X線CCDにおける新しいイベント解析法
– イベント吸収深さと電子群の拡がりの測定 –

河野 誠

京都大学院 理学研究科 物理学第二教室 宇宙線研究室

2001年2月1日

概要

CCD 検出器は X 線天文学において空間分解能、エネルギー分解能、時間分解能という面で現在最もバランスの取れた検出器である。CCD では 1 つの X 線光子によって生成された電子群が複数のピクセルにまたがって拡がることがあるため、正しい X 線のエネルギーを知るためには複数のピクセルのデータから X 線イベントを再構築しなければならない。$ASCA$ 衛星以降現在まで一般的であったイベント解析法グレード法では 2×2 ピクセル以上に広がったイベントは X 線イベントとみなさず捨てていた。しかし、将来的には X 線反射鏡の性能向上により、より空間分解能に優れ硬 X 線領域でも検出効率の高い CCD が必要とされる。これらの目標は CCD のハード的な改良、すなわち小さいピクセル、厚い空乏層によって達成することができる。しかし、これらの改良にともない CCD のピクセルサイズに対して拡がりの大きいイベントが増加する。従って、グレード法では大きく拡がるイベントが多い硬 X 線領域で検出効率の低下を招いてしまう。

そこで我々の研究室では、グレード法に代わるイベント解析法フィッティング法を開発している。フィッティング法はイベントの周囲の 5×5 ピクセルの波高値を 2 次元対称ガウシアンでフィッティングを行ないイベント全体の波高値を求めるものである。従って、フィッティング法はグレード法より大きく拡がったイベントまで有効利用することが出来る。

私は、シミュレートしたイベントに対してフィッティング法を適用し波高値と広がりを正しく評価するための補正法を確立した。次に、実際の CCD で得られたイベントに対してフィッティング法を用いて解析を行なった。波高値-拡がり空間上での分布の形は CCD に固有で CCD の不純物濃度等によって異なっている。しかし、エネルギーの異なった X 線を同じ CCD に照射した場合には同じ分布が得られた。これは、イベントの拡がりと CCD 表面からの深さの間に相関があることを示している。広がりと深さの関係を求めるため、フラックスを良く更正した線源を用いる、エネルギーの異なる X 線を用いるという二つの実験を行なった。

その結果からイベントの広がりと深さの関係を求め波高値-拡がり空間上での分布が空乏層で吸収されたイベント、中性領域で吸収されたイベント、底近くの不純物濃度の高いところで吸収されたイベント、に分類することができ、CCD のパラメータの違いで説明することが出来た。

目 次

第 1 章　X 線天文学 **1**
1.1 X 線検出器 1
1.2 X 線天文衛星 2

第 2 章　X 線 CCD **5**
2.1 CCD の構造 5
2.1.1 MOS ダイオードの構造 5
2.1.2 空乏層 5
2.1.3 チャネルデバイス 6
2.1.4 電荷転送方式 7
2.1.5 露光方式 8
2.2 CCD での X 線の検出 9
2.2.1 X 線の吸収 9
2.2.2 CCD で生成された電子群の運動 11
2.3 CCD の性能 12
2.3.1 エネルギー分解能 12
2.3.2 量子効率 13
2.3.3 CCD の性能を劣化する要因 13

第 3 章　CCD データの解析法 **15**
3.1 イベント検出法 15
3.2 イベント解析法 17
3.2.1 グレード判定法 17
3.2.2 フィッティング法 17

第 4 章　実験装置 **21**
4.1 CCD 駆動システム 21
4.2 CCD Chips 21
4.3 真空槽 22
4.4 コリメータ付き線源および比例係数管 24
4.5 蛍光 X 線発生装置 25

第 5 章　実験記録 **27**
5.1 比例計数管による線源の強度測定 27

5.2 コリメーター付線源を使用した CCD の実験 28
5.3 蓄積中の電極電圧を変える実験 28
5.4 蛍光 X 線照射実験 28

第 6 章 グレード法による解析結果 **31**
6.1 コリメーター付き線源を用いた検出効率の測定 31
6.2 蓄積中の電極電圧にともなう検出効率の変化 32
6.3 蛍光 X 線照射実験 35

第 7 章 フィッティング法の改良と検証 **41**
7.1 フィッティング法の高速化 41
7.2 フィッティング法の検証 42
7.2.1 波高値 42
7.2.2 広がり 44
7.2.3 イベント中心位置 45
7.2.4 フィッティング法の検証まとめ 46

第 8 章 フィッティング法とグレード法の比較 **47**
8.1 電極電圧にともなうスペクトルの変化 47
8.1.1 Deep1 47
8.1.2 Deep2 48
8.2 蛍光 X 線照射実験 49
8.2.1 Deep1 50
8.2.2 Deep2 50
8.3 フィッティング法とグレード法の比較のまとめ 51

第 9 章 フィッティング法によるイベントの拡がりを用いた解析 **53**
9.1 コリメーター付き線源を用いたイベントの深さの測定 53
9.2 イベントの広がりと波高値の関係 55
9.3 蓄積中電極電圧による空乏層厚さの変化の測定 58
9.4 エネルギーに伴う PH-σ ダイアグラムの変化 63
9.4.1 Deep1 63
9.4.2 Deep2 66
9.5 イベントの拡がりの解析結果のまとめ 70
9.6 拡がりのモデルとの比較 72
9.6.1 空乏層で吸収されたイベント 72
9.6.2 中性領域で吸収されたイベント 75
9.6.3 中性領域より深いところで吸収されたイベント 77

第 10 章 まとめ **79**

付 録 A フィッティング法を用いた検出効率測定法 **81**

図 目 次

2.1 MOS 構造の電荷分布 6
2.2 チャンネルデバイスによる電場構造の違い 7
2.3 電荷転送方式 8
2.4 FT 方式と FFT 方式 9
2.5 0.2-15 keV の X 線に対する Si の質量吸収係数 10
2.6 電子密度分布 12

3.1 CCD でとられるイメージ (模式図) 15
3.2 CCD の生イメージ 15
3.3 CCD で得られる生スペクトル 16
3.4 グレード判定法による分類 18
3.5 フィッティングの方法 (1 次元) 19

4.1 1/2 inch CCD の外観 22
4.2 CCD の断面構造 22
4.3 蛍光 X 線発生装置およびチェンバー 1 外観 23
4.4 チェンバー 2 内部およびコリメータ付き線源 24
4.5 コリメーター付き線源 24
4.6 比例係数管のサイズ 24
4.7 比例計数管とコリメーター付き線源 25
4.8 X 線発生装置からの X 線のスペクトル (HV=20 kV) 26

5.1 比例係数管による ^{55}Fe のスペクトル 28
5.2 ^{55}Fe のスペクトル (バックグラウンド差引後) 28

6.1 コリメーター付き線源を使用した実験の Deep1 でのイベント検出位置 . . . 31
6.2 コリメーター付き線源を使用した実験の Deep2 でのイベント検出位置 . . . 32
6.3 電極電圧にともなう Mn K の検出効率の変化 (グレード法) 33
6.4 Deep1 の ^{55}Fe のスペクトル 34
6.5 Deep2 の ^{55}Fe のスペクトル 34
6.6 電極電圧にともなうエネルギー分解能の変化 (グレード法) 35
6.7 電極電圧にともなう ^{55}Fe のピーク位置の変化 (グレード法) 35
6.8 グレード法による Deep1 のエネルギー vs チャンネル 37
6.9 グレード法による Deep2 のエネルギー vs チャンネル 37
6.10 グレード法による Deep1 のエネルギー vs エネルギー分解能 38

6.11 グレード法による Deep2 のエネルギー vs エネルギー分解能 39

7.1 シミュレーションしたイベントをフィットして得られたスペクトル 43
7.2 シミュレーションで得られたスペクトルのフィッティング結果 43
7.3 シミュレーションによる出力 σ の分布 44
7.4 シミュレーションで得られた σ の平均と標準偏差 45
7.5 σ=0.2 ピクセルの時のイベント中心のずれ 45
7.6 シミュレーション結果、波高値と σ を補正後 46

8.1 Deep1 のフィッティング法による ^{55}Fe のスペクトル 48
8.2 電極電圧にともなう ^{55}Fe のピーク位置の変化 (Deep1 フィッティング法) . . 48
8.3 電極電圧にともなうエネルギー分解能の変化 (Deep1 フィッティング法) . . 48
8.4 電極電圧にともなう検出効率の変化 (Deep1 フィッティング法) 48
8.5 Deep2 のフィッティング法による ^{55}Fe のスペクトル 49
8.6 電極電圧にともなう ^{55}Fe のピーク位置の変化 (Deep2 フィッティング法) . . 49
8.7 電極電圧にともなうエネルギー分解能の変化 (Deep2 フィッティング法) . . 49
8.8 電極電圧にともなう検出効率の変化 (Deep2 フィッティング法) 49
8.9 Deep1 のエネルギーチャンネル関係 (フィッティング法) 50
8.10 Deep1 のエネルギーエネルギー分解能関係 (フィッティング法) 50
8.11 Deep2 のエネルギーチャンネル関係 (フィッティング法) 51
8.12 Deep2 のエネルギーエネルギー分解能関係 (フィッティング法) 51

9.1 コリメーター付き線源を使用した実験の PH-σ ダイアグラム 53
9.2 拡がり σ 以下での検出効率 54
9.3 5.894 keV の X 線がある深さまでに吸収される確率 55
9.4 X 線の吸収された深さとイベントの広がりの関係 55
9.5 フィッティング法におけるイベント閾値 56
9.6 PV=+6[V]、active 領域の PH-σ ダイアグラム 56
9.7 VOC 領域の PH-σ ダイアグラム 57
9.8 引き算後の PH-σ ダイアグラム 57
9.9 σ で区切ったスペクトル 58
9.10 電極電圧による PH-σ ダイアグラムの変化 (Deep1) 60
9.11 電極電圧による PH-σ ダイアグラムの変化 (Deep2) 61
9.12 イベントの深さと広がりの関係 62
9.13 横に拡がる成分を除いたカウント数の比較 62
9.14 各ターゲットの PH-σ ダイアグラム (Deep1) 64
9.15 各ターゲットの時の入射光子数のフィッティング結果 (Deep1) 65
9.16 各ターゲットを用いた時の拡がりと深さの関係 66
9.17 各ターゲットの PH-σ ダイアグラム (Deep2) 67
9.18 各ターゲットの時の入射光子数のフィッティング結果 (Deep2) 69
9.19 各ターゲットを用いた時の拡がりと深さの関係 (Deep2) 70
9.20 PH-σ ダイアグラム上でのイベントの分類 71

9.21 空乏層で吸収されたイベントが拡散する様子 72
9.22 拡散方程式の座標系 73
9.23 空乏層のイベントの拡がりと深さの関係フィッティング結果 (Deep2) 74
9.24 各電圧での空乏層厚さとアクセプタ濃度フィット結果 74
9.25 電荷損失の計算値のプロット 76

A.1 XIS の PH-σ ダイアグラム 81
A.2 σ と σ 以下のカウント数 (XIS) 81
A.3 深さの測定 82
A.4 深さとイベントの拡がりの関係 82

表 目 次

1.1 主な X 線天文衛星 3

4.1 C4880 の電圧可変範囲 21
4.2 CCD Deep1、Deep2 の不純物濃度、厚さ 22
4.3 蛍光 X 線発生装置のターゲットと蛍光 X 線のエネルギー 26

5.1 各 CCD でのクロック電圧 27
5.2 蛍光 X 線照射実験で X 線発生装置に流した電流 29
5.3 実験記録 29

6.1 検出効率測定実験のグレード毎のカウント数。 32
6.2 各ターゲットでのグレード分岐比 (Deep1) 36
6.3 各ターゲットでのグレード分岐比 (Deep2) 36
6.4 グレード法によるエネルギー分解能のエネルギー依存フィッティング結果 38

9.1 各ターゲット使用時の全入射光子数 (Deep1) 63
9.2 各ターゲット使用時の全入射光子数 (Deep2) 68
9.3 電荷損失のパラメータ 75
9.4 中性領域中の電子の再結合に関するパラメータ 76
9.5 中性領域中のイベントの拡がりに関するパラメータ 77

第1章　X線天文学

現在では多くの種類の天体からX線が放射されていることが知られている。しかし、X線は大気によって吸収されてしまうため観測装置を大気圏外に持ち出さなければ観測することが出来ない。X線天文学の幕開けは、1962年にB. Rossiらがロケットを打ち上げ好運にもさそり座の方向から強力なX線 (Sco X-1) を検出したことである。その後現在までに多くの人工衛星が打ち上げられ、さまざまな種類の天体からX線が放射していることが観測されている。

1.1　X線検出器

X線天文学では天体を観測する際、X線のエネルギー、入射位置、時刻を測定することが重要である。これらの性能をバランスよくもつ検出器が多く用いられるがどれか一軸に秀でた能力を持つ検出器も存在する。

比例計数管

Arなどの不活性ガスを金属容器に閉じ込め芯線に電圧をかける。X線が入射し光電吸収されると電子は電圧により加速され、周囲の原子を電離し増幅される。芯線を複数用いることにより位置検出も可能となっている。軽量で大面積のものを作ることが出来るが、エネルギー分解能はあまりよくない。

蛍光比例計数管

X線の吸収体はやはりガスであるが、電子を増幅せずに発光領域に導く。電子が周囲の原子を励起して、それが基底状態に戻る際に発する蛍光を光電子増倍管で読み出す。

マイクロチャンネルプレート

入射X線によって生じる光電子を多数の光電子増倍管で検出する。エネルギー分解能はほとんどないが、優れた空間分解能、時間分解能を達成できる。精度のよいX線反射鏡を搭載した衛星で使われる。

CCD

半導体検出器はX線を空乏領域で吸収し電子-正孔対を発生させて検出する。半導体では平均電離エネルギーが小さいため高いエネルギー分解能が達成できる。この半導体検出器を格子上に区切ったものがCCDであり、優れたエネルギー分解能と位置分解能を合わせ持っている。

回折格子

X線に分散をかけ他の検出器で座標を測定することにより非常に優れたエネルギー分解能を達成している。しかし、位置分解できない、拡がった天体には使用できない、低エネルギーのX線にしか感度がない、検出効率が悪い、などの欠点もある。

カロリーメーター

X 線のエネルギーを素子の温度上昇として検出する。極低温で動作させる必要があるが非常に優れたエネルギー分解能を持つ。回折格子と異なり鉄輝線を含む領域まで観測可能である。しかし、現在のところ CCD のようには空間分解能を期待できない。

1.2　X 線天文衛星

1970 年にアメリカが Uhuru を打ち上げて以降数多くの X 線天文衛星が打ち上げられてきた (表 1.1)。日本はこれまで特徴をもった衛星を打ち上げ成果をあげてきている。ここでは、X 線 CCD カメラを搭載した 3 台の衛星を紹介する。

ASCA 1993 年 2 月に打ち上げられた日本の 4 番目の X 線天文衛星。4 台の X 線反射望遠鏡を搭載し初めて硬 X 線領域での撮像を行なった。焦点面検出器として 2 台の蛍光比例計数管 (GIS) と X 線 CCD カメラ (SIS) を搭載した。CCD の分光能力を生かして超新星残骸のプラズマ診断や活動銀河核からの拡がった鉄輝線の発見、硬 X 線での撮像能力を生かして強い吸収を受けた前主系列星からの X 線検出や超新星残骸 SN1006 での宇宙線加速の証拠を発見するなど多くの成果をあげてきた。現在観測を停止中で 2001 年 3 月頃に大気圏に突入する予定。

Chandra 1999 年 7 月にアメリカ NASA により打ち上げられた衛星。角分解能 $0.5''$ と今までにない結像性能を持った X 線反射望遠鏡を搭載している。検出器としてマイクロチャンネルプレート (HRC) と X 線 CCD(ACIS)、回折格子を搭載している。現在までに、その優れた結像性能を生かして、多くの星がいる星形成領域から個々の天体を分離する、超新星残骸で領域毎の放射機構の違いをみる、宇宙 X 線背景放射の大部分が AGN で説明出来ることを示す、など数多くの成果をあげている。

Newton 1999 年 12 月に ESA(European Space Agency) により打ち上げられた衛星。焦点面検出器として 2 種類の X 線 CCD カメラと回折格子を搭載している。X 線反射望遠鏡の有効面積が大きく、撮像型の衛星としてはこれまでにない検出感度を持っている。その有効面積を生かしてサーベイ観測で成果を上げることが期待されている。

名称	国	稼働年	検出器 †
Uhuru	アメリカ	1970–1973	P
Ariel-5	イギリス	1974–1975	P
HEAO-1	アメリカ	1977–1979	P, SC
Einstein	アメリカ	1978–1981	P, SC, M
Hakucho	日本	1979–1983	P
Tenma	日本	1983–1985	P, SC
EXOSAT	ESA	1983–1986	P
Ginga	日本	1987–1991	P
ROSAT	ドイツ	1990–1998	P, M
ASCA	日本	1993–	SC, CCD
RXTE	アメリカ	1995–	P
BeppoSAX	イタリア	1996–	SC
Chandra	アメリカ	1999–	M, CCD
Newton	ESA	1999–	CCD

表 1.1: 主な X 線天文衛星

† P: 比例計数管、SC: 蛍光比例計数管、M: マイクロチャネルプレート、SS: 半導体検出器、CCD: X 線 CCD

第2章　X線CCD

CCD(Charge Coupled Device) は半導体検出器を格子状に分割し位置も検出できるようにしたものである。それにより、入射 X 線のエネルギー、位置、時刻を同時に測定することが可能である。X 線天文衛星では日本の ASCA に搭載されて以降、Chandra、Newton に搭載されそして ASTRO-EII にも搭載予定であり、現在最も幅広い観測目的を達成できる検出器である。

CCD の構造には MOS 構造と p-n 接合の 2 種類がある。今回使用した CCD は MOS 構造である。MOS 構造とは、表面から金属 (Metal) で出来た電極、酸化物 (Oxide) で出来た絶縁層、半導体 (Semiconductor) という構造のことである。

2.1　CCDの構造

2.1.1　MOSダイオードの構造

CCD を構成する MOS ダイオード構造は上から順に、ポリシリコン、SiO_2、p 型半導体の Si を重ねた構造になっている。p 型半導体の MOS 構造の電荷分布は図 2.1 のようになっている。表面の電極に負の電圧をかけると図 2.1(a) のように半導体表面に p 型半導体の多数キャリアである正孔が集まる。正の電圧をかけると多数キャリアである正孔が電場によって排除されキャリアが無い部分すなわち空乏層が形成される (図 2.1(b))。空乏層厚さは電極にかける電圧とともに増大する。しかし、電圧がある一定値を越えると半導体表面に小数キャリアである電子が蓄積し始め (図 2.1(c)) 半導体にかかる電場が変化しなくなるため空乏層厚は成長しなくなる。

2.1.2　空乏層

p 型半導体の MOS 構造の電極に正の電圧をかけると半導体の表面付近から正孔が排除され空乏状態となり、$-q$ の電荷を持つアクセプタイオンが一様に分布する。従って、空乏層の単位体積当たりの電荷量 Q はアクセプタ濃度 N_A の関数として

$$Q = -qN_{\mathrm{A}} \tag{2.1}$$

のように表される。これより深さ方向のポアソン方程式は

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{qN_{\mathrm{A}}}{\epsilon} \tag{2.2}$$

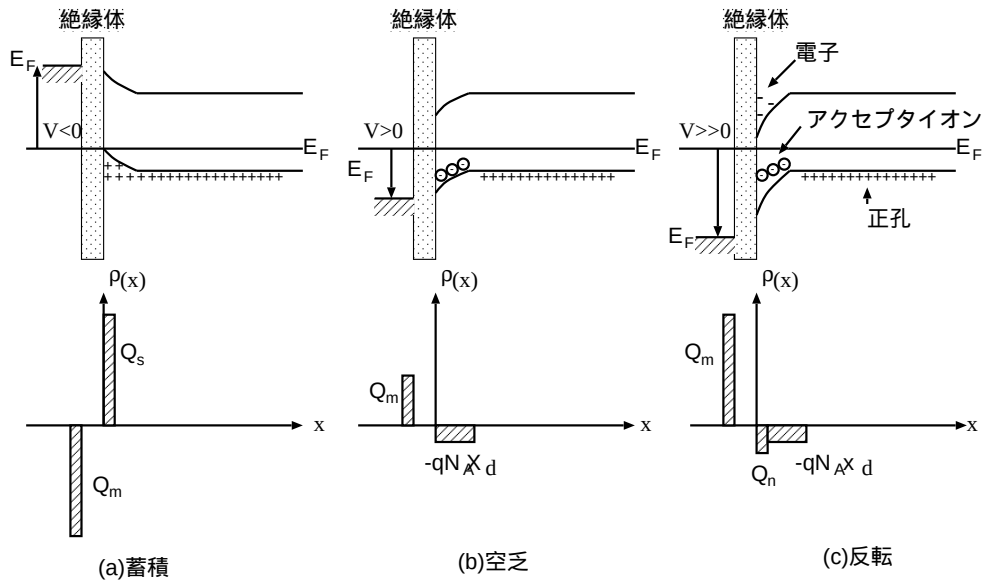


図 2.1: MOS 構造の電荷分布
Q_m:金属表面にたまる電荷、Q_s:半導体表面にたまる電荷、Q_n:反転層にたまる電荷、N_A アクセプタ濃度、E_F:フェルミ準位

と書ける。ここで、ϵ は Si の誘電率で $\epsilon = 1.05 \times 10^{-12}[\mathrm{Fcm}^{-2}]$ である [6]。深さ x_d より深いところでは中性領域となっているので電場は 0 であり中性領域のポテンシャルを 0 とする。すなわち、境界条件は

$$\frac{d\phi}{dx}(x_d) = 0 \tag{2.3}$$

$$\phi(x_d) = 0 \tag{2.4}$$

となる。この境界条件のもとに式 2.2 を解くと

$$\phi(x) = \frac{qN_\mathrm{A}}{2\epsilon}(x - x_d)^2 \tag{2.5}$$

電極表面 $(x = 0)$ のポテンシャルを ϕ_s とすると空乏層厚さ x_d は

$$x_d = \sqrt{\frac{2\epsilon\phi_s}{qN_\mathrm{A}}} \tag{2.6}$$

と求まる。従って理想的な状況では電極にかける電圧が高いほど、また不純物濃度が低いほど空乏層厚さが大きくなることがわかる。

2.1.3　チャネルデバイス

p 型半導体の MOS 構造の電極に正の電圧をかけると半導体表面にポテンシャルの溝が生じる。ここに電子を集めて電荷の転送を行なう CCD を表面チャネルデバイスと呼ぶ。しか

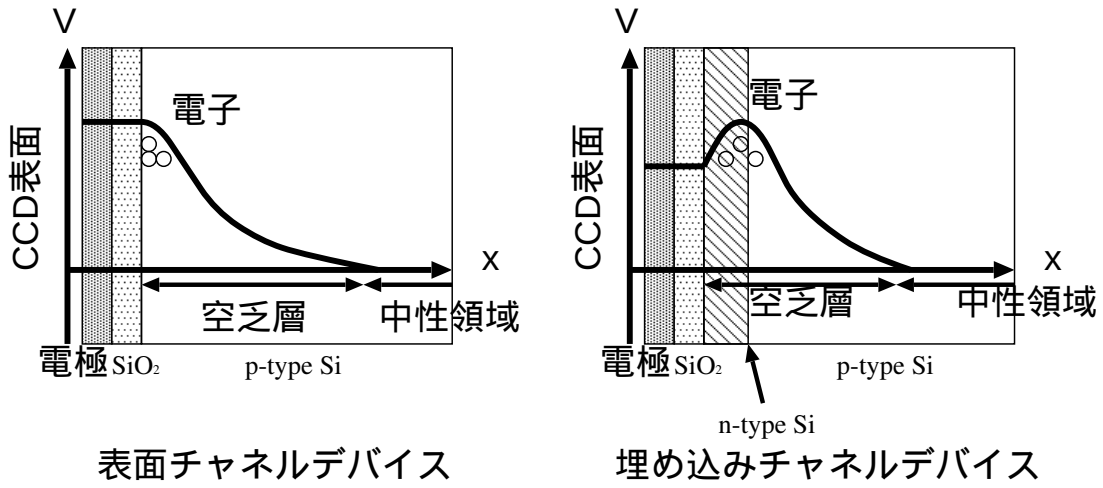


図 2.2: チャンネルデバイスによる電場構造の違い

し、Si-SiO_2 の境界面付近は界面トラップによる影響を受けやすく電荷回収効率が悪くなってしまう。

これに対し p 型半導体と絶縁層の間に n 型半導体をはさんだ MOS 構造だとポテンシャルが図 2.2 のようになり界面トラップの影響を受けにくくなる。このような CCD を埋め込みチャネルデバイスと呼ぶ。今回使用した CCD は埋め込みチャネルデバイスであり、p-n 接合により電極に電圧をかけない場合でも空乏層が存在する。

2.1.4 電荷転送方式

電荷転送の方法には電極構造の違いによって区別される以下のようなものがある。

- 三相方式
  1 ピクセルに 3 個の電極があり、図 2.3 左上のように電圧を順番に変化させることにより電荷を転送する。与えるクロックが複雑になるデメリットもあるが、電荷を逆方向にも転送することも可能である。

- 二相方式
  1 ピクセルに 2 個の電極があり、図 2.3 右上のようにピクセルの一部に不純物をドープすることによって電位勾配を作り電荷を転送する。電荷を逆向きに転送することは出来ない。今回使用したのはこのタイプの CCD。

- バーチャルフェイズ方式
  1 ピクセルに電極は一つだけ。図 2.3 下のようにピクセルの一部に不純物をドープしてある。電荷転送方向はドープによって決まっている。表面に電極がない部分があるので低エネルギー側で検出効率を稼げるのが特徴。

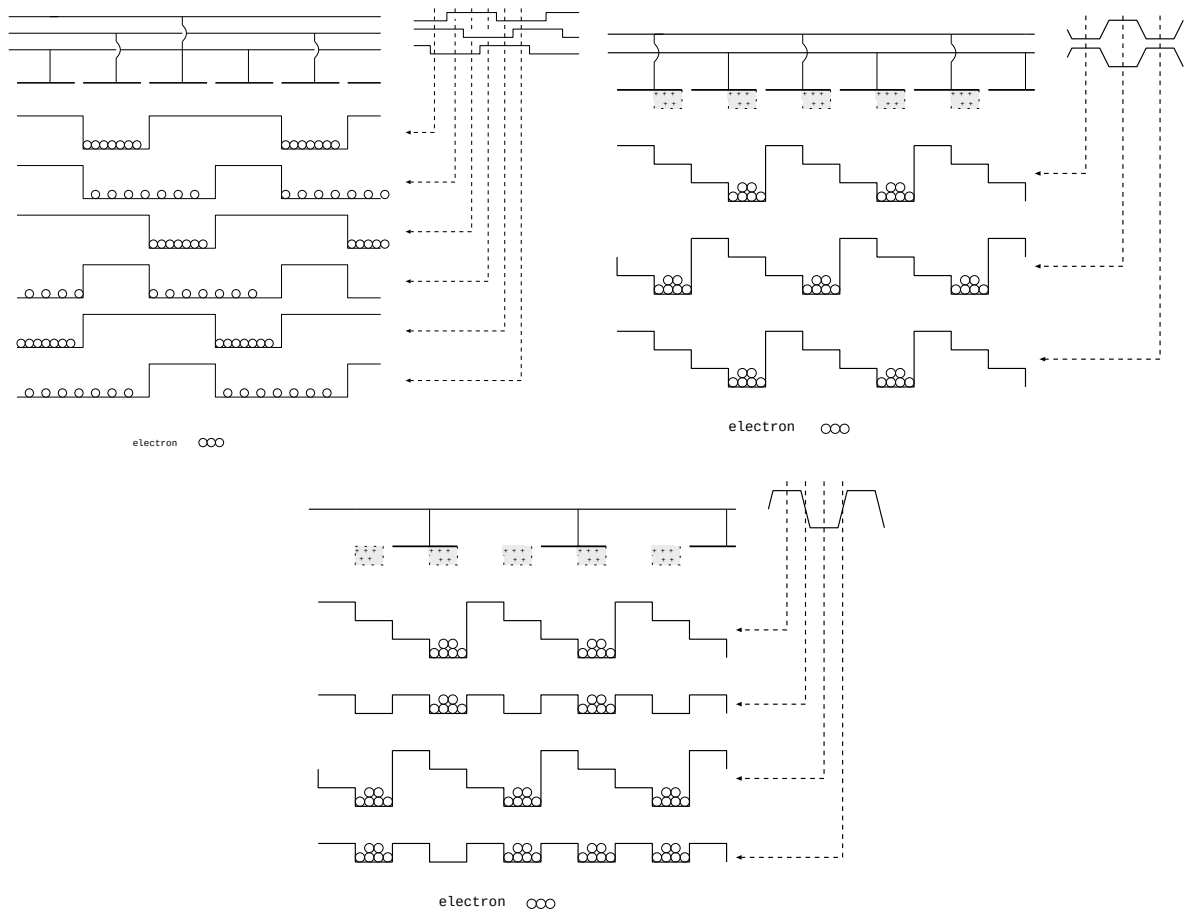


図 2.3: 電荷転送方式
左上:三相方式、右上:二相方式、下:バーチャルフェーズ方式

2.1.5　露光方式

図 2.4 のように CCD 全体で受光する Full Frame Transfer(FFT) 方式と CCD を 2 つの領域、受光領域と蓄積領域に分割して使用する Frame Transfer(FT) 方式がある。FFT 方式では縦転送 1 回する毎に、横転送を行ない読み出すことを横方向のピクセルの数だけ行なわなければならない。一方、FT 方式では、縦転送のみ行ない遮光された蓄積領域に転送する。そして、露光時間中に読み出すということが出来る。従って、縦転送の途中で入射し CCD 上での位置と取得されたイメージ上での位置が縦転送方向に異なるイベントは FT 方式の方が少なく押えることが出来る。

