Astro-E 搭載 CCD 検出器 XIS と新しいイベント抽出法の研究

村上 弘志
京都大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

概要

X 線観測は、天体の高エネルギー現象を探る手段として、今や天文学に欠かせないものとなっている。これまでいくつもの衛星により、数々の成果があげられているが、 2000 年 2 月、日本は新たに X 線天文学衛星 ASTRO-E を打ち上げる。この衛星には、優れたエネルギー分解能 ($\sim$ 10eV) を持つ XRS、 10–700keV もの広いエネルギー領域をカバーする HXD とともに、 0.4–12keV で撮像分光の可能な CCD カメラ、 XIS が搭載される。 CCD カメラは、現在活躍中の日本の衛星、 ASCA に初めて搭載され、その後アメリカやヨーロッパの次期 X 線衛星にも搭載が決まり、標準的な検出器として使用されているものである。

我々の研究室は、 XIS の高エネルギー側の性能評価を担当している。最終的には応答関数を作成することを目的とし、 8 種類の単色 X 線を当てることで、 ADC 微分線形性などの機能試験やゲイン・エネルギー分解能・量子効率等の性能評価を行った。

XIS は、使用する状況に応じて、いくつかのモードを選択することができる。露出時間の短縮や露出領域を限定するためのものである。その動作試験および性能評価を行い、設計通りの働きをしていることが確認された。

また、 CCD では、 X 線ばかりでなく宇宙線等の高エネルギー粒子も検出されるので、これを除去することが必要となる。宇宙線等のこのバックグラウンドと X 線を選別することをイベント抽出と言う。 ASTRO-E の XIS での性能評価には、 ASCA で使われたのと同じイベント抽出法、すなわち「Grade 方式」が用いられた。これは、 3×3 のピクセル内の電荷分布を調べ、その広がりから X 線と高エネルギー粒子を見分けるものである。

この方法だと、高エネルギー X 線で多く作られる、広がりの大きいイベントが、捨てられてしまう。 ASTRO-E では、データを保存できる量が増え、 5×5 ピクセルの電荷量を知ることが可能となる。そこで、私は 5×5 すべてを利用することにより、広がった X 線イベントも正しく認識する抽出法を探求した。

まず、 ASCA の Grade を発展させ、 5×5 を使った新 Grade 方式を開発し、 Zn の蛍光 X 線 ($\sim$8.6keV) を XIS に照射したデータの解析を行った。その結果、従来の Grade 方式より検出効率を数 % あげることに成功した。次に、 5×5 の電荷分布をガウシアンで fitting する方法で行った。この方法で、新 Grade 方式よりわずかに多い検出効率が実現した。さらに、 fitting 方式ならば、電荷の広がりから、中性領域で吸収された電荷量を戻してやることが可能となり、最終的に 10% 程度の検出効率増加に成功した。

エネルギー分解能・計算時間の短縮などまだいくつか考慮せねばならない課題はあるが、観測の目的によっては、このイベント抽出法は十分有効なものである。

もくじ

図一覧

表一覧

第 1 章

X 線天文学と検出器

1.1 X 線天文学

有史前から人類は星を見てきた。頭上高くにあるのに落下もせず明るく輝く星々は、決して手の及ばぬものとして信仰の対象であったり、事象を占う術であったりした。その後天体観測は天文学として学問の一分野になり、望遠鏡の発明等により進歩してきたが、人間の目に見えるのは非常に限られた範囲の光だけであった。そのため長い間天文学はその可視光で得られる知識のみで進められてきた。 20 世紀に入ると、電波や赤外線での観測も行われるようになり、天体から得られる知識は増大した。さらに 1962 年、ロケット観測により初めて X 線天体が検出され、人類は宇宙の姿を垣間見る新しい手段を手に入れた。これにより X 線天文学が誕生し、これまで日進月歩の発展を遂げてきた。

X 線とは、数百 eV から数百 keV までのエネルギーを持つ電磁波を指す。温度にすると 1000 万度以上に相当し、高温プラズマや、強い磁場からのシンクロトロン放射など、高エネルギー現象により発生する。まず最初に、 X 線の観測によりこれまで明らかにされてきたことを述べる。

1.1.1 これまでの成果

X 線の観測はさまざまな発見をもたらしたが、観測対象別にその概要を述べる。

- 銀河中心

  銀河中心は、銀河面上の物質による吸収により可視光では観測できない。 X 線は透過力が強いためこの領域の観測が可能であり、さまざまな発見がなされた。まず銀河中心は非常に巨大なエネルギーを持つ高温プラズマで覆われていることが分かった。高温プラズマは、銀河中心 $1^\circ \times 2^\circ$ に広がるものと、銀河中心核 Sgr A* の近傍 $2' \times 3'$ の、二種類が存在する。

  また、巨大分子雲 Sgr B2 からは、中性鉄の蛍光 X 線が検出された。これは、この分子雲が強い X 線に照射されて、その照りかえしにより放射していることを示唆してい

る。観測される蛍光 X 線の強度を説明するには、非常に強い X 線が必要となるが、現在そのような天体は見つかっていない。

この高温プラズマと蛍光 X 線の発見は、ともに銀河中心で過去に活発な現象が起きていたことを示すものであり、巨大ブラックホールと考えられている Sgr A* や、スターバーストの活動性を探る手がかりとなる。

- 前主系列星

  星の誕生は分子雲の奥深くで起こるため、未だ明らかでない点が多い。透過力の強い X 線で観測することにより、主系列段階に入る前の、 T Tauri 型星や、さらに生まれたての原始星を直接観測することができ、磁場活動、自転などの情報が得られた。

- 超新星残骸

  超新星残骸は高温プラズマからの熱的放射を強く出しているが、磁場によるシンクロトロン放射で、非熱的な X 線も放射していることが分かった。これは、超新星残骸中で電子及び陽子が加速され大きなエネルギーを持っている可能性を示しており、宇宙線の加速源となるのではないかと期待される。

- 中性子星

  X 線パルサーの観測でサイクロトロン吸収線が発見され、中性子星の磁場強度が分かった。パルス周期の変動からは中性子星の公転周期がわかり、連星系の相手の星の質量から中性子星の質量が計算できる。また、 X 線バーストの光度と温度の関係から中性子星の半径も明らかになった。

  近頃、小マゼラン雲から多くのパルサーが発見され、数千万年程前に SMC で活発な星生成活動が起きたのではないかとされている。

- 銀河・銀河団

  スターバースト銀河から高温プラズマが検出された。また、銀河団も高温プラズマに覆われていることが発見された。温度を観測することで銀河・銀河団の進化を調べることができる。高温プラズマの分布からは、観測されているより大きい質量の存在が示唆され、 dark matter と呼ばれている。

- 活動銀河核

  セイファート銀河やクェーサーなど、中心核で非常に強い X 線を放射している銀河も存在する。これら活動銀河核は、 X 線背景放射の候補とも考えられている。

以上のように、 X 線という新しい手段により我々は宇宙で起こるさまざまな現象を観測し、多くのことを明らかにしてきた。特に高エネルギー現象を直接観測することが可能になったのである。

1.2 検出器

X 線は目で見ることはできないし、当然耳で聞こえるものでもなければ、舌で味わってみたりするものでもない。そのため、何らかの方法で人が認識できる形にしてやる必要がある。その役割を担っているのが検出器である。さまざまな種類のものがあるが、大抵の場合 X 線は電気信号に変換される。それをコンピュータ等で取り込み、イメージや数字として出力するのである。

X 線観測から得られる情報としては、

- 強度
- エネルギー
- 位置
- 時刻
- 偏光

が挙げられる。これらを、広い範囲で正確に測定することが求められる。強度は、明るい X 線源になると、 Sco X-1 など数十 photon/sec/cm^2 に達するものまである。また、暗い天体を観測するためには、感度が良く、有効面積の大きいものが良い。エネルギーは、観測範囲は広いほどいいが、分解能も問題になる。高温プラズマからの熱的な放射は、電離した電子からの多くの輝線を伴う。この輝線を分解することができると、温度・アバンダンスなどの情報が得られる。銀河中心から蛍光鉄輝線が検出されたのも、エネルギー分解能が良くなったためである。位置は、広い視野と空間分解能が問題になる。近接した天体を分離する、また天体が点状であるか、広がっているか区別する、などのことが必要になる。他波長との比較のためには、正確な位置決定も重要である。時刻については、パルサーなどミリ秒単位で変動するものもあるので、これを検出するのが可能な程度の時間分解能が必要となる。最後に偏光は、 X 線領域ではまだ現実的な観測手段はないが、今後の開発が望まれる。

X 線は、大気の吸収により地上からの観測は不可能であるため、ロケット、人工衛星、気球などで大気圏外へ検出器を持ち出す必要がある。このため、重さ等の点での制約もある。これまで使われてきた検出器に関して、その利点と短所を簡単に説明する。 ([1], [2] 参照)

1.2.1 比例計数管

不活性ガスを密封した金属容器の中に細い金属線を張ったものである。金属容器に開けた窓から X 線が入射すると、金属容器中のガスと反応して、 X 線のエネルギーに比例した数の電子が生じる。金属容器と金属線の間には高電圧がかけられているので電子は加速され、さらにガスと反応して二次電子を作りだしながら金属線に達する。その後プレアンプやフィルターアンプを通して、 ADC でデジタル信号に変換され、計算機などに読み込まれる。

軽量で構造が単純で大面積のものを作ることが可能という利点がある。「ぎんが」衛星などに搭載された。

1.2.2 蛍光比例計数管

比例計数管では、二次電子群をつくり出すことで電荷を増幅して X 線を検出していたが、ねずみ算式の電子増幅によるためにエネルギー分解能はあまり良くない。そこで、二次電子ではなく蛍光で増幅を行うようにしたのが、蛍光比例計数管である。

比例計数管と同様、 X 線はガスと反応して一次電子群を生じる。その後、電子は増幅がおきない程度の電場に引かれて発光領域へと移動する。この領域で電子は加速され、ガスを励起して蛍光を発し、その蛍光を光電子増倍管で読みとるのである。

比例計数管の 2 倍のエネルギー分解能を得ることができる。「あすか」衛星の GIS はこの種類の検出器である。また、 ASTRO-E 搭載の HXD(Hard X-ray Detector) は、ガスではなく結晶で光を発生させる結晶シンチレータを使った検出器と次に説明する半導体検出器を組み合わせて、 10–700keV の広い範囲の X 線を検出することが可能である。

1.2.3 半導体検出器

半導体検出器は、ガスではなく半導体で X 線を検出するものである。 hole によって電荷が移動する p 型と電子による n 型の二種の半導体をつなげた p-n 接合の構造をしている。これに逆バイアスをかけると、 hole も電子も存在しない空乏層が生じる。ここに X 線が入射すると hole と電子の組が生じ、これを電気的に読み出すことにより X 線を検出する。

半導体中では一次電子を生じさせるエネルギーがガスより小さく、多くの電子が生じるため、蛍光比例計数管よりさらに数倍優れたエネルギー分解能が得られる。しかし、冷却が必要、大型化が難しい、などの欠点もある。

1.2.4 CCD

Charge-Coupled Device の略。半導体検出器の一種であるが、多く ($\sim 10^6$) の微小な半導体検出器を縦横に並べ、撮像能力を持たせたものである。日本の X 線天文衛星「あすか」に初めて搭載された (SIS)。 AXAF や、 XMM など、次期 X 線衛星にも搭載され、今や X 線検出器の主流となっている。 ASTRO-E には XIS(X-ray Imaging Spectrometer) が搭載される。 XIS は、 0.4–12keV まで検出でき、エネルギー分解能は、 6keV の X 線に対して 130eV 程度である。

バケツリレー方式で電荷を転送していくため時間分解能はあまり良くなく、また、大面積のものを作るのは難しいという欠点もある。

1.2.5 カロリーメーター

X 線が入射するエネルギーを熱に変換し、温度上昇による抵抗値の変化を読みとることで X 線のエネルギーを測定する。その測定方法により、電子の個数の統計揺らぎは生じず、優れたエネルギー分解能を実現できる。 ASTRO-E には、 XRS(X-Ray Spectrometer) が搭載されるが、このエネルギー分解能は、 10eV 程度である。ただし、 65mK まで冷却せねばならず、冷媒である固体ネオンの重量制限のため寿命は二年程度である。ピクセルサイズは 300μm で、 CCD ほど位置分解能は良くない。

1.2.6 X 線反射望遠鏡

検出器ではないが、 X 線を観測するのに重要なものである。 X 線望遠鏡は、入射角を小さくすることで全反射を利用して集光する。回転放物面と双曲面をつなげて鏡をつくり、それを何枚も重ねることにより有効面積を上げる。 ASTRO-E に搭載される XRT(X-Ray Telescope) は、有効面積は 7.0keV で 250cm^2 であり、 XIS 上での 1mm が $0.7224'$ に相当する。

以上のようにさまざまな検出器があり、それぞれ長所・短所がある。 CCD は、エネルギー分解能・時間分解能・位置分解能のバランスが良く、標準的な検出器である。本修士論文では、日本の次期 X 線衛星 ASTRO-E に搭載される CCD 検出器、 XIS について、その性能評価の結果を述べ、さらに検出感度を上げるための、新しい検出方法を探る。

第 2 章

CCD

2.1 概要

CCD は撮像素子であり、通常一つの素子は 100 万個ほどのピクセルと呼ばれる単位から成り立っている。1 つのピクセル自体 X 線等の光を検出できるようになっており、このピクセルからの情報を読み出すことで撮像を行う。CCD の特徴は、この 100 万個におよぶピクセルの情報を読み出す方法にある。ピクセル数の少ない素子では、ピクセル毎にプレアンプをつけて読めばいいが、100 万個になると容易ではない。このため、CCD では検出器であるピクセル自体を情報の輸送路として利用し、バケツリレー方式で情報を伝達させる。この方式をとることで、少ない読み出し口で各ピクセルの情報をすべて読み出すことができる。

以下、CCD の構造と CCD に X 線が入射されて電気信号として取り出されるまでを順を追って説明する。概略を言うと、

1. CCD には逆バイアスがかけられ、空乏層が形成されている。
2. ここに X 線が入射すると、光電効果により電子雲が生じる。
3. 生じた電荷は、電界により電極へ引き寄せられる。
4. この電極にかけられる電圧は、ある決まったパターンで変化するようになっており、電子群は電極から電極へ転送されていく。
5. その後、読みだし口から読み込まれて ADC でデジタル信号に変換される。
6. デジタル信号は、ゼロレベルを引くなどした後、X 線のエネルギーに変換される。

という順番である。以後、それぞれの段階について詳しい説明を行う ([3], [4] 参照)。

2.1.1 構造

CCD の構造は、大きく二種類に分けられる。一つは MOS 構造で、もう一つは p-n 接合からなるものである。これまで使われてきた ASCA の SIS や、 ASTRO-E の XIS 等は MOS 構造のものであるが、 XMM では MOS と p-n の両方が使われる。ここでは MOS 構造の CCD のみについて説明する。

MOS とは、 Metal-Oxide-Semiconductor の略である。すなわち、導電体である金属、絶縁体の酸化物、そして半導体のシリコンを重ねた構造をしている。シリコンは、不純物を加えて p 型か n 型にしたものである。これに電圧を加えると、酸化物は絶縁体であるので電流は流れないが、シリコン中の自由電荷 (p 型なら hole) が移動する。すると自由電荷のない部分ができる。これが空乏層である。空乏層には移動できない電荷が残っているが、それらの電荷と引き寄せられた自由電荷の間には、外部からかけられているのとは逆向きの電界が生じる。これが外部からの電界と釣り合うまで自由電荷が移動するため、自由電荷が引き寄せられた部分では電場は生じない。この領域を中性領域という。空乏層の厚さは外部電界の大きさによって決まる。

実際の CCD の断面図を図 2.1に示す ([5] 参照)。最上部には電極がある。その他空乏層に達するまでには、 SiO_2 の層などがあるが、これらをゲート構造と呼ぶ。また、ピクセルの境にはチャンネルストップと呼ばれるものもある。これらは、低エネルギーの X 線を吸収してしまうため、厚過ぎてはいけない。ゲート構造については、 4.6.2 節で詳しく述べる。ゲート構造の下は空乏層であり、そのさらに下に中性領域がある。各領域で X 線は吸収され電子を発生するが、検出器として使えるのは、空乏層の部分である。

2.1.2 X 線 → 電子雲

エネルギー E(eV) の X 線が CCD に入射すると、空乏層中の Si 原子に光電吸収され、 E が K 吸収端以上の場合、最内殻の電子をはじきとばす。この時、ある決まったエネルギー E_k が必要となるので、 $E-E_k$ のエネルギーの電子が生じることになる。この光電子は、半導体中で価電子帯にいる電子を励起し、電子と hole の組をつくり出す。一方、電子をはじき飛ばされた Si 原子は、多くの場合 E_k のエネルギーを持つ Auger 電子を放出し、これも電子 -hole 対を作る。一対をつくり出すのには、およそ 3.65eV のエネルギーが必要であるので、最終的には、 E/3.65 個の電子 -hole 対が生じる。

しかし、電子をはじき飛ばされた Si 原子から、数 % の確率で Auger 電子の代わりに Si の K 核 -L 核の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。この時、この X 線が同じピクセル内の Si 原子に再び吸収され、そのエネルギーに相当する電子 -hole 対が生じれば問題ないが、他のピクセルで吸収されてしまった場合、 $E-E_k$ の X 線と、 Si の蛍光 X 線の、二つが検出されることになる。それぞれエスケープイベントと、 Si 蛍光 X 線イベントと呼ばれる。

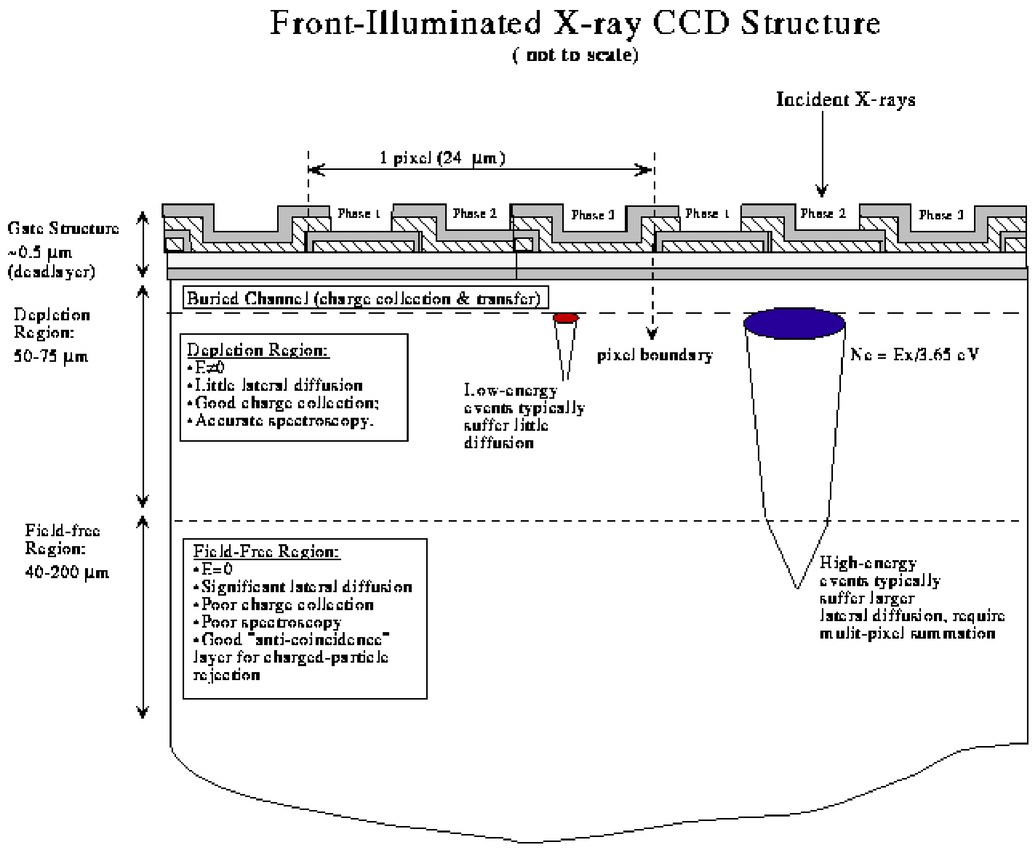


Figure 2.1: CCD の断面図。上から電極などのゲート構造、空乏層、中性領域となる。

2.1.3 電子雲のふるまい

半導体中で、 X 線により電子雲が形成されると、以後電子は、

- ドリフト
- 拡散
- 再結合

の作用に応じて運動する。

ドリフトとは、電荷が電界中で受ける力によりある一定の方向に動くことである。すなわち、電界の方向に z 軸をとると、

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

という運動方程式に従う。ここで、 e は素電荷、 $E(z)$ が電界、 m_e が電子の質量である。半導体中では、電子は原子との衝突を繰り返しながら運動するため、この式は、衝突と衝突の間の平均時間、 τ_c を用いて、大雑把には

$$-eE(z)\tau_c \sim m_e v_e$$

となり、さらに

$$v_e = -\mu_e E(z) \tag{2.1}$$

と書くことができる。この、 $\mu_e \equiv e\tau_c/m_e$ は、電子移動度と呼ばれるものである。 Si 中では電子の平均自由行程 $l \sim 10^{-5}$cm、室温での平均速度 $v_{th} = \sqrt{kT/m_e} \sim 10^7$ cm/s から[1]、 $\tau_c \sim 10^{-12}$ s なので、電子移動度は 10^3cm^2/V/s 程度の値をとる。 XIS の場合は不純物濃度が小さく $\tau_c \sim 5 \times 10^{-12}$ s なので、 $\mu_e \sim 8000$cm^2/V/s である。

次に拡散は、拡散方程式

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t} = D\nabla^2\rho \tag{2.2}$$

により表せる。 ρ は電子の密度分布であり、 D は拡散係数である。この解は、

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{(4\pi Dt)^3}} \exp\left(-\frac{x^2+y^2+z^2}{4Dt}\right) \tag{2.3}$$

となるが、これは $1\sigma = \sqrt{2Dt}$ の Gaussian である。したがって、電子は時間とともに広がっていく。また、

$$D \equiv v_{th} l \tag{2.4}$$

であり、電子移動度を用いて、

$$D = \frac{kT}{e}\mu_e$$

と表せる。先の $\mu_e \sim 8000$cm^2/V/s の値を代入すると、 -90℃で 126cm^2/s の値が得られる。

最後に再結合であるが、 Si では直接再結合はほとんど起こらず、不純物を介した間接再結合が主要となる。この不純物の個数密度を N_t、捕獲断面積を σ_p $(\sim 10^{-15}$ cm$^2)$ とすると、再結合のタイムスケールは、

$$\tau_p = \frac{1}{v_{th}\sigma_p N_t} \tag{2.5}$$

である。電子の個数は、 $\exp(-t/\tau_p)$ に比例して減少する。電子の拡散する広がりは、 $\sqrt{2Dt}$ と表せたので、再結合までに電子が拡散する典型的な距離、拡散長 L は、

$$L = \sqrt{D\tau_p} \tag{2.6}$$

として定義される。

[1] 実際には CCD は冷却して使われるが、 -90℃でも、 $v_{th} \sim 5 \times 10^6$ cm/s である。

実際の半導体中での電子の振舞いを計算するためには、これらの運動を足し合わせ、さらに境界条件を考えて方程式を解かなければいけない。だが、だいたいの見積もりをする場合には、各方程式を解き、それぞれのタイムスケール等を比較するだけで充分である。

空乏層中は、外部からの印加電圧により電界がかかっている。ここで X 線が吸収された場合、ただちに電極までドリフトし、露出時間が終わり次第転送されていく。

2.1.4 電荷転送

電荷転送は、電極ごとに電圧を変化させて次々に隣へ電荷を受け渡していく方法で行われる。これには、次の 3 つの方式がある。図 2.2に、それぞれの転送方法での電極にかけられる電圧と、それによるポテンシャル、また電子の動きを摸式的に示す。

- 三相方式

  1pixel 当たり三つの電極があり、順番に電圧をかけてやることで電荷を移動する。電圧のパターンによって、逆方向への転送や、蓄積する電極の位置を変更することなど可能であり、融通がきく。 XIS は、この方式を採用している。

- バーチャルフェーズ方式

  あらかじめ正の電荷をもつ不純物を加えておき、 1pixel あたり一つの電極だけで転送が行えるようにしたものである。電極は pixel の半分しか覆っていないため、低エネルギーの X 線に対する感度が増加する。しかし、転送は一方向にしか行えない。

- 二相方式

  不純物を加えた上に、 1pixel 当たり二つの電極で転送を行うようにしたものである。駆動が簡単なのが利点である。

このような方法で転送されていくわけであるが、転送中に X 線を受けると、間違った位置で X 線を検出してしまうことになる。 X 線観測用 CCD では、通常これを避けるために受光領域と遮光領域を設けている。露出時間が終わると、受光領域で蓄積された電荷は遮光領域へ移され、その後 1pixel ずつ読み出されていく。遮光領域の配置は、次の二つの方式がある。図 2.3にそれを示す。

- フレームトランスファー方式

  受光領域の隣にもう一つ同等のピクセル配置をもつ遮光領域をつなげたもの。露出時間が終了すると、受光領域の電荷がそのまま遮光領域へ移動する。受光領域ではすべてのピクセルが有効に使えるという利点があるが、遮光領域への転送は、一列ずつ行われるため、時間がかかる。この間に X 線が入射すると先に述べたように位置を正しく検出しない。 XIS はこの方式。

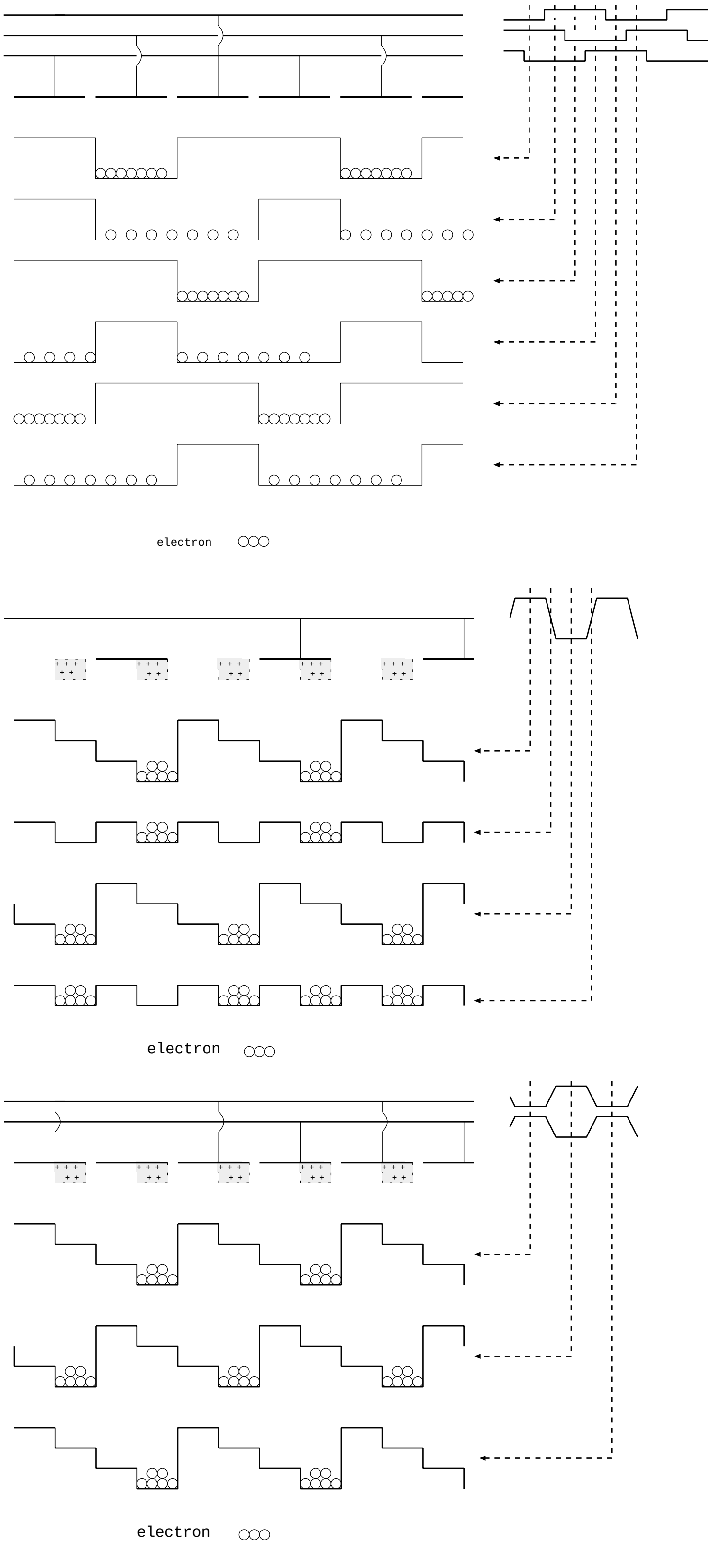


Figure 2.2: 電荷の受け渡し方法。上から三相方式、バーチャルフェーズ方式、二相方式。

- インターライン方式

  一列ごとに受光領域と遮光領域が並んでいるもの。受光領域から遮光領域への転送は素早く行なえるが、有効な受光面積は小さくなってしまう。そのため、光量が多い場合に適している。

このどちらの方式にしても、遮光領域に移った電荷がすべて読み出されるまでは次のフレーム (露出一回分のデータ) を読み出せないため、露出時間は、この読みだし時間で制限される。

2.1.5 読みだし口 →ADC

読みだし部分 (転送されてたどり着く最後のピクセル) には、 FET がつながっている。電荷は、ここで電圧に変えられ、プレアンプ、フィルターアンプなどを経て ADC へと送られる。デジタル信号となった後は、コンピューター等に取り込まれ、データの処理が行われることとなる。

2.1.6 データ処理

ADC でデジタルに変換された値 (PH 値; Pulse Hight 値) には、 X 線による電荷以外のもの (暗電流等; 次節参照) が含まれている。そこで、あらかじめ X 線が入射しない時の出力、ゼロレベルを調べておき、 PH 値からゼロレベルを引いた値が解析に使われる。この値は、ピクセルレベルと呼ばれる。

ピクセルレベルは、 X 線のエネルギーを表すデジタル信号であるが、一つの X 線イベントが複数のピクセルにまたがっている場合がある。この場合は、関係するピクセルのピクセルレベルをすべて足し合わせなければ、正しく X 線のエネルギーを表すことにはならない。その一方で、宇宙線によるバックグラウンド等は除かなければならない。この二つの作業、すなわち X 線だけを選び出し、ピクセルレベルを足し合わせて、正しく X 線のエネルギーを求めることをイベント抽出と呼ぶ。ピクセルレベルを足し合わせて最終的に得られた値を、イベント値と呼ぶことにする。

2.2 CCD の基本性能

CCD を検出器として使う場合、いかに正確に、いかに効率良く X 線を検出するか、が優劣を決定する。そこで問題になるのは、 CCD チップ本体および電子回路部からのノイズや、ADC の線形性等である。 ADC で読み込まれたデータは、ゼロレベルを引き純粋な電荷の量にした後、エネルギーに変換される。それぞれの段階で、エネルギー情報に対し、不確定性が生じる。

