X線CCDの読み出し法の研究と較正システムの開発

濱口 健二
京都大学大学院理学研究科物理学第二教室宇宙線研究室

1999年1月7日

概要

X 線 CCD は空間・エネルギー・時間分解能をすべて備えた標準的な検出器として、今後打ち上げ予定の X 線衛星 AXAF, XMM, ASTRO-E に搭載が予定されている。この中で時間分解能は CCD の読み出し時間で制限されるが、現在の読み出し速度では、早い時間変動の天体に対応できないという問題がある。しかも、強度の強い天体に対してはエネルギー分解能にも影響が及ぶため、今後の CCD の大面積化に対応するためにも高速読み出しが不可欠である。この研究は高速化の際に検出効率、エネルギー分解能を犠牲にしないよう、現状で最善の読み出し方法を検討したものである。

まず、X 線 CCD の 2 つの読み出しモード、ノーマルモードと MPP モードによる暗電流特性を調べた。MPP モードは CCD の電極電圧を下げることで暗電流を減らすのが特徴である。測定の結果、-40 度以下までは暗電流は少なく電荷転送時に生じるスプリアスチャージが主成分であった。温度を上げると、ピクセル内のトラップの数に比例した量子化したヒストグラムが得られた。暗電流の温度依存性から、そのトラップは以前の結果と同じく鉄の不純物の混入と考えると最も都合が良い。また、暗電流の詳細な解析により別のトラップ準位の鉄も存在することがわかり、イメージとの対応からトラップの多い領域が CCD チップの両端に近いことを突き止めた。これらの鉄は製造中に入り込んだ可能性が高く、工程の検討が必要と思われる。一方、ノーマルモードは電圧をかけることで空乏層領域を広げ、検出効率を上げるのが特徴である。データを取得したところ、全面に横線が入る特徴的なイメージで、画面の両端のピクセル値は低く、MPP とは逆の描像であった。暗電流は温度と共に急激に増加する傾向を示したことから依存性をモデルに当てはめたが、良い相関は見られていない。また、横線がある部分とない部分に特徴的な温度依存性の違いは見られなかった。

次に、2 重, 4 重, 8 重の相関サンプリング方式を比較した。その結果、サンプリング数が多いほど読み出しノイズが減る方向にある事がわかった。しかし、ノイズがポアッソン的であった場合に期待される効果は見られず、またエネルギー分解能に反映されるほどの違いはなかった。

最後に X 線 CCD の多色蛍光 X 線較正システムを開発した。較正にはできるだけ純度の高い蛍光輝線を用いることが望ましいが、開発当初は、チャンバー壁ステンレスによる蛍光 X 線、2 次ターゲット内部不純物の蛍光 X 線、トムソン散乱成分が主な不純物として含まれた。そこで、蛍光 X 線の純度増加のための整備を行ない、コリメータ設置、フィルター、ターゲットの純度増等の対策をとったところ、蛍光 X 線純度は 99 %近くにまで増加した。そのうえで、完全に除去の難しいトムソン散乱成分の混入量を評価した。実際に CCD に X 線を照射すべく、まず ^{55}Fe を当てた結果から空乏層厚を 2 通りの方法で求めたところ、それぞれ、7 μm と 15μm という値が求められた。MPP モードに対しては蛍光 X 線発生装置からの Al、Ti、Zn の Kα,β 輝線を実際に当て、エネルギー分解能は、個々の Kα 線に対して $\mathrm{E}/\Delta\mathrm{E} = 1.2(\mathrm{Al}), 26(\mathrm{Ti}), 50(\mathrm{Zn})$ という結果を得た。

基本的な読み出し方法について測定を行ない、また蛍光 X 線発生装置での性能評価方法を確立し、多色の検出効率を求められるようになった事から、今後は MPP と ノーマルの利点を兼ねた読み出し方式を検討しつつ、高速化に取り組んでいくことが課題となる。具体的には、現状の読み出し時間 20 秒を 1 秒以下まで高速化する事が目標である。

目次

図目次

表目次

第 1 章

X 線天文学と検出器

1.1 X 線測定に用いられる検出器

X 線計測に用いられる検出器には様々なものが考え出されており、それぞれ測定の目的によって一長一短がある。まず、個々の検出器について検証し、その後、その長所短所に触れていく。

比例計数管 比例計数管はガスを用いた計数管の一種で、PR ガス (例 Ar 90%+ CH_4 10%) 等を容器に封入あるいは連続的に流し、入射した X 線によって作られた電子をガス増幅して検出するもので、入射 X 線の計測ができるほかエネルギースペクトルも得ることができる。特徴は構造が簡単で大容積化しやすいことから、検出効率や有効面積を比較的容易に上げられることである。様々な改良がなされ、現在では、位置検出もできるような多芯線型比例計数管も開発されている。

シンチレーション計測器 X 線を NaI や CsI などのシンチレータ結晶にあてて可視光に変換し、光電子倍増管などによって検出するというものである。結晶を大きくすることによって硬 X 線や γ 線に対する検出効率を上げることができ、また時間分解能も数十 μsec と高い。エネルギー分解能は ^{55}Fe で ~500eV 程度である。

半導体検出器 p 型半導体と n 型半導体を接触させてできた PN 接合に逆バイアスをかけることによって電荷キャリアの存在しない空乏層を形成してやり、その領域に X 線光子が入射すると電荷が生成され、それが電場に引かれて電極に到達することによって信号として取り出される。Si, Ge でできた半導体検出器が一般に使われるが、電子対を作る平均エネルギーがガス検出器よりも小さいことから多くの電子が作られ、高いエネルギー分解能を出すことができる。また、高圧をかけて広い空乏層を作り出すため一般に検出効率も高い。

CCD 半導体検出器を LSI 技術によって小型化したものをシリコンチップの上に並べたもので、半導体検出器と同程度のエネルギー分解能を持ちながら、イメージングの能力が備わっている。しかし、小型化しているため空乏層を厚くすることはできず、X 線では 10keV までの比較的低エネルギーの X 線にしか感度がない。また、ここの電極に溜った電荷を順々に読み出していくことから時間分解能も秒のオーダーと他の検出器に比べると悪い。CCD については次の章で詳しく述べる。

マイクロチャンネルプレート チャンネル型光電子倍増管を重ねたもので、入射 X 線はガラス管ないし壁に当たって電子を作りだしチャンネル型電子倍増管で増幅される。チャネルは大きさが 10~20μm で構成されており位置分解能は高く、また電子がチャンネルを通過する時間も数 ns と非常に短いため時間分解能も優れているが、エネルギー分解能が非常に悪いという欠点もある。

カロリーメータ 吸収体を 数十 mK まで冷却し、X 線を吸収した時に変化する温度を測定するもので、現在の検出器の中では最高のエネルギー分解能を誇っている。X 線を吸収することにより生成される粒子はこの場合フォノンで、1 個のフォノンを生成するのに必要なエネルギーは 10^{-4}eV と非常に小さいことから多くの粒子が生成されるため、エネルギー分解能の理論値は 1eV 以下といわれている。現時点では理論値には遠く到達していないが、それでも 10eV レベルの非常に高いエネルギー分解能を達成している。

1.2 各種検出器の特徴

個々の検出器の長所、短所を表 1.1にまとめた。

表 1.1: 各検出器の長所、短所

	時間分解能	空間分解能	エネルギー分解能	検出効率	検出レート
比例計数管	○	× (△)	△	○	○
シンチレーション計測器	○	× (△)	△	○	○
半導体検出器	○	×	○	○	○
CCD	△	○	○	△	△
マイクロチャンネルプレート	○	◎	×	△	○
カロリーメータ	○	△	◎	○	×
X 線フィルム	×	○	×	×	×

これを見ても分かるように CCD はいずれの分野においてもそれなりの能力を発揮する万能選手であるという事ができる。

1.3 X 線 CCD を搭載する X 線天文衛星

過去に X 線 CCD を搭載して打ち上げられた衛星は以下のいずれも日本の 2 台の衛星が代表的である。

ようこう 1991 年に打ち上げられた太陽観測用 X 線衛星で、軟 X 線望遠鏡のイメージ取得用に CCD が搭載されている。太陽からの X 線は非常に強く、基本的にはフラックスモードによる太陽のイメージ撮影で光子計測は行なわない。 CCD の前にシャッターがついており、撮影はシャッターを開閉することで行なう。

ASCA 1992 年 2 月に打ち上げられた天文観測用 X 線衛星で、 2 種類計 4 台の検出器が載せられており、位置検出型ガス蛍光比例計数管 GIS とともに、 X 線 CCD, SIS が初めて搭載された。 1 つの SIS は 4 枚の CCD チップからなり読み出し時間は 4 秒、撮像時間はモードによってが 1 フレーム 4 秒から 16 秒まで変化する。エネルギー分解能は打ち上げ当初 130eV であったが機上での宇宙放射線によるダメージで徐々に悪化してきている。空乏層は 30 μm で、 0.3keV から 10keV エネルギーバンドで感度を持つが、高エネルギー側では検出効率が落ちる。空間分解能は X 線望遠鏡で決まり、 Half Power Diameter は $3'$ であるが、 cusp-shape 状のするどい Point Spread Function をしているため、 $20''$ 程度まで天体を分解することが可能である。

これまでの X 線衛星に載せられた実績から、 X 線 CCD が X 線天文観測に極めて有効な検出器である事が認識されてきた。今後、 2000 年に渡って大型の X 線天文衛星が各国から打ち上げられるが、そのいずれもが基幹の検出器として、 X 線 CCD を搭載している。今後打ち上げ予定の X 線天文衛星とその仕様は以下のようになっている。

AXAF 1999 年春、スペースシャトルより打ち上げ予定のアメリカの X 線衛星で、空間分解能 $0.5''$ という究極の X 線望遠鏡を装備している。検出器として X 線 CCD, ACIS と、マイクロチャンネルプレートである HRC が搭載されており、 X 線望遠鏡からの直接ないし 3 種類のグレーティングを通した分光 X 線を焦点面上で検出器を移動する事で撮像する。 ACIS は 表面照射型 8 枚と低エネルギー側で検出効率の高い裏面照射型 2 枚の 2 種類の CCD より構成され、 1CCD チップ $8.45'\times8.45'$(1 pixel $0.495''$ 角) の視野を見ることができる。読み出し時間は 3.3sec であるが、視野の大きさないしデータの質が犠牲にすれば 0.2sec まで高速化できる。

XMM 1999 年 8 月打ち上げ予定のヨーロッパ宇宙機関の X 線天文衛星。 0.3keV から 10keV 強の間で AXAF の 5 倍程度の大有効面積を持ちながら、 Half Energy Diameter で $20''$ とそれなりの空間分解能を確保している。 X 線望遠鏡は 3 台のり、 2 種類のグレーティング素子による高エネルギー分解能の観測も可能である。焦点面検出器は、 EPIC という MOS 型 と PN 型の 2 種類の CCD で、 MOS CCD は焦点面光軸上に 1 つの CCD とその周囲に焦点面を再現するように 6 つの CCD が段違いに置かれる。

Astro-E 2000 年 2 月打ち上げ予定の日本の X 線天文衛星で、これまでの X 線天文衛星で初めて 4keV 以上の高いエネルギー領域で ~15eV のエネルギー分解能を備えた X 線カロリーメータ (XRS) を装備する。衛星には二段薄板多重鏡で構成された 5 台の X 線望遠鏡と 3 種類の検出器が搭載され、 X 線カロリーメータが 1 台、 X 線 CCD (XIS) が 4 台の 5 台が焦点面に置かれる。もう一種類は硬 X 線検出器 (HXD) で 10keV から 700keV 付近までの硬 X 線領域をカバーしコリメータで視野を制御する。 XIS は AXAF の ACIS と同じ CCD で、その仕様は表 1.2にある。現在、フライトモデルが完成間近であり、当研究室でも校正作業が行なわれている (西内 M 論 [8] を参照)。

表 1.2: Astro-E 搭載 CCD、 XIS の仕様

有効面積	~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	0.4~10keV
時間分解能	8sec(frame mode)^1
空乏層厚	60~80μm
エネルギー分解能	130eV(FWHM)@6keV
読み出し雑音	$3e^-$
読み出し口	4 箇所
動作制御温度	–90°C

1.4 X 線 CCD の問題点

以上のように CCD は今後多くの X 線衛星に搭載されるが 1 つ大きな問題がある。それは読み出し速度の遅さである。 CCD の 1pixel からの信号を読み出すには 10μsec 程を要するが、近年の CCD は 1024×1024 pixel が標準で、 1 フレーム読み出すのに 10sec 以上の時間を要する。 XIS や ACIS の場合、読みだし口を 4 箇所設けて高速読み出しを行なっているが数倍のスピードアップがせいぜいである。読み出し時間はそのまま時間分解能につながることから、パルサーのような早い時間変動を示す天体を撮像しながら時間解析を行なうことは到底不可能である。

しかも、長い読み出し時間はそれ以上の問題をはらんでいる。 X 線 CCD は X 線の入射によってできた電荷の数を数えることによって入射 X 線のエネルギーを測定する。もし同じピクセルに 2 つ以上の光子が入射すると、もはや元の X 線のエネルギーを測定できない。これをパイルアップといい、 SIS においても Crab パルサーのような明るい天体をエネルギー情報を保存したまま観測することはできなかった。近年の X 線望遠鏡の集光能力の向上はこれがより深刻な問題となりつつある。例えば衛星 AXAF の場合、点源天体からの X 線は 1pixel 内にほとんど入ってしまい、有名な X 線天体は大体がこのパイルアップ強度以上になってしまう。空間分解能の向上だけでなく、 XMM のようなミラーの有効面積の増大や、 X 線 CCD の検出効率の向上によってもカウントレートが増え、パイルアップが起こりやすくなる。また、もう一つの路線として広い有効面積を稼ぐための CCD チップの大面積化、あるいは偏光を測定するための 1 ピクセルの小面積化ある。これらは画素数の増加そして読み出し時間の増大という問題にぶつかる。

そこで読み出しの高速化が急務となるが、高速化でノイズレベルが悪化しエネルギー分解能が落ちてしまっては意味がない。当研究室では今後 CCD の高速化に取り組む予定で、この修論はその下準備としての CCD の基本特性を調べたものである。

第 2 章

CCD の基礎

CCD(Charge Coupled Device) は電荷結合素子と訳されるように、本来は電荷の転送方式の名称である。その検出器としての性能は、光を感じて電荷を生成し蓄積する受光部と、蓄積された電荷を読み取る転送部に大別される。

2.1 半導体検出器としての CCD

2.1.1 X 線の検出原理

CCD は多数の MOS ダイオードをモザイク状に並べたもので、 1 つ 1 つのダイオードが半導体検出器として働く。半導体が P 型 Si の場合、電極に正の電圧を加えると半導体中の正孔が電極の反対側に押し退けられて、絶縁層付近に空乏層を形成する。この空乏層に X 線光子 (可視光でも可) が飛び込むと光電子が生成しそれが周囲の電子を電離することによって 1 次電子を形成する。この 1 次電子が電界に引き付けられ、最終的に電極近傍のポテンシャル井戸に集積される。

2.1.2 暗電流

CCD は 電極に電圧をかけ、正孔を追い出す事により空乏層を形成する。この状態は熱的に非平衡な状態を作り出していることに相当し、系は常に電荷分布を平衡に戻すために電荷を生成する。この電荷を暗電流といい、 X 線イベントによる信号電荷に対してノイズ源となる。

CCD での暗電流の発生箇所は主として、

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

の 3 つがあり、通常 3. の成分が最も支配的となる。この理由として、 Si が間接バンドギャップ半導体である事が挙げられる。間接バンドギャップ半導体の場合、価電子帯から伝導体への直接生成再結合はほとんどおこらず、バンドギャップ中に局在したエネルギー準位を経由した間接遷移が主要な生成再結合過程となる [13]。この事から局在したエネルギー準位が増えると遷移確率が増えるが、 SiO_2 と Si の境界面では格子構造が不連続な事からダングリングボンドを形成し、これにより多数の局在準位が生じる。これが暗電流増加の原因で、その成分をなくすことがエネルギー分解能を上げる重要なポイントとなる。

ノーマルモードと MPP モード

CCD の駆動は電極に正の電圧を加えるノーマルモードが通常であるが、上に述べた界面準位からの暗電流が卓越する問題をはらんでいる。これに対し埋め込みチャンネル型と呼ばれる CCD は、受光時の電極を全て反転状態にすることでこの成分を大幅に削減でき、この駆動方法を MPP モードと言う。

反転状態におけるポテンシャル構造を図 2.1 に示す。埋め込みチャンネルでは n 型 Si によりポテンシャル井戸が内部にできるため、電極を反転状態にしても電荷を蓄積することができる。一方、 SiO_2 との界面付近はポテンシャル

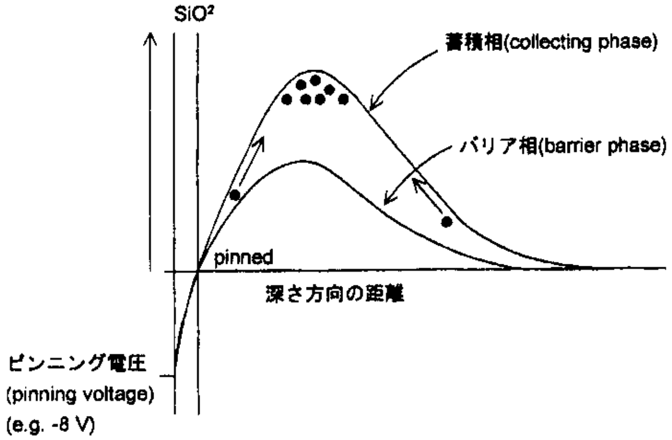


図 2.1: MPP 動作時のポテンシャル分布図
[12] 宮口氏集録より抜粋

が反転し、界面での価電子帯の正孔濃度が大きくなるため、電子が表面準位に励起されても正孔に捕獲され、伝導帯に励起されにくくなる。この効果により、3. を起源とした暗電流は著しく少なくなるものの、電圧を下げているため空乏層は成長しないという欠点がある。更に電荷転送時にスプリアスチャージという電荷が生成されるという欠点もあり、これは次節で述べる。

2.2 電荷転送デバイスとしての CCD

生成された一次電子が生成箇所近傍の電極に集積されたことから、後はこの電荷を読み出せば X 線のエネルギーと位置情報がわかる。CCD の特徴はこの個々の電荷を各ピクセルの電極間で受け渡して、読み出し口まで運んでいく点にある。

2.2.1 電荷転送

電圧を個々の電極間で同期して加えてポテンシャルの井戸を動かし、電荷を送るのが CCD の電荷転送方式でバケツリレーに良くたとえられる。方式にはいくつかあり、四相、三相、二相、単相（バーチャルフェイズ）の 4 通りが主に使われる。これらは電極に何種類の電圧をかけるかの違いで設計時の配線で既に決まっており、1 つのピクセル中の電極数にそのまま対応する。二相と三相クロックの電荷転送方式を図 2.2に載せた。二相クロックの場合、単純に電圧を上下させるだけでは電荷は移動しないことから、内部にイオンを注入することによって、同じ電極内でポテンシャル差をつくり出している。このため駆動自体は簡単になるが、製作段階で転送方向が決まってしまうという欠点もある。これは単相クロックも同様である。当研究室では、主にこの二相クロック CCD を用いて実験している。

二相クロックの場合、電荷転送時は図 2.3の 'readout' 時のような、high と low を交互に繰り返す信号が 2 つの電極に逆位相で送られる。前述の MPP モードは high と low の電圧値を下げ、蓄積中 ('integrate' 時) に二相の電極とも low level に落すことで暗電流を減らす。しかし転送時には low から high に移る過程で、スプリアスチャージと呼ばれる電荷が生成されてしまう事が知られている。Janesick[16][17][18] らによると、CCD が反転状態で動作している時、拡散して来た正孔の一部は酸化膜界面にそってトラップされる。CCD が非反転状態へ移ると、トラップされていた正孔が放出、衝突電離を起こすのに十分なエネルギーを持つまで加速され、Si 原子が電離して電荷を生じると言う。この電荷は先の暗電流と同様ノイズ元となり、両者は区別できないことから合わせて暗電流という事が多い。

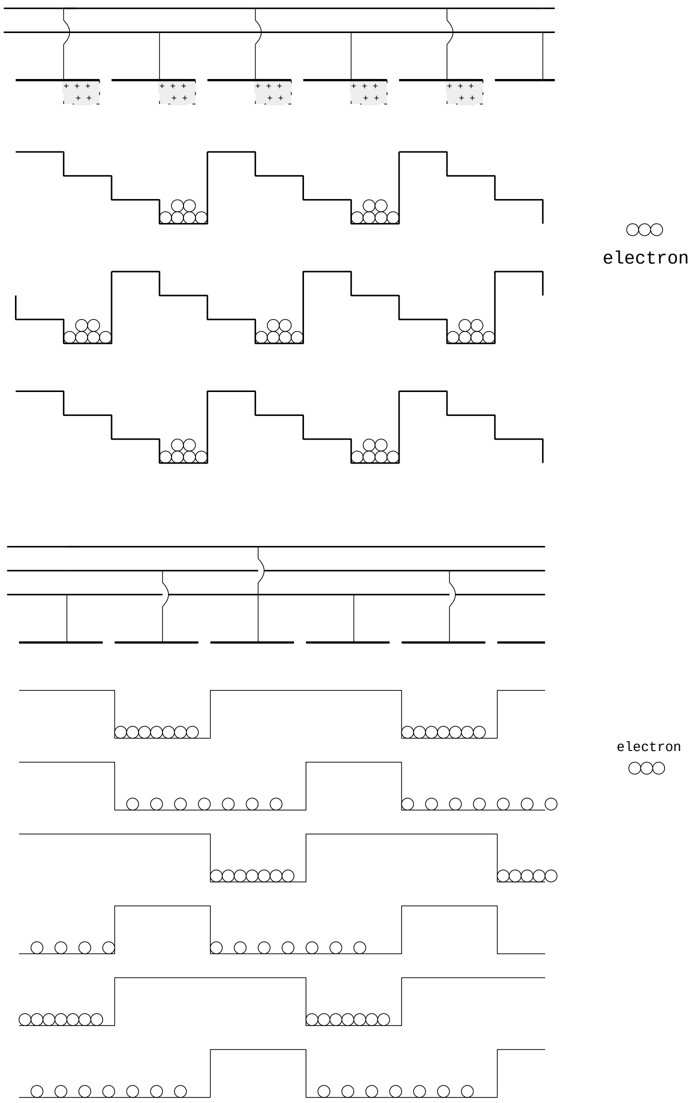


図 2.2: 二相クロック、3 相クロックの転送原理
上の二相クロックの図中の斜線はイオンを注入した部分を指す。

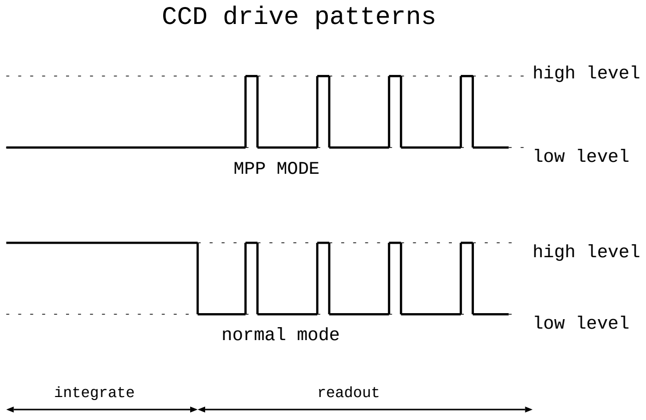


図 2.3: CCD 電極に送られるクロック

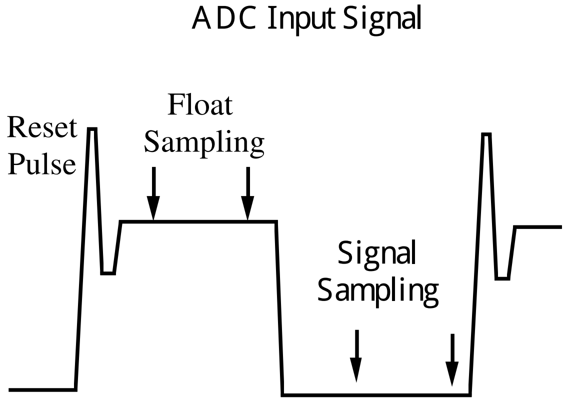


図 2.4: CCD からの信号と相関 4 重サンプリングのタイミング

2.2.2 CTI

CCD が電荷転送を行なう際、何らかの理由で取りこぼしてしまう電荷がいくらか存在する。1 ピクセル分の転送で実際に転送される電荷の割合を電荷転送効率 (CTE = Charge Transfer Efficiency) という。これに対し 1 ピクセル分の転送で転送されない電荷の割合を電荷転送非効率 (CTI = Charge Transfer Inefficiency) といい、CTI = 1 − CTE が成り立つ。V ピクセル転送を行なった場合に転送される電荷量を見積もると、最初の電荷の数を N_0, 最終的に残る電荷の数を N, 失われる電荷の数を ΔN とすると、

$$N = N_0 - \Delta N = N_0 \times (CTE)^V \sim N_0(1 - CTI \times V) \tag{2.1}$$

と近似できる。実際の性能評価において特に問題となるのは、転送中バンドギャップ中に局在したトラップ準位に捕まって電荷を失うケースである。

2.3 データサンプリング方式

CCD からは図 2.4のような信号が送られてくる。今回の実験では相関多重サンプリング法を用いて計算機にデータを取り込む。CCD の信号はリセット信号が送られ回路のバイアス値である Float level を経験した後、あるピクセルの信号値を示した Sample level へと移行する。Sample level と Float level の引き算が、信号電荷に (理想的には) 比例した値になることから、データを取得するにはこの 2 つのレベルを何らかの形で求めなくてはならない。そこで、今回の実験で我々が用いるのは相関 N 重サンプリングである。これは送られてきた信号を Float level, Signal level 合わせて N 回サンプリングし、平均した値を引き算する事でピクセル値を求めようというものである。N 回サンプリングするのは、サンプリング回数を増やして回路のノイズ成分を打ち消そうとするためである。図 2.4は相関 4 重サンプリングの例である。

2.4 取得データと性能評価

こうして読みだし口から取り出した信号から 1 フレームのイメージが得られる。実際に計算機に取り込まれるイメージは図 2.5の通りである。図中の effective 領域とは実際に露出中に CCD の各ピクセルに蓄積されたデータを読み込んだ領域を指す。effective 領域は読み出すまでに「露光 + 電荷転送 + 読み出し」の 3 つの過程を経ており、その各々から影響を受けている。そこでこれらの影響を見積るために、effective 領域の読み出し後に CCD にクロックを送って空読みを行なう。空読みは水平方向と垂直方向の 2 方向について行ない、それぞれ水平オーバークロック (Horizontal Over Clock) 領域、垂直オーバークロック (Vertical Over Clock) 領域と呼ばれる。当論文では、以降 HOC 領域、VOC 領域と略称する。

HOC 領域は effective 領域の横転送後に行なう空読み領域で「横転送 + 読み出し」の影響を受ける。一般に横転送は 100msec 以下と時間が短く暗電流の影響をほとんど受けないため、出力レベルは信号のゼロレベルとみなす事が

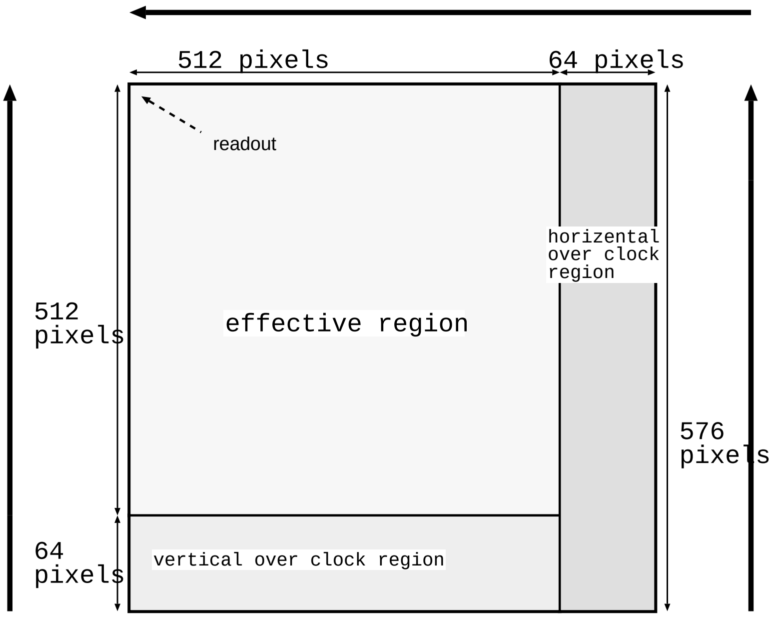


図 2.5: 計算機に取得されるイメージ

できる。ノイズも読み出しに伴う成分がほとんどなため、読み出しノイズという時にはこの領域の揺らぎを指す。一方、VOC 領域は「電荷転送 ($\simeq$ 縦転送) + 読み出し」の両方を反映する。そこで、この領域の値を差し引くことで effective 領域で露光中に得たピクセルレベルを算出することができる。また、VOC - HOC から、縦転送に伴う信号電荷の生成量を推定する事ができる。

第3章

X線CCDの性能評価

3.1 X線CCD評価システム

京都大学宇宙線研究室のCCDデータ取得システムは1994年に製作され、その後システムの整備が進められた。詳細については[1]を見て欲しい。システムの概略は以下の通りである(図3.1も同時に参照の事)。

CCD信号取得システム CCDは、2.2.2節で述べたようにCCD面上に並べられた電極に規則的に電圧をかけることにより電荷転送を行なう。電圧をかけるタイミングはワークステーション上でユーザーが設定、それに従って京都大学宇宙線研究室のCCDドライブシステムが転送に必要な電圧を順次作りだしCCDに送り込む[1]。今回の実験で用いた電圧値は表3.2に記載してある。転送に従ってCCDより出力された信号は前置増幅器(以下PreAmp)によって増幅され、差動アンプ(以下Diff-Amp)、ローパスフィルター(以下LPF)を通じて整形された後、VME上のアナログデジタルコンバーター(以下ADC)によって取り込まれる。取り込まれたデータはVME上のCPUボードで演算処理され、Ethernetを通じて1枚のフレームデータとして記録される。出力波形は常時Diff-AmpないしLPF後にオシロスコープでモニターした。LPFの時定数は$\sim 2\mu$secに設定してある。通常駆動時には、図3.2のような波形が見られる。

