Astro-E2 衛星搭載 XIS 裏面照射型 (BI) チップの性能評価及び応答関数の作成

山口 弘悦

京都大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

2005 年 2 月 2 日

概要

今年打ち上げ予定の X 線天文衛星 Astro-E2 には 4 台の X 線 CCD カメラ XIS が搭載されるが、うち 3 台が表面照射型 (FI) チップ、 1 台が裏面照射型 (BI) チップである。私はこのうちの BI チップについてその特性を調べ、応答関数の作成を行ったので、本修士論文にてその結果を報告する。

XIS は金属 (電極) 部、酸化膜部、半導体部からなる MOS 型の CCD である。X 線 CCD は半導体部で光電吸収によって生じた電荷を電極付近に集め、転送して読み出すことで入射 X 線の位置やエネルギーを測定する。そのエネルギー分解能や位置決定精度の高さから、現在の X 線天文において最もポピュラーな検出器となっている。

FI チップは X 線を電極側から入射させるタイプで、大部分の X 線が電極の近傍で吸収されるので、入射 X 線によって生じた電荷が半導体中を電極へ向かう際に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。しかしながら、低エネルギーの X 線にとっては電極や酸化膜が遮蔽物となり、半導体の空乏層まで到達しにくくなるため、検出効率が著しく落ちる。一方で BI チップは電極の反対側から X 線を吸収させるため、低エネルギーの X 線の吸収効率は FI に比べて大きくなる。日本の天文衛星では Astro-E2 で初めて BI を搭載することになった。

2004 年 6 月に宇宙線研究室内の実験室にて BI チップの較正試験を行った。XIS を真空チェンバ内に設置し、CCD を機上での動作温度と同じ-90 ℃にした上で、別の真空チェンバに設置した X 線発生装置から出た 1 次 X 線を Al,Cl,Ti,Fe,Zn,Se といったターゲットに照射し、そこから出る特性 X 線を XIS に照射させることで、単色 X 線に対する XIS の応答を調べた。

実験データの解析の結果、2.6keV、8.6keV の X 線に対するエネルギー分解能が、それぞれ半値幅にして 101eV、163eV と、XIS FI の 95eV @2.6keV、170eV @8.6keV とほとんど等しい値であることを示した。また、BI の X 線検出効率を最大限まで高くするために適切なイベント検出法の構築も行った。従来の X 線天文用 CCD では、入射 X 線が生成する電子雲が 1 ピクセルよりも広がるので、波高値がイベント閾値を越えたピクセルを中心とした 3 × 3 ピクセル内の波高値のパターンから X 線イベントを認識し、パターン内の波高値の合計から入射 X 線のエネルギーを算出する「Grade 法」を用いて解析がなされてきた。ところが、BI では電荷の拡散が大きいため、この方法でイベント検出を行うと、実際は X 線によるイベントであるにも関わらず解析段階で取りこぼされてしまうものが大量にあることを発見した。そこで、イベント閾値を越えたピクセルを中心とした 5 × 5 ピクセルの波高値を 2 次元ガウシアンでフィッティングし、その広がり幅から X 線イベントかどうかを判別し、X 線イベントであればガウシアンの体積から入射 X 線のエネルギーを求める「Fitting 法」を用いた解析を行い、「Grade 法」による解析よりも約 30%(低エネルギー側) ~ 45%(高エネルギー側) 検出効率を高くすることに成功した。また、このときのエネルギー分解能は、従来の「Grade 法」による解析の場合と大きく変わらなかった。 以上の結果から、XIS BI においては「Fitting 法」が最適な解析法であると判断し、この方法によるチップの応答を詳細に調べ、応答関数を作成した。

目 次

第 1 章　Astro-E2 衛星 **1**
1.1 概要 . . . 1
1.2 XRT . . . 2
1.3 XRS . . . 3
1.4 HXD . . . 8
1.5 XIS . . . 9

第 2 章　X 線 CCD **13**
2.1 MOS 構造 . . . 13
2.2 X 線と CCD の相互作用 . . . 14
2.2.1 光電吸収 . . . 15
2.2.2 初期電子雲 . . . 15
2.3 電荷集積 . . . 16
2.4 チャネルデバイス . . . 18
2.5 CCD の動作 . . . 19
2.5.1 電極構造 . . . 19
2.5.2 転送方式 . . . 20
2.5.3 読みだし方式 . . . 22
2.6 性能の指標 . . . 23

第 3 章　XIS **27**
3.1 概要 . . . 27
3.2 センサー . . . 27
3.2.1 CCD チップ . . . 28
3.2.2 ベース・TEC . . . 29
3.2.3 ボンネット・可視光遮断フィルター (OBF) . . . 31
3.3 FI と BI . . . 31
3.3.1 検出効率の比較 . . . 32
3.4 周辺回路 . . . 33
3.4.1 AE/TCE . . . 33
3.4.2 DE . . . 35
3.5 観測モード . . . 35
3.5.1 クロックモード . . . 35
3.5.2 エディットモード . . . 37
3.6 CI 機能 . . . 38
3.7 データ解析法 . . . 40
3.7.1 補正 . . . 40
3.7.2 イベント抽出 . . . 42

第 4 章　性能評価 **47**
4.1 試験方法 47
4.1.1 評価システム 47
4.1.2 実験条件 48
4.2 読み出しノイズ 50
4.3 Bad Pixel · Bad Column 50
4.4 Grade 法によるデータ解析 52
4.4.1 ゲイン · エネルギー分解能 52
4.4.2 検出効率 53

第 5 章　新しい解析法 **63**
5.1 XIS Grade 方式の問題点 63
5.2 新 Grade 法 (スプリット閾値可変方式) 65
5.3 Fitting 法 68
5.4 議論 70

第 6 章　応答関数の作成 **77**
6.1 CTI の補正 77
6.2 Dark スペクトル 80
6.3 応答関数 82
6.3.1 概要 82
6.3.2 メインピーク 82
6.3.3 Si エスケープ 83
6.3.4 Si ライン 84
6.3.5 コンスタント成分 85
6.4 まとめと議論 86

第 7 章　まとめと今後の課題 **95**
7.1 まとめ 95
7.2 今後の課題 95

図 目 次

1.1 Astro-E2 衛星外観 . . . 1
1.2 Astro-E2 衛星内部構造 . . . 2
1.3 XRT 外観 . . . 3
1.4 衛星上での XRT の配置図 . . . 4
1.5 望遠鏡の構造と原理 . . . 5
1.6 XRS 冷却システム外観 . . . 6
1.7 マイクロカロリメータ外観 . . . 7
1.8 XRS の構造 . . . 7
1.9 HXD 外観 . . . 8
1.10 HXD の構造 . . . 9

2.1 MOS CCD の基本構造 . . . 13
2.2 MOS 構造のエネルギーバンド図 . . . 14
2.3 0.2–20keV の X 線に対する Si、O の質量吸収係数 . . . 15
2.4 蛍光 X 線の発生確率 . . . 16
2.5 0.2–20keV の X 線に対する初期電子雲の半径 . . . 17
2.6 直接再結合と間接再結合 . . . 18
2.7 表面チャネルデバイス (左) と埋め込みチャネルデバイス (右) . . . 19
2.8 ３相方式 . . . 20
2.9 ２相方式 . . . 20
2.10 バーチャルフェーズ方式 . . . 21
2.11 Frame Transfer 方式 . . . 21
2.12 Full Frame Transfer 方式 . . . 22
2.13 Interline Transfer 方式 . . . 22
2.14 CCD からの出力パルスと積分方式 . . . 23

3.1 XIS 構成図 . . . 27
3.2 XIS センサーの外観と構成 . . . 28
3.3 XIS CCD チップの構成 . . . 29
3.4 CCD の電極構造 (左) とチャネルストップ構造 (右) . . . 30
3.5 Focal plane assembly 外観 . . . 31
3.6 TEC 素子断面図 . . . 32
3.7 BI チップの断面図 . . . 33
3.8 量子効率の比較 . . . 34
3.9 AE/TCE の概念図 . . . 35
3.10 Normal モードの電荷転送パターン . . . 36
3.11 P-sum モードの電荷転送パターン . . . 36
3.12 Burst モードの電荷転送パターン . . . 37

3.13 犠牲電荷による CTE の回復 39
3.14 電荷注入機構の概略図 40
3.15 電荷注入機構の概略図 41
3.16 ASCA Grade 方式 (Normal モード) 43
3.17 Grade 方式 (P-sum モード) 45

4.1 京都大学較正システム 48
4.2 大阪大学較正システム 49
4.3 読み出しノイズ 50
4.4 バッドコラム 51
4.5 各エネルギーの X 線スペクトル (0–4096ch 全体) 58
4.6 各エネルギーの X 線スペクトル (メインピーク) 59
4.7 X 線エネルギーと波高値の対応関係 60
4.8 SSD のスペクトル 61
4.9 リアルタイムモニタ用 SSD (太郎さん) のスペクトル 62

5.1 Zn のスペクトル Grade0 (左) と Grade7 (右) 64
5.2 Grade7 のイベント 65
5.3 スプリット閾値の最適化 67
5.4 新しい Grade 法による Zn のスペクトル (Grade7) 67
5.5 新 Grade 法による各エネルギーの X 線スペクトル (0–4096ch 全体) 73
5.6 Fitting の方法 74
5.7 sumph とイベントの広がりの関係 74
5.8 σ とイベント数の関係 75

6.1 転送回数の違いによるスペクトルの変化 78
6.2 CTI 78
6.3 波高値と縦転送 CTI の関係 87
6.4 Dark のスペクトル 88
6.5 Dark を差し引きしたスペクトル (0–400ch) 88
6.6 各エネルギーの X 線スペクトル (0–4096ch 全体) 89
6.7 ゲイン 90
6.8 エネルギー分解能 90
6.9 Si エスケープ成分のできかた 90
6.10 Si エスケープの相対強度 91
6.11 コンスタント成分のできかた 91
6.12 コンスタント成分を含んだスペクトル 92
6.13 コンスタント成分の相対強度 92
6.14 Fitting 法によって得られた Zn のスペクトル 93

表 目 次

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

3.1 XIS の 4 センサーの名称 28
3.2 XIS 性能諸元 30
3.3 クロックモードとエディットモードの組合せ 39

4.1 各ターゲットのエネルギー及び実験条件 49
4.2 バッドコラムの位置 52
4.3 Gaussian fit の中心値 53
4.4 エネルギー分解能 54
4.5 検出効率 55
4.6 太郎さんのカウント数 56

5.1 XIS Grade 法 (スプリット閾値=7) によるカウント数と Grade 分岐比 . . . 66
5.2 エネルギー毎の最適なスプリット閾値 66
5.3 スプリット閾値可変 Grade 法によるカウント数と Grade 分岐比 68
5.4 スプリット閾値可変 Grade 法によって求めたエネルギー分解能と検出効率 69
5.5 Fitting 法によって求めたエネルギー分解能と検出効率 70
5.6 新 Grade 法と Fitting 法のエネルギー分解能と検出効率の比較 71

6.1 波高値と縦転送 CTI の関係 79
6.2 波高値と縦転送 CTI の関係のモデルフィッティング結果 79
6.3 CTI 補正前後のエネルギー分解能の比較 80

第1章　Astro-E2衛星

1.1　概要

Astro-E2 衛星は 2000 年 2 月に軌道投入に失敗した Astro-E 衛星の 2 号機であり、日本で第 5 番目の X 線天文衛星となる。2005 年の夏頃に鹿児島宇宙空間観測所 (KSC) から、3 段式 M-V ロケットによって高度約 550km の円軌道に打ち上げられる予定である。

この衛星には、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 台搭載され、その焦点面に 4 台の X 線 CCD カメラ (XIS) と 1 台の高精度 X 線分光器 (XRS) が置かれる。さらに非撮像型ではあるが、硬 X 線帯域 (10–600 keV) を観測できる硬 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できる。

図 1.1: Astro-E2 衛星外観

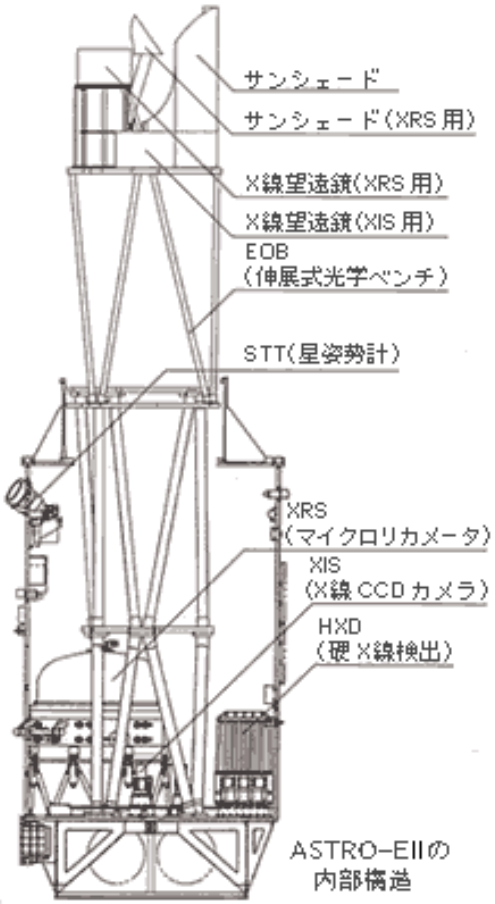

図 1.2: Astro-E2 衛星内部構造

1.2 XRT

Astro-E2 搭載用 X 線望遠鏡 (XRT) は、ASCA/XRT よりもひとまわり大きいもので、口径 40cm、焦点距離 4.75m の XRT-I (焦点面に XIS を置くもの) が 4 台と、口径 40cm、焦点距離 4.5m の XRT-S (焦点面に XRS を置くもの) が 1 台ある (配置は図 1.4 参照)。反射鏡はアルミ薄板にレプリカ法で鏡面を形成したレプリカミラーを、XRT-I は 175 枚、XRT-S は 168 枚、どちらも同心円状に配置したもので、鏡面構造としては、回転双曲面と回転放物面からなる本来の WolterI 型光学系を円錐 2 段で近似している。鏡面の反射材には金が用いられる。原理としては、ASCA/XRT と同様に鏡に対して十分小さな (0.5–1.0 度) 角度で入射した X 線が全反射することを利用している。

ASCA/XRT や Astro-E2/XRT のような薄板多重 X 線望遠鏡は、Chandra/HRMA のような基盤を直接研磨する方式に比べて結像性能 (角度分解能) では劣るが、小型超軽量でありながら非常に大きな有効面積を持つという特長を示す。特に > 11 keV の硬 X 線帯域で現行の XMM-Newton を凌ぐ有効面積を有する。

また、Astro-E2/XRT は ASCA/XRT からいくつかの改良がなされているので、以下にそれを列挙する。

- レプリカ法の導入によって鏡面形状精度が格段に向上し、ASCA の約 2 倍の角度分解能を達成した。(Half Power Diameter $\sim$1.9 arcmin)

- 口径をほとんど変えずに焦点距離を約 1.3 倍に伸ばしたことにより斜入射角が小さくなったため、高エネルギー側での反射率が 2 倍 (@6 keV) 程度向上した。
- 望遠鏡前面にプリコリメータを配置したことにより、ASCA の頃からの問題であった「迷光」(視野外の明るい天体からの光の漏れ込み) を約 1 桁減少させた。

図 1.3: XRT 外観

表 1.1: 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
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)	1.9′	1.9′	3.5′
重量 †	2.7kg	2.7kg	0.5kg

†: 検出器 1 台当たり

1.3 XRS

Astro-E2/XRS(X-Ray Spectometer) は衛星搭載機器としては世界で初めて、X 線マイクロカロリメータを使って天体を観測する装置である。後に述べるように、撮像型として

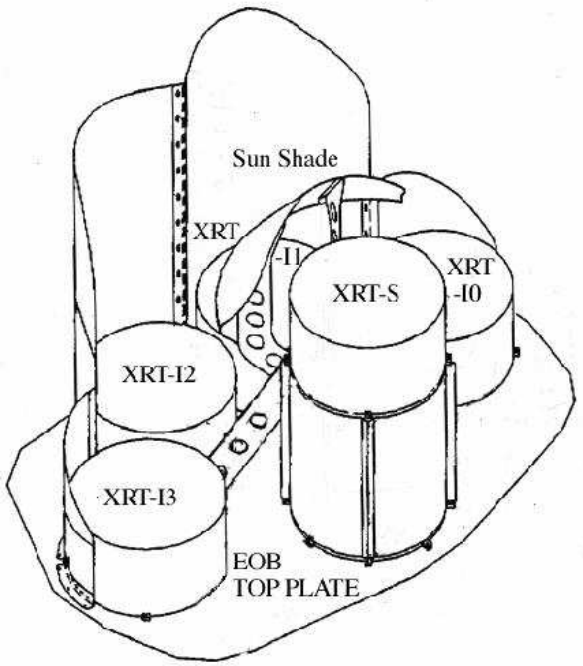

図 1.4: 衛星上での XRT の配置図

は他の追随を許さない高いの分光能力を有し、Astro-E2 衛星の一番の「売り」とも言える画期的な検出器である。

X 線マイクロカロリメータは、入射した X 線光子 1 個 1 個のエネルギーを素子の温度上昇として測定する。そのエネルギー分解能は素子内のフォノン数のゆ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 では断熱消磁と放射冷却により 65mK の低温を達成し、X 線の吸収体には X 線帯域での吸収効率の高い HgTe を使用する。これにより入射 X 線のエネルギーによらず 6–7 keV のエネルギー分解能を達成し、また 10keV の X 線に対しても 70% 以上という非常に高い検出効率を実現できる。

高精度の X 線分光観測については、既に Chandra/HETG などによって、grating による方法が確立されているが、grating は非撮像であるため点源にしか適用できないのに対して、XRS では広がった天体でも高いエネルギー分解能で分光できる。さらに XRS は grating とは異なりエネルギーによらず一定の分解能を持つため、鉄の K 輝線を含む高エネルギー側では grating にも勝るエネルギー分解能を示す。従って、銀河団ガスや超新星残骸などの広がった天体や、点源であれば、鉄の K 殻の輝線や吸収線で初めてわかるサイエンスが期待できる天体が、XRS で優先的に観測されることになるだろう。

しかしながら、XRS は素子の応答速度が数 ms と遅く、明るい天体を観測する場合はフィルタを使用してカウントレートを落とし、パイルアップを防がなくてはならない。さらに視野が 2.9'×2.9' と非常に狭く、素子数も 32 と少ないため、XIS のような高いイメージング能力は持たない。従って XIS と組み合わせた撮像・分光観測が非常に重要となる。

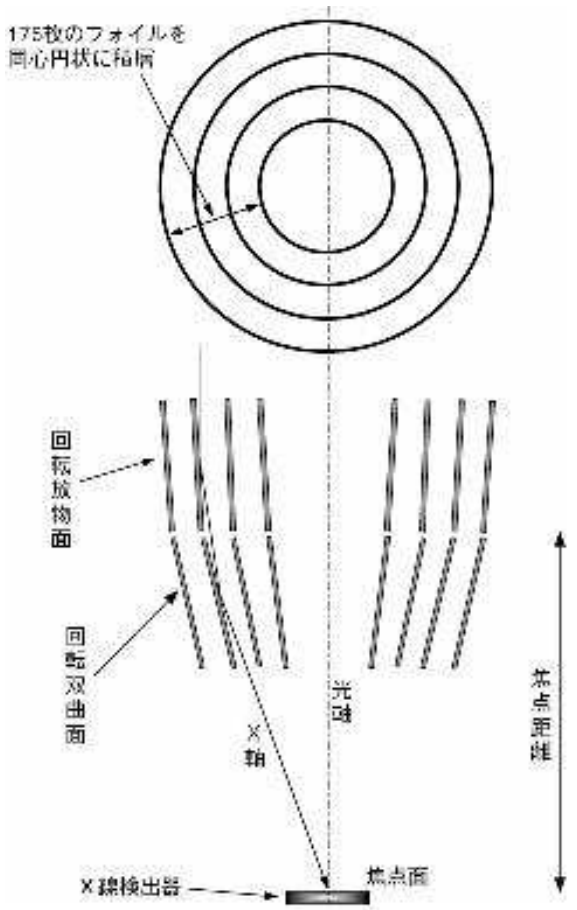

図 1.5: 望遠鏡の構造と原理

X 線カロリメータの原理

図 1.8 に XRS の模式図を示す。X 線光子が入射し X 線吸収体に吸収されると、吸収体の温度が数 mK 上昇する。温度計は熱的には吸収体から部分的に切り離されており、吸収体が熱平衡に達した頃にその温度を感知し始める。その後シリコンピクセルを暖めた熱は弱い結合を通してゆっくりと熱浴に流れて行き、数ミリ秒後に元の動作温度に戻る。

時定数とエネルギー分解能

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、

$$\Delta T = E/C \tag{1.1}$$

と書ける。ただし C は素子の熱容量である。従って素子の温度上昇を測定することによって入射した X 線光子のエネルギーがわかることになる。一方、素子が定常状態に戻るまでの時定数 τ は、熱容量 C と素子・熱浴間の熱伝導度 G の兼ね合いで決まり、

$$\tau = C/G \tag{1.2}$$

となる。XRS では約 3msec である。

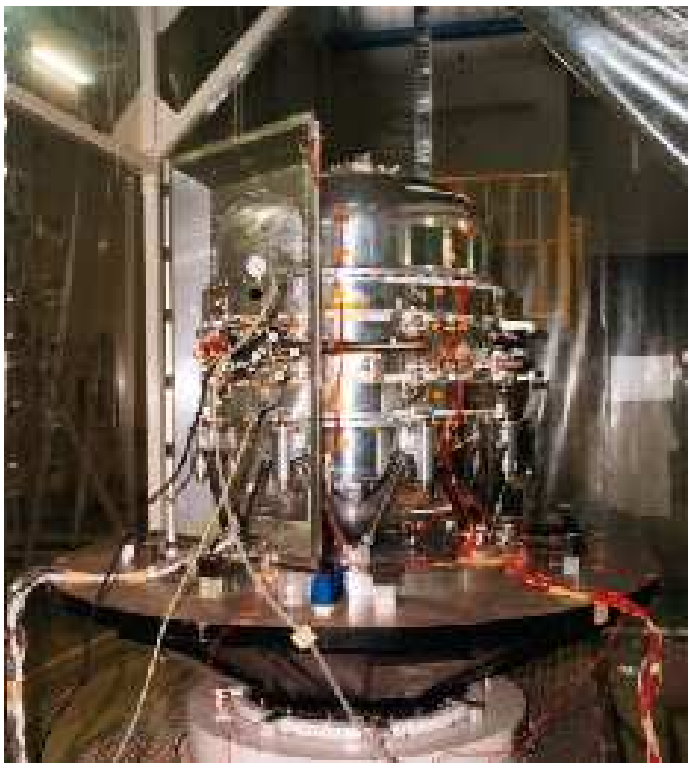

図 1.6: XRS 冷却システム外観

一方エネルギー分解能は、素子の温度ゆらぎ (フォノンノイズ) や温度計のジョンソンノイズ、読みだし回路のノイズなどにより決まる。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 $CT/kT = C/k$ と見積もられる。従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、

$$\Delta E = kT\sqrt{C/k} = \sqrt{kT^2C} \tag{1.3}$$

となる。入射 X 線光子による温度上昇は小さいので、入射によって励起されるフォノンの数の統計ゆらぎは定常状態でのフォノン数のゆらぎに比べて十分小さく、無視できる。従って式 1.3 がそのままエネルギー分解能の見積もりとなる。実際はこれに加えてジョンソンノイズ等を考慮し、エネルギー分解能は

$$\Delta E_{FWHM} = 2.35\xi\sqrt{kT^2C} \tag{1.4}$$

と求められる。但し、ξ はバイアス条件や温度計の感度によって決まるパラメータで、$\sim$2 程度の値を持つ。ここで注目すべきなのが、エネルギー分解能が熱浴の温度と素子の熱容量によって決まり、入射 X 線のエネルギーにはよらないことである。動作温度を極低温にすることにより、エネルギー分解能を極限まで小さくすることが可能である。(熱容量も T の関数。) XRS の場合、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。

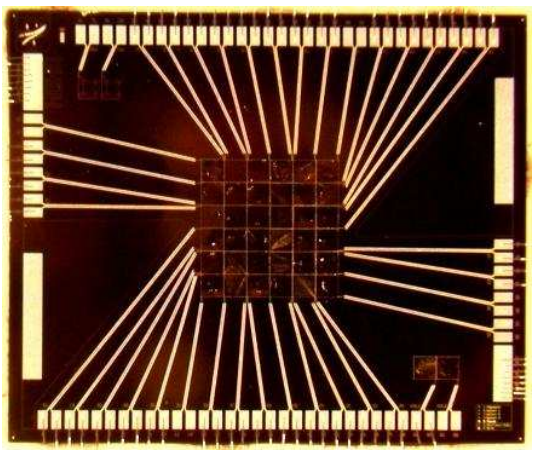

図 1.7: マイクロカロリメータ外観

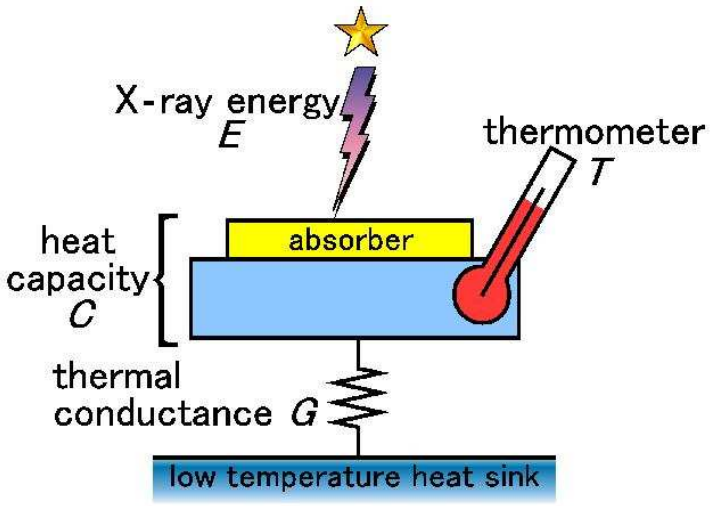

図 1.8: XRS の構造

Astro-E 1 号機からの改良点

- センサーの雑音を大幅に抑制することに成功し、エネルギー分解能が約 2 倍向上した。
- 1 号機は技術的な制限のため、2×16 ピクセルのバイリニアアレイ式であったが、製造技術の向上によって 6×6 ピクセルの 2 次元アレイ式が搭載可能になった。これによって、より撮像に適した形状となっただけでなく、シリコンのバックグラウンドイベントを大幅に抑制することに成功した。
- XRS はまず固体ネオンによって 17K まで冷やされ、次に液体ヘリウムによって 1.3K にし、最後に断熱消磁で 65mK に冷却する。そして XRS の寿命は、使い捨てである固体ネオンの量で決まる。1 号機では 2 年弱であった。Astro-E2 では新たに機械式冷凍機を搭載してデュワー内の放射シールドを冷却することで、固体ネオンの消

費量を削減することに成功。これにより XRS の寿命が 2.5–3.5 年にまで延びた。

- ^{55}Fe 線源からの X 線が常に照射するエネルギー較正専用のピクセルを 1 つ設けたことで、他のピクセルのバックグラウンドを大幅に抑えることが可能になった。

1.4　HXD

Asto-E2/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。従って XIS および XRS と合わせると、 3 桁を越えるエネルギー帯域をカバーすることになる。後に述べるような”Well” と”Anti” から成る複眼構成により、そのヒットパターンからバックグラウンドである荷電粒子やコンプトンイベントを効率良く除去でき、特に 10–200keV 付近では、過去のいかなる宇宙 X 線装置より高い検出感度を有する。

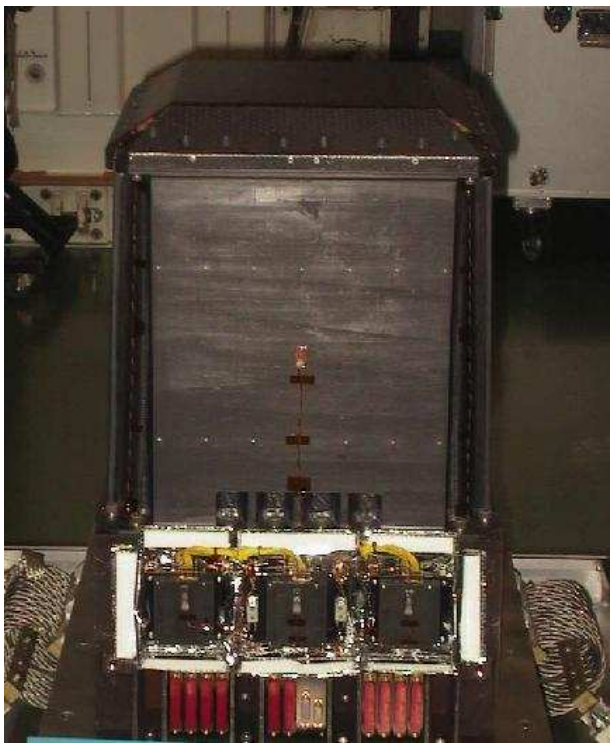

図 1.9: HXD 外観

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

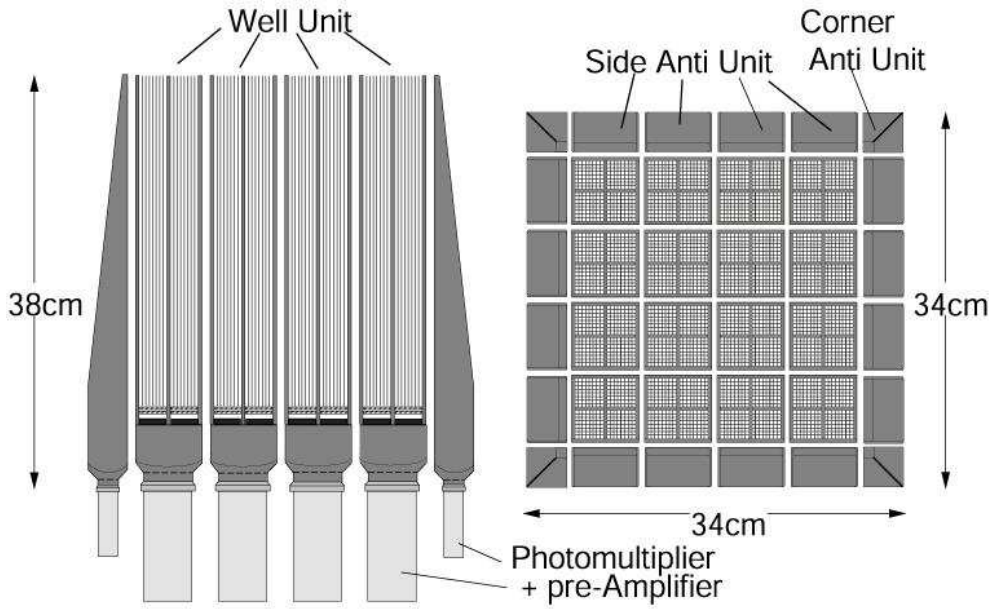

図 1.10: HXD の構造

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 $0.56^\circ \times 0.56^\circ$(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 $1200\mathrm{cm}^2$ にもなり、1MeV でも $600\mathrm{cm}^2$ 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、$\sim 5^\circ$ 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。

1.5 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。

基本的には ASCA/SIS と同じ検出器であるが、SIS に比べて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 $-60°C$ から $-90°C$ 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。
- 損傷の原因である荷電粒子対策として、カメラボディ周辺にプラスチックリングが設けられた。
- 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。
- 同じくメモリー制限のため、SIS では X 線光子が入射した結果生じたイベントを機上で抽出し、イベントを含む 3×3 ピクセルのデータを地上に転送していた。XIS ではさらに情報量の多い 5×5 ピクセルのデータを記憶、転送できる。これにより X 線イベントの検出方法の幅が大きく広がり、検出効率の向上につながる。X 線 CCD における一般的なイベント抽出の方法は、3.7 で述べる。
- 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。
- 通常よく用いられる前面照射型 (FI) チップ 3 台に加えて低エネルギー側の検出効率に優れる裏面照射型 (BI) チップが 1 台搭載される。製造技術の向上により、FI と同程度のエネルギー分解能を維持している。

