衛星搭載用 X 線 CCD と
衛星軌道上における CCD 放射線損傷の研究

冨田 洋
京都大学 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

1995 年度修士論文

概要

X 線天文衛星 ASCA は世界で初めて X 線 CCD カメラを搭載し、その優れた位置検出能力と高いエネルギー分解能から数多くの優れた成果を収めている。今後 X 線天文学において X 線 CCD カメラは標準的な焦点面検出器になると予想され、 X 線天文学には欠かせない存在になりつつある。

我々京都大学宇宙線研究室は浜松ホトニクス、大阪大学と共に将来衛星搭載用 X 線 CCD カメラの開発を行なっている。我々はこの X 線 CCD の詳細な性能評価を行なった。エネルギー分解能で 140eV(FWHM at 5.9keV)、読みだしノイズ 7electron(RMS) が達成できた。いずれも世界でトップクラスの性能であるが、ダークカレントの点で、改良の余地が残されている。温度が -40 度以上でのダークカレント量はピクセル毎に量子化されていることが分かった。これは Si のバンドギャップ中にレベルを持つ不純物準位によるもので、 CCD 製作のスタートウェハか製造行程に問題があると考えられる。一方、表面準位によるダークカレントは -60 度でも存在するが、 MIT によって CCD へのクロックの与え方で減少させる方法が提案されている。今回この方法の有効性を実験的に確認した。

衛星搭載用 X 線 CCD カメラの問題点として、年のタイムスケールで CCD が劣化し、電荷転送効率 (CTE) の低下、ダークカレントの増加、エネルギー分解能の低下してしまうことが ASCA の経験から明らかになってきた。これらは軌道上での放射線により作られるトラップ準位が原因であるとされているが、細かいメカニズムは未だに解明されていない。

そこで、我々は CCD の放射線ダメージの性質と、その対処と性能回復の研究を行なった。上記の浜松ホトニクスで製作された X 線 CCD に、京都大学バンデグラフ型タンデム加速器を用い、 2MeV 及び 9.5MeV のプロトンを照射することにより衛星軌道上をシミュレートした。その結果、 CTE の劣化、ダークカレントの増加、エネルギー分解能の劣化を確認し、そのフラックス、プロトンエネルギー依存性、温度依存性を、また 電荷転送効率は転送速度に依存することが分かった。さらに詳しい実験と解析から、プロトンにより生ずるトラップ準位 又はトラップ密度は全くランダムに発生するのではなく、ある決まった準位に偏ることが分かった。

対処と性能回復として、まず X 線 CCD 動作温度を下げることを行なった。その結果 -90 度程度の温度であれば、ダークカレントやホットピクセルが問題ないレベルまで減少したが、電荷転送効率は効果的に回復しないことが分かった。次に常温でのアニーリングを行なったが効果的改善は見られなかった。しかし 高温 (150 度) のアニリングでは CTE、エネルギー分解能に大きな改善が確認された。

目次

1 X 線天文学と CCD **6**

1.1 X 線天文学とその観測 . . . 6
1.2 X 線検出 . . . 6
1.3 CCD . . . 7
1.3.1 電極、電荷転送、電荷転送効率 (CTI) . . . 7
1.3.2 inter line と frame transfer . . . 9
1.3.3 over clock region . . . 9
1.3.4 トラップと暗電流と CTI . . . 11
1.4 CCD のデータ処理 . . . 12
1.4.1 ASCA SIS . . . 12
1.4.2 イベント抽出 . . . 13
1.5 X 線天文学において X 線検出器に求められる性能 . . . 14
1.6 これからの X 線天文学 . . . 15

2 浜松ホトニクス CCD **16**

2.1 チップ概要 . . . 16
2.1.1 SIS と XIS と浜松ホトニクス CCD の違い . . . 16
2.2 駆動方法、データ取得方法、解析方法 . . . 16
2.2.1 駆動方法、駆動環境 . . . 16
2.2.2 データ取得 . . . 18
2.2.3 データ解析 . . . 19
2.3 暗電流 . . . 21
2.3.1 trap によるダークカレント . . . 21
2.3.2 trap 以外のダークカレント . . . 22
2.3.3 クロックパターン . . . 24
2.3.4 クロック電圧依存性と縦転送による影響 . . . 24
2.4 電荷転送効率 . . . 25
2.5 ノイズ . . . 26
2.6 エネルギー分解能 . . . 27
2.7 空乏層 . . . 28
2.8 エネルギー線形性 . . . 30
2.9 まとめ . . . 30
2.10 将来 . . . 32

3 CCD 放射線損傷 **33**

3.1 これまでの研究 . . . 33
3.2 衛星軌道上での放射線 . . . 35
3.3 放射線損傷実験 . . . 36
3.4 データ解析 . . . 38
3.5 経年変化 . . . 38
3.6 温度特性 . . . 43
3.7 性能回復 . . . 43

3.7.1 電荷転送効率とエネルギー分解能 . . . 43
3.7.2 ダークカレントとホットピクセル . . . 45
3.8 人工電荷による実験 (fat zero) . . . 45
3.9 CTI の補正 . . . 46
3.10 ダークカレントを引き起こすトラップ . . . 48
3.10.1 トラップの出る確率 . . . 49
3.10.2 トラップの準位と幅 . . . 49
3.11 まとめ . . . 50

A SRH model **51**

図目次

1.1 3 相電極 CCD の電荷転送 . . . 8
1.2 2 相電極 CCD の電荷転送 . . . 8
1.3 バーチャルフェイズ CCD の電荷転送 . . . 8
1.4 CCD の転送方式 . . . 10
1.5 CCD image . . . 11
1.6 CCD MOS 構造 . . . 11
1.7 半導体バンド構造 . . . 12

2.1 notch と notch なしチップ . . . 17
2.2 CCD ドライブパターン . . . 18
2.3 京都大学宇宙線研究室 DAQ システム . . . 19
2.4 CCD からの信号波形 . . . 20
2.5 CCDX 線照射イメージ . . . 20
2.6 浜松ホトニクス CCD スペクトル . . . 22
2.7 トラップ 1 つ当たりのダークカレント . . . 23
2.8 trap の分布 . . . 23
2.9 1 ピクセル当たりのトラップの個数 . . . 23
2.10 トラップのないピクセルのダークカレント . . . 24
2.11 縦転送中のダークカレント . . . 25
2.12 縦転送 (parallel)CTI と横転送 (serial)CTI の求め方 . . . 26
2.13 notch の有無による CTI の違い . . . 26
2.14 読みだしノイズのクロック電圧依存性 . . . 27
2.15 readout noise 温度依存性 . . . 27
2.16 CCDX 線スペクトル . . . 29
2.17 浜松ホトニクス CCDX 線スペクトル . . . 30
2.18 エネルギーの線形性 . . . 31
2.19 金属トラップによるダークカレントのピーク間隔 . . . 31

3.1 ASCA 打ち上げ前に行なわれた CCD 放射線損傷実験によるスペクトルの変化 . . . 34
3.2 犠牲信号電荷がトラップを埋める模式図 . . . 34
3.3 ASCA SIS の CTI の非一様性 . . . 35
3.4 衛星軌道上でのカメラボディ内部でのプロトンスペクトル . . . 36
3.5 1 つのプロトンが CCD に与えるダメージ . . . 37
3.6 CCD に与えるダメージ (カメラボディ内部のプロトンスペクトルを考慮) . . . 37
3.7 タンデム加速器を用いた実験装置概要 . . . 38
3.8 照射したプロトンのスペクトル . . . 39
3.9 ダークカレントの経年変化 (左： 9.5MeV、右： 2MeV) . . . 40
3.10 CTI の経年変化 (左： 9.5MeV、右： 2MeV) . . . 40
3.11 readout noise の経年変化 (左： 9.5MeV、右： 2MeV) . . . 41
3.12 エネルギー分解能の経年変化 (左： 10MeV、右： 2MeV) . . . 41
3.13 hot pixel の経年変化 (左： 10MeV、右： 2MeV) . . . 41
3.14 特定のピクセルの pixel level の経年変化 . . . 42
3.15 X 線スペクトルの変化 . . . 42

3.16 ダークカレントと hot pixel の 温度依存性 43
3.17 アニリング前後のスペクトル 44
3.18 室温でのアニリング前後のダークフレームスペクトル。 45
3.19 犠牲電荷と CTI 47
3.20 光を入れる前後の X 線スペクトル 47
3.21 光を入れることによる効果 48
3.22 CTI を補正したスペクトル 48
3.23 ダメージを少しだけ与えた後の CCD スペクトル。 49
3.24 ダメージトラップによるダークカレントの温度依存性 50

表目次

1.1 SIS の諸パラメーター 12

2.1 浜松ホトニクス CCD チップ概要 17
2.2 パターン別ダークカレント 24
2.3 エネルギー分解能 28
2.4 空乏層の厚さ 30

3.1 放射線損傷実験における、諸パラメーター 39
3.2 アニリングの効果 44
3.3 光を入れた場合の CTI とエネルギー分解能 46

第 1 章

X 線天文学と CCD

1.1 X 線天文学とその観測

X 線天文学とは文字通り宇宙 (銀河や星) からの X 線を利用してその性質を調べるものである。 X 線天文の対象となる代表的な天体を幾つかあげてみると以下のようになる。

銀河団 過去の観測から、銀河団には電磁波で観測されるもの以上の質量 (ダークマター) を持っていると考えられている。大きなマスが作る深い重力ポテンシャルはガスを高温に温め (1 千万度 ∼ 1 億度以上)、高いエネルギーを持ったプラズマは制動放射により X 線で輝く。又、高電離された元素は その量に比例する強度で特性 X 線をだし、宇宙に普遍的に存在する元素の組成の情報を我々に提供する。さらに 銀河団の非常に大きい空間的広がりや質量は 宇宙の大域的構造や進化を解明する重要なプローブになる。温度や重元素量は銀河団内部で非一様性を示すものも最近数多く報告されている。

活動銀河核 (**Active Galactic Nuclei : AGN**) 宇宙に存在する多くの銀河の中心には巨大なブラックホールが存在していると考えられている。ブラックホールは 母銀河からの質量でできた降着円盤をなし、その内側では何らかの機構で X 線を出していると考えられる。 AGN は複雑な構造をしたガスがとりまいており X 線を吸収したり蛍光 X 線を出す。吸収の量や鉄輝線などから ガスの構造の構造がわかる。また時間を示すことから X 線を放射している領域の大きさなどが推定される。

超新星残骸 超新星爆発により 星内部で作られた重元素は宇宙にばらまかれ、宇宙空間を加熱する。適度な温度の場合 重元素からの特性 X 線で輝きその量が推定できる。また 非常に希薄なため地球上の実験室では再現できない電離非平衡状態が現れていると考えられているものも多い。比較的近傍の場合はその空間構造も調べることが出来る。

コンパクトオブジェクト ここであげたコンパクトオブジェクトとは主に銀河内にある、ブラックホール、中性子星、白色わい星であり X 線で輝くものの多くは連星系をなす。速い時間変動や規則正しい強度の周期性 スペクトルの変動などから、それら力学的構造などが解明される。

上にあげたものは代表的なもので、他にも楕円銀河、星生成領域、 CXB(Cosmic X-ray Buck-ground) に加え、通常の main sequence の星や渦巻銀河も X 線を出している。 X 線の観測には 上記にあげたように 主に スペクトル、時間変動、空間構造の 3 つの方向から研究がなされている。しかし観測は簡単ではなく 例えば X 線は地球大気を通過出来ないので検出器を上空にあげなくてはならない。又 上記 3 点を十分満たす検出器は存在せず より理想に近い検出器開発が必須である。現在まで X 線天文の発展とは 検出器の進歩と言い替えることができ、これは 今後の X 線天文においても同様であろうと考えられる。

1.2 X 線検出

X 線検出器としての CCD について述べるには X 線と物質の相互作用の理解は欠かせない。半導体 (主にシリコン) の場合を簡単に触れることにしよう。 X 線の検出に関係する最も重要な素過程は光電吸収である。 X 線のエネルギーを E(eV) としよう。光電吸収ではじき出された光電子 及び オージェ電子は electron-hole pair をつくっていく。最終的には全てのエネルギーを使い果たし、平均 $\frac{E}{w}$ 個の electron-hole pair を作る。シリコンの場合 w=3.65 で

ある。最終的に、この $\frac{E}{w}$ 個の数を信号 (電圧) に変え、 AD 変換を行ない、信号を処理する。実際には生成される electron-hole pair の数には統計的な揺らぎがあり、

$$\sigma = \sqrt{\frac{F \cdot E}{w}} \tag{1.1}$$

と表現される。これが半導体検出器のエネルギー分解能の限界を決定する。 F は Fano factor とよばれる定数で物質により異なり、シリコンでは $\sim$0.12 である。式 1.1で分かるように、 w が小さいほど限界のエネルギー分解能はよくなる。半導体検出器のエネルギー分解能は一般にガス検出器より良いが、その要因の 1 つはここにある。

実際の検出器ではエスケープと呼ばれる現象が現れる。 X 線と物質の相互作用でその物質からの蛍光 X 線が発生した場合は (オージェ電子が発生しなかった場合) 、 CCD について考えると (CCD については次章参照) その蛍光 X 線が自分自身のピクセル内で吸収されたなら、やはり自分自身のピクセルで合計 $\frac{E}{w}$ 個の信号電子を検出する。蛍光 X 線が自分自身のピクセルで吸収されない場合 そのピクセルは $\frac{E-E_x}{w}$ 個の信号電荷を検出する (E_x= 蛍光 X 線のエネルギー)。蛍光 X 線が他のピクセルで検出された場合は、そのピクセルで $\frac{E_x}{w}$ 個の信号電子を検出する。蛍光 X 線はどのピクセルにも吸収されず CCD の外へ逃げる場合もある。まとめると、エネルギー (E eV) の X 線が入射した場合検出される信号電荷の数は $\frac{E}{3.65}$ 個、 $\frac{E-E_x}{3.65}$ 個、 $\frac{E_x}{w}$ 個の 3 通りが考えられることになり、単色の X 線を照射しても上記 3 つのピークが見える場合がある。 3 者の比は検出器により異なる。

1.3 CCD

CCD は半導体検出器である。半導体検出器とは文字通り半導体を利用した検出器で p-n 接合に逆バイアスをかけて用いる。 p-n 接合 (ダイオード) に逆バイアスをかけると 電流はほとんど流れず空乏層が広がり、ここで X 線を検出することになる。バイアス電圧はほとんどがこの空乏層にかかり X 線によってできた電子が集められ、再結合する前に電気信号に変換される。空乏層以外で発生した電子 (と hole の pair) は電圧がかかっていないので、収集されることはなく再結合する。

CCD は imaging 機能を備えていることが通常の半導体検出器と異なる大きな特徴である。 CCD にはイメージセンサー以外の用途もあるが、ここでは イメージセンサーとしての役割を述べる。 CCD は多数の MOS ダイオードをモザイク状にならべたもので、 1 つ 1 つのダイオード (ピクセル) が半導体検出器として働く。ピクセルは何万 (あるいは何十万、何百万) とならんでいるわけであるが、それぞれに読み出し回路が独立につながれているわけではない。 X 線により励起された信号電荷はバケツリレーによって運ばれ 読み出される (図 1.1参照)。つまり電荷の読みだしは 1 箇所で行なわれる。又 通常の半導体検出器とは異なり、 X 線を検出したらトリガーをかけて信号電荷を読み出すのではなく、市販のカメラと同様に、ある程度の露出を行ない、その後読みだす、という動作をくりかえす。 1 回の露出で得た image を 1 フレームと呼ぶ。 1 フレームで得られる情報は、各ピクセルのパルスハイトである。 1 ピクセルについて 2 バイト (16 ビット) のパルスハイトの情報があるとするならば、 1024×1024 ピクセルの CCD の場合、 1 フレームで 2 メガバイトという膨大な情報になる。大量のデータの処理も CCD の特徴である。

1.3.1 電極、電荷転送、電荷転送効率 (CTI)

CCD の各ピクセルには複数の電極がついており、この電極にかける電圧をコントロールすることによって、電荷の転送を行なう。 1 つのピクセルにある電極の数は CCD によって異なる。例として電極の数が違う 3 つの例をあげる。もっとも基本的なものは三相 (1 つのピクセルに 3 つの電極がついている) である。 (図 1.1参照)。信号電荷のあるポテンシャル井戸は転送前方に隣接する井戸より浅く、後方の井戸より深くなくてはならない。後に紹介する SIS はこの 3 相構造をもつ。二相の電極で駆動を行なうタイプの CCD の例は図 1.2である。 Si (シリコン) 内部の電場に構造をもたせて電極の数を減らしている。後に紹介する浜松ホトニクスの CCD はこの原理で電荷を転送する。一相で電荷転送を行なうことも可能である (図 1.3)。電極が覆っていないところがあり仮想電極 CCD(バーチャルフェイズ CCD) という。 TIJ(日本テキサスインスツルメンツ) 社製の TC213 はこのタイプである。この方法は電極がピクセルの全てを覆う必要がないので低エネルギー X 線の感度が増すという利点がある。上記の例では二相と単相では電荷を逆方向へは転送できない。これは CTI を起こすトラップを研究するときに ややネックとなる。

CCD は電荷をバケツリレーで転送するわけであるが、その転送回数は大変多い。例えば、 512×512 ピクセルのチップの場合、最大で 1024 ピクセル分の転送、三相ならば、 3072 回の転送を行なわなくてはならない。一方 信号電荷はピクセルからピクセルへ確実に 100% 転送されるわけではない。 1 ピクセル分の転送で実際転送される電荷の割合を電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency = CTE) 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非電荷転送効率 (Charge Transfer Inefficiency = CTI) という。 CTI = 1 - CTE である。 CTI は通

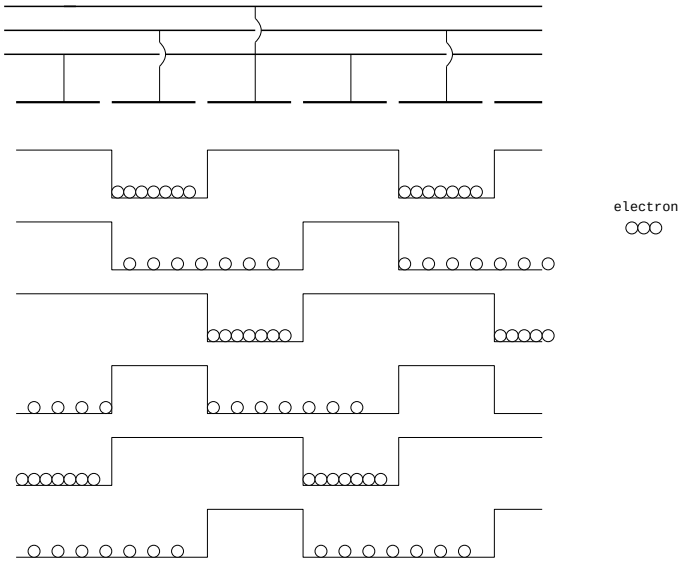

図 1.1: 3 相電極 CCD の電荷転送

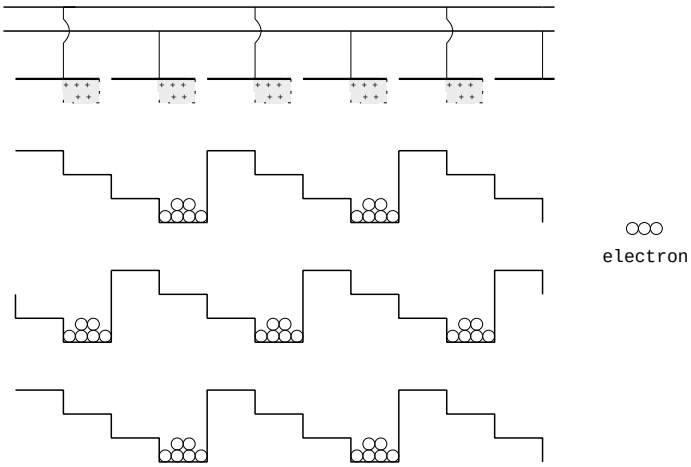

図 1.2: 2 相電極 CCD の電荷転送

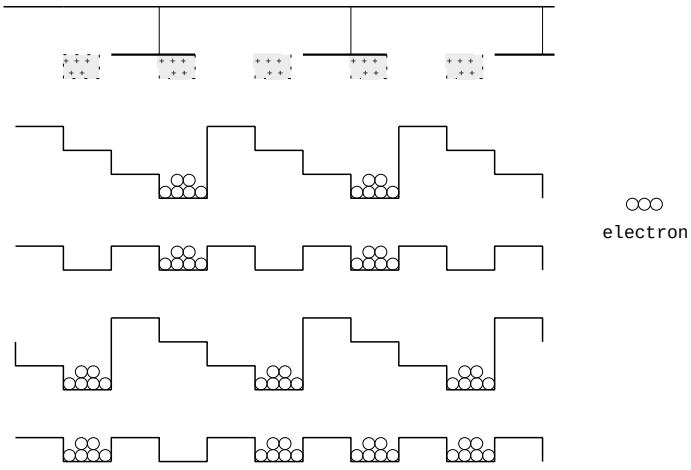

図 1.3: バーチャルフェイズ CCD の電荷転送

常 10^{-4} より小さい。v ピクセル分の転送を行なった場合、どれだけの電荷が CTI によって失われるか見積もってみよう。オリジナルの電荷の数を N_O、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、

$$N = N_O - \Delta N = N_O \times (CTE)^V \sim N_O(1 - CTI \times V) \tag{1.2}$$

である。CTI を 10^{-5} とすると、1000 ピクセルの転送で $\Delta N \ / \ N_O \sim 0.01$ となる。X 線天文で用いられる CCD では、エネルギー分解能が 0.02(FWHM@6keV) 程度であるので、無視できない量である。CTI は CCD の性能を決める大きなファクターである。

1.3.2 inter line と frame transfer

CCD はすべてのピクセルの電荷を読みだすのに時間がかかる。その場合 転送中に X 線がピクセルにとびこむと露出中の場所とは違った場所で X 線を検出することになる。露出時間に比べ転送時間が無視出来るほど小さければ問題とはならないが、そうでない場合、これを解決する 2 つの方式がある。1 つはインターライン方式、もう一つはフレームトランスファー方式と呼ばれている。共に受光用領域と遮光された領域をもつ。一方 遮光された領域のない CCD をフルフレームトランスファー方式という。

- インターライン方式
  インターライン方式では、1 次元的な撮像用の領域と遮光された転送用の領域が平行に何本もならんでいる (図 1.4. 左上)。1 フレームの露出が終ると、撮像領域で得た信号電荷は隣あった転送用領域へ転送される。転送用領域は遮光されており 転送中に光を検出することはないので、ゆっくりと信号電荷の転送を行なう。しかし、遮光は薄い Al で覆っているのが普通で X 線のカットはできない。撮像領域から転送領域への転送後、撮像領域では再び露出を始める。駆動は比較的簡単であるが、欠点として、焦点面領域での有効面積が小さくなること、加工が難しい、背面照射[1] が出来ない、などがあげられる。X 線に用いられることはない。
- フレームトランスファー方式
  フレームトランスファー方式では、撮像用の 2 次元領域と遮光された蓄積用の 2 次元的領域が隣あってならんでいる (図 1.4. 右上)。遮光には比較的厚い金属を用いることができるので、X 線をカットすることが可能である。この方式であれば焦点面領域の有効面積を小さくするというインターライン方式の欠点もなく、加工も比較的簡単で、背面照射も可能である。転送クロックには 3 種類あり、
  - 受光領域から蓄積領域への転送、ST clock という。
  - 蓄積領域内での転送、これを paralell 転送という。
  - serial register 内での転送

  である。クロックは 3 種類で、転送されている場所も 3 種類 (受光領域と蓄積領域の間を入れると 4 種類) であるが、必ずしも 1 対 1 に対応してない。X 線天文で用いられる CCD は有効面積を稼ぐためフレームトランスファー方式を用いるのが普通である。
- フルフレームトランスファー方式
  これは上記 2 者のように遮光された領域を持たない (図 1.4下)。

1.3.3 over clock region

CCD では信号電荷がなくてもある程度の出力がある。その出力をゼロレベルという。よって真の信号を知るためにはこのゼロレベルを差し引きせねばならない。ゼロレベルの代用として用いられるのが、オーバークロック領域 (over clock region、仮想ピクセル領域ともいう) の出力である。over clock region とは実在しないピクセルの出力である。仮にピクセルが 512×512 ピクセル存在するとした場合、CCD の駆動を 576×576 ピクセル分行なえば、576×576 - 512×512 ピクセル = 69632 ピクセルは存在しない仮想ピクセルからの出力となる (図 1.5)。over clock region には 2 種類ある。vertical overclock region(V.O.C.region) と horizontal overclock region(H.O.C.region) の 2 種類である (図 1.5)。実在するピクセルの領域は effective region と呼ぶ。オーバークロック領域は、ともに蓄積中は存在しない仮想領域であるが、V.O.C.region は vertical 転送中には存在する。H.O.C.region は vertical 転送中でも存在しない。H.O.C.region は serial 転送をすることによって初めて存在する仮想領域である。ゼロレベルは H.O.C.region