CCD冷却真空システム CCDは暗電流軽減のため冷凍器を用いて冷却する。背面につけられたコールドヘッドには温度計とヒーターを取り付けてあり、温調器によって任意の温度にコントロールすることができる。CCDを飽和水蒸気圧以下まで冷却(図3.3参照)するとCCD表面が結露してしまい、その時にCCDを駆動すると最悪ショートしてCCDを壊してしまう事になりかねない。そこで、CCDはロータリーポンプ、ならびにターボポンプによって中真空領域まで真空引きされたチャンバー中におかれる。真空度のモニターは低真空領域はピラニ真空系、中真空領域はペニング真空系で行う。

実験機器を立ち上げた当初は真空チャンバーの真空度は8×10^{-5} torr程度まで到達していたが、実験する内にフランジに取り付けたD-sub、BNCコネクター接合部分のシールからの真空洩れがひどくなり、常温では10^{-4} torr台にすら到達しなくなってしまった。そこで、洩れたシールの上からエポキシ系の接着剤を塗って孔をふさいだところ、温度に関係なく最大1.5×10^{-6} torrになるまで真空度を回復した。フランジに取り付けたD-subへの抜き差しを減らすような工夫が今後必要になるであろう。具体的には大気側に別のD-subを取り付け、このD-subとフランジに取り付けたD-subを常時接続し、大気側の別のD-subをケーブル接続に使用するなどが考えられる。

3.1.1 ノイズ問題

CCDの性能評価を行なう前に、このシステムのノイズ評価を各点の信号をオシロスコープでモニターする事で行なった。その結果いくつかのノイズが見い出された。

リセットパルスから来るノイズ

---

[1] CCDドライブシステムはパルスジェネレータの信号を基準クロック、VME上にあるDACを参照電圧としている

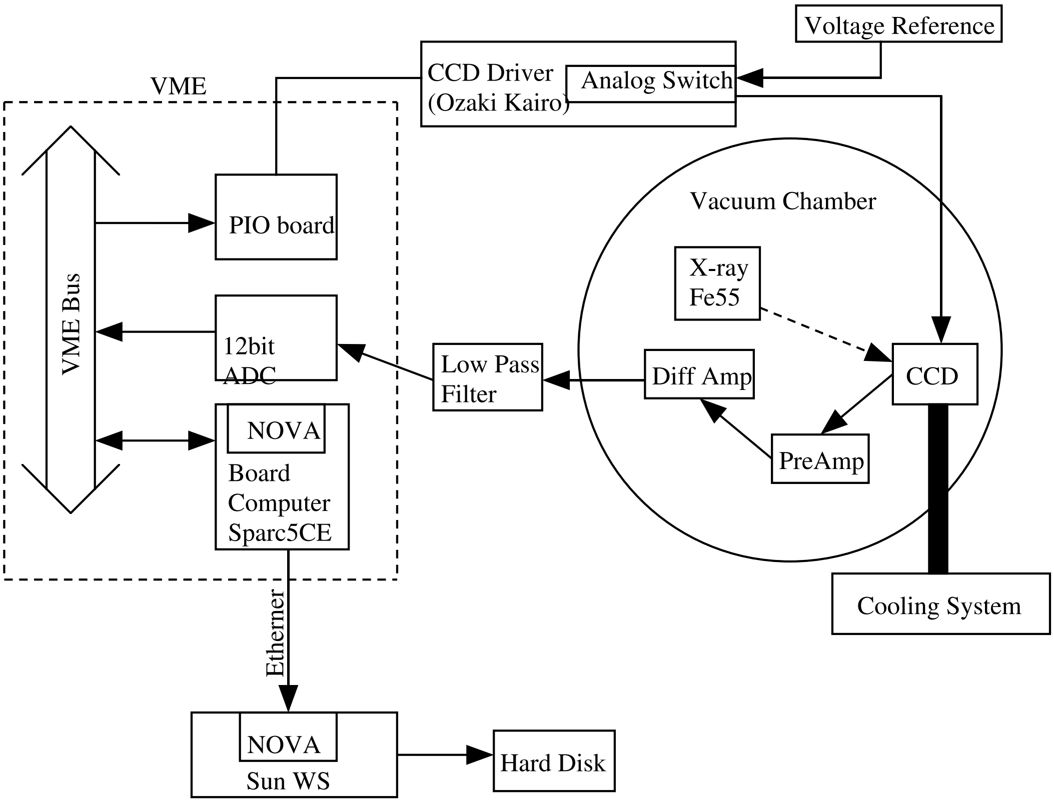


図 3.1: CCD データ取得システムの概略

図 3.2 の Diff-Amp 後の波形を見ると、リセット直後にアンダーシュートを起こし、 10 μs に渡って最大 Vp-p $\sim$ 1V に渡る振れを起こしているのが分かる。 CCD の読み出し部分の回路図は図 3.4のようになっているが、 CCD のリセットは RG 部分に送られてきたリセット信号の電圧を感じて、 RD が電流を供給することで行なわれる。アンダーシュートは、 CCD に入力したリセット信号がきれいなパルスを形成していない所に原因がある。リセット信号を見てみると、同じようなアンダーシュートが波形に見られ、それをそのまま増幅した波形が図のように見えていると思われる。アンダーシュートは LPF を通した後にも見られることから、 ADC でのデータ取得はアンダーシュート後の波形が安定した部分で行なった[2]。もっともこの形は毎回変化しないことから、 Data を取得する時には毎回同じ電圧レベルになりノイズ成分には効いてこない。

Diff-Amp 後の波形にはフロートレベル、シグナルレベル共に Vp-p $\sim$ 600mV のノイズがのっている。しかし、これは 1μsec 以内の非常に短い時間変化を示すことから LPF で波形整形後にはなくなり、 Vp-p $\sim$ 50mV 程度にまでノイズ振幅は下がっていることがわかる。

2.5μ sec noise

Diff-Amp 後の出力波形を時間分解能を上げて見ると、 Vp-p $\sim$ 1V で 2.5 μ sec の spiky なノイズがのっていた。 2.5μsec 周期は CCD ドライブシステムを駆動している基準クロックに相当しており、ドライブ回路の基準クロックが信号線にのってしまったものだと考えられる。 LPF でなくなることから今回根本的な対策はとっていない。

1 μ sec noise

CCD のデータ取得中に LPF 後の波形を見たところ、 1μ sec(1MHz) の spiky なノイズがのっていた。これは LPF 以前の信号線を外してものっており、 ADC からノイズが逆流していることが分かった (図 3.5)。このノ

---

[2] 具体的にはリセット信号後、 10 μ sec 以降にデータを取得している

表 3.1: 用いた ADC の規格

機種名	VMIVME-3115(VMIC 社製)
特徴	simultaneous sample-and-hold inputs
resolution	12bit
voltage range	0 to 5v, ±5v, or 0 to +10v → ±5v で使用
conversion cycle	1μs ×2,000,000/scan rate
gain error	±0.05% maximum
input offset	±5mv maximum
maximum sampling rate	1.0Mcps(2channel) or 0.5Mcps(4channel) → 1.0Mcps で使用

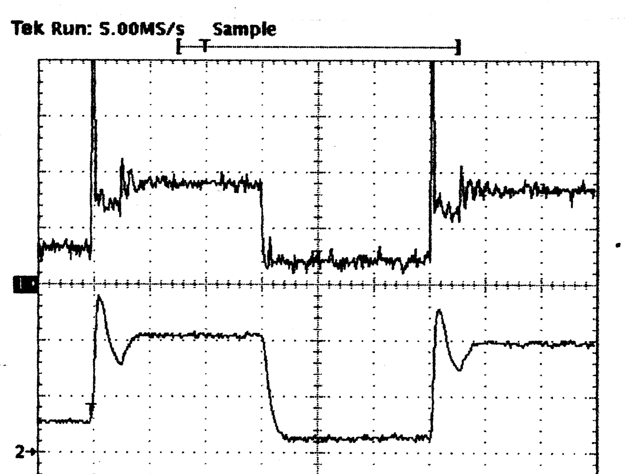


図 3.2: Diff-Amp 後, LPF 後の波形のモニター
上が Diff-Amp 通過後の波形 (1div=2.0V)、下が LPF 通過後の波形 (1div=1.0V) になる。

表 3.2: 浜松フォトニクス社製 CCD の特徴

CCD configuration	Full Frame Transfer
Fill Factor	100%
Effective Pixels	512(H)×512(V)
Effective Photo Sensitive Area	6.144mm(H)×6.144mm(V)
Chip Size	7.5mm(H)×8.0mm(V)
Pixel Size	12μm×12μm
CCD Clock Phase	2 相 CCD
Output	1 stage MOSFET source follower for Low Noise Readout
Other Spec	Buried Channel
Clock Vertical & Horizontal Shift Register Clock Voltage	Normal　High 12V, Low 0.4V
	MPP　High 6V, Low –8V
Output Gate Voltage	Normal　6V
	MPP　3V

lot No. N18, N13, P2 共通。

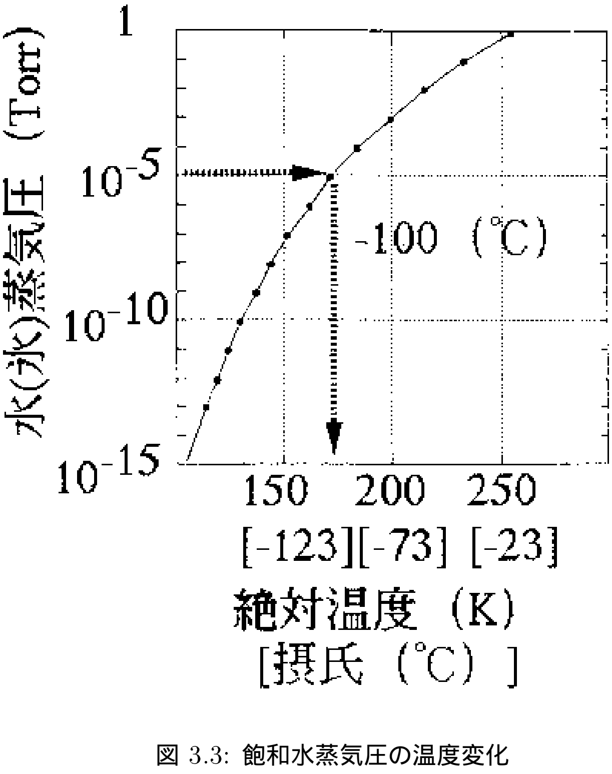


図 3.3: 飽和水蒸気圧の温度変化

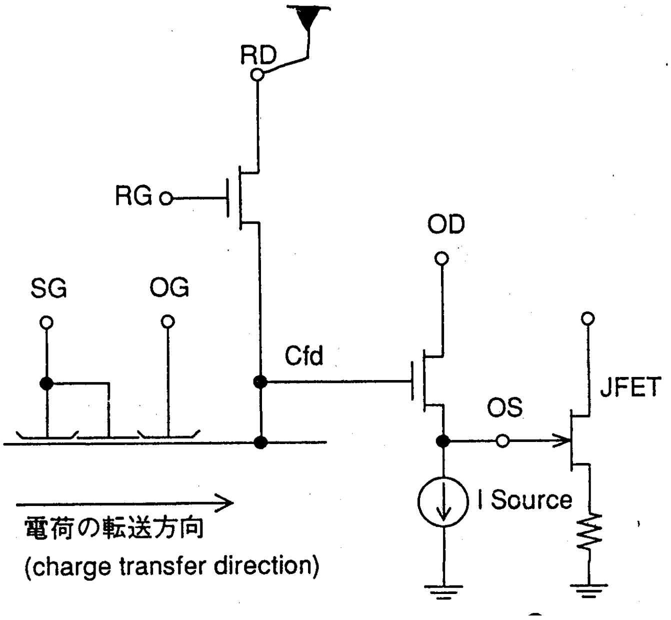


図 3.4: CCD 読み出し部分の回路図
浜松フォトニクス社資料から抜粋。OS の部分より左側が CCD chip 内の構造になる。

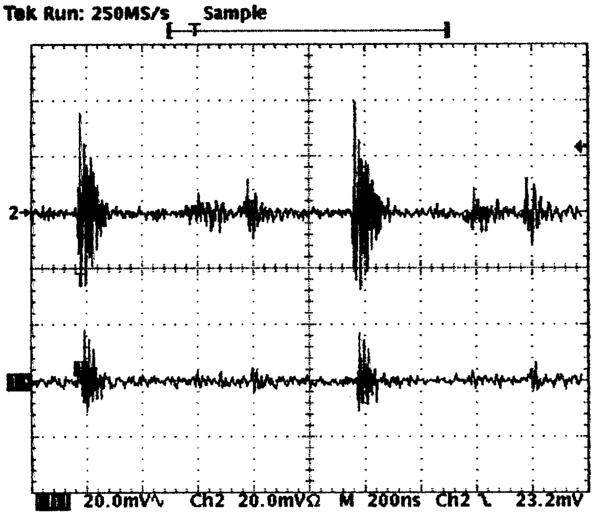


図 3.5: 1 μ sec ノイズ
上側は LPF 後の波形 (1div=20.0mV)、下が Diff-Amp 通過後 (1div=20.0mV) の波形

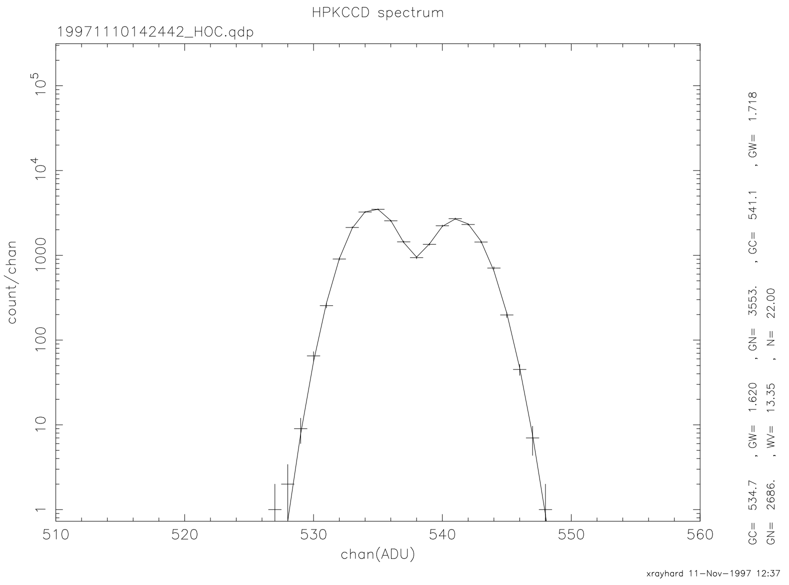


図 3.6: HOC 領域から作ったヒストグラム
ダブルピークの構造が見られる

イズは VME の One-board computer が ADC にアクセスしている時にはっきり見られ、 Vp-p ∼100mV に及ぶことを突き止めた[3]。一方、どのボードにもアクセスしていない時は Vp-p ≤20mV と小さかった。

原因は CPU ボードないし VME ラックにあった。試しに ADC ボード以外のボードにアクセスしたところ、ノイズ周期が変化したことから、 VME バックプレーンのデータアクセス関連に問題があるものと思われる。このノイズは ADC を VME から切り離さない限りなくすことは難しい。そこで、システムノイズを評価することでこのノイズが読み出しノイズに与える上限値を算出した (⟨ 真空ポンプ、冷凍器系からのノイズ ⟩ の頁を参照)。

ヒストグラムのダブルピーク構造

CCD のフレームデータを取得し HOC 領域のヒストグラムを生成したところ、本来なら一山であるにもかかわらず、図 3.6に示されるような 2 つのピークが現れ、いずれもガウシアンでフィットできた。同じ日に取得したフレームデータを比較したところ、 2 つのガウシアンの高さの比は各フレーム毎に大きく変化していたが、中心チャンネルの差は一定であった。しかし日を変えて測定したところ、前の測定と比べ中心チャンネルの差も変化していた。この値は温度依存性がなく、しかも effective 領域や VOC 領域にも同様なダブルピークが見られたことから、この構造は途中の回路系に問題があると予想される。また、ダブルピークの片方の成分を取り出した[4]イメージを見たものの全く規則性が見い出されなかったことから、 1 pixel(60 μsec) 以内に時間変動する何らかのノイズ成分が存在すると思われる。

この問題は全く別な側面から解決を見た。 LPF と ADC をつなぐ同軸ケーブルを上下にふると信号のバイアスレベルが ∼ 2V ふれるという新たな問題が発生した。この原因は LPF の同軸コネクターの接触不良によるもので、回路基盤への負担をなくすために LPF をシャーシに組み込んでコネクターを安定させたところ、信号レベルの揺れは見られなくなった。この改善の後、フレームデータを取得したところダブルピークが見られなくなった。ダブルピークは LPF のコネクターの接触不良により生じた浮遊容量が、短い周期で振動した事が原因ではないかと推測している。

真空ポンプ、冷凍器系からのノイズ

---

[3] One-board computer が Bus Master にアクセスする LED が点灯している時にノイズがのる

[4] 具体的には 2 つのガウシアンの中心チャンネルの中間値より上のチャンネルの pixel のみを抽出してイメージを作った。

表 3.3: システムノイズ

	真空冷却系駆動せず (ADU)	真空冷却系駆動 (ADU)
配電盤別	0.86	1.00
配電盤同じ	1.03	1.14

真空ポンプの電源のグランド (以下 GND) と VME, 電源系のグランドとの電位差をモニターすると、数十 mV 程度のノイズが不定期にのっていた。これが、 VME 電源や各所の電源系の GND に回って信号に影響を及ぼす可能性がある。また、 Pre-Amp や Diff-Amp は真空チャンバー内に入れられており、真空ポンプからのノイズが回路系にのる可能性がある。そこで、システムノイズを測定しこれらの影響を調べた。

実験方法

- CCD 本体は取り付けず、 CCD の出力信号ピンを GND に落とす。
- CCD 駆動系と真空冷凍器系の電源を、同じ配電盤から取る場合、別の配電盤からとる場合で比較[5]。
- 真空冷凍器系を駆動している時と駆動していない時でそれぞれ比較。
- ADC のデータ取得は通常のデータ取得と同じように行なう。

通常と同じフレームデータを取得しその個々のピクセル値のヒストグラムを作成しガウシアンでフィットしたところ、低チャンネル高チャンネル側双方に余剰成分が見られた。分散の値が 表 3.3にある。配電盤を一緒にした方が 2 割ほどノイズが増大しており、電源系からノイズがのっている事を示している。また、真空冷凍器系を駆動していない状態と駆動している状態とを比較すると、 15∼20% のノイズの増大が見られる。

この事から CCD N18 4-5A0N-4 の測定 (3.3節参照) はできるだけ読み出しノイズを少なくするという観点から配電盤を別にして行なっていたが、 CCD の取り替え作業中チップを壊してしまった。その直接の原因は特定できなかったが、測定回路系とチャンバー系の電位が AC 的に大きく振れると、 CCD 取り付け中に壊してしまう可能性が指摘され[6]、安全のために同じ配電盤から電源を供給[7]する事にした。

GND LOOP 対策

個々のモジュールの GND 線にループを作ると、変動磁場による誘導電流がノイズを引き起こしてしまう [11]。そこで測定器系の GND を一本化し、 Diff-Amp, LPF 等各種回路系をシャーシに組み込むことで外部の系と遮断、電磁波ノイズの影響を抑えた。
またオシロスコープで GND ループができないよう、データ取得時には同軸ケーブルの信号線と GND 線に 1 本ずつプローブを当て、プローブの GND をつなぐ事によってデータ取得系の GND と オシロスコープの GND を切り離した。

3.1.2 光洩れ問題

CCD は可視光に対しても感度を持つため、実験時には CCD に可視光が入らないようにしなければならない。しかし、ペニング真空計は光を発し、また、フランジの白色真空シールは外部からの可視光を通してしまう。現行システムでは両者の影響は無視できないことが分かったため、ペニングは測定中電源を落し、真空シールからの光洩れは暗幕でチャンバーを覆うことで対処した。

---

[5] 別な配電盤からとった場合の実験は 1997 年 11 月 30 日に行ない、同じ配電盤からの場合は 1997 年 12 月 27 日に行なった

[6] 阪大の北本さんによると、以前、阪大でもたて続けに CCD を 3 枚壊してしまい、その時に測定回路系とチャンバー系の電位が ∼50V ほども振れていたという

[7] 京大のシステムでは配電盤を動かした場合でも、測定回路系とチャンバー系の電位差は (システムを動かしていない時) 数十 mV p-p であった。

表 3.4: 個々のトラップ数を持つピクセル数

trap 数	ピクセル数
0	820691
1	313392
2	104427
3	29597
4	10054

–20°C の結果。

3.2 低ノイズ CCD の性能評価

3.2.1 暗電流特性

冨田修論では浜松フォトニクス社製 CCD チップ S5467 の暗電流特性を測定し、暗電流の増加が製造プロセス中に入る不純物に起因している事を突き止めた。その後、浜松フォトニクス社では製造プロセスを見直し、低暗電流チップを開発している。今回測定するものは現在開発中のチップ N18 4-5A0N-4(表 3.2参照) である。暗電流の特性は冨田 M 論と同じ手法で調査した。

MPP モードは暗電流値が低いことから –40 °C より高い温度においても電荷が飽和しない。そこで、 MPP モードで –40°C より高い温度で何も光を当てないフレームを取得し、暗電流の温度依存性を調べた。条件は以下の通りである。

測定温度	–20°C, –15°C, –10°C, –5°C, –0°C
取得データ	5 フレーム
露出時間	150.0sec
読み出し時間	20.6sec (60μsec/pixel)
読み出し方法	相関 4 重サンプリング
ゲイン (MPP)	12.68eV/ch, 3.47e$^-$/ch

MPP モードにおいても、 –40°C より高い温度領域では?? 節 1.2. の局在準位 (以降トラップ[8]) からの暗電流が卓越する。 1 つのトラップより発生する暗電流は一定であるから、ヒストグラムが各ピクセルに存在するトラップ数に比例した量子化した構造をとるという事が知られている [3]。そこで各温度のデータに関し、 VOC の最頻値をゼロ点として 5 フレーム を足し合わせたヒストグラムを作成した (図 3.7)。

それぞれの温度に関して、左側のピークから順にトラップのないピクセル、 1 つあるピクセルと対応している。 –20°C のデータに関してトラップの個数をフィッティングより求めた (表 3.4) ところ、トラップ数の平均は 0.50 個 /pixel であり、冨田修論の結果である S5467 の 2.6 個 /pixel よりはるかに改善されていることが分かる。

ピークの間隔はどれも同じでこれがトラップ 1 つ当たりに流れる暗電流量に対応すると考えられている [3]。そこで、この値を温度毎に求めた結果が 表 3.5、図 3.8である。トラップ数 0 のピークも VOC のレベルに対して値を持っており、これも暗電流と推測されるのでこの値も合わせてグラフに記載した。

暗電流の物理過程は Shockley, Read 及び Hall によって SRH モデルが確立された。これによると温度 T(°K) の時に生じる暗電流は近似的に以下のように表わされる。

$$U = K \times \frac{T^2}{exp(\frac{Et-Ev}{k_B T}) + exp(\frac{Ec-Et}{k_B T})} \tag{3.1}$$

式中の文字はそれぞれ、 E_t: トラップ準位、 E_v: 価電子帯の上端のエネルギー、 E_c: 伝導体準位の底のエネルギー、 k_B: ボルツマン定数であり比例定数として K をおいた。この式を Si に適応する場合、 Ec–Ev = 1.12eV という関係

---

[8] 電荷転送時には局在準位は転送電荷をとりこぼす吸い込み口として働く事から通例トラップと呼ばれる

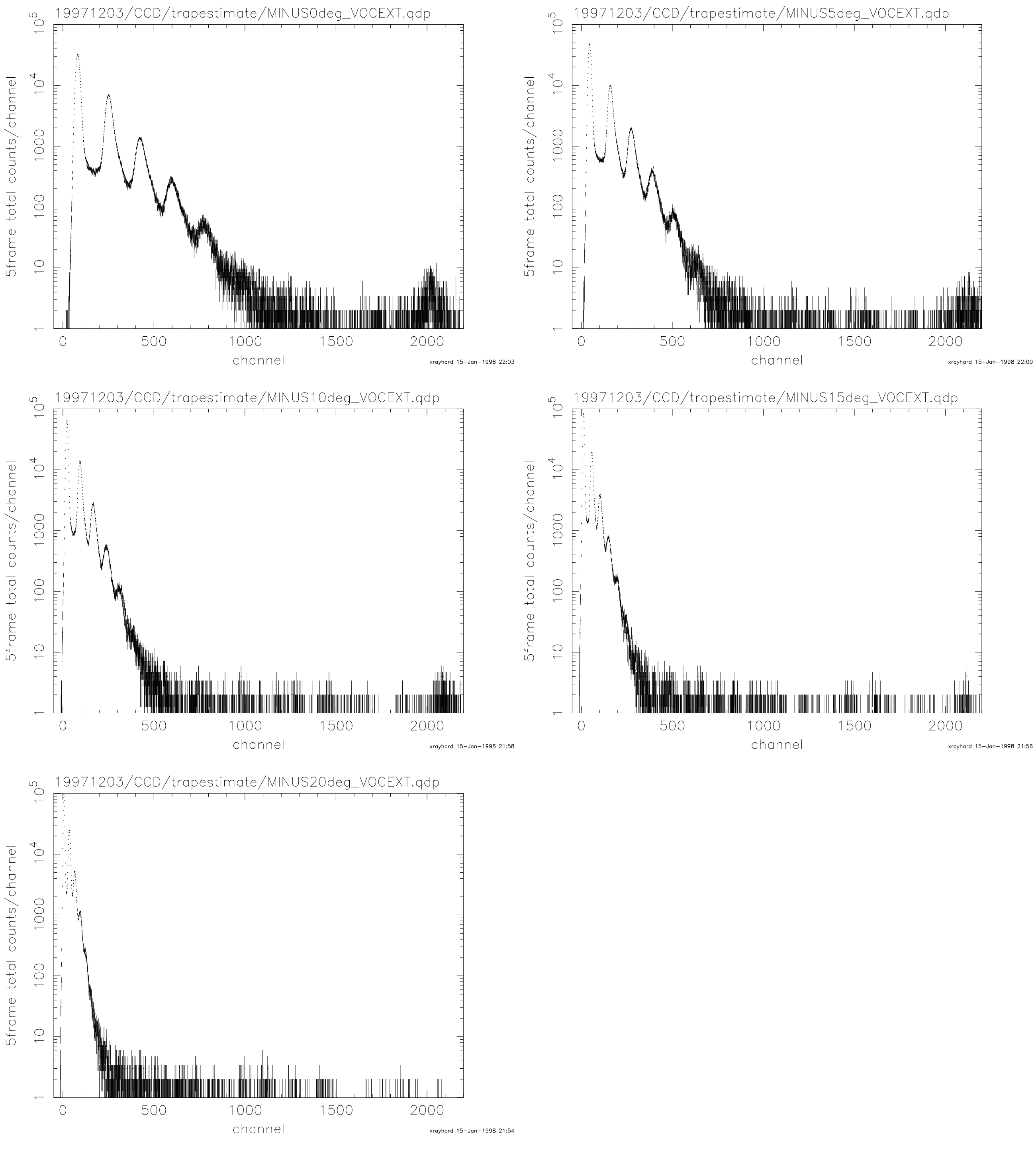


図 3.7: VOC をゼロ点としたヒストグラム

左上右上真中...の順で、 0,5,10,15,20 °C

表 3.5: MPP モード –20°C ～ 0°C の暗電流量

°C	トラップ 1 つ当たりの暗電流量 (e$^-$/frame(20.6sec))	トラップ数 0 の中心値 (e$^-$/frame(20.6sec))
–20	102.19	19.95
–15	157.43	41.78
–10	248.04	78.11
–5	394.43	159.06
0	593.53	283.81

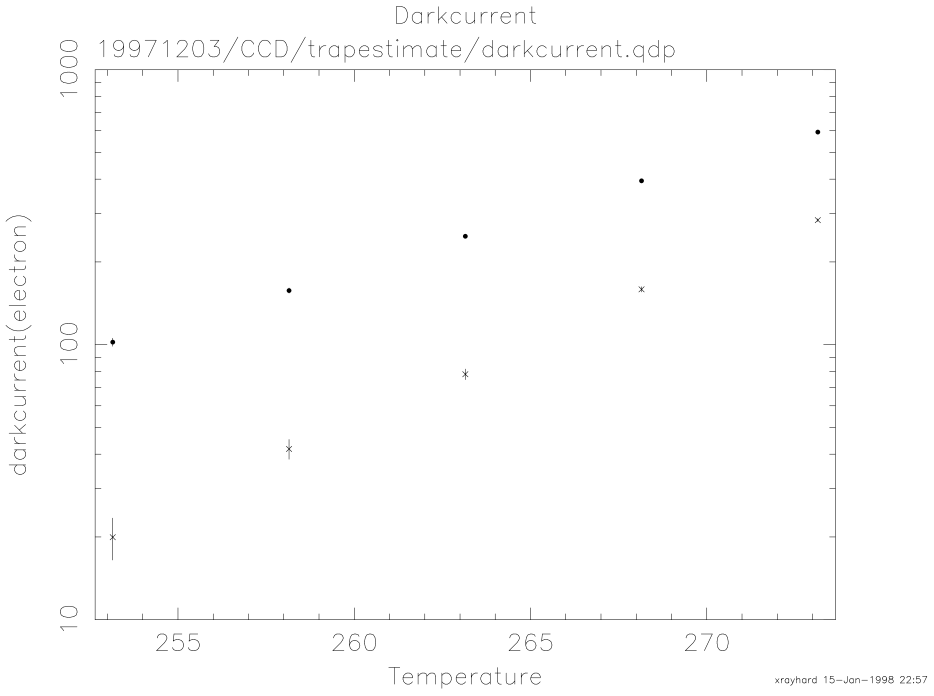


図 3.8: MPP モード –20°C ～ 0°C 領域での暗電流量

黒丸はピーク間隔より求めたダークカレント量、ばつは トラップ数 0 のピクセルにも存在するダークカレント量である。ガウスの中心値の不定性はフィッティング領域の選び方によるところが大きい事から、図中のエラーは目安として 1 ADU をつけてある。

