平成 9 年度 修士学位論文
JLC 実験用崩壊点検出器の開発のための
CCD 素子に関する研究

佐賀大学大学院 工学系研究科 物理学専攻
96SM15 国谷 俊夫

平成 10 年 2 月

目 次

第 1 章 序論 **7**

1.1 高エネルギー物理学と加速器 7

1.2 JLC 実験 9

1.3 JLC の測定器 11

1.4 CCD 崩壊点検出器 11

第 2 章 CCD(電荷結合) 素子 **13**

2.1 CCD(電荷結合) 素子 13

2.2 CCD 素子の構造 16

2.3 電荷の発生・収集・転送 19

2.4 Muliti Pinned Phase(MPP) 動作モード 19

2.5 浜松ホトニクス社製 CCD 21

2.6 EEV 社製 CCD 21

第 3 章 第 1 回ビームテスト (1997 年 6 月) **24**

3.1 実験目的 24

3.2 実験セットアップ 24

第 4 章 解析と考察 (1997 年 6 月) **28**

4.1 暗電流特性 28

4.1.1 ゼロレベル 28

4.1.2 暗電流の非一様性補正 28

4.1.3 暗電流の温度依存性 32

4.2 クラスタリング 34

4.3 シグナル・ノイズ比 34

4.3.1 ノイズ (N) 定義 34

4.3.2 温度相関 34

4.3.3 ビーム入射角依存性 34

4.4 アライメント 37

4.5 非検出効率 40

4.6 位置分解能 I 41

4.7 位置分解能 II (GEANT によるシミュレーション) 44

第 5 章 第 2 回ビームテスト (1998 年 1 月) **47**

5.1 実験目的とセットアップ 47

5.2 データ収集系 50

第 6 章　解析と考察 (1998 年 1 月) **51**
6.1 シグナル・ノイズ比 (浜松ホトニクス社製 CCD) 51
6.2 アライメント (浜松ホトニクス社製 CCD：有感層 10 μm) 55
6.3 非検出効率 (浜松ホトニクス社製 CCD：有感層 10 μm) 58
6.4 エネルギー分解能 (浜松ホトニクス社製 CCD：有感層 10 μm) 60
6.5 位置分解能 (浜松ホトニクス社製 CCD：有感層 10 μm) 61
6.6 暗電流特性 (EEV 社製 CCD) 68
6.7 シグナル・ノイズ比 (EEV 社製、浜松ホトニクス社製混合 RUN) 72
6.8 EEV 社製 CCD と浜松ホトニクス社製 CCD のクロック干渉 72

第 7 章　まとめ **78**
7.1 JLC 実験用崩壊点検出器 78
7.2 データ収集系 78
7.3 浜松ホトニクス社製 CCD 78
7.4 EEV 社製 CCD 79
7.5 結論・今後 79

付 録 A MPP 動作モード **80**
A.1 MPP 動作モード 80

付 録 B SRH モデル **81**
B.1 SRH モデル 81

付 録 C クラスター中心 **83**
C.1 クラスター中心 83

付 録 D データ収集系の実装 **86**
D.1 ビームテスト用データ収集系 86
D.2 VME ドライバ 86
D.3 UNIDAQ 86
D.4 collector 88
D.5 receiver 88
D.6 analyzer 88

図 目 次

1.1 力の大統一の可能性 8
1.2 JLC のデザイン 10
1.3 JLC に設置される検出器 11

2.1 電荷転送 (2 相式と 3 相式) 14
2.2 IT 方式 CCD 15
2.3 FIT 方式 CCD 15
2.4 FT 方式 CCD 16
2.5 FFT 方式 CCD 17
2.6 電極下のポテンシャル 17
2.7 2 相 FFT 型 CCD 素子の構造 18
2.8 ピクセルのフォーマット 19
2.9 電荷転送のシーケンス 20
2.10 浜松ホトニクス社製 CCD 素子 (S5466) 21
2.11 EEV 社製 CCD 素子 (CCD02-06) 22
2.12 EEV 社製 CCD 素子の effective 領域 22

3.1 第 1 回ビームテストでの検出器のセットアップ 25
3.2 第 1 回ビームテストのシステム構成 26

4.1 1 frame 分の暗電流のスペクトル 29
4.2 暗電流の非一様性を補正した後のノイズ分布 30
4.3 暗電流特性による回路ゲインと読みだしノイズの導出 31
4.4 ^{109}Cd のスペクトル 32
4.5 暗電流の温度依存性: 点は測定点、実線はフィットの結果 33
4.6 2×2、3×3 のクラスタリング法 35
4.7 $-15°C$ での S/N 比分布 35
4.8 $+5°C$ での S/N 比分布 36
4.9 S/N 比の温度依存性 (読みだし周期：1.3 秒) 36
4.10 S/N 比の温度依存性 (読みだし周期：4 秒) 37
4.11 ビーム入射角と S/N 比 38
4.12 発生電子数の path length 依存性 (上)、発生電子数を CCD1 で規格化 (下) 39
4.13 CCD1 と CCD2 の位置の相関 40
4.14 飛跡認識後の CCD3 のクラスター分布 41
4.15 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布 42
4.16 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布 42

4.17 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布 . . . 43
4.18 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布 . . . 43
4.19 位置分解能 . . . 44
4.20 フルシミュレーションのイベントディスプレイ . . . 45
4.21 フルシミュレーションから得られる多重散乱の分布 . . . 46

5.1 第 2 回ビームテストでの CCD の配置 . . . 48
5.2 第 2 回ビームテストでの検出器のセットアップ . . . 48
5.3 第 2 回ビームテストのシステム構成 . . . 49

6.1 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 10 μm、$-15°C$ での S/N 比分布 . . . 51
6.2 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 10 μm、$+5°C$ での S/N 比分布 . . . 52
6.3 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 50 μm、$-15°C$ での S/N 比分布 . . . 53
6.4 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 50 μm、$+5°C$ での S/N 比分布 . . . 54
6.5 X-Y のアライメント . . . 55
6.6 CCD の回転角 . . . 56
6.7 ビーム軸まわりの回転 . . . 57
6.8 Z 軸補正 . . . 58
6.9 CCD2 に存在する近接ヒット . . . 59
6.10 CCD2 に存在する近接ヒット (条件：CCD0 と CCD3 に 1 クラスターしかないとき) . . . 59
6.11 温度 −15 度：CCD2 エネルギー分布 . . . 60
6.12 温度 +5 度：CCD2 エネルギー分布 . . . 61
6.13 residual . . . 61
6.14 位置分解能 (2.0 GeV/c)：double gaussian でフィット . . . 62
6.15 クラスター総電荷量に対する local peak の電荷量の比 . . . 63
6.16 カット領域毎の residual 分布 . . . 64
6.17 それぞれのカット領域をエントリー数で規格化し、重ねて表示 . . . 65
6.18 位置分解能の入射粒子運動量依存性、面積で重みをつけた σ の平均を採用 . . . 66
6.19 位置分解能の入射粒子運動量依存性、分布の R.M.S. を採用 . . . 67
6.20 EEV 社製 CCD の暗電流のスペクトル . . . 68
6.21 EEV 社製 CCD の暗電流の温度依存性：点は測定点、実線はフィットの結果 . . . 69
6.22 暗電流の温度依存性：浜松ホトニクス社製と EEV 社製の比較 . . . 70
6.23 暗電流特性による回路ゲインと読みだしノイズの導出 . . . 71
6.24 CCD0(浜松ホトニクス社製) の S/N 分布 . . . 72
6.25 CCD1(浜松ホトニクス社製) の S/N 分布 . . . 73
6.26 CCD2(EEV 社製) の S/N 分布 . . . 74
6.27 浜松 CCD のみでのセットアップの場合 . . . 76
6.28 3 層目に EEV 社製 CCD を置いた場合 . . . 77

A.1 MPP 状態のピクセル . . . 80

C.1 重心法による粒子の入射角度 (縦軸) と位置分解能 (横軸) の相関 . . . 84
C.2 式 6.2 による粒子の入射角度 (縦軸) と位置分解能 (横軸) の相関 . . . 85

D.1 データ収集系構成 87
D.2 データフォーマット (1997 年 6 月版) 89
D.3 データフォーマット (1998 年 1 月版) 90
D.4 データフォーマット (1998 年 1 月版) : ヘッダ 91
D.5 データフォーマット (1998 年 1 月版) : 実験条件変数部 92
D.6 データフォーマット (1998 年 1 月版) : イベントデータ 93
D.7 ネットワークから送られるイベントデータのフォーマット (1998 年 1 月版) 94
D.8 dark frame ファイルのデータフォーマット (1998 年 1 月版) 95

表 目 次

1.1 JLC のパラメータ 10

2.1 浜松ホトニクス社製 CCD のパラメータ 21
2.2 浜松ホトニクス社製 CCD のピクセル構成 22
2.3 EEV 社製 CCD のパラメータ 23
2.4 EEV 社製 CCD 素子のピクセル構成 23

3.1 第 1 回ビームテストの測定条件 25
3.2 データ収集系構成 27

4.1 回路ゲインと読みだし ノイズ 30
4.2 X 線源による直接 calibration の結果から得られた回路ゲイン 31
4.3 各温度での非検出効率 44
4.4 各測定温度での位置分解能 45

5.1 第 2 回ビームテストの測定条件 47

6.1 CCD1 との相対的な回転角 (度) 56
6.2 非検出効率 60
6.3 エネルギー分解能の温度依存性 60
6.4 回路ゲインと読みだし ノイズ (EEV 社製) 69
6.5 回路ゲインと読みだし ノイズ (浜松ホトニクス社製のみでセットアップの場合) 75
6.6 回路ゲインと読みだし ノイズ (浜松ホトニクス社製と EEV 社製の混合セットアップの場合) 75

第1章　序論

1.1　高エネルギー物理学と加速器

電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を統一的に記述する標準模型は、LEP での精密実験を筆頭とする数多くの実験によって、その正しさが徹底的に検証され、未だその破れは見つからない。

しかし、長く標準模型の粒子スペクトラムに残されてきた二つの空席のうちトップクォークこそ近年 TEVATRON で発見されたものの、この模型の最も重要なメカニズムである自発的対称性の破れを担うヒッグス粒子は未だ発見されていない。また、標準模型は実験から決めなければならないパラメータを多く含んでいることから、より基本的な理論が存在すると考えられる。

もし、標準理論のゲージ対称性を単一のより大きなゲージ群に埋め込むことができれば、電弱相互作用と強い相互作用を統一できる。この種の理論は大統一理論 (GUT) と呼ばれている。しかし、標準理論を含む最小の GUT である $SU(5)$ 理論は hierarchy 問題とよばれる問題をかかえている。電弱相互作用の理論では粒子に質量を与えるためにヒッグスというスカラー粒子を導入し、その結果、自発的対称性の破れで質量のないボーズ粒子 (光子) と重いボーズ粒子 (W, Z) ができた。$SU(5)$ 対称性を破るためには $SU(2)$ のスケールの M_W 程度ではなく GUT スケール (M_X) のヒッグス粒子が必要となる。結果として、軽いヒッグス粒子は重いヒッグス粒子から輻射補正をうけて、ヒッグス粒子のみでなく、W、Z 粒子の質量も不安定になる。これを逃れるためには $M_W/M_X \simeq 10^{-13}$ の精度を持った見事な打ち消しの機構を考え出さねばならない。

この問題は、さらに新しい対称性 (超対称性) を加えることで解決される。超対称性はフェルミ粒子とボーズ粒子を同一粒子の異なる状態とみなすような対称性である。これを、標準理論に導入することで強い力、弱い力、電磁気力の 3 力を統一することに決定的な役割を果たしている。標準理論のゲージ対称性に対応する 3 つの結合定数 α_3 、α_2 、 α_1 の測定値からそれらの高エネルギーでの値を予測すると、標準理論のみでは力の統一が起こらなかったのに対して、超対称性を導入すると、 10^{16} GeV 付近で見事に一致する (図 1.1)。また標準理論では予言できなかったヒッグス粒子の質量が計算できるようになり、150 GeV 以下にそれが存在する可能性が高まっている。また、超対称性理論は 1 TeV 以下で超対称性粒子が存在する可能性も示している。

以上のような背景から、重心系のエネルギーが TeV 領域に達する電子・陽電子衝突型加速器の必要性が増大している。

現在、最大の電子・陽電子衝突型加速器は CERN の LEP である。重心系のエネルギーはアップグレードによって LEP-II では 200 GeV まであがると言われている。しかし、世界最大の加速器でも TeV 領域には到達することは難しい。その最大の要因は円形加速器特有のシンクロトロン放射によるエネルギー損失のためである。

一つの荷電粒子が円軌道を 1 周するときに放出するエネルギー U_{loss} は、

$$U_{loss} = \frac{4\pi}{3}\frac{r_e}{(m_0c^2)^3}\frac{E^4}{\rho} \tag{1.1}$$

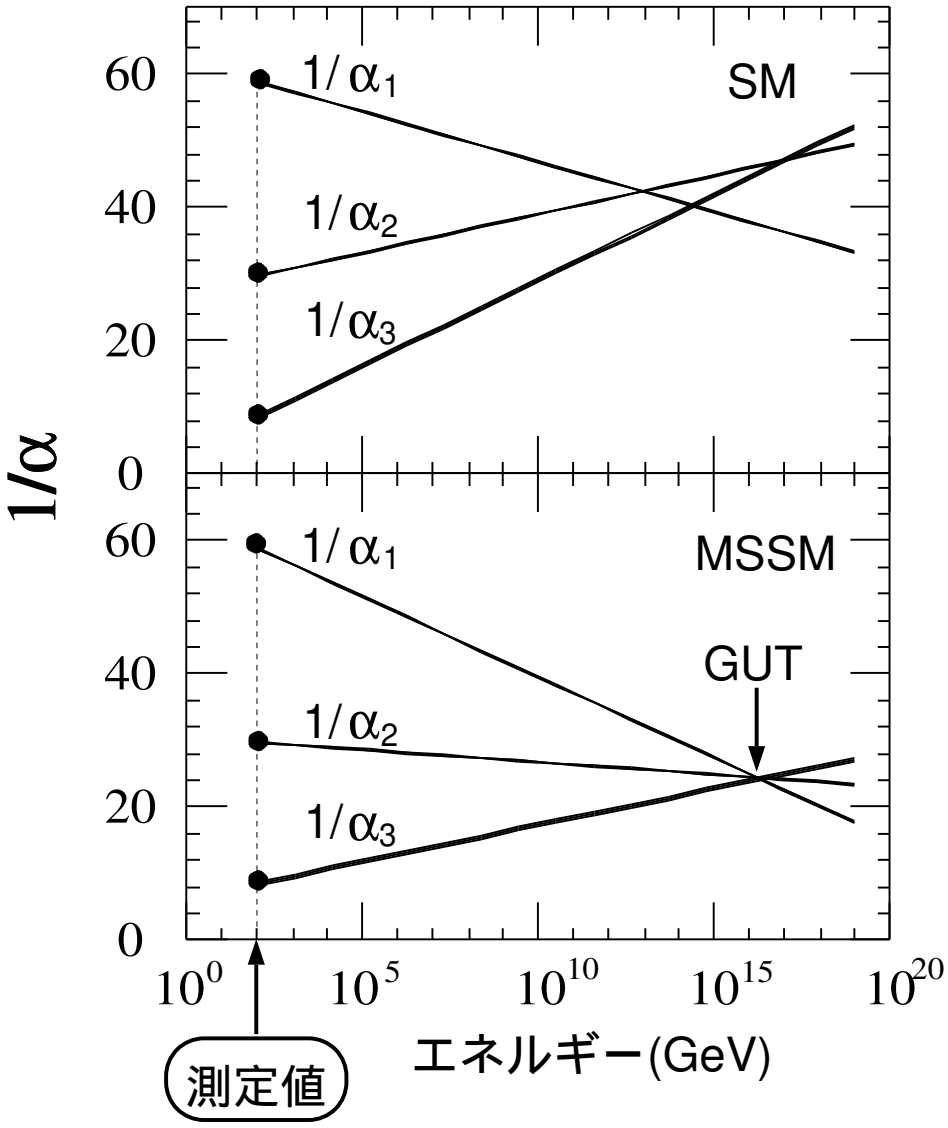


図 1.1: 力の大統一の可能性
(SM：Standard Model)、(MSSM：Minimal Supersymmetric Standard Model)

r_e ：古典電子半径
m_0 ：荷電粒子の質量
E ：荷電粒子のエネルギー
ρ ：曲率半径

で与えられる [4]。電子の場合について値を代入すると、

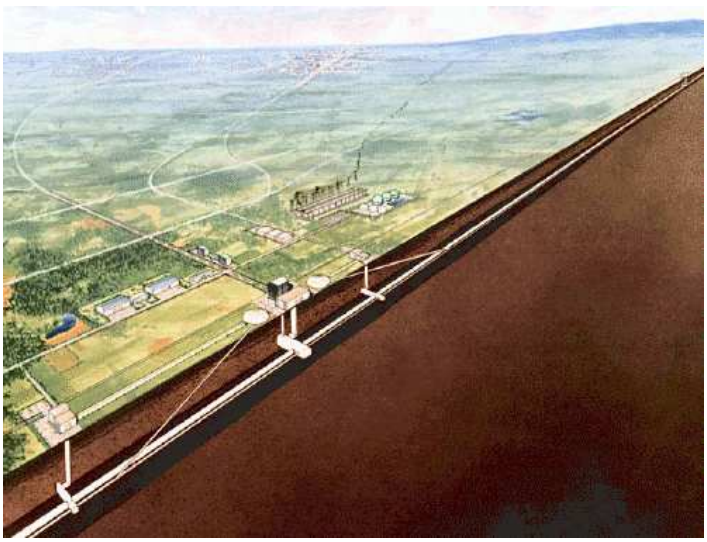
$$U_{loss} = 88.5\frac{E^4}{\rho} \tag{1.2}$$

となる。エネルギーを上げようとすると 4 乗の効果で損失が起こるが、リングの大きさを大きくしてもたかだか 1 乗でしか効いてこないため、極めて効率が悪い。建設費用と運転費用を考慮するならば、TeV 領域に達する電子・陽電子衝突型円形加速器の建設を実現することは極めて難しい。

このような円形加速器の弱点を克服できる装置として、線形加速器が挙げられる。加速部が直線なので原理的に、シンクロトロン放射が起こらない。日本においても先に述べた物理を睨んで、次世代線形加速器の建設を目指し JLC(Japan Linear Collider) 計画が進行中である。

1.2 JLC 実験

JLC 計画は、全長 30km にもおよぶ長大な e^+e^- 線形加速器 (図 1.2) の建設とそこでの素粒子実験である。JLC は、2 台の線形加速器を対向させ、電子と陽電子を加速し衝突させる新方式の衝突型加速器である。電子・陽電子ビームは直線上を加速されるので、原理的にはシンクロトロン放射によるエネルギー損失がない。実験開始後、全重心系エネルギーは最終的に TeV 領域を目指しており、その物理としては、TeV 領域のエネルギーフロンティアとしての、ヒッグス・超対称性といった新粒子探し、また、トップクォーク等、未だ性質が詳しく測定されていない既存物理の精密測定による新現象の探索等である。加速器に関するパラメータは表 1.1 に示す。



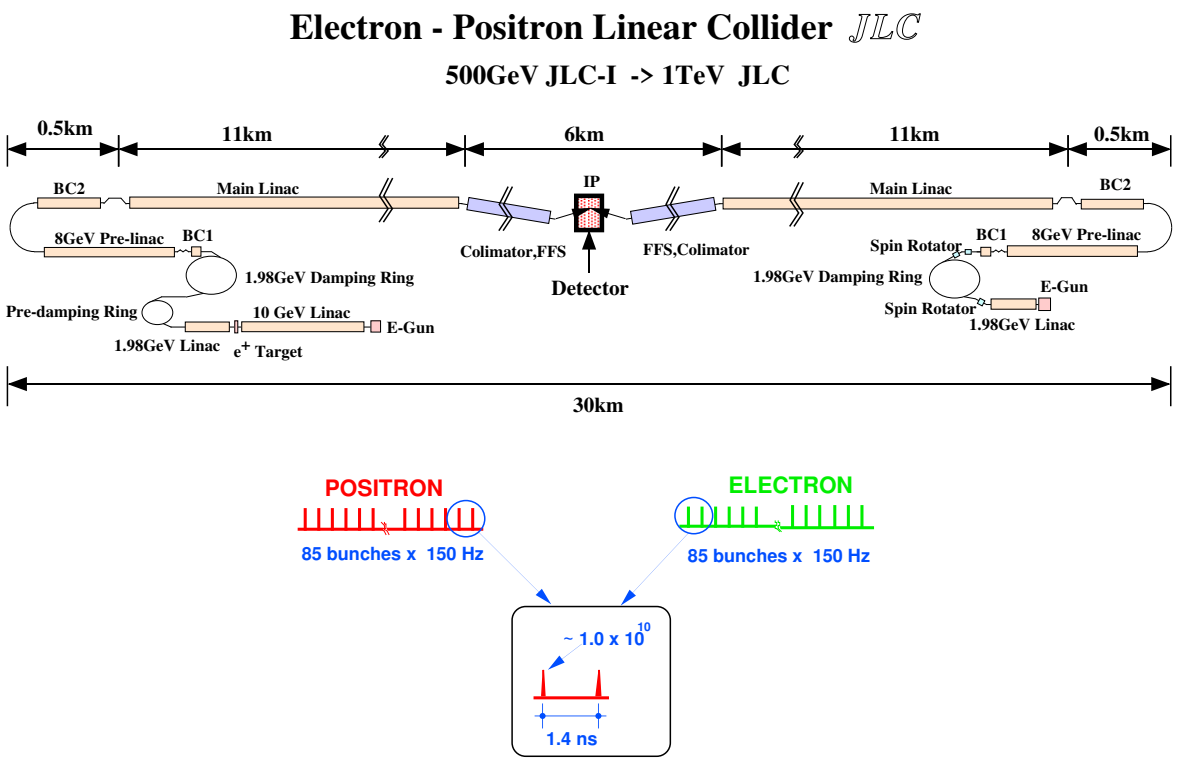


図 1.2: JLC のデザイン

パラメータ	JLC-I	最終アップグレード
重心系エネルギー	0.5 TeV	1.5 TeV
ルミノシティ	$5 \times 10^{33}/cm^2/s$	$10 \times 10^{33}/cm^2/s$
加速器全長	30 km	
加速電界強度	$20 \sim 40\ MV/m$	$120\ MV/m$
ビームの周波数	150 Hz	
ビームあたりのバンチ数	85 バンチ	
バンチあたりの粒子数	1×10^{10}個	3×10^{10}個
バンチ長	$80\ \mu m$	
加速器の電力	$< 200\ MW$	
衝突点での R.M.S. ビームサイズ		
水平方向	$\sim 300\ nm$	
鉛直方向	$\sim 3\ nm$	

表 1.1: JLC のパラメータ

1.3 JLC の測定器

JLC における電子陽電子衝突過程は全重心系エネルギーが反応の素過程に使用されるために、反応の終状態を基本粒子すなわちレプトン、クォーク、ゲージボソンの単位で明確にとらえることができるという特徴がある。確実な新粒子探索や精密測定ができるように、この加速器の潜在能力を 100 % 引き出せる高性能の測定器が必要である (図 1.3)。

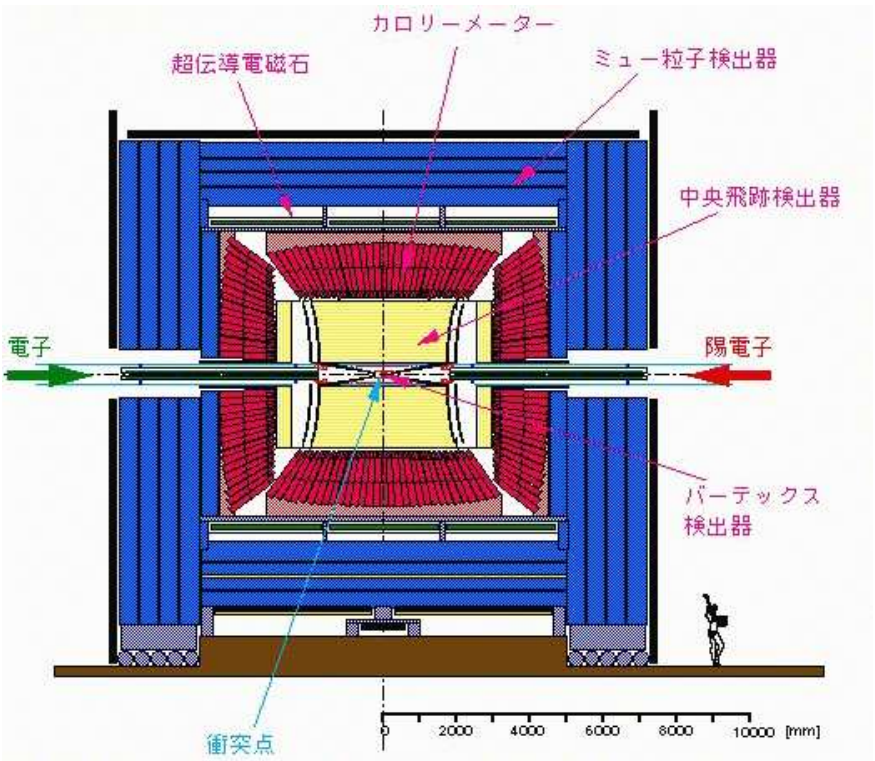


図 1.3: JLC に設置される検出器

1.4 CCD 崩壊点検出器

崩壊点検出器は JLC の検出器群のなかでも最もビームライン近傍に設置され、荷電粒子の飛跡を精密測定する。そうして得られた飛跡の情報からジェットの中の B 中間子や D 中間子の崩壊点を見つけ出すことによって、そのジェットが b クォークや c クォークから発生した事を識別することができる。JLC において最も注目しているヒッグスやトップクォークは主に b クォークに崩壊するため、崩壊点検出器は、バックグラウンドから本物の事象を選び出す際に決定的かつ重要な役割を果たす。従って、重いクォークを効率良くとらえ、かつ軽いクォークを効率良く排除できるだけの十分に高い位置分解能を要求される。また、崩壊点検出器は荷電粒子の運動量測定において、崩壊点検出器の外側に存在する中央飛跡検出器に対し位置情報を提供した場合、約 2 倍の運動量分解能の向上が期待されている。

従来の加速器実験に採用されてきた崩壊点検出器はシリコンストリップ検出器である。これは単体では 1 次元の位置情報しか与えないため、向きをかえて数層に重ね合わせたうえ、複雑なイベント再構成のアルゴリズムを用いてようやく位置情報を取得してきた。JLC 実験では、重心系のエネルギーが高いために、

ジェットは強くコリメートされる。また、衝突点近傍ではビーム・ビーム相互作用によって生じる低エネルギーの電子・陽電子のバックグラウンドも多い。したがって、そのため崩壊点検出器では測定される粒子の密度が非常に高いものとなる。このような状態を考慮すると、ストリップ型半導体検出器では 2 次元平面内での通過位置の特定をすることは非常に困難である。従って、ピクセル型の検出器が要求される。

我々は、CCD 素子 (Charge Coupled Device:電荷結合素子) を JLC 用崩壊点検出器として応用することに注目している。この場合、以下のような利点がある。

- すべてのヒットの曖昧の無い 2 次元情報が得られる。

  CCD はヒットの情報がすでに 2 次元であるために、荷電粒子の通過位置を見つけやすく再構成を行いやすい。シリコンストリップ型検出器の場合、位置情報はあくまで 1 次元であり、複数の検出器からの情報をもとにイベントの再構成をしなければならないため複雑である。

- 高い位置分解能

  有感単位が小さいために、高い位置分解能が得られる。

- 近接粒子の完全な分離ができる

  シリコンストリップ検出器で 1 本のストリップがカバーしている領域を約 10000 ピクセルでカバーしているため。

- HIGH HIT DENSITY を許容する

  非常に多くのピクセルで構成されるためビーム衝突点近くに設置できる。

- 物理的に薄い

  多重散乱が起こりにくい。

現在、CCD が用いられている唯一の例である SLD/VXD3-CCD 崩壊点検出器 (SLAC) は低温下 (約 $-50°C$) で運転されているが、冷却の際、検出器自体が熱膨張率の違う物質で構成されているため、常温から低温へ冷やすとそり返るといった問題が持ち上がっていた。これは製作時と運転時の温度差を小さくすることで解決できる。また、JLC ではビームモニタ系との干渉を避けるために冷却用の構造物を小型化しなければならない。以上から我々は CCD を常温近く ($0°C$ 付近) で動作させることを目指している。