[1] X 線を電極と反対方向から入射させること。これにより、電極での低エネルギー X 線の吸収を減らすことが出る。

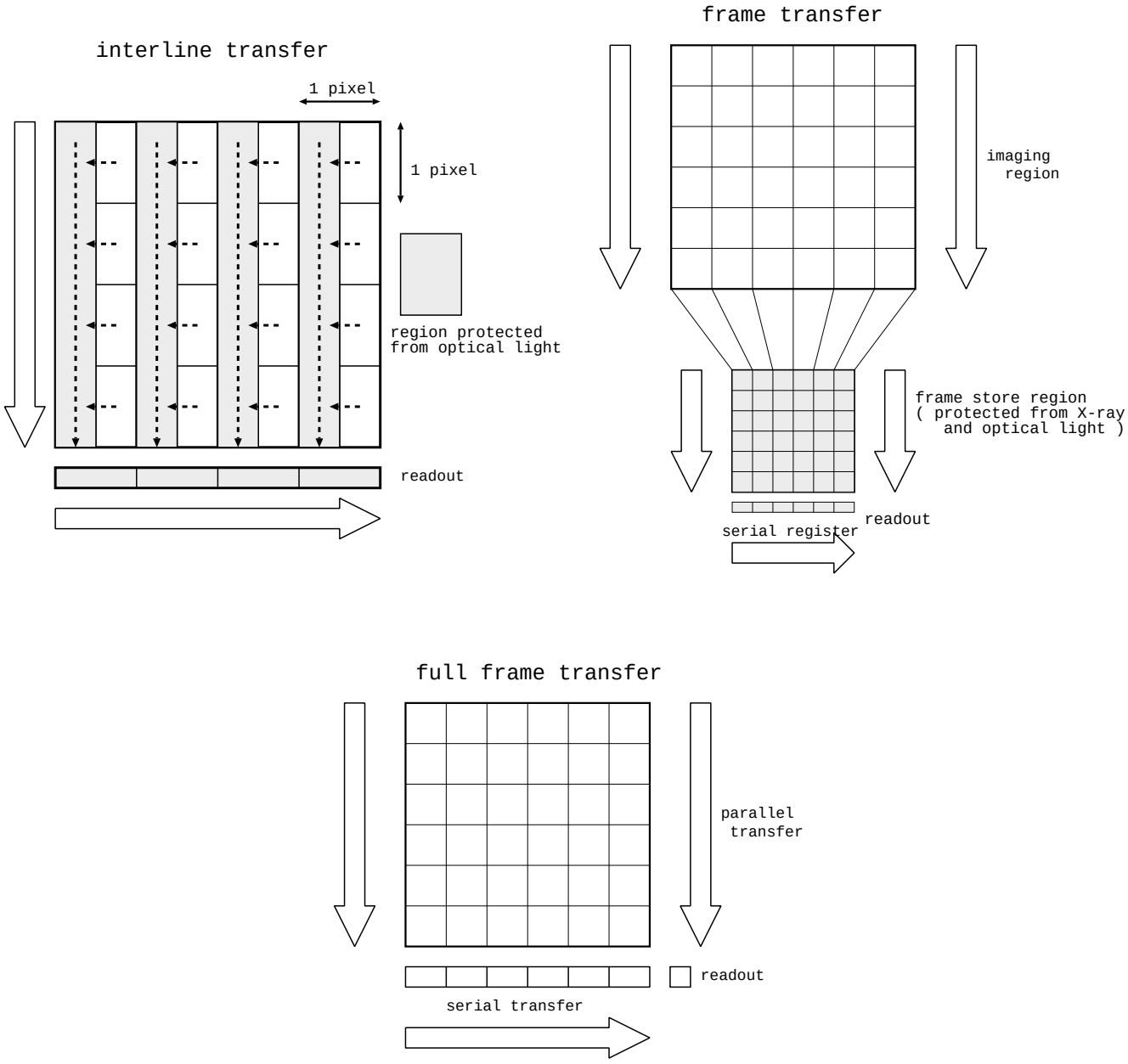

図 1.4: CCD の転送方式。左上がインターライン方式、右上がフレームトランスファー方式。ともに遮光された領域を持つ。下はフルフレームトランスファー方式。遮光された領域はない。X 線ではインターラインは使われない。

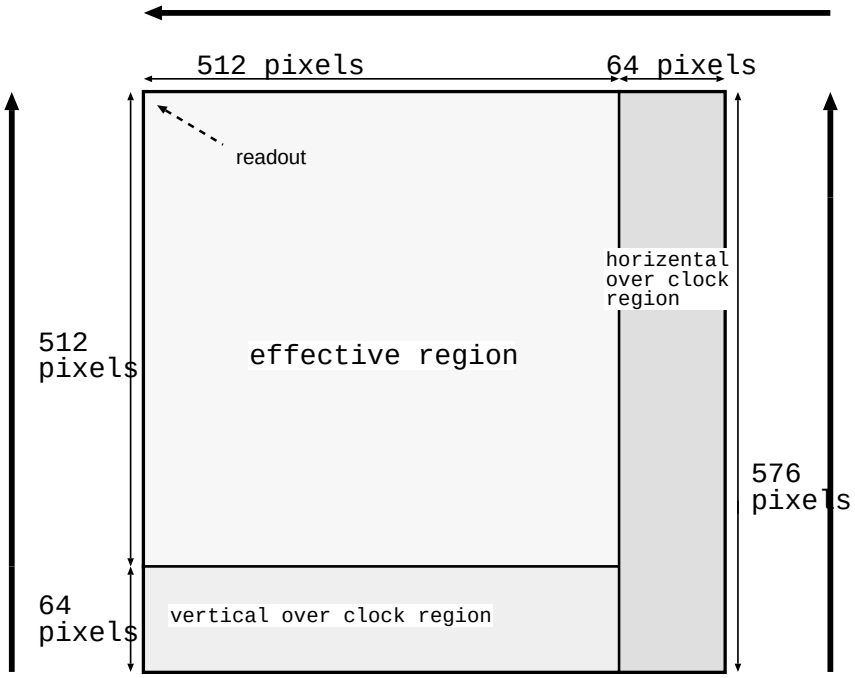

図 1.5: CCD から得られるイメージ (512×512 ピクセル)。左上に読みだしゲートがあることに注意。

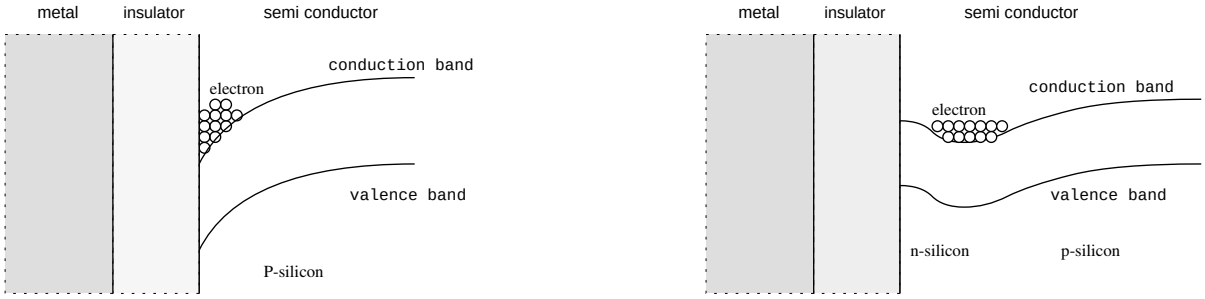

図 1.6: CCD の断面図。いわゆる MOS 構造。左が表面チャネル型 CCD、右が埋め込みチャネル型 CCD。埋め込みチャネル型では信号電荷が Si と insulator の境界に触れることはない。

を取るか、 V.O.C.region を取るかの 2 者が考えられる。両者の違いは縦転送の影響を受けているか否かであり、どちらをを採用するかは場合によって異なる。

1.3.4 トラップと暗電流と CTI

半導体という観点からもう一度 CCD を見ることにしよう。 CCD のピクセルの断面図が図 1.6である。これはいわゆる MOS(Metal-Oxide-Semiconductor) 構造である。 半導体が p 型の場合、電極には正の電圧をかけることにより、多数キャリアーを排斥して空乏層を厚くし、 X 線を検出する。次に半導体のバンド構造を図 1.7に示す。半導体として通常用いられるシリコンのバンドギャップは約 1.15eV(温度の関数) である。信号電荷を 1 つ作るには、このバンドギャップ (禁止帯) を電子が越えなくてはならない。温度が高いと熱エネルギーでバンドギャップを越えることも可能になる。バンドギャップを越えた電子は信号電荷と区別が出来ないため、雑音 (あるいは OFFSET) となり、 CCD の性能を悪化させる。この電子を暗電流 (dark current、ダークカレント) と呼ぶ。 X 線 CCD はこのため冷却して使う必要がある。

理想的な半導体では価電子帯と電導帯の間にはエネルギー準位はないが、実際にはこのバンドギャップに準位をもったピクセルが必ず存在する。この準位を「トラップ」と呼ぶ (図 1.7)。 価電子帯から伝導帯へ電子が励起する場合トラップを介する方が「一気に」励起する場合よりはるかに確率は高い。つまりトラップはダークカレントを増加させる原因となる。トラップによるダークカレントはトラップの準位に依存した温度依存性をもつ (付録 A 参照)。又、トラップは CTI を引き起こす原因になる。空のトラップが存在するピクセルへ信号電荷がくると、トラップへ信号電荷が捕まり、転送効率を悪化させるからである。トラップは半導体と絶縁物の間に集中していることが知られ

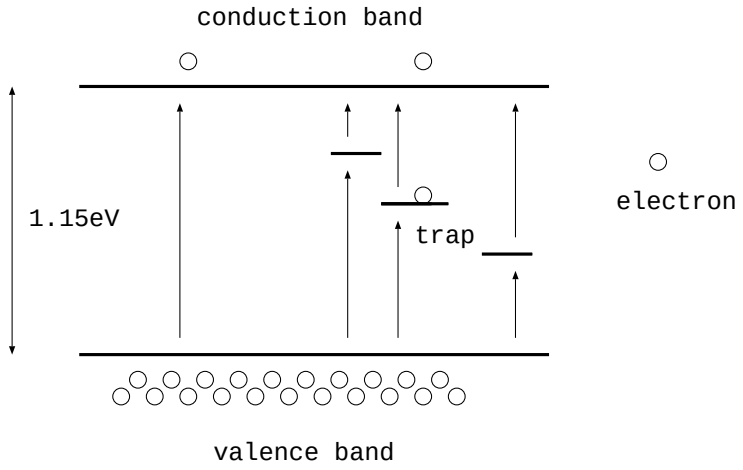

図 1.7: 半導体バンド構造

項目	値	備考
照射方式	前面照射	
電極	フレーム転送 三相駆動	
ピクセル数	水平 420× 垂直 422	
ピクセルサイズ	27μm×27μm	
面積	11mm×11mm	
時間分解能	4sec	全ピクセル読みだし
	16msec	FASTMODE
エネルギー分解能	2%	FWHM@6KeV
検出エネルギー	0.4 ∼ 10 keV	
動作温度	摂氏 -61 度	
空乏層	∼ 30μm	

表 1.1: SIS の諸パラメーター。 Yamashita (1995) より引用。

ている。このトラップを表面準位と呼ぶ。信号電荷がこの表面準位と遭遇しなければ、 CTI に関して信号電荷は表面準位の影響を受けない。最近は埋め込みチャネル型 CCD(Buried channel CCD,BCCD) と呼ばれるものが X 線 CCD の主流である。 BCCD とは半導体の表面部分が N 型になっており、ポテンシャルの井戸の底が表面から離れる様になっている (図 1.6右)。これにより、ポテンシャルの井戸に蓄えられる電荷の数は小さくなるが、それでも数万個の電子を保持することが可能である。 X 線 CCD の場合、エネルギーが数十 keV 程度まで測定できれば十分である。電子の数でいうと 1 万個以下であり、ポテンシャルの深さとしては十分である。

1.4 CCD のデータ処理

X 線 CCD の例として ASCA SIS を例にあげ、 CCD の信号処理について述べよう[2]

1.4.1 ASCA SIS

ASCA は 1993 年に打ち上げられた日本にとって 4 番目の X 線天文衛星である。 CCD を世界で初めて本格的に用いており、 X 線望遠鏡 4 台とそれぞれの焦点面に検出器がおかれている。 4 つの焦点面検出器のうち、 2 つがガスカウンター (GIS : Gas Imaging Spectrometer) で、 2 つが CCD(SIS : Solid state Imaging Spectrometer) である。 CCD を用いた SIS についてこの section では述べる。 SIS 1 台は 4 つの CCD チップから構成されており、田の字型にはりあわせてある[3]。 SIS に使われている CCD の仕様を表 1.1に簡単にまとめる。

[2] ASCA SIS に関しては Yamashita(1995) や Kotani(1993) が詳しく、そちらを読むことを薦める。

[3] 田の字型に貼り合わした溝がかなり大きく、観測上大きなデメリットとなっている。

1.4.2 イベント抽出

ゼロレベル

CCD で得られるデータはイメージ画像であり、 SIS の場合 420×422 のリアルピクセルとオーバークロックピクセルがある[4]。通常は、オーバークロック領域の出力をゼロレベルとして使っており effective 領域の出力から差し引かれる。しかしこれだけでは 2 つの点で不十分である。 1 点は ピクセルにはダークカレントがあるからである。ダークカレントは衛星軌道上での放射線が原因で増加が激しく、又 ダークカレントのピクセルごとのばらつきも大きい。このばらつきをピクセルの個性という。しかし ダークカレントの時間的な (秒、分といったオーダーでの) 変化は小さいと考えられる。不十分なもう 1 つの点は 光洩れである。我々の欲しい情報は X 線による情報であるが、 CCD は光にも感度がある。 SIS でも 光が洩れ込まないように設計はされてはいるが[5]、不十分でなんらかの光が洩れ込む。この光は太陽からの光が主な原因であることは分かっている。この光の量は衛星が昼から夜になると一気に減少し、夜から昼になると増加する。つまり時間変化が激しい。しかしながら、ピクセル間のばらつきはそれほど大きくはないと考えられている。上記 2 点 (ダークカレントと光洩れ) は当然仮想ピクセルに大きな影響は与えないないので、オーバークロックの出力をゼロレベルにとり、 offset として差し引くだけでは不十分である。 SIS のデータ処理アルゴリズムの場合、時間的なゼロレベルの変化は考慮していたが、 1 ピクセルごとの個性は考慮していない。具体的には、我々の欲しい情報を pixel level とすると

$$\text{pixel level} = \text{PH}_{\text{raw}} - \text{bias level} - \text{bias offset} - \text{dark frame} + \text{PH dataoffset} \tag{1.3}$$

と表される。 PH_{raw} とはピクセルの生出力である。 bias level は先に説明したオーバークロックの PH_{raw} で 1 フレームに 1 つの値を持つ、 bias offset は地上からコマンドで決定される値で、 bias level と真のゼロレベルとが大きく離れ過ぎた時適当な値を入れ補正するために使う (一定)。 PH dataoffset は整数演算するためにつける offset で、CCD 本体とは関係ない (一定)。そして dark frame が上記の問題を解決するポイントとなっている量で、ダークカレントと光洩れを表す。 dark frame はある領域 (現在では 16×16 ピクセル) ごとに 1 つ値が設定されている。又、フレームごとに値を変化させる。具体的には

$$\text{新 dark frame} = \text{現在までの dark frame} + [\frac{\text{pixel levelの平均}}{\text{k}}] \tag{1.4}$$

と表現される。 k はヒストリーパラメーターと呼ばれる量で、 1,4,8,16 の 4 通りから選ばれる。 k=1 では発散し、k=16 では急激な時間変化に対応できない。現在は k=4 である。 pixel level の平均は該当領域のピクセルのうち lower discri と upper discri 内の pixel level の平均である。式 1.4の操作を「dark の update」と呼び、 1 フレーム読み出すごとに計算をおこなう。 dark frame はピクセルに 1 つの値が設定されているわけではなく、いくつかのまとまったピクセルに 1 つの値が設定されているが、この点が SIS の大きな問題点となっている。ピクセルの個性が見えないからである。

event select

ゼロレベルなどを引かれた pixel level が我々の知りたい情報である。 SIS では CCD の各ピクセルから読み出された pixel level を一つ一つチェックし、 X 線による情報を捜し出す。具体的には pixel level が、ある threshold (event threshold) よりも高く、かつ 周りの 8 つのピクセルの pixel level が別の threshold(split threshold) よりも低い場合、そのピクセルは X 線を検出したと判断される。周りの 8 ピクセルの pixel level が中心の pixel level より小さく、 split threshold より大きかった場合には X 線による信号電荷が、 2 つ以上のピクセルに収まったと判断される。信号電荷の分布の仕方によって番号が付けられており grade と呼ばれる。複数のピクセルに広がった信号電荷は足し合わされて元の信号電荷の量が推測される[6]。ここで、 dark frame がピクセルの個性を反映していないことが、新しい問題点を生む。それはホットピクセルである。ホットピクセルとはダークカレントが異常に大きいピクセルのことである。ダークカレントが異常に大きいと、そのピクセルの pixel level が event threshold を越えてしまうのである。 CCD の温度が同じなら、ダークカレントの大きさはある程度一定しており、ホットピクセルは CCD を読

[4] horizontal overclock region と vertical overclock region の 2 つがあるが、これはコマンドで選択できる。現在は horizontal overclock region を使っている。 section 2.2.2、 2.2.3 参照

[5] 光は通さないが X 線は通す膜がとりつけられている。実際にはある程度の光は洩れるし、膜自体が低エネルギーの X 線を吸収しやすい。又 SIS のうち 1 台ではこの膜の一部が破れている あるいは薄くなっているらしい。

[6] この計算は X 線が強い場合衛星上で行なわれるが (bright mode)、強度が弱い場合は event threshold を越えたピクセルの周りの 8 ピクセルの pixel level も全て記録し地上へ送る (faint mode)

み出すごとに毎回誤ってX線を検出したと判定されてしまう[7]。衛星ではBDR[8]に書き込める情報量が制限されており、ホットピクセルが多くなると、真のX線イベントが記録できなくなってしまう。ホットピクセルはダークカレントが原因であり、衛星軌道上の放射線によるダメージが問題になる。

dark frame error

ホットピクセル以外にも、問題点がある。それは、dark frame errorと呼ばれている。式1.4を用いてダークフレームを決定する場合、X線を検出していないピクセルのpixel levelの平均を用いて計算している。具体的には -40ADU < pixel level < +40ADUとなるピクセルの平均をとって計算している。X線を検出していないピクセルのpixel levelは読みだしノイズの揺らぎでばらつくこと予想されるため 左右対称のスペクトルになると考えられるが、実際には放射線の影響でダークカレントが増し 高エネルギー側にテイルを引くようになる。よって単純に平均をとるとdark frameを大きくとり過ぎることになる。これをdark frame errorといい ASCA SISで直面している問題の1つである。

1.5 X線天文学においてX線検出器に求められる性能

X線天文学においてX線検出器に求められる性能とCCDの関係をまとめると以下のようになる。

1. 高いエネルギー分解能

   CCDのエネルギー分解能は最高で130eV(FWHM@6keV)程度である。これは、現在まで主流であった、ガスカウンターより、数倍以上いい。130eVはシリコンを使った場合のほぼ限界に近い数値で、これ以上のエネルギー分解能を得るにはシリコン以外の半導体かボロメーターなどを利用せねばならない。

2. 高い時間分解能

   CCDの時間分解能は読みだし方式に依存する。通常の読みだし(全てのピクセルを読み出す)では、1フレームの読みだしに数秒 ~ 数十秒が必要で、これが時間分解能となる。しかし1ピクセルずつ読み出すのではなく、parallel転送を何回か繰り返した後、serial転送をしてX線を読み出すという方式を行なえば、位置情報を犠牲にするものの、時間分解能で数十msecは達成可能である。

3. 高い位置分解能

   CCDの位置分解能はピクセルの大きさで決まる。CCDのピクセルの大きさは数十μm程度である[9]。

4. 高い感度、広いエネルギーレンジ

   CCDの場合、高エネルギー側の感度は空乏層の厚さで決まる。空乏層の厚さは数μm~100μm程度である。空乏層40μmの場合、検出効率は10keVで約27%の感度である。CCDの低エネルギー側での感度は電極、絶縁層の厚さで決まる。通常、数百eVが低エネルギー側の感度の限界である[10]。低エネルギー側の感度を増すために、電極の無い裏側からX線を照射するCCD (back illuminateという)や、電極がCCDの一部を覆うようにしたCCDなどが考案、利用されている。

5. 大きい有効面積

   CCDの有効面積は ピクセルが存在する範囲の大きさである。通常1cm^{2}程度で、有効面積は小さい。よってX線望遠鏡なしでCCDは用いられない。有効面積を大きくするには複数の案が考えられる。まず ピクセルを大きくすることが考えられるが、その場合、ダークカレントが大きくなる、位置分解能が悪くなるなどの欠点がある。ピクセルの大きさを一定にしてピクセルの数を増やすと、読みだしに時間がかかる。複数のCCDをモザイク状に並べた場合、CCD間の隙間がどうしてもできてimageに欠点ができる。どれも一長一短である。

6. 寿命が長い。

   衛星上では部品の取り替えなどは出来ない[11]。よってタフで丈夫なことが必須である。CCDは地上では半永久的な寿命をもつが、衛星軌道上では、放射線によるダメージを受け性能は悪化してゆく。ASCA SISの場

[7] ホットピクセルほど頻繁ではないが よくイベントととして検出されるピクセルもありフリッカリングピクセルという。ホットピクセルほどダークカレントが大きくないものである。

[8] Bubble Data Recorderの略。衛星上のデータの記録装置

[9] 但し、ASCA-SIS、ASTRO-E XISの場合はX線望遠鏡の結像精度によって空間分解能は決定される

[10] 衛星上では光洩れを防ぐため、OBF(Optical Blocking Filter)という膜をCCDの前においてある。これも低エネルギーX線を吸収し易い。

[11] HSTなんかは特別です。

合、エネルギー分解能は 打ち上げ時 130eV(FWHM@6keV) が 打ち上げ 2 年半で 230∼250eV まで悪化している (Dotani *et al.* (1996))。

7. 小さくて軽い。
   衛星に搭載するため重量は軽く、コンパクトである方が良い。 CCD は小さく 冷却装置を入れてもそれほど重くはないが、放射線から CCD を守るシールドがもっとも重量を占める。

CCD はひとことでいうと

「格段優れているというポイントはないが、大きな欠点もなくあらゆる点で良い性能を発揮する検出器」

といえるだろう。現在の X 線天文では、 X 線望遠鏡と焦点面検出器という組合せで用いられるのが主流で、焦点面検出器としては CCD が今後主流となっていくであろう。

1.6 これからの X 線天文学

20 世紀の終りにはアメリカ、ヨーロッパ、日本で相次いで X 線天文衛星が打ち上げられる[12]。 ASCA の次の世代を担う日本の X 線天文衛星について この section では述べる。日本の次期 X 線天文衛星計画は ASTRO-E 計画と呼ばれ、衛星は西暦 2000 年打ち上げ予定である。搭載される検出器は以下の 3 種類である。

- XIS (X-ray Imaging Spectrometar)
  CCD カメラで X 線望遠鏡との組み合わせで用いらる。合計 4 台のカメラになる。
- XRS (X-Ray Spectromertar)
  ボロメーターで X 線望遠鏡との組み合わせで用いらる。 1 台のみである。 CCD の約 1 0 倍のエネルギー分解能を有する。冷却剤として液体ヘリウム、固体ネオン用いるため、寿命は 2 年が限度である。 X 線望遠鏡を伴っているが撮像はできない。
- HXD (Hard X-ray Detector)
  シンチレーションカウンター + PIN ダイオード検出器。 10keV∼1MeV までの硬 X 線、 γ 線をカバー。撮像はできない。

CCD を用いた XIS を簡単に紹介しよう。 CCD は MIT リンカーン研究所で開発されたチップを用い、 1024×1024 ピクセルある。しかし、実際には読みだし口が 4 つあり、 4 つの長方形に分割 (256×1024 ピクセル) したそれぞれの領域を読み出す。 operating 温度は -90 度を目標としている。これは、暗電流を抑えるためである。又 ピクセルごとに dark frame をもつのでピクセルの個性は消える。 X 線望遠鏡も高エネルギー側の反射率が増し、又 シャープな画像が得られると期待されている。空乏層の厚さも 60μm と SIS の倍の厚さとなり高エネルギー X 線の感度が増す。 4 台の XIS のうち 1 台で背面照射型の導入も検討されている。

ASTRO-E の次はどうであろうか？。 X 線天文において、もはや CCD は標準的な焦点面検出器であり、 CCD なしでは考えられない。現在、浜松ホトニクス、大阪大学、京都大学の 3 者を中心に、衛星搭載を目標とした純国産の X 線 CCD の開発を進めている。今までの CCD に対してピクセルの大きさを小さくすることにより、信号電荷の広がり方を測定し、偏光の測定を計画している。その他、超電導を用いた X 線スペクトロメーター、数十 keV の高エネルギー X 線が撮像が可能なスーパーミラーの開発などが注目されている。

この論文では、上記の国産 X 線 CCD の研究と、この CCD を用いた、衛星軌道上での放射線損傷の研究を報告する。

[12] アメリカの衛星は AXAF といい imaging が売り物、ヨーロッパのは XMM(X-ray Multi Miror) という。どちらも CCD を使っている

第 2 章

浜松ホトニクス CCD

この chapter では将来衛星搭載を目指して 浜松ホトニクス、大阪大学、京都大学の 3 者が中心となって研究開発を進めている X 線用 CCD チップの性能評価を報告する。