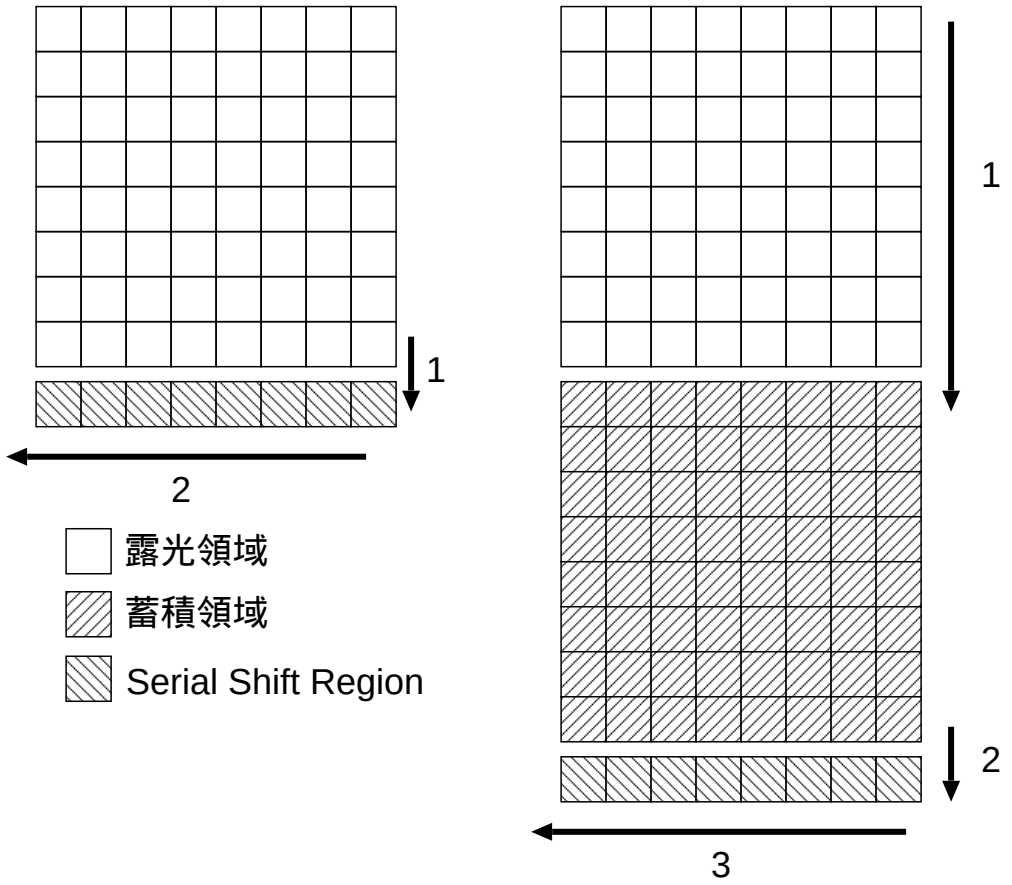


図 2.4: FT 方式と FFT 方式
左:FFT 方式　1、2 を交互に行なう。
右:FT 方式　1 を行なった後、2、3 を交互に行なう。

2.2 CCD での X 線の検出

2.2.1 X 線の吸収

X 線が CCD に入射するとまず光電吸収によって X 線はそのエネルギーを電子に与える。光電吸収を起こす確率は入射 X 線のエネルギーに依存しており、Si K 殻のエネルギー ($E_{\rm k} = 1.838$ [keV]) のところで不連続となっている。これは、入射 X 線のエネルギーが $E_{\rm k}$ より大きい場合は主に Si 原子の K 殻の電子に、小さい場合には主に L 殻の電子に作用するためである。0.1–15 [keV] の X 線と Si の相互作用はほぼ光電吸収のみであり他の相互作用は考えなくてよい。X 線が厚さ x[cm] の Si に吸収されずに通り抜ける確率 P は、Si の密度 ρ[g cm^{-3}] と質量吸収係数 μ[cm^{2}g] を用いて

$$P = e^{-\mu\rho x} \tag{2.7}$$

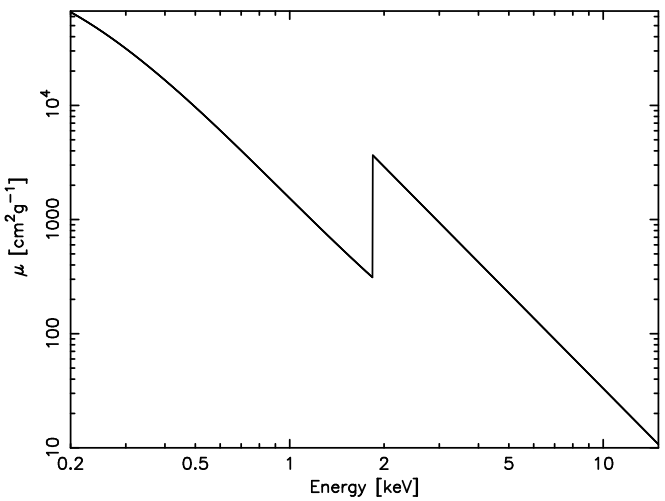


図 2.5: 0.2-15 keV の X 線に対する Si の質量吸収係数

のように表せる。質量吸収係数 μ は図 2.5 のように入射 X 線のエネルギー E[keV] の関数であり [5] により

$$\log \mu = \begin{cases} 3.19 - 2.71 \log E + 0.0755 (\log E)^2 + 0.873 (\log E)^3 & (E < E_{\rm k}) \\ 4.3 - 2.78 \log E & (E > E_{\rm k}) \end{cases} \tag{2.8}$$

という関数で近似されている。

光電吸収で叩き出された電子はその運動エネルギーを周囲の原子に与え、正孔・電子対を生成する。その個数は電子のエネルギーに比例している。Si の平均電離エネルギーは 3.65 eV である。一方、光電吸収で叩き出された電子の軌道には外殻電子が落ち込みその準位間のエネルギーは多くの場合は、電子の形で放出される。この電子は Auger 電子と呼ばれ、その運動エネルギーは電離に使われる。この場合、入射した X 線のエネルギーはすべて電離に使われる。外殻電子が落ち込んだ時にそのエネルギーが X 線として放出されることもある。その X 線のエネルギーは L 殻から K 殻への遷移の場合 1.739 [keV] である。この X 線の飛程により、次のようなことが起こりうる。

1. 同一ピクセルで吸収される。
2. 隣のピクセルで吸収される。
3. 遠くのピクセルで吸収される。
4. CCD の外部に逃げ出す。

1. の場合は Auger 電子を発生した場合と区別がつかず X 線のエネルギーがすべて電離に使われる。2. の場合もイベント解析法によって足し合わせ X 線のエネルギーを求めることが出来る。3. や 4. の場合には Si の蛍光 X 線のエネルギーだけ失ったイベントとして認識さ

れる。このイベントを Si エスケープと呼ぶ。また、3. の場合には Si の蛍光 X 線は別のイベントとして認識される。このように CCD に入射した X 線は多くの場合そのエネルギーに比例した個数の電子を電離するので、その電子の個数を数えることによって X 線のエネルギーを知ることが出来る。

2.2.2 CCD で生成された電子群の運動

X 線により CCD 内部で生成された電子群はその環境に応じて、ドリフトや拡散によって運動する。また、不純物濃度に応じて時間とともに再結合する。

- ドリフト
  空乏層で生成された電子は図 2.2 のようにかかっている電場によって電極方向にドリフトする。X 線の吸収された深さを x、ポテンシャルを $\phi(x)$ とするとドリフト速度 v は
  $$v = \mu_n(-\frac{d\phi(x)}{dx}) \tag{2.9}$$
  と表される。μ_n[Vs] は電子の移動度である。(2.5) 式より電子が電極に到達するのにかかる時間 $t_{\rm drift}$[s] は
  $$t_{\rm drift} = \frac{\epsilon}{q\mu_n N_{\rm A}} \log(\frac{x_d}{x_d - x}) \tag{2.10}$$
  と求められる。

- 拡散
  CCD 内部で生成された電子群は以下のような理由で時間とともに拡がる。このプロセスを拡散と呼ぶ。図 2.6 のような密度で電子が分布しているとする。電子は熱運動している。その速度を v_{th}、平均自由行程を l とすると平均緩和時間 τ_c は $\tau_c = l/v_{th}$ となる。図中の境界面を左から単位時間あたり単位面積あたりに通過する電子の個数 F_1 は
  $$F_1 = \frac{1/2\rho(-l)l}{\tau_c} = \frac{1}{2}\rho(-l)v_{th} \tag{2.11}$$
  逆に右から左にながれる個数は
  $$F_2 = \frac{1}{2}\rho(l)v_{th} \tag{2.12}$$
  となる。したがって左から右にながれる実効的な電子の個数 F は
  $$F = F_1 - F_2 = \frac{1}{2}v_{th}(\rho(-l) - \rho(l)) \tag{2.13}$$
  $x = \pm l$ での値をテイラー展開して第 2 項までとると
  $$F = -v_{th}l\frac{d\rho}{dx} \equiv -D\frac{d\rho}{dx} \tag{2.14}$$
  $D \equiv v_{th}l$ は拡散係数と呼ばれる。拡散係数と移動度の間には
  $$D = (\frac{kT}{q})\mu_n \tag{2.15}$$
  の関係がなりたちアインシュタインの関係式として知られている。

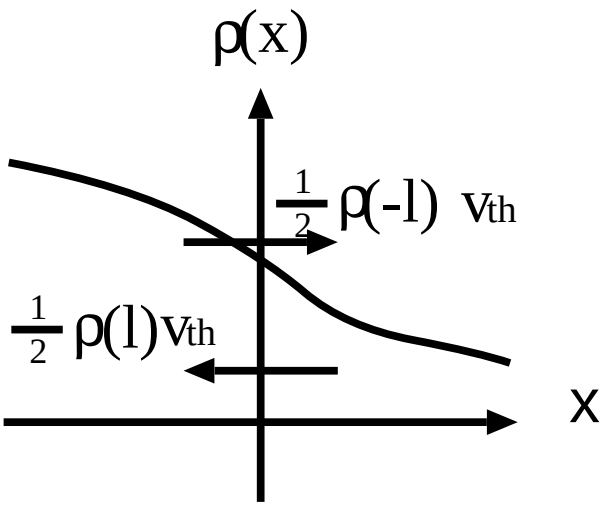


図 2.6: 電子密度分布
→は境界を単位面積あたり単位時間あたりに通過する電子の個数。

- 再結合
  Si 中では伝導帯の底の電子は価電子帯上端の正孔と異なり運動量がゼロでないため、伝導帯の電子と価電子帯の電子が結合する直接再結合は起こらない。すなわち、エネルギーと運動量を保存したまま遷移するためには格子との相互作用が必要である。このような半導体は間接バンドギャップ半導体と呼ばれバンドギャップ中に局在したエネルギー準位を仲介した間接遷移が再結合の主要な過程となる。中性領域では正孔が圧倒的に多いため中間準位に電子が捕獲されるとすぐに正孔がとらえられるため、再結合過程は電子の捕獲過程で律速されている。中間準位の濃度を N_t、電子の捕獲断面積を σ_n とすると電子の寿命 τ_n は

$$\tau_n = \frac{1}{v_{th}\sigma_n N_t} \tag{2.16}$$

  となる。

2.3　CCD の性能

CCD の性能を評価する主な指標としてゲイン、エネルギー分解能、量子効率があげられる。ゲインやエネルギー分解能は観測の質を、量子効率は観測の量を左右する重要なパラメータである。

2.3.1　エネルギー分解能

CCD で単色の X 線を検出した時の出力波高値は幅をもつ。その幅は入射 X 線によって作られる電子個数の統計的揺らぎに読みだしノイズなどの要素を加えたものとなる。電子

の個数による統計的揺らぎは poisson 分布からずれておりそのずれはファノ因子と呼ばれる。ファノ因子を F、読みだしノイズの標準偏差を σ_r、X 線のエネルギーを E_0、平均電離エネルギー (Si では 3.65 eV) を W とすると波高値の分布は σ_e を拡がりとするガウス分布になる。

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_r^2 + F\frac{E_0}{W}} \tag{2.17}$$

ファノ因子は実験的に求められており Si では $F = 0.12$ である。エネルギー分解能は半値幅 (FWHM) を eV 単位で表したものを用いるのが一般的であり次式のようになる。

$$FWHM = \sqrt{8\ln 2}W\sqrt{\sigma_r^2 + F\frac{E_0}{W}} \tag{2.18}$$

CCD でのエネルギー分解能の理論的限界値は $\sigma_r = 0$ となった時の値で 5.9 keV の X 線に対して約 120 eV である。

2.3.2 量子効率

量子効率とは、入射した X 線のうち X 線として認識される割合のことである。CCD 内で X 線が吸収される割合は (2.7) 式に依存する。CCD で検出されたイベントでもデータ処理によって捨てられてしまうものがあるため、CCD でイベントを検出する割合とデータ処理によって有効利用できる割合を掛け合わせたものとなる。

2.3.3 CCD の性能を劣化する要因

CCD の性能を決定するパラメータとしてゲイン、エネルギー分解能、量子効率をあげた。これらは次のような理由により劣化する。

- 暗電流
  CCD で外部からエネルギーを与えない時に検出される電荷。電子はトラップを介して熱励起されることがあり、出力に足されることになる。その揺らぎがエネルギー分解能を劣化させる。熱励起は温度を下げることによって抑制することが出来る。

- 読みだし雑音
  CCD の読み出された信号に読みだし回路などによってのるノイズ。主に読みだし口における初段 FET の熱雑音や 1/f ノイズ、クロックの揺らぎ、グラウンドや電源によるノイズが原因となる。

- 電荷転送非効率
  CCD 上で電荷を転送する際に電荷を取り残してしまう確率。主に、電荷転送中に電子がトラップに捕獲されてしまうことが要因。転送回数が増えるほど影響が大きくなる。ゲインが転送回数に依存してしまい、その揺らぎのためエネルギー分解能にも悪影響をもたらす。

- 光洩れ
  CCD では可視光でも電子が生成されるため、光による電荷が出力にたされることになる。その揺らぎがエネルギー分解能を劣化させる。

- パイルアップ
  一つのピクセル、もしくは隣り合うピクセルに複数の X 線が入射するとそれらのエネルギーを合計したイベントと区別がつかなくなる。これをパイルアップと呼ぶ。パイルアップが起きると入射 X 線のエネルギーがわからなくなるためスペクトルを得る上で障害となる。パイルアップが起きる確率は、X 線のイベントの数に依存する。1 フレームあたり 1 ピクセルあたりのイベント個数を λ とすると、あるピクセルに n 個のイベントが存在する確率 $P_\lambda(n)$ はポアッソン分布となり

$$P_\lambda(n) = \frac{\lambda}{n!}\exp(-\lambda) \tag{2.19}$$

  のように表される。

- ホットピクセル
  X 線が入射していなくても常に高い波高値を出してしまうようなピクセルをホットピクセルという。ホットピクセルは製造行程、放射線ダメージなどにより発生する。

第3章　CCDデータの解析法

X 線天文学では、X 線の入射位置、時刻、エネルギーを知ることが重要である。X 線用 CCD を用いる時には約 10 秒毎に読み出しを行ないそのイメージから X 線のイベントを抽出してその位置、電荷量を調べることによって必要なパラメータを得ている。本論文では ASTRO-E 衛星搭載 XIS の更正試験で用いられたソフトウェア xisdl を用いた。以下、xisdl の解析法を紹介する。

3.1　イベント検出法

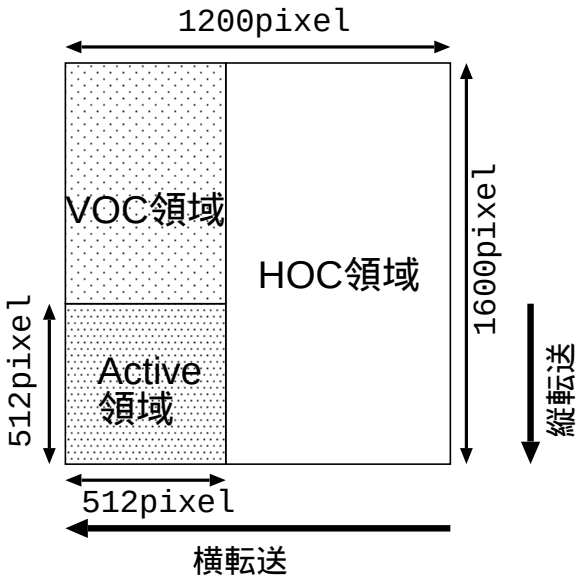


図 3.1: CCD でとられるイメージ (模式図)

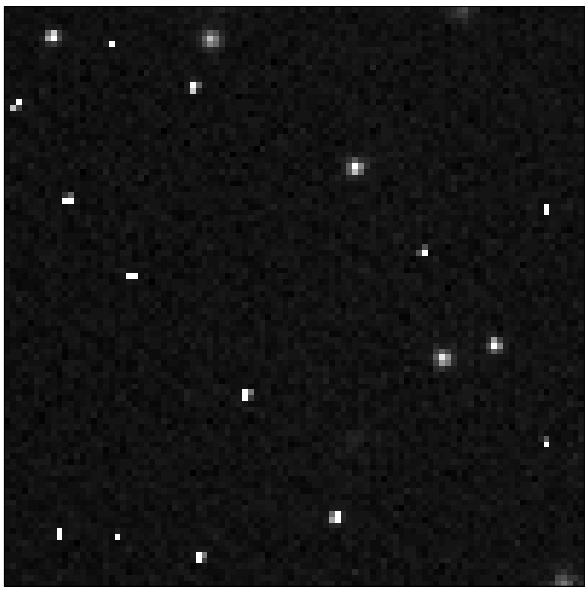


図 3.2: CCD の生イメージ

CCD の生データは図 3.1 のような各ピクセルに波高値が入った 2 次元イメージである。図 3.1 中の Active 領域というのが露光時間中に CCD 上に存在した領域である。Vertical Over Clock 領域 (VOC 領域) や Horizontal Over Clock 領域 (HOC) 領域は実際の CCD のサイズよりも縦転送や横転送を多く行なう事により取得される仮想的なピクセルである。これらの領域の内、VOC 領域は転送中に実在するピクセル上を通過してくるので転送中に入射した X 線等のイベントが検出される。また、Active 領域も露光時間だけでなく転送時間の内実在しているピクセル上にある時間も露光されていることになる。図 3.1 に示してあるピクセル数は C4880(4.1 章参照) によって取得される Deep1 および Deep2(4.2 章参照) のイメージのサイズである。

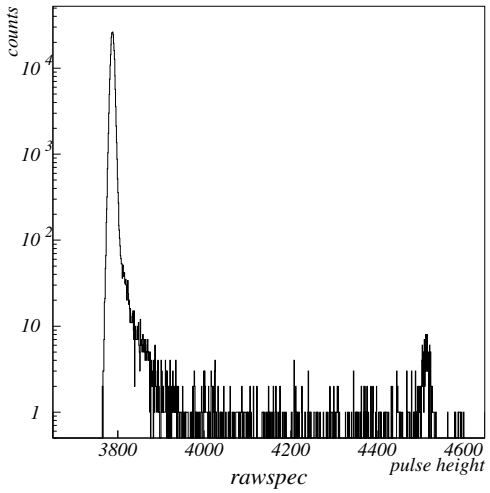


図 3.3: CCD で得られる生スペクトル

^{55}Fe からの X 線を照射したイメージの波高値の分布を単純にヒストグラムにしたものが図 3.3 で、3800ch 付近のダークレベルすなわち X 線による電荷の存在しないピクセルの波高値に対応するピークとともに 4540ch 付近の Mn Kα ラインとそこからダークレベルのピークにかけて伸びるテール成分が見られる。テール成分が出来る主な原因は、図 3.2 に見られるような入射した X 線によって作られる電子群が複数のピクセルにわたってしまったイベントを分割して勘定しているからである。このようなデータを解析するには、まずダークレベルを各ピクセルの波高値から引くことを行ない、分割された電子群を足し合わせる必要がある。

xisdl は各ピクセル毎に、n 枚目のフレームの波高値を PH(n)、n 枚目のフレームまでで求められたダークレベルを D(n) として、ダークレベルの算出を以下のように行なう。

$$\mathrm{D(1)} = \mathrm{PH(1)}$$
n=2 から n=16 まで
$$\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} > \mathrm{darkUpper} \rightarrow \mathrm{D(n)=D(n-1)}$$
$$\mathrm{PH(n)} - \mathrm{D(n-1)} < \mathrm{darkLower} \rightarrow \mathrm{D(n)=PH(n)}$$
$$\mathrm{darkLower} < \mathrm{PH(n)\ -D(n-1)} < \mathrm{darkUpper}$$
$$\rightarrow \mathrm{D(n)=D(n\text{-}1)+(PH(n)\text{-}D(n\text{-}1))/8}$$

darkUpper や darkLower は波高値が darkUpper 以上に増加した場合は、そこに X 線が入射したものとしてダークレベルを計算するのに使用しない。darkLower よりも波高値の減少量が大きかった場合にはいままで X 線が入射したものを足していたものとし新たに計算を始める、という閾値である。上の様にして算出したダークレベルを差引後の波高値を $\mathrm{PH_1}$ として

$$\text{event threshold lower} < \mathrm{PH_1} < \text{event threshold upper}$$

のピクセルを抜き出す。event threshold lower はこの値を越えたピクセルをイベント中心の候補とするという値で本論文では 50ch($\sim$ 400 eV) で統一した。event threshold upper は

Hot pixel を除くための閾値である。次にイベント中心の候補となったピクセルの周囲の 8 ピクセルを調べ、その中により波高値の大きいピクセルがある時はイベント中心としない。同じ波高値のピクセルがあった時にはイメージ上で y 座標が大きいもの、x 座標が大きいものをイベントの中心とする。以上の方法により 1 個のイベントを 2 回カウントしないようになっている。

3.2 イベント解析法

上のようにしてイベントを検出した後、イベントが複数のピクセルに広がった場合にはそれらのピクセルの波高値を足し合わせる必要がある。そのためにイベントの広がりを決定する必要がある。次に本論文で使用した広がりを決定しイベント全体の波高値を求めるための二つのイベント解析法について述べる。

3.2.1 グレード判定法

まず一つめのイベント解析法は、イベント中心と判定された周囲の 8 ピクセルの波高値が split threshold を越えているかどうかを判定しそのパターンによって図 3.4 のように 8 種類のグレードに分類を行ない、そのグレードに応じて波高値の足し合わせるものである。split threshold はダークレベルの揺らぎを拾わないように十分大きな値であること、またイベントの含まれているピクセルを捨ててしまわないように余り大きな値でないことが要求される [2]。従って、本論文ではすべての実験でダークレベルの揺らぎの 3σ から 4σ となる 15ch($\sim$ 110 eV) を採用した。しかし、グレード法では 3×3 以上に広がったイベントは、中性領域で吸収された X 線イベントや荷電粒子によるバックグラウンドが多く含まれることからすべて捨ててしまうため特に高エネルギー側での検出効率の低下を招く。

3.2.2 フィッティング法

二つめは、フィッティング法 [3] と呼ばれるものである。フィッティング法は、空乏層が厚くまたピクセルサイズの小さい CCD を用いる場合ピクセルサイズと比較してより広がったイベントが増える。これらを有効利用するために開発されたイベント解析法である。フィッティング法はイベント中心として判定されたピクセルを中心に 5×5 のピクセルの波高値に対して 2 次元対称ガウス関数でフィットを行ない、その結果イベント毎にその広がりと波高値の合計を求めるものである。しかし、2 次元対称ガウシアンの体積をピクセル毎に求めると計算量が膨大になるため、

1. モデルの関数の各ピクセルの中心での値を実際の波高値と比較しフィットを行なう。
2. フィッティングの結果として出てきたモデルの関数を 7×7 ピクセルまで外挿し各ピクセルの中心でのモデルの値を足し合わせたものをイベントの波高値モデルの σ を

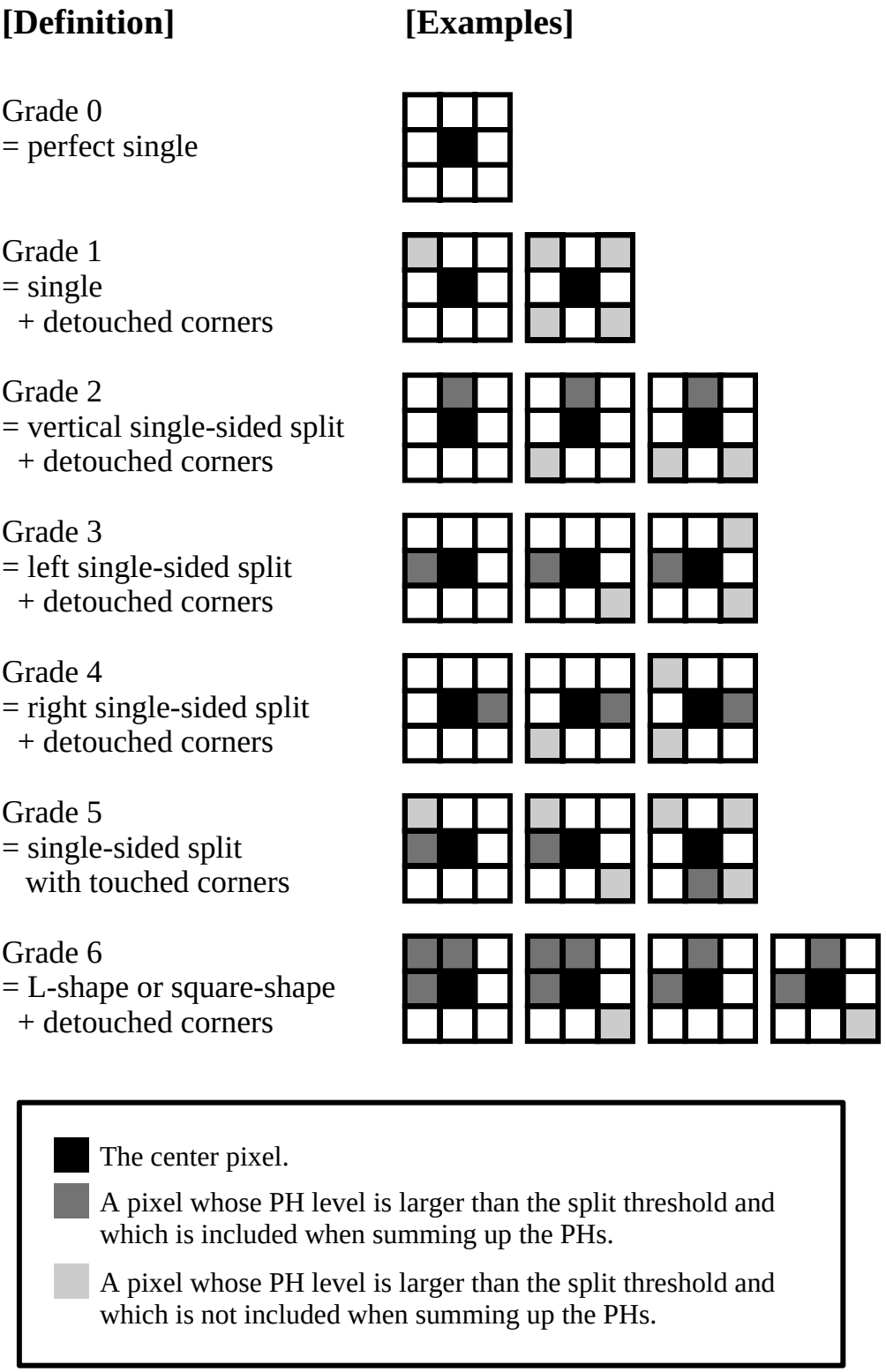


図 3.4: グレード判定法による分類

拡がりとする。

という作業を行なっている。この作業を 1 次元で表したものが図 3.5 である。

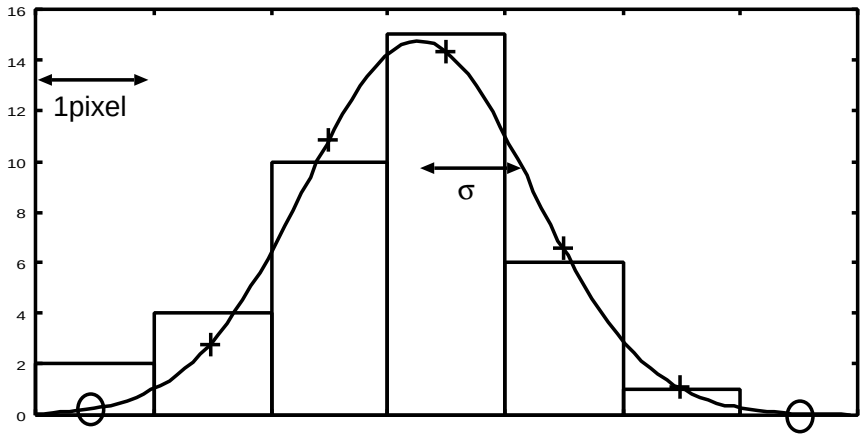


図 3.5: フィッティングの方法 (1 次元)
ヒストグラムはデータの各ピクセルの波高値、ガウス関数の + 印の部分とデータをフィットする。フィッティングの結果として + 印と○ 印の合計を波高値、広がりとして σ を出す。