XIS については 3 章でより具体的に紹介する。BI チップについては本論文のメインテーマであるが、3.3 において FI との詳しい比較を議論する。

表 1.2: 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	21.5mm×21.5mm(PIN) 24mm×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	3.5msec	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2章　X線CCD

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-Newton/EPIC に使われ、Astro-E2/XIS や MAXI/SSC に採用が決まっている。

2.1　MOS 構造

「MOS」とは、Metal (金属) 、Oxide (酸化膜) 、Semiconductor (半導体) の略で、この 3 層を順に接続したものを MOS 構造と呼ぶ。通常、半導体部分にはシリコンが用いられる。これは、シリコンの表面を酸化性の外気に曝すことで安定した酸化膜が容易に形成されるからである。Chandra/ACIS や Astro-E2/XIS では、この上に金属層としてポリシリコンを堆積させたものを使っている。図 2.1 に MOS CCD の構造図を示す。

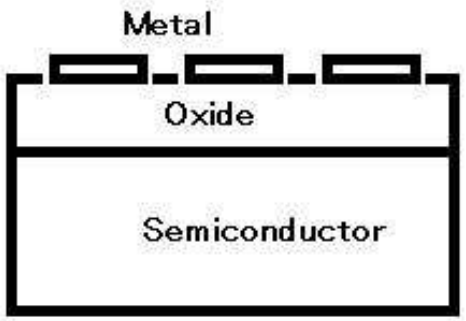

図 2.1: MOS CCD の基本構造

半導体内の不純物として、ボロン (ホウ素) などの III 族の原子を添加したものはキャリアが正の電荷を持つことになるため、このような半導体は「P 型半導体」と呼ばれる。

一方で、リンや砒素などの V 族の原子をドープされたものは、電子がキャリアとなり、「N 型半導体」と呼ばれる。今のところ、微細加工のしやすさなどから実用化されているのはすべて P 型の CCD だが、現在開発が進められている N 型 CCD には大きな利点がある。CCD の有感領域である空乏層の厚みは不純物濃度の 1/2 乗に反比例するが、N 型 CCD の方が不純物濃度を下げやすいため、硬 X 線まで高い検出効率を持った CCD が作成できると期待される。実現されれば、N 型の CCD が将来主力となっていくであろう。

以下では P 型 CCD について説明する。図 2.2 は MOS CCD のポテンシャル構造を示している。図の左は金属部と半導体部を電気的に絶縁した状態で、フェルミ準位とは金属、あるいはシリコンの電子の平均エネルギーであり、真性フェルミ準位とはシリコンに不純物が含まれない場合のフェルミ準位である。従って真性フェルミ準位は荷電子帯と伝導体のちょうど中間にくる。P 型半導体では荷電子帯のすぐ上にアクセプタ準位を持つため、フェルミ準位は真性フェルミ準位よりも下側になる。

次に金属部に正電圧 (V>0) をかけた場合を考える。このとき酸化膜の両側に電位差が生じ、酸化膜内およびシリコンの表面の垂直方向に電界が生じる。その結果、ポテンシャル構造は図の右のようになる。すると多数キャリアである正孔は図の右方向に追い込まれ (図 2.2 は電子にとってのエネルギーバンドなので正孔にとっては右側の方がエネルギーが低くなることに注意) シリコン表面にキャリアが存在しなくなる。この状態を「空乏」と呼び、空乏状態になったシリコン表面を空乏層と呼ぶ。そして空乏層の奥のポテンシャルの平坦な領域を中性領域と呼ぶ。

金属部に印加するさらに増していくとエネルギーバンドを強くしたに曲げ、空乏層幅は深くなるが、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。こうなると少数キャリア (電子) の数が多数キャリア (正孔) の数よりも多くなるため、あたかも N 型半導体のようになる。これを「N 反転」と呼び、反転状態になったシリコン表面部を反転層と呼ぶ。一旦反転状態になると、さらに印加電圧を大きくしてもシリコン表面に負電荷が溜まることで電位を支えるため、空乏層幅はこれ以上深くはならない。

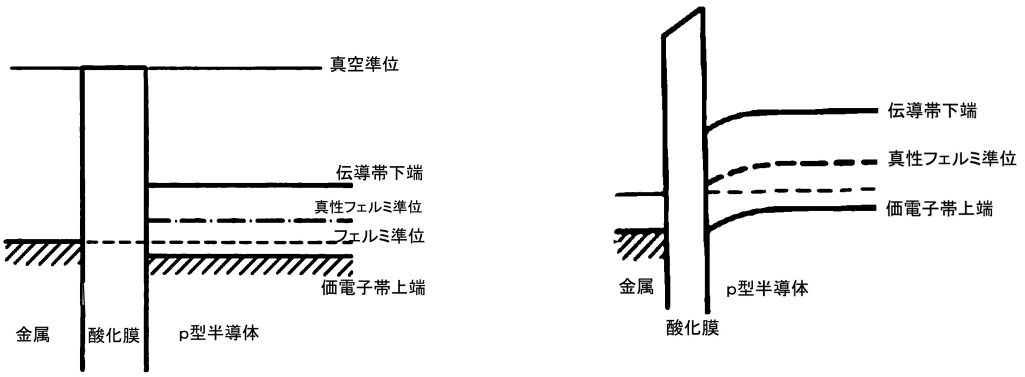

図 2.2: MOS 構造のエネルギーバンド図

2.2　X 線と CCD の相互作用

X 線がイベントとして認識されるには、まず CCD と相互作用をしなくてはならない。X 線はチップを構成するさまざまな物質と相互作用するが、X 線イベントとして検出されるのはほとんどが Si の空乏層で相互作用したものである。

2.2.1 光電吸収

0.2–12keV 程度のエネルギーでは、X 線と物質の相互作用はほぼ 100% 光電吸収である。X 線のエネルギー (E_0[keV]) が Si K 殻のエネルギー (E_K=1.838keV) より大きい場合、X 線は K 殻の電子をたたき出し、たたき出された電子は E_0-E_K の運動エネルギーを持って初期電子雲の形成にまわる (後述)。また、$E_0 < E_K$ の場合は L 殻の電子がたたき出される。

ここで、物質の密度を ρ、質量吸収係数を μ とすると、深さ $0 \sim z$ で光電吸収が起きる確率 P は次の式で表される。

$$P = 1 - e^{-\mu\rho z} \tag{2.1}$$

但し、質量吸収係数は E_0 の関数であり、物質ごとに異なる値を取る。図 2.3 左に Si の質量吸収係数を示す。1.838keV に不連続点が見られるが、これは光電吸収によってはじき出される電子が L 殻電子から K 殻電子に変わるためであり、この不連続点を K 吸収端と呼ぶ。さらに図 2.3 右に O の質量吸収係数を示す。O の K 吸収端は 0.543keV である。

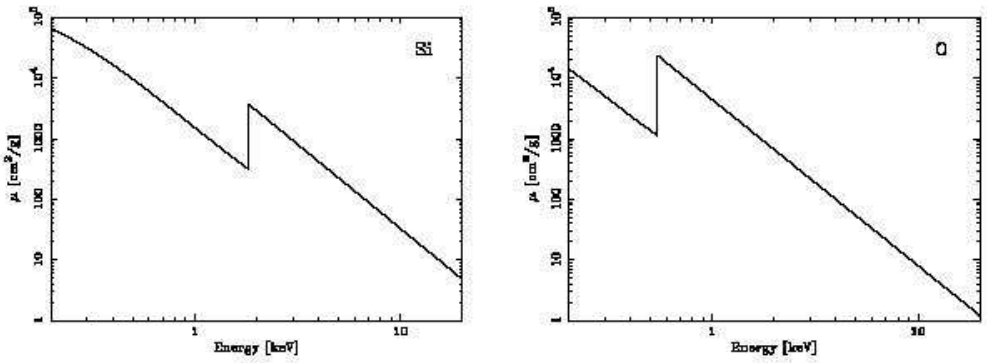

図 2.3: 0.2–20keV の X 線に対する Si、O の質量吸収係数

Si 質量吸収係数は Jenesick (1986)[7] により次のような関数で近似されている。6 章での議論でこの関数を用いる。

$$\mu_{Si}\ [cm^2/g] = \begin{cases} 10^{[3.19-2.71\log(E_0)+0.0755(\log(E_0))^2+0.873(\log(E_0))^3]} & \text{for } E_0 < 1.838\text{keV} \\ 10^{[4.3-2.78\log(E_0)]} & \text{for } E_0 > 1.838\text{keV} \end{cases} \tag{2.2}$$

2.2.2 初期電子雲

光電吸収により生じた電子は半導体中で価電子帯にいる電子と弾性散乱を繰り返し、多数の電子・正孔対を作る。また、光電吸収により内殻の電子を失った Si 原子はほとんどが Auger 電子を放出し、放出された電子もやはり電子・正孔対の生成にまわる。Auger 電子とは、内殻の空いた準位に外殻の電子が落ちる際にその束縛エネルギーの差の分だけ別の外殻電子にエネルギーを与える物理過程によって放出された電子のことである。例えば、L 殻から K 殻に落ちる際に別の L 殻電子が放出された場合、K 殻、L 殻の束縛エネルギーをそれぞれ E_K、E_L とすると、Auger 電子のエネルギーは E_K-2E_L となる。結局このような過程により順次内殻は埋まってゆき、最終的には価電子帯にいる電子のみが電子・正孔

対を作ると考えられる。電子・正孔対を一対作り出すのに必要なエネルギーは約 3.65eV なので、生成される電子・正孔対の数は最初に入射した X 線のエネルギー E_0 に比例する、$10^3 \times E_0/3.65$ 個となる。

しかし、内殻電子を失った Si 原子からわずかな確率で Auger 電子の代わりに Si の K 殻–L 殻間のエネルギーに相当する蛍光 X 線が発生する場合がある。このとき、発生した X 線が同一ピクセル内ですぐ再吸収された場合は Auger 電子の場合と見分けはつかないが、遠く離れたピクセルで再吸収されてしまうと、Si 蛍光 X 線 (1.739keV) に対応するイベントと、E_0-1.739keV に対応するエスケープイベントの 2 つが検出されてしまう。また、発生した蛍光 X 線が空乏層の外に逃げてしまった場合はエスケープイベントのみが検出される。これらのイベントパターンについては 6 章で詳しく議論する。

では、Auger 電子と蛍光 X 線はどのくらいの割合で起こるのだろうか。その確率は原子番号によって異なり、原子番号が大きくなるほど蛍光 X 線が発生する割合が高くなる傾向にある。図 2.4 は原子番号に対する蛍光 X 線の発生する割合をプロットしたものである。Si は $Z = 14$ なので、蛍光 X 線となる確率は約 4.7%である。つまり、ほとんどが Auger 電子となるのである。

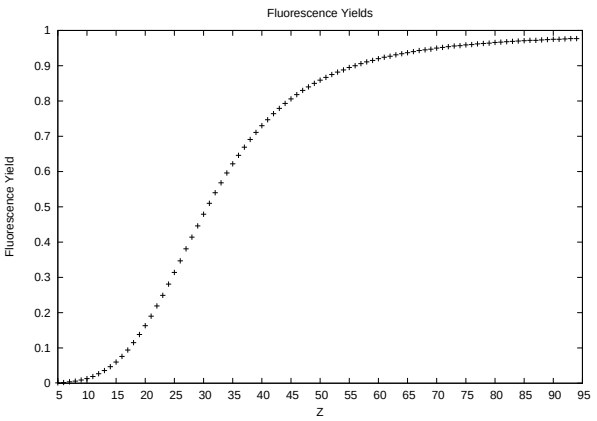

図 2.4: 蛍光 X 線の発生確率

生成された電子は初期電子雲を形成する。Auger 電子によって 1 箇所に全ての電子が生成される場合は、初期電子雲は等方的だと考えることができ、その半径は β 線の飛程を測定することにより実験的に、

$$a\ [cm] = 1.71 \times 10^{-6} \cdot E_0^{1.75} \tag{2.3}$$

と表されることがわかっている [7] (図 2.5 参照)。

2.3　電荷集積

Si によって X 線が吸収され電子雲が形成されると、次はチップにかけられた電界によって電荷は電極の方へと集積される。このとき、電界によるドリフトの他に、電荷のランダム運動による拡散や、Si との再結合も考慮しなくてはならない。

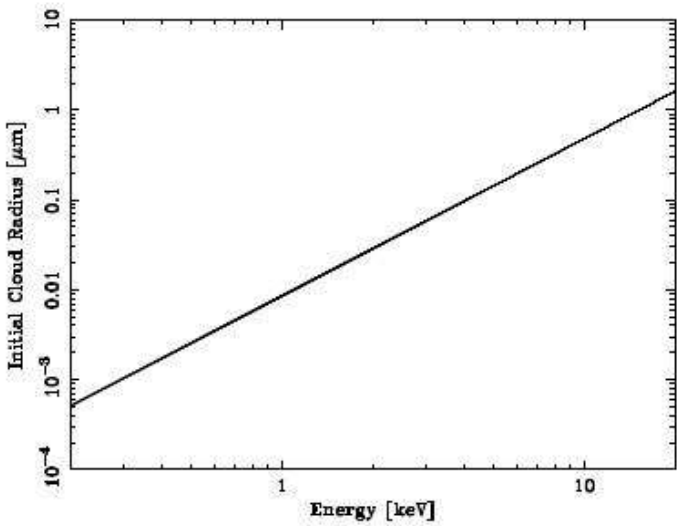

図 2.5: 0.2–20keV の X 線に対する初期電子雲の半径

ドリフト

電荷は電界中で受ける力によりある一定の方向に動く。すなわち、電界の方向に z 軸を取り、電界を $E(z)$、電子の質量と電荷をそれぞれ m、$-e$ とすると、次のような運動方程式が成り立つ。

$$-eE(z) = m\frac{\mathrm{d}^2 z}{\mathrm{d}t^2} \tag{2.4}$$

半導体中でドリフトされる電子は他の原子との衝突を繰り返しながら運動する。そのため式 2.4 は衝突から次の衝突までに要する時間 (平均緩和時間) τ_c を用いて次式のようになる。

$$-eE(z)\tau_c = m\bar{v} \tag{2.5}$$

但し、$\bar{v}$ は電荷の平均速度である。これを変形して、

$$\bar{v} = \frac{e\tau_c}{m}E(z) \equiv \mu E \tag{2.6}$$

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係数 μ を電子移動度と呼び、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指標となる。

拡散

電子が特定の場所に集中して存在すると、電界がなくても移動を行う。電子は熱運動により、濃度の高いところから低いところへと拡散するのである。

拡散は、ρ を電子の密度として、拡散方程式

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = D\Delta\rho \tag{2.7}$$

に従う。D を拡散係数と呼び、アインシュタインの関係式により、温度 T を用いて

$$D = \frac{kT}{e}\mu \tag{2.8}$$

と表される。

式 2.7 を解くと、

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2+z^2}{4Dt}\right) \tag{2.9}$$

となり、これは $1\sigma = \sqrt{2Dt}$ の Gaussian なので、時間 t 後にはこの程度まで電子雲が広がることを意味する。

再結合

電子は正孔と再結合し、平衡状態に戻ろうとする。再結合過程は、電子が直接価電子帯に落ちる直接再結合と、不純物を介した間接再結合がある (図 2.6 参照)。Si では間接再結合がほとんどである。不純物の密度を N_A、捕獲断面積を σ_p とすると、再結合のタイムスケール τ_p は、

$$\tau_p = \frac{1}{\bar{v}\sigma_p N_A} \tag{2.10}$$

と表される。

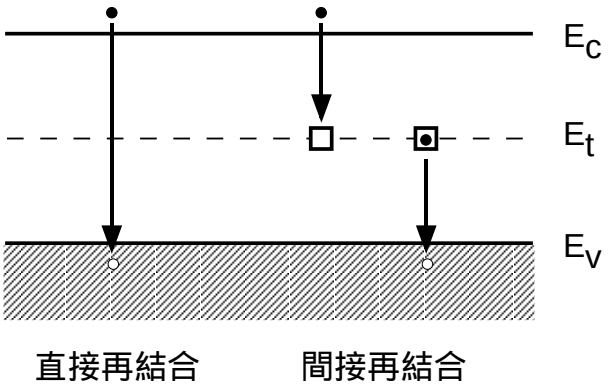

図 2.6: 直接再結合と間接再結合

2.4　チャネルデバイス

電極方向へと集積された電荷は読みだし口に向かって転送される。このときなるべく電荷を損失することなく転送されるよう、XIS では埋め込みチャネルデバイスという方式が採られている。この節ではチャネルデバイスの種類について簡単に説明する。

表面チャネルデバイス

通常の MOS 構造では、図 2.7 左のように空乏層の表面、酸化膜との境界の部分がポテンシャルの底となる。表面チャネルデバイスとは、この部分に電荷を蓄積し、そのまま転送するタイプの CCD のことだが、酸化膜との境界面に多数存在するトラップのため電荷損失を受けやすく、エネルギー分解能が悪化する。

埋め込みチャネルデバイス

図 2.7 右のように、空乏層と酸化膜の間に基盤と逆の極性を持つ部分を「埋め込む」ことにより、ポテンシャルの底が境界面から離れるようにしたもの。一般に界面よりも半導体内部の方がトラップの数がはるかに少ないため、電荷転送効率がよい。XIS はこの方式を用いている。

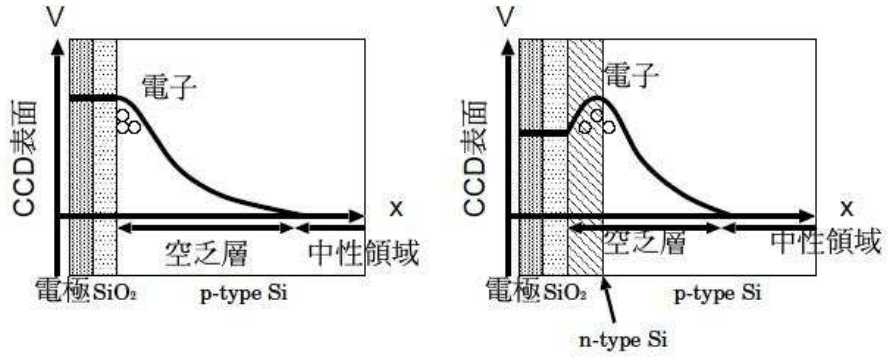

図 2.7: 表面チャネルデバイス (左) と埋め込みチャネルデバイス (右)

2.5 CCD の動作

この節では電荷の転送から読みだしまでを、CCD の動作を詳しく見ていくことで説明する。

2.5.1 電極構造

3 相方式

図 2.8 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読みだし口方向へ移動させて行く。電圧のかけ方によって逆方向に転送することもできる。XIS はこの方式を用いている。

2 相方式

1 ピクセルを 2 つの電極で構成し、各電極の半分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作る。 3 相方式よりも駆動が簡単。

バーチャルフェーズ方式

1 ピクセルに電極のある部分とない部分を作り、それぞれの一部に不純物をドープさせてポテンシャルの階段を作る。電極が 1 つで済む。さらに電極がない部分があり、低エネルギーの X 線に対する量子効率が高くなる。

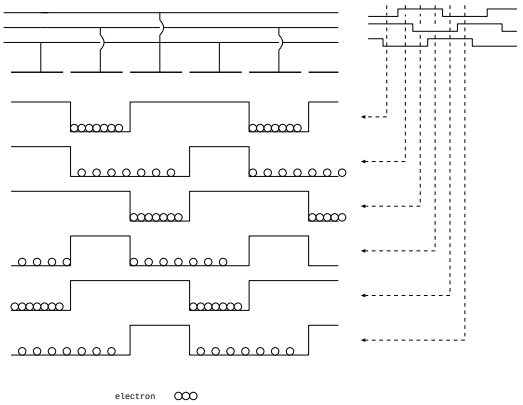

図 2.8: 3 相方式

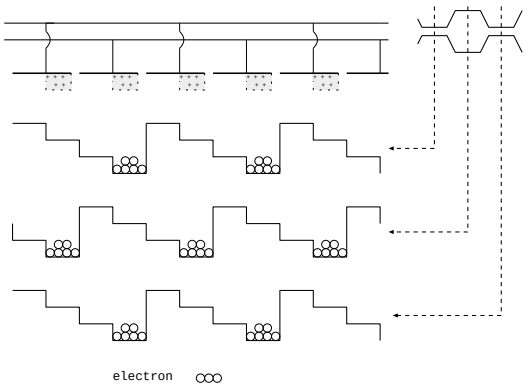

図 2.9: 2 相方式

2.5.2　転送方式

Frame Transfer

Frame Transfer 方式では、チップは図 2.11 のように撮像領域と蓄積領域から成る。それぞれのピクセル数は同じでなくてはならない。読み出しは以下のように行われる。

1. 一定時間撮像領域を露光した後、全ピクセルの電荷を一度に蓄積領域へと転送する。
2. 次に、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の一番下の列の電荷がシリアルレジスタに入る。
3. 次にシリアルレジスタのみ横ピクセルの数だけ横転送し、順次読み出す。
4. 2、3 を縦のピクセル数分繰り返し、蓄積領域中の全ピクセルを読み出す。2、3、4 の間、撮像領域では次の露光に入っており、4 が終わり次第即、次の frame の読み出しを行う。

なお、蓄積領域には X 線や光が入らないようにアルミなどのカバーがかけられる。XIS ではこの方式が用いられる。

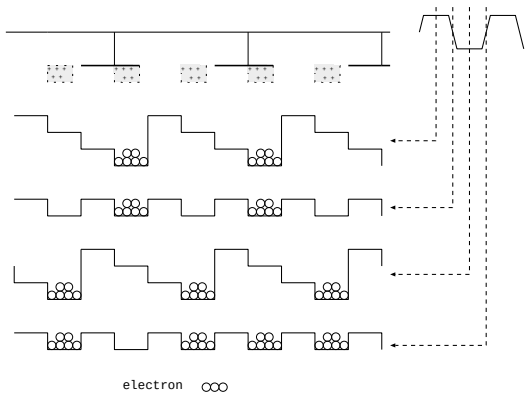

図 2.10: バーチャルフェーズ方式

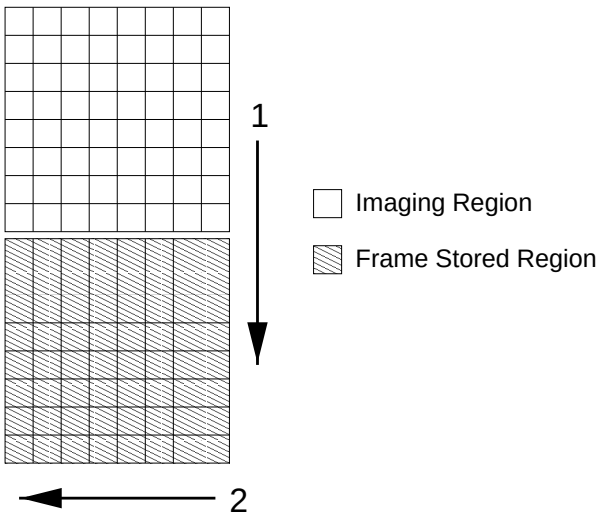

図 2.11: Frame Transfer 方式

Full Frame Transfer

Full Frame Transfer 方式は基本的に Frame Transfer 方式の CCD に蓄積領域がない構成である。そのため、Frame Transfer のように電荷転送中に次の露光を行うことはできない。転送中はシャッターで撮像領域を閉じることになる。転送の手順は Frame Transfer とほとんど同じである。蓄積領域がないため同一サイズで多画素にできるというメリットはある。

Interline Transfer

Interline Transfer 方式は図 2.13 のように撮像領域と蓄積領域を交互に設けたもの。蓄積領域は遮光されている。撮像領域から蓄積領域への転送が 1 ピクセル分の転送で済むが、有効面積が Frame Transfer に比べて小さくなるため、暗い天体でも検出できるような大きな感度が必要な X 線天文では用いられない。市販のデジタルカメラにはこの方式が用いられている。

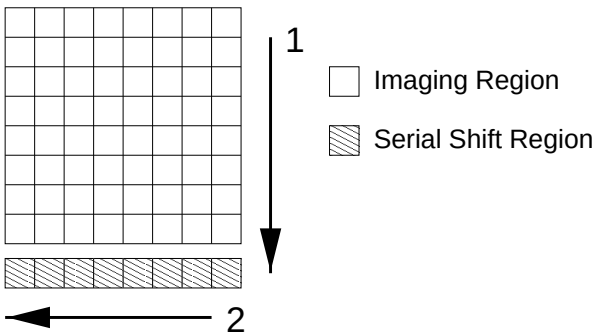

図 2.12: Full Frame Transfer 方式

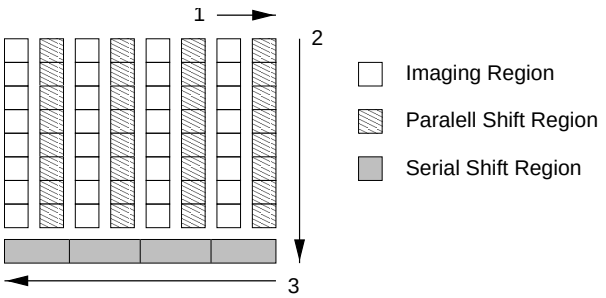

図 2.13: Interline Transfer 方式

Frame Interline Transfer

Interline Transfer 型に Frame Transfer 方式のような蓄積領域をさらに設けたもの。つまり、撮像領域のピクセル数の 2 倍の数の蓄積用ピクセルが存在する。

Interline Transfer だと蓄積領域を転送している間に受光領域が光を検出した際、蓄積領域に電荷が漏れ出してしまうことがあり、このようなことが起こると正しい位置情報が失われることになる。Frame Interline Transfer 方式は第 1 の蓄積領域から第 2 の蓄積領域まで高速転送され、その後ゆっくりと読み出すことができるので、そのような問題は起こらなくなる。

2.5.3　読みだし方式

読み出し口まで転送された電荷は FET により電圧値に変換される。CCD からのアナログ出力信号の波形は図 2.14 左のように reset パルス部、float レベル、signal レベルからなる。信号波高値は float レベル-signal レベルで定義され、1 ピクセルごとに繰り返されるこの波形を読み出し回路で読み出し、波高値が求められる。

XIS では float、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 2.14 右) を採用している。

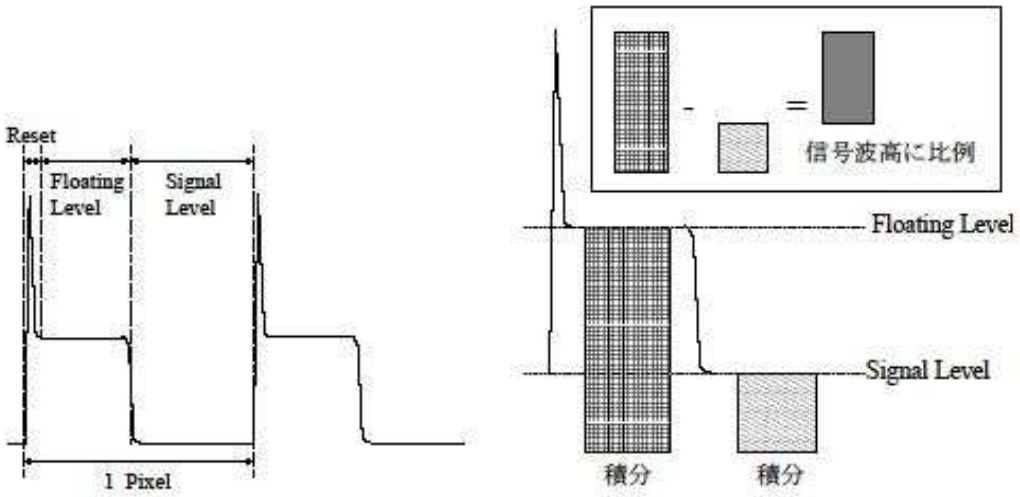

図 2.14: CCD からの出力パルスと積分方式

2.6 性能の指標

この節では、ゲインやエネルギー分解能、検出効率などの基本性能や、その他問題となることがらについてまとめる。これら CCD の性能を詳細に知ることは、観測データ解析の信頼性を向上させる意味で非常に重要なことである。

ゲイン

入射 X 線のエネルギーに対する出力 channel の値。前節で述べたように、出力 channel は電荷量を電圧情報に変換したものなので、理想的にはゲインは線形なものとなる。しかし現実的には、ADC の非線形性などの要因でエネルギーによるばらつきが生じる。この非線形性を含めてゲインを精度良く見積もることが、入射 X 線のエネルギーの決定において極めて重要である。

エネルギー分解能

2.2 節で述べたように、エネルギー E_0 の X 線の入射によって得られる電荷量の平均値は E_0/W_{Si} である (但し、W_{Si} は電子・正孔対を 1 つ作るのに必要なエネルギー)。この電荷量はポアソン統計に従う揺らぎを持つと思われるが、現実的には様々な要因によりポアソン分布からずれる。このずれを Fano 因子 (F) と呼ばれる定数に押し込めると、統計揺らぎは

$$\sigma_e = \sqrt{F\frac{E_0}{W_{Si}}} \tag{2.11}$$

と表される。なお、Si の場合は $F = 0.12$ となる。さらに、シムテム的な要因の読み出しノイズがかかり、最終的な電荷量の揺らぎは

$$\sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{E_0}{W_{Si}}} \tag{2.12}$$

となる。従ってエネルギー分解能 ΔE をガウシアンの半値幅 (FWHM) で表すと、以下のようになる。

$$\Delta E \sim 2.35 W_{Si} \sqrt{\sigma_{read}^2 + F \frac{E_0}{W_{si}}} \tag{2.13}$$

量子効率 (QE)

CCD の空乏層は有限の厚みなので、入射した X 線の中には相互作用を起こさずに透過してしまうものも存在する。また、空乏層の前面にある絶縁層で (FI の場合は電極層も) 吸収され、空乏層まで到達できないものもある。そこで、本論文では

$$\text{量子効率} = \frac{\text{空乏層で吸収された X 線}}{\text{CCD に入射した全 X 線}}$$

と定義し、これと区別して、全入射 X 線に対するイベント検出された X 線の割合を「検出効率」と呼ぶことにする。「検出効率」ができる限り「量子効率」に近づくように最適なイベント検出法や解析パラメータを定めなければならない。

電荷転送効率 (CTE)

前節で述べたように、集積された電荷は転送され読み出されるわけだが、転送途中で電荷の一部が失われるため、100%の電荷が読み出されるとは限らない。「 1 つの電荷が 1 ピクセルの転送で失われる確率」を電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency; CTI) と定義し、逆に電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency; CTE) を

$$\mathrm{CTE} = 1 - \mathrm{CTI} \tag{2.14}$$

という関係式を満たすように定義する。当然この値が 1 に近いほど性能の良い CCD と言える。

半導体結晶には製造過程や製造後の放射線損傷で格子欠陥が生じる。これが転送される電荷にとってトラップとなり、CTI の主な原因となる。特に打ち上げ後は宇宙線による損傷を受け、CTI は経年変化する。CCD はピクセルの位置によって電荷が読み出されるまでに要する転送回数が異なるため、受ける CTI の積分値もピクセル毎に異なる。従って CTI の増加はエネルギー分解能の劣化の原因となるので、定期的に正しい CTI の値を知り、補正を行う必要がある。

また、トラップの他に転送電圧が不適切なために起こる転送不良も CTI の要因となりうる。この場合は電圧の最適化を行わなければならない。

読み出しノイズ

電子回路起源のノイズ。その大きさを知るため、XIS では 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。

暗電流

CCD に X 線が入射しなくても熱励起により電荷が生じることがあり、これを暗電流と呼ぶ。熱励起の確率は CCD の温度を下げることによって低くすることができる。

光洩れ

X 線 CCD は可視光にも感度を持つ。撮像領域に可視光遮断フィルタを設けることで可視光の入射はかなり抑えることができるが、それでも洩れ込んでしまう場合があり、ダークレベルとして波高値に乗る成分となる。入射 X 線のエネルギーを正しく見積もるためには光洩れの大きさを正確に知り、差し引く必要がある。また、あまりに光洩れが激しい場合はその領域をデータ解析で用いるべきではない。