2.1 チップ概要

浜松ホトニクスで製作され我々が今回駆動したチップ (S5467) は以下の 2 種類に分類できる。

- 512×512 ピクセル ノッチなし。
- 1024×1024 ピクセル ノッチあり。

ノッチとは、電荷転送の経路を小さくすることにより、信号電荷が出合うトラップの個数を減らし、電荷転送効率の向上を図ったタイプの CCD である (図 2.1)。 512×512 ピクセルノッチなしのチップが標準的チップであり、京都大学には 10 個以上納品されおり、性能評価はこのチップを中心に行なった。 1024×1024 ピクセルノッチありのチップは 1 つだけあり、電荷転送効率の測定を行なった。 CCD の諸パラメーター (浜松ホトニクスの発表値) を表 2.1に記す。

2.1.1 SIS と XIS と浜松ホトニクス CCD の違い

比較のため SIS と XIS と浜松 CCD の違いについて簡単に触れておく。これらは CCD であるという点で同じであるが、違いもある。 SIS と XIS に比べ 浜松ホトニクス CCD は、

- ピクセルの大きさ (面積) が $\frac{1}{5}$
- 空乏層が薄い ($\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}$)
- 2 相 CCD である。

などがあげられる。ピクセルの「体積」は浜松ホトニクス CCD の場合 $\frac{1}{10}$ になり、 SIS や XIS と比較するとき注意が必要である。

2.2 駆動方法、データ取得方法、解析方法

2.2.1 駆動方法、駆動環境

CCD の駆動には京都大学宇宙線研究室の CCD ドライブシステム (Ozaki (1994)) を用いた。 CCD の effective ピクセル (1024×1024 又は 512×512) に対し、オーバークロック領域を含め 1088×1088 又は 576×576 ピクセルの読みだしを行なった (図 1.5参照)。

駆動速度は基本的に、 1 ピクセル当たり、 60μsec である。よって全てのピクセルの読みだしに必要な時間は、 576×576 ピクセル分の駆動の場合で 20sec、 1088×1088 ピクセル分の駆動で 71sec である。 CCD の転送方式は full frame transfer 方式である。これは frame transfer 方式や inter line 方式とは違い、転送用の領域をもたない。よって転送中に得た X 線イベントと蓄積中のイベントとは区別できない。そこで、蓄積時間を転送時間より十分大きくとること、又は 転送中の X 線はシャッターでカットすることにより解決をはかった。駆動温度は室温 ~ 摂氏 -135 度である。温度コントロールは 0.1 度の単位で行なった[1]。又 露結を防ぐため、冷却を真空中で行なった。

[1] 温度計 (熱電対) は CCD チップからやや離れた所についており、 CCD チップの温度とは一致していないかも知れない

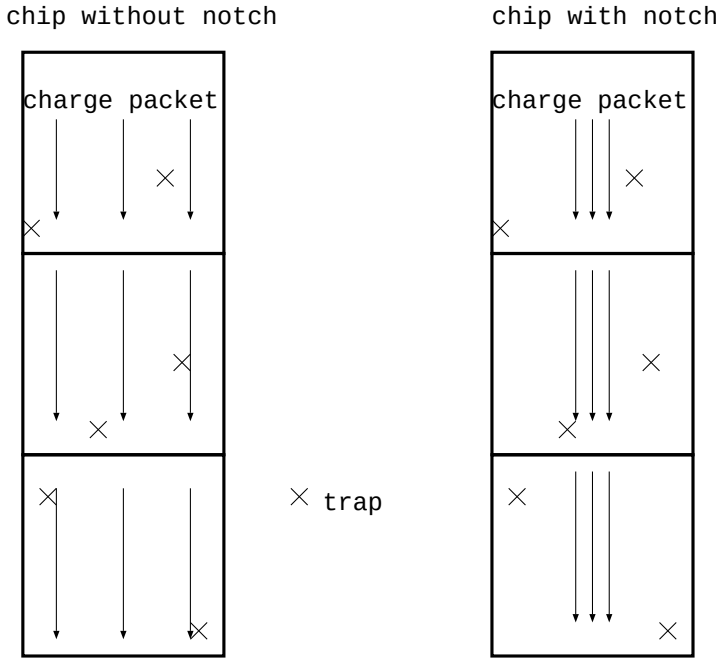

図 2.1: notch と notch なしチップの違い。ノッチチップは電荷転送の経路が小さく charge packet の出合うトラップの数が小さい。

dark current	1.6 electron/sec/pixel(normal mode @ -40degree)
	0.30 electron/sec/pixel(MPP mode @ -40degree)
sensitivity	1.8μV/electron
capacity	60000electron
C.T.E.	0.99995
read noise	10 electron r.m.s
confuguration	full frame transfer
format	512×512 or 1024×1024
depletion depth	6 or 10um
dead layer	1.5 um
pixel size	12μm×12μm
vertical clock phase	2 phase
horizental clock phase	2 phase
chip size	13.6mm×14.4mm
output	1 stage MOSFET source follower

表 2.1: 浜松ホトニクス CCD チップ概要

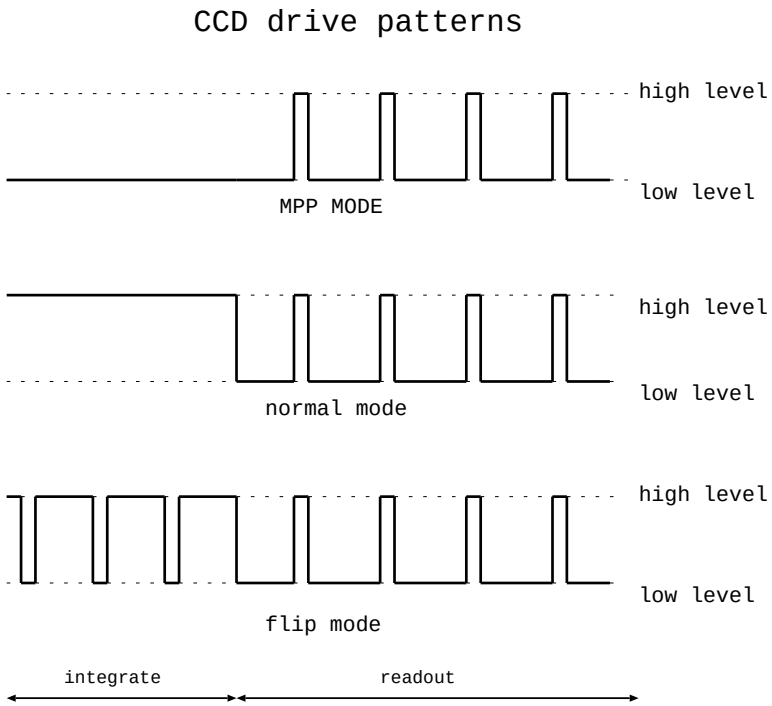

図 2.2: CCD ドライブパターン。転送方法に違いはなく、蓄積中の電圧のかけ方が違う。 MPP mode は 2 相ともに LOW level にする。

クロックパターン

我々のシステムでは ピクセルに high level と low level の 2 つの電圧しかかけることができない。クロックパターンとは high と low の選択 (1bit) の時系列である。クロックパターンは基本的に MPP mode(Multi Pinned Phase mode) と呼ばれるものを採用した。これはダークカレントを抑えるために、蓄積中にピクセルにかける電圧をできるだけ低くした (low level にした) ものである。その他 実験を行なったパターンは、 normal mode、 flip mode の合計 3 種類である (図 2.2)。 3 者において違いは蓄積中の電圧のかけ方に違いがあるだけで、転送方法は共通である。この論文にある実験では通常 MPP mode で駆動しているが、空乏層を厚くするために用いたのが normal mode で蓄積中に高い電圧をかけている (high level にしている)。しかし その場合 ダークカレントの増加が予想されるので、対処するために用意したのが、 flip mode(基本的に high level で周期的に一瞬だけ low level におとしている) である。 MPP mode を使うとダークカレントが減るのは、表面準位を介してながれるダークカレントを抑えることが出来るためである。 CCD の電極にかける電圧をある一定レベル以下[2]にすると絶縁層 (酸化膜) とバルク (空乏層をなす部分) の境界面にホールが集まってくる (反転層の形成)。このホールが表面準位を登っている電子と再結合し、ダークカレントを抑えるわけである。ホールは絶縁層の近くだけに集まるのであるから、バルク中のトラップ (金属トラップなど) には効果はない。表面準位を登るには時間がかかるので (この時間は温度による) その時間内は反転層を形成しておく必要はない。つまり空乏層を厚くするために電圧を高くしておき、電子が表面準位を登ってきそうになったら反転層を形成し表面準位の電子を再結合でなくせばよい。再結合は 1μsec より小さいタイムスケールでおこるので、反転層の形成は一瞬でよい。この原理を利用して電荷蓄積中に high としている蓄積電圧を周期的にわずかの間 low にしたのが、 flip mode である (Burk and Gajar (1991))。蓄積中にピクセルの全電極を low レベルにできるのはピクセル内のイオンにより、電極にかける電圧に関わらず信号電荷を 1 ピクセル内に蓄積できるからである (図 1.2)。このため図 1.1の 3 相 CCD では信号電荷をピクセル内に蓄積できず、最低 1 相は HIGH レベルにしなくてはならない。 2 相 CCD とバーチャルフェイズ CCD はダークカレントを抑える有効手段になっているわけである。

2.2.2 データ取得

我々が実験で使用したデータ取得システムは京都大学宇宙線研究室のシステムで、概念図は図 2.3の通りである。 CCD からの信号は ADC(Analog to Digital Converter) [3] でデジタル信号へ変換される。 ADC は VME 上で動き、

[2] 浜松ホトニクス CCD の場合 -7V 以下のようである。因みに推奨値は -8V である。

[3] (株) プロフォートの「PVME-341」(12bit) を使用した。

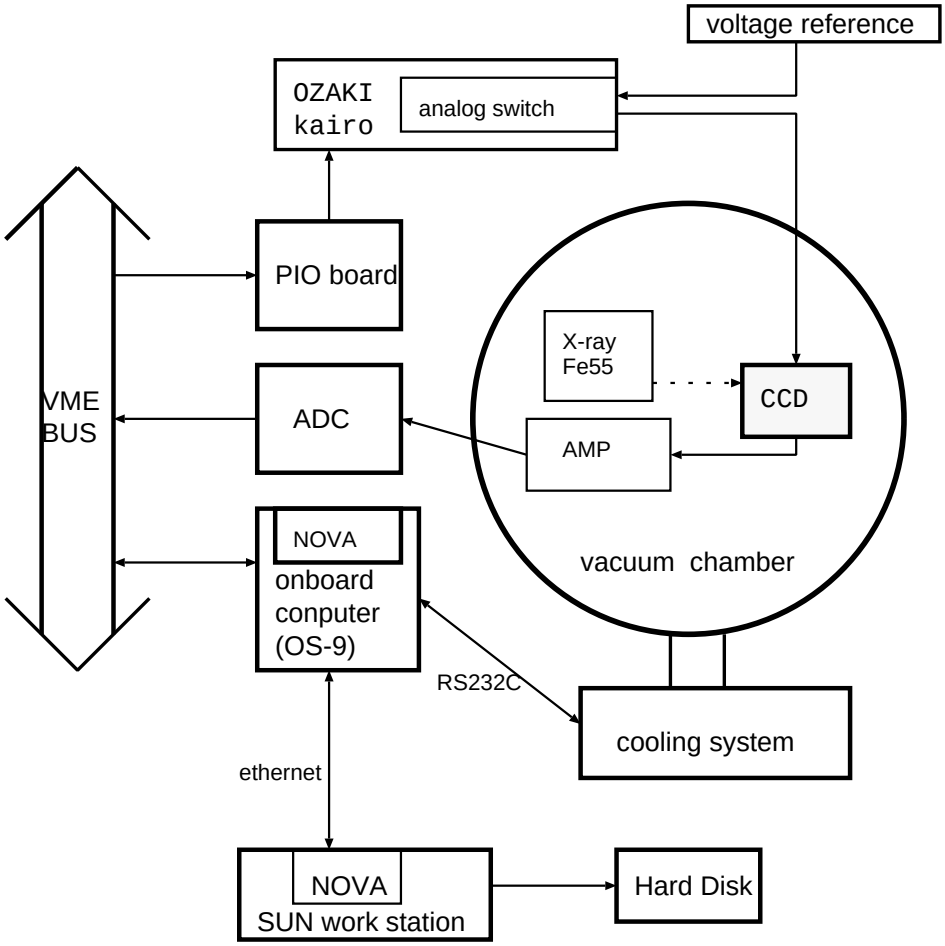

図 2.3: 京都大学宇宙線研究室 DAQ システム。データは CCD→ ADC→ OS-9→ UNIX→ hard disk と転送される。

データは VME のコントローラーとしての OS-9 へ転送される。さらにデータはソケット通信を用いて UNIX work station へ転送され、最終的にハードディスクへ書き込まれる。

CCD からの出力される波形は図 2.4のような形で、我々の必要としている情報 (=$\mathrm{PH_{raw}}$) は float level と signal level の差である。

$$\mathrm{PH_{raw}} = \mathrm{float\ \ level} - \mathrm{signal\ \ level} \tag{2.1}$$

ADC で このアナログ信号をデジタル信号に変換するわけであるが、 ADC でのサンプリングを図 2.4の 4 点で行なった。これを相関 4 重サンプリングという。サンプリングのタイミングはパターンジェネレーターから出される。 データは 1 フレームごとに温度や駆動パターン取得時刻などを書いたヘッダー部分とをつけて全てのピクセルのパルスハイト情報とともに OS-9 から UNIX へ転送される[4]。ピクセルごとのデータはゼロレベルを引いた pixel level でなく、 $\mathrm{PH_{raw}}$ の値をイベントセレクトなどはせず全てを記録した[5]。

2.2.3 データ解析

データ解析の際 ゼロレベルの代用として用いるオーバークロック領域は、 vertical over clock reigon を使った。我々が知りたい情報は蓄積中に受けた情報であるが、蓄積中の情報を持つ effective 領域のデータは縦転送中に受けた影響があり、それらは差し引くべきである。よって、断りがない限り 今後この論文に渡って、ゼロレベルは V.O.C.region のピクセルレベルの平均を取ることにする。ダークのアップデートは基本的には行なっていない。

浜松ホトニクスの CCD では、 X 線による信号電荷が 1 つのピクセルに収まらないイベントが多い (図 2.5)。 十分空乏化していない領域があり、そこでとらえられた X 線による信号電荷がゆっくり拡散し、 1 つのピクセルに収ま

[4] 実はヘッダーに書いてあるパターンやチップの番号はいい加減である。又、 1 フレームのデータのフォーマットは構造体で定義されており、そういう点では 2 つの部分に大別できてない

[5] 3 章の放射線損傷実験を含めたすべてのデータを集めると、そのデータの量は数十ギガバイトにもなる。

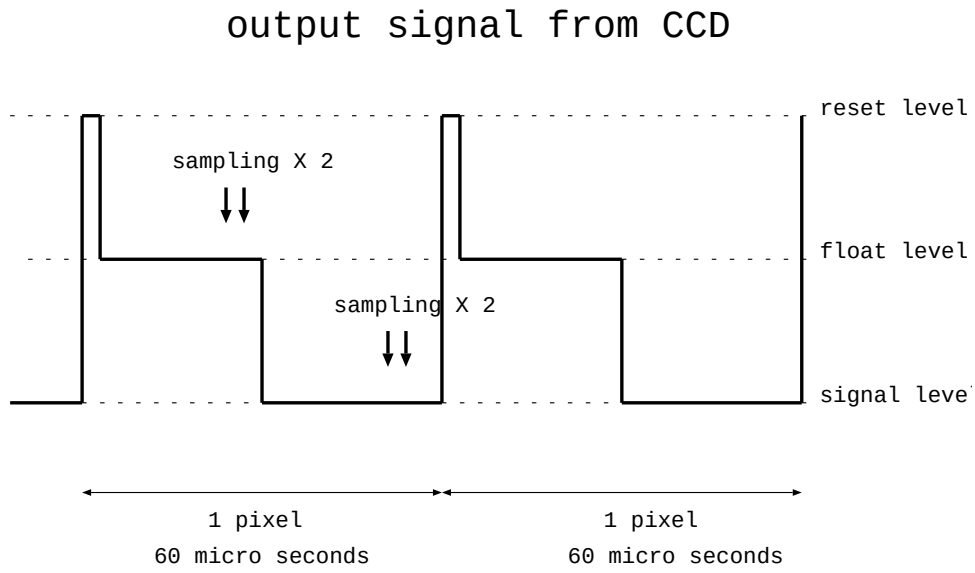

図 2.4: CCD からの信号。1 ピクセルの信号にはリセットレベル、フロートレベル、シグナルレベルの 3 つがある。フロートレベルとシグナルレベルの差が我々の求めている情報である。

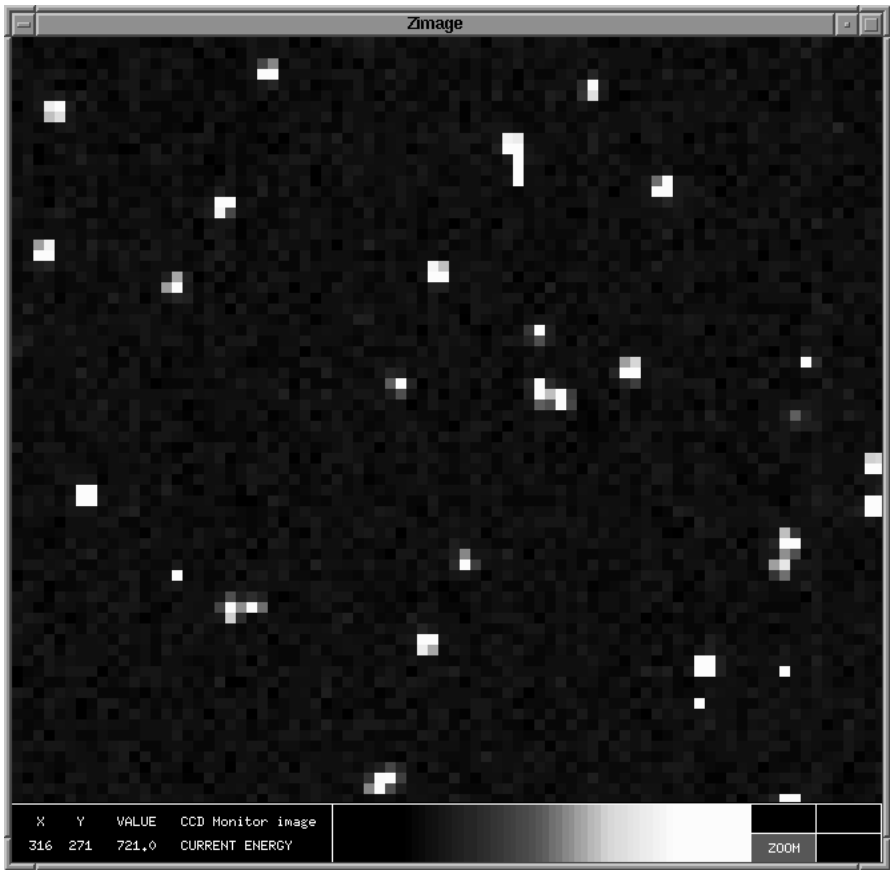

図 2.5: X 線照射イメージ。白い部分が PH の大きいピクセルである。複数のピクセルに広がった X 線イベントが多数ある。

らないためと考えられる[6]。衛星上では統計を稼ぐ理由で拡散したイベントもデータ処理しなければならないが、今回は 1 つのピクセルに収まった X 線イベントのみ (シングルピクセルイベント) を評価することにした。我々の評価方法では X 線は Fe^{55}(5.9keV,6.4keV) のみを照射しているので、 event select において event threshold はあまり厳密にこだわる必要はない。問題となるのは、 split threshold である。 split threshold が小さ過ぎると、イベントが減ってしまう。大き過ぎると、エネルギー分解能はおちる。標準的には、 0.3keV を基準としている。又 我々のデータ取得システムでは 1 ADU = 約 3 electron である (チップにより多少異なる)。

次のセクションより実験結果について述べる。

2.3 暗電流

ダークカレントにはいくつか種類がある。例えば、空乏層領域での熱励起、酸化膜界面での表面準位による熱励起、中性バルク領域での熱励起と拡散 などがあげられる。暗電流はデバイス内での熱的なエレクトロンの生成に起因し、そのノイズのためデバイスのパフォーマンスを制限する。

2.3.1 trap によるダークカレント

我々はまずダークフレームのスペクトルを製作した。データ取得環境と解析方法は

- X 線は当てていない。
- 積分時間は 150 秒。
- 全転送時間は 20 秒 (1 ピクセル当たり 60μsec)。
- MPP mode で取得。
- クロック電圧は +6.7V と -8.0V。
- チップはノッチなし。
- 温度は -4 度、 -9 度、 -14 度、 -19 度の 4 点
- 各温度 1 フレーム取得
- ゼロレベルは V.O.C.region の平均である。

である。スペクトルを図 2.6に示す。各温度、ピークが 5~6 本見られる。又、それらの間隔は等しい。これは単一のエネルギーレベルを持つのトラップによるダークカレントであると考えられる。つまり、トラップが 1 つもないピクセルはダークカレントが少く、図 2.6で一番左のピークを形成する。同様にトラップが 1 つ存在するピクセルは、同じ図で左から 2 番目のピークを形成する。トラップが 2 つ、 3 つ、 4 つの場合も同様である。図 2.6でピークとピークの間隔は、同じ温度であれば どれもほぼ同じであり、この間隔がトラップ 1 つによってながれるダークカレントであろうと考えられる。この間隔を温度ごとに測定した結果が、図 2.7である。トラップを介するダークカレントの大きさ I の温度依存性は近似的に

$$\mathrm{I} \propto \mathrm{T}^2 \cdot \frac{1}{\exp(-\frac{\mathrm{E_t}-\mathrm{E_v}}{\mathrm{k_B T}}) + \exp(-\frac{\mathrm{E_c}-\mathrm{E_t}}{\mathrm{k_B T}})} \tag{2.2}$$

と表すことが出来る (付録 A 式 A.10参照)。 T は絶対温度、 E_t はトラップのエネルギー準位、 E_v は価電子帯の頂上のエネルギー準位、 E_c は電導帯の下端のエネルギー準位、 k_B はボルツマン定数である。摂氏 -30~10 度付近では exp の項が支配的である。式 2.2を図 2.7にフィットして E_t を求めると、 E_t = 0.55eV であった。この準位に近いトラップを生ずる物質として、 Au(0.54eV)、 Cu(0.53eV)、 Zn(0.55eV)、 Fe(0.55eV) があげられる。トラップはスタートウェハに最初からあったか製造過程で混入した不純物であるらしい。現在の所 物質は何であるかわかっていないが メーカーによればおそらく鉄であろうと考えられている (Miyaguchi 1996)。以後このトラップを金属トラップと呼ぶ。

[6] Ono (1996) 参照

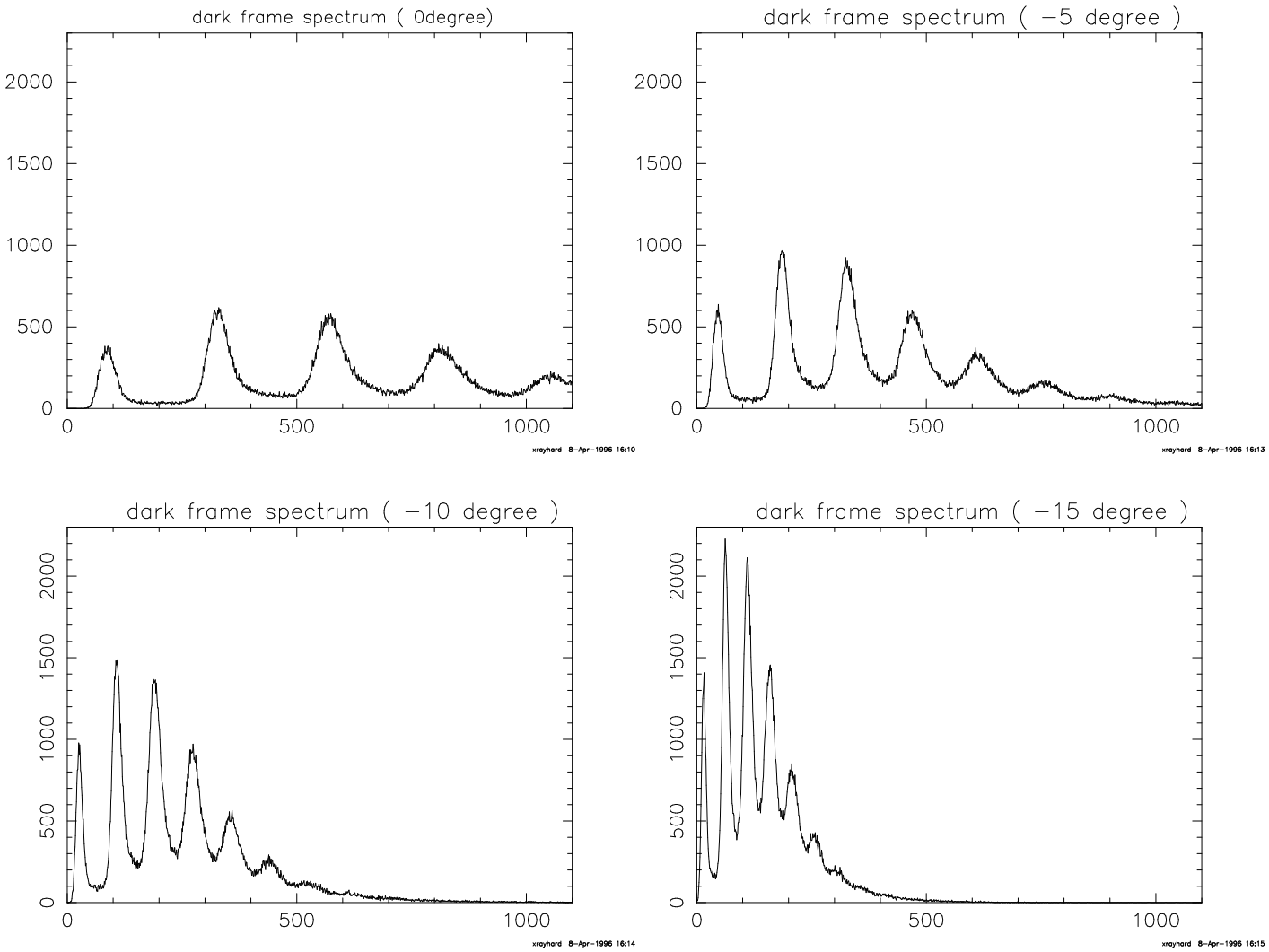

図 2.6: ダークカレントスペクトル (X 線はあてていない)。左上： -4 度、右上： -9 度、左下： -14 度、右下： -19 度ゼロレベルとして VOC の平均を引いている。横軸はダークカレントであるが ADU の単位でかいてある。 $1\mathrm{ADU} = 0.02\ \mathrm{electron/sec/pixel}$ である。