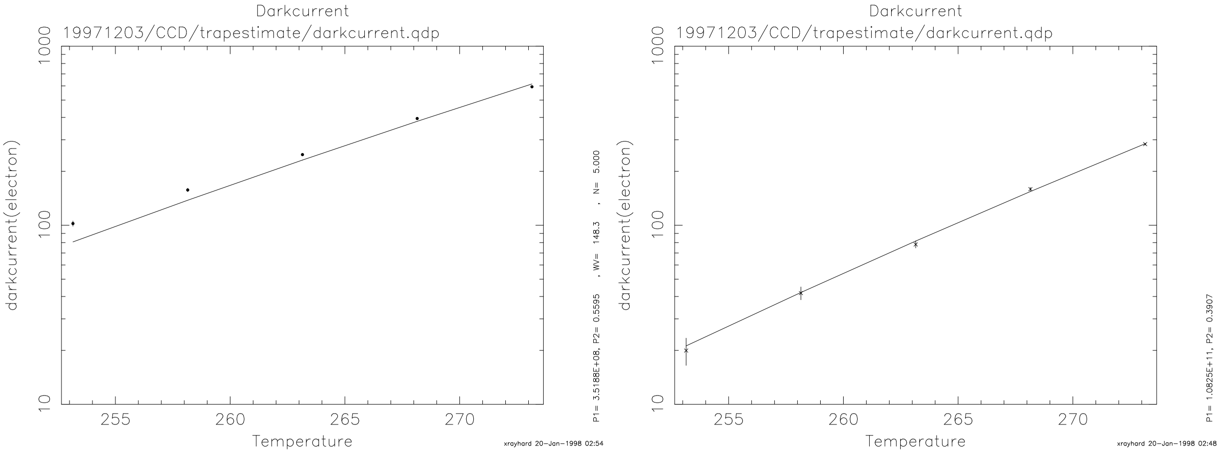


図 3.9: 暗電流のフィッティング結果

表 3.6: SRH model のフィッティング結果

	トラップ準位 (eV)	エラー ($\Delta\chi^2$=2.7)
トラップ 1 つあたりの暗電流	0.56	(0.55,0.57)
トラップ数 0 にも存在する暗電流	0.39	(0.36,0.42)

があることから、 $E' = Ec - Et$ とおくと

$$U = K \times \frac{T^2}{exp(\frac{1.12-E'}{k_B T}) + exp(\frac{E'}{k_B T})} \tag{3.2}$$

となり、 U は K と E' の 2 パラメータの式になる。注意しなくてはならないのは 1.12–E'(=Et–Ev) を代入しても同じ式になることから、これも解ということである。この式を 図 3.8 にフィッティングした。結果は表 3.6の通りである。

ピーク間隔より求めた暗電流値は冨田修論と良い一致を示している。冨田修論によれば、 0.55keV 付近にトラップ準位を作る不純物は Au(0.54keV), Zn(0.55keV), Mn(0.53keV), Fe(0.55keV) であり、メーカーによれば Fe が可能性が高い。一方、 0.39keV 付近のトラップ準位は O(0.38keV, 0.41keV), Fe(0.40keV) が挙げられ、先の結果と合わせれば何らかの過程で混入した Fe が条件の違いにより、別のトラップ準位を作りその影響を見ている事でつじつまが合う。

次に暗電流の CCD 上での位置依存性を調べるために 0°C の dark image を作成した (図 3.10)。イメージは、周辺部の値が大きくなる特徴を示している。この傾向は –40°C 付近から見え始め、ちょうど暗電流が大きくなりヒストグラムが量子化する温度に対応することから、周辺部でトラップ数が多いのが原因ではないかと推測される。しかし、このイメージだけからではトラップ数が原因なのか、ゼロレベルの変動が原因なのか判断できない。そこで、 0°C のイメージに対して 図 3.11のような各点を水平転送方向に射影したプロットを作成した。周辺部と中心部の違いを明確にするために、垂直方向で中心部分の値が低くなっている 151–450 列を切りとって作成した。図 3.7 中の 0°C のヒストグラムと対照するとよく分かるが、下からトラップのないピクセル、 1 つあるピクセルと対応している。これを見ると明らかに周辺部でトラップ数が増加し、それがピクセル値の増加につながっていることが分かる。周辺部にトラップが増加した可能性として、シリコンウエハーを裁断してチップ 1 枚を切りとる際に不純物が混入した可能性が考えられる。 CCD 製造過程の検討が必要であろう。

図 3.7のヒストグラムに戻ると、どの温度を見ても 2000ch 付近にライン状の盛り上がりが見られる。図 3.10を見ると、ところどころに値の高い点が存在しこのチャンネル数が盛り上がりに対応している。これらの点は別なフレー

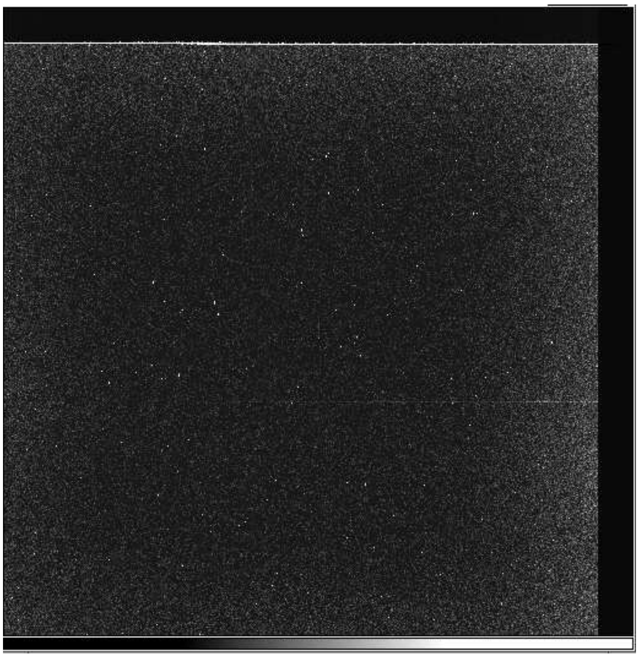


図 3.10: MPP モード 0°C のイメージ
表示の階調を変えたためホットピクセルがよく見える

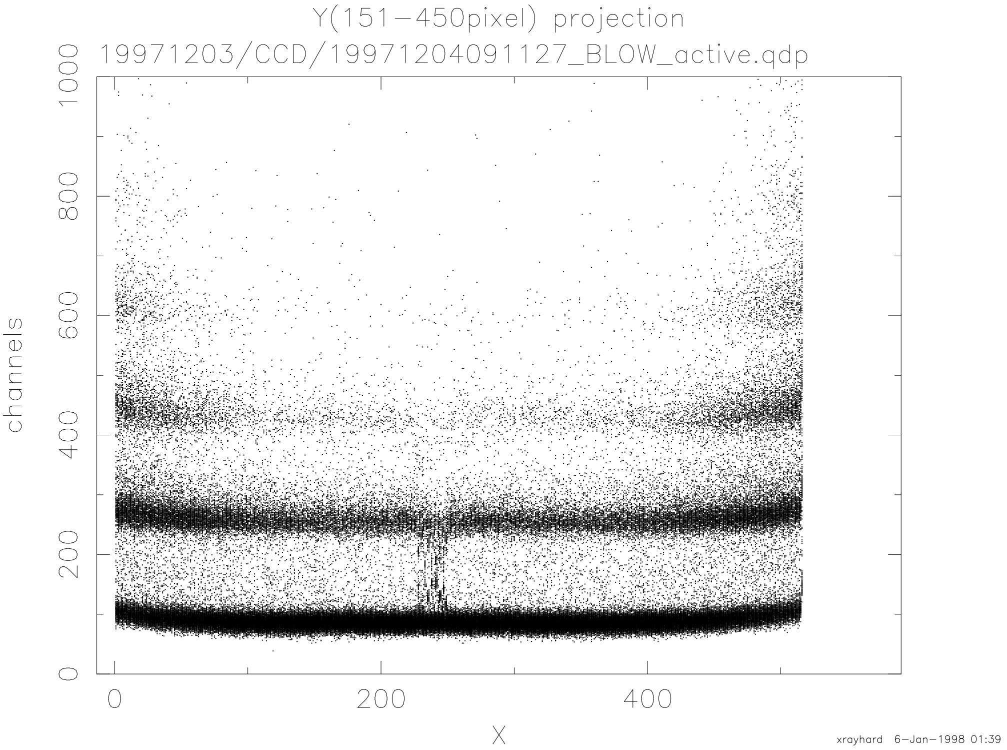


図 3.11: 水平方向に各点を射影したプロット

表 3.7: ^{55}Fe のピークチャンネルとゲイン

temperature °C	Mn Kα (channel)	Error($\Delta\chi^2$=2.7) (channel)	Mn Kβ (channel)	Error($\Delta\chi^2$=2.7) (channel)	gain (eV/ADU)	(e$^-$/ADU)
−120	464.9	(464.5, 465.4)	511.9	(510.1, 513.1)	12.68	3.47
−100	477.7	(477.3, 478.0)	526.3	(525.4, 527.3)	12.34	3.38
−80	472.7	(472.3, 473.1)	519.9	(518.5, 523.5)	12.47	3.42
−60	464.0	(463.6, 464.4)	511.9	(511.2, 512.9)	12.70	3.48
−40	452.1	(451.6, 452.7)	496.7	(495.9, 497.4)	13.05	3.58

ムで見ても同じところに同じチャンネルで現れることから、ホットピクセルであると思われる。ホットピクセルとは、CCD の絶縁不良などにより、常に電極から微弱な電流が流れ込んでいるピクセルのことある。このため電極がキャリアの吐き出し口となって読み出しのたびに大きな電荷を出している。グレイスケールのイメージ上で常に白い領域として見られることから別名白傷と呼ばれる。衛星軌道上では高エネルギープロトンによる放射線損傷により生成され、衛星 ASCA に搭載された CCD, SIS でもこのピクセルが問題にされている。ヒストグラムをよく見ると、イベント数は温度が下がると減少する様子が見られるが、不思議なのはピークチャンネルは逆に高くなるように見えることである。これは、温度を下げるにつれてパルスハイトの低いピクセルからホットピクセルではなくなるために、見かけ上ピークが高くなるのではないかと推測している。

3.2.2 N13 6-5A0N-2 の検出効率評価

当研究室にある別な CCD N13 6-5A0N-2(表 3.2 参照) を用いて検出効率の測定を行なった。このチップも前のものと同様、低暗電流チップとされている。

N13 6-5A0N-2 のゲイン、検出効率

^{55}Fe を当ててゲイン、電荷転送非効率、検出効率の測定を以下の設定で行なった。

測定温度	−120°C, −100°C, −80°C, −60°C, −40°C
取得データ[9]	20 フレーム (−120°C, −40°C), 21 フレーム (−80°C), 28 フレーム (−100°C, −60°C)
露出時間	150.0sec
読み出し時間	20.6sec (60μsec/pixel)
読み出し方法	相関 4 重サンプリング

データの解析には日本の次期 X 線衛星 ASTRO-E に搭載される X 線 CCD, XIS の機上で行なわれるイベント解析ルーチンをエミュレートしたソフトウェア、 xisdl(XIS Delay Look) を用いた。このソフトウェアのアルゴリズムについては付録 A を参照して欲しい。 xisdl 上のパラメータの値として、 Dark level threshold, Light Leak Threshold は effective 領域の揺らぎの 5σ に設定、 Split Threshold は effective 領域の揺らぎの 3σ に設定した。

ゲインの決定、リニアリティ

各フレームからゼロレベルを差し引いて足し合わせたヒストグラムを作成した (図.3.12)。以降、このヒストグラムを summed hist と呼ぶ。 0 チャンネルのピークが X 線イベントの入っていないピクセルで右側の 2 つのピークがそれぞれ Mn Kα, Mn Kβ のイベント、あいだにだらだらと伸びているのが X 線イベントが洩れ出たピクセルである。

このイベントのピークをフィッティングより求め、ゲインを評価した (表.3.7)。 −100°C から −40°C にかけて、約 6% のゲインの変動がある。これは、内部の MOSFET の温度依存性を表している可能性もあるが、別な日に測定を行なった −120°C のデータだけゲインがはるかにずれている事を考え合わせると、 CCD 外のシステムの不安定性を反映しているのかもしれない。

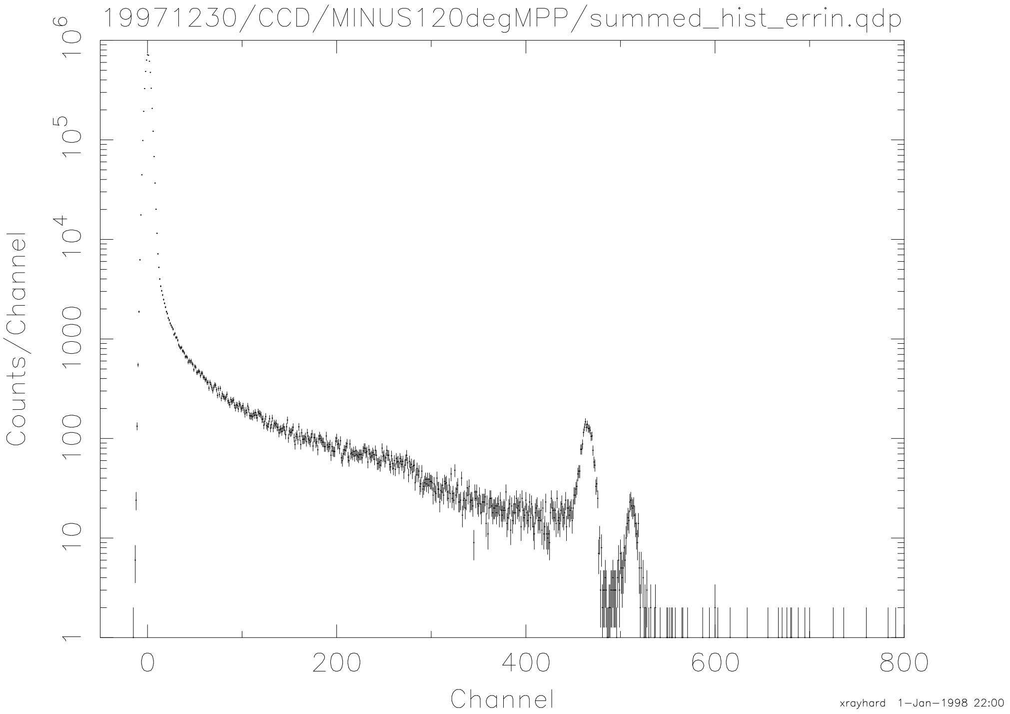


図 3.12: ゼロレベルを引いて足し合わせたヒストグラム (–120°C)

表 3.8: 領域 A, 領域 D の ^{55}Fe の中心値

	領域 A			領域 D			領域 A – 領域 D
temp	GC(Error($\Delta\chi^2$=2.7)) channel	sigma channel	全 photon count	GC(Error($\Delta\chi^2$=2.7)) channel	sigma channel	count	channel
–100°C	477.2 (476.7, 477.6)	5.53	483.7	478.1 (477.7, 478.5)	5.74	530.9	–0.9
–40°C	452.0 (451.5, 452.6)	6.08	378.4	452.2 (451.6, 451.8)	6.43	305.8	–0.2

電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency)

effective 領域を田の字状に 4 つに分割して summed hist を作成し、各領域の Mn Kα イベントの中心チャンネルを使い電荷転送非効率を測定した。グレード 0 と呼ばれるシングルピクセルイベントに対して、読み出し口に最も近い領域 A と読み出し口から最も遠い領域 D に対して –100°C と –40°C の 2 点の解析を行ない、表 3.8 にのせてある。これより、横転送 250 回、縦転送 250 回の転送の平均 CTI が求まる。

CTI はどちらも負の値で、しかも領域 A、領域 D のピークチャンネルのエラーは重なっている。つまり、 CTI はこの統計では測定することができないほど低い。これより、 CTI の上限値を求めると、縦転送と横転送が同じ CTI であるとして、 CTI $\leq 10^{-6}$/ 一転送 となる。

検出効率

X 線イベントは 2 つ以上のピクセルにまたがって検出される事があることから、イベント抽出の違いによって検出効率も異なってくる。ここでは、 2 通りの測定方法で検出効率を推定する。データは –80°C で取得したものを用いる。

表 3.9: 全 21 フレームで受けた各 grade 毎の光子数

グレード分岐比		grade0 (cts)	grade1 (cts)	grade2 (cts)	grade3 (cts)	grade4 (cts)	grade5 (cts)	grade6 (cts)	grade7 (cts)
photon 数 (0–800ch)		1901	253	592	109	82	162	1274	15501
フィッティング	Mn Kα	1413	167	421	99	104	128	804	11147
	Mn Kα escape	43	—	—	—	—	—	—	—
	Mn Kβ	204	103	67	—	—	—	104	***
合計		1660	270	488	99	104	128	908	11147

表 3.10: 方針 1,2 より求めた空乏層厚

	方針 1			方針 2
	grade0	grade0∼6	grade0∼7	
count 数	1901	4373	19874	25285
空乏層厚	1.3μm	3.1μm	18μm	26μm

方針 1:

1. 線源として用いる ^{55}Fe の強度を求める。
2. グレード 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 のカウントレートを求める[10]。
3. 上の結果から、 CCD の空乏層厚を求める。

方針 2:

1. 線源として用いる ^{55}Fe の強度を求める。
2. 生データの総エネルギーフラックスを求める。
3. 得られたフラックスを ^{55}Fe のエネルギーで割り、 ^{55}Fe のカウントレートを求める。(単純のため、ここでは Mn Kα のみが来たと考える。)
4. 上の結果から、 CCD の空乏層厚を求める。

図 3.13 に各グレードのスペクトルを、表 3.9 に各グレード毎の 0–800ch の間に含まれるカウント数を表示した。参考にスペクトルをフィッティングすることによって求めた Kα, Kβ 値も記載している。 ^{55}Fe の線源強度は 6keV 付近ではほぼ 100 % の検出効率をもつ半導体検出器を用いて測定した。その結果、 CCD 全面に当たる 21 フレーム (170.6sec) の Mn の蛍光輝線は $= 42633$ cts と算出された[11]。この計算は全てのイベントが Mn Kα という過程の元で行なっているが、 Kβ 成分が混入してくることによる不定性は、 ∼20% の Kβ 成分[12]を Kα に読み違えてしまう事による事で起こる。しかし、これはせいぜい 2% で今回の議論には問題にならない。

これから空乏層厚を求める。方針 1 のシングルピクセルイベント grade 0 ないし X 線イベントとして認めることができる grade 0∼6 の空乏層厚は $\leq 3\mu$m であるのに対し、方針 2 で求めた空乏層厚はおよそその 10 倍である。これは一体何を意味しているのだろうか。方針 1 であっても grade 7 まで足してやると方針 2 の値に近付くことから、本質的な問題はイベントがほとんど グレード 7 にいってしまうのは何故かということに集約されるであろう。

---

[10] Fe の Kβ event の上限と考えられる 800ch までを足し合わせる

[11] 今回の実験は 15μm のアルミホイルを 2 枚かぶせており、その影響も考慮している

[12] SSD のスペクトルより算出した

表 3.11: Mn Kα の中心チャンネル

grade	0 (ch)	1 (ch)	2 (ch)	3 (ch)	4 (ch)	5 (ch)	6 (ch)	7 (ch)
Mn Kα 中心チャンネル	473.0	472.7	472.7	472.8	472.6	473.3	457.2	414.2

浜松フォトニクス社の CCD はピクセルのサイズが小さいため、イベントは複数のピクセルにまたがりやすくなる。しかし、阪大の平賀氏が行なっている実験によれば、X 線が入った後の 1 次電荷雲の広がる大きさを半径 2μm と算出 (personal communication) しており、ピクセルサイズ 12 μm から比べると全体の 80% が grade 7 にいってしまう事は理解に苦しむ。かつて浜松フォトニクス社で行なわれた実験によれば、中性領域で反応した電子雲が徐々に上がってきた結果、大きなぼんやりとした構造が測定されたというが、Grade 7 がこれと同一のものか確認できていない。1 つのポイントは、grade 0 を始めとした他のイベントの Mn Kα line の中心チャンネルは表 3.11に表されているように 476ch 付近をピークとしているのに対し、grade 7 のみ 414 ch と大幅に低いことである。スペクトルは spiky な事からそろって電荷をとりこぼしていることになる。60ch は全体の 12% に当たり、これが何の原因によるのかは今後の課題である。

3.3 ノーマルモード vs MPP モード

検出効率はできるだけ高い方が良いため、空乏層を成長させるノーマルモードで駆動できることが望ましい。そこで、MPP モードとノーマルモードの違いによる暗電流ならびに読み出しノイズの挙動の温度依存性を浜松フォトニクス社製の低暗電流チップ N18 4-5A0N-43.2を用いて測定した。

3.3.1 暗電流、読み出しノイズ特性

データ取得は以下の設定で行なった。

測定温度	–120°C, –100°C, –80°C, –60°C, –40°C
取得データ	20 フレーム
露出時間	150.0sec
読み出し時間	20.6sec (60μsec/pixel)
読み出し方法	相関 4 重サンプリング
ゲイン (MPP)	12.68eV/ch, 3.47e$^-$/ch

MPP モードに関しては、あらかじめ ^{55}Fe を当てることによってゲインの測定を行なった。

1 フレームのイメージ

ノーマルモード, MPP モードの –120°C 平均フレームのイメージが図 3.14である。ノーマル, MPP 両フレームに共通して見られる全面に散在する白い点は宇宙線イベントである。数列おきに値の高い縦線がみられるが、これは回路系の問題で下で詳しく述べる。VOC 領域の値が MPP モードで HOC に比べて高いのは、MPP での縦転送に伴うスプリアスチャージのためである。MPP モード のデータに対しては、水平垂直方向に積分したヒストグラムを作成した (図 3.15)。列ごとの傾向がはっきりと見えている。特徴は以下の通りである。

水平方向 32 ライン毎のゼロレベルの増加

縦線はちょうど 32 ライン毎に現れる。横方向の断面図 (図 3.15) をみると頻繁にピークが見られるが、これらが 32 ライン毎の縦線に対応し、よく見れば 8 ライン、16 ライン毎にもピークが見られる。この原因は CCD ドライブ回路中のパターン発生回路にある。回路中で用いているカウンタにはビットが反転するたびに過剰な電流が流れる性質があり、反転するビットの多い 2^N ライン毎に値が高くなる。毎回同じように値が高くなることから、ピクセルの個性とみなせば、X 線イベントを計測する際に影響は残らない。暗電流を評価する際には値の高い 32 ライン毎を差し引いて評価を行なった。

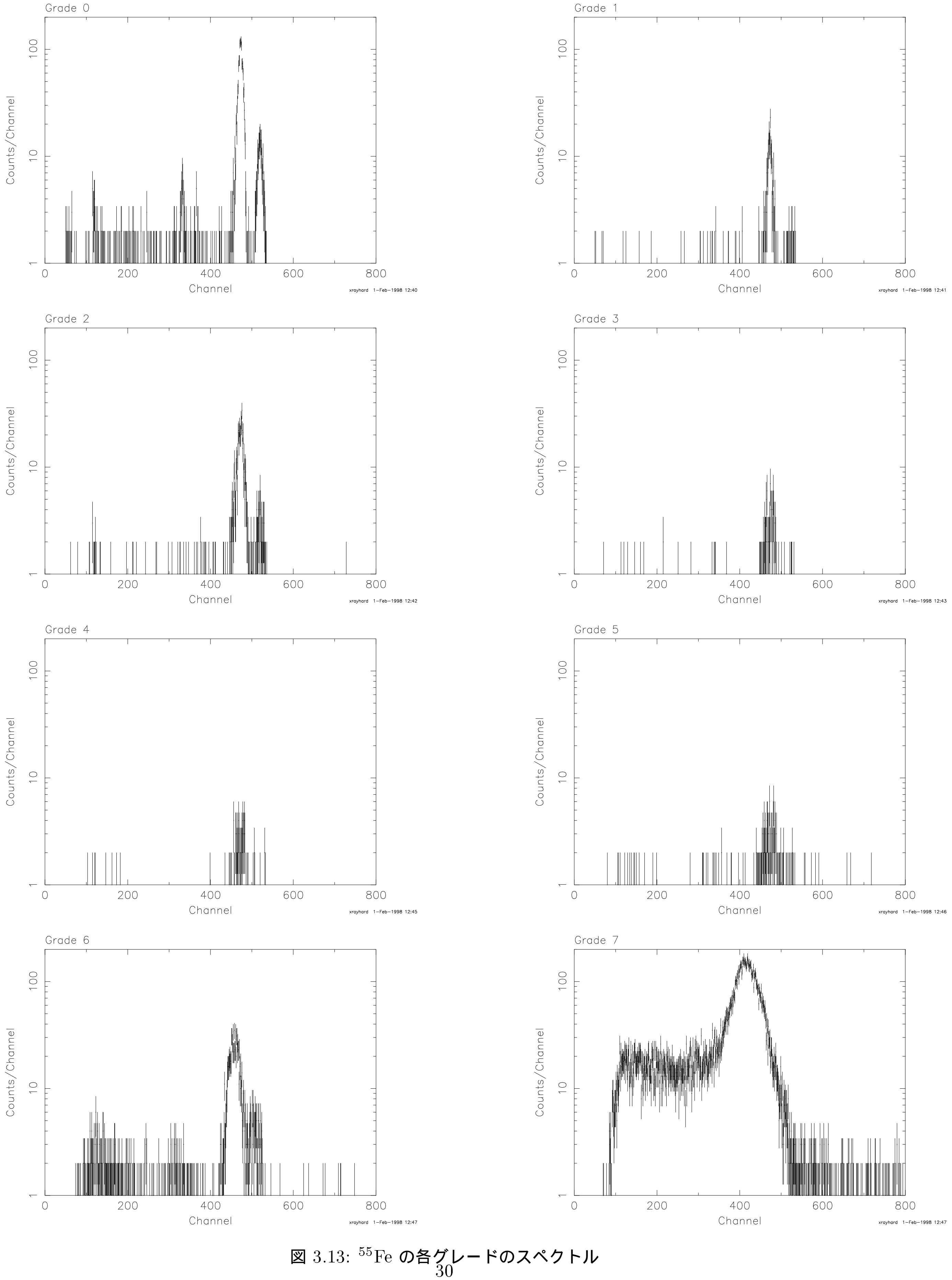


図 3.13: ^{55}Fe の各グレードのスペクトル

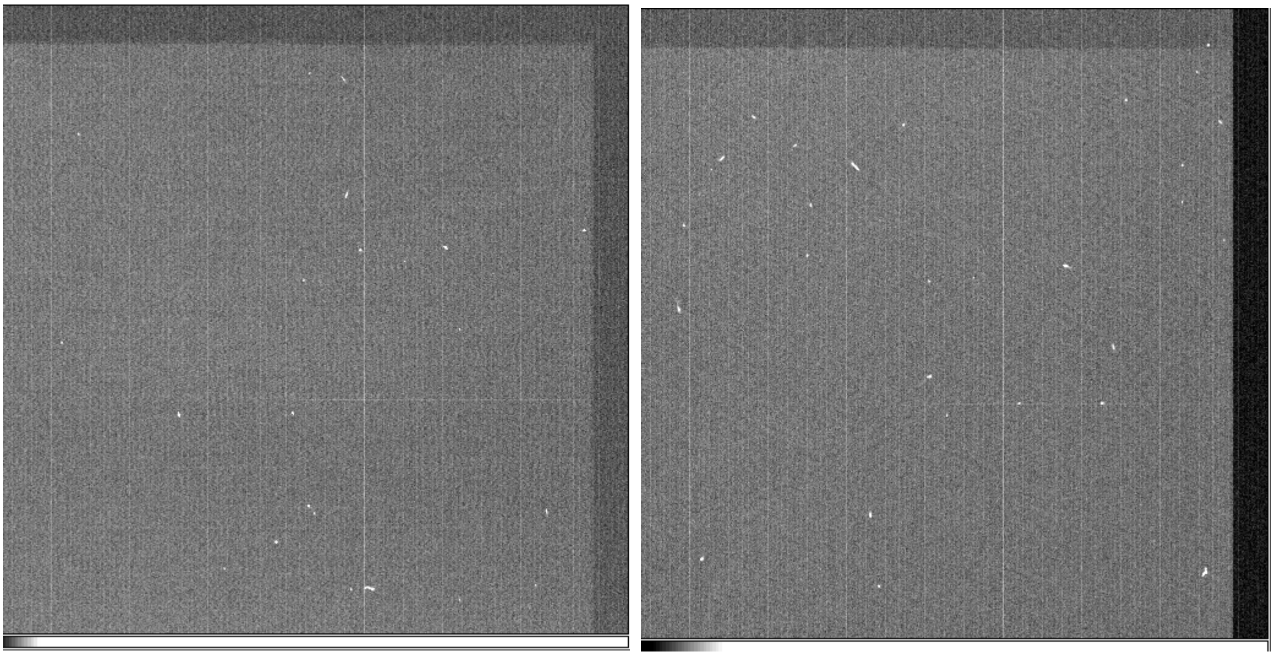


図 3.14: ノーマルモードと MPP モードの –120°C のフレームイメージ
vspace-5mm 左側がノーマル、右側が MPP モード。こころもち、ノーマルモード のフレームは宇宙線が少ないように見える

垂直方向 10 line 付近までの値の落ち込み

後に測定を行なう N13 チップには垂直方向の落ち込みは見られない。この事から何らかの形でチップ内でのゼロレベルの変動がおきているものと推測している。この領域も暗電流の評価には用いていない[13]。