しかし、$0°C$ という比較的高い温度での使用は、暗電流の増加により熱雑音が増え、シグナル・ノイズ比 (S/N 比) が悪化すると予想される。実際 VXD3 が低温下で運転されている根拠がここにある。[1]

本研究では、崩壊点検出器の現実的な設計を目指し、CCD 素子の $0°C$ 付近における暗電流特性の解析と、KEK-PS で行われたビームテストのデータをもとに、$0°C$ 付近での最小イオン化粒子 (以下 MIP と略す) の検出を行った。

[1] S/N 比の問題だけではなく、放射線損傷耐性を持たせるためにも低温下での運転が必要であった。

第2章　CCD(電荷結合)素子

2.1　CCD(電荷結合)素子

CCD 素子 (Charge Coupled Device:電荷結合素子) は 1970 年に AT & T ベル研究所で考案されたデバイスである。CCD 素子は電荷転送デバイスの一種であり、ポテンシャルの井戸を利用して半導体中を電荷を転送するデバイスである。

ポテンシャルの井戸は、複数の MOS 構造の電極の 1 つに、他と異なる電圧を加えることによりその電極下を部分的に異なるポテンシャルにすることで実現できる。電極への電圧の加え方には代表的なもので以下のものがある (図 2.1)。

- 2 相方式

  電荷転送に用いるパルスが 2 種類必要である。さらに、各電極下のシリコン内部の電場に構造を持たせる。これは、n シリコン中に p シリコン帯を置くことで実現できる。これによって、すべての電極の電位が等しいときでもピクセル内にポテンシャル井戸を保つことが出来る。

- 3 相方式

  電荷転送に用いるパルスが 3 種類必要であるが、最も基本的な方式である。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、後方の井戸より深い。

実用化されている CCD 素子は電荷転送方式により以下の 4 種類に分類される。これらは近年、Full Frame Transfer 方式を除いて汎用のビデオカメラ等に利用されている。

- Interline Transfer(IT) 方式

  IT 方式 (図 2.2) では、1 次元の撮像用の領域と遮光された転送用の領域が並行に並んでいる。撮像用のデバイスには、暗電流の少ないフォトダイオードを使う事が多い。1 frame の露出が終ると、撮像領域で得た信号電荷は隣り合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。しかし、一般に遮光はうすいアルミニウムなので、X 線のカットは出来ない。また、有効面積が小さい、加工が難しいなどの欠点を持っている。また、垂直シフトレジスタから水平シフトレジスタへ転送している最中に蓄積動作を行うので、垂直レジスタへ信号が洩れ込む現象が発生しやすい。

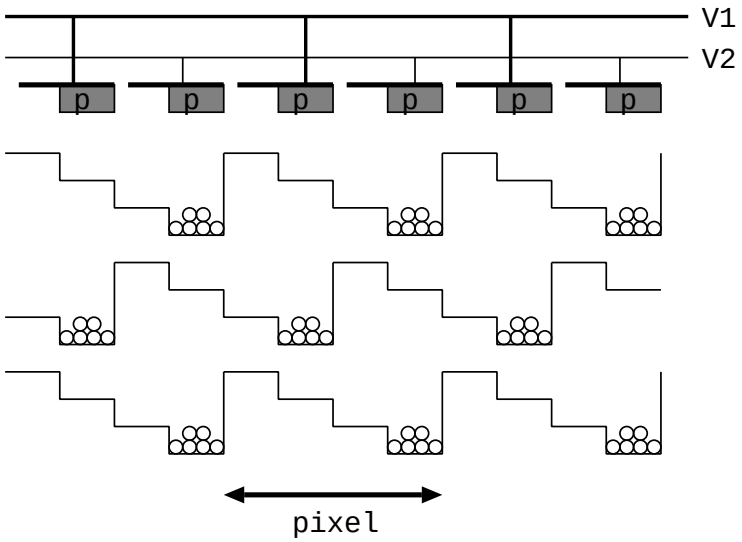
- Frame Interline Transfer(FIT) 方式

  IT 方式の問題点を改善するために考案されたデバイスである (図 2.3)。IT 方式に蓄積部を設けた構成になっている。読み出す信号は、一旦蓄積領域へ置かれるので、フォトダイオードが蓄積動作中に洩れ出る電荷の影響を抑えることが出来る。

- Frame Transfer(FT) 方式

  FT 方式 (図 2.4) は、撮像用の 2 次元領域と遮光された蓄積用の 2 次元領域が隣り合って並んでいる。遮光には比較的厚い金属を用いることが出来るので、例えば蓄積領域に入射する X 線をカットするこ

2phase



3phase

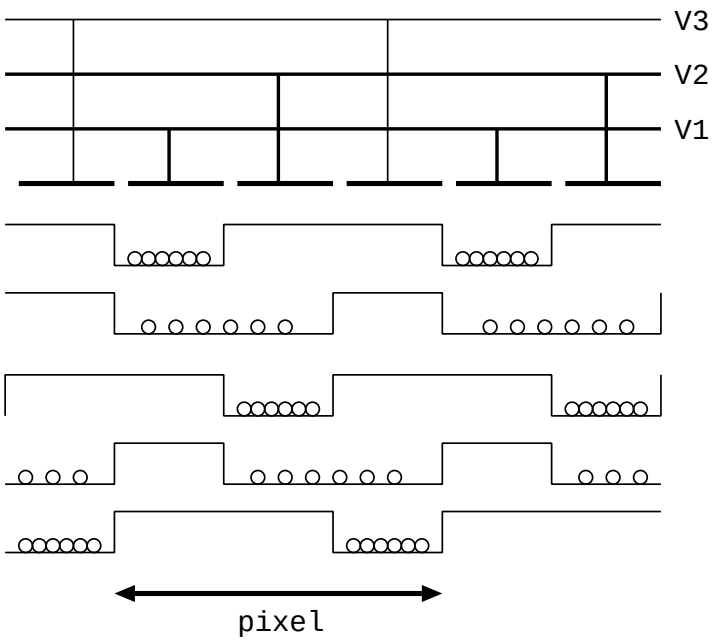


図 2.1: 電荷転送 (2 相式と 3 相式)

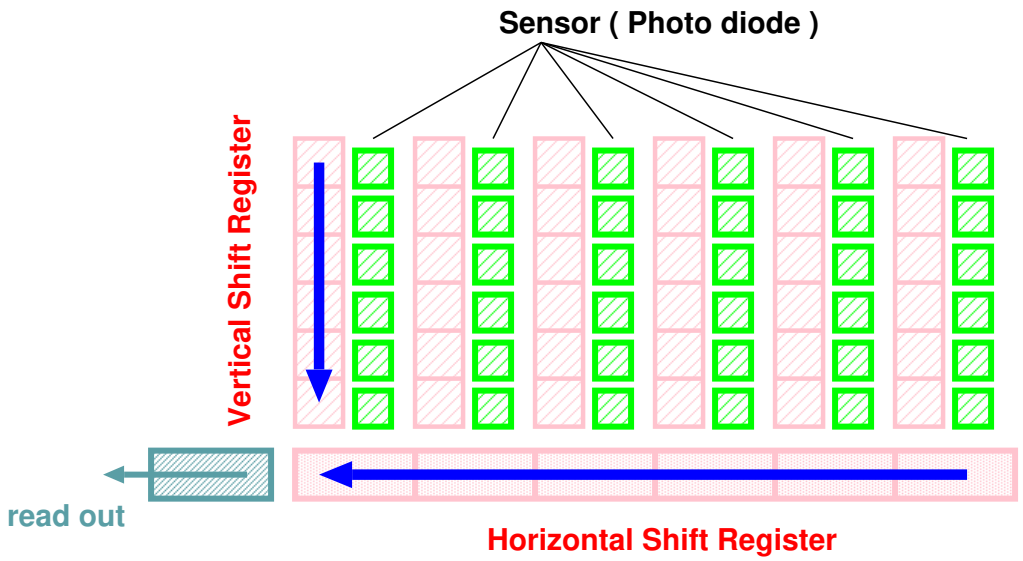


図 2.2: IT 方式 CCD

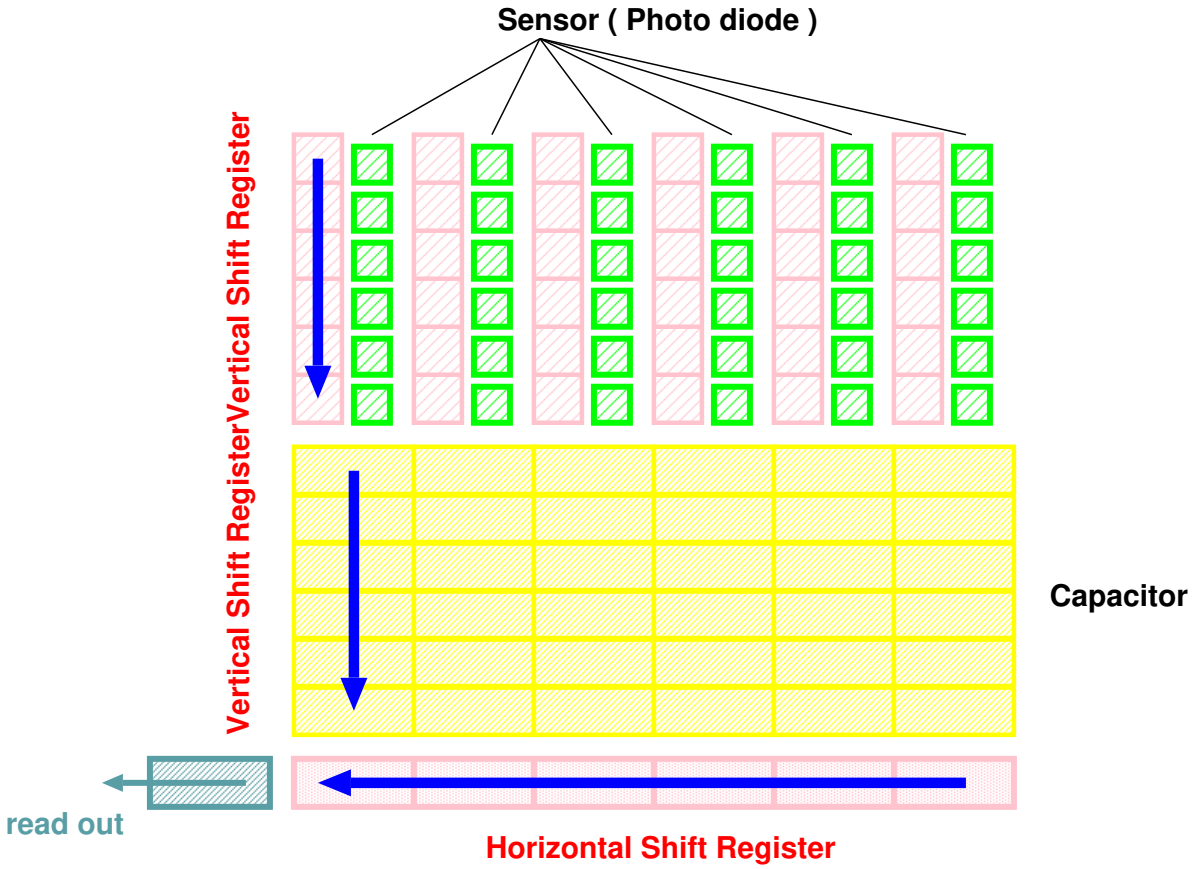


図 2.3: FIT 方式 CCD

とはできる。撮像領域で蓄積された信号電荷は一旦蓄積領域に frame ごと転送される。そして、撮像領域が蓄積動作中に蓄積領域の信号が読み出される。

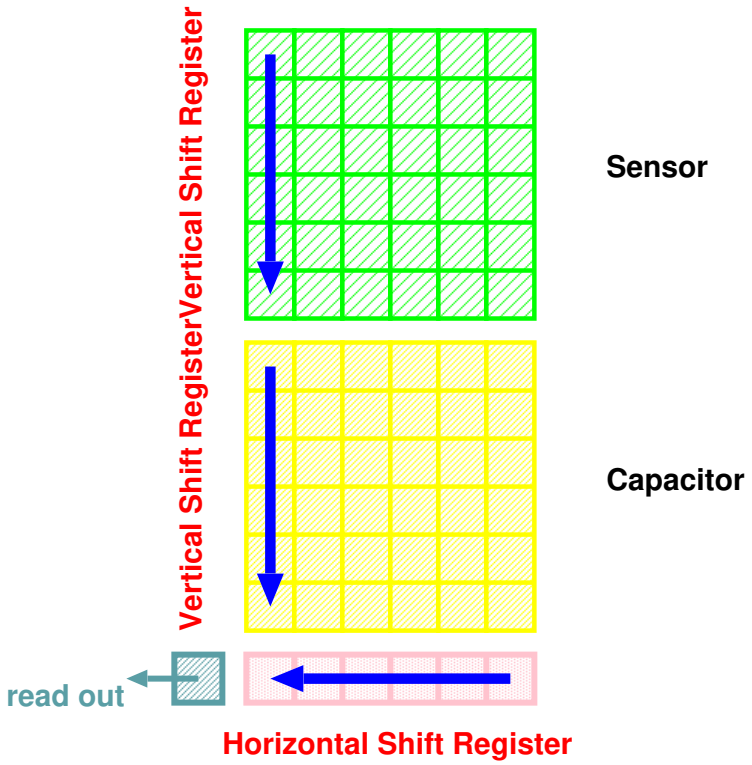


図 2.4: FT 方式 CCD

- Full Frame Transfer(FFT) 方式

  FT 方式から蓄積領域を外した構成になっている (図 2.5)。したがって、常に露光状態であり、このためビデオカメラに応用することは難しいが、前に挙げた 3 種類と比較して、同一サイズの CCD 素子で最も画素数を多くできるといった特徴がある。主として科学計測用途に利用されている。電荷の転送方法は FT 方式の蓄積領域と同じである。我々が本研究で使用した CCD 素子はこのタイプである。以後、CCD 素子とは、この FFT 方式の CCD 素子を指す。

2.2 CCD 素子の構造

2 相 FFT 型 CCD 素子の構造の一部分を図 2.7 に示す。

外部から入射した荷電粒子がシリコン中を通過すると、入射粒子は電磁相互作用でエネルギー損失を受け、平均 3.6 keV で 1 対の電子・ホール対を発生させる。

Polysillicon gate に正電圧、n 型シリコン層に負電圧を印加することにより、n 型と p^- 型の間に空乏層が広がる (図 2.6)。一方、p^-、p^+ 境界領域にはバリア層と呼ばれる領域が発生している。

バイアス電圧のほとんどが空乏層にかかるため、強い電場が発生している。バリア層では、ドープの割合が異なるために、p^-、p^+ 境界において電子が得るエネルギーよりも大きなポテンシャル差が生まれており、このため発生した電子は p^+ 領域へは進めない。以上から、有感層で発生した電子はこの領域から逃れることが出来ずにポテンシャル井戸の深いところから占有していく。

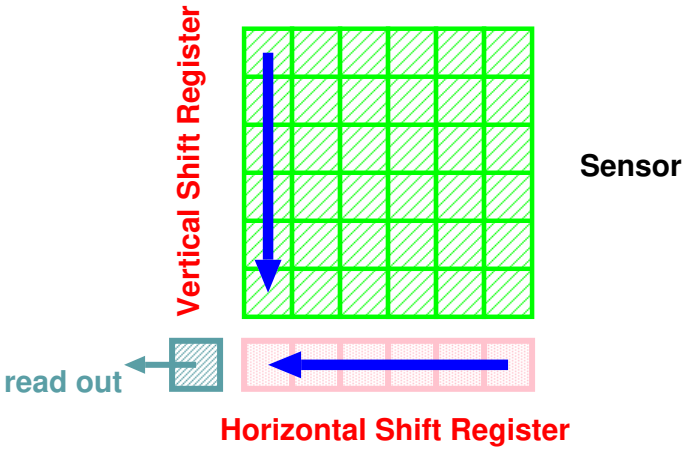


図 2.5: FFT 方式 CCD

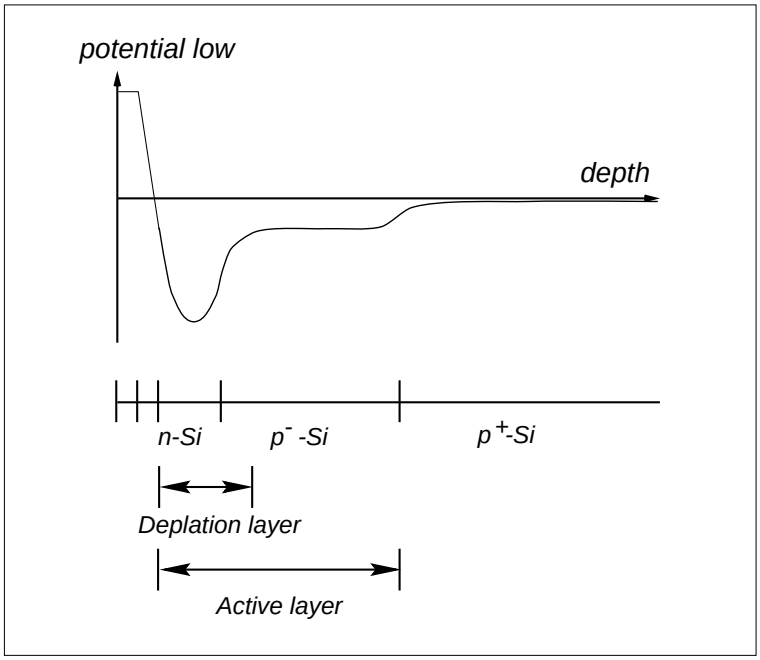


図 2.6: 電極下のポテンシャル

シリコン内では、垂直方向は複数の駆動電圧によりつくられる電位差、そして水平方向は、n 型シリコンに埋め込まれた p 型シリコン (channel stop) がポテンシャルの差をつくり、ピクセルを形成している。これにより、発生した電荷を各ピクセル下に蓄積することが可能である。

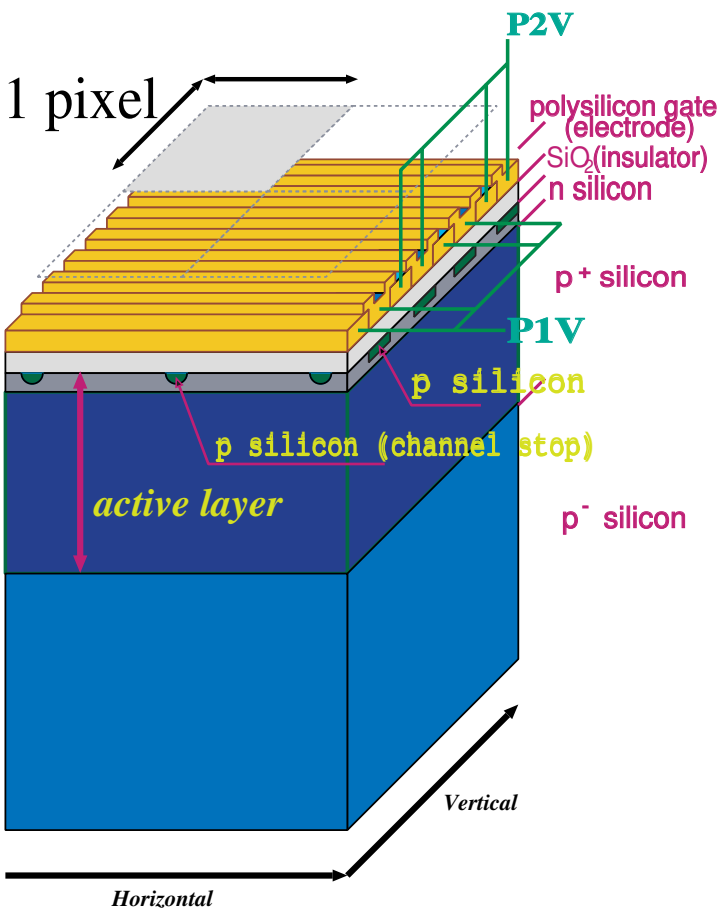


図 2.7: 2 相 FFT 型 CCD 素子の構造

CCD 素子のピクセルは性質により次のように分類される。

- inactive (または blank)

  実際にはピクセルが存在しない領域。

- brack reference (または dark reference)

  ピクセルは存在するが、画素が単純に遮光されている領域。

- effective

  データとして利用できる領域。

- isolation (または transition elements)

  black reference と effective な領域との境の領域。境界を決めるのは難しいので、データとして利用しない方がよい領域。

inactive、brack reference、isolation は、垂直方向と水平方向の effective 領域をはさんで前後に定義できる (図 2.8)。我々が使用した CCD のピクセル構成に関するパラメータは後の節で示す。

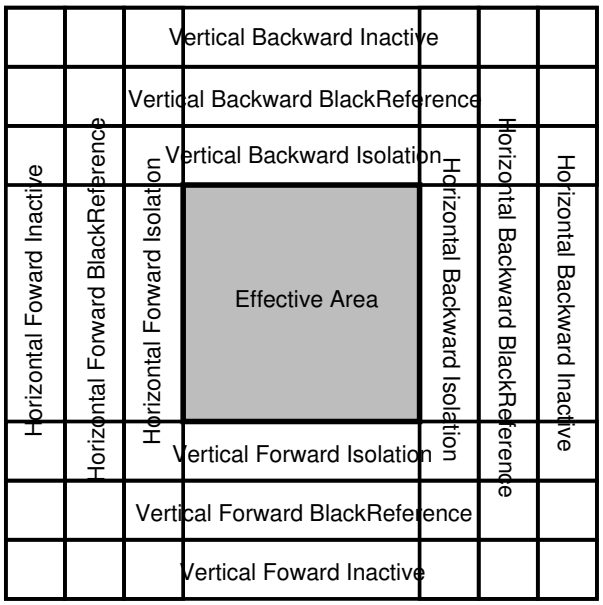


図 2.8: ピクセルのフォーマット

2.3 電荷の発生・収集・転送

5×5 のフルフレームトランスファー型 CCD の電荷転送を図 2.9 に示す。

シフトレジスタによって転送された信号電荷は、最終的に出力部において信号電荷に対応した電圧に変換されて出力する。

CCD の電荷検出の方式として最も広く使用されている方式に FDA (Floating Diffusion Amplifier) がある。FDA は、電荷を検出するノードに対して 1 組の電荷リセット用 MOSFET と電荷変換用 MOSFET により構成され、検出用ノードに転送された電荷は電荷電圧変換用 MOSFET で

$$V = \frac{Q}{C} \tag{2.1}$$

の関係により電荷から電圧に変換される。次のピクセル信号を読む際には、検出ノードは一旦リセット用 MOSFET によりリファレンスレベルにリセットされる。

2.4 Muliti Pinned Phase(MPP) 動作モード

MPP 動作 (付録 A 参照) とは、暗電流の主な要因となる界面での表面準位による熱励起を抑えるための駆動方式である。そのため、常温駆動を可能にする有力な手段となる。本研究で使用されている、浜松ホトニクス社製 CCD 素子や、EEV 社製 CCD 素子もこの駆動方式に対応している[1]。

[1]EEV 社は MPP 動作モードを”Inverted Mode Operation(IMO)” と呼んでいる。

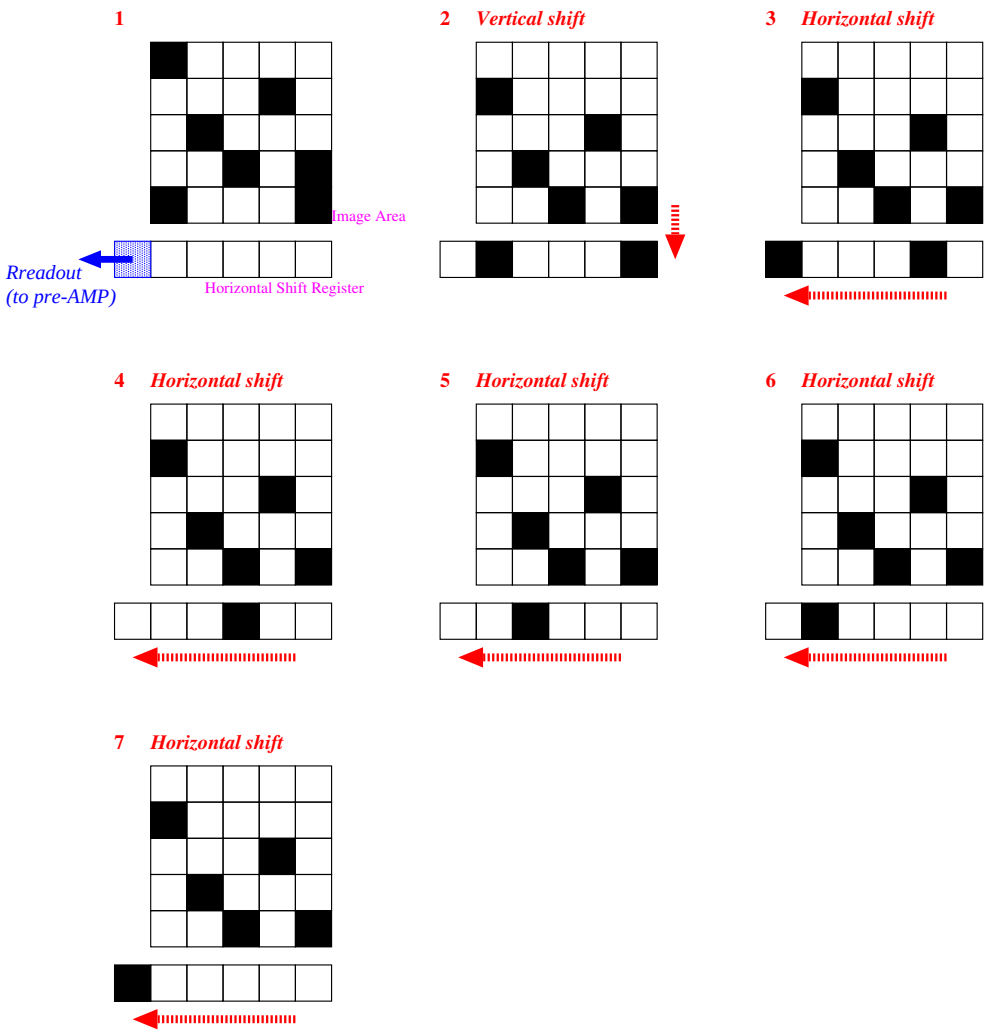


図 2.9: 電荷転送のシーケンス

CCD 型名	有効画素数 $pixel(H) \times pixel(V)$	画素サイズ $\mu m \times \mu m$	有感層の厚さ μm	駆動回路
S5466	512×512	24×24	10	C5934-1010
S5466(特注品)	512×512	24×24	50	C5934-0909

表 2.1: 浜松ホトニクス社製 CCD のパラメータ

2.5 浜松ホトニクス社製 CCD

浜松ホトニクス社製 CCD に関するパラメータを表 2.1 に、また、ピクセル構成を表 2.2 に示す。

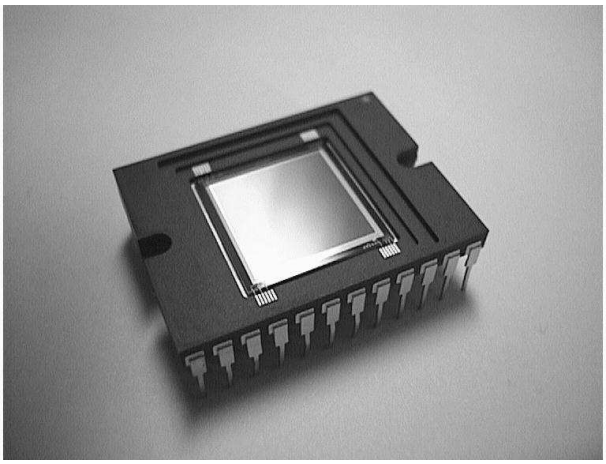


図 2.10: 浜松ホトニクス社製 CCD 素子 (S5466)

2.6 EEV 社製 CCD

EEV 社製 CCD 素子に関するパラメータを表 2.3 に、また、ピクセル構成を図 2.12、表 2.4 に示す。EEV 社製の CCD 素子は図 2.12 のように、effective な領域はさらに 2 つの領域に分けられている。読みだし口に近いほうを section A、もう他方を section B と定義する。

