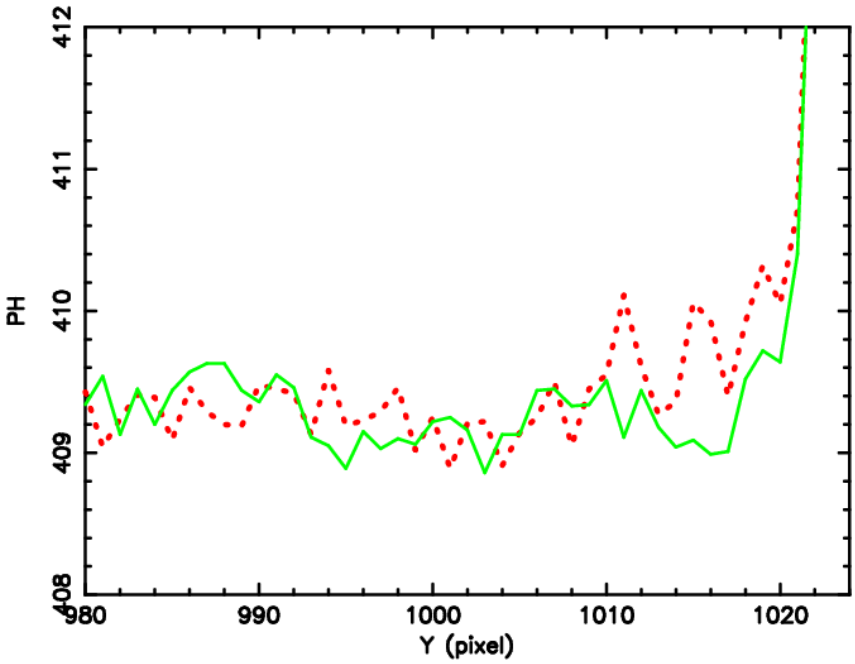

図 5.9: CI ありの μ-code と無しの μ-code でのダークレベルの比較 (frame No.50)
実線が CI 無しの μ-code を用いた場合のダークレベル。
破線が CI ありの μ-code を用いた場合。

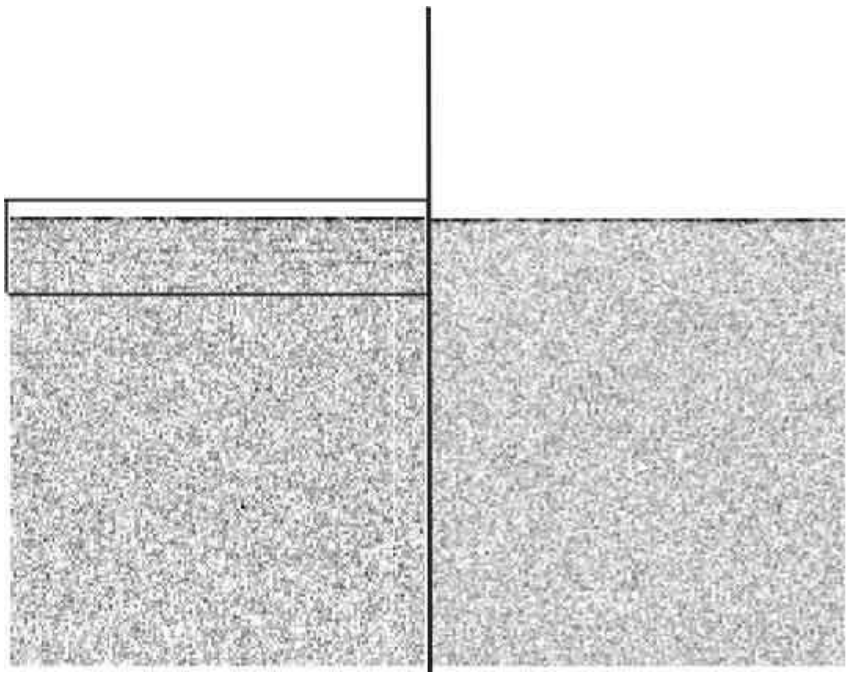

図 5.10: CI ありの μ-code と無しの μ-code でのイメージの比較
(左):CI ありの μ-code を用いた場合の frame イメージ。
(右):CI 無しの μ-code を用いた場合。
線で囲んだ部分にオフセットが見られる。

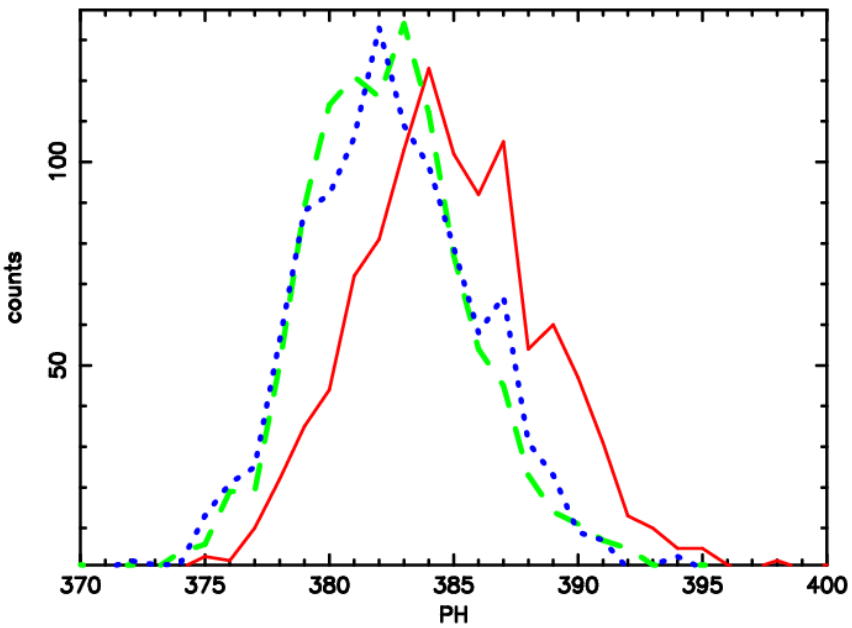

図 5.11: 構造のあるピクセルとその上下の列のダークレベルのヒストグラム
実線がオフセットのある列のピクセルの波高値分布。
点 · 破線はそれぞれ実線のピクセルの 1 列上 · 下の列の波高値分布。

第6章　性能試験

本章ではXISの基本的な性能を評価するための性能試験の結果を述べる。ゲイン、エネルギー分解能、量子効率の結果について説明し、Bad pixel分布についても記す。

6.1　較正試験の目的

キャリブレーションの際データの積分時間が長い程性能がより精度良く決まるが、単に長くデータを取れば良いのではなく実際に天体を観測したときX線強度や輝線エネルギー等を正しく決定出来るように較正することが必要十分条件である。我々は以下の目的のもとに、1号機の較正試験を参考にして実験計画を立てた。

1. ゲイン (ピークの位置) を0.1%の精度、エネルギー分解能を1%の精度で決定する。
2. 単色X線に対するスペクトルの形の再現を誤差3%以下で行う。
3. 絶対的な量子効率を10%以内の誤差で決定する。

6.2　試験の方法

6.2.1　評価システム

本章及び次章に示すXIS機能・較正試験は京都大学X線較正システムを用いて行われた。図6.1中右手のチェンバ (レインボーと呼ぶ) に付けられたKevex社製X線発生装置から出た一次X線はのレインボーチェンバ内に配置された二次ターゲットに入射する。ターゲットは表6.1に示した金属及びポリエチレンが用意されていて、ステージを回転させて目当てのターゲットに一次X線を照射させるようになっている。ターゲットからの特性X線あるいは散乱X線は、左手のチェンバに入射する。XISは図のようにチェンバ内で動かすことが出来て、ビームライン上からずらすと、後方にあるCanberra社製窓無しSSDにX線が入射し、X線強度及びスペクトルの較正を行えるようになっている。またビームラインから90°の方向にはX線リアルタイムモニタ用のSSDも取り付けてある。また、XISをビームライン上からずらして^{55}FeからのX線が入射するようにも出来る。