垂直方向の値の上昇

緩やかな温度勾配があるせいで暗電流量がなだらかに上昇しているのかもしれないが推測の域をでない。しかし、盛り上がりは 0.3 ch 程度でほとんど問題にはならない。

温度が上がって暗電流が増加するとイメージにも暗電流の特徴が見え始める。–40°C のイメージを見て欲しい (図 3.16)。 MPP モードでは、中心部からフレーム周辺部に向けて値が大きくなる特徴がある (参照 3.2.1節)。 MPP より更に変化が激しいのがノーマルモードである。イメージ全体に周囲より値の高い横線が無数に走っている。また、水平方向に関して中心より端の方がカウントが低くなる傾向があり、これは MPP モードと反対である。

データ解析、評価

暗電流の比較は以下の手順で行なった [10]。

暗電流

1. HOC 領域の平均値をバイアスとし、各フレームでバイアス値を求める。
2. 各フレームからそのフレームのバイアスを引いたフレームを作る。
3. バイアスを引いたフレームを合わせて、平均フレームを作る。
4. 平均フレームの effective 領域と VOC 領域の各ピクセルの平均値を求める。
   この時、 32pixel 毎の線の部分は足し合わせない (3.3.1節を参照の事)。

---

[13] 垂直方向は 11pixel 目から平均をとった

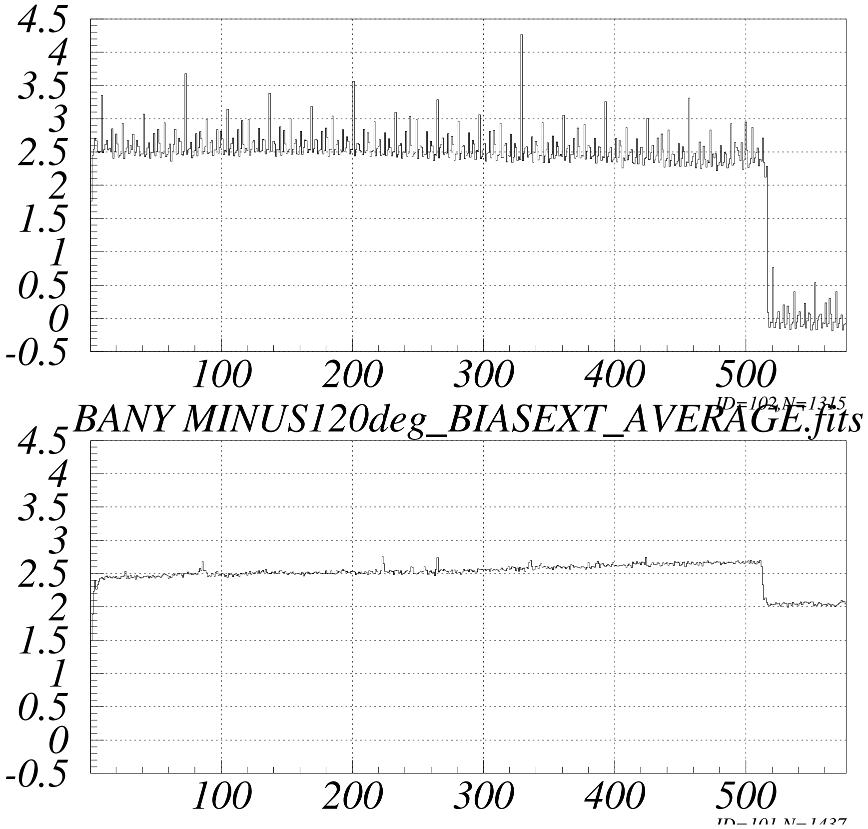


図 3.15: 平均ピクセル値の断面図
上は垂直方向に積分して横軸が水平転送方向、下は水平方向に積分して横軸が垂直転送方向

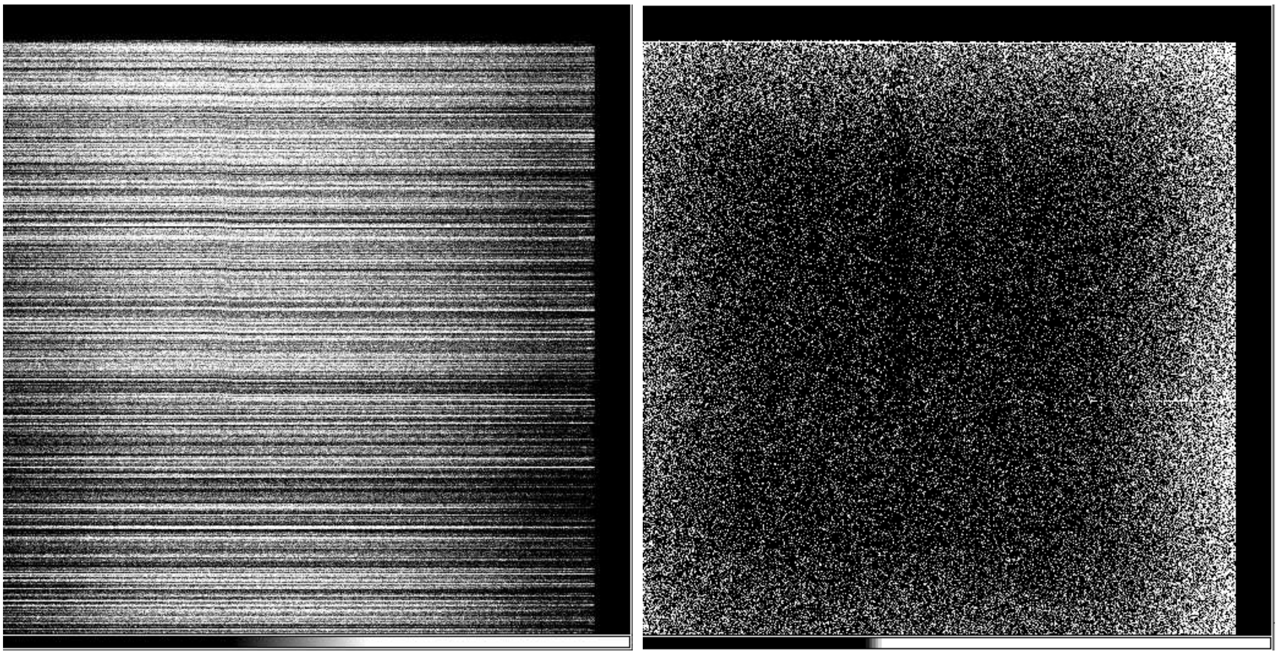


図 3.16: ノーマルモードと MPP モードの –40°C のフレームイメージ

左側がノーマルモード、右側が MPP モード。

表 3.12: 暗電流特性

	ノーマル		MPP	
temp °C	effective (e$^-$/sec/pixel)	VOC (e$^-$/pixel)	effective (e$^-$/sec/pixel)	VOC (e$^-$/pixel)
–120	0.023	–0.019	0.012	6.985
–100	0.069	0.727	0.012	6.506
–80	0.045	6.823	0.014	5.864
–60	3.605	56.992	0.018	5.202
–40	27.784	448.444	0.070	4.490

5. (effective の平均値)–(VOC の平均値) を CCD の積分時間で割って暗電流値を求める。
   また、(VOC の平均値)–(HOC の平均値) を求め CCD 縦転送に特有の値を求める。

読み出しノイズ

1. バイアスを引いた各フレームから更に平均フレームを引き、読み出しノイズを求めるために HOC 領域の、バックグラウンド揺らぎを求めるために effective 領域のヒストグラムを作る。
2. 各フレーム毎に、それぞれのヒストグラムのゼロレベルノイズを求める。
3. 上で求めた各フレーム毎のゼロレベルノイズの平均を取り、ノイズ値とした。

上の手順に従い、ノーマル と MPP の暗電流量、読み出しノイズの温度特性を出した。結果は、図 3.17, 3.18, 3.19, 3.20の通りである。図はノーマルと MPP モードを同時に載せてあり、ノーマルのゲインは MPP と同じと仮定してプロットしてある。

ノーマルモードの暗電流値は温度が上がるに従い急激に増大しているのに対し、MPP モードは –40°C に至るまでほぼ一定で、暗電流を減らす MPP モードの特徴をよく表している。

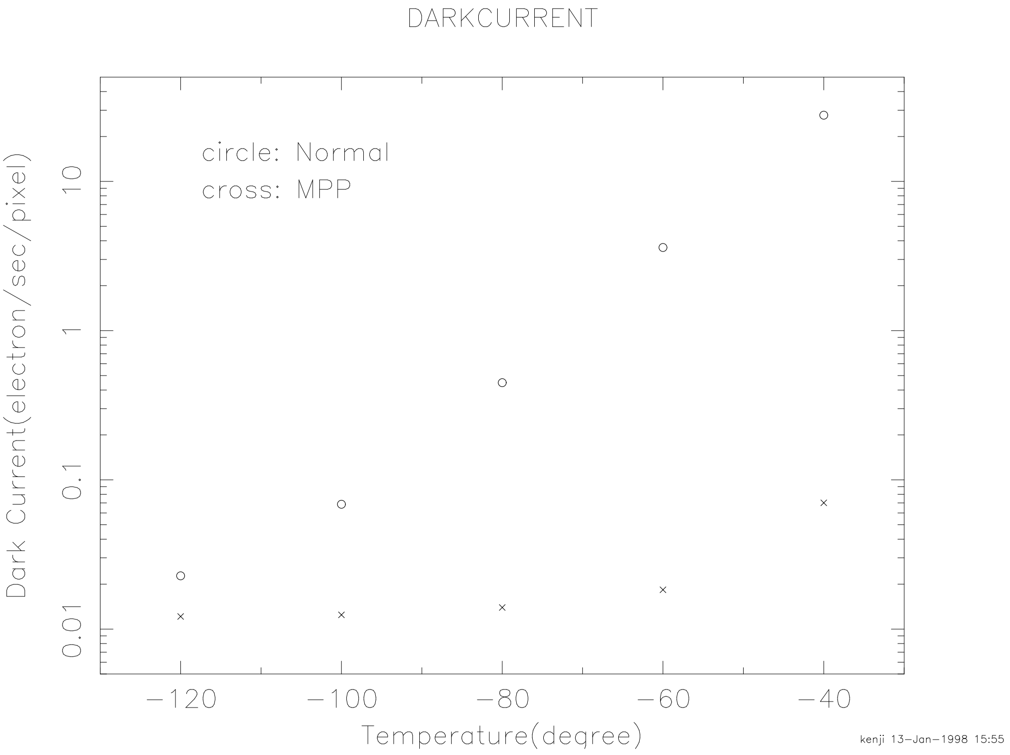


図 3.17: 暗電流特性

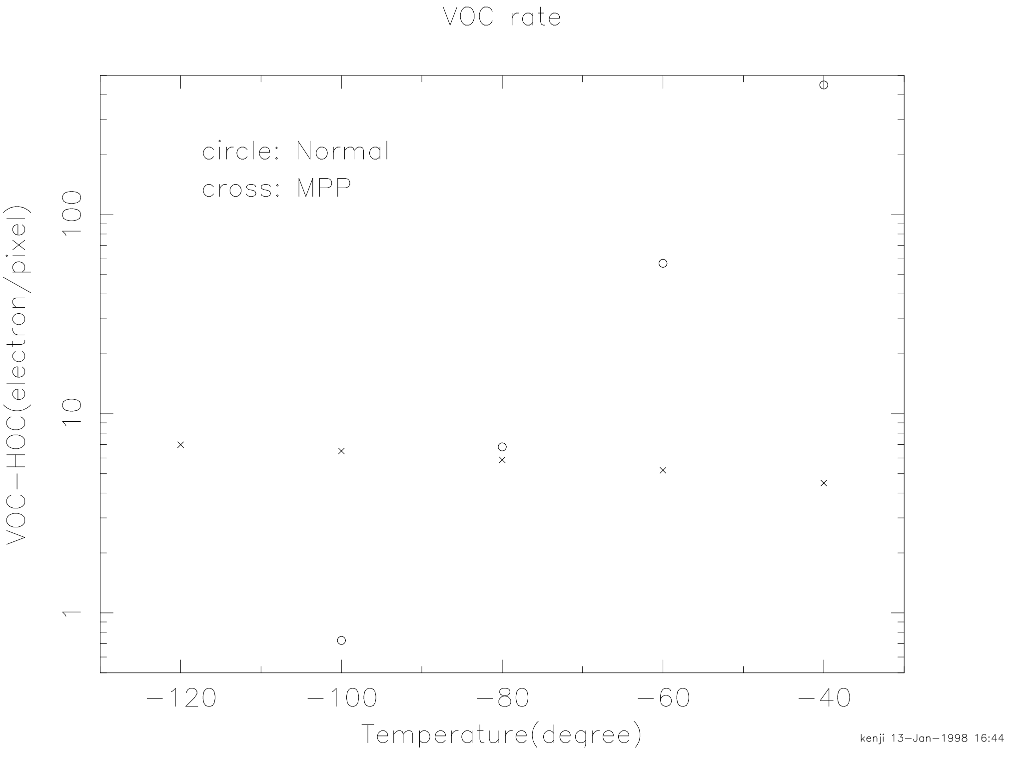


図 3.18: VOC 値の温度特性

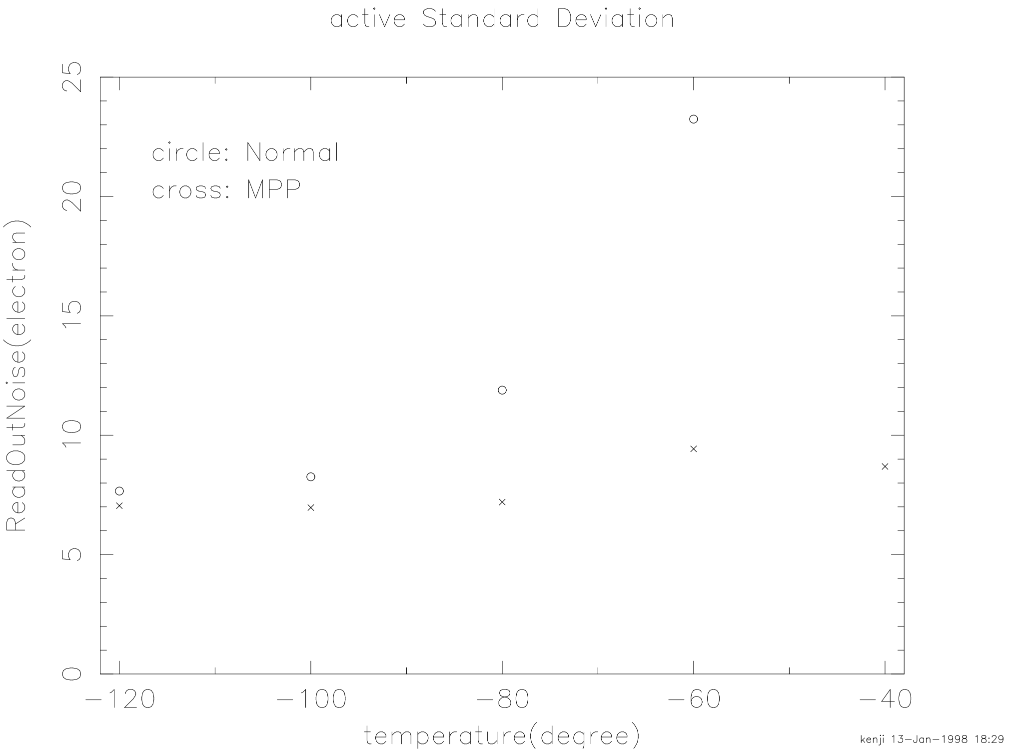


図 3.19: effective 領域の揺らぎの温度特性

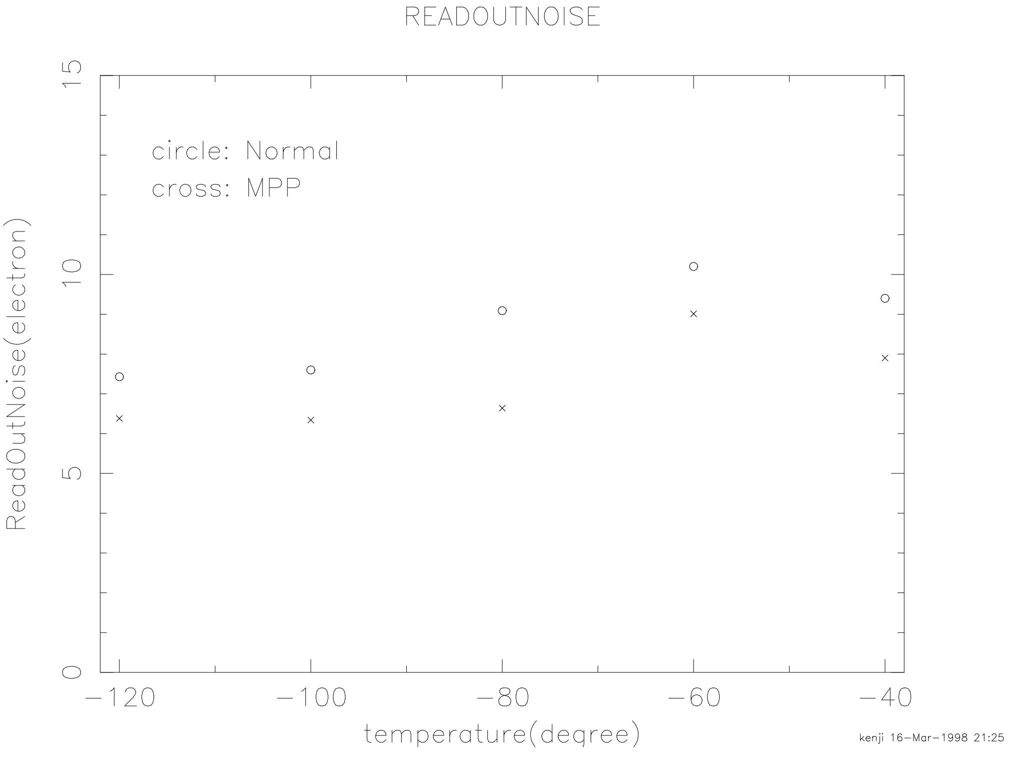


図 3.20: 読み出しノイズ

表 3.13: 読み出しノイズ

	ノーマル		MPP	
temp °C	effective (e^-)	HOC (e^-)	effective (e^-)	HOC (e^-)
–120	7.66	7.43	7.05	6.38
–100	8.26	7.60	6.97	6.34
–80	11.89	9.09	7.20	6.64
–60	23.24	10.20	9.43	9.01
–40	72.99	9.40	8.69	7.90

表 3.14: P-2 チップのゲイン

	Mn Kα	Gain	
	(channel)	(eV/ch)	(e^-/ch)
MPP	627.7	9.39	2.57
ノーマル	491.9	12.0	3.29

VOC の温度特性を見ると、ノーマルモードは 暗電流値と同じように急激な増え方をしているが、これは読み出し時間約 20sec の間 effective 領域上にいる内に暗電流を拾ったためであろう。 MPP モードで温度変化がないのは、縦転送において電極電圧が反転状態から非反転状態へ移行する際に生じる MPP モードに特有のスプリアスチャージであると思われ、詳しくは今吉修論 [7] で調べられている。温度が上がるにつれて若干値が下がる傾向があるがこれが本当かは議論の余地がある。

読み出しノイズは常に MPP モードの方が低い値を示しているが、ノーマル, MPP ともに同じような温度依存性を示している。 –60°C 付近でノイズ悪化のピークが見られるが、これはチップの読み出し部分にある MOSFET の特性であると思われる。

宇宙線 *Event* の見積もり

先の平均フレームにもはっきり現れていたが、 1 フレーム 当たり平均して 1~2 イベント、宇宙線イベントが観測される。暗電流は平均値で評価していることからこれらの寄与を評価した。宇宙線イベントは 1 つ当たり大体 10pixel、その各々が 100ch 程度の値を持っていると見積もると、 $1.8 \times 10^{-4} e^-$/sec/pixel と、 MPP モード, –120°C においても暗電流の 1% 程度である。

3.3.2 検出効率の比較

ノーマルモードの gain

ノーマルモード と MPP モード ではゲートにかけられる電圧が異なるためゲインも違う可能性がある。しかし残念ながら N18 4-5A0N-4 チップはトラブルのため ノーマルモード で ^{55}Fe 線源をあてる前に壊してしまった。そこで、スタンダードチップである P2 4-5A1P-4 を用いて、ノーマルモード、 MPP モード のゲインの違いを比較する。読み出し口付近の電極構造は同じであるから、 N18 と定性的には同じ挙動を示すと思われる。

測定温度	–100°C
取得データ	MPP モード、ノーマルモード それぞれについて、 Dark, ^{55}Fe 共に 3 フレーム ずつ取得

図 3.21, 表 3.14を見ると、 MPP モード よりもノーマルモード の方が 25% ほどゲインが増加する傾向にある。これを、先の暗電流、読み出しノイズのグラフに適応すると、ノーマルモード の方が MPP モード よりすべての温度で更に暗電流が多く、読み出しノイズが悪くなる傾向にある。

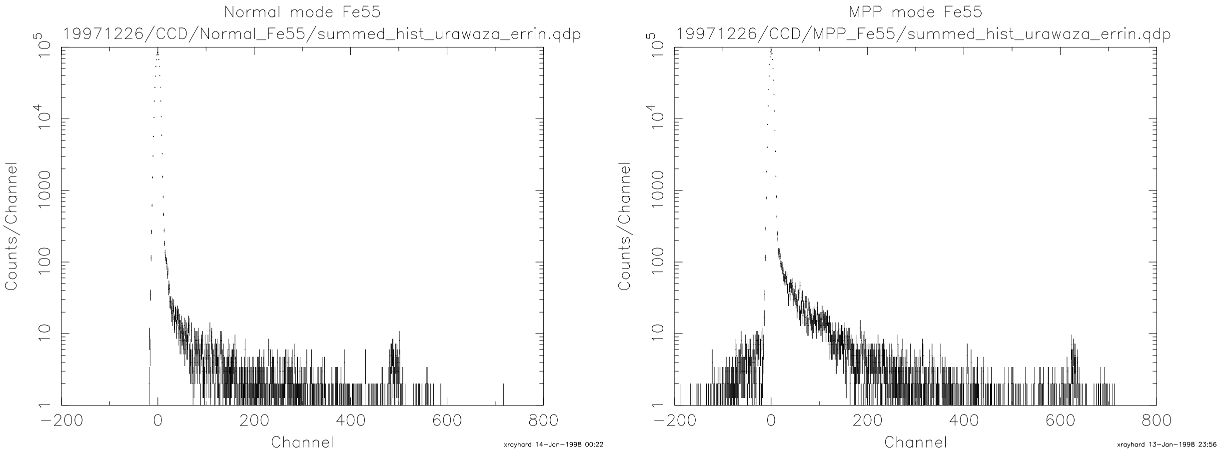


図 3.21: ノーマルモード、MPP モードの ^{55}Fe のヒストグラム
上が ノーマルモード で下が MPP モード。MPP モードのゼロレベル以下のイベントは宇宙線 event によって dark frame の見積りを誤った pixel に対応する。

表 3.15: グレード分岐比と検出カウント

グレード分岐比	grade0 (cts)	grade1 (cts)	grade2 (cts)	grade3 (cts)	grade4 (cts)	grade5 (cts)	grade6 (cts)	grade7 (cts)	grade0∼6 (cts)	grade0∼7 (cts)
MPP モード	58	10	18	5	4	7	26	494	128	622
ノーマルモード	29	0	5	6	156	21	113	145	330	475

^{55}Fe の測定結果

上の測定から、X 線イベントの各グレードへの分岐比を算出した。表 3.15 に結果をまとめてある。

split threshold はいずれも 3σ で設定した。X 線イベントと見なしうる grade 0∼6 の全光子数は ノーマルモード の方が大きいが grade 7 まで足すと逆に MPP モードの方が多くなる。grade 0∼6 の比較的まとまったイベントは空乏層領域で吸収される事から、ノーマルモード は空乏層厚が大きいという予想通りの結果が得られた。一方 grade 7 の広がったイベントは中性領域で吸収されると言われている。電荷を電極方向に集める事のできる層は、中性領域内部では逆に MPP モード の方が厚いという結果が得られた。また、grade 0 も MPP モード の方が大きいが、個々のイベントを実際に見てみると ノーマルモード の方が横方向に伸びたイベントが多いことがわかり、これは grade 4 のイベントが多いことでも裏ずけられる。電荷転送が ノーマルモード の方が悪いためと考えられるが、これが今回の電圧設定ないしチップの特性等に問題があるのかは不明である。

3.4 考察

3.4.1 ノーマルモード, VOC 領域の成分

垂直転送時の電圧は蓄積時の電圧と同じにしてあることから、ノーマルモード VOC の温度依存性は垂直転送中に拾う暗電流によるものと推測される。そこで、VOC の値と effective 領域から求めた縦転送時間 20.6sec 間の暗電流量とを比較した (表 3.16)。

表 3.16を見ると、⟨VOC の電子数の測定結果⟩よりも⟨蓄積時の暗電流量から概算した縦転送中に拾うであろう暗電流量⟩の方がどの温度領域においても高く (3 番目のコラム)、縦転送中は暗電流が抑圧されている可能性がある。この事と関連すると思われる事柄に、Barry E. Burke と Stephanie A. Gajar [14] が確立した表面準位の暗電流を押えるクロックがある。これは、ノーマルモードで蓄積中に定期的に電極を反転状態に持って行くことで正孔密度を上

表 3.16: ノーマルモード, VOC 量と同時間で流れる暗電流との比較

°C	VOC 電子数 (e^-/pixel)	20.6sec の暗電流量 (e^-/20.6sec/pixel)	$\frac{\text{VOC 電子数}}{\text{暗電流電子数}}$	τ (sec)	t/τ	1-exp(-2.7t/τ)
–120	–0.019	0.469	-4.04×10^{-2}	1.64×10^{8}	2.18×10^{-10}	5.87×10^{-10}
–100	0.727	1.413	0.515	6.54×10^{5}	5.47×10^{-8}	1.48×10^{-7}
–80	6.823	9.227	0.739	8.00×10^{3}	4.47×10^{-6}	1.21×10^{-5}
–60	56.992	74.268	0.767	2.20×10^{2}	1.63×10^{-4}	4.40×10^{-4}
–40	448.444	572.358	0.784	1.10×10^{1}	3.25×10^{-3}	8.74×10^{-3}

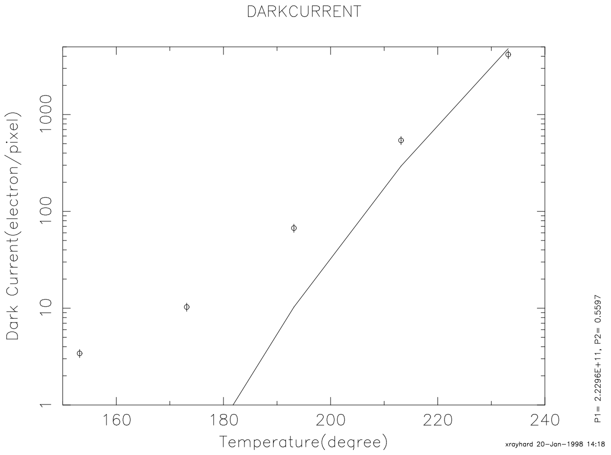


図 3.22: ノーマルモードの暗電流特性の SRHmodel フィット
目安として 10% の err を入れてある。

げ、トラップ準位にある電子と再結合させせることによって暗電流が増大するのを防ごうというものである。今回の測定では縦転送は 35.76 msec 周期で行なわれ、そのたびに電極値が 12V から 0V に変化する。そこで同じ時間間隔で通常の状態と反転状態を繰り返す場合に予測される暗電流値を表にのせた。 4 番目のコラム τ が再結合タイムスケール、 t/τ が再結合タイムスケールに対する縦転送時間の比率、最後のコラムが転送後再結合する割合を示している。これと 3 番目のコラムを比較して、等しければ縦転送の Low–Level によって暗電流が抑圧されている事になる。しかし、実際には蓄積中の暗電流よりは少ないものの、予測値よりは 2 桁以上多い結果になった。今回のクロックでは横転送は電極においても 0V までしか下がっておらず、 SiO_2 の表面ではもっと高い電圧になっていると思われる事から完全には反転層は形成されず、表面のポテンシャルを下げたことにより正孔密度が若干あがり、トラップ電子との再結合確率が増えた効果がほんの少しだけ現れていると見ることができる。

3.4.2 MPP とノーマルにおける暗電流の温度特性

ノーマルモードは –80°C 付近においても暗電流が十分見られることから、図 3.17を式 3.2 でフィッティングした。その結果が図 3.22である。ノーマルモードはゲインが不定であるが、式を見ると幸いな事に比例定数 K がその違いを吸収してくれるため、トラップ準位の評価には全く効いてこない。ノーマルモードは SRH model が合わなかった。何か別な成分が入ってきているのか、後々の考察が必要である。

MPP モード と同じように VOC の最頻値をゼロ点として 20 フレーム分足し合わせたヒストグラムを作成した (図 3.23)。 MPP モードと違い、ヒストグラムに量子化した構造は見られない。 –80°C と –40°C のヒストグラムを比較すると、 –80°C は大きく広がってしまっているため 1ADU 当たりのカウント数は落ちてしまっているが、温度が上がっても大体の形は変化しないように見える。これよりノーマルモードで見られる暗電流は、バルク中の金属ト