Horizontal	Forward	Inactive	4
		Black Reference	4
		Isolation	4
		Effective	512
	Backward	Isolation	4
		Black Reference	0
		Inactive	4
Vertical	Forward	Inactive	0
		Black Reference	0
		Isolation	4
		Effective	512
	Backward	Isolation	4
		Black Reference	0
		Inactive	0

表 2.2: 浜松ホトニクス社製 CCD のピクセル構成

図 2.11: EEV 社製 CCD 素子 (CCD02-06)

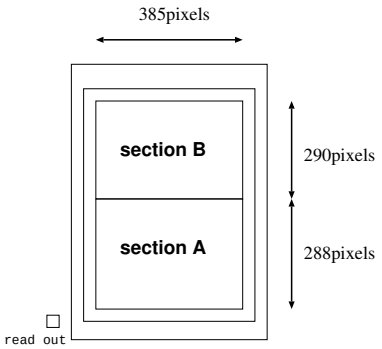


図 2.12: EEV 社製 CCD 素子の effective 領域

型名	有効画素数	画素サイズ	有感層の厚さ
	$pixel(H) \times pixel(V)$	$\mu m \times \mu m$	μm
CCD02-06	385×578	22×22	20

表 2.3: EEV 社製 CCD のパラメータ

Horizontal	Forward	Inactive	4
		Black Reference	4
		Isolation	1
		Effective	385
	Backward	Isolation	1
		Black Reference	4
		Inactive	6
Vertical	Forward	Inactive	0
		Black Reference	0
		Isolation	0
		Effective	578
	Backward	Isolation	0
		Black Reference	0
		Inactive	0

表 2.4: EEV 社製 CCD 素子のピクセル構成

第3章　第1回ビームテスト (1997年6月)

3.1　実験目的

最近行われたラボレベルのテスト [8] により、MPP 動作モード下での浜松ホトニクス社製 CCD が、十分低い暗電流特性を持ち、MIP 検出も高いシグナル・ノイズ比 (S/N 比) で行える可能性が高いことがわかっている。しかし、温度 $0°C$ 付近において実際に高エネルギービームを照射して MIP 検出を実証した例はこれまでのところ全くない。

この実験の目的は、

- 常温付近に温度が設定された CCD 素子の暗電流特性を詳しく解析する。
- 実際に高エネルギービームを照射して、MIP が検出できる事を実証する。
- 飛跡認識を行い、検出効率や位置分解能の評価を行う。

である。実験は KEK-PS T1 ビームラインで行われた。

3.2　実験セットアップ

3 つの CCD 検出器を平行に並べ相対的な位置を固定した。ビームの上流側から CCD1、CCD2、CCD3 と名付けた (図 3.1、図 3.2)。2 層目に置かれた検出器は有感層の厚さが他の 2 つよりも厚い (表 3.1)。3 つの CCD 検出器を恒温槽に設置し、温度をコントロールした。CCD は 4 秒周期でビームの照射をうけるが、1 つのビーム束にどれくらいの荷電粒子が含まれているかをモニタするため、CCD の直前に PMT とプラスチックシンチレータで構成される検出器を置いた (図 3.2)。

ビームが照射されるタイミングは Flat Top Start(4 秒周期) により与えられた。それをきっかけとして、各タイミングで発生するパルスにより CCD が動作し、ADC は CCD と同期してピクセル毎の電荷量をデジタル化しメモリに蓄積された。データは 4 秒ごとに読み出された。

測定条件を 表 3.1 にまとめておく。

CCD の電荷転送を 4 秒周期で行う場合、電荷転送が行われずピクセルが停止状態となる時間がある。この時、後節で示すようにピクセル毎に暗電流の蓄積勾配が異なることから、暗電流の非一様性が観測される。一方、CCD の電荷転送を 1.3 秒周期で行うと、CCD は常に電荷転送を行っているので、同一垂直軸上のピクセルに蓄積される暗電流量は等しくなる。また、暗電流の蓄積量は、蓄積時間に比例するから、シグナル・ノイズ比は 1.3 秒転送周期のほうが 4 秒転送周期の場合より高い値が得られると予想できる。

この実験で使用した浜松ホトニクス製の CCD 素子と駆動回路の組合せでは、最高で 4 $\mu sec/pixel$ の転送速度に対応している。したがって、CCD 1 枚あたり有効画素領域 (512×512 pixels) の読み出し (1 frame 分) には約 1 秒かかる。

CCD はピクセル数分のデータを生成するが、読みだし口が各 CCD には 1 つしかないため、シリアル読みだしとなる。ビームテストでは効率良くデータを蓄積するために CCD1 枚あたりの処理を高速で行うこ

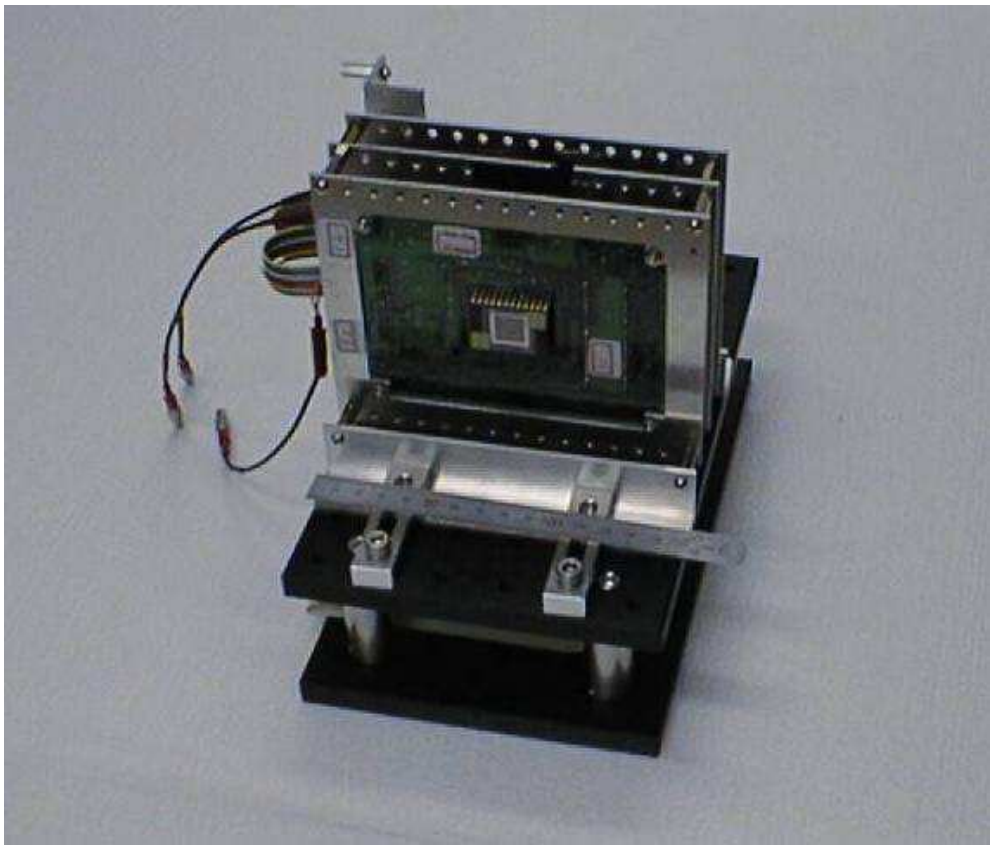


図 3.1: 第 1 回ビームテストでの検出器のセットアップ

CCD1	S5466 (有感層 10 μm) / C5934-1010
CCD2	S5466 改 (有感層 50 μm：特注品) / C5934-0909
CCD3	S5466 (有感層 10 μm) / C5934-1010
温度	$-15°C$、$-5°C$、$+5°C$、$+15°C$
ビーム	π^- (1.6 GeV/c)
ビーム入射角	0°、45°、60°
電荷転送周期	4 秒、1.3 秒
読みだし周期	4 秒
ビームオフデータ	100 frame/run、暗電流特性を study する
ビームオンデータ	300 frame/run、MIP の測定する

表 3.1: 第 1 回ビームテストの測定条件

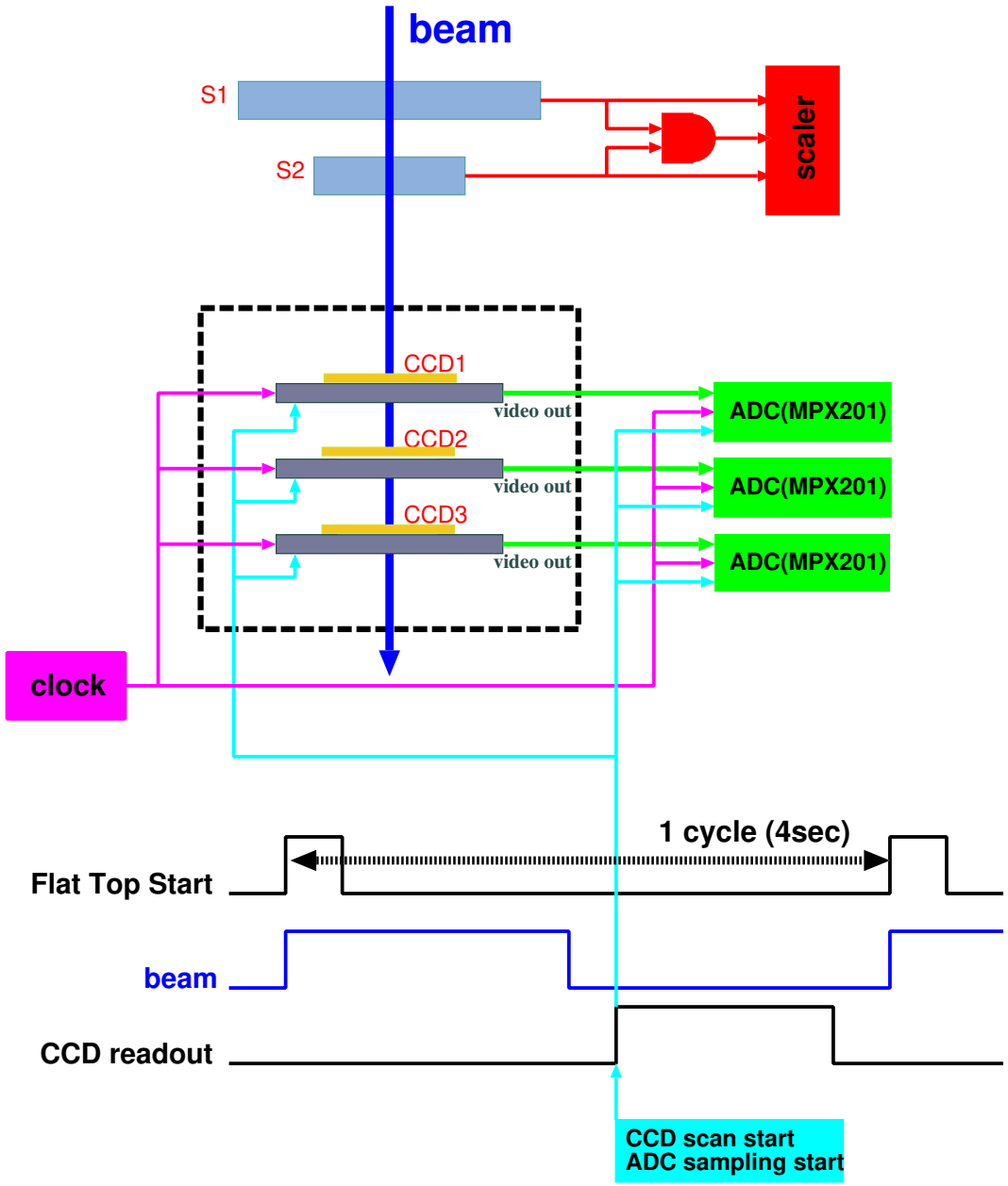


図 3.2: 第 1 回ビームテストのシステム構成

VME HOST	CPU	HP9000/743rt (Hewlett Packard)
	OS	HP-RT (Real Time OS)
	DAQ SOFTWARE	UNIDAQ v2.3 (KEK online group)
ADC	製品名	MPX201A (Pentland)
	分解能	12 bit (0.5 mV/ADCchannel)
	RAM	4 Msamples
	sample rate	MAX 20 MHz

表 3.2: データ収集系構成

とが必要とされた。そこで、我々は VME システムをベースとした高速収集系を構築した。システムの概要は表 3.2 にまとめる。詳細は付録にまとめる。

第4章　解析と考察(1997年6月)

4.1　暗電流特性

4.1.1　ゼロレベル

CCD の駆動の際、inactive 領域からのアウトプットは FDA のリセット用 MOSFET のリファレンスレベルと等しい。したがってこれは回路のゼロレベルを示すことになる。つまり、CCD からの出力は常に、inactive 領域のバイアスをオフセットに持っている事になる。解析を行う際はこのゼロレベルを差し引いて行うようにする。

4.1.2　暗電流の非一様性補正

ピクセル毎に暗電流の大きさを調べた場合、その不均一性が観測される。図 4.1 に暗電流のスペクトルを示すが、明らかにピークの右側に tail を引いているのがわかる。これは暗電流特性のピクセル毎の非一様性示している。

しかし、暗電流の時間的な (秒、分のオーダーでの) 変化は小さいと考えられる。したがって、解析対象のデータは、対応する暗電流分布のピクセル毎の平均 (dark frame と言う) を差し引くと補正することが出来る。

$$Data_{ij}^{corrected} = Data_{ij}^{raw} - \overline{Dark_{ij}} \tag{4.1}$$

式 4.1 を用いて、ビームオフデータを補正すると、図 4.2 のようになる。

図 4.2 は 4つの異なる温度点で測定されたものであるが、分布は 0 を中心としたガウス分布であり、その幅は温度が上昇するにしたがって広くなる傾向がある。各温度での分布の幅を、

$$\sigma_{noise}(T) \tag{4.2}$$

として、定義する。これは、熱励起により発生する電子の統計的寄与 σ_{dark} と、読みだしノイズ $\sigma_{readout}$ からなる。すなわち、

$$\sigma_{noise}^2(T) = \sigma_{dark}^2(T) + \sigma_{readout}^2 \tag{4.3}$$

である。

一方、熱励起により発生する電子数を N_{e^-}、回路ゲインを $Gain$ 、暗電流量を $Dark$ とすると、

$$Dark = Gain \cdot N_{e^-} \tag{4.4}$$

そして、Poisson 統計より、

$$\sigma_{dark} = Gain \cdot \sqrt{N_{e^-}} \tag{4.5}$$

である。式 4.3 と、式 4.4、4.5 から、 σ_{dark} と N_{e^-} 消去すると、

$$\sigma_{noise}^2(T) = Gain \cdot Dark(T) + \sigma_{readout}^2 \tag{4.6}$$

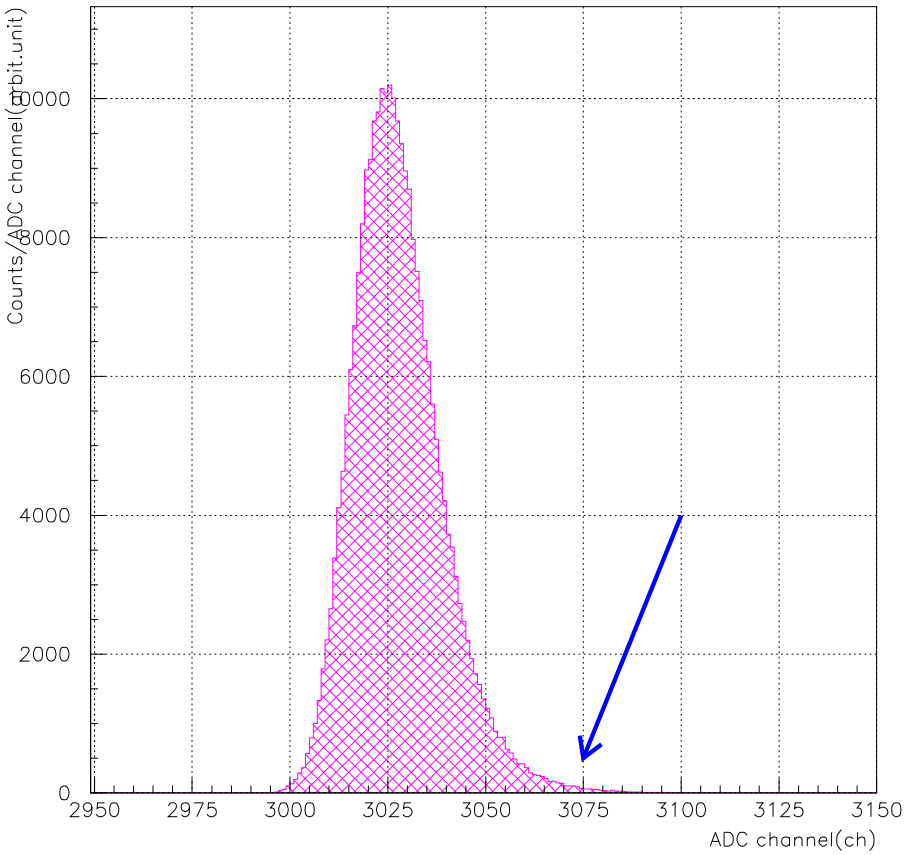


図 4.1: 1 frame 分の暗電流のスペクトル

	CCD1	CCD2	CCD3
$Gain\ (\mu/e^-)$	103.2 ± 2.3	10.6 ± 1.4	99.7 ± 2.1
読み出し $noise$ (mV)	1.6 ± 0.4	0.5 ± 0.3	1.7 ± 0.3

表 4.1: 回路ゲインと読みだし ノイズ

が得られ、回路ゲインと読みだし ノイスの大きさが実験的に求めることが出来る。

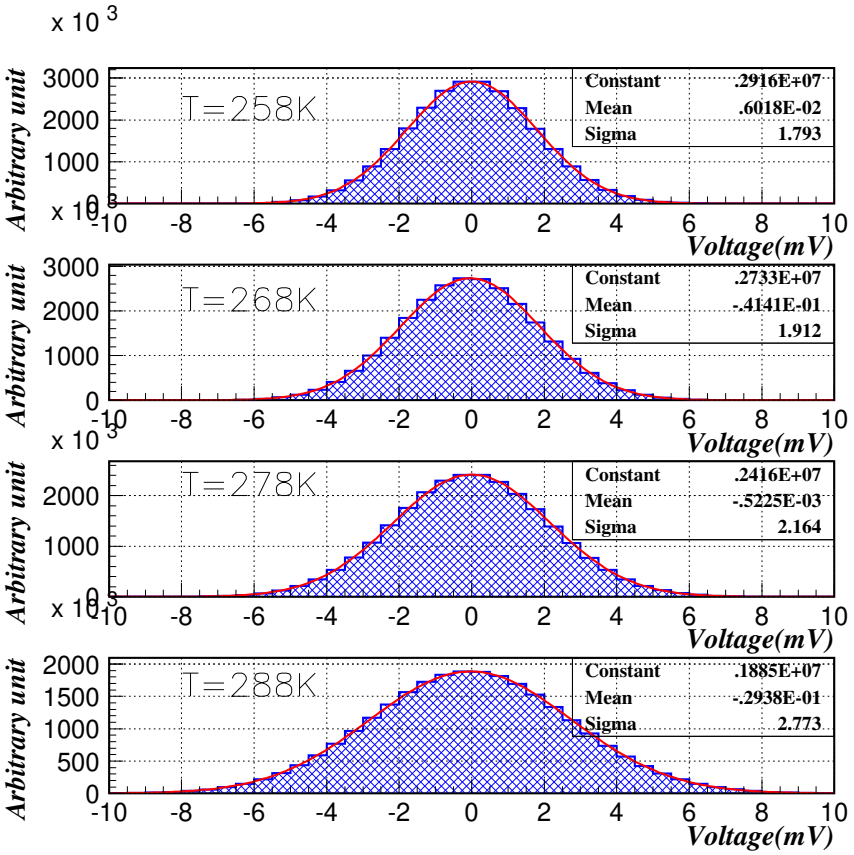


図 4.2: 暗電流の非一様性を補正した後のノイズ分布

σ^2_{noise} と暗電流の関係を 図 4.3 に示す。式 4.6 をフィットさせた結果を、表 4.1 にまとめる。読みだし ノイズは、浜松ホトニクス社より提供されている資料を参考にすると、15 e^- (r.m.s.) であり、およそ 1.5 mV に相当する。我々の実験が、規格値とほぼ同程度のノイズレベルで行われたことがわかる。

回路ゲインについては、^{109}Cd [1]を用いて、直接 calibration も行った。図 4.4 は CCD 検出器によるクラスタリング (4.2 節参照) を施した場合の典型的な ^{109}Cd のスペクトルである。この calibration の結果は表 4.2 の様になり、表 4.1 と良い一致が見られた。

[1]X 線源：22 keV, 26 keV

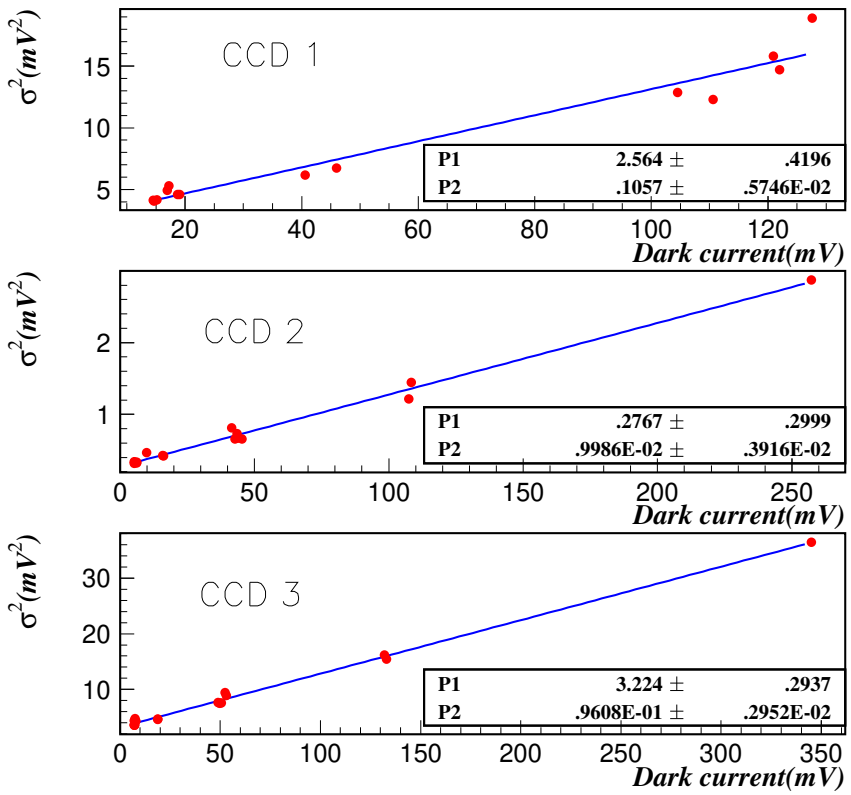


図 4.3: 暗電流特性による回路ゲインと読みだしノイズの導出

	CCD1	CCD2	CCD3
$Gain\ (\mu/e^-)$	100.2 ± 0.1	9.6 ± 0.1	112.6 ± 0.1

表 4.2: X 線源による直接 calibration の結果から得られた回路ゲイン

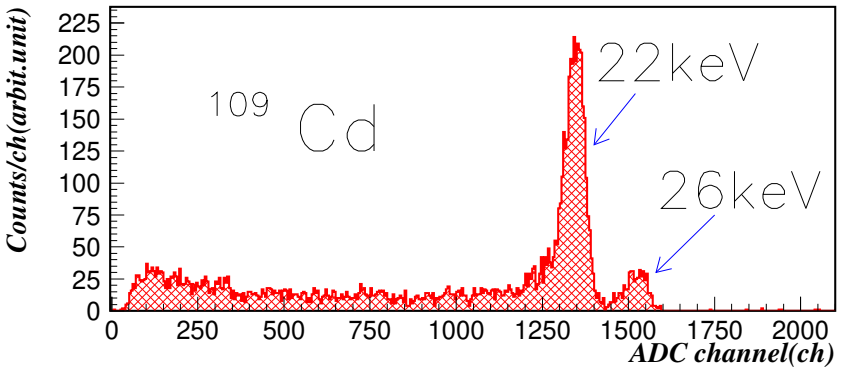


図 4.4: ^{109}Cd のスペクトル

4.1.3 暗電流の温度依存性

暗電流の寄与源としては、主なもので

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

が挙げられる。非 MPP 動作モードであれば、暗電流の支配的要因は界面での表面準位による熱励起であるが、MPP 動作モード下ではこの効果は著しく小さくなる。

暗電流の温度依存性は SRH モデル (付録 B 参照) に従う。暗電流の大きさは、基本的には真性キャリア濃度の式に当てはめることができるが、キャリアが完全に空乏化されている時は、バンドの中心による電子とホールの交互の放出によって電子ホール対が発生し、これが暗電流の主な要因となる [9]。このような過程には、放出時間定数の寄与があるため、厳密には、単位時間あたりの暗電流の温度依存性は、次の式に比例する [11]。

$$f = T^2 \times exp\left(-\frac{\epsilon_g}{2k_B T}\right) \tag{4.7}$$

ここで、ϵ_g は シリコンバンドギャップの温度依存性の実験式より

$$\epsilon_g = 1.16 - \frac{7.02 \times 10^{-4} T^{3/2}}{T + 1108} \tag{4.8}$$

である [12]。

図 4.5 は実験から得られた単位時間あたりの暗電流量である。フィットは式 4.7 で行っている。フィッティングパラメータは規格化定数と、測定温度と CCD 素子の温度のずれを示す量 ($T \equiv T + \delta T$) の 2 つである。結果は与えられた式に非常によくフィットしていることがわかる。また、測定温度と実際の CCD 素子付近の温度には

$$+2.8 \pm 0.7\ K \tag{4.9}$$

のずれが生じている可能性があることがわかった。

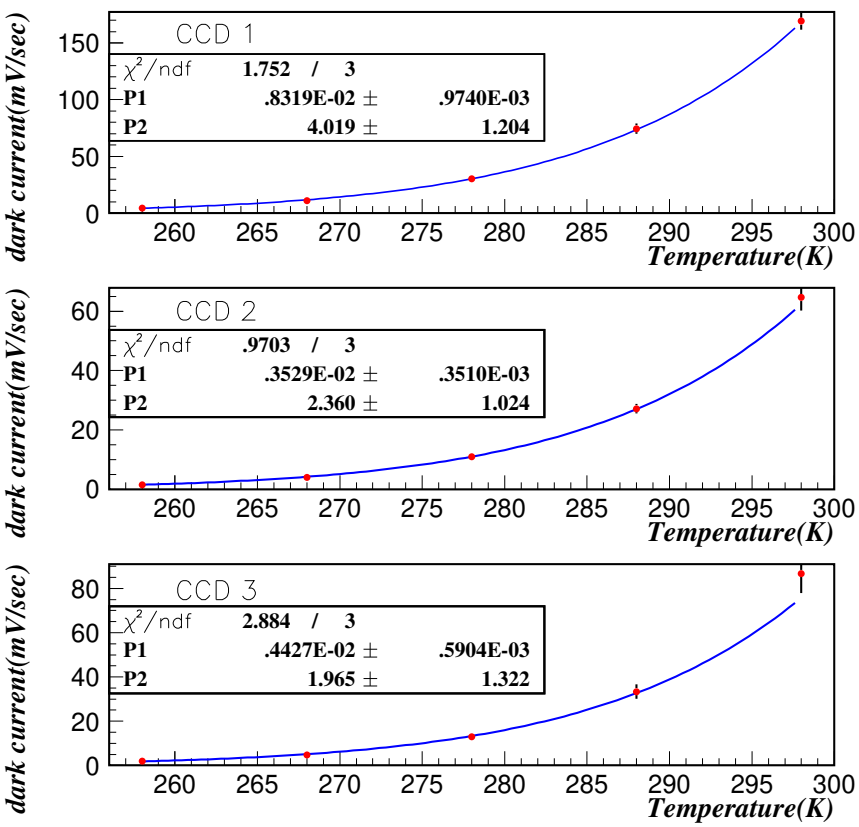


図 4.5: 暗電流の温度依存性: 点は測定点、実線はフィットの結果

4.2 クラスタリング

ビーム照射時のデータを解析する際は、クラスタリングと呼ばれる操作が必要となる。それは、荷電粒子や光子がある特定のピクセルにヒットした場合でも、熱的な拡散や、荷電粒子や光子のシリコンとの相互作用点により、周囲のピクセルに電荷が拡散する場合があるからである。今回行ったクラスタリングは次のような手順である。