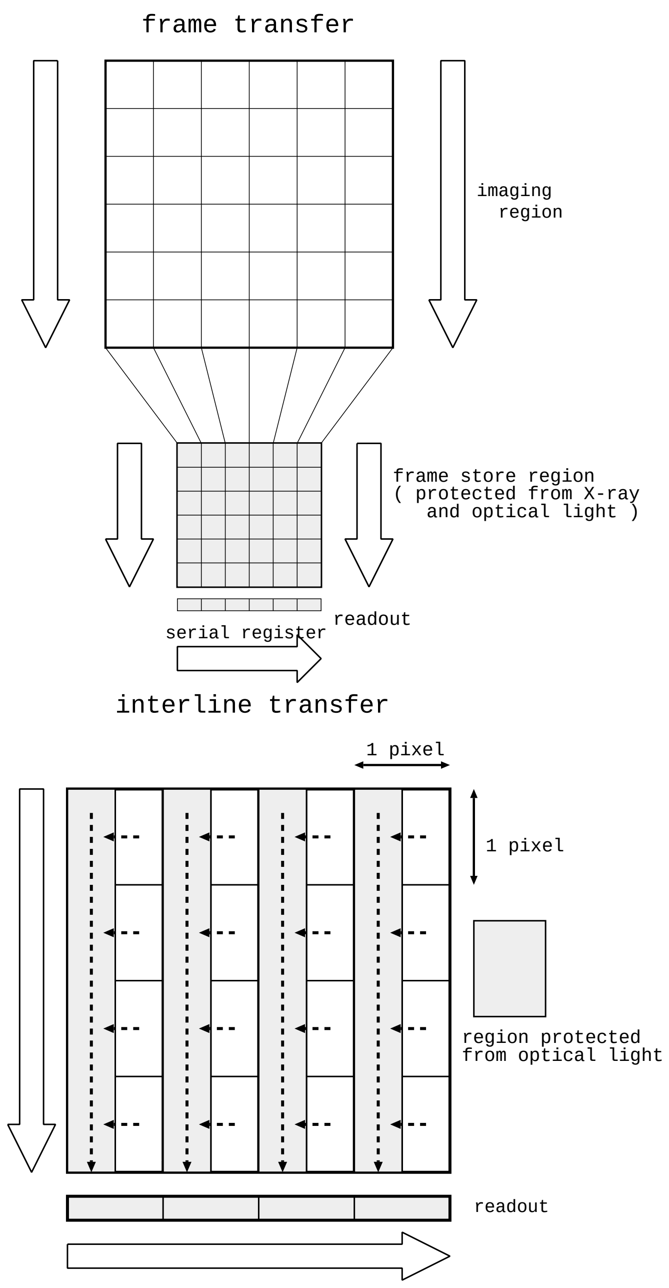


Figure 2.3: フレームトランスファー方式 (上) と、インターライン方式 (下)。網かけした部分が遮光領域である。

2.2.1 CCD で問題となるもの

1. 読み出しノイズ

   読み出しノイズとは、 CCD から読み出された後の信号に、電子回路でのるノイズのことである。この大きさを調べるには、 CCD からの出力が完全に「0」の時の信号を調べれば良い。そこで、通常 CCD の実際のピクセルの数より多く読み出しが行われ、対応するピクセルの存在しない信号を得る。これを over clock region といい、水平方向に多く読み出す HOC (Horizontal Over Clock) と、垂直方向に多く読み出す VOC (Vertical Over Clock) の二種類がある。

2. 暗電流

   X 線が入射しないピクセルでも、出力は完全に 0 になるわけではない。 X 線ではなく熱により励起される電子が存在するためである。これは、ノイズとして信号にのるだけでなく、ゼロレベルのゆらぎとしても問題になる。 X 線の入射しないピクセルからは、読み出しノイズと暗電流のたし合わされたものが出力される。これがデータ解析の時にゼロレベルとして引かれるのである。

   暗電流の大きさは、温度の関数として表される (式 4.1参照)。

3. 光洩れ

   X 線 CCD は、可視光も感知する。そのため、 X 線以外の光は極力入射しないようにして使用しなくてはいけない。それでも洩れ入って来た場合は、光の当たっている領域を除去して解析が行われる。もしくは、光量が少ない場合は光洩れに相当する分もゼロレベルに含め、ピクセルレベルを計算する。

4. 電荷転送非効率

   半導体中に不純物が存在すると、電子がそこでトラップされてしまう場合がある。そのため、転送中に電子群の一部が失われてしまう。これを表す量が、電荷転送非効率 (CTI; Charge Transfer Inefficiency) である。

5. 積分非線形性

   X 線により生じる電荷の量は、 X 線のエネルギーに比例する。したがって、 ADC で変換されゼロレベルを引いた信号値も、理想的にはエネルギーに比例するはずである。得られた信号とエネルギーの関係の直線からのずれを示すのが、積分非線形性である。これは、主に ADC の性能で決まる。

6. 微分非線形性

   ADC の下位のビットが正確でないと、 channel の幅の違いによりある一定の周期で信号にガタガタが生じる。これが微分非線形性である。これも ADC が原因となる。詳しくは、 4.2節参照。

7. パイルアップ

   露出時間内に一つのピクセルに複数の X 線が入射すると、その二つの X 線を分離することは不可能であり、二つの X 線を加えたエネルギーをもつ一つの X 線として検出される。これがパイルアップの問題である。 X 線強度が高い時に問題となる。

8. 白傷・黒傷

   ピクセル中に格子欠陥が生じると、暗電流の大きさが異常に大きくなり常に X 線を受けているように見えてしまう。これが白傷である。逆に格子欠陥が電荷を捕らえ、 X 線が入射しても弱い信号しか検出されないのが黒傷である。このようなピクセルは、解析の際に除いてやることが必要である。

2.2.2 性能を示す指標

CCD の性能を表すには、エネルギー分解能、ゲイン、量子効率、読み出し速度という量が使われる。 CCD を使用する際には、これらをできるだけ正確に知っておくことが必要である。以下、それぞれを説明する。

1. エネルギー分解能

   2.1.2節で説明したように、エネルギー E の X 線が入射した場合平均 (E/3.65eV) 個の電子が生じる。しかし、これには統計的なゆらぎが生じ、また暗電流、読みだしノイズによる不確定性も加わるため、最終的に得られる信号は、電子数に換算して

$$\delta\mathrm{E} = \sqrt{(N^2 + F \cdot \frac{\mathrm{E}}{w})} \quad \mathrm{electron} \tag{2.7}$$

   だけの幅を 1σ とするガウシアンになる。ここで、 N は読みだしノイズと暗電流によるノイズの和であり、 F はポアッソン分布によるゆらぎの二乗を単位とした電子数の不確定性を表す量、ファノファクターである。 Si では F $\sim$ 0.12 なので、ポアッソンよりエラーは小さい。

   このゆらぎに相当するエネルギーの大きさが、エネルギー分解能である。普通は半値幅 (Full Width at Harf Maximam; FWHM) で表されるので、 2.7式の $\sqrt{8\ln 2}$ 倍した電子数をエネルギーに直したものとなる。近接した輝線を分離できるかどうか、などに関わる量である。

2. ゲイン

   2.2.1節で述べたように、 X 線のエネルギーと出力される信号とは、理想的には比例する。そこでエネルギーと出力信号との関係を直線で表す。これが検出器の使用範囲でどれだけ正確であるかによって、 X 線のエネルギーの誤差が決まる。

3. 量子効率

   入射した X 線のうち、検出できる割合を示すものである。すなわち、検出効率 Q_I は、

$$Q_I = \frac{\mathrm{CCD}\text{で検出された光子数}}{\text{入射光子数}}$$

   で定義される。

   低エネルギー側では、空乏層の手前の電極やフィルターによって吸収されてしまうことで検出効率は落ちる。また、高エネルギー側では、空乏層をつき抜けてしまうことで検出効率が落ちる。これらを考慮すると、検出効率は、

$$Q_I = \exp\left(-\int \lambda(\mathrm{E}, l)dl\right) \times [1 - \exp\left(-\lambda_{\mathrm{Si}}(\mathrm{E})\mathrm{D}\right)] \tag{2.8}$$

   D : 空乏層厚
   l : 光子の軌跡に沿った長さ
   λ(E,l) : 電極など、遮断物の吸収係数
   λ_{Si}(E) : シリコンの吸収係数
   となる。

4. 読み出し速度

   2.1.4節にあるように、 CCD の露出時間は読み出し速度によって制限される。したがって読み出し速度は速いほど良いが、実際には ADC の性能やエネルギー分解能との兼ね合いで読み出し速度が決まる。

以下、 XIS の性能を評価する際には、主にこれらの量を測定する。

第 3 章

XIS

X 線天文学は今や天文学のなかで重要な地位を占める。今後も高エネルギー分解、高空間分解、大有効面積などの特徴を持つ衛星が次々と打ち上げられ、さらなる成果を挙げることが期待される。

日本は、これまで「はくちょう」、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」の衛星を打ち上げ、 1.1.1節に述べたものに代表される、多くの成果を挙げてきた。次は、 2000 年 2 月に ASTRO-E の打ち上げが予定されている。 ASTRO-E には、 1.2節で述べた XRS、 XIS、 HXD が搭載される。 XRS、 HXD はそれぞれ、高エネルギー分解能、広いエネルギー帯域で検出可能、という優れた特徴をもつ。しかし、標準的な検出器として、 0.4–12keV の X 線を、大有効面積かつ良い空間分解能で観測できる XIS の役割も大きい。

XIS のシステムは、センサー、アナログ回路と温度制御を行う AE/TCE (Analog Electronics / Thermal Controller Electronics)、および DE (Degital Electronics) からなる。以下、それぞれについて説明し、その後 XIS でのデータ処理法を述べる。

3.1 センサー

センサーは S0–S3 の 4 台ある。 CCD チップと TEC (Thermal Electric Cooler) を含むベース部と、フード、 OBF(Optical Blocking Filter) 等からなるボンネット部に大きく分けられる (図 3.1)。

3.1.1 ボンネット

ボンネット部の断面図を図 3.2に示す。ボンネットの役割は、まず第一に X 線以外の光が洩れ込んで来るのを防ぐことである。そのため一番上にはフードがある。フードは光の入射する角度を制限し、さらに内壁で反射した光が入って来ないよう、バッフルがついている。望遠鏡からも X 線ばかりでなく可視光が入射してくるが、これを遮断するのは OBF である。これは、 1000Å の厚さのポリイミドの両面に Al を 1000Å 程度コーティングしたものである。これにより可視光を 1 万分の 1 以下にし、 X 線は O の K 輝線で 50% 以上透過す

るように設計されている。

センサー内部は、打ち上げ時に OBF に加わる力を低減するため真空に保たれる。そのため、ボンネットにドアとバルブがついている。打ち上げ時にはどちらも閉まっているが、宇宙空間に出た後すぐにバルブを開き、センサー内部を高真空にする。これは、打ち上げ時に空気が洩れてボンネット内部に入った場合、そのままドア開けすると OBF に力が加わってしまうのでそれを避けるためである。その後衛星の高度を上げる時に、噴射ガスによるコンタミを防ぐようにバルブを閉め、軌道にのってから再びバルブを開きドア開けを行う。ドアは、アクチュエータ (ヒーターで熱を加えることにより膨張するもの) によって開けられるが、その後再び閉めることはできないし、する必要もない。ドア開け後は、センサー内への光の洩れ込みを防止するため、バルブは閉められる。真空度のモニターのため、ボンネットには圧力センサーがついている。また、圧力センサーの較正用と、アクチュエータの動作モニターのための温度センサーも二個据え付けられている。

他に、 CCD の劣化により性能が変化した場合に基準とするための較正用線源として、 ^{55}Fe が取り付けられている (3.4節参照)。

3.1.2 ベース

CCD チップはベース部に取り付けられる。 CCD の裏面には TEC が取り付けられている。これは、 3 台のペルチェ素子からなり、 CCD を -90℃まで冷却する (Cooling mode)。

TEC は、逆に CCD を温めるのにも使われ (Annealing mode)、室温程度まで上昇させることが可能である。 CCD の温度を上げることで、チップに付着した水蒸気などをとばすことができる。

3.1.3 CCD チップ

CCD 素子は、ピクセルサイズ 24μm で 1024×1024 ピクセルの撮像領域をもつ。したがって、受光部はおよそ 25mm 四方の正方形である (図 3.3)。この受光部は、 256×1024 ピクセルを 1 セグメントとした、 4 つのセグメントにわかれている (3.4節参照)。読み出しはこのセグメントごとに行われるので、すべてのピクセルを読み出すのにかかる時間は 6.4 秒と短くてすむ。最も一般的ですべてのピクセルを読み出す Normal モードでは、 8 秒を 1 フレームとしている。すなわち、時間分解能は 8 秒である。しかし、 Window オプション、 P-sum モード等を使うことにより短い時間分解能での観測も可能であり、露出時間の変更もできる (3.3.2節参照)。ただし、この場合はイメージの一部しか読み込まないなど何かの性能を犠牲にすることになる。

XIS で検出可能な X 線のエネルギー範囲は、低エネルギー側は OBF と電極での X 線の吸収の大きさで決まり、高エネルギー側は、空乏層厚で決まる。おおよそ 0.4–12keV である。読みだし雑音は、 -90℃で使用時には電子換算で約 3 個 (RMS)、すなわち X 線のエネルギーに換算して 11eV 程度 ([6] 参照) であり、 6keV でのエネルギー分解能は 130eV (FWHM)

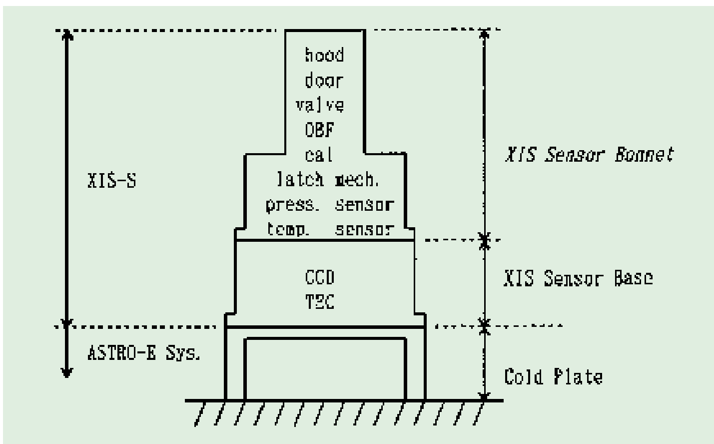


Figure 3.1: XIS センサー

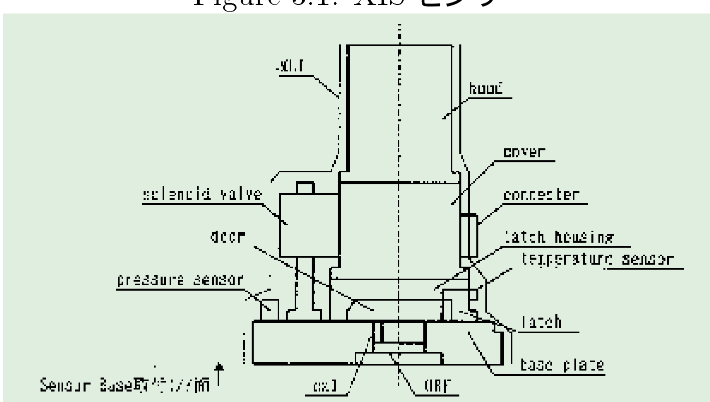


Figure 3.2: ボンネット部

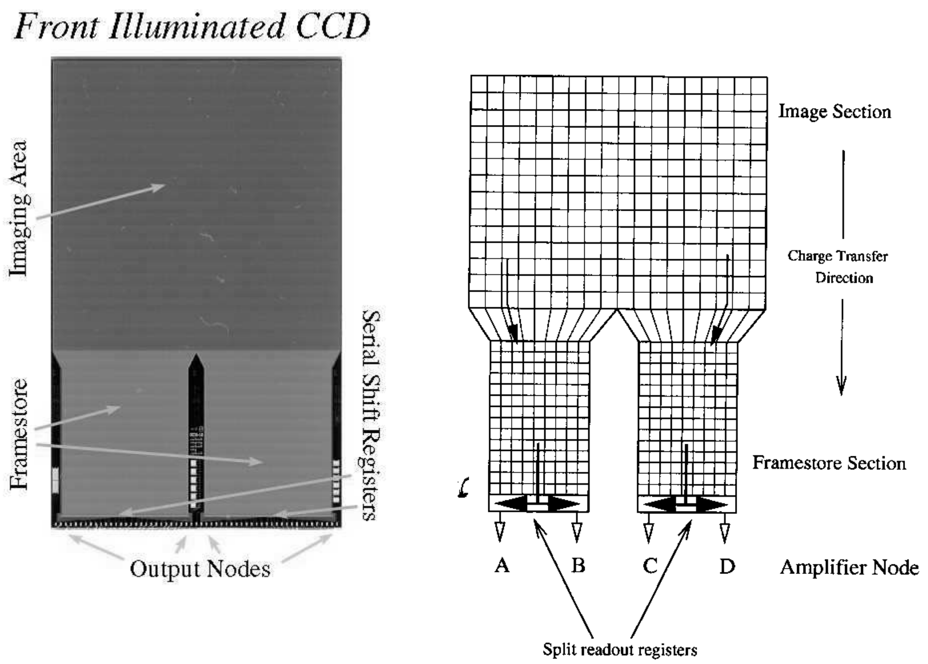


Figure 3.3: CCD チップを真上から見た図。左: 写真 右: 読み出しの順番

である。性能を表 3.1にまとめておく。

3.2 周辺回路

3.2.1 AE/TCE

AE/TCE は、 S0,S1 を受け持つ AE/TCE01 と、 S2,S3 の AE/TCE23 の 2 系統がある。それぞれチップごとにコントロールカード、ドライバーカード、ビデオカード、 TCE カードの 4 セットからなる。この 4 つはチップごとにあるのだが、二組が一つの回路箱に収められ電源も共通なのでまとめてよばれるのである。

コントロールカードは全体の制御、および DE とのインターフェースの働きをする。ドライバーカードは CCD へ駆動信号を送り、 CCD からのアナログ入力信号がビデオカードで処理される。この二つは、デジタル $\leftrightarrow$ アナログの変換を行っているのである。 DE から送られてきたデジタル信号がドライバーカードでアナログ電圧の駆動パターンに変換され、また CCD からのアナログの出力がビデオカードの ADC でデジタルに変換され、コントロールカードを通じて DE に送られる。 CCD からの出力は、 signal level と floating level の差として現れるが、 XIS ではこの二つのレベルを同じ一定時間ずつ積分し、その差をとって出力する。

最後に、 TCE カードは TEC と信号をやりとりして、温度の制御とモニターの役割を果

Table 3.1: XIS の性能諸元

項目	性能
転送方法	三相方式、フレームトランスファー
有効面積	$\sim$25mm×25mm
有効画素数	1024×256×4
画素サイズ	24μm×24μm
有効エネルギー範囲	0.4 ~ 12keV
時間分解能	8 秒 (Normal/Burst モード)
エネルギー分解能	130eV (FWHM) @ 6keV
読み出し雑音	$\sim$ 3 electrons (RMS)
動作制御温度	-90 ~ -80℃

たす。

3.2.2 DE

DE は、PPU (Pixel Processing Unit) と MPU (Main Processing Unit) からなる。PPU は AE0–3 に対応して PPU0–3 の 4 つある。

ここでは、ピクセルごとに出力される PH 値からゼロレベルを引いてピクセルレベルを算出し、イベント検出を行う (具体的な方法は、3.3節参照)。その後テレメトリフォーマットに編集してデータプロセッサ (DP) へ送出する。

3.3 データ処理

データ処理は、まずゼロレベルを引いてピクセルレベルを出し、それがある値 (イベント閾値) を越えているピクセルがイベントとして検出され、イベント値が計算される。ただし、PH 値の出力方法はいくつかのモードがあり、処理の方法も異なる場合がある。([7] 参照)

3.3.1 ピクセルごとの処理

AE でデジタルに変換された信号は、ゼロレベルを引いて X 線のエネルギーに対応する量になる。

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

である。まず、この各々の定義を述べる。

1. PH データ

AE から読み出された生データである。3.2.1節で説明したように、CCD からの出力がデジタルに変換されたもの。

2. ダークレベル

   ピクセル毎の PH データのゼロレベルを示す値。暗電流と読みだしノイズの大きさを表すためものである。観測に入る前や、観測中でもコマンドに従い更新される。4, 8, 16, 32、いずれかの回数の撮像を行い、X 線イベントの入っていない (PH データが、ダークの上限として設定した値より小さい) ものを平均化することで求められる。この値を変更するモードは、DarkInitialize と DarkUpdate があるが、前者はすべてのピクセルの値を初期化してしまってからダークレベルを決定するのに対し、後者はそれまでのダークレベルの値に光洩れ量を補正した値を元にダークレベルが決定される。

   また、ダークの更新の際にはホットピクセルも選び出され、その位置情報が保存される[1](3.3.2節参照)。

3. 光洩れ量

   衛星が地球の周回軌道上で日陰から日照あるいは日照から日陰に変わった時などは、観測対象以外からの可視光線の洩れ込みにより PH データが一様に変化する場合がある。この変化は素早いので、ダークレベルの更新では対応できない。

   光洩れ量は、一つのセグメントを 1×1 から 4×16 の領域に分割し、その領域毎に毎フレーム計算される。その値は次のフレームに反映されるが、テレメトリにも出力されるので後から補正することも可能である。光り洩れ量は、クロックモード (3.3.2節参照) が Normal/Burst の時のみ計算され、P-sum の時には行われない。したがって、Normal/Burst ではゼロレベルとして引かれるのはダークレベル + 光洩れ量であり、P-sum ではダークレベルだけである。

4. バイアスレベル

   HOC 領域の PH データの平均値である。読み出しノイズに対応している。ダークレベルに含まれるので、ピクセルレベルの処理には使われないが、AE 内の回路のモニターとして必要に応じて出力される。

3.3.2 モード

XIS には、読みだし方法 (クロックモード) と 1 つのイベントあたり出力される情報 (エディットモード) の二種類のモードがある。

クロックモードには、次の 3 つがある。

---

[1] 1 セグメント当たり 1024 個を越えた時は、個数のみの情報が得られる

1. Normal モード

   CCD 上のすべてのピクセルデータをそのまま読み出すモード。以前述べたように、この場合の露出時間は 8 秒であり、時間分解能も 8 秒になる。

2. P-sum(Parallel-sum) モード

   縦方向に適当な数のピクセルのデータを加算してから蓄積領域に転送するモード。加算ライン数は、 64, 128, 256 ラインから選べる。縦方向の転送は、一度に一列すべてを転送できるので転送時間は短くてすみ、撮像時間も極めて短くできる。蓄積領域の電荷を読みだす時間は変わらず 8 秒とするので、 1 ライン当たりの撮像時間は、 8/1024∼8 ミリ秒であり、時間分解能も同様に短くなる。そのかわり、縦方向に射影したイメージしか得られず、位置情報は犠牲になる。「あすか」衛星 (以後 ASCA) の CCD 検出器 SIS のファーストモードに対応する。

3. Burst モード

   すべてのピクセルをそのまま読み出すという点ではノーマルモードと同じだが、 8 秒間の露出のうち前半の何秒かの分は、空読みして捨ててしまう。そのため実効的な露出時間が短くなり、 Normal モードでは Telemetry がいっぱいになってしまうような明るい天体でも観測できる。ただし、全観測時間の一部しかデータ取得に使われていないことになる。また、時間分解能は 8 秒のままである。

Normal/Burst モードには、さらに Window オプションをつけることができる。これは、イメージの一部だけを読むものであり、露出時間、時間分解能ともに短くなる。限られた範囲のイメージしか得られないが、パイルアップせずに明るい天体を観測することが可能になる。

テレメトリに出力される情報は、エディットモードで決定される。次の 8 つのモードがある。

1. 5×5

   イベントの座標と、そこを中心とする 5×5 ピクセルのピクセルレベルが出力される。最も情報量が多い。

2. 3×3

   イベントの座標と、そこを中心とする 3×3 ピクセルのピクセルレベルが出力される。それに加えて、外周の 16 ピクセルのうち、スプリット閾値 (3.3.3節参照) を越えたものの位置情報と、越えなかったピクセルのピクセルレベルの合計が出力される。

3. 2×2

   イベント中心の上下左右の 4 ピクセルのうち、ピクセルレベルの一番高いものと、その対照位置以外で次に大きいピクセルレベルを持つものを選び、この二つのピクセル

を含む 2×2 ピクセルすべてのピクセルレベルが出力される。その周りのピクセルについてはスプリット閾値を越えたかどうかの情報のみ出力される。

4. Timing

   P-sum モードで使用される。座標と、イベント中心とその左右でスプリット閾値を越えたピクセルのピクセルレベルの和が出力される。また、 Grade(3.3.3節参照) も出力される。

5. DarkInitialize/DarkUpdate

   ダークレベルを更新した後、ホットピクセルの座標とそのダークレベルが出力される。P-sum モードでは、 DarkUpdate はイベント検出と並行して行われるため、出力される情報は Timing モードのままである。

6. Frame

   1 フレーム分、すべてのピクセルの PH データが読み出される (Window オプション使用時は、 CCD 全体ではなく限られた範囲のすべてのピクセルのデータ)。

7. Dark Frame

   その時点での、全ピクセルのダークレベルが出力される。

クロックモードとエディットモードで、組合せが可能なものを表 3.2に示す。

Table 3.2: エディットモードとクロックモードの組合せ

	Normal	Parallel Sum	Burst
5×5	◎	×	◎
3×3	◎	×	◎
2×2	◎	×	◎
Timing	×	○	×
Dark Init	◎	○	◎
Dark Update	◎	×	◎
Frame	◎	○	◎
Dark Frame	–	–	–

◎ : window オプション対応、○ : window オプションなし対応、× : 対応せず、 – : clock mode とは無関係な処理

3.3.3 イベント抽出法

これまでの手順でイベントとされてきたのは、イベント閾値を越えるピクセルレベルをもつピクセルである。しかし、 2.1.6節で述べたように、この中から X 線以外のイベントを取り除き、またいくつかのピクセルレベルをたし合わせて、イベント値を求めてやらねばならない。 XIS では、 ASCA の SIS と同様にイベント毎に Grade 付けし、それにしたがってイベント値を求める方法がとられる。

この Grade 方式は、 X 線の広がりのパターンによって Grade 0–7 に分類する方法である。中心ピクセルのまわりに、ゼロレベルゆらぎより明らかに大きいピクセルレベルをもつピクセルがあれば、これは電荷が中心のピクセルから洩れ出しているためと考えられる。そこで、ある適当な値、スプリット閾値を設定し、イベント中心のまわり 3×3 ピクセル内でこの閾値より大きいピクセルレベルを持つものを選び出す。そのパターンにより、図 3.4の基準にしたがい Grade が決定される。 Grade 0–6 のどれにも当てはまらないのが Grade 7 であり、 X 線のイベントとされるのは、 Grade 0, 2, 3, 4, 6 である[2]。また、イベント値も Grade 毎に決められた方法でピクセルレベルを足し合わせて求められる (図 3.4の網かけの部分が加えられる)。 Timing モード時の Grade 付けの方法は、図 3.5に示した。

3.4 SIS からの改良点

ASCA 衛星の SIS は、初めて X 線天文衛星に搭載された X 線 CCD カメラであったが、それゆえ打ち上げ後さまざまな問題が生じた。 XIS では、その経験を活かし、以下の点を改良した。

1. 動作温度

   ASCA の SIS はおよそ −65℃で動作するよう設計されていた。しかし、この動作温度では CCD の劣化により暗電流が増え、エネルギー分解能が悪くなった。 XIS は、 −90℃まで冷却することにより暗電流値を低く抑える。

2. 較正用線源

   SIS は劣化後ゲインも変化したが、それを較正するのは困難であった。 XIS では、キャリブレーション用に ^{55}Fe を取り付け、つねに CCD の角に照射することにした。

3. 素子のギャップ

   SIS は、 4 枚のチップを張り合わせて一つの検出器としていたため、すき間ができてしまっていた。 XIS は、一つの基盤上に 4 つのセグメントを形成することですき間はない。

[2]ASCA では、 Grade 6 は X 線イベントとして認知していなかった

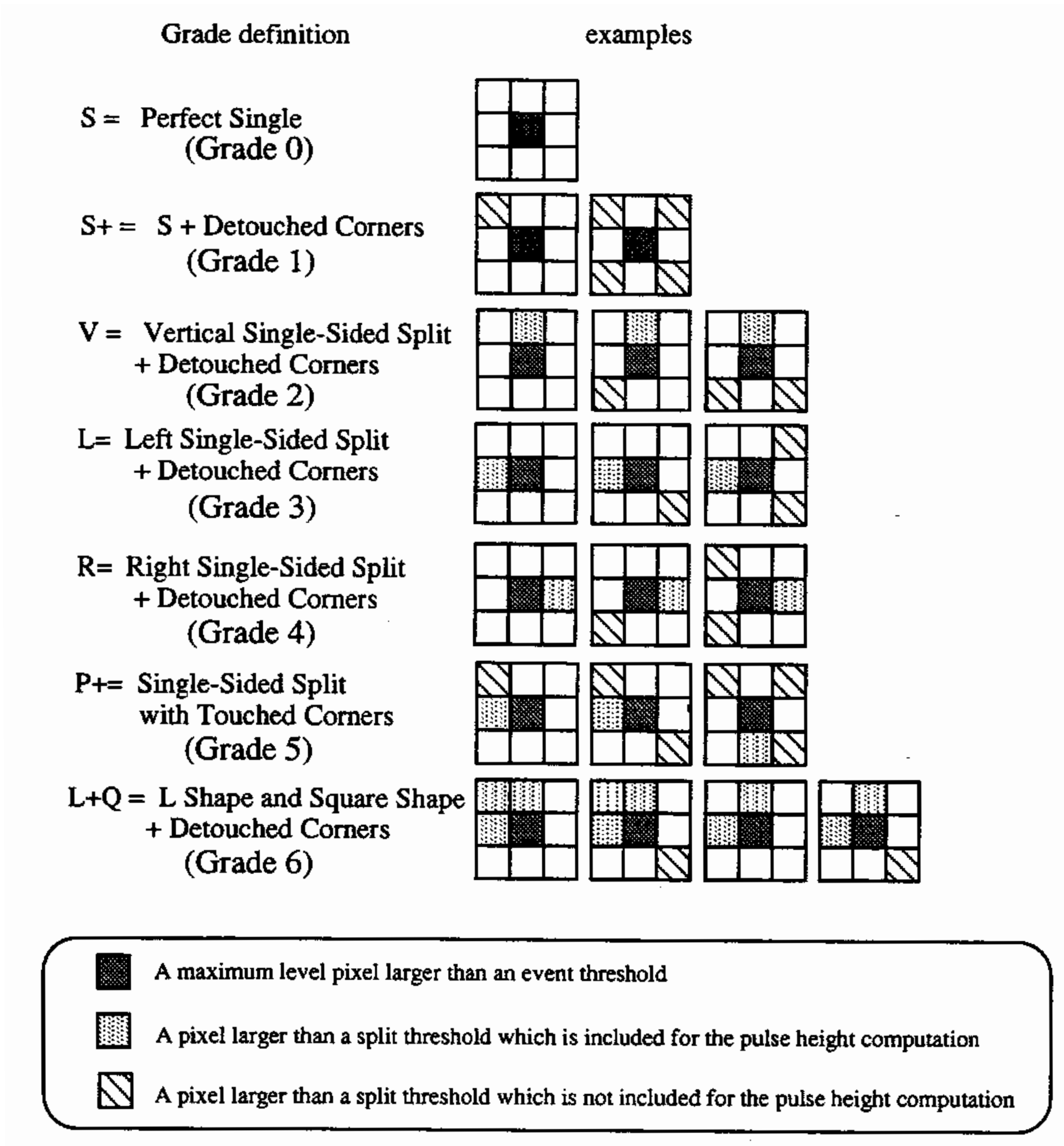


Figure 3.4: Grade 法による分類

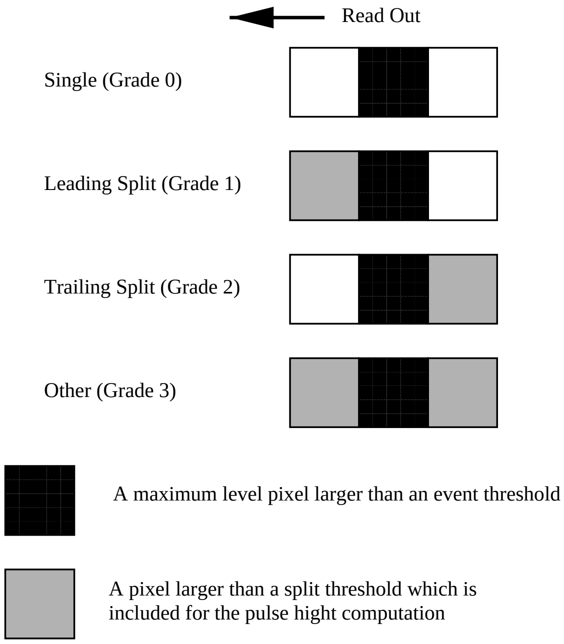


Figure 3.5: Grade 法による分類 (Timing モード)