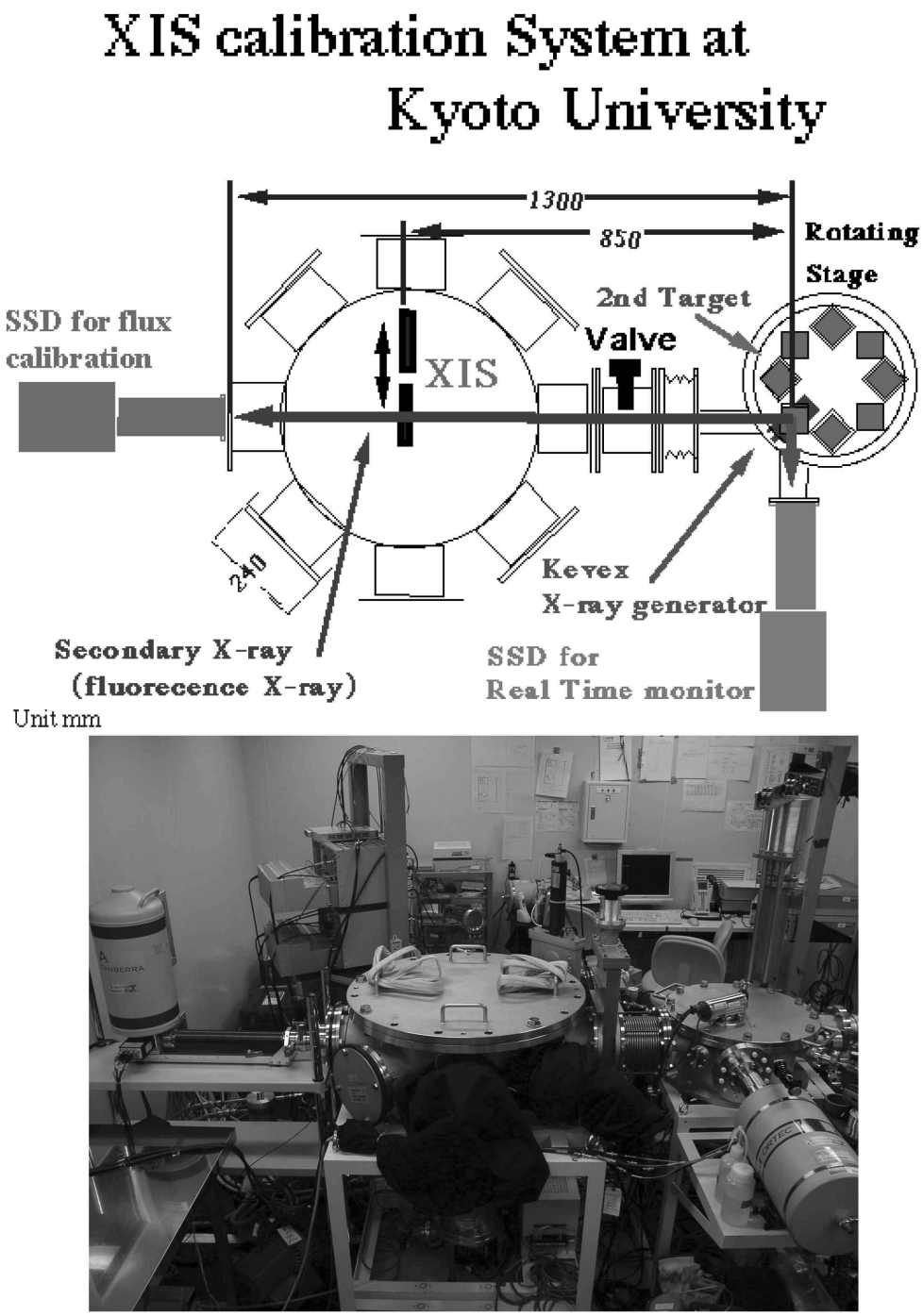

図 6.1: 京都大学 XIS 較正システム

6.2.2　実験条件

本章の実験では XIS2 号機の FMS0 及び S1 センサーを用いた。CCD 温度は常に約-90 ° C、コールドプレート温度は-40 ° C に保たれた。チェンバ内気圧は $\sim 10^{-6}$Torr に保たれた。

表に、各二次ターゲットのエネルギー、X 線発生装置にかける電圧、電流値をまとめる。

表 6.1: 各二次ターゲットのエネルギーと X 線発生装置にかける電圧、電流値

ターゲット	Energy		θ-stage	電圧	電流 (P)
	Kα(keV)	Kβ(keV)	°	kV	mA(%)
Al	1.49	1.56	-5	5	0.029(0.2)
Cl	2.62	2.82	40	5	0.045(0.2)
Ti	4.50	4.93	85	15	0.047(0.2)
^{55}Fe	5.89	6.49	—	—	—
Fe	6.40	7.06	130	15	0.145(0.5)
Zn	8.63	9.57	220	20	0.058(0.2)
Se	11.22	12.50	265	20	0.066(0.2)
ポリエチレン	—	—	175	15	0.020(—)

二次 X 線の強度は、パイルアップによりゲイン等が変化してしまわない範囲で最大の強度を取った。P 値は 1frame 毎の全ピクセルに対する X 線のイベント数の割合を示す量であり、例えば P=0.2%の場合は

$$\frac{0.002 \times 1024 \times 256}{8} \sim 64 counts/sec/segment \tag{6.1}$$

となる。

6.3 読みだしノイズの測定

読みだしノイズは CCD の重要な性能の一つである。その値は HOC 領域の PH データの root mean square を電子換算することで求める。S0、S1 各センサーの読みだしノイズはそれぞれ 2.1、3.7electron であった。この結果を元に、以後の解析の際のスプリット閾値を決定する。4.5.2 節で述べたように、スプリット閾値は当該ピクセルの電荷が、X 線による電子雲の裾野である場合とノイズの揺らぎである場合とを区別するためのパラメタである。したがって X 線イベントのピクセルレベルを正しく決定するための重要なパラメタであり適切に設定する必要がある。そのためには読みだしノイズの大きさと暗電流の揺らぎの両者を考慮しなければならない。XIS1 号機ではは Flight Model で最もノイズが大きいセンサーで 1σ が 4electron∼15eV であった。そのため 4σ である 60eV 以上が好ましいが、余裕をもって 20ch∼78eV に設定していた。今回は S0、S1 センサーのノイズの大きさから判断する。また暗電流値は、2.3、1.3electron/frame/pixel であるため、ダークレベルの揺らぎの 1σ は最大で 3.9electron∼15eV である。すなわち 4σ である 60eV∼16ch 以上が好ましいが、ここでは 1 号機と同じく余裕を持って 20ch とした。

実際の解析に用いたパラメタの値を表にまとめておく。

表 6.2: 解析での各種パラメタの設定値

darkLower/darkUpper	–40/40 (ch)
Hot pixel threshold	3000 (ch)
Event threshold Lower/Upper	50/4095 (ch)
split threshold	20 (ch)
X 線イベントと認識した Grade(Normal mode)	Grade 0,2,3,4,6

6.4　ゲイン · エネルギー分解能

FMS0 センサーに対しては ^{55}Fe のみを、FMS1 センサーに対しては表 6.1 中の各ターゲットからの二次 X 線を Normal モードで照射した。スペクトル fit では XIS 応答関数を考慮した。これは単色 X 線を照射したときのスペクトル形をモデル化したものであり、図 6.2 のようにメインピークの他、サブピークやコンスタント成分、エスケープ、Si-Kα、三角成分がある。ここではメインピークの波高値を知るのが目的であるのでメインピークとサブピークを考慮しながら、各エネルギーの X 線ピーク付近を 2 つのガウス関数で fit した。サブピークはスプリット閾値以下の電荷が周囲のピクセルに洩れだすことが原因で、メインピークとサブピークの波高値の差は split threshold の半分とされる。ここでは 10ADU とした。またサブピークの幅は今回は今西修論に習って 1.78 倍に固定した。