1. あらかじめ ADC カウントに対する threshold を決めておく。
2. threshold を越えるピクセルが存在し、かつ、そのピクセルが周囲より高い ADC カウントである (local peak と言う)。
3. local peak の周辺の ADC カウントを足し合わせてクラスターとする。

但し、

- クラスタリングが 偶数 × 偶数 で行われる場合、例えば、2×2 では、local peak の周囲を 4 通り定義できるので、そのうち最大のカウント数を採用する。
- クラスターの中心はクラスターの ADC カウント重心とする (図 4.6)。

4.3 シグナル・ノイズ比

4.3.1 ノイズ (N) 定義

シグナル・ノイズ比 (S/N 比) を求めるために、はじめにノイズ (N) の定義を行う。シグナル (S) の値として、クラスタリングを施した値を用いるので、ノイズの大きさもクラスタを反映するものでなくてはならない。それは、クラスタの大きさにあわせて dark frame を足し合わせることで作ることができる。

4.3.2 温度相関

図 4.7 は、温度 $-15°C$ における S/N 比 をあらわす[2]。ノイズの主な要因は暗電流であるが、S/N 比はピークで 13 程度であり、MIP の信号がノイズレベルよりも十分に高い事を示している。さらに、温度 $+5°C$ においてでさえも、S/N 比は 10 程度得られている (図 4.8)。

各温度点での S/N 比を温度の関数として表し、CCD の読みだしサイクル毎に分類すると 1.3 秒周期の場合は図 4.9、そして 4 秒周期の場合は図 4.10 である。温度が上昇して行くにつれて、 S/N 比が悪化していくのがわかる。しかし、電荷転送周期を短くすると、蓄積される暗電流を低く抑えノイズの暗電流寄与を小さく抑えることができるため、より高い S/N 比が得られている。

4.3.3 ビーム入射角依存性

S/N 比のビーム入射角依存性を求めた。MIP が CCD を通過する際、物質との相互作用によって失うエネルギーの大きさは MIP のシリコン中での path length に依存している事が図 4.11 から明らかに確認できる。MIP 通過による有感層内での発生電子数を, 回路ゲイン $Gain$ $(\mu V/e^-)$ と ADC カウントのピーク

[2]ビームの入射角が $0°$、読みだし周期 4 秒のデータによる。クラスタリングは 2×2 で行われている。

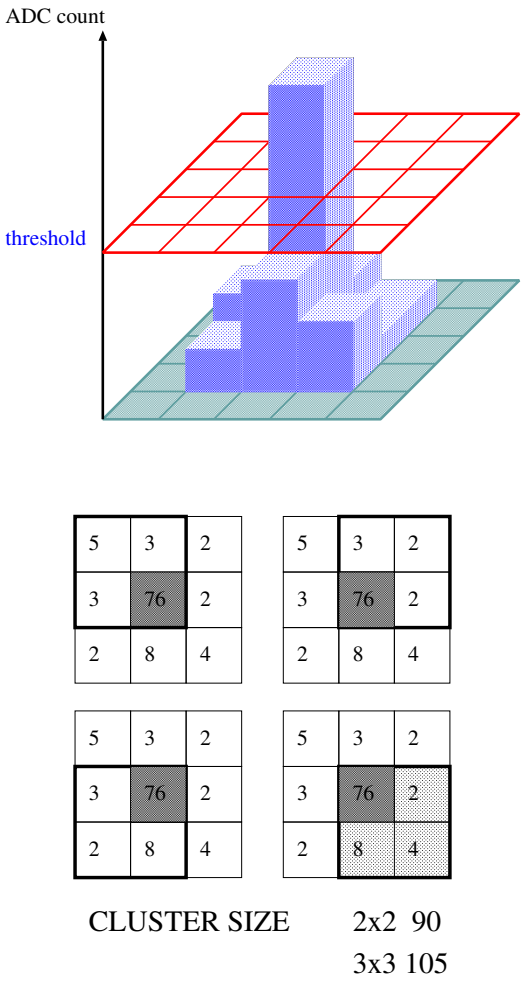


図 4.6: 2×2、3×3 のクラスタリング法

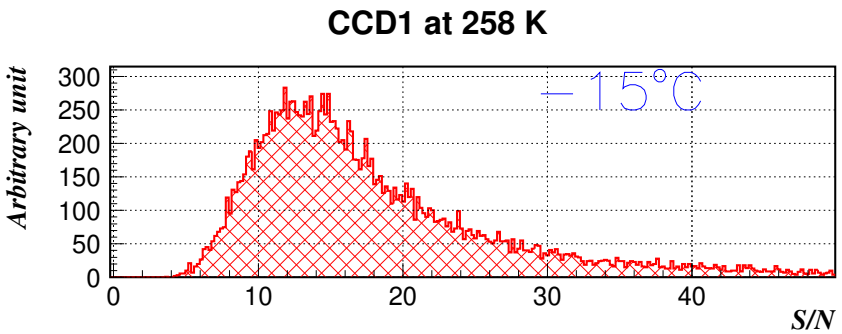


図 4.7: $-15°C$ での S/N 比分布

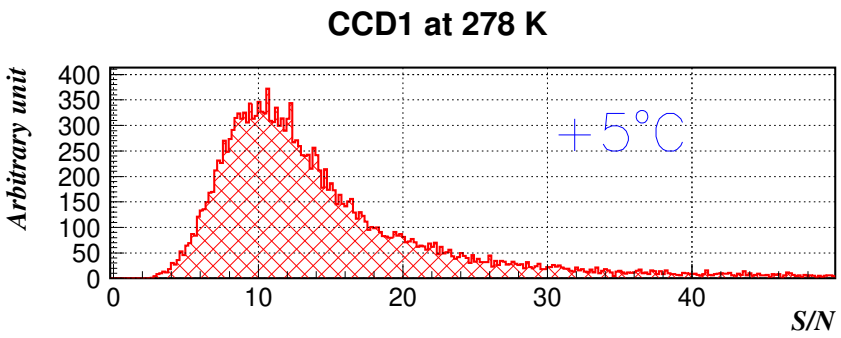


図 4.8: $+5°C$ での S/N 比分布

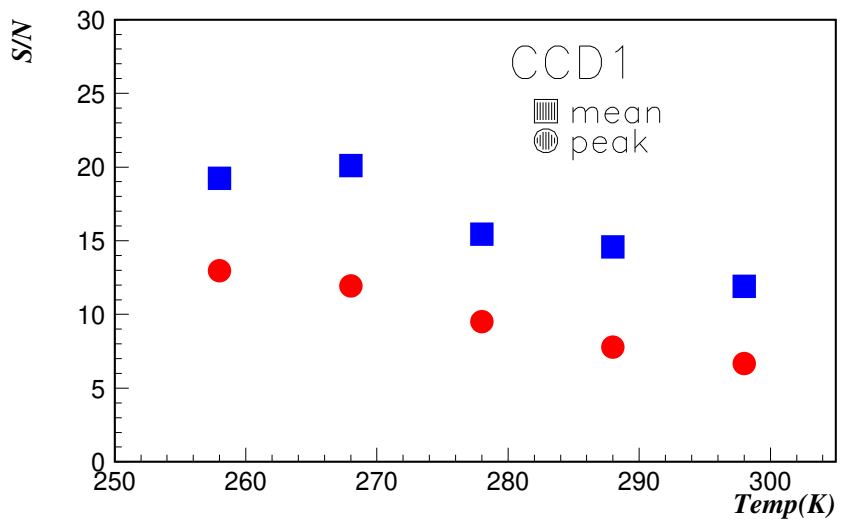


図 4.9: S/N 比の温度依存性 (読みだし周期：1.3 秒)

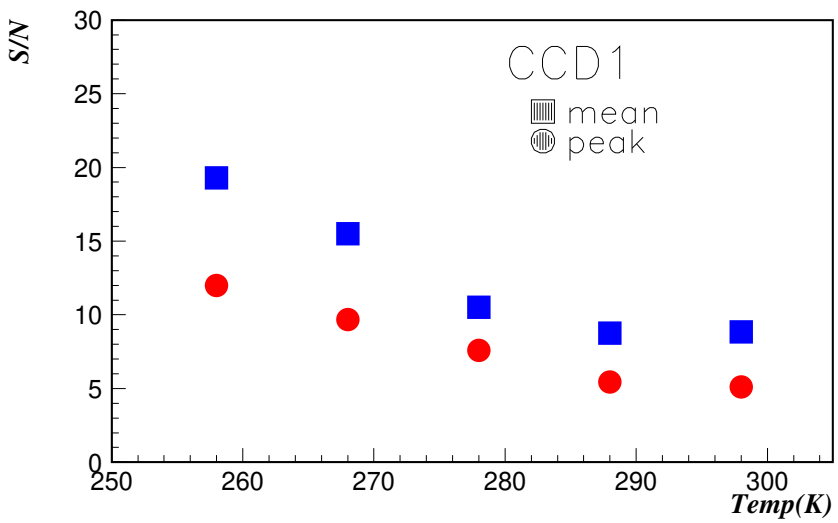


図 4.10: S/N 比の温度依存性 (読みだし周期：4 秒)

値または平均値 $ADCchannel\ (\mu V)$ より知ることが出来る。即ち、

$$N_{e^-} = \frac{ADCchannel}{Gain} \tag{4.10}$$

である。

各入射角、CCD について発生電子数をプロットしたものが図 4.12(上) である。発生電子数は正比例の関係にある。一方、CCD2、CCD3 での発生電子数を CCD1 の発生電子数で規格化したものが図 4.12(下) である。これより、CCD1 と CCD3 はほぼ同じ有感層厚、そして CCD2 は CCD1 や CCD2 の約 5 倍の有感層厚であると言える。これは、有感層の厚さが CCD1：10 μm、CCD2：50 μm、CCD3：10 μm である事に矛盾しない。

単位 path length あたりの発生電子数は、

- $60.8 \pm 6.2\ e^-/\ \mu m$ (ADC チャンネルのピーク値を採用した場合)
- $108.3 \pm 2.6\ e^-/\ \mu m$ (ADC チャンネルの平均値を採用した場合)

であった。

4.4 アライメント

検出器はセットアップ時に mm 以下のレベルで注意深く配置されたが、検出器そのものが数 μm のレベルで位置を検出する性能があるため、トラッキングを行う前に精密なオフラインアライメントを行う必要がある。具体的には、3 枚の CCD の相対的な XY 方向の位置のずれを調べ、その情報をを CCD データの配列に与える。

次の手続きを経ると、CCD1 と CCD2、CCD1 と CCD3 の相対的な位置の相関を見ることが出来る。

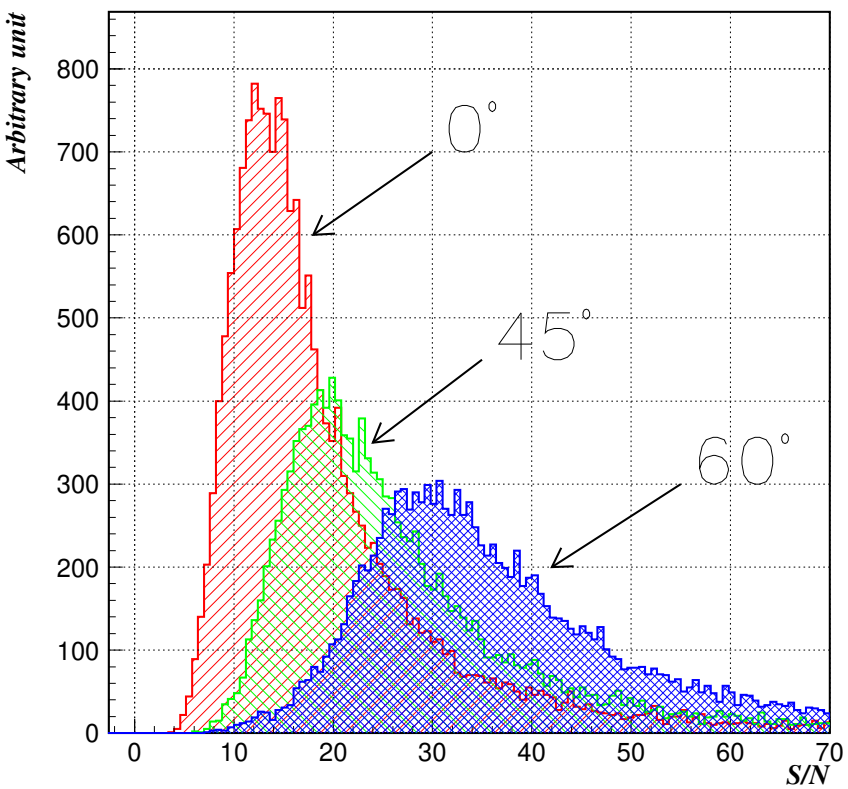


図 4.11: ビーム入射角と S/N 比

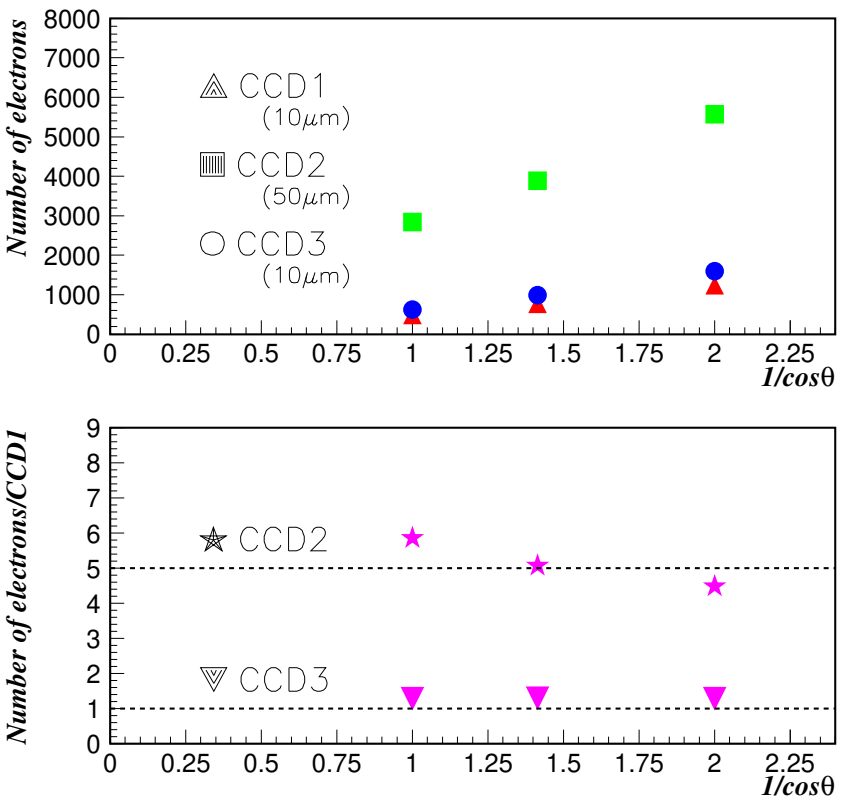


図 4.12: 発生電子数の path length 依存性 (上)、発生電子数を CCD1 で規格化 (下)

1. CCD1 で local peak の位置 (x1, y1) を探す。
2. CCD2 上で (x1, y1) を中心とした、十分広い領域中ですべての local peak を探し、それぞれの (x1, y1) からのずれを記録する。
3. CCD3 についても同様に (x1, y1) からのずれを記録する。
4. CCD1 ですべての local peak について行う。

図 4.13 は典型的な相関を示すものである。X 軸、Y 軸に投影されたヒストグラムをガウス分布でフィットし、CCD データを収めている配列の添字にフィットした結果分のオフセットを持たせる。これでオフラインアライメントが完了する。

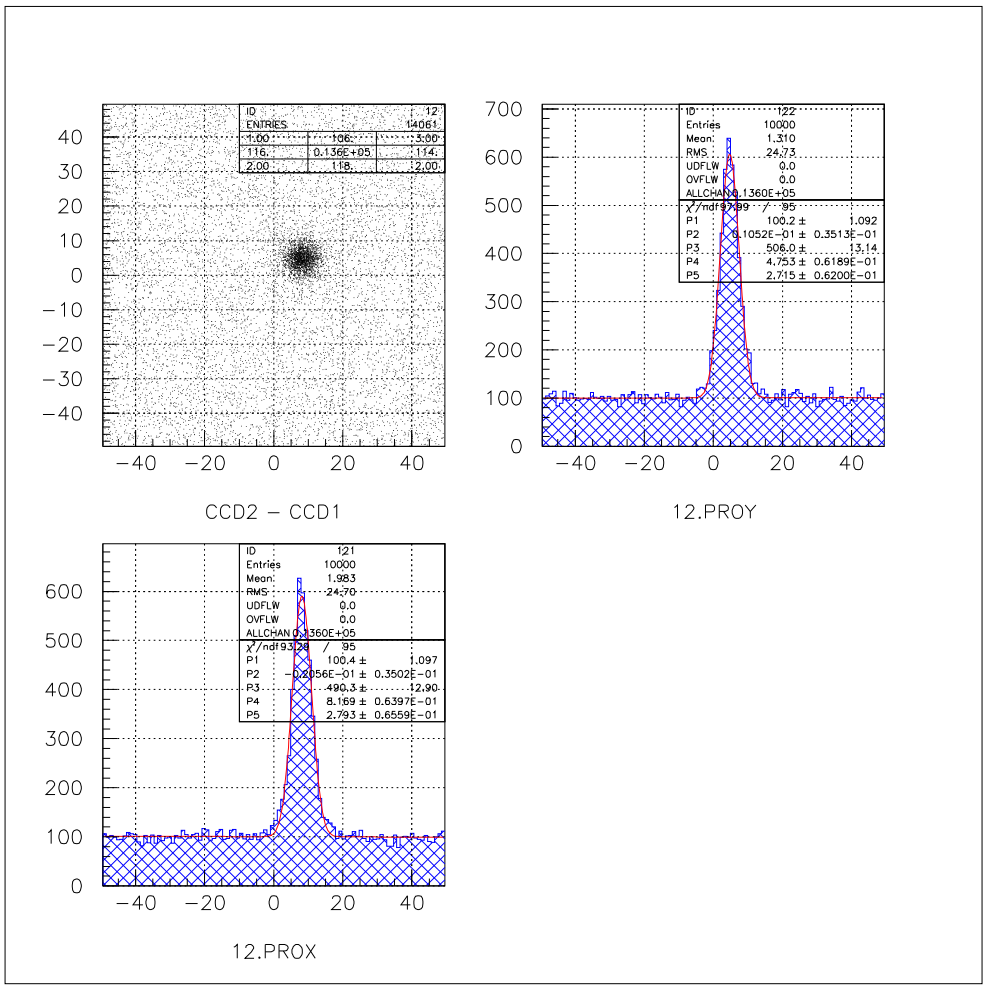


図 4.13: CCD1 と CCD2 の位置の相関

4.5 非検出効率

オフライン解析によりアライメントされた CCD イメージを用いて、検出効率を求める。CCD1 と CCD3 にクラスターが存在する場合に、CCD2 へ内挿した周囲にクラスターが存在するかどうかを検証する。

CCD1 にクラスターが存在するときの、CCD3 のクラスター分布が図 4.14 である。クラスタリングは

3×3 で行った。ピークの両側にランダムな成分が確認できる。2 枚の CCD で飛跡を捉えようとすると、どうしてもこの成分を取り除くことが出来ない。できるだけこの寄与を減らすために、CCD3 でのクラスター分布のピークから $3\,\sigma$ 以内を使うことにする。そして、CCD2 へ内挿した点の周囲でクラスタリングを行う。そこから得られるスペクトルについて、ピーク値の 20 % を閾値とし、それ以下のエントリーを「不感」と見なし、CCD2 のエントリーに対する比率を「非検出効率」と定義する。

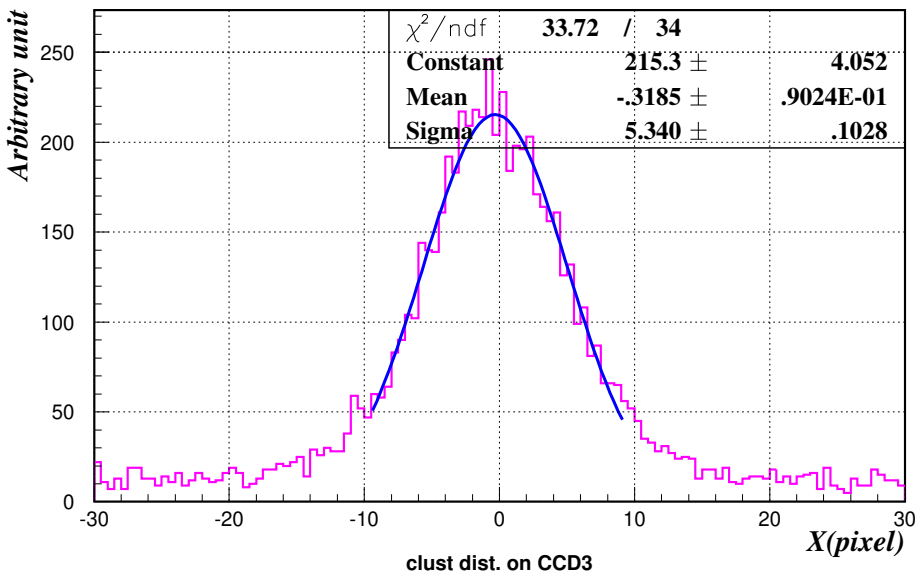


図 4.14: 飛跡認識後の CCD3 のクラスター分布
飛跡認識の段階でランダムな成分が混入し、平らな成分をつくっている

各温度における CCD2 のスペクトルを図 4.15、図 4.16、図 4.17、図 4.18 に示す。また、非検出効率を表 4.3 にまとめる。ランダムなヒットによる「偽の飛跡」が「本物の飛跡」と区別出来ない事、そして「偽の飛跡」が「本物の飛跡」と判断される場合、高い確率で CCD2 では「不感」となるはずであるから、得られる結果は上限値であると解釈できる。

ランダムな成分による「偽の飛跡」を取り除くためには、最低あと 1 枚の CCD が必要である。また、温度 $+15°C$ (図 4.18) において極端に悪化している要因は、他の温度での測定 (図 4.15 ~ 4.17) と比べるとわかる通り、回路ゲインに変化が起こったためと思われる。これは、この温度での測定中に回路もしくは読みだしに問題が生じたことに起因している[3]。

結局、非検出効率は温度 $+5°C$ 以下では、1 % 以下であることが分かった。

4.6 位置分解能 I

4.5 節で CCD2 への内挿点とクラスター重心のずれを X-Y に射影した場合のプロットが図 4.19 である。この分布の幅が位置分解能を示す。各温度点において測定された位置分解能は表 4.4 の通りである。温度

[3]正確に何が起こったかはつきとめられなかった。次回ビームテストでの課題として残った。

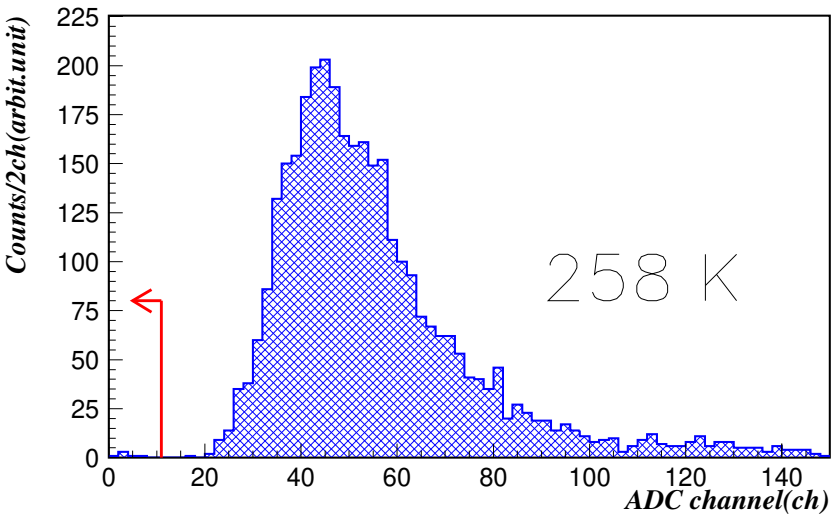


図 4.15: 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布

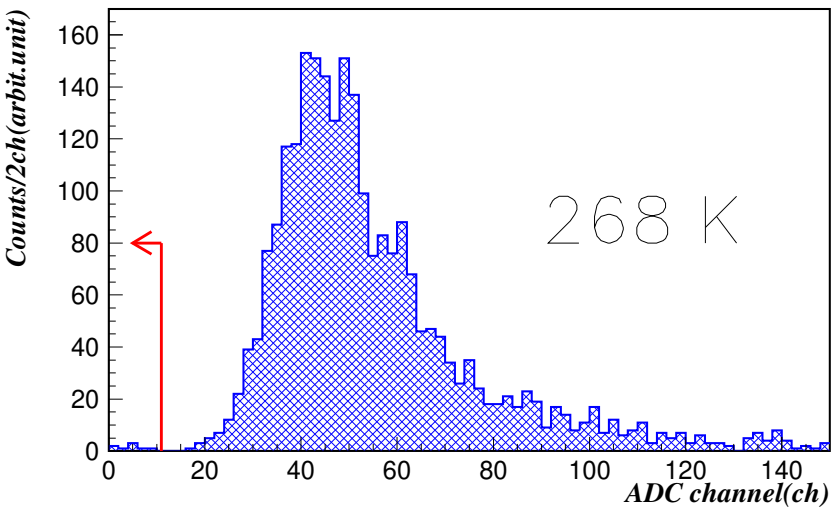


図 4.16: 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布

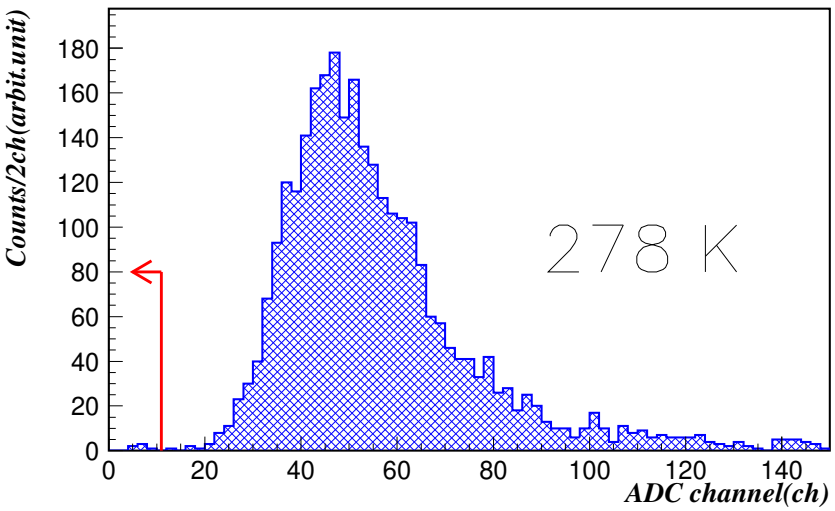


図 4.17: 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布

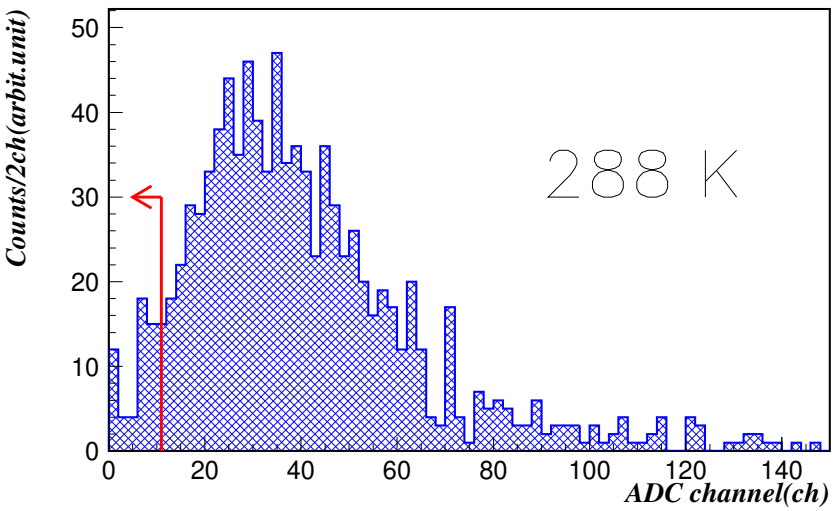


図 4.18: 飛跡認識による CCD2 のエネルギー分布

温度 ($^\circ C$)	-15	-5	$+5$	$+15$
非検出効率 (%)	< 0.5	< 0.8	< 0.7	$< 6.6^\dagger$

表 4.3: 各温度での非検出効率

† 実験のセットアップに問題が生じゲインが低下したため、検出効率が悪化するような結果が得られた。

に依存しない値、

$$\sigma = 13.0 \pm 0.2\ \mu m \tag{4.11}$$

を得た。但し、考慮しなければならないことは、使用した CCD センサーが浜松ホトニクス社の標準品であったため、センサー背部に 1.2 mm 厚のアルミナが存在する事である。この物質による多重散乱が位置分解能を悪化させる要因となっている。この効果は、次節のシミュレーションで触れる。