このため、フィッティング法による結果が正しいものであるのか検証する必要がある。また、10000 イベントフィッティングを行なうのに 1 時間強の時間を要してしまっており、実用化するには高速にフィッティングを行なえるように改良する必要があった。
まとめると、フィッティング法はグレード法と比較して

- メリット
  1. 空乏層が厚いまたはピクセルサイズの小さい CCD で高エネルギー側の検出効率があがる。
  2. 電子群の拡がりを見積もることが出来る。
- デメリット
  1. フィッティングがデジタル化しているので正しい値を出しているか検証が必要。
  2. 時間がかかる。

本論文では、

1. フィッティング法の高速化と検証 (7 章)
   改良とシミュレーションの結果。
2. フィッティング法とグレード法と比較 (8 章)
   検出効率、エネルギー分解能がどのように変化するか検証。

3. CCD 内部での電子群の拡がりの測定 (9 章)
   フィッティング法を用いて X 線吸収深さと拡がりの関係を求める。

を行なう。

第4章　実験装置

本章では実験に使用したCCD駆動システム、X線源等を紹介する。

4.1　CCD駆動システム

本論文におけるCCD駆動システムは浜松ホトニクス社製C4880をX線CCD開発用に改造したものを使用した。C4880は真空槽に入りCCDを接続する回路部、真空槽の外部でクロックに電圧を与えるサブヘッド、サブヘッドに対してデジタルクロックを与え出力をAD変換するコントロール部から構成され、これらをWindows98上のソフトウェアから制御する。取得されるイメージはCCDの画素数と関係なく縦1600横1200のイメージである。C4880はCCD駆動クロックの電圧を表4.1の範囲で変更することが出来る。読みだし速度は1画素あたり7マイクロ秒で従って1フレームの読み出しにかかる時間は約13秒である。読みだしノイズは平均的には、$12\mathrm{e}^{-}rms$程度である。

蓄積中	縦転送 H	縦転送 L	横転送 H	横転送 L
$+0 \sim 13V$	$+0 \sim 6V$	$-12 \sim 6V$	$+2 \sim 6V$	$-12 \sim 4V$
RG H	RG L	OG	OD	
$+2 \sim 10V$	$-8 \sim 4V$	$+1.5 \sim 9V$	$+18 \sim 22V$	

表 4.1: C4880の電圧可変範囲

4.2　CCD Chips

本論文で使用したCCD Chipは、浜松ホトニクス社製1/2 inchパッケージのDeep1 (NH31 7-5A0NH-2) およびDeep2(NH31 20-5A0NH-2) である。その外見を図4.1のようなもので、$12\mu\mathrm{m} \times 12\mu\mathrm{m}$のピクセルが512×512存在する。これらのCCDはエピタキシャルウエハから作られており、その断面構造を図4.2に、ウエハの厚さ、不純物濃度などのパラメータを表4.2に示す。基盤の部分には$5 \times 10^{18}\mathrm{cm}^3$のアクセプタ (ボロン) がドープされている。ボロンは拡散速度が速いため、製造過程中にエピ部分に浸透し実際のアクセプタ厚さは表4.2より数μm薄いものとなる。

CCD	チャネルドナー濃度 $[\mathrm{cm}^{-3}]$	チャネル厚さ $[\mu\mathrm{m}]$	アクセプタ濃度 $[\mathrm{cm}^{-3}]$	アクセプタ厚さ $[\mu\mathrm{m}]$
Deep1	1×10^{16}	1	2.5×10^{14}	14
Deep2	1×10^{16}	1	1.5×10^{13}	49

表 4.2: CCD Deep1、Deep2 の不純物濃度、厚さ

図 4.1: 1/2 inch CCD の外観

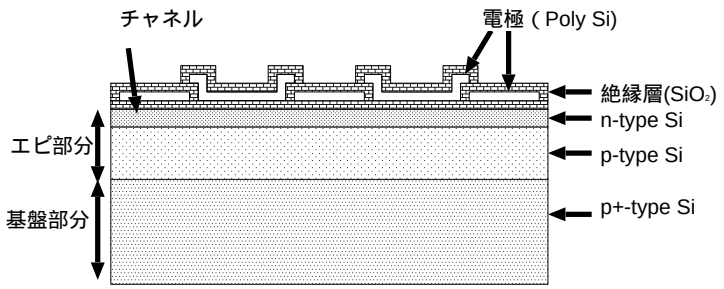
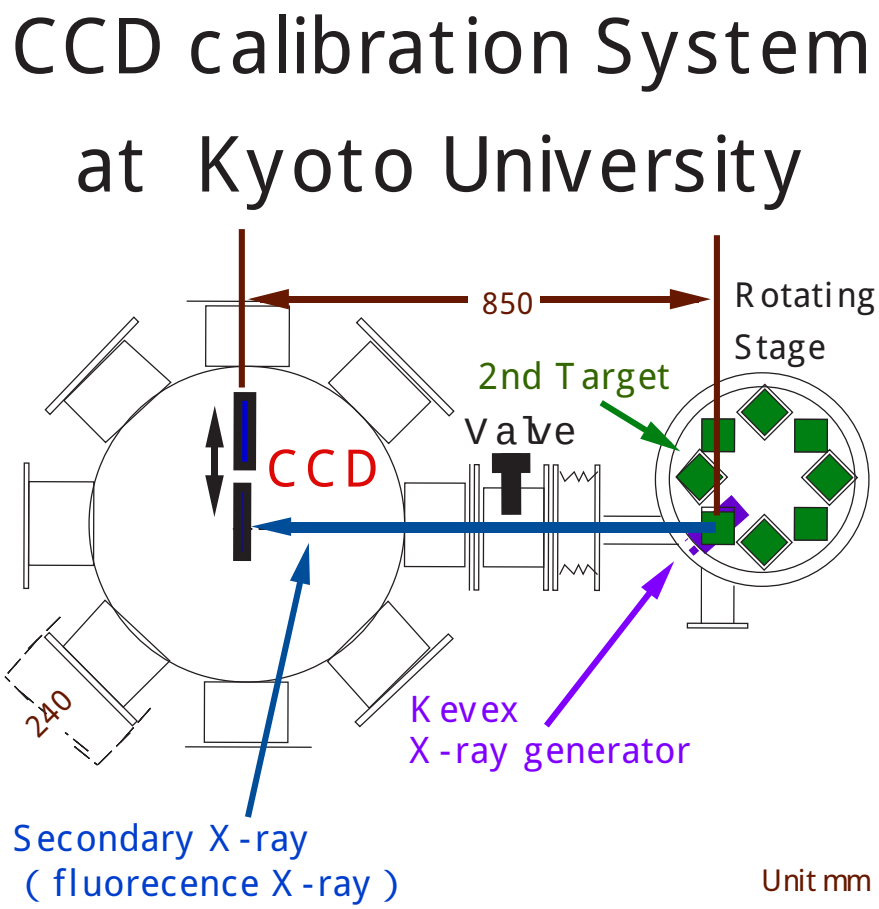


図 4.2: CCD の断面構造

4.3　真空槽

CCD は暗電流を低く押えるために冷却しなければならない。しかし、周囲に水分のある状態で冷却すると飽和水蒸気圧を越えた所で結露する。また、CCD の周囲に空気が存在すると冷却する際に対流を起こして熱流入の原因となる。これらを防ぐために CCD を真空中に入れて実験を行なう必要がある。今回使用した真空槽は、蛍光 X 線発生装置を備えたチェンバー 1 (図 4.3) とコリメータ付き線源を固定できるようになっているチェンバー 2 (図 4.4) である。すべての実験は-80°C で行なった。



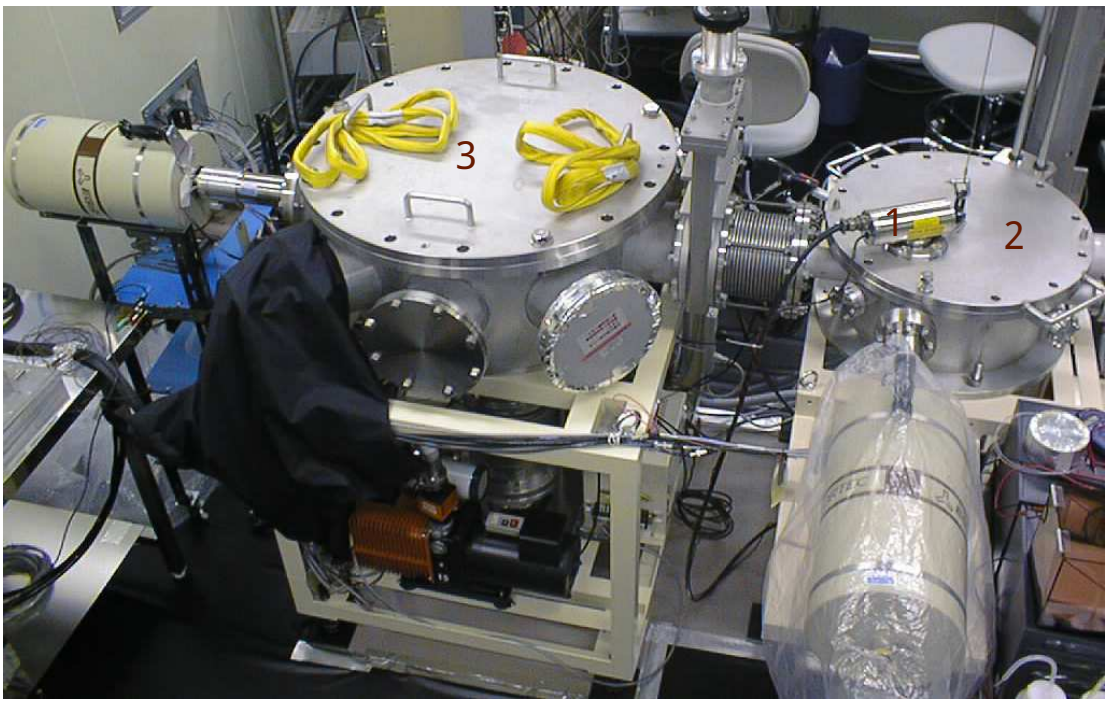


図 4.3: 蛍光 X 線発生装置およびチェンバー 1 外観
図中 1:KEVEX 社製 X 線発生装置、図中 2:ターゲットチェンバー、図中 3:CCD チェンバー

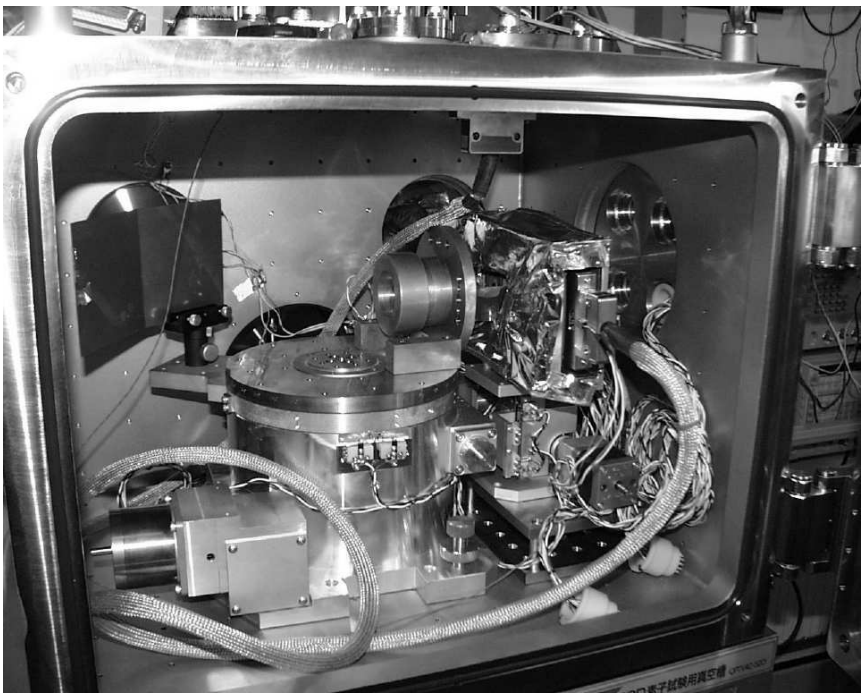


図 4.4: チェンバー 2 内部およびコリメータ付き線源

4.4　コリメータ付き線源および比例係数管

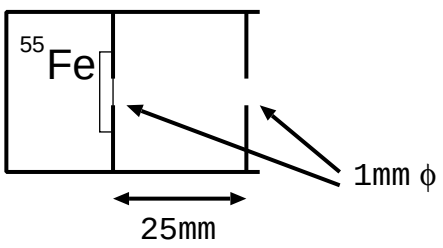


図 4.5: コリメーター付き線源

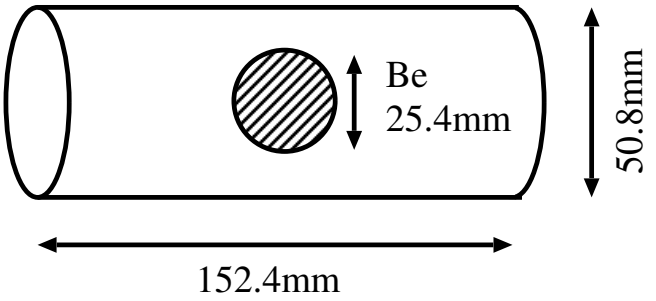


図 4.6: 比例係数管のサイズ

放射線源 ^{55}Fe の強度を精度良く決定するために図 4.5 のように線源と真鍮製厚さ 1mm、1mmϕ 穴のコリメーターを 2 枚固定する治具を用いた。このようなコリメーターを用いると検出器との距離が変化してもスポット全体での X 線の強度は変化しないので精密な測定が出来る。

CCD 上でのスポットサイズは CCD とコリメータの距離によって変化する。今回用いた CCD の場合露光領域の大きさが約 6mm×6mm なのでスポットサイズの直径をそれ以下に押えなければならず、CCD と前面のコリメータの距離を 7.5cm 以下に設定しなければならない。

線源強度測定には、Reuter Stokes 社製の比例係数管を使用した。窓は Be 製 ($23\mathrm{mgcm}^{-2}$)

、1 気圧の $Ar(97\%)+CO_2(3\%)$ の混合ガスが封入されている。そのサイズを図 4.6 に、治具に固定したところを図 4.7 に示す。この測定での検出効率は、大気および Be 窓の透過率、比例係数管の検出効率を掛け合わせたものになる。大気の透過率は、線源から比例係数管の窓までの距離は 26mm、300K、組成が窒素 80%酸素 20%であるとして計算すると 94%となる。Be 窓の透過率は 92%。比例係数管の検出効率は 92%である。これらを掛け合わせるとこの測定での検出効率は 80%と求まる。

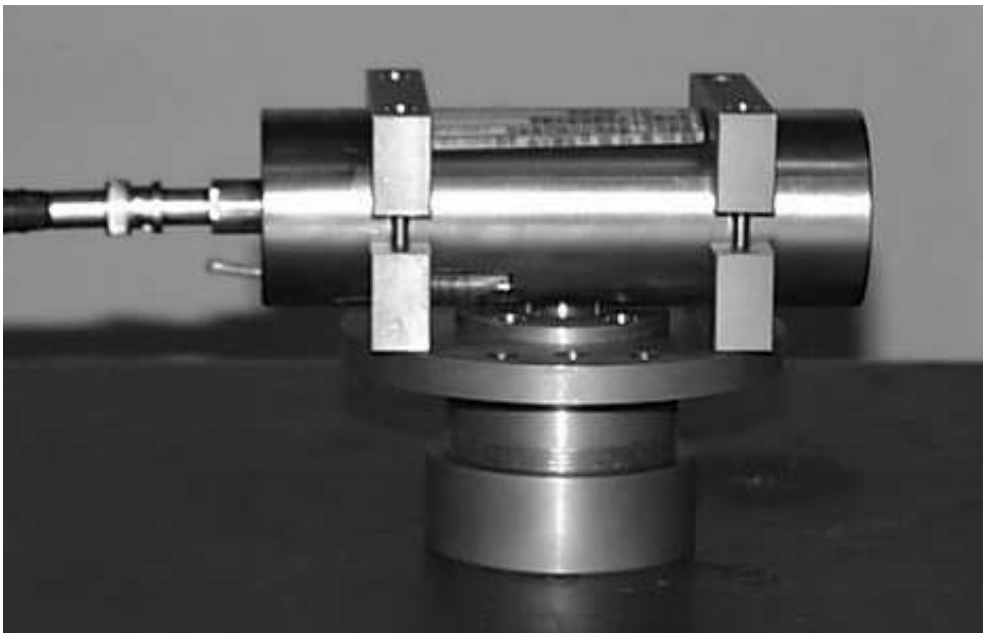


図 4.7: 比例計数管とコリメーター付き線源

4.5 蛍光 X 線発生装置

蛍光 X 線発生装置は、一次 X 線源である KEVEX 社製 X 線発生装置からの X 線をターゲットチェンバー (図 4.3) 内にあるターゲットに照射してその蛍光 X 線を取り出すものである。KEVEX 社製 X 線発生装置は高電圧により加速された電子をタングステンのターゲットに入射させ、制動輻射による連続 X 線とタングステンの特性 X 線を発生する。一次 X 線源の電子の加速電圧を 20 kV とした時のスペクトルを図 4.8 に示す。2 次 X 線発生チェンバーには 7 種類のターゲットが用意されている、それらのリストと用いる時の電子の加速電圧を表 4.3 に示した。これらのターゲットは 2 次 X 線の純度が高くなるように、X 線フィルターをつける、ターゲット自体も純度の高いものを使う、チェンバーによる散乱が起こるのを押えるなどの工夫がしてある。その結果 98%以上の単色度が達成されている [1]。

Target	Energy(keV)		加速電圧 (kV)
	Kα	Kβ	
Al	1.486	1.560	5.0
Cl	2.621	2.815	5.0
Ti	4.508	4.932	15.0
^{55}Fe	5.894	6.489	–
Fe	6.398	7.057	15.0
Ni	7.471	8.263	15.0
Zn	8.630	9.570	20.0
Se	11.207	12.492	20.0

表 4.3: 蛍光 X 線発生装置のターゲットと蛍光 X 線のエネルギー

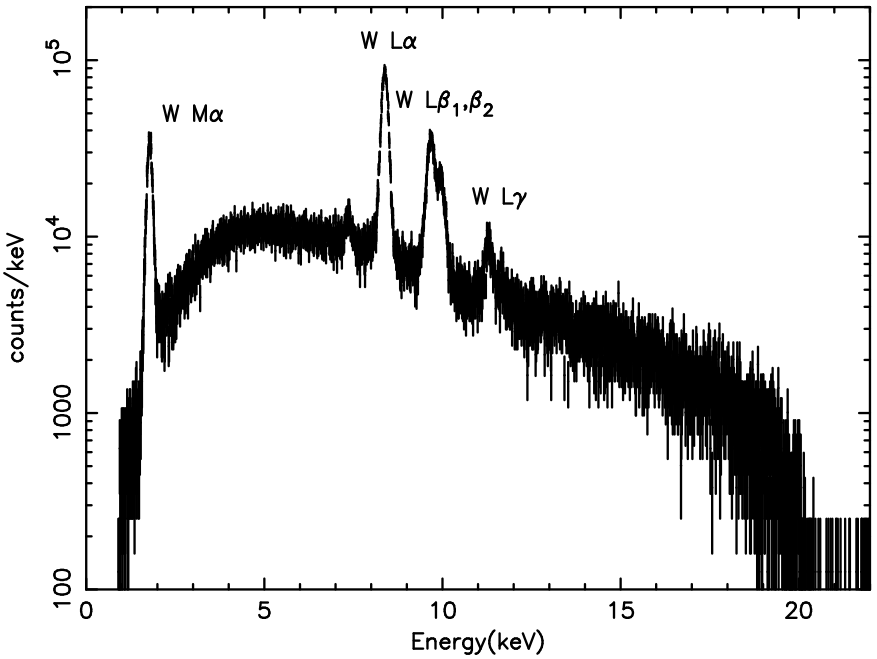


図 4.8: X 線発生装置からの X 線のスペクトル (HV=20 kV)

第5章　実験記録

本章では、2種類のCCD、Deep1、Deep2の検出効率、エネルギー分解能、ゲインなどを決定するために行なった実験の記録をまとめる。CCDに与えたクロックの電圧は表5.1にまとめた。実験の記録を簡単にまとめた表5.3を章末に示した。

CCD	縦転送	横転送	RG	OG	OD	蓄積中
	H/L(V)	H/L(V)	H/L(V)	(V)	(V)	(V)
Deep1	+0/-10	+6/-4	+6/-8	+3V	+20	0∼13
Deep2	+0/-8	+6/-4	+5/-8	+2.5V	+20	0∼13

表 5.1: 各CCDでのクロック電圧
蓄積中:蓄積中に露光領域にかけた電圧

5.1　比例計数管による線源の強度測定

CCDの検出効率を測定するために、まず4.4であげたコリメーター付き線源の強度を比例計数管で測定する実験を行なった。予備実験からコリメーターを付けた線源の比例係数管におけるカウントレートは1秒あたり1カウント程度であることがわかっている。誤差を1%程度以下におさえ、また現実的な計測時間にするため測定時間はlive timeで15000秒とした。測定は2000年11月11日から13日にかけて行なった。

得られたスペクトルを、図5.1に示す。Mn Kラインとその Arエスケープによるライン以外に連続的なバックグラウンドがあることがわかる。そこで、同じ配置で ^{55}Feだけ取り除き、積分時間7500秒間の測定を行なった。図5.1のスペクトルからバックグラウンドを差し引くことによって図5.2のようなスペクトルを得ることが出来た。このスペクトルのMn Kラインとその Arエスケープのカウント数の合計が線源の強度である。差し引後のスペクトルのMn Kラインを二つのガウシアンで Arエスケープを一つのガウシアンでフィットし、その面積の合計は1.31×10^6ctsであった。4.4節で求めたようにこの測定での検出効率は80%であるからコリメーターつき固定治具に ^{55}Feを設置した場合のフラックスは、1.093 ± 0.003photons/sである。

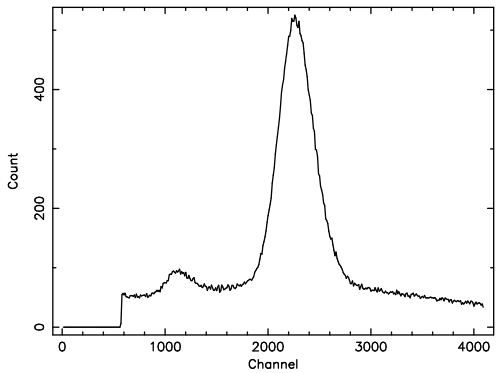


図 5.1: 比例係数管による ^{55}Fe のスペクトル

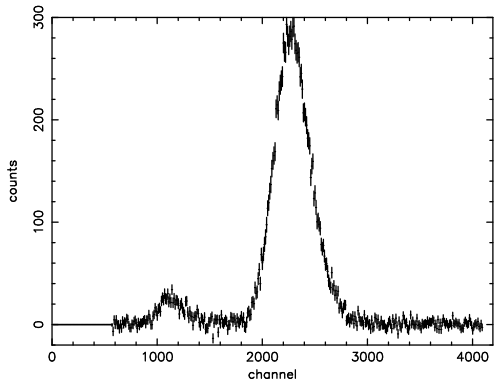


図 5.2: ^{55}Fe のスペクトル (バックグラウンド差引後)

5.2　コリメーター付線源を使用した CCD の実験

比例計数管により絶対強度を測定したコリメーター付き線源を用いて Deep1、Deep2 の検出効率を測定する実験をそれぞれ 12 月 7 日、11 月 29 日にチェンバー 1 で行なった。両方の CCD で露光領域の電極電圧は+6[V]、露光時間は 1 フレームあたり 1 分 45 秒で 100 フレーム取得した。

5.3　蓄積中の電極電圧を変える実験

CCD の空乏層厚さは蓄積中に露光領域の電極にかける電圧を大きくすると増加していく。その変化を測定するために Deep1、Deep2 を用いてそれぞれ 12 月 27 日、12 月 20 日にチェンバー 2 で行なった。両方の CCD で、蓄積中の露光領域の電極電圧を 0[V]、+2[V]、+4[V]、+6[V]、+8[V]、+10[V]、+13[V] に設定した 7 点取得した。露光時間は 1 フレームあたり 10 秒で各電圧毎に 60 フレーム取得した。

5.4　蛍光 X 線照射実験

CCD のエネルギー分解能や検出効率のエネルギー依存性、ゲインを測定するためにさまざまなエネルギーの X 線を照射する実験を Deep1、Deep2 を用いてそれぞれ 12 月 28 日、12 月 22、25 日にチェンバー 2 で行なった。蓄積中の電圧を Deep1、Deep2 でそれぞれ+6[V]、+10[V] に設定して行なった。両方の CCD で蛍光 X 線発生装置 (??) を用いて、Al、Cl、Ti、Fe、Ni、Zn、Se の 7 種類ターゲットの X 線を照射した。露光時間は 1 フレームあたり 10 秒で各ターゲット毎に 60 フレーム取得した。二つの CCD で検出効率が異なり、またその比率はエネルギーに応じて変化するため、X 線発生装置に流す電流はイメー

Targets	Al	Cl	Ti	Fe	Ni	Zn	Se
電圧 (kV)	5.0	5.0	15.0	15.0	15.0	20.0	20.0
Deep1 電流 (mA)	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.30	0.30
Deep2 電流 (mA)	0.06	0.09	0.09	0.16	0.01	0.18	0.10

表 5.2: 蛍光 X 線照射実験で X 線発生装置に流した電流

検出器	実験日	露光時間	フレーム数	X 線源	目的
比例計数管	11 月 11 ~ 13 日	1.5×10^4 s		1	絶対強度測定
比例計数管	11 月 13 ~ 14 日	7.5×10^3s		none	バックグラウンド測定
Deep1	12 月 7 日	105s	100 枚	1	検出効率測定
Deep1	12 月 27 日	10s	60 枚 ×7	2	電圧変化
Deep1	12 月 28 日	10s	60 枚 ×7	3	ゲイン等測定
Deep2	11 月 29 日	105s	100 枚	1	検出効率測定
Deep2	12 月 20 日	10s	60 枚 ×7	2	電圧変化
Deep2	12 月 22、25 日	10s	60 枚 ×7	3	ゲイン等測定

表 5.3: 実験記録
X 線源:1=コリメーター付 ^{55}Fe、2=^{55}Fe、3=蛍光 X 線発生装置

ジを見ながらパイルアップがあまり起こらずイベント数が少なくなり過ぎないように調整した。その結果、ターゲット毎に用いた設定を表 5.2 に示す。Deep2 のデータを取得した時には、Ni のターゲットに付けられているフィルターの不良によりそのデータのみ純度の低いものとなってしまった。

第6章　グレード法による解析結果

Deep1 と Deep2 を用いて、コリメーター付き線源を用いた検出効率の測定実験、蓄積中に電極にかける電圧を変化させることによる検出効率変化の測定実験、蛍光 X 線発生装置を用いた実験のグレード法を用いて解析した結果を述べる。

6.1　コリメーター付き線源を用いた検出効率の測定

コリメーター付線源は 5.1 章で強度が測定されている。コリメーター付線源をもちいた CCD の実験からグレード法を用いた時の CCD の検出効率を求める。転送中に入射するイベントの影響を除き、正しく露光時間を評価するために、アクティブ領域と VOC 領域のうちアクティブ　領域と同じ大きさの領域からイベント検出を行なった。それぞれの領域

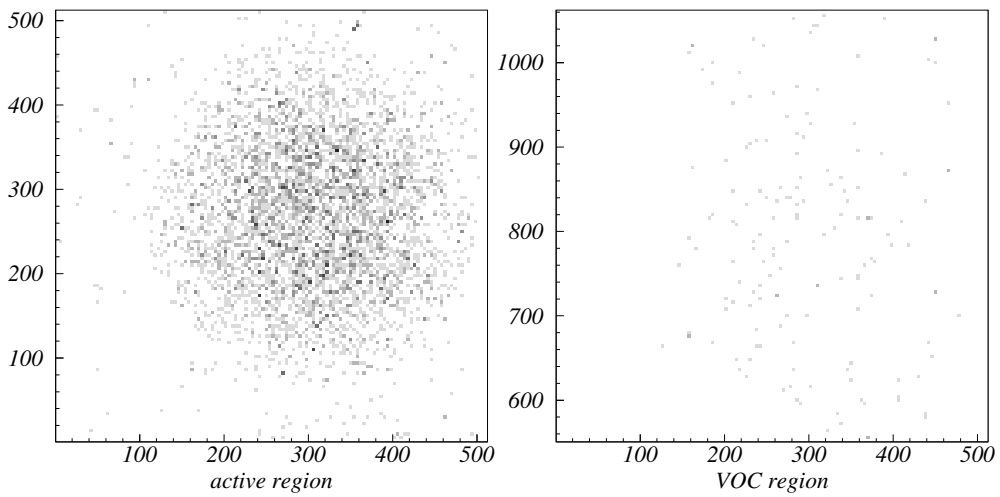


図 6.1: コリメーター付き線源を使用した実験の Deep1 でのイベント検出位置
左:アクティブ領域、右:VOC 領域

でのイベント検出位置を Deep1 は図 6.1 に Deep2 は図 6.2 に示した。図は枠が 512×512 ピクセルすなわち CCD のサイズになっており、4×4 ピクセル毎に合計し 8 カウントがもっとも濃い色になるようにしてある。Deep1、Deep2 の実験ともにアクティブ領域では線源のコリメートされたスポットが CCD の中に納まっていることがわかる。また、VOC 領域ではスポットの当たっている部分を通過してきている部分にのみイベントが分布しておりコリメートがうまくいっている事がわかる。