次にトラップのチップ上での分布の仕方をみよう。異なる 2 つのチップの温度 -10 度付近における CCD イメージを図 2.8に示す。明るい (白い) 部分がパルスハイトの高いピクセル、すなわちトラップの多いピクセルである。明らかに一様な分布ではなく、一部に偏って分布しているようである。又 チップによって分布の仕方も異なる。

1 ピクセルにあるトラップの個数の分布を示したのが図 2.9である。 1 ピクセルに平均 2.6 個のトラップが分布しており、図 2.9には 参考に平均 2.6 のポアッソン分布も示した (点線) [7]。 1 ピクセルが $12\mu\mathrm{m}\times12\mu\mathrm{m}$ であるので、約 2×10^6 個 $/\mathrm{cm}^2$ のトラップが存在する。

2.3.2 trap 以外のダークカレント

図 2.6を見て分かるように、トラップがゼロのピクセルでもダークカレントは存在する。これがバルクの数個の別の金属トラップによるものであるなら、トラップの個数分布はポアッソン分布に従うので金属トラップの様にいくつかのピークを示すであるが そうはなっていない。表面準位によるダークカレントである可能性がある[8]。このダークカレントは全てのピクセルに共通で、金属トラップの有無には関係ない。金属トラップがゼロのピクセルのダークカレントの温度変化を図 2.10に示す。温度依存性は金属トラップの場合 (図 2.7) と変わらないようである。摂氏 -60 度以下になればダークカレントはそれ以上減らずに一定になる。これは実験に用いた真空センサーが光を出しそれが

[7] 一様に分布してないので本当はポアッソン分布にはならない。ポアッソンはあくまで参考である。

[8] これは蓄積中の low レベル電圧を変えることなどによって確認できる。今後の課題である

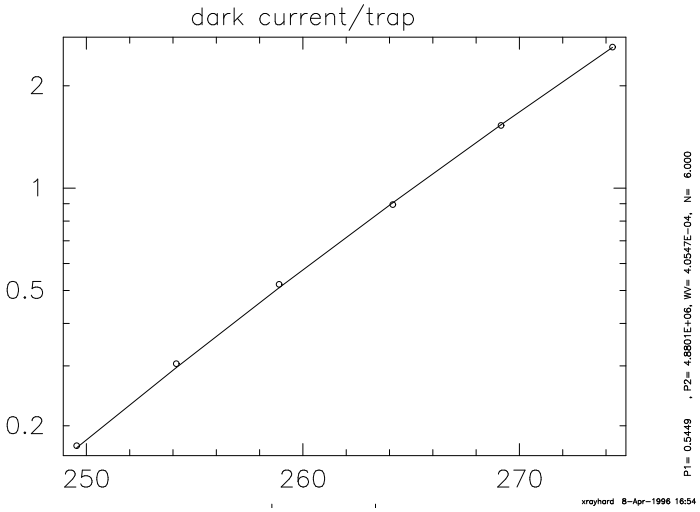

図 2.7: トラップ 1 つ当たりのダークカレント。横軸は温度 (linear)、縦軸ダークカレント (log)。

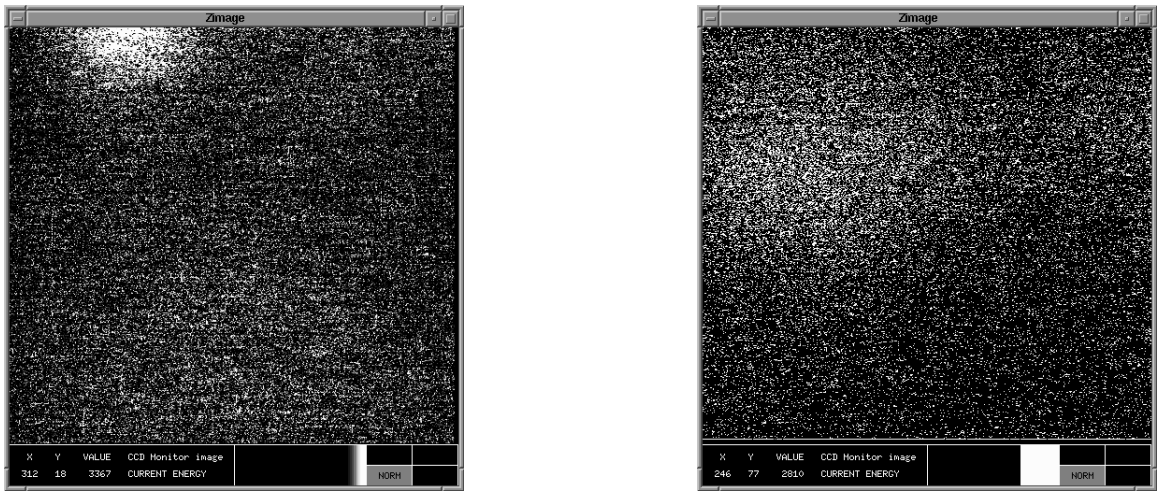

図 2.8: trap の分布。 2 つの異なるチップについて示す。白い部分が trap の多いピクセルである。左のチップでは一箇所にかたまり、右のチップはチップの半面に散らばっている。チップにより違いがある。

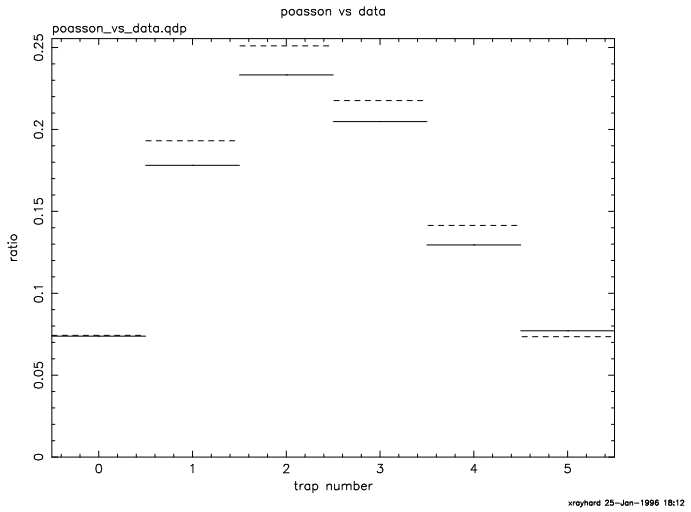

図 2.9: 1 ピクセル当たりのトラップの個数。実線はデータ。点線は平均 2.6 のポアッソン分布である。

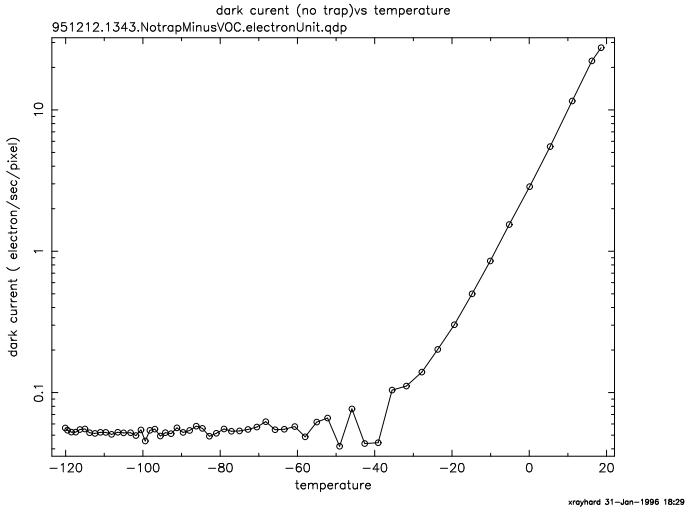

図 2.10: トラップのないピクセルのダークカレント。横軸温度。縦軸ダークカレント (electorns/sec/pixel)

パターン	ダークカレント:-90 度 (electrons/sec/pixel)	ダークカレント:-60 度 (electrons/sec/pixel)
MPP mode	0.055	0.064
normal mode	0.058	0.109
flip mode	0.059	0.068

表 2.2: 蓄積中の電圧の違いによるダークカレントの違い

CCD に入ったためで真のダークカレントではない。

図 2.6をみると、ピークとピークの間にもある程度の残差がある。図 2.6(左上) で ∼280ADU までは金属トラップのないピクセルのダークカレントである。金属トラップのないピクセルのダークカレントは 2 つの成分にわけることができる。ピークを作る部分と、高いレベルに伸びるテイルの部分である。テイルの部分は統計的揺らぎではなく、ピクセルの個性である。テイルのピクセルのダークカレントも 温度特性は金属トラップのピクセルや金属トラップのないピークを作るピクセルと同じで原因ははっきりしない[9]。

2.3.3 クロックパターン

我々は蓄積中の電圧が違う 3 つのパターンについて実験をおこなった。 3 つのパターンは MPP mode、 normal mode、 flip mode の 3 つである (section 2.2.1)。 3 つのパターンに対する結果が表 2.2である。 -60 度では MPP mode から normal mode へ変えると、ダークカレントの増加が確認された。さらに flip mode でダークの減少が確認された。しかし -90 度では 3 者に違いは確認できなかった。蓄積中のダークカレントで減少した分は 表面準位によるダークカレントと考えられる。つまり -60 度でも表面準位によるダークカレントが 0.04 electron/sec/pixel ほど存在する。 -90 度まで下げると ダークカレントは蓄積中の電圧を変えても変化は確認できず、表面準位によるダークカレントは非常に小さいようである。

2.3.4 クロック電圧依存性と縦転送による影響

転送クロック (+ 側) 電圧とダークカレントの関係を示したのが図 2.11である。データは MPP mode で取得した。このグラフでは縦転送中にながれたダークカレントの大きさも示した。縦転送中にながれたダークカレントとは、

$$\frac{\mathrm{PH_{raw}(vertical\ \ overclock\ \ region)} - \mathrm{PH_{raw}(horizentl\ \ overclock\ \ region)}}{\text{転送時間}} \tag{2.3}$$

である。図 2.11から 蓄積中のダークカレントはクロック電圧によらないが、縦転送中のダークカレントは転送クロック電圧に強く依存し値も大きい。

[9] これも 蓄積中の電圧を変えれば分かるであろう。

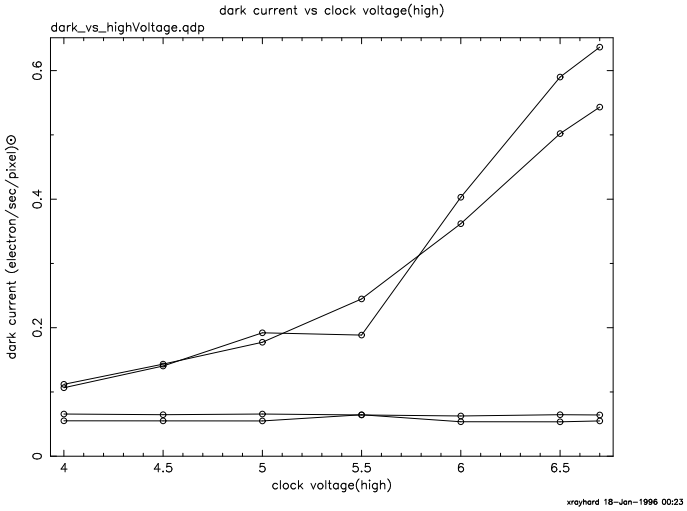

図 2.11: ダークカレントとクロック電圧の関係。
横軸: クロック電圧 (+)、縦軸: ダークカレント 温度は -90 度と -60 度
parallel 転送中のダークカレントも示した。 parallel 転送中のダークカレントは電圧に大きく依存するようである。

2.4 電荷転送効率

CTI は parallel 転送にともなう CTI(parallel CTI) と serial 転送に伴う CTI(serial CTI) にわけられる。 parallel transfer を行なう領域と serial register(図 1.4) は構造的には大きさの違いがあるが、大きな影響は及ぼさない。一方 転送速度が両者で大きく違い、 CTI に大きく影響する。

実験 (データ取得) 環境は以下の通りである。

- 温度は -60 度、 -90 度、 -120 度の 3 点でデータを取得した。
- パターンは MPP mode である。クロック電圧はノッチチップは +6.0V と -8.0V ノッチなしチップは +6.7V と -8.0V である。
- X 線 (Fe^{55}) を当てたデータと当てていないデータをそれぞれ 10 フレーム以上取得した。
- 蓄積時間はノッチなしチップ (512×512 ピクセル) の場合 150 秒、ノッチチップ (1024×1024 ピクセル) の場合 60 秒、転送時間はノッチなしチップで 20 秒、ノッチチップで 71 秒であった。
- ノッチチップの場合は蓄積時間に比べ転送時間が長いため、転送中は X 線を検出しないように、シャッターで X 線をカットした。ノッチなしチップは転送中も X 線は入っている。

以上の様にしてとられたデータに対し、以下の様にして CTI を計算した。

1. X 線を当てたデータに対し各フレームで、ゼロレベルは V.O.C.region の平均とした。
2. 同じ温度、同じクロック電圧で X 線を当てなかった各フレームにおいてゼロレベルを V.O.C.region の平均とて差し引き、複数のフレームを平均した。
3. 1 のデータに対し、 2 のデータを dark frame として差し引いた。
4. 3 のデータに対し、 parallel CTI を求めるために effective region を 2 つの領域に分けて X 線を当てたフレームの X 線スペクトルを作った。領域の分け方は図 2.12の通りである。
5. serial CTI を求めるために parallel CTI と同様にしてスペクトルを作った。但し領域の分け方は異なる (図 2.12)。
6. 2 つに分けた領域の X 線のピークの中心値をそれぞれ求めた。求め方は、 (ガウシアン $+E^{\Gamma}$) という式でスペクトルを fitting することにより、 best fit value を中心値とした。これを parallel CTI と serial CTI の両方で行なった。
7. 2 つの領域の X 線ピークの値の差から CTI を求めた。具体的には、差を ΔE、読みだしに近い方の X 線ピークのエネルギーを E とすると

$$CTI = \frac{\Delta E}{E}\frac{1}{240} \tag{2.4}$$

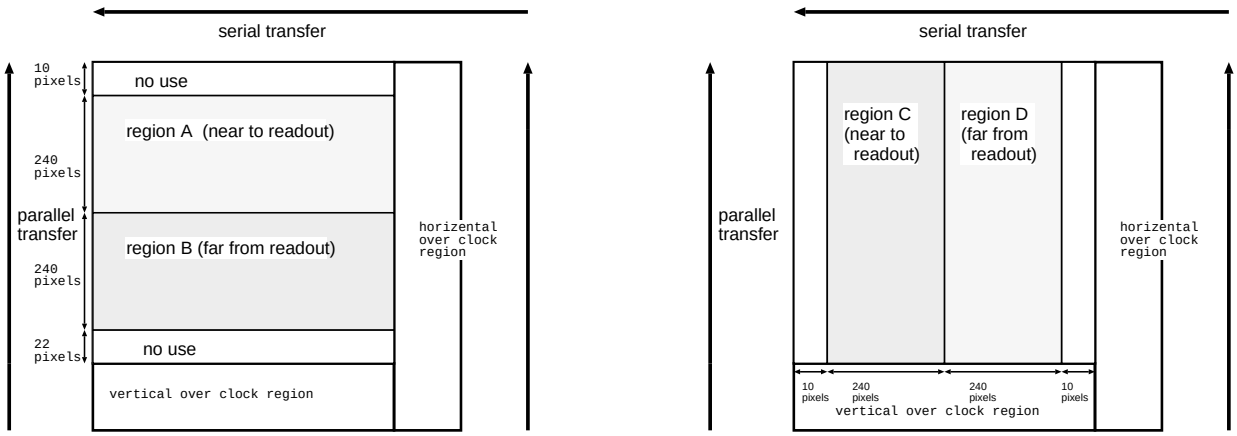

図 2.12: 縦転送 (parallel)CTI と横転送 (serial)CTI を求める時の領域の分け方。左 parallrl CTI、右 serial CTI。CCD の image で端の方は除去している。

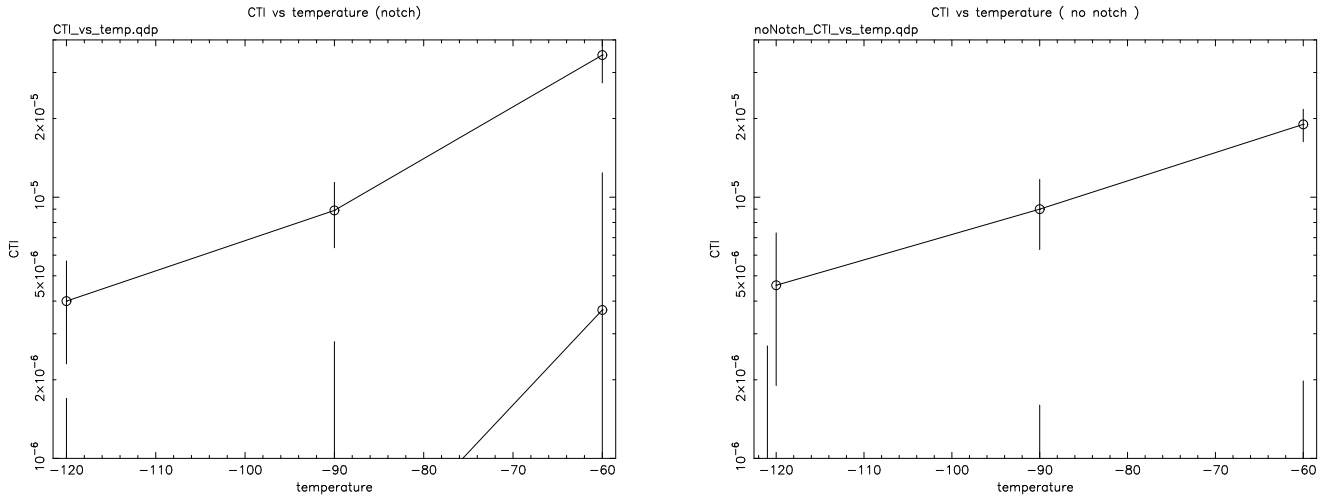

図 2.13: ノッチチップ (左) とノッチなしチップ (右) の CTI。各々のグラフで 2 本の折れ線は parallel 転送と serial 転送の CTI である。上が parallelCTI で温度依存性が見られる。 notch の効果はあまりない。 serial 転送の CTI は上限値が分かったのみである。

である (式 1.2参照)。これを parallel CTI と serial CTI の両方について行なった。

結果は図 2.13である。ノッチタイプの CCD で parallel 転送 CTI の向上は確認できなかった。 serial 転送に関しては、上限値が求められたのみで、もっと統計をあげない限り測定は難しい[10]。又 温度依存性が見受けられ、温度が低い方が転送効率はいいようである。これは温度が低い方がトラップの電荷再放出タイムスケールが大きいためであろう。

2.5 ノイズ

最終的にエネルギー分解能を決定する上で障害になるノイズは 3 種類考えられる。読みだしノイズ、ダークカレントの時間的なばらつき、 fano factor に起因するもの、である。 fano factor については次章で紹介する。この section では、読みだしノイズについて議論する。読みだしノイズの正確な定義は難しいが、ここでは「H.O.C.region のピクセルの PH_{raw} の標準偏差」と定義した。この値は CCD チップ本来の読みだしノイズに加えて、 CCD output 以後のアンプのノイズ、外来ノイズも含まれ、 CCD 本来の読みだしノイズの上限値を与えている。

[10] 単に X 線の強度をあげればいいわけではない。強度をあげれば X 線による信号電荷がトラップを埋め CTE を見かけ上良くしてしまうからである。

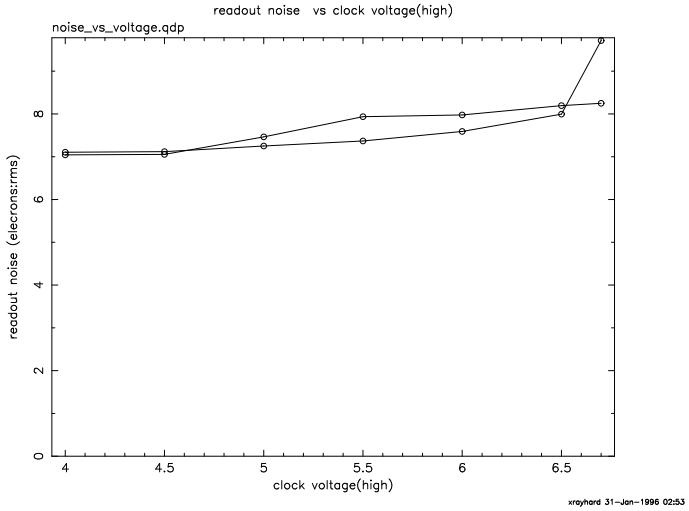

図 2.14: 読みだしノイズのクロック電圧依存性。ややクロック電圧の依存性が見られる。

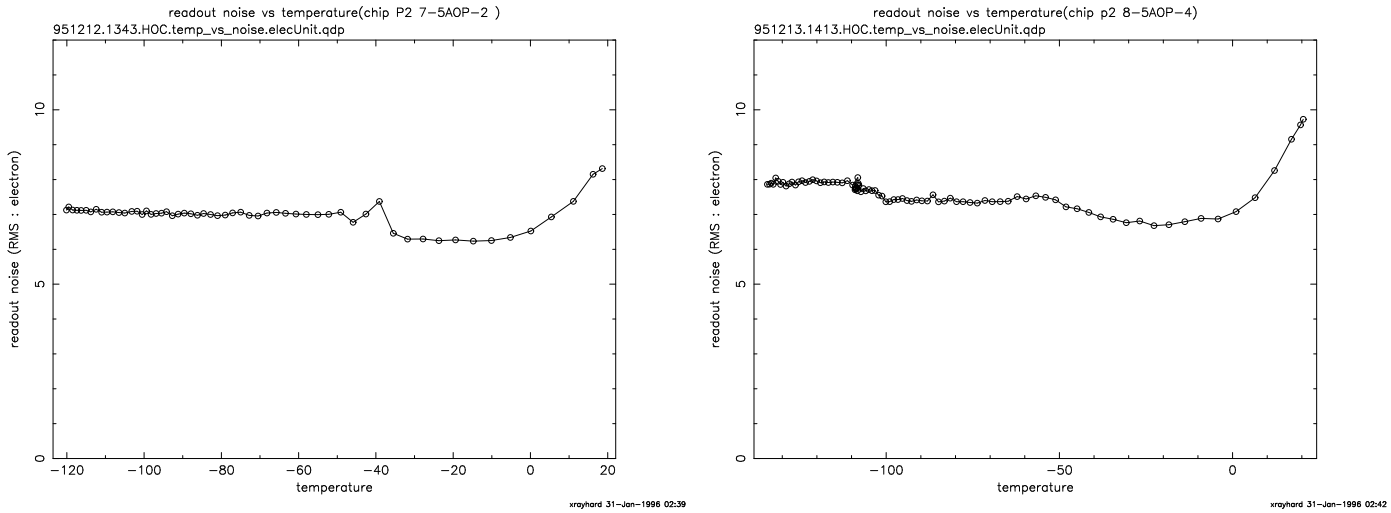

図 2.15: 読みだしノイズ温度依存性。異なる 2 つのチップの結果を示す。ともにノッチなしのチップの結果である。

クロック電圧依存性

読みだしノイズのクロック電圧 (high level のみ) 依存性を図 2.14に示す。温度は -90 度、クロック電圧 (low level) は- 8.0V である。微妙だが 電圧が低い方が 読みだしノイズは小さい傾向にある。

温度依存性

2 つのチップの結果を図 2.15に示す。図 2.15より、やや温度依存性が伺える。温度の単調減少ではなく、摂氏 -20 度近くで、極小を示す傾向がみえる。理由は現在のところ分かっていない。