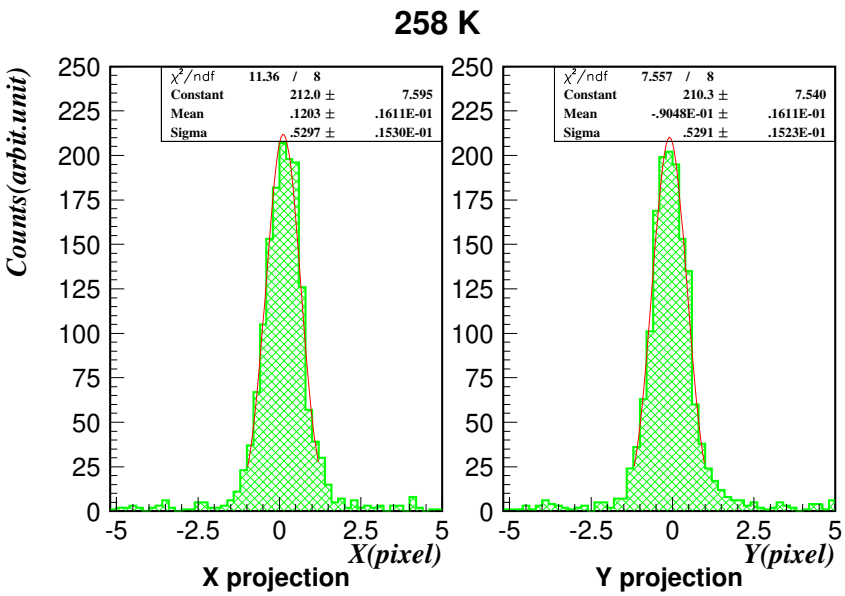


図 4.19: 位置分解能

4.7 位置分解能 II (GEANT によるシミュレーション)

GEANT3.21 による CCD 素子を構成する物質と荷電粒子の相互作用についてフルシミュレーションを行った。これにより物質による多重散乱の成分を見出すことが目的である。

シミュレーションでは CCD の有効領域のみを作り、実験の geometry を再現した。粒子は 1.6 GeV/c の

温度 ($^{\circ}C$)	-15	-5	$+5$	$+15$
$\Delta X(\mu m)$	12.7 ± 0.4	13.1 ± 0.4	12.6 ± 0.6	13.6 ± 0.6
$\Delta Y(\mu m)$	12.7 ± 0.4	13.3 ± 0.4	12.7 ± 0.8	14.0 ± 0.7

表 4.4: 各測定温度での位置分解能

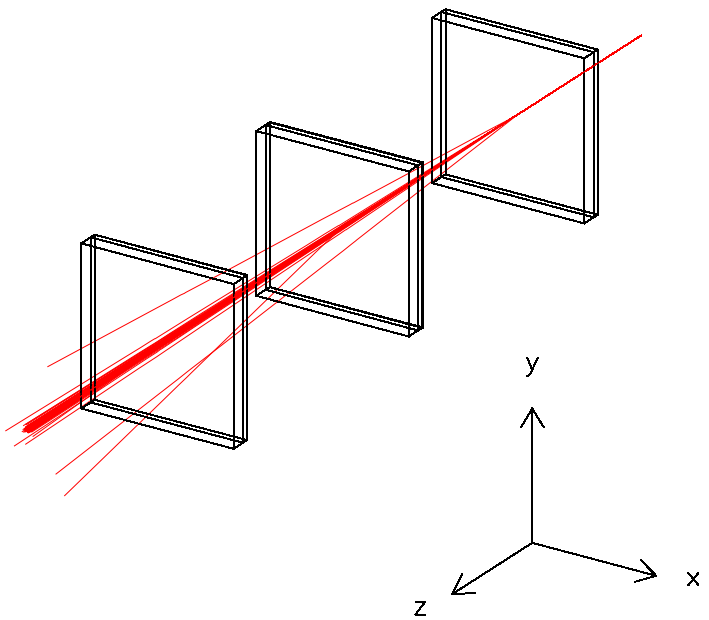


図 4.20: フルシミュレーションのイベントディスプレイ

π^- を CCD の中心軸上から飛ばした。各 CCD 表面での位置データを用いて、CCD2 上の飛跡のずれをプロットしたのが図 4.21 である。

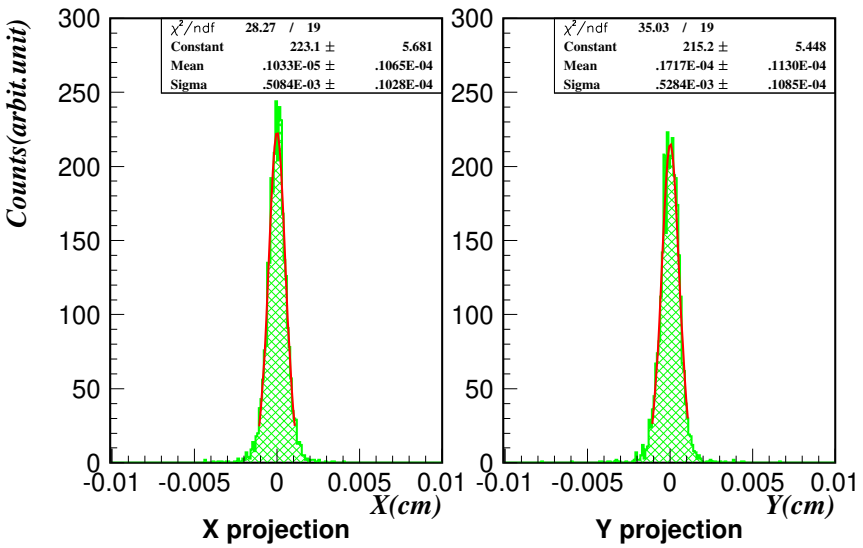


図 4.21: フルシミュレーションから得られる多重散乱の分布

これから、位置分解能の多重散乱による寄与は、

$$\sigma = 10.3 \pm 0.2\ \mu m \tag{4.12}$$

であることが分かった。

実験から得られた分解能 (4.11) が、CCD 固有の位置分解能と多重散乱の寄与の重ね合わせであるから、CCD 固有の位置分解能は計算することができ、

$$\sigma_{intrinsic} = 7.9 \pm 0.4\ \mu m \tag{4.13}$$

であったことが分かった。

第5章　第2回ビームテスト (1998年1月)

5.1　実験目的とセットアップ

1998 年 1 月のビームテストでは、

- 多重散乱による影響を減らす。
- 多重 hit を取り除くためのセットアップをする。
- 位置分解能の入射粒子運動量依存性を求める。
- 浜松ホトニクス社製以外に EEV 社製の CCD も調査する。

が主要項目であった。

また、第 1 回テストでは入射粒子の運動量を 1.6 GeV に固定していたが、0.5 GeV、1.0 GeV、2.0 GeV の 3 点でとることにより、位置分解能の入射粒子運動量依存性を求め、多重散乱の影響が無い極限値を実験的に求めることも行った。

4 層それぞれの CCD については表 5.1 の通りである。ビームの上流から CCD0、CCD1、CCD2、CCD3 と定義する。4 層の CCD のうち、3 層目 (CCD2) 以外の CCD はテスト中は交換をせずに、常に reference 用として機能させる。そして、2 層目 (CCD1) に素子のアルミナのパッケージに穴を空けた CCD を置く。

CCD 素子のアルミナパッケージによる散乱は、上流から 3 層のセンサを通過する荷電粒子の飛跡に寄与しない。また、2 層目と 3 層目を近づけることで、センサを構成する物質による散乱の寄与を最小限に抑える工夫がなされた。

CCD0	浜松製 S5466 (有感層 10 μm) / C5934-1010
CCD1	浜松製 S5466 (穴空き特注品、有感層 10 μm) / C5934-1010
CCD2	浜松製 S5466 (有感層 50 μm) / C5934-1010(gain を落す改造を施したもの)
	浜松製 S5466 (有感層 10 μm) / C5934-1010
	EEV 社製 CCD0206
CCD3	S5466 (有感層 10 μm) / C5934-1010
温度	$-15°C$、$-5°C$(EEV のみ)、$+5°C$、$+15°C$(EEV のみ)
ビーム	π^- (0.5 GeV、1.0 GeV、2.0 GeV)
ビーム入射角	0°、45°、60°
電荷転送周期	4 秒
読みだし周期	4 秒

表 5.1: 第 2 回ビームテストの測定条件

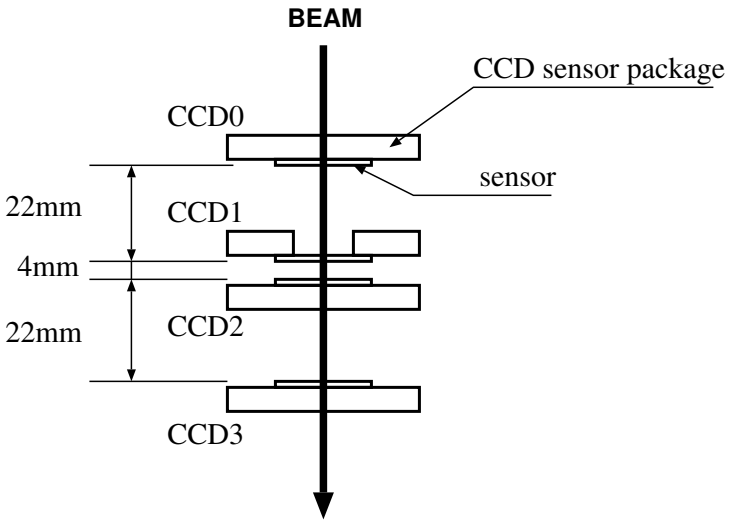


図 5.1: 第 2 回ビームテストでの CCD の配置
物質による散乱の効果が小さくなるように配置を工夫した

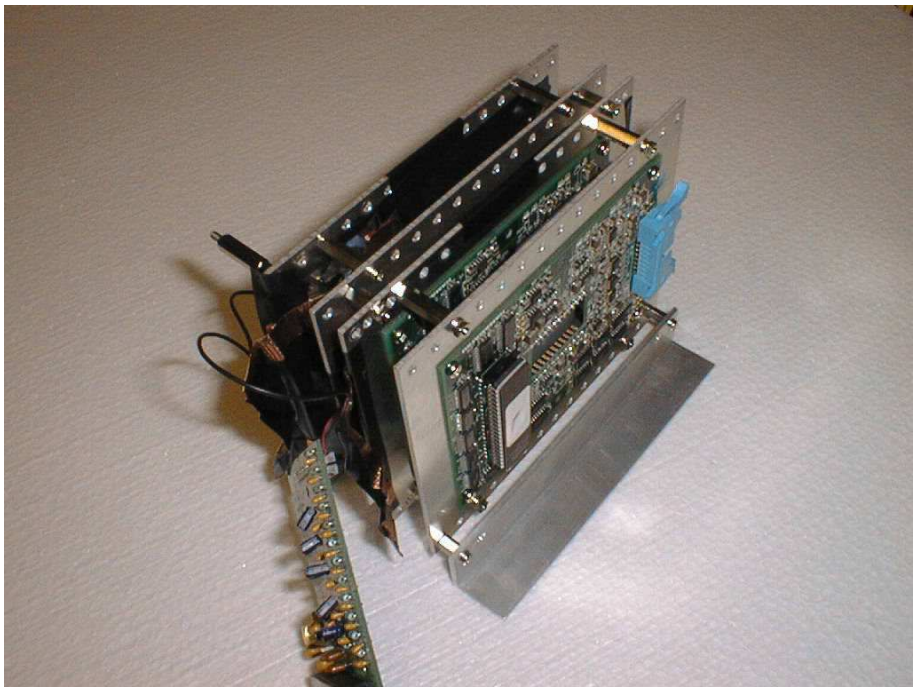


図 5.2: 第 2 回ビームテストでの検出器のセットアップ

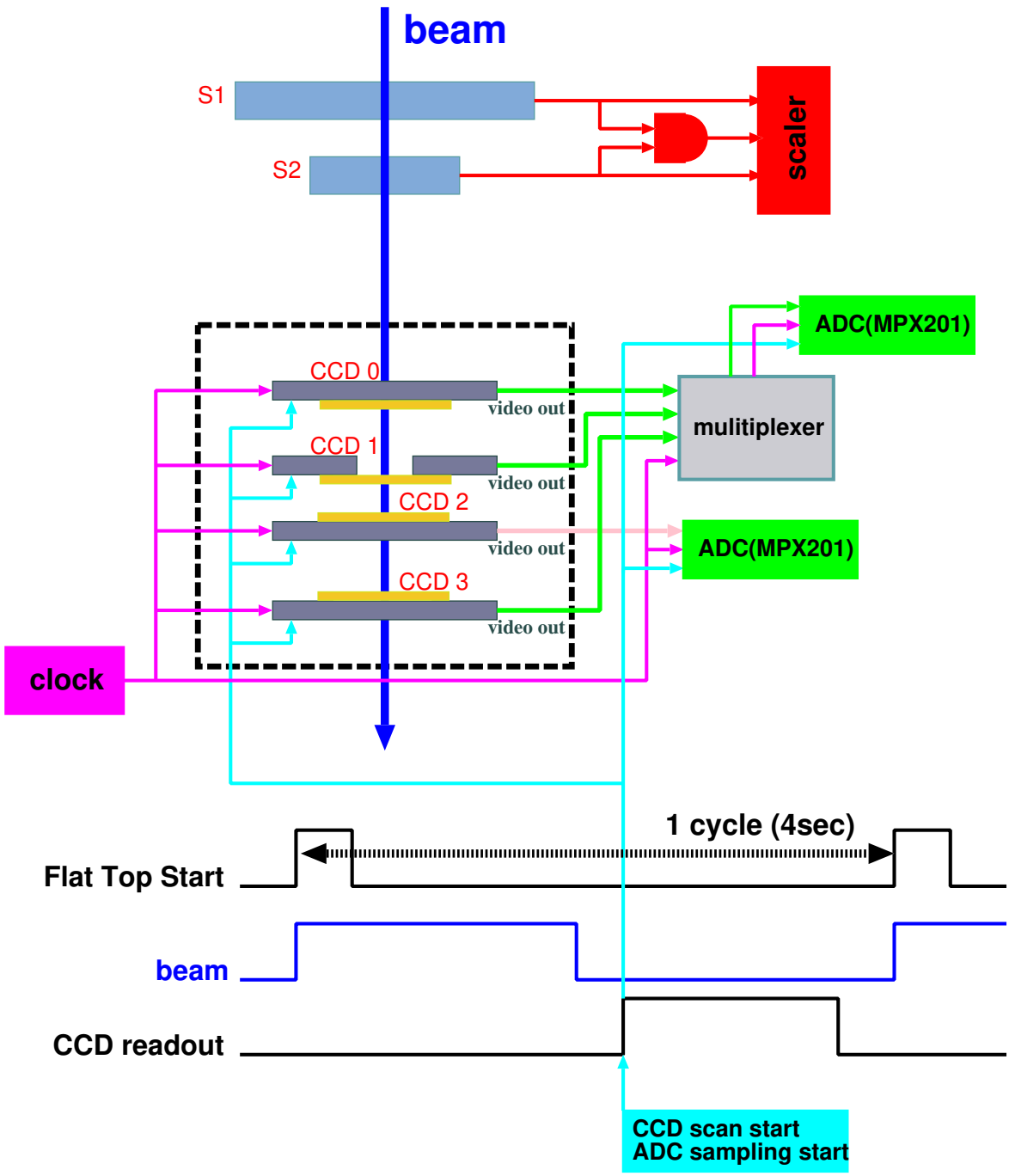


図 5.3: 第 2 回ビームテストのシステム構成

5.2 データ収集系

1997 年 6 月と同様のデータ収集系を用いて行われた。但し、 reference として機能する 3 枚の CCD データは、Multiplexer の導入によって ADC1 台で読めるようにした (図 5.3)。

第6章　解析と考察 (1998年1月)

6.1　シグナル・ノイズ比 (浜松ホトニクス社製 CCD)

今回のテストにおける浜松ホトニクス社製 CCD の S/N 比を有感層 10 μm のものは図 6.1・図 6.2、有感層 50 μm のものは図 6.3・図 6.4、に示す。S/N 比は各測定温度において前回のテストと同程度であった。このことから暗電流特性や回路の特性について前回のテストを再現している事が確認できた。

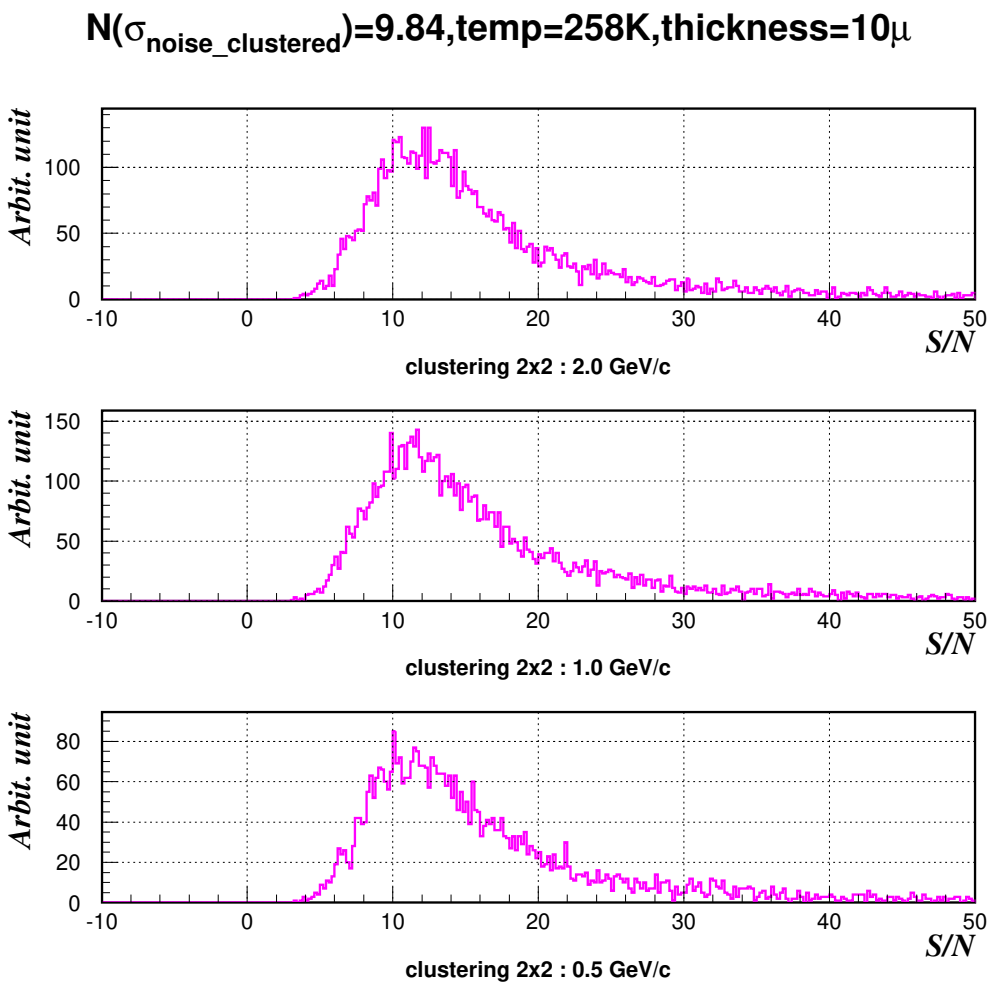


図 6.1: 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 10 μm、$-15°C$ での S/N 比分布

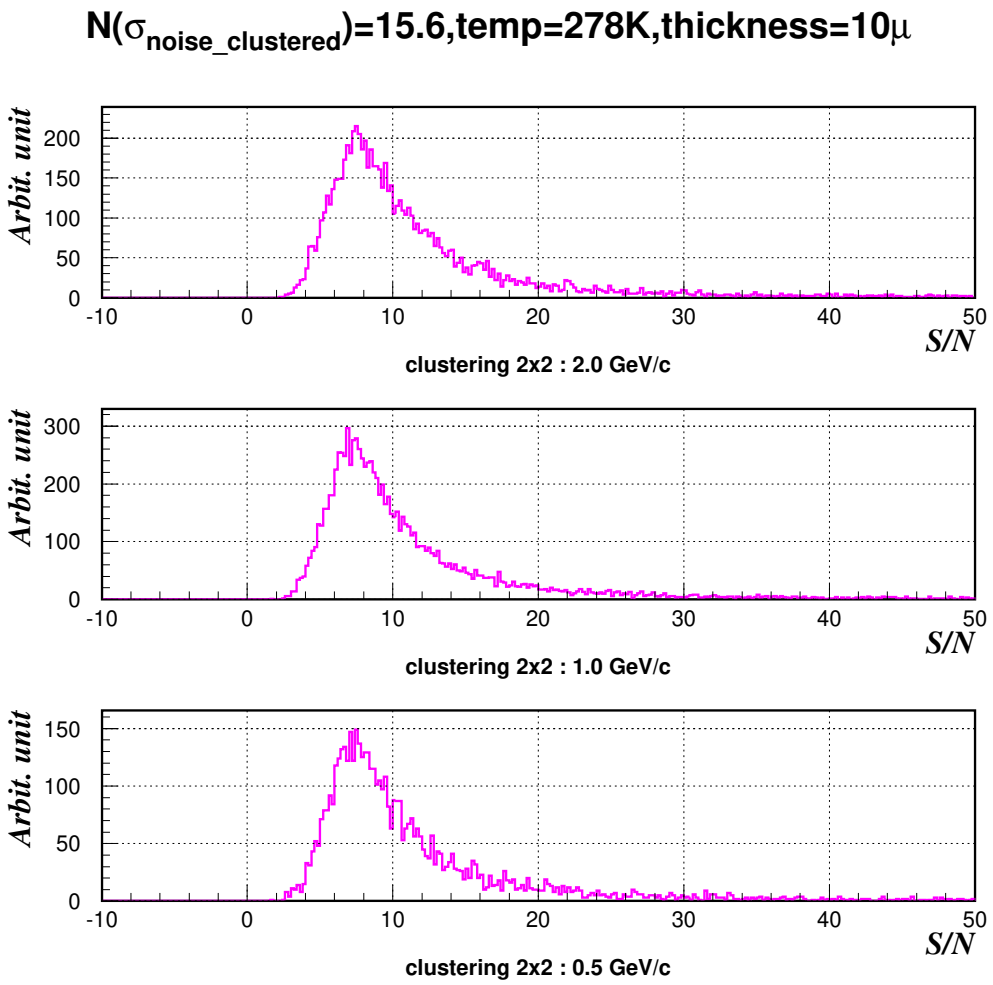


図 6.2: 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 10 μm、$+5°C$ での S/N 比分布

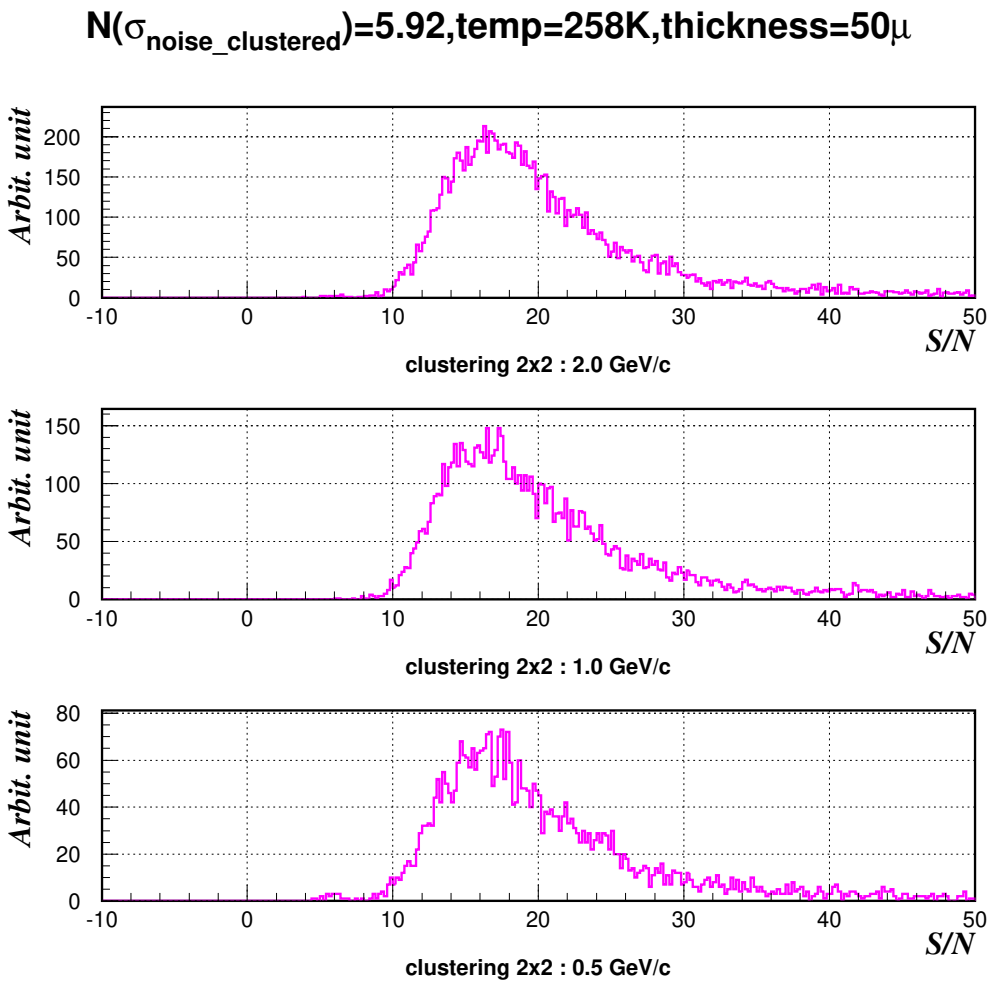


図 6.3: 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 50 μm、$-15°C$ での S/N 比分布

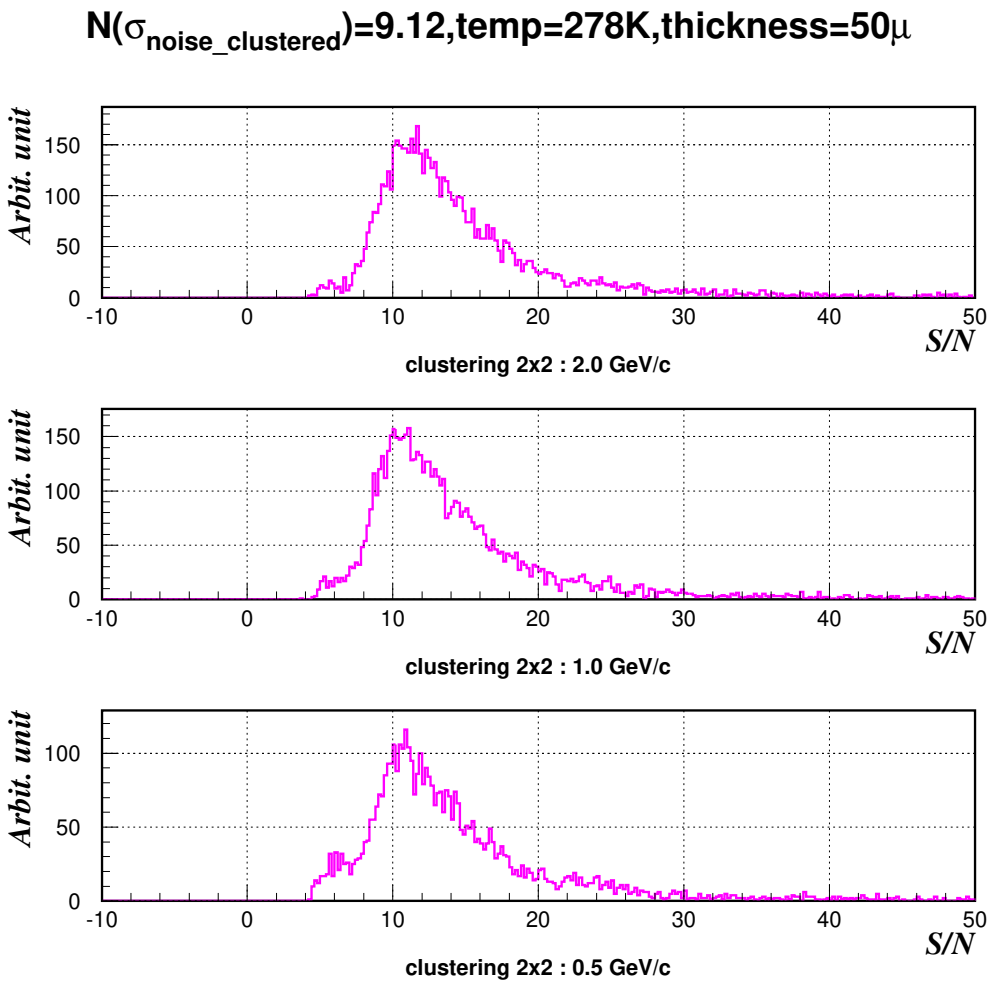


図 6.4: 浜松ホトニクス社製 CCD、有感層 50 μm、$+5°C$ での S/N 比分布

6.2　アライメント (浜松ホトニクス社製 CCD：有感層 10 μm)