Bad Pixel・Bad Column

製造過程や放射線損傷によって生じる、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を Bad Pixel もしくは Hot Pixel と呼ぶ。また、転送と逆の方向に電荷が tail を引くことがあり、これを Bad Column と呼ぶ。tail は Bad Pixel の後ろに引くことが多い。これらは解析の際には取り除く必要がある。

パイルアップ

入射 X 線の量が多いとき、 1 回の露光時間中に複数の X 線が同一あるいは近接したピクセルに入射すると、電荷が足しあわされてエネルギーが高い 1 つのイベントとみなされてしまう。これをパイルアップと呼び、パイルアップが起こると正しいスペクトルを知ることができなくなってしまうので、明るい X 線天体を観測するときはフィルターをかけるなどしてカウントレートを人為的に落としてやらなくてはならない。

第3章　XIS

3.1　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 3.1 に、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や機能、観測モードやデータ処理法についての説明を行う。

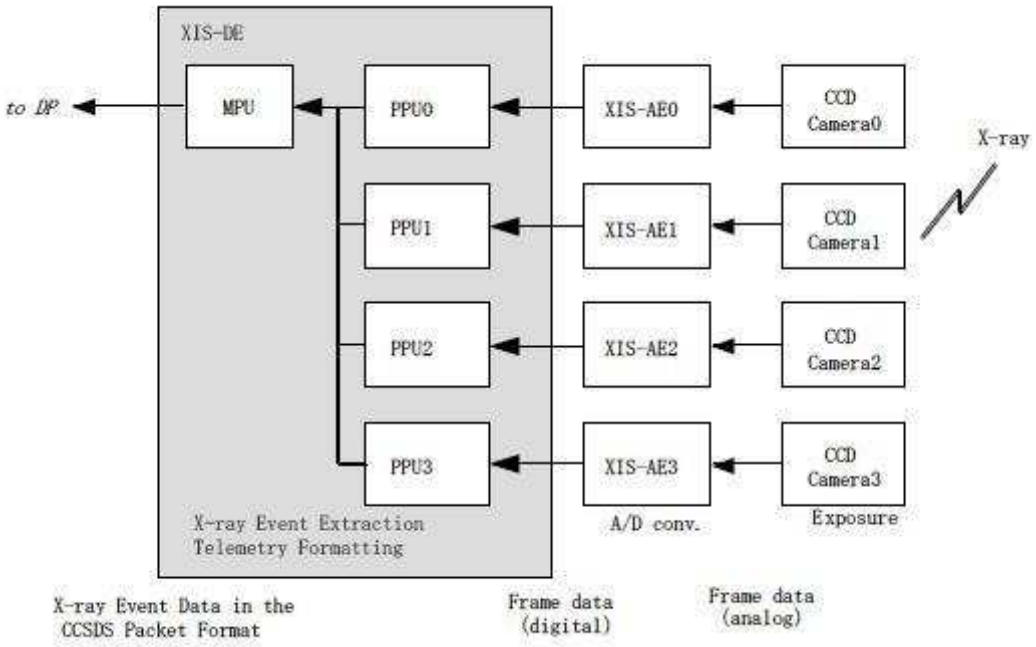

図 3.1: XIS 構成図

3.2　センサー

4 台のセンサー (XIS0,XIS1,XIS2,XIS3; 表 3.1 参照) はそれぞれが独立に XRT の焦点面に置かれ、同じ方向を同時観測する。センサー部は CCD チップ、ベース、ボンネットから構成される。個々のセンサーの外観と構成を図 3.2 に示す。

表 3.1: XIS の 4 センサーの名称

センサー名	XIS0	XIS1	XIS2	XIS3
通称	FI0	BI1	FI2	FI3
CCD 正式名称	w1.3c6	w1.8c2	w1.7c6	w1.14c7

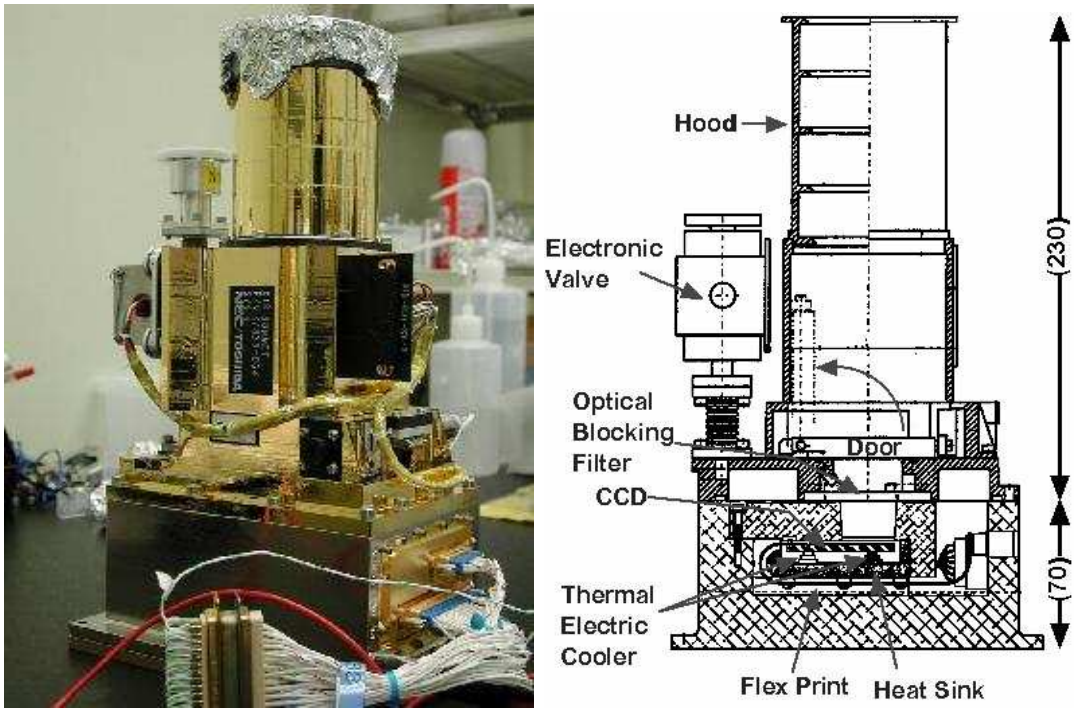

図 3.2: XIS センサーの外観と構成

3.2.1 CCD チップ

XIS にはマサチューセッツ工科大学 (MIT) Lincoln 研究所製の CCD チップを用いる。チップの構成図を図 3.3 に示す。ASCA/SIS や Chandra/ACIS と同じ MOS CCD で、電極構造は 3 相方式、電荷転送は Frame Transfer 方式である。図の上方が撮像領域 (Imaging region) で、$24\mu\mathrm{m} \times 24\mu\mathrm{m}$ のピクセルが 1024×1026 個モザイク状に並んでいる。一方、図の下方は蓄積領域 (Frame-store region) で、$21\mu\mathrm{m} \times 13.5\mu\mathrm{m}$ と、やや小さいピクセルが 512×1026 個並んだもの 2 つから成る。

また、蓄積領域の最下部には真中を境に反対方向に転送できる Serial readout register があり、(縦方向を parallel 方向、横方向を serial 方向と定義する。) 1 枚の CCD につき計 4 個の読み出し口がある。この 4 つの読み出し口から各々 256×1026 ピクセルの電荷を読みだし、独立な回路で並行して信号処理をする。これにより、読み出し時間が 1 つの読み出し口で読み出す場合の $1/4$ に短縮できることになる。読み出し口の違いによりチップを 4 つに分割し、左側から順にセグメント A,B,C,D と呼ぶ。それぞれのセグメント間でゲインが異なることに注意しなければならない。なお、図に示されているように、セグメント間には物理的なすき間はない。

撮像領域の最上部にあるのは、電荷注入用の serial register である。基本的には読み出

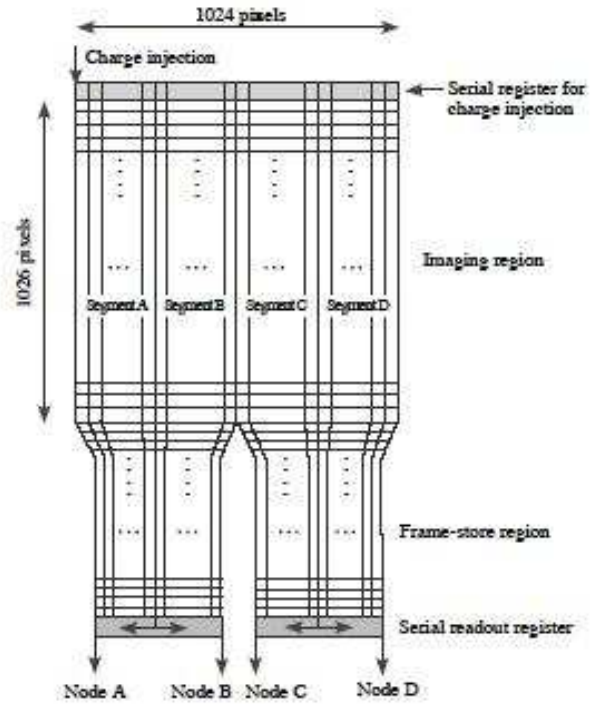

図 3.3: XIS CCD チップの構成

し用の serial register と同じ構造を持つが、４つのセグメントには別れておらず、1024 ピクセルがひとつのレジスタになっている。端にある input gate から X 線光子が作る電荷量と同程度の電荷を注入することができ、これを順次横転送していくことでレジスタ全体に電荷を送ることができる。電荷注入が不要な場合は input gate の電圧を調節してやればよい。電荷が注入された場合、serial register の電荷は縦転送に伴って撮像領域に運ばれる。電荷注入機能についての詳細は 3.6 節で改めて述べる。

次に、CCD 電極部の断面図を図 3.4 左に示す。形成過程の都合上生じる電極のオーバーラップが見られる。３つの電極の各電圧を変化させることで、parallel 方向に電荷が拡散するのを防ぐことができるが、横方向にはそのように電圧によるトラップを作ることができない。そこで半導体部分に不純物を集中的にドープさせた「チャネルストップ」と呼ばれる構造によって隣のピクセルとの間に人工的なポテンシャル障壁を作る (図 3.4 右)。これにより電荷が漏れ出ないようにできるが、チャネルストップで X 線が吸収された場合、生じる電荷が強い拡散や再結合を受けてしまうため、X 線を電極側から照射させる FI チップでは (特に低エネルギー側で) 応答関数にこの影響が現れてしまう。一方 BI チップでは X 線を電極と反対側から照射させるため、ほとんどこの影響は現れない。この点も BI の特長だと言えるであろう。

最後に XIS の性能諸元を表 3.2 にまとめる。

3.2.2 ベース・TEC

XIS ベースは主に CCD を設置している focal plane assembly(FPA) (図 3.5)、CCD を放射線から守るカバーシールド、そしてベース本体からなる。FPA では、金でコートされ

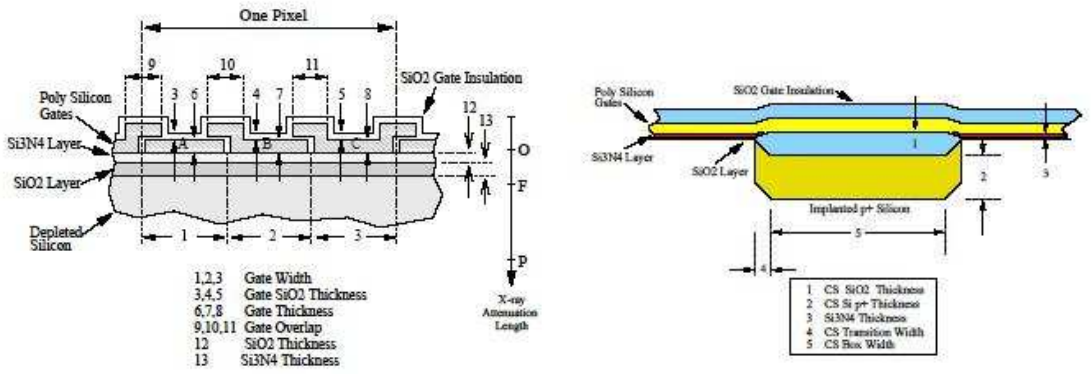

図 3.4: CCD の電極構造 (左) とチャネルストップ構造 (右)

表 3.2: XIS 性能諸元

Clock	3 相方式
ピクセルの大きさ	24μm $\times$ 24μm (撮像領域)
ピクセル数	1024 (横) $\times$ 1026 (縦)
読み出し口	4 個
空乏層厚	70μm (FI), 45μm (BI)
読みだしノイズ	< 3 e$^-$
読みだし時間	8sec (Normal), 7.8msec (P-sum)

た銅製 heat sink の上に 1 台の TEC(Thermal Electric Cooler) が配置されている。図 3.6 に TEC 素子の断面図を示す。TEC は CCD を冷却するためのペルチェ素子 (3 段) であり、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 に冷却して観測に用いる。また、TEC はそれ自身の抵抗によって発熱もするので、正しく温度制御が行われるように TEC に流す電流に上限値 (Soft Current Limit, SLC) を設定し、通常は SCL よりも低い電流を流している。TEC に逆電流を流すことでヒーターとしても使われる。

CCD の上面は撮像領域を除いて厚み 18mm のアルミ製カバーシールドとフレームフィルターが取り付けられている。CCD は軌道上特に South Atlantic Anomaly(SAA) 通過時に高エネルギー陽子による激しい放射線損傷を受ける。ASCA や、地上実験の経験から、CCD が高い性能で数年間動作し続けるためには、Al 換算で 10 g cm^{-2} 程度のシールドが必要となる。ベースの側面、カバーシールド、heat sink、次に説明するボンネットのフード部の厚みを 3mm にすることで、視野方向以外は実効的に 10 g cm^{-2} 程度の厚みを達成した。

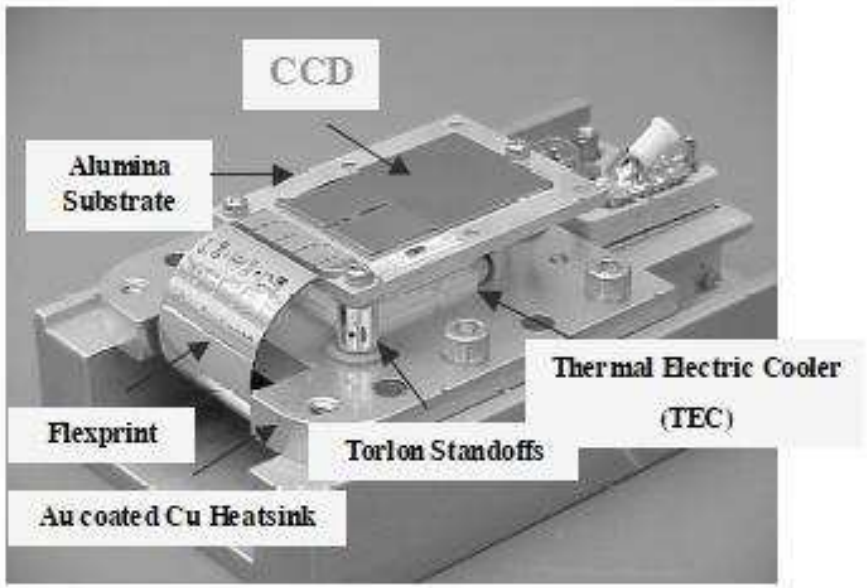

図 3.5: Focal plane assembly 外観

3.2.3 ボンネット・可視光遮断フィルター (OBF)

ボンネットは CCD の上方 (望遠鏡側) に配置され、集光された X 線の光路を確保しつつその他の方向からの X 線を遮断する。ボンネットの内壁で 1 回反射した X 線や可視光 (迷光) も 5 段のバッフルを持つフードによって遮断し、さらにボンネットの外側表面にアルミテープを張り付けたことで熱外乱も低減する機能を持つ。

XIS には機上で CCD を試験、較正する目的で、CCD の撮像領域の左上端と右上端を常に照射するように ^{55}Fe の線源が OBF(Optical Blocking Filter, 可視光遮断フィルター) の外側の外壁に取り付けられている。放射線損傷等による CCD の性能の経年変化があっても、この (エネルギーが既知の) 線源を使うことにより X 線のエネルギーに対する波高値の大きさを正確に知ることができる。さらにドアにも 1 つの線源が取り付けられており、ドアが閉まった状態で CCD 全面を照射することができる。これは、打ち上げ後からドアを開くまでの間の較正に用いられる。

一般に CCD は可視光によっても信号を出すため、XRT の方向からの可視光を遮断するために OBF を CCD の前面に置く。OBF は厚さ $1000\mathring{A}$ のポリイミドの両面にアルミニウムを合計 $1200\mathring{A}$ 蒸着させたもので、これは可視光に対して 5×10^{-5} 以下の透過率、酸素の KX 線に対して 70%程度の透過率を持つ。

3.3 FI と BI

ここで、FI チップと BI チップの性質を簡単に比較したい。

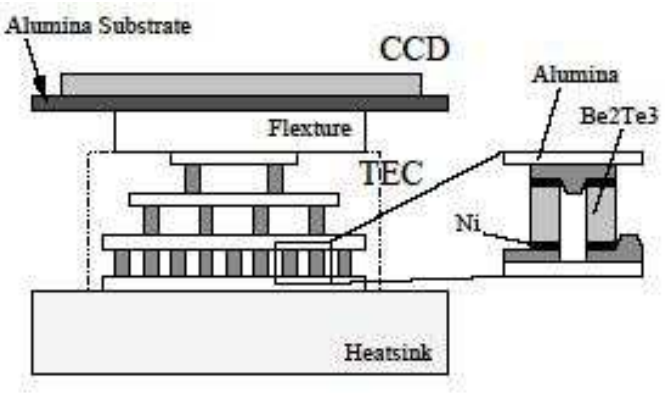

図 3.6: TEC 素子断面図

前面照射型 (Front-illuminated CCD, FI)

電極側から X 線を入射させる。X 線が電極の近くで吸収されるので、電荷が Si 結晶中を電極へ向かう際に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。しかしながら、低エネルギーの X 線の多くは前面の電極層や絶縁層が遮蔽物となり、空乏層まで到達できないため検出効率が悪くなる。また、普通電極の反対側には不感領域である中性層が残るので、この部分で吸収された X 線は非常に大きな拡散・再結合を受ける。このような X 線は大きく広がったイベントとして検出されるので、通常は解析の際に除外することになる。

裏面照射型 (Back-illuminated CCD, BI)

電極の反対側から X 線を吸収させる。低エネルギーの X 線の吸収効率は FI よりも優れるが、吸収点が電極から遠い分、拡散や再結合の影響でエネルギー分解能が悪化する。Chandra/ACIS の一部や XMM-Newton/EPIC pn がこの方式を採用しているが、低エネルギーの X 線に対するエネルギー分解能は FI(XMM-Newton/EPIC MOS など) に比べて約 2 倍悪い。

XIS BI は上記のような拡散・再結合の効果を軽減するように製造されており、低エネルギーの X 線に対しても FI とほとんど変わらないエネルギー分解能を達成した。図 3.7 に BI チップの断面構造を示す。

3.3.1 検出効率の比較

図 3.8 に FI 及び BI の理論上のエネルギーと量子効率の関係を示す。0.5keV 付近で BI の検出効率が FI の約 3 倍もあることがわかる。また、FI は電極部の SiO_2 層のため Si (1.84keV) と O (0.54keV) の吸収端が顕著に現れているのに対し、BI は極めて薄い酸化膜 (約 3nm; 図 3.7 参照) があるに過ぎないので、吸収端はほとんど目立たない。一方、高エネルギーの X 線に対しては、FI の空乏層が約 70μm なのに対して BI は約 45μm と薄いので、検出効率はやや劣る。6.7keV での BI の検出効率は、おおよそ FI の 75%である。

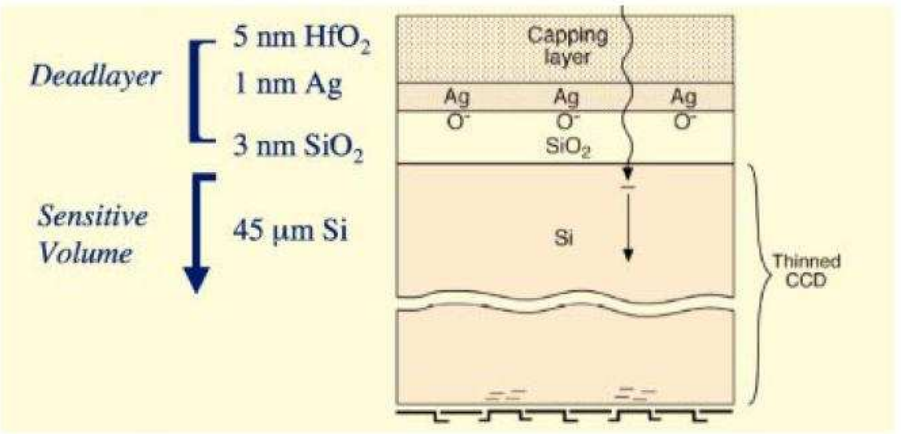

図 3.7: BI チップの断面図

3.4 周辺回路

3.4.1 AE/TCE

Analog Electronics / Thermal Controller Ellectronics (AE/TCE) は、CCD を動作させアナログ信号を取得するためのアナログ電気回路系と、TEC の温度制御回路系の総称である。AE/TCE はそれぞれのセンサーにひとつずつ用意されているが、FI0 用の AE/TCE と BI0 用の AE/TCE は一つの回路箱に収められており、電源入力も共通である。これを AE/TCE01 と呼ぶ。また同様に、FI2 用、FI3 用も合わせて一つの箱に収められ、AE/TCE23 と称する。

各 AE/TCE の回路系は Controller Card、Driver Card、Video Card、TCE Card の 4 枚の回路基盤から構成されている。これらは共通の Backplane に接続されており、相互に信号のやり取りはあるものの、それぞれが独立した機能を持っている。図 3.9 にその概念図を示し、以下でそれぞれの回路基盤の役割について説明する。

Controller Card

AE/TCE の制御を司るカード。DE からのコマンドを受け付け、それが他のカードへの命令であった場合は Backplane を通して他のカードを制御する。DE から読みだしコマンドが来た場合は指定されたカードから CR (Control Register) あるいは HK (House Keeping) のデータを取得し、DE に送信する。CR データ、HK データとはそれぞれ、動作モードやパタメタの設定情報と、電圧や温度、真空度などの情報を指す。これらは Controller Card で AD 変換される。他には、CCD のクロックパターン信号を発生し、Driver 回路や Video 回路を制御したり、TCE Card に TCE 回路で使用するクロックを送るのがこのカードの役割である。

Driver Card

CCD を動作させるためのドライブ信号を発生させるカード。XIS では、電荷を転送させるためのクロックとして撮像領域の縦転送、蓄積領域での縦転送 Serial Register での横

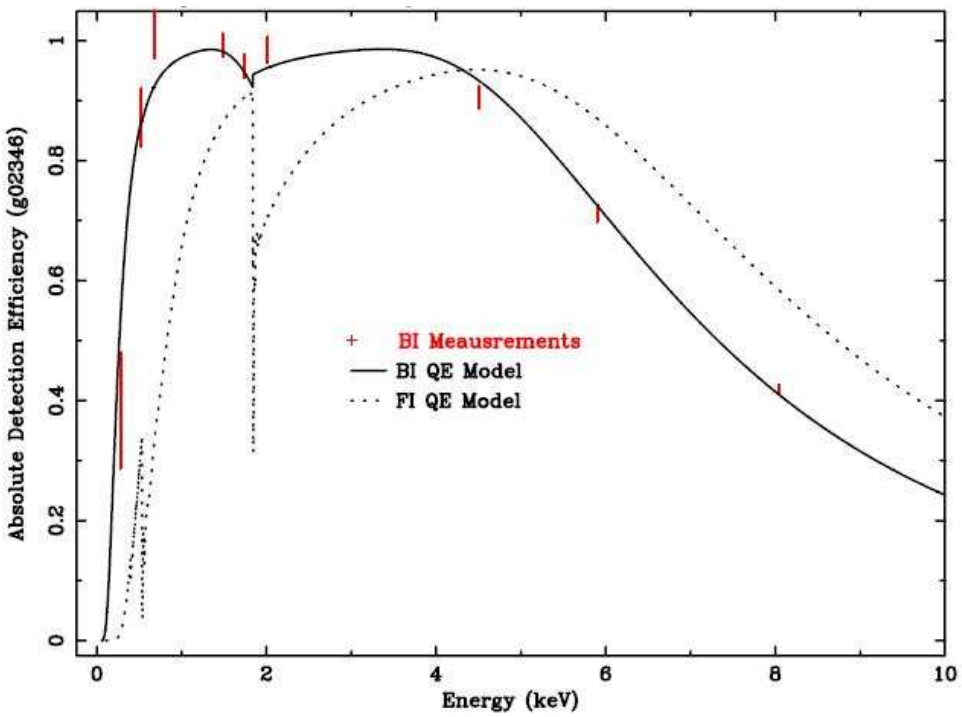

図 3.8: 量子効率の比較

実線が BI、破線が FI である。エラーバーは MIT での実験において測定された、BI Flight model と同じタイプのチップの検出効率を表す。

転送の 3 種類があり、さらに読みだしのリセットを行うための Reset Gate Clock がある。これらは電圧が High Level と Low Level の間で切り替わる 2 値クロックであり、それぞれの High, Low の電圧は Driver Card 上の DAC に設定された値によって決定される。クロック信号の他には動作中一定電圧を印加するもの (Input Gate のオフセットやドレイン電圧など) もあり、それらの出力電圧の設定も DAC 行われる。

Video Card

CCD からのビデオ信号のアナログ処理を行い、各ピクセルの信号レベルの AD 変換までを行う。CCD の各ピクセルの電荷量は floating level と signal level の差として現れる。XIS の Video Card では、floating level の信号を一定時間積分し、signal level の信号を符号反転させて同じ時間だけ積分することで各ピクセルの電荷量を求めている (積分方式)。

Video Card の ADC 自体は 16bits の精度を持っているが、DE へ送られるピクセルデータは 12bits で、次のようにして Gain の切替えを行う。

- Gain High: 15bit–0bit のうち 13bit–2bit 目を取り出す
- Gain Low : 15bit–0bit のうち 15bit–4bit 目を取り出す

原理的には積分方式回路の積分時間を変えることで Gain を変化させることもできるが、通常は上記の方法で Gain の切替えを行う。

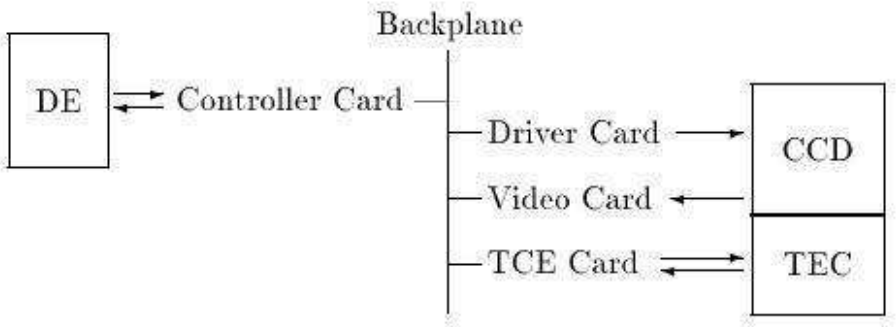

図 3.9: AE/TCE の概念図

TCE Card

TEC に流す電流を制御して CCD の温度制御を行う。温度制御モードには Cooling Mode と Annealing Mode があり、それぞれ CCD を低温にする場合、高温にする場合に用いられる。いずれのモードの場合でも、TCE Card は TEC の CCD 側の温度と heat sink の温度をモニタしており、それとコマンドで指定した CCD の到達目標温度を比較して、TEC 電流の適切な制御を行う。また、もうひとつの制御パラメータとして、Soft Current Limit (SLC) を設定する。(SLC については。3.2.2 節参照。)

3.4.2 DE

デジタル信号回路 (DE) は PPU (Pixel Processing Unit) と MPU (Main Processing Unit) の 2 種類のデータ処理装置から構成される。前者は AE で AD 変換されたフレームデータ (全てのピクセルの波高値のデータ) から光漏れ・ダーク補正を行った上でイベント検出を行い、後者はそのイベントデータをテレメトリフォーマットに編集し、XIS、XRS、HXD 共通の DP (データプロセッサ) へ送り出す。この他にも DE は、AE とやり取りするコマンドや HK 情報のインターフェイスを取ったり、AE のメモリ内容を保持する役割を担う。

3.5 観測モード

3.5.1 クロックモード

CCD の駆動方式には大きく分けて 3 通りある。Normal モード、Parallel-sum (P-sum) モード、Burst モードである。また、Normal モードと Burst モードでは Window オプションを持つ。これらの駆動方式は μ-code と呼ばれるクロックパターンによって決定される。なお、CCD の駆動方式はセンサー毎に変えることはできるが、セグメント毎に変えることはできない。以下でそれぞれのモードと Window オプションについて説明する。

Normal モード

CCD の全てのピクセルを順に読み出すモード。1frame の読みだしには 8sec かかる。

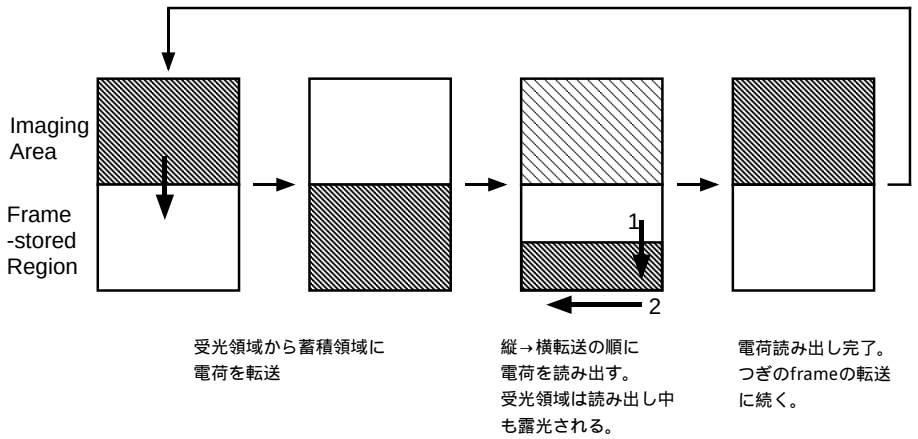

図 3.10: Normal モードの電荷転送パターン

P-sum モード

各ピクセルの電荷量を縦方向に適当な数だけ加算して読み出すモード。加算ライン数は 64、128、256 から選ぶことができる。空間情報を犠牲にする代りに読みだし時間を 7.8msec と大幅に短縮できる。

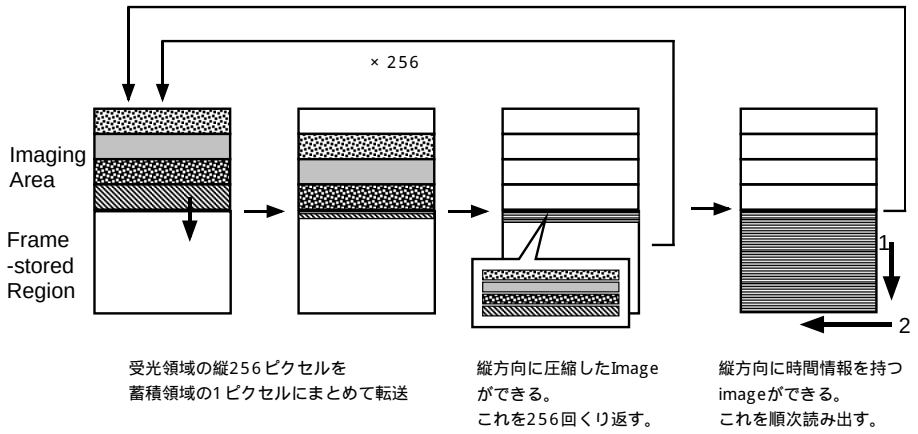

図 3.11: P-sum モードの電荷転送パターン

Burst モード

Normal モードと同じく全ピクセルの情報を読み出すが、露光時間 8 秒のうち前半の何秒かを捨てて実効的に露光時間を短くする。Normal モードだとパイルアップやテレメトリ飽和が起こるような明るい天体の観測に用いられる。露光時間は 0.1sec から 2sec の間の数種類から選ぶことができる。