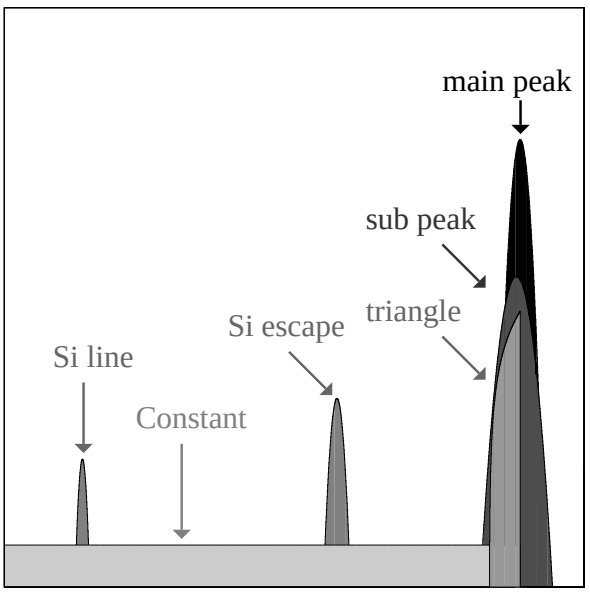

図 6.2: XIS 応答関数の成分

S1 センサーについて、各エネルギーの K_α ピークを fit したスペクトルを図 6.3 に示す。

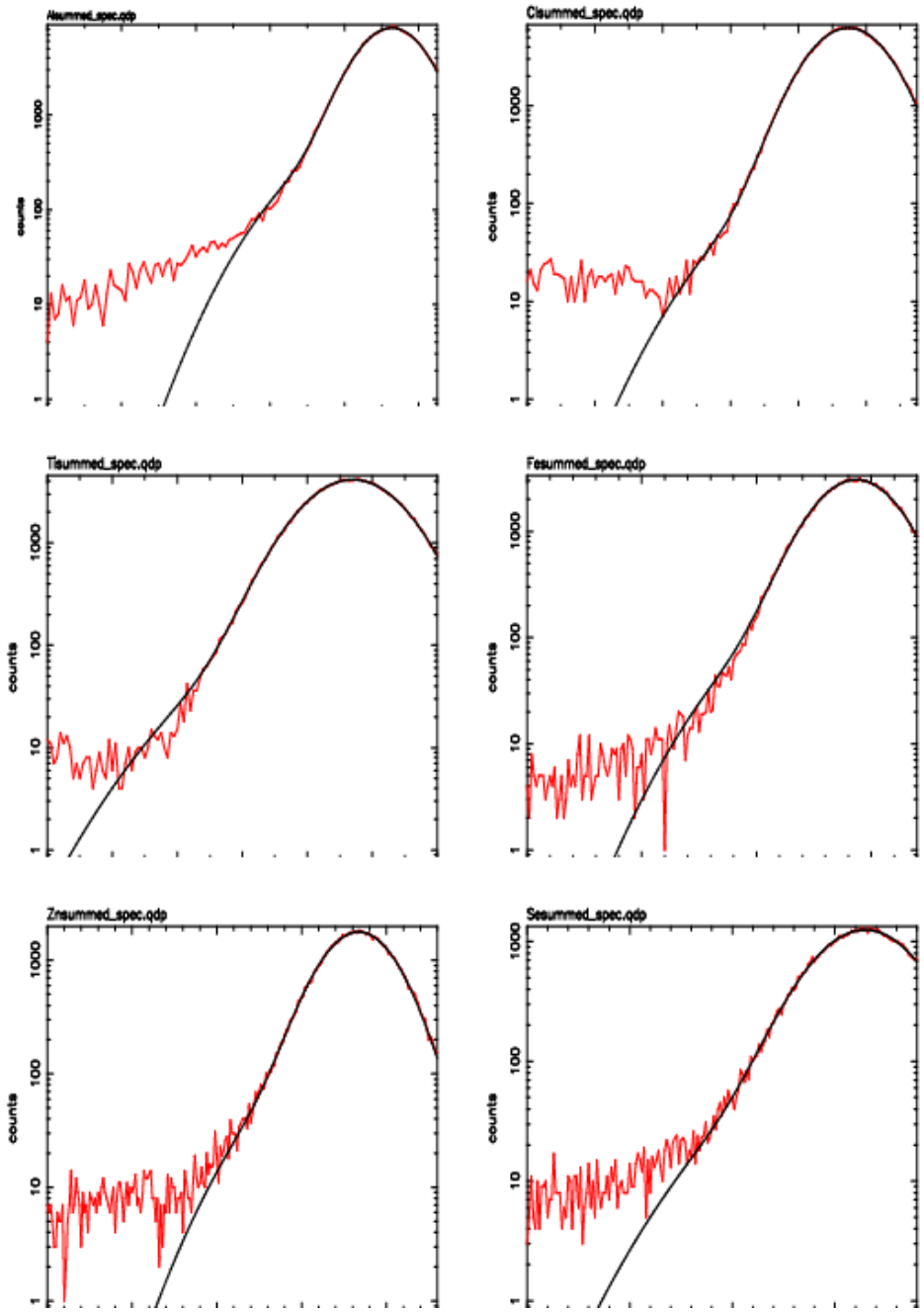

図 6.3: 各エネルギーの K_α ピークのスペクトル fit

また各エネルギーの K_α、K_β ピークを fit した際の、メインピークの中心値、FWHM をそれぞれ図 6.4、6.5 に示す。5.89keV での FWHM は、S0 センサーで 130eV、S1 センサーで 136eV であった。それぞれの fitting 関数は、図 6.4 は一次関数、図 6.5 は以下の式である。ここで N' とは、3.2.2 節の式で fit したときに残る高エネルギー側の残差を補正するために 1 号機の較正時に導入したパラメタである。2 号機でも同じ傾向が現れたため、同様の関数で fit した。また $W_{Si}F$ は 3.65·0.12 に固定した。この時のパラメタを表 6.3 にま

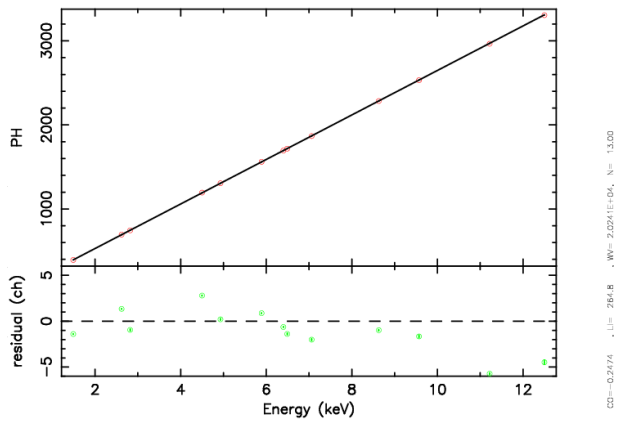

図 6.4: FM S1 センサー ゲイン

とめておく。

$$\Delta E = W_0 \cdot \sqrt{8ln2} \cdot \sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{E}{W_0} + N'E^{2.0}} \tag{6.2}$$

上式のように高エネルギーで線形になるようなモデルで fit するとエネルギー分解能を良く表すことが出来る。

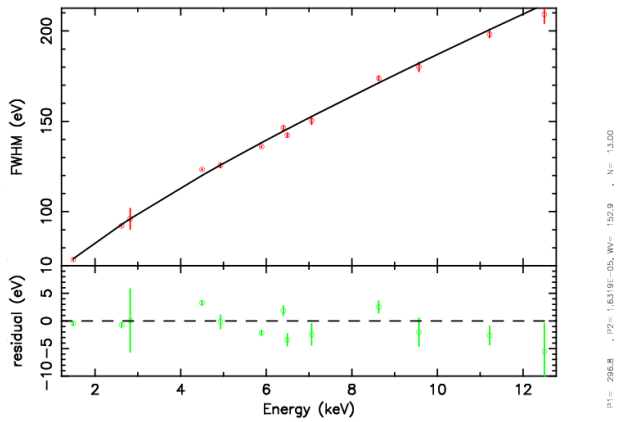

図 6.5: FM S1 センサー エネルギー分解能

表 6.3: FM S1 センサー ゲインと分解能

ch/eV	0.264
offset (ch)	-0.247
N_{read} (eV)	17.2
N' (ch)	1.63×10^{-5}

6.5 検出効率

XIS1 号機までの検出効率測定は XIS と同じ位置に比例係数管を置き特性 X 線を当て、そのカウント数と SSD のカウント数の関係を求め、最終的に XIS に入射する X 線 flux を求めていた。これは、SSD の構造が複雑で XIS の位置と異なる場所にあるため入射 X 線の絶対強度を求めることが困難であったために用いられた方法である。しかしこの方法では比例係数管入射窓の薄膜や不十分なエネルギー分解能のために入射 X 線の絶対強度誤差が大きかった。実際この方法で求めた各エネルギーでの検出効率の値は reference CCD(MIT が Bessy という放射光施設を使用して検出効率を決定した CCD。加速器内に入れた電子の数を知ることで X 線スペクトルを正確に求めることができる。) にたいして大きくばらついていた。