高精度で位置分解能を求めるために、第 1 回ビームテストよりもさらに精密なオフラインアライメントが必要となる。つまり、X-Y の補正だけでなく、ビーム軸まわりの回転、そして CCD 間の距離の補正を行う必要がある。

図 6.5 は X-Y 方向の補正である。この後、図 6.6 のように CCD1 を基準として、もう一枚の CCD との dx-y または、dy-x の相関から、ビーム軸まわりの CCD1 との相対的な回転角 θ を求めることができる。図 6.7 は dx と y、または dy と x の相関である。dx-y プロットでフィットした直線の傾きは $tan\theta$ と表すことが出来る (図 6.6)。同様に dy-x プロットでの傾きは $-tan\theta$ となる。表 6.1 は CCD1 との相対的な回転角を導出した結果である。

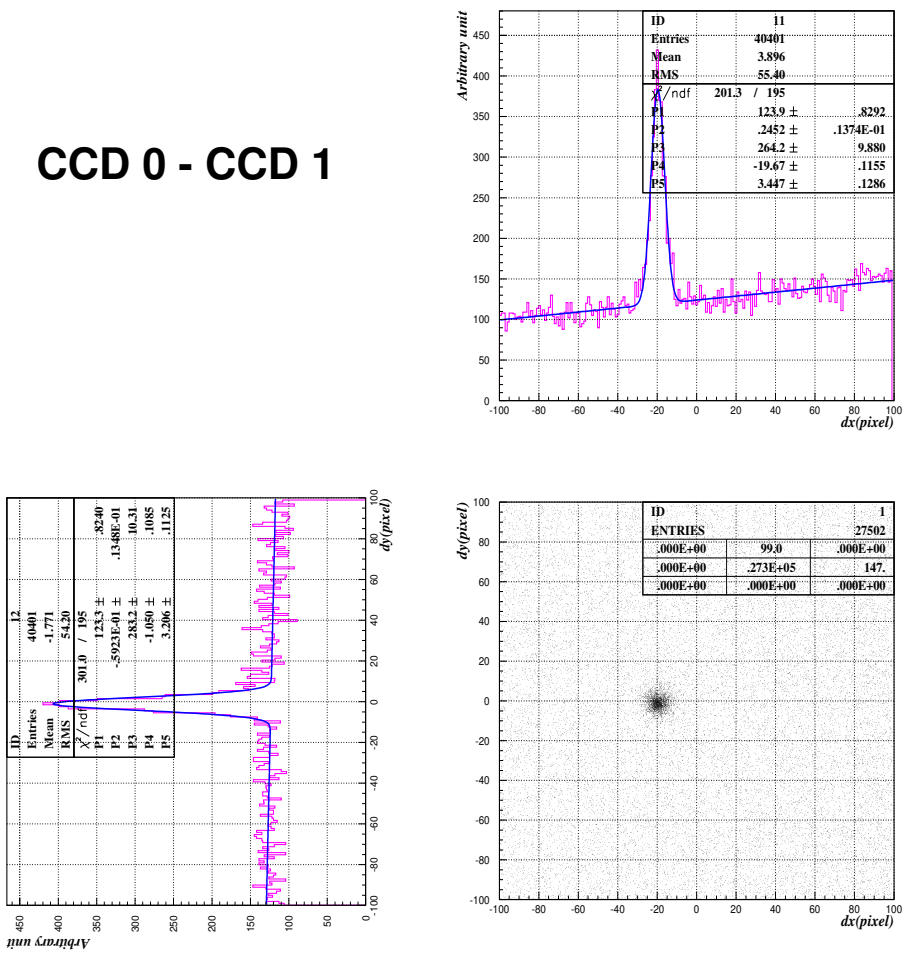


図 6.5: X-Y のアライメント

同一の実験セットアップでは CCD 検出器の配置間隔は固定されていた。よって、検出器に斜めに入射して来るビームの飛跡から $(x2-x1)$ と $(x1-x0)$ の比をとると常に定数となり、これを用いて Z 軸方向の補正が出来る。図 6.8 は X-Y、回転の補正を行った後に、$(x2-x1)$ と $(x1-x0)$ の比をとったものである。この時のピークの値をを Z 軸の補正情報として採用する。図 6.8 によると、CCD0 と CCD1 の距離を 22 mm

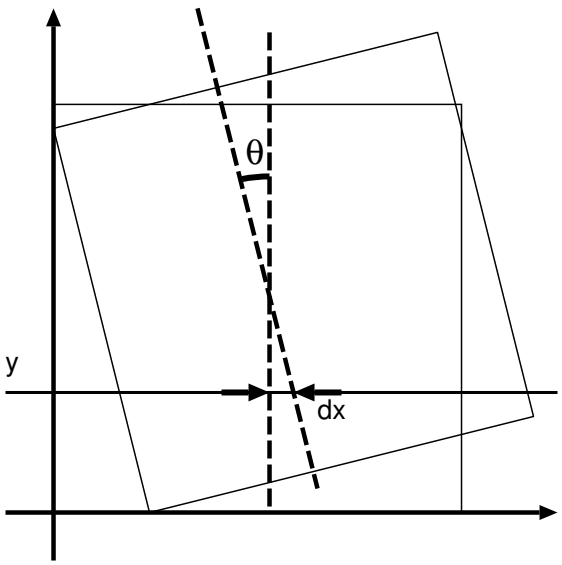


図 6.6: CCD の回転角

	$< A1 >$ (図 6.7 より)	$\theta = tan^{-1} < A1 >$
CCD0	0.004639	0.2658
CCD2	0.0007053	0.04042
CCD3	0.009981	0.5719

表 6.1: CCD1 との相対的な回転角 (度)

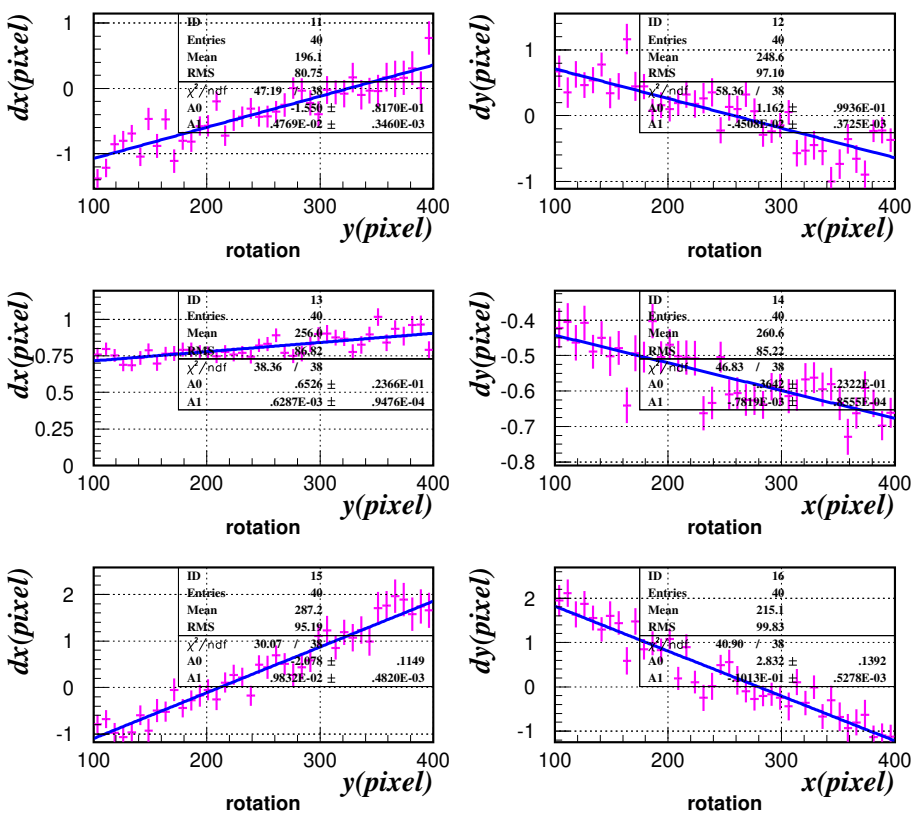


図 6.7: ビーム軸まわりの回転

上段 (CCD0-CCD1)・中段 (CCD2-CCD1)・下段 (CCD3-CCD1) ：$dx - y$ プロットと $dy - x$ プロットのフィットされた直線の傾きは、互いに符合が反対で絶対値が等しい。

と仮定した場合、CCD1 と CCD2 の距離は 5.0 mm となる。

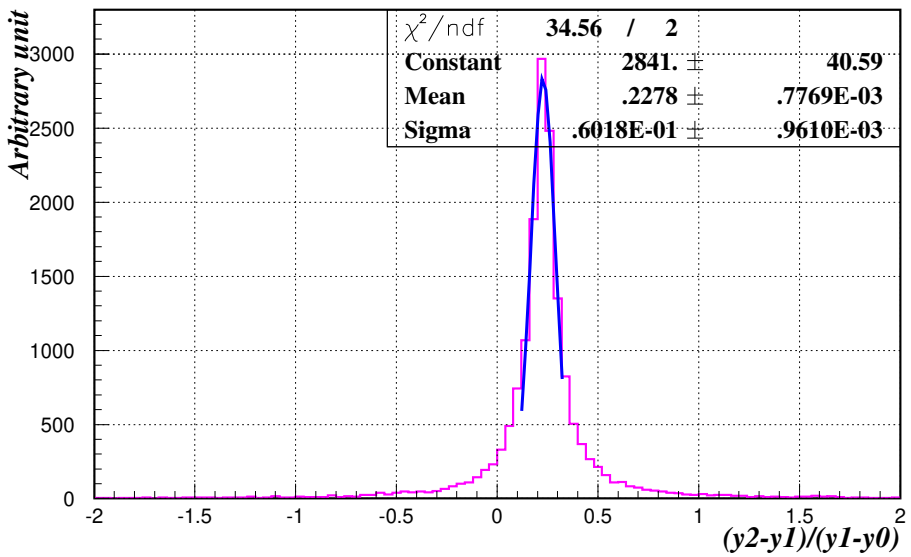


図 6.8: Z 軸補正

6.3 非検出効率 (浜松ホトニクス社製 CCD：有感層 10 μm)

オフライン解析により高精度でアライメントされたデータを用いて、非検出効率を評価する。MIP が通過したと思われるイベントを抽出する条件 (MIP 通過の条件) は、

- CCD0 と CCD1 にクラスターが存在する。
- CCD0 と CCD1 のクラスター位置の CCD3 への外挿点付近 (5σ[1]) にクラスターが存在する

である。

「MIP 通過の条件」を満たす場合のみ、CCD0 と CCD1 のクラスター位置の CCD2 への外挿点付近でクラスターを探す。もし、CCD2 にクラスターが存在しない場合は「不感」として数える。

ここで、CCD1 にクラスターを見つけたときに、他の CCD にどれくらい近接ヒットがあるかを見てみる。図 6.9 は「MIP 通過の条件」を満たしているときに、CCD2 上の外挿点の周囲に存在するクラスターの数を表している。ここで、CCD0 と CCD3 に 1 トラックのみ存在する条件を与えると、CCD2 上の近接ヒット数は 図 6.10 となる。以上より、トラックの条件から抽出された「不感」エントリーは 0 であった。

非検出効率の定義は、MIP 通過の条件から得られる不感と、飛跡認識後に得られるエネルギー分布 (図 6.11、6.12) でピーク値の 20 % 以下のエントリーとの合計を、MIP 通過の条件を満たす全エントリーに対する割合で示す。ただし、シグナルの tail がピークの 20 % 以下にも存在しているので、ピークの左側をガ

[1] σ=アライメントを行った際の位置のずれの標準偏差

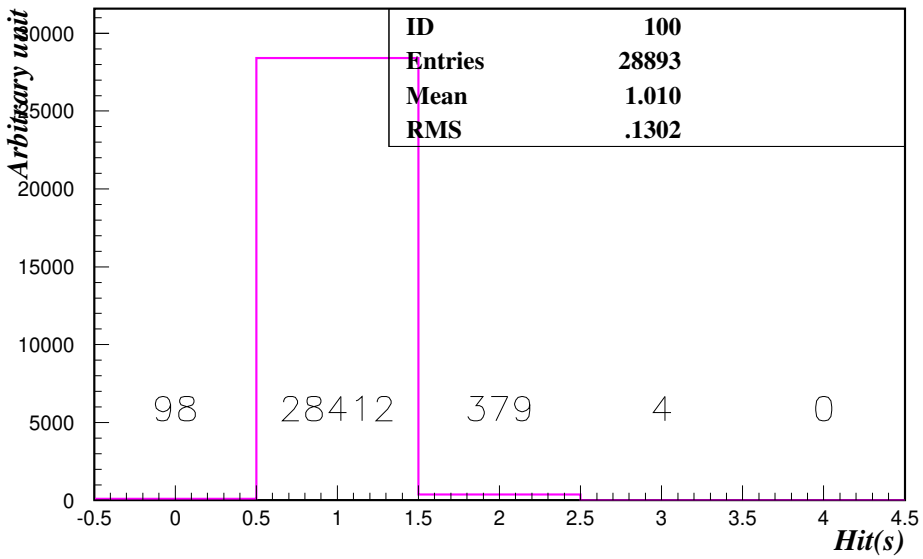


図 6.9: CCD2 に存在する近接ヒット

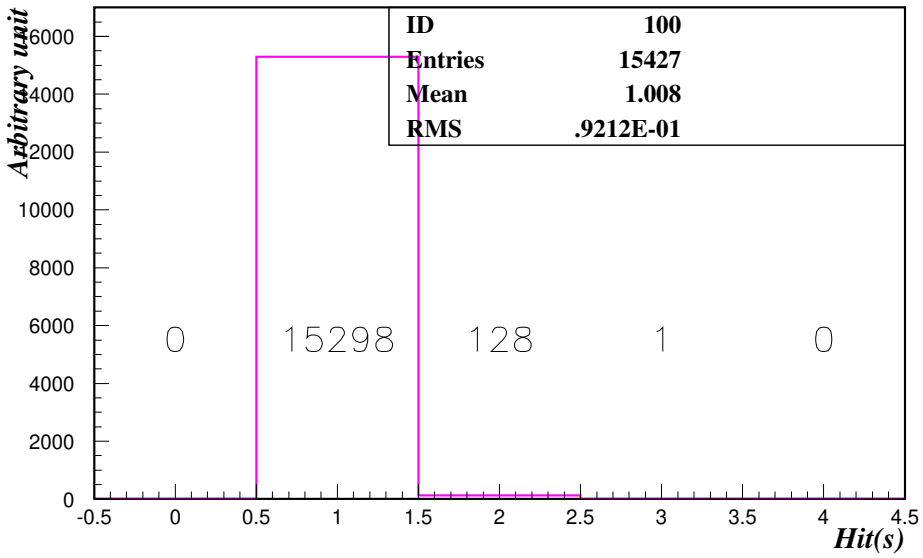


図 6.10: CCD2 に存在する近接ヒット (条件：CCD0 と CCD3 に 1 クラスターしかないとき)

温度 ($^{\circ}C$)	-15	$+5$
非検出効率 (%)	$0.00 \pm 0.03(stat.) \pm 0.04(sys.)$	$0.05 \pm 0.04(stat.) \pm 0.04(sys.)$

表 6.2: 非検出効率

温度 ($^{\circ}C$)	-15	$+5$
エネルギー分解能	0.289 ± 0.005	0.322 ± 0.005

表 6.3: エネルギー分解能の温度依存性

ウス分布でフィットし、統計的に tail に存在するイベントを推定する。これを系統誤差として計算すると、非検出効率は表 6.2 の通りとなる。

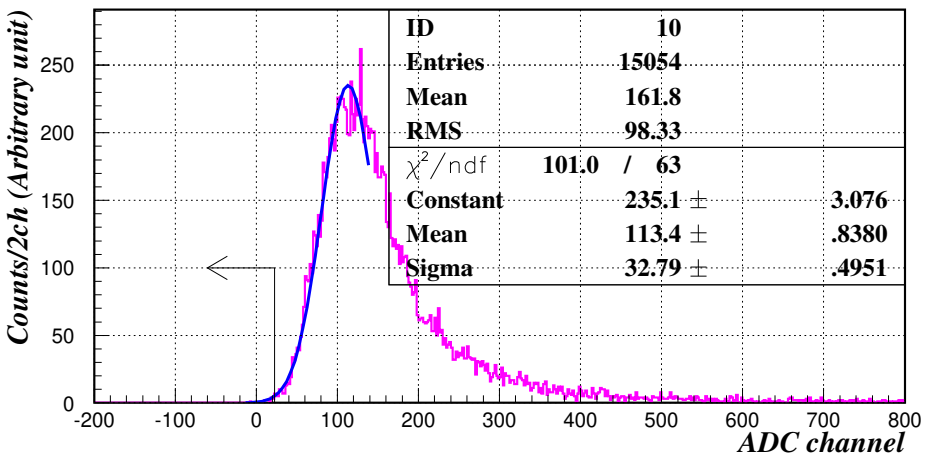


図 6.11: 温度 -15 度 : CCD2 エネルギー分布

6.4 エネルギー分解能 (浜松ホトニクス社製 CCD : 有感層 10 μm)

スペクトルのピーク値を μ、分布の幅を σ とおくと、エネルギー分解能は

$$E_{resolution} = \frac{\sigma}{\mu} \tag{6.1}$$

で与えられる。図 6.11、6.12 で得られる、 μ 、 σ を用いてそれぞれの温度におけるエネルギー分解能を表 6.3 に示す。

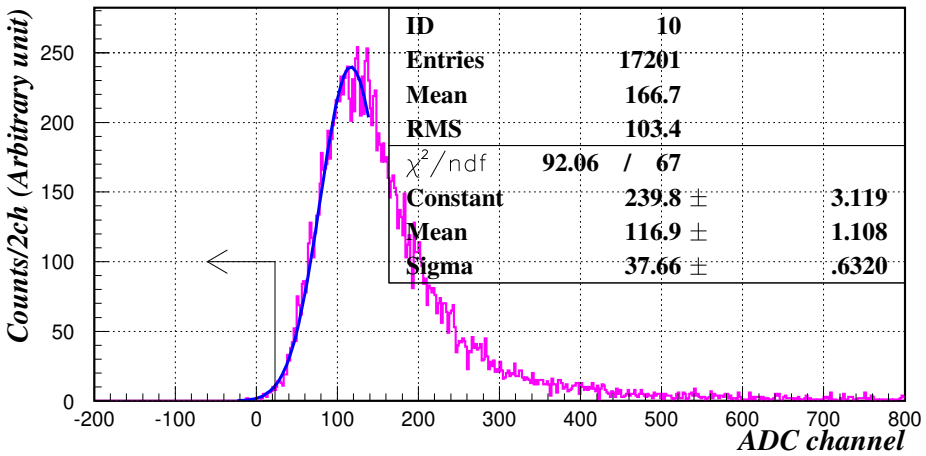


図 6.12: 温度 +5 度 : CCD2 エネルギー分布

6.5 位置分解能 (浜松ホトニクス社製 CCD : 有感層 10 μm)

前回のテストでは、MIP が CCD 素子のパッケージで多重散乱を起こす効果が無視できず、その寄与を差し引くためシミュレーションを行い、そこから CCD 素子固有の位置分解能を得た。

今回のテストでは位置分解能の入射粒子運動量依存性から CCD 素子固有の位置分解能を見出すことが可能である。

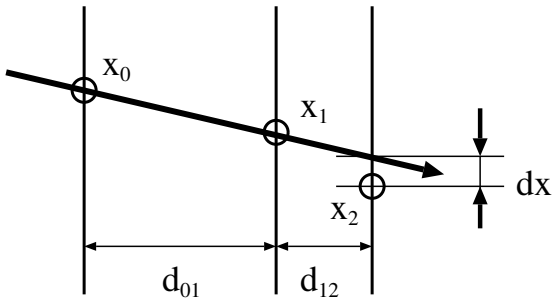


図 6.13: residual

図 6.13 のように、CCD0 と CCD1 からの CCD2 への外挿点と実際のクラスターの位置とのずれを見る。クラスタリングは 2×2 で行われた。クラスターの位置の X 座標は次の式で与えた[2]。

$$X_{cluster} = \left[1 - \left(1 - \frac{LocalPeak \text{の隣の } ADCchannel}{LocalPeak \text{の } ADCchannel}\right)^5\right] \times 0.5 \tag{6.2}$$

[2]付録 C 参照

クラスターの位置と外挿点の位置の差は、

$$dx = X_2 - \left(X_1 + \frac{X_1 - X_0}{d_{01}} d_{12} \right) \tag{6.3}$$

で与えられる。Y 座標に関しても同様である。この dx、dy の分布は図 6.14 である。但し、double gauusian でフィットを行っている。

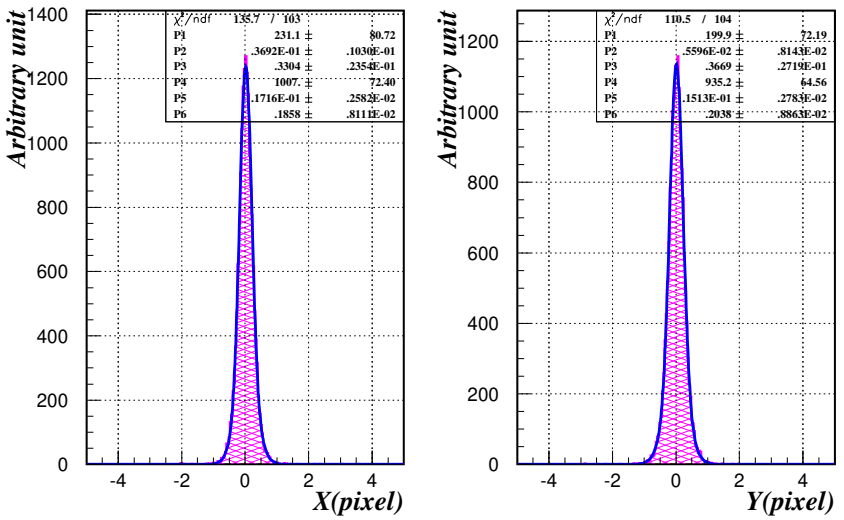


図 6.14: 位置分解能 (2.0 GeV/c) : double gaussian でフィット

ここで、ビームの運動量が 2.0 GeV/c のときのクラスターの電荷量に対する local peak の電荷量の割合を見てみる (図 6.15)。図 6.15 において横軸が 1 の場合はクラスターの総電荷が 1 ピクセルに収まっていることを意味する。

MIP のシグナルが 1 ピクセルに収まるときの位置分解能はいわゆる「 on-off 法 」により、ピクセル幅 24 μm の $1/\sqrt{12}$ $(= 0.29)$ 程度となる。しかし、隣接するピクセルに電荷量がしみだしている場合は、重みをつけて位置を出すことができるため、一般に「 on-off 法 」よりも正確な分解能が得られる。

図 6.15(下) のように、クラスターに対する local peak の割合が

- 0.8 以上
- 0.6 以上 0.8 未満
- 0.6 未満

の 3 つの領域に分けてそれぞれ double gauusian でフィットを行ってみると図 6.16 のようになる。これらをエントリー数で規格化して linear と log のスケールで表すと図 6.17 になり、ヒストグラムの高さから cut 1 よりも cut 3 のほうが太い分布である事が読み取れる。以上より、電荷が 1 ピクセルに集まる傾向を示す時は $1/\sqrt{12}$ の成分が混入し、結果として位置分解能が悪化することを確認した。

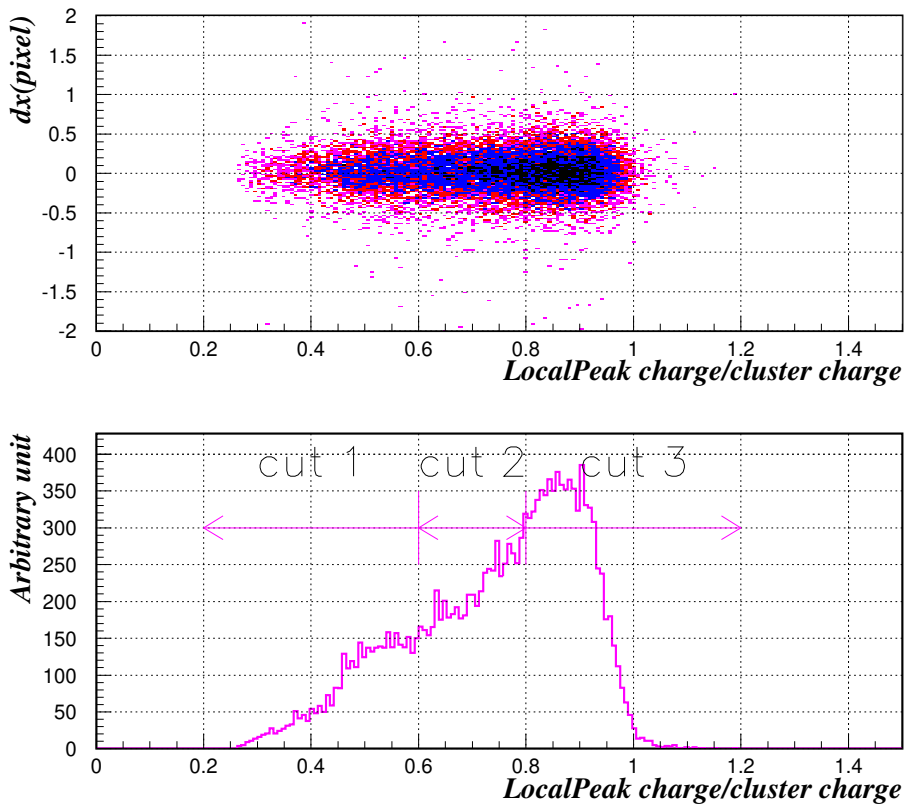


図 6.15: クラスター総電荷量に対する local peak の電荷量の比
(上)：CCD の X 軸方向の分解能との相関、(下)：(上) の投影と分布のカット領域