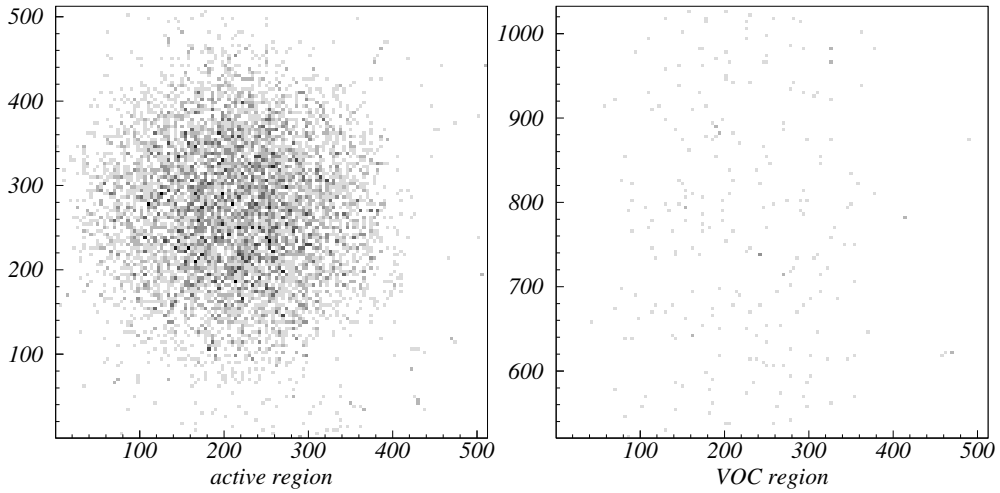


図 6.2: コリメーター付き線源を使用した実験の Deep2 でのイベント検出位置
左:アクティブ領域、右:VOC 領域

	Grade0	Grade1	Grade2	Grade3	Grade4	Grade5	Grade6	Grade7
Deep1	1307	7	348	107	104	16	592	1024
(active)	1338	9	357	109	107	17	611	1087
(VOC)	31	2	9	2	3	1	19	63
Deep2	1762	24	1026	313	334	36	1262	492
(active)	1813	24	1066	333	345	38	1296	513
(VOC)	51	0	40	20	11	2	34	21

表 6.1: 検出効率測定実験のグレード毎のカウント数。
Deep1、Deep2 の active 領域と VOC 領域の 500 ~ 1000ch のカウント数の差を示した。

取得したデータのアクティブ領域と VOC 領域の各グレードにおける全イベント数および Mn K ラインが含まれる波高値が 500ch ~ 1000ch までのイベント数の差を表 6.1 に示した。5.1 章より露光時間中に入射した X 線は、1.15×10^4 個と予想される。これより Deep1、Deep2 の検出効率は、グレード 0 のみを使用した場合それぞれ 11%、15%、通常 X 線イベントとして用いられるグレード 02346 を使用した場合は 21%、41%である。空乏層で吸収された X 線イベントがグレード 02346 のいずれかになるとした場合空乏層厚は Deep1 で $7\mu m$、Deep2 で $13\mu m$ となる。

6.2　蓄積中の電極電圧にともなう検出効率の変化

空乏層は電極に電圧をかけることによって成長する。そこで、蓄積中の露光領域の電極電圧を変化させグレード法を用いた場合の検出効率どう変わるかを測定した。

前章と同様にアクティブ領域と VOC 領域のうちアクティブ領域と同じ大きさの領域に対してイベント検出を行ない、グレード 0 およびグレード 02346 のデーターの 500ch から 1000ch のカウント数を求め、その差を露光中のカウント数とするという解析を行なった。蓄積中の電圧が+6V とコリメータ付き線源を使用した時の設定と同じデータのグレード 02346 のデータより前章で求めた検出効率の値を用い入射フラックスは 44photons/s と求まった。これより、各電圧のグレード 0、グレード 02346 のデータに対して検出効率を求めた。その結果を図 6.3 に示す。図のように Deep2 のグレード 0 のみのデータはあまり増加が見られなかった。これは、Deep1 に比べて空乏層が厚いため空乏層の底の方で吸収されたイベントは複数のピクセルにまたがってしまうことが多いためと考えられる。

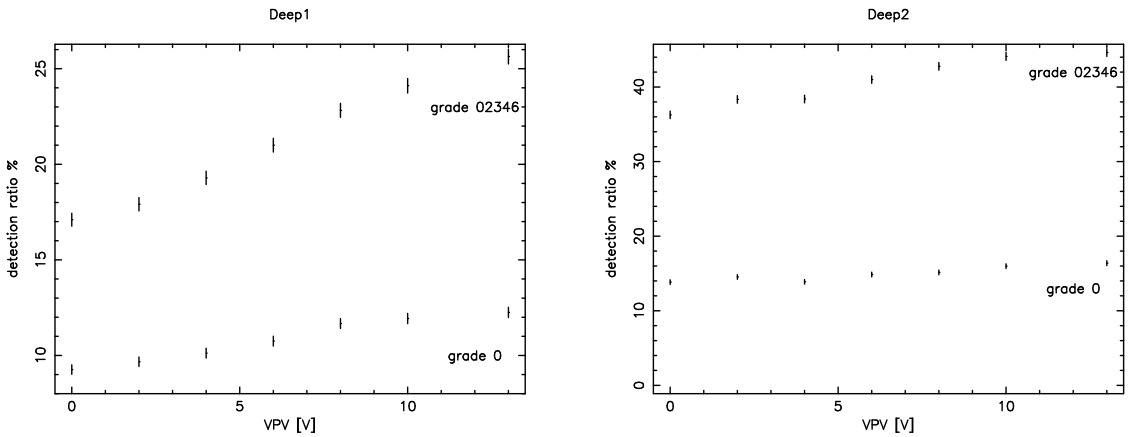


図 6.3: 電極電圧にともなう Mn K の検出効率の変化 (グレード法)
左:Deep1、右:Deep2

次にスペクトルの解析を行なった。Deep1、Deep2 の蓄積中電圧が+6V のグレード 0 とグレード 02346 のスペクトルをそれぞれ図 6.4、図 6.5 に示した。Mn Kα、Mn Kβ のラインをシングルガウシアンでフィットして蓄積中電圧の変化にともなうエネルギー分解能 (半値幅)、ピークチャンネルの変化をそれぞれ図 6.6、6.7 に示した。

ただし、Deep1 でグレード 02346 を使用した場合図 6.4 の様にピークの低エネルギー側にテールを引いている。従って、Deep1 のグレード 02346 のデータの Kα ラインのみメインピークに加えてもう一つのガウシアンを入れてフィッティングした。この 2 つめのガウシアン成分は、隣のピクセルに電荷が洩れ出しているが split threshold よりは小さい場合に切り捨てられてしまうことによって起こることが知られている ([2]、[4])。しかし、今回は 8 章で示すように、さらに中性領域で吸収されたイベントがグレード 02346 に含まれておりテールを大きくしている。Deep1 のグレード 02346 のエネルギー分解能を除いてデータ毎に多少ばらつきがあるものの電圧の増加にともなう系統的な変化は見られなかった。Deep1 のグレード 02346 のエネルギー分解能が電圧とともに劣化したのはグレード分岐比が変化したためと思われる。

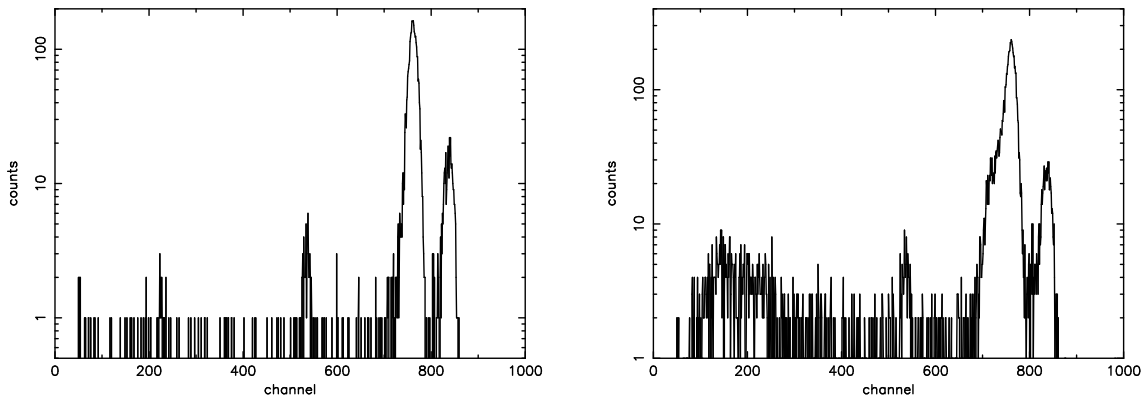


図 6.4: Deep1 の ^{55}Fe のスペクトル
電極電圧 = + 6V、左:グレード 0、右:グレード 02346

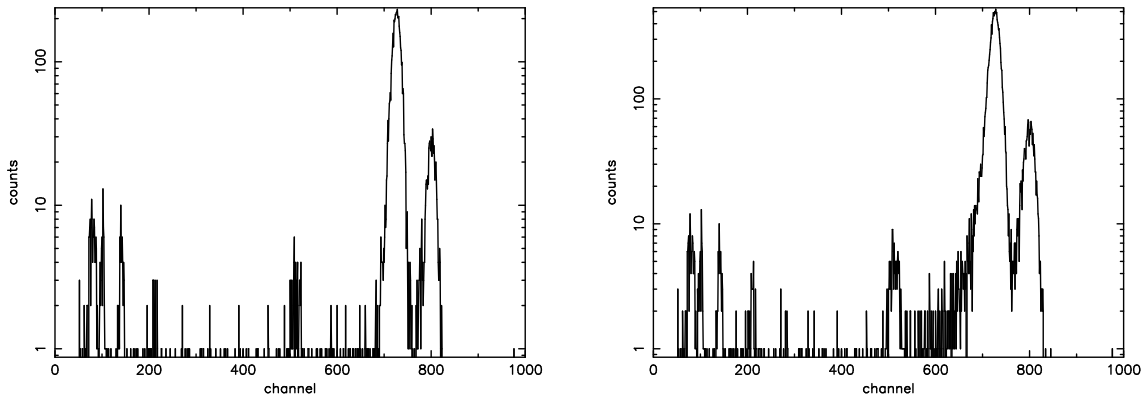


図 6.5: Deep2 の ^{55}Fe のスペクトル
電極電圧 = + 6V、左:グレード 0、右:グレード 02346

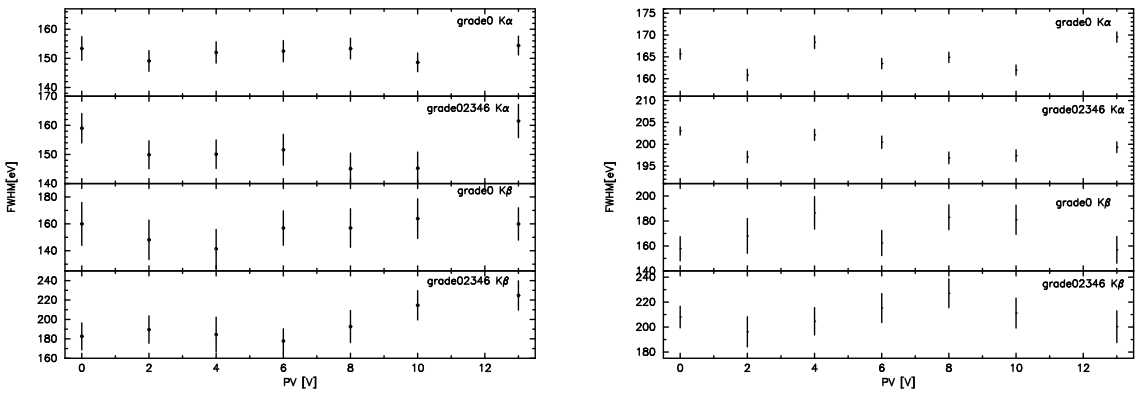


図 6.6: 電極電圧にともなうエネルギー分解能の変化 (グレード法)
左:Deep1、右:Deep2

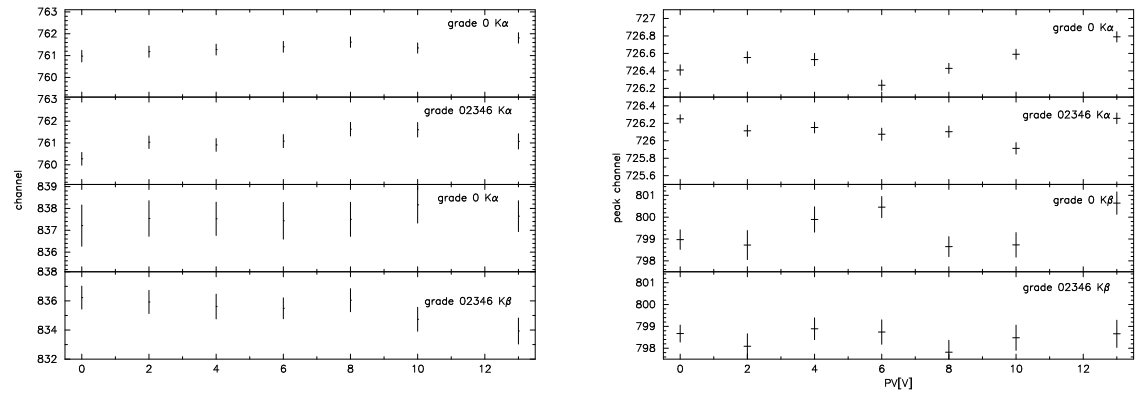


図 6.7: 電極電圧にともなう ^{55}Fe のピーク位置の変化 (グレード法)
左:Deep1、右:Deep2

6.3 蛍光 X 線照射実験

4.5 章で紹介した蛍光 X 線発生システムを用いた実験をグレード法で解析した結果から、CCD のゲイン、エネルギー分解能、グレード分岐比のエネルギー依存性を求めることにした。

グレード法で解析した結果各ターゲットのデータのグレード分岐比は表 6.2、6.3 の様になった。どちらの CCD でも入射 X 線のエネルギーが高くなるとともにグレード 0 の割合が減少しグレード 6 のような広がったイベントが多くなっていることがわかる。ただし、Al と Cl の間ではこの関係が逆転している。これは、Al の蛍光 X 線のエネルギーが Si の K 吸

Targets	Grade0	Grade1	Grade2	Grade3	Grade4	Grade5	Grade6	Grade7
Al	54.22	0.63	11.30	4.82	5.29	1.72	18.46	3.57
Cl	67.01	0.71	9.69	4.66	4.98	0.76	8.87	3.33
Ti	35.49	0.38	8.06	3.01	3.38	0.71	20.47	28.48
^{55}Fe	26.93	0.23	6.80	2.30	2.75	0.52	19.04	41.44
Fe	24.85	0.39	6.65	2.12	2.64	0.57	17.15	45.64
Ni	22.81	0.36	5.99	2.15	2.81	0.52	14.35	51.02
Zn	21.11	0.27	5.99	1.94	2.20	0.45	12.48	55.56
Se	18.66	0.19	5.81	1.55	2.27	0.34	9.86	61.32

表 6.2: 各ターゲットでのグレード分岐比 (Deep1)
全イベントのグレード分岐比を%単位で示した。

Targets	Grade0	Grade1	Grade2	Grade3	Grade4	Grade5	Grade6	Grade7
Al	66.96	0.77	16.11	4.80	5.09	0.53	4.90	0.84
Cl	72.42	0.92	13.46	4.43	4.62	0.47	3.05	0.63
Ti	40.82	0.74	18.07	5.98	6.12	0.93	14.5	12.84
^{55}Fe	27.16	0.35	16.17	4.84	5.23	0.49	18.72	27.03
Fe	23.63	0.50	14.41	4.39	4.48	0.64	18.89	33.07
Ni	20.89	0.43	12.91	3.98	4.27	0.57	18.37	38.58
Zn	16.06	0.27	11.24	3.32	3.82	0.48	19.15	45.65
Se	13.07	0.19	10.18	3.09	3.17	0.31	19.63	50.37

表 6.3: 各ターゲットでのグレード分岐比 (Deep2)
全イベントのグレード分岐比を%単位で示した。

収端のエネルギーよりも低いためより深くで吸収されるイベントの割合が多いためである (図 2.5)。

これらのデータを用いて、グレード 0 とグレード 02346 のそれぞれのターゲットの Kα と Kβ をガウス関数でフィットを行なった。ただし、Deep1 のグレード 02346 のデータはテール成分としてもう 1 つのガウス関数を加えてある。蓄積中の電圧が同じ ^{55}Fe のデータも含めて、エネルギーチャンネル関係を調べた。その結果を図 6.8 および図 6.9 に示した。どちらの CCD でグレード 0 を使用した場合とグレード 02346 を使用した場合にゲインの差はなく、

$$PH[ch] = 129.2 \times E[keV](Deep1) \tag{6.1}$$

$$PH[ch] = 123.3 \times E[keV](Deep2) \tag{6.2}$$

のように表せる。

次に入射 X 線のエネルギーとエネルギー分解能の関係を求めた。理論的にはエネルギー

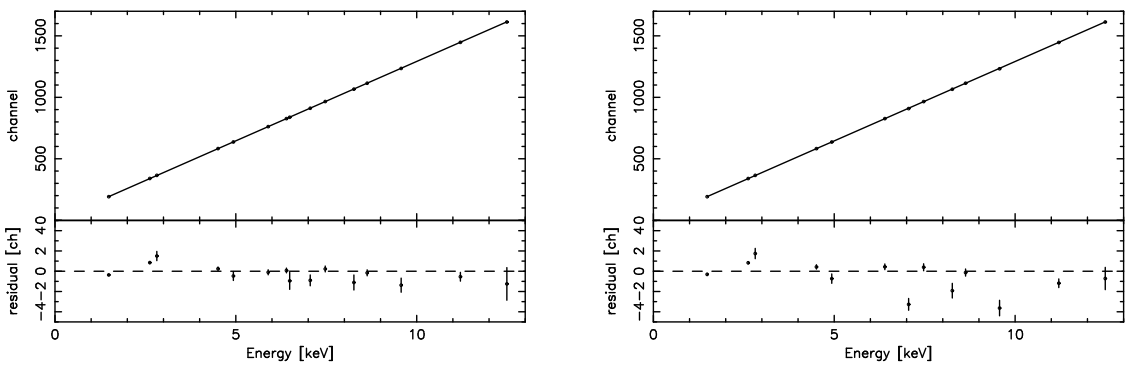


図 6.8: グレード法による Deep1 のエネルギー vs チャンネル
左:グレード 0、右:グレード 02346 直線は (6.1) 式、下に残差を示した。

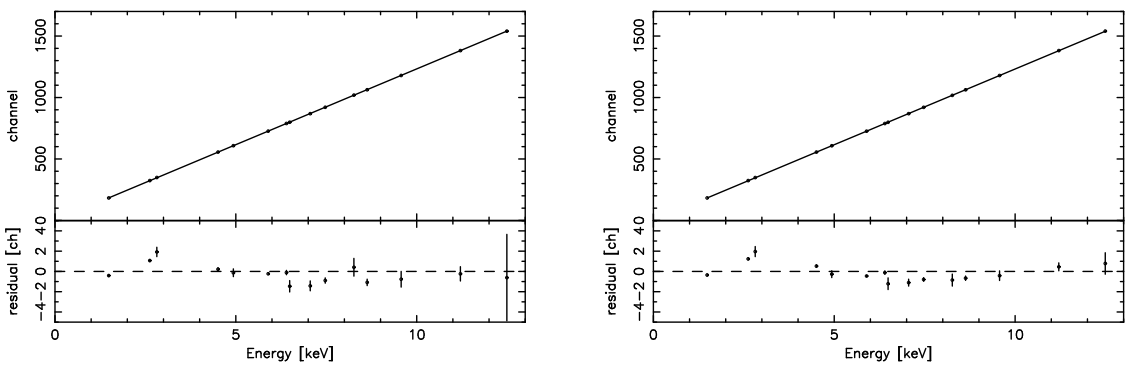


図 6.9: グレード法による Deep2 のエネルギー vs チャンネル
左:グレード 0、右:グレード 02346 直線は (6.2) 式、下に残差を示した。

	読みだしノイズ (e^-)	a	b
Deep1	12.0(2)	1.03(8)	$0\times10^{-2}(2)$
Deep2	12.9(2)	0.86(6)	$2.3\times10^{-1}(2)$

表 6.4: グレード法によるエネルギー分解能のエネルギー依存フィッティング結果
6.3 でフィットした結果。括弧の中の数字は最後の桁につくエラー。

分解能は (2.18) 式で表せる。しかし、グレード 02346 では複数のピクセルを足していること、またエネルギーに依存して平均的に足し合わせるピクセルの数が変化していることなどから、高エネルギーで理論曲線より FWHM が大きくなっていると考えられる。そこで読みだしノイズはグレード 0 で決定し、グレード 02346 のデータは、入射 X 線のエネルギーを E_0[keV] として

$$FWHM[eV] = \sqrt{8\ln 2}W\sqrt{\sigma_r^2(a+bE_0)+F\frac{E_0}{W}} \tag{6.3}$$

ような式で a と b を動かしてフィッティングを行なった。フィッティングは統計の良い各ターゲットの Kα のみを用いて行なった。その結果を Deep1 は図 6.10 に Deep2 は図 6.11 に示し、フィッティングのパラメータを表に示した。グレード 0 のみのデータでは、読みだしノイズは実験中の平均的なものと一致している。一方、Deep1 のグレード 02346 のデータではグレード 0 が主要な部分を占めるためグレード 0 と違いはなく、エネルギーに依存する項は 0 であった。しかし、拡がったイベントの多い所、特に Al や Se でフィットした曲線より上にいく傾向が見られた。Deep2 ではグレード 0 に対してグレード 2346 のイベントの割合が多いためエネルギーにとともに平均的に加算するピクセルが増えていることがわかる。

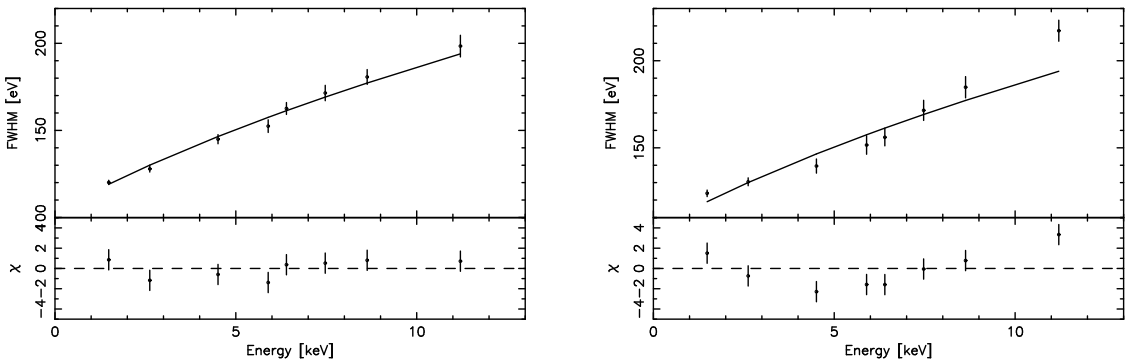


図 6.10: グレード法による Deep1 のエネルギー vs エネルギー分解能
左:グレード 0、右:グレード 02346、曲線は式 2.18 でフィットした結果。下に残差を示した。

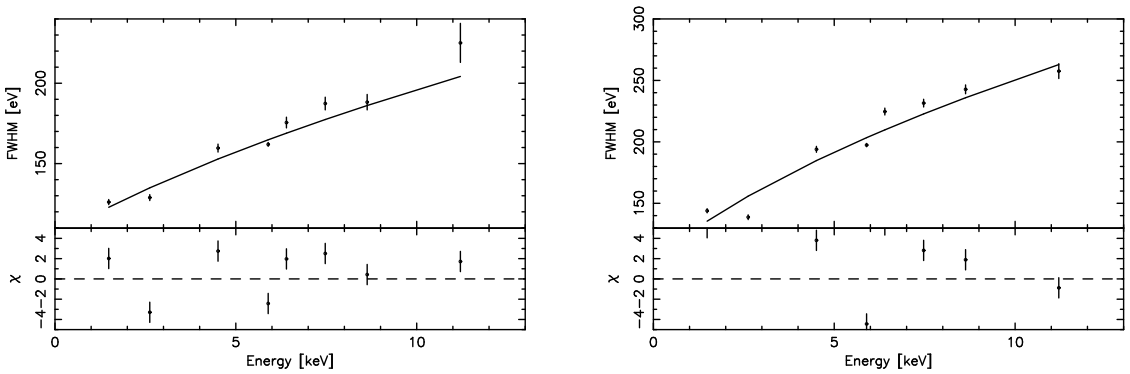


図 6.11: グレード法による Deep2 のエネルギー vs エネルギー分解能
左:グレード 0、右:グレード 02346、曲線は式 2.18 でフィットした結果。下に残差を示した。

第7章　フィッティング法の改良と検証

フィッティング法は3.2.2章に示した通り、2次元対称ガウス関数のピクセル中心値と実際の波高値を比較しているためフィッティング結果の波高値や広がりが正しく評価されたものであるか検討する必要があり、また10000イベントの解析に1時間強かかるため実用化するには高速化しなければならないという問題を抱えていた。本章では、まず高速化するために行なったことを記し、さらにフィッティング法の結果のパラメータが正しいものであるかシミュレーションを行なった結果を記す。

7.1　フィッティング法の高速化

フィッティング法はxisdlがイベントのCCD上での位置、フレーム番号、イベントの周囲5×5のピクセルの波高値などを出力したテキスト形式のファイル(イベントファイル)を使用する。従来のフィッティング法はフィッティングを行なうプログラムとしてdis45[8]を用いている。そのために、

1. 一イベント毎にdis45を動かすためのコマンド、各ピクセルの波高値などが書かれたファイルを作成する。
2. 一イベント毎にファイルを読み込みdis45で関数のフィッティングを行ないその結果をファイルに書き出す。
3. 結果のファイルを読み込み、フィッティングの結果をイベントファイルに付け加えたファイルを作成する。

という手順をとっていた。このためNイベントのフィッティングを行なうのに2N+1回のファイルの読み出しと書き出しを行ない、N+2個のプロセスを順番に走らせている。ファイルの読み書きおよびプロセスの数を減らすことによって高速化することが出来ると考え、単一のプログラムでイベントファイルの読み込みから書き出しまでを行なう、すなわちファイルの読み書きを各1回とプロセスを1個でフィッティングを行なう様に変更した。

従来の方法では、dis45の内部でCERN Program LibraryのMINUIT[9]というパッケージを用いてフィッティングを行なっていた。そこで、MINUITを利用してフィッティングの部分に関しては同じ動作をするようにプログラムを作成した。プログラム作成にあたっては、関数の変更やxisdlへの組み込みが容易に行なえるように分割してコーディングした。結果、10000イベントの解析が1分弱で行なえるようになった。この速度は、xisdlがイベント検出を行ないグレード判定する時間(100フレームあたり3分程度)と比較しても十分問題ない範囲であると考えられる。

7.2　フィッティング法の検証

フィッティング法が与える波高値、広がり σ、イベントの中心位置が正しいものであるのか検証を行なう。実際の実験データのみからでは、広がりの大きいイベントの真の波高値、真の広がりが不明であるため検証することは出来ない。そこで、6 章で得られた $^{55}\mathrm{Fe}$ のデーターとほぼ同条件になるようシミュレーションを行なった。2 次元回転対称ガウシアンの体積が 700ch に固定し中心位置をピクセル上でランダムに 10000 イベント発生させ、それぞれのイベントに対して各ピクセルに入る体積を積分する、ということを σ が 0.1 ピクセルから 2.0 ピクセルまで 0.1 ピクセルきざみで固定して行なった。その結果に対してフィッティング法を実行し波高値、σ、イベント中心位置がどのように評価されているか検証を行なった。また、ゼロレベルのゆらぎがフィッティング法に与える影響を評価するためにデーターに実際のデータと同レベルの σ =4ch のノイズを加えてフィッティングを行なった結果も述べる。

7.2.1　波高値

まず、ノイズを加えていないシミュレーション結果のフィッティングを行なった。図 7.1 のように σ が小さいところで鋭く入力した 700ch に対してほぼ正しい結果が得られていることがわかる。しかし、σ が大きいところではピークが広がりかつ本来の値よりも波高値を小さく評価しているスペクトルが得られた。フィッティングの結果得られたスペクトルをガウス関数でフィットした結果を図 7.2 に示した。図 7.2 より、$\sigma \leq 1$ ピクセルのイベントに対しては正しく波高値を評価できておりいるが、$\sigma > 1$ ピクセルのイベントに対しては正しく波高値を評価できていないことがわかる。これは、7.2.2 章で述べるように σ が正しく評価されていないものを 7×7 ピクセルまで外挿している効果が出ているものと考えられる。しかし、$\sigma > 1.0$ ピクセルのイベントに対して

$$PH_{output} = PH_{input} \times (1.05 + 3 \times 10^{-2} \times \sigma_{input} - 9 \times 10^{-2} \times \sigma_{input}^2) \qquad (7.1)$$