そこで今回の試験では、SSD 結晶前面の入射窓を取り外すことが可能な窓無し SSD を用いた。図 6.6 は Be の入射窓の場合と、ポリマーの入射窓の場合の SSD の検出効率を示している。今回用いたのは窓なし SSD なので少なくともポリマーの線より検出効率が高く、1–50keV の範囲で 100%であるとして問題ない。したがって SSD と CCD のカウント数の比は直接相対検出効率を表しており、幾何学的な補正も不要である。ただしあるエネルギー点で絶対検出効率を仮定する必要がある。

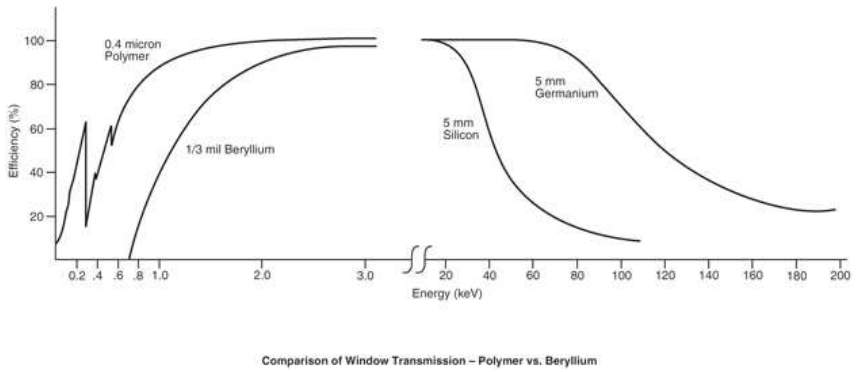

図 6.6: 窓無し SSD の検出効率
低エネルギー側の線は、Efficiency が高い方が 0.4μm のポリマーを結晶の前に配置した場合、低い方が 1/3mm のベリリウム膜の場合。

3.2.3 節で述べたように検出効率は CCD チップの電極層、絶縁体層、空乏層の厚みによって決まる。そこで XIS1 号機の各層の厚みを仮定して検出効率を求めてみた。図 6.7 は、各層の厚みが 1 号機の S0 センサーの値を取った場合とその値から各層を >10%ずつ増減させた場合の検出効率を示している。各ラインでの各層の厚みの振り幅を表 6.4 に示す。

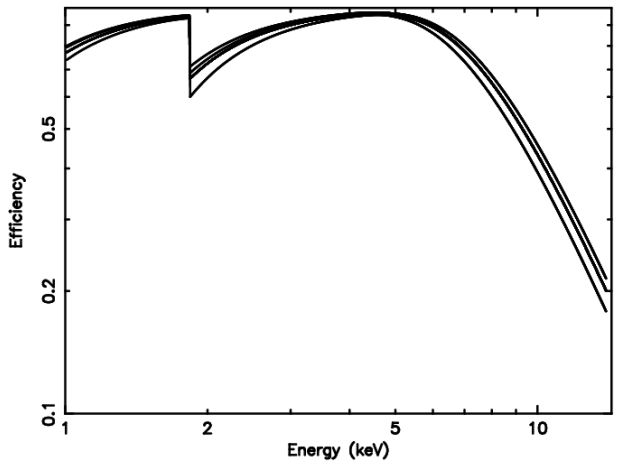

図 6.7: CCD 各層の厚みによる検出効率の違い
表 6.4 の範囲で CCD 各層の厚みを変えても、
図の最大値と最小値の間に収まることになる。

電極 · 絶縁層の厚みを薄くすると、低エネルギー側の検出効率が高くなり、厚くすると逆に低くなる。高エネルギー側では空乏層の厚みにより検出効率が変化するのが分る。しかし、各層の厚みを変えても 4–5keV での検出効率は 95.4–96.7%でほとんど変化しない。従って XIS の絶対検出効率を 10%の誤差で決めるためには 96%@4.5keV を仮定して問題ないことが分った。

表 6.4: 図 6.7 中の各層の厚みの振り幅

電極層厚 (μm)	0.25–0.45(0.33)	
絶縁層厚 (μm)	0.20–0.35(0.27)	括弧内は 1 号機 S0 センサーの値
空乏層厚 (μm)	65–80(74)	

以上の結果を踏まえて各エネルギーの X 線イベントのカウント数と SSD のカウント数を比較した。XIS は 0.5keV 以上の Grade02346 の全イベント、SSD は 200ch($\sim$0.5keV) 以上の全イベントを積分し、KαKβ のピーク強度の比で分けている。また各点での検出効率のプロットを図 6.8 に示す。

表 6.5: 各エネルギーの X 線の XIS、SSD それぞれのカウント数

	XIS のカウント (Grade 02346)(counts)	SSD のカウント (counts)	規格化後の検出効率
Al	185740	19675	0.984
Cl(Kα)	176112	20381	0.900
(Kβ)	154483	1739	0.926
Ti(Kβ)	28707	3313	0.903
Fe(Kα)	138852	20675	0.816
(Kβ)	34682	5982	0.705
Zn(Kα)	97559	19415	0.524
(Kβ)	21665	4311	0.524
Se(Kα)	85726	26884	0.332
(Kβ)	13329	6037	0.230

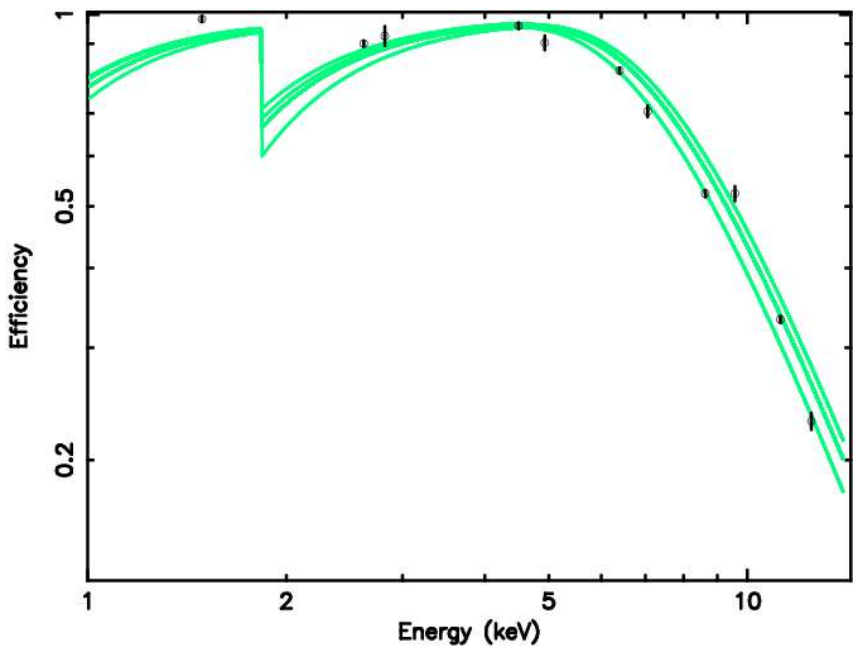

図 6.8: S1 センサーの量子効率
図 6.7 の上に今回の結果をエラーを含めて表示した。

6.6 Bad Pixel分布とその影響

XIS1 号機には見られなかった現象の一つとして”Bad Pixel” と”Bad Column” がある。現象としては、Bad Column で吸収されたイベントは転送され読みだされるまでにテールを引いてしまうため Grade 法によって X 線と認識されない。図 6.9 に通常のイベントと Bad Column でのイベントのイメージを示す。