4. ダークレベル

SIS で劣化後問題が大きかったのは、メモリー制限のためダークレベルが各ピクセル毎ではなく、 16×16 ピクセルの単位でしか分からないことであった。そのため、劣化が進みそれより狭い範囲でダークレベルが変化した時対応ができなかった。 XIS はピクセル毎にダークレベルを持つため、この問題はなくなる。また、光洩れ量を毎フレーム更新し、短い時間でのゼロレベルの変化にも対応する。

第 4 章

XIS の性能評価

本章では、 XIS の基本的な性能について述べる。まず、評価システムの説明を行い、次いで性能評価の上で問題となる微分線形性とスプリット閾値の検討を行う。そして最後に、各種性能評価の結果を述べる。

4.1 評価の方法

4.1.1 評価システム

京都大学では、 XIS の高エネルギー側 (2keV 以上) の較正を担当した。実験のシステムは、X 線発生装置からの一次 X 線を Al, Cl, Ti, Fe, Ni, Zn, Se の 7 種のターゲットにあて、そこで発生する二次 X 線を CCD に照射するものである (図 4.1)。 7 種のターゲットは回転ステージ (θ ステージ) 上にあり、どのターゲットを使うか選択できる。また、これとは別に ^{55}Fe の線源も据え付けられており、 X ステージを動かすことにより、 XIS にそのどちらの光線を当てるか制御する。合計 8 種のエネルギーの X 線を使用することになる。 X 線の強度、スペクトルは、二つの SSD でモニターができるようになっている。

二次ターゲット、 XIS はともに真空槽内にあり、 XIS は冷却して計測を行った。詳しくは、浜口修論 ([8]) を参照。

性能評価には Flight Model の S0–S3 の他、評価用の EM2, EMJ も使われた。

4.1.2 実験条件

性能試験は、基本的に下記の条件のもとで行われた。

Table 4.1: 実験を行う際の環境

CCD 温度	コールドプレート温度	気圧
-90℃	-50℃	$\sim 10^{-6}$ torr

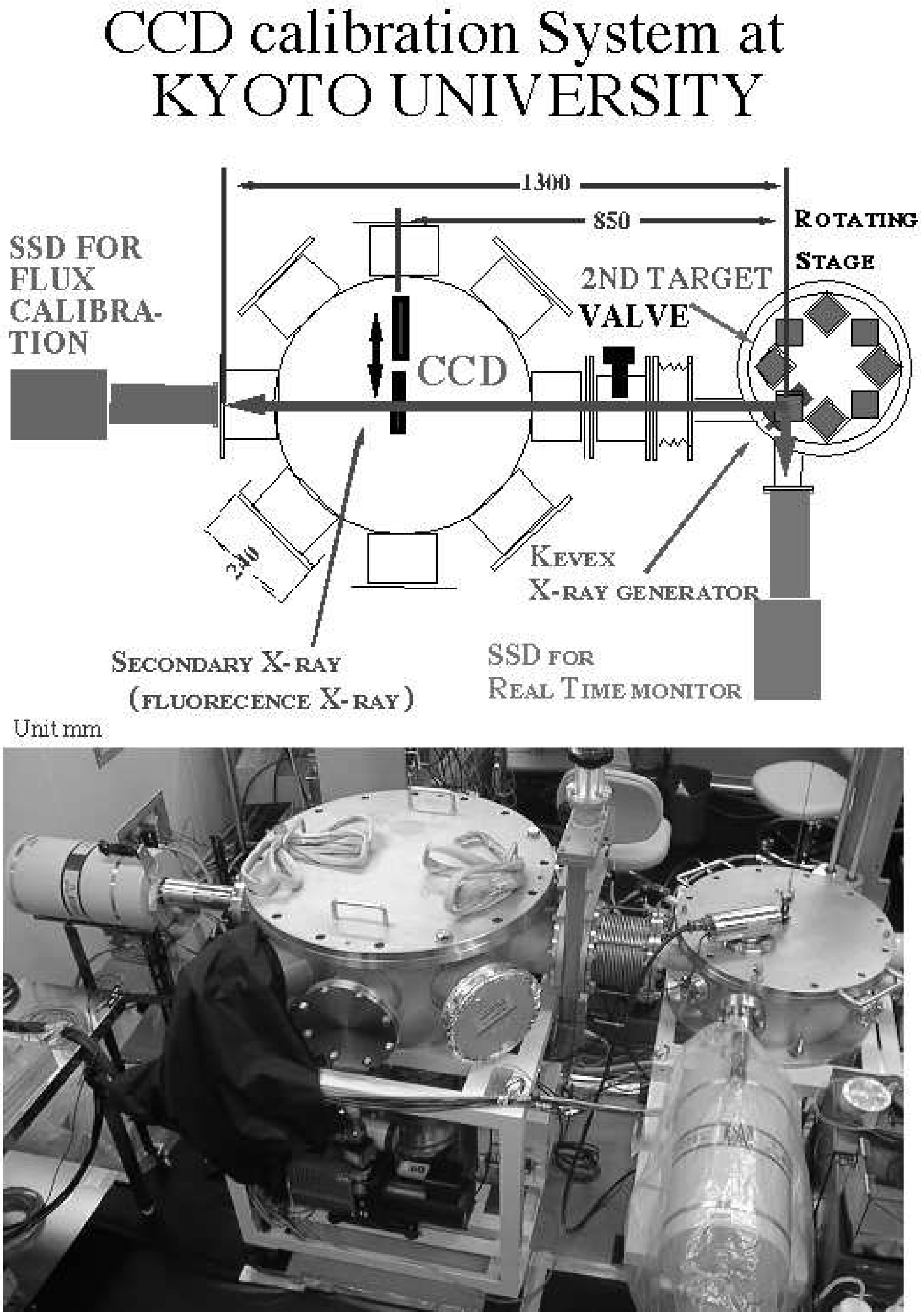


Figure 4.1: XIS のキャリブレーションシステム

Table 4.2: 各ターゲットのエネルギーとX線発生装置にかける電圧、電流値

Target	Energy		θ-stage	電圧	電流; P=0.2%	0.5%	1.0%	2.0%
	K_α(keV)	K_β(keV)	°	kV	mA	mA	mA	mA
Al	1.49	1.56	−5	5	0.029	0.073	0.15	0.29
Cl	2.62	2.82	40	5	0.045	0.113	0.23	0.45
Ti	4.50	4.93	85	15	0.047	0.117	0.23	0.47
^{55}Fe	5.89	6.49	—	—	—	—	—	—
Fe	6.40	7.06	130	15	0.058	0.145	0.29	0.58
Ni	7.47	8.26	175	15	0.060	0.15	0.30	0.60
Zn	8.63	9.57	220	20	0.058	0.145	0.29	0.58
Se	11.22	12.50	265	20	0.066	0.165	0.33	0.66

また、二次X線源の強度は、P= 0.2, 0.5, 1.0, 2.0% の4種類が使われた。このPとは、1farme毎の全ピクセルに対するX線のイベント数の割合を表す量であり、例えばP= 0.2%の場合は、

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

ということになる。表4.2に、各ターゲットのエネルギーと、強度別のX線発生装置の電圧・電流値をまとめておく。

以下、特に断らない限り、表4.1の条件下、Al, Cl, Ti, Fe, NiはP= 0.5%、Zn, SeはP= 0.2%のデータを使用した。それぞれ、これ以上強くなるとパイルアップによりゲイン等が変化してしまう強度である([9]参照)。温度やX線強度を変更した時のXISの性能実験も行われているが、これらの実験結果については、西内修論([6])を参照してもらいたい。

4.1.3 キャリブレーション計画

性能評価の最終目標は、もちろん検出したX線の強度、スペクトル、時刻を正しく再現することにある。しかし、誤差0で完璧に元通りにすることなど不可能であるので、どれだけ正確な値が得られるか、が問題になる。我々の性能評価の目的は、

1. ゲイン(ピークの位置)、エネルギー分解能を0.1%の精度で決定する。
2. 単色X線に対するスペクトルの形の再現を誤差3%以下で行う。
3. 絶対的な量子効率を10%以内で、4つの検出器間の相対量子効率を5%以内の誤差で決定。

である。これに基づいて、1センサーあたりの露出時間が決定され、実験が行われた。

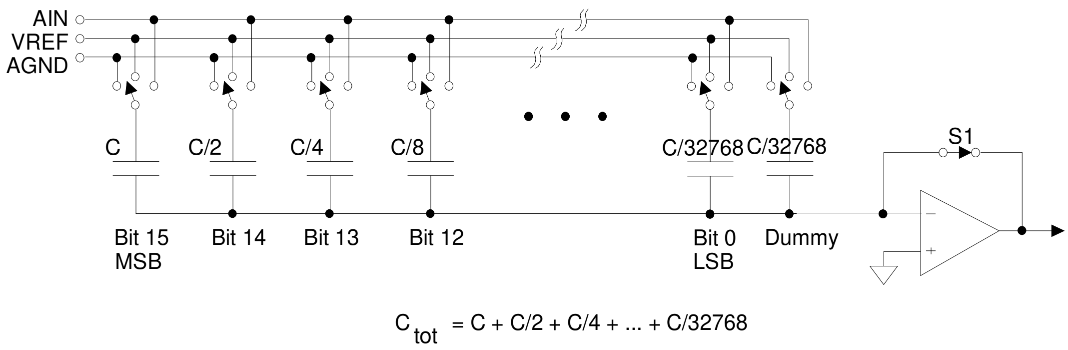


Figure 4.2: ADC の回路図

4.2 微分非線形性

CCD に限らず、検出器の信号を解析する上で問題になってくるものに、微分非線形性がある。検出器からの出力は、 ADC でデジタル信号に変換されるが、この時、 ADC の下位のビットが正確でないと、ある決まった周期で channel の幅が狭くなったり広くなったりする。この非線形性は、各 channel に入るカウント数に反映されるため、観測したスペクトルをあるモデルで fitting しようとすると χ^2 が大きくなり、モデルの検定を正確に行えないという不都合が生じる。

4.2.1 ADC の仕組み

XIS は、 CS5016A という逐次比較型 16bitADC を使用している。以下、この ADC の仕組みを簡単に説明する。図 4.2に、 ADC の基本構造を示す ([10] 参照)。

2 倍ずつ値の違うコンデンサーがビット数の分 16 個あり、一端はコンパレーターに、もう一端は AIN, VREF, AGND のどれかに接続されるようになっている。 AIN に信号が入力され、 AGND はゼロレベル、 VREF は ADC が変換する電圧の上限になる。すなわち、AGND–VREF 間の電圧を 2^{16} 個の目盛りに区切り、 16 ビットのデジタル信号として出力するのである。

初め、コンデンサーは全て AIN 側に接続され、 $\mathrm{C_{tot}} = \mathrm{C} + \mathrm{C}/2 + \mathrm{C}/4 + \cdots \mathrm{C}/2^{15}$ の一つのコンデンサーとして働く。スイッチ S1 は閉じられているので、コンデンサーに蓄積される電荷は、入力電圧 $\mathrm{V_{in}}$ に応じて $-\mathrm{Q_{in}} = \mathrm{V_{in}C_{tot}}$ となっている (図 4.3a, [10] より)。

デジタルに変換する時には、まず S1 が開かれる。すると、 $\mathrm{Q_{in}}$ はコンデンサーとコンパレーターの間に閉じ込められる (図 4.3b,[10] より)。ついで、まず最大の容量 (C) を持つコンデンサーが VREF に接続され、他の 15 個のコンデンサーは AGND に接続される。すると、コンパレーターで 0 と $\mathrm{VREF}-\mathrm{Q_{tot}}/\mathrm{C}$ を比較することにより、 $\mathrm{V_{in}}$ が VREF/2 より大きいか小さいかがわかる。もし大きければコンデンサーは VREF に接続されたままで次に

C/2 の容量のコンデンサーで同様に VREF の 3/4 との大小が比べられる。 VREF/2 より小さい場合は C のコンデンサーは AGND につながれ、 C/2 で VREF の 1/4 との大小が調べられる。以下 $C/2^{15}$ のコンデンサーまで同様の操作を行うことにより、 16bit のデジタル信号が得られる。 VREF 側に接続しているコンデンサーに対応するビットが立つわけである。このコンバートモードでは、 16 個のコンデンサーは DAC の働きをしていることになる。

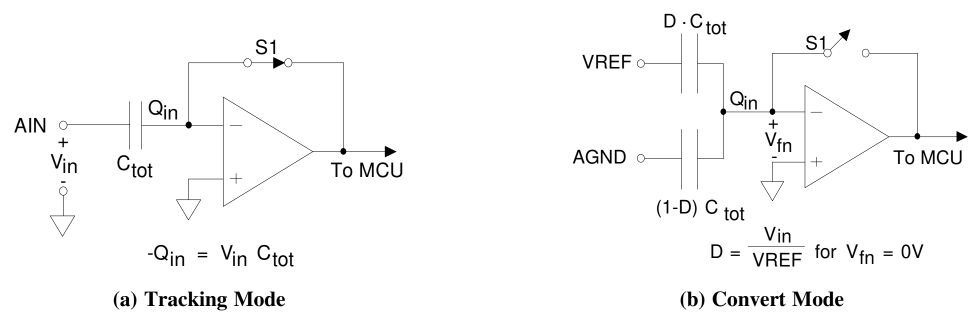


Figure 4.3: ADC の動作 (a): トラッキングモード (b): コンバートモード

つまるところ、逐次比較型 ADC は、 $1/2, 1/4, 1/8, \cdots$ の重さの分銅をもつ上皿てんびんのようなものである。分銅の重さ、すなわちコンデンサーの容量の誤差によってそれに対応するビットの幅が変わるのだ。例えば、一番下位のビットのコンデンサーが $C/2^{15}$ より大きければ一番下のビットは、 1 になるより 0 になりやすく、 2 ビット周期での変動が見られる。下から二番目のコンデンサーであれば $2^2 = 4$ ビットの周期になる。

XIS に使われている ADC のカタログに示されている微分非線形性を図 4.4に示す ([10] より)。横軸はチャンネル数であり、縦軸は、一つ一つのチャンネル幅の平均 (全体を 2^{16} で割ったもの) からのずれを表す。平均と一致すればゼロであり、平均の 2 倍であれば、 1 に、幅がゼロであれば -1 になる。

この図は最も下のビット (LSB – Least Significant Bit[1]) について示したものである。一般に下のビットほど誤差が大きいので、 XIS では下の 2bit は捨て、 3–14 番目の 12 ビットを使用している。したがって XIS では微分非線形性の影響は図 4.4ほど大きくはないはずである。 Low-gain mode では、さらに上の 4–16 番目の 12 ビットを使用するのでより影響が小さい。

4.2.2 搭載機器の ADC の評価

次に、 XIS からの信号を解析し、 Fright 用機器に使われている ADC の微分非線形性を測定した。微分非線形性を見るためには、なるべく広い範囲で一定のカウント数をもつスペ

[1]逆に、最上位のビットは MSB – Most Significant Bit と言う

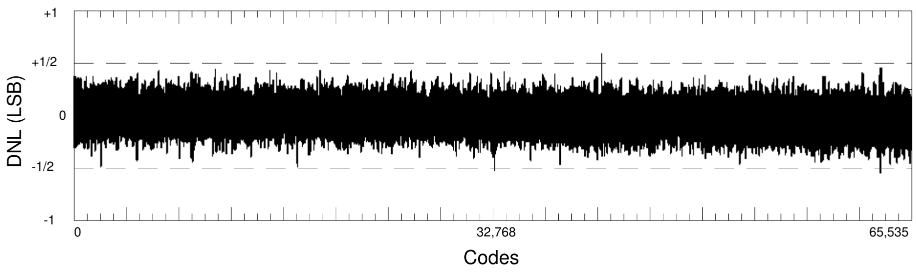


Figure 4.4: XIS の使用する ADC の微分非線形性 (カタログのもの)。横軸がチャンネルを表し、縦軸がそのチャンネルの幅の平均からのずれに対応する量である。

クトルを用いるのが簡単である。そこで、 LED を XIS に当てる実験を行った。 LED の強度を自由に変えることにより、フラットなスペクトルを作るためである。取得されたデータを表 4.3に、イメージを図 4.5に示す。

Table 4.3: LED 実験で取得したデータ

ID	照射 X 線	センサー	モード	frame 数
19981120_152000	Fe55+LED	S1	Normal	125

まず、取得されたイメージのセグメントごとにすべてのピクセルの PH 値を集積してスペクトルを作った。それが、図 4.6であるが、スペクトルが何本かにわかれているのが見てとれる。これを拡大した図 4.7 を見るとわかるように、これは微分非線形性により、ある一定の周期で大きい振幅で変化しているためである。また、セグメント毎にパターンが異なっていることもわかる。これは各セグメントで ADC が違うためである。

100ch の範囲であれば、スペクトルはほぼ直線とみなして良いので、直線で fit した時のずれは、微分非線形性の影響を表すと考えて良い。図 4.7を fit した時の reduced χ^2 を表 4.4に示す。

セグメント C がもっとも値が大きくなっている。ただし、 1bin 当たりのカウントが大きくなると、 bin ごとの変動に対してカウント数のエラーの割合が小さくなり、微分非線形性

Table 4.4: 2700–2799ch を直線で fit した時の reduced χ^2 および非線形性を表す目安 $N_{\chi 1}$

Segment	A	B	C	D
red-χ^2	20.25	10.49	59.41	19.53
$N_{\chi 1}$ (counts/100ch/segment)	18000	50000	7500	13000

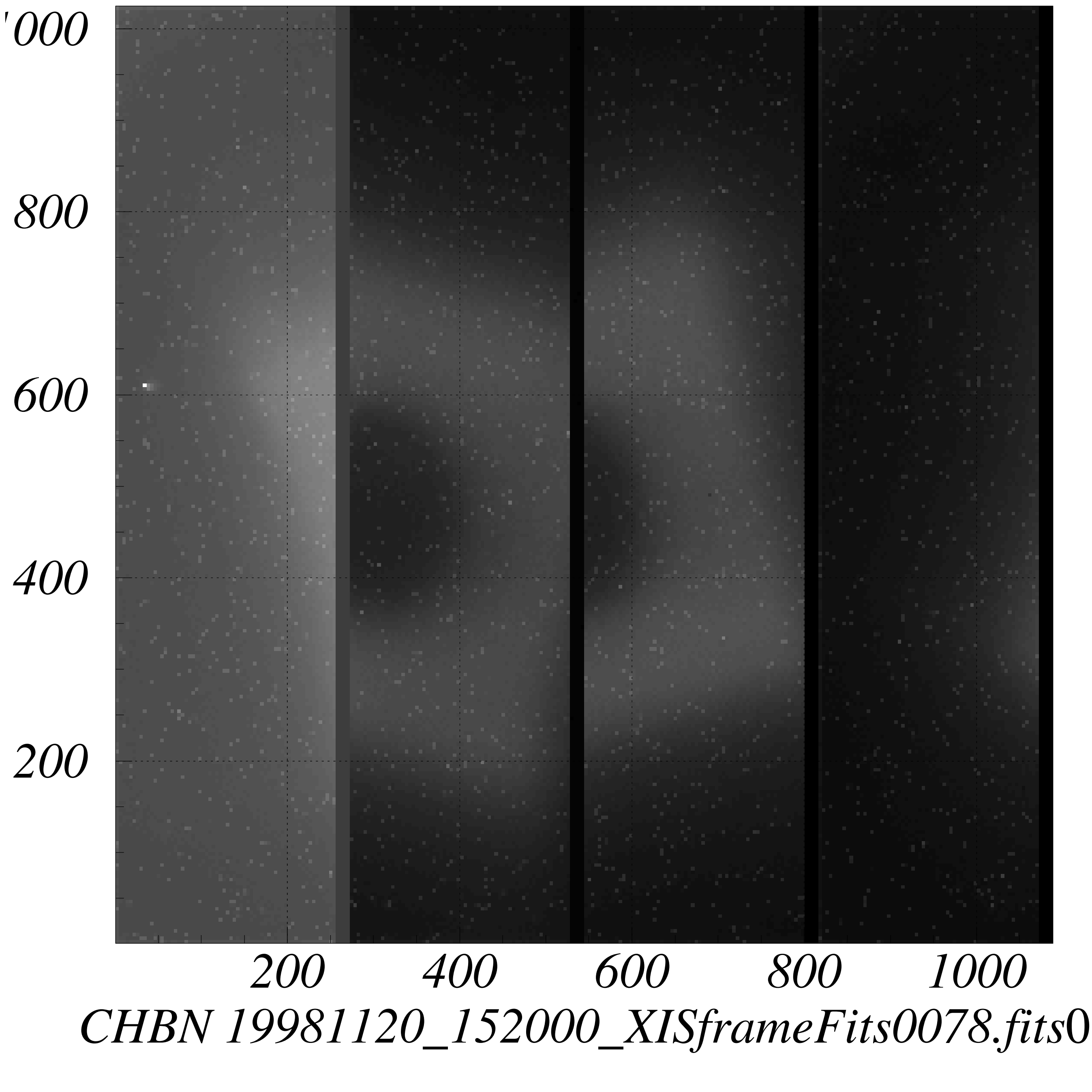


Figure 4.5: LED 実験で取得されたイメージ。 Segment B, D は左右逆になっている。

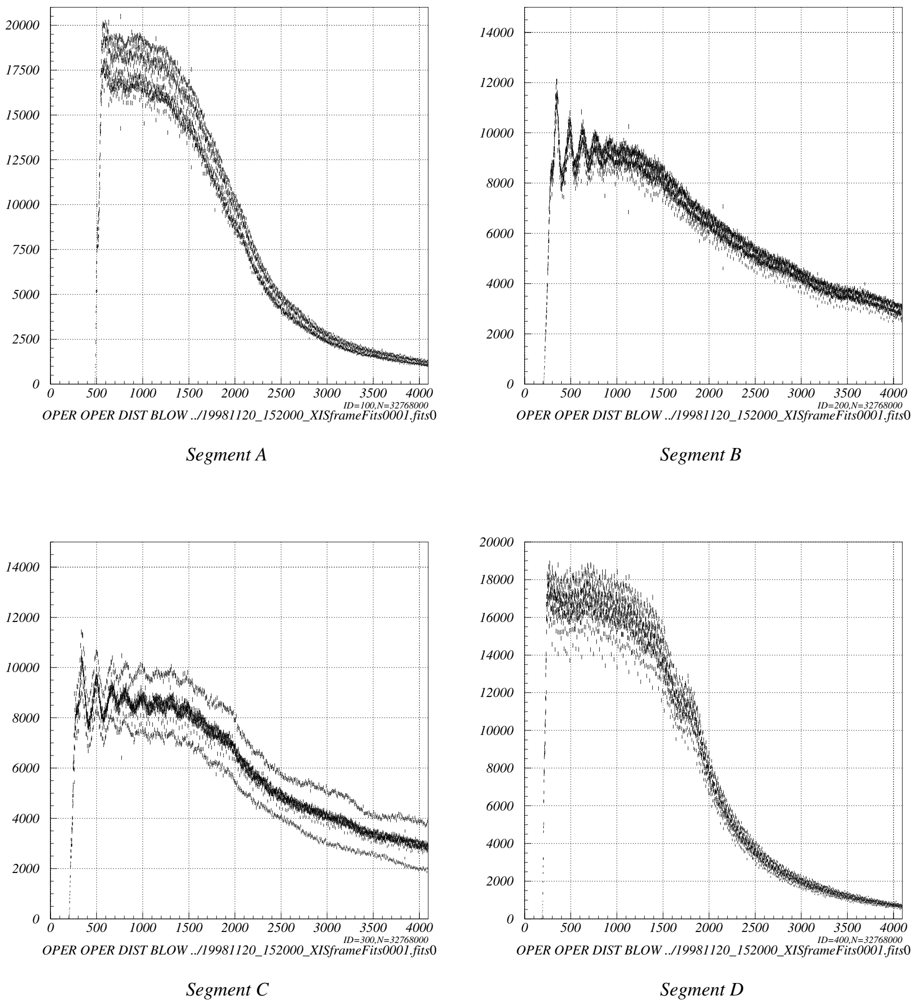


Figure 4.6: 全ピクセルの PH 値を集積したスペクトル。 500ch 付近の、鋸の歯状の構造は、微分非線形性によるものではない。

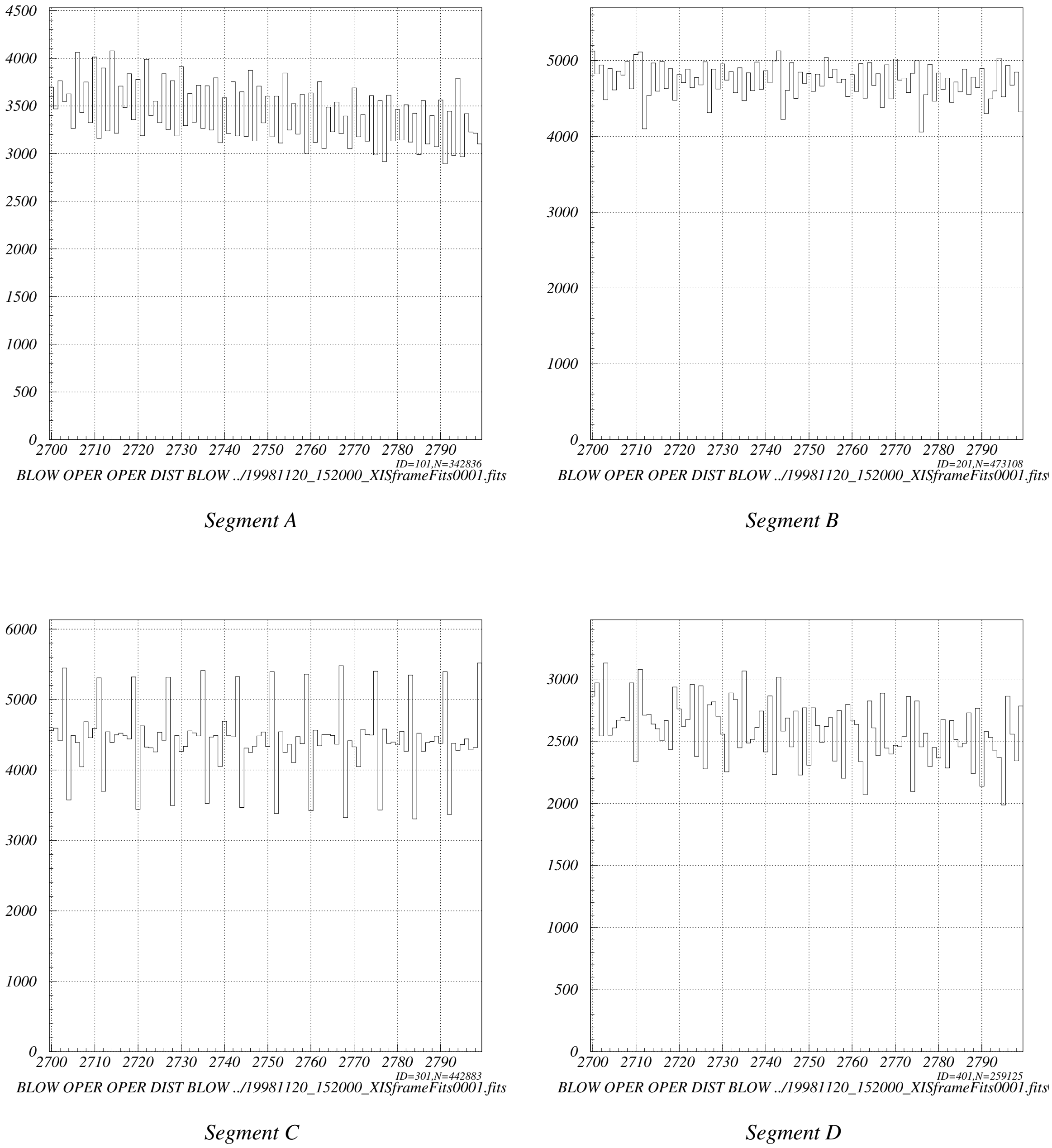


Figure 4.7: PH 値を集積したスペクトルの 2700–2799ch を拡大したもの

の影響が大きくなる。また、実際の観測にどのくらい影響してくるか、というのを知ることが重要である。そこで、微分非線形性を表す目安として、 reduced χ^2 がおよそ 1 になるカウント、 $N_{\chi 1}$ を用いることにする。 カウント数が 1/10 になれば、エラーは $1/\sqrt{10}$ になり、 χ^2 は 1/10 になるので、得られた reduced χ^2 でカウント数を割ってやれば良い。そのおおよその値を表 4.4に示す。図からも予測される通り、セグメント C がもっとも線形性が悪いという結果になった。 7500counts/100ch/segment 程度で影響が出始めてしまう。

次に、この変動の周期を調べるためフーリエ解析を行った。図 4.8がそのパワースペクトルであるが、大変に強い周期性が出ている。 $1/2^n$ (n は整数) の倍数の場所で強くなっているが、微分非線形性の起こる原因からすれば、当然のことである。

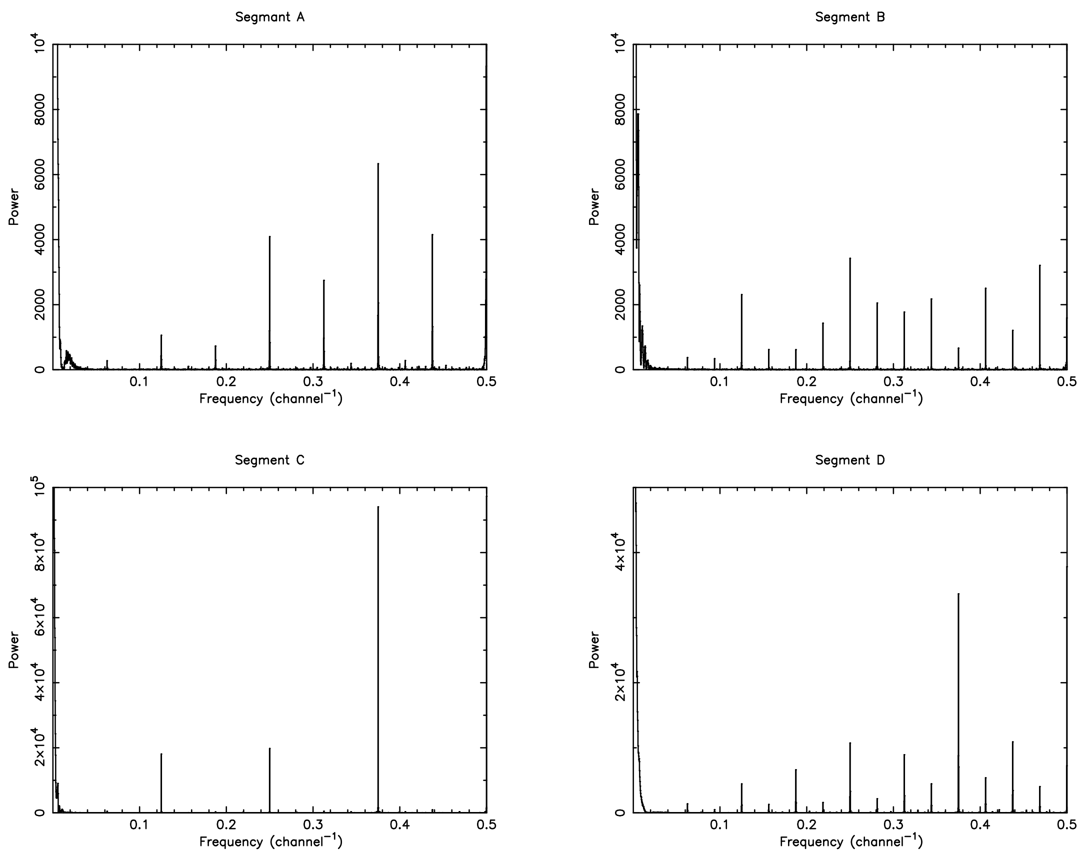


Figure 4.8: スペクトルの周期解析を行ったもの

4.2.3 ダークを引いたデータへの影響

前節では、得られたデータの全ピクセルの PH 値をそのまま集積したもので周期性を調べた。しかし、実際の観測では各ピクセルの PH 値からダークレベル、光り洩れを引いたピクセルレベルが使われる。衛星に搭載されるデータレコーダーの都合上、機上から地上に送ら