という関係が成り立っている。この関数を用いることでフィッティング結果とイベントの広がり σ から正しい波高値を知ることが出来る。この方法では広がりが大きいイベントの部分でエネルギー分解能の悪化を招いてしまう。しかし、今回のデータでは $\sigma > 1$ ピクセルとなるイベントは中性領域で吸収されたイベントである (9.1 章) ので 10%程度のエネルギー分解能の劣化は問題にならない。

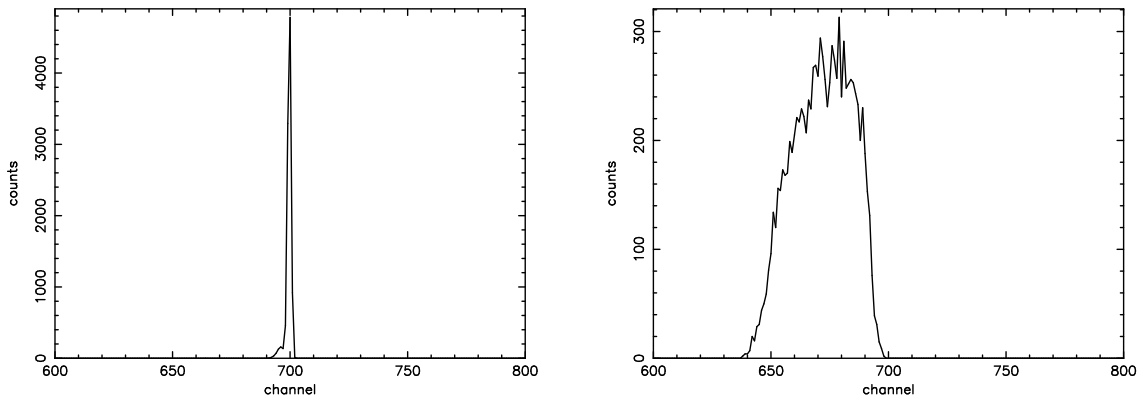


図 7.1: シミュレーションしたイベントをフィットして得られたスペクトル
左:σ=0.2pixel、右:σ=1.2pixel

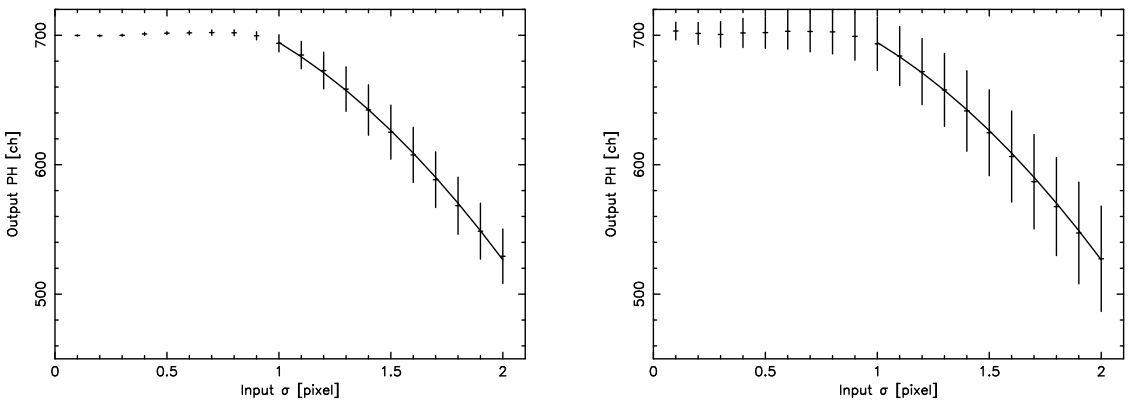


図 7.2: シミュレーションで得られたスペクトルのフィッティング結果
左:ノイズなし、右:$\sigma = 4$ch のノイズを加えた時
入力したイベントの波高値は 700ch。 曲線は式 7.1
スペクトルをガウス関数でフィットした時の中心値と 1σ 示した。

次にノイズを加えたシミュレーション結果を同じように検証した。ノイズを加えた場合には $\sigma = 0.1$ ピクセルのイベントで約 3.5ch 大きな値が中心値になった。これは、シングルピクセルイベントに対してフィッティングを行なう時にノイズにより波高値がプラスになっているピクセルがあるとそのピクセルも足しこんでフィットしてしまうためノイズと同程度波高値が大きく出るものと考えられる。

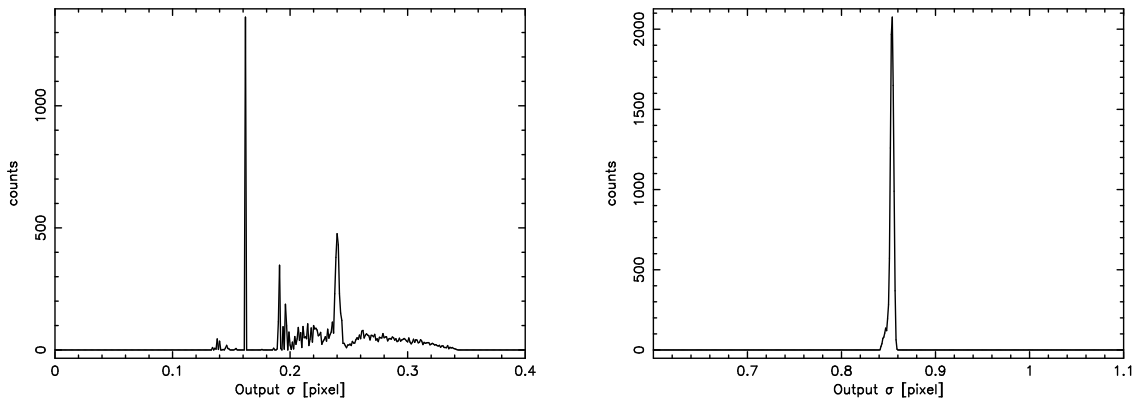


図 7.3: シミュレーションによる出力 σ の分布
左:σ=0.1 ピクセル、右:σ=0.8 ピクセル

7.2.2　広がり

フィッティング法は広がりの小さいイベントとくにグレード法でグレード 0 と判定されるイベントに対しては正しく広がりを決定することが出来ず、フィッティングの初期値やステップサイズによって決定されてされてしまう。図 7.3 に $\sigma = 0.1$ ピクセルのデータに対してフィッティングを行なった結果を示した。$\sigma = 0.16$ ピクセルの部分にあるピークはシングルピクセルイベントに対応し、2 つのピクセルに跨ったイベントに対応するピークが $\sigma = 0.24$ ピクセルのところに対応している。$\sigma > 0.2$ ピクセルのデータでは、シングルピクセルイベントや 2 ピクセルイベントが減少し、フィッティング結果の σ は一つのピークになる。その例として、$\sigma = 0.8$ ピクセルのデータのフィッティング結果も図 7.2 に示した。しかし、フィッティングの結果得られた σ は入力したイベントの σ とは異なっている。そこで、入力した σ に対してフィッティング結果の σ がどのように分布するかを調べるために、各データセットに対して出力 σ の平均値と標準偏差を図 7.4 に示した。$\sigma \leq 1.5$ ピクセルのデータは標準偏差が ≤ 0.04 ピクセルと十分小さいのでこれを一次関数でフィットしたところ

$$\sigma_{output} = 0.906 \times \sigma_{input} + 0.127 \tag{7.2}$$

という関係が得られた。この関係は、$\sigma > 1.5$ ピクセルのデータに対しても外挿して図 7.4 のように問題ないと思われる。

$\sigma = 4\mathrm{ch}$ のノイズを加えたデータをフィッティングした結果は、$\sigma = 0.1$ ピクセルを除いて個々のデータセットでは基本的な傾向は同じでピークの広がりが大きくなっていた。$\sigma = 0.1$ ピクセルのデータではノイズのない時よりも広がりの大きいイベントが増えていた。やはり、シングルピクセルイベントの隣のピクセルが正の波高値を持つ時だけ足し合わせてフィッティングを行なうため拡がりを大きく見積もっていると考えられる。ノイズを加えた結果についても σ の平均と標準偏差を図 7.4 に示した。

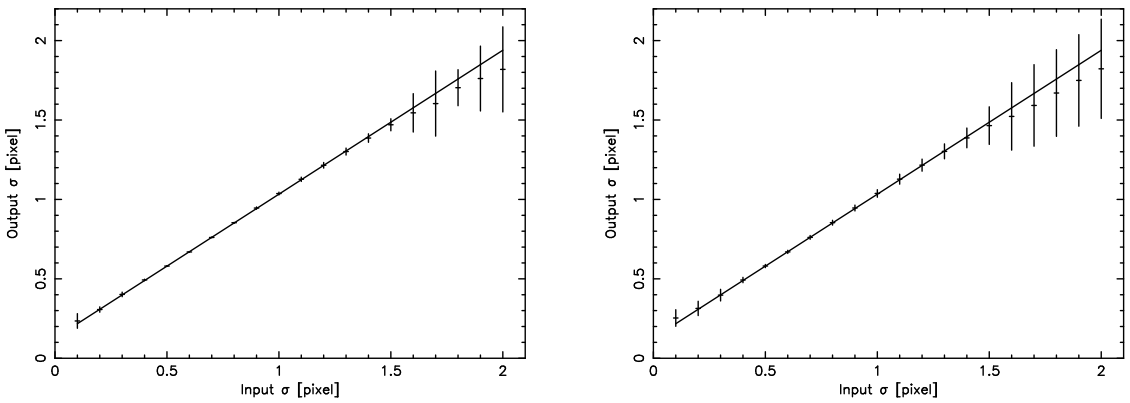


図 7.4: シミュレーションで得られた σ の平均と標準偏差
左:ノイズなし、右:$\sigma = 4\mathrm{ch}$ のノイズを加えた時
ラインは式 7.2

7.2.3 イベント中心位置

イベント中心位置の分布を知ることが出来たならば、検出効率のピクセル上での違いを求めることが出来る。このような検出効率の差は CCD の表面構造によって起こる。

σ が 0.1 ピクセルのデータではイベント中心位置のずれは全くランダムに分布していた。しかし、σ が 0.2 ピクセルのイベントでは図 7.5 のようにその誤差が約 0.1 ピクセル程度におさまっていた。さらに拡がりの大きなイベントでは誤差が小さくなっていた。イベントの中心位置が重要になるのは低エネルギーの X 線が CCD 表面構造によって場所による検出効率の違いを調べる場合である。しかし、低エネルギーの X 線は浅いところで吸収されることが多く拡がるイベントは少ない。従ってフィッティング法はイベントの中心位置を調べることも出来るが実用的ではない。

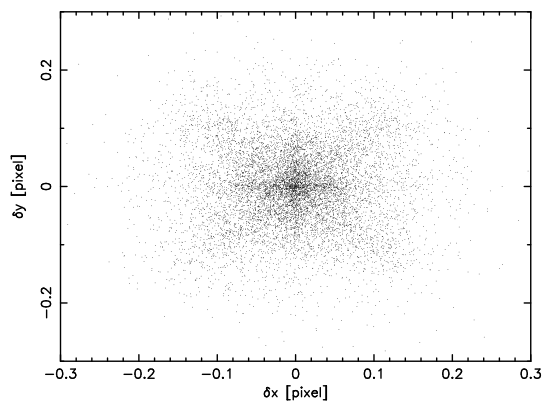


図 7.5: σ=0.2 ピクセルの時のイベント中心のずれ

7.2.4　フィッティング法の検証まとめ

以上のような検証を行なった結果、フィッティング法によって得られる結果は σ の大きいイベントでは波高値を小さく評価している、σ の出力の分布は入力したイベントの σ の一次関数となっていることが判明した。そこで、実験データを用いる際には

1. 式 7.2 の逆関数を用いて フィッティングの結果得られた σ を補正する。
2. 補正をおこなった σ と式 7.1 の逆関数を用いて波高値を補正する。(連続になるように $\sigma > 0.93$ ピクセル以上に適用)

個々のイベントの真の波高値や σ が不明であっても、以上の操作を行なうことによって統計的な議論が出来る精度で補正することが出来る。すなわち、フィッティング法によって求まった結果が、PH_{fit}、σ_{fit} であった場合に補正方法は、

$$\sigma_{real} = (\sigma_{fit} - 0.127)/0.906 \tag{7.3}$$

$$PH_{real} = \begin{cases} PH_{real} = PH_{fit} & \sigma_{real} \leq 0.93 \\ PH_{real} = \frac{PH_{fit}}{1.05+3\times10^{-2}\times\sigma_{real}-9\times10^{-2}\times\sigma_{real}^2} & \sigma_{real} > 0.93 \end{cases} \tag{7.4}$$

シミュレーションを行なった結果から各 σ ごとに 1000 イベントづつ抽出し上記の補正をフィッティングの結果に適用したところ図 7.6 のようになった。

これより σ が 1 ピクセル以下のイベントに対しては波高値の誤差の標準偏差が 1%程度、σ が 1.5 ピクセルでは誤差の標準偏差が 3%程度でフィッティング結果をだすことが出来ることが判明した。

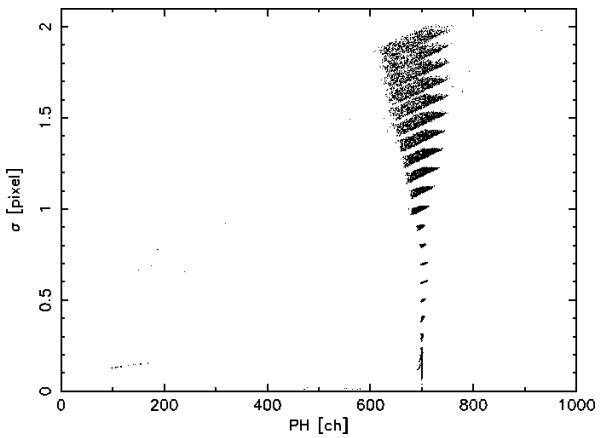


図 7.6: シミュレーション結果、波高値と σ を補正後

第8章　フィッティング法とグレード法の比較

7章で検証したように、フィッティング法は補正後では波高値を$\sigma < 1.0$ピクセルのイベントに対しては誤差1%程度で評価できており、また$\sigma > 1.0$ピクセルのイベントに対しても分散は大きくなるものの$\sigma = 1.5$ピクセルで誤差3%程度、またイベントの広がりに対しても0.2ピクセル$< \sigma < 1.5$ピクセルでは誤差の標準偏差が3%程度、と分布の議論をするには十分な精度を持っている。

6章においてグレード法を用いて解析したデータを本章ではフィッティング法を用いて解析を行なった。その際イベント検出の下限値を50chとした。

さらにフィッティング法によって得られるスペクトルとグレード法によって得られるスペクトルの比較を行なう。フィッティング法では9.1章以降で示すように中性領域で吸収されたイベントを除き、空乏層で吸収されたイベントのみを用いるには、適切なσを境界としてそのσ以下のイベントのみを用いれば良い。9.1以降に示した解析より、その閾値を、Deep1では$\sigma = 0.15$ピクセル、Deep2では$\sigma = 0.3$ピクセルとした。

8.1　電極電圧にともなうスペクトルの変化

フィッティング法を用いた場合の、蓄積中の電極電圧の変化による検出効率の変化を測定した。また、6.2で行なったグレード法による解析結果との比較を行なう。

8.1.1　Deep1

まず、Deep1の結果を示す。蓄積中の電圧が+6[V]のスペクトルを図8.1に示す。Mn Kαラインのピークは波高値が768ch、半値幅が173[eV]であった。これはグレード法と比べて波高値が1%程度大きく評価されおり、またエネルギー分解能はグレード02346を使用した時の152[eV]よりも悪かった。しかし、グレード02346を用いた時に見られた低エネルギー側のテール成分は見られなかった。また、検出効率は13.3%とグレード法でグレード0のみを使用した時とグレード02346を用いた時の中間であった。これらの結果よりグレード法では中性領域で吸収され電荷を失っているイベントがグレード2346に含まれ、テールを構成していると考えられる。

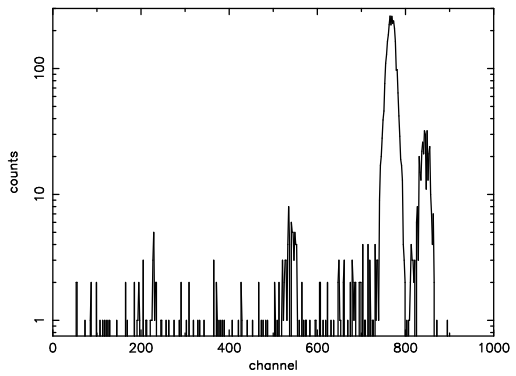


図 8.1: Deep1 のフィッティング法による ^{55}Fe のスペクトル
電極電圧は+6[V]

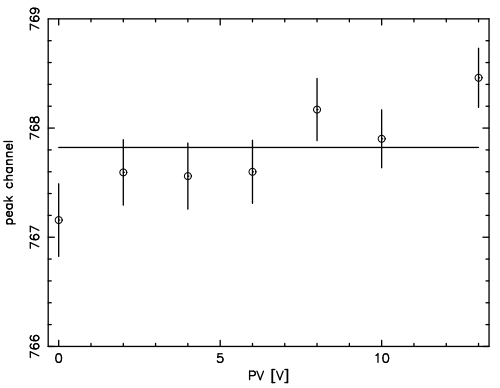


図 8.2: 電極電圧にともなう ^{55}Fe のピーク位置の変化 (Deep1 フィッティング法)

蓄積中の電極電圧によるピーク位置、エネルギー分解能、検出効率の変化をそれぞれ図 8.2、図 8.3、図 8.4 に示す。ピーク位置やエネルギー分解能は多少ばらつきがあるものの電圧の変化にともなった傾向は見られなかった。検出効率は電極電圧とともに増加しているが+10[V] から+13[V] の間では電圧変化に対する増加量が減っている。

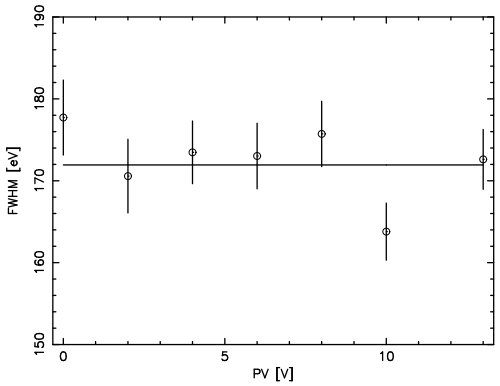


図 8.3: 電極電圧にともなうエネルギー分解能の変化 (Deep1 フィッティング法)

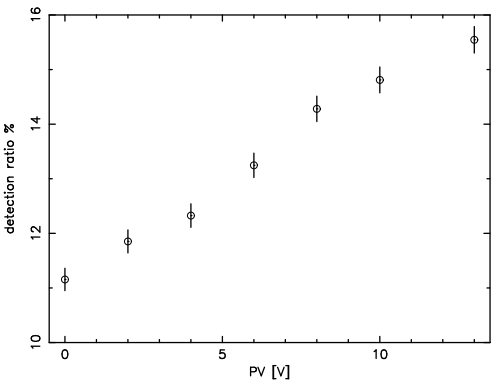


図 8.4: 電極電圧にともなう検出効率の変化 (Deep1 フィッティング法)

8.1.2 Deep2

次に、Deep2 の結果を示す。蓄積中の電圧が+6[V] のスペクトルを図 8.5 に示す。Mn Kα ラインのピークの中心値が 733ch とやはりグレード法に比べて約 1%大きく評価されている。半値幅は 207[eV] とグレード法でグレード 02346 のデータを用いた時と同程度であった。また、検出効率は 40.7%とグレード法でグレード 02346 を用いた時のとほぼ同程度であった。蓄積中の電極電圧によるピーク位置、エネルギー分解能、検出効率の変化をそれぞれ図 8.6、図 8.7、図 8.8 に示す。ピーク位置やエネルギー分解能は多少ばらつきがある

ものの電圧の変化にともなった傾向は見られなかった。検出効率は電極電圧とともに増加しているが$+10$[V] から$+13$[V] の間ではほとんど変化していない。

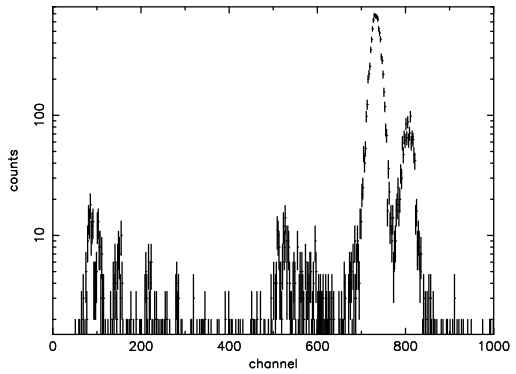


図 8.5: Deep2 のフィッティング法による ^{55}Fe のスペクトル
電極電圧は$+6$[V]

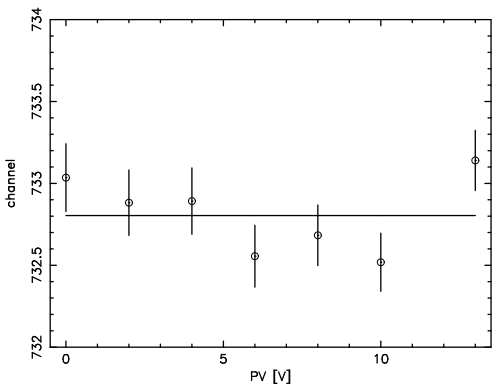


図 8.6: 電極電圧にともなう ^{55}Fe のピーク位置の変化 (Deep2 フィッティング法)

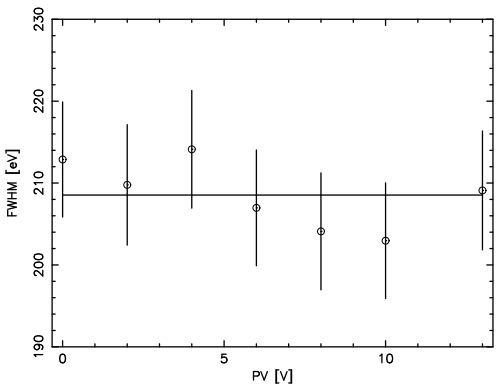


図 8.7: 電極電圧にともなうエネルギー分解能の変化 (Deep2 フィッティング法)

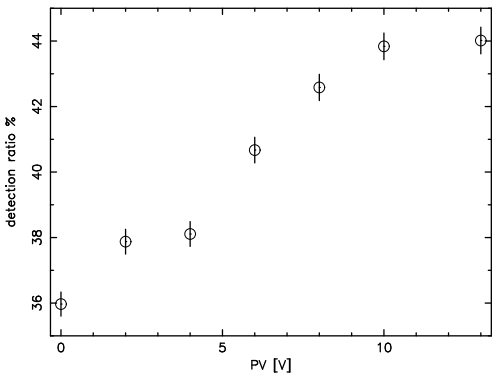


図 8.8: 電極電圧にともなう検出効率の変化 (Deep2 フィッティング法)

8.2 蛍光 X 線照射実験

次に、蛍光 X 線照射実験のデータを用いてフィッティング法を用いた場合のゲイン、エネルギー分解能のエネルギー依存性を求める。やはり、すべてのエネルギーのデータに対して $\sigma < 0.15$(Deep1)、$\sigma < 0.30$(Deep2) のイベントを使用した。

8.2.1 Deep1

Deep1 のエネルギーと波高値の関係を図 8.9 に示す。ゲインを調べたところ、offset がなければ合わないことが判明した。これは、シミュレーションの時に $\sigma = 0.1$ ピクセルのデータで波高値がノイズの影響を受けていたのと同様シングルピクセルイベントでノイズを足し込んでしまっていることが理由と考えられる。その効果はエネルギーが低いほど拡がりの小さいイベントが多いため、有力になると考えられる。

$$PH = 129.4(2) \times E[\mathrm{keV}] + 5.58(5) \tag{8.1}$$

のように表せる。(括弧の中の数字は最後の桁につくエラー) 一方、エネルギー分解能を各ターゲットの Kα のみを対称に (6.3) 式で σ_r はグレード 0 で求めた値を用いてフィッティングを行なった。その結果、実行的に $1.29(9) + 1.0(2) \times 10^{-1} \times E_0$ ピクセル加算している結果になった。ここで E_0 は X 線のエネルギー、括弧の中の数字は最後の桁につくエラーである。しかし、さらにエネルギーの高い方でずれがある。エネルギーの 2 乗に依存して増える項もあるようだ。

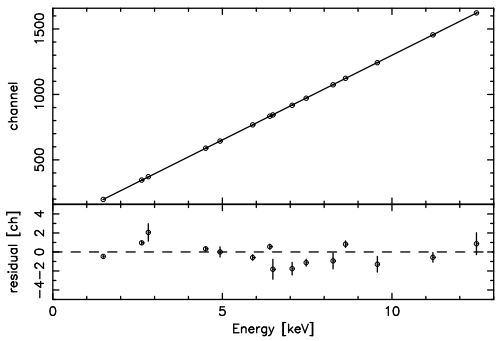


図 8.9: Deep1 のエネルギーチャンネル関係 (フィッティング法)

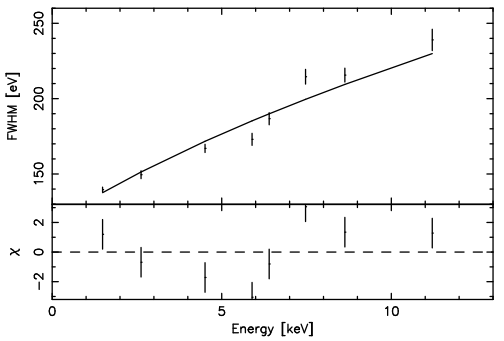


図 8.10: Deep1 のエネルギーエネルギー分解能関係 (フィッティング法)

8.2.2 Deep2

Deep2 のエネルギーと波高値の関係を図 8.11 に示す。ゲインはやはり offset がなければ合わない。エネルギーと波高値の関係は

$$PH = 123.1(2) \times E[\mathrm{keV}] + 7.34(4) \tag{8.2}$$

のように表せる。(括弧の中の数字は最後の桁につくエラー) 一方、エネルギー分解能を各ターゲットの Kα のみを対象に (6.3) 式で、σ_r はグレード 0 で求めた値を用いて、フィッティングを行なった。その結果、実行的に $1.8(1) + 1.8(2) \times 10^{-1} \times E_0$ ピクセル加算している結果になった。ここで E_0 は X 線のエネルギー、括弧の中の数字は最後の桁につくエラーである。Deep1 に比べて実行的に加算するピクセルが増えており、またエネルギーに対する増加量も

多い。これは、空乏層が厚くなったために拡がったイベントが増えていることによっている。

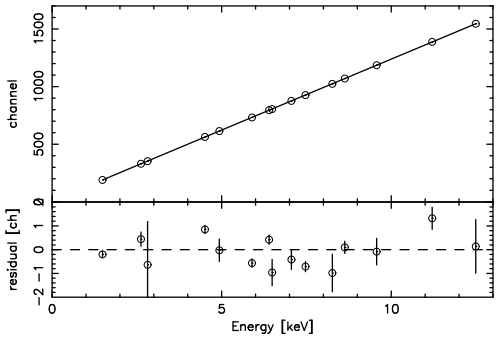


図 8.11: Deep2 のエネルギーチャンネル関係 (フィッティング法)

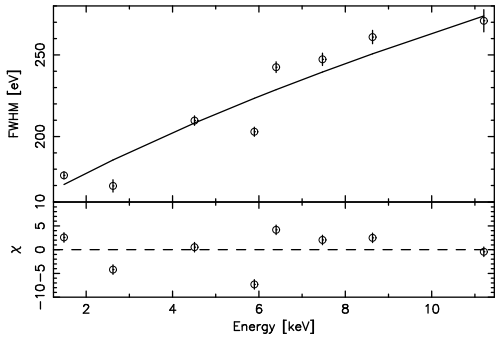


図 8.12: Deep2 のエネルギーエネルギー分解能関係 (フィッティング法)

8.3 フィッティング法とグレード法の比較のまとめ

フィッティング法の性能は検出効率は $\sigma < 0.15$ ピクセルのイベントを用いた Deep1 ではグレード法でグレード 02346 を使用した時よりより劣っていた。これは、Deep1 は空乏層が薄く中性領域の浅いところで吸収されるとイベントの拡がりが比較的小さくグレード法では排除しないためと予想される。実際 $\sigma \sim 0.4$ ピクセル程度までグレード 6 のイベントは分布している。従って、グレード 02346 を用いた時よりもフィッティング法の方がエネルギー分解能も良くテール成分も見られなかった。一方、$\sigma < 0.3$ ピクセルのイベントを用いた Deep2 ではグレード 02346 を用いた時とほぼ同程度の検出効率であった。エネルギー分解能は高エネルギー側で優っているものの低エネルギー側では悪化していた。

これより、グレード法ではそのイベントが吸収された位置が空乏層か中性領域かの区別がつかず一律拡がりが σ =0.30 ピクセル程度以下のイベントを利用している。そのため、空乏層の薄い CCD では中性領域のイベントも一部集めてしまい大きなテール成分を作る原因となる。また、よりピクセルサイズが小さいまたは空乏層が厚い CCD を用いた場合 $\sigma > 0.3$ ピクセルのイベントを捨ててしまうため検出効率の低下につながると考えられる。