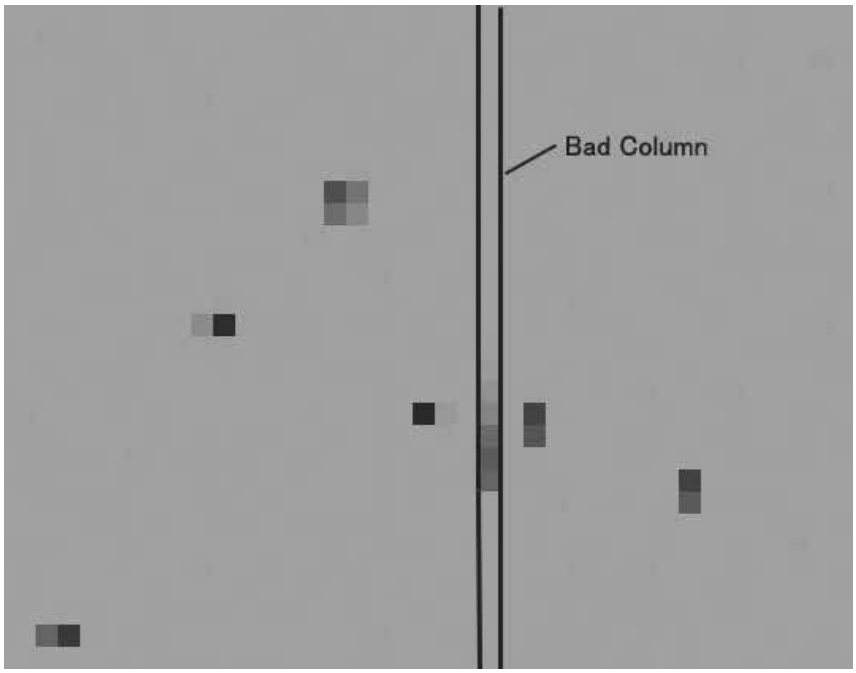

図 6.9: 通常のイベントと Bad Column でのイベント
太線で示した column が Bad Column でそれ以外は通常の column。Bad Column のイベントのみ parallel 方向にテールを引いている。

Parallel 方向 1024 ピクセル全体にこの症状が見られる column もあれば一部にのみ見られる column もある。また後者の場合その多くに、常にイベント閾値以上の波高値を示す Bad Pixel が Bad Column 領域の下端に見られる。これらの領域は当然観測に用いられない上、Bad Pixel による偽のイベントがスペクトルにピークを作ってしまう可能性もある。さらに Grade 法ではイベント中心の左右のピクセルレベルも考慮するため、Bad の両隣の column も観測に使えなくなる。これらより Bad Pixel 及び Bad Column の場所を記録してあらかじめ観測できない領域や偽のイベントを把握しておくことが重要になる。

表 6.6 に今回の試験で発見された S0、S1 センサーの Bad Pixel 分布をまとめる。ここで bad pixel/column の領域の示し方は、ピクセルの座標をセグメント A の読みだし口から最も近いピクセルを (1,1) としている。例えば [19:227-280] は x 座標 19 の column は $227 \leq y \leq 80$ の範囲が Bad Column になっている、と言う意味である。S0、S1 でそれぞれ 4、10column の Bad Column が存在する。これにより影響を受ける領域はチップ全体の ∼1.2、2.9%である。しかし Astro-E2 の場合 XRT の結像性能が HPD2.0min で、これは 100 ピクセル以上に相当する。このため点源の観測を行う際でも光子統計の損失は大きな問題にはならない。

表 6.6: S0、S1 センサーの Bad Pixel 分布

センサー	セグメント	bad pixel/column の領域
S0	segment A	[19:227-280] [213:1-] [239:334]
	segment B	[347:674] [400:731] [485:861]
	segment C	[559:?] [569:966] [609:628] [709:1-915] [764:912]
	segment D	[988:842]
S1	segment A	[142:554-] [94:984]
	segment B	[455:1-] [495:556-] [515:863-]
	segment C	[560:279-] [657:874-923?] [730:626-] [738:1-] [742:670?-] [768:824-]
	segment D	なし

Bad pixel/column の領域:例えば、[19:227-280] は
x 座標 19 の column は 227≤y≤80 の範囲が Bad Column になっている、という意味。

第7章　電荷注入機能によるCTI補正

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出来てしまう。このため入射した X 線による電荷を集め切れず結果としてエネルギー分解能の悪化につながる。実際 Chandra/ACIS は放射線帯を通過する軌道を周回しているため、CTI の増加が予想以上に著しい。また低高度軌道を周回した ASCA/SIS の場合、column 毎の CTI をモニタできなかったため CTI を正しく補正することが出来ず分解能の劣化につながった。これらのことから、ゲイン · エネルギー分解能の劣化を抑えるためには出来るだけ細かい領域毎に CTI の経年変化を評価し補正することが重要である。XIS では SIS·ACIS での反省から、column 毎の CTI モニタを実現するため電荷注入 (Charge Injection) 機能を備えている。これと常に CCD の隅を照射するキャリブレーションソースを使って機上試験で CTI 補正を行う予定である。本章ではその方法についての定式化を行う。

7.1　補正方法

以下では注入電荷量の決定から最終的なゲイン補正までの手順を追う。ます電荷注入により CTI をモニタする場合、以下の 4 種類の CTI を考慮する必要がある。

- C_{cs}: CI のためのシリアルレジスタを横転送中の電荷転送非効率
- C_{if}: 露出領域から蓄積領域への縦転送中の電荷転送非効率
- C_{pa}: 蓄積領域での縦転送中の電荷転送非効率
- C_s: 読み出しのためのシリアルレジスタを横転送中の電荷転送非効率

ただし、C_{if} は、同じ column の全イベントが等しく受ける CTI である。このため絶対値を求めることは出来ないので、以下では $C' = (1 - C_{if})^{1024}$ と定数として扱う。

7.1.1　注入電荷量の決定

CI 機能を用いた CTI モニタのためには、撮像領域に注入した段階での電荷量を正確に知ることが重要である。このために XIS では CCD 撮像領域最上部の両端を常時照らしているキャリブレーションソース (^{55}Fe) によるイベントを利用する。キャリブレーションソースの X 線強度は、ソースホルダーでの散乱 X 線のカウントレートを CXB+NXB に対して十分低くするという制限がある。このため現実的な時間では注入電荷と同様の統計を得られないことに留意しなければならない。

一般に、X 線が CCD で吸収された時に生じる電荷 N と読みだされるときの電荷 N' の関係は、蓄積領域と読みだし用シリアルレジスタそれぞれでの転送回数を n_{pa}、n_s とすると、

$$\begin{aligned} N' &= NC'(1-C_{pa})^{n_{pa}}(1-C_s)^{n_s} \\ &\sim NC'(1-n_{pa}C_{pa})(n_sC_s) \end{aligned}$$

と表せる。ここで C_{pa}、C_s は 1 より十分小さいとした。セグメント A の左端最上部付近 (x 座標 a の column とする) に入射した ^{55}Fe Kα 線を考える。このイベントが読みだされるときの電荷量を $Q'_{\rm Fe}(a)$ とすると、

$$Q'_{\rm Fe}(a) \sim Q_{\rm Fe}C'(1-C_{pa}(a))^{1024}(1-C_s)^a \tag{7.1}$$

となる。 ここで $\rm Q_{Fe}$ は入射時に生じた電荷量である。X 線が当たる領域全体に渡って $Q'_{\rm Fe}$ をプロットすると、CCD の x 座標の関数として表せる。column 毎の C_{pa} をならしてしまえば

$$\begin{aligned} Q'_{\rm Fe}(x) &\sim Q_{\rm Fe}C'(1-<C_{pa}>)^{1024}(1-C_s)^x \\ &\sim Q_{\rm Fe}C'(1-<C_{pa}>)^{1024}(1-xC_s) \end{aligned}$$