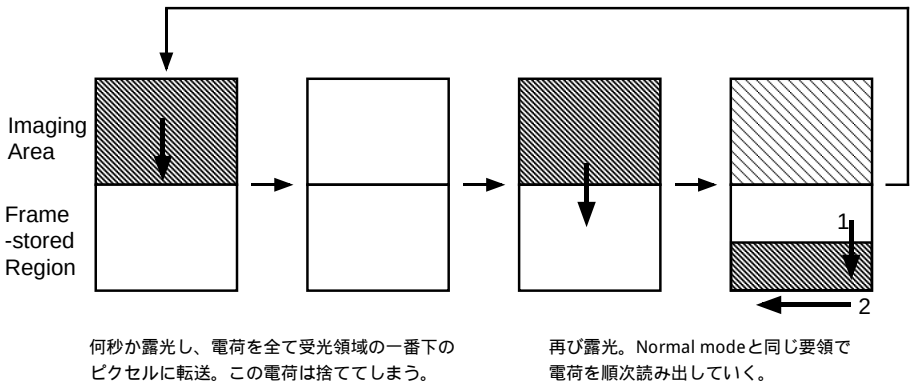

図 3.12: Burst モードの電荷転送パターン

Window オプション

CCD の特定の領域のみを繰り返し読み出すことにより、1frame 当りの露光時間を短くし、明るい天体でもパイルアップしないように観測をすることを目的として用いる。Window のサイズは縦転送方向のみ変えることができて、CCD 全体の 1/4、1/8、1/16 から選べる。Burst モードのように全観測時間の一部を捨てるようなことはしないので、視野全体のデータが必要でない場合はこちらの方がメリットが大きい。

3.5.2 エディットモード

DE はある決まったフォーマット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 イベント当りが持つ情報量にも制限をつけなくてはならない。XIS では以下のようなエディットモードを用意しており、天体の明るさに応じて使い分けることにしている。

5×5 モード

イベント中心ピクセルの位置と、周囲 5×5 ピクセルの波高値が送信される。イベントデータとしては最もデータ量が多いので、明るい天体を観測している場合はテレメトリの飽和に気をつけなければならない。

3×3 モード

イベント中心ピクセルの位置と、周囲 3×3 ピクセルの波高値と、その外側の 16 ピクセルのうち、スプリット閾値 (3.7 節参照) を越えたピクセルの座標と、越えなかった残りのピクセルの波高値の和が送信される。

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 ピクセルは以下の手順で選ばれる。

1. 中心ピクセル (PH-1) 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 (PH-2) を選ぶ。
2. PH-2 と対称なピクセルを除いた 2 ピクセルのうち波高値の高いピクセル (PH-3) を選ぶ。
3. PH-2 と PH-3 に隣接するピクセルを PH-4 とする。

Timing モード

P-sum モードで使われる。イベントの位置と、Grade 判定法 (3.7 節参照) に応じて周辺ピクセルの波高値を加えた値、判定された Grade、の 3 つの情報が出力される。

Dark Init/Update モード

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。

Frame モード

1frame 分の全ピクセルの波高値が送信される。膨大なデータ量になるので、通常の観測では用いられない。Window オプション使用中の場合は、選択した領域のみの波高値が出力される。

Dark Frame モード

PPU に記憶される全ピクセルのダークレベル値が出力される。

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 3.3 に示す。

3.6 CI 機能

XIS 2 号機では、新たに電荷注入 (Charge Injection; CI) 機能がついた。これは、CCD のピクセルに人為的に電荷を注入し、X 線によって生じた電荷と同じように転送し、読み出すというものである。

この機能の目的は大きく分けて以下の 2 つが挙げられる。

- 電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency; CTE) の正確な測定
- 「犠牲電荷」による CTE の回復

ASCA/SIS や Chandra/ACIS では、打ち上げ後の宇宙線被曝により CCD の結晶に格子欠陥が生じたため、CTE が悪くなる現象が見られた。CTE の劣化はエネルギー分解能の劣化を招く。ASCA ではキャルソースを持たなかったことに加えて、一般に CTE は

表 3.3: クロックモードとエディットモードの組合せ

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

○ :使用可、 × :使用不可、–:クロックモードとは無関係な処理、 Normal mode, Burst mode はすべて Window option 対応可能

column 毎に異なるため、その測定は困難を極めた。Astro-E2 では、この電荷注入機能を利用して、column 毎に CTE を測定し、補正を行う。

さらに格子欠陥そのものを埋める目的でも電荷注入機能が用いられる。図 3.13 のように、天体からの X 線によって発生した電荷を転送する前にあらかじめ十分な量の電荷を流し、前もってトラップを埋めてしまうことで、後から転送されてくる電荷を守るというものである。これを「犠牲電荷」と呼ぶ。

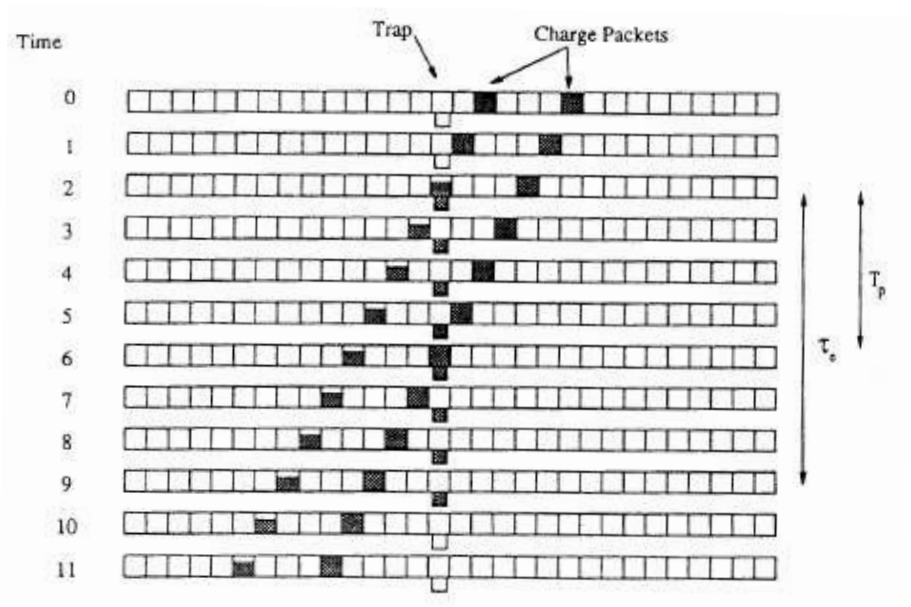

図 3.13: 犠牲電荷による CTE の回復

それでは具体的に、電荷注入機構についての説明を行う。XIS には、撮像領域の最上部に電荷注入のためのレジスタが設けられている (3.2 節参照)。図 3.14 は電荷注入の概略を示したもので、ID は input diode、IG は input gate、S1,S2,S3 はシリアルレジスタ、IA1,IA2 は撮像領域を表す。シリアルレジスタには撮像領域全体 1024 ピクセル分の長さ

があり、読みだし様のシリアルレジスタ (蓄積領域最下部のもの) と結線されていて、横転送は同期して行われる。すなわち、読みだし用シリアルレジスタが 1 回横転送すると、同時に電荷注入用シリアルレジスタも 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によって、レジスタ全体に渡って任意のパターンで電荷を与えることができる。例えば「電荷注入、横転送 1 回」を 1024 回繰り返せば、レジスタ中の全ピクセルに電荷を配置し、「電荷注入、横転送 4 回」を 256 回繰り返せば、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。最後に、レジスタの電荷を撮像領域最上部に縦転送し、電荷注入が完成する。

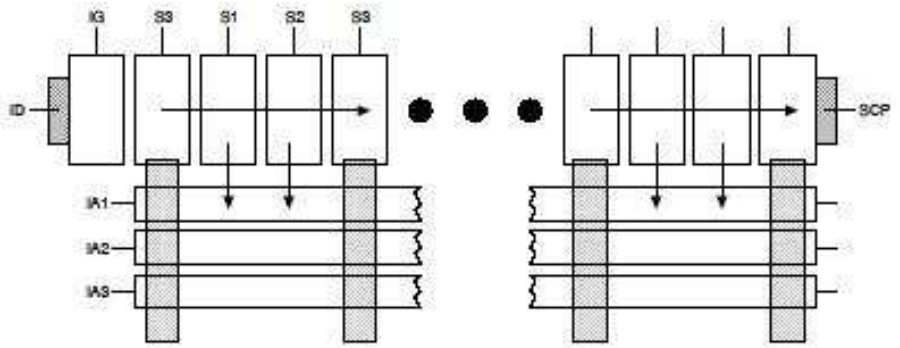

図 3.14: 電荷注入機構の概略図

電荷注入には、”fill and spill” という方法が用いられる。図 3.15 は input gate 近辺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り、ここの電位を低くすると、電子にとってのポテンシャルは高くなるので、大量の電荷が IG と S3 の領域に流れる (“fill”)。その後 ID のポテンシャルを低くすると、電荷が ID の方へと戻ってゆき、最終的に IG と S3 のポテンシャルの差の分だけ電荷が S3 に残る (“spill”)。あとは通常の横転送でシリアルレジスタに送られるという仕組みである。

IG と S3 のポテンシャル差は、DAC を通じて調整することができる。注入電荷量がどの程度安定しているかは明らかではないが、一定量の電荷を注入した際に得られるエネルギースペクトルのライン幅は、単色の X 線が作るラインの幅よりも細いことが経験的にわかっている。

3.7 データ解析法

3.7.1 補正

2.6 節で説明したように、CCD の各ピクセルからの信号を読み出した際に得られる値には暗電流などによるオフセットが乗る。X 線による電荷量を正しく見積もるため、これらを差引きする補正が必要である。

ダークレベル補正

ダークレベルとは、ピクセルに放射線が何も入射していないときのレベルであり、読みだしノイズ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

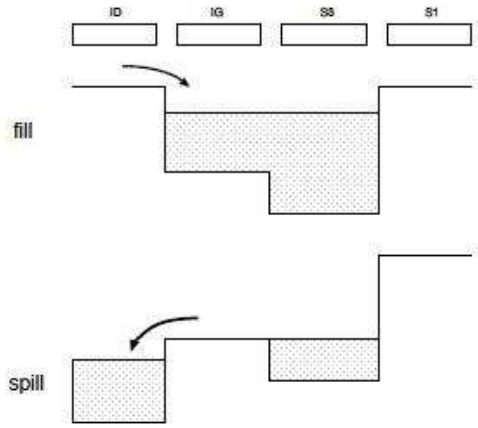

図 3.15: 電荷注入機構の概略図

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 ではピクセル毎にダークレベルを求めることで、このような問題を防ぐ。

ダークレベルは Dark Init、Dark Update モードのときに更新される。Normal/Burst モードでは指定した frame 数のデータ (デフォルトで 32frame)、P-sum モードでは指定したピクセル上のライン数 (デフォルトで 16 ライン) を用いて決定される。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、以下の通りである。

$$\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} > \mathrm{DarkUpper} \text{ の時、} \mathrm{D(n)} = \mathrm{D(n-1)} \tag{3.1}$$

$$\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} < \mathrm{DarkLower} \text{ の時、} \mathrm{D(n)} = \mathrm{PH(n)} \tag{3.2}$$

$$\mathrm{DarkLower} < \mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} < \mathrm{DarkUpper} \text{ の時、}$$
$$\mathrm{D(n)} = \mathrm{D(n-1)} + \frac{(\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)})}{\mathrm{h}} \tag{3.3}$$

ここで DarkUpper/Lower はダークレベル閾値の上限・下限であり (通常 $\pm$20、h はヒストリーパラメタ (通常は 16) である。

ダークレベルを更新する際、同時に Hot Pixel も選び出され、その位置の情報も更新される。

ASCA などの経験から、SAA 通過後に大きくダークレベルが変化することがわかっている。従ってこのときには必ずダークレベルの更新をする必要が生じる。

光洩れ量補正

光洩れは可視光の入射による波高値の変動であり、衛星が日陰から日照、あるいはその逆に移ったときに特に大きく変動する。Normal/Burst モードでは光洩れ量を frame 毎に更新される。P-sum モードではダークレベルの更新が常に行われるので光洩れ量の補正を行う必要がない。

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、

$$\mathrm{LightLow} < \mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n)} - \mathrm{L(n-1)} < \mathrm{LightUpper} \tag{3.4}$$

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、

$$\mathrm{L(n)} = \mathrm{L(n-1)} + < \mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n)} - \mathrm{L(n-1)} > \tag{3.5}$$

と計算される。ここで LightLow/Upper 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。

3.7.2 イベント抽出

イベント抽出と入射 X 線エネルギーの決定は通常 Grade 法という、電荷雲の広がりパターンの判別によって行う。ASCA/SIS、Chandra/ACIS、XMM-Newton/EPIC はいずれもこの方法で解析がなされている (Grade の定義は若干異なる)。本論文ではこの他に Fitting 法という解析法も取り上げるが (5 章参照)、ここでは Grade 法に限って説明する。

ASCA Grade 方式

Normal モードでは、まず、イベント閾値 (デフォルトは FI で 50、BI で 20 の予定) を定め、波高値がそれを越えたピクセルで、なおかつ周囲 3×3 ピクセルよりも波高値が高いものをイベントとして認識する。

次に、周囲 3×3 ピクセルのうちでスプリット閾値と呼ばれる値 (FI で 20; [6] 参照、BI は未定) を越えたピクセルの分布パターンから、図 3.16 のように Grade が定義される。ここで、2×2 ピクセルよりも広がったイベントは全て Grade7 と定義する。ダークレベルの揺らぎによって波高値が高くなったものを電荷の洩れ出しと誤認しないために、スプリット閾値は 2.6 節で述べた読みだしノイズの揺らぎの大きさよりも十分大きく取る必要がある。

Grade0–7 のうちで X 線によるイベントと見なせるのは、Grade0, 2, 3, 4, 6 である。X 線が入射した点を中心に電荷雲が円形に広がると仮定したとき、Grade1 や 5 のようなパターンになることは考えにくい。このような広がり方は、中心ピクセルに入射した単一 X 線のによる電荷の洩れ出しではなく、複数の X 線によるパイルアップと考えるのが妥当である。また、X 線イベントのほとんどは 2×2 ピクセル程度にしか広がらない。これに対して Grade7 のように 3×3 ピクセル以上に広がるイベントは、ほとんどが宇宙線などの荷電粒子によるものである。従って、Grade7 のイベントはバックグラウンドと見なして除外する。但し、5 章で議論するように、電荷の拡散の大きい BI チップについては、明らかな X 線イベントであるにも関わらず、Grade7 に分類されてしまうものが多く存在する。CCD 固有の量子効率を無駄にしないためにも、このようなイベントを正しく救い出さなければならない。

XIS Grade 方式

上述の ASCA Grade 方式は、その名の通り ASCA/SIS で採用されていた Grade 判定法である。ASCA 衛星ではテレメトリ容量の都合上、各イベントに対して中心ピクセルの周囲 3×3 ピクセルのデータしか保存されなかった。これに対して AstroE-2/XIS では、中

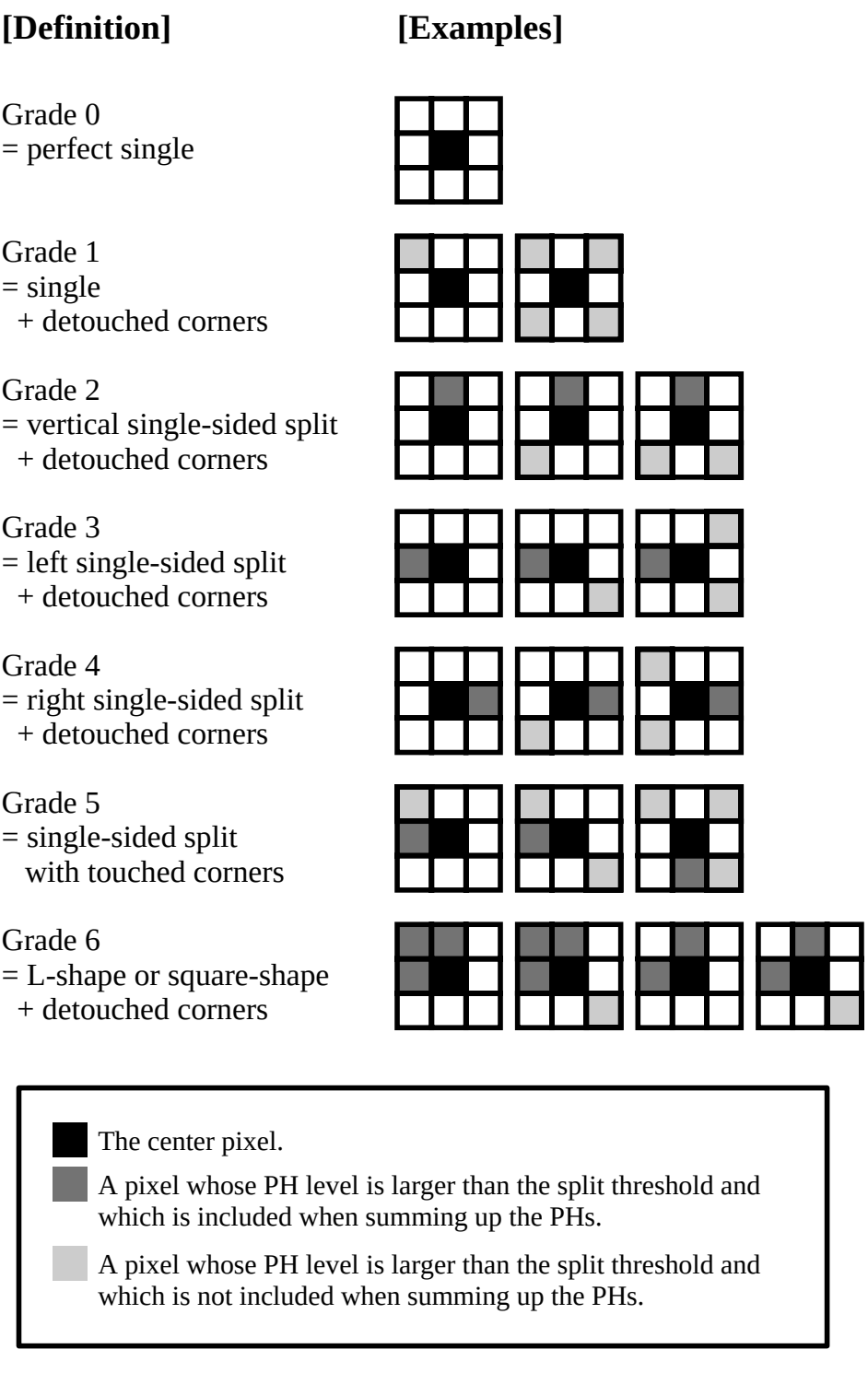

図 3.16: ASCA Grade 方式 (Normal モード)

心ピクセルの周囲 5×5 ピクセルのデータが保存できる。明るい天体を観測する際に用いられる 3×3 モードや 2×2 モードでも、その外側のピクセルがスプリット閾値を越えたかどうかの情報が含まれる (3.5 節参照)。この性能を利用して真の X 線イベントとバックグラウンドやパイルアップとをより厳密に区別できるようにしたものが XIS Grade 方式である [3]。

ASCA Grade 方式からの具体的な追加・変更点は、(1) Grade6 の波高値の計算法と、(2) Grade6 の細分化、(3) 3×3 ピクセルの外側のチェックの 3 点である。以下で変更点について説明する。

1. まず、Grade6 には"L-shape" と"square-shape" の 2 パターンが含まれるが、前者を Grade6、後者を Grade8 と再定義する。

2. Grade6 はスプリット閾値を越えた 2 ピクセルに挟まれた角の (スプリット閾値を越えていない) ピクセルの波高値も加算する。

3. Grade8 のうち、中心ピクセルに隣接する 2 ピクセルよりも、それらに挟まれる角のピクセルの方が波高値が高いものを Grade11 とし、パイルアップによるイベントと見なす。

4. 3×3 ピクセルのうち、スプリット閾値を越えたピクセルの外側で隣接する (5×5 領域内の) 各ピクセルがスプリット閾値を越えているかどうかをチェックする。 1 つでも越えていた場合、Grade10 とし、バックグラウンドイベントと見なす。

5. 逆に、Grade7 のうちで外側のピクセルが 1 つもスプリット閾値を越えていない、すなわちイベント中心まわり 3×3 ピクセル以内に収まっているものを Grade9 とする。Grade9 は X 線イベントと見なす場合もある [3]。

以上のように、Grade0–11 の 12 通りにパターン分けする方式を、"XIS Grade 12" 方式と呼び、Grade8 を Grade6 に、Grade9, 10, 11 を Grade7 に押し込めたものを、"XIS Grade 8" 方式と呼ぶ。XIS Grade 8 方式でも、X 線イベントと見なすのは、ASCA Grade 方式同様、Grade0, 2, 3, 4, 6 である。以後の Grade 法についての議論では、全てこの XIS Grade 8 方式を用いるものとする。

P-sum モードでは、図 3.17 のようにイベント中心と隣り合うピクセルの波高値のパターンから Grade 判定を行う。

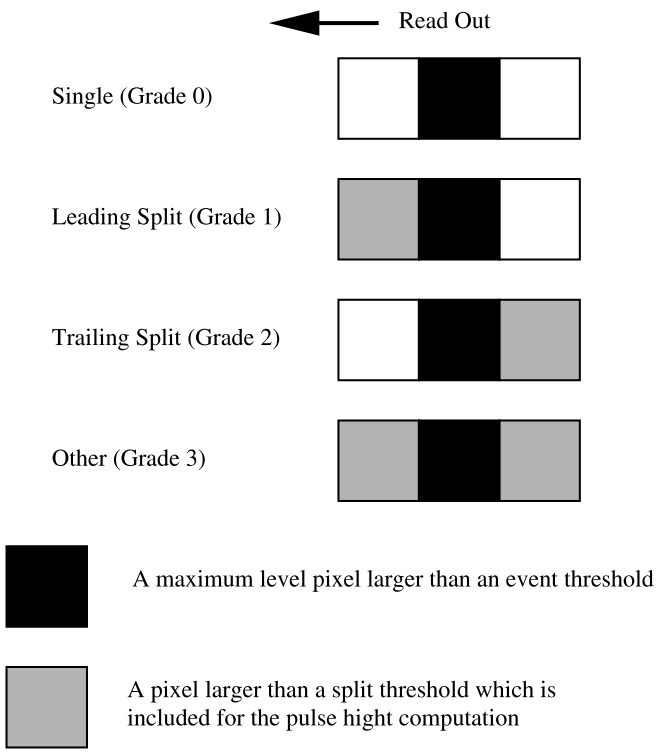

図 3.17: Grade 方式 (P-sum モード)

第4章　性能評価

本章では、京都大学宇宙線研究室内の実験室にて行ったXIS BIチップの性能評価試験と、そのデータ解析の結果について報告する。実験は2004年6月中、2台のBIチップ(BI0, BI1)に対して行われたが、本章以降では、Astro-E2衛星に搭載されることが決定しているBI1(w1.8c2)についてのみ議論を行う。

4.1　試験方法

4.1.1　評価システム

XISの機能・較正試験は主に京都大学と大阪大学で行われた。京都大学では高エネルギー側(>2keV)、大阪大学では低エネルギー側(<2keV)を中心に、X線データを取得した。以下でこれらのシステムについての説明を行う。

京都大学システム

京都大学のシステムは、二次X線を発生させて単色X線をXISに照射する方式である。図4.1右側の真空チェンバ(名称:レインボーチェンバ)の上部にKevex社製X線発生装置が取り付けられており、そこから出た一次X線はレインボーチェンバ内に入射する。レインボーチェンバ内には、表4.1に示したように、Al, Cl, Ti, Fe, Zn, Se, ポリエチレンのターゲットがθ-stage上に設置されている。stageはチェンバを閉じたままで自由に回転させることが可能になっており、一次X線が照射するターゲットを自由に選択できる。ターゲットがポリエチレンの場合、散乱された連続X線が、それ以外のターゲットからは単色の蛍光X線が二次X線として、左手のチェンバ(名称:デカチェンバ)に入射する。デカチェンバ内には図4.1上のようにXISがビームラインに対して垂直に動くx-stage上に設置されており、レインボーチェンバからの二次X線、もしくはデカチェンバ内に取り付けられた^{55}Fe線源からのX線が照射できるようになっている。また、XISを^{55}Fe線源側に移動させると、後方(図4.1左側)のCanberra社製窓無しSSDにレインボーチェンバからの二次X線が入射するようになっており、X線強度及びスペクトルの較正ができる。さらにレインボーチェンバ横、ビームラインと垂直な方向(図4.1右下)にはリアルタイムモニタ用のSSD(名称:太郎さん)が取り付けてある。

大阪大学システム

大阪大学のシステムは図4.2のように回折格子(Grating)を用いてX線分光を行い、連続的なX線を照射する方式である([1][2]参照)。

Manson社製X線発生装置により得られた一次X線をSES (Si-K Edge Spectrometer)に入射される。SES中で集光され、回折格子に入射する。回折X線はエネルギーの違い

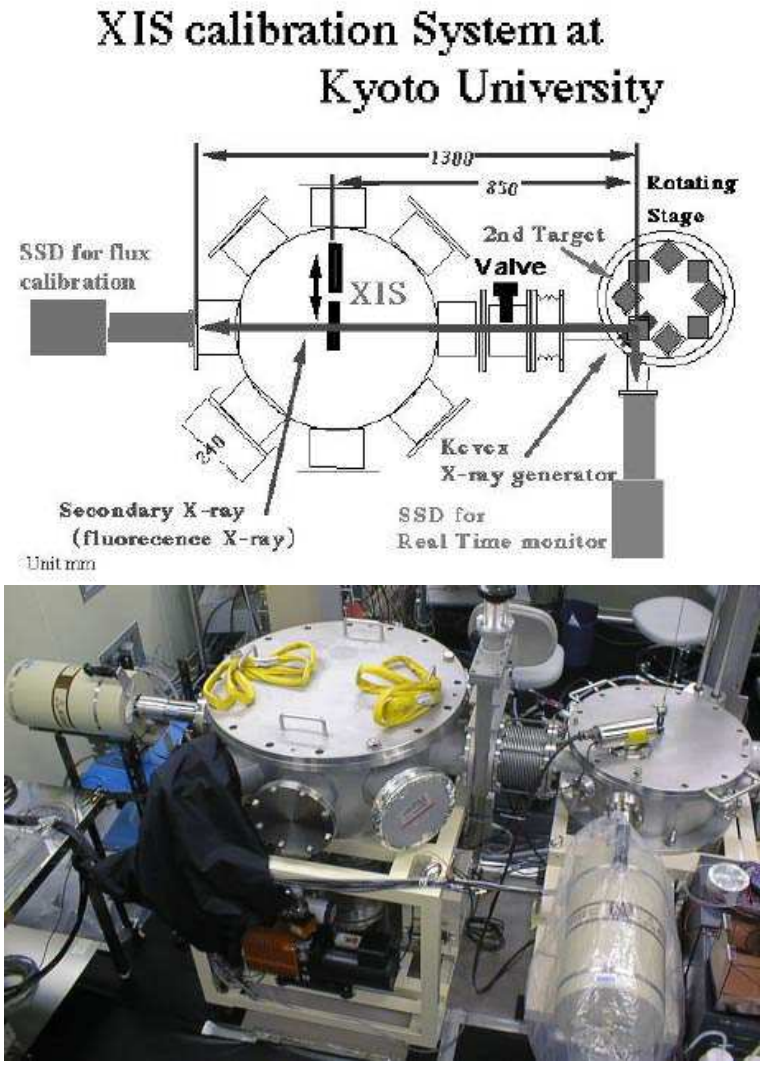

図 4.1: 京都大学較正システム

により一次的に分散するので、Focal Plane 上に置いた XIS には座標毎に対応したエネルギーの X 線が入射する。つまり、細かくピクセルを区切ってデータを集積すれば、ほぼ単色 X 線に対するデータが連続的に得られる。

4.1.2　実験条件

これ以降は全て、京都大学のシステムで行われた試験について述べる。

XIS をインストールしたデカチェンバ、及びレインボーチェンバの気圧は $\sim 10^{-6}$Torr とし、CCD、コールドプレートの温度は、それぞれ機上での動作温度と同じ-90°C、-60°C に設定した。

X 線を照射する際に注意すべきことは、カウントレートを上げすぎてパイルアップが起こらない程度に、X 線発生装置の強度を抑えることである。表 4.1 に各ダーゲットの特性 X 線のエネルギーとともに、それらのデータを取得する際に X 線発生装置にかけた電圧、電流値、データの取得 frame 数 (1frame は 8sec) などを示す。ここで P 値とは、1frame

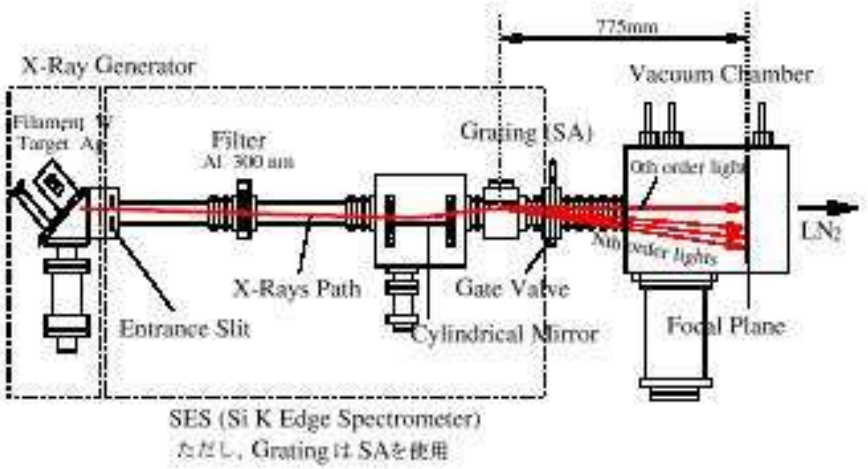

図 4.2: 大阪大学較正システム

毎の全ピクセルに対する X 線イベント数の割合を示す量である。P=0.5%であれば、

$$\frac{0.005 \times 1024 \times 256}{8} \sim 164 \text{ counts/sec/segment} \tag{4.1}$$

となる。

また、バックグラウンドの評価用に Dark (X 線の当っていないデータ) も取得したので、合わせて表 4.1 に示す。

表 4.1: 各ターゲットのエネルギー及び実験条件

ターゲット	Energy		θ-stage	電圧	電流 (P)	取得 frame 数
	Kα(keV)	Kβ(keV)	deg	kV	mA(%)	frame
Al	1.49	1.56	-5	5	0.073 (0.5)	200
Cl	2.62	2.82	40	5	0.113 (0.5)	200
Ti	4.50	4.93	85	15	0.047 (0.2)	400
^{55}Fe	5.89	6.49	—	—	—	400
Fe	6.40	7.06	130	15	0.058 (0.2)	400
Zn	8.63	9.57	220	20	0.058 (0.2)	400
Se	11.22	12.50	265	20	0.066 (0.2)	400
ポリエチレン	—	—	175	15	0.020 (0.004)	800
Dark	—	—	—	—	—	100

4.2　読み出しノイズ

読み出しノイズとは電子回路起源のノイズのことで、X 線が入射していなくても有限の波高値を示す。この値を知るためには、CCD の実際のピクセル数よりも多く読み出しを行えばよい (この空読みだしの領域を HOC(Horizontal Over Clock) 領域と呼ぶ)。3.7 節で述べたように、X 線による電荷量を求める際にはこの読み出しノイズの値を差し引きしなくてはならない。

しかしながら、単純に差し引きすれば解決できるわけではない。読み出しノイズには固有のゆらぎがあるからである。従って、読み出しノイズの root mean square が CCD にとって重要な値になってくる。

この揺らぎが大きすぎると、ノイズによる成分を X 線による電荷の一部と見誤る恐れがある。特に Grade 法を用いて解析をする場合、スプリット閾値は読み出しノイズの root mean square よりも十分に大きな値にしなくてはならない。

図 4.3 に ^{55}Fe のデータ取得中の HOC 領域の揺らぎ (1σ) を示す。どの segment でも CCD 立ち上げ直後の数 frame を除いては、およそ 1.5–1.7 electron の範囲内に収まっていることがわかった。スペクトルなどを作成する際には、ノイズの安定しない最初の数 10frame は使わないことにしている。