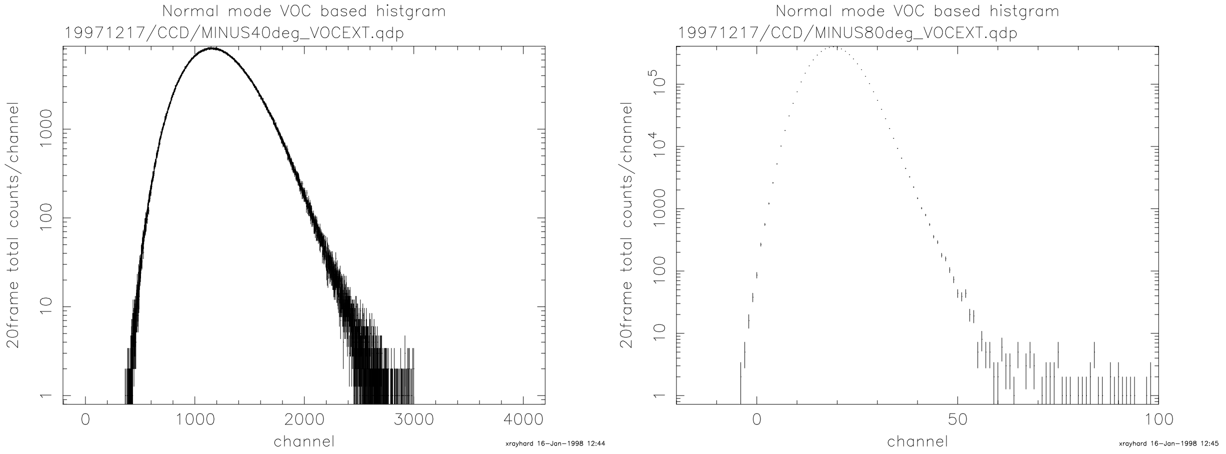


図 3.23: effective 領域のヒストグラム
左 −40°C、右 −80°C 。縦軸、横軸のスケールが両者で違うことに注意。

ラップ等ではない表面準位の複数のトラップによる暗電流が重なりあって見えているものと思われる。

ノーマルモードでイメージ一面に縞模様が見え、 MPP とは逆相関の様相を呈している原因を調べるために、個別に領域を切りとって暗電流の温度依存性を調べた。調べた領域は以下の 3 点である。

1. 画面右端の値の低い領域
2. 画面中央上部の値の高い領域
3. 垂直方向 168 列目の値の高い筋の入った領域

各領域を取り出した結果が 図 3.24 である。どの温度でも同じように変化していて、場所による依存性は見られない。

縞模様の原因は、 N18 のチップにとって浜松フォトニクス社指定の電圧が適正ではなかったために、場所によっては電荷転送のクロックがふれるたびに表面準位の暗電流を多く拾ってしまった事が考えられる。ノーマルモードでは空乏層厚が広がり検出効率が上がるというプラスの効果があることから、 high level の電圧を低くしてこのチップに最適な電圧を探すことが重要であろう。

3.5 まとめ

システムのノイズ評価を行なうことにより、

- CCD への信号線に 1μsec, 2.5μsec の spiky なノイズがのっていた。
- システムノイズは $\leq$1.2ADU であった。
- 暗幕をかけるなどの対策を講じることにより、光洩れをなくすことができた。

MPP モードで CCD の性能評価を行なうことにより、

- 低暗電流チップ N18 4-5A0N-4 は、冨田修論で用いられたチップ S5467 に比べてトラップ数が大幅に減少していた。
- トラップ準位は鉄の 0.55eV と 0.40eV と同じ温度特性を示した。トラップはイメージ周辺に広がっており、製造過程で混入した可能性が考えられる。
- ^{55}Fe の線源を当てた結果、 CTI $\leq 10^{-6}$/ 一転送 という上限値が求まった。

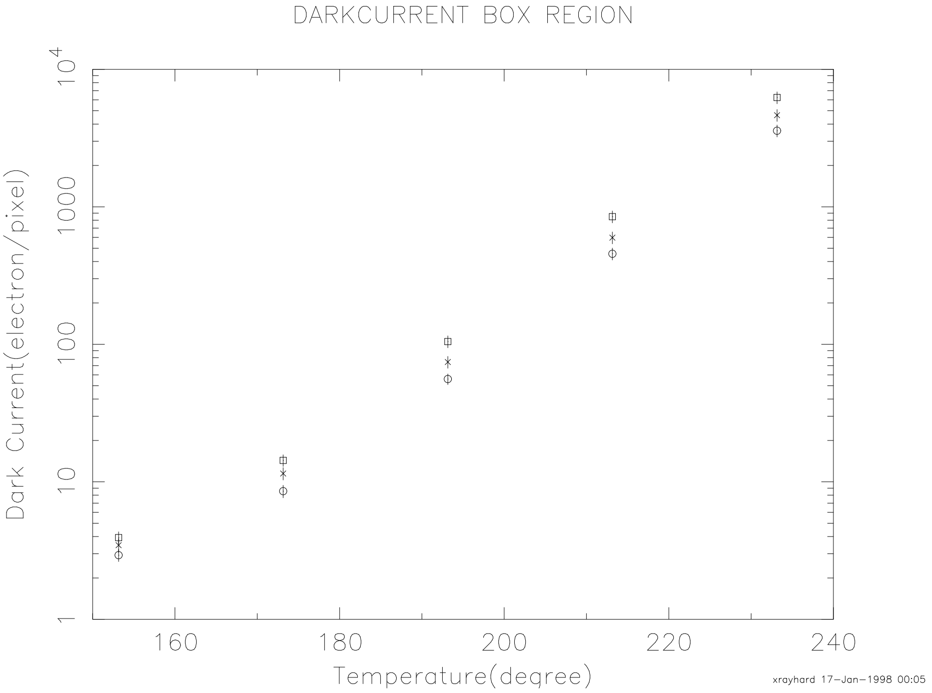


図 3.24: effective 領域中の 3 領域の暗電流特性。
丸が領域.1(画面右端の値の低い領域)、ばつが領域.2(画面中央上部の値の高い領域)、四角が領域.3(垂直方向 168 列目の値の高い筋の入った領域)。

- 検出効率を測定した結果、イベント検出法で 3μm、フラックス測定法で 26μm という空乏層厚が求まった。また、イベント検出した結果ほとんどがグレード 7 となっていた。

ノーマルモード と MPP モード で暗電流評価を行なうことで、

- MPP モード には今吉修論で記述されているスプリアスチャージによるものと思われる温度依存性を示した。
- ノーマルモードのイメージには特徴的な縞模様が見られたが、縞のあるなしは温度依存性に無関係であった。
- ノーマルモードは –120°C ~ –40 °C の低温度領域でも暗電流特性があるものの、 MPP で使われる SRH model で温度依存性を表すことはできなかった。

第 4 章

読み出し方式の考察

これまで相関 4 重サンプリング法を用いてきたが、読み出しノイズがより効果的に少なくなる、ないし読み出しがより効率良くなる読み出し方法が他にあるかもしれない。このような観点から MPP モードで以下の 2 通りの方法を試してみた。

4.1 N 重相関サンプリング

読み出しノイズが完全にランダムであれば、サンプリング回数を m 倍 に増やせば読み出しノイズは $m^{-1/2}$ になる事が期待される。今回、今までの 相関 4 重サンプリングと共に、 2 重、 8 重相関サンプリングを行なって、読み出しノイズ、エネルギー分解能の違いを比較した。

4.1.1 読み出しノイズの依存性

今まで、 1pixel を 60 μsec で読み出していた事から同じ早さで N 重サンプリングによる違いを試した。その場合、尾崎回路に送り込む CCD 読み出しクロックのパターンを 8 重相関 に対応させるには、パターンジェネレーターからの基準クロックを今までの 2 倍の 1.25μ sec にする必要がある。この時、リセットパルスから 10μsec 以降に読み出すためには (3.1.1節、リセットパルスから来るノイズ参照)8 重相関の場合、サンプリングのトリガーを 5μsec (200kcps) おきにかける必要がある。

この条件で 8 重相関のイメージを見たところ、取得する画面上に不規則な縞模様があらわれた (図 4.1)。縞があるところとないところの格差は $\sim$5ADU であった。 4 重相関、 2 重相関サンプリングにはこのような模様は見られず、また、サンプリング信号をオシロスコープでモニターしたところ問題は見られなかった。このことから、許容サンプリングレート以内ではあるが (表 3.1 参照) 高速サンプリングによって ADC の処理精度がおちた事にあると推測している。そこで、読み出し速度を半分の早さにして測定を行なった。この場合は 8 重相関でサンプリングしても縞模様はでてこない。詳しくは以下の通りである。

測定温度	−80°C
取得データ	20 フレームずつ
露出時間	40.0sec
読み出し時間	41.2sec (120μsec/pixel)(これまでの 2 倍)
読み出し方法	相関 2,4,8 重サンプリング

3.3.1節の解析法で読み出しノイズを求めた (表 4.1、図 4.2)。この場合、ガウシアンで良く近似できるが各フレームでの標準偏差にばらつきがあるので、取得した 20frame 分のデータの中での最大値、最小値を出しエラーの目安とした。図を見ると、確かに相関サンプリング数が多くなるほど読み出しノイズは減る傾向にある。しかし相関サンプリングによる改善量が大きい相関 2 重と相関 4 重の違いにおいても 10% 強で、 $2^{-1/2} = 30\%$ には及びもつかない。

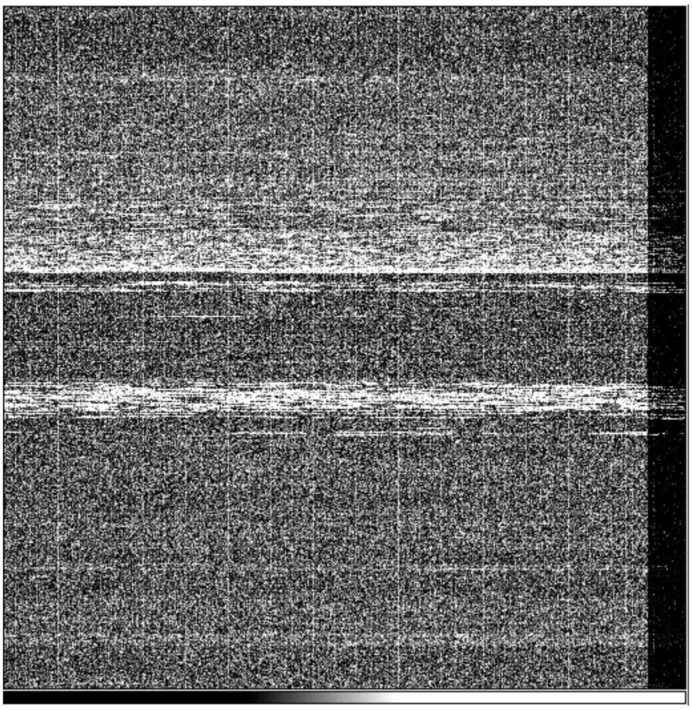


図 4.1: 8 重相関ダークフレーム取得時に現れた縞模様
最も顕著な例。

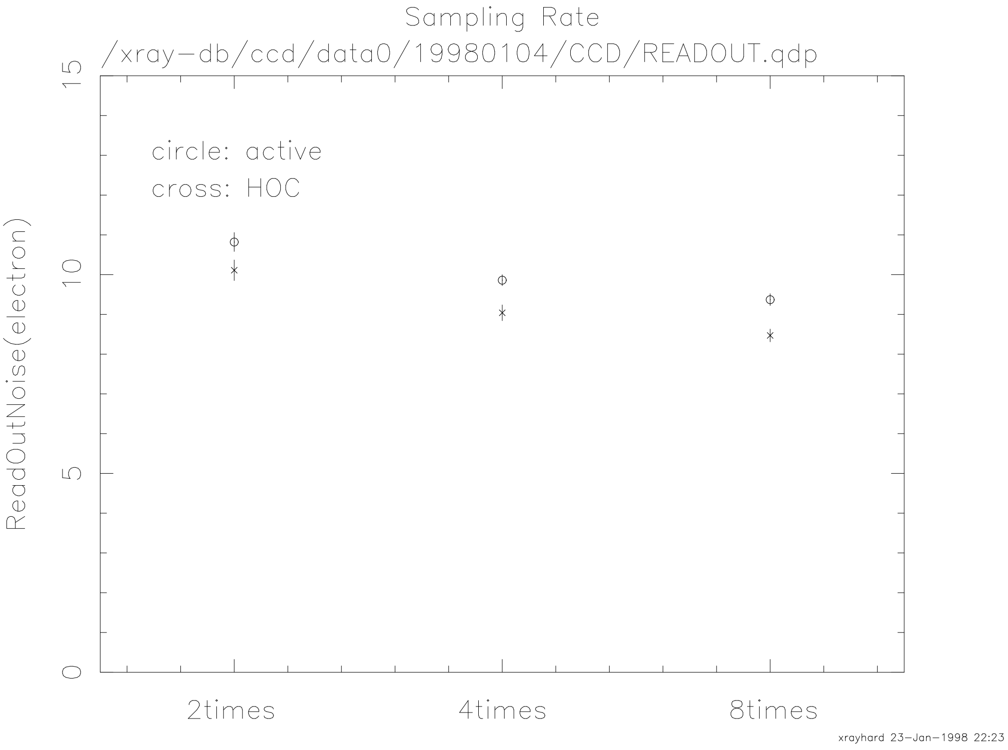


図 4.2: サンプリング回数の違いによる読み出しノイズの変化

個々のフレームのゼロレベルの揺らぎのエラーはほとんどない。ここでのエラーは 20 フレーム 取得したデータの最大、最小値をのせている。

表 4.1: 読み出しノイズ

	active (e$^-$)		HOC (e$^-$)	
2 重サンプリング	10.82	±0.24	10.11	±0.26
4 重サンプリング	9.86	±0.14	9.04	±0.20
8 重サンプリング	9.37	±0.15	8.47	±0.16

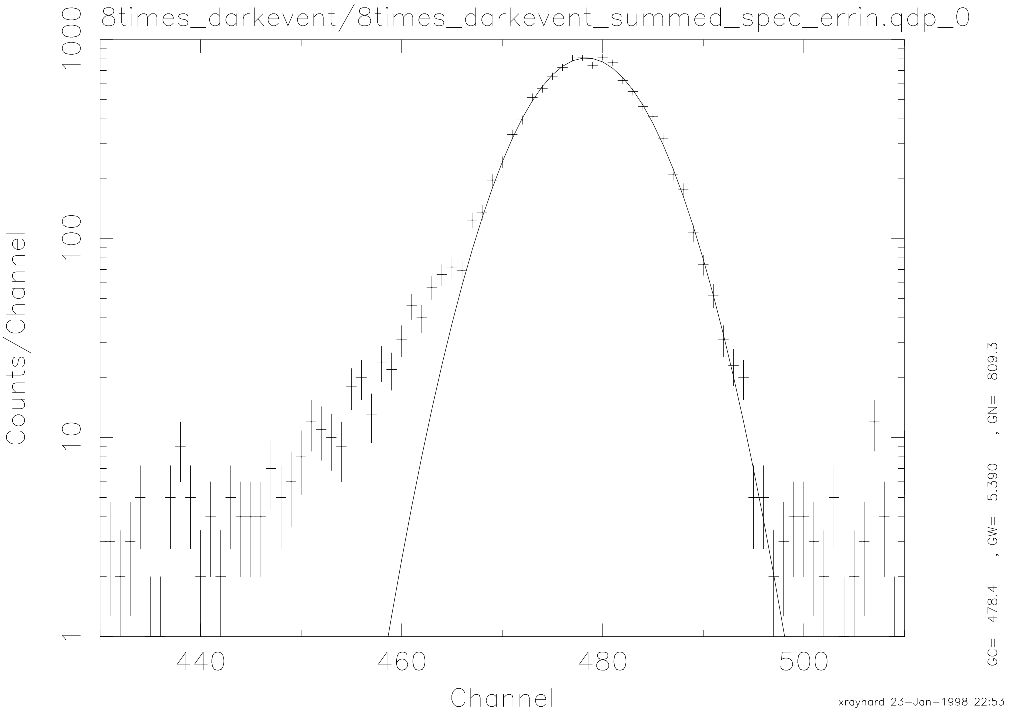


図 4.3: 8 重相関で取得した ^{55}Fe のスペクトル

4.1.2 エネルギー分解能

相関サンプリングがエネルギー分解能に与える影響を ^{55}Fe を当てて調べた。測定条件は以下の通りである。

測定温度	-80°C
取得データ	∼120 フレーム
露出時間	40.0sec
読み出し時間	41.2sec (120μsec/pixel)
読み出し方法	相関 2,4,8 重サンプリング

エネルギー分解能の評価には、シングルピクセルイベントである grade 0 のデータを用いた。^{55}Fe のスペクトルを見ると、ガウシアン的なピークだけでなく低エネルギー側にテール状の成分があるのがわかる (図 4.3)。このテール成分の起源については、藤原修論 [6] を見て欲しい。シングルガウシアンのみでフィティングする時、テール成分が混ざり込んでしまわないよう領域を決める必要がある。そこで、今回は最初に適当な領域でフィッティングしてガウスの形を決め、その中心値から 1σ の範囲をあらたな領域として定めて再度フィッティングしてガウスの標準偏差を求めた。結果は 表 4.2、図 4.4 にある。

表 4.2: 各種相関サンプリングの ^{55} エネルギー分解能

	FWHM(eV)
2 重サンプリング	160.08 (151.60, 170.03)
4 重サンプリング	148.65 (142.08, 156.08)
8 重サンプリング	155.80 (146.46, 167.02)

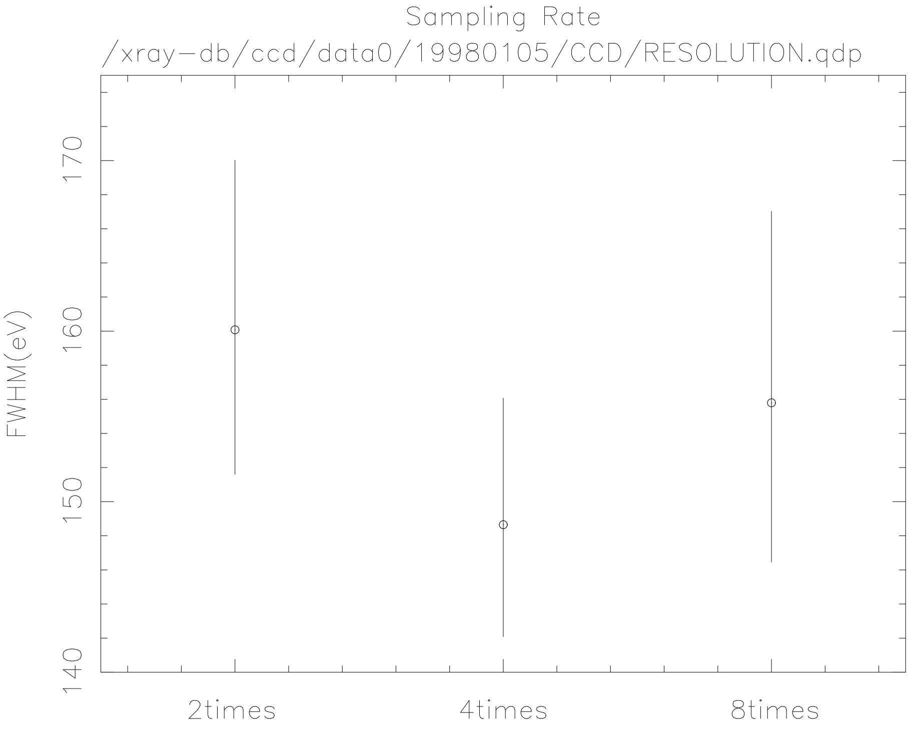


図 4.4: 各種相関サンプリングの ^{55}Fe エネルギー分解能
エラーは $\Delta\chi^2 = 2.7$ の範囲で出してある。

図 4.4 を見るとわかるように、相関サンプリングの効果は見られなかった。

4.2　ノーリセットクロック

CCD のクロックでリセットをかけなかった場合、信号出力部分には毎回電荷がキャンセルされずに溜っていくことから、横転送クロックが 1 周期かかる毎に徐々に電圧が上がっていく事が予想される。この場合、フロートレベルとサンプルレベルの 2 度 AD 変換をする必要がなくなるという利点がある。そこで、 1 列全くリセットをとらない場合と 64pixel 毎にリセットを書けた場合の 2 通り試してみた。

その結果が図 4.5である。予想に反して横転送クロックが動くたびに電圧値が変化し、フロートレベルとシグナルレベルを形成している。その上で徐々に電圧値は下がっていっているが、 576pixel 毎にリセットをかけるクロックを見てもわかるようにすぐに電圧値が飽和してしまった。 −80deg のダークフレームであるから表 3.13を見ても 1pixel に溜る電子数はせいぜい $5e^-$ であり、 576pixel 分電荷が溜っても $\sim 3000e^-$ 程度にしかならないはずで矛盾している。電極の構造から考えてもどこかオペレーションもしくは CCD に問題があるのかもしれない。

4.3　まとめ

2 重、 4 重、 8 重サンプリングに関して

- サンプリング回数が上がる毎に読み出しノイズに 5% から 9% の改善が見られた。
- ^{55}Fe を当てたが有意な改善は確認できなかった。

ノーリセットクロックをかけたが

- 予測したような階段状に電圧レベルが上がっていくような波形は見られなかった。

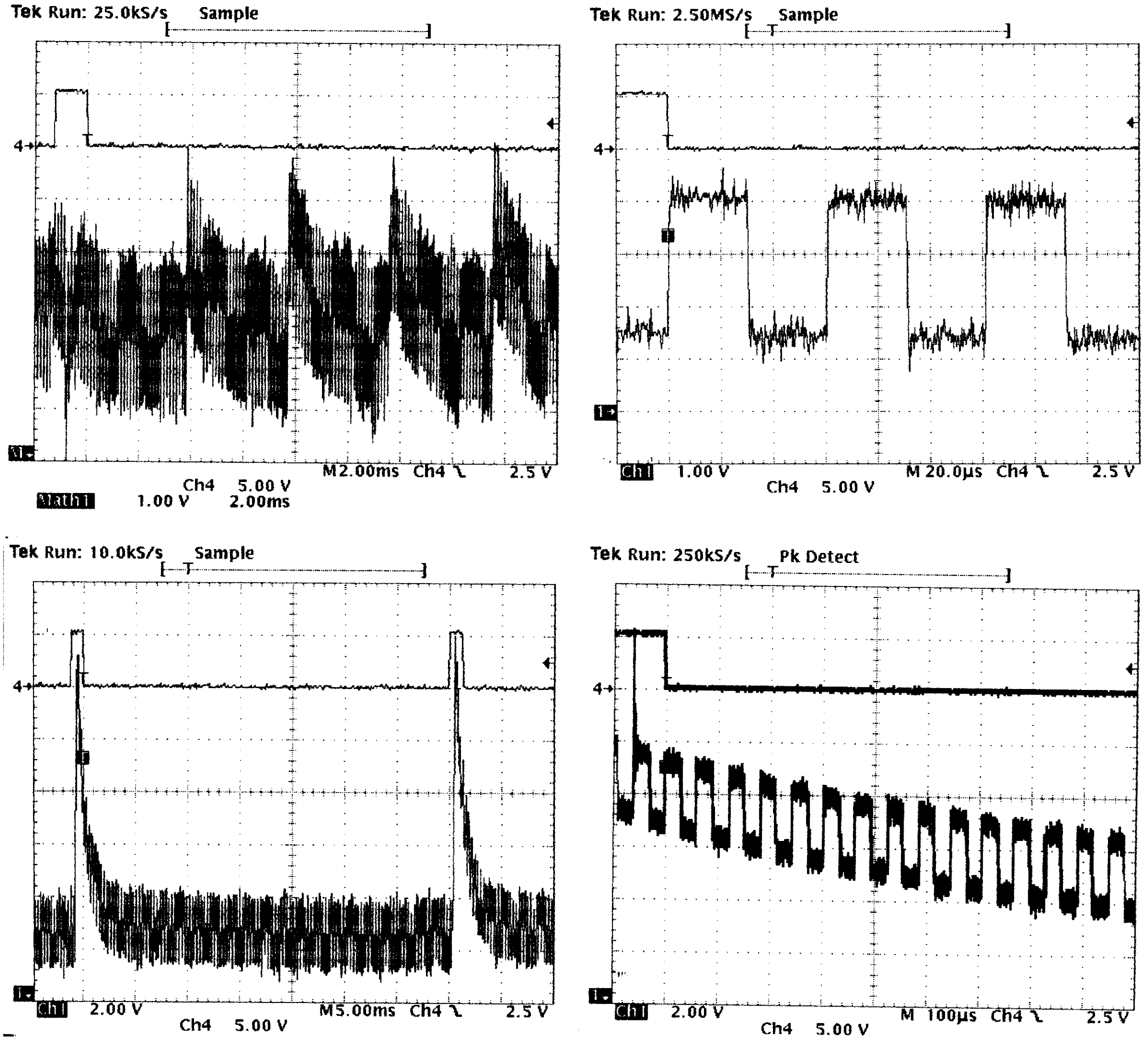


図 4.5: リセットをかけなかった場合の Diff-Amp 後の波形

上段が 64pixel 毎にリセットをかけた波形、下段が 1line リセットをかけなかった波形。どちらも左が 1line 分のオシロスコープの波形、右が拡大になっている。

第 5 章

多色蛍光 X 線測定システムによる CCD の応答測定

5.1 蛍光 X 線発生装置概要

これまでは ^{55}Fe を用いて性能評価を行なってきたが、様々な波長の X 線に対する CCD の応答を見るために、当研究室では多色蛍光 X 線測定システムを開発した。このシステムは X 線発生装置からの連続 X 線を 2 次ターゲットに当ててその蛍光 X 線を取り出すもので、現在 Al から Pb までの Kα, β ないし Lα, β, γ 線を見ることができる。

システムは図 5.1にあるように、多色蛍光 X 線発生部のチャンバー (以下 2 次 X 線発生チェンバー) と CCD 測定部のチャンバー (以下サンプルチェンバー) の 2 つよりなり、両者はバイパスでつながれている。 X 線発生装置 (参照: 表 5.1) は 2 次 X 線発生チェンバーに取り付けられており、そこより出た 1 次連続光は、 θ ステージ上のボックスに取り付けられた 2 次ターゲットに当たって蛍光 X 線を発生する。 θ ステージ上には 8 種類のボックスをおく事ができ、通常は Al, Cl, Ti, Fe, Ni, Zn, Se, Sn のターゲットが置かれている。 Al, Ti, Fe, Ni, Zn, Sn に関しては板を、 Cl は塩化ビニルのシートを貼ってある。 Se は粒状のものしか市販されていないため、塩化ビニルの土台の上に Se 粒を敷き詰め硬化剤で固定している。各種、蛍光 X 線のエネルギーは表 5.3にある。

発生した 2 次蛍光 X 線はバイパスを通じて CCD 測定部チャンバー内部におかれた CCD に照射され測定が行なわれる。 X 線スペクトルの評価には半導体検出器 (Solid State photon Detector、以下 SSD) を用いる。 CCD は X ステージ上にのっており、スペクトル評価時には横に動かして後方にある SSD で測定を行なう。 SSD は 2 次 X 線発生チェンバーにもついて常時 2 次蛍光 X 線を見ることができ、 CCD でデータ取得時の X 線モニターとして用いる。

SSD の信号処理系は、図 5.2のようになっている。 SSD より出た信号はプリアンプで増幅され、 NIM モジュールのシェイピングアンプで整形 (以下、図 5.3も参照の事)、 VME モジュール上の ADC でデジタル変換され、計算機に取り込まれる。 ADC はクリアパルス社製でサンプルホールドが可能であり 12bit の分解能を持つ。サンプルホールドは Gate Generator からのゲート信号 (今回は 100μsec に設定) の間行なわれ、 Single Channel Analyzer(SCA) から出される信号に合わせて AD 変換される。またデッドタイム軽減のため、 Single Channel Analyzer のパルスをスケーラーで数え、 X 線強度を測定する。

5.1.1 SSD のパイルアップ評価

SSD からの信号には、 2 つないしそれ以上のイベントからの波形が同時にのる場合があり、これをパイルアップという。測定側は 1 つの信号とみなす事から特に X 線が強い時にはその強度を過小評価してしまう。そこでランダムパルサーを用いて SSD からの信号をエミュレートし、ランダムパルサーが出した信号のカウント数 (Trigger count) とシステムが測定したカウント数 (Scaler count) との関係から、パイルアップの比率を測定した。

ランダムパルサーは Berkeley Nucleonics Corporation(BNC) 社製の Model DB-2 を用い、図 5.2中矢印の部分から後段回路に送られる疑似信号を数えて Scaler count とする。 Trigger count は、ランダムパルサーから別途出される 100ns の TTL パルスをスケーラーでモニターする事で数えあげた。

測定は以下の条件で行なった。

表 5.1: X 線発生装置の仕様

	規格	実測
機種名	X 線発生装置 K5039S(Kevex 社製)	
方式	電子ビーム励起型	
サイズ	72mmϕ×170mm	
重量	3.4kg	
印加電圧	5∼50kV	
ビーム電流	max 1.0mA	
1 次ターゲット	タングステン (W)	
窓膜	ベリリウム (Be)、厚み 0.13mm	
Flux Stability	0.2%	
ビームサイズ	25°	∼20°
X 線レンジ		2∼50keV

表 5.2: 半導体検出器の仕様及び性能

	規格	実測
機種名	SLP-04160-P-S(EG&G ORTEC 社製)	
Active Diameter	4.0mm	
Active Depth	3.49mm	
Detector-Window Distance	7mm	
Absorbing Layers	Be 8μm, Au ∼200$\AA$	
Counting rate	1000cts/s	
Energy resolution at 5.9keV	∼160eV	∼200eV('96)

表 5.3: 各種元素の K 殻吸収端と Kα,β 蛍光輝線エネルギー

	K-edge (keV)	Kα line (keV)	Kβ line (keV)
Al	1.560	1.486	
Si	1.840	1.739	
Cl	2.819	2.621	2.815
Ti	4.964	4.508	4.931
Mn	6.536	5.894	6.489
Fe	7.110	6.398	7.057
Ni	8.330	7.471	8.263
Cu	8.979	8.040	8.904
Zn	9.660	8.630	9.570
Se	12.652	11.207	12.494
Sn	19.190	25.191	28.467