と表せる。したがってこれを直線で fit するとその傾きは読みだし用シリアルレジスタでの CTI を表すと考えられる。

一方、注入電荷の読みだし時の値は各 column 毎に決定できる。例えばあるピクセル (x 座標 b とする) での読みだし値は

$$Q'_{\rm CI}(b) = Q_{\rm CI}C'(1-C_{cs})^b(1-C_{pa}(b))^{1024}(1-C_s)^b \tag{7.2}$$

^{55}Fe の場合と同様に x 座標の関数として $Q'_{\rm CI}$ をプロットすると、その傾きは CI 用 · 読みだし用両シリアルレジスタでの CTI 効果を足し合わせたものになる。

$$Q'_{\rm CI}(x) \sim Q'_{\rm CI}(0)C'(1-<C_{pa}>)^{1024}(1-x(C_s+C_{cs})) \tag{7.3}$$

したがって両者の傾きの差から C_{cs} を決定できる。また、撮像領域のもう一端を照らしているキャリブレーションソースの信号からも同様の計算が出来るため、CI 用シリアルレジスタの両端での C_{cs} が得られる。これらの点を直線で fit することでレジスタ全体で精度良く C_{cs} が求められる。

7.1.2　CTI の決定

ここまでで残った未知数は各 column の C_{pa} である。しかし C_{pa} を column 毎に正確に求めようとすると C_{pa} の影響を受けてない撮像領域下部での電荷量を知る必要があり、そのためには輝線エネルギーが既に分っている天体が撮像領域下部に来るような観測が要求される。

だがここでは CI 機能のみから近似的に C_{pa} を決める方法として、キャリブレーションソースのデータを用いる。セグメント A 左端のある column(x 座標 c の column とする) の ^{55}Fe の電荷量を y 座標の関数として決定し、その傾きを当該 column 全体の C_{pa} であると仮定する。式で表せば、

$$\begin{aligned} Q'_{\mathrm{Fe}}(c,y) &\sim Q_{\mathrm{Fe}}C'(1-C_{pa}(c))^{y}(1-C_s)^{c} \\ &\sim Q_{\mathrm{Fe}}C'(1-C_{pa}(c)y)(1-cC_s) \end{aligned}$$

なる直線の傾きを決めることになる。こうして $C_{pa}(c)$ が決定できれば column c に関しては CTI 補正が可能であり、その他の column についても先に決定している C_{cs} と C_s から補正すべき電荷量が決定できる。

以上により column 毎の C_{pa} の絶対値が分れば、実際の観測データのピクセルレベルをその CCD 上の座標に応じて補正してやればよい。例えば、セグメント A では、座標 (x,y) のピクセルでのピクセルレベルを $Q'(x,y)$ とすると、補正後の値は $Q'(x,y)((1-xC_s)(1-yC_{pa}))^{-1}$ となる。

第8章　FM S1センサー較正実験データへのCTI補正の応用

本章では、前章で示したCI機能を用いたCTI補正方法を現在のFMセンサーに応用できるかを検証する。

8.1　注入電荷量の安定性

前章で述べたように、CTI補正を精度良く行うためには撮像領域へ注入した段階での電荷量の安定性が重要である。そこで今回の較正試験で得たデータから、実際の注入電荷量の揺らぎを調べた。

4.6.1節で示したNormalモードのμ-codeを用いてCI機能を有効にしてダークのデータを取った。あるframeのセグメントA最上部のイメージを図8.1に示す。グレースケールで色が白い程波高値が高い。serial方向3ピクセル間隔に注入電荷が並んでいる。この3ピクセル間隔の電荷注入を1ピクセル横にずらしながら計4回行うことで、全てのcolumnに1度電荷が注入されている。図中程で1columnだけダークレベルが高くなっているのはBad Columnによるものである。

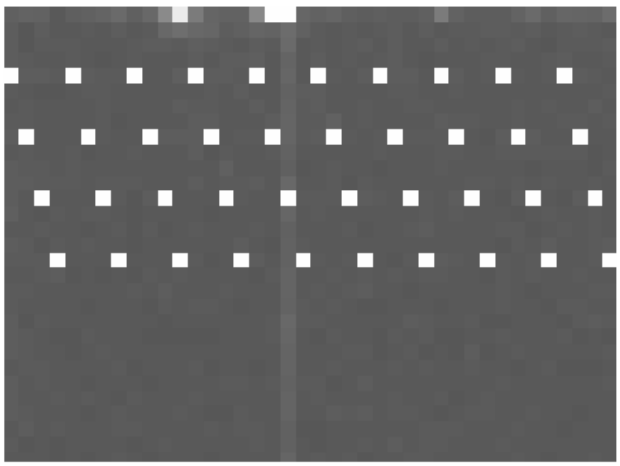

図 8.1: 注入電荷のイメージ
グレースケールで白い程波高値が高くなっている。
セグメント A の最上部を拡大したもの。

このイメージのピクセルレベルは既に

- CI 用シリアルレジスタを横転送中の電荷損失
- 撮像領域から蓄積領域への縦転送中の電荷損失
- 蓄積領域での縦転送中の電荷損失
- 読み出し用シリアルレジスタを横転送中の電荷損失

を受けた後の値である。即ちどのピクセルの波高値も、CTI により電荷の揺らぎが大きくなった結果を見ている。従ってもとの注入電荷量の揺らぎを見るためには、なるべく上記の電荷損失を受けないピクセルでの電荷量を frame 数だけサンプルしそのヒストグラムを見るのが良い。ここではイベント判定されたピクセルの中で最も読みだし口から近い、つまり横転送の CTI 効果が最も小さいピクセルでの揺らぎを調べる。

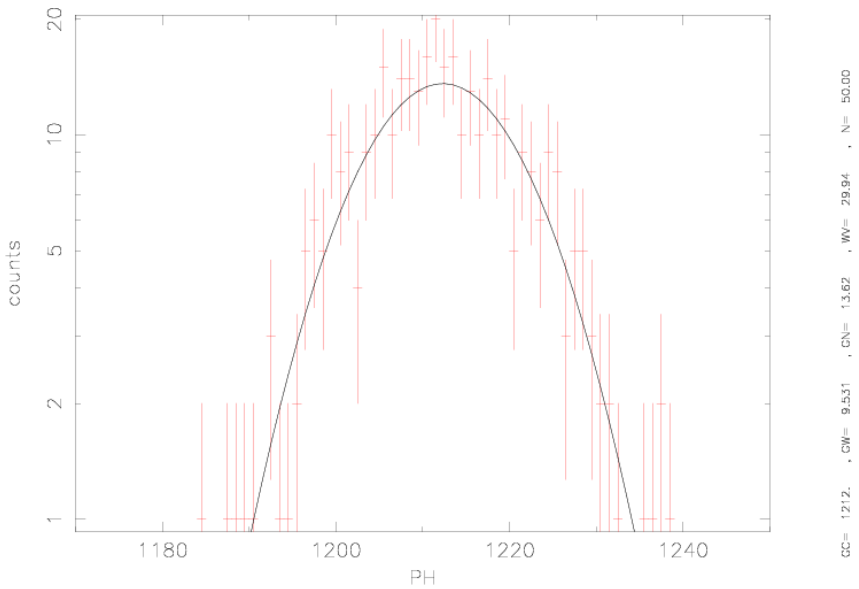

図 8.2: 注入電荷の揺らぎ
セグメント A 中の注入電荷のうち最も CTI の効果が小さい (x 座標の小さい)
ピクセルの波高値分布。X 線イベントの幅に対して ∼70%である。

FMS1 センサーの線形性から、このピークは X 線で 4.6keV に相当し、分解能は FWHM で 85eV 相当である。この幅は図 8.3 にも示しているように他の注入ピクセルについてもほぼ同様の結果である。これは今回の性能試験で得た Ti(4.5keV) のピークに対して ∼70%の幅に収まっていることになる。ファノ因子から決まる X 線イベントの分解能よりも、電極電圧の制御で決まる注入電荷のそれの方が優れていることを示している。

8.2 注入電荷の CTI と X 線の CTI

もう一つ CI 機能による CTI 補正において重要なことは column 毎の CTI が注入電荷の場合と X 線データの場合とで consistent なことである。もし inconsistent であれば注入電荷のデータから column 毎の補正をしても何の意味も為さなくなる。