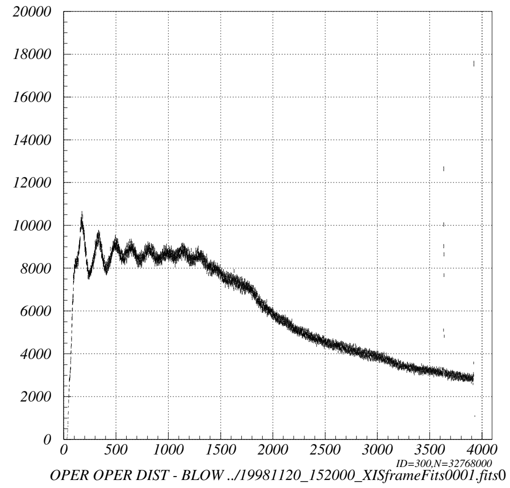


Figure 4.9: ダークレベルを引いたスペクトル (Segment C)

れるデータはダークレベルを差し引いた後のものである。地上でダークレベルを引く前のデータを計算することもできるが、この場合ダークレベルのデータを機上から地上へ転送する必要があり、現実的でない。そこで、まず前節と同じデータからダークレベルを引いたものに対して同様にスペクトルを作り、微分非線形性を調べた。ダークフレームは、LED 実験では当たっている光量が多過ぎ、現実のノイズレベルを表すものが得られないので、通常の X 線を当てた観測のものを使用した。

これ以降は、もっとも微分線形性の悪いセグメント C について主に述べる。全体のスペクトルを図 4.9に、拡大したスペクトルを図 4.10に、パワースペクトルを図 4.11に示す。

ダークレベルを引いただけで、ADC の微分非線形性によるスペクトルのガタガタが改善されているのがわかる。ダークレベルはピクセルごとに異なり、数チャンネルの幅で分布している。そのため生の PH 値からこれを引いてやると、もともと同じチャンネルに入っていたデータが数チャンネルにわかれて分布することになる。すなわち、最終的にはダークレベルの形で各チャンネルをスムージングしたスペクトルが得られるのである。

周期解析をした結果 (図 4.11) に示されるように、2, 4 チャンネル周期の変動はほとんどなくなり、8 チャンネル周期の変動も一桁ほど弱くなっている (図 4.11の縦軸は、図 4.8より一桁小さくなっていることに注意)。この傾向は、他のセグメントでも変わらなかった。

図 4.10を直線で fit し、reduced χ^2 =3.45 が得られた。$N_{\chi 1}$ は、およそ 10^5counts/100ch/Segment となる (表 4.5)。やはり一桁程度改善していることがわかる。

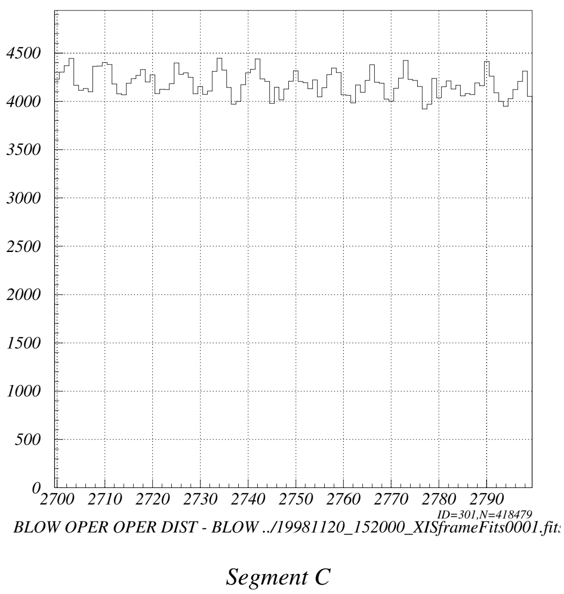


Figure 4.10: ダークレベルを引いたスペクトルの 2700–2799ch を拡大したもの (Segment C)

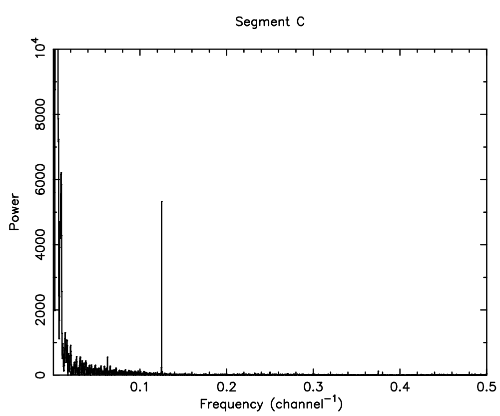
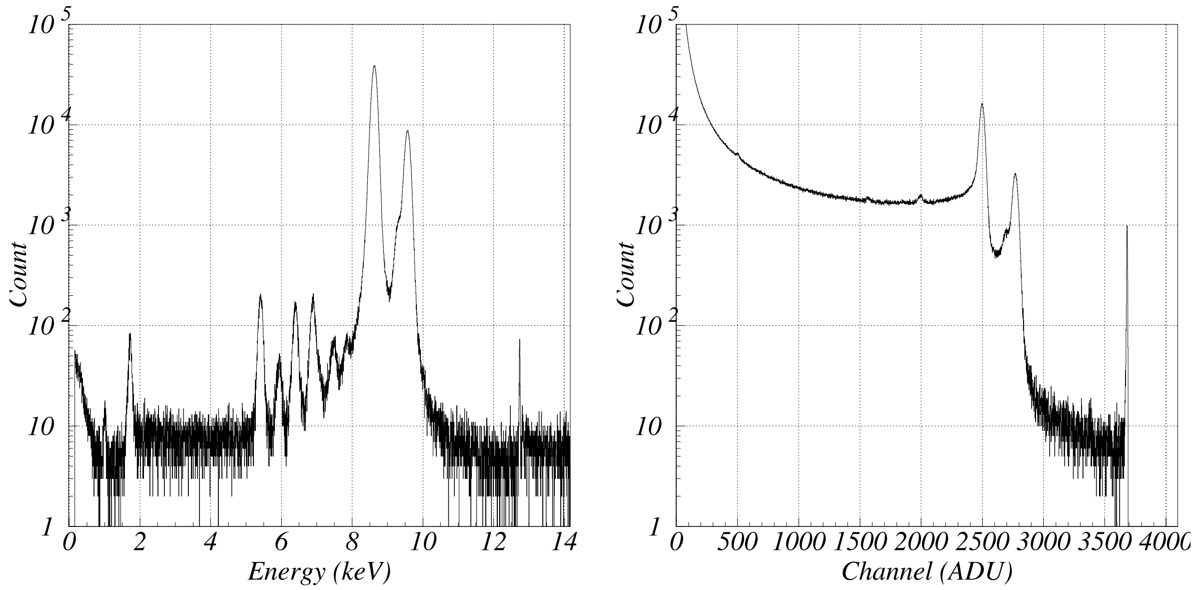


Figure 4.11: ダークレベルを引いたスペクトルの周期解析を行ったもの (Segment C)

Table 4.5: ダークレベルを引いたスペクトルの 2700–2799ch を直線で fit した時の reduced χ^2 および非線形性を表す目安 $N_{\chi 1}$

Segment	A	B	C	D
red-χ^2	1.19	1.40	3.45	1.76
$N_{\chi 1}$ (couts/100ch/segment)	180000	320000	120000	130000



(a) Grade 02346 spectrum (b) 5x5 pulse hight

Figure 4.12: (a): Grade 付けにより得られたスペクトル、 (b): 5×5 のピクセルレベルを別々に集積したスペクトル

4.2.4 実際の観測に対する影響

前々節で生のスペクトルに対する影響を、前節でダークレベルを引いて作ったスペクトルに対する微分非線形性の影響を調べた。実際の観測では、ダークレベルを引いた後、さらに光洩れの補正がなされる。そこで、今度は Zn の蛍光 X 線を長時間観測したデータで解析を行った。 P=0.5% で 3150frame、全部で $\sim 4 \times 10^6$ event/segment である。

通常の観測で最終的に得られるスペクトルは、 Grade 法によりイベントを検出し、イベント値を計算したものである (図 4.12a)。しかし、このスペクトルは各イベントごとに、 1 ~ 数個のピクセルのピクセルレベルを足したものなので、微分線形性の様子を調べるには向かない。そこで、各イベントに対して 5×5 のピクセルレベルを別々に集積してスペクトルを作った。図 4.12b にそれを示す。

この 5×5 ピクセルから集積したスペクトルについて、まず直線とみなせる 1200–1299ch

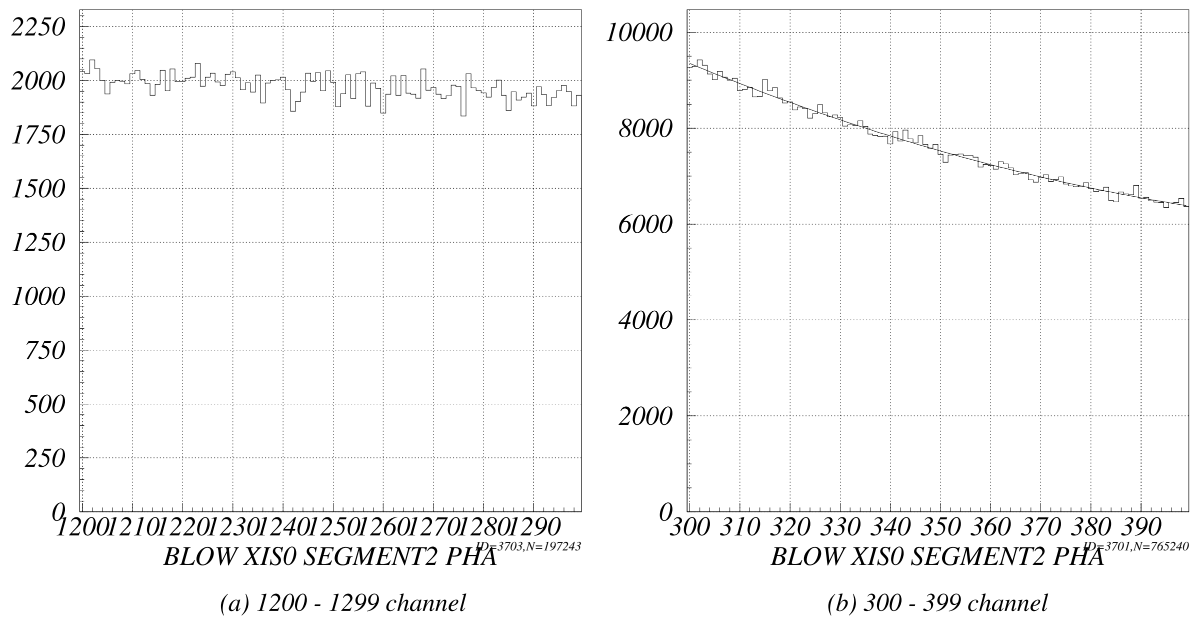


Figure 4.13: (a): 1200–1299ch、 (b): 300–399ch を拡大したもの (fitting の結果も示した)

の範囲 (図 4.13a) で fitting を行った。その結果、 reduced χ^2 は、 1.094 となったが、これは Confidence level にして 24.6% である。すなわち、微分非線形性の影響は効いてこないということになる。そこで、さらにカウント数の多い 300–399ch(図 4.13b) で調べた。ここでは、直線では明らかに大局的に合わないので、二次曲線で fitting した。 reduced χ^2 は 1.182 であった。 Confidence level 10.6% に相当するので、この程度のカウントから微分非線形性の影響が効き始めると考えられる。周期解析の結果は、図 4.14であるが、ほとんど周期性は見られない (縦軸は図 4.11より二桁小さい)。ダークレベルを引いた場合と同様に、さらに光洩れの補正値のゆらぎによってスペクトルがなまされた結果である。

これまでの結果をまとめると、表 4.6のようになる。実際の観測では、 10^6counts/100ch/segment は、およそ 25counts/keV/sec の天体を 100ksec 観測するのに相当するので、ほとんどの場合微分非線形性の影響は無視して良い。ただし、光洩れの値は最小でも 64 pixel×64 pixel の領域ごとに計算され、それをもとに補正が行なわれる。したがって、点源や広がりの小さい天体では光洩れ値の等しい一つの領域におさまってしまうことがありうる。この場合光洩れ補正によってなまされることはないので、広がった天体の 1/10 の数 counts/keV/sec の天体を 100 ksec 観測すると影響が現れるが、実際にこのような明るい天体を長時間観測することは少ないだろう。

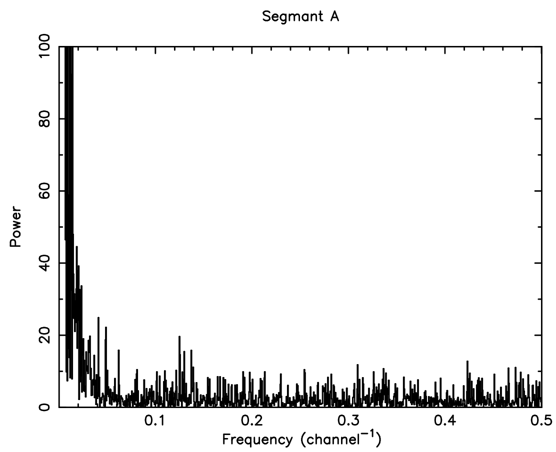


Figure 4.14: ダーク、光り洩れを引いた後のデータのパワースペクトル

Table 4.6: 微分非線形性の影響し始めるカウント

	生の PH 値	ダークレベルを引いたもの	ダーク、光り洩れを引いたもの
$N_{\chi 1}$(counts/100ch/seg)	10^4	10^5	10^6

4.2.5 微分非線形性の補正

前節までで、微分非線形性の影響はほとんどの場合考えなくて良いことを示した。しかし、非常に明るい X 線源を長時間観測すると問題になってくる場合もあるのもまた事実である。そこで、この節では微分非線形性の補正方法を述べる。

補正をする場合問題になるのは、これまで述べたように地上に送信される観測データは、ダークレベルと光洩れを引いたものであり、ダークレベルは通常の観測では値を知ることができない、ということである。そのため、図 4.7のパターンを知っていても、観測データに当てはめて補正することはできない。しかし、何 channel の周期で変動しているか、ということは分かっており、これはダークレベルにはよらないので、これを利用して補正できる。

4.2.4で述べたように、実際のデータでは、イベント回り 5×5 のピクセルレベルを知ることが可能である。そこで、まず 5×5 ピクセルから別々に集積して作ったスペクトル、図 4.12b で、変動のパターンを調べた。この際、すでに変動の周期は、8 チャンネル周期が一番強いと分かっているので、8 チャンネルごとに折り畳んで平均する方法をとった。ただし、急激にスペクトルが変化している部分は、パターンを変えてしまう恐れがあるので、1000–2199ch のデータを使用した。図 4.15a に得られたパターンを示す。

補正するには、このパターンにしたがってピクセルレベルを戻してやれば良い。それには

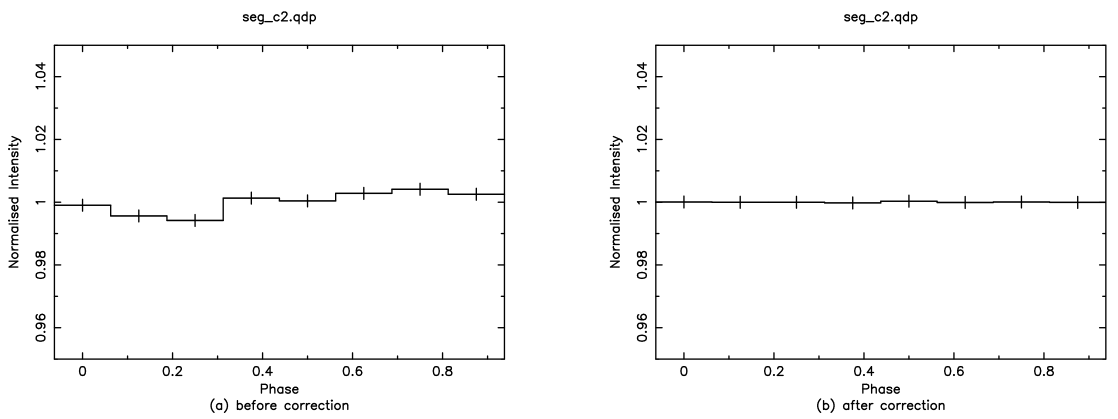


Figure 4.15: 8 チャンネル周期で折り畳んだパターン (a): 補正前 (b): 補正後

スペクトル集積後に補正するのが簡単であるが、位置情報を失ってしまうと Grade 法等でイベント抽出することができなくなってしまう。そこで位置情報を保ったまま、各ピクセルのピクセルレベルを 8 チャンネル周期のパターンにしたがって隣のチャンネルに再分配することで補正を行った。

このような補正で得られたスペクトルを 8 チャンネル周期で折り畳んだのが、図 4.15b である。でこぼこがなくなり、補正はうまくいっている。

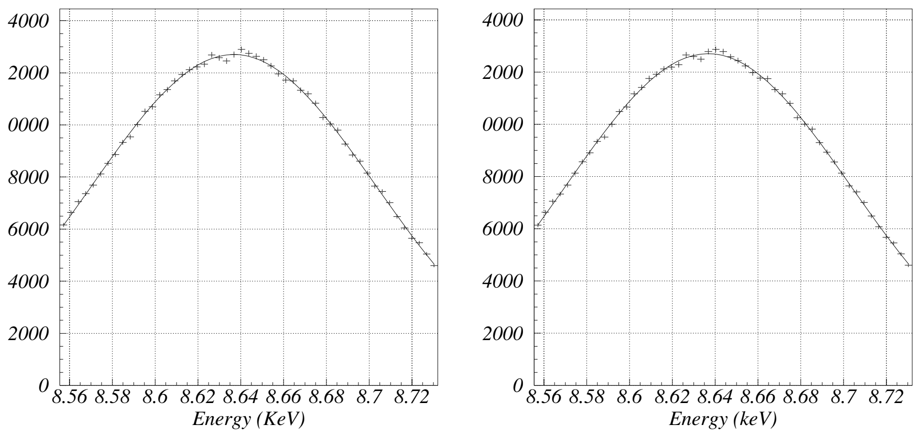
最後に、補正の前後で Grade 付けで得られたスペクトルがどのように変化したか述べる。複数のピクセルの足し合わせでは微分非線形性は弱まるので、補正の効果を見るため、 Grade 0 のシングルピクセルイベントだけのスペクトルを作った。補正の前後で、 K_α をガウシアンで fit した結果を図 4.16に、パラメーターを表 4.7に示す。

補正することによりエネルギー分解能等が変わることがあれば良くないが、補正の前後ですべてのパラメーターは、ほぼ一致している。 reduced χ^2 のみ、 0.1 減っているが、これは補正により余計な残差がなくなり、純粋にデータのガウシアンからのずれが計算されたためである。この方法で補正することが可能だということが示された。

Table 4.7: 補正前後のパラメーターの変化

	normlization	Width† (eV)	center (keV)	χ^2
補正前	12703 ± 25	66.1 ±0.2	8.6368 ± 0.0001	0.922
補正後	12705 ± 29	66.0 ±0.2	8.6368 ± 0.0001	0.829

†: ガウシアンの 1σ の幅。



(a)Grade 0 spectrm (before correction) (b)Grade 0 spectrm (after correction)

Figure 4.16: Grade 0 のみのスペクトルの K_α 輝線の fit 結果 (a): 補正前 (b): 補正後

4.3 放射線損傷とスプリット閾値の決定

XIS のイベント抽出を Grade 判定で行う場合、スプリット閾値は、検出効率、エネルギー分解能等に関わる重要な値である。そこで、どの程度にするのが適当か、打ち上げ後の損傷も考慮に入れた上で見積もった。

4.3.1 放射線損傷を受ける前 – 西内修論

放射線損傷を受ける前の地上実験の結果から、スプリット閾値が決められている。スプリット閾値が小さいと Grade 0 のイベント数が減り、逆に大きいと Grade が大きいイベントのエネルギー分解能が落ちる。すなわち、実際には X 線のないピクセルでも暗電流や読みだしのノイズがのるため、これをイベントとして検出しないよう十分高い値で、かつ実際の X 線イベントをあまり落とさずにすむのがスプリット閾値として最適である。

西内修論 ([6]) では、 Grade 0 のイベント数の減り始める位置から、 13ch($=$ 51eV $\sim$ 14electron) 以上という結果が出ている。これは、ノイズの 4σ レベルに相当する。この結果は EM2 のチップのみ使用したものであるが、他のチップでも同様にノイズの 4σ レベル以上が適当と考える。

4.3.2 dark level の時間変化

衛星打ち上げ後は、宇宙放射線により CCD 中に格子欠陥が生じ、これがトラップとして働くために暗電流が増加する。するとダークレベルのゆらぎも大きくなるので、それを考慮してスプリット閾値を決定しなければならない。そこで、次に打ち上げ後の暗電流の時間変化を見積もる。この際、 ASCA 衛星の CCD 検出器 SIS の結果と比較し、温度の違いによ

る効果を考慮して XIS の値を予想する。(参考: 山下修論 [11])。SIS は 4CCD mode で露出 16 秒、読みだし時間を含めると 1frame で最大 20 秒程度であるが、XIS は露出 8 秒、最大読みだし時間 6.4 秒程度である。しかし、今回の予測ではこの違いは無視して、どちらも 1frame の値を使う。

SIS では、打ち上げの時点では暗電流は ~ 10 electron/frame/pixel であった (4CCD mode。以後も、特に断らない限り SIS は 4CCD mode の値を使う)。打ち上げから 600 日後では、暗電流は $\sim$ 27 electron/frame/pixel だけ増加した。ただし、これは損傷を受けたピクセルの場合であり、健全なピクセルの暗電流は変化していない。また、600 日の時点でほぼすべてのピクセルが損傷を受けていることもわかった。すなわち、600 日の間に、すべてのピクセルにトラップが生じ、暗電流が増加したことになる。XIS での放射線による劣化も、SIS と同じペースで起こると仮定する。

SIS と XIS の動作温度はそれぞれ $-60°$C,$-90°$C である。次はこの温度の違いを考慮しなければならない。Tomida (1997,[12]) によると、放射損傷によって生じるトラップのエネルギー準位は、およそ 0.57eV である[2]。これはバンドギャップのほぼ中央の値になる。暗電流の大きさは、

$$I(T) \propto \frac{T^2}{\exp\left(\frac{E_c-E_t}{kT}\right)+\exp\left(\frac{E_t-E_v}{kT}\right)} \tag{4.1}$$

($I(T)$: 温度 T(K) の時のトラップ一個当たりの暗電流の大きさ
E_t, E_c, E_v: それぞれトラップ、伝導帯の下端、価電子帯の上端のエネルギー準位)
と表されるので、上記準位にトラップがある場合、$-60°$C から $-90°$C に温度を下げると、暗電流は 4.5×10^{-3} 倍になることがわかる。トラップの数が同じであればこれが SIS と XIS の暗電流の比になるはずである。

XIS では、現在の暗電流値は、~ 0.4 electron/frame/pixel である。したがって、劣化前の SIS のおよそ 4×10^{-2} 倍と、計算値と 10 倍違う。この原因は良くわからないが、暗電流の温度変化 (西内修論 [6]) を見ると、暗電流の減り方が次第に鈍くなっており、特に $-80°$C から $-90°$C ではほとんど変化していない。このことから、これはトラップ以外の要因による暗電流が存在するためと思われる。

しかし、放射線の劣化によって増加するのはトラップによる暗電流なので、トラップ数の増加は SIS の場合と同じだと考えると、暗電流の増加分に対しては SIS の 4.5×10^{-3} 倍で良いことになる。放射線損傷による SIS の暗電流の増加は 27electron だったので、XIS では、$\sim 27\cdot 4.5\times10^{-3} = 0.12$ electron/frame/pixel になる。もともとの暗電流 0.4 に対して小さいことがわかる。$-85°$C の場合だと、暗電流は $-60°$C の時のおよそ 0.01 倍になるが、それでも 0.27electron/frame/pixel と、劣化による増加は非常に小さい。

こうして劣化による暗電流の増加を見積もることができた。暗電流が増加すれば、そのゆらぎも大きくなる。スプリット閾値を決定するのは、暗電流自体の大きさではなく、そのゆ

[2] 山下修論 ([11]) では $\sim$0.65eV と見積もられているが、その場合でも暗電流の大きさは 2 倍以下の違いしかない。

らぎの大きさである。なぜなら、ダークレベルは常に暗電流の大きさに合わせて補正することができるからである。

SIS では、暗電流の大きさを 16×16 ピクセル単位でしか測定することができなかったので、それより小さいスケールでダークレベルが変化すると対応できなかった。しかし、 XIS は各ピクセル一個ずつに対してダークレベルを測定できるので、ただ暗電流のゆらぎだけを考えれば良い。

SIS では、シングルイベントの時の 3×3 ピクセルの角のピクセルの値を使いダークレベルの推定を行った。打ち上げ直後の SIS のダークレベルのゆらぎは、 1σ レベルで電子およそ 6 個分に相当する大きさだった。読みだしノイズは 5electron 程度なので、暗電流の 10electron とあわせて、 $\sqrt{5^2+10} \sim 6$ で正しいことがわかる。また、 600 日後には、ゆらぎはおよそ 8electron なので、 $\sqrt{5^2+10+27} \sim 8$ でよく一致している。

XIS の読みだしノイズはおよそ 3.4electron なので、劣化後の暗電流 $\sim$ 0.5electron とあわせても、 $\sqrt{3.4^2+0.5} \sim 3.5$ electron で放射線の劣化はほとんど効かないことがわかる。

4.3.3 CTI の影響

CTI により、転送中に電荷の一部が失われる。すると X 線のエネルギーを正しく測れないばかりか、その失う電荷がゆらぐことによる不定性も生じる。したがって、これもスプリット閾値の決定に影響を与える可能性がある。

SIS の場合、 1–2 $\times 10^{-5}$transfer^{-1} year^{-1} の割合で劣化が起こった。これは、 1000 回の転送でおよそ 1–2% の電荷を失うということである。

X 線イベントに対しては、 1% のずれがそのままエネルギー分解能に効いてくるため、この効果は無視できないが、暗電流に対しては、 1% は小さく、そのゆらぎも無視して良い大きさである。

4.3.4 結論

XIS の現在の性能と劣化後の予想値を表 4.8にまとめる。比較に用いた SIS も同様に示す。

表 4.8から、 XIS は劣化してもダークレベルのゆらぎはほとんど変化しないので、スプリット閾値は、現在の値を使って問題ない。評価に用いたチップでは、これは 51eV になるが、最もノイズが大きい S1 では、ノイズは 1σ で 4electron $\sim$ 15 eV なので、 60 eV 以上にするのが良い。

60eV 以上は、多少大きくてもエネルギー分解能が悪くなる、などの影響が出にくいため、実際の解析は、余裕をもって 20ch $\sim$ 78eV の値を採用した。

4.4 クロックの確認

3.3.2で述べたように、 XIS には Normal, Burst, P-sum の 3 つのモードと、 Window オプションがある。これらのクロックは、 AE のメモリーに書き込まれるマイクロコードによっ

Table 4.8: XIS と SIS のノイズの比較

XIS

	読みだしノイズ	暗電流	CTI	ダークレベルのゆらぎ (1σ)
	[electron]	[electron/frame/pixel]	[transfer^{-1}]	[electron]
劣化前	3.4	0.4	0	3.4
劣化後	3.4	0.5(0.7)†	2×10^{-5}	3.5(3.5)†

† () 内は、 $-85°$C の時の値

SIS

	読みだしノイズ	暗電流	CTI	ダークレベルのゆらぎ (1σ)
	[electron]	[electron/frame/pixel]	[transfer^{-1}]	[electron]
劣化前	5	10	0	6
劣化後	5	37	2×10^{-5}	8

て決定される。そこで、マイクロコードが間違っていないことの確認のため、 LED 実験を行った。

P-sum, Burst モードでは、露出時間は短くなる。この露出時間が間違っていると、 X 線の時間あたりの強度を間違って出すことになる。また、時間変動を調べる場合にも違いが生じる。 LED 実験は、 LED をある一定の間隔で点滅させることで、露出時間や露出間隔を確認するものである。

LED は、 TLRA190P という LED を使用し、約 1.67 ミリ秒の点灯で 6 keV 相当の電子を生じるように調整した。 P-sum モードでは、一番短い時で 8/1024 =7.8125 ミリ秒の露出時間になるが、何ラインも加算するため、点灯時間は数十マイクロ秒で良く、露出時間に比べて十分短い。

4.4.1 P-sum モード

P-sum モードは、縦に何 line も加算することで、撮像時間、時間分解能を短くすることができる。蓄積領域の 1 フレーム分は、変わらず 8 秒で読み出される。 1line 読み出すのにかかる時間は、 8/1024 =7.8125 msec である。 128line 加算する場合だと、一画面を 8line に圧縮することになるため、 $8 \times 7.8125 = 62.5$msec が撮像時間になる。 $n$line 加算する時は、 $8/1024 \times 1024/n = 8/n$ が撮像時間である。

128 line 加算の P-sum モードの動作をチェックするため、 0.125 秒間隔で LED を点滅させ、 XIS に照射したデータを調べた。 128 line 加算するので、 LED の点灯時間は、 1/300/128 $\sim$ 13 マイクロ秒である。図 4.17にイメージを示す。点滅の周期に従って、横縞が見えているのがわかる。 LED が点灯した時の 1 画面分が明るくなっている。この周期を詳しく調べ

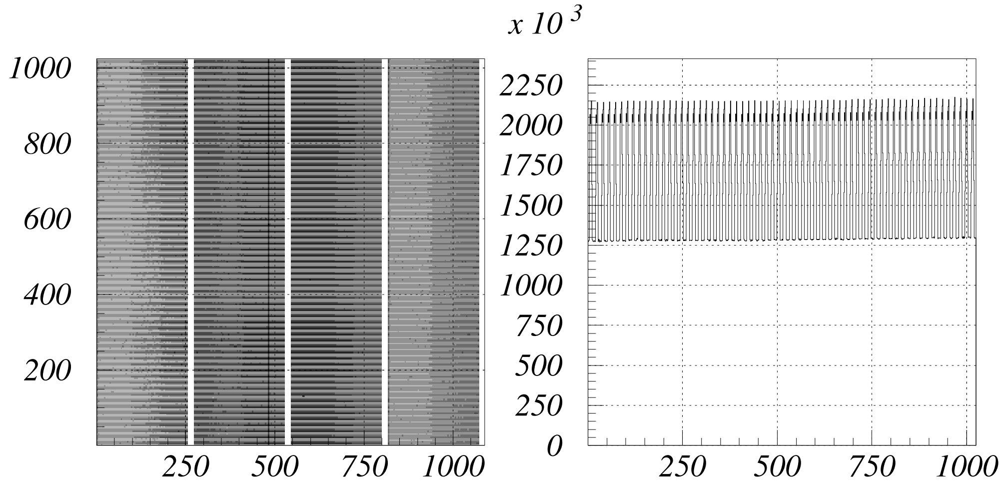


Figure 4.17: LED を 0.125 秒間隔で点滅させた時のイメージ (左) と、 y 軸方向に射影したヒストグラム (右)

るため、イメージを y 軸方向に射影した。射影したヒストグラムも図 4.17に示す。非常に規則正しく、パルス状になっている。このヒストグラムを拡大した、図 4.18をみるとわかるように、パルスの周期は 16line で、幅は 8line である。撮像領域の 1 画面分は 1024line であるから、 128line 加算すると、 8line になり、正しい。また、周期 16line は、 $8/1024 \times 16 = 0.125$ より、 LED の点灯周期に一致する。これにより、少なくとも 8/1024 秒以下の精度でマイクロコードが正しいことが確認された。

さらに良い精度での確認のためには、このパターンの時間変化を見てやれば良い。図 4.19に 15, 25, 40 フレーム目の、拡大したヒストグラムを示す。 8 フレーム目と 15 フレーム目の間には変化はないが、 25 フレーム目で、 1line にも満たないずれが見られる。このずれはさらに拡大し、 40 フレーム目で半 line 分ほどずれているのがわかる。つまり、 32 フレームでずれは 1line に満たない。すると、 $32 \times 8 = 256$ 秒間にずれが 8/1024 秒以下の精度である。一方、この LED はパルスジェネレーターにより点滅周期が決定しているが、その精度は 10^{-6} 秒。 0.125 秒の周期に、ずれが 10^{-6} 秒あれば、 256 秒では、 $256/0.125 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$ 秒。ちょうど観測されたずれと同程度である。観測からは、上限値が決定されただけなので、パルスジェネレーターのずれと見分けがつかない。従って、 1line の露出時間は、 $8/1024/1024/32 \sim 2.4 \times 10^{-7}$ 秒の精度で正しいことが確かめられた。