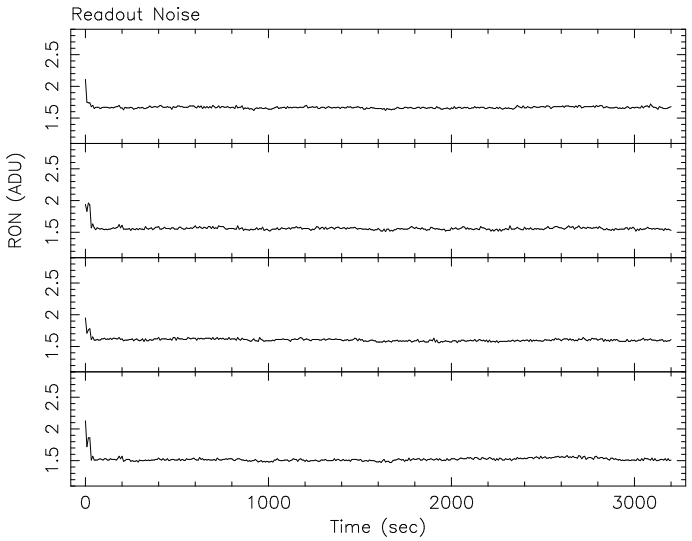

図 4.3: 読み出しノイズ
上から順に segment A, B, C, D のもの

4.3　Bad Pixel · Bad Column

バッドコラムとは電荷の転送不良などで上下に多量の電荷が洩れ出したり、コラム上のどこかにある格子欠陥などにより X 線が入射しなくても常に電荷を出すピクセル (バッドピクセル) があるためにそのピクセルよりも読みだし口から遠い側の全ピクセルが高い波高値を示すことにより、テール状のイベントができてしまうコラムのことを指す。当然ながらこのようなコラムは観測には用いることができない。そのため、あらかじめどの場所にバッドコラムがあるかを知っておく必要がある。

バッドコラムは上述の通りテールを引いたようなイベントになるために Grade 判定した際に Grade7 に分類されるので、常に X 線イベントが検出されない。従って、イベント検出をかけたデータをなるべくたくさん積分したイメージを見て、イベント数が 0 かそれに近い数しかないコラムを探せばよい。図 4.4 は本実験で取得した全ての X 線データ (Grade 法によるイベント検出をしたもの) を足し合わせたイメージである。濃淡はイベント数を示す (色が薄いほどイベントが多い)。図の中央から左寄りに 2 本の筋が見えるが、このコラム状のピクセルはすべて 1 イベントも受かっていない。すなわち、これらがバッドコラムである。表 4.2 に BI1 チップ上に存在する全てのバッドコラムをリストアップした。

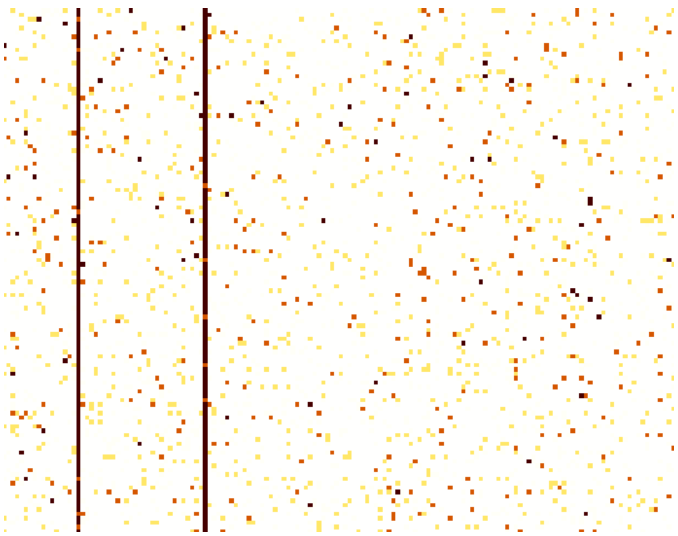

図 4.4: バッドコラム

但し、打ち上げ後の放射線損傷などにより格子欠陥が増えると、バッドコラムもこれよりも増える可能性が十分にありうる。従って機上での較正試験中にも頻繁にバッドコラムの調査を行い、最新の情報を提供していかなければならない。

表 4.2: バッドコラムの位置

segment	X	Y
A	28	0–1024
	57	165–1024
	70	997-1024
	83	768–772
	178	403–1024
B	268	209–1024
	297	71–1024
C	543	165–1024
	566	609–1024
	655	352–1024
	663	0–1024
D	892	0–1024
	897	0–1024
	972	529–1024

4.4　Grade法によるデータ解析

この節では、これまでの CCD でも一般的に用いられてきた Grade 方式を用いて解析を行い、性能を評価する。ダーク閾値は ± 20 とし、スプリット閾値については、実際に CCD を製作したマサチューセッツ工科大の XIS チームが BI チップの評価版を用いた実験によって最適値と定めた値である、「7」とした。X 線と見なすのは Grade0, 2, 3, 4, 6 である。

4.4.1　ゲイン · エネルギー分解能

表 4.1 に示した二次 X 線全てのスペクトルを図 4.5 に示す。また、図 4.6 にはそれぞれのメインピークを拡大したものを示す。なお、これらのスペクトルは全て segment A で検出された X 線のみを抽出している。これ以降で評価するゲインやエネルギー分解能も全て segment A のものである。

まず、図 4.6 のように、各メインピーク (Kα と Kβ) を single Gaussian でフィッティングする[1] 。Al もデータに関しては Kα と Kβ が分離しきれないので、Kβ の幅は Kα と同じ値になるようにリンクしてフィッティングした。また、Al と Cl のスペクトルではメインピークの低エネルギー側に比較的カウント数の高いコンスタント成分が見える。この成分についての議論は 6 章で行うとして、ここでは単純な constant モデルでフィッティングした (この成分がメインピークのフィッティングに及ぼす影響を最小限に抑えるため)。

ゲインは各 Gaussian の中心と X 線エネルギーの関係から求められる。表 4.3 にフィッティングにより求まった Gaussian の中心値を、また図 4.7 には、それらを直線フィッティ

[1] 本来 Grade 法の応答関数を考慮した場合、今西修論 [4] のように 1 つのメインピークを double Gaussian でフィッティングするべきだが、本論文では後で採用する Fitting 法との比較をしやすくするため全て single Gaussian でのフィッティングを行う。エネルギー分解能を FI チップ [6] と比較する際は単純ではないので注意。

ングした結果を示す。これにより、エネルギーと波高値 (PH) の関係は次式のように求まった。

$$\mathrm{PH\ [channel]} = 255.6 \times \mathrm{Energy\ [keV]} - 4.369 \tag{4.2}$$

表 4.3: Gaussian fit の中心値

特性 X 線		Energy (keV)	Gaussian 中心値 (ch)
Al	Kα	1.49	375.71 ($\pm$0.05)
Cl	Kα	2.62	666.84 ($\pm$0.05)
	Kβ	2.82	714.45 ($\pm$0.60)
Ti	Kα	4.51	1148.28 ($\pm$0.04)
	Kβ	4.93	1254.98 ($\pm$0.23)
^{55}Fe	Kα	5.90	1503.18 ($\pm$0.03)
Fe	Kα	6.40	1633.96 ($\pm$0.07)
^{55}Fe	Kβ	6.49	1653.97 ($\pm$0.26)
Fe	Kβ	7.06	1800.53 ($\pm$0.26)
Zn	Kα	8.64	2201.75 ($\pm$0.17)
	Kβ	9.57	2441.33 ($\pm$0.40)
Se	Kα	11.2	2861.32 ($\pm$0.19)
	Kβ	12.5	3189.73 ($\pm$0.71)

次に、エネルギー分解能を求める。これは Gaussian の幅から求められる。表 4.4 に各エネルギーに対するエネルギー分解能を半値幅 (FWHM) で示した。

中嶋修論 [6] によると、FI センサーのエネルギー分解能は 5.90keV で 130.3$\pm$0.31eV である。但し、これはサブピークを考慮した double Gaussian でフィッティングした場合のメインピークの半値幅であり、single Gaussian でフィットした場合はこれよりも数 eV 大きな値になることがわかっている。従って、XIS BI のエネルギー分解能は XIS FI のそれと大きくはかわらない値であることが言える。

4.4.2 検出効率

検出効率の測定は、XIS のデータのみで行うことはできない。この実験では、XIS の後側に窓無し SSD を取り付けてあり、XIS でデータを取得する直前か直後に同じ X 線強度で SSD でもデータを取得した。この SSD のデータを用い、以下のような原理で検出効率を測定する。

ターゲットからの二次 X 線の強度を I [photon/s]、ターゲットから XIS までの距離とターゲットから SSD までの距離をそれぞれ R_{XIS} [cm]、R_{SSD} [cm] とおくと、XIS と SSD に入射する X 線の flux はそれぞれ $I/(4\pi R_{\mathrm{XIS}}^2)$ [photon/cm^2/s]、$I/(4\pi R_{\mathrm{SSD}}^2)$ [photon/cm^2/s] となる。ここで XIS 1 セグメントの面積を S_{XIS} [cm^2] とすると、XIS の量子効率 Q_{XIS} と 1 セグメント当りのカウントレート C_{XIS} [counts/s] の間には次の関係が成り立つ。

$$C_{\mathrm{XIS}} = \frac{I}{4\pi R_{\mathrm{XIS}}^2} \times S_{\mathrm{XIS}} Q_{\mathrm{XIS}} \tag{4.3}$$

表 4.4: エネルギー分解能

特性 X 線		Energy (keV)	エネルギー分解能 (FWHM ;eV)
Al	Kα	1.49	76.40 ($\pm$0.37)
Cl	Kα	2.62	96.26 ($\pm$0.28)
	Kβ	2.82	94.79 ($\pm$1.56)
Ti	Kα	4.51	121.45 ($\pm$0.46)
	Kβ	4.93	132.57 ($\pm$1.20)
^{55}Fe	Kα	5.90	133.22 ($\pm$0.37)
Fe	Kα	6.40	141.77 ($\pm$0.64)
^{55}Fe	Kβ	6.49	146.09 ($\pm$1.10)
Fe	Kβ	7.06	152.98 ($\pm$1.47)
Zn	Kα	8.64	166.22 ($\pm$1.01)
	Kβ	9.57	173.30 ($\pm$2.30)
Se	Kα	11.2	189.85 ($\pm$1.29)
	Kβ	12.5	207.41 ($\pm$3.77)

同様に SSD の面積を $S_{\rm SSD}$ [cm^2] とすると、SSD の量子効率 $Q_{\rm SSD}$ とカウントレート $C_{\rm SSD}$ [counts/s] の関係は、

$$C_{\rm SSD} = \frac{I}{4\pi R_{\rm SSD}^2} \times S_{\rm SSD} Q_{\rm SSD} \tag{4.4}$$

となる。
ところで、窓無し SSD は Be などの入射窓がついた SSD とは異なり、1–50keV の X 線に対しては検出効率がほぼ 100%と見なすことができる。従って、$Q_{\rm SSD} \approx 1$ とできて、式 4.3、4.4 より

$$Q_{\rm XIS} = \frac{C_{\rm XIS}}{C_{\rm SSD}} \times \frac{R_{\rm XIS}^2 S_{\rm SSD}}{R_{\rm SSD}^2 S_{\rm XIS}} \tag{4.5}$$

となる。
このうち $R_{\rm XIS}$、$R_{\rm SSD}$、$S_{\rm XIS}$ は既知量であり、$C_{\rm XIS}$、$C_{\rm SSD}$ は測定で求まる量だが、$S_{\rm SSD}$ については既成品である窓無し SSD の内部構造に関する情報がないため、知ることができない。従ってこれだけでは $Q_{\rm XIS}$ は求められないのである。

中嶋修論 [6] では以下のような方法で、FI チップのエネルギー毎の絶対検出効率を決定している。検出効率は CCD の空乏層や絶縁層、電極層の厚みにより決定されるが、[2]一般に、空乏層が厚いほど特に高エネルギー側で検出効率が高くなり、電極層、絶縁層が厚いほど特に低エネルギー側で検出効率が低くなる。FI チップの各層の厚みをパラメータとして X 線帯域全体の量子効率曲線 (図 3.8 のような曲線) を求めた。その結果、各層の厚みが公称値から 10%程度の誤差があったとしても、その範囲内では 4–5keV(Ti の特性 X 線のエネルギー) の検出効率がほぼ一定であることが示されたので、この値をこのエネルギー点での絶対検出効率と仮定した。$S_{\rm SSD}$ が一定値なので、あとは測定量 $C_{\rm XIS}$、$C_{\rm SSD}$ から各エネルギー点での検出効率を決定することができる。具体的には、$Q_{\rm XIS}$ とそれぞれのカウントレートの間に、

$$Q_{\rm XIS} = \frac{C_{\rm XIS}}{C_{\rm SSD}} \times 0.137 \tag{4.6}$$

[2]もちろん BI チップについては電極層は X 線照射面と反対側にあるのでこの厚みには依存しない。

なる関係が与えられた。

今回の BI の実験においても実験システムの構成は FI の時と全く変わっていないので、式 4.5 において $R_{\rm XIS}$、$R_{\rm SSD}$ と $S_{\rm SSD}$ の値は FI 実験のものと同一であり、またチップの面積も FI と BI で等しいので、$S_{\rm XIS}$ も同一である。従って BI の検出効率測定に対しても関係式 4.6 をそのまま適用することができるのである。

以上のことを踏まえて表 4.5 に XIS と窓無し SSD のカウント数、及び検出効率を示す。ここで、それぞれのカウント数はフィッティングした Gaussian の面積を用いた (この時点ではエスケープや Si ラインおよび低エネルギー側のコンスタント成分は考慮に入れていない)。但し、Al と Cl については SSD で Kα と Kβ のメインピークが分離しきれなかったので、これらを合わせた値を示す。また、図 4.8 に示したように、Al と Cl の SSD のスペクトルにはメインピークの低エネルギー側にテールのような成分が見られるため、この成分も X 線によるものと見なしてカウントした。比較のため、Se の SSD スペクトルも同じく図 4.8 に示す。テール成分が現れたのは Al と Cl のみであった。

表 4.5: 検出効率

特性	X 線	$C_{\rm XIS}$	$C_{\rm SSD}$	検出効率
Al	Kα+Kβ	165.44	20.082	1.129 ($\pm$0.011)
Cl	Kα+Kβ	145.11	29.558	0.673 ($\pm$0.006)
Ti	Kα	42.589	9.1033	0.641 ($\pm$0.007)
	Kβ	8.2425	1.7794	0.635 ($\pm$0.016)
Fe	Kα	26.041	8.3522	0.427 ($\pm$0.005)
	Kβ	6.6134	2.4844	0.365($\pm$0.008)
Zn	Kα	16.987	9.4667	0.246 ($\pm$0.003)
	Kβ	3.7627	2.7544	0.187 ($\pm$0.004)
Se	Kα	13.033	11.746	0.152 ($\pm$0.002)
	Kβ	2.1422	2.7489	0.107 ($\pm$0.003)

Al の検出効率が 1 を超えてしまった理由について

さて、表 4.5 の結果を見ると、Al の検出効率が 1 を超えてしまっている。これは言うまでもなく物理的にありえないことであり、実験段階でのミス、もしくは計算段階でのミスがどこかで起こっていることを意味する。以下、考えられる原因をひとまず列挙してみた。

1. X 線強度が XIS のデータ取得時と SSD のデータ取得時とで変わってしまっている。
2. 二次ターゲットから SSD までのビームラインの一部が何ものかに遮られたため、SSD のカウントレートが小さく出てしまった。
3. SSD の時間分解能より X 線が入射する間隔が短かったため SSD がイベントを処理しきれなかった。
4. X 線発生装置からの一次 X 線が洩れ込み、チェンバや XIS のボンネット内側と相互作用して Al のラインを出した。

5. SSD の検出効率が実は Al ラインのエネルギー (1.49keV) で 100%ではない。

可能性があるのは上記の 5 つである。以下で一つ一つ検証してみる。

1. について
本実験では、XIS のデータ取得時も窓無し SSD のデータ取得時もレインボーチェンバ横の SSD (太郎さん) でリアルタイムモニターしている (4.1 節参照)。もしも X 線強度が変化しているのであれば太郎さんのカウントレートにも、差が見られるはずである。そこで、Al のデータ取得時の太郎さんのスペクトルを見てみた。図 4.9 にそれを示す。どちらのスペクトルにも 500–700ch 付近にパイルアップが見られる。そこで、イベント閾値の 155ch から 350ch までのカウント数を積分した値と、500–700ch のカウント数を積分した値を表 4.6 に示す。そして、前者の値を 1count 分、後者の値を 2counts 分と計算して、カウントレートも示した。なお、XIS のデータは 1frame 当りの露光時間が 8sec で、計 200frame 取得したので、太郎さんのデータ取得時間は 1600sec となる。
この表の結果を見ると、2 つのデータのカウントレートの間に大きな差は見られない。よって、途中で X 線強度が変わっている可能性は否定された。

表 4.6: 太郎さんのカウント数

	カウント数		取得時間 [sec]	カウントレート [counts/sec]
	155–350 ch	500–700 ch		
XIS データ取得時	142669	4630	1600	94.96
窓無し SSD	44902	1362	500	95.25

2. について
4.1 節でも述べたように、XIS のビームラインからの移動は X-stage を動かせることで行うが、チェンバ内は真空状態にしてあるため、正常に移動が完了し、窓無し SSD までのビームラインを遮るものがないかの確認を直接行うことはできない。真空引きの前には毎回 stage の動作チェックは行っているが、今回の BI1 実験の前には時々正常に動作しないことがあった。そこで、2004 年 3 月に行われた FI3 の実験の際に取得されたデータと見比べることにした。この実験の前に行った動作チェックでは、stage に異常がなかったことが確認されている。また、この実験の時の X 線強度、取得時間は BI1 の実験時と同じなので、窓無し SSD のカウント数を比較するだけで、今回の実験で異常がなかったかどうかの確認が行える。調べた結果、FI3 実験時の窓無し SSD のカウント数は 8682counts、一方、今回の BI1 実験での窓無し SSD のカウント数は 10041counts なので、むしろ今回の方が窓無し SSD のカウント数が多いくらいで、何かがビームラインを遮っていたとは考えにくい。逆に、FI3 の実験時は窓無し SSD のカウント数が少なかったことから、この程度のシステマティックなエラーがあるということが言えるのかも知れない。

3. について
窓無し SSD にはパイルアップは見られなかった。また、表 4.5 を見ればわかるように、Al のデータよりも Cl のデータの方がカウントレートが高い。従って Al の時だけイベントの処理が追いつかないとも考えられない。従ってこの可能性も棄却できる。

4. について
もしも検出器起源の輝線成分が混入しているのであれば、他のスペクトル (Cl, Fe, Zn な

ど) にも Al の輝線が見られるはずである。しかしどのスペクトルにもそのような証拠はない。よってこの可能性も棄却される。

5. について
窓無し SSD は公称値ではほぼ 100%の検出効率を持つとのことだが、他の原因が考えにくいことや、中嶋修論 [6] の図 6.9 を見ると、ここでも Al のエネルギーでの検出効率だけがフィッティングの結果からかなり大きくずれていることから、おそらく窓無し SSD にもエネルギーによって有効面積などに差があるのではないかと考えられる。しかしながら、既製品である窓無し SSD の内部構造についての情報を得ることができないため、これ以上の詳しい議論はできない。

結局この問題を完全に解決することはできなかったが、上記 5. で述べたように、原因はおそらく窓無し SSD の性能にあるものと思われる。以後は検出効率は「目安の値」と考えることにして話を進めたい。また、Al のエネルギー以外は一応、SSD の検出効率が 100%、すなわち XIS の検出効率は正しい値を示していると仮定して話を進める。
なお、正確な検出効率の測定は、打ち上げ後に既に X 線強度がわかっている天体 (かに星雲やカシオペア A など) を観測して行うことになっている。

ここまでで、XIS BI1 の基本的な性能評価は全て行ってきた。読み出しノイズ、Bad Column は観測に支障をきたさない程度であり、またゲインやエネルギー分解能も FI センサーと同程度で十分に良い性能であると言える。しかしながら最後に求めた検出効率が図 3.8 に示した理論値から大きくかけ離れ、効率に優れるはずの低エネルギー側でも FI の 0.900 ($\pm$0.009) @2.62keV[6] に劣る値となっている。私は、この結果が BI チップの持つ「量子効率」が真に低いことによるのではなく、イベント検出法に依存した問題であると考えた。次章でその原因を究明し、解決法を講じる。

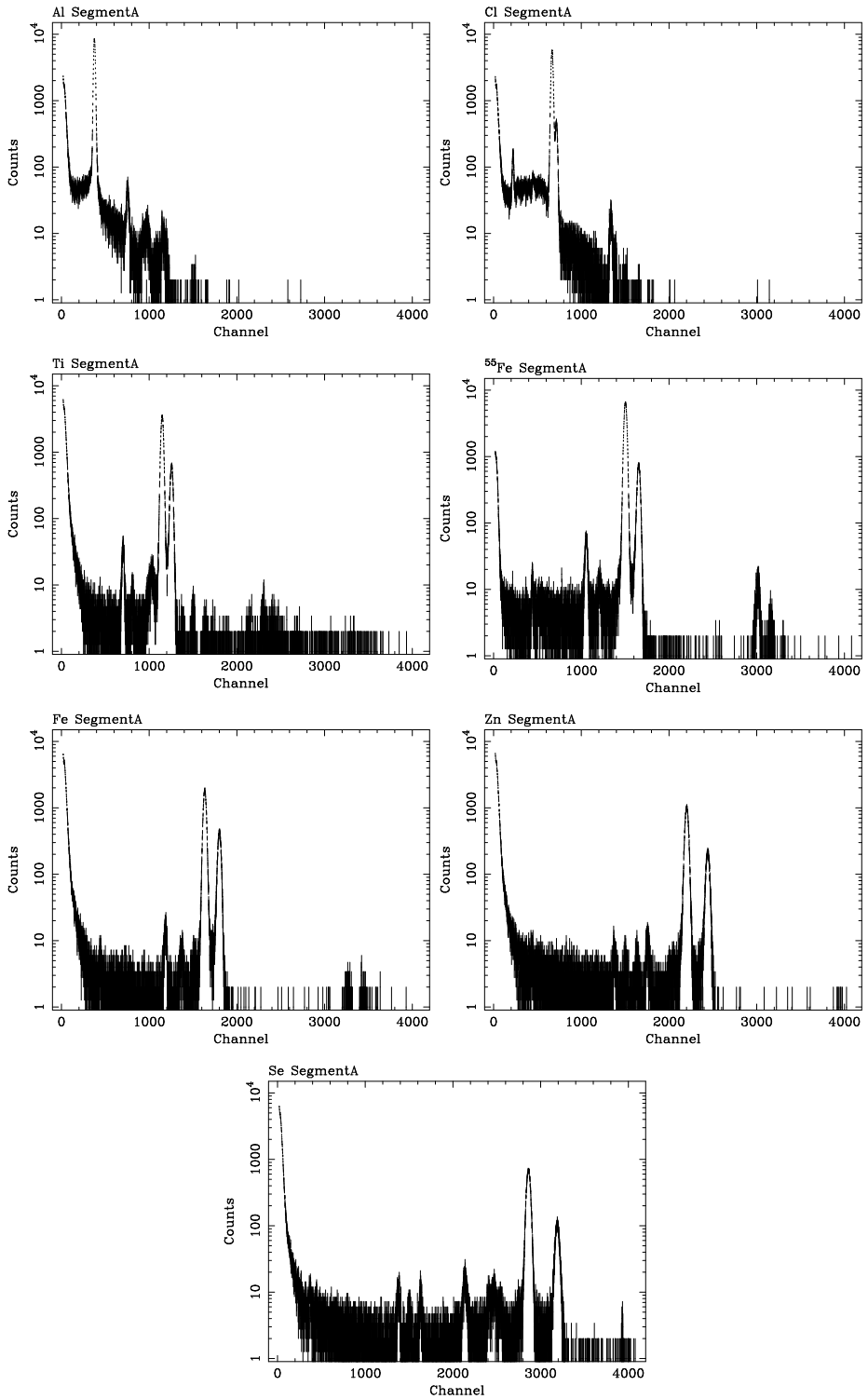

図 4.5: 各エネルギーの X 線スペクトル (0–4096ch 全体)
但し segment A のみ。　どの二次 X 線のものかは各スペクトルの左上に示してある。

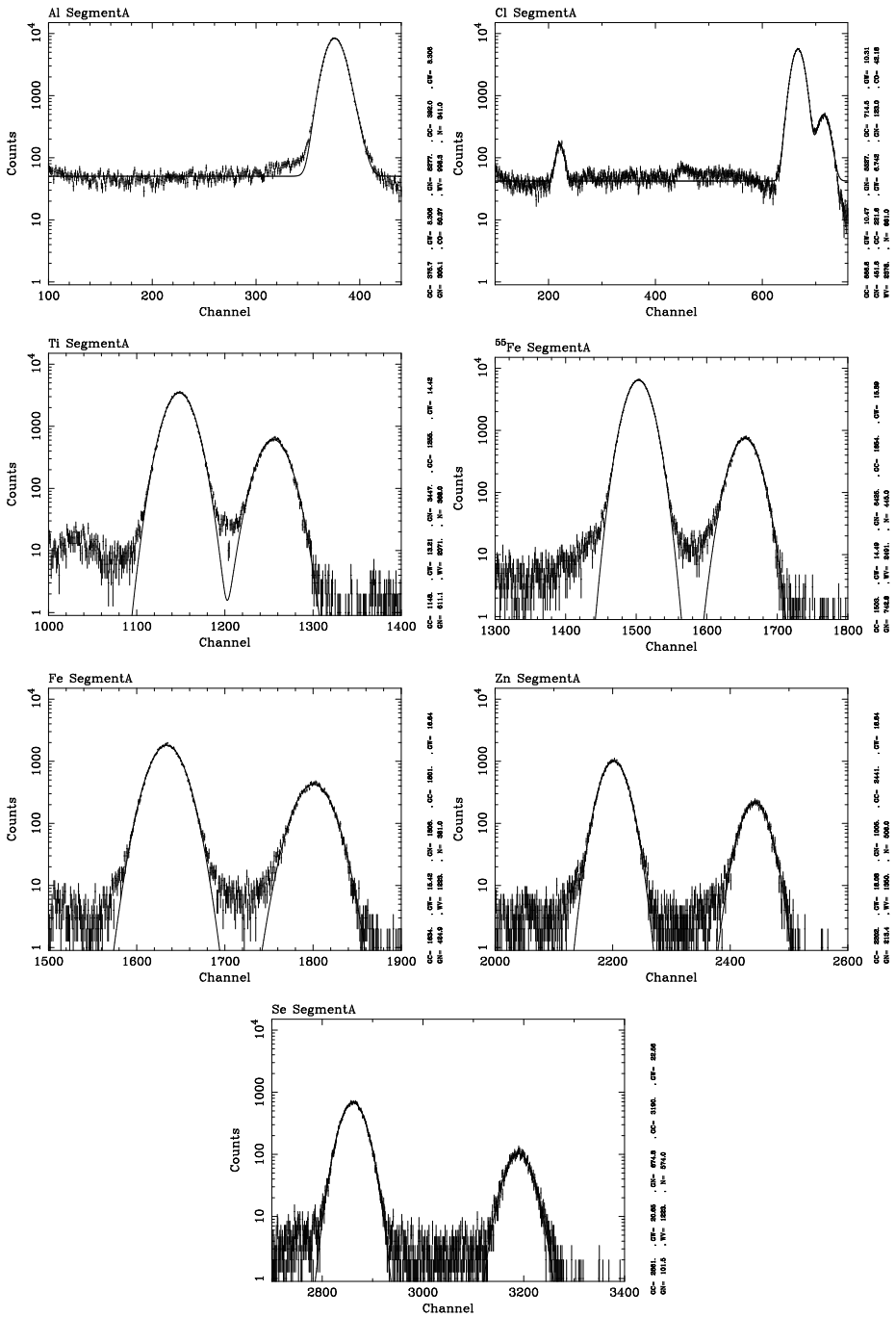

図 4.6: 各エネルギーの X 線スペクトル (メインピーク)
但し segment A のみ。

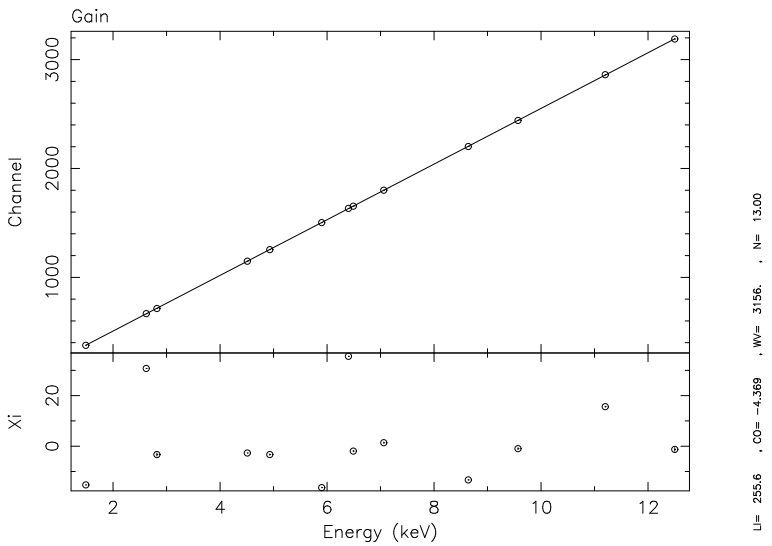

図 4.7: X 線エネルギーと波高値の対応関係

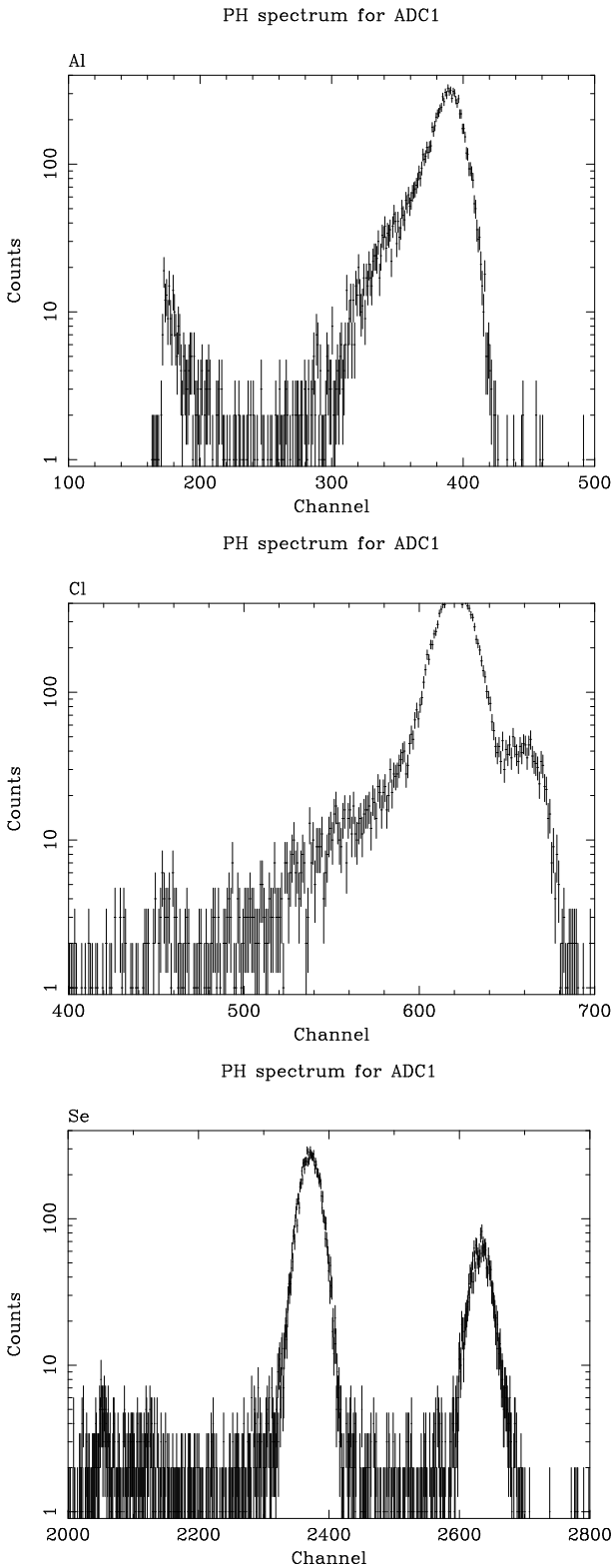

図 4.8: SSD のスペクトル

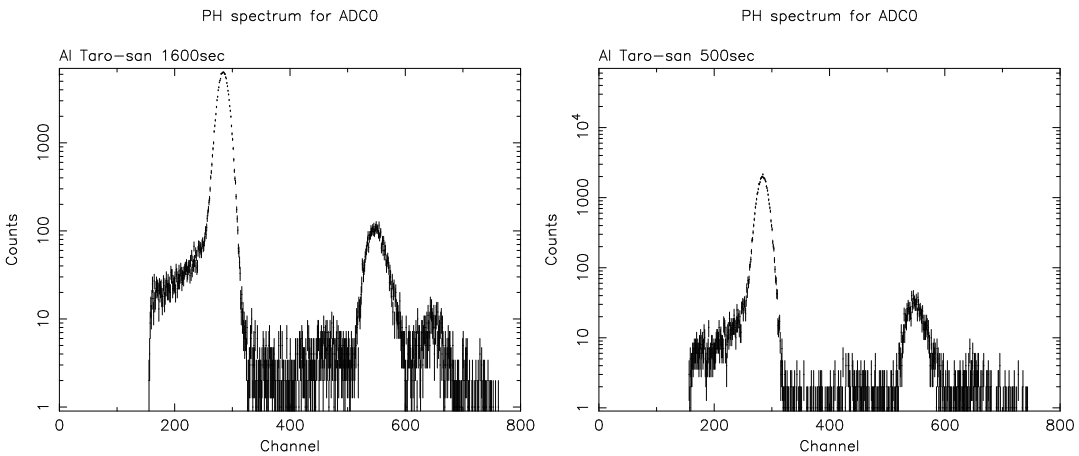

図 4.9: リアルタイムモニタ用 SSD (太郎さん) のスペクトル
左：XIS データ取得時 (1600sec)、 右：窓無し SSD データ取得時 (500sec)