まず前節で行った各ピクセルの注入電荷の揺らぎをセグメント A 内の全てのピクセルについて行ったものを図 8.3 に示す。縦軸のエラーはガウス関数の中心値の 1σ エラーである。各ピクセルの中心値のエラーは ∼0.5ch と小さいものの、ピクセル間のばらつきが大きい。このばらつきが column 毎の縦転送 CTI の違いを反映しているのか、単なる揺らぎなのかを以下で調べる。

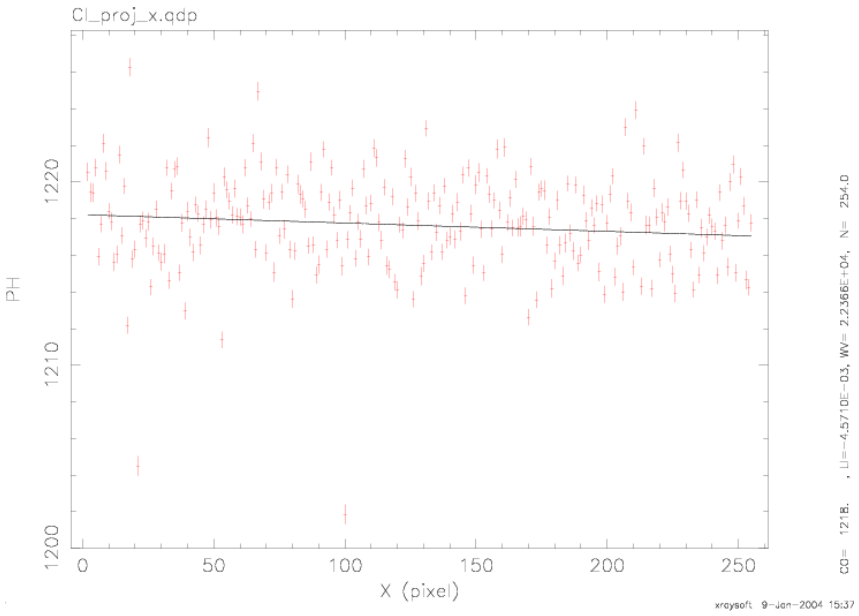

図 8.3: 各ピクセルでの注入電荷量
図 8.2 の分布を各ピクセルに対して行った結果。

そのためには X 線のデータに対して図 8.3 と同様のことをするのが参考になる。図 8.4 は ^{55}Fe の各イベントのピクセルレベルの中心値を column 毎にプロットしたものである。ただし 1 ピクセル当たりのイベント数が 1–5 カウントと少ないため各 column の上半分の領域のイベントを積分している。また column 毎の CTI を正確に反映させるため Grade0 のイベントのみを選択している。

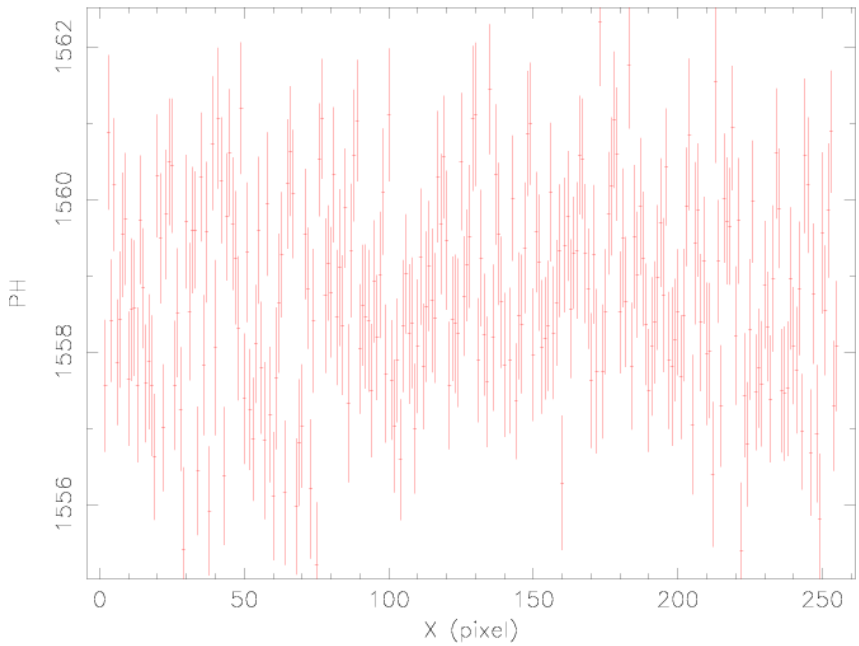

図 8.4: 各ピクセルでの ^{55}Fe(Grade0) のピクセルレベル
図 8.3 と同様のことを ^{55}Fe データに関して行った結果。
ただし撮像領域上半分の領域のイベントのみ。

以上の注入電荷と ^{55}Fe それぞれの column 毎のばらつきに相関があれば、図 8.3 の縦のばらつきは CTI を反映していると考えられる。そこで両者の相関を取ったものを図 8.5 に示す。縦 · 横軸はそれぞれ図 8.3 及び 8.4 を縦軸に射影してその平均値をとり、そこからのずれをパーセント表示している。なおこの図も撮像領域の上半分の領域からのみ ^{55}Fe のイベントを選択して示している。

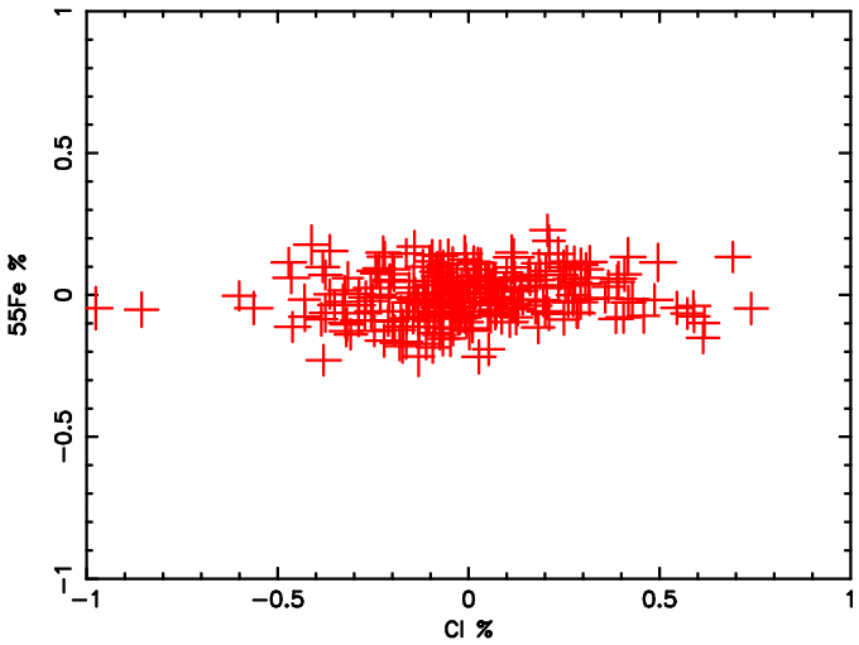

図 8.5: ^{55}Fe(Grade0) と注入電荷のピクセルレベルの相関
座標は縦 · 横軸とも平均値からのずれをパーセント表示したもの。

CI 機能による CTI 補正を行う場合、両者の間には正の相関があって欲しいわけだが、図を見る限り相関は非常に小さい。実際図を直線で fit すると傾きは 0.04 となる。

つまり図 8.3 の縦のばらつきは、column 毎の parallel CTI を示すものではないが、それ以外の何らかの column 毎の特徴を表しているものである。この原因は、1 つには CI 用レジスタから撮像領域への縦転送の際に電荷損失が起きている場合が考えられる。しかし CI 用レジスタと撮像領域の境界は蓄積領域と読みだし用レジスタの境界と全く同じに設計されているため、前者で電荷損失があれば後者でも同様なことが起こるのが自然だが ^{55}Fe のデータを見る限りそのようなことはおこっていない。また、撮像領域に電荷が転送されてから図 8.1 の位置まで縦転送される間に損失を受けているとも考えにくい。これまでのデータからはこの注入電荷の column 毎のばらつきを説明する理解は得られていない。