4.4.2 Burst モード

次は、 Burst モードの確認である。 Burst モードは、露出時間を短くするモードである。露出時間が正しくなっていれば良い。露出時間を確かめるため、読み出しの 8 秒周期とわずかにずらした周期で LED を点滅させた。ただし、 CCD の読み出しとパルスジェネレーターを同期させることはできなかった。

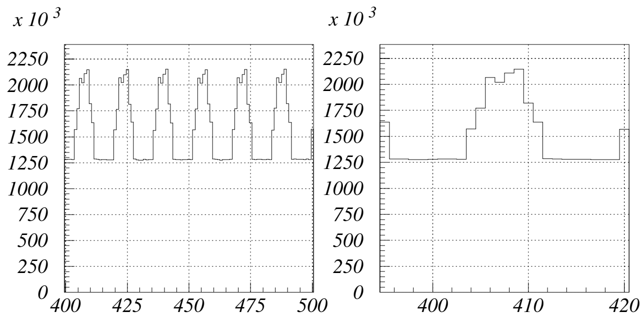


Figure 4.18: y 軸方向へ射影したヒストグラムの拡大 (8frame 目)

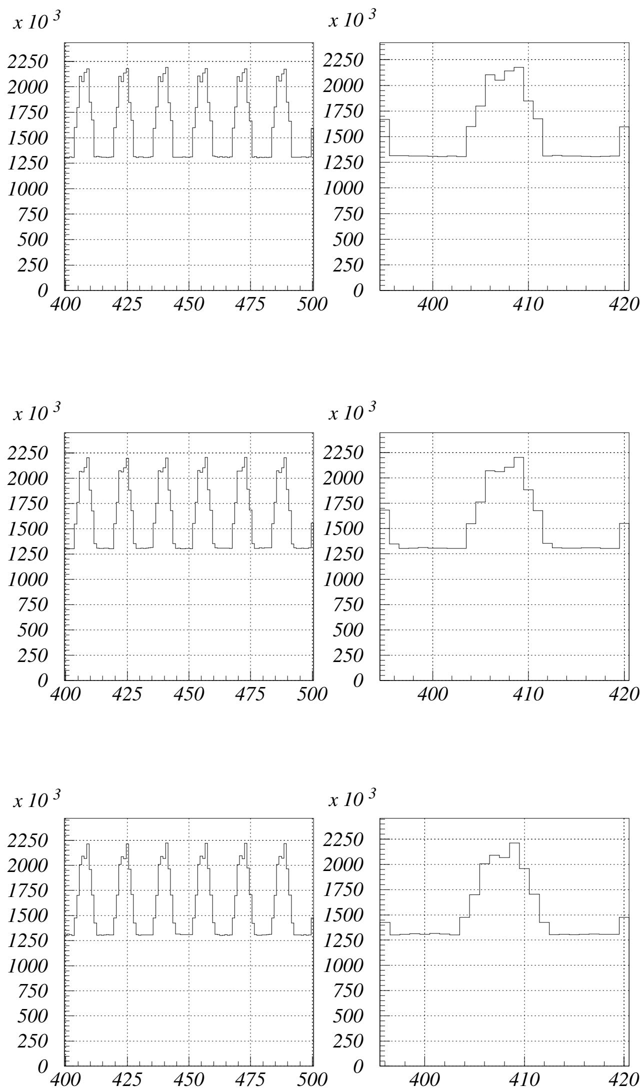


Figure 4.19: y 軸方向へ射影したヒストグラムの拡大。上から 15, 25, 40frame 目

4 秒露出のバーストモードの場合、 8.032 秒間隔で LED を点滅させた。すると、 1frame 毎に 0.032 秒ずつ LED の点灯する時刻はずれていく。そのため、 4/0.032=125frame 毎に、LED の光を検出する frame としない frame が繰り返すはずである。もし露出時間がずれていれば、その frame 数が変化することでわかる。 LED の点灯している時間は 1/600 秒としたので、無視して良い。

4, 2, 1 秒の各モードに対して、それぞれ 8.032, 4.008, 2.002 秒の間隔で LED を点滅させた。どの場合も、 125frame ごとに受光 frame と受光しないフレームが繰り返される。 4, 2, 1 秒露出の Burst モードに対して実験を行った結果を図 4.20に示す。横軸は、 frame 数に対応するものだが、 LED の点灯時刻のずれに換算して、秒で表している。露出されたフレームを点で表した。点の上下の位置は、イメージの受かった点で、下にずれているのは、読み出し中に LED の光りを受けた frame である。上述のように CCD とパルスジェネレーターは同期していないので、時刻 0 は CCD の読み出し開始時刻とはずれている。

図 4.20からわかるように、実験の結果は、露出が正しく行われていることを示すものであった。実験の精度は、 1frame で何秒 LED の点灯時刻がずれるかによって決まるため、4, 2, 1 秒の各モードでそれぞれ ±0.032, 0.016, 0.008 秒である。開始時刻はずれているので、この実験では 1frame 内で露出の始まる時刻を知ることはできない。露出時間は X 線源からの X 線強度を計算するために使われ重要度が高いので、今回の実験では露出時間のみを正確に決定した。

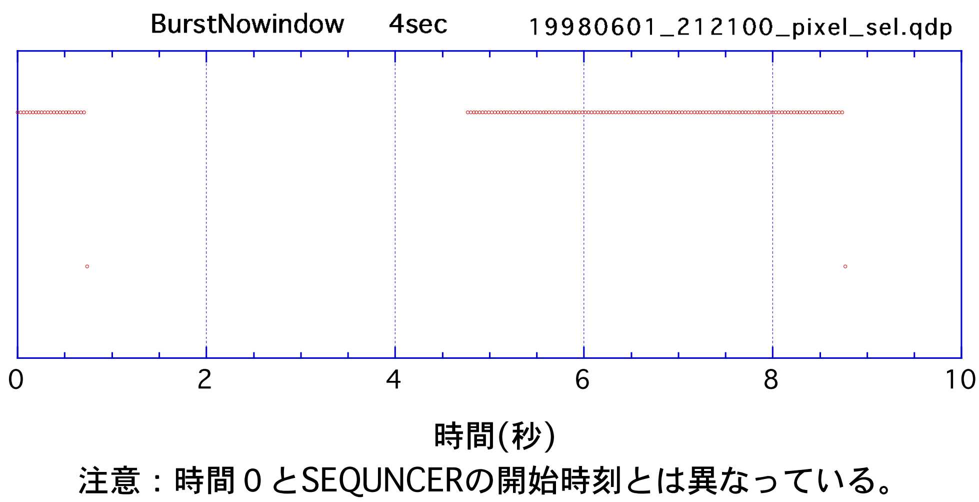
4.4.3 Window オプション

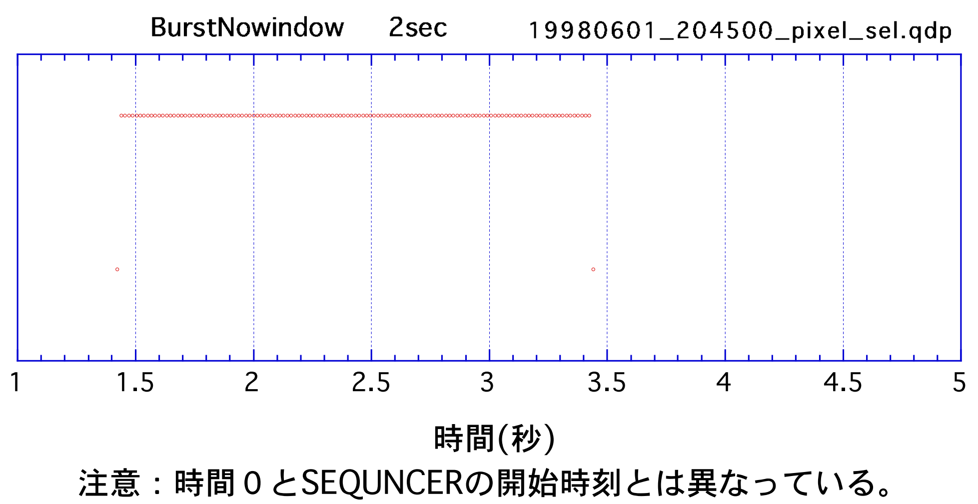
最後に、 Normal, Burst 両モードに Window オプションをつけて実験を行った。 Window モードは、 1/4, 1/8, 1/16 の 3 つのサイズがある。 Normal モードに Window オプションを用いると、 1/4 の場合は 256line ずつ、 2 秒間隔で読み出される。したがって、 8 秒間に 4 回読み出される。 LED を Burst モードの実験と同じように周期を少しずらして点滅させると、 2 秒に対応する frame 数ごとに、その何回目の読み込みで LED を検出するかが変化する。何回目で読み込まれたかは、イメージの縦方向の位置でわかるので、これにより読み出し間隔がわかる。結果を図 4.21に示す。 LED の点灯間隔は、 1/4, 1/8, 1/16 の各モードでそれぞれ 4.02, 2.005, 1.00125 秒とした。実験精度はそれぞれ、 ±0.04, 0.02, 0.01 秒である。

Burst Window モードの結果を図 4.22に示す。これは、 Normal Window の、一部分しか露出されないような形になる。表 4.9の設定で実験が行われ、同じ表に示した精度で正しいことが確認された。

4.5 各モードの性能

クロックが正しいことが確認されたので、各モードで性能評価を行った。西内修論 ([6]) では、 Cl, Ti, ^{55}Fe, Fe, Ni, Zn の 6 種のターゲットからの二次 X 線を照射し、 Normal モー





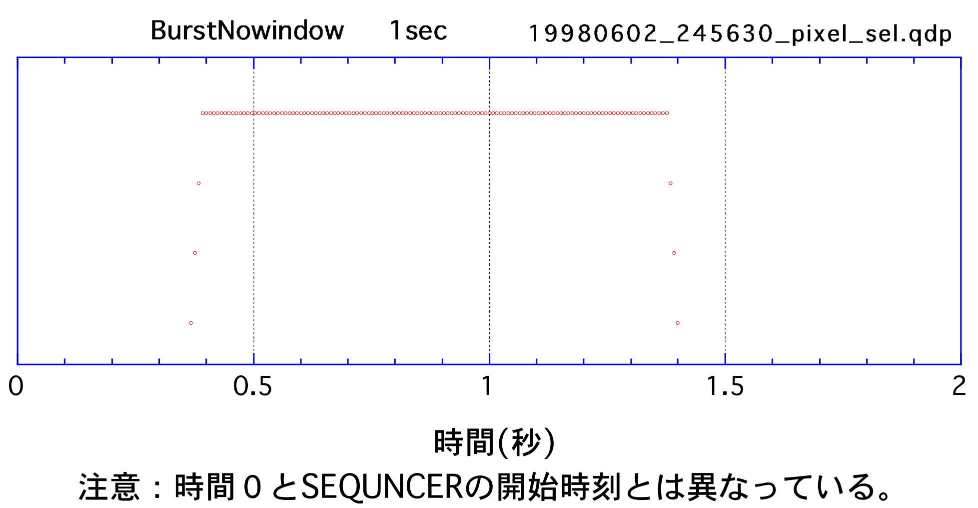


Figure 4.20: Burst モードの LED 実験の結果。点で示した時間だけ露出が行われた。点の位置が下にずれているものは、転送途中に露出が行われたものである。

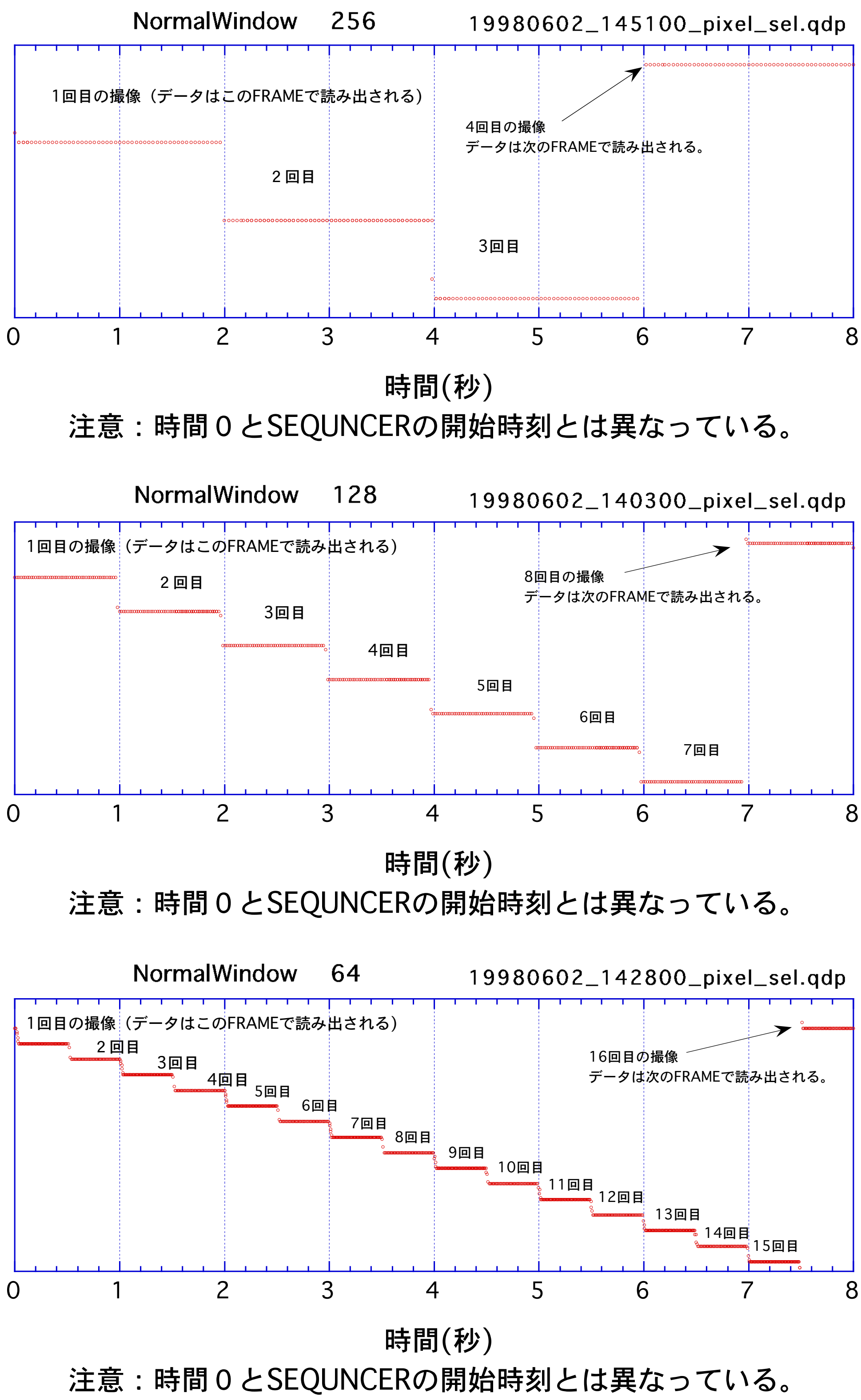


Figure 4.21: Normal Window モードの LED 実験の結果

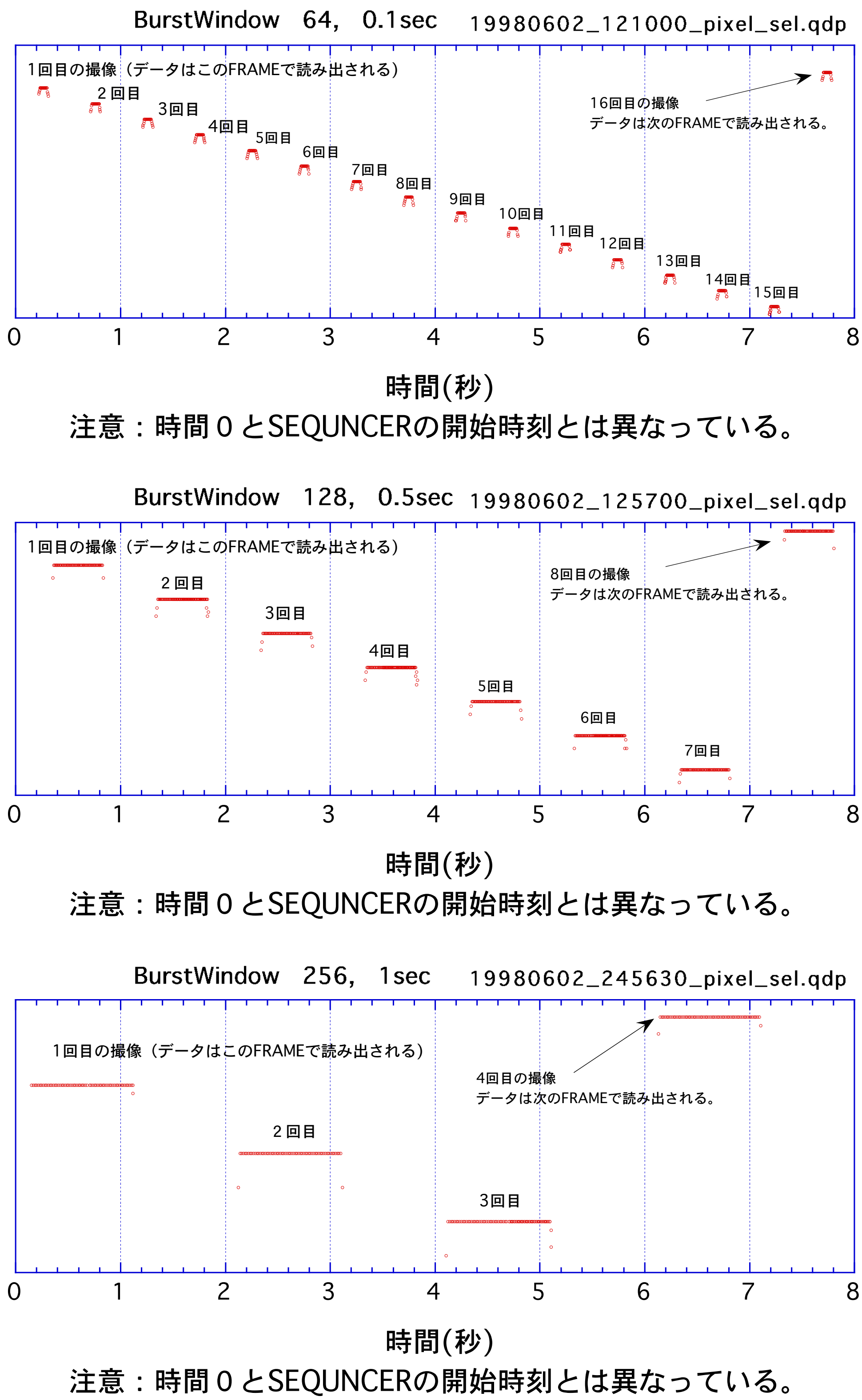


Figure 4.22: Burst Window モードの LED 実験の結果

Table 4.9: Burst Window モードの LED 実験の設定および精度

Window のサイズ	一回あたりの露出時間 (秒)	LED の点滅間隔 (秒)	実験の精度 (秒)
1/4	0.971	4.008	0.016
1/8	0.467	2.002	0.008
1/16	0.0698	1.0005	0.004

ドのゲイン、エネルギー分解能を詳細に調べた。本論文では、モードによる違いがないかを調べることを第一の目的とする。したがって、少ない種類の X 線にたいしてすべてのモードで実験を行った。解析結果は、セグメント A のもののみ示す。

4.5.1 ゲイン、エネルギー分解能

^{55}Fe と Zn の二つの蛍光 X 線を照射し、 Normal, Normal Window, Burst, Burst Window, P-sum の各モードで測定した。それぞれの単色 X 線を当てたスペクトルをガウシアンで fit し、中心のチャンネルと FWHM からゲイン、エネルギー分解能を比較した。この実験では、スプリット閾値は 14ch とした。古い解析結果も含まれるので、それとの整合性を保つためである。 Window は 1/4, 1/8, 1/16 のサイズで、 Burst は 4, 2, 1 秒、 Burst Window は Window のサイズ 1/4, 1/8, 1/16 に対してそれぞれ 1, 0.5, 0.1 秒、 P-sum は 256, 128, 64line 加算、そしてこれと Normal モードで、合計 13 のモードについて行った。

表 4.10(a) に、 ^{55}Fe と Zn、それぞれの二次 X 線を照射したときの中心チャンネルを示す。エラーよりは大きい範囲のばらつきが見られるが、系統的にずれているものはなく、モードによる違いは見られない。

表 4.10(b) にエネルギー分解能 (FWHM) を示す。 ^{55}Fe の Normal モードのデータは、冷却中のものしかないため、エネルギー分解能は悪くなっている。 P-sum モードは他よりエネルギー分解能が低い傾向も見られる。 P-sum は他と処理の方法が違うので、性能が違うといえるかどうかは、さらに詳しい解析が必要である。 P-sum 同士での違いは見られない。

4.5.2 各モードの相対的な量子効率の比較

この節では、量子効率のモード毎の相対的な違いのみ調べる。絶対的な量子効率の値については、次の 4.6節で述べる。

測定は、 Zn の蛍光 X 線のみで行った。相対的な違いを調べるだけなので、一点だけで充分である。前節と同じ全 13 モードで測定を行った。強度のモニターを行っている SSD のカウントとの比を比較し、相対的な量子効率とした。表 4.10(c) に SSD のカウントに対する XIS の検出したカウント数を示す。 XIS のカウント数は、グレード 02346 をすべて加えたものである。ただし、 P-sum は、グレード付けの仕方が異なるため、スペクトルを fitting

Table 4.10: 各モードの性能の比較

(a): 各モードのゲイン

	Normal	Normal Window			Burst			Burst Window†			P-sum		
		1/4	1/8	1/16	4sec	2sec	1sec	1/4	1/8	1/16	256line	128line	64line
^{55}Fe	1669.41*	1670.35	1670.05	1670.12	1670.54	1670.17	1670.91	1670.44	1669.93	1670.68	1670.82	1670.74	1671.00
	±0.11	±0.08	±0.07	±0.11	±0.08	±0.07	±0.12	±0.10	±0.05	±0.28	±0.08	±0.04	±0.08
Zn	2443.23	2442.71	2442.22	2442.34	2442.70	2442.46	2442.97	2442.61	2442.36	2443.37	2442.59	2442.46	2444.35
	±0.08	±0.08	±0.06	±0.08	±0.09	±0.06	±0.09	±0.08	±0.05	±0.11	±0.05	±0.09	±0.09

†: Burst Window での露出時間は、1/4, 1/8, 1/16 の Window オプションでそれぞれ 1, 0.5, 0.1 秒。
∗: 冷却中のデータ

(b): 各モードのエネルギー分解能 (FWHM)

	Normal	Normal Window			Burst			Burst Window†			P-sum		
		1/4	1/8	1/16	4sec	2sec	1sec	1/4	1/8	1/16	256line	128line	64line
^{55}Fe	54.91*	36.18	36.36	36.17	36.34	36.41	36.15	36.78	36.38	35.33	34.98	35.00	34.98
	±0.28	±0.20	±0.16	±0.27	±0.19	±0.16	±0.28	±0.25	±0.13	±0.68	±0.19	±0.09	±0.19
Zn	45.81	46.42	46.32	46.54	46.77	46.84	46.61	46.61	46.59	45.28	42.88	42.83	42.67
	±0.20	±0.20	±0.15	±0.20	±0.21	±0.14	±0.2	±0.19	±0.12	±0.26	±0.12	±0.21	±0.21

†: Burst Window での露出時間は、1/4, 1/8, 1/16 の Window オプションでそれぞれ 1, 0.5, 0.1 秒。
∗: 冷却中のデータ。

(c): 各モードの相対的量子効率

	Normal	Normal Window			Burst			Burst Window†			P-sum		
		1/4	1/8	1/16	4sec	2sec	1sec	1/4	1/8	1/16	256line	128line	64line
Zn	0.6662	0.6430	0.6547	0.6669	0.6608	0.7259	0.7263	0.6547	0.6588	0.6395	0.3934	0.4071	0.4029

†: Burst Window での露出時間は、1/4, 1/8, 1/16 の Window オプションでそれぞれ 1, 0.5, 0.1 秒。

して求めたものを XIS のカウント数とした。これと、 SSD のカウントと、どちらも時間あたりに直して比を出した。 Window オプションを用いる場合は、 1/4, 1/8, 1/16 に応じて SSD のカウントも 1/4, 1/8, 1/16 にして計算した。 Burst Window モードは、露出時間は表 4.9であるが、この実験では、蛍光 X 線が全面に一様に当たっているため、転送中に受けた X 線を区別できない。そのため、表 4.9の値に 25 ミリ秒加えたものを露出時間とした。その結果、 Normal, Normal Window, Burst Window はほぼ同じ量子効率が得られた。

Burst モードは量子効率が大きくなっているが、スペクトルの形もおかしいことから、これはマイクロコードに何らかの間違いがあるのだと思われる。詳しい原因は調査中である。また、前述したように P-sum モードと他のモードは比較できない。 P-sum 同士はほぼ同じ検出効率が求められたので、それで良いことにする。

4.6 量子効率

西内修論 ([6]) で、 EM1 の量子効率を測定したが、今回新たに EM2(SS) および S3 の量子効率を求めた。また、 MIT でも別に独立な方法で量子効率を測定しているので、両者の結果を比較する。

4.6.1 京大における量子効率測定

京大では、 XIS に X 線を照射している時は、同時に SSD により強度のモニターが行われている (図 4.1参照)。しかし、 SSD の構造は複雑であり、また位置も XIS と違うため、 SSD のカウント数から直接 XIS に入射する X 線の光量を見積もることは難しい。そこで、 XIS と同じ位置に構造の単純な比例計数管を置き、そのカウント数と SSD のカウント数の関係を求め、最終的に XIS に入射する X 線の flux を求めた。無理に式で表せば、

$$\frac{F_0(\mathrm{XIS})}{F(\mathrm{SSD})} = \frac{F_0(\mathrm{PC})}{F(\mathrm{SSD})}$$

$$F(\mathrm{PC}) = Q(\mathrm{E}) \cdot F_0(\mathrm{PC})$$

$F_0(\mathrm{XIS})$:	XIS に入射する X 線の光量
$F(\mathrm{SSD})$:	SSD が検出した X 線の光量
$F_0(\mathrm{PC})$:	比例計数管に入射する X 線の光量
$F(\mathrm{PC})$:	比例計数管が検出した X 線の光量
$Q(\mathrm{E})$:	計算で求められた PC の検出効率

となる。 flux はすべて単位面積あたりの光量としている。この時 XIS の量子効率は、 XIS が検出した X 線を $F(\mathrm{XIS})$ で表すと、

$$(\text{Quantum Efficiency}) = \frac{F(\mathrm{XIS})}{F_0(\mathrm{XIS})}$$

として求められる。 PC の量子効率の決定については西内修論 ([6]) を参照のこと。

上記の式に従い、 Al, Cl, Ti, Fe, Ni, Zn の 6 つのターゲットに対して量子効率が求められた。

まず F_0(PC)/F(SSD) であるが、比例計数管は K_α と K_β を分離できないため、 EM1 では二つの輝線を一緒にして計算してしまっていたが、今回はこれらを別々に計算することにした。この際、元の二次 X 線源から出てくる X 線の K_α/K_β 比によって比例計数管に入射する X 線を K_α と K_β に分けなければならない。そこで、 SSD で K_α と K_β を分離した強度を測定し、 SSD の二つの輝線に対する検出効率の違いの分を戻してやることで、入射 X 線の K_α/K_β 比を求め、この値を使用した。 Al だけは二本のラインを分離できないため K_α のみであるが、もともと K_β は 1/100 程度の強度しかないので、無視して構わない。したがって、 $(6\times2-1)$ 点のエネルギーで調べられたことになる。表 4.11に、これらの数値を示す。SSD は scaler で計数された全カウントからバックグラウンドを引いたものを使用し、比例計数管は fitting で $K_\alpha+K_\beta$ を出し、 dead time 補正を行った。

F_0(PC)/F(SSD) が分かってしまえば、 XIS の実験と同時にモニターしている SSD のカウント数を元に、 XIS に入射しているであろう光子数が推測でき、量子効率を測定できる。XIS のカウント数は、 Grade 0, 2, 3, 4, 6 の合計とした。その全イベント数を、 fitting で求めた K_α, K_β の比に従って分配し、その値の入射光子数に対する割合を調べた。表 4.12に Segment A の結果を示す。

同様に、 S3 に対しても量子効率を求めた。同じく表 4.12に結果を示す。

4.6.2 MIT での量子効率測定

XIS のキャリブレーションは、 MIT でも行われている。量子効率の測定は、京大とは全く違う独立な方法で行われた。

MIT では、量子効率は、低エネルギー側と高エネルギー側に分けて測定が行われた。つまり、電極など空乏層の前にある構造と、空乏層の厚さとをそれぞれ求めたのである。以下、測定法を簡単に説明する ([13] 参照)。

まず、 reference となる CCD の量子効率を測定する。これは、 Bessy という放射光施設を使用した。加速器内に数個の電子を入れ、この電子の数等を知ることで計算で正確に X 線スペクトルを求めることができる。この X 線放射で reference CCD の量子効率がわかれば、後はこの CCD との検出効率の比を求めることで他の CCD の量子効率を測定できる。

低エネルギー側の量子効率は、空乏層に達するまでの電極などのゲート構造によって決まる。図 4.23に、ゲート構造の模式図を示す。さらに、ピクセルの境には、ゲート構造の下にチャンネルストップもあり、これも低エネルギー側の吸収に聞いてくる。この構造を図 4.24に示す。

Table 4.11: SSD のカウント数に対し、比例計数管で求められた全入射光子数

target	exposure sec	N(SSD)† counts	F(SSD)* cnts/sec	N(PC)‡ counts	PC Q.E.§	K_α/K_β	F_0(PC)¶ ph/s/cm^2	$\frac{F_0(\mathrm{PC})}{F(\mathrm{SSD})}$
Al K_α	2300	154178	65.34	50782.2	1	1	120.323	1.841
K_β					1	0	0	0
Cl K_α	2800	152758	52.87	52216.5	0.78	12.154	54.8439	1.037
K_β					0.71	1	4.51235	0.085
Ti K_α	2300	124409	52.4	49718.7	0.98	4.8947	38.0954	0.727
K_β					0.95	1	7.78299	0.149
Fe K_α	3600	195075	52.5	56103.8	0.71	3.3056	33.8076	0.644
K_β					0.61	1	10.2275	0.195
Ni K_α	4000	228054	55.32	50523.9	0.56	4.1	36.67	0.663
K_β					0.46	1	8.94391	0.162
Zn K_α	4500	303639	65.79	48706.1	0.42	3.4465	40.1652	0.611
K_β					0.33	1	11.6538	0.177
bgd$^\$$	1789	3023	1.69	—	—	—	—	—

†: SSD の総カウント数。

∗: SSD のカウントレート。バックグラウンドを引いてある。

‡: PC のカウント数。 fitting で $K_\alpha+K_\beta$ を出し、 dead time 補正したもの。

§: 比例計数管の量子効率

¶: PC のカウント数を量子効率で入射光子数に戻してやり、 K_α/K_β 比にしたがって分配したもの。単位面積、単位時間あたりの量にしている。

$: バックグラウンド。 X 線を照射しない時のカウント。

Table 4.12: EM2, S3 の量子効率

target	exposure sec	N(SSD) counts	F(SSD) cnts/sec	N(XIS)† counts	K_{α}/K_{β}^{*}	F(XIS) cnts/s/cm^2	Q.E.‡ (EM2)	Q.E.§ (S3)
Al K_{α}	1800	82949	44.393		1	42.04	0.6340	0.7074
K_{β}					0	0		
Cl K_{α}	1800	94312	50.7058	121367	1	44.22	0.8860	0.7415
K_{β}					0.2	4.315	1.0500	0.8786
Ti K_{α}	1800	115977	62.7419	117455	1	39.01	0.8645	0.8951
K_{β}					0.1	7.963	0.8640	0.8985
Fe K_{α}	1800	—	—	—		—	—	0.8173
K_{β}						—	—	0.7440
Ni K_{α}	1800	115809	62.6486	84396	1	27.7	0.6680	0.7028
K_{β}					0.22	6.056	0.5990	0.6435
Zn K_{α}	1800	117556	63.6191	73184	1	23.69	0.6100	0.5650
K_{β}					0.24	5.583	0.4960	0.4620
bgd	1789	3023	1.69	—	—	—	—	