第5章　新しい解析法

5.1　XIS Grade方式の問題点

前章のようにXIS BIの検出効率が異常なまでに低く出てしまった理由を考える。

検出効率が理論値よりもかなり低いということは、適切なイベント検出が行われなかったため、実際はX線イベントであるにも関わらず解析の時点で漏れてしまったものが多数存在すると考えるのが妥当であろう。イベント検出法は言うまでもなくバックグラウンドを除去し、X線イベントだけをできる限り「過不足なく」拾い上げられるものであることが必須条件となる。よって、まずはこのGrade法がその条件を満たす解析法であるかどうかを調べなくてはならない。

図5.1右にZnのGrade7のスペクトルを示した。XIS Grade法では、X線イベントと見なされるのはGrade0, 2, 3, 4, 6のみであり、3×3ピクセル以上に広がったイベントはGrade7に分類され、X線イベントとしては検出されないはずである。にも関わらず、図5.1右を見るとGrade7のスペクトルにもZnのイベントに対応する波高値を示すイベントが多数検出されているのがわかる。比較のためGrade0のスペクトルも図5.1左に示したが、Grade7の3倍程度のイベント数しか存在しない。逆に言えば、それだけGrade7に分類され、無駄になったイベントの数が無視できないぐらい多いということを意味する。また、直接frameデータのイメージを見てGrade7に分類されたイベントの様子を調べ、そのうちいくつかの例を図5.2に示した。図右下の縦に長く伸びたイベント以外の3つは、すべてZn-Kαのエネルギーに相当する合計波高値(2200ch程度)を示したイベントである。これらはやや電荷の広がりが大きくGrade7に分類されてしまったものの、その広がり3×3ピクセル内に収まっており、広がり方もX線イベントと考えて問題なさそうである。一方、広がり方が明らかに他の3つとは異なる図右下のイベントはBad Pixelからの電荷がテールを引いたものである。(Bad Columnの一つ)。このような類のイベントはバックグラウンドとして取り除かなければならない。

もう少し具体的に見ていく。X線イベントであるのにGrade7に分類されるイベントがかなり存在することがここまでの議論で明らかになったので、次に各Gradeへの分岐比がどの程度かを定量的に調べ、さらにその比が入射X線のエネルギーによってどのように変わるかを調べた。

表5.1にその結果を示す。各二次X線(及び^{55}Fe)について上段に書かれた値がメインピーク近くで適当に選んだ範囲内(表5.1右端に記載)のカウント数であり、下段の値がそれぞれのGradeへの分岐比である。

この結果を見ると、高エネルギーへ行くほどGrade0の割合が小さく、Grade7の割合が大きくなる傾向があることがわかる。

ここで注意しなくてはならないのが、Grade分岐比はスプリット閾値に強く依存するということである。また、エネルギー分解能もスプリット閾値に強く依存する。定性的に説明すると、スプリット閾値が大きすぎるとスプリット閾値以下の電荷の洩れだしを持つイベントが多くなるため、Grade法によって決定される波高値のばらつきが大きくなりエネ

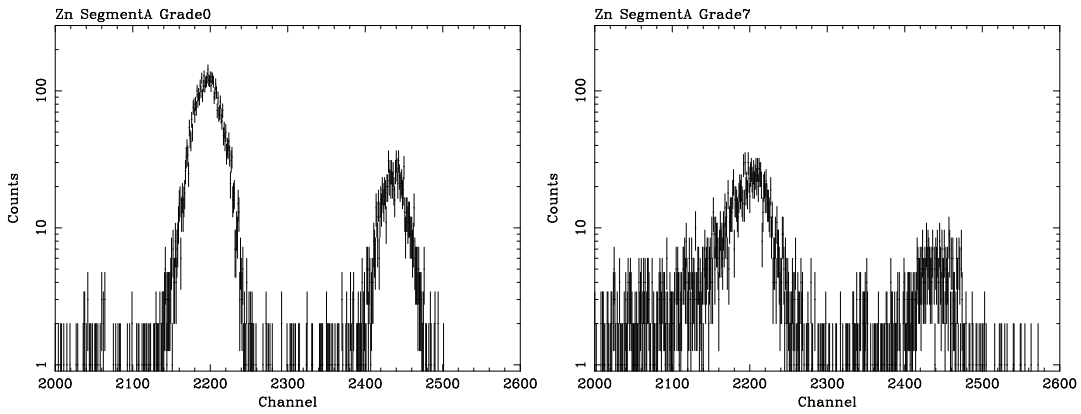

図 5.1: Zn のスペクトル Grade0 (左) と Grade7 (右)

ルギー分解能が悪化するが、逆に閾値が小さすぎると電荷雲の広がりが大きいイベントはすぐに Grade7 に分類されてしまう (3×3 ピクセル以上に広がっていると見なされる) ため特に電荷量が多い高エネルギー側で検出効率が悪化する。また、さらに閾値が小さくなると、今度は読み出しノイズの揺らぎによってスプリット閾値を超えてしまうようなピクセルが増えるため逆にエネルギー分解能が悪化してしまう。従って、最適なスプリット閾値の決定はエネルギー分解能と検出効率のバランスを考慮して行われなければならない。

以上のことを踏まえると、表 5.1 の結果はスプリット閾値が小さすぎることを示唆していると考えることができる。さらに高エネルギーに行くに従って Grade7 の割合が高くなるので、エネルギーが高いほどスプリット閾値の不足分が大きくなると言える。しかしながら、従来 Grade 法ではスプリット閾値は一定値に決め、エネルギー毎に差をつけるようなことはしないので、どうしてもこのような問題が生じてしまう。これが Grade 法の大きな欠点だと言えるのではないだろうか。

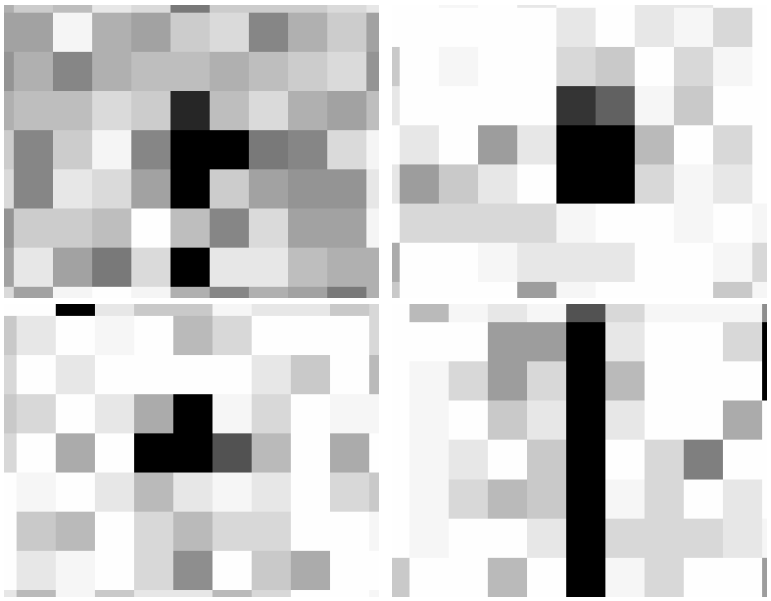

図 5.2: Grade7 のイベント

左上、右上、左下は波高値 2150–2250ch のイベントで、右下は転送不良により広がった Grade7 イベント。色の濃いピクセルほど波高値が高い。

5.2 新 Grade 法 (スプリット閾値可変方式)

ところで、ここまでの解析で用いたスプリット閾値は 7 であったが、この値はマサチューセッツ工科大の XIS チームが XIS BI の評価版の実験によって最適とした値である。今回用いた Flight Model はこのときのチップとは異なるので、最適パラメータが異なるのも不自然なことではない。よって以下で BI1 チップに最適なスプリット閾値を改めて決定したいと思う。

各 X 線のデータに対し、スプリット閾値をいろいろな値にしてエネルギー分解能と検出効率がどのように変化するかを調べた。図 5.3 に例を示す。左が Cl、右が Zn のデータだが、少なくともこれらが同じスプリット閾値では好ましくないことはわかる。

エネルギー分解能と検出効率の一方を優先すればもう一方を犠牲にすることになるので最適値の判断は難しいが、それらのバランスから Cl では閾値=10–11 程度、Zn では閾値=15–16 程度が最適だと考えられる。他の二次 X 線についても同様のことを行い、エネルギー毎にスプリット閾値の最適化を行った。あくまで目安でしかないが、その結果を表 5.2 に示す。また、大阪大の実験結果より、O の K 輝線のエネルギーに相当する 0.52keV での最適値は 7 であることがわかっているので、それも合わせて示す。

表 5.2 から、sumph とスプリット閾値の関係は

$$\mathrm{SplitThrethold} = 0.004 \times \mathrm{sumph} + 7 \tag{5.1}$$

でおおよそ近似できる。先の予想の通り、エネルギーが高くなるほどスプリット閾値を大きくした方が性能が良くなることがわかった。ここで、新しい解析法を提案したいと思う。従来はスプリット閾値を常に一定して解析していたが、これを入射 X 線のエネルギーによって可変にし、全バンドで最大限の性能を発揮させるようにしたい。もちろん入射 X 線のエネルギーは初めからわかるわけではないので、以下のような手順で解析を行わせるものとする。

表 5.1: XIS Grade 法 (スプリット閾値=7) によるカウント数と Grade 分岐比

二次 X 線	Grade								範囲 [ch]
	0	1	2	3	4	5	6	7	
Al	48055	3224	56025	19023	21402	6893	44013	2524	300–500
(分岐比)	0.2389	0.0160	0.2785	0.0946	0.1064	0.0343	0.2188	0.0125	
Cl	21914	1630	47753	14755	17349	7041	61641	4462	600–800
(分岐比)	0.1241	0.0092	0.2705	0.0836	0.0983	0.0399	0.3492	0.0253	
Ti	20052	978	42468	9698	13090	4571	53002	2445	1000–1400
(分岐比)	0.1371	0.0067	0.2903	0.0663	0.0895	0.0312	0.3623	0.0167	
^{55}Fe	40314	877	88711	14514	22815	6483	99080	5292	1300–1800
(分岐比)	0.1450	0.0032	0.3190	0.0522	0.0820	0.0233	0.3563	0.0190	
Fe	10192	704	28748	3831	8119	3480	37857	3284	1500–2000
(分岐比)	0.1059	0.0073	0.2988	0.0398	0.0844	0.0362	0.3935	0.0341	
Zn	6201	474	17780	2113	5600	2239	25266	2225	2000–2600
(分岐比)	0.1000	0.0077	0.2872	0.0341	0.0905	0.0362	0.4082	0.0359	
Se	2705	112	11637	981	3955	1137	22620	1325	2700–3400
(分岐比)	0.0608	0.0025	0.2617	0.0221	0.0889	0.0256	0.5086	0.0298	

1. 一旦スプリット閾値=7 でイベント検出を行い、合計波高値 (sumph) を決定する。
2. 式 5.1 に従ってそのイベントに対するスプリット閾値を再定義する。
3. 新しいスプリット閾値を用いて Grade 判定を行い、sumph も書き換える。
4. 以上の手順を全てのイベントに対して適用する。

この方法を用いて解析した場合の Grade 分岐比を表 5.3 に、エネルギー分解能と検出効率を表 5.4 に示す。

表 5.3 を表 5.1 と比較すると、Grade0 の割合が増え、Grade7 の割合が減っていることがわかる。Grade7 のスペクトルも図 5.4 のようになり、5.1 に見えたようなピークは完全になくなった。これによって、表 5.4 のように検出効率がかなり向上した。しかしながら、

表 5.2: エネルギー毎の最適なスプリット閾値

エネルギー (keV)	スプリット閾値
0.52	7
1.49	8–9
2.62	10–11
4.51	11–12
5.90	13–14
6.40	13–14
8.64	15–16
11.2	18–19

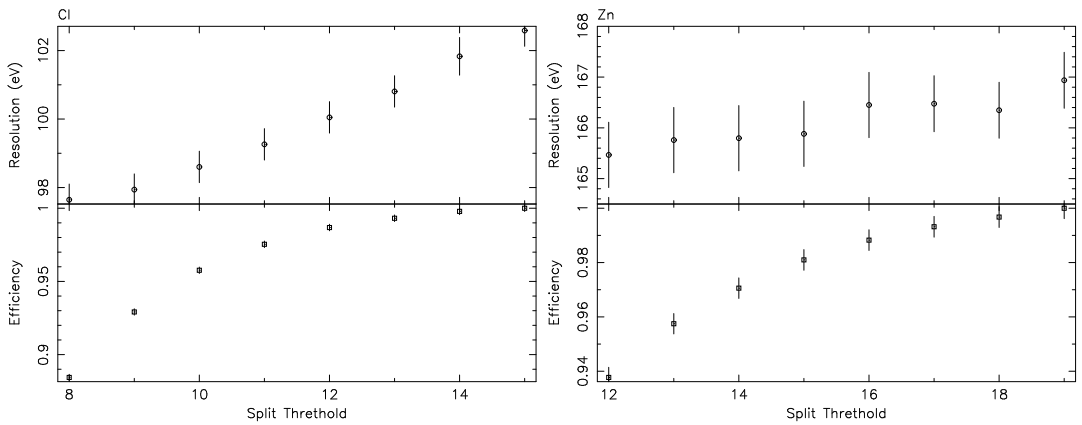

図 5.3: スプリット閾値の最適化

左が Cl、右が Zn を表す。上段は各スプリット閾値に対するエネルギー分解能で、下段は検出効率である。但し、検出効率は Cl でスプリット閾値=15 のとき、Zn でスプリット閾値=19 のときを 1 に規格化してある。

先述の理由でエネルギー分解能はやや悪化している。全特性 X 線のスペクトルは図 5.5 に示す。

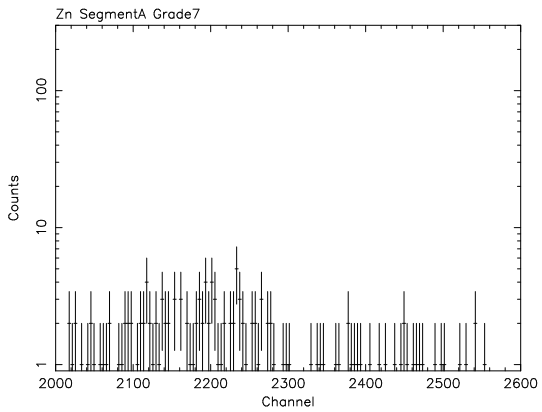

図 5.4: 新しい Grade 法による Zn のスペクトル (Grade7)

表 5.3: スプリット閾値可変 Grade 法によるカウント数と Grade 分岐比

二次 X 線	Grade							
	0	1	2	3	4	5	6	7
O	23020	1440	17051	7134	7832	2466	8593	733
（分岐比）	0.3372	0.0211	0.2498	0.1045	0.1147	0.0361	0.1259	0.0107
Al	56221	2826	56686	21100	22830	5431	40945	1704
（分岐比）	0.2706	0.0136	0.2729	0.1016	0.1099	0.0261	0.1971	0.0082
Cl	32699	1510	53252	19713	21294	4788	57879	2192
（分岐比）	0.1691	0.0078	0.2755	0.1020	0.1101	0.0248	0.2994	0.0113
Ti	39574	771	45823	16564	17673	2200	45339	605
（分岐比）	0.2348	0.0046	0.2719	0.0983	0.1049	0.0131	0.2690	0.0036
^{55}Fe	93623	1334	86681	29802	31388	2940	77312	1284
（分岐比）	0.2886	0.0041	0.2672	0.0919	0.0968	0.0091	0.2383	0.0040
Fe	35729	646	33182	11037	11924	1193	28988	305
（分岐比）	0.2905	0.0053	0.2698	0.0897	0.0969	0.0097	0.2357	0.0025
Zn	26665	393	20594	7165	7516	679	17899	143
（分岐比）	0.3290	0.0048	0.2541	0.0884	0.0927	0.0084	0.2208	0.0018
Se	20899	206	14466	5455	5746	341	13512	85
（分岐比）	0.3442	0.0034	0.2383	0.0899	0.0946	0.0056	0.2226	0.0014

イベントを拾った範囲 [ch] は表 5.1 に同じ

5.3 Fitting 法

この節では、新たにもう一つの解析法を試みたいと思う。

そもそも Grade 法は、波高値のパターンをいくつかの Grade にすることで電荷雲の広がりを見積もり、その広がりが X 線イベントだと見なせるかどうかを判断するという手法だった。ならば、もっと直接的に電荷雲の広がりを測定する手法を用いればイベントの判別もより適切に行えるのではないだろうか。それを可能にするのが Fitting 法である。この解析法は村上修論 [3] や河野修論 [5] などで開発・改良されており、空乏層が厚く、電荷雲の広がりが大きな CCD におけるイベント解析には非常に有効であることが実証されている。今回の実験で用いた XIS BI チップは FI ほどの空乏層厚はないが、前章までの解析で電荷雲の広がりがかなり大きいということが示されているので、BI の解析においても Fitting 法を適用することは有効だと考えられる。以下で簡単に Fitting 法の解説を行う。

Fitting 法は、イベント閾値を超えたピクセルの周囲 5×5 ピクセルの波高値に対して 2 次元対称 Gaussian でフィッティングを行う。Gaussian の σ を電荷雲の広がりとみなし、また合計波高値は本来 Gaussian の体積から求めるべきだが、計算を簡易にするため、各ピクセル中心値での Gaussian の高さを 7×7 ピクセル分まで足し合わせるという方法を採っている。この流れを図 5.6 にわかりやすく一次元的に示した。

以下、この方法を用いて解析を行う。まずは Fitting によって求めた合計波高値 (以後、sumph) と σ の関係をプロットしたものを図 5.7 に示す。見やすくするため、Cl は 101–110frame の 10frame 分、Zn は 101–130frame の 30frame 分だけをプロットしたが、データ点を増やしてもその分布はこの図と変わりない。

Cl のスペクトルの 600–750ADU 付近、Zn のスペクトルの 2100–2500ADU 付近に集中しているのが、それぞれのメインピークである。これらの図を見ると、明らかにメイン

表 5.4: スプリット閾値可変 Grade 法によって求めたエネルギー分解能と検出効率

Energy (keV)	エネルギー分解能 (FWHM ;eV)	検出効率
1.49	77.12 (±0.28)	1.185 (±0.012)
2.62	97.50 (±0.37)	0.759 (±0.007)
2.82	94.73 (±1.57)	–†
4.51	123.51 (±0.46)	0.764 (±0.009)
4.93	134.58 (±1.11)	0.760 (±0.020)
5.90	135.97 (±0.37)	–*
6.40	144.36 (±0.65)	0.579 (±0.007)
6.49	148.51 (±1.01)	–*
7.06	154.32 (±1.29)	0.506 (±0.012)
8.64	169.18 (±1.01)	0.344 (±0.004)
9.57	177.85 (±2.03)	0.267 (±0.006)
11.2	194.27 (±1.11)	0.218 (±0.002)
12.5	215.57 (±3.23)	0.159 (±0.004)

†Cl は Kα と Kβ が分離しきれなかったため、検出効率の測定はこれらをまとめて行った。
*^{55}Fe は SSD での強度測定を行っていないため。

ピークのイベントはσ <0.5 の範囲に集中しているのがわかる。また、図 4.5 や図 4.6 のスペクトルにも見えていた、Cl のコンスタント成分に対応するイベントも、200–600ADU の当りに分布しているが、このイベントもやはりσ <0.5 の範囲に集中している。この成分についての議論は 6 章にてさらに詳しく行う。

ここではメインピークのイベントの広がりについてもう少し厳密に調べたい。Cl のデータからは 600–750ADU、Zn のデータからは 2000-2500ADU の範囲のイベントのみを選び、σ とイベント数の関係をヒストグラムにし、図 5.8 に示した。

Cl、Zn ともに、ピークが 2 つあるように見えるが、これは Fitting によって求めたσ が、1 ピクセルのイベント (Grade0 に相当) の場合小さめに出て、複数のピクセルにまたがるイベント (Grade2,3,4 に相当) の場合大きめに出てしまうことによる。たった 5×5 ピクセルを 2 次元 Gaussian でフィッティングするので、少し粗くなってしまうのはやむを得ない。この図から、Cl と Zn のイベントの広がりを見比べると、Cl の方が大きく広がったイベントが多く存在していることがすぐにわかる。BI チップでは低エネルギーの X 線が電極から遠い点で多く吸収されることを裏付ける結果である。これは、Grade 法での解析においてスプリット閾値を一定にしたとき、高エネルギーの方が Grade7 の比率が高かったことに一見矛盾するようにも思われるが、高エネルギーのイベントはそもそも発生する電子の数が多いため、広がり (σ) 自体は低エネルギーのイベントに比べて小さいながらもスプリット閾値を超えるピクセルが広く分布していたに過ぎない。

さて、図 5.8 を見ると Cl のイベントはσ >0.5 にも分布しているが、0.1< σ <0.5 のイベント数に対して 1/1000 程度 (すなわちこのイベントを含めても検出効率は 0.1%程度しかかわらない) ので、解析を単純にするため本論文では全てのエネルギーでσ <0.5 を X 線イベントと見なすことにした。但し、大阪大による低エネルギー側の実験結果次第では、この値を変える必要が生じる可能性もある。

この方法によって得られたスペクトルから求めたエネルギー分解能と検出効率を表 5.5 に示す。さらに表 5.6 には、エネルギー分解能 (ΔE) と検出効率が従来の Grade 法に対

して、新 Grade 法と Fitting 法でどれだけ増加したかを示した。これを見ると、どちらの解析法においても、ΔE は高々 1–2% しか増加していない (エネルギー分解能はその程度しか悪化していない) のに対し、検出効率は低エネルギー側で約 10%、高エネルギー側では 50% 近くも増加しているのがわかる。この差は非常に大きく、スプリット閾値を 7 に固定していた従来の Grade 法がいかに不適切だったかが改めて明らかになった。また、新 Grade 法に対して Fitting 法では ΔE が 0.1–2% 程度、検出効率は 2–10% 程度増加している。これもやはり、多少のエネルギー分解能の悪化を犠牲にしてでも無視できない検出効率の差があると言える。両者の検出効率の間にまだこれだけの差が残ってしまったのは、おそらく新 Grade 法において、エネルギー毎のスプリット閾値の決め方がかなり感覚的だったことが原因であろう。これに対して Fitting 法は、Gaussian の σ というパラメータで定量的に電荷雲の広がりを評価するので、X 線イベントか否かの判定もより高い精度で行える。別の言い方をすれば、より物理過程を考慮した判定法だと言えるのではないだろうか。よって私は Fitting 法が最適な解析法だと判断し、次章の応答関数作成も Fitting 法を用いて行うことにした。

表 5.5: Fitting 法によって求めたエネルギー分解能と検出効率

Energy (keV)	エネルギー分解能 (FWHM ;eV)	検出効率
1.49	78.37 (±0.37)	1.298 (±0.013)
2.62	99.26 (±0.37)	0.861 (±0.007)
2.82	104.04 (±1.75)	–†
4.51	124.19 (±0.46)	0.811 (±0.009)
4.93	136.88 (±1.10)	0.813 (±0.021)
5.90	136.61 (±0.37)	–*
6.40	144.98 (±0.64)	0.612 (±0.007)
6.49	151.60 (±1.10)	–*
7.06	157.30 (±1.29)	0.534 (±0.012)
8.64	169.36 (±0.92)	0.358 (±0.004)
9.57	178.28 (±2.02)	0.277 (±0.006)
11.2	194.56 (±1.10)	0.223 (±0.002)
12.5	226.30 (±3.68)	0.158 (±0.004)

†Cl は Kα と Kβ が分離しきれなかったため、検出効率の測定はこれらをまとめて行った。
*^{55}Fe は SSD での強度測定を行っていないため。

5.4　議論

本章では、可変スプリット閾値方式の Grade 法および Fitting 法という 2 つの新しい解析法を用いてイベント解析を行い、それぞれがエネルギー分解能や検出効率にどのように影響するかを調べてきた。その結果、どちらの解析法でも旧来の Grade 法に比べて有意に検出効率が向上していることが明らかになった。そして旧 Grade 法の検出効率が低かった原因は、かなりの量の X 線イベントが X 線イベントとは見なされない Grade7 に分類されていたことであり、その現象は特に高エネルギー側で顕著だった。では、なぜこのような結果になったのだろうか。ここではその理由についての議論を行いたい。

表 5.6: 新 Grade 法と Fitting 法のエネルギー分解能と検出効率の比較

Energy (keV)	新 Grade 法		Fitting 法	
	ΔE の増加率	検出効率の増加率	ΔE の増加率	検出効率の増加率
1.49	1.009	1.050	1.026	1.150
2.62	1.013	1.128	1.031	1.279
4.51	1.017	1.203	1.023	1.277
6.40	1.018	1.356	1.023	1.433
8.64	1.018	1.398	1.019	1.455
11.2	1.023	1.434	1.025	1.467

従来の Grade 法による ΔE と検出効率をそれぞれ 1 としたときの新 Grade 法、Fitting 法それぞれの ΔE と検出効率を表す。

まず、これらの新しい解析法と旧来の Grade 法との決定的な相違点について述べる。可変スプリット閾値方式の Grade 法は、入射 X 線のエネルギーに応じてスプリット閾値を変えて Grade 判定を行う。これはすなわち、X 線によって発生する電荷の総量から周辺ピクセルに洩れ出しうる典型的な電荷の絶対量をあらかじめ決めているのに他ならない。そして Fitting 法は、波高値の分布から、直接発生した電荷の総量と拡散の幅を測定するという方法である。もう少しわかりやすい言葉で言うと、前者は電荷の総数と周辺に洩れた電荷の数から広がり幅を決定し、後者はイベント中心と周辺ピクセルの波高値をフィッティングによって結ぶことで広がり幅を見積もる。そしてその「幅」から X 線イベントか否かを判断しているのである。そういう意味では、両者は具体的な手順こそ違えど本質的には同じ発想の解析法だと言える。

これに対して旧来の Grade 法は、電荷の総量という情報を無視し、周辺ピクセルに含まれる電荷の絶対数だけでイベント判定を行うので、実のところイベントの「幅」を見ているわけではないのである。本来 X 線によるイベントかどうかはこの「幅」を元に判断されるべきであって、周辺に洩れた電荷の数だけで判断されるべきではない。したがって、旧来の Grade 法は必ずしもイベント検出法としてふさわしいものではないと言える。

では、なぜ今まで ASCA、XIS などで何度も扱われてきた FI チップでは上記のような Grade 法の問題点があらわにならず、今回 BI チップで初めて顕在化することになったのだろうか。

FI と BI の相違点は、当然のことながら X 線照射方式である。FI は電極側から X 線が入射するため、高エネルギーの X 線の方が電極から離れたところで吸収されやすく、結果として電子雲が大きく拡散する。ここで、FI ではスプリット閾値は 20 に設定されていたわけだが、この値にすることで、最も電子雲の大きく広がる高エネルギーの X 線イベントでもそのほとんどが Grade6 以内で検出されていたのである。FI の場合、低エネルギーの X 線による電荷は絶対量も広がりも高エネルギーのものと比較して小さいので、高エネルギー X 線のイベントが Grade7 にならないようなスプリット閾値にしておけば、低エネルギーでも Grade7 にならないことは自明である。実際のところは低エネルギーイベントはほとんどが Grade0 であった。

一方の BI チップは、電極の反対側から X 線を吸収するため、より拡散するのは生成する電荷量の少ない低エネルギー X 線の方である。FI と同じようにスプリット閾値を 20 に設

定してしまうと、閾値以下の電荷が周囲 3×3 ピクセル内に洩れ出す低エネルギー X 線イベントが大量に現れ、エネルギー分解能を悪くする結果が得られた。そこでスプリット閾値を低め (7) に設定していたのである。そして、FI のときに高エネルギーイベントを基準にして閾値を決めたのと同じように、BI では低エネルギーイベントを基準にして閾値を決めておけば十分だと思われていた。ところが、前章および本章の解析によって、予想外の結果が得られた。確かにイベントの広がりは低エネルギーの方が大きかったが、Grade 分岐比が示しているように、周辺ピクセルに洩れ出す電荷の絶対量は高エネルギーの方がはるかに多かったのである。このため、低エネルギーで最適と思われたスプリット閾値そのままで高エネルギー X 線イベントを解析すると、今度はかなりの量のイベントが Grade7 に含まれてしまい、その結果検出効率が異常に低く出てしまったのである。