2.6 エネルギー分解能

CCD のエネルギー分解能を決定するファクターとしては

- Fano noise
- ダークカレント
- 読みだしノイズ

チップ	温度	蓄積時間	転送時間	クロック電圧 (+)	エネルギー分解能 @5.9keV(eV:FWHM)	
					S.T.=300eV	S.T.=100eV
ノッチなし	-60	150	20	6.7	174	153
	-90	150	20	4.0	150	141
	-90	150	20	5.0	167	157
512×512pixels	-90	150	20	6.0	177	159
	-90	150	20	6.7	216	193
	-115	150	20	6.7	157	149
ノッチあり	-60	60	72	6.0	374	322
	-90	60	72	6.0	188	177
1024×1024pixels	-120	60	72	6.0	189	180

表 2.3: エネルギー分解能。 split threshoulde(S.T.) は 100eV と 300eV の 2 種類。イベントはシングルピクセルイベントのみである。取得フレーム数は統一していない。

- CTI

が考えられる。 X 線のエネルギーの内 ある量は electron-hole pair を作らないプロセスによってシリコン格子に移され、実際に発生する electron-hole pair の数にわずかな統計的差が生じる。この不確かさは Fano によって公式化され、 Fano factor として特徴づけられる。この不確かさから生じるノイズが Fano noise である。

$$\text{Fano noise} = \sqrt{\frac{\text{photon energy(eV)}}{3.65} \times \text{Fano factor}} \quad \text{electrons(rms)} \tag{2.5}$$

と関係づけられる。 Fano factor は検出器の最終的なエネルギー分解能の限界に影響を及ぼす。実験的かつ理論的な Fano factor は ∼0.12 である。 Fano factor=0.12 とすると、 5.9keV の X 線に対して、 120eV(FWHM) の影響を及ぼす。ダークカレントはそのピクセルごとの あるいは時間的なばらつきがノイズになる。

チップはノッチのあるチップとないチップの 2 種類の CCD について、エネルギー分解能の評価を行なった。 X 線は (^{55}Fe:5.9keV と 6.4keV) を照射した。データは複数のフレームを足しあわせ、ゼロレベルは V.O.C.region の平均をとった。ダークフレームは引いていない。スペクトルはシングルピクセルイベントのみを集めて作った。エネルギー分解能は Mn K_α = 5.9keV のラインをガウシアンでフィッティングすることにより計算した。 split threshould は 300eV と 100eV の 2 通り、温度は -60 度、 -90 度、 -120 度の 3 通りである。 -90 度では、クロック電圧を変化させてデータを取得した (但し ノッチなしのチップだけ)。結果は表 2.3の通りである。 -90 度での、ノッチなしチップのシングルイベント (split threshould = 100eV) のスペクトルを図 2.16に示す。

クロック電圧が低いほど、エネルギー分解能がいいようである。クロック電圧にエネルギー分解能が依存するのは何故であろうか？。エネルギー分解能を決定する要因としては、読みだしノイズ、ダークカレント、 CTI があげられる。エネルギー分解能は -90 度の転送クロック電圧 + 4V と + 6.7V で 141eV と 193eV の違いがある。これだけの違いを生むには、

$$\sqrt{193^2 - 141^2} \quad = \quad 132\text{eV(FWHM)} \tag{2.6}$$

相当のノイズが必要である。 electron にすると、 35 electron (FWHM) = 15 electron(R.M.S) である。原因として転送クロック電圧によって読みだしノイズはほとんど変わらず寄与しない。 CTI は parallel で +6.7V の場合で 5×10^{-5} 程度、 4.0V で 1.1×10^{-5} 以下であった。平均 250 pixel の転送があると思えば、 6.7V の場合、約 20electron の電荷の損失をうける。 parallel 転送にともなうダークカレントも変わり、 6.7V の場合 0.62electron/pixel/sec、 4.0V の場合 0.1electron/pixel/sec で、 1 フレームあたり、 10electrons/pixel の増加である。 CTI とダークカレントがエネルギー分解能に寄与していると考えられる。

2.7 空乏層

空乏層の厚さを測定する実験を行なった[11]。チップはノッチなしである。方法は、強度の分かってる X 線源[12]を CCD にあて、実際のフラックスと検出された X 線のカウント数を比較する。データ取得は MPP mode、クロック

[11] ここでは簡単な見積もりだけである。詳しい実験は 文献 9、 10 参照

[12] 京都大学宇宙線研究室の前田良知氏に比例係数管を用いて強度を測定していただいた。

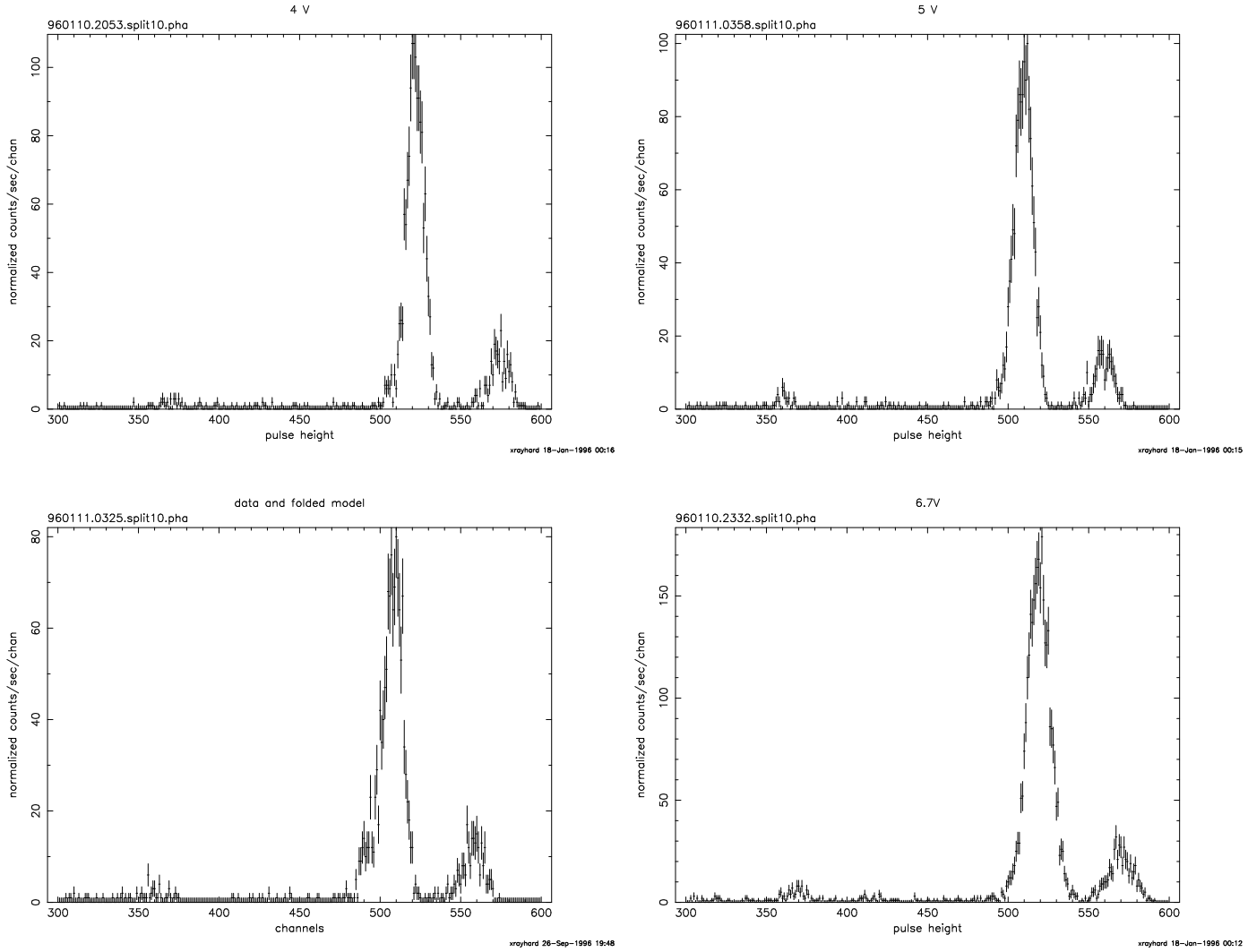

図 2.16: X 線 (^{55}Fe) スペクトル。シングルイベントのみ。 split threshould = 100eV。転送クロックの電圧によりエネルギー分解能が違う。左上：+ 4V、右上：+ 5V、左下：+ 6V、右下：+ 6.7V。転送クロックが低いほどエネルギー分解能は良い。 360ADU の付近に見えるのはシリコンのエスケイプ (5.90 - 1.74 = 4.11 keV) である。取得フレーム数は統一していない。

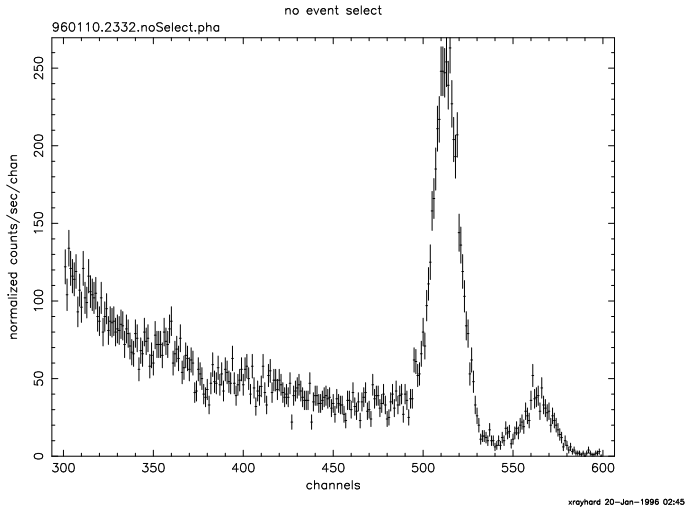

図 2.17: 浜松ホトニクス CCD の X 線 (Fe^{55}) スペクトル。イベントセレクトをしていない。シングルでないイベントが多く、低エネルギー側にカウントが多い。

	空乏層 (μm)
方法 1	8.9
方法 2	1.0
方法 3	0.6
方法 4	0.8

表 2.4: 空乏層の厚さ。浜松ホトニクスの発表値は 6μm である。

電圧 +6.7 V、 -8.0 V で行なわれた。 X 線イベントはシングルイベントでないものが多い。又、カウント数は split threshould に依存する。よって「検出された X 線のカウント」は、次の 4 通りを考える。

- 方法 1. X 線のトータルフラックスを X 線 1 つの平均エネルギーで割る。
- 方法 2. X 線スペクトルでイベントセレクトしていない生スペクトルで、 Mn K_α のピークの X 線イベントを数える。
- 方法 3. split threthould 100eV の Mn K_α のピークを X 線イベント数とする。
- 方法 4. split threthould 300eV の Mn K_α のピークを X 線イベント数とする。

CCD の電極などによる X 線の吸収は厚さ 2.2μm(Miyaguchi (1996)) のシリコンの一様分布を仮定した。結果は表 2.4の通りである。こうしてみると、シングルイベントの数が極端に少いことが改めて分かる。

2.8 エネルギー線形性

エネルギーと検出されたチャンネルとの線形性をチェックをおこなった。チェックするには、既知のエネルギーの X 線を照射することが必要である。既知のエネルギーの X 線としては、 Mn K_α、 Mn K_β、 Mn K_α のシリコンのエスケイプの 3 点で調べた。結果は図 2.18である。

上記の方法で統計が十分なのは Mn K_α、 K_β だけで、又 エネルギーレンジが狭い。視点を変えて 金属トラップのピークを使って議論する。図 2.6で同じ温度であれば、ピークの間隔は同じであるはずである。これを温度 -4 度でとったデータを使って確認しよう。もし ピークの間隔が同じでなければエネルギーの線形性が崩れていることになる。結果は図 2.19である。データはエラーの評価が難しく出せていないが (fitting のモデリングが難しい)、ほぼ直線に乗るようで、やはりエネルギーの線形性は 10keV 付近まで大きく崩れていることはないようである。しかし温度依存性は調べていないので今後の課題である。

2.9 まとめ

1. 金属トラップがあり 特に -40 度以上ではダークカレントに最も寄与している (MPP mode)。表面準位による

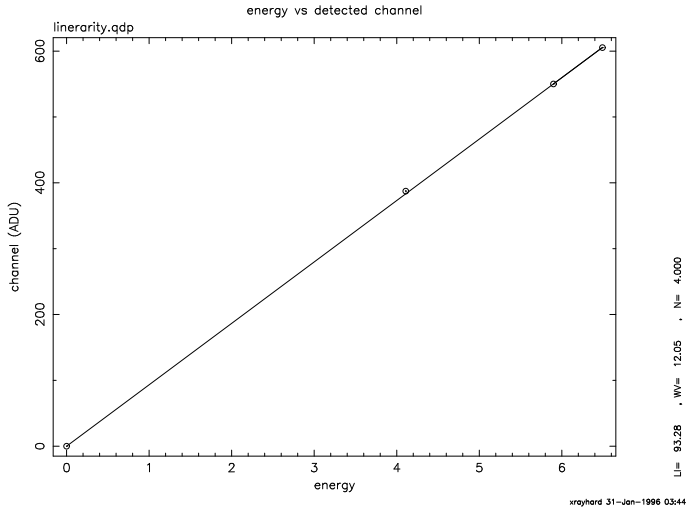

図 2.18: エネルギー線形性。縦軸は検出された channel、横軸は X 線のエネルギー (keV)。 X=0、 Y=0 は原点を示した点で実験データではない。残りの 3 点が実験データ。実線は原点を通る直線で fit したもの。

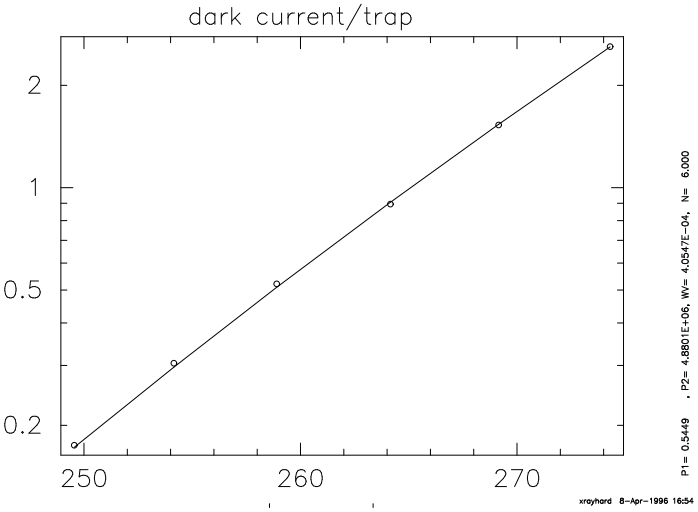

図 2.19: トラップによるダークカレントを利用した線形性のチェック。 5 つのデータは左から順に金属トラップないピクセルのダークカレントピークのパルスハイト、金属トラップが 1 つだけのピクセルによるダークカレントのピークのパルスハイト..... である。パルスハイトはゼロ点を引いていない。エラーは小さい。実線は直線でのベストフィットである。データはほぼ直線に乗る。もっとも高いパルスハイトは約 10keV に相当する。

ダークカレントよりも寄与は大きい。

2. 金属トラップはチップ内で非一様に分布していることが分かった。トラップは 1 ピクセルに 2∼3 個である。
3. クロックパターンの改良で、 normal mode におけるダークカレントを抑えることができる (-60 度)。但し温度が低くなると (-90 度) 効果はなくなる。これは表面準位によるダークカレントを抑えるためであろう。
4. 縦転送に伴う影響がダークカレントに現われる。ダークカレントは転送クロック電圧に依存し、電圧が低いほどダークカレントは小さい。
5. CTI は -90 度で、縦転送で 1×10^{-5} 横転送は 2×10^{-6} 以下であった。ノッチの効果は確認出来なかった。
6. CCD 出力後のアンプのノイズなどを含めた読みだしノイズはもっとも良いもので 7 electron(RMS) であった。
7. エネルギー分解能は転送クロックの high level 電圧に強い依存性を示す。クロック電圧が低いほど、エネルギー分解能はいい。 -90 度、クロック電圧を 4V にすれば、エネルギー分解能は 140eV(FWHM@6keV) となる。
8. シングルイベントでないものが多い。
9. エネルギーの線形性は 10keV までは、大きく崩れていることはない。

2.10 将来

浜松ホトニクス社の CCD は ASTRO-E 後の X 線天文衛星への搭載をめざしている。しかし、現状ではまだまだ不十分である。具体的には以下の項目があげられる。

1. 空乏層を厚くする。目標は 100μm。高い比抵抗のウェハーの入手が鍵になる。
2. ピクセルサイズを小さくする。目標 6μm。これはダークカレントの減少だけでなく X 線偏光の測定も目的としている。
3. チップを大きくする。実際には複数のチップを組み合わす、複数の読みだし口をつけるなどの方法がいる。
4. 読みだし口を複数つけて、 CTI、読みだし速度への影響を改善する。
5. 電荷注入ゲートをつける。これは CTI の測定と改善のために必要である。

将来衛星への搭載を目指すには まだまだ問題が多い。我々は さらに性能のいい X 線 CCD の開発に取り組んでいかなくてなならない。

第 3 章

CCD 放射線損傷

この章では最近 ASCA SIS で問題となっている CCD の放射線ダメージの問題を取りあげる。現在 ASCA は打ち上げから 3 年が経過しているが、 SIS では放射線の影響で劣化が激しく、ホットピクセルでテレメトリー[1]が飽和しがちである[2]。フリッカリングピクセルにより、ダークフレームエラーも激しい。この放射線ダメージによって軌道上の CCD の寿命が決まってしまう。我々は実際に CCD にプロトンを照射し、ダメージの詳細な性質と劣化を防ぐ方法、劣化した場合に性能を回復する方法を調べた。 CCD は 2 章で紹介した浜松ホトニクス CCD を、プロトン照射は京都大学理学部バンデグラフ型タンデム加速器を用いた。

3.1 これまでの研究

放射線による CCD への影響は大きく分けて 2 種類ある。イオン損傷とバルク損傷である。イオン損傷は放射線によって生成された electron-hole pair のうち、酸化膜内部でトラップされたホールが 正の方向へシフトする電圧を発生させる (フラットバンドシフトと呼ぶ)。フラットバンドシフトによる電圧の変化は 2∼3 volt 以上にもなる。フラットバンドシフトは例えばダークカレントの発生に寄与する。表面準位を介してながれるダークカレントは反転層の形成で軽減させることができる (section 2.3.4)。反転層の形成には十分低い電圧をかけなければならないが、ダメージ前の状態では反転層を形成できる電圧であっても、放射線の影響でフラットバンドシフトが起これば反転層の形成でできなくなり、ダークカレントの増大を招く。しかし最も CCD に及ぼす影響が大きいのはバルク損傷である。これは放射線がシリコン原子と相互作用することにより発生する。十分なエネルギーがあると、原子は lattice position からはじき出され、はじき出された原子は別の原子をはじき出し欠陥 (トラップ) を作る。トラップが電荷転送チャネルに集中すれば CTE に影響を与え、バンド構造の中間に準位を作れば、ダークカレントの増加を招く (図 1.7、付録 A)。

ASCA に搭載された CCD を用いた実験では Gendreau.(1995) が詳しい。これによれば、プロトン (エネルギーは 2.1MeV 又は 40MeV) を SIS と同じ CCD に垂直に照射することにより実験を行なった。照射量は 2.1MeV で 1.2×10^8prtons/cm^2、 40MeV で 6.4×10^9prtons/cm^2 であった。ダメージは CTI とダークカレントの増加に顕著に現われ、エネルギー分解能の劣化が確かめられた。照射中の CCD の冷却、駆動の有無は結果に影響を与えなかった。CCD のダメージの有無によるスペクトルの違いを図 3.1に示す。

この論文の考察によれば、 X 線 CCD の放射線ダメージによる CTI 劣化の一番の原因はトラップによるものあることもわかった。空のトラップが信号電荷をとらえるタイムスケールは転送速度に比べ、十分小さく、空のトラップに信号電荷が来ると必ずトラップに捕まる。一方 電荷を放出する (デトラップの) タイムスケールは温度の関数で、転送速度に比較的近い。転送速度よりデトラップのタイムスケールが長い場合には、吸い込んだピクセルとは違うピクセルでデトラップが行なわれることになり、元のピクセルは電荷を失う。これがトラップにより電荷転送効率を悪くするメカニズムである。温度が低い場合はトラップは満たされた状態が続き、信号電荷を捕まえるトラップとしては働かないことなる。同じ列 (又は行) で 2 つの信号電荷が転送される時を考えると、その 2 つの信号電荷の距離が近ければ、読みだしに近い信号電荷が常にトラップを埋めて犠牲になることになり、 2 つの信号電荷ので 読みだしから遠い方は、 CTI により失う電荷の数は減少する (図 3.2)。以上の結果に対する、 SIS のダメージの予測は、CTI(parallel clock) は $1\sim2\times10^{-5}$/year の割合で劣化していき、 ST clock と serial clock の CTI に関しては、転送速度が速いことから、劣化はないであろうというものであった。

[1] 地上に送るデータ。量に限りがある。

[2] これは、ホットピクセルは pixel level が低いのでレベルディスクリの設定により対処している。

図 3.1: ASCA SIS と同じ CCD を用いた放射線損傷実験による X 線スペクトルの変化。左：ダメージ前。右：ダメージ後。ダメージ前に比べてエネルギー分解能が悪くなっており、X 線イベントのピークが低い方へずれている。これは CTI の悪化によるものである。(Gendreau 1995)

図 3.2: 犠牲信号電荷がトラップを埋める模式図。(Gendreau 1995)

図 3.3: ASCA SIS の異なる列のスペクトル。列が異なると X 線ピークの位置が大きくことなる。(Dotani *et al.* (1996))

一方 ASCA SIS の現状についてはまとめると以下のようになる (Yamashita 1995, Dotani *et al.* 1996)。

1. CTI の劣化は、 parallel CTI に関しては予想通りである。
2. CTI の経年変化は parallel CTI で $1\sim2\times10^{-5}$/year 程度の劣化がある。
3. parallel CTI は列によって大きく違う。この違いはポアッソンエラーでは説明がつかないほど大きい (図 3.3)。
4. 放射線によるダメージを受けていないピクセルの性質は ほとんど変化していない。一方 ダメージを受けたピクセルの数は増加しており、 1 年でほぼ全ピクセルがダークカレントの増加を示した。
5. ダメージの有無に関わらず、 pixel level の値は、読みだしノイズの揺らぎ程度の範囲内で、一定している。
6. pixel level は短い時間スケールで 7$\sim$ 数十 ADU 変化することがある。これは SAA[3] でダメージを受けてフリッカリングピクセル化 (ホットピクセル化) したものと考えられる。
7. CTI で失われる電荷は信号電荷の量に比例する。つまり CTI はエネルギーによらない。
8. ホットピクセルの数は温度が高いほど多い。
9. ダークフレームエラーが大きい。

打ち上げ前の予想と異なり、現在説明ができていない点として 3 があげられる。 3 はエネルギー分解能を悪化させている大きなファクターで、原因の解明が急がれる。

3.2 衛星軌道上での放射線

衛星上での CCD のカメラボディー内部でのプロトンのスペクトルの例が、図 3.4である。カメラボディーの内部では $\sim$100MeV のプロトンが多いが、実際にはエネルギーが高すぎて CCD にダメージを与えずにつき抜けてしまう。 1 つのプロトンで どのエネルギーがもっとも CCD に影響を与えるのかを示したのが図 3.5である。図 3.5より、エネルギーの低いプロトンほど CCD にダメージを与えるのがわかる。衛星内部のプロトンのスペクトル (図 3.4)

[3] Sauth Atlantic Anomaly の略。ブラジル沖 大西洋上空で 100MeV 以下の proton が閉じ込められている。他の軌道上に比べて、荷電粒子が 10^3 $\sim10^6$ 倍多い。

図 3.4: 衛星軌道上でのカメラボディ内部でのプロトンスペクトル。(Gendreau 1995)

を考慮した上で、どのエネルギーがもっとも CCD にダメージを与えるかを示したのが、図 3.6である。図 3.6より、衛星内部では、低エネルギーのプロトンから 30MeV までのプロトンが均等に CCD に影響を与えている。但し ここで考えている「影響」はプロトンと電子の相互作用 (bete の式から導かれる電離損失) である。 Janesick *et al.* (1991) によれば、実際の CCD の劣化はプロトンとシリコン原子核の相互作用がもっとも寄与する。その場合 上記の考え方では不十分である。

3.3 放射線損傷実験

CCD の放射線による性能劣化の研究のため、浜松ホトニクス CCD を用いて行なった放射線損傷実験の実験装置の略図を図 3.7に示す。放射線 (プロトンビーム) をつくり出すため京都大学バンデグラフ型タンデム加速器を用いた。エネルギーは 2.88MeV と 10MeV である。但しこのエネルギーはビームが通過する膜によって減衰され、 CCD にはそれぞれ 2.0MeV、 9.5MeV のプロトンが入射した。ビームは加速器を出て、金の膜で散乱され、アルミナイズドマイラーを通過して CCD に垂直に入射する。アルミナイズドマイラーは加速器の高真空を保つために挿入された。金の膜は実験により厚さが異なる。ビームの強度は SSD(Soild State Detector) でモニターされた。