†: Grade 02346 の全カウント数

∗: XIS のデータを fitting して求められた、 XIS が検出したイベントの K_{α}/K_{β} 比。入射 X 線の比ではない。

‡: SSD のカウントレートと表 4.11 の結果から求めた、入射 X 線強度に対する XIS の検出したカウントの割合。 XIS のカウントは、 K_{α}/K_{β} にしたがって分配した。すなわち、 EM2 の量子効率。

§: EM2 と同様に求めた S3 の量子効率。

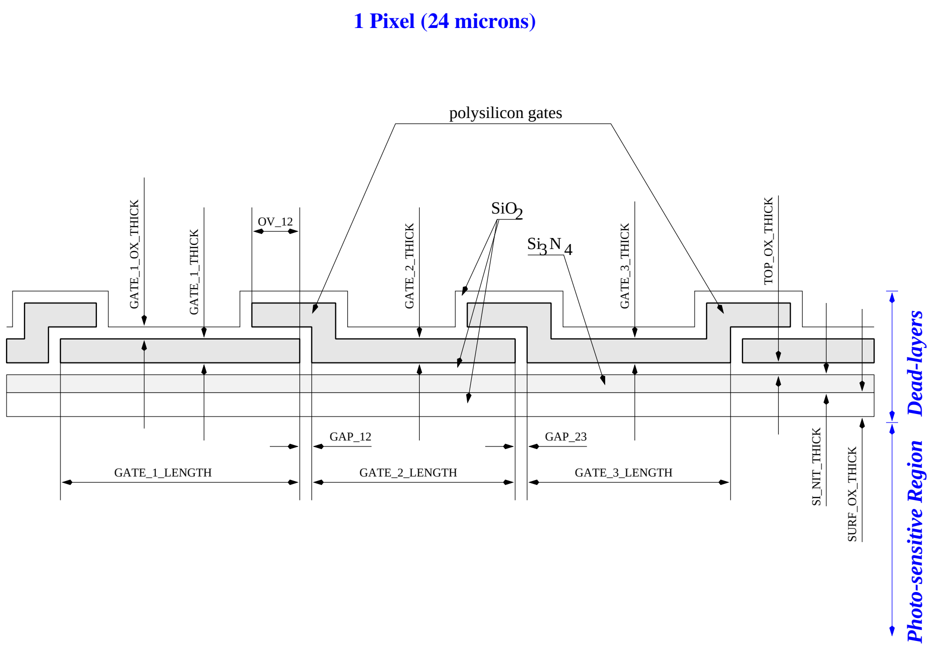


Figure 4.23: XIS のゲート構造

低エネルギー側の量子効率がわかれば、これら電極などの構造の吸収量を決定できる。チャンネルストップの厚さや幅は、 SEM や mesh の実験から決められた。また、空乏層の厚さは、高エネルギー側の方で説明するが、 Grade 分岐比から求められるものを使った。チャンネルストップ、空乏層厚のパラメーターを仮定し、シミュレーションモデルで実際に得られたスペクトルを fitting してゲート構造のパラメーターを決定した。こうして求められた値は、表 4.13の通りである。ただし、表に示したのは、 XIS と同等の別の CCD に対する数値である。

Table 4.13: 量子効率を決定するパラメーター

決め方	fitting			mesh	SEM		分岐比
parameter	$Si^{+\dagger}$	SiO_2^{++}	Si_3N_4	CS* Si	CS* SiO_2	CS* Width	空乏層厚
(μm)	0.259	0.354	0.031	0.35	0.45	4.1	71.3

†: 電極の polysilicon の厚さ

∗: Channel Stop

次に、高エネルギー側の量子効率を求めるため空乏層厚を決定する。中性領域と空乏層、それぞれで吸収される X 線の比を調べ、それにより空乏層厚を求めた。 X 線の吸収される平均的な深さを λ とし、空乏層の厚さを d_d とすると、この二つの領域で吸収される X 線の

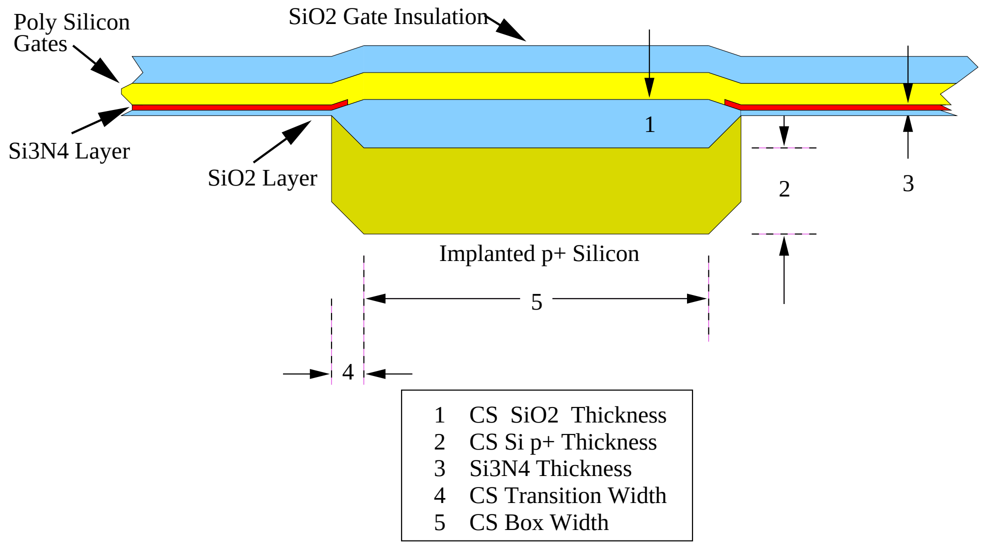


Figure 4.24: チャンネルストップの構造

数は、次の関係で表される。

$$\mathrm{N_{und}} = (\mathrm{N_d} + \mathrm{N_{und}}) \exp\left(-\mathrm{d_d}/\lambda\right) \tag{4.2}$$

ここで、 $\mathrm{N_d}$ が空乏層、 $\mathrm{N_{und}}$ が中性領域で X 線が吸収された時のイベントの数を表す。この式は、すべての X 線が、空乏層か中性領域で吸収されることを仮定している。したがって、 λ が空乏層厚より少し短くなるエネルギーの X 線で実験を行う。

この $\mathrm{N_d}$ と $\mathrm{N_{und}}$ は、電荷の広がりの大きさで区別できる。そこで、 Grade 方式を用いて二つを区別した。 $\mathrm{N_d}$ は、 Grade 0, 1, 2, 3, 4, 6 のイベントをすべて加えたスペクトルの、main peak の $\pm 3\sigma$ に含まれるイベント数、 $\mathrm{N_{und}}$ は Grade 7 のスペクトルの、 main peak から 3σ 以上低いイベントの総数とした。実際には、

1. 中性領域で電荷が生成されたイベントは、 K_α と K_β が区別できないため、 K_β まで含めてしまう。

2. 深いところで吸収されたイベントの中には、広がりが大き過ぎてイベント閾値より低くなってしまい、検出されないものがある。

という問題があるが、この二つは打ち消しあう方向に働くので、数 % しか効かない。

Table 4.14: 各検出器の空乏層厚

検出器	S0	S1	S2	S3	SS(EM2)
空乏層厚 (μm)	72.43	64.43	69.54	69.08	66.97

こうして空乏層厚が求められた。結果は、表 4.13に示した。

これらの結果から、一つの基準となる CCD の絶対量子効率が求められた。他の CCD については、基準の CCD と交互に X 線をあて、強度比を比べることで絶対量子効率を測定した。その後、空乏層厚等のパラメーターを求めるのである。

MIT で基準 CCD との比較実験で使われたのは、 O, F, Si, P, Ti, ^{55}Fe, Cu の蛍光 X 線である。この各点で量子効率が求められた。 S0–S3 の空乏層厚を表 4.14に、 EM2 と S3 の MIT と京大で求められた検出効率の比較を図 4.25、図 4.26にそれぞれ示す。また、基準となった CCD の量子効率も参考のため図 4.27に示した。

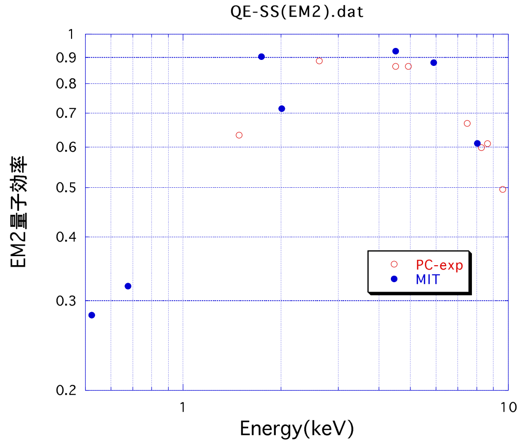


Figure 4.25: EM2 の量子効率。 ○ が京大、 ● が MIT の結果。

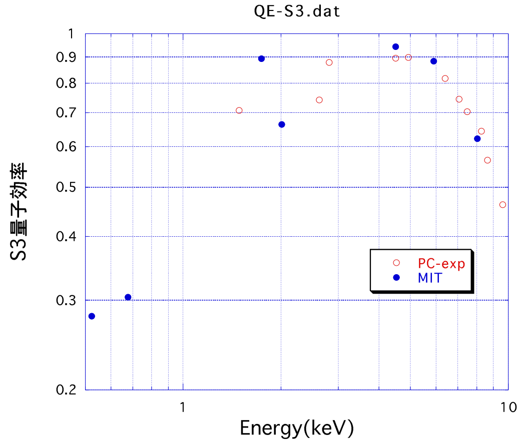


Figure 4.26: S3 の量子効率。 ○ が京大、 ● が MIT の結果。

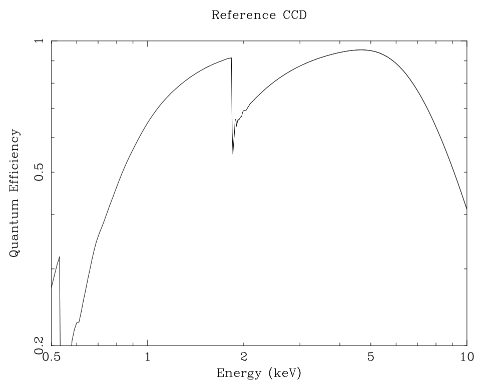


Figure 4.27: reference CCD の量子効率

第 5 章

新しいデータ処理法

「あすか」では、データの容量に対する制限から 3×3 ピクセルの情報しか得ることができなかった。そのため Grade も、3×3 ピクセル内の情報を使ったものしかない。XIS では、ASCA で使われた Grade 方式の Grade 0, 2, 3, 4, 6 を X 線イベントと考える。Grade 7 は 3×3 いっぱいに広がっており、宇宙線など高エネルギー粒子によるものと考えられるからである。しかし、X 線でも高いエネルギーのものの中には、広がりが大きく Grade 7 に分類されてしまうものもある。図 5.1は Zn の蛍光 X 線で Grade 7 に分類されたもののスペクトルであるが、X 線のエネルギーに相当するピークが見られる。

XIS では 5×5 ピクセルのデータが使えるので、高エネルギー粒子によるものと X 線だが広がりが大きく Grade 7 に分類されてしまったものを見分けられることが期待できる。図 5.1のピークを X 線イベントとして拾えるような新しいイベント解析法を使えば、特に広がりの大きいイベントの多い、高エネルギー側での検出効率の増大が期待できる。

5.1 5×5 のイメージ

イベントとして抽出するためには、X 線イベントで Grade 7 に分類されているのはどのようなものか知らなければいけない。そこで、まず 5×5 のイメージはどのようになっているのか調べた。

図 5.1のスペクトルのピークをガウシアンで fit し、$\pm 1\sigma$ の範囲 (2370–2445ch) に含まれるイベントのイメージを図 5.2に示す。スプリット閾値を越えたピクセルを黒で塗りつぶしてある。さらに、ピークより高いイベント値 (2800–4000ch) と低いイベント値 (1500–1800ch) のものを同様にそれぞれ図 5.3、図 5.4に示す。

一見しただけで、ピークに含まれるイベントとそれ以外のイベントには違いが見られる。図 5.2のイベントは、Grade 7 に分類されてはいるが 3×3 の中におさまっているのがほとんどである。一方図 5.3、図 5.4のイベントは、5×5 の最外郭にまで広がっていることがわかる。

高エネルギー側のイベントは宇宙線などの高エネルギー粒子によるものと考えられるため、生成される電子の数も多く、半導体中深い場所で吸収されるため広がりが大きい。また

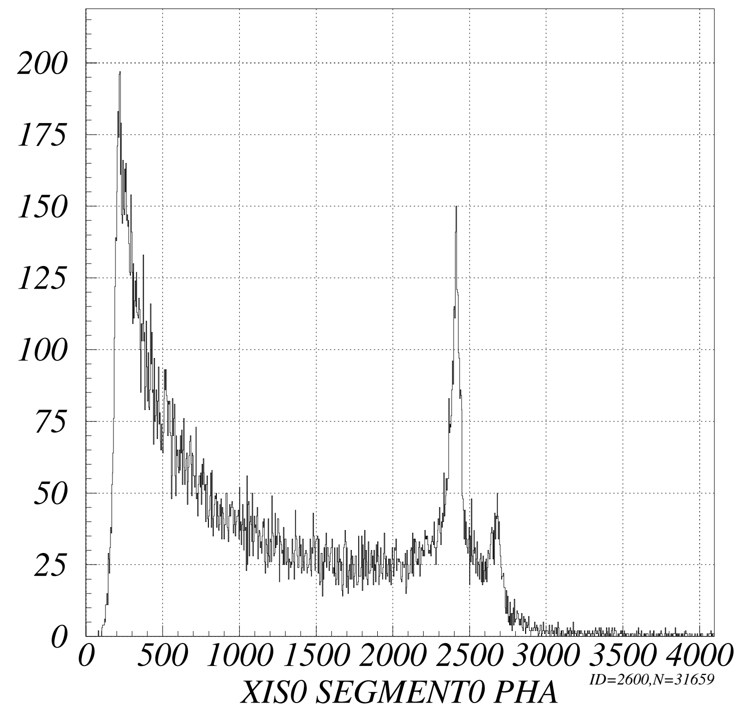


Figure 5.1: Grade 7 に分類されたイベントのスペクトル (Zn)

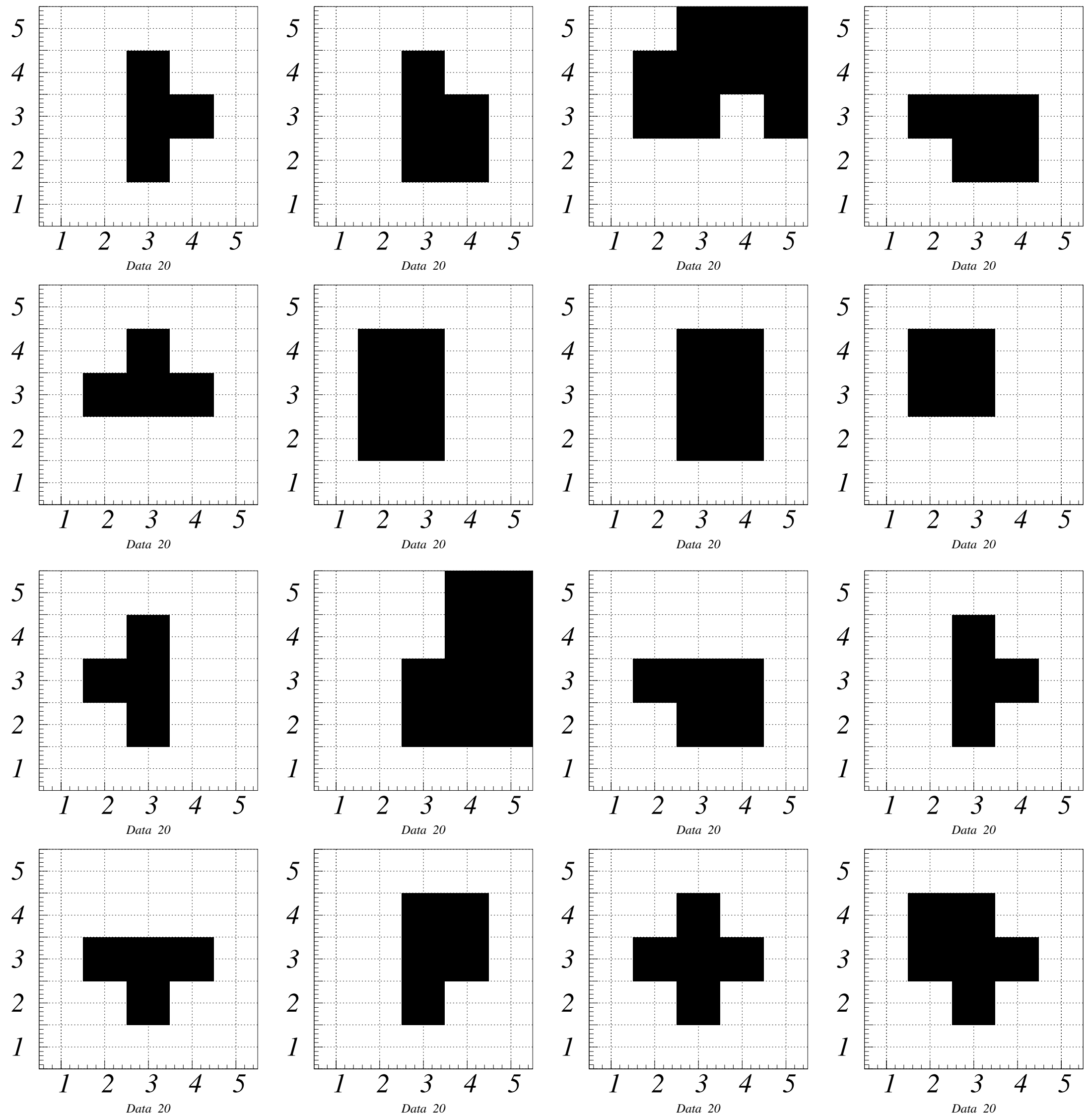


Figure 5.2: Grade 7 のうち、スペクトルのピーク (2370–2445ch) のイベントのイメージ (Zn)。スプリット閾値を越えるピクセルを黒く塗りつぶしてある。

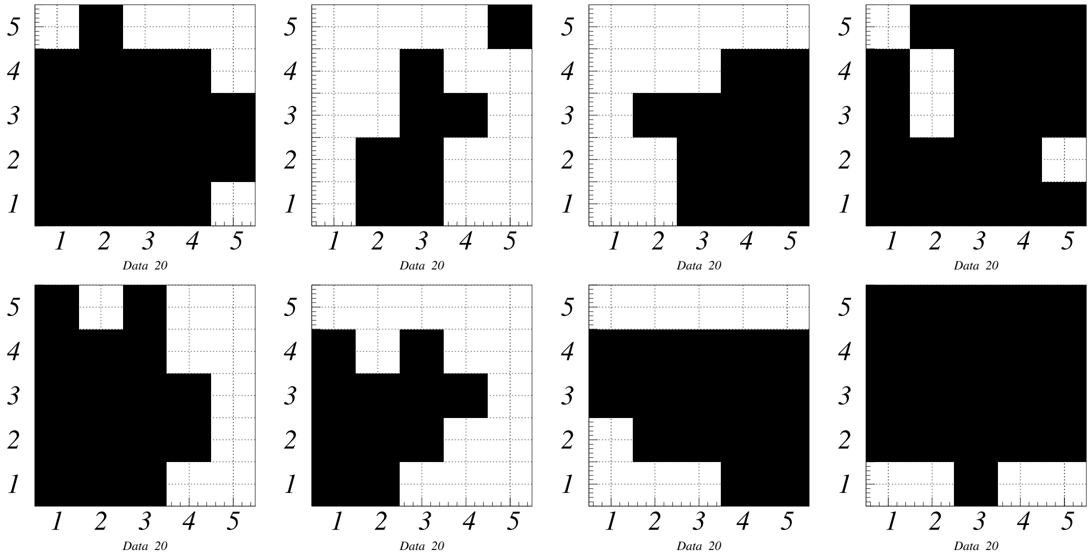


Figure 5.3: Grade 7 のうち、ピークより高いイベント値 (2800–4000ch) をもつイベントのイメージ (Zn)。スプリット閾値を越えるピクセルを黒く塗りつぶしてある。

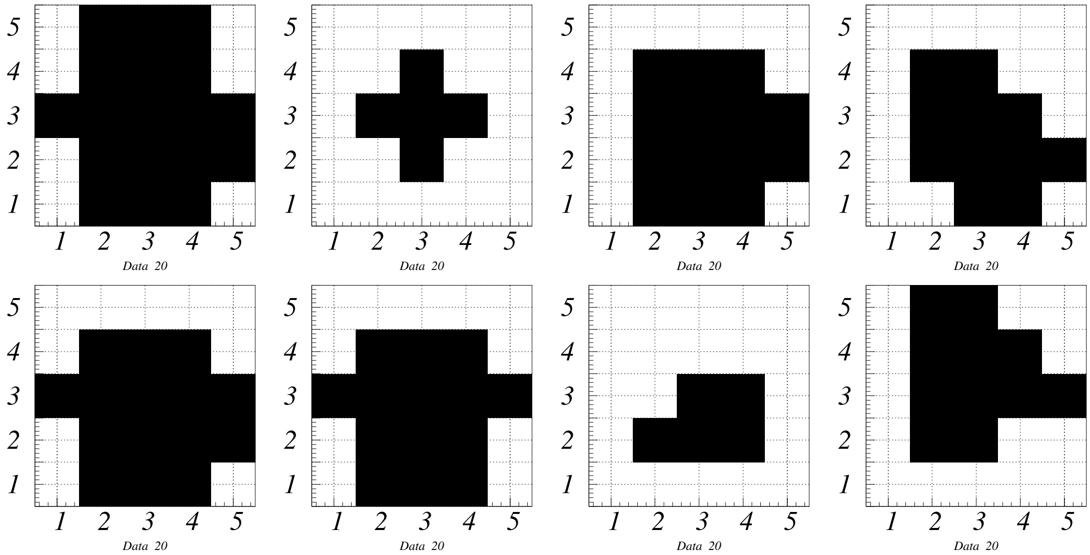


Figure 5.4: Grade 7 のうち、ピークより低いイベント値 (1500–1800ch) をもつイベントのイメージ (Zn)。スプリット閾値を越えるピクセルを黒く塗りつぶしてある。

低エネルギー側のイベントは、 X 線だが吸収された場所が深すぎたため広がりが大きくなり、電荷が集めきれなくなってしまったか、あるいは再吸収により一部の電子を失ったものと考えられる。

すなわち、どちらにしても広がりがそう大きくないイベントを選ぶことにより、 X 線によるイベントで、かつ正しい波高値を示すものを抽出することができるはずである。そこで、次節からこれらのイベントを検出する方法を考察する。

5.2 5×5 ピクセルを使った新 Grade

新しい解析法は、旧来のものとあまり大きく変わらなければこれまで得た知識を使うことができ、変更も少なくてすむ。そこでまずは、これまでの Grade 方式を拡張し、 5×5 ピクセルを使った新しい Grade を定義してイベント検出を行う。

5.2.1 新しい Grade の定義

図 5.2のようなイベントも収集するため、新しい Grade は次のように定義した。
「イベント中心とスプリット閾値を越えたピクセルの連なりが、 5×5 の境界に接しない、完全な離れ小島になっていること」
具体的には、次のような手順で選別を行った。

1. 3×3 のうち、イベント中心から十字に連なる 4 つのピクセルがスプリット閾値を越えているか調べる。
2. 越えていた場合、そのピクセルの外側の、角あるいは辺で接する 3 つのピクセルをチェックする。
3. 次に、 3×3 のうち、イベント中心と角で接する 4 つのピクセルがスプリット閾値を越えていないか調べる。
4. 越えていた場合、さらに 3×3 のなかでその両隣にあるピクセルがスプリット閾値を越えていないか調べる。
5. 両隣とも越えていた場合は、その 3×3 の角のピクセルの外側の、 5×5 の角に当たるピクセルをチェックする。
6. 2,5 でチェックしたピクセルの中に、スプリット閾値を越えるものがあれば、そのイベントは広がっているとして捨てる。チェックしたものすべてが越えていなければ、新しい Grade としてイベントに数える。

要は、隣か斜めかに接するうち、スプリット閾値を越えるピクセルのみをたどっていって 5×5 の外郭部に達しないイベントをすべて拾う、ということである。ただし、 3×3 の角か

Table 5.1: グレード法の解析に使用したデータ

data ID	照射 X 線	センサー	フレーム数
19980812_110000	Al	S3	420
19980812_180400	Cl	S3	420
19980812_210500	Ti	S3	420
19980813_203600	^{55}Fe	S3	125
19980813_031500	Fe	S3	420
19980813_062800	Ni	S3	420
19980813_140500	Zn	S3	420
19980813_171300	Se	S3	420

ら斜めをチェックするのはその両隣が閾値を越えている場合だけとしているが、これは近くに別のイベントが存在する場合に捨ててしまわないことを考慮したためである。

5.2.2 結果

表 5.1に示すデータで、従来の Grade 0, 2, 3, 4, 6 と新 Grade 方式によるものとで解析を行った。新 Grade でも、従来の Grade 1, 5 は捨てている。それぞれの方法による Zn のスペクトルを図 5.5に示す。

新 Grade 方式で得られたスペクトルは、低エネルギー側の tail が大きくなっている。低エネルギー側に tail ができるのは、広がったイベントの電荷の一部がスプリット閾値で数え落とされるためだとする解析結果が出ているが ([6])、 5×5 を使って、さらに広いイベントまで拾おうとしたためにその影響が大きくなってしまったのだと考えられる。

図 5.5の K_α 輝線をガウシアンで fitting し、エネルギー分解能とイベント数を求めた。表 5.2に結果を示す。 K_α で 3.4%、 K_β で 4.1%、カウント数が増加した。エネルギー分解能も 2% 程度悪くなっている。

5.3 fitting 法

Grade による X 線の分類には、広がった X 線イベントを捨ててしまう以外の問題もある。

1. Grade 6 イベント (田の字型等) は、実際には、広がったイベントの一部分のみを見ている可能性がある。この場合、 3×3 の外の電荷は数えられないため、実際より低いイベント値を示すことになる。また、 X 線ではないイベントも拾ってしまうおそれがある。

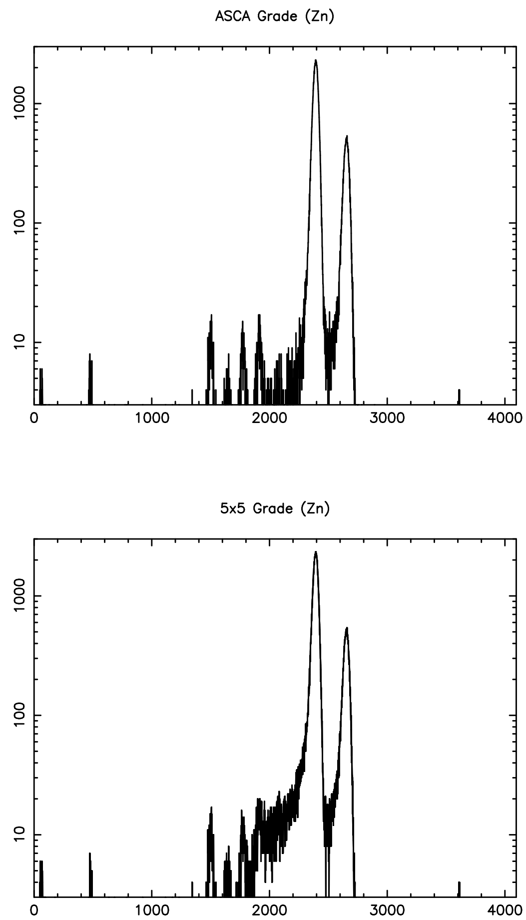


Figure 5.5: Grade 02346 と新 Grade の比較

Table 5.2: Grade 02346 と新 Grade の分解能、検出効率

Method	Line	Peak [ch.]	Width† [ch.]	Norm.*	Intensity [count]	検出効率 ‡ [%]
Grade 02346	Kα	2392.40	20.54	2229.46	114786	52.8
新 Grade		2391.76	20.99	2256.97	118743	54.6
Grade 02346	Kβ	2653.02	22.06	494.25	27330	23.8
新 Grade		2652.14	22.63	501.69	28453	24.8

†: ガウシアンの 1σ の幅。

∗: ガウシアンのピークの位置の値。

‡: 全 217489event に対する、 fitting で求められたピークのイベント数の割合

2. スプリット閾値を越えない電荷は数え落とされるため、 3×3 内に広がっている場合でも、正しいイベント値を示さない場合がある。これは、 tail 成分を作る要因となる ([6] 参考)。

3. 上記スプリット閾値は、そもそも人為的なパラメーターである。この値は、実験結果から試行錯誤で決められたものであり、物理的な意味はない。

このような問題を解決するため、 5×5 ピクセルのピクセルレベルに対して、 fitting を行うことでイベント検出を行った。

5.3.1 fitting の方法

各ピクセルの中心で、モデル関数の値とピクセルレベルを比較することにより、 fitting を行っている。本来、ピクセルレベルと比較する値としては、モデル関数をピクセル内で積分した値をとるべきであるが、計算時間を短縮するため、簡便な方法をとった。これにともない、 fitting の結果からイベントのイベント値を出す際にも、モデル関数の積分値ではなく、各ピクセルの中心でのモデル関数の値の和をとることとした。

fitting 関数には二次元のガウシアンを使った。 2.3式に示されるように、電子雲はガウシアンの形で拡がると考えられるためである。パラメーターは、 x,y 二方向の σ、ガウシアンの中心の x,y 座標、および normalization の 5 つであるが、 x,y 方向の σ は同じ値に固定して、 4 つのパラメーターで fitting を行った。中心座標は、イベント中心から $\pm$1ch、 σ は 3ch 以下とし、定数成分は含めていない。また、各ピクセルレベルの uncertainty は、読みだしノイズに相当する、 3ch(=12eV$\sim$3.2electron) を採用した。

5.3.2 結果

解析に用いたのは、表 5.1と同じ、 S3 で取得された Al, Cl, Ti, ^{55}Fe, Fe, Ni, Zn, Se の 8 種の蛍光 X 線のデータである。各種 10000event ずつ取り出して fitting を行った。例として、 Zn の fitting 結果のイメージを 図 5.6に示す。それぞれ左がデータ、右がモデルの 5×5 のピクセルレベルを表している。以降、何も断りのない場合は、 Zn のデータのみ解析した結果を示す。

モデルが、データを良く再現できていることがわかる。また、斜めや、一つおいた隣のピクセルにイベントがあっても、これを除いて一つのイベントだけをうまく fitting できている様子も見られる。

こうして fitting により得られたスペクトルを図 5.7a に示す。同じデータに対して従来の Garde 0, 2, 3, 4, 6 を抽出したスペクトル図 5.7b と比較すると、低エネルギー側に、多くのイベントが検出されている。これは、図 5.4のように、広がりが大きくイベント値の低いイベントまで含めてしまったためである。