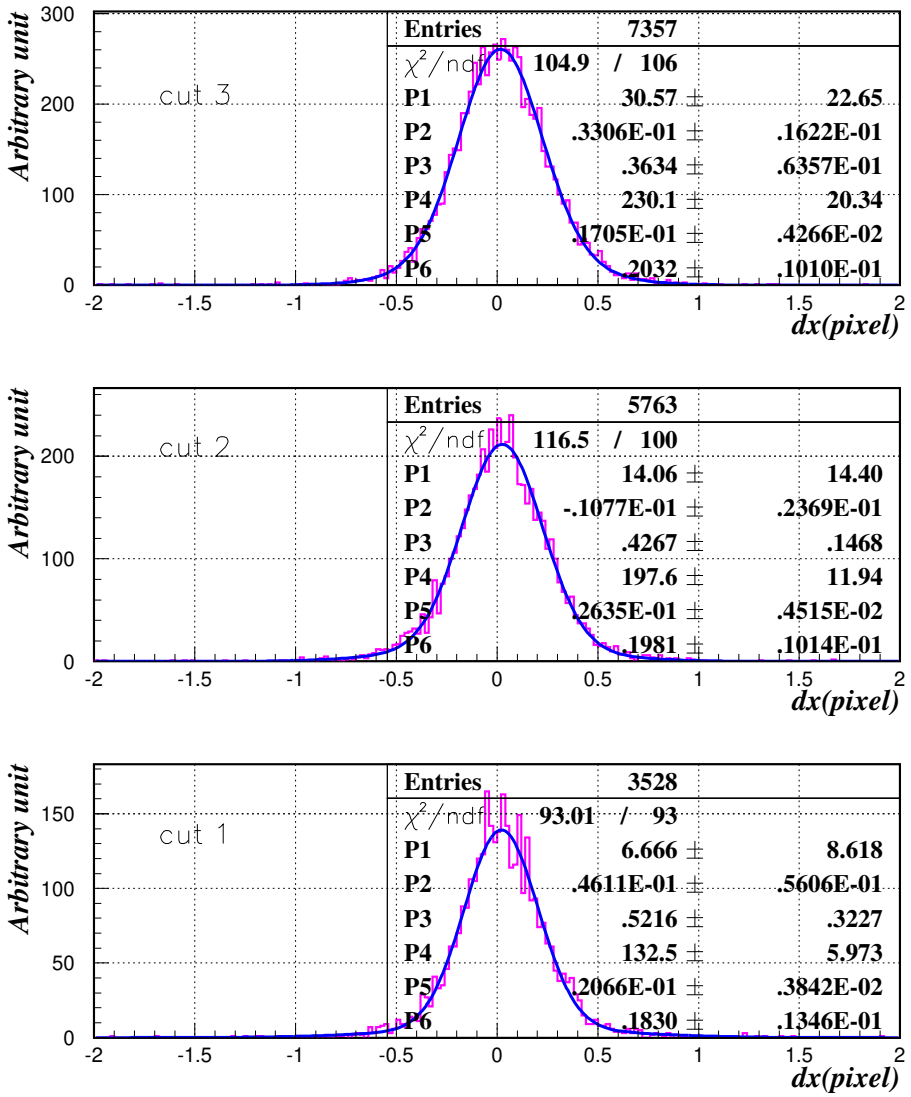


図 6.16: カット領域毎の residual 分布

P1 ~ P3 : 裾付近を特徴づけるガウス分布のパラメータ、P4 ~ P6 : ピーク付近を特徴づけるガウス分布のパラメータ、cut3 では裾付近のパラメータ (P3) に $1/\sqrt{12}$ の成分が見えている。

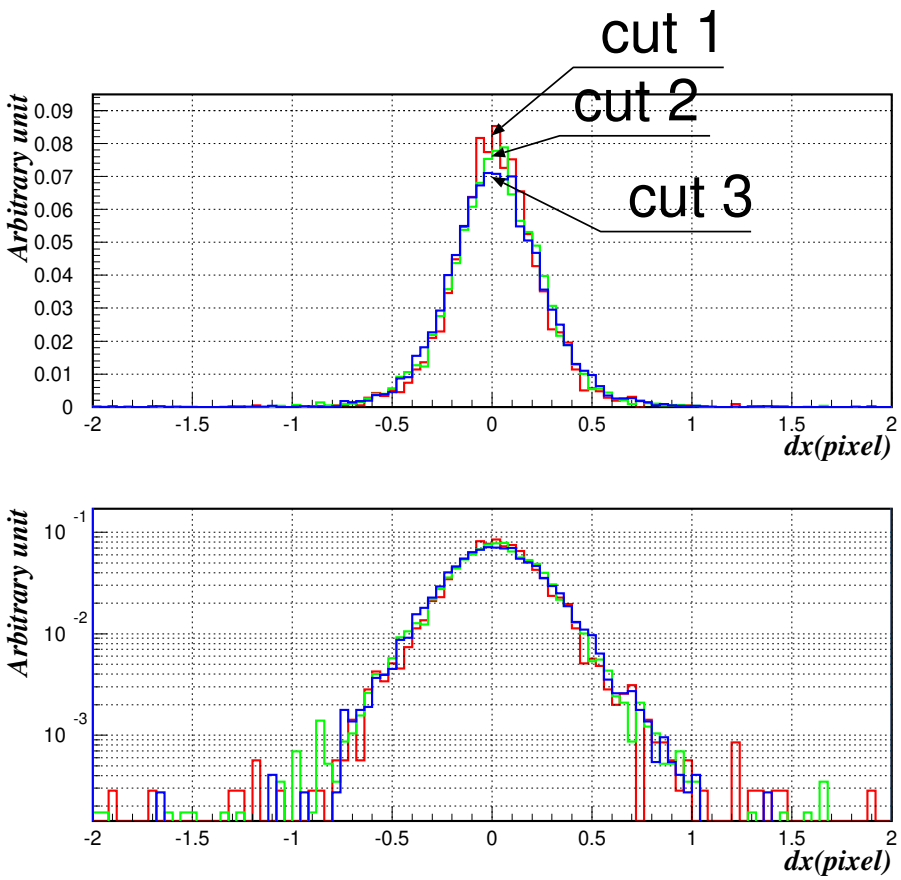


図 6.17: それぞれのカット領域をエントリー数で規格化し、重ねて表示

(上)：linear 表示、(下)：log 表示。local peak の割合が増えると位置分解能が悪化する傾向が見られる。

荷電粒子の散乱については、今回の実験のように大角度の散乱が少ないと期待される場合、その分布はガウス分布で近似でき、その広がりは、

$$\theta_0 = \frac{13.6(MeV)}{\beta cp} z \sqrt{\frac{L}{L_R}} \left[1 + 0.038 ln \left(\frac{L}{L_R} \right) \right] \tag{6.4}$$

で表される [10]。L/L_R は、物質の輻射長で測った厚さを示す量である。式 6.4 は運動量を無限大にすると散乱の効果は極限として 0 になる。

測定される位置分解能は、CCD 固有の位置分解能と式 6.4 の重ね合わせであるから、

$$\sigma^2_{observe} = \sigma^2_{scattering} + \sigma^2_{intrinsic} \tag{6.5}$$

と書ける。

double gauusian によるフィットより、各成分のエントリー数 (面積) で重みをつけて σ の平均を求め、運動量依存性をプロットすると図 6.18 のようになった。また、分布の R.M.S. [3]を用いて運動量依存性をプロットすると図 6.19 のようになった。 これらは予測される傾向を良く示しており、式 6.5 でフィットする

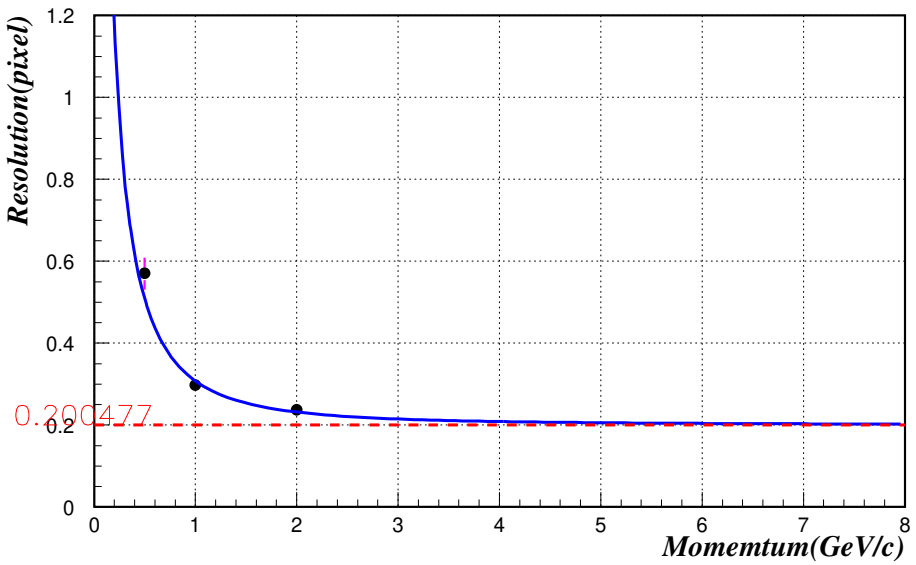


図 6.18: 位置分解能の入射粒子運動量依存性、面積で重みをつけた σ の平均を採用

と $\sigma_{intrinsic}$ は、

$$0.20 \pm 0.01 \ pixel \quad (\text{重みつき}\sigma\text{の場合}) \tag{6.6}$$

$$0.24 \pm 0.01 \ pixel \quad (R.M.S.\text{の場合}) \tag{6.7}$$

であった。これらはそれぞれ 4.8 μm、5.8 μm に相当する。JLC 実験では 7.2 μm を要請しているが、今回の解析で目標値を十分に上回る結果を得たことになる。

[3]ガウス分布の太い成分の 3σ でカットしている。

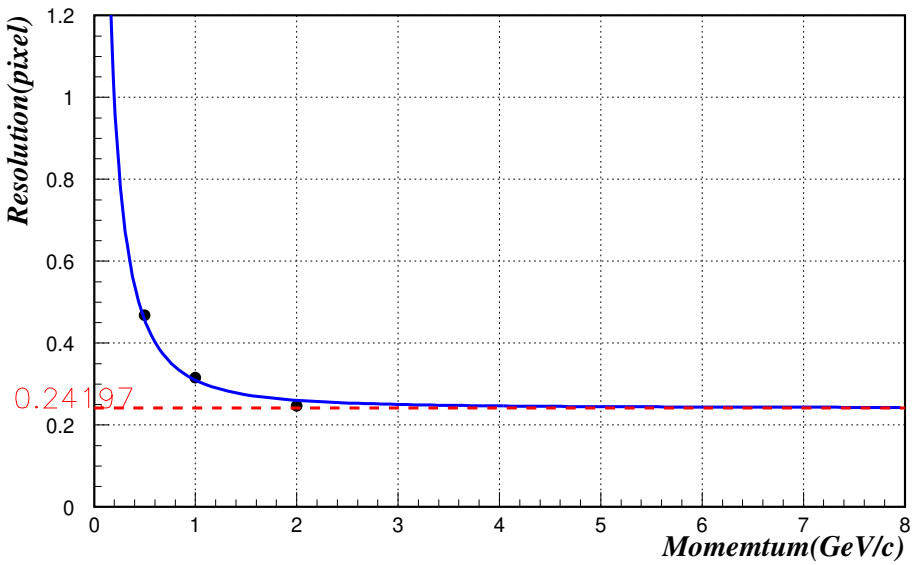


図 6.19: 位置分解能の入射粒子運動量依存性、分布の R.M.S. を採用

さらに、ここで得られた位置分解能には、CCD0 と CCD1 から飛跡を外挿する際にそれらの CCD が持っている分解能の寄与が含まれている。得られた分解能を σ とし、CCD0 から CCD2 までの固有の位置分解能を σ_0、 σ_1、 σ_2 とおくと式 6.3 より、

$$(\sigma)^2 = (\sigma_2)^2 + \left(1 + \frac{d_{12}}{d_{01}}\right)^2 (\sigma_1)^2 + \left(\frac{d_{12}}{d_{01}}\right)^2 (\sigma_0)^2 \tag{6.8}$$

を得る。ここで、図 6.8 の Z 軸補正より、

$$\frac{d_{12}}{d_{01}} = 0.228 \tag{6.9}$$

を代入する。また、これら 3 つの CCD は同じタイプのものなので固有の位置分解能は $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2$ とすることができる。これを σ_{HPK} と置くと、結局、

$$\sigma_{HPK} = \frac{\sigma}{\sqrt{2.56}} \tag{6.10}$$

となり、解析結果に適用すると浜松ホトニクス社製 CCD の位置分解能は

$$\sigma_{HPK} = 3.0 \pm 0.2\ \mu m \quad (\text{重みつき}\sigma\text{の場合}) \tag{6.11}$$

$$\sigma_{HPK} = 3.6 \pm 0.2\ \mu m \quad (R.M.S.\text{の場合}) \tag{6.12}$$

であることが分かった。

6.6 暗電流特性 (EEV 社製 CCD)

今回のビームテストでは EEV 社製 CCD 素子も使用し、その暗電流特性を調査した。EEV 社製 CCD はセンサー部が 2 つの領域に分けられているため解析も領域毎に行った。

ピクセル毎に暗電流の大きさを調べた場合、浜松製と同様に非一様性が観測される。図 6.20 に暗電流のスペクトルを示すが、上段がセンサー全体の暗電流分布である。これを領域毎にわけたものが中段と下段である。但し、領域の境界から 50 ピクセル以内は解析の対象から除いている。

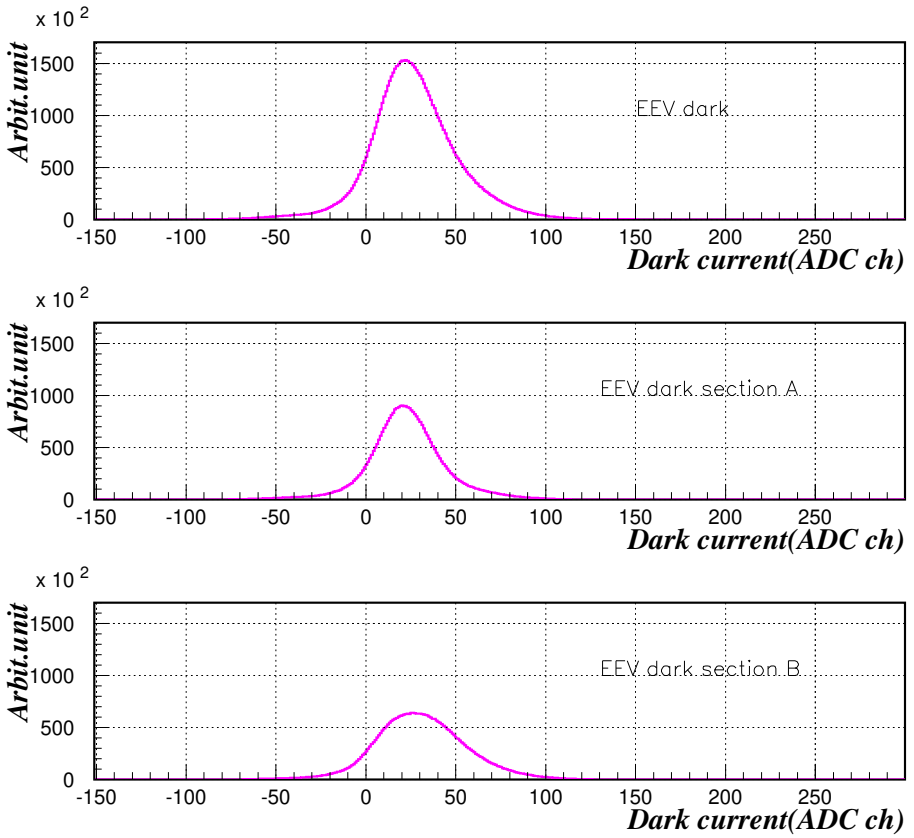


図 6.20: EEV 社製 CCD の暗電流のスペクトル
section A と B で暗電流の特性が違う

図 6.21 は領域毎の暗電流の温度依存性を示したものである。また、この暗電流の温度依存性を浜松製で規格化すると図 6.22 のようになり、暗電流の大きさはオーダーとしては浜松製と比べて同程度に抑えられているが、平均で約 30 % 程 EEV 社製のほうが多いことがわかる。

前回のテストと同様に暗電流特性から回路ゲインと読みだしノイズを得ることができる (図 6.23、表 6.4)。浜松ホトニクス社製と比べると回路ゲインは約半分であった。また、読みだしノイズは 8 mV 程度あり、第 1 回テストにおける浜松ホトニクス社製の約 5 倍のノイズレベルであることがわかった。

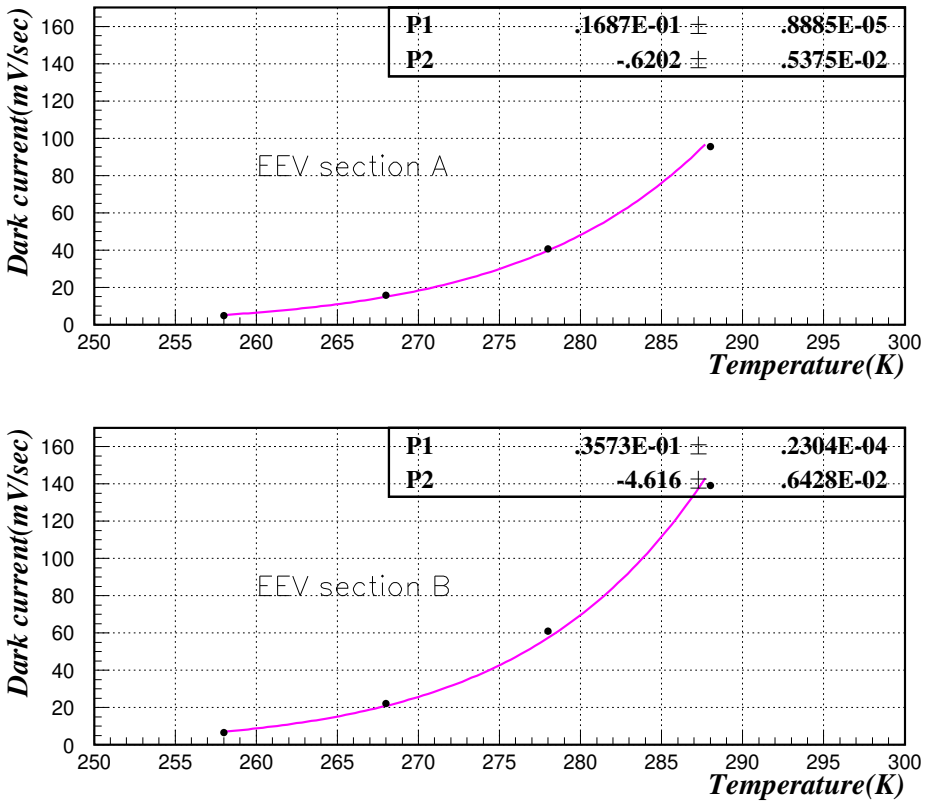


図 6.21: EEV 社製 CCD の暗電流の温度依存性：点は測定点、実線はフィットの結果

	section A	section B
Gain (μ/e^-)	44.2 ± 22.5	55.1 ± 15.5
読み出し *noise* (mV)	8.2 ± 1.6	8.4 ± 1.6

表 6.4: 回路ゲインと読みだしノイズ (EEV 社製)

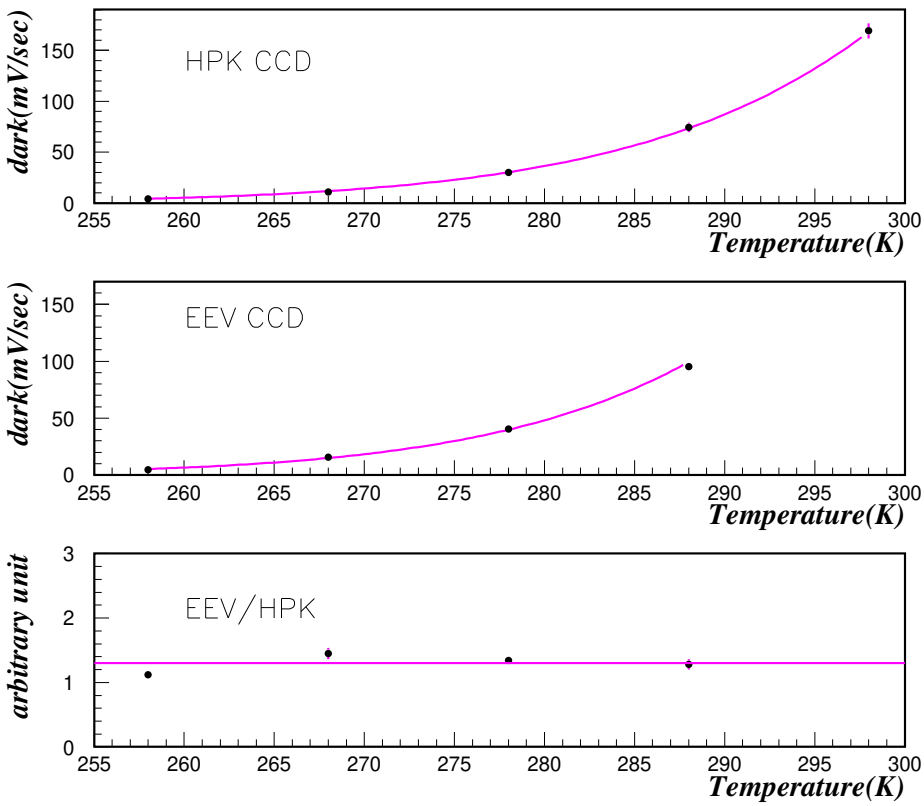


図 6.22: 暗電流の温度依存性：浜松ホトニクス社製と EEV 社製の比較
(下) 実線は 4 点の平均

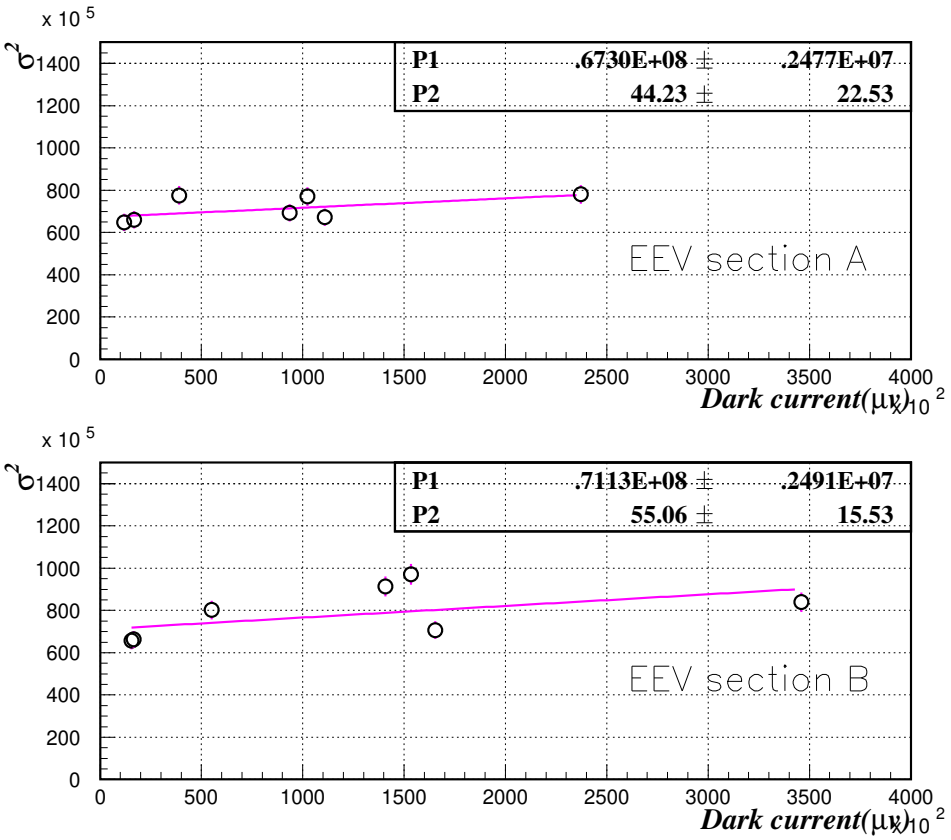


図 6.23: 暗電流特性による回路ゲインと読みだしノイズの導出
実線は直線によるフィットの結果

6.7　シグナル・ノイズ比 (EEV 社製、浜松ホトニクス社製混合 RUN)

EEV 社製 CCD と浜松ホトニクス社製 CCD を同時に使用した RUN で、$-15°C$ でのビーム RUN を用いて、ビーム上流側から 3 枚の CCD のシグナル・ノイズ比 (S/N 比) を示す。

EEV 社製 CCD から最も遠い位置に設置されている浜松ホトニクス社製 CCD0 の S/N 比は図 6.24 である。これに対して、EEV 社製 CCD と向かい合っている浜松ホトニクス社製 CCD1 の S/N 比は図 6.25 である。これら 2 つの検出器は全く同じ特性でありながら S/N 比で比較すると明らかに CCD1 のほうが悪い。EEV 社製 CCD の S/N 比は図 6.26 である。

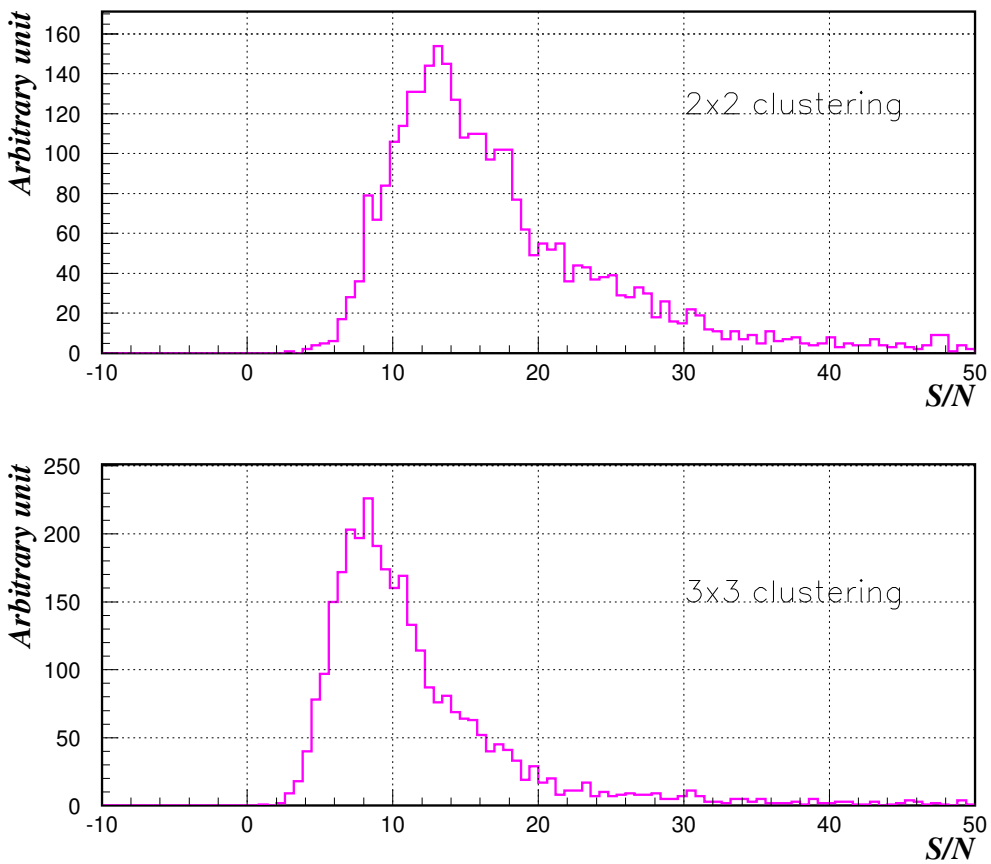


図 6.24: CCD0(浜松ホトニクス社製) の S/N 分布

6.8　EEV 社製 CCD と浜松ホトニクス社製 CCD のクロック干渉

EEV 社製 CCD を駆動する際は、EEV 社から供給される駆動回路を用いたために、浜松ホトニクス社製と異なる基本クロックを必要とした。さらに、EEV 社製 CCD とそれをはさむように配置された浜松ホト