文献は [15] を参照

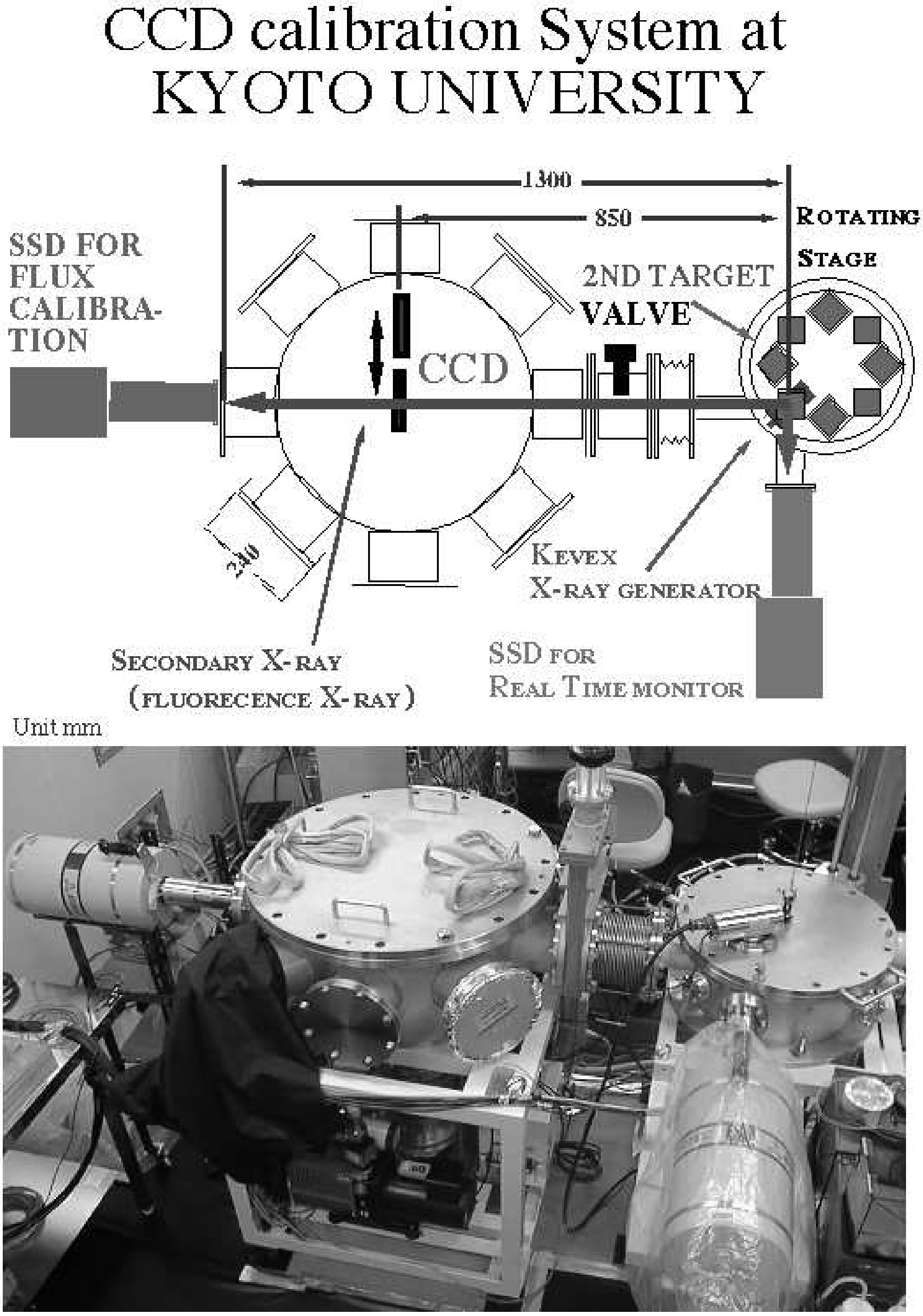


図 5.1: 多色蛍光 X 線測定システムの概略

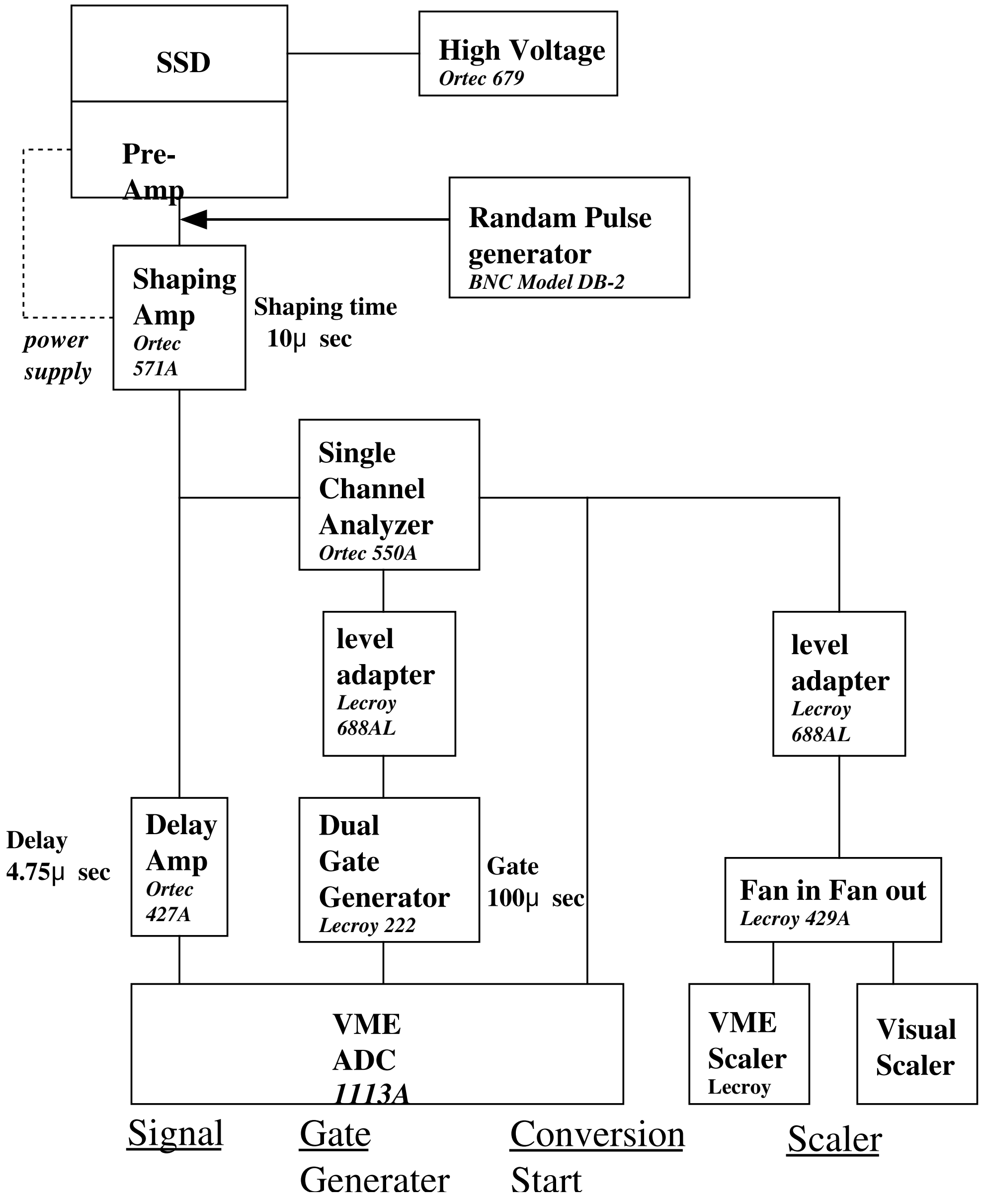


図 5.2: SSD からの信号のデータ取得ブロックダイアグラム

四角のブロックがそれぞれ検出器ないし NIM モジュールとなる (ADC のみ VME)。ブロック中の大文字がモジュールの名称、下の斜体は製品名である。

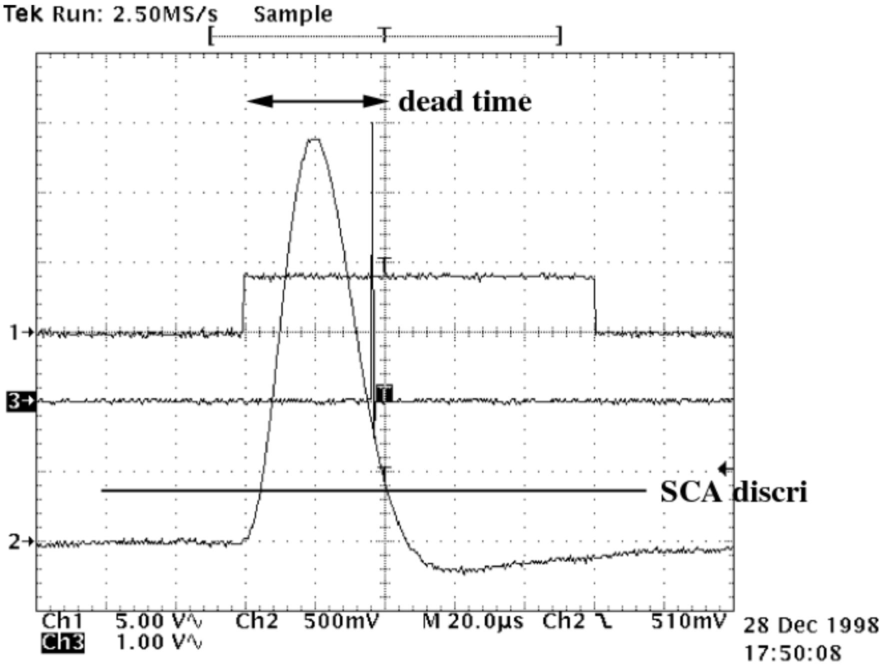


図 5.3: パイルアップ測定時の各波形
2 はシェーピングされ deray がかけられた後のデータ信号 (ブロックダイアグラム中 Signal 線)、1 がサンプルホールドされるゲート信号 (同 Gate 線)、3 が ADC に変換を指示するタイミング信号 (同 Conversion Start 線)。

カウントレート	50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 cts/s
RISE TIME	0.1μsec
FALL TIME	50μsec
Signal のピーク電圧	~2.9V(Zn とほぼ同じ)
SCA ディスクリ	~375mV

デッドタイムは同じ波高値の場合は一緒であるから T_d とすると近似的に、

$$Triggercount - Scalercount = Triggercount \times T_d \tag{5.1}$$

$$Triggercount = \frac{Scalercount}{1 - T_d \times Scalercount} \tag{5.2}$$

そこで、Scaler count と Trigger count のグラフ、ならびに上式の最小二乗法によるフィッティング結果が図 5.4である。グラフを見ると両者の相関は極めて良い事が分かる。デッドタイムの値は 42μsec、これは図 5.3においてデータ信号が立ち上がってから SCA ディスクリの電圧以下に下がるまでの時間幅、つまりオシロスコープから推測されるデッドタイムに一致している。この事から、~3600cts/s の強度まではオシロスコープでデッドタイムを測定すれば、実際来た X 線の光子数を求められる事が分かった。

5.2 蛍光 X 線発生装置からの X 線

CCD には 2 次ターゲットに当たって生じた蛍光輝線ばかりでなく、さまざまな過程によって混入した X 線が入射する。測定はできるだけ単色光が望ましいため、SSD を用いてその混入源を特定、除去し蛍光 X 線の純度増加を行なった。除去しきれなかった成分、特に Thomson 散乱成分についてはその寄与を評価した。

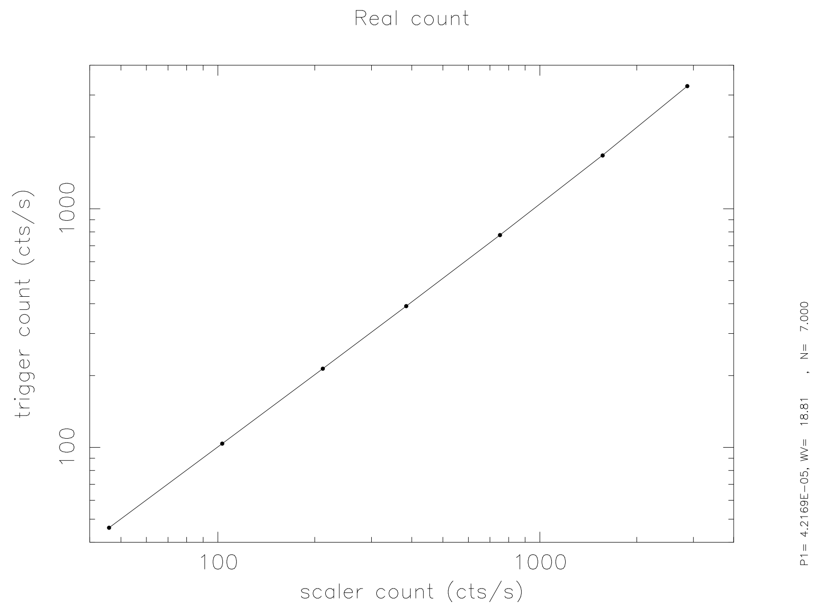


図 5.4: スケーラのカウント値と実際にランダムパルサーが出したパルス数
横軸は Scaler count、縦軸は Trigger count。

表 5.4: タングステンの蛍光 X 線のエネルギー

line		energy(keV)
L	α	8.396
	$\beta1$	9.671(50)
	$\beta2$	9.960(20)
	γ	11.284(10)
M		1.774

文献は [15] を参照、() は主放射線との対比強度

5.2.1 X 線発生装置からの 1 次 X 線

まず 2 次ターゲットにどのような X 線が当たっているか知るために、1 次 X 線のスペクトルを SSD で測定した。大気による吸収を避けるために X 線発生装置と SSD をサンプルチェンバーの両端のポートに配置し、チャンバーを真空に引いて測定した。1 次 X 線は非常に強度が大きくそのままでは SSD が簡単にパイルアップを起こしてしまうことから、SSD 前面に厚さ 1mm, 直径 0.5mmϕ の Ni のコリメータを取り付けて測定を行なった。

図 5.5に印加電圧 10kV と 20kV の結果を載せた。横軸はエネルギーを表しており蛍光 X 線のピークチャンネルより求めた。10kV のスペクトル中に見られるラインはタングステンの M 、連続成分は電子の制動輻射成分によるものである。低エネルギー側 4kV 付近で急激にスペクトルが落ち込んでいるが、これは X 線発生装置の Be 窓による吸収が主である。20kV に印加電圧を上げると、タングステンの L 殻の特性 X 線成分が見えてくる。7keV 付近の小さなラインはコリメータのニッケルが吸収再放出して見えているものである。

5.2.2 2 次ターゲットボックスの構成

ターゲットボックスは、サンプルチェンバーとリアルタイムモニター SSD の両者にできるだけバックグラウンド成分の少ない純度の高い X 線を供給する目的で製作された。ボックス上面の窓から入射した 1 次 X 線は中で斜めにおかれた 2 次ターゲットに当たり蛍光 X 線を放射するが、2 次ターゲットは斜め向きに設置され検出器からできるだけ

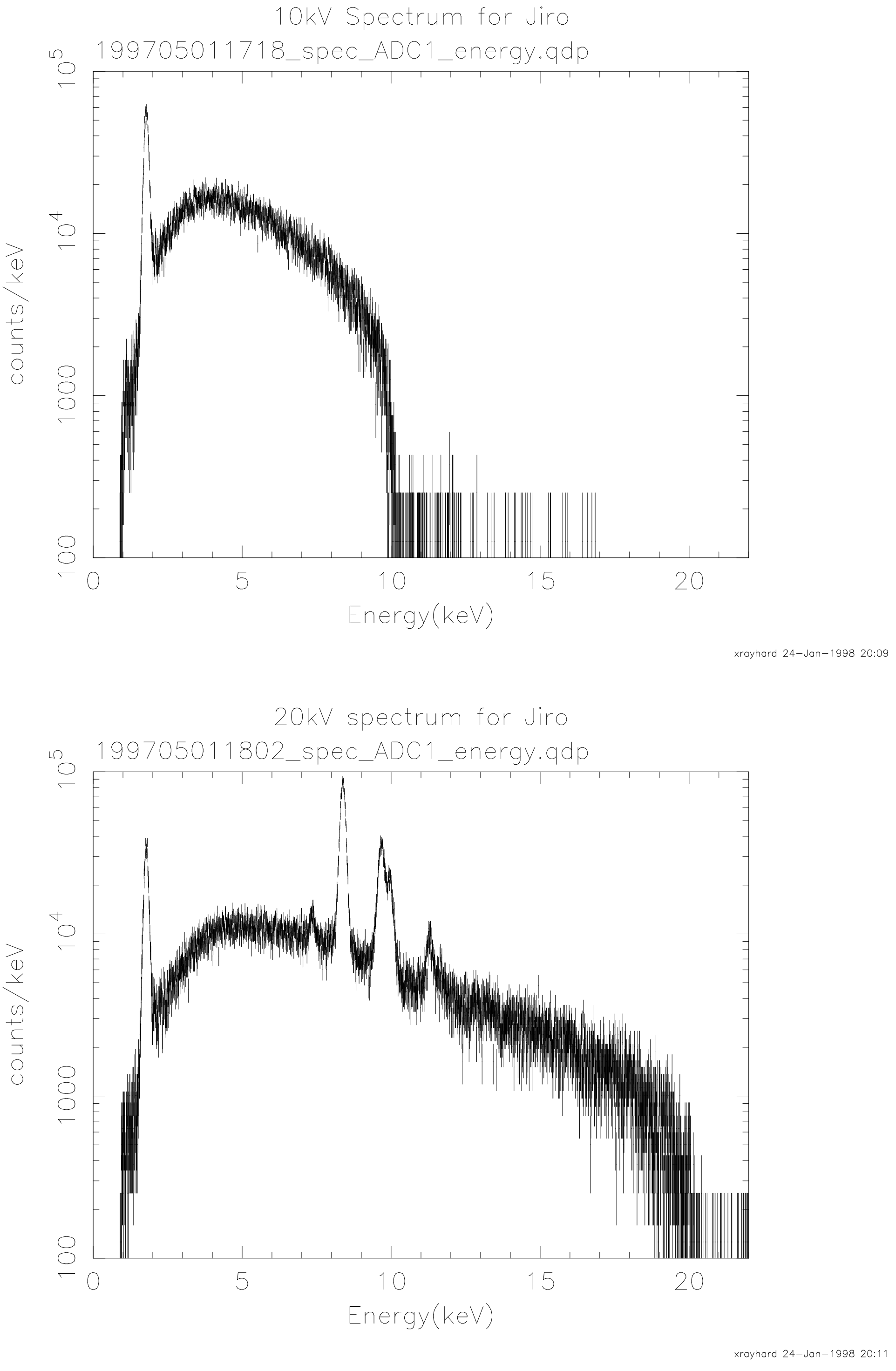


図 5.5: X 線発生装置からの 1 次 X 線

表 5.5: 各種材質の脱ガス量

	ガス放出率係数 K torr cm^3 s^{-1} cm^{-2}
ステンレス	$\leq 2.5\times 10^{-7}$
銅	$\leq 4.0\times 10^{-6}$
アルミ	$\leq 1.0\times 10^{-4}$
しんちゅう	$\leq 2.0\times 10^{-4}$

見やすい構成になっている。その上 X 線ジェネレータからのトムソン散乱成分が 2 つの検出器にとって最も少なくなるよう角度を調節した。ボックスの上面並びに横の 2 つの窓にはそれぞれコリメータないしフィルターが取り付けられる。今後、 X 線が 2 次ターゲットにあたる前に通過する上面窓を上流窓、あたった後に通過する窓を下流窓と呼ぶことにする。ターゲットボックスは通常 2 次 X 線発生チェンバー内に 7 つ配置されることから、チャンバー内の真空度に影響を与えないよう最も脱ガス量の低いステンレスをその材質に選んだ。代表的な金属の脱ガス量を表 5.5に合わせて記載する。

5.2.3 各種蛍光 2 次 X 線

例として、 2 次ターゲットに Al と Ti を用いた結果を、図 5.6に示す。いずれの測定も X 線発生装置の印加電圧を 20kV に設定してある。

Al のスペクトルを見ると 1.6keV 付近に Al K 輝線が見られるが、その右側にも多くのライン成分と連続成分があるのがわかる。うち連続成分は X 線発生装置からの 1 次 X 線が 2 次ターゲット上でトムソン散乱された成分でタングステンの特性 X 線も見えている。残りのラインは途中で蛍光吸収された成分で、 Fe Kα、 Kβ 等が見えている。

一方、 Ti のスペクトルを見ると、 Ti Kα(4.5keV), Kβ(4.9keV) がはっきり分離される。 Ti は、 Si の吸収端を越えていることから Ti Kα のエスケープピークが 2.8keV 付近に見られる。 5~10keV 付近までは Ti Kα、 Kβ 成分のパイルアップ成分である。それより高いエネルギーでだらだらと伸びているのはトムソン散乱成分である。 Al との最も大きな違いはトムソン散乱成分が非常に弱くなっていることである。これは、 2 次ターゲット上での吸収断面積と散乱断面積を比較すると、トムソン散乱は 1 次近似で電子数に比例することから原子番号 Z の依存性を示すのに対し、吸収断面積は Z^5 に比例する事から原子番号が大きくなると Z^4 の比率で蛍光吸収率が増大するためである。 Al(Z=13) と Ti(Z=22) との蛍光収率に対するトムソン散乱の比は 8.2 (=1.69^4) となる[1]。また、 Al のトムソン散乱成分が低エネルギー側で落ちているのは吸収断面積が低エネルギー側で卓越するためである。 Al の吸収係数のグラフを、図 5.7に載せる。

5.2.4 蛍光 X 線純度増加策

Zn の蛍光 X 線はエネルギーが高い事から周囲にある物質を叩いてその蛍光輝線を発するため不要成分を特定しやすい。そこで Zn を純度増加の叩き台とした。

不純 X 線の混入源の特定

ターゲットの材質にはニラコ社の Zn 板を用い、最初に 2 次ターゲット Zn で純度 99.99% の測定を行なった。ニラコ社には Zn の中に含まれる不純物のデータがないことから、 GoodFellow 社の同程度の純度のデータを参考資料として表 5.6にのせる。共通の測定条件は以下の通りである。

A. 何も対策を施していない初期状態

図 5.8、データ A のスペクトルを見ると、 Zn の Kα, Kβ の成分がそれぞれ 8.63keV, 9.57keV に見えている。6.9keV 付近に Zn Kα のエスケープが存在するが、その両側に多くのライン成分が見える。 Kβ より高エネル

---

[1] この図の場合、 Al の蛍光輝線に対してのトムソン散乱成分が Ti のそれの 8 倍 よりも大きいのは Al のラインが検出器の不感層で 60% ほど吸収されてしまっているせいである

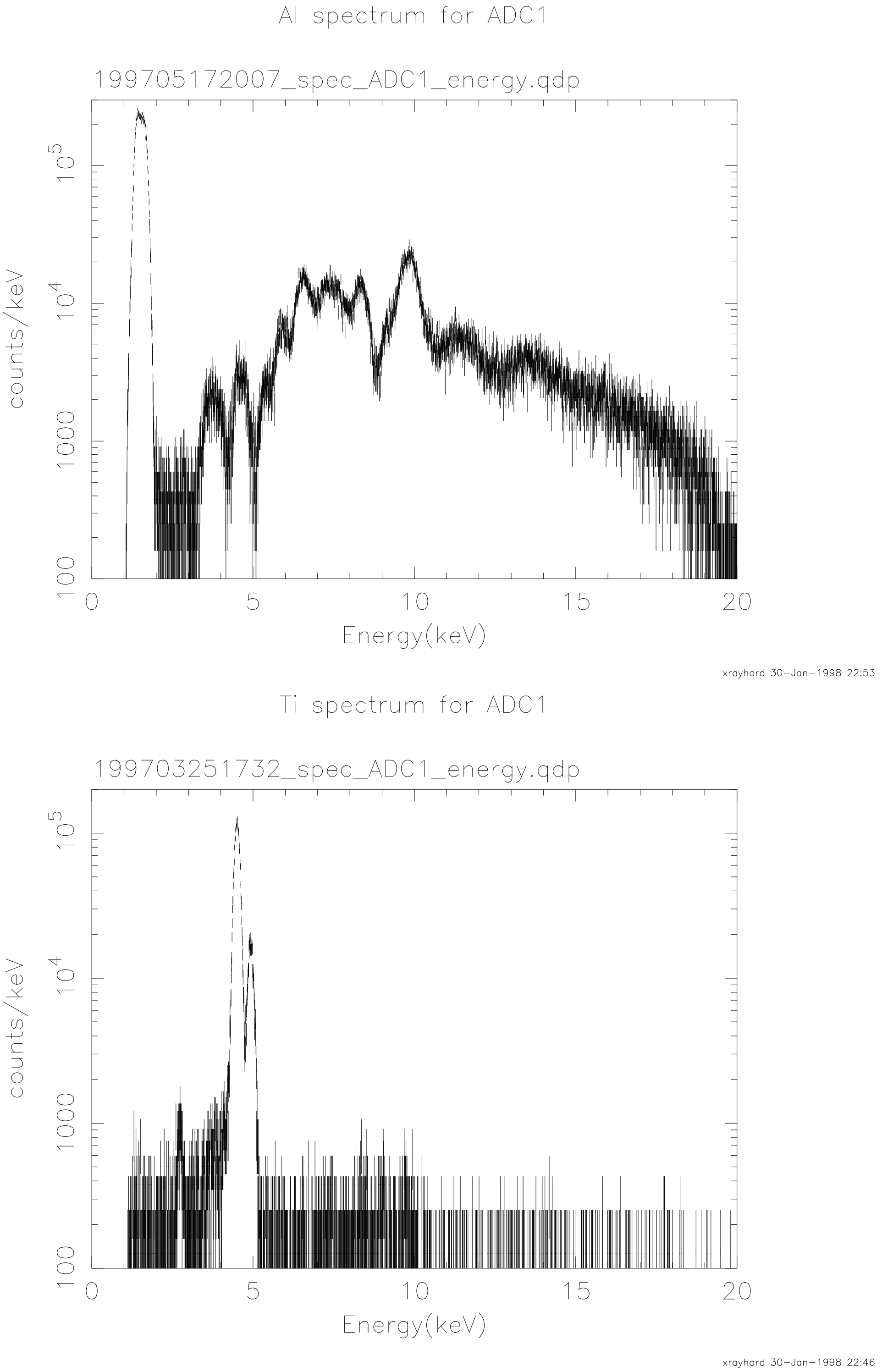


図 5.6: SSD で測定した Al(上) と Ti(下) のスペクトル

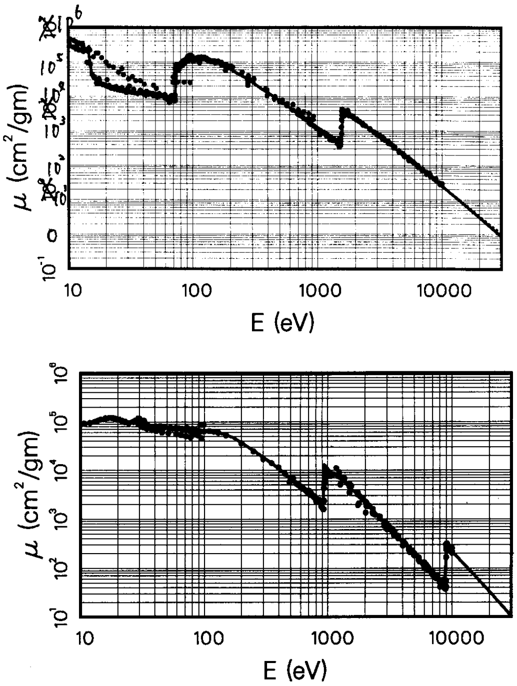


図 5.7: 吸収係数のエネルギー依存性の例
文献 [19] より抜粋。上が Al の吸収係数、下が Cu の吸収係数に当たる。

表 5.6: Zn 2 次ターゲットに含まれる不純物の例

純度 (%)	Ag	Bi	Ca	Cd	Cu	Fe	Mg	Pb	Si	Sn	参照製品
99.99+	15	⟨1	2	5	10	5	⟨1	10	3	5	ZN000315(Foil)
99.999	⟨1	—-	—	⟨1	⟨1	⟨1	⟨1	1	⟨1	—	ZN007915(Rod)

データは GoodFellow 社製品の物。

表 5.7: 純度増加実験共通の設定

X 線ジェネレータ	20.0kV
X 線強度	SSD で大体 200cts/s になるように調整
露出時間	1000sec
ターゲットボックス	ステンレス製

ギー側にも連続成分が見られ、Kα, β のパイルアップ成分が大半であると思われるが、1 次ターゲットからのトムソン散乱成分の可能性もある。これらの成分を特定し取り除くのが今回の目標である。

最初にこれらのラインのエネルギーを特定して元素を同定した。結果はこの後の実験結果と合わせて表 5.2.4にまとめてある。なお以下の実験に共通した設定は表 5.7に、個々の設定は表 5.8にあるので合わせて参照して欲しい。表 5.2.4を見ると Zn の Kα のエスケープをはさむ形で Cr(line ID: c), Fe(d), Ni(f) の Kα ラインが存在する。これらはステンレスの主成分にあたり、SSD がチャンバー側壁のステンレスで蛍光再放出された X 線を見ている可能性が高い。そこで SSD 前面に 4mmϕ のコリメータを置き、チャンバー内を見ないようにした。

B. SSD 前面にコリメータを取り付けチャンバー壁からの蛍光 X 線を防ぐ

データ A に SSD 前面コリメータをつけたのが data B である。A のスペクトルにはエスケープの両側に Cr,Fe のラインがはっきりと見られたが、B には見られない。Fe Kα のピーク値で比較して半分以下に減少している。これより、Cr, Fe のラインの大半はチャンバー側壁からの成分を見ていたことが分かった。

C. さらに Zn のフィルターを下流に取り付ける

DataB 低エネルギー側には line a, b が残っている。a. は Na Kα,Cu Kβ が対応するが、Na はパス中の材質にはなく、Cu Lα は 2 次ターゲット中混入しているが、Cu Kα に対してこれほど強いとは思われない。b. に到っては妥当な成分すら見つからない。

物質中の X 線の吸収係数は図 5.7のように E^{-3} という依存性を持ち、さらに吸収量は指数の肩にかかることから、適当な厚みの物質を途中においてやれば低エネルギー側の X 線を効果的に除去する事ができる。そこで、ターゲットボックス下流窓に Zn のフィルターをいれた結果が、data C である。line a, b が完全になくなっているのがわかる。line a は 2 次ターゲットから出ている可能性が最も高く、おそらく手で触った時に人体から付着した Na であると思われる。