以上の結果から、少なくとも現在の打ち上げ前の段階では CTI 補正が有効に行えるかどいうか分らない。これは現在の CTI が上記の注入電荷のばらつきに比べ小さいためであると予想される。ただし打ち上げ後は放射線損傷のため CTI の増加が激しく CI 機能による CTI 補正が効果を示すと考えられる。

第9章　まとめと今後の課題

9.1　まとめ

本修士論文は Astro-E2 衛星搭載 X 線 CCD、XIS2 号機 flight model の機能 · 性能試験の結果と、電荷注入 (CI) 機能による CTI 補正の定式化 · 実際のデータへの応用を行った結果を述べたものである。以下に内容を要約する。

- XIS 機能試験を行った。XIS のドア開け試験ではドアが問題なく開くことを確認した。TEC の冷却性能試験ではほぼ予定通りの電力で目標温度まで冷却されることを確認した。また圧力センサーの出力電圧の温度依存性を調べた。2 号機から新しく加わった CI 機能に関しては、CI 関連 HK 情報のモニタによるノイズの調査、CI 機能を無効にしたときにピクセルレベルに残る構造の調査を行い、いずれも XIS の性能 · 運用には影響しないことを確認した。
- XIS 性能試験を行い、ゲイン、エネルギー分解能、検出効率を評価した。
- CI 機能による column 毎の CTI 補正を行う機上較正試験方法を定式化した。
- CI 機能による CTI 補正を地上較正試験で得たデータに適用した。打ち上げ前は CTI が非常に小さいため、注入電荷の CTI と X 線イベントの CTI とが consistent であるかどうかが判明できなかった。CTI 補正の有効性を証明するためには、より CTI の大きいチップによる解析が必要である。

9.2　今後の課題

- XIS の性能評価をさらに詳細に行う。特に今回の試験で取得した連続 X 線のデータから、検出効率を特性 X 線のエネルギーのみではなく連続的に決定できるはずである。
- CCD に単色 X 線が入射してもスペクトルは単純なガウス関数にはならず、テールやエスケープなどの成分が現れる。これらの成分を含めたスペクトルを定式化したものを応答関数と呼ぶが、2 号機センサーの応答関数を今後作成しなければならない。このことは上記の連続 X 線の解析時に各エネルギーの X 線強度を正しく評価するためにも必要なことである。
- 最も大切なことは打ち上げ後の XIS の性能変化に迅速に対応し、CTI の補正量及び応答関数を改訂することである。

謝辞

本修士論文作成にあたり、多くの方々の御指導、御協力を賜わりました。ここに深く感謝したいと思います。

今回の研究が京都大学宇宙線研究室の皆様の御協力の上に成り立っていることは言うまでもありません。
指導教官の小山勝二教授には実験、データ解析のみならず、物理、天文にいたるまで様々な助言を頂きました。ここに深く感謝します。粟木久光助手には応答関数作成の直属の上司として、本当に本当に多大なる御尽力を頂きました。応答関数の基本からデータ解析法、シミュレーション方法に至るまで、知識の少ない私を根気良く指導して頂きました。またこの論文の校正でもお世話になりました。鶴剛助手には、学部生の頃の実験から指導して頂きました。また発想力の乏しい私に考える機会を幾度となく与えて下さいました。本論文の校正の際にも御協力して頂きました。

今回の XIS の較正試験は戦略研究によりサポートして頂き初めて可能になったものです。この研究の代表者である大阪大学の常深博教授に深く感謝します。また大阪大学の方々には同じ XIS グループとして支えて頂きました。北本俊二助教授、林田清助教授、宮田恵美助手には、XIS の実験、解析において多大なる御尽力を頂きました。片山晴善さんには阪大のデータやその解析法を教えて頂き、また結果の絵などをたくさん頂きました。荘保信さんにもデータをたくさん頂きました。また衛星の熱真空試験では QL 解析の方法を懇切丁寧に教えて頂きました。
宇宙科学研究所の方にもお世話になりました。堂谷忠靖助手には熱真空試験の際に親切に指導して頂きました。尾崎正伸助手には応答関数作成ソフトを作って頂きました。また熱真空試験の時も要領の得ない私を根気良く指導して頂きました。

今やアメリカの坪井陽子さんには、X 線による原子星観測について詳しく教えて頂きました。NASDA の冨田洋さんには超新星残骸について興味深い話をたくさん聞かせて頂きました。坂野正明さんには XIS 解析ソフトを多数作って頂きました。また研究室で煮詰まっている私を食事に誘ってはげましてくれました。西内満美子さんには、応答関数作成の先輩としてその基本やこれまでの結果を優しく教えて頂きました。またマゼラン雲観測部隊のボスとして部下の私を指導して頂きました。濱口健二さんには、実験システムの構築をして頂き、その使用法を教えて頂きました。また原子星観測などで様々な discussion をして頂きました。村上弘志さんには、実験の手法からデータ解析の基本、XIS の基本に至るまで数え切れないほどのアドバイスを頂きました。また本論文で用いている Sgr B2 についても詳しく教えて頂きました。横川淳さんには、入学当初のまだ右も左もわからない私にデータ解析の手法を丁寧に教えて頂き、パルサー論文作成や観測プロポーザル作成の際に計り知れないほどの御協力を頂きました。同期の辻本匡弘さんには、データ解析から研究会発表、さらには本論文作成に当たって幾度となく相談にのって頂きました。同室

の馬場彩さんには、私の気晴らしのくだらない話につき合って頂きました。河野誠さんには、年末の alpha のバージョンアップの際に遅くまでつき合って頂きました。
　宇宙線研究室の X 線グループ以外の方にも大変お世話になりました。舞原俊憲教授には、講義で様々な知識を頂きました。岩室史英助手には、すばる観測の興味深い話を聞かせて頂きました。田沢雄二助手には、書類作成などでお世話になりました。後藤美和さんには最近太り気味の私をたしなめて頂きました。本原顕太郎さんには車を出して遠くまで食事に連れていって頂きました。同期の田口智之さん、秦 隆志さんとは共に励ましあって修士論文を作成しました。原島隆さんには食事につき合ってもらったりしました。秘書の中小路有香さんには各種申請などをやって頂きました。

　最後に、全ての ASTRO-E チームの方々に感謝します。ASTRO-E の今後の活躍を期待しております。

中嶋 大

関連図書

[1] 小山 勝二 「X 線で探る宇宙」 培風館 1992

[2] Sze, S.M. 「半導体デバイス」 産業図書 1987

[3] 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 SES データセンター 「科学衛星 Astro-E2 中間報告書 (第 2 分冊)」(1998)

[4] 片山 和典, 修士論文 (大阪大学 1999)

[5] 片山 晴善, 修士論文 (大阪大学 2000)

[6] 幸村 孝由, 修士論文 (大阪大学 1999)

[7] 小谷 太郎, 修士論文 (東京大学 1993)

[8] 荘保 信, 修士論文 (大阪大学 2000)

[9] 西内 満美子, 修士論文 (京都大学 1998)

[10] 濱口 健二, 修士論文 (京都大学 1998)

[11] 村上 弘志, 修士論文 (京都大学 1999)

[12] 今西 健介, 修士論文 (京都大学 2000)

[13] 山下 朗子, 修士論文 (東京大学 1995)

[14] Fraser, G.W., Abbey, A.F., Holland, A., McCarthy, K., Owens, A., & Wells, A. 1994, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 350, 368

[15] Holt, S.S., Gotthelf, E.V., Tsunemi, H., Negoro, H. 1994, PASJ, 46, L151

[16] Janesick, J., Elliott, T., Collins, S., Daud, T., Campbell, D., Dingizian, A., & Garmire, G. 1986, Proc. SPIE, 597, 364

[17] Murakami, H., Koyama, K., Sakano, M., Tsujimoto, M., & Maeda, Y. 2000, ApJ, in press

[18] Prigozhin, G.Y., Rasmussen, A., Bautz, M., Ricker, G.R, 1998, Proc. SPIE, 3444, 267

[19] Science Instruments (SI) Calibration Report for the AXAF CCD Imaging Spectrometer (ACIS) Ver. 0.9