加速器を用いた実験は合計 4 回行なわれた。 1 回目 (1995 年 7 月) はビームのキャリブレーションを行なったため、 CCD にはビームを照射していない。 2 回目 (1995 年 9 月) にはビームのエネルギーを 2.88MeV、 3 回目 (1995 年 11 月) には 10MeV として、 CCD にビームの照射を行なった。 4 回目 (1995 年 12 月) はプロトンを小量照射させる実験を行なった。加速器で十分な線量が得られる低いエネルギーとして 2.88MeV のプロトンを選び、逆に十分な線量が得られる高いエネルギーとして 10MeV のプロトンを選んだ。我々はダメージの経年変化を調べるため、 2 回目と 3 回目の実験で、プロトンの照射と CCD 詳細データ取得 (X 線を当てたデータと当てないデータの取得) を交互に行なった。 CCD に照射したプロトンの量と照射中の駆動、冷却を表 3.1に示す。冷却温度は ASTRO-E の XIS が駆動される温度を想定し -90 度とした。 CCD は全て 512×512 ピクセル CCD(ノッチなし) で、 2 章で報告したチッ

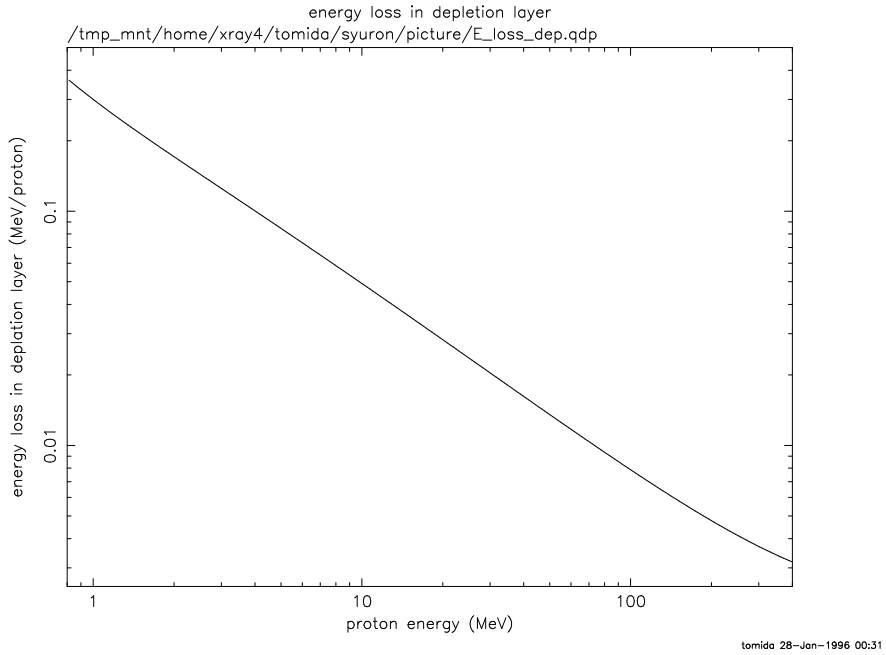

図 3.5: 1 つのプロトンが CCD に与えるダメージ。厳密には 1 つのプロトンが CCD に垂直に入射した時、空乏層の内部において電離損失で失うエネルギーである。空乏層は $6\mu\mathrm{m}$ で、電極の厚さも考慮している。

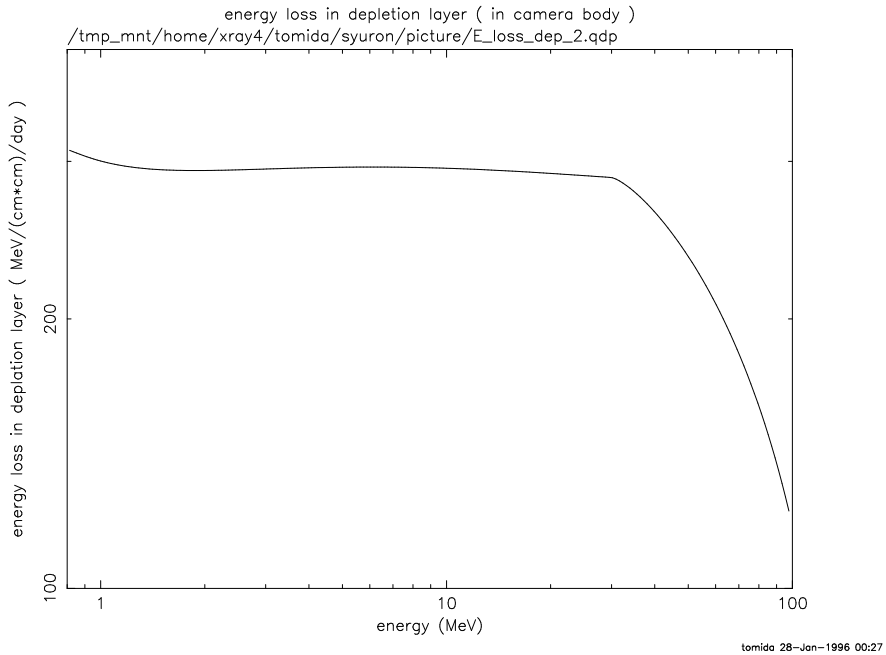

図 3.6: CCD に与えるダメージ (カメラボディ内部のプロトンスペクトルを考慮)。図 3.5と図 3.4の積である。 CCD 内部では $1\sim30\mathrm{MeV}$ のプロトンが平均的に寄与している。

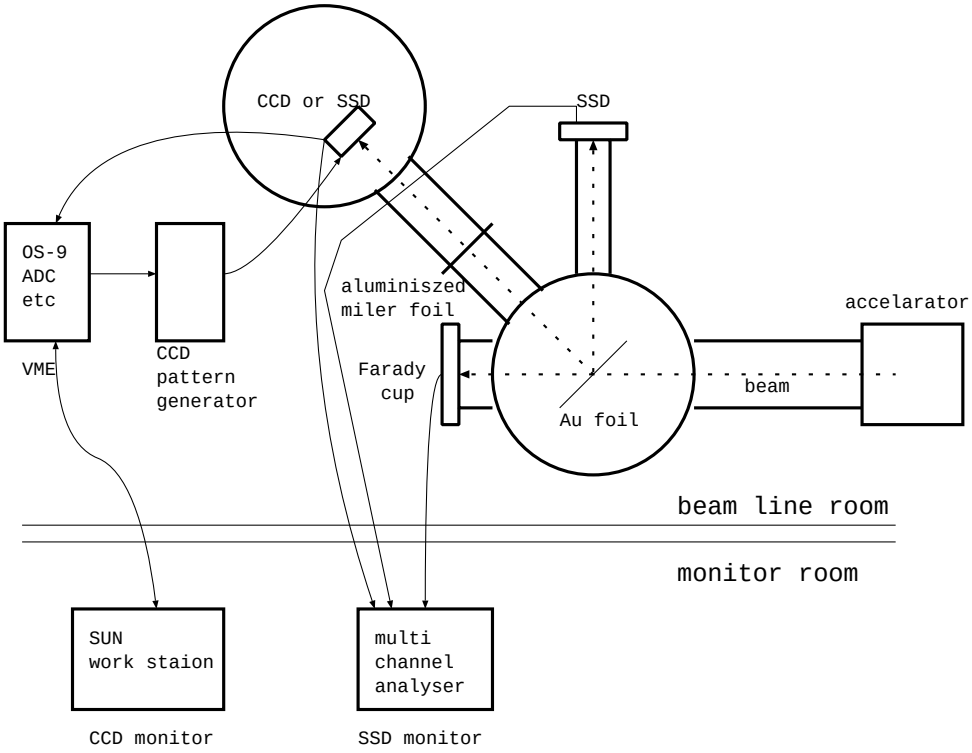

図 3.7: タンデム加速器を用いた実験装置概要。金の膜は実験により厚さが異なる。

プである。蓄積時間は 150 秒、転送は 1 ピクセルあたり 60μsec で、 over clock region を作るため 576×576 ピクセル分の転送を MPP mode で行なった。転送クロック電圧は +6.7V と -8.0V であった。最終的には全部で 8 個の CCD にダメージを与えた。照射したプロトンのエネルギースペクトルは図 3.8である。加速器で得られたプロトンのエネルギーは 10MeV と 2.88MeV で単色スペクトルであるが、金の膜とアルミナイズドマイラーでのエネルギーロスで broad になっている。又 ビームが通過してくる膜とビーム管での散乱により、単色のスペクトルにはなっていない。照射した X 線は ^{55}Fe を使用した。

3.4 データ解析

データ解析にあたっては、ゼロレベルを V.O.C region の平均とした。基本的に X 線によるイベントをとり出すときに、ダークフレームのアップデートはおこなっていない。シングルピクセルイベントの選択においては、 event threshould を 30ADU(約 300eV) とした。ホットピクセルの定義は、

「X 線を照射しないデータにおいて、 V.O.C.region の PH_{raw} をゼロレベルとし、 8 秒間の露出で event threshould 100eV をこえるピクセル。」

と定義する。但し event threshold は場合により変化させる。露出時間の 8 秒とは ASTRO-E で XIS が駆動される時の露出時間である。実際のデータは通常 150 秒の積分で取得されたものであるので、これを補正をしている。 CTI と読みだしノイズは 2 章で定義した通りである。

次のセクションより実験結果を記す。

3.5 経年変化

我々は 性能劣化の経年変化を追い、その様子を調べた。図 3.9~3.13に示す。

ダークカレント　　ここで示したのは effective region のピクセルのダークカレントの平均である。 9.5MeV の場合に変化は見られないが、 2MeV の照射では見られる。 2MeV の方が劣化が激しいようである。

No	実験	total fluence(protons/cm^2)	備考
1	10MeV	5.9×10^5	プロトン照射中は -90 度で駆動
		1.6×10^7	
		$4.6\ \times10^7$	
		$1.8\ \times10^8$	
		5.5×10^8	
		2.8×10^9	
2	2.88MeV	1.8×10^6	プロトン照射中は -90 度で駆動
		5.3×10^6	
		1.1×10^7	
		2.2×10^7	
		4.4×10^7	
		1.1×10^8	
3	10MeV	1.0×10^8	照射中非冷却、駆動なし。経年変化は追っていない
4	10MeV	9.8×10^8	照射中非冷却、駆動なし。経年変化は追っていない
5	10MeV	9.5×10^8	照射中非冷却、駆動なし。経年変化は追っていない。照射領域を限定。
6	10MeV	2.8×10^6	照射中 -20 度に冷却して駆動。経年変化は追っていない
7	10MeV	1.5×10^7	照射中非冷却、駆動なし。経年変化は追っていない
8	10MeV	5.9×10^7	照射中非冷却、駆動なし。経年変化は追っていない

表 3.1: 放射線損傷実験における、諸パラメーター。トータルの照射量を示す。

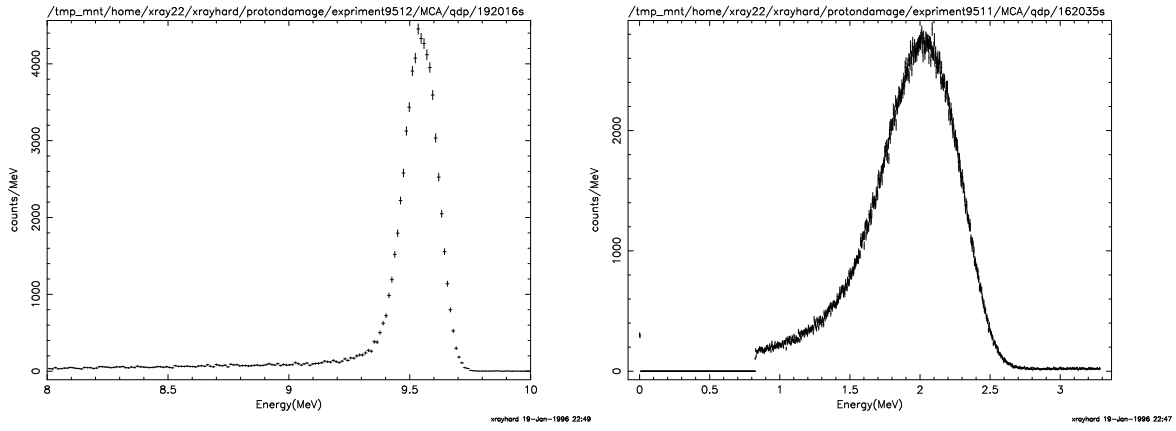

図 3.8: 照射したプロトンのスペクトル。左： 1995 年 9 月の実験でプロトンを照射した時のスペクトル。右： 1995 年 11 月の実験でプロトンを照射した時のスペクトル。プロトンは金の膜とアルミナイズドマイラーでエネルギーをロスしているため、エネルギーのピークは 9.5MeV、 2MeV となっている。

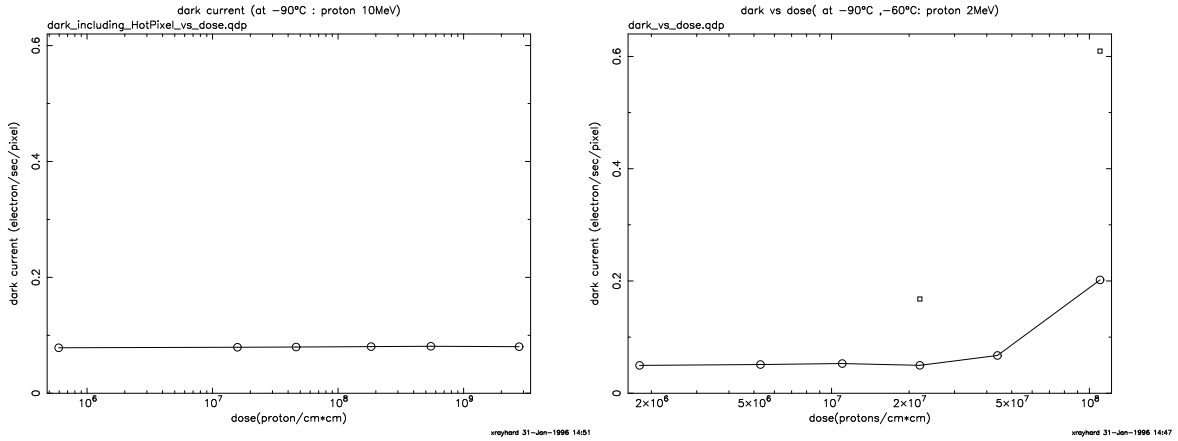

図 3.9: ダークカレントの経年変化 (左 9.5MeV、右 2MeV)。温度 -90 度。 2MeV については -60 度での経年変化 (但し 2 点のみ) も示す。

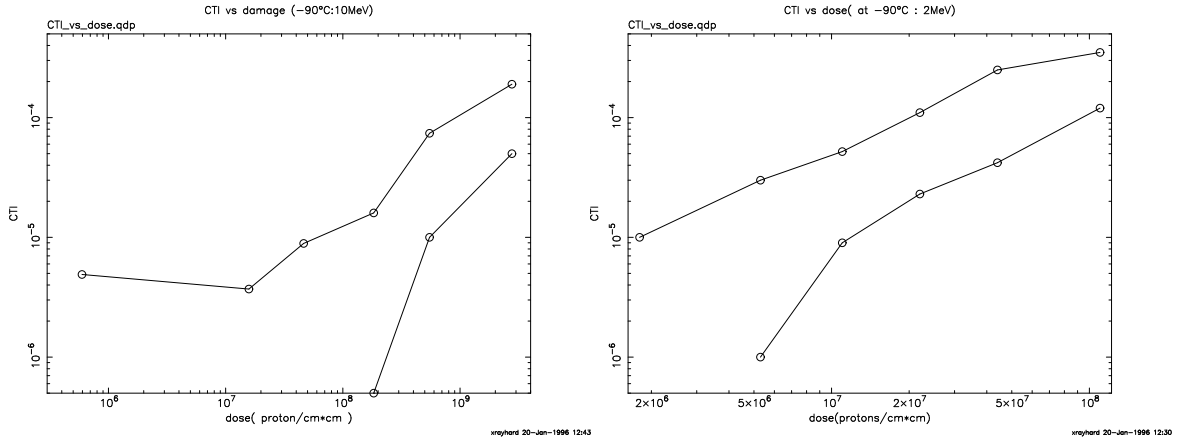

図 3.10: CTI の経年変化 (左： 9.5MeV、右： 2MeV)。温度 -90 度。 2 本の折れ線は parallel CTI(上) と serial CTI(下) を示す。

CTI parallel CTI と serial CTI では parallel CTI の方が劣化は激しい。この差は転送速度によるものであると考えられる。又、 2MeV の方が CTI の増大は激しい。

readout noise 2MeV、 9.5MeV ともに変化はないようである。

エネルギー分解能 2MeV、 9.5MeV ともに変化している。 CTI やダークカレントと同じ様に 2MeV の方が劣化が激しい。ダメージを与える前と後のスペクトルを図 3.15に示す。劣化の原因として、読みだしノイズの増加、ダークカレントの増加、 CTI の増大があげられる。 X 線のピークは低い方へずれていること、読みだしノイズは変化していないこと、ダークカレントが増加してなくても、エネルギー分解能は悪化していることから主に CTI の増大が最も寄与していると考えられる。

ホットピクセル ホットピクセルは異常にダークカレントの多いピクセルである。 9.5MeV では平均ダークカレントに変化はないとしたが、小数のピクセルでは、 -90 度でもダークカレントは増大している。これも 2MeV の方が、劣化が激しい。

読みだしノイズ以外を除けば どのパラメータも例外なく 2MeV の方が激しく劣化を起こす。これは、 2MeV の方がチップの空乏層でプロトンと原子核の衝突断面積が大きいためと考えられる。

示した経年変化はチップ全体を平均した量ばかりである。どれも突然の変化は示さず、照射量に対し単調増加を示す。平均量でなくピクセルレベルで経年変化を追ったのが、図 3.14である。最終的にホットピクセル化したピクセルを選び、 pixel level の経年変化を示した。ホットピクセル化はゆっくりと起こるものでなく、突然現れるものであることが確認できる。これは、 ASCA-SIS の結果に矛盾しない (Yamashita 1995)。

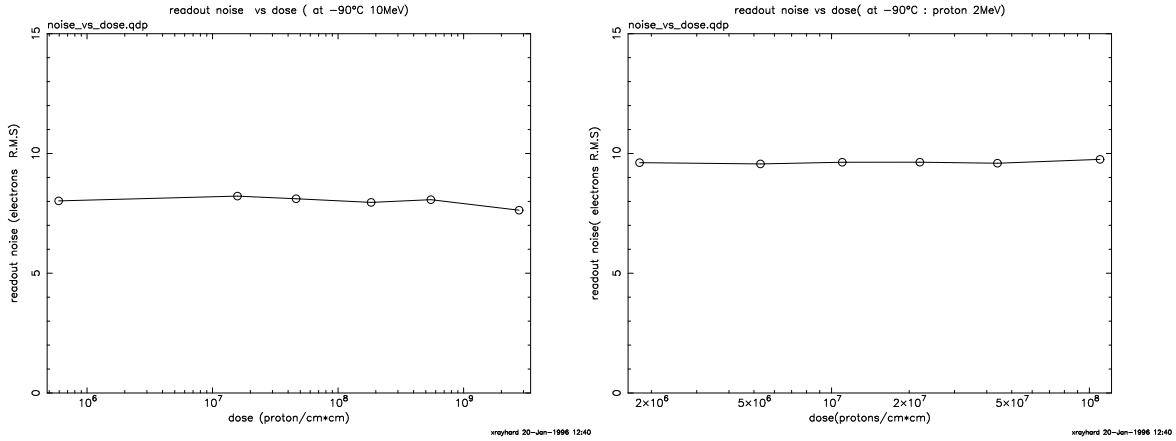

図 3.11: readout noise の経年変化 (左： 9.5MeV、右： 2MeV、温度 -90 度)

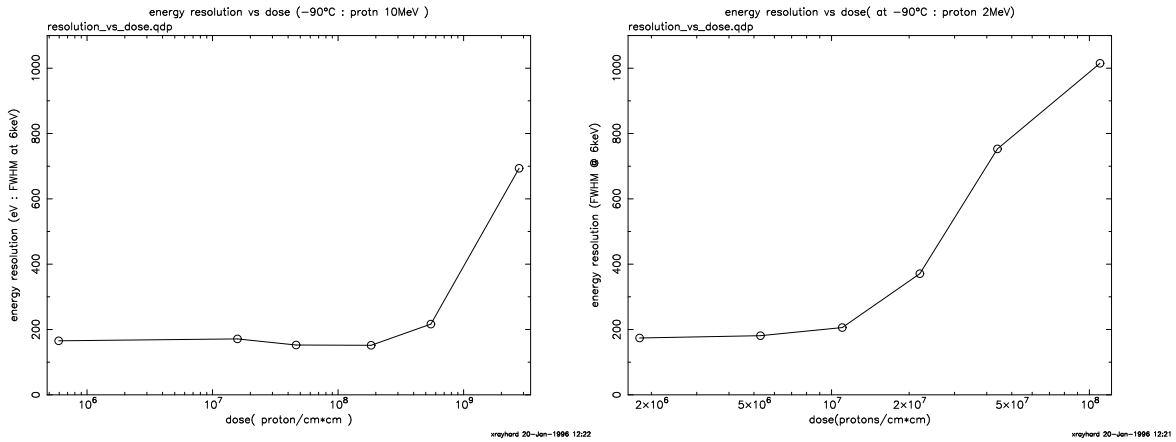

図 3.12: エネルギー分解能の経年変化 (左： 10MeV、右： 2MeV)。温度 -90 度

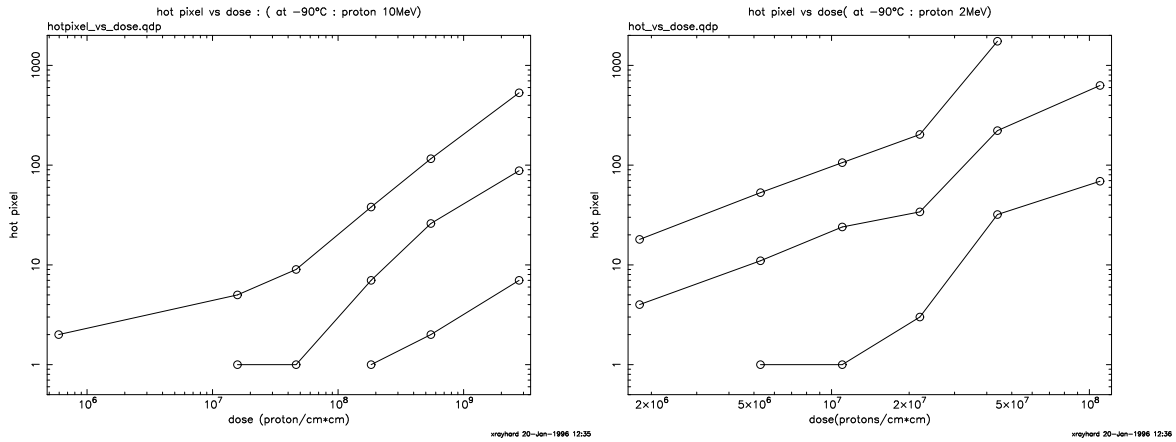

図 3.13: hot pixel の経年変化 (左： 10MeV、右： 2MeV、温度 -90 度)。 3 本の折れ線は event threshould が異なる。上から順に 100eV,20eV,4eV

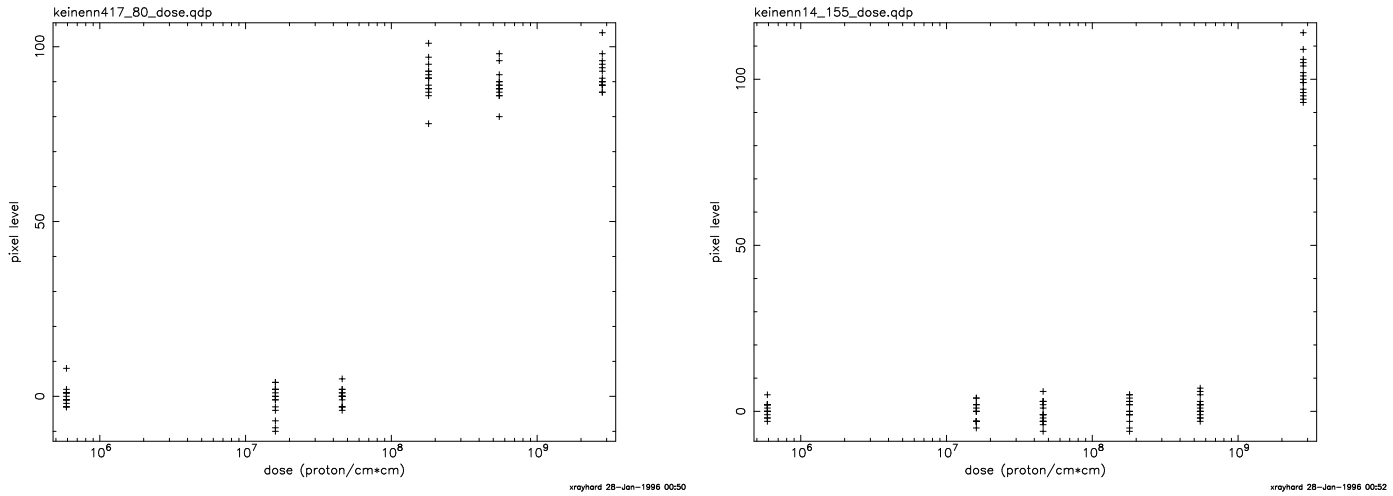

図 3.14: 特定のピクセルの pixel level の経年変化。最終的にはホットピクセル化している。ホットピクセル化は除々に進化していくものでなく、突然起こるようである。