ゲインはフィッティング法を用いた場合どちらの CCD でも offset をつけてやらないと合わず、これはノイズが原因である。

このようにフィッティング法はグレード法と比較して、中性領域のイベントを排除する精度が高いがノイズの影響を受けやすいという結果が得られた。

第9章　フィッティング法によるイベントの拡がりを用いた解析

9.1　コリメーター付き線源を用いたイベントの深さの測定

コリメーター付き線源を用いたデータに対してフィッティング法を適用した結果の波高値とσの関係を図9.1に示した。図9.1は波高値とσをモザイク状に区切りそれぞれの四角に入っているイベントの数を色調で表したものである。以降この関係を示した図をPH-σダイアグラムと呼ぶ。一見して二つのCCDでPH-σダイアグラムは大きく異なっているように見える。しかし、その違いは不純物濃度、エピ厚の違いによって説明できることを示す。

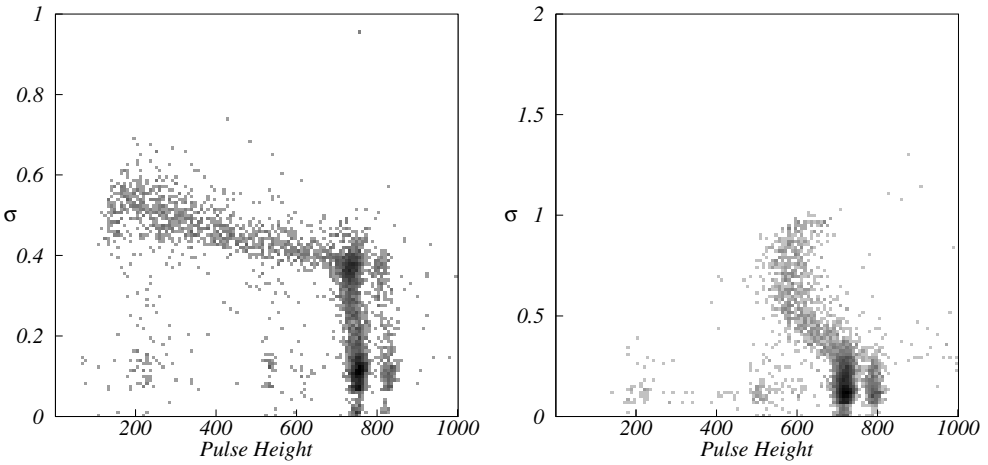


図 9.1: コリメーター付き線源を使用した実験のPH-σダイアグラム
左:Deep1、右 Deep2(ともにlog scale)

PH-σダイアグラム上のσが大きい部分では、入射X線のエネルギーの一部を失っており、またPH方向への分散も大きくなっている。しかし、コリメーター付き線源を用いたデータは統計が良くないのでスペクトルの拡がりに対する変化に関する議論は9.2章で行なう。

コリメーター付き線源は5.1章において、そのフラックスが1.093 ± 0.003photons/sと決定されている。CCD表面の電極、絶縁層での吸収は厚さが$\sim 0.5[\mu\mathrm{m}]$なので2%程度であり十分小さい。そこで次のような仮定をおくと個々のイベントが吸収された深さを決定することが出来る。

- イベントの広がりは吸収された深さの単調増加関数である。

PH-σ ダイアグラムを σ の軸に射影を取り σ 方向に積分し入射 X 線に対する割合を求めたものが図 9.2 である。ただし、転送中に入射した X 線の影響を除き、積分時間を正しく評価するために VOC 領域でアクティブ領域と同じ大きさから抽出されたイベントに対してもフィッティング法による解析を行ない差を取ってある。図 9.3 は 5.894 [keV] の X 線がある深さまでに Si に吸収される割合を示したものである。

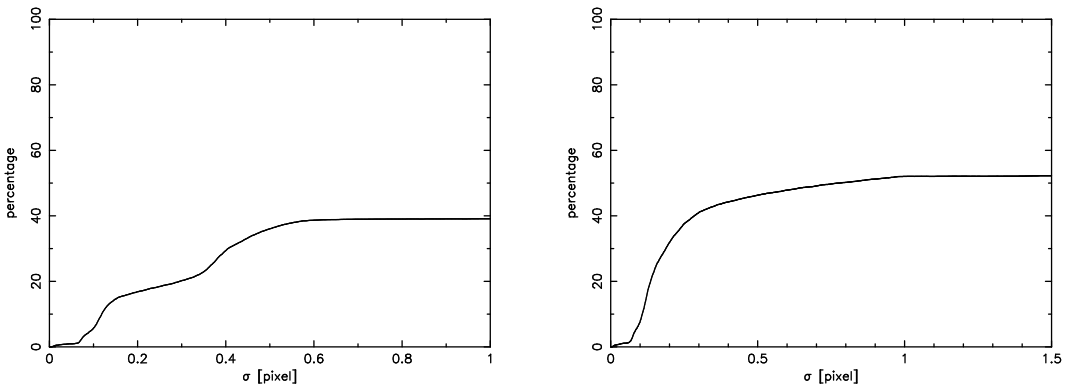


図 9.2: 拡がり σ 以下での検出効率
左:Deep1、右:Deep2

図 9.3 と図 9.2 で縦軸の値の等しい点からイベントの深さと広がりの関係が求まる (図 9.4)。Deep1 と Deep2 の結果を比較すると深さ 5μm までは広がりがほぼ一致している。しかし、広がりが 5μm を越えた辺りから Deep1 の傾きが急になっている (図 9.4 中 (a))。これは、X 線が中性領域で吸収された場合には、電子がドリフトされず拡散によって広がり空乏層に到達するまでに時間がかかるため、深さあたりの広がりの増加が大きくなるためと考えることが出来る。一方、Deep2 では深さに対して広がりの変化が大きくなる値が 15μm である (図 9.4 中 (b))。これより、Deep1、Deep2 の空乏層厚さはそれぞれ 4μm、15μm であると推測される。空乏層厚さに関する議論は、9.21 章で行なう。

また、Deep1 では深さ約 14.4μm で曲線が立ち上がっている (図 9.4 中 (c))。これはこれ以上拡がったイベントがないこと、すなわちイベントが検出される深さの限界と考えられる。従って深さ約 14.4μm のイベントが検出されていると考えられ、これは表 4.2 に示したとおり、Deep1 のエピ厚さが 15μm であることと良く一致している。一方、Deep2 のデータでは、21μm のところから急速に立ち上がっている。

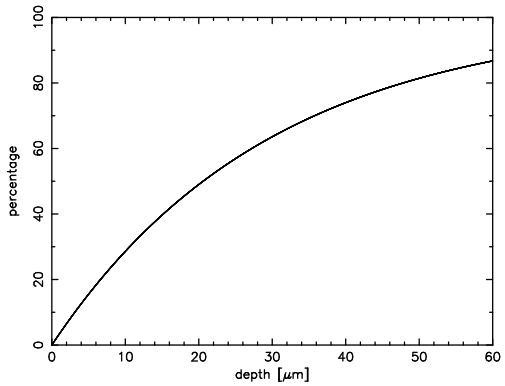


図 9.3: 5.894 keV の X 線がある深さまでに吸収される確率

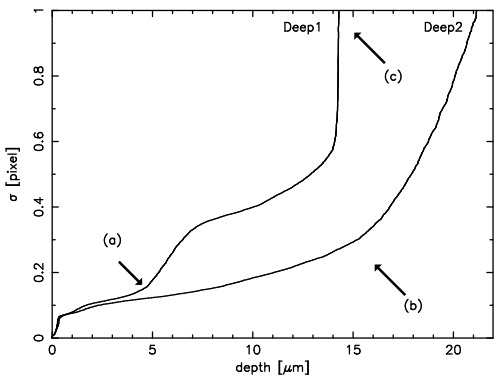


図 9.4: X 線の吸収された深さとイベントの広がりの関係

ただし注意すべきなのは、イベント閾値の影響である。イベント閾値は、イベントの中心のピクセルの波高値が 50ch 以上のものだけを取り出しているため PH-σ ダイアグラム上では図 9.5 のようにイベントが検出されない領域が存在する。同じ波高値を持ったイベントでもそのイベント中心のピクセル上の位置に中心ピクセルの波高値が左右されるため、この境界は明確なものではなくこの境界に近付くと連続的に検出率が低下していると考えられる。

より高いエネルギーの X 線を用いれば、イベント閾値に対して相対的に波高値が大きくなるため、このデータで不明であった領域も測定できる。従って、図 9.4 のような図で深さの上限値となっている値は、本来のイベントが検出される限界からイベント閾値にかかった割合を差し引いたものになっており、低いエネルギーの X 線を用いた法がイベント閾値にかかる割合が増えるため深さの上限が浅くなってしまっているようにみえると思われる。

9.2 イベントの広がりと波高値の関係

5.3 章の蓄積中の電極電圧が+6[V] に設定した ^{55}Fe のデータをフィッティング法で解析を行ない PH-σ ダイアグラムを作成したところ図 9.6 のように図 9.1 より拡がったイベントが多いものであった。

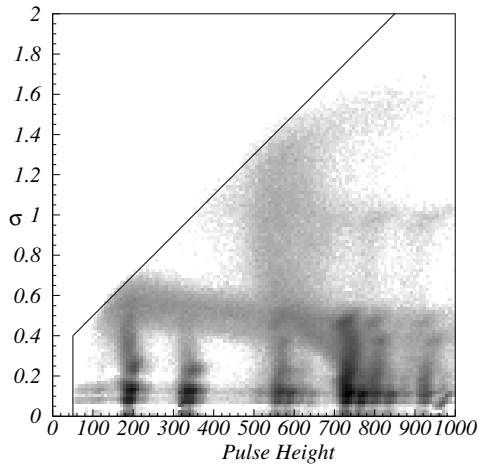


図 9.5: フィッティング法におけるイベント閾値
さまざまな条件のデータの PH-σ ダイアグラムを足し合わせたもの。
線の左上の領域にはイベントが検出されない。

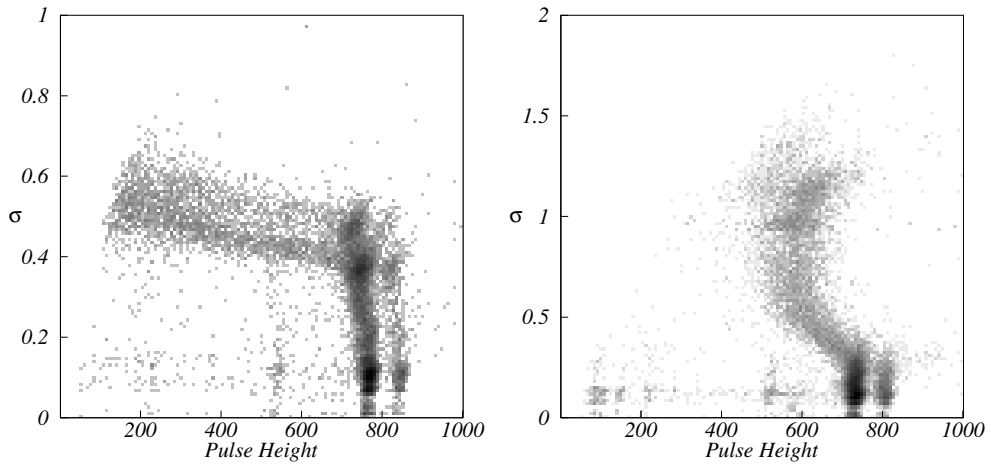


図 9.6: PV=+6[V]、active 領域の PH-σ ダイアグラム
左:Deep1、右:Deep2(ともに log scale)

これはフレーム毎の転送にかかる時間 (約 13 秒) に対し積分時間 (105 秒→ 10 秒) が短くなったため、転送中に入射するイベントの数が多くなったためと考えられる。転送中の CCD には各ピクセルの 2 つの電極に 0[V]、-10[V] の電圧がかけられており空乏層厚さが薄くなっているため、蓄積中のイベントと異なった分布を取るはずである。実際転送中のイベントのみである VOC 領域のデータに対してフィッティング法を行ない PH-σ ダイアグラムを作成したところ図 9.7 のようになり、図 9.6 から引き算を行なったところ図 9.8 のように図 9.1 と良く一致したものとなった。以降、引き算を行なった図 9.8 のデータを使用して議論を行なう。

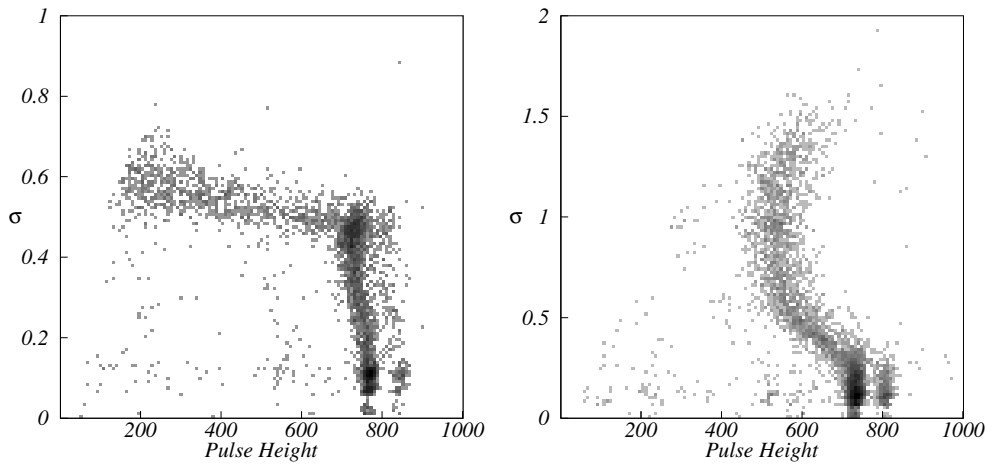


図 9.7: VOC 領域の PH-σ ダイアグラム
左:Deep1、右:Deep2(ともに log scale)

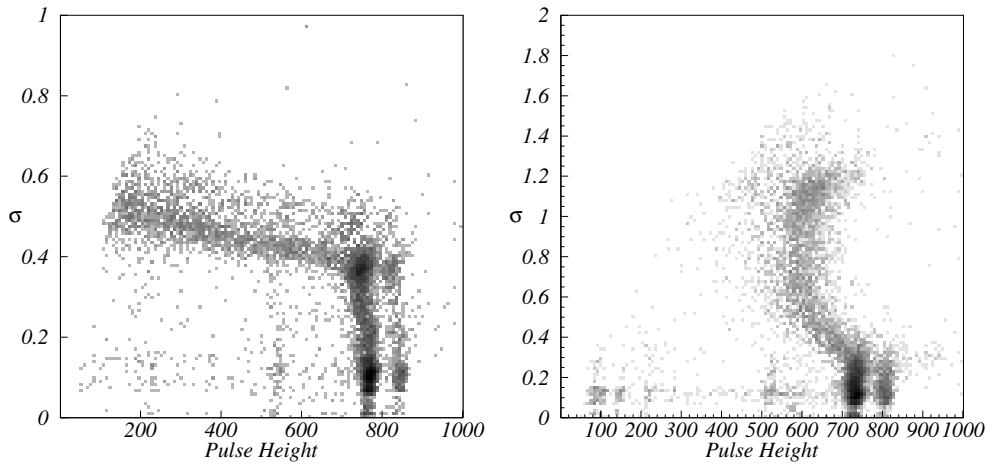


図 9.8: 引き算後の PH-σ ダイアグラム
左:Deep1、右:Deep2(ともに log scale)

PH-σ ダイアグラムを σ で切り分けて、波高値の軸への射影を取ることによって拡がり毎のスペクトルが得られる。

まず、Deep1 の PH-σ ダイアグラムを図 9.4 の 2 つの変曲点を区切りとして、$\sigma < 0.15$ ピクセル、0.15 ピクセル $< \sigma < 0.35$ ピクセル、$\sigma > 0.35$ ピクセルの三つの部分に分割して図 9.9 のようなスペクトルを作成した。

$\sigma < 0.15$ ピクセルの Mn Kα ラインのピークは波高値が 769[ch]、半値幅が 173[eV] であった。0.15 ピクセル $< \sigma < 0.35$ ピクセルのデータでは Mn Kα のピークの中心値が 756ch と σ <0.15 ピクセルのデータに比べて約 2%電荷を失っていることがわかる。その半値幅は

769ch が 5.9 keV という値を用いて 314[eV] であった。$\sigma > 0.35$ ピクセルのデータでは Mn kα のピークの中心値は 749ch とさらに電荷を失っており、また σ が 0.4 ~ 0.6 ピクセル付近に広がる波高値の小さい成分がテールとなっているのがみられる。

次に、Deep2 の PH-σ ダイアグラムからスペクトルを作成する。図 9.4 には Deep1 のものと異なり複数の明確な変曲点は見られない。そこで、PH-σ ダイアグラム上での折れ曲がりとなっている、0.3 ピクセル刻で分割することとした。その結果のスペクトルを図 9.9 に示す。やはり、9.1 から空乏層で吸収されたイベントであると予想されるピークの位置は σ とともに大きく減少していき、$\sigma < 0.3$ ピクセルで Mn kα のピークが波高値 734[ch] 半値幅は 206[eV] であった。$\sigma > 0.3$ ピクセル以上のデータではいずれも Mn の二つのラインが区別できなくなっている。$\sigma > 0.9$ ピクセルのデータでは、ピーク位置が 611ch と $\sigma < 0.3$ ピクセルに比べて、17%電荷を失っていた。また、半値幅は 784[eV] であった。

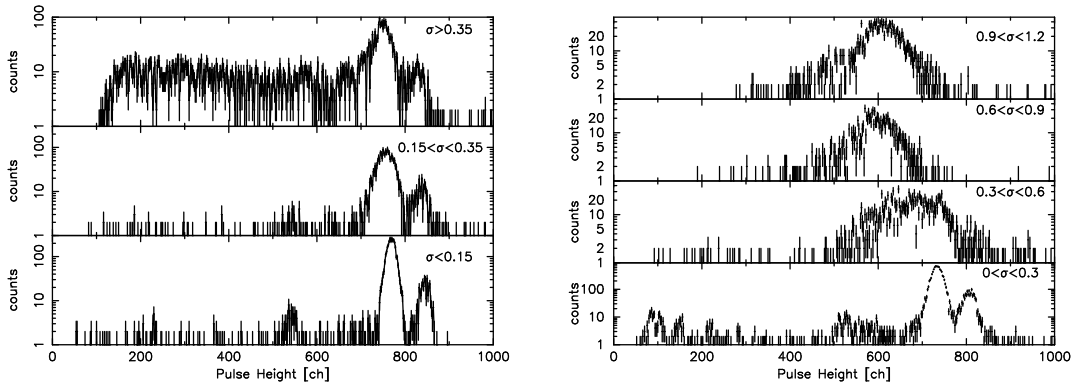


図 9.9: σ で区切ったスペクトル
左:Deep1、右:Deep2

Deep1 で空乏層厚さが 4.5[μm] でそれに相当する広がりが $\sigma = 0.15$ ピクセルであり、Deep2 では空乏層厚さが 15[μm] でそれに相当する拡がりが $\sigma = 0.3$ ピクセルであるとする 9.1 章の結果は、中性領域で吸収されたと考えられるイベントが電荷の一部を失っていることより正しいと思われる。

9.3　蓄積中電極電圧による空乏層厚さの変化の測定

9.1 章の PH-σ ダイアグラムから空乏層厚さを求める方法は 9.2 章のようなスペクトル解析を行なった結果、中性領域で吸収されたイベントと思われる領域で電荷を失っていることから正しいものであることが判明した。そこで、9.1 章の方法を 6.2 蓄積中の電圧を変えて測定したデータに適用する。

まず、入射した X 線の光子の数を求める。コリメーター付き線源のデータと同じ電圧の設定のデータのイベントの個数の比を求めることによって入射した X 線の数を求めることが出来る。そこで、図 9.2 と図 9.8 のイベントの数の比較を行なった。その際、全イベント数を比較するのではなく 9.1 より拡がり σ と吸収深さが相関していることがわかっている

のでコリメーター付線源を使用した時の σ 以下のイベントの数 $N_{col}(<\sigma)$ とコリメーターなしの実験の σ 以下のイベントの数 $N_{nocol}(<\sigma)$ を数点とり、

$$N_{nocol}(<\sigma) = A \times N_{col}(<\sigma) \tag{9.1}$$

のような式でフィットして A を求めることによりフラックスを求めることが出来る。その結果、入射した X 線の数は 2.68×10^4 個であるともとまった。今後、チェンバー 2 で取得した ^{55}Fe のデータに対しては入射 X 線の光子数はこの値を用いる。

各電圧のデータの PH-σ ダイアグラムを Deep1 は図 9.10 に Deep2 は図 9.11 に示した。どちらの CCD でも電極電圧の増加とともに PH-σ ダイアグラムの広がりの大きい部分で変化が見られている。これは、電圧の増加とともに空乏層厚さが大きくなり中性領域が狭められる。従って同じ深さで吸収されたイベントでも、空乏層までの距離が短くなり、到達するのにかかる時間が短くなる。ゆえに、イベントの広がりは小さくなり、電荷損失の量も減少していると考えることが出来る。

しかし、Deep1 の PH-σ ダイアグラムで横に伸びる部分 ($\sigma \sim 0.5$) は広がりが小さくなっている。一方、Deep2 の PH-σ ダイアグラムでは PV=+6[V] では図 9.5 のイベント検出の限界に近かったため明確でなかった広がりの大きい部分で横に伸びる成分が PV=+10[V] 以上のデータでは現れている ($\sigma \sim 1.0$)。

次に電極電圧が与える変化を定量的に評価することとする。まず、上で求めたフラックスよりイベントの広がりと吸収された深さの相関を求めた (図 9.12)。Deep1 では、深さ 5μm 付近にある変曲点が電圧にともない変化しているのがわかる。これは、電極にかける電圧とともに空乏層厚さが増大していることを示している。電極の電圧が 0[V] の時に空乏層厚さが 3μm であったのが電圧とともに増加し、電圧が+13[V] の時に 5μm まで成長している。一方、深さ 7μm 付近の変曲点は変化していない。これは、上に述べた、この変曲点がアクセプタ濃度の変化によるものであるという考えと矛盾していない。一方、Deep2 では空乏層厚さが、電圧 0[V] の 13μm から電圧+13[V] の 19μm まで増加している。

図 9.12 中で電極電圧が低いほど、感度のなくなる深さが浅くなっている。これは、電荷を失って横に伸びるイベントの分布が電圧が低いほど拡がりの大きい部分に存在するため、図 9.5 のようなイベント閾値にかかるイベントが増加するためである。

そこで、Deep1 のデータから電荷を大きく失っている成分すなわち PH-σ ダイアグラム上で横に拡がる成分を除いたカウント数を除いて比較してみた。横に拡がる成分の領域として、波高値が 700ch 以下、σ が 0.3 ピクセル以上 0.8 ピクセル以下の部分を選択した。その結果、図 9.13 のように電圧に対してカウント数の有意な変動は見られなかった。この平均値が対応する深さが表面から中性領域の底までの深さで 10.1μm と求まった。

また、横に拡がる成分は次のように説明できる。基盤からアクセプタや不純物が浸透してアクセプタ濃度に勾配があり不純物濃度が高くなっている。このような領域で X 線が吸収された場合には電荷はアクセプタ濃度の勾配により電場を受けドリフトされるが不純物濃度も高いため再結合の効果を強く受ける。このため、深さに対して拡がりは余り変化しないが電荷を失ってしまう。

一方、Deep2 では中性領域の深さが 5.9 keV の X 線の減衰長と同程度の深さになるので、次節でより高エネルギー側の X 線で中性領域の深さを決定することにした。

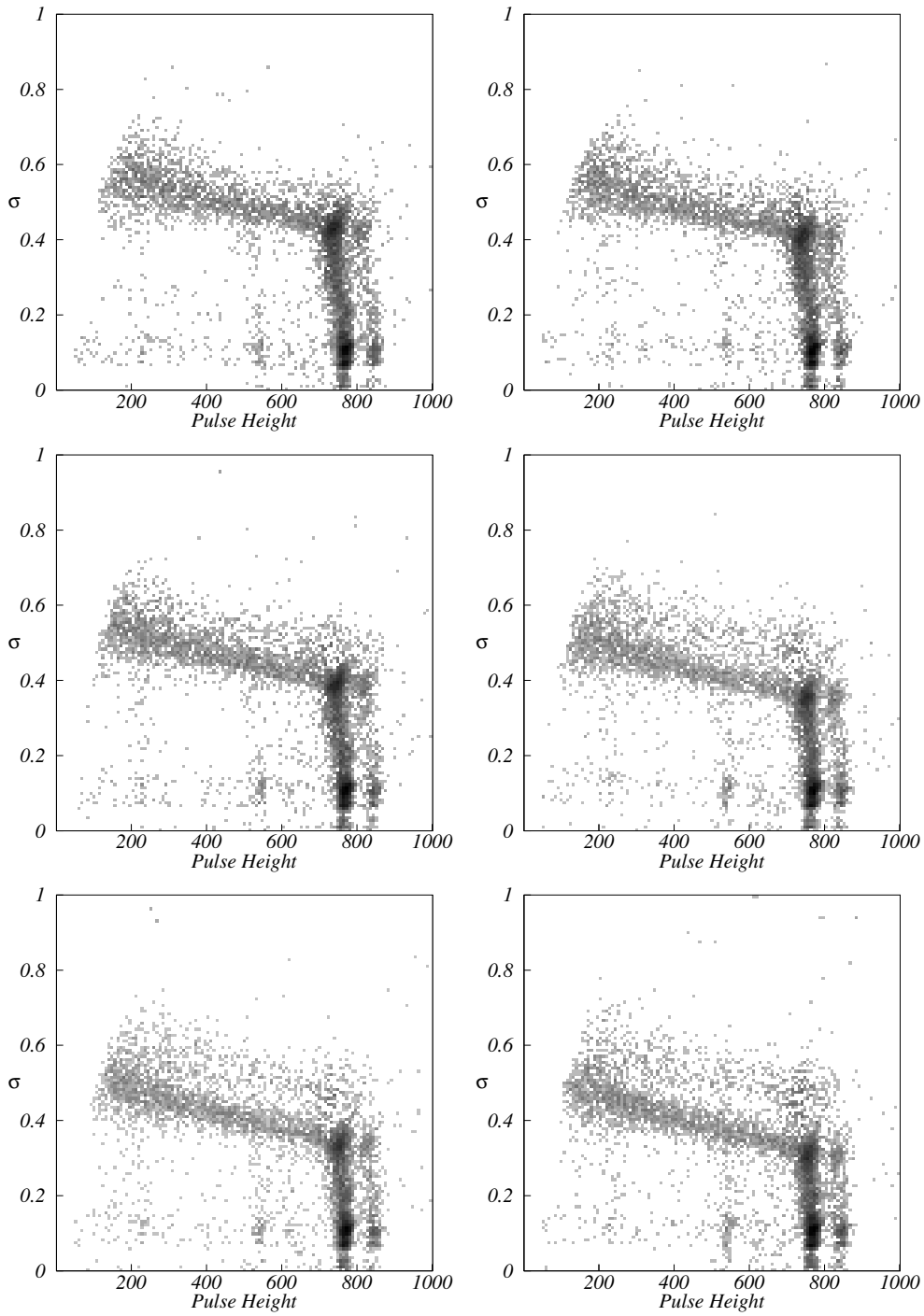


図 9.10: 電極電圧による PH-σ ダイアグラムの変化 (Deep1)
左上:PV=0[V]、右上:PV=+2[V]、左中:PV=+4[V]
右中:PV=+8[V]、左下:PV=+10[V]、右下:PV=+13[V]