以上のことから、スプリット閾値を一定に取る従来の Grade 法は FI の解析に対しては有効であるが、BI の解析には適していないと結論することができる。

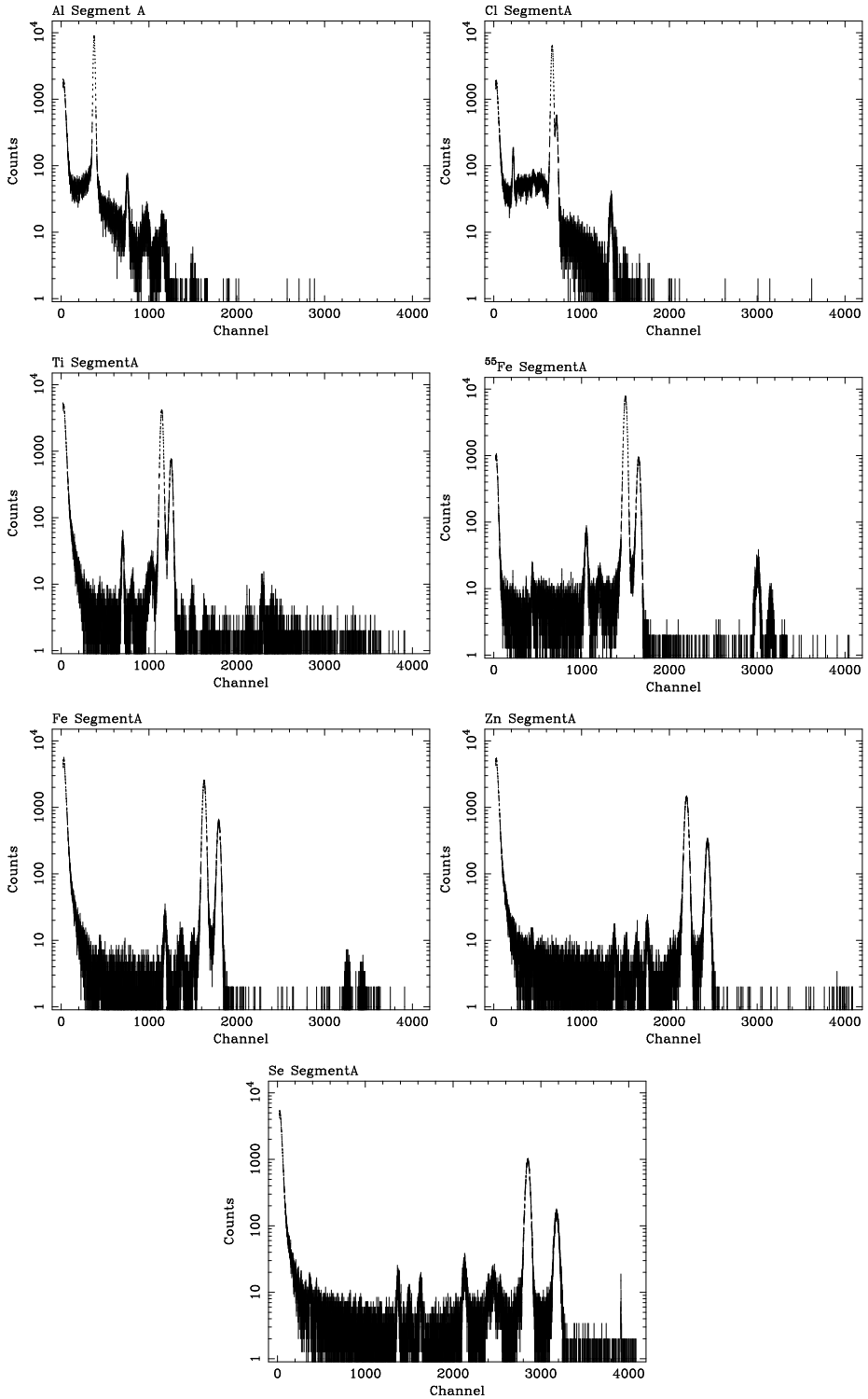

図 5.5: 新 Grade 法による各エネルギーの X 線スペクトル (0–4096ch 全体)
但し segment A のみ。　どの二次 X 線のものかは各スペクトルの左上に示してある。

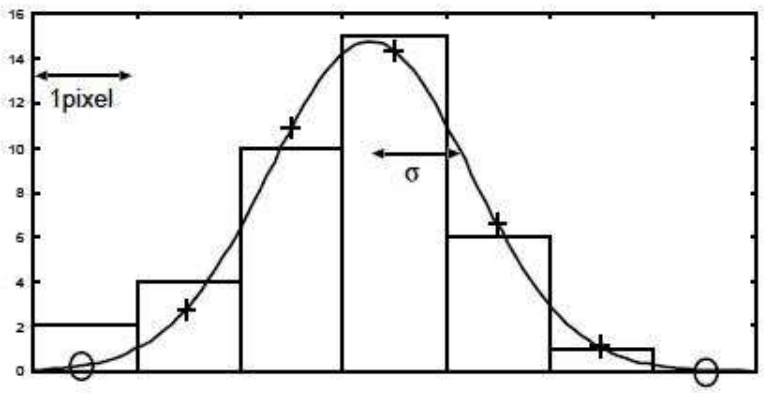

図 5.6: Fitting の方法

帯状のヒストグラムは各ピクセルの波高値を表す。Gaussian の + 印の部分と各ピクセル波高値をフィッティングし、合計波高値は + 印と ○ 印の和から決定する。

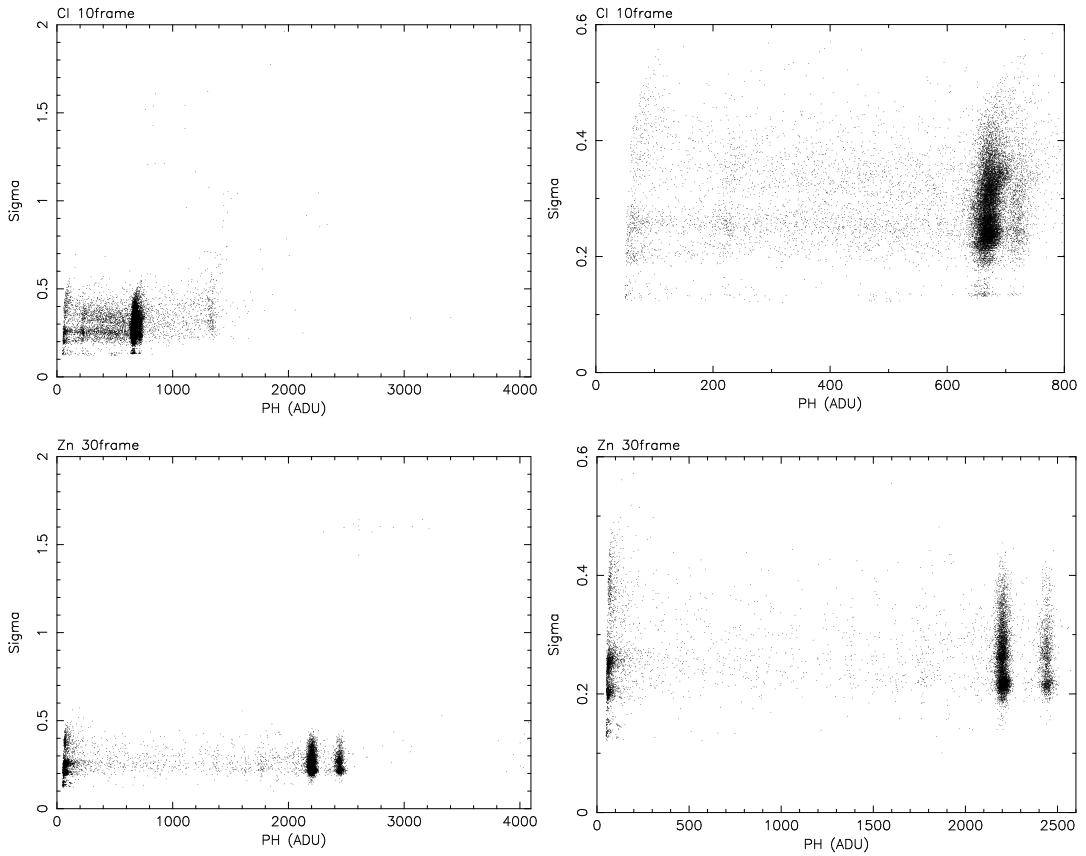

図 5.7: sumph とイベントの広がりの関係
左上：Cl10frame 分、右上：Cl、イベントの多い部分の拡大図
左下：Zn30frame 分、右下：Zn、イベントの多い部分の拡大図

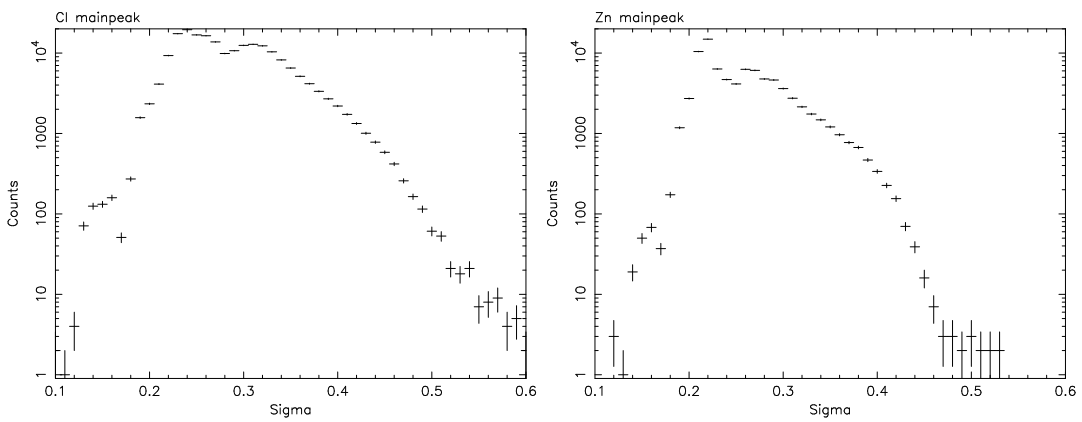

図 5.8: σ とイベント数の関係
左：Cl、右：Zn

第6章　応答関数の作成

これまでの章ではそれぞれのスペクトルのメインピークだけに注目し、エネルギー分解能や検出効率を基準に、最適な解析法の検討を行なってきた。だが単色の X 線に対する XIS の応答はその X 線エネルギーに対応するメインピーク成分だけではなく、低エネルギー側に伸びるテール成分や、いくつかのライン構造も存在する。これらの成分も含めて XIS の応答を正確に記述するのが応答関数であり、それを作成することが性能評価試験の最終目的である。本章では、Fitting 法によって得られたスペクトルから XIS の応答関数の作成を行なう。またそれに先立ち、できる限り正確な応答を調べるための CTI 補正、および Dark スペクトルの差し引きを行なう。

6.1　CTIの補正

CTI (電荷転送非効率) は 2.6 節でも述べたように、主に放射線損傷などによる格子欠陥が電荷にとってのトラップとなることが原因と考えられている。実際、放射線帯を通過する高高度楕円軌道を周回している Chandra/ACIS などでは特に CTI の増加が著しい。しかしながら CTI の増加については、クロックの電圧が最適でないために起こる電荷の転送不良など、他にもいろいろな要員が考えられ、そう単純なものではない。まずは CTI の大きさがどの程度なのかを現象論的に把握し、正しい補正を行なうことで、CTI によって生じるエネルギー分解能の劣化を防ぐことが重要である。

では、CTI によってスペクトルがどのような影響を受けるのかを見ていく。図 6.1 は全て ^{55}Fe、segmentA のスペクトルの Kα メインピークの部分を拡大したものだが、Y 座標 (縦方向) は上から順に、$0 \leq \mathrm{Y} < 128$、$128 \leq \mathrm{Y} < 256$、$256 \leq \mathrm{Y} < 384$、$384 \leq \mathrm{Y} < 512$、$512 \leq \mathrm{Y} < 640$、$640 \leq \mathrm{Y} < 768$、$768 \leq \mathrm{Y} < 896$、$896 \leq \mathrm{Y} < 1024$、X 座標 (横方向) は全て読みだし口に近い側、$0 \leq \mathrm{X} < 128$ の領域のイベントのみを選択している。つまり、上のスペクトルほど読みだし口に近く、転送回数が少ない領域のイベントを集めていることになる。この図だけではややわかりにくいが、読みだし口から遠くなるに従ってピークの中心値が低くなっている。

それぞれのピークを Gaussian でフィットし、その中心値をプロットしたのが図 6.2 左である。これを直線でフィットすると、その傾きは -3.738 ($\pm$0.248) $\times 10^{-3}$、切片は 1508.627 ($\pm$0.146) と求まった。切片の値は撮像領域最下部の、受ける縦転送 CTI が最も小さいピクセルの波高値を意味する。この傾きの絶対値を切片の値で割ると、2.48 ($\pm$0.164) $\times 10^{-6}$ が得られる。これが縦転送の CTI である。2.6 節で定義した通り、１つの電子が１ピクセルの縦転送によって 2.48 ($\pm$0.164) $\times 10^{-6}$ の確率で失われることを意味する。また、同じように読みだし口から遠い側、$128 \leq \mathrm{X} < 256$ の領域を Y 座標ごとに区切り、ピークの中心値をプロットしたものを図 6.2 右に示す。直線フィッティングの結果は、傾きが -3.704 ($\pm$0.248) $\times 10^{-3}$、切片が 1508.374 ($\pm$0.146) であった。傾きはほとんど変わらないが、切片が図 6.2 左よりも少し小さくなっていることがわかる。これは、シリアルレジスタを横転送する際に受ける CTI による差である。この差から横転送の CTI を求めると、1.31 ($\pm$1.76) $\times 10^{-6}$ と

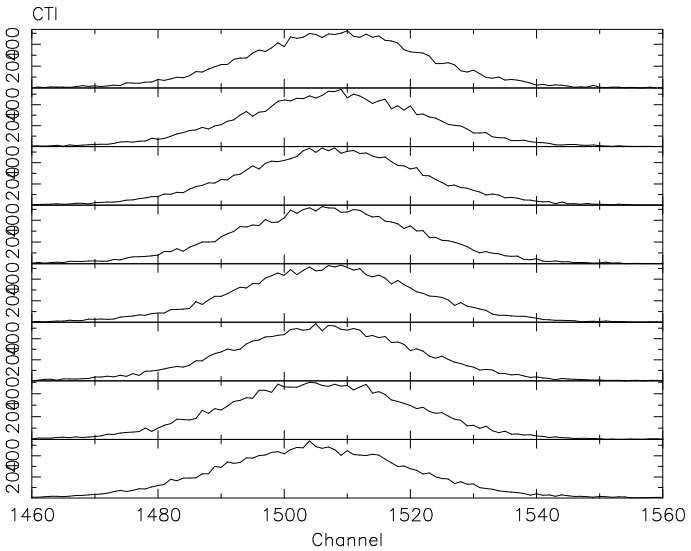

図 6.1: 転送回数の違いによるスペクトルの変化

全て X 座標は $0 \leq \mathrm{X} < 128$、Y 座標は上から順に、$0 \leq \mathrm{Y} < 128$、$128 \leq \mathrm{Y} < 256$、$256 \leq \mathrm{Y} < 384$、$384 \leq \mathrm{Y} < 512$、$512 \leq \mathrm{Y} < 640$、$640 \leq \mathrm{Y} < 768$、$768 \leq \mathrm{Y} < 896$、$896 \leq \mathrm{Y} < 1024$ の領域のイベントだけを抽出している。

なった。

CTI はコラム毎に差があるので、本来は独立に補正しなければならないが、ここでは十分な統計が得られないため、各コラムの平均値を全てのコラムが等しく受ける CTI だとみなす。現時点では CTI の値は上記のようにあまり大きくないので、このように扱ってもほとんど問題はないと思われる。
機上では、コラム毎の CTI を評価するために CI 機能を用いられる。

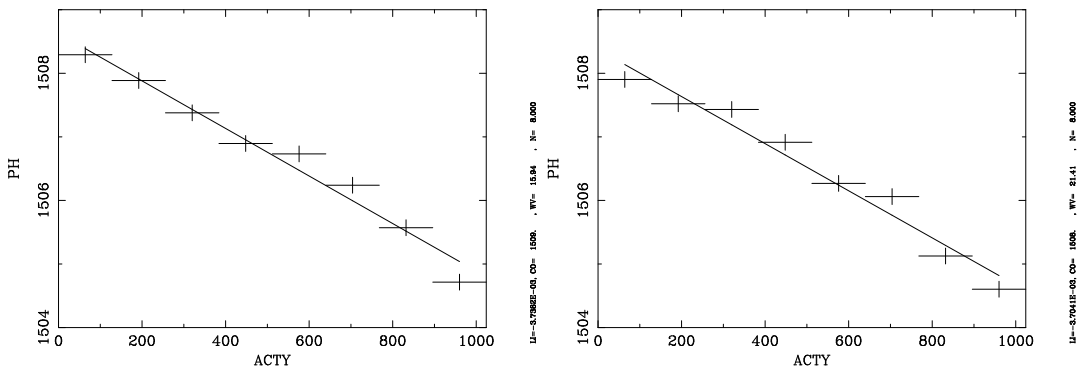

図 6.2: CTI
左：読みだし口に近い側 ($0 \leq \mathrm{X} < 128$)、右：読みだし口から遠い側 ($128 \leq \mathrm{X} < 256$)

このようにして、縦転送と横転送の CTI を他のエネルギーのデータについても全く同じ方法で計算したところ、エネルギーによって CTI が異なる値を示すことがわかった。縦転送 CTI のエネルギー (波高値) 依存性を表 6.1 に示す。なお、この表での「波高値」は図 6.2 と同じような方法で横転送の CTI を直線フィットにより求めた際に得られた切片の

値 (最も読みだし口に近い、(X,Y)=(0,0) での波高値に相当) を示している。

表 6.1: 波高値と縦転送 CTI の関係

波高値 [ch]	CTI [$\times 10^{-6}$]
672.76	5.23 ($\pm$0.354)
1154.34	3.73 ($\pm$0.373)
1508.75	2.48 ($\pm$0.164)
2207.07	2.09 ($\pm$0.361)
2866.38	1.83 ($\pm$0.334)

次にこの値をプロットしたものを図 6.3 に示す。上から順に、直線フィットしたもの、巾関数フィットしたもの、その log–log 表示である。フィッティングの結果は表 6.2 に示す。

表 6.2: 波高値と縦転送 CTI の関係のモデルフィッティング結果

パラメータ	直線モデル	巾関数モデル
a	$-1.33\ (\pm 0.32) \times 10^{-9}$	$1.20\ (\pm 0.09) \times 10^{-3}$
b or α	$4.96\ (\pm 0.56) \times 10^{-6}$	$0.835\ (\pm 0.159)$
χ^2/d.o.f.	8.01	1.07

直線モデルの関数形は $(\mathrm{CTI}) = \mathrm{a}\times(\mathrm{PH}) + \mathrm{b}$
巾関数モデルは $(\mathrm{CTI}) = \mathrm{a}\ \times(\mathrm{PH})^{-\alpha}$

あくまで現象論的な結果ではあるが、表 6.2 より、CTI のエネルギー依存性は直線モデルでは明らかに合わず、巾関数でよく説明できることがわかる。よって以後は、縦転送の CTI は以下のような関係式が満たされるものとする。

$$(\text{縦転送の CTI}) = 1.20 \times 10^{-3} \times (\mathrm{PH})^{-0.835} \tag{6.1}$$

同様にして横転送の CTI を求めると、以下のような関係式が得られた。

$$(\text{縦転送の CTI}) = 1.90 \times 10^{-3} \times (\mathrm{PH})^{-0.970} \tag{6.2}$$

式 6.1、6.2 より、CTI を受けていない波高値 Q と読み出された波高値 Q' の間には次式が成り立つが、

$$Q' \approx Q(1 - 1.9 \times 10^{-3}\ Q^{-0.970} \times \mathrm{X} - 1.2 \times 10^{-3}\ Q^{-0.835} \times \mathrm{Y}) \tag{6.3}$$

$Q \approx Q'$ なので近似的に

$$Q \approx \frac{Q'}{(1 - 1.9 \times 10^{-3}\ Q'^{-0.970} \times \mathrm{X} - 1.2 \times 10^{-3}\ Q'^{-0.835} \times \mathrm{Y})} \tag{6.4}$$

を満たすものとして、補正を行なう。
補正を行なう前後のエネルギー分解能を表 6.3 で比較する。CTI がさほど大きくないのでわずかではあるが、補正後の方がエネルギー分解能が良くなっているのがわかる。軌道上で CTE が劣化したのちは、補正の重要度も増してくるであろう。

表 6.3: CTI 補正前後のエネルギー分解能の比較

エネルギー (keV)	CTI 補正前の ΔE (eV)	CTI 補正後の ΔE (eV)
1.49	78.38 (±0.37)	78.09 (±0.37)
2.62	99.26 (±0.37)	98.78 (±0.37)
2.82	104.04 (±1.75)	103.93 (±1.75)
4.51	124.19 (±0.46)	123.62 (±0.46)
4.93	136.88 (±1.10)	136.22 (±1.10)
5.90	136.61 (±0.37)	136.22 (±0.37)
6.40	144.98 (±0.64)	144.68 (±0.64)
6.49	151.60 (±1.10)	151.58 (±1.10)
7.06	157.30 (±1.29)	156.73 (±1.29)
8.64	169.36 (±0.92)	168.87 (±0.92)
9.57	178.28 (±2.02)	178.43 (±2.02)
11.2	194.56 (±1.10)	193.89 (±1.10)
12.5	226.30 (±3.68)	226.63 (±3.68)

6.2　Dark スペクトル

これまでは、Dark (バックグラウンド) イベントを考慮することなく議論を進めてきた。最終的には単色 X 線に対する XIS の正確な応答を知る必要があるので、ここで Dark の差し引きを行なうことにする。

まずは Dark 35frame 分のスペクトルを図 6.4 に示す。イベント閾値の 50ch からおおよそ 400ch にかけて何らかのイベントが検出されている他、1500ch 付近にもわずかながらイベントが見られる。後者はちょうど ^{55}Fe メインピークのエネルギーなので、XIS に取り付けられたキャルソースによる成分だと思われる。以上の成分を除いては、バックグラウンドのイベントはほとんど存在しないことがわかる。従って、これまで Dark の差し引きを省略したままエネルギー分解能や検出効率の比較を行なってきたことについては特に問題はなかったと言える。

次にこのスペクトルをバックグラウンドとして、各 X 線データに対して取得時間を規格化して差し引きを行なう。例えば図 6.5 左は、Dark を引いた Fe のスペクトルの 0–400ch の様子だが、少なくとも 0–200ch はやや引き残りが存在する。一方、図 6.5 右は ^{55}Fe のスペクトルだが、こちらは大きく引きすぎてしまっている。^{55}Fe のスペクトルだけにこのような現象が見られたことから、原因は XIS の置かれた位置によってバックグラウンドが異なることだと考えられる。Dark のデータを取得したとき、XIS はレインボーチェンバからのビームライン上にあった。これは ^{55}Fe 以外の X 線データを取得したのと同じ場所である。もちろん Dark のデータを取る際には X 線発生装置はオフにしていたが、レインボチェンバ内の真空計[1]は動作したままになっており、おそらくここから電子が出ており、それが 0–400ch 付近のバックグラウンドイベントを作っていたものと考えられる。^{55}Fe のデータ取得時はビームラインとは別の場所に XIS を移動させるので (図 4.1 参照)、この成分が検出されなかったのであろう。ただ、XIS がビームライン上にあるときでも図 6.5 左のようにバックグラウンドイベントが引き残っていることを考慮すると、このイベント

[1] ペニング真空計。電子を放出し、真空中に残留する気体を電離させて生成したイオンを電極に補集して、電流値から圧力を求める。

は時間的な変動を有する可能性が非常に高い。従って、0–400ch のイベントは以後無視した方が安全かと思われる。

また、図 6.6 に CTI を補正し、バックグラウンドを引いたスペクトルを示す。

6.3　応答関数

6.3.1　概要

天体からの X 線を XIS が検出したとき、その出力は天体からのスペクトルをそのまま表すわけではなく、検出器の特性に従ってある変換を受けた情報を表すことになる。天体が放出しているスペクトルを **S(E)**、観測されるパルス波高値の分布を **PH(ch)** とすると、ある行列 **R(ch,E)** を用いて、

$$\mathbf{PH(ch)} = \mathbf{R(ch, E)} \otimes \mathbf{S(E)} \tag{6.5}$$

の関係が成り立つ。我々は **R(ch,E)** を正確に知ることにより、得られたデータ (**PH(ch)**) から元の情報 (**S(E)**) を推定することが可能になる。この **R(ch,E)** が応答関数である。

まず、単色 X 線の入射に対してスペクトルに現れる成分にはどのようなものがあるかをある程度予想しておく。理想的には以下の 4 種類の成分で説明できるものと思われる。

1. メインピーク　空乏層で X 線が吸収され、全ての電荷が集積されたもの。
2. Si エスケープ　X 線が吸収された後に Si 蛍光 X 線が発生し、そのピクセルから十分離れたピクセル、もしくは空乏層の外側まで逃げていった場合に得られる。
3. Si ライン　エスケープした Si 蛍光 X 線が他のピクセルで吸収されたもの。
4. コンスタント　空乏層前面の薄い不感層もしくはその近傍で X 線が吸収され、電荷の一部が集積できなかったもの。

以下で各成分について物理的解釈を与え、離散的に取得したデータを元にしてあらゆるエネルギーの X 線に対する応答を推定することを目標とする。

6.3.2　メインピーク

メインピーク成分は入射した X 線によって発生した電荷が全て集積された成分なので、理想的には単純な single Gaussian で表される。よって、ゲイン (Gaussian の中心値) とエネルギー分解能 (Gaussian の FHWM) を一般的なエネルギーに依存した関数形で表せばよい。

まず Fitting 法で解析した際に得られるゲインを求める。CTI 補正をしたスペクトルから求めたエネルギーと波高値 (PH) の関係は図 6.7 に示した通りであり、直線フィッティングの結果、次式のような関係が求められた。

$$\mathrm{PH\ [channel]} = 255.5 \times \mathrm{Energy\ [keV]} + 1.864 \tag{6.6}$$

次に、エネルギー分解能を一般化する。表 6.3 に示した各エネルギーでのエネルギー分解能をプロットし、式 2.13 に従う関数を重ねたのが図 6.8 左である。ここで、読みだしノイズ (σ_{read}) は 4.2 節の結果から、1.65ADU=6.458eV とした。図を見るとわかるように、高エネルギー側へ行くに従ってデータ点と理想値のずれが顕著になる。この現象は、詳しい説明は与えられていないものの FI チップのときにも見られており、高エネルギー側で

線形な関数になるような補正項を加えることでデータをよく再現することが知られている [4][6]。そこで今回も前例に従い、次式に従う関数でのフィッティングを行なった。

$$\Delta E\ [\mathrm{eV}] = 2.35 W_{Si}\sqrt{\sigma_{read}^2 + F\frac{1000\times E_0\ [\mathrm{keV}]}{W_{si}} + N'(1000\times E_0\ [\mathrm{keV}])^2} \tag{6.7}$$

フィッティングの結果は図 6.8 右に示す。また、補正係数は

$$N' = 7.81\times 10^{-7}$$

と求まった。

6.3.3 Si エスケープ

Si エスケープは、空乏層で一次 X 線が光電吸収された後 Si 蛍光 X 線が発生し、そのまま再吸収されることなく空乏層の外まで逃げるか、十分に遠いピクセルで再吸収されるという過程によって生じる成分である。つまり、一次 X 線が最初に吸収されたピクセル周辺には一次 X 線のエネルギーから Si 蛍光 X 線のエネルギー (1.739keV) を引いたエネルギーに相当する数の電荷が生成されることになる。従ってこの成分も single Gaussian で表され、Gaussian の中心値と FWHM はそのエネルギーに対応する値として式 6.6 と式 6.7 から簡単に求められる。あとはその強度、正確に言えばメインピークに対する強度比を求めればよい。

なお、1.739keV の蛍光 X 線が出るためには光電吸収によって K 殻の電子がはじき出される必要があるので、K 吸収端 (1.838keV) 以下のエネルギーの X 線に対する応答には Si エスケープのイベントは現れない。

Si エスケープイベントを作るような状況を以下でいくつかのパターンに分けて考察する。空乏層の厚さを $D(\sim 45\mu\mathrm{m})$、Si の蛍光収率 (Fluorescence Yield) を $f(\sim 0.047)$、シリコンの密度を $\rho(\sim 2.33\ \mathrm{g/cm^3})$ とおき、Si の吸収係数は X 線エネルギーの関数なので $\mu_{[E]}$ と表す (関数形は式 2.2 参照)。まず、一次 X 線 (エネルギー $E_0[\mathrm{keV}]$) が深さ $z\sim z+dz$ で吸収される確率は

$$dP1 = \mu_{[E_0]}\rho e^{-\mu_{[E_0]}\rho z}dz \tag{6.8}$$

となり、その後蛍光 X 線が角度 $\theta\sim d\theta$ 方向 (角度の定義は図 6.9 参照) に放射される確率は

$$dP2 = f\times\frac{\sin\theta}{2}d\theta \tag{6.9}$$

と表される。ここで $0\le\theta<\pi/2$、すなわち蛍光 X 線が上向きに発せられた場合、空乏層から外に逃げる確率は

$$P3 = e^{-\mu_{[1.739]}\rho z/\cos\theta} \tag{6.10}$$

である。但し、上述の通り空乏層の外に逃げなくとも、十分に遠いピクセルで再吸収された場合はやはりエスケープイベントになる。Fitting 法ではイベント中心のまわり 5×5 ピクセルより外の情報は使わないので、少なくとも 3 ピクセル以上離れたところまで吸収されなければエスケープとなるのに十分である。イベント中心から 5×5 ピクセルの外までの距離を r とおくと (1 ピクセルが $24\mu\mathrm{m}$ なので $r\sim 72\mu\mathrm{m}$)、$r\le z\tan\theta$ のときはエスケープとなる確率は

$$P3 = e^{-\mu_{[1.739]}\rho r/\sin\theta} \tag{6.11}$$

となる。
$\pi/2 \leq \theta < \pi$、すなわち蛍光 X 線が下向きに発せられた場合も同様に考え、まとめると P3 は以下のように蛍光 X 線の放射角度によって場合分けされた形に求まる。

$$P3 = \begin{array}{ll} e^{-\mu_{[1.739]}\rho z/\cos\theta} & \text{for } 0 \leq \theta < \mathrm{Arctan}(r/z) \\ e^{-\mu_{[1.739]}\rho r/\sin\theta} & \text{for } \mathrm{Arctan}(r/z) \leq \theta < \pi - \mathrm{Arctan}(\frac{r}{D-z}) \\ e^{-\mu_{[1.739]}\rho (z-D)/\cos\theta} & \text{for } \pi - \mathrm{Arctan}(\frac{r}{D-z}) \leq \theta \leq \pi \end{array} \tag{6.12}$$

となる。
以上より、最終的にエスケープイベントが検出される確率 P_{escape} は、

$$P_{\mathrm{escape}} = \int_{z=0}^{z=D} dP1 \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} dP2 \cdot P3 \tag{6.13}$$

となる。
一方、メインピークのイベントができる確率 P_{main} は式 2.1 よりただちに

$$P_{\mathrm{main}} = 1 - e^{-\mu_{[E_0]}\rho D} \tag{6.14}$$

と求められるので[2]、メインピークイベントに対するエスケープイベントの確率の比がそのままスペクトルの相対強度 $T_{\mathrm{escape}}/T_{\mathrm{main}}$ となる。すなわち、

$$\frac{T_{\mathrm{escape}}}{T_{\mathrm{main}}} = \frac{P_{\mathrm{escape}}}{P_{\mathrm{main}}} \tag{6.15}$$

である。
式 6.15 の強度比を $D = 4.5 \times 10^{-3}\mathrm{cm}$、$r = 7.2 \times 10^{-3}\mathrm{cm}$ のもとに数値計算したモデルと、データの比較を図 6.10 左に示す。データを再現しなかったので D と r を常識的な範囲 (10%以内) で変化させてみたが、各エネルギーでの強度比の値の変動は 5%未満しかなかった。図 6.10 右はデータ点とモデルが合うようにモデルを 2.2 倍したものである。今の時点ではモデルとデータの不一致の原因は不明だが、factor 倍するとある程度再現することがわかった。注意しておきたいのは、この強度比はあまりエネルギーに依存しないことである (データ、モデルともに)。今西修論 [4] や中嶋修論 [6] によると、FI では高エネルギー側ほど強度比がかなり低くなる傾向にあったが (10keV での強度比が 2keV での強度比の約 1/10)、BI は違った特性を持っていることが明らかになった。

6.3.4　Si ライン

Si ラインは一次 X 線が光電吸収された後に Si 蛍光 X 線が放出され、十分に離れたピクセルで再吸収された場合に生じるイベントである。関数形は Si 蛍光 X 線のエネルギーに相当する channel に現れる single Gaussian である。
得られたスペクトルから Si ライン成分を探したが、どのスペクトルも後述のコンスタント成分に埋もれて見つけることが出来なかった。以下、予想される相対強度のみを示す。
蛍光 X 線が吸収されるところまでは、先述の式 6.8、6.9 と同じである。次に Si ラインのイベントとなるためには、エスケープとは逆に、空乏層の外に逃げる、もしくは一次 X