D. 2 次ターゲット Zn の純度を上げる

Zn Kα のソフト側テール中のラインが消えずに残っている。これは Cu Kα と同定されたが Zn Kα から CCD の応答関数を見積もる際に問題になる可能性が高い。表 5.6 を見ると Cu は 2 次ターゲット中に多く含まれていることから、純度を 99.9998 % まで上げてライン成分が減るか確かめた。その結果がデータ D である。図ではわかりにくいがライン成分は確認できなくなった。

E. Cu のフィルターを下流に取り付ける

一方、Cu の K 吸収端は Zn の Kα と Kβ の間にあり (図 5.7参照)、エッジにおいて吸収係数は 10 倍近く上がることから、適当な厚みの Cu のフィルターを下流フィルターの後に置けば、Zn Kβ を選択的に吸収できる (data E)。フィルターをかけない場合に比べて 1/100 程度まで落ちているのがわかる。

スペクトル中の Zn 蛍光 X 線成分 (data F)

2 次ターゲットの純度を上げ、下流側に Zn フィルターを入れることで不純ラインを大幅に落せたので、統計を上げて個々の成分を見積もった。なお、現在の強度は CCD に当てた時に強過ぎることから 6.2mmϕ のコリメータを上流側に入れて X 線強度を下げた。そのため、X 線発生装置の最大強度であるビーム電流 1.0mA で測定したものの、SSD 上での X 線強度は ~70cts/s に落ちている。今回、14,400sec(4 時間) 測定することで 10^7cts のイベントを集めた。設定の条件は 表 5.8の F 、測定したスペクトルは図 5.9に、個々の成分のフィッティング結果は表?? にある。

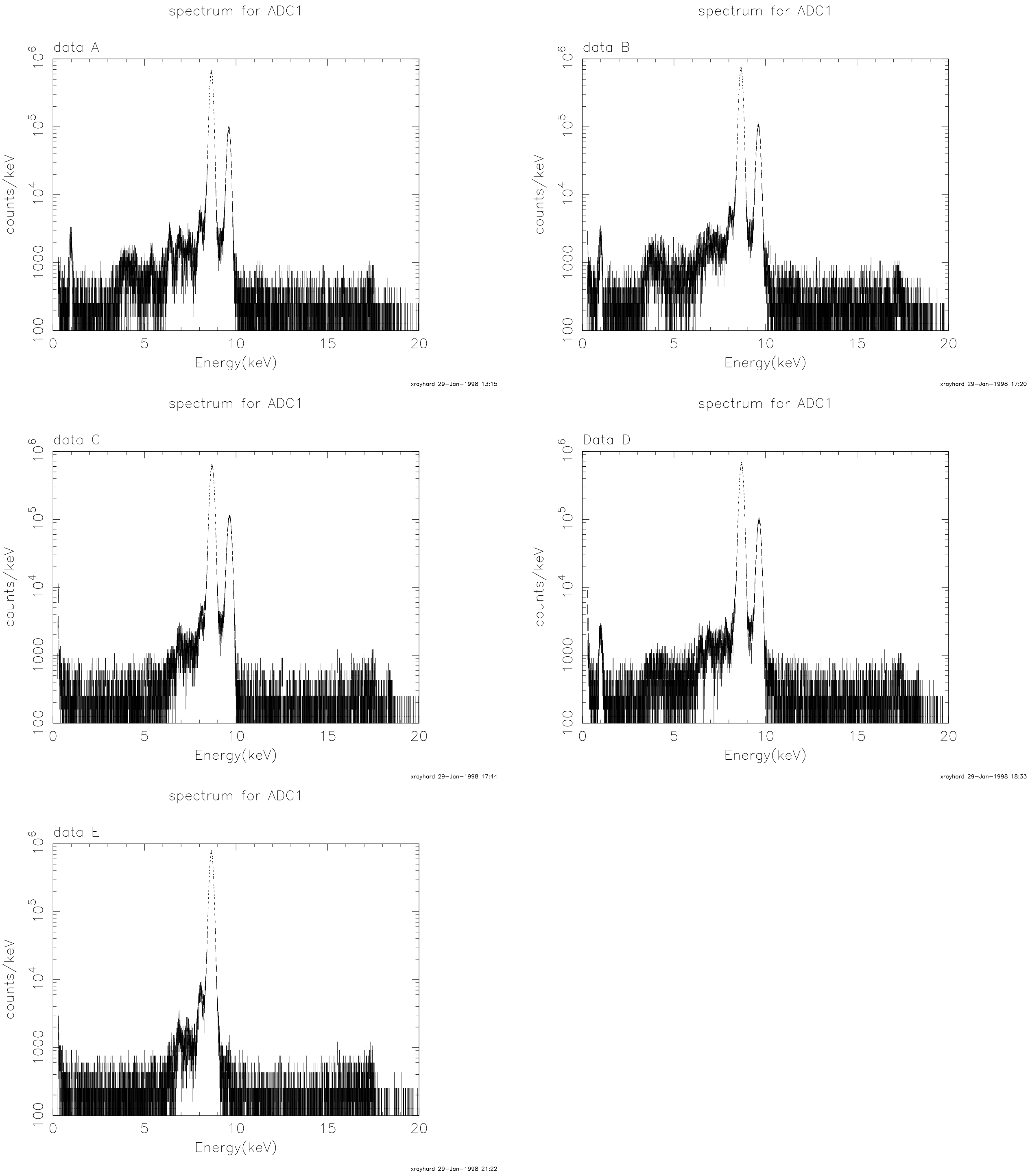


図 5.8: Zn スペクトルの純度増加への試み

左上、右上、左中…の順番で、データ A,B,C と続く。

表 5.8: 純度増加実験個別の設定

data ID	2 次 Target	上流コリメータ	下流フィルター	SSD 前面コリメータ
A	Zn(99.99%)	なし	なし	なし
B	Zn(99.99%)	なし	なし	あり
C	Zn(99.99%)	なし	Zn(厚み)	あり
D	Zn(99.9998%)	なし	なし	あり
E	Zn(99.99%)	なし	Cu(厚み)	あり
F	Zn(99.9998%)	6.2mmϕ	Zn	あり

表 5.8より確認できる不要なライン成分は 4 本しか存在しない。内、 Fe,Cr,Ni は Zn Kα に対して 0.3% 以下の強度にまで減少した。残り問題なのは連続成分が何者かという事である。スペクトルを見ると 3 種類の連続成分が存在する。

1. Zn Kα 輝線から 5keV 付近まで伸びるテール成分
2. 1. に続いて 1keV 付近まで伸びるフラット成分
3. 10〜20keV まで広がるフラット + 丘成分

一方、 SSD を含む半導体検出器に単色の X 線が入射したとき、次のような過程がガウスピークにテーリングを作り出すとされている [15]。

検出器内部での不完全な電荷収集によるもの 検出器に使用される結晶素材に格子欠陥や種々の不純物準位が存在した場合に、検出器内で生成された電子・正孔対がトラップを起こし信号に寄与しない部分が生じるもの。低エネルギー側へテーリングを作る結果となる。

真性領域表面付近の内部電界の変化によるもの SSD は PN 接合に逆バイアスを加えることによって見かけの真性領域を作り出しそこで光を感じるが、その表面にイオンなどの電荷が付着し、その極性によって n 型または p 型の表面チャンネルが形成されることで生じるもの。チャンネルが形成されると、検出器表面付近の内部電界が湾曲し、その電界上で発生した電荷のうち電子または正孔のいずれかは真性領域上のチャネルに到達する。チャネル上に達した電荷は電極に向かって移動するが途中でトラップされることが多く、その程度によって電荷の収集に相違が生じる。ピークの低エネルギー側にテールとして寄与するもの、更に低エネルギー領域にバックグラウンドとして寄与するものにわかれる。

検出器入射窓近傍での入射 X 線の吸収の際に起こるもの 入射 X 線が光電吸収されると多数の電子・正孔対が生成されるが、これらの電荷は発生直後プラズマ状態を形成し、この中から高密度の “warm electron” が収集電界の影響を受けずに拡散して広がっていく。光電吸収が入射面近くで発生するなどその平均自由距離が入射電極までの距離に比べて大きい場合、これらの電子群のうちの一部は入射電極に達して信号に寄与しなくなり、ピークの低エネルギー側にテール及びバックグラウンドを形成する。入射 X 線のエネルギーが高くなると電荷の発生する電極からの距離が電荷の広がる平均自由距離に比べて大きくなるため、電子が入射電極に到達する確率は小さくなり、テールも小さくなる

1.,2. の成分は上の過程で生じた Kα 線の疑似イベントである可能性がある。一方、 3. の成分は K α 線、 Kβ 線のパイルアップ成分であると思われる。従ってこれら 3 成分はすべて Zn の蛍光輝線を起源としている可能性がある。この事を確かめるべく ^{55}Fe 線源を SSD にあてて応答を測定した。 ^{55}Fe は Mn Kα, β 成分のみであるから、疑似イベントでなければこのような構造は見えないはずである。

パイルアップ成分は線源強度によって変化することから、 Zn のカウントレートと同じ 70cts/s にそろえ、同じ 14,400sec 測定した。ただし、これまで測定してきたサンプルチェンバー側の SSD は前面にコリメータが取り付け

表 5.9 純度増加対策中に取得したスペクトルの各種 X 線成分

				A			B			C			D			E		
line ID	Center Channel (ADU) †	Center Energy (keV)	同定 line	Gauss Width (ADU)	Gauss Norm (count)	line count (count)	Gauss Width (ADU)	Gauss Norm (count)	line count (count)	Gauss Width (ADU)	Gauss Norm (count)	line count (count)	Gauss Width (ADU)	Gauss Norm (count)	line count (count)	Gauss Width (ADU)	Gauss Norm (count)	line count (count)
a	214.5	0.98	NaKα? CuL?	7.32	16.8	309 (2.28E-3)	8.79	16.6	366 (2.06E-3)				9.30	17.5	408 (2.56E-3)			
b	550-680	3.65 -4.68	??		$\sim$ 8			$\sim$ 10						$\sim$ 5				
c	$\sim$ 760	5.31	CrKα		$\sim$ 10			$\sim$ 6										
d	895.5	6.39	FeKα	10.4	20.8	545 (4.03E-3)		$\sim$ 10 †6		23.8	5.03	301 (1.97E-3)		$\sim$ 10			$\sim$ 4	
e	966.4	6.95	ZnKα escape	28.6	13.9	997 (7.36E-3)		$\sim$ 15 †6		34.2	11.6	995 (6.50E-3)	23.6	13.7	810 (5.09E-3)	19.0	11.6	552 (3.24E-3)
f	$\sim$ 1020	7.38	NiKα		several											37.8	9.41	892 (5.23E-3)
g	1064.9															12.9	8.37	271 (1.59E-3)
h	1078.5	7.84	blade??										20.8	14.3	743 (4.67E-3)			
i	1105.5	8.06	CuKα	15.3	35.1	1346 (9.94E-3)	16.5	41.6	1726 (1.05E-2)	18.5	29.8	1386 (9.05E-3)				14.4	54.6	1971 (1.16E-2)
j	1180.8	8.65	ZnKα	10.8	5018.8	135329 (1.00)	11.7	5564.6	162919 (1.00)	12.5	4870	153068 (1.00)	12.4	5100.5	159105 (1.00)	11.8	5758.3	170460 (1.00)
k	1300.7	9.61	ZnKβ	11.3	742.8	21034 (0.155)	12.1	830.0	25218 (0.155)	12.9	885.4	28564 (0.187)	12.6	777.6	24593 (0.155)		$\sim$ 8	
l	$\sim$ 1700							$\sim$ 6										
m	$\sim$ 2360						30.8	3.0	233 (1.43E-3)									

Gauss Width, Gauss Norm は qdp で fitting して求めた。 Gauss Width は $\Delta\chi^2$=2.7 の値、 Gauss Norm は Gaussian の peak count に対応する。
Gaussian の積分値、 $Gausscount = \sqrt{2\pi} \times GaussWidth \times GaussNorm$

line count の欄の () 内の数値は Zn Kα のカウントを 1.0 とした時の比率。

† channel 値は、 A で測定した値を載せてある。但し、 A に出てこなかった g,h はそれぞれ、 g:D、 h:E の値を採用。

表 5.9: 純度増加対策中に取得したスペクトルの各種 X 線成分

表 貴 純度増加対策後のスペクトル の各種 線成分

蹣釈 苗	着 宙瘤	着 梼纈苹 縉	同定 蹣釈	煤 快	煤 麗鴉	蹣釈 竢
	架	貴街	鋳	鰻	姥	鹸 L嬰
	弘	峡感	緞	厩	幹	憶蔚 ┣鞆
	控	峡弦	晧 纉	鰻	彊	俺傾 T嚇
	碓屋	勲蓋	礼		完	
	臼鍵	軒橋	晧	臼	外姐	顕晃碍 L
	嘘旭	庚怯	晧	臼	鬼薫	欝恭臆 ┛幻芥

煤 皷瘤 の積分値、煤 粡阨銓
内の数値は 晧 のカウントを 窺 した時の比率。

られており、 亀 を当てることができないことから 次 線発生チェンバーに取り付けられた 嗽 で測定を行なった。その結果が図 貴碓である 。晧 の場合と同じようなテール成分が存在することから、 窺 の成分は電荷未収集の結果といってよいであろう。 荻 の成分を見ると 亀 の方が逆に盛り上がる傾向を示している。 の成分はパイルアップと考えて間違いないであろう。

連続成分が 晧 起源である事から、これらの成分を足し合わせたところ 嗽 の全カウント数の 晃 であった。測定にはこれだけの純度があれば十分であると思われる。

各種 癇 の純度増加

晧 の結果を他のターゲットに対しても適応した。ターゲット製作ないし 線照射の設定の基本的なコンセプトは以下の通りである。

次ターゲットの純度を最大限あげる 次 線は吸収端直後の 線を最も効率良く吸収再放出する。 壽闕 散乱成分はエネルギー依存性がない事から、ターゲットを厚くするほど蛍光輝線に対する散乱成分を増やす結果となる。そこで、 次ターゲットの光学的厚みを吸収端で に設定した。

次ターゲットと同じ元素のフィルターを置く 前の節で述べたようにフィルターを厚くする程、低エネルギー 線の

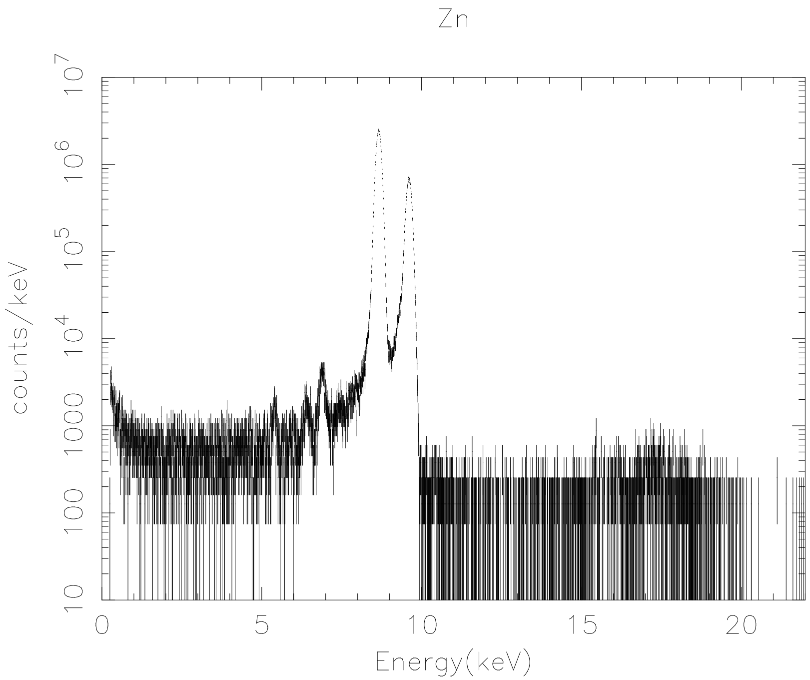
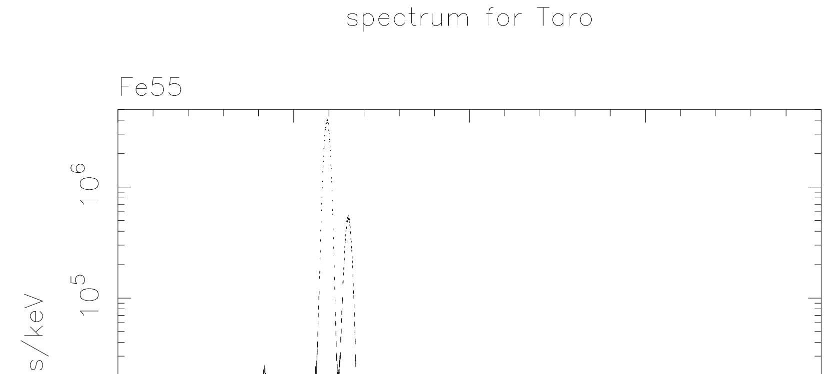


図 貴杭 純度増加対策を施した後の最も統計の良い 暗 スペクトル



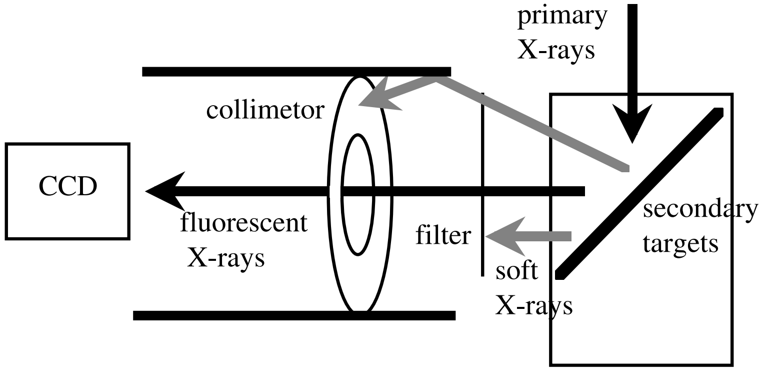


図 貴 ターゲットボックスと検出器の位置関係

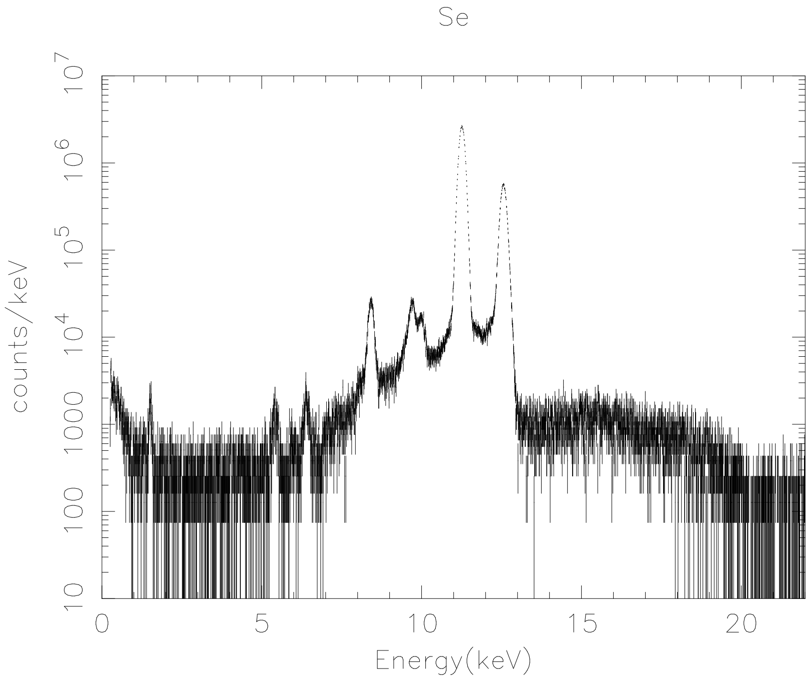
貴　壽闕 散乱成分の見積り

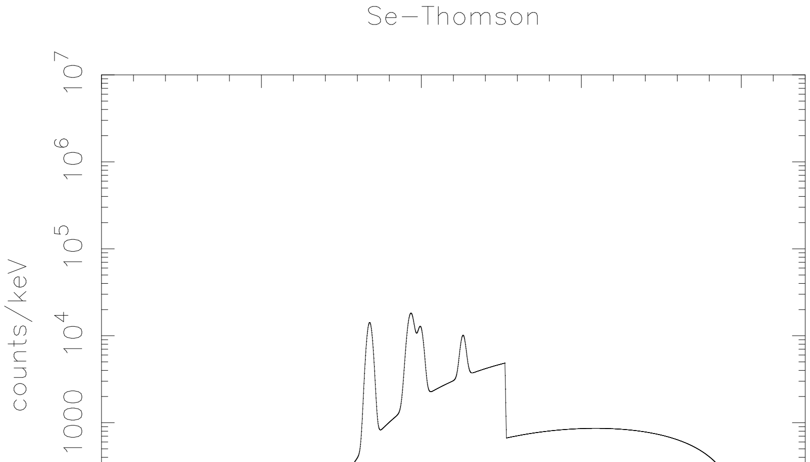
上記のような対策を講じても 壽闕 散乱 線を完全に消すことは難しい。これらの成分は 次 線のテールないしフラット成分に混入して応答関数の見積りを誤る元となる。取得した蛍光 線スペクトルには、 次 線の特性 線ないし連続 線の一部と思われる成分が見える事があり、これらで規格化する事で 壽闕 散乱成分を推測する事が可能である。今回、特に 嚆 のスペクトルにおいて、タングステン N 線、並びに高エネルギー側の連続成分が見られた。そこで、 次 線のスペクトルに 次ターゲットでの吸収、フィルターでの吸収 図貴臼を参照 を加えることにより 嗷で測定されるであろう 壽闕 散乱のスペクトルをモデル化し、現実と比較検証する。モデルが妥当であると確認されれば、他の蛍光 線に対しても同様のモデル化を行ない寄与 規格化すべき成分が見られない場合は上限値 を評価する。

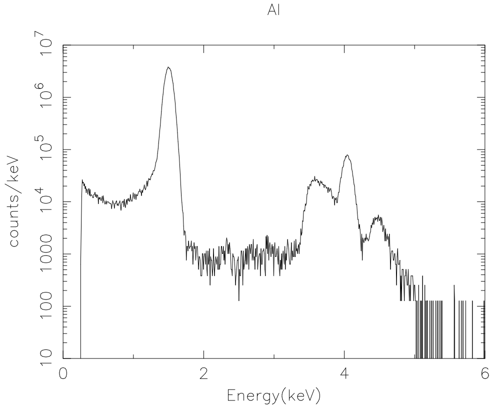
壽闕 散乱のスペクトル

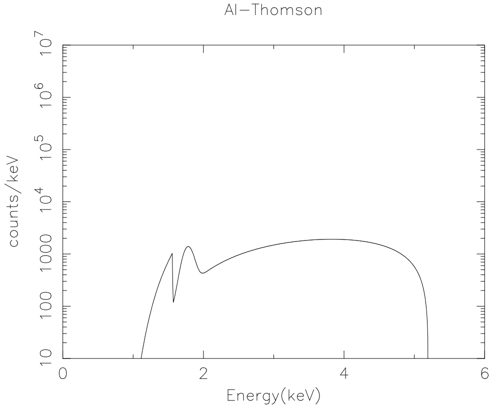
貴節で取得した 次 線スペクトルを、単一制動放射に吸収をかけいくつかガウス関数を加えたモデルでフィットした。ただし、スペクトルはゲインの補正のみで 嗷のレスポンスは考慮にいれていないため、 検定でフィッティングの妥当性を評価することはできない。しかし、モデルとデータのずれをほぼ 屢以内で再現する事ができた。 嗷の検出効率は、高エネルギー側は 鑸 付近までほぼ 確哀、低エネルギー側の検出部前面での吸収は 線発生装置の 代 窓による吸収に比べてはるかに小さい事からこのフィッティング結果を 次 線のスペクトルとする。 次ターゲット中での散乱が 回で、ターゲットの光学的厚さが十分厚いと仮定すると 丑 質量吸収係数 の依存性がある 朶 嚆 は十分厚いことから、この散乱ならびにフィルター透過の吸収をかけあわせて、蛍光 線に混じって測定される 次 線 の 壽闕 散乱成分のスペクトルを算出した。

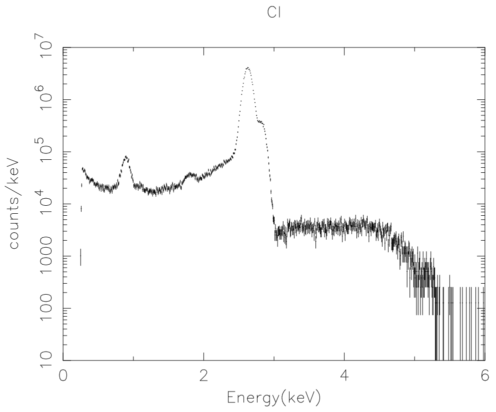
壽闕 散乱にはエネルギー依存性はないが偏光に対する依存性がある。 線発生装置は偏光度が 線のエネルギーで異なる事からモデルにこの効果をかけなくてはならないかもしれない。 椛よると、当研究室で用いている 線発生装置は最高エネルギーで偏光度 [illegible]、最高エネルギーの [illegible]以下では偏光度 [illegible]以下と算出した。つま

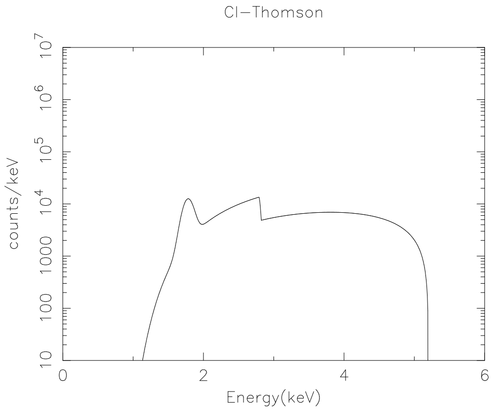

Se
10^7
10^6
10^5
10^4
1000
100
10
counts/keV
0
5
10
15
20
Energy(keV)

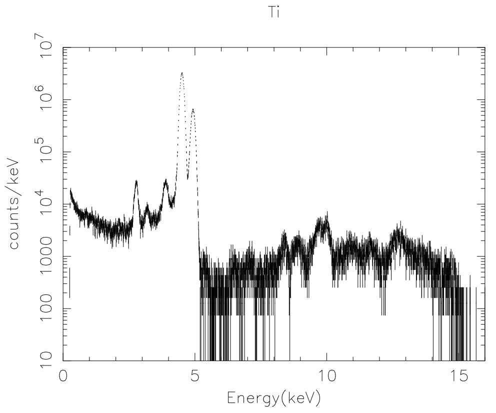

Se−Thomson
10^7
10^6
10^5
10^4
1000
counts/keV

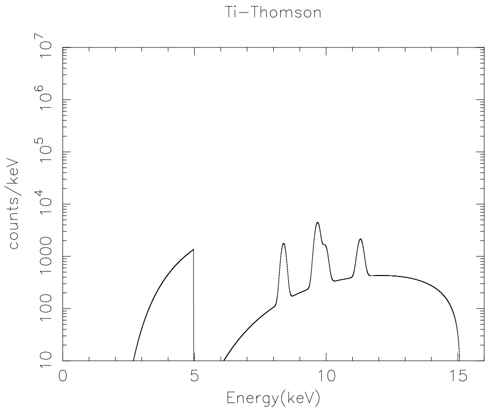

Al


Al–Thomson


Cl


Cl–Thomson


Ti


Ti–Thomson

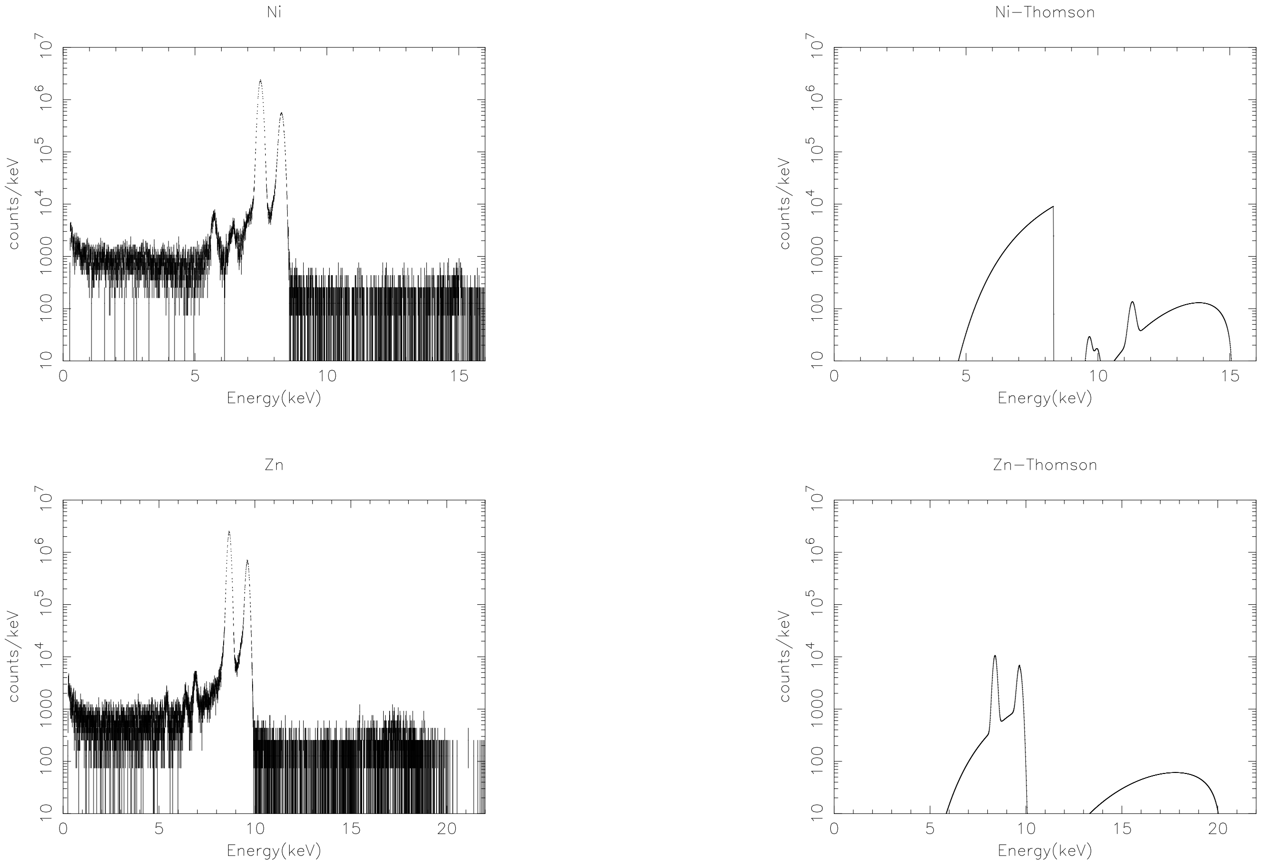


図 貴 礼、 晧 のスペクトルとトムソン散乱モデル

表 貴 ダークフレームデータのノイズレベル

籬□	範　瘴 □　□
亀	窺宜　窺郡
糟	窺宜　窺卦
夊	窺唄　窺群
晧	萩圧　窺□

それぞれのデータを取得した直後のノイズレベルをかいてある。

貴 鍛による 糟晧 の蛍光 線の測定

蛍光 線発生装置で 鍛に 線を当ててみた。 鍛の種類は 章の後半で用いた 留貝境義偉□ 亀 と蛍光 線 糟晧 の 種類の元素を用いた。実験の設定は以下の通り。

測定温度	□　以下
取得データ	屋 胙
ダークフレーム	イベントデータ取得後に 恰鰊辣 取得
露出時間	欝峡鰯繝
読み出し時間	屋□ 彊黼祚韈　讒
読み出し方法	相関 重サンプリング
読み出しモード	独自のノーマルモード
測定電圧	晧　屋誦　握
	夊　碓誦　握葦
	糟　碁　握芦軈