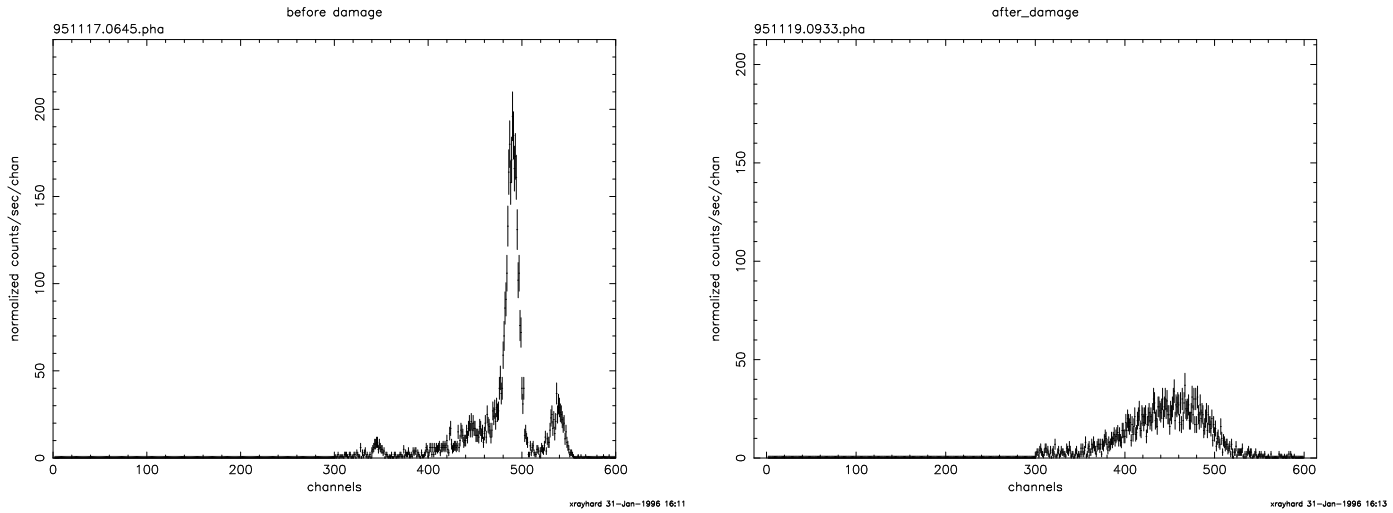

図 3.15: X 線スペクトルの変化。左：ダメージ前、右ダメージ後。 2MeV を照射した CCD のシングルピクセルイベントだけを示している。エネルギー分解能が著しく悪化している。又、 X 線のピークは低い方へずれている。これは CTE の低下によると考えられる。

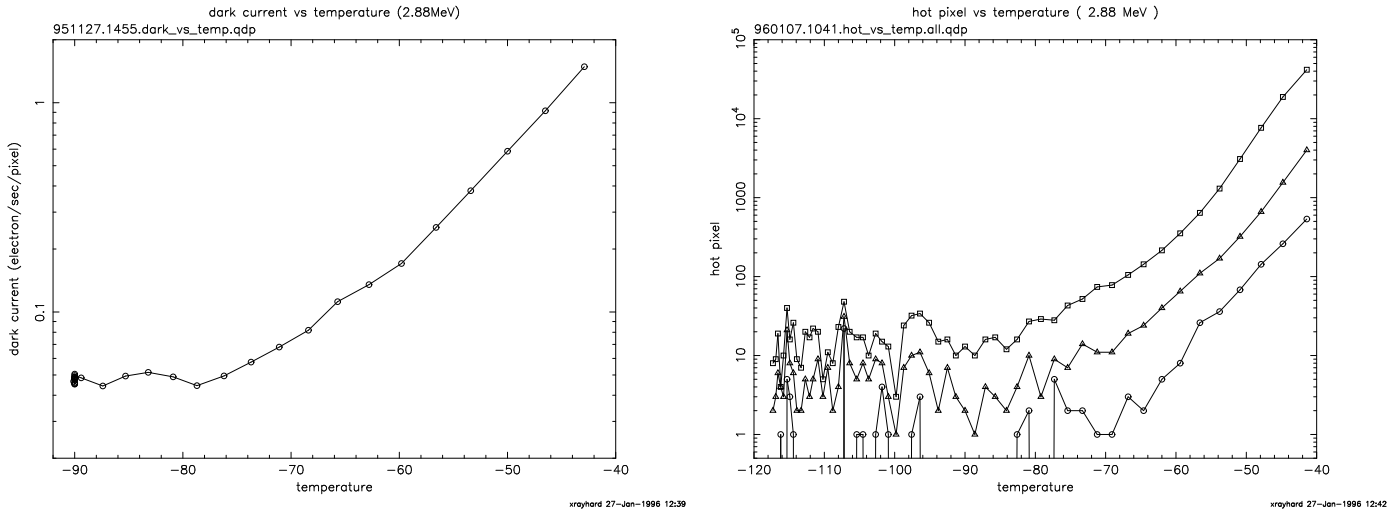

図 3.16: ダークカレントの温度依存性 (左) とホットピクセルの温度依存性 (右)。 2.00MeV のプロトン照射したチップデータを取得。ホットピクセルの温度依存性 (右) で 3 本の折れ線は異なる event threshold を示す。下から順に 300eV、 100eV、 25eV である。

3.6 温度特性

放射線損傷を起こした場合、温度により激しい変化が起きるダークカレントとホットピクセルについて述べる。温度変化に対する、ダークカレント ホットピクセルの数の関係を図 3.16にしめす。両者に温度依存性が見られる。いずれも低温の方が良い。ホットピクセルは -60 度付近では温度 1 度の上昇で 1.25 倍の変化を受ける。

3.7 性能回復

3.7.1 電荷転送効率とエネルギー分解能

プロトンにより劣化した CCD の性能の回復を図った実験を行なった。方法は CCD chip に 9.5MeV のプロトンを照射後、

約 1 カ月室温におく。但し 1 カ月の間、 -90 度まで冷却して性能評価を 5 回行なった。

⇓

摂氏 50 度に半日おき、その後冷却してデータを取得

⇓

摂氏 100 度に半日おき、その後冷却してデータを取得

⇓

摂氏 150 度に半日おき、その後冷却してデータを取得

という手順で行なった。それぞれの段階でのエネルギー分解能、 CTI を表 3.2に示す。アニリングの各段階の X 線スペクトルを 図 3.17に示す。室温程度のアニリングには効果はないが、 100 度のアニリングによって性能回復が確認でき、 150 度のアニリングでは Mn K_α、 K_β の 2 本が分離できるまでに回復している。但し、ダメージ前の状態まで完全に回復するわけではない。同時に温度摂氏 150 度でも CCD は壊れないことも確認できた。アニリングの効果は、同じ温度でも高温におく時間が長いほど効果が大きい (Holland *et al.* (1990))。今回の実験では 100 度のアニリングよりも 150 度の方が効果が大きい様に見受けられるが、これは 単にアニリングの時間が増加した効果である可能性は否定できない。更に高温でのアニリングについては (Holland *et al.* (1990))、効果はあるものの劇的な性能回復はなく、最も効果的改善が現れるのは 150 度である。これは、我々のデータと矛盾しない。

こういった 100 度を越える高温でのアニリングは効果的なことであることは確認できたが、衛星上では不可能であり 実現可能な温度は 20 度くらいが限界である。今回の実験では 20 度 (室温) 程度のアニリングでは効果はないことが確認でき、 SIS で 20 度程度のアニリングを行なっても効果はあまり期待できない。又 XIS にもヒーターはつけないことになっている[4]。

[4] SIS にはヒーターがついている

項目	エネルギー分解能 (FWHM@6keV)	CTI(10^{-4})
ダメージ直後	660	1.6
室温 0.5 日	570	1.7
室温 3 日	660	2.1
室温 7 日	670	1.9
室温 14 日	690	1.6
室温 28 日	800	1.8
50 度 12 時間	840	2.5
100 度 12 時間	450	1.2
150 度 12 時間	396	0.52

表 3.2: アニリングの効果

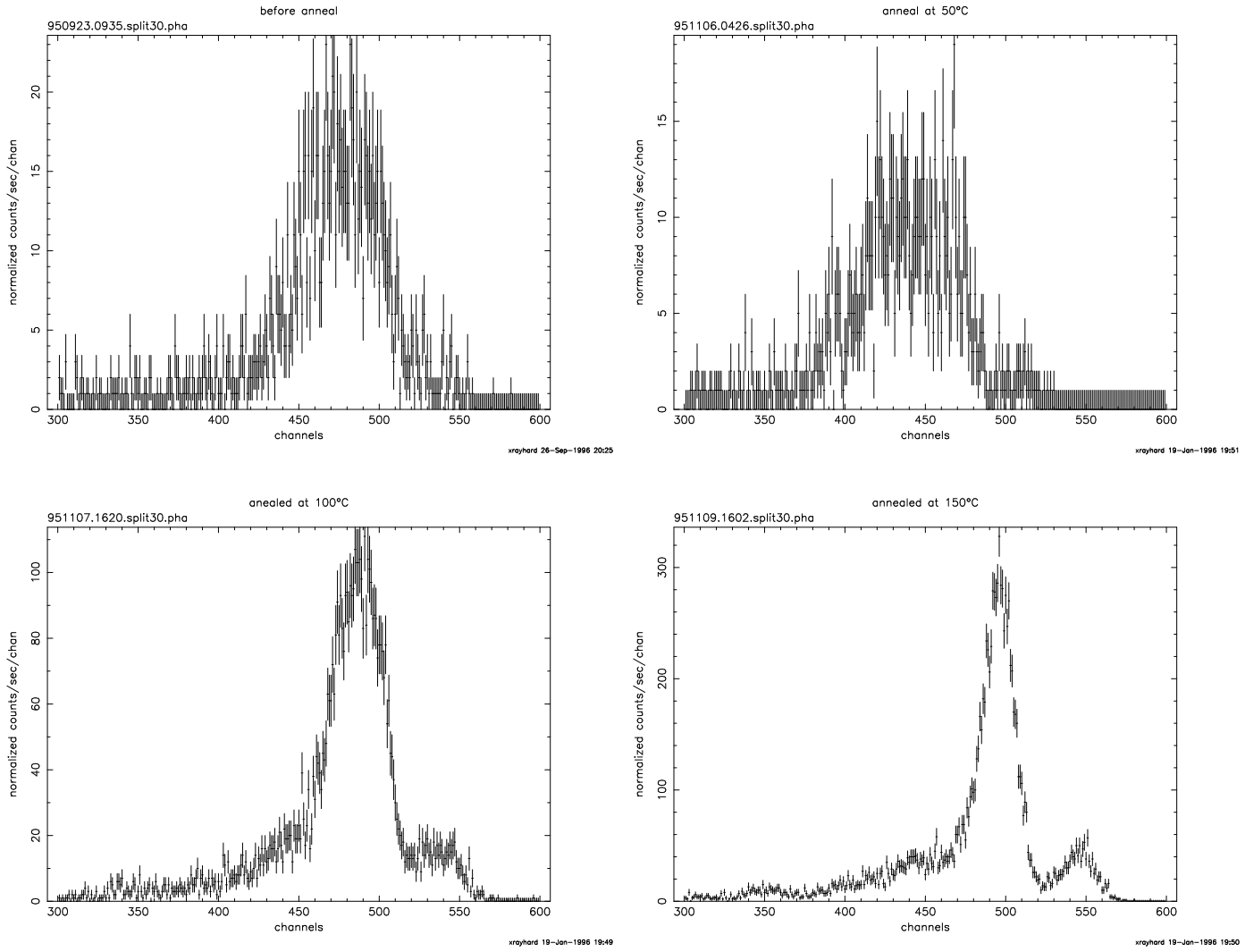

図 3.17: アニリング前後の X 線スペクトル。左上：アニリング前、右上： 50 度でのアニリング後。左下：アニリング前、右下： 150 度でのアニリング後。 Mn k_α と k_β の 2 本がはっきり分別できるまでに性能回復した。

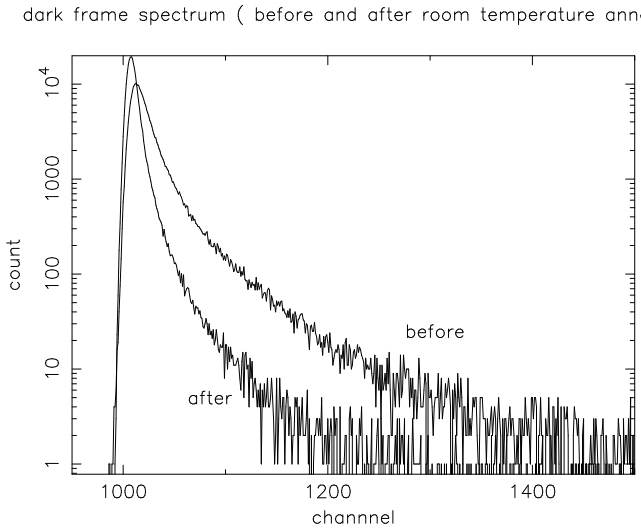

図 3.18: 室温アニリング前後のダークフレームスペクトル。ダークカレントは減少した。

3.7.2 ダークカレントとホットピクセル

9.5MeV の実験ではダークカレントの増加はなかったが、 2MeV の実験では増加が見られた。この subsection では 2MeV のデータについて、ダークカレント及びホットピクセルについて述べる。方法は 2.0MeV のプロトンを照射後、

約 1 週間 -60 度以下におく。その間 数度 性能評価

⇓

その後室温で 40 時間放置し -90 度で性能を評価。

という手順で行なった。結果は図 3.18の通りである。

図 3.18からも分かる様にダークカレント、ホットピクセル両方に、室温でのアニリングに効果が見られる。ホットピクセルとダークカレントの減少は、エネルギー分解能の改善には効果は薄いが、全く無駄なものではない。例えば ASCA SIS での dark frame error やホットピクセルによるテレメトリーの飽和という 2 つの問題を解決に期待が持てる。

3.8 人工電荷による実験 (fat zero)

Gendreau (1995) によれば、信号電荷の前 (読みだしに近い方) に、別の犠牲となる信号電荷があれば、注目する信号電荷の CTI は改善される (図 3.2)。よって人工的に犠牲となる信号電荷を入れることにより、 CTI の改善が見込まれる (fat zero)。 CCD では人工的な電荷注入が可能なように設計されている場合がある。事実、浜松 CCD でも設計上可能であるが、我々の研究室では電荷を注入できるように回路等が製作されていないので[5]、 CCD チップ全体に一様な弱い光を照射し、全ピクセルに信号電荷のオフセットをかけることにより、犠牲となる電荷をつくりだした。データの取得と解析方法は以下の通りである。

1. X 線を当てずに光を当てて取得したデータに対し V.O.C.region をゼロレベルにとったフレームをつくり、
2. X 線と光を両方当てたデータを 10 フレーム取得し V.O.C.region をゼロレベルにとり、
3. 1 のデータを 2 のデータのダークフレームとして差し引く。

以上の手順を -60 度、 -90 度、 -120 度の 3 温度で、さらに各温度で 光によって励起される electron の量を 0、 47、 160、 470electron/pixel の 4 パターンについて行なった。光の照射は LED を用いてパルス的に照射した。 CCD は 2MeV を照射した CCD のものである。結果を表 3.3に示す。光による改善がみられるが、完全に CTI を復活させるわけではない。図 3.20は光をあてる前後の X 線スペクトルである。 Mn K_α と K_β の 2 本が区別できるまでにはなっていない。図 3.21はシングルピクセルイベントに対し、横軸 = paralell clock をうけた回数、縦軸に = pixel level を記したものである。光を入れない場合、 parallel の転送回数が少い部分では Mn K_α と K_β が区別できているが、転送回数が多くなると、区別は出来ない。これが光を入れた場合 犠牲電荷の影響で転送回数が多くなっても両者の区別が可能になっている。

[5] その後 これについて実験を行ない有効な結果を得ている。 Tomida *et al.* 参照

1 ピクセル当たりの光 (electrons)	温度	parallel CTI (10^{-4})	serial CTI (10^{-4})	エネルギー分解能 (eV:FWHM@6keV)
0	-120	1.9	0.58	720
47	-120	1.6	0.63	550
160	-120	1.2	0.42	440
470	-120	0.75	0.47	530
0	-90	4.0	0.39	1000
47	-90	3.3	0.51	950
160	-90	2.4	0.37	680
470	-90	1.6	0.33	620
0	-60	-	2.3	850
47	-60	-	1.7	760
160	-60	-	1.23	740
470	-60	2.4	0.90	850

表 3.3: 光を入れた場合の CTI とエネルギー分解能。 -60 度では parallel CTI は測定できなかった。

1 ピクセルに入れた光による犠牲電荷は最高で 470electron/pixel である。 CTI による信号電荷の喪失は 読みだしから最も遠いピクセルで 300electron ほどであったため、 CTI により犠牲電荷が失われても十分な値と考えられる。しかし結果は 470 electron でも CTI は完全に回復していない。理由として

1. X 線イベントの信号電荷の占める体積が犠牲電荷の占める体積と異なっているため。

   光による信号電荷 470electron に対し X 線イベントの信号電荷は Mn k_α の場合 1620electron で当然その占める体積は大きく、その分 転送中に出会うトラップの数も多い。一方 犠牲電荷は占める体積は小さいため、 X 線イベントが出会うトラップを埋めきれないため CTI が完全に回復しない。

2. 電子の数が増えたためトラップと相互作用する確率が増えたため。

などが考えられる。空のトラップがあれば必ず電荷は捕まえられると考えれば、 2 の考え方はできない。いずれにせよ CTI を完全に回復させるには、注目する信号電荷と同じかそれ以上の量の人工的な犠牲電荷を入れなければならない。又、犠牲電荷を入れれば それだけトラップに吸われる電荷が増え、効果的な方法にはならないかも知れない。

表 3.3で -60 度の parallel CTI のデータが記録されていないが、これは parallel 転送の回数が多くなるとシングルピクセルイベントの数が極端に減るからである。理由は以下の通りである。すなわち、トラップに吸収された電子は検出されたピクセルより後ろ (後に読み出される) のピクセルで再放出されるが、その確率はすぐ後のピクセルがもっとも高い。転送回数が増えると検出されたピクセルの後ろ隣のピクセルでパルスハイトが段々高くなり シングルピクセルイベントではなくなってしまうためである。

3.9 CTI の補正

CTI を補正することにより、エネルギー分解能がどう改善されるかを計算してみる。方法はデータから求められた parallel CTI と serial CTI 及び X 線が検出されたアドレスを用いて、元の pixel level を逆算した。データは 2MeV を照射した CCD に X 線を当てたもの (-90 度で取得) を用いた。 CTI を補正したスペクトルが 図 3.22である。 Mn K_α と K_β が分離できている。エネルギー分解能は 284eV(FWHM@5.9keV) まで回復した。図 3.21(左) でわかるように転送回数が少い部分では Mn K_α と K_β が区別できているが、転送回数が多くなると、区別は出来ない。これは CTI が一様でないためである。よって CTI の簡単な補正では、エネルギー分解能を完全に回復できない。 CTI を各ピクセルごとに、無理ならば 各列ごとに求めることが出来れば、もっと良い CTI 補正が可能である。しかし そのような 細かい CTI を求めるには データ取得に膨大な時間がかかり[6]とくに衛星上ではまず不可能である。

CTI を起こすピクセルを見つける他の手段としては、一様な信号電荷をいれたあと、 CCD を順方向と逆方向の転送を繰り返すという方法がある (Miyaguchi (1995)、 Morley *et al.* (1988))。これは順方向の転送では CTI を引き起こすピクセルとして働くが、順方向の転送では CTI を引き起こさないというピクセルが存在し、そのピクセルに

[6] 単に強い X 線をあてて X 線イベントを稼ぐということはできない。なぜなら、 X 線が強いとそれ自身が犠牲電荷となってトラップを埋め、 CTI を改善してしまうからである。

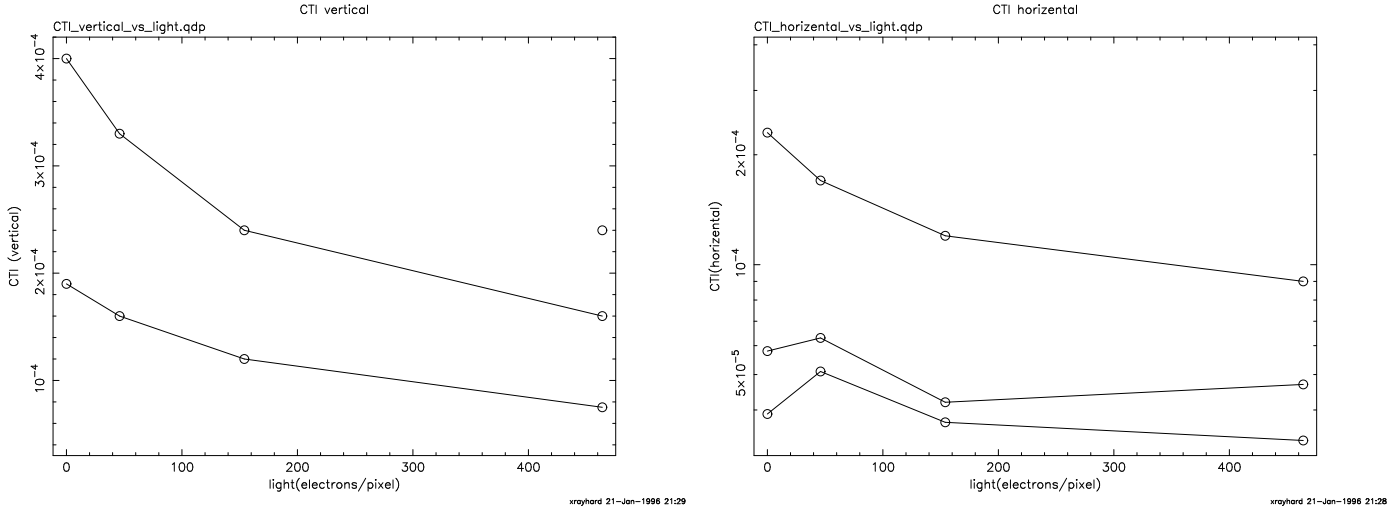

図 3.19: 犠牲電荷と CTI。左 parallel CTI。右 serial CTI。縦軸は CTI、横軸は犠牲電荷の量。 3 本の折れ線は 3 つの温度を示す。上から順に -60、 -90 、 -120 度。

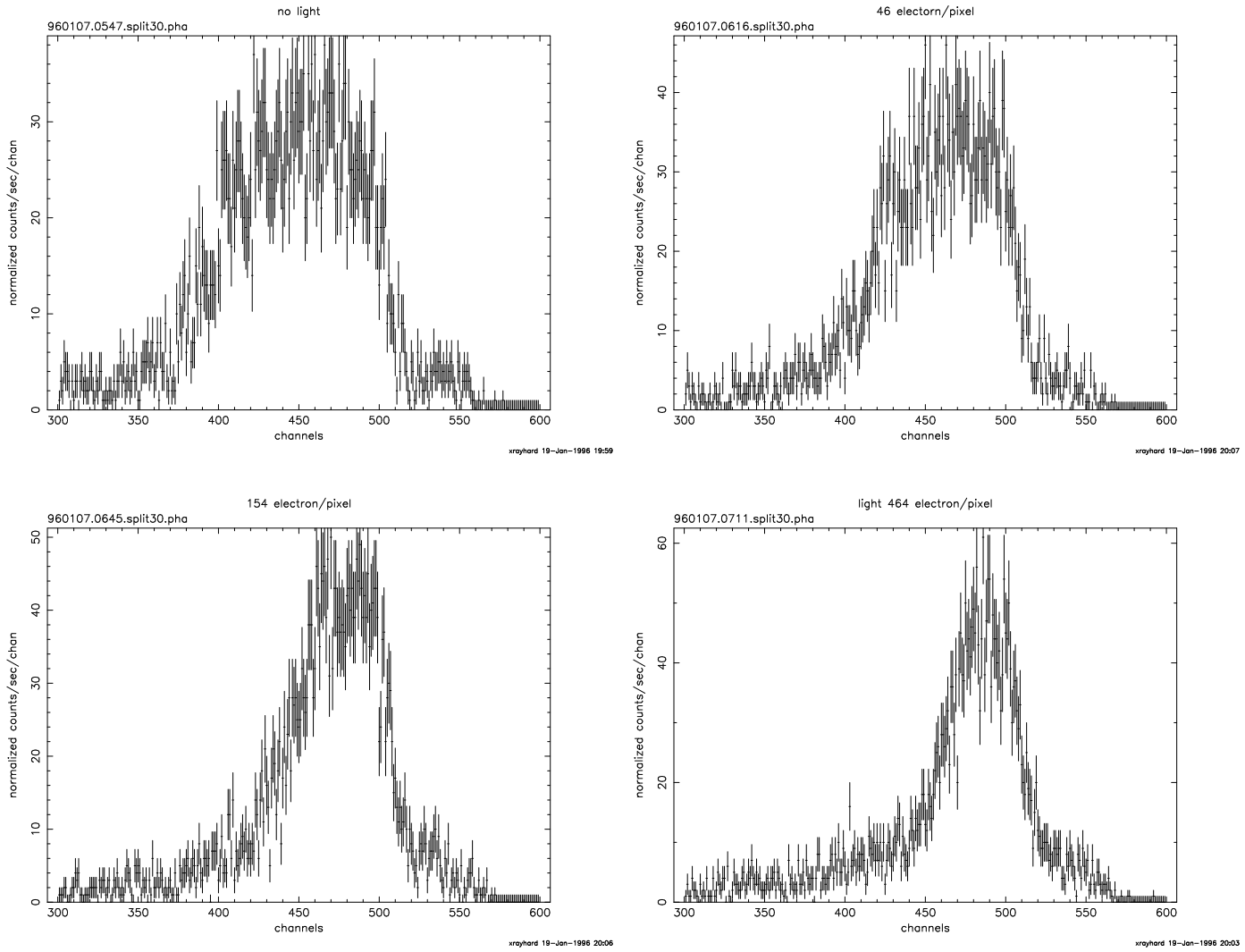

図 3.20: 光を入れる前後の X 線スペクトル。温度 -90 度入射した光の量はそれぞれ 左上 0、右上 47 左下 160 右下 470 electrons/pixel。