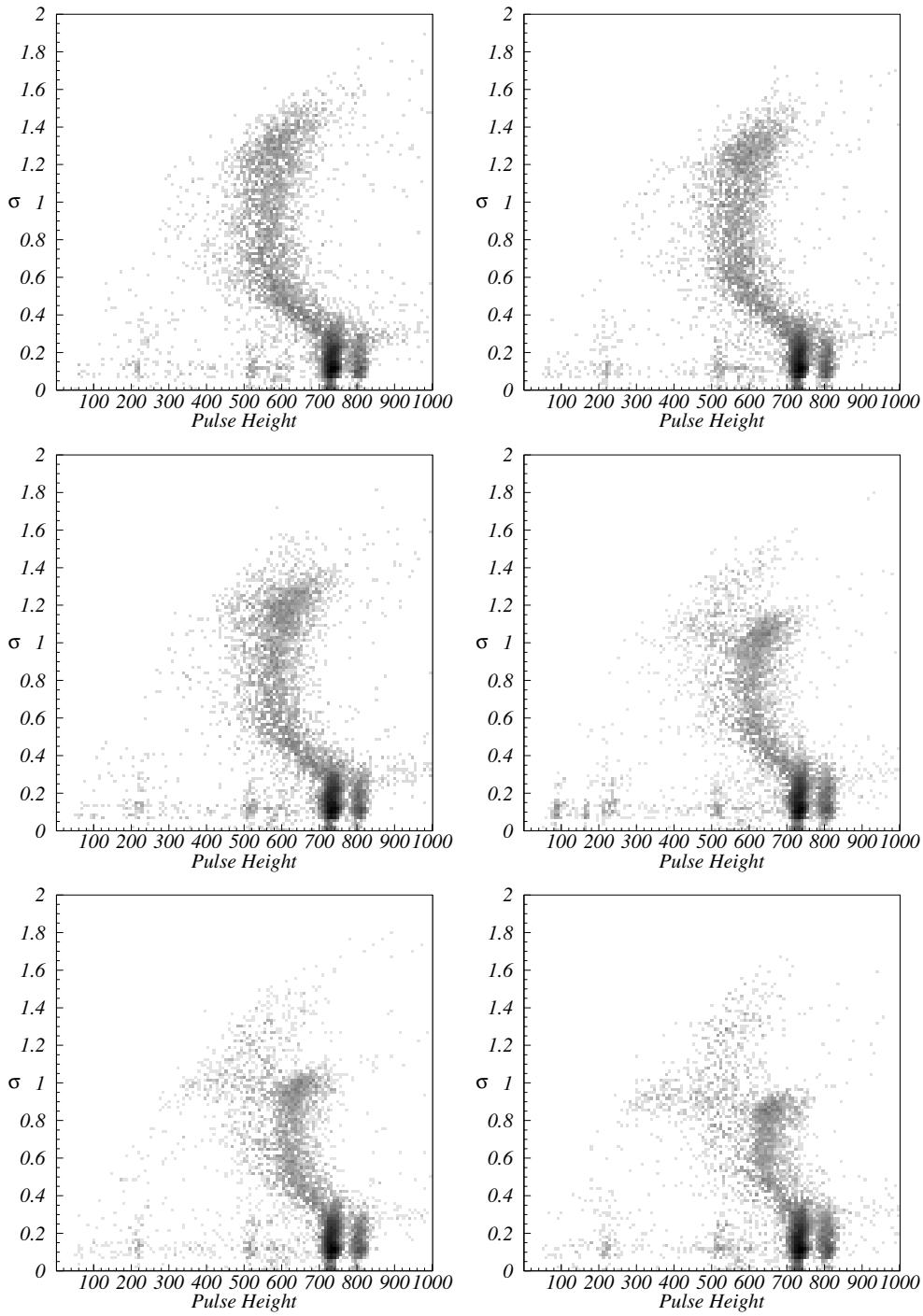


図 9.11: 電極電圧による PH-σ ダイアグラムの変化 (Deep2)
左上:PV=0[V]、右上:PV=+2[V]、左中:PV=+4[V]
右中:PV=+8[V]、左下:PV=+10[V]、右下:PV=+13[V]

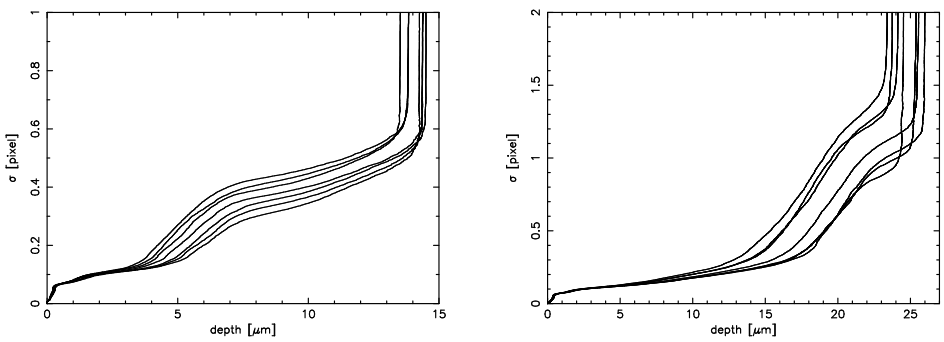


図 9.12: イベントの深さと広がりの関係
左:Deep1、深さ 5μm のところで上から電圧の低い順になっている。
右:Deep2、深さ 15μm のところで上から電圧の低い順になっている。
検出される深さの限界が異なって見えるのはイベント閾値のため。

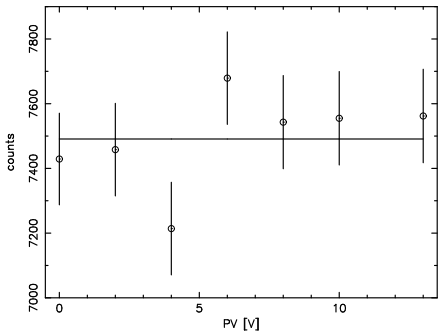


図 9.13: 横に拡がる成分を除いたカウント数の比較
エラーは 1σ。直線は一定としてフィットした結果。

Target	Al*	Cl*	Ti	Fe	Ni	Zn	Se
入射光子数 ($\times 10^4$)	3.01	1.76	2.78	4.85	5.14	8.63	1.12×10

表 9.1: 各ターゲット使用時の全入射光子数 (Deep1)
*:Al と Cl はフィッティングが余りあっていない。図 9.15 参照
その他はフィッティングの誤差は 1%以下。

9.4 エネルギーに伴う PH-σ ダイアグラムの変化

蛍光 X 線を照射したデータを用いて、入射 X 線のエネルギーの変化に伴う PH-σ ダイアグラムの変化を調べた。

9.4.1 Deep1

まず、Deep1 の PH-σ ダイアグラムを図 9.14 に示す。図 9.14 はそれぞれのターゲットの Kα の位置が図の上で同じになるようにスケーリングしてある。これらの図を比較すると、Al と Cl のデータでは浅いところで吸収されてしまうことが多いため拡がりの小さいところにイベントが集中しているが、その他のデータではエネルギーの低い X 線の方が PH 方向にばらつきが大きくなっている、イベント閾値 (図 9.5) の影響でイベントがない部分がある、という 2 点を除くとどのエネルギーでも PH-σ ダイアグラムは同じ形をしている。これは、イベントの拡がりと電荷損失の割合は入射 X 線のエネルギーと無関係に X 線の吸収深さのみによって決定していることを意味する。また、PH-σ ダイアグラムの濃淡に注目するとエネルギーの高い X 線の方が広がりが大きいところが濃くなっている。しかし、Al と Cl のデータではこの関係が逆転している。これは間に Si K 吸収端があり Al の蛍光 X 線より Cl の蛍光 X 線に対する吸収断面積の方が大きくなっているからである。

次に各ターゲットを用いた時の CCD への入射光子数を次のようにして決定する。

1. まず各ターゲットの σ と σ 以下のイベントの個数のグラフを作成する。
2. 上のグラフの $\frac{d\sigma}{dx}$ が大きくなっている、σ が 0.15 ピクセルから 0.3 ピクセルまで 0.05 ピクセル刻で点を取る。
3. 図 9.12 の電圧が同じデータから広がりを深さに戻す。
4. 入射 X 線の光子数をフィッティングにより求める。

この結果、Al と Cl のデータで、図 9.15 のように深いところでモデルより多くイベントが検出されている。各深さでのカウント数のずれにして最大 6%程度のずれがある。これは、Al や Cl のデータは波高値が小さいためノイズの影響が大きくなりイベントの広がりを大きく評価しているためと考えられる。他のターゲットのデータは各深さでのカウント数の誤差が 1%程度以下に納まっておりモデルがデータ点を良く再現していることがわかった。

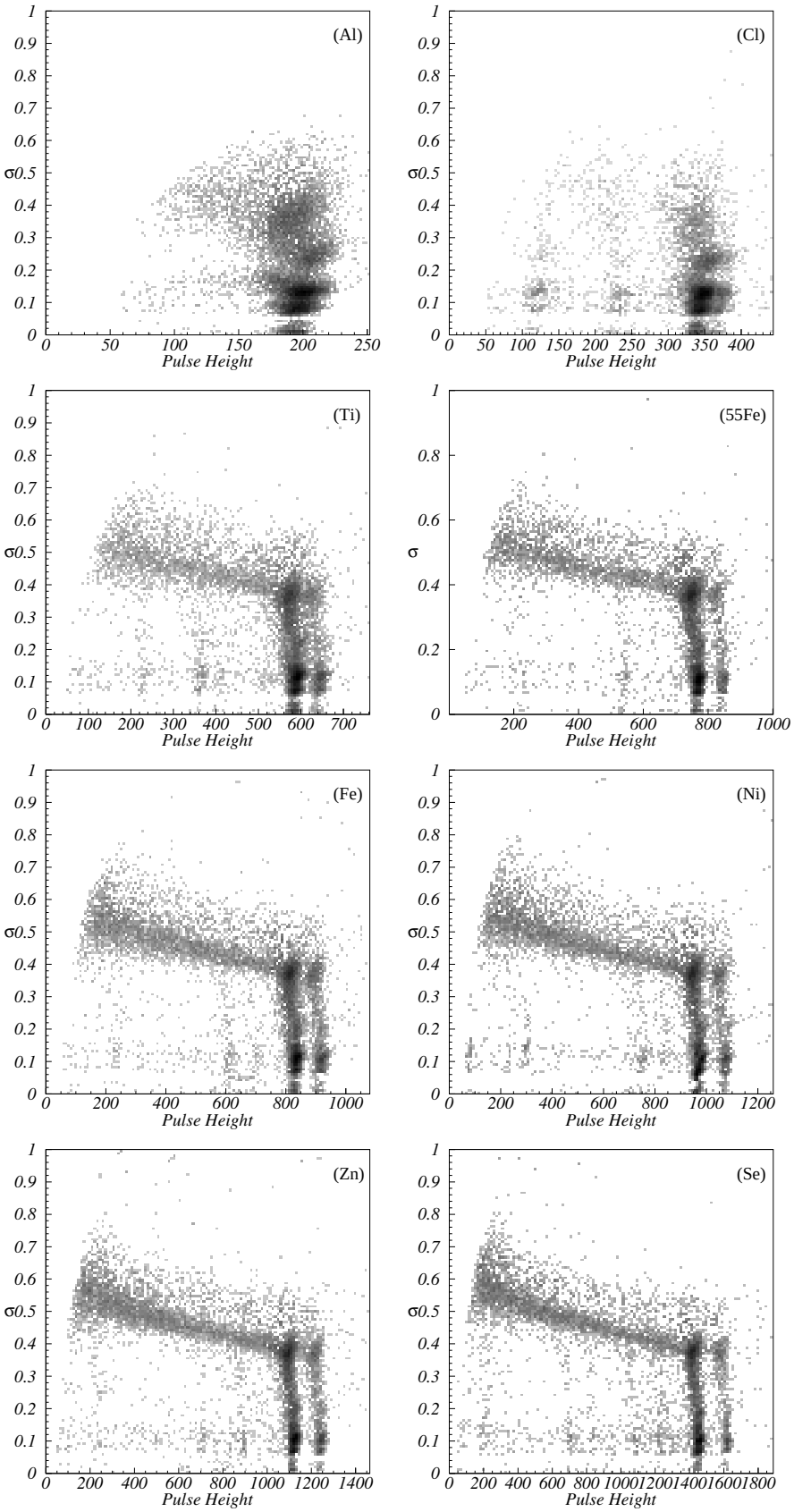


図 9.14: 各ターゲットの PH-σ ダイアグラム (Deep1)
各ターゲットの Kα 輝線が同じ位置にくるようにスケーリングした。

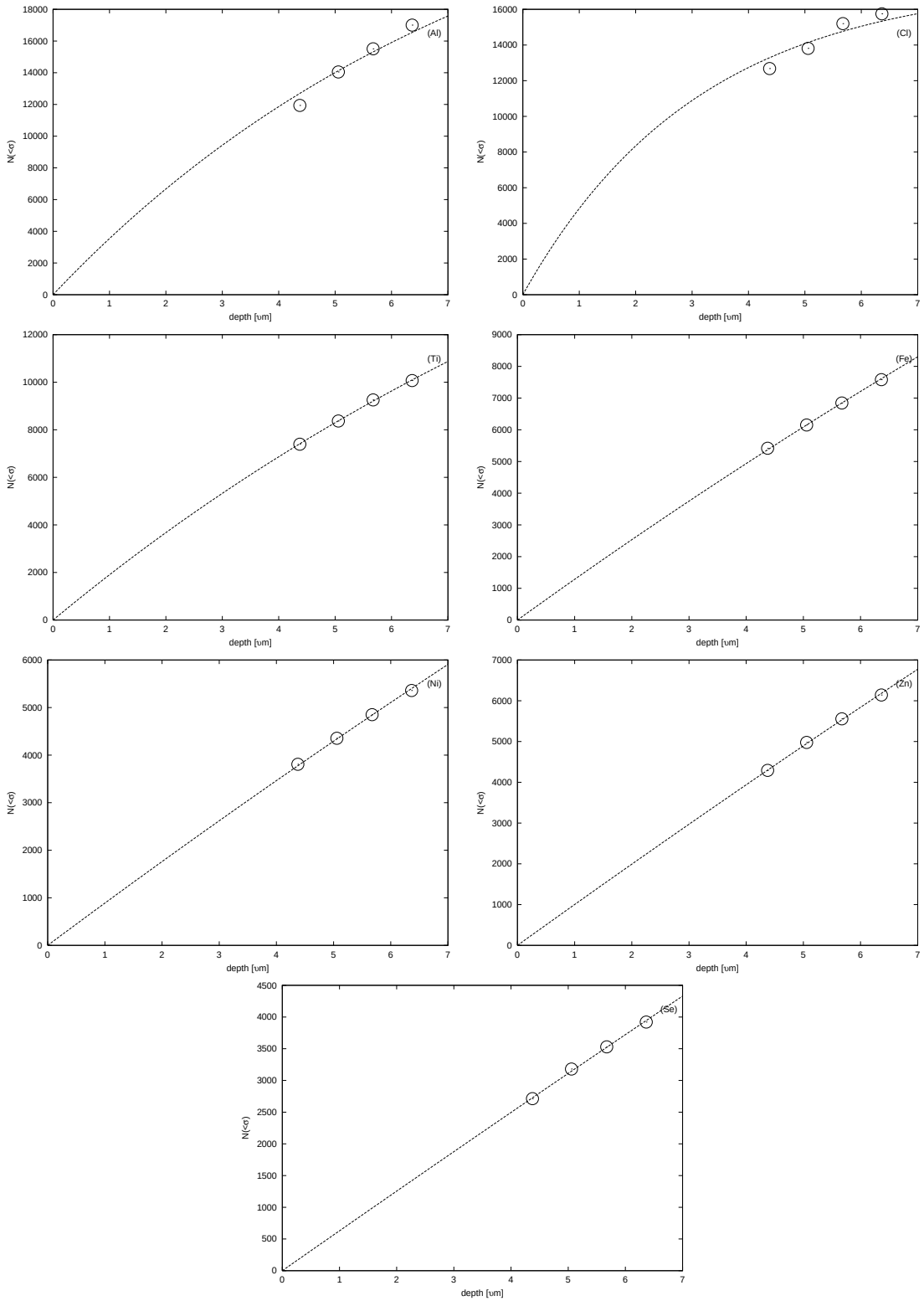


図 9.15: 各ターゲットの時の入射光子数のフィッティング結果 (Deep1)
縦軸は図 9.12 から求めたその深さでの拡がり (σ) より拡がりの小さなイベントの個数。

次に、表 9.1 のように求められた入射光子数のうち高エネルギー側のものを用いてイベントが吸収された深さとその拡がりの関係を求め直すこととした。これは、高エネルギーのデータを用いた方が

- 深い部分で吸収されるイベントが多いため深いところでの感度が良くなること。
- イベント閾値 (図 9.5) が X 線のエネルギーに対して相対的に低くなるので電荷を失っている成分を多く拾えること。
- X 線のエネルギーに対してノイズが相対的に小さくなること。

などの理由で有利であるからである。Fe、Ni、Zn、Se の各ターゲットでのデータからイベントの深さと拡がりの相関を求めたものが図 9.16 である。各エネルギーで一致しており、イベントの拡がりの大きさは X 線のエネルギーと無関係であることを示している。図 9.16 で各ターゲット毎に最も深い所で吸収されたイベントの深さが X 線のエネルギーとともに深くなっているのは上で述べた通りイベント閾値が相対的に低くなることにより検出されないイベントが減少するからである。

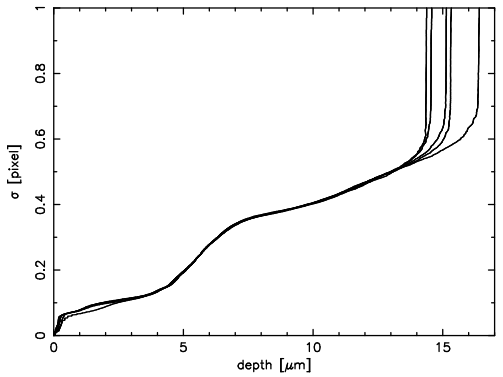


図 9.16: 各ターゲットを用いた時の拡がりと深さの関係
深さの上限が浅いデータから順に、^{55}Fe、Fe、Ni、Zn、Se。
深さの上限がずれるのは図 9.5 にかかるイベントの個数が異なるためと考えられる。

9.4.2　Deep2

次に、Deep2 にエネルギーの異なった X 線を照射した時の PH-σ ダイアグラムを図 9.17 に示した。図 9.17 は Deep1 の時と同様にそれぞれのターゲットの Kα の位置が図の上で同じになるようにスケーリングしてある。注目すべきは、^{55}Fe のデータでは余り明瞭に見えていなかった拡がりの最も大きい領域で横に伸びるイベントが見られるようになったことである。これは、^{55}Fe を用いたデータでは、Mn Kα の X 線の減衰長と同程度の深さで吸収されたイベントであるため感度が低くなっていること、図 9.5 で示したイベント閾値に

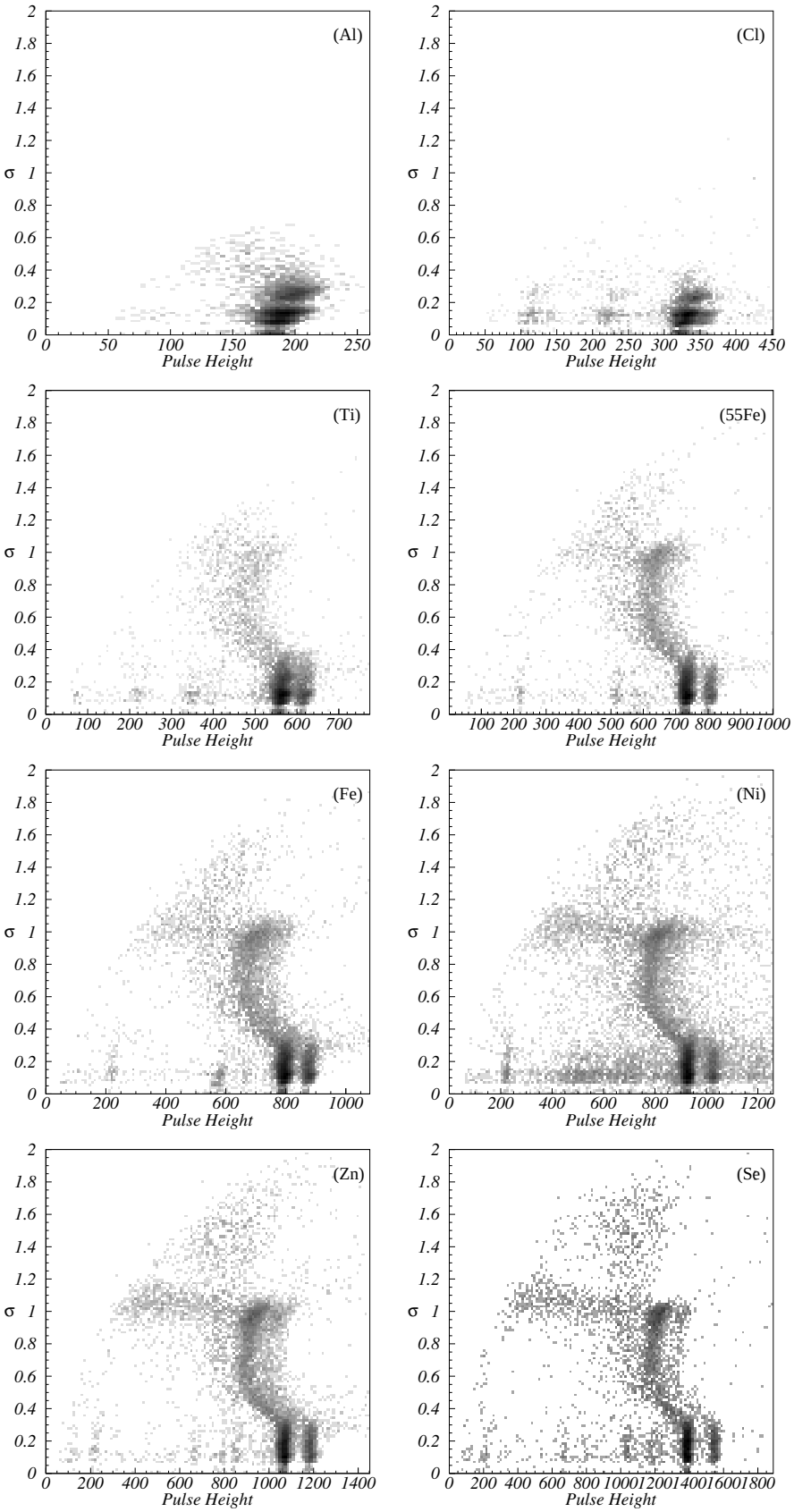


図 9.17: 各ターゲットの PH-σ ダイアグラム (Deep2)
各ターゲットの Kα 輝線が同じ位置にくるようにスケーリングした。
Ni のデータはフィルターの不良により純度の低いものとなっている。

Target	Al	Cl	Ti	Fe	Ni	Zn	Se
入射光子数 ($\times 10^4$)	1.58	1.53	2.17	3.92	6.15	5.44	3.90
光子数の比	0.53	0.87	0.78	0.81	1.19*	0.63	0.35
電流の比	0.60	0.90	0.90	0.80	—	0.60	0.33

表 9.2: 各ターゲット使用時の全入射光子数 (Deep2)
Al、Cl、Ti ではフィッティング結果のフラックスを用いると、
深さとイベントの拡がりの曲線が他のずれる。
その他のデータでは入射光子数のフィッティングの際の各データ点での誤差は 1%以下。
下の 2 列は Deep1 のデータを取得した時の X 線の光子数と X 線発生装置に流した電流との比較。Deep2 の値/Deep1 の値を示した。
∗:Deep2 で Ni のデータを取得した際にはフィルターの不良があったので比較できない。

近いことが理由で明確でなかった部分がより減衰長の長い X 線を用いることで統計が良くなったためである。

次に Deep1 の時と同様に各ターゲットを用いた時の入射 X 線の光子数を ^{55}Fe の蓄積中の電圧が同じデータから求めた σ と深さの関係 (図 9.11) を用いて決定する。図 9.11 で $\frac{d\sigma}{dx}$ が大きくなっている σ=0.3-0.45 ピクセルまでの 4 点をリファレンスとした。

Cl のデータでは Deep2 が Deep1 に比べて空乏層厚さが 16μm と大きくなっており、Cl の蛍光 X 線 (2.6 keV) の減衰長 3μm に比べて十分大きくなっているためほぼ 100%のイベントが検出されていることになっている。フィッティングにより求まった入射 X 線光子数を表 9.2 にまとめた。また、各ターゲットを使用した時に X 線発生装置に流した電流と CCD に入射した光子数の、Deep1 の実験時と Deep2 の実験時の比率も示した。いずれのターゲットでも CCD に入射した X 線と X 線発生装置に流した電流の比率はほぼ等しくなっている。

各データに対して入射 X 線の光子数が求まったので、これらを用いて求めた各エネルギーの X 線での吸収深さと拡がりの関係を図 9.19 に示す。ただし、やはり低エネルギー側の ^{55}Fe のデータではイベント閾値にかかってしまうため不明であった深さ 25μm 以上の部分の拡がりと深さの関係を調べることにする。エネルギーの高い方から 2 種類のターゲット、Se、Zn を選択した。Se と Zn についてテール成分を次のような領域を排除することによって除いた。

- 波高値が Kα の 40%以下。
- σ が 0.9 ピクセル以上、1.3 ピクセル以下。

その結果、Se のデータでは最も深い位置で吸収されたイベントの深さが 29.6μm、Zn のデータでは最も深い位置で吸収されたイベントの深さが 29.3μm となり良く一致した。

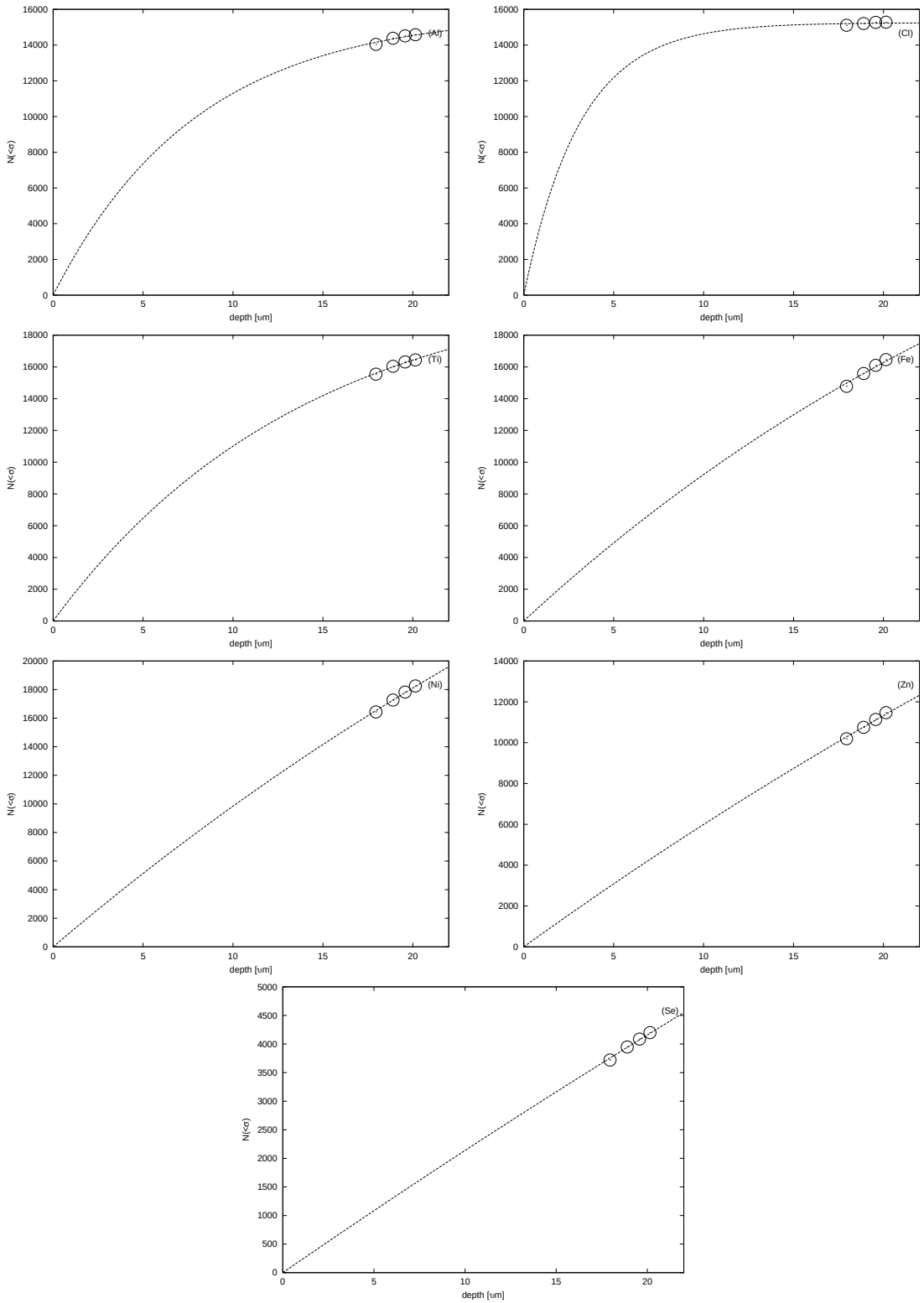


図 9.18: 各ターゲットの時の入射光子数のフィッティング結果 (Deep2)
縦軸は図 9.12 から求めたその深さでの拡がり (σ) より拡がりの小さなイベントの個数。

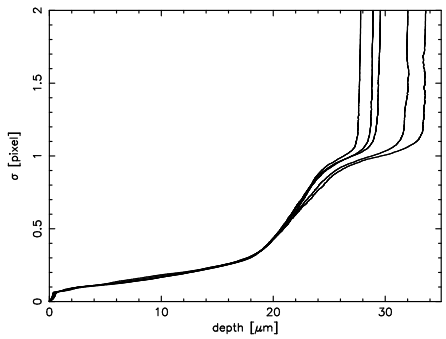


図 9.19: 各ターゲットを用いた時の拡がりと深さの関係 (Deep2)
深さの上限が浅いデータから順に、^{55}Fe、Fe、Ni、Zn、Se。
深さの上限がずれるのはイベント閾値 (図 9.5) にかかるイベントの個数が異なるためと考えられる。

9.5　イベントの拡がりの解析結果のまとめ

Deep1 と Deep2 で取られたデータをフィッティング法で解析した結果そのイベントの波高値 (PH) と拡がり (σ) 空間上での分布、PH-σ ダイアグラムに関して、以下のような描像が得られた。

- イベントの拡がりと深さは相関している。
- イベントは、図 9.20 のように空乏層、中性領域、中性領域の底のより深い部分の不純物の多い領域で吸収されたイベントに分類できる。
- 空乏層に比べて中性領域では深さに対するイベントの拡がりの変化量が大きくなっている。