この実験のために個々の機器を移動させたため、ゲインは以前と違う値になっている。また、システムの都合上、プリアンプは外づけになっている。ダークフレームのデータは 鍛が載っている ステージを移動させ、 線のあたらない場所においてデータを取得した。それから、 範領域と 瘴 領域のスペクトルを作りそれをガウシアンでフィット 表 貴芥 してその 皷 をノイズとした。

ノイズは 窺患　後述、プリアンプが外付けであったことを考えると読み出しノイズも悪い値とはいえない。 晧 のデータが特にノイズが大きくなっているが原因は不明である。

貴　ダークカレントの評価

一般にダークカレントにはピクセルの個性があるのでゼロレベルを単純に差し引きするよりも、 線を当てていないイメージを引いた方が良い場合がある。しかし、ダークレベルが低く個性が見えにくい場合は 2 つのイメージの

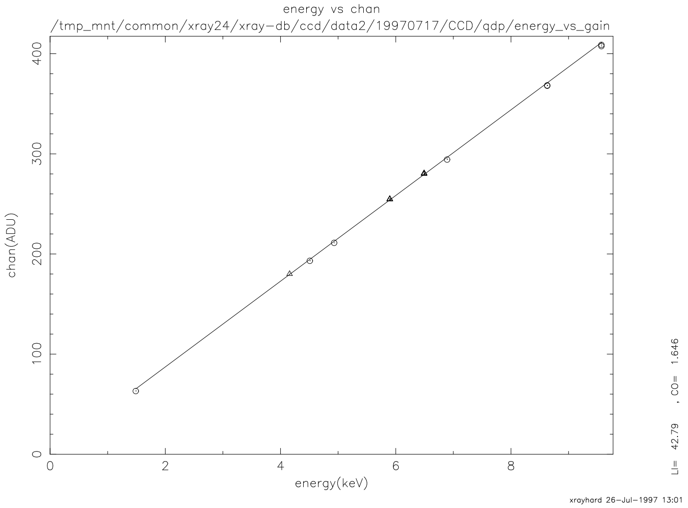


図 貴 絣纈苹 関係

の領域 計 乙旭旭 ピクセルを調べた。

ゲイン

横軸に 線エネルギー縦軸にピークの 菴銕繻 をとったグラフが図 貴欝である。これを直線でフィットすると

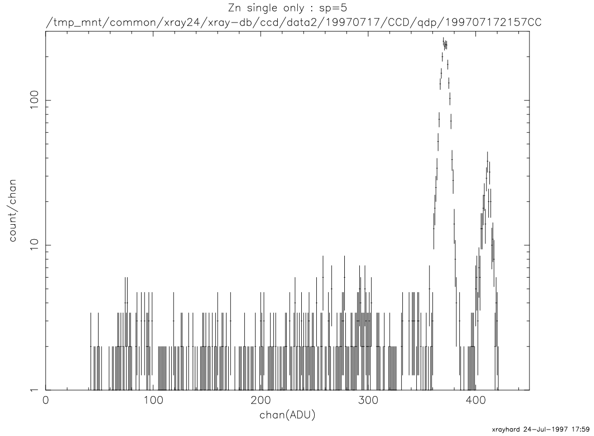
菴寛傾 絣纈苹 繝轌郡 ┸芥

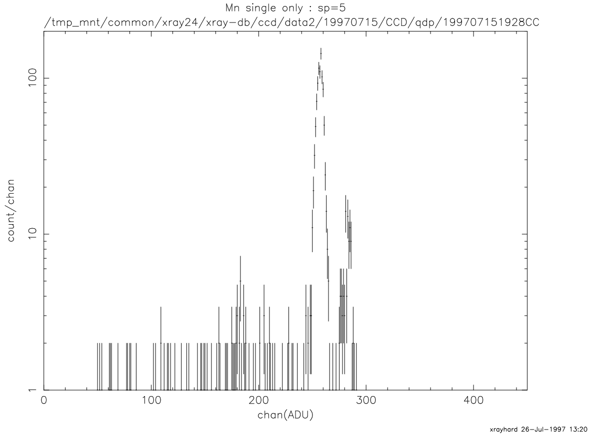
であった。

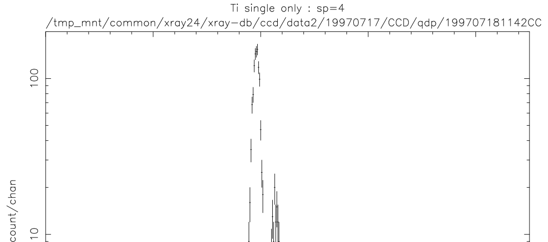
エネルギー分解能

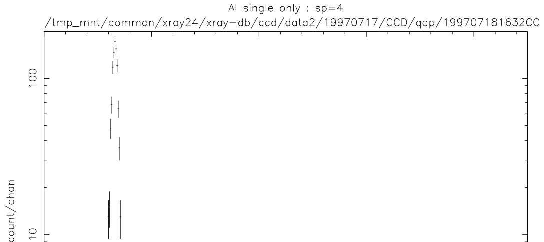
表 貴 鋤のエネルギー分解能

績纐苹 繙	分解能 □蜴 繙	竢 粤 鱚芍闔┃	鈿蜩紲祖姨	齔跚 袓姨
窺憾隈	渦	渦沖	嘘 □	
堪虋隈	虋	唄広	嘘 □	
貴弦協	虋	虋	臼 □	
庚儀姶	厩	姥鍬	嘘 □	









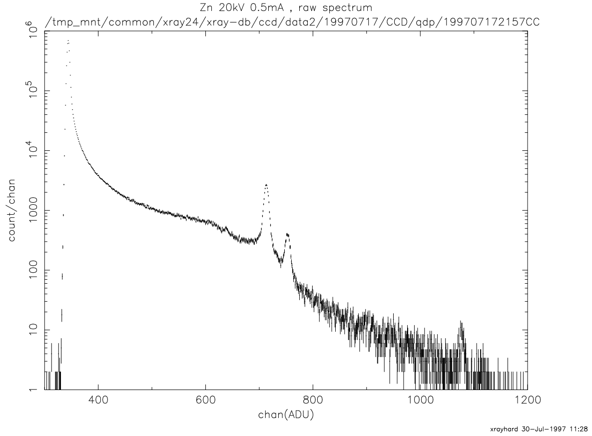


図 貴 晧 握 の 鏵スペクトル

表 貴 検出したイベント数

籬 □	皷鈑跂	苒痳綏 以外	苒	フラックスモードで測定
繇鈿鴉瘡	騎恩	姥	恩	飢
晧 屋誦 握	爵	袈	厩慌外	憶牡訓
夂 碓誦 握葦	恩	嘘斡葦	憶乙涯	俺抗軍
糟 碁握芦軈	臆	憾	輝	憾

検出したイベント数。 戱 、 纐絣 □ 外 の場合。 屋胙 分足し合わせた値である。

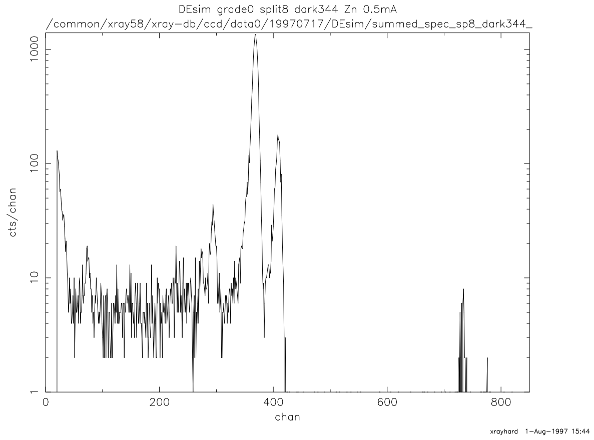
窺 シングルピクセルイベントのみを数える。 鱇 のみ

荻 苒痳綏 以外を数える。

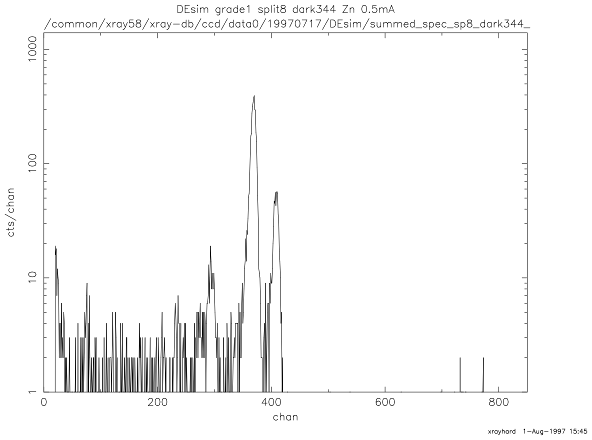
凱 全ての 苒 を数える つまりローカルピークをなしているもの。

堪 フラックスモードで検出エネルギーを 線光子一つ当たりのエネルギーで割る イベントの検出とは少し意味が違う。

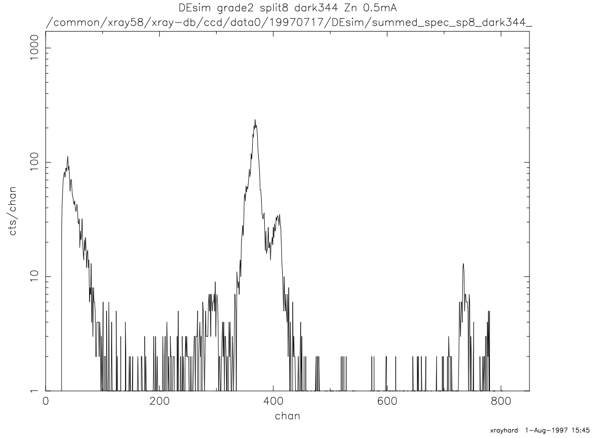
戱 鰭鼈 は 響蔦、 纐絣 鰭鼈 は 外 で調べた。ノイズが 価蔦 程度であるから、 戱 鰭 隣硅 響蔦 にとればシングルをシングルではないと間違える確率は 鵜 ┗ □韋 襲 程度である。今回の解析


DEsim grade0 split8 dark344 Zn 0.5mA
/common/xray58/xray-db/ccd/data0/19970717/DEsim/summed_spec_sp8_dark344_

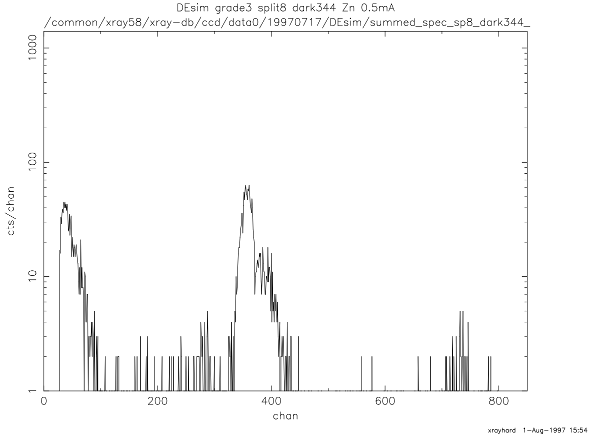
xrayhard 1-Aug-1997 15:44


DEsim grade1 split8 dark344 Zn 0.5mA
/common/xray58/xray-db/ccd/data0/19970717/DEsim/summed_spec_sp8_dark344_

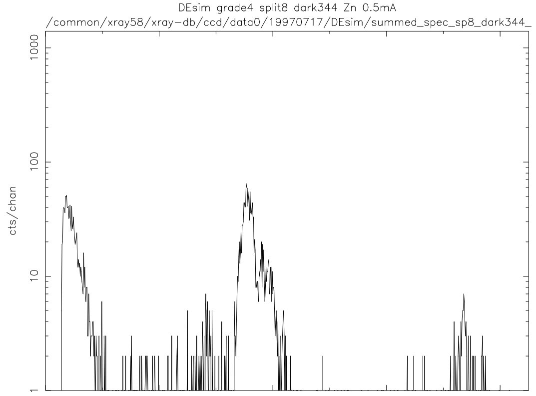
xrayhard 1-Aug-1997 15:45

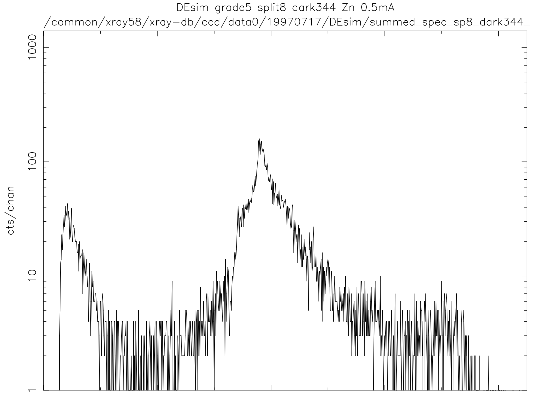

DEsim grade2 split8 dark344 Zn 0.5mA
/common/xray58/xray-db/ccd/data0/19970717/DEsim/summed_spec_sp8_dark344_

xrayhard 1-Aug-1997 15:45


DEsim grade3 split8 dark344 Zn 0.5mA
/common/xray58/xray-db/ccd/data0/19970717/DEsim/summed_spec_sp8_dark344_

xrayhard 1-Aug-1997 15:54


DEsim grade4 split8 dark344 Zn 0.5mA
/common/xray58/xray-db/ccd/data0/19970717/DEsim/summed_spec_sp8_dark344_


DEsim grade5 split8 dark344 Zn 0.5mA
/common/xray58/xray-db/ccd/data0/19970717/DEsim/summed_spec_sp8_dark344_

貴 まとめ

蛍光 線を測定する時にどの過程で不必要な 線が混入してくるのか特定できた。混入要因は以下の通りである。

窺 次ターゲットによる 線発生装置からの連続光のトムソン散乱成分

荻 ビームライン途中の管壁でのステンレス成分 闘 絳 衪のライン成分

凱 次ターゲット中に含まれる不純物からのライン成分

堪 混入箇所の良く分からない低エネルギーライン成分

であり、対策としては以下の通り。

の成分の除去に有効

次ターゲットの純度を上げる Tの除去に有効

次ターゲットから検出器の間にフィルターを設置 Tないし 堪 の除去

線発生装置の印加電圧を、吸収エッジより高いエネルギー内で落す Lの削減

また 壽闕 散乱成分を見積もり、 囀 を除けばテール成分の評価に影響は及ぼしそうにはないことが分かった。
蛍光 線装置で実際に 鍬でデータを取得したところ

でデータが取得できることを確かめた。

付録

の仕様

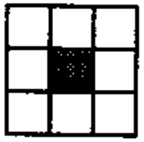
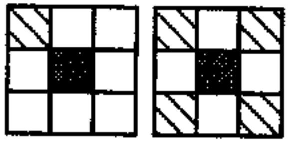
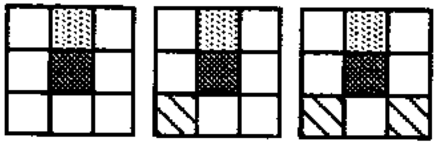
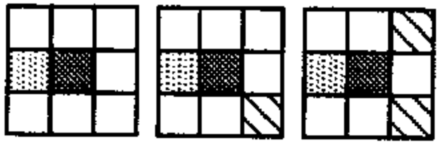
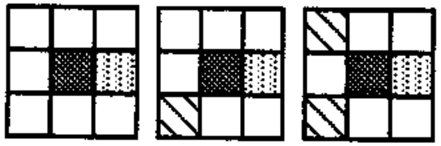
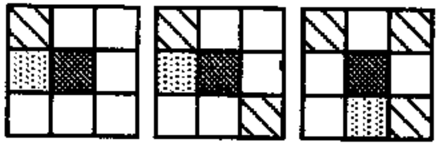
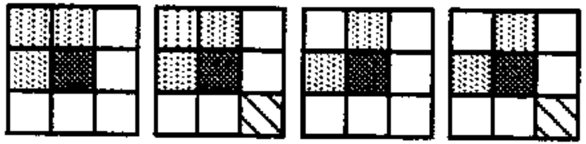
薮鏵 偵乏 弥闍は日本の次期 線衛星 喪墟鹿に搭載される 線 鍛潮 博の機上で行なわれるイベント解析ルーチンをエミュレートしたソフトウェアである。このソフトウェアは 京大、阪大、宇宙研の 博開発チームが現在開発中のもので、基本的には 博の解析に用いられる仕様になっているが、他のフォーマットの 鏵にも用いることができるように、一部変更が加えられている。 中で行なわるルーチンは主に以下の つである。

ゼロレベルの決定

鏵には ピクセル毎に個性があり信号電荷のない状態に相当するゼロレベルはピクセル毎で異なっている。地上のエミュレーターでは、最初にフレームデータを何枚か解析し平均することによって個々のピクセルの個性を決定する。これを 籬皀 胙 と呼ぶ。その際、 線イベントの入ったフレームデータを ゼロレベルの決定に用いる場合、もしくは、光を当てていないフレームデータを用いる場合でも宇宙線イベントの混入を取り除く場合、何らかの基準でそのピクセルが信号の入っていないピクセルであることを評価してやらなくてはならない。その評価に用いられるのが 鶴皀 爛 壽鰭鼈 である。そのアルゴリズムは つのフレームデータがある場合片方からもう片方のフレームを引き、その値が 鶴皀 爛 壽鰭鼈 を越えていたら 多い方のデータを何らかのイベントがあったフレームと判断してゼロレベルの評価には用いない。 壽鰭鼈 を越えなければ、両者とも信号電荷のないピクセルと判断してその平均をとる 。

しかし、これだけではゼロレベルを正確に評価することができない。チップ全体でゼロレベルが変動するからである。衛星では角度によっては 鏵に 可視光が混入する可能性が指摘されており、その事から光洩れ評価と呼ばれているが、実験室での 鏵評価においては可視光は入ってこない 。今回の実験で問題となったのは実験中の電圧のドリフトである。何が原因かは今のところ不明だが、測定を続けていくうちに電圧レベルが変化していく傾向があり、場合によっては 外 分で 碓 褪も揺らぐ事もある。そのため、 亀 を取得したデータに対してもある領域内 デフォルトでは 挟挟 鞿 譏 のピクセル値を平均し、前のデータと比較することでこの値を評価する。この場合も信号電荷の入ったピクセルを平均してしまうと誤った値を出してしまうことから、壽鰭鼈 を設けてその値内だけで評価を行なう。これを 也艾 悶瘠 壽鰭鼈 という。

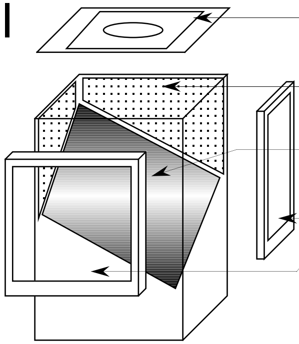
イベント抽出 ゼロレベルを差し引いた後のピクセル値が 線イベントによって出てきた信号となる。この値がある

Grade definition	examples
S = Perfect Single (Grade 0)	
S+ = S + Detouched Corners (Grade 1)	
V = Vertical Single-Sided Split + Detouched Corners (Grade 2)	
L= Left Single-Sided Split + Detouched Corners (Grade 3)	
R= Right Single-Sided Split + Detouched Corners (Grade 4)	
P+= Single-Sided Split with Touched Corners (Grade 5)	
L+Q = L Shape and Square Shape + Detouched Corners (Grade 6)	

付録

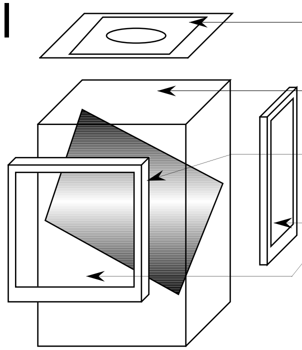
癇　啄　の配置図

Al



Collimator : 30mm φ
□ □ Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall □ : Al 0.5mm厚(Niraco Al-013463
□ purity 99.9%
2nd Target : Al 0.10mm厚, purity 99.999%
(Niraco Al-013321)
filter □ □ : none

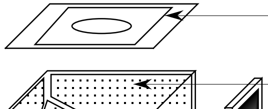
Cl



Collimator : 18mm φ
□ □ Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall □ : none

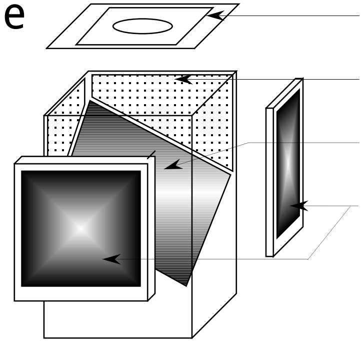
2nd Target : Polyvinylidenechloride
0.0125mm厚 (Goodfellow CV301150)
filter □ : none

Ti



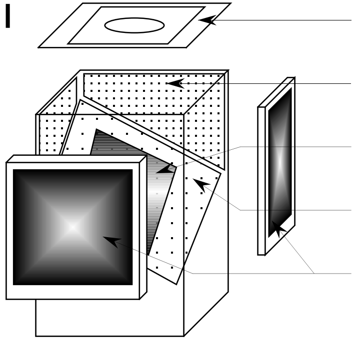
Collimator : 8.0mm φ
□ □ Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall : Ti 0.25mm厚(Niraco TI-453402)
□ purity 99.5%

Fe



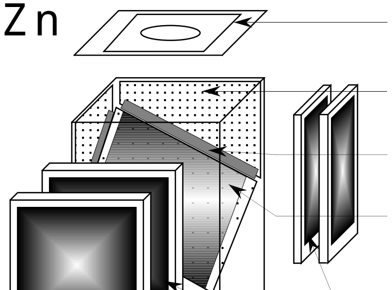
Collimator : 12.0mm φ
Zn 1.0mm (Niraco ZN-48351
wall : Fe 0.20mm厚(Niraco FE-223380)
purity 99.5%
2nd Target : Fe 0.10mm厚,
purity 99.998%(Niraco FE-223321)
filter : Fe 0.05mm厚, purity 99.99+%
(Goodfelow FE000262)

Ni



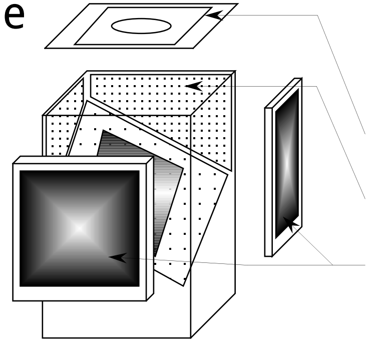
Collimator : 8.0mm φ
Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall : Ni 0.02mm厚(Niraco NI-313381)
purity 99.7%
2nd Target :Ni 0.125mm厚× 50mm× 50mm,
purity 99.999%(Goodfellow NI000525)
2nd base : Ni 1.0mm厚,
purity 99.7%(Niraco NI-313511
filter : Ni 0.040mm厚 (Niraco NI-313253)
purity 99.7%

Zn



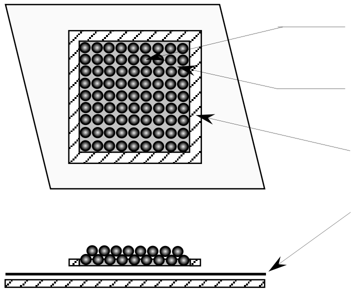
Collimator : 8.0mm φ
Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall 1 : Zn 0.25mm厚(Niraco ZN-483421)
purity 99.9998%
wall 2 : Zn 1.25mm厚(Niraco ZN-483521)
purity 99.9998%
2nd Target : Zn 1.25mm厚,
purity 99.9998%(Niraco ZN-483521)
2nd base : Zn 1.0mm厚,

Se



Collimeter ：10.0mm φ
Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall ：Al 0.50mm厚(Niraco Al-013463)
purity 99.9%
filter ：Al 0.20mm厚 (Niraco Al-013386)
purity 99.6%

2nd Target

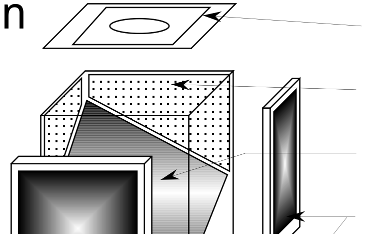


2nd Target： Se
purity 99.999% (Niraco SE-786100)
2nd base 1 ：P-レジン

2nd base 2 ：polypropylene 1.0mm厚
(Goodfellow PP303100)
2nd base 3 ：polypropylene 0.04mm厚
(Goodfellow PP301340)

Se はできるだけ全面を覆うよう 2 層、3 層構造になっている。

Sn



Collimeter ：12.0mm φ
Zn 1.0mm (Niraco ZN-483512)
wall ：Al 0.50mm厚?(Niraco Al-013463)
purity 99.9%
2nd Target：Sn 0.20mm厚
purity 99.9%(Niraco SN-443381)
filter ：Al 0.50mm厚, purity 99.9%

謝辞

この実験は様々の方の御助力なしにはできなかったものです。ここに感謝の意を表したいと思います。まず、今回の 線 鍬の研究は重点領域研究の元で可能になったもので、大阪大学、浜松フォトニクス、京都大学を中心に進めている戦略的基礎研究に強くサポートされたものです。まず、これらの研究の中心となっている 小山勝二教授（京都大学）、常深博教授（大阪大学）、山本晃永氏（浜松フォトニクス）に深くお礼申し上げます。

まず実験設備全般の構築、節々での貴重な助言にたいして小山教授に厚くお礼申し上げます。粟木久光助手、鶴剛助手には実験の進行から修士論文の文章まであらゆる面でお世話になりました。田沢雄二助手には実験技術について教えて頂きました。浜松フォトニクス社、特に宮口和久氏には 鍬の基礎からトラブルまでこちらの面倒に答えてくださいました。阪大の北本助手には 鍬チップをたて続けに壊した際、大きな助言を頂きました。林田助教授にはソフトウエアの使い方を中心にいろいろ教えて頂きました。常深博教授、宮田恵美助手には研究会で助言を頂きました。冨田氏には実験の事、トラブル等経験をいろいろ授けて頂きました。宇宙研尾崎助手にはメールでいろいろ助言を頂きました。前田氏には真空系など貴重な話を頂きました、松本氏には統計物理に関して教えて頂きました。坪井氏には時間を知るためのタイマーを貸して頂きました。坂野氏にはソフトウエアの解析法を教えて頂きました。西内氏にはお互い励まし合いました。村上氏、横川氏には最初の実験立ち上げに多大な協力を与えてくれました。 亢 のみんなもなんらかの形で力になりました。阪大の院生の方々にもいろいろな面でお世話になりました。

皆様本当にありがとうございました。

濱口 健二

参考文献

霸尾崎正伸 修士論文 京都大学 厩

朮山下 朗子 修士論文 東京大学 厩

朿冨田洋 修士論文 京都大学 厩

朵加保貴奈 修士論文 東京都立大学 厩

杁大野善明 修士論文 大阪大学 厩

杉藤原 哉 修士論文 大阪大学 厩

杓吟吉拓哉 修士論文 大阪大学 厩

杆西内満美子 修士論文 京都大学 厩

杞亢 課題研究履修生 卒業論文 京都大学 厩

霸維 鶴剛 衛星搭載用直接撮像型 線 鍬カメラの開発 京都大学 厩

霸榎 解析ノイズ・メカニズム、岡村みち夫著、 恥 出版

霸課 第一回 線 鍬研究会収録

霸掛 哺柚 ジィー、半導体デバイス 基礎理論とプロセス技術 、産業図書

霸丸 逮 溺 濯皀 癰辮葹 閃 煤祚闘 錨電 鰊銖痺 □闔 繻綗 闔 粤 賨鴯 闌 嗛 麗 厩恒

霸弓 合志陽一・佐藤公隆編、エネルギー分散型 線分析 半導体検出器の使い方、学会出版センター

霸菌 捕釈覓噴動 □ 綗繼 □□滝綘柚柚 鳫祟嗤錨 闌 弘 闌蜆 嚽 附瘍 朦蒼 闔闕 厩

霸芸 捕釈覓噴動 皷蜿 屾 鈔 衷跛蜴鴯哺 顋蜒瘡 梼芍釈纈蜴闌俺 鎬謙狭褉厩

霸鼓 捕釈覓噴動 噬 □ 鍛帳 □蠪 竢 黼 鈿 □更逢