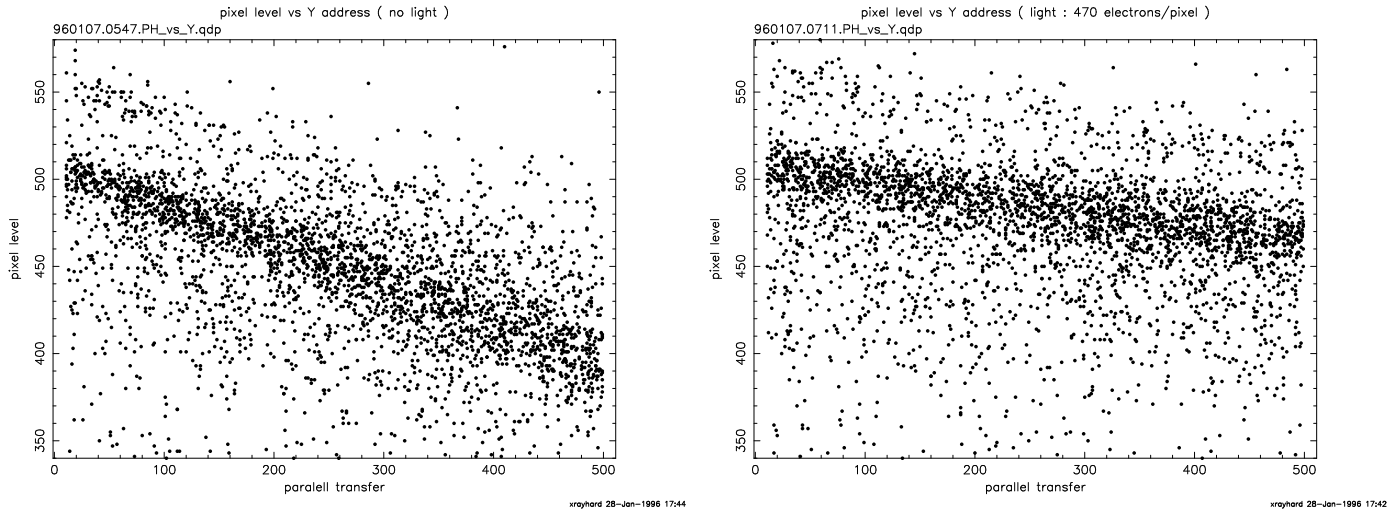

図 3.21: 光を入れることによる効果。 1 つの点が 1 つのシングルイベントに対応する。縦軸は pixel level 、横軸は parallel 転送をした回数。左が光を入れない場合。右が光を 1 ピクセルに 470electron 入れた場合。転送回数が多いほど、 pixel level は小さいが、光により大きく改善している。

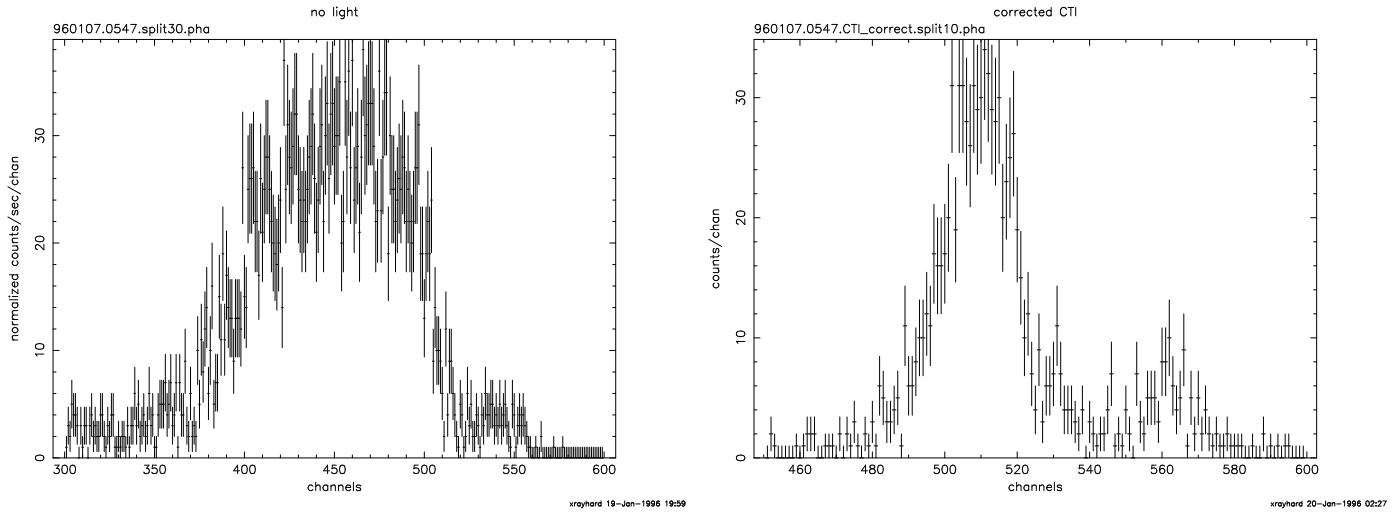

図 3.22: CTI を補正していないスペクトルと補正したスペクトル。 Mn k_α と k_β が分離できている。

だけ有効である。すべてのピクセルがそのような性質をもっているかどうかはわからないが、その場合にはこの手段が有効であり、ピクセルごとの CTI を知る有効手段となる。しかし、今回我々が実験で用いた CCD は 2 相であるため、逆転送は出来ない。

光による人工的な犠牲電荷を入れた場合のデータに対しても同様に CTI の補正を行なった。人工電荷によって転送回数が多くても Mn K_α と K_β が分離できているため (図 3.21右) CTI 補正により エネルギー分解能は犠牲電荷を入れない場合より改善できると考えられた。が 結果はエネルギー分解能は 379eV までしか回復しなかった。光を照射せずに CTI 補正すると 284eV である。原因として、光の量が時間的にばらついていること、 X 線を当てた場合と当てない場合で X 線源 (chip から 5cm の距離においている) での光の反射の仕方が異なること、などがあげられる。

3.10 ダークカレントを引き起こすトラップ

1995 年 12 月に行なった実験では、プロトンビーム (10MeV) を少量だけ照射する実験を行なった[7]。すべてのピクセルにダメージを起こすのではなく、 1%~10% のピクセルにダメージを起こし、そのピクセルを細かく観察する

[7] これについては 1996 年 5 月に再実験を行なった。結果は Tomida *et al.* 参照

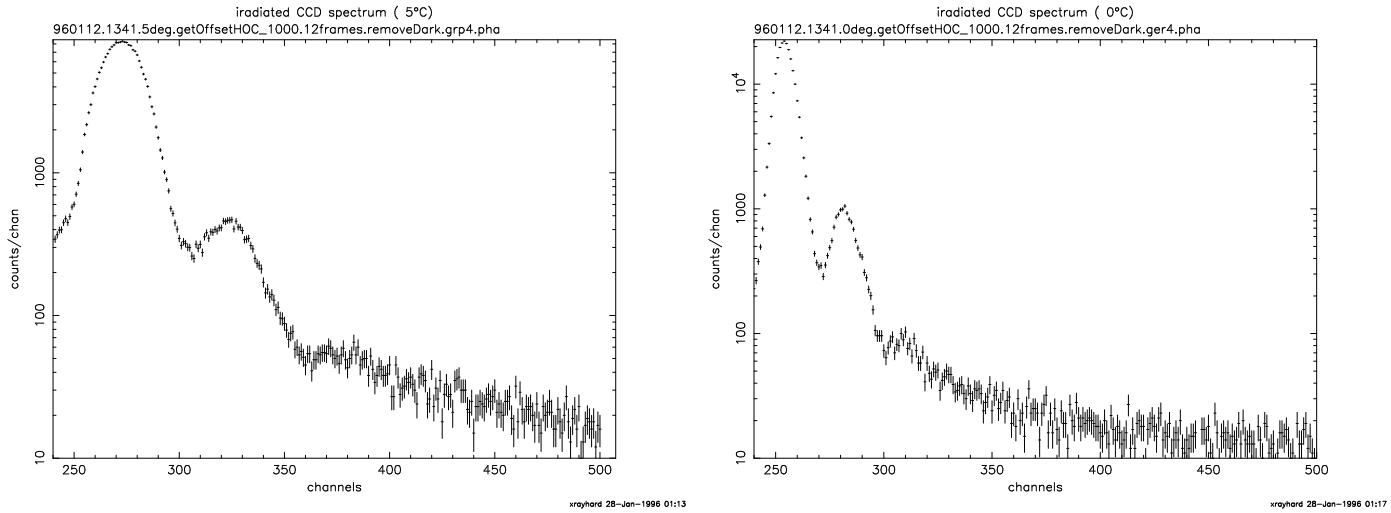

図 3.23: ダメージを少しだけ与えた後の CCD スペクトル。右は 0 度、左は 5 度でとったデータ。縦軸が counts、横軸が pixel level に相当する (但し offset がかかっている)。この絵では 1ADU $\sim$ 3electron ではなく binning したので 1ADU = 12 electron になっている。又 ダメージを与える前にとった同じ温度、同じ露出時間の frame を dark frame として差し引いている。ピークが 2 つ見える。大きいピークはダメージを受けていないピクセル。小さいピーク (セカンドピーク) はダメージを受けたピクセルによるダークカレントと考えられる。縦軸は log scale で書いてある。

ためである。表 3.1の No.8 のチップの評価を以下に示す。この実験から得られた ダメージを与えた後の dark frame のスペクトルを図 3.23に示す。 このスペクトルは以下のようにして作られた。

1. ダメージを与える前に複数の温度でデータをとる (X 線はあてない)。 V.O.C.region をゼロレベルとして引く。
2. ダメージを与えた後に複数の温度でデータをとる (X 線はあてない)。 V.O.C.region をゼロレベルとして引く。
3. 2 で取得したある温度のデータに対し、同じ温度の 1 のデータを dark frame として引く。

統計を稼ぐ意味で、スペクトルは単一の温度でなく それぞれの温度 ± 2 度のフレームを足して作った。図 3.23から分かるように ピークが 2 つ見える。大きいピークはダメージを受けていないピクセル。小さいピーク (セカンドピーク名付ける) はダメージを受けて トラップができたピクセルによるダークカレントと考えられる。更に、微弱ではあるが セカンドピークの右に 3 番目のピークらしきものも見える。ある決まった量のダークカレントがあることから、 2 章で説明した金属のトラップによるダークカレントの様に何か量子化しているパラメーターがあると予想される (Janesick *et al.* (1989))。

3.10.1 トラップの出る確率

表 3.1chip8 から 85 proton/pixel のプロトンが照射されている。又 図 3.23から、ダメージを受けてダークカレントが増加したピクセルの割合を調べると、その割合は 6% であった。方法は、セカンドピークをガウシアンでフィットすることにより求めた。これにより 1 個のプロトンが欠陥を作る確率は 0.07% となる。トラップができるのは、プロトンとシリコンの原子核との相互作用でシリコンが latice position からはじき飛ばされた場合である。しかしプロトンは電子との相互作用でそのエネルギーのほとんどを失う。原子核との相互作用でエネルギーを失う確率は非常に小さいため、 0.07% という小さな値になると考えられる。

3.10.2 トラップの準位と幅

このトラップのエネルギー準位をダークカレントの温度依存性から計算してみよう。図 3.23の 2 つのピークの位置の差がダメージでできたトラップによるダークカレントであると解釈できるので、この差を温度別に評価する。この実験では、ダメージを与える前後のデータの量が十分でなく、求めた温度は 3 点 (-10 度、 0 度、 5 度) のみである。結果は図 3.24の通りである。結果を式 2.2にあてはめ、ベストフィット値を求めると、トラップの深さは valence band から 0.62eV となった。但し図 3.24にあるように、うまくフィットできていず、エラーの評価が曖昧である。

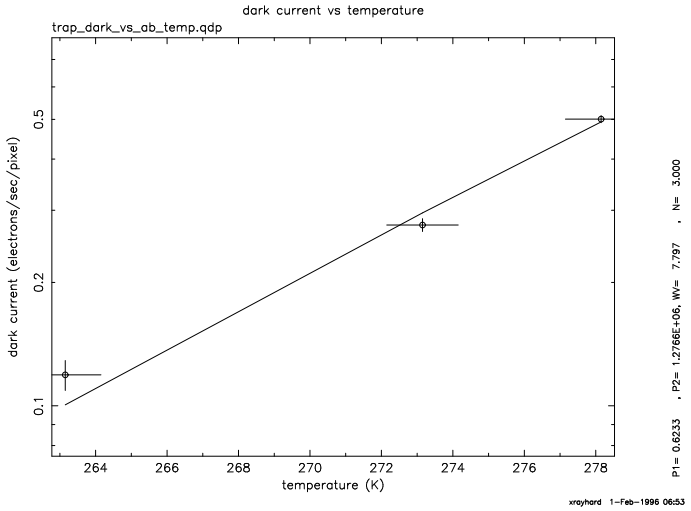

図 3.24: ダメージトラップによるダークカレントの温度依存性。縦軸 = ダークカレント、横軸 = 温度 (絶対温度)。実線は式 2.2のベストフィットである。 E_t=0.62 となる。

fitting した際の gausian の幅は、ダメージを受けていないピクセルで、 10ADU(120 electrons) でセカンドピークで 15ADU(160 electrons) であった。この差を生むには $\sqrt{15^2 - 10^2}$=11ADU = 135 electron が必要である。セカンドピークをつくるダークカレントは約 1000electron であるから、 $\sqrt{1000}$=32 electron の誤差があるが、 135electron の一部を説明できるだけである。

このダークカレントは -60 度 ∼-90 度でどれほど影響してくるだろうか。図 3.24と金属トラップによるダークカレント (図 2.7) を比べると、ほぼ同じラインにのる。ダメージによるトラップは金属トラップと同じ程度の寄与をすると仮定すれば、 -60∼-90 度といった環境では、ほぼ無視できる量であると考えられる。ホットピクセルやフリッカリングピクセルとこのトラップは関係がない可能性が大きい。

3.11 まとめ

- プロトンの照射により、 CCD の性能劣化が確認できた。その劣化は parallel CTI とホットピクセルの増加に顕著に現われ、 CTE の劣化はエネルギー分解能を悪化させる。これは過去の実験と矛盾しない。読みだしノイズには影響を与えない。
- 2MeV のプロトンの方が 9.5MeV のプロトンより大きなダメージを与える。
- ダークカレント、ホットピクセルの数は温度に依存する。温度は低いほど、性能は良い。 XIS の駆動環境である -90 は十分低い温度であるといえるだろう。
- CTI は横転送でも悪化しているが、縦転送ほどは悪くなっていない。
- 高温 (摂氏 150 度) に CCD を置くと (約 12 時間)、劣化した CCD の性能は CTE、エネルギー分解能ともに回復しアニリングの効果が現れた。しかし室温程度のアニリングでは CTE に効果はほとんどない。
- 人工的な弱い光を一様に CCD に照射することよって、 CTE の改善が確認された。これは犠牲となる信号電荷が存在することによると考えられる。又、 CTE の回復する大きさは犠牲電荷の量に依存する。
- ホットピクセルは段々成長するものではなく、突然ランダムに発生する。これは SIS の結果に一致する。
- ダークカレントの量子化を確認した。

付録 A

SRH model

トラップを介した電子と正孔の再結合モデルは Shockley-Read、 Hall により詳しく解析されている (SRH model)。再結合の割合 U は

$$U = \frac{p \cdot n - n_i^2}{(n + n_1) \cdot \tau_{p0} + (p + p_1) \cdot \tau_{n0}} \tag{A.1}$$

と表すことができる (Shockley and Read、 Hall)。ここで

$$\begin{array}{lcl} p & : & \text{free carrierとなるhollの密度} \\ n & : & \text{free carrierとなるelectronの密度} \\ n_i & : & \text{真性キャリア密度} \\ n_1 & = & N_c \exp(-\frac{E_c - E_t}{k_B T}) \\ p_1 & = & N_v \exp(-\frac{E_t - E_v}{k_B T}) \\ \tau_{p0} & : & \frac{1}{v_p s_p N_t} \\ \tau_{n0} & : & \frac{1}{v_n s_n N_t} \\ N_c & : & \text{electronの有効状態密度} \\ N_v & : & \text{holeの有効状態密度} \\ v_p & : & \text{holeの熱速度} \\ v_n & : & \text{electronの熱速度} \\ s_p & : & \text{holeの捕獲断面積} \\ s_n & : & \text{electronの捕獲断面積} \\ N_t & : & \text{トラップの密度} \\ T & : & \text{絶対温度} \\ k_B & : & \text{boltzmann定数} \\ E_v & : & \text{valence bandの上端のエネルギー} \\ E_c & : & \text{conduction bandの下端のエネルギー} \end{array} \tag{A.2}$$

である。これを空乏層内という近似を用いて温度依存性をみてみる。上記の式で温度依存を持つ項を書き出すと

$$\begin{array}{lcl} n_i & = & 2(\frac{2\pi k T}{h^2})^{\frac{3}{2}} (m_n m_p)^{\frac{3}{4}} \exp(-\frac{E_g}{2k_B T}) \\ N_c & = & 2(\frac{2\pi m_n k T}{h^2})^{\frac{3}{2}} \\ N_v & = & 2(\frac{2\pi m_p k T}{h^2})^{\frac{3}{2}} \\ v_p & \propto & T^{\frac{1}{2}} \\ v_n & \propto & T^{\frac{1}{2}} \\ n_1 & = & N_c \exp(-\frac{E_c - E_t}{k_B T}) \\ p_1 & = & N_v \exp(-\frac{E_t - E_v}{k_B T}) \end{array} \tag{A.3}$$

があげられる。ただし

$$\begin{array}{lcl} m_n & : & \text{electronの有効質量。} \\ m_p & : & \text{holeの有効質量。} \\ E_g & : & \frac{E_c - E_v}{2} = \text{バンドギャップ}(\sim 1.15\text{eV}) \end{array} \tag{A.4}$$

又 silicon の場合 $m_n = 0.33m$、$m_p = 0.5m$、$m = $ electronの質量 である。空乏層という近似なので

$$n << n_i、\ p << n_i、\ n << n_1、\ p << n_1 \tag{A.5}$$

となる。式 A.1は

$$\mathrm{U} \simeq \frac{-\mathrm{n_i^2}}{\mathrm{n_1 \cdot \tau_{p0} + p_1 \cdot \tau_{n0}}} \tag{A.6}$$

と近似できる。ここで

$$\tau_{\mathrm{no}} \sim \tau_{\mathrm{po}} \equiv \tau = \frac{1}{\sqrt{\frac{3\mathrm{k_B T}}{\mathrm{m}}}\mathrm{sN_t}} \tag{A.7}$$

$$\mathrm{m_n = m_p = m \ \ s_p = s_n = s} \tag{A.8}$$

と近似すると、

$$\mathrm{N_c \simeq N_v} \tag{A.9}$$

なので式 A.1は結局

$$\mathrm{U = -s \cdot m \cdot N_t}\sqrt{3}(\frac{2\pi}{\mathrm{h}^2})^{\frac{3}{2}}(\mathrm{k_B T})^2 \frac{1}{\exp(\frac{\mathrm{E_t - E_v}}{\mathrm{k_B T}}) + \exp(\frac{\mathrm{E_c - E_t}}{\mathrm{k_B T}})} \tag{A.10}$$

となる。我々が CCD を使う環境は温度が -90 度 ∼-60 度といった環境で、絶対温度にすれば、約 200 度である。 T = 200 K の状況では、

$$\mathrm{k_B T} = 0.017\mathrm{eV} \tag{A.11}$$

で式 A.10で分母の 2 つの exp の項は

$$\mathrm{E_t} \simeq \frac{\mathrm{E_c + E_v}}{2} = 0.575\mathrm{eV}(\text{バンドギャップ中央}) \tag{A.12}$$

でない限り、どちらかが一方的に小さい。つまり式 A.10は

$$\begin{array}{l} \mathrm{E_t} > \frac{\mathrm{E_c + E_v}}{2}\text{のとき、}\mathrm{U} \propto \mathrm{T^2 exp}(-\frac{\mathrm{E_t - E_v}}{\mathrm{k_B T}}) \\ \mathrm{E_t} < \frac{\mathrm{E_c + E_v}}{2}\text{のとき、}\mathrm{U} \propto \mathrm{T^2 exp}(-\frac{\mathrm{E_c - E_t}}{\mathrm{k_B T}}) \end{array} \tag{A.13}$$

となり 温度依存性がわかる。トラップが連続的に分布している場合を考えてみる。この場合 仮定として捕獲断面積はみな同じとしよう。式 A.1を E_t の関数と考えたなら、式 A.12の条件が成り立つ時に極大になる。つまりトラップが準位的に連続して分布しているなら、トラップを介してながれるダークカレントは、ほとんどがバンドギャップの中央付近のトラップによるもので、ダークカレントの温度依存性からトラップの深さを求めると $\frac{E_c + E_v}{2} = 0.58$ eV (バンドギャップ中央) となってしまい、温度依存性よりトラップ準位を求めると 0.58eV と算出することになる。トラップの準位が 0.01eV 違えばダークカレントの量は 2 倍異なり、 0.1eV 違えば 360 倍の違いである。

謝辞

この論文の製作にあたり、多くの人の協力をいただきました。特に京大宇宙線研究室の方の協力をいただきました。田沢さんは タンデムでの実験に多くのことを教えていただき、夜中の実験につきそい指導してただきました。松本君には、筆者とともにプロトン実験の主任として、計画、実験道具工作からデータ解析まで幅広く手伝っていただきました。尾崎さんにはタンデム実験から CCD のパターンの作成などを幅広く手伝っていただきました。 CCD 駆動システムは尾崎さんの製作したものです。鶴さんにもタンデムの徹夜の実験を手伝っていただき、この論文を読んで何度もチェックしていただきました。 CCD-DAQ システムは鶴さんの製作です。粟木助手もタンデムでの実験を手伝っていただき真空槽関連の整備をしていただきました。前田君もタンデムの実験を手伝っていただき、 X 線源の較正をしていただきました。小山先生には、実験の計画にアドバイスをいただき、海外を含めた学会での発表に大変協力していただきました上野さん、林さん、坂野君、坪井さん、学部生の浜口君、小澤君、西内さんには実験のセッティングや撤収などの作業を手伝っていただきました。今西君や舞原先生など赤外線グループの方にも CCD に関する知識や解析のアドバイスなどをうけました。

研究室以外の方にも協力をいただきました。阪大の常深先生、北本さん、林田さん、宮田さんや大学院生の鷲見君や大野君、今吉君、戸練君にも いろいろ CCD について知識をいただきました。宇宙科学研究所の堂谷さん、山下さんには ASCA に関する情報を沢山教えていただきました。

最後に浜松ホトニクスの宮口さん、山本部長、鈴木さんにお礼を申しあげます。 CCD について何もしらない我々のつまらない質問に答えていただき、高価な高性能 CCD チップを沢山供給していただきました。

本当に皆様ありがとうございまいした。

参考文献

1. Burke,B.K and Gajar,S.A IEEE Transations on electron Device Vol. 38 No2 285 1991
2. A,Yamashita 修士論文 「「あすか」搭載 X 線 CCD カメラの軌道上での較正」, (東京大学 1995)
3. K.Gendreau , 博士論文 (MIT 1995)
4. T.Kotani 修士論文 「ASTRO-D 搭載 SIS の性能評価」(東京大学 1993)
5. Miyaguchi 1995 浜松ホトニクスの宮口和久氏の個人的メモ。オリジナルは Jenesick 作
6. Miyaguchi 1996 浜松ホトニクスの宮口和久氏からの個人的な e-mail
7. Dotani *et al.* 1995 ASCA NEWS
8. M.Ozaki 修士論文 「X 線 CCD システムの開発」,(京都大学 1994)
9. Holland *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science Vol36 No6 1663. 1991
10. Y.Ono 修士論文 「X 線検出用 CCD の研究開発」(大阪大学 1996)
11. H.Tomida *et al.* in press (SPIE 1996)
12. Janesick *et al.* SPIE. Charge Coupled Devices and Solid State Optical Sensoers II. Vol 1447. P88 1991
13. Janesick *et al.* IEEE Transactions on Nuclear Science Vol 36 No1 572. 1989
14. Morley *et al.* Instrumentation for Ground Lased Optical Astronomy Present and Future (L Robinson ed.) 1988