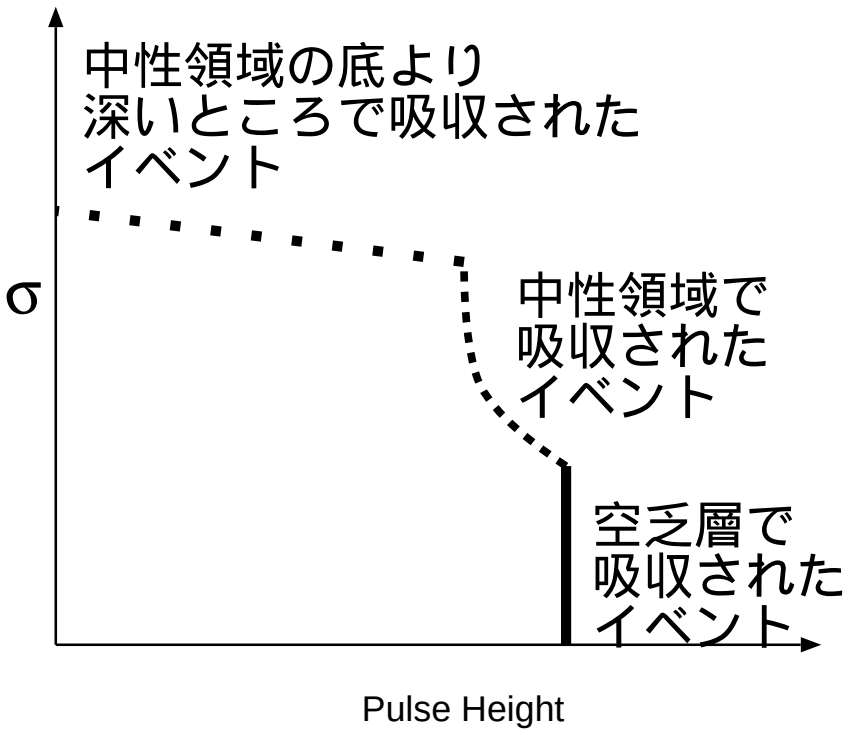


図 9.20: PH-σ ダイアグラム上でのイベントの分類

9.6　拡がりのモデルとの比較

CCD 内部で X 線が吸収されて作る電子群は、空乏層で吸収された場合には電場によりドリフトされ、電極表面に到達するまでに熱運動により拡散する。一方、中性領域で吸収された場合には、電場がかかっていないために拡散によって拡がり空乏層に到達すると電場により電極に引き寄せられる。この場合電極に到達するまでに時間がかかるので、より大きく拡がり、また電荷の一部を再結合によって失う。

9.6.1　空乏層で吸収されたイベント

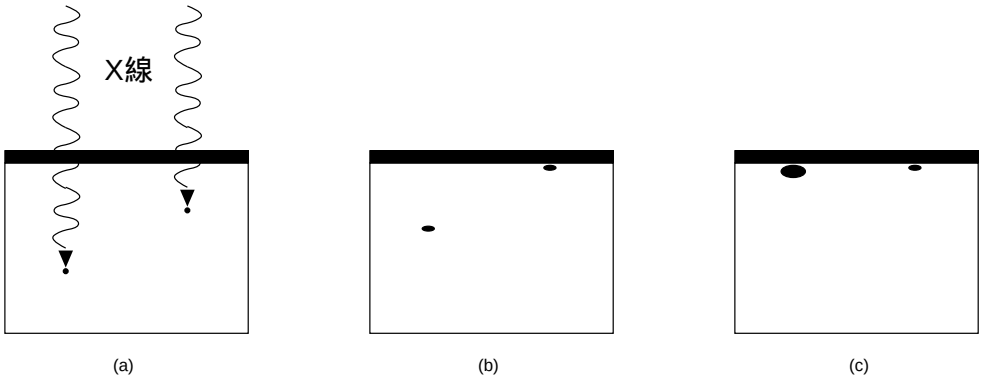


図 9.21: 空乏層で吸収されたイベントが拡散する様子
(a):X 線吸収時イベントの拡がりは小さい。
(b):浅いところで吸収されたイベントが電極に到達。2 つのイベントの拡がりは同じ。
(c):深いところで吸収されたイベントも電極に到達。

空乏層で吸収されたイベントは図 9.21 のようにドリフトされるとともに拡散によって拡がっていく。電極に到達するのにかかる時間 $t_{\rm drift}$ は空乏層厚さ x_d、アクセプタ濃度 $N_{\rm A}$、電子の移動度 μ_n の関数として

$$t_{\rm drift} = \frac{\epsilon}{q\mu_n N_{\rm A}} \log(\frac{x_d}{x_d - x}) \tag{9.2}$$

のように表せる。(2.10 式参照) アクセプタ濃度は Deep1、Deep2 でそれぞれ $2.5\times10^{14}[{\rm cm}^{-3}]$、$1.5\times10^{13}[{\rm cm}^{-3}]$ である。このような低不純物濃度では移動度を決定するのは格子散乱であり、200[K] で $\mu_n = 4.5 \times 10^3[{\rm cm}^2{\rm V}^{-1}{\rm s}]$ である [6]。この式では空乏層の底に近付くと値が発散してしまうが、これは拡散によって拡がる速度がドリフト速度に対して十分小さいという前提条件に合わなくなるため適用範囲外である。

同時に電子群は拡散により横方向へ拡がりをもつ。図 9.22 のように座標をとると

$$D\nabla^2\rho(r,x,t) = \frac{d}{dt}\rho(r,x,t) \tag{9.3}$$

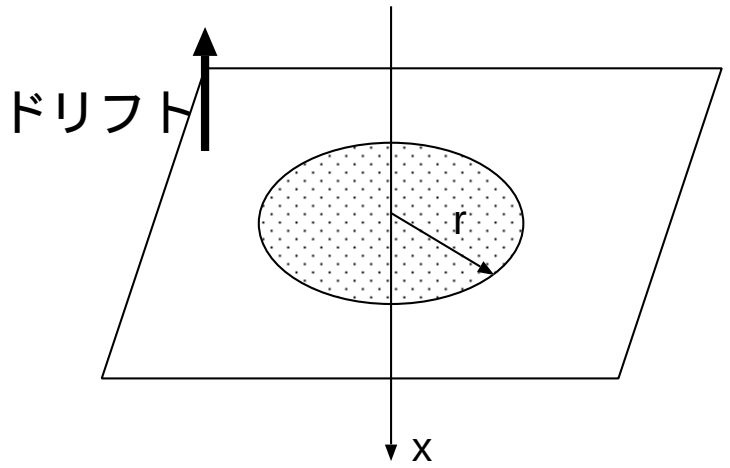


図 9.22: 拡散方程式の座標系

x 方向の運動を変数分離して

$$D\nabla^2 R(r,t) = \frac{d}{dt}R(r,t) \tag{9.4}$$

この特解は

$$R(r,t) = \frac{1}{4\pi Dt}\exp(-\frac{r^2}{4Dt}) \tag{9.5}$$

であり、これは t 秒後の電荷の分布が $\sigma = \sqrt{2Dt}$ の 2 次元対称ガウシアンであことを示す。(9.2) 式を用いて電極に到達した時の拡がり σ は X 線が吸収された深さ x の関数として

$$\sigma = \sqrt{2Dt} = \sqrt{2D\frac{\epsilon}{q\mu N_{\rm A}}\log(\frac{x_d}{x_d - x})} \tag{9.6}$$

のように表される。この式を用いて実際に得られたデータに対し不純物濃度と空乏層厚さをフリーパラメータとしてフィッティングを行なうことにした。まず、Deep2 のフラックスの良く定まっているコリメータ付き線源を使用したデータを用いた。フィッティングは σ の精度が悪くない σ =0.2 ピクセル以上また空乏層厚さよりも深い部分は適用範囲外なので深さ $15[\mu{\rm m}]$ 以下のデータに対して行なった。

フィッティングの結果から、空乏層厚さ $x_d = 16.4[\mu{\rm m}]$、アクセプタ濃度 $4.4\times10^{12}[{\rm cm}^{-3}]$ と求まった。このアクセプタ濃度は表 4.2 の値の 3 分の 1 である。しかし、全く違った方法で求められた値としては良く合っていると言えるだろう。また、$\sigma < 0.14$ ピクセルの部分で理論曲線とデータがずれているがこれは拡がりの小さいイベント、特にシングルピクセルイベントに対しては σ を大きめに見積もってしまう効果が現れているためである。電圧を変化したデータに対して同様のフィットを行なったところ、図 9.24 のような結果が得られた。この結果は、アクセプタ濃度は $4.0\pm0.4\times10^{12}[{\rm cm}^{-3}]$ であり、空乏層厚さは、電極電圧 0[V] で $14[\mu m]$ であったのが+8[V] まで電圧とともに増加して $18[\mu m]$ となったが、それ以上の電圧ではあまり増加が見られなかったということである。

一方、Deep1 のデータでは空乏層のイベントの拡がりがほぼ $\sigma < 0.15$ ピクセル以下であるためこのようなフィットを行なうことは出来なかった。

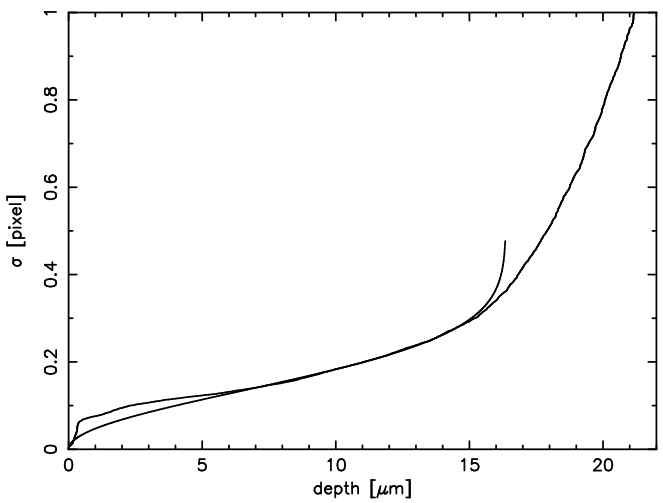


図 9.23: 空乏層のイベントの拡がりと深さの関係フィッティング結果 (Deep2)
理論曲線は、浅いところで σ が小さく、$16[\mu\mathrm{m}]$ 辺りで発散している。

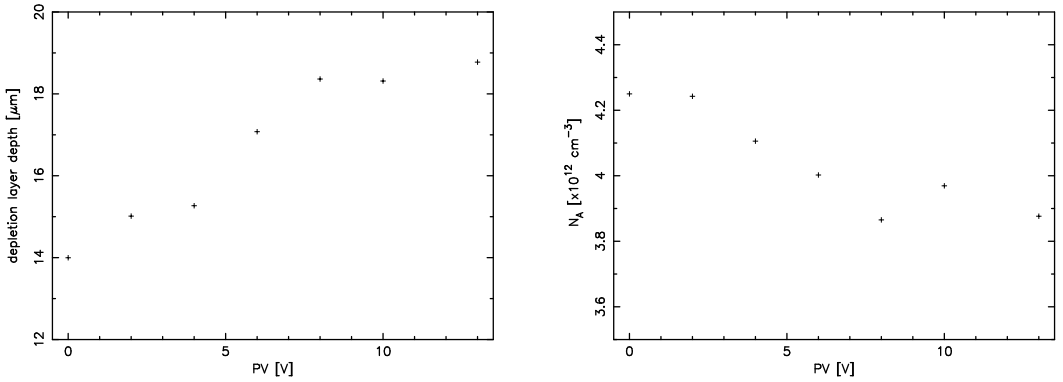


図 9.24: 各電圧での空乏層厚さとアクセプタ濃度フィット結果
横軸は電極の電圧、左:空乏層厚さ、右:アクセプタ濃度

tb

CCD	中性領域厚さ	底のイベントの電荷回収量
	x_n	$h(x_n)$
Deep1	10.1-4.5μm	97%
Deep2	29.5-18.3μm	83%

表 9.3: 電荷損失のパラメータ
空乏層厚さ、電荷損失量は ^{55}Fe の電極電圧+6[V] のデータから得られた値。
中性領域厚さは、表面から中性領域底までの厚さ − 空乏層厚さとして示した。

9.6.2 中性領域で吸収されたイベント

中性領域で吸収されたイベントは拡散によって拡がり空乏層に到達した電子はドリフトにより電極へ引き寄せられる。一方、中性領域の底である基盤との境界に到達した電子は、今回使用した CCD では基盤部分により多くアクセプタであるボロンがドープされている $(5 \times 10^{18}\mathrm{cm}^{-3})$ ためポテンシャルの障壁となり反射される。しかし、拡散によって空乏層に到達するのに時間がかかるため電子の寿命 $(\sim 10^{-6}\mathrm{s})$ が無視できなくなる。

拡散方程式

従って空乏層での拡散方程式に再結合の項を加え、

$$D\nabla^2\rho(r,x,t) - \frac{\rho}{\tau} = \frac{d}{dt}\rho(r,x,t) \tag{9.7}$$

のように表される。ここで、τ は中性領域での電子の寿命である。電子の寿命と拡散係数から拡散長 L は $L = \sqrt{D\tau}$ で与えられる。初期条件と境界条件は次の 3 つである。

$$\begin{cases} \text{初期条件} & \rho(r,x,0) = \rho_0\delta(x-x_0)\delta(r) \\ \text{空乏層との境界条件} & \rho(r,0,t) = 0 \\ \text{基盤との境界条件} & -D\frac{\partial\rho}{\partial x}(x=x_n) = 0 \end{cases} \tag{9.8}$$

空乏層との境界に到達する電荷量は、

$$h(x_0) = \frac{\cosh(\frac{x_n}{L} - x_0 L)}{cosh\frac{x_n}{L}} \tag{9.9}$$

とあらわされる。

電荷損失量の比較

実際のデータと比較するために、実験で得られた値と前節で出てきたパラメータの対比を表にまとめる。Deep1、Deep2 でそれぞれ $h(x_n), x_n$ の値を用いると、(9.9) 式より中性領域での電子の拡散長が求まる。$\frac{x_n}{L}$ は Deep1、Deep2 でそれぞれ、0.23、0.63 であり、従って拡散長 L はそれぞれ、24μm、18μm と求まる。アクセプタ濃度が $\sim 10^{14}\mathrm{cm}^{-3}$ 以下と低

CCD	x_n/L	拡散長 L (μm)	電子の寿命 τ_n s	不純物濃度 cm^{-3}
Deep1	0.23	24	7.7×10^{-8}	2×10^{15}
Deep2	0.63	18	4.3×10^{-8}	4×10^{15}

表 9.4: 中性領域中の電子の再結合に関するパラメータ

いので拡散係数 D は格子散乱によって支配されており $D = 75[\mathrm{cm}^2\mathrm{s}]$ である [6]。従って、電子の寿命 τ_n は Deep1、Deep2 でそれぞれ、7.7×10^{-8}s、4.3×10^{-8}s となる。電子の寿命は Au のような中間準位を作る不純物の濃度 N_t で決まり、Deep1、Deep2 での寿命はそれぞれ N_t が $2 \times 10^{15}\mathrm{cm}^{-3}$、$4 \times 10^{15}\mathrm{cm}^{-3}$ に対応する [6]。これらの結果を表 9.4 にまとめた。また、$h(x)$ より中性領域の深さに対しての電荷損失の量が求めることが出来、その結果を図 9.25 に示した。Deep1 に比べて、Deep2 で不純物濃度の値が大きなものとなった。これは、Deep2 の方がエピタキシャル層が厚く、行程に時間がかかるため行程中に基盤に含まれていた不純物が浸透していくためであると推測される。

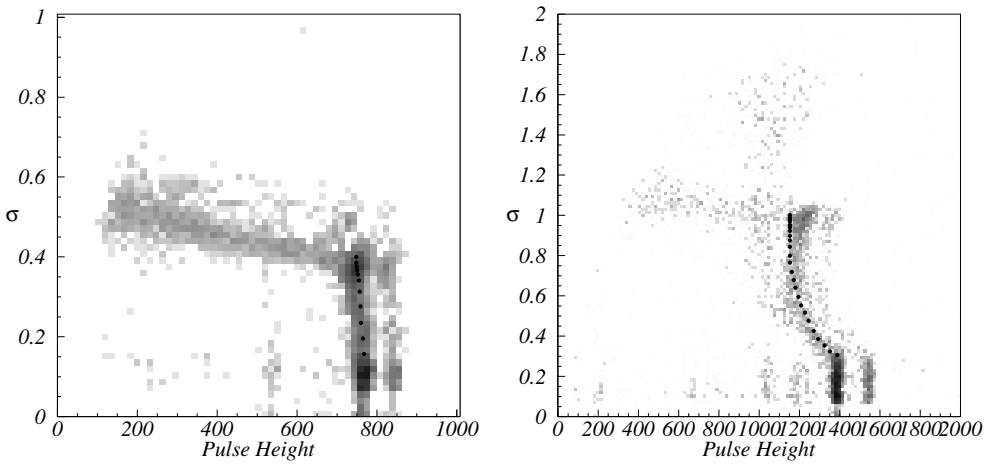


図 9.25: 電荷損失の計算値のプロット
電荷損失の量を (9.9) 式で見積もり深さ 0.5μm 毎にプロットした。
左:Deep1 ^{55}Fe のデータ、右:Deep2 Se のデータ

拡がり

中性領域で吸収されたイベントの拡がりは空乏層に到達した時の拡がりをさらに空乏層での拡がりでなましたものである。どちらも分布がガウス関数であると仮定すると拡がり σ_t は中性領域で拡がる大きさ σ_{ff} と空乏層で拡がる大きさ σ_{dl} に

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{ff}^2 + \sigma_{dl}^2} \tag{9.10}$$

CCD	σ_{max} (μm)	σ_d (μm)	x_n (μm)
Deep1	5.6	1.25×10^{-2}	5.6
Deep2	11.2	2.5×10^{-2}	11.2

表 9.5: 中性領域中のイベントの拡がりに関するパラメータ
ただし、中性領域の底で吸収されたイベントの拡がり σ_{max}、中性領域厚さ x_n、空乏層のイベントの拡がりの最大値 σ_d

のような関係が成り立つ。中性領域での拡散が縦方向と横方向でほぼ同じとすると、中性領域で吸収されたイベントの拡がり σ_{ff} は、中性領域での深さ x と空乏層で最も拡がったイベントの拡がり σ_d から

$$\sigma_{max} = \sqrt{\sigma_d^2 + x^2} \tag{9.11}$$

となるから中性領域の底で吸収されたイベントの拡がりは Deep1、Deep2 で表 9.5 のように計算される。このように中性領域の底で吸収されたイベントの拡がりの見積もりはほぼあっていた。しかし、中性領域の浅いところで吸収されたイベントの拡がりはこの計算よりも大きかった。これは、反射して戻ってくる成分が大きく拡がっており、その効果が無視できないためであろう。

9.6.3 中性領域より深いところで吸収されたイベント

中性領域の底より深い部分は、製造行程で基盤よりアクセプタや不純物が拡散している。従ってこの領域で吸収されたイベントは、

- アクセプタ濃度の勾配により、中性領域方向へドリフトされる。
- 不純物濃度が高いため再結合が速い。

ため、拡がりは大きく変化せず電荷を失うと考えられる。

第10章　まとめ

本論文はフィッティング法の性能を評価し、フィッティング法によりイベント吸収深さと拡がりの測定について述べたものである。以下に結果をまとめる。

- フィッティング法を従来の 60 倍高速化した。
- シミュレーションによりフィッティング法が求める波高値と拡がりの補正係数を求めた。
- 浜松ホトニクス社の CCD、Deep1 と Deep2 にさまざまなエネルギーの単色 X 線を照射した。
- 上のデータを用いてグレード法とフィッティング法の比較を行ない、

  1. フィッティング法は空乏層のイベントと中性領域のイベントを区別する能力に優れている。
     - 空乏層の薄い Deep1 では中性領域のイベントを排除できたことによりグレード法で見られたテール成分がフィッティング法ではなくなった。
     - Deep2 ではグレード法とほぼ同じ性能であった。
     - さらに空乏層の厚い CCD では空乏層のイベントがより拡がるため検出効率でフィッティング法が優勢になると考えられる。
  2. 一方、フィッティング法は特に拡がりの小さいイベントでノイズの影響を受けやすい。

  ということが判明した。
- フィッティング法で得られたイベントの波高値と拡がりの分布の形は X 線のエネルギーに依存していない、濃度は X 線の吸収断面積に依存して変化していた。
- フィッティング法で得られたイベントの拡がりと深さを対応させることにより X 線の吸収深さとイベントの拡がりの間の関係を求めた。
  - その関係からイベントを空乏層、中性領域、中性領域より深い部分で吸収されたものに分類した。
  - この関係から、電極電圧による空乏層厚さの変化を測定した。
  - 深さと拡がり、電荷損失の割合について簡単な計算を行なった。

付 録A　フィッティング法を用いた検出効率測定法

これまで CCD の検出効率を測定するには、予め検出効率のわかっている比例計数管のような他の検出器を用いて X 線源の強度を測定する必要があった。しかし、CCD で検出されたイベントの拡がりと X 線が吸収された深さが対応していることを利用すれば、エネルギーの異なった 2 種類の X 線のデータからそれら X 線源の強度を測定出来るようになる。以下にその方法について記す。

まず、2 種類の X 線を同じ CCD に照射したデータを用意する。今回は旧 XIS3[4] の Ni(7.47 keV) と Se(11.20 keV) の蛍光 X 線のデータをそれぞれ 50000 イベントづつ使用した。Ni、Se から 10000 イベントずつ取り出した PH-σ ダイアグラムは図 A.1 のようなものである。

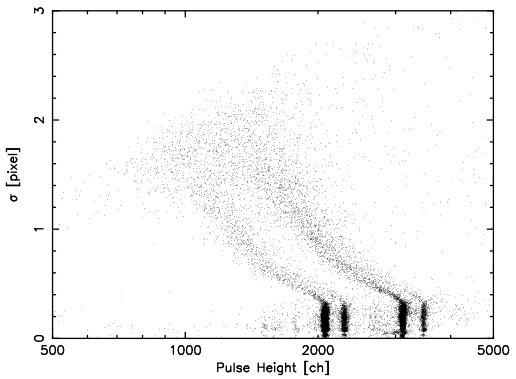


図 A.1: XIS の PH-σ ダイアグラム

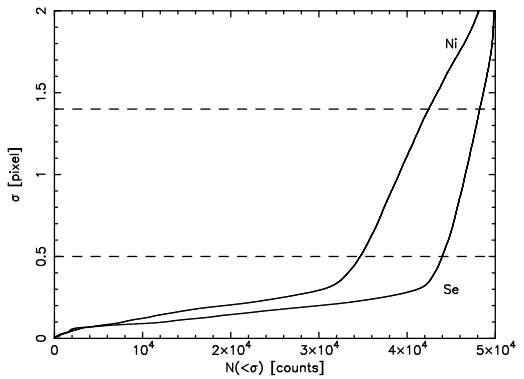


図 A.2: σ と σ 以下のカウント数 (XIS)

次に、Ni、Se のデータから横軸に拡がり σ、縦軸に拡がり σ 以下のイベントの個数 $N(<\sigma)$ のグラフを作成する。

適当な拡がり σ を 2 点選択してする。ここでは $\sigma = 0.5$ ピクセルと $\sigma = 1.4$ ピクセルを選択した。拡がりが σ ピクセル以下のイベントの数を $N_{Ni}(<\sigma)$、$N_{Se}(<\sigma)$、σ ピクセルに相当する深さを d_σ、Ni と Se の蛍光 X 線の Si 中の質量吸収係数をそれぞれ μ_{Ni}、μ_{Se}、Si の密度を ρ、Ni と Se の蛍光 X 線の入射数をそれぞれ N_{Ni}、N_{Se} とすると下の 4 つの関係式が成り立つ。

$$N_{Ni}(< 0.5) = N_{Ni} \times \exp(1 - \mu_{Ni}\rho d_{0.5}) \tag{A.1}$$

$$N_{Ni}(< 1.4) = N_{Ni} \times \exp(1 - \mu_{Ni}\rho d_{1.4}) \tag{A.2}$$

$$N_{Se}(< 0.5) = N_{Se} \times \exp(1 - \mu_{Se}\rho d_{0.5}) \tag{A.3}$$

$$N_{Se}(<1.4) = N_{Se} \times \exp(1 - \mu_{Ni}\rho d_{1.4}) \tag{A.4}$$

ここで未知数は、深さ $d_{0.5}$、$d_{1.4}$ と入射 X 線の数 N_{Ni}、N_{Se} の 4 つである。独立した式が 4 つで未知数が 4 つなので解が求まるはずである。未知数の中で $d_{1.4}$ 以外のものを消去すると、

$$\begin{aligned} & \mu_{Se}\rho \log(1 - \tfrac{N_{Ni}(<0.5)}{N_{Ni}(<1.4)}(1 - \exp(-\mu_{Ni}\rho d_{1.4}))) \\ = \quad & \mu_{Ni}\rho \log(1 - \tfrac{N_{Se}(<0.5)}{N_{Se}(<1.4)}(1 - \exp(-\mu_{Se}\rho d_{1.4}))) \end{aligned} \tag{A.5}$$

この関数に実際の値を代入して (左辺)−(右辺) をプロットしたものが図 A.3 である。図 A.3 より $d_{1.4} = 126[\mu\mathrm{m}]$ と求まり、これより N_{Se} や N_{Ni} も求めることが出来る。N_{Ni}、N_{Se} より作成した深さと拡がりの関係は図 A.4 であり、2 つの X 線で良く一致しており深さを正しく求められたと考えられる。図 A.4 より XIS の空乏層厚さは $\sim 90\mu\mathrm{m}$ と求まった。

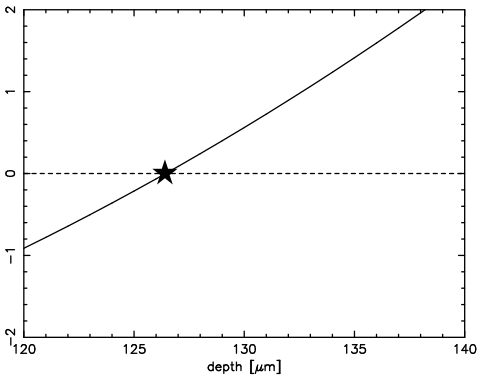


図 A.3: 深さの測定

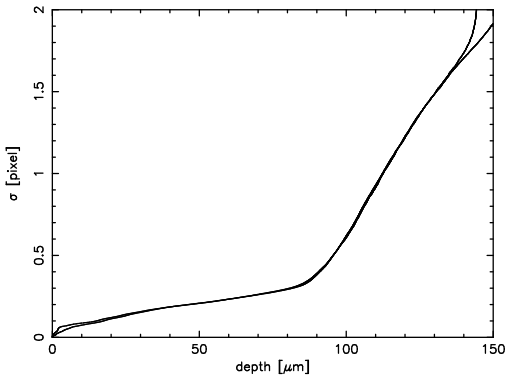


図 A.4: 深さとイベントの拡がりの関係

関連図書

[1] Hamaguchi K. et al. 2000, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 450, 360

[2] 西内 満美子, 修士論文 (京都大学 1998)

[3] 村上 弘志, 修士論文 (京都大学 1999)

[4] 今西 健介, 修士論文 (京都大学 2000)

[5] Janesick J. et al. 1986, Proc. SPIE, 597, 364

[6] Sze, S.M. 「半導体デバイス」 産業図書 1987

[7] Hopkinson G.R. 1983, Nuclear Instruments and Methods, 216, 423

[8] Ishisaki Y. 1999, DISPLAY45

[9] James F. MINUIT, CERN Program Library Long Writeup D506

謝辞

本論文作成にあたり、多くの方々に御指導、御協力を賜わりました。ここに感謝の意を表したいと思います。

指導教官の小山勝二教授には、実験やデータ解析の方法のみでなく、研究の進め方や研究者としてのあり方を教えていただきました。鶴剛助手には、基本的な実験器具の使い方に始まり、実験の進め方を御指導いただきました。

この研究は、戦略的基礎研究「画素の小さい X 線検出用 CCD の開発研究」のもとで可能になったものです。大阪大学の常深博教授には数多くの有用なコメントを頂きました。浜松ホトニクス社の山本晃永事業部長、宮口和久氏には CCD 素子に関するさまざまな質問に答えて頂きました。

実験において、本研究室の皆様にお世話になりました。今西健介さんには、深夜におよぶ実験にも御協力を頂き、数多くの有用なコメントを頂きました。同期の馬場彩さんには、自分の修士論文で忙しい中、議論の相手になって頂きさまざまなアイデアを頂きました。村上弘志さんには、フィッティング法に関する基本的なことから教えて頂きました。辻本匡弘さんには、CCD のデータ解析のソフトウェアの使い方から教えて頂きました。浜口健二さんが開発した蛍光 X 線発生装置を用いて質の良いデータを得られました。西内満美子さんには、遅くまで仕事をしていると出会ってしまうというプレッシャーをかけて仕事を切り上げるようにして頂きました。横川淳さんには、あすかデータ解析の基礎から教えて頂きました。植野優さん、千田篤さんには実験器具の移動など手伝って頂きました。片岡淳さんには、ADC が動かなくなった時にお世話になりました。本研究室の秘書の中小路有香さん、古守亜矢子さんには各種申請でお世話になりました。本研究室の赤外線、γ 線グループの方々にもさまざまなことを教えて頂きました。

また、本実験が行なえたのは本研究室の先輩の蓄積があったからこそです。なかでも、坂野正明さんの開発したソフトウェア、前田良知さんの作成した線源固定治具は非常に優れたものでした。

大阪大学、愛媛大学、宇宙研の CCD 実験グループの方々にもお世話になりました。

その他数多くのに支えられて論文を完成させることが出来ました。この場を借りてお礼申し上げます。