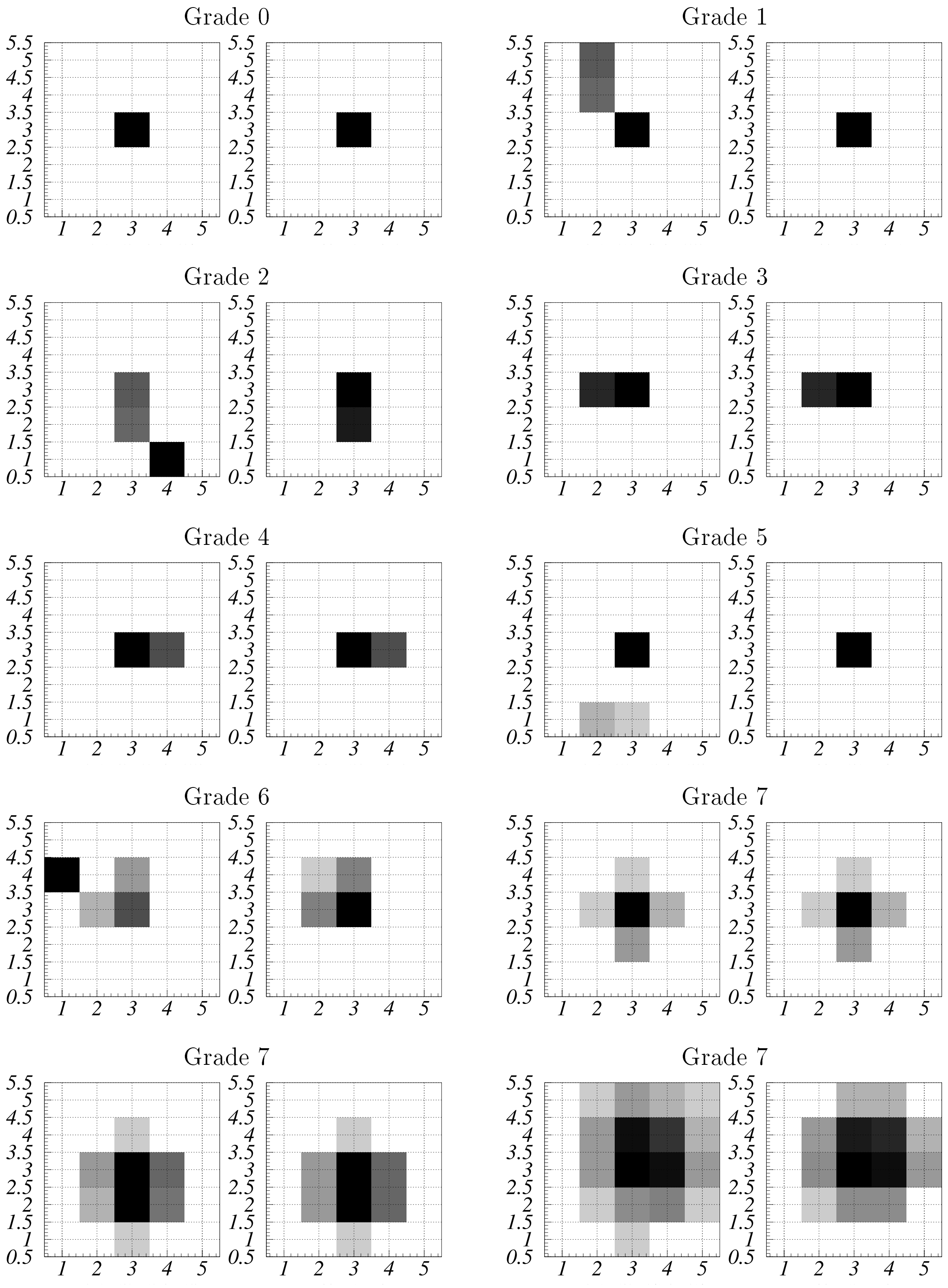


Figure 5.6: fitting の結果。それぞれ左がデータ、右がモデルで、ピクセルレベルをグレースケールで表示した。上に、従来の方法で分類された Grade を示している。

Table 5.3: 各方法による分解能および検出効率。エラーは 1σ レベル

Method	Line	Peak [ch.]	Width† [ch.]	Norm.*	Intensity [count]
Grade 02346	Kα	$2392.41^{+0.28}_{-0.28}$	$20.62^{+0.29}_{-0.29}$	$103.36^{+1.24}_{-1.23}$	5342
fitting($\sigma < 0.4$)		$2399.35^{+0.27}_{-0.27}$	$20.24^{+0.28}_{-0.28}$	$108.28^{+1.27}_{-1.26}$	5493
Grade 02346	Kβ	$2652.96^{+1.38}_{-1.39}$	$22.27^{+1.50}_{-1.40}$	$21.96^{+1.21}_{-1.19}$	1226
fitting($\sigma < 0.4$)		$2660.45^{+1.28}_{-1.29}$	$21.84^{+1.41}_{-1.32}$	$23.69^{+1.23}_{-1.21}$	1297

†: ガウシアンの 1σ の幅。

∗: ガウシアンのピークの位置の値。

そこで、どの程度の広がりまで、正しいイベント値をもつイベントとして検出できるのか、fitting で得られたガウシアンの σ とイベント値の関係をグラフにすることで調べた。結果を図 5.8に示す。

明らかに、$\sigma = 0.4$ を境にしてイベント値が急激に落ちているのがわかる。そこで、$\sigma < 0.4$ のみ選び出したところ、図 5.7c のスペクトルが得られた。低い PH のイベントは、ほぼ除かれている。

図 5.7b,c の Kα, Kβ をそれぞれガウシアンで fit した結果を表 5.3に示す。$\sigma < 0.4$ の条件で選別した場合、Kα で 2.8%、Kβ で 5.8% の量子効率の増加が見られた。その上、エネルギー分解能 (表中の Width) はほとんど変化がない。良くなってさえいる。

こうして fitting でイベント検出することが可能であることが示された。

5.3.3 広がったイベント

次に、$\sigma > 0.4$ のイベントはどのようなイベントなのか考える。図 5.8で、低いイベント値でもある程度まとまった範囲に分布しているものは、宇宙線等のバックグラウンドではなく蛍光 X 線によるものであろう。すなわち、これらのイベントは、何らかの原因で正しい PH 値を示さない X 線イベントである。

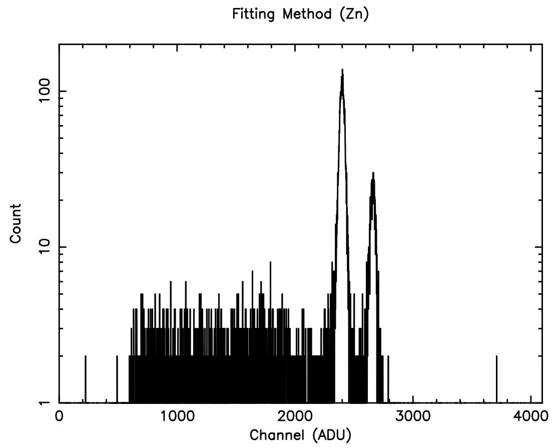
原因として考えられるのは、

1. 広がりが大きく、周縁部でガウシアンと合わない分が足しこまれなかった。つまり、電荷は正しく来ているが、集めきれていない。

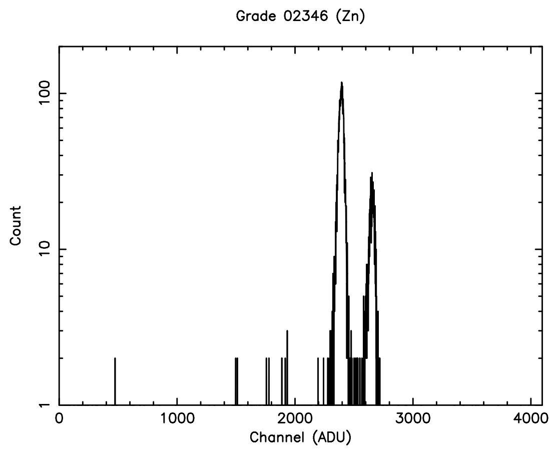
2. 電極まで達した電荷はすべて集めているが、半導体内の奥深くで吸収されたために、電極まで達しないものがある。

のどちらか、あるいは両方である。そこで、$\sigma > 0.4$ のイベントの、5×5 よりさらに広い範囲のイメージを調べた。図 5.9に、$800 <$ (イベント値) < 1300、$1.4 < \sigma < 1.5$ に含まれるイベントの一例を示す。

(a)



(b)



(c)

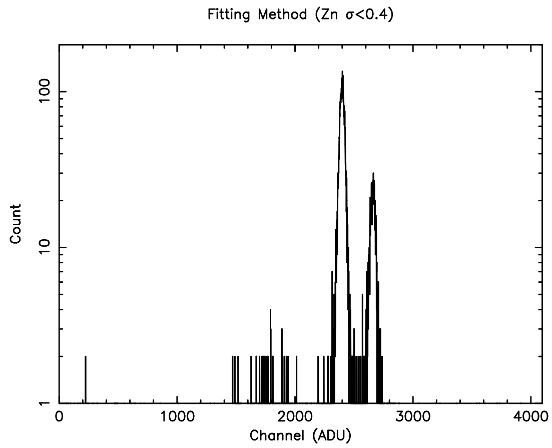


Figure 5.7: Zn の蛍光 X 線のスペクトル a: fitting 法 b: Grade 02346 c: fitting 法で σ <0.4ch としたもの

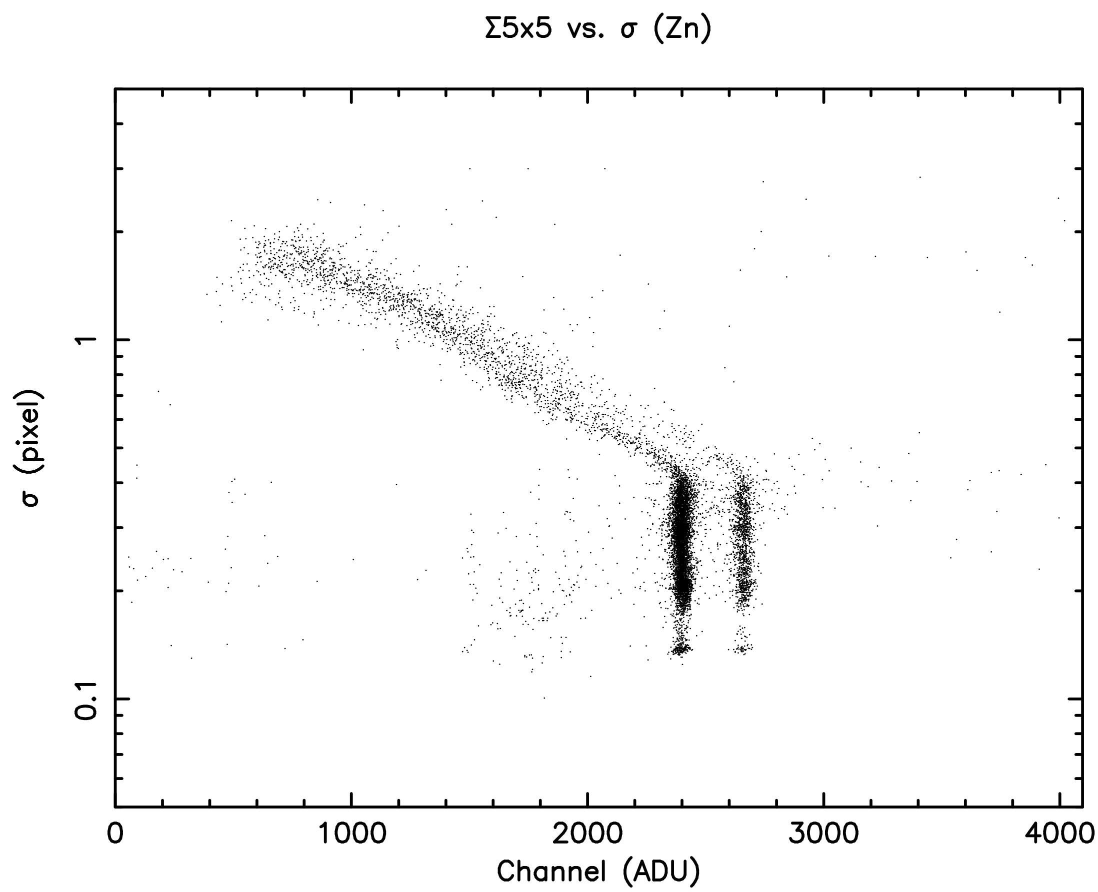


Figure 5.8: イメージの広がり σ とイベント値の関係。イベント値は、 5×5 ピクセルを足し合わせたもの。

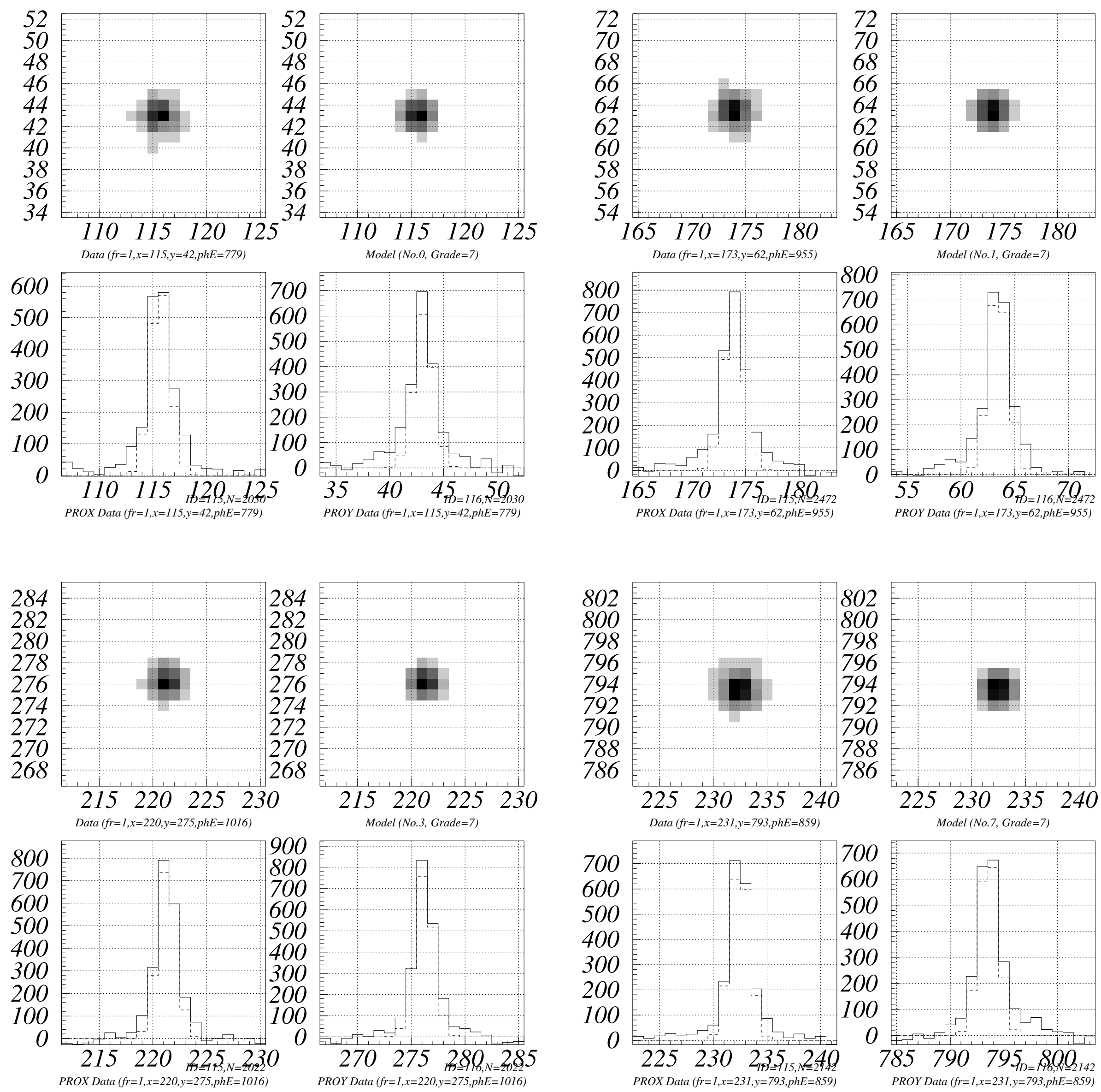


Figure 5.9: イベント値が低く計算されたイベントの 19×19 のイメージ。グレースケールの図は、左がデータで、右がモデル。ヒストグラムは、左が x 軸、右が y 軸への射影で、実線がデータ、破線がモデル。

図 5.9 は、4 つのイベントについて、データとモデルの 19×19 ピクセルのイメージ、および x 軸、y 軸へ射影したヒストグラムを示したものである。この場合も fitting は 5×5 ピクセルのみで行っている。イメージのみでは、観測データとモデルの間に、差はほとんど見られない。しかし、射影したヒストグラムから、データはモデルを超過している部分があることが分かる。周縁部でガウシアンより広がりが大きくなっているために、射影すると一様に超過分が生じるのである。

しかし、観測データも中心から 5 ピクセル程度でほぼ 0 になっており、超過分を全部たしこんでも、正しい値は得られない。やはり集め切れていないばかりではなく、電極へドリフトする過程で電荷が失われているのであろう。そこで、次に電荷の寿命と電極に達するまでの典型的なタイムスケールとの比較を行う。

まず、空乏層中で X 線が吸収された場合を考える。空乏層厚は、測定結果から 69 μ m と分かっている (4.6節参照)。電極には、数 V の電圧がかけられ、移動度は 8000cm^2/V/s なので (2.1.3節参照)、式 2.1を用いて移動速度を大雑把に見積もると、

$$v_e = 8000 \times (\mathrm{V}/0.0069) \sim 1 \times 10^6 \mathrm{Vcm/s}$$

となる。したがって、空乏層中を移動するのにかかる時間は、およそ 10^{-8} 秒である。これに対して、式 2.5において、$\sigma_p \sim 10^{-15}$ cm^2 であり、また [6] より $N_t \sim 10^{12}$ cm^{-3} なので、電荷が再吸収される時間は $\tau_p \sim 10^{-4}$ 秒となる。すなわち、空乏層中では、再結合による電荷損失はほぼ無視できる。

エネルギーの高い X 線の中には、空乏層で吸収されずつき抜けてしまうものがある。このような X 線は、空乏層の下層の、中性領域で吸収されるか、そこでも吸収されずにつき抜けてしまうか、ということになる (図 2.1)。そこで、次に中性領域で吸収される場合を考える。

2.1.1で述べたように、中性領域は、電界がなく、電子とホールは引き離されない。電界がないことから電子の移動は拡散だけによるものであり、電子とホールが混在することから寿命は短くなる。

まず、拡散は 2.3式より、$1\sigma = \sqrt{2Dt}$ で表される速さで進む。そのため、中性領域中で吸収される深さを z_0 とすると、空乏層に達するまでの時間は、おおよそ

$$\mathrm{T}_{dif} = \frac{z_0^2}{2D} \tag{5.1}$$

として良い。ここで、D は拡散係数であるが、2.4式より、電子の熱速度と平均自由行程だけで決まるので、これは空乏層中と変わらず、126cm^2 s^{-1}(2.1.3節参照) である。中性領域の厚さは 100 μ m 程度であるので (図 2.1,[5] 参照)、$\mathrm{T}_{dif} \sim 4 \times 10^{-7}$ sec となる。

一方、寿命は不純物密度 N_t と反比例するので、密度が 100 倍になれば、寿命はやはり $\sim 10^{-6}$ sec となり、拡散中の電荷損失は無視できない。

すなわち、図 5.8で、$\sigma = 0.4$ch の前後でイベント値が大きく変化するのは、中性領域で吸収されたイベントのためではないかと考えられる。このようなイベントは、空乏層へ達するまでの間に電荷を失い、大きく広がるのである。

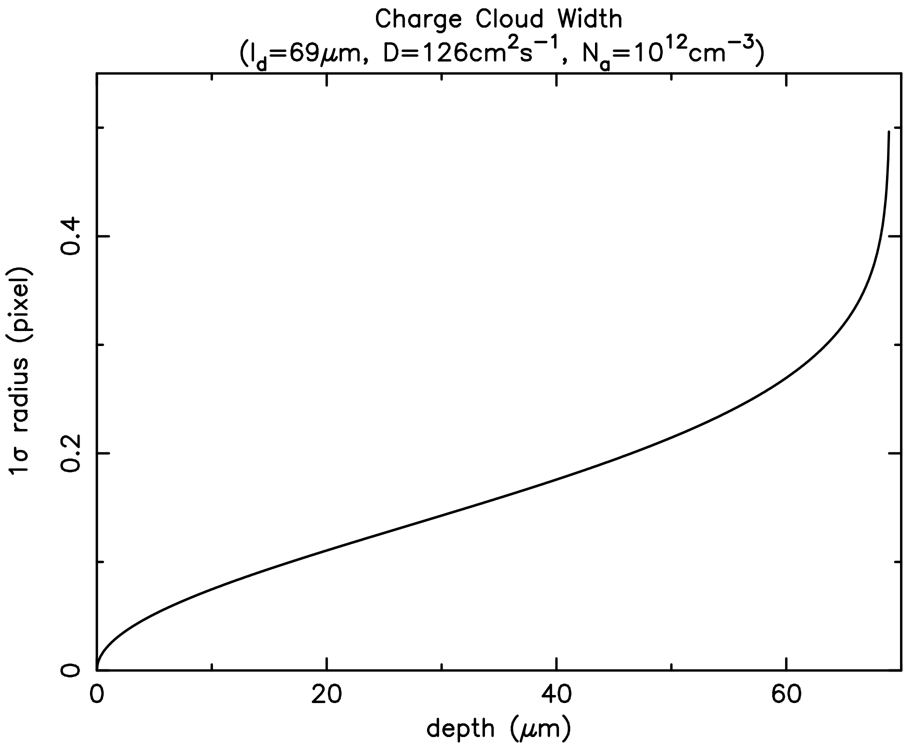


Figure 5.10: 空乏層の深さを 69μm とした時の電荷の広がり (1σ 半径)

$\sigma > 0.4$ch のイベントが、中性領域で吸収された X 線によるものだとすると、空乏層で吸収された場合は、広がりは 0.4ch 以内に収まるはずである。また、イベント値の広がり具合は、再吸収の進捗状況と一致しなければいけない。

空乏層厚を 69μm とした時、 X 線が吸収された深さに対する電子雲の 1σ 半径を書いたのが、図 5.10である。 0.4ch の広がりは、ほぼ空乏層の底で吸収されたイベントに相当する。図 5.8の折れ曲がりの位置は、空乏層と中性領域の境を表しているのだろう。これは逆に、fitting 法で空乏層厚を見積もることができるということである。これまで量子効率を求める際には X 線の絶対強度の測定が必要であったが、この方法を使えばあまり正確でないにせよ簡単に量子効率を測定できる。

Hopkinson (1983; [14]) は、中性領域で吸収された X 線の電荷収集について、 substrate が p 型と n 型の場合にわけて計算している。 XIS は substrate 中性領域が同じ p 型であるが、この場合境界条件により電子は中性領域から substrate へ抜けることはできない。吸収される深さ z_0 に対して、集められる電荷の割合は、次の式で表される ([14])。

$$h(z_0) = \frac{\cosh(d/L - z_0/L)}{\cosh(d/L)} \tag{5.2}$$

ここで、 L は拡散長 $\sqrt{D\tau_p}$ であり (2.6式参照)、 d は中性領域の厚さを示すものである。こ

のグラフは図 5.11のようになる。

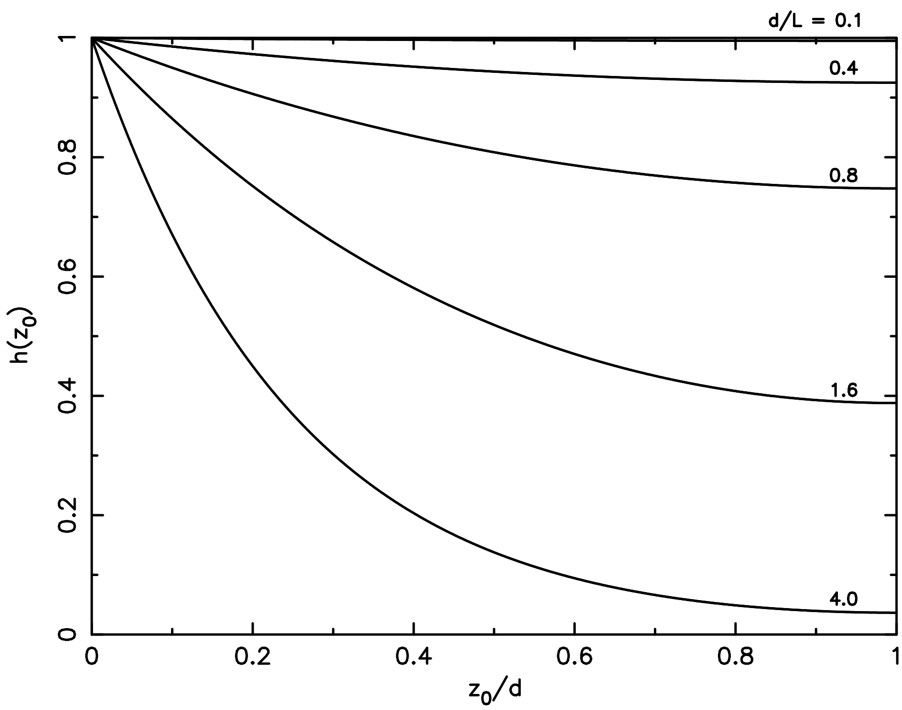


Figure 5.11: 中性領域で吸収される深さ z_0 に対する電荷の失われる割合 $h(z_0)$。深さは、中性領域全体の厚さ d との比 z_0/d で表している。拡散長と中性領域の厚みの比 $d/L = 0.1$, 0.4, 0.8, 1.6, 4.0 の五通り示した。[14] にあるのと同じ図である。

中性領域の厚みが拡散長に近付く、すなわち寿命と空乏層へ達するまでの時間が同程度になるにつれ、中性領域で吸収される電荷の割合が増えてくるのが分かる。当然 X 線が電子雲をつくり出す場所が深いほど吸収される割合も多い。

図 5.8の電荷の減る原因が、中性領域で吸収された X 線から生じた電荷が再結合で失われたためであるとすれば、 5.2式でグラフが説明できるはずである。ただし、図 5.11の横軸は吸収される深さであるが、図 5.8は電荷の広がりであるので、比較の際にはこの二つの関係を求めなければいけない。いま、中性領域では、電荷の移動は拡散だけと考えているので、深さ方向への拡がりと、水平方向への拡がりは同じ機構によるものである。そこで比例定数 k を用い、中性領域での広がりを

$$\sigma_{\rm ff} = k \cdot z_0 \tag{5.3}$$

と仮定した。さらに、空乏層中で $\sigma \sim 0.4{\rm ch}$ まで拡散することも考慮に入れて、式 5.2は、

$$h(z_0) = \frac{\cosh(d/L - (d/L) \cdot (\sigma - 0.4)/\sigma_0)}{\cosh(d/L)}$$

となる。ただし、ここでさらに $\sigma_0 = kd$ と置き換えている。これは、中性領域の一番底から空乏層へ達するまでに拡散する広がりを示す量である。この場合、電極に達した時の広がりは $\sigma_0 + 0.4$ である。

この式を使い、

$$\mathrm{PH} = \mathrm{PH}_0 \cdot h(z_0) \tag{5.4}$$

として $d/L, \sigma_0$ の二つのパラメーターに対して図 5.8の fitting を行った。この時、 PH_0 は、電荷を失わないときのイベント値なので、 $\sigma < 0.4$ だけで作ったスペクトル図 5.7c から求めた値を使用した。ただし、イベント値の計算には、 19×19 ピクセルの和をとった。 5×5 よりもとりこぼしが少なく、正しい値に近いと考えられるからである。図 5.12に K_α の fitting の結果を示す。 K_β を分離できないために系統的にずれているが、大体一致している。$\sigma \sim 1.8$ から再び上昇しているが、これは、中性領域の底が $\sigma \sim 1.8$ に相当するということである。すなわち、 $\sigma > 1.8$ の領域は、意味がない。

best-fit parameter は、 $d/L = 1.39, \sigma_0 = 1.41$。中性領域は拡散長の 1.39 倍の厚さをもち、中性領域の底から空乏層に入るまでに 1.41ch 広がる。 D=126cm^2 s^{-1} であったから、式 2.6より中性領域の厚さ d は、

$$156 \cdot \left(\frac{\tau_p}{10^{-6}\mathrm{sec}}\right)^{\frac{1}{2}} \mu\mathrm{m} \tag{5.5}$$

となる。また 1ch= 24μm なので、 $\sigma_0 = kd$ より、

$$k = 0.22 \left(\frac{\tau_p}{10^{-6}\mathrm{sec}}\right)^{-\frac{1}{2}} \mu\mathrm{m} \tag{5.6}$$

となる。深さ方向と水平方向で広がり方が全く同じだと考えると、 $k = 1$ より、 $\tau_p = 4.8 \times 10^{-8}\mathrm{sec},\ d = 34.2\mu\mathrm{m}$ となる。このような仮定をすると、中性領域中での不純物濃度は、2.5式より $4.2 \times 10^{15}\mathrm{cm}^{-3}$ である。

5.3.4 fitting 法の改良

中性領域で吸収された X 線の電荷は、空乏層に達するまでの間に吸収されてしまうので、正しい値より低いイベント値を示す。しかし、前節でこのようなイベントでも式 5.2で表現できることがわかった。それならば、イメージの広がりと、一部失われたイベント値から、元のイベント値を求めることができる。すなわち、中性領域で吸収された X 線も、イベントとして含めることができる可能性があるのだ。この方法であれば、 Grade 法では決して正しいイベント値を求めることのできないイベントも救える。空乏層以外で吸収される X 線も検出できれば、高エネルギー側での大幅な検出効率の増大が期待できるのである。

それにはまず、各エネルギーとも、イベント値 -σ の関係が同じパラメーターで fitting できることを確かめなければいけない。式 5.4の、 $h(z_0)$ がエネルギーの関数になってしまうと、単純に逆関係を求めることができないからである。パラメーターの物理的意味からも、

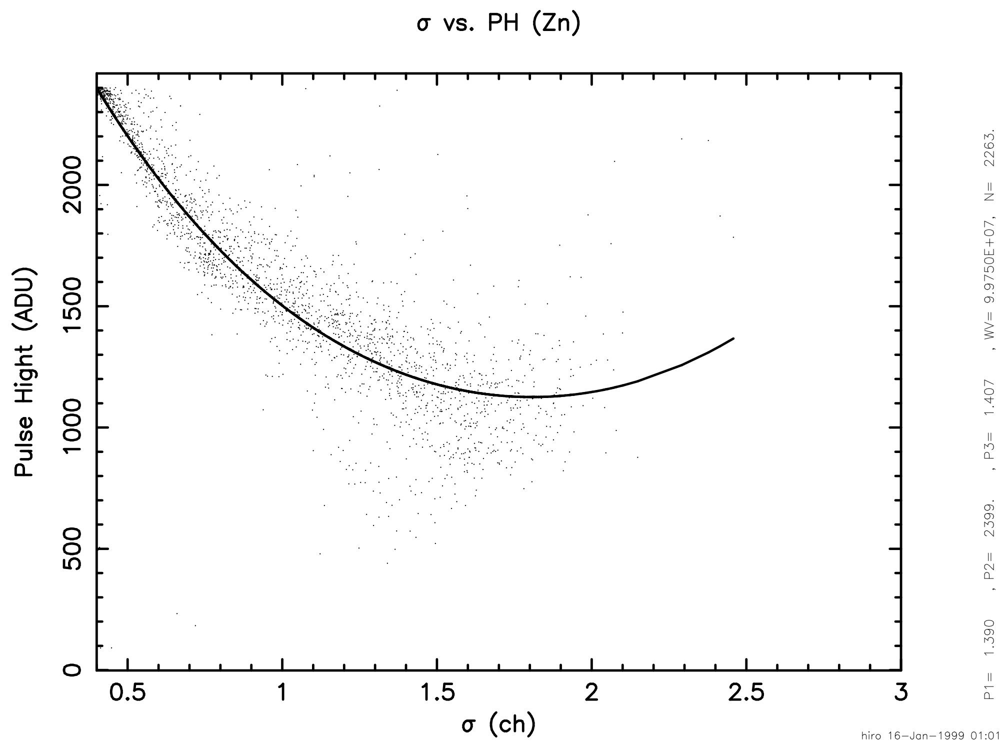


Figure 5.12: 中性領域で電荷の失われる様子を fitting した結果。図 5.8 とは縦軸・横軸が入れ替わっているのに注意。中性領域の底で吸収されても最大で $\sigma \sim 1.8$ までしか広がらず、$\sigma > 1.8$ の領域は意味がない。イベント値は、 19×19 を足し合わせたものである。