[2] 正確にはここからエスケープの分を引く必要があるが、後でわかるようにエスケープの強度はメインピークの強度に比べて十分小さいのでこのように近似できる。

線が吸収されたピクセルから 5×5 ピクセル以内で再吸収されてはならない。そのような確率 $P3'$ は以下のようになる。

$$P3' = \begin{array}{ll} 0 & \text{for } 0 \leq \theta < \mathrm{Arctan}(r/z) \\ e^{-\mu_{[1.739]}\rho r/\sin\theta} & \text{for } \mathrm{Arctan}(r/z) \leq \theta < \pi - \mathrm{Arctan}(\frac{r}{D-z}) \\ 0 & \text{for } \pi - \mathrm{Arctan}(\frac{r}{D-z}) \leq \theta \leq \pi \end{array} \tag{6.16}$$

その後空乏層の外に出る前に再吸収される確率は、

$$P4 = \begin{array}{ll} 1 - e^{-\mu_{[1.739]}\rho(z/\cos\theta - r/\sin\theta)} & \text{for } \mathrm{Arctan}(r/z) \leq \theta < \pi/2 \\ 1 - e^{-\mu_{[1.739]}\rho((z-D)/\cos\theta - r/\sin\theta)} & \text{for } \pi/2 \leq \theta \leq \pi - \mathrm{Arctan}(\frac{r}{D-z}) \end{array} \tag{6.17}$$

となるので、最終的に Si ラインのイベントが検出される確率 P_{line} は、

$$P_{\mathrm{escape}} = \int_{z=0}^{z=D} dP1 \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} dP2 \cdot P3' \cdot P4 \tag{6.18}$$

となる。あとは同様にしてメインピークに対する相対強度が求められる。

この成分は、データに全く見られなかったように非常に強度の弱い成分である。Si 蛍光 X 線の質量吸収係数 $\mu_{[1.739]} \sim 861\ \mathrm{cm}^2/\mathrm{g}$、Si の密度 ρ =2.33 $\mathrm{g/cm}^3$ より、

$$e^{-\mu_{[1.739]}\rho l} \sim e^{-0.2l[\mu\mathrm{m}]}$$

となる。つまり、Si 蛍光 X 線が 5μm も進めば強度が $1/e$ になることを意味し、5×5 ピクセルより外にたどり着ける X 線は非常に少ないのである。

6.3.5 コンスタント成分

コンスタント成分は、一次 X 線が空乏層の非常に浅い領域で吸収されたため一部の電荷が表面の不感領域に洩れ込み、集積できなくなることによって生じる成分だと考えられている。

図 6.11 のように、吸収された一次 X 線は式 2.3 に従う半径を持つ初期電子雲を形成する。不感層と空乏層の境界付近で吸収された X 線によって形成された電子雲は境界にまたがるため、その一部は不感層に広がることになる。不感層に洩れ込んだ電荷はほとんどが集積されることなく再結合を受けるので、結果として空乏層内に拡散した電荷のみが集積され、波高値も吸収された深さによってばらばらの値をとる。この効果によってメインピークよりも低エネルギー側に近似的にコンスタントで表せるような成分を作る。

図 6.12 にコンスタント成分を含むようなスペクトルをいくつか示した。一見してわかるのが、Al と Cl のスペクトルに非常に大きなコンスタント成分が現れていることである。なお、メインピークよりも高エネルギー側に現れているイベントについては、検出効率を求める際に利用した窓無し SSD では検出されていないこと、通常メインピークよりも波高値の高くなるような応答は (パイルアップを除いては) 考えられないこと、カウント数が低エネルギー側に比べて減っていること、同じ条件で実験を行なった FI では全く見られなかった成分であることなどから、特性 X 線以外の X 線の混入によるものではなく、メインピークのイベントと低エネルギー側のコンスタント成分のイベント、もしくはコンスタント成分のイベント同士のパイルアップによるものだと考えている。よって以下では、コンスタント成分はメインピークの Gaussian 中心値よりも低エネルギー側だけに現れる

成分であるとし、メインピークよりも高エネルギー側のイベントについては全て無視することとする。

ここで BI チップの構造について考える。図 3.7 を見ると、Si の前面には薄い酸化膜や Ag の層が存在するが、その厚みは高々10nm である。一方、Cl の特性 X 線が入射したときに形成された初期電子雲の半径は式 2.3 から求めると約 91nm である。従って、たとえ Cl の特性 X 線が不感層の表面で吸収されたとしても、電荷の大半は空乏層まで到達できるはずである。しかしながら Cl のスペクトルを見ると、少なくともイベント閾値の 50ch(∼200eV) まではほぼ一様にコンスタント成分のイベントが存在しているのがわかる。この事実は図 3.7 に示された不感層の厚さだけで説明をつけられない。そこで、例えば Si 層が完全に空乏化されておらず、一部中性領域が残っていると考えれば、うまくデータを再現するようなモデルを作ることができるようになるのかも知れないが、現段階では適切なモデルが完成していないため、ここではデータから計算したコンスタント成分の相対強度の結果のみを示したい。

コンスタント成分はバックグラウンドイベントが見られなくなる 400ch からメインピーク中心値までの十分広い領域をコンスタントモデルでフィットすることにより求めた。また、その際エスケープピークやキャルソースのピークなどが寄与しないように十分に注意した。さらに、コンスタント成分には KαX 線、KβX 線両方による成分があると考えられるが、その (Kα と、Kβ の) 強度比はメインピークの強度比に等しいとして計算を行なった。その結果、メインピークに対するコンスタント成分の相対強度は図 6.13 のように求まった。

6.4　まとめと議論

以上、Fitting 法によって得られたスペクトルをもとに応答関数の作成を行なってきたが、今のところ一部未完成である。まずはこれの完成を急ぎたい。さらに現状のモデルではまだまだデータをうまく説明しきれていない部分もあるので、今後、より深く物理過程を考え、再現性のよい応答関数を作成する必要がある。また、上では触れなかったが、図 6.14 のように、単純な single Gaussian と constant model でデータをフィッティングしようとすると、必ずピークの裾野の部分に大きな引き残りができてしまう。これはおそらく、5×5 ピクセルという非常に少ないピクセルの中で 2 次元 Gaussian フィッティングを行なったため精度が粗く、Gaussian の体積が本来の合計波高値とはやや外れた値を示すイベントが存在することによっていると思われる。Grade 法では、スプリット閾値以下の電荷が周辺ピクセルに洩れだしたことによって生じるサブピーク成分が応答関数の一部として組み込まれていたが、Fitting 法においてもやはり、2 次元 Gaussian の値と実際の波高値の分布がどの程度ずれるのかを正確に評価し、応答関数を与えてやることが必要であろう。

また、より多くの実験データを集めることも、応答関数の精度向上につながると思われる。今回得られたスペクトルには比較的大きなパイルアップが見られた他、低エネルギー X 線スペクトルに見られた強いコンスタント成分など、物理的解釈の難しい現象が散見された。残念ながら搭載が決定している BI1 は打ち上げまで再び地上実験に用いることはできないが、打ち上げ後にはスペア品の BI0 センサーでの再実験が可能になる見込みである。そのときには前回の実験よりも綿密に計画を立て、余裕を持ってパイルアップの起こらないような X 線強度で長時間のデータ取得を行ないたい。そして、今回の実験およびデータ解析では明らかにしきれなかったいくつもの問題点の解決を目指したいと思う。

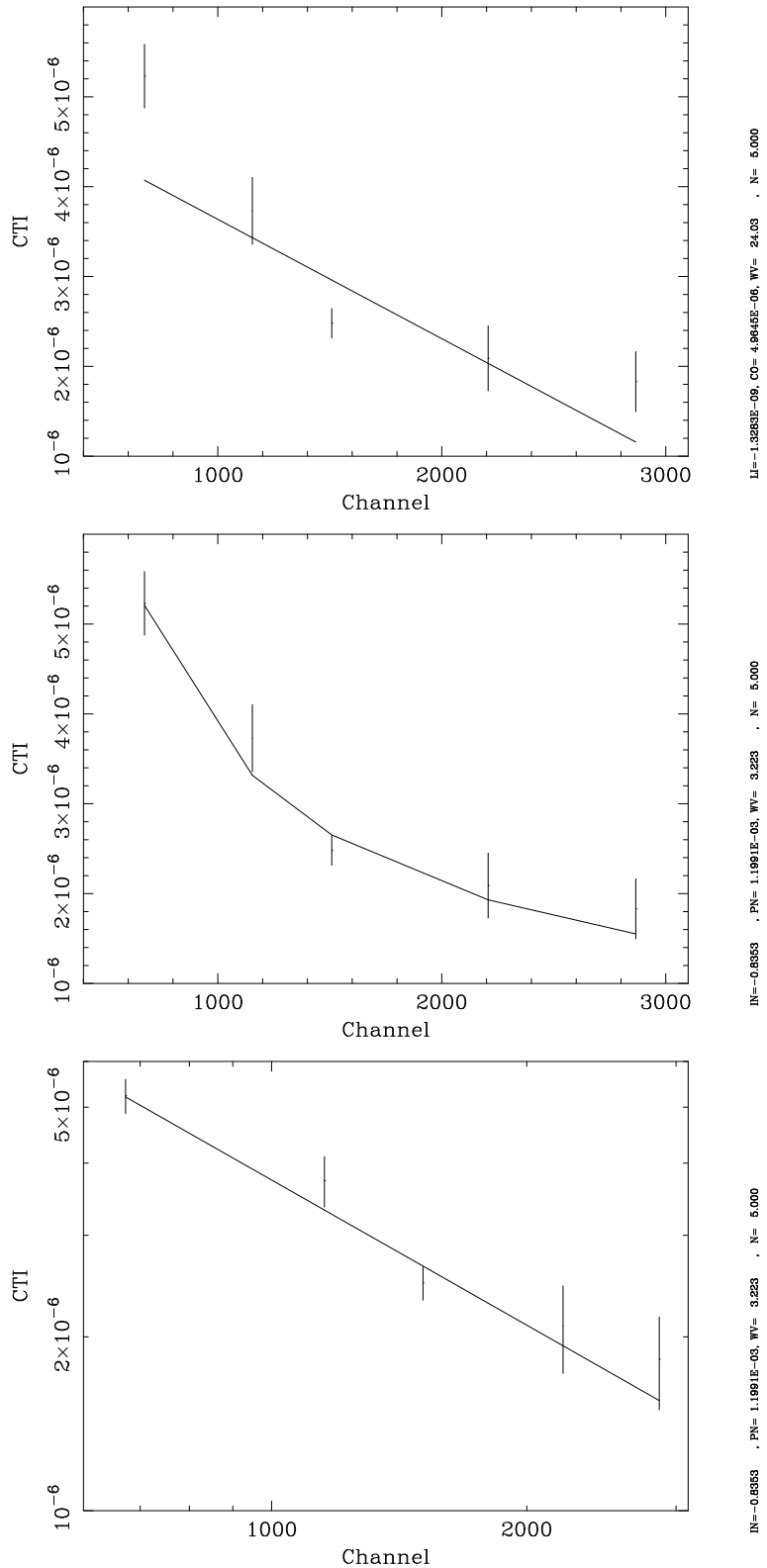

図 6.3: 波高値と縦転送 CTI の関係
上：直線フィット、 中：巾関数フィット、 下：巾関数フィットの log–log 表示

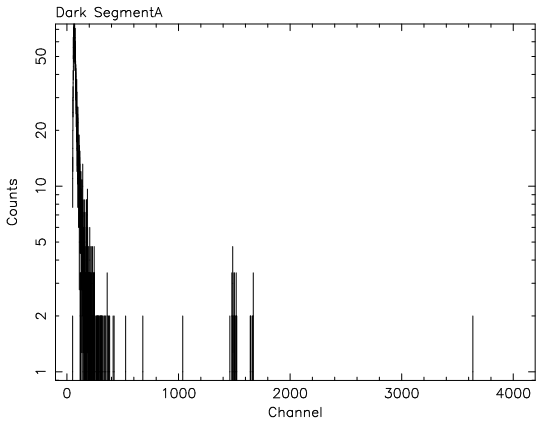

図 6.4: Dark のスペクトル

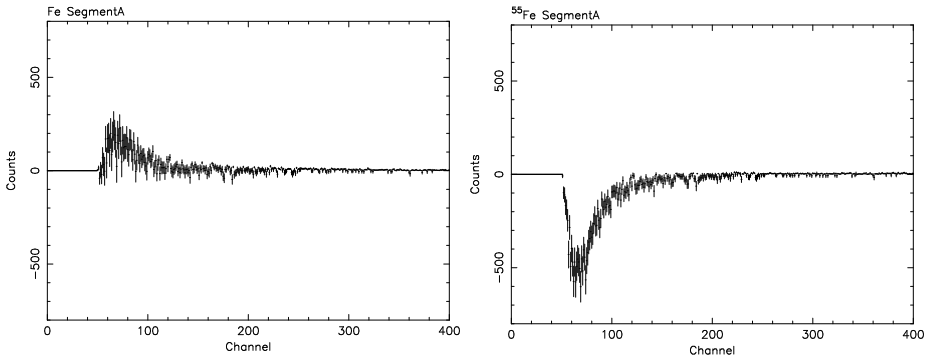

図 6.5: Dark を差し引きしたスペクトル (0–400ch)
左：Fe のスペクトル、 右：^{55}Fe のスペクトル

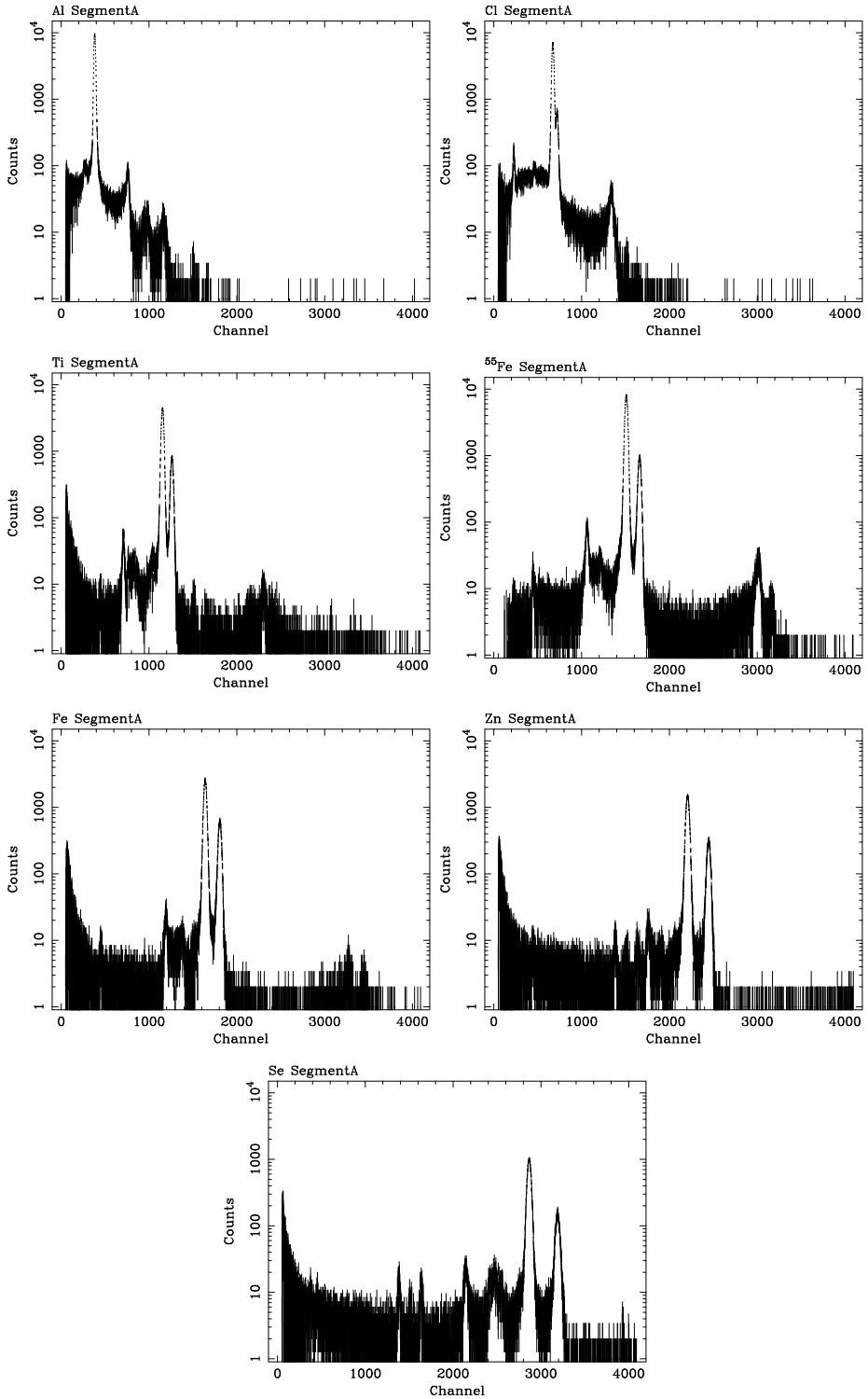

図 6.6: 各エネルギーの X 線スペクトル (0–4096ch 全体)
但し segment A のみ。　どの二次 X 線のものかは各スペクトルの左上に示してある。

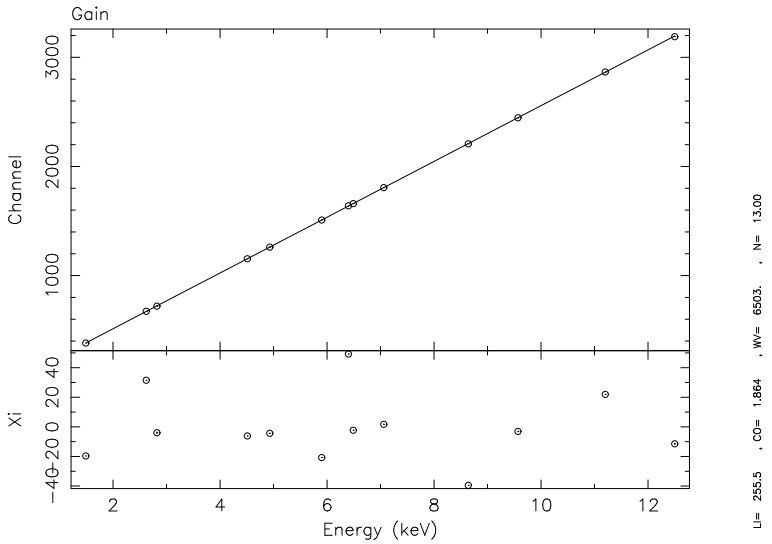

図 6.7: ゲイン

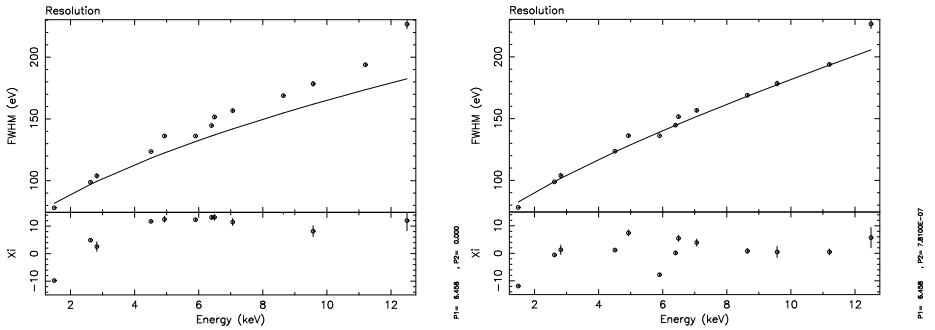

図 6.8: エネルギー分解能
左：理論値との比較、 右：補正項を加えてフィッティングしたもの

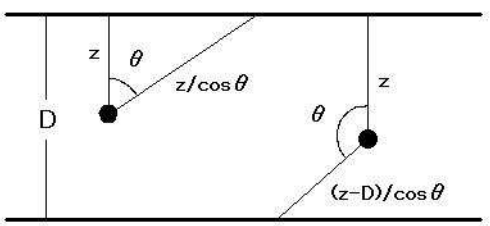

図 6.9: Si エスケープ成分のできかた

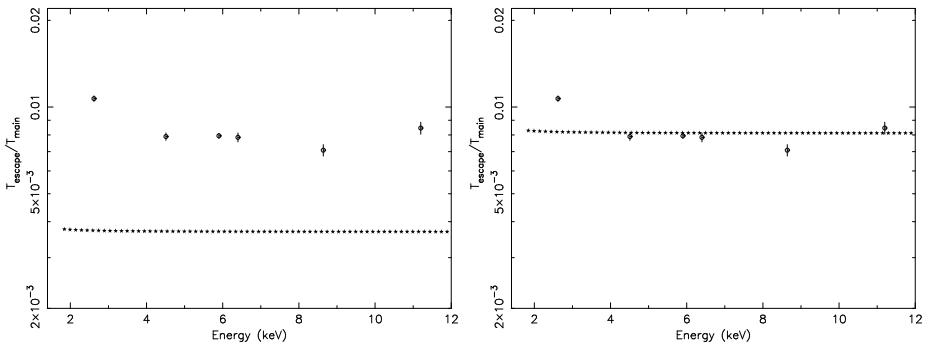

図 6.10: Si エスケープの相対強度
左：データ点とモデルの比較、 右：データに合うようにモデルを 2.2 倍したもの

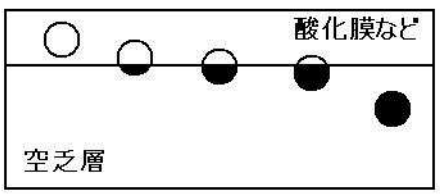

図 6.11: コンスタント成分のできかた
黒く塗りつぶした部分の電荷のみが集積される。

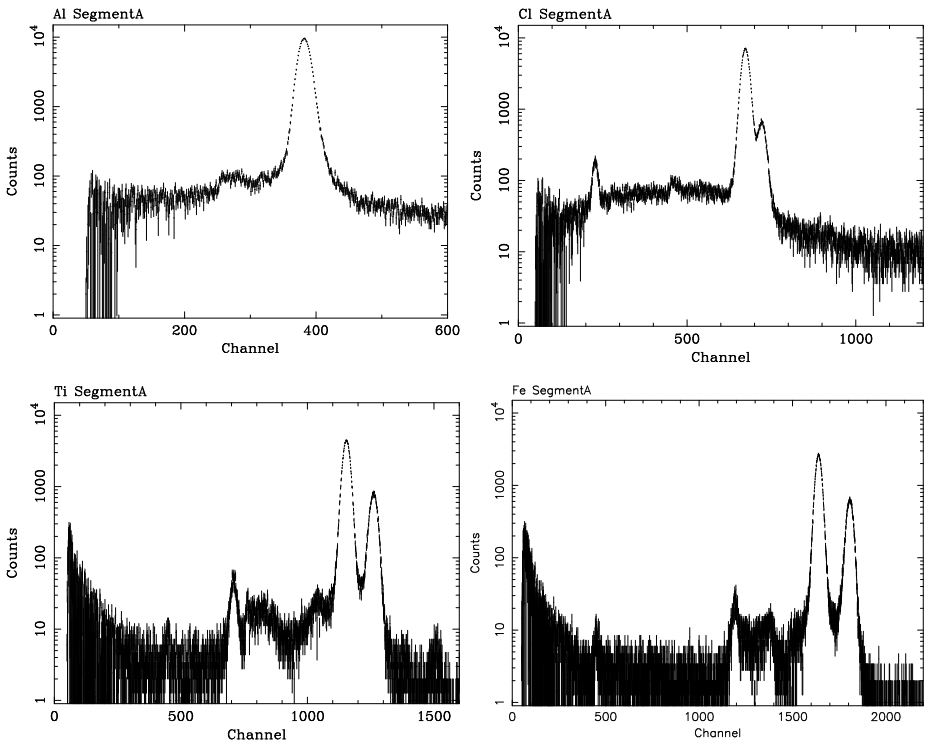

図 6.12: コンスタント成分を含んだスペクトル
特性 X 線の種類は各スペクトルの左上に示した。

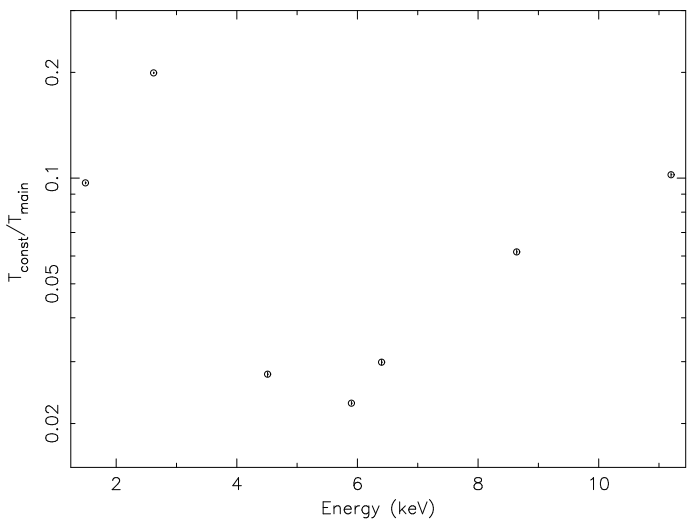

図 6.13: コンスタント成分の相対強度

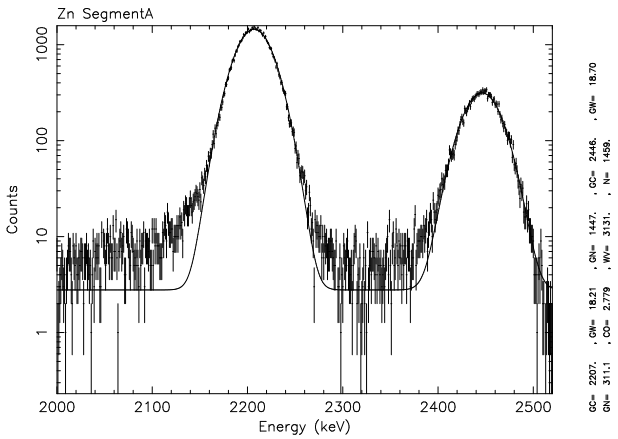

図 6.14: Fitting 法によって得られた Zn のスペクトル

Gaussian と constant model で表したが、ピークの裾に引き残りが生じる。

第7章　まとめと今後の課題

7.1　まとめ

本修士論文は Astro-E2 衛星搭載用 X 線 CCD、XIS2 号機の Flight Model のうち、裏面照射型 (BI) チップの機能 · 性能試験の結果と、応答関数作成の結果を述べたものである。以下に内容を要約する。

- XIS BI チップの性能試験を行った。データ解析を行なったところ、エネルギー分解能は FI に近い値を示したものの、検出効率が理論値と大きくかけ離れていることがわかった。
- 検出効率が悪くなっていた原因を突き止めた。高エネルギーの X 線にとってはスプリット閾値が小さすぎたため、多くのイベントが X 線とみなされない Grade7 に分類されていたことを発見、イベントが Grade7 に分類される割合を調べると、高エネルギーの X 線イベントほど分岐比が大きいことがわかった。
- スプリット閾値を入射 X 線のエネルギーに応じて可変にした新しい Grade 法と、Fitting 法を用いてイベント解析を行なった。どちらの場合も、従来の Grade 法に比べてかなり大きな検出効率を達成した。
- 低エネルギーの X 線によるイベントの方が電荷の広がりは大きかったが、周辺ピクセルに洩れ出す電荷の絶対量は高エネルギーの方が多いことを発見した。そのことから、従来の Grade 法が BI の解析には不適切であることを示した。
- Fitting 法によるスペクトルをもとに応答関数の作成を行なった。

7.2　今後の課題

- 今回は segment A に限って評価を行った。今後、全セグメントに対して同様の解析を行い性能を評価する。
- 低エネルギー X 線で顕著に現れるコンスタント成分など、物理的な解釈がなされていない事項がいくつもある。これらについてより詳細に考察し、さらに精度の高いモデルを構築する。
- 打ち上げ後は機上での CCD の劣化状況を確認しながらそれにすばやく対応し、新しい応答関数を提供して行く。

謝辞

本修士論文の作成にあたり、本当に多くの方々から御指導、御協力を賜わりました。この場をお借りして、深く御礼を申し上げます。

特に小山勝二教授にはこの先一生頭が上がりそうにありません。あまりにも出来が悪くて煩わせてばかりでどうしようもない僕を見捨てることなくいつも恐く、いや厳しく御指導頂いて感謝の気持ちでいっぱいです。鶴剛助教授にもみっちりしごいて頂きました。僕が間違ったことを言って鶴さんに馬鹿にされるのが日常的光景になりました。松本浩典助手には実験のイロハから野球のイロハまで、色んなことを教えて頂きました。本論文の校正もして頂きました。期限ギリギリまで終らなくて大変申し訳なく思っています。

常深博教授はじめ、大阪大学の皆様にも深く感謝します。阪大にお邪魔した折りには、林田清助教授に大変丁寧なご指導を賜わりました。一年間 XIS の仕事をしてきて、「林田先生なしには XIS は成り立たない」と確信するようになりました。先生のバイタリティーにはいつも感動しています。鳥居研一助手の優しいご指導にも感謝します。宮田恵美助手には解析ソフトについてわからないことを教えて頂きました。太っ腹な並木さんが大好きです。阪大で実験させて頂いた折りには 3 日間に渡って贅の限りを尽くしました。全て並木さんのおごりでした。同期の勝田君にはソフトの使い方がわからなくなったとき、いつも助けてもらいました。東海林君は独特のテンションで僕を元気づけてくれました。松浦君には忙しい中、実験の手伝いをして頂きました。宮内君と学会で議論したことがこの論文の内容につながっています。本当にありがとう。

宇宙科学研究所の方々にも大変お世話になりました。堂谷忠靖助教授、尾崎正伸助手、村上さんに深く感謝します。

XIS は MIT の方々の手で製作されています。Steve さんには BI の実験前にいろいろとご助言を頂きました。威圧感タップリの Bev さんには鋭い眼光で... 、じゃなくて大量の実験データを送って頂いたほか、メールでの質問にも丁寧に回答して頂きました。

京都大学宇宙線研究室の皆様にも大変感謝しております。特に中嶋さんには実験からデータ解析に至るまで、XIS に関するありとあらゆることを教えて頂きました。いつも相談に乗って下さいましたし、しょっちゅう愚痴も聞いて頂きました。中嶋さんがいなかったら多分この修論はできていません。本当にありがとうございました。高木さんには公私に渡って非常に親身になって頂きました。何度となく解析のヒントを与えて頂き、かなり助かりました。植野さんには M1 のときの観測データ解析で誰よりもお世話になりました。千田さんにも親切なご指導を頂きました。僕の下らないギャグに厳しいツッコミを入れて頂きました。同期の乾君が僕以上にテンパってたおかげで、締め切り間際の連日の徹夜にもなんとか耐えることができました。小野君、兵藤君、僕が先生に怒られるのがそんなにうれしいですか？
γ 線グループの皆さんにも感謝します。中森さんはじめ 223 号室の皆さんは僕の気晴らしにつき合って頂きました。西村君は斜め後ろの席で常に締め切り間際の如く頑張っているので、僕も大変勇気づけられました。西田さん、ラーメンご馳走様でした。またトレーニ

ングに励みます。渡部さんの天然キャラにはいつも心が癒されます。ちらしずしご馳走様でした。もっと僕を癒して下さい。高田さんはもはや神です。プログラミングの知識に乏しい僕に救いの手をさしのべてくれました。それも締め切りの 36 時間前に。グループの境界を超えてお互いに協力し合える (一方的に助けてもらえる) 環境ってすばらしいですね！

最後に、Astro-E2 チームの全ての方々と、 2 台の XIS BI センサーに感謝します。本当にありがとうございました。

関連図書

[1] 片山 和典, 修士論文 (大阪大学 1999)

[2] 片山 晴善, 修士論文 (大阪大学 2000)

[3] 村上 弘志, 修士論文 (京都大学 1999)

[4] 今西 健介, 修士論文 (京都大学 2000)

[5] 河野 誠, 修士論文 (京都大学 2001)

[6] 中嶋 大, 修士論文 (京都大学 2004)

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

[8] 堀田 厚生,「半導体の基礎理論」 技術評論社 2000

[9] 浜松ホトニクス株式会社 「技術資料 FFT-CCD エリアイメージセンサの特性と使い方」(2002)

[10] 宇宙科学研究所 SES データセンター 「科学衛星 Astro-E2 中間報告書 (第 1 分冊)」(2003)

[11] 宇宙科学研究所 SES データセンター 「科学衛星 Astro-E2 中間報告書 (第 2 分冊)」(2003)