エネルギーによらず一定のはずである。図 5.13に 8 種の蛍光 X 線のイベント値 -σ の関係を示す。

前節で Zn のデータを fitting したのと同様に、 $d/L, \sigma_0$ の二つのパラメーターで、 ^{55}Fe, Fe, Ni, Zn, Se のイベント値 -σ 関係を fitting した。 Al, Cl, Ti は中性領域で電荷を失ったと思われるイベントはほぼ見られなかったので、 fitting は行っていない。結果を表 5.4に示す。fitting は、すべて K_α のみで行ったが、 K_β の洩れ込みを完全には除去できなかったため fitting の精度は悪く、エラーも小さくなってしまっている。しかし、各エネルギーともほぼ同じ値をとったので、エラーの大きさを考慮した上で平均をとり、 $d/L = 1.40, \sigma_0 = 1.37$ とした。

このパラメーターを用い、式 5.4で電荷を失う前のイベント値、 PH_0 を求めた。そうして得られた、 Zn のイベント値 -σ のグラフを図 5.14に示す。あまりきれいに戻っていない。図 5.12から分かるように、 fitting のモデルとデータ点には系統的なずれが見られる。前述したように K_β の影響も考えられるが、モデルは単純化されているため、完全には合わないのであろう。実際には、 XIS の中性領域には電極と逆方向に電子を集めるように電圧がか

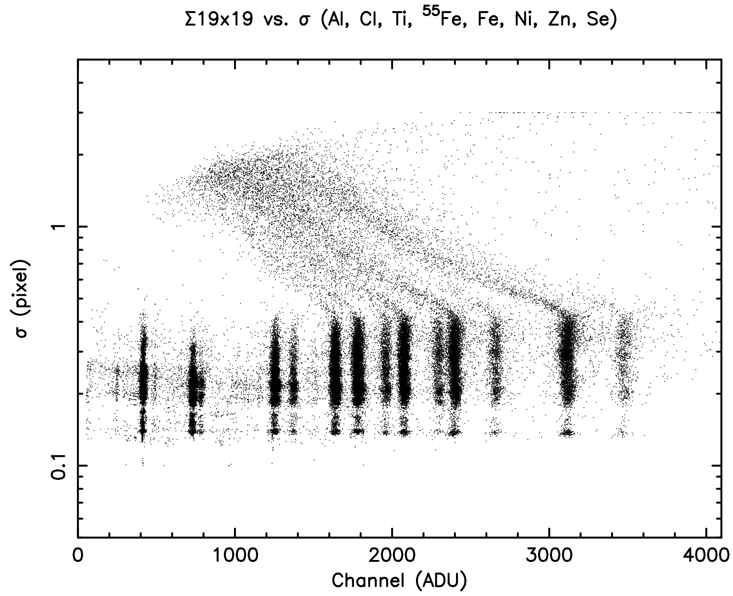


Figure 5.13: 8 種の蛍光 X 線のイベント値 -σ 関係。 channel の小さい方から、 Al, Cl, Ti, ^{55}Fe, Fe, Ni, Zn, Se である。イベント値は 19×19 ピクセルをたし合わせたもの。

Table 5.4: 8 種の蛍光 X 線を fitting した結果

	^{55}Fe	Fe	Ni	Zn	Se
d/L	$1.32^{+0.09}_{-0.06}$	$1.27^{+0.03}_{-0.03}$	$1.35^{+0.02}_{-0.02}$	$1.39^{+0.02}_{-0.02}$	$1.42^{+0.01}_{-0.01}$
σ_0	$1.22^{+0.18}_{-0.12}$	$1.18^{+0.07}_{-0.06}$	$1.28^{+0.04}_{-0.04}$	$1.41^{+0.05}_{-0.04}$	$1.40^{+0.02}_{-0.02}$

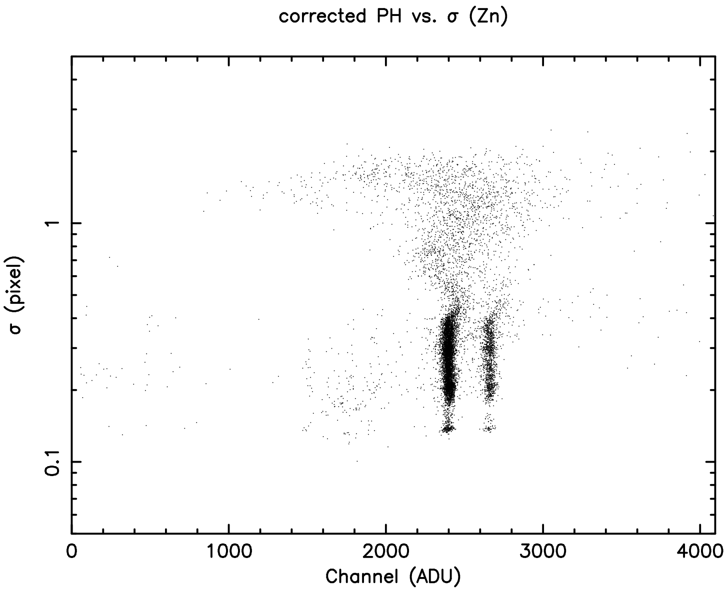


Figure 5.14: σ の広がりに対する修正後のイベント値

かっているが、今はこれを無視している。したがって、中性領域で吸収された X 線のイベント値を戻してやる場合には、イベントの数と正確さの兼ね合いをとらねばならない。σ が大きくなると、K_α と K_β が混ざってしまう。このようなイベントまで戻してやることにはあまり意味がないだろう。ある σ まで戻せればそれで充分である。

そこで、$\sigma < 0.6$ までを fitting し、そのパラメーターを用いることにした。今回は $0.4 < \sigma < 0.6$ でも充分統計の良い Zn, Se のデータのみを fitting した結果、パラメーターは、$d/L = 0.778, \sigma_0 = 0.407$ となった。先の結果と大分違う。モデルは完全には合わないため、局所的にはずれが大きくなってしまうのであろう。このパラメーターでイベント値を戻した結果、図 5.15が得られた。スペクトルは、図 5.16である。ピークに含まれるイベント数、エネルギー分解能を表 5.5に示す。表 5.3と比較すると、$\sigma < 0.4$ までよりさらに増え、従来の Grade 方から K_α で 9.7%、K_β で 15.0% も検出効率が増加したことが分かる。エネルギー分解能は悪くなったが、tail が見えるほどではない。$0.4 < \sigma < 0.6$ を取り出したスペクトルも、図 5.17に示す。

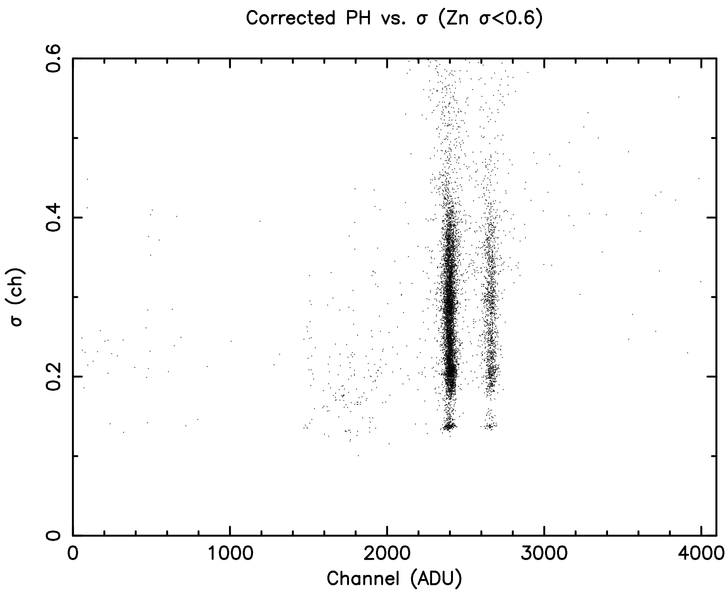


Figure 5.15: $\sigma < 0.6$ を fitting して吸収前のイベント値に戻したもの

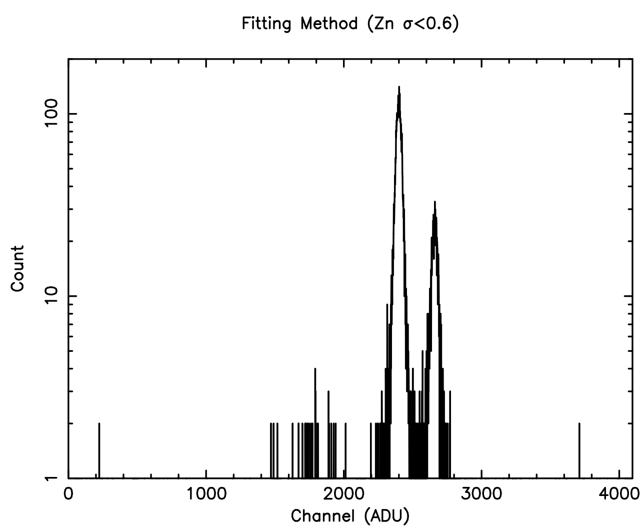


Figure 5.16: $\sigma < 0.6$ のイベント値を戻して得られたスペクトル

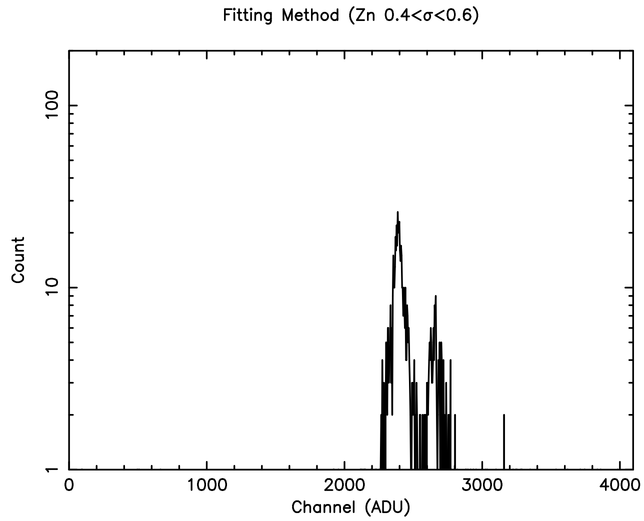


Figure 5.17: $0.4 < \sigma < 0.6$ のスペクトル

Table 5.5: 改良した fitting 法による分解能および検出効率。エラーは 1σ レベル

Method	Line	Peak [ch.]	Width† [ch.]	Norm.*	Intensity [count]
fitting($\sigma < 0.6$)	K_α	$2399.03^{+0.30}_{-0.30}$	$21.03^{+0.32}_{-0.32}$	$113.16^{+1.42}_{-1.41}$	5966
fitting($\sigma < 0.6$)	K_β	$2659.88^{+1.42}_{-1.43}$	$23.03^{+1.62}_{-1.49}$	$24.83^{+1.37}_{-1.36}$	1433

†: ガウシアンの 1σ の幅。

∗: ガウシアンのピークの位置の値。

5.3.5 バックグラウンドの除去

イベント抽出法は、イベントを多く検出するだけではいけない。バックグラウンドをきちんと取り除くことができなければ意味がない。バックグラウンドは、宇宙線などの高エネルギー粒子が主な原因である。そこで、 EMJ を使って、 ^{60}Co からの γ 線を照射する実験を行った。

図 5.18にイベント値 -σ をプロットしたものを示す。 $\sigma < 0.6$ のデータだけを使えば、ほぼ除去できる。 Grade 0, 2, 3, 4, 6 では、 ^{60}Co のデータの内 2.65% を X 線イベントと認識したが、 fitting 法で $\sigma < 0.6$ までとると、 3.99% を X 線イベントとしてしまう。

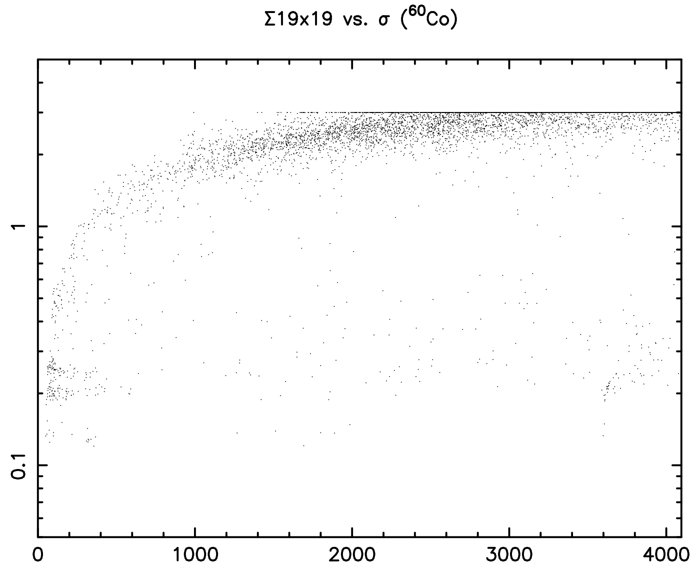


Figure 5.18: ^{60}Co を照射したデータの σ とイベント値の関係。イベント値は、 19×19 ピクセルをたし合わせたもの。

5.4 新 Grade 方式と fitting 方式の比較

最後に、従来の Grade 方式と 5×5 を使った Grade 方式、そして fitting 方式の 3 つの方法で、 Al, Cl, Ti, ^{55}Fe, Fe, Ni, Zn, Se の 8 種の蛍光 X 線データを解析した結果をまとめておく。新 Grade 方式は、 Al 242381, Cl 216575, Ti 221662, ^{55}Fe 103815, Fe 226401, Ni 218201, Zn 216700, Se 219177 イベントを解析した結果であるが、 Grade 0, 2, 3, 4, 6 と、fitting 法は、同じデータから 10000 イベント取り出して解析した結果である。 ^{55}Fe, Fe, Ni, Zn, Se のデータについては、 $\sigma < 0.6$ までの fitting 法も行った。

$\sigma < 0.6$ の場合の、 Grade 法に対する増加割合を図 5.19に示す。 X 線のエネルギーが 5 keV 以上でしだいに検出効率が上がっていく様子がわかる。 12 keV ではおよそ 20% も検出効率が増加する。同様に、エネルギーの悪化する割合も図 5.19に示した。エラーが大きいため詳しいことはいえないが、 10 keV 以下では分解能の有意な悪化は見られていない。

5.4.1 結果

Table 5.6: 従来の Grade、新 Grade、 fitting の各方式によるエネルギー分解能と検出効率

Line	Method	Peak [ch.]	Width† [ch.]	Norm.*	Intensity‡ [count]	増加割合 §
Al K_α	Grade 02346	412.01	8.23	440.87	9095	
	新 Grade	412.02	8.28	10599.91	220005(9077)	0.1%¶
	fitting($\sigma < 0.4$)	415.80	8.48	424.56	9028	2.6%¶
K_β	Grade 02346	—	—	7.09	146	
	新 Grade	—	—	199.07	4132(170)	
	fitting($\sigma < 0.4$)	—	—	21.16	450	
Cl K_α	Grade 02346	728.86	10.44	313.45	8204	
	新 Grade	728.68	10.35	6839.98	177455(8194)	−0.1%
	fitting($\sigma < 0.4$)	733.23	10.84	302.15	8214	0.1%
K_β	Grade 02346	780.74	11.66	27.41	801	
	新 Grade	780.93	11.59	597.28	17350(801)	0.0%
	fitting($\sigma < 0.4$)	784.64	12.38	26.27	815	1.7%
Ti K_α	Grade 02346	1251.17	13.47	225.57	7618	
	新 Grade	1251.05	13.54	5003.19	169849(7663)	0.6%
	fitting($\sigma < 0.4$)	1256.41	13.75	220.81	7612	−0.0%
K_β	Grade 02346	1367.38	15.35	41.81	1609	
	新 Grade	1367.20	14.78	939.87	34814(1571)	−2.4%
	fitting($\sigma < 0.4$)	1373.18	15.13	42.74	1621	0.7%
^{55}Fe K_α	Grade 02346	1634.49	16.04	193.59	7781	
	新 Grade	1634.33	16.05	1447.27	58219(5608)	−27.9%$
	fitting($\sigma < 0.4$)	1640.29	15.78	199.54	7892	1.4%
	fitting($\sigma < 0.6$)	1640.23	15.85	201.70	8013	3.0%
K_β	Grade 02346	1798.29	19.58	22.89	1124	
	新 Grade	1797.42	18.28	173.66	7955(766)	−31.9%$
	fitting($\sigma < 0.4$)	1805.66	18.18	24.75	1128	0.4%
	fitting($\sigma < 0.6$)	1805.55	18.39	25.04	1154	2.7%
Fe K_α	Grade 02346	1773.79	17.09	154.80	6632	
	新 Grade	1773.91	16.92	3500.44	148428(6556)	−1.1%
	fitting($\sigma < 0.4$)	1780.30	16.52	161.61	6691	0.9%
	fitting($\sigma < 0.6$)	1780.25	16.68	164.23	6868	3.6%
K_β	Grade 02346	1954.77	18.09	40.60	1841	
	新 Grade	1954.45	18.54	880.03	40903(1807)	−1.8%
	fitting($\sigma < 0.4$)	1961.31	18.15	41.70	1897	3.0%
	fitting($\sigma < 0.6$)	1961.11	18.50	42.84	1986	7.9%

Line	Method	Peak [ch.]	Width[†] [ch.]	Norm.^{ast}	Intensity[‡] [count]	増加割合[§]
Ni K_α	Grade 02346	2070.37	19.19	129.10	6211	
	新 Grade	2070.63	18.87	2921.49	138196(6333)	2.0%
	fitting($\sigma < 0.4$)	2077.17	18.33	137.43	6314	1.7%
	fitting($\sigma < 0.6$)	2077.13	18.65	141.10	6595	6.2%
K_β	Grade 02346	2289.43	20.70	26.60	1380	
	新 Grade	2289.02	20.68	603.09	31261(1433)	3.8%
	fitting($\sigma < 0.4$)	2297.17	20.52	27.71	1426	3.3%
	fitting($\sigma < 0.6$)	2296.72	21.09	28.79	1522	10.3%
Zn K_α	Grade 02346	2392.41	20.62	103.36	5342	
	新 Grade	2391.76	20.99	2256.97	118743(5480)	2.6%
	fitting($\sigma < 0.4$)	2399.35	20.24	108.28	5494	2.8%
	fitting($\sigma < 0.6$)	2399.02	20.75	112.71	5861	9.7%
K_β	Grade 02346	2652.96	22.27	21.96	1226	
	新 Grade	2652.14	22.63	501.69	28453 (1313)	7.1%
	fitting($\sigma < 0.4$)	2660.45	21.84	23.69	1297	5.8%
	fitting($\sigma < 0.6$)	2659.94	22.74	24.74	1410	15.0%
Se K_α	Grade 02346	3107.60	24.78	64.57	4011	
	新 Grade	3106.81	25.76	1484.84	95885(4375)	9.1%
	fitting($\sigma < 0.4$)	3115.99	25.58	68.33	4381	9.2%
	fitting($\sigma < 0.6$)	3115.80	26.80	72.41	4864	21.3%
K_β	Grade 02346	3465.89	27.30	10.77	737	
	新 Grade	3464.51	27.61	240.66	16656(760)	3.1%
	fitting($\sigma < 0.4$)	3474.19	28.46	11.31	807	9.5%
	fitting($\sigma < 0.6$)	3474.88	29.92	12.29	922	25.1%

†: ガウシアンの 1σ の幅。

*: ガウシアンのピークの位置の値。

‡: () 内は、全体を 10000 イベントとした場合の検出数

§: ASCA の Grade 0, 2, 3, 4, 6 から相対的に増加した割合

¶: Al は K_α と K_β が分離できないので、合わせて増加割合を出した。

$: データにゴミが混ざってしまっている。

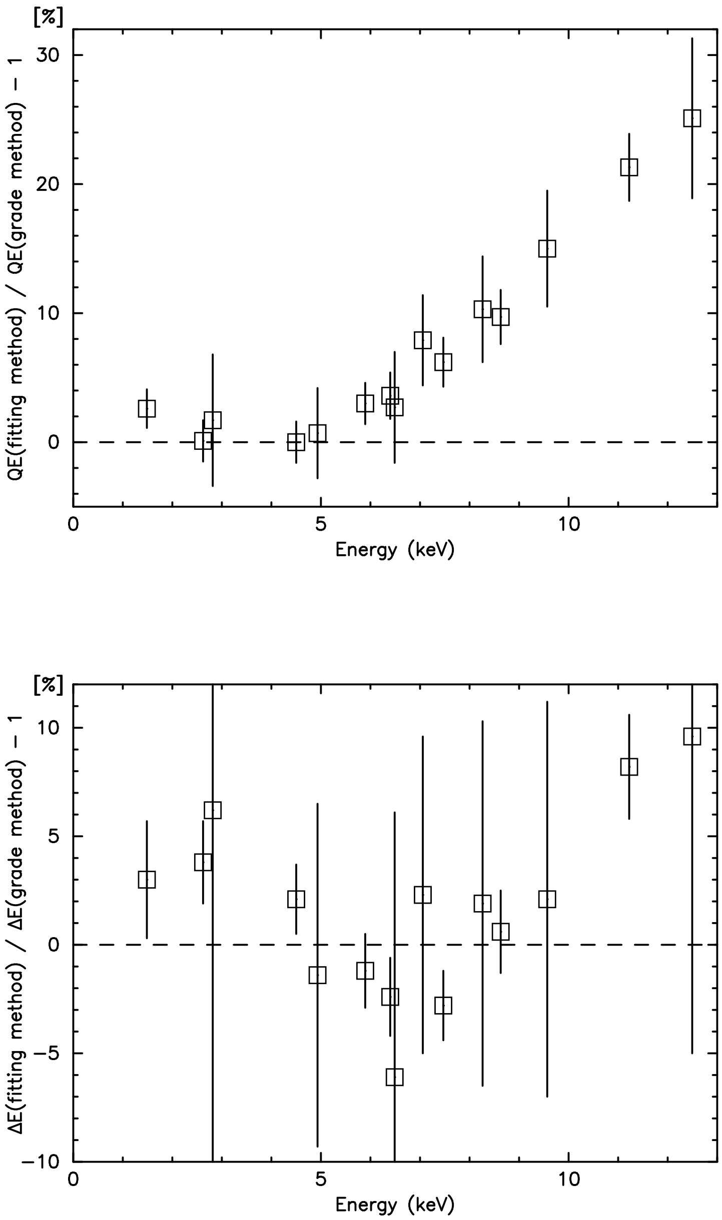


Figure 5.19: fitting 法による検出効率・エネルギー分解能の増加割合。 σ =0.6 pixel までとったものと、 Grade 法を比較したものである。ただし、 5keV 以下は σ >0.4 pixel のデータはほとんどなかったので σ <0.4 を使った。

5.4.2 S/N 比の比較

実際の観測に適用する場合に重要なのは、検出効率がどれだけ増えたかではなく、観測の統計がどれだけ良くなったかということである。暗い天体を検出する時にはノイズのゆらぎに対して天体からの X 線がどれだけあるかによって有意度が決まる。その統計の良さを表す量が S/N 比 (signal-noise 比) である。そこで、 fitting 法と Grade 法での S/N 比を比較するため、図 5.20に各方法の検出効率とバックグラウンドの混入率を plot した。検出効率は表 5.6に示した Zn の K_α 輝線、すなわち 8.6 keV の X 線に対するものであり、バックグラウンドの混入率は 5.3.5節で述べた ^{60}Co のデータを用いた結果である。 fitting 法は σ <2.0 pixel までとった場合についても載せてある。 S、すなわち signal は検出効率に比例して増える。その一方 N、 noise はバックグラウンドのゆらぎによるものなので、バックグラウンドの 1/2 乗に比例する。したがって、 (検出効率)/$\sqrt{(\text{バックグラウンドの混入率})}$ が S/N 比を表す。この S/N 比の値がこれまでの Grade 法の場合と同じになる場所を図 5.20中に実線で示した。この線より上にある方法を使えば S/N 比を改善することができるが、 fitting 法はどれも実線の下側、つまり S/N 比が悪い側に来ている。唯一、新 Grade 方式のみが S/N 比が良くなっている。 fitting 法は、 S/N 比という尺度で比べると全然良くないように思われる。

しかし、実際にはバックグラウンドには宇宙線などによるイベント (Non X-ray Background; NXB) に加え、 X 線背景放射 (Cosmic X-ray Background; CXB) も含まれる。 CXB はどの方法でも同じ割合で含まれるため、この寄与も考えなくては実際より大きい割合でバックグラウンドが増えるように見えてしまう。

SIS の場合では、 CXB は NXB の 4 倍程度の強度である ([15])。これを考慮した場合に S/N 比一定になる場所を図 5.20中に点線で示した。今度は逆に fitting 法が S/N 比が良くなることがわかる。実際に天体を観測する時のように、 CXB も含まれる場合には fitting 法の方が優れているということである。 XIS は放射線シールドが厚くなったことから CXB に対する NXB の割合は SIS の場合より小さくなると考えられるので、より fitting 法の効果が大きい。

しかし、 fitting 法には、問題が一つある。計算時間が長くかかるということである。 10000 イベント解析するのに、数時間かかってしまう。したがって、全イベントではなく、 Grade 7 と判定されたもののみ fitting 法を行う、などの工夫が必要である。

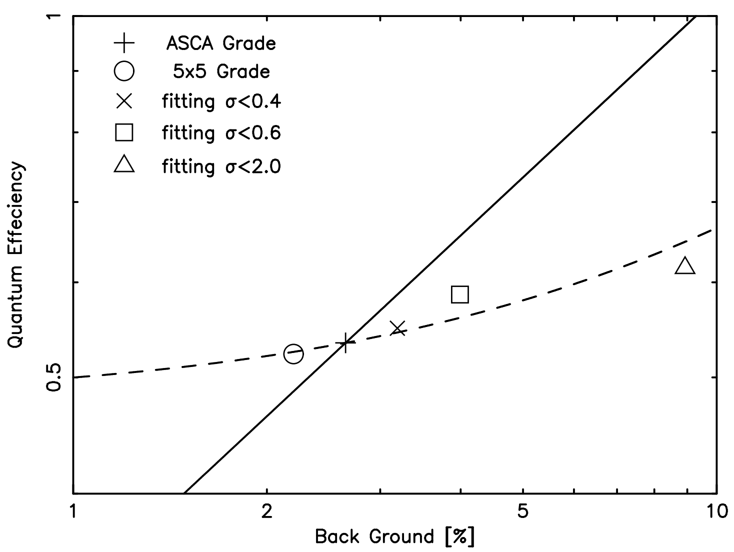


Figure 5.20: これまでの Grade 法 (ASCA Grade)、新 Grade 法 (5×5 Grade)、 fitting 法 ($\sigma < 0.4$, 0.6, 2.0 pixel) の S/N 比の比較

第 6 章

おわりに

6.1 まとめ

この修士論文は、京都大学で行われた、 XIS の評価実験を述べたものである。以下に内容を要約する。

- XIS のデータを解析する上で問題となる微分非線形性、スプリット閾値について考察した。
- XIS は、さまざまな状況での使用を想定して、 Normal, P-sum, Burst の各モードと Window オプションが用意されている。これらのモードの動作を確認し、ゲイン、エネルギー分解能、相対的量子効率を評価した。
- 絶対量子効率の測定を行い、 MIT の結果と比較した。空乏層や電極の厚さなどのパラメーターが決定できた。
- 新しいイベント検出法を試みた。電荷の広がりを二次元のガウシアンで fitting する方法で、検出効率が高エネルギー側で 10% 程度上がることがわかり、充分実用になりそうである。

6.2 今後の課題

- 応答関数作成

  一番重要なのは、応答関数を作成することである。 CCD に単色 X 線を入射しても、スペクトルは単純なガウス関数とはならない。その形を調べ、エネルギー毎に決めてやることが必要である。現在はゲイン・エネルギー分解能・量子効率が求められただけであり、これでは観測されたスペクトルから入射 X 線を推定することができない。

- fitting 法の実用化

fitting 法は、量子効率が増えることは明らかになったが、バックグラウンドがどれだけ混ざってくるかは、まだ簡単な見積りしかされていない。これを明らかにせねばならない。また、新しいイベント検出法を実際に使用するまでには、プログラムの作成など、多くの課題が残されている。特に計算時間の短縮が望まれる。

ASTRO-E は、 2000 年 2 月打ち上げ予定である。それまでに解析手順を整えねばならない。そうして次々と送られてくるデータから、未だ解明されぬ宇宙の神秘を探っていくのだ。 ASTRO-E によって多くの新発見がなされることを期待する。

謝辞

本修士論文は、多くの方々の指導・協力により完成までこぎつけました。

小山勝二教授からは、研究のさまざまな面での助言をいただきました。小山先生がその著作・講義でX線天文学を分かりやすく、魅力的に語って下さったのが、この分野に興味を持つきっかけとなりました。

粟木久光助手、鶴剛助手には、学部生の頃の学生実験からはじまり、XISの実験・データ解析・物理的解釈に至るまで、さまざまな面で御指導いただきました。

前田良知さんには、銀河中心の観測の解析や、発表など指導していただきました。また、実験設備の設計もしていただきました。松本浩典さんには、解析ソフトの作成をしていただきました。坪井陽子さんには星生成領域のことを教えていただき、論文のお手伝いをさせてもらいました。冨田洋さんには、超新星残骸のことや、CCDの原理など教えていただきました。坂野正明さんには、解析ソフトを数多く作成していただきました。本論文中の、二次元ガウシアンでのfittingプログラムも坂野さんの作成です。西内満美子さんは、特にXISの基礎から教えていただきました。そればかりでなく、X線のデータ解析の仕方を一から教えてくれたのも西内さんです。浜口健二さんには、蛍光X線発生装置を作成していただきました。また、XISの解析ソフトの書き方を教えていただきました。横川淳さんとは、学生実験で協力してCCD駆動回路を製作し、CCDの動作原理の理解に大変役立ちました。また、同学年ということでよい刺激を与えてくれました。今西健介、辻本匡弘さんには、発表の絵作りや解析など手伝っていただきました。宇宙線研究室の赤外線グループの方々にも、魅力的な話をしていただきました。

XISの性能評価実験が京都大学でできたのは、戦略研究としてサポートしていただいたためです。この研究の代表である大阪大学の常深教授に感謝します。他にも阪大の北本俊二助教授、林田清助教授、宮田恵美助手、大学院生の片山和典さんにお世話になりました。

宇宙研の尾崎正伸助手には、CCD駆動回路作成の上で大変お世話になり、その後もCCDについて多くのことを教えていただきました。

ともすれば怠けてしまいがちの私が〆切までに修論を仕上げることもできたのも、皆様が暖かく見守ってくれたおかげです。この場を借りてお礼申し上げます。

また、当然のことながら、天文学・物理学など現在まで発展するには多くの先人の業績が積み重ねられてきました。こうしてCCDやX線天文学を研究できるのも、そのような方々の存在があってこそです。まとめて感謝します。

村上 弘志

参考文献

[1] 小山 勝二「X 線で探る宇宙」培風館 1992

[2] 科学衛星 ASTRO-E 中間報告書, 1998, 宇宙科学研究所 SES データセンター

[3] S. M. ジィー「半導体デバイス」産業図書 1987

[4] 尾崎 正伸, 修士論文 (京都大学 1994)

[5] Mark Bautz, Contributions of the MIT ACIS Team to the AXAF Calibration Review (`http://space.mit.edu/ACIS/msfc_calib.html`)

[6] 西内 満美子, 修士論文 (京都大学 1998)

[7] 「ASTRO-E XIS-DE システム機能仕様書」富士通, 1997

[8] 浜口 健二, 修士論文 (京都大学 1998)

[9] Nishiuchi, M. et al., 1998, Proc. SPIE, **3445**, 268

[10] Crystal Semiconductor Corporation, CS5016 の規格表 (`http://acis.mit.edu/syseng/astroe/dwgs/ee/specs/5016a.pdf`)

[11] 山下 朗子, 修士論文 (東京大学 1995)

[12] Tomida, H. et al., 1997, PASJ, **49**, 405

[13] Sienece Instrument (SI) Calibration Report for the AXAF CCD Imaging Spectrometer (ACIS)ver 0.9

[14] Hopkinson, G. R., 1983, NIM **216**, 424

[15] K. C. Genderau, et al., 1995, PASJ, **47**, L5