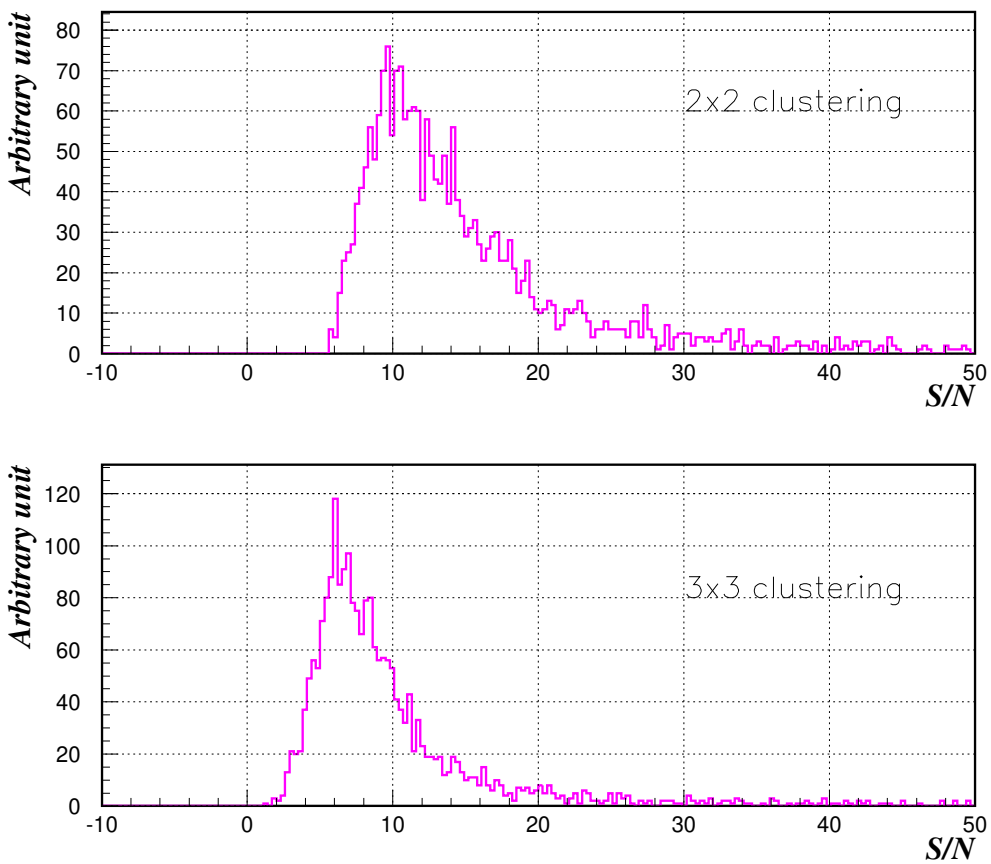


図 6.25: CCD1(浜松ホトニクス社製) の S/N 分布

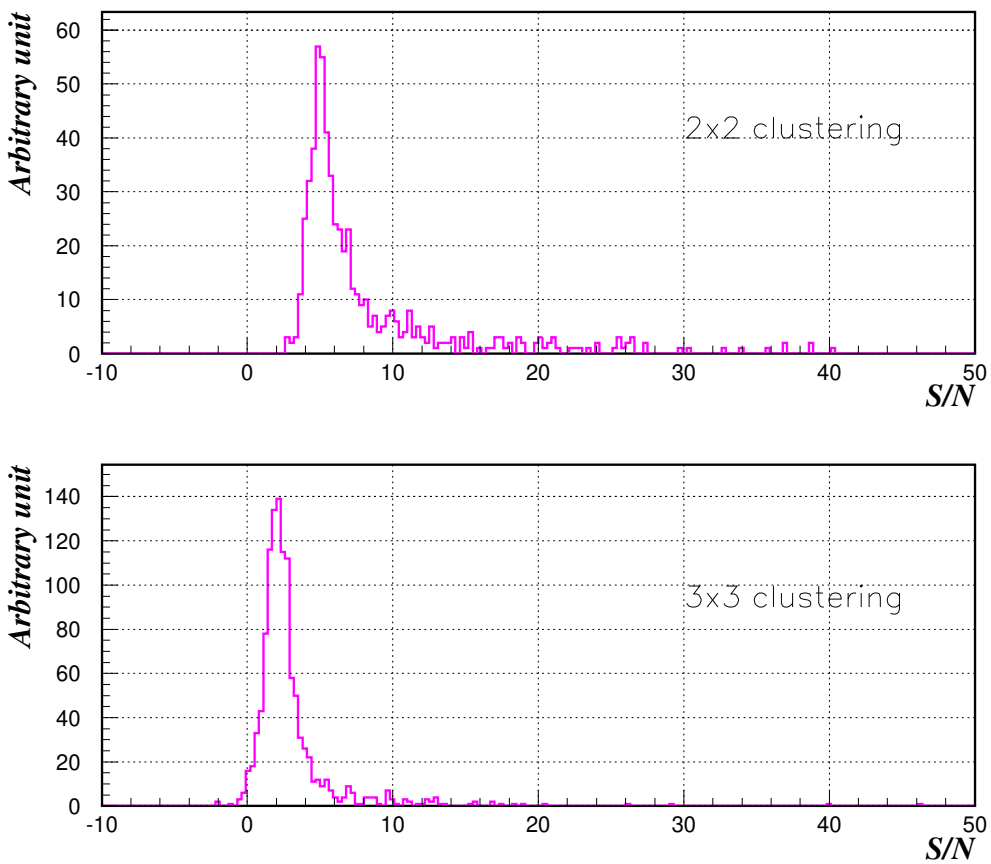


図 6.26: CCD2(EEV 社製) の S/N 分布

	CCD0	CCD1
$Gain\ (\mu/e^-)$	85.0 ± 8.4	84.2 ± 12.0
読み出し $noise$ (mV)	1.8 ± 0.81	1.7 ± 0.77

表 6.5: 回路ゲインと読みだしノイズ (浜松ホトニクス社製のみでセットアップの場合)

	CCD0	CCD1
$Gain\ (\mu/e^-)$	83.1 ± 6.7	75.5 ± 10.4
読み出し $noise$ (mV)	1.9 ± 0.90	2.6 ± 0.96

表 6.6: 回路ゲインと読みだしノイズ (浜松ホトニクス社製と EEV 社製の混合セットアップの場合)

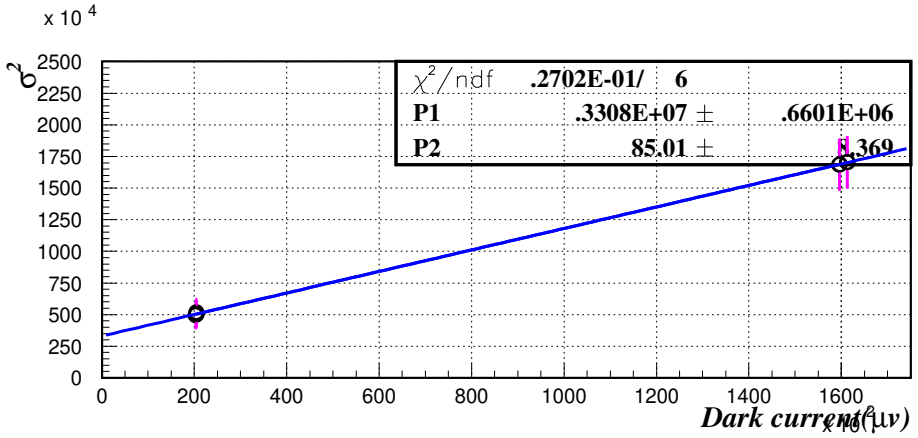
ニクス社製 CCD は、お互いの同期していないクロックが回路にノイズを与えて、実験を困難にした。

図 6.27 は 4 層とも浜松ホトニクス社製で構成された場合の、CCD0、CCD1 の回路ノイズと回路ゲインを導出するものである。その結果は表 6.5 の通りである。これに対して、図 6.28 は 3 層目に EEV 製を置いた時のものである。

得られた回路ノイズと回路ゲインを表 6.6 に示す。2 つの表より、1 層目 (CCD0) の回路ノイズは同程度であるが、EEV と隣り合っている 2 層目 (CCD1) の回路ノイズは約 2 倍になっていることがわかる。

EEV 社製と浜松ホトニクス社製と混在させて測定を行う場合、共通の基本クロックで駆動することで、このようなノイズの問題を回避できると思われる。これは、今後の課題である。

CCD0



CCD1

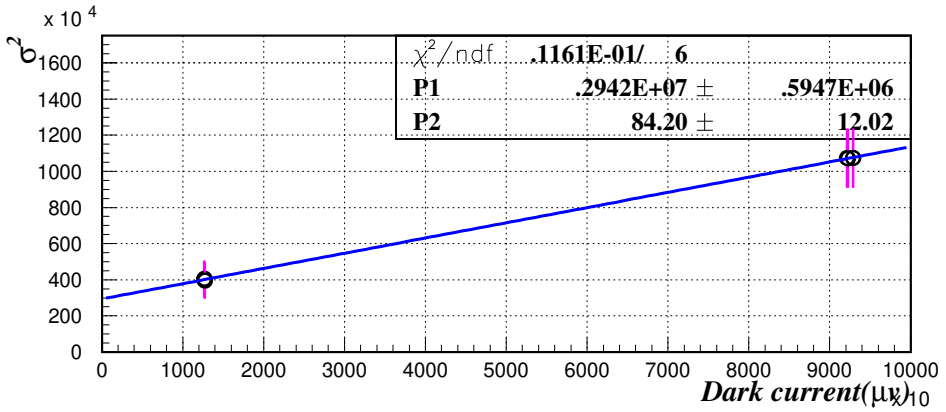
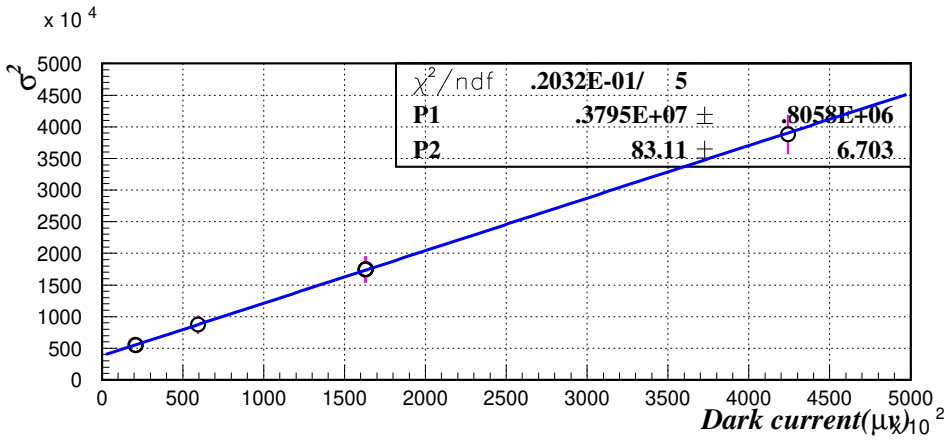


図 6.27: 浜松 CCD のみでのセットアップの場合
すべてのクロックが同期しているので、回路ノイズは規格範囲内である。

CCD0



CCD1

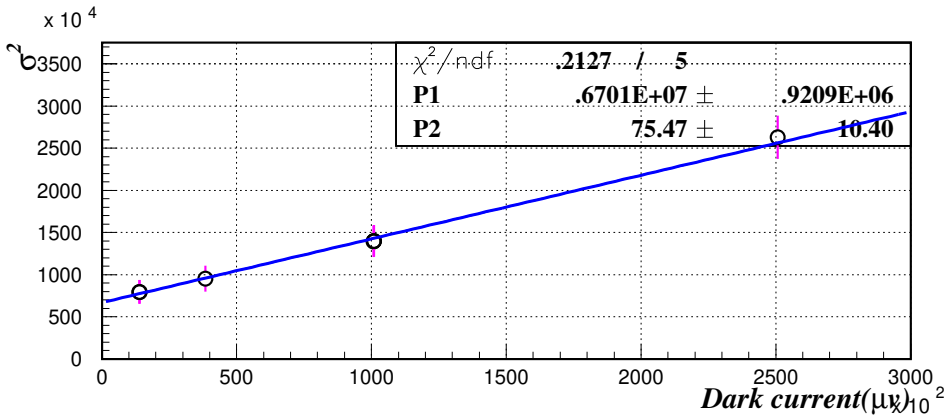


図 6.28: 3 層目に EEV 社製 CCD を置いた場合
CCD1 に EEV 社製 CCD(CCD2) からのノイズが乗っていると思われる。

第7章　まとめ

7.1　JLC実験用崩壊点検出器

JLC実験における崩壊点検出器は常温付近での運転を想定しており、また、検出器に要請されている位置分解能は7.2 μm である。

本研究では浜松ホトニクス社製とEEV社製のそれぞれについて、暗電流の特性、及び、高エネルギービーム照射による飛跡検出実験を行った。

7.2　データ収集系

実験に際し、高速ネットワーク、Real Time OSを用いたビームテスト用のデータ収集系の構築を行い、フロントエンドで2 MBytes/secの高速処理能力を持つシステムの開発に成功した。

7.3　浜松ホトニクス社製CCD

まず、$-15°C$ から $+15°C$ までの暗電流特性が詳しく解析された。それによると、MPP動作モード下でCCD素子の暗電流温度依存性がSRHモデルに従っていることが確認された。また、暗電流の大きさと統計的な揺らぎの幅から回路ゲインと回路ノイズを求めることに成功した。

次に、実際に高エネルギービームを照射した場合、有感層10 μm の素子について、温度$0°C$付近において、10程度のシグナル・ノイズ比で最小イオン化粒子の検出に成功した。この際、シリコン中1 μm あたりの平均電子発生数はピークで60 e^-、平均で100 e^- であった。また、1 frameの転送周期を4秒から1.3秒へ変えるとシグナル・ノイズ比の向上がみられた。

非検出効率は、第2回ビームテストでほぼ0であることが確認された。

オフラインによるアライメントでXY方向のずれのみを考慮した場合、検出器固有の位置分解能は約8 μm であった。

ビーム軸まわりの相対的な回転・Z軸方向の補正を考慮し、入射粒子の運動量依存性より位置分解能を評価した場合、約5 μm となった。さらに、各CCDが持つ位置分解能の伝播を考慮するとCCD単体としての位置分解能は約3 μm であることが分かった。これは、JLCが要求している位置分解能を達成している。また、SLD実験におけるVXD3の位置分解能は4.6 μm と報告されている。我々の検出器は開発研究のためのプロトタイプであり、一方でVXD3は実験用の実機であるから、数字だけでの比較はできないが、今回使用した24 μm ピクセルサイズの浜松ホトニクス社製CCDは、世界最高レベルの位置分解能をもつ飛跡検出器を実現した。

7.4 EEV 社製 CCD

常温付近での暗電流の特性を調査した。浜松ホトニクス社製と比べて暗電流が 30% ほど多いことが分かった。暗電流の温度依存性は SRH モデルで説明でき、暗電流とそのふらつきの幅から回路ゲインと回路ノイズを求めることにも成功した。外部からのノイズを遮断できなかったためシグナル・ノイズ比が $-15°C$ でも 10 以下と低かった。すべての検出器の基本クロックを共通化することでノイズの問題は回避できるものと思われる。

7.5 結論・今後

浜松ホトニクス社製 CCD 素子は JLC 実験用崩壊点検出器のデバイスとして、暗電流・位置分解能の点からは十分に応用可能であると言える。

今後は EEV 社製 CCD について質の良いビームデータを蓄積し、浜松ホトニクス社製との比較を行う必要がある。

一方で、放射線損傷の影響を調査する必要がある。JLC 実験で崩壊点検出器が 1 年間に被曝する量はおよそ 15 kRad である。放射線によってシリコンの結晶中に格子欠陥が発生し、電荷の一部が転送中にトラップされて電荷転送効率 CTE(Charge Transfer Efficiency) を悪化させる。その度合はトラップ準位のエネルギーおよび密度、温度、そして CCD の転送速度に依存する。常温で CCD 素子を崩壊点検出器へ応用するためにはこの項目をクリアしなければならない。

付 録A　MPP動作モード

A.1　MPP動作モード

MPP(Multi Pinned Phase) 動作は別名反転 (Inverted) 動作とも呼ばれ、CCD の電極を構成する MOS 構造のすべてのゲート下を反転状態にしておくことで実現する。

MOS 構造の半導体に大きな逆バイアスをかけると、シリコン-シリコン酸化物界面下のエネルギーバンド状態は valence band の方が conduction band よりフェルミエネルギーに近づく。つまりこの状態はシリコン-シリコン酸化物界面下では自由ホールが蓄積され、p 型半導体と同じ状態が再現されている。このような、半導体の型が反転している状態を「反転状態」と呼ぶ。

図 A.1 は、MPP 動作時の電極下の状態を表している。反転状態のため、シリコン-シリコン酸化物界面下には、ホールが集められている。界面付近で熱励起により発生した自由電子は反転相にあるこれらの自由ホールと再結合し、暗電流には寄与しない。これが、MPP 動作モードの暗電流抑制の機構である。

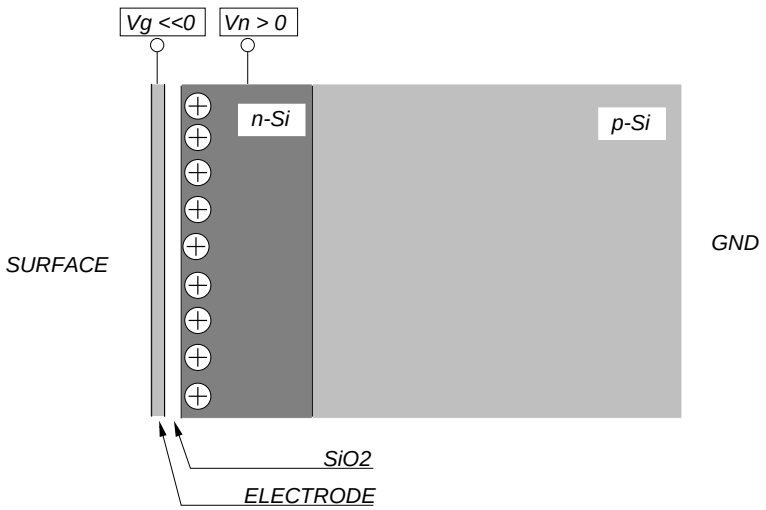


図 A.1: MPP 状態のピクセル

付 録B　SRHモデル

B.1　SRHモデル

半導体内部の欠陥は、結晶格子の規則正しい周期性を破壊し、禁制ギャップにエネルギー準位を導入する。このような媒介的なエネルギー準位を踏台にしておこる電子とホールの再結合-発生過程の理論は Shockley, Read, Hall によって完全に確立されている (SRH モデル)。

媒介中心の作用による再結合の割合 U は

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

と表すことができる。ここで、

$$\begin{aligned}
p &: \text{自由キャリアとなるホールの密度} \\
n &: \text{自由キャリアとなる電子の密度} \\
n_i &: \text{真性キャリア濃度} \\
n_1 &= N_c exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_B T}\right) \\
p_1 &= N_v exp\left(-\frac{E_t - E_v}{k_B T}\right) \\
\tau_{p0} &: \frac{1}{v_p s_p N t} \\
\tau_{n0} &: \frac{1}{v_n s_n N t} \\
N_c &: \text{電子の有効状態密度} \\
N_v &: \text{ホールの有効状態密度} \\
v_p &: \text{ホールの熱速度} \\
v_n &: \text{電子の熱速度} \\
s_p &: \text{ホールの捕獲断面積} \\
s_n &: \text{電子の捕獲断面積} \\
N_t &: \text{トラップの密度} \\
T &: \text{絶対温度} \\
k_B &: \text{ボルツマン定数} \\
E_v &: \textit{valence band} \text{の上端のエネルギー} \\
E_c &: \textit{conduction band} \text{の下端のエネルギー}
\end{aligned} \tag{B.2}$$

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見てみる。温度依存を持つ項は、

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

がある。但し、

$$\begin{aligned} m_p &: \text{ホールの有効質量} \\ m_n &: \text{電子の有効質量} \\ E_g &: \frac{E_c - E_v}{2} = \text{バンドギャップ } (\sim 1.16eV) \end{aligned} \tag{B.4}$$

また、シリコンの場合 $m_n = 0.33m$、$m_p = 0.5m$、$m =$ 電子の質量 である。空乏層であることから、

$$n \ll n_i, p \ll n_i, n \ll n_1, p \ll n_1 \tag{B.5}$$

となる。式 B.1 は、

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

と近似できる。ここで、

$$\tau_{n0} \sim \tau_{p0} \equiv \tau = \frac{1}{\sqrt{\frac{3k_B T}{m}} s N_t} \tag{B.7}$$

$$m_n = m_p = m \tag{B.8}$$

$$s_p = s_n = s \tag{B.9}$$

と近似すると、

$$N_c \simeq N_v \tag{B.10}$$

なので、式 B.1 は

$$U = -s \cdot m \cdot N_t \sqrt{3} (\frac{2\pi}{h^2})^{3/2} (k_B T)^2 \frac{1}{exp\left(-\frac{E_c - E_t}{k_B T}\right) + exp\left(-\frac{E_t - E_v}{k_B T}\right)} \tag{B.11}$$

となる。トラップを経由する暗電流のほとんどはバンドギャップの中央付近のトラップによる [9] ものだから、式 B.11 で、

$$E_t = \frac{E_c + E_v}{2} = \frac{E_g}{2} \tag{B.12}$$

とおくと、

$$U \propto T^2 exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \tag{B.13}$$

が得られる。

付 録C　クラスター中心

C.1　クラスター中心

クラスタリングを行いそのクラスターの中心を求める場合、

- local peak を中心として採用する「on-off 法」
- 算術的重心を採用する「重心法」
- 電荷収集の機構に対応した関数による導出

以上のような方法が考えられる。

MIP のシグナルが 1 ピクセルに収まるときの位置分解能はいわゆる「on-off 法」により、ピクセル幅 24 μm の $1/\sqrt{12}$ $(= 0.29\ pixel)$ 程度となる。しかし、隣接するピクセルに電荷量がしみだしている場合は、重みをつけて位置を出すことができるため、一般に「on-off 法」よりも正確な分解能が得られる。

第 2 回ビームテストの解析における重心法に基づく位置の検出と位置分解能の評価で、図 C.1 のようにビームの入射角度と位置分解能との間に相関がみられた。

そこで、この相関を補正するための経験的な式[1]

$$X_{cluster} = \left[1 - \left(1 - \frac{LocalPeak\text{の隣の }ADCchannel}{LocalPeak\text{の }ADCchannel}\right)^5\right] \times 0.5 \tag{C.1}$$

を用いて粒子の通過位置を決定し、図 C.1 と同様のプロットを作ると図 C.2 のように、2 者の相関を補正することが出来た。

[1]式 6.2 と式 C.1 は同じ。[14]

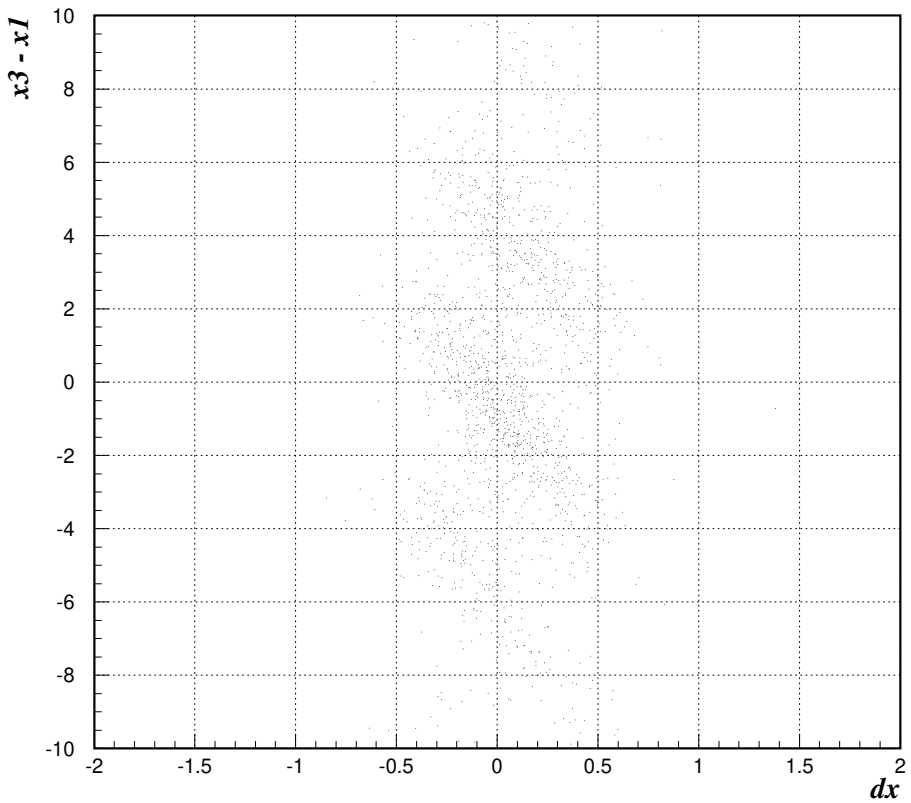


図 C.1: 重心法による粒子の入射角度 (縦軸) と位置分解能 (横軸) の相関

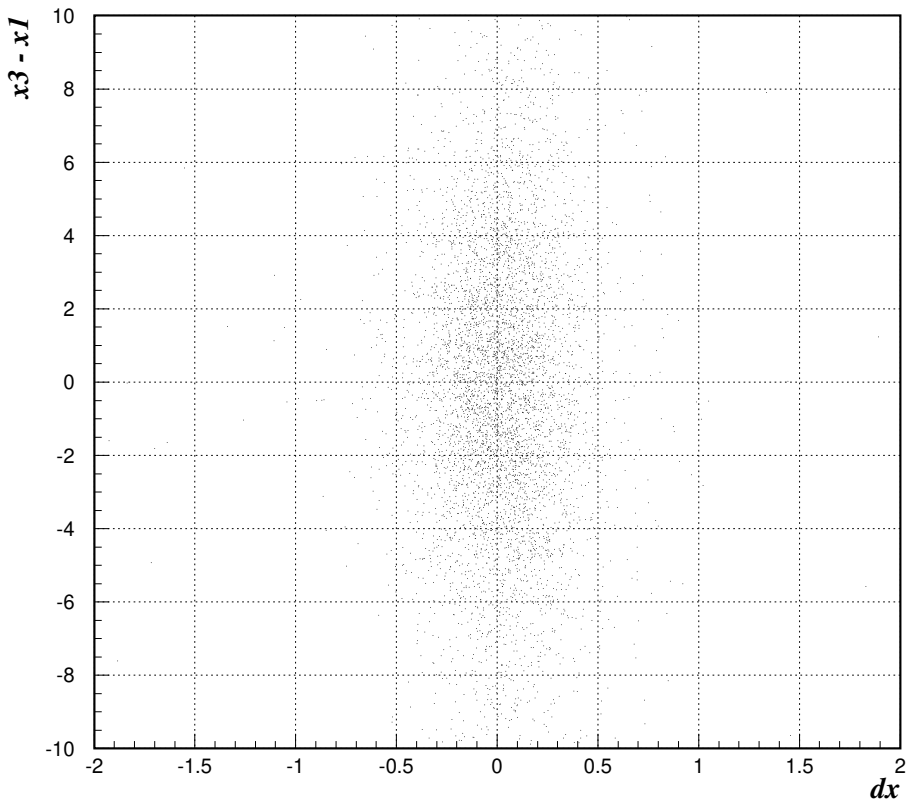


図 C.2: 式 6.2 による粒子の入射角度 (縦軸) と位置分解能 (横軸) の相関

付 録D　データ収集系の実装

D.1　ビームテスト用データ収集系

ビームテストにおいて吐き出されるデータ量は、浜松ホトニクス社製 CCD の場合、1 frame につき 約 500 kbyte ある。本研究 (4 枚の CCD を扱う場合) では、2 Mbyte/sec の フロントエンド処理能力を要求された。

我々は高速データ収集システムとして VME ベースのシステムを構築を行った。VME バスは、読みだし及び書き込みが平均 5 Mbyte/sec を実現する (DMA 転送を使えば条件により異なるが 10 ~ 20 Mbyte/sec まであがる)。現時点では、並列処理を行っていないため、使用した ADC の digitization 速度 20 MHz にはおよばないものの、2 Mbyte/sec の throughput を実現した。

このデータ転送速度は Ethernet の限界値に近いことから、実際のビームテストにおいて他実験への影響を避けるため、図 D.1 に示す独立回線を用いたデータ転送を行った。これにより、収集されたデータはオンライン解析を通して、KEK 内 LAN(FDDI) を通って記録媒体へ高速に転送される。

以下ではこのデータ収集ソフトの構築について示す。

D.2　VMEドライバ

VME ボードコンピュータ (HP9000/743rt) で VME バスを利用するためには、バスを扱うデバイスドライバが必要である。Hewlett Packard 系マシンにインストールできるドライバは KEK オンライングループにより開発されており[1]、我々はこれを採用した。

D.3　UNIDAQ

UNIDAQ は日本国内では KEK オンライングループが中心となって開発された UNIX ベースのマシンによってデータ収集を行うためのソフトウェア集合である [13]。我々が使用したのはバージョン 2.3(1995 年 8 月 29 日版) である。

全体としての動作は、NOVA と呼ばれるバッファマネージャを中心に、collector や analyzer や recorder といった各プロセスがデータの受渡しを行うものである。UNIDAQ を構成する主な (必要最低限の) ソフトは次の通りである。

- (NOVA) バッファマネージャ。ローカルホスト用と、ネットワーク用がある。
- (collector) エレクトロニクス系からデータの取得を行う。
- (receiver) ホスト間でデータの受渡しを実現する。
- (analyzer) オンライン解析を行う。PAW を fork している。

[1] gendev1.03_hprt.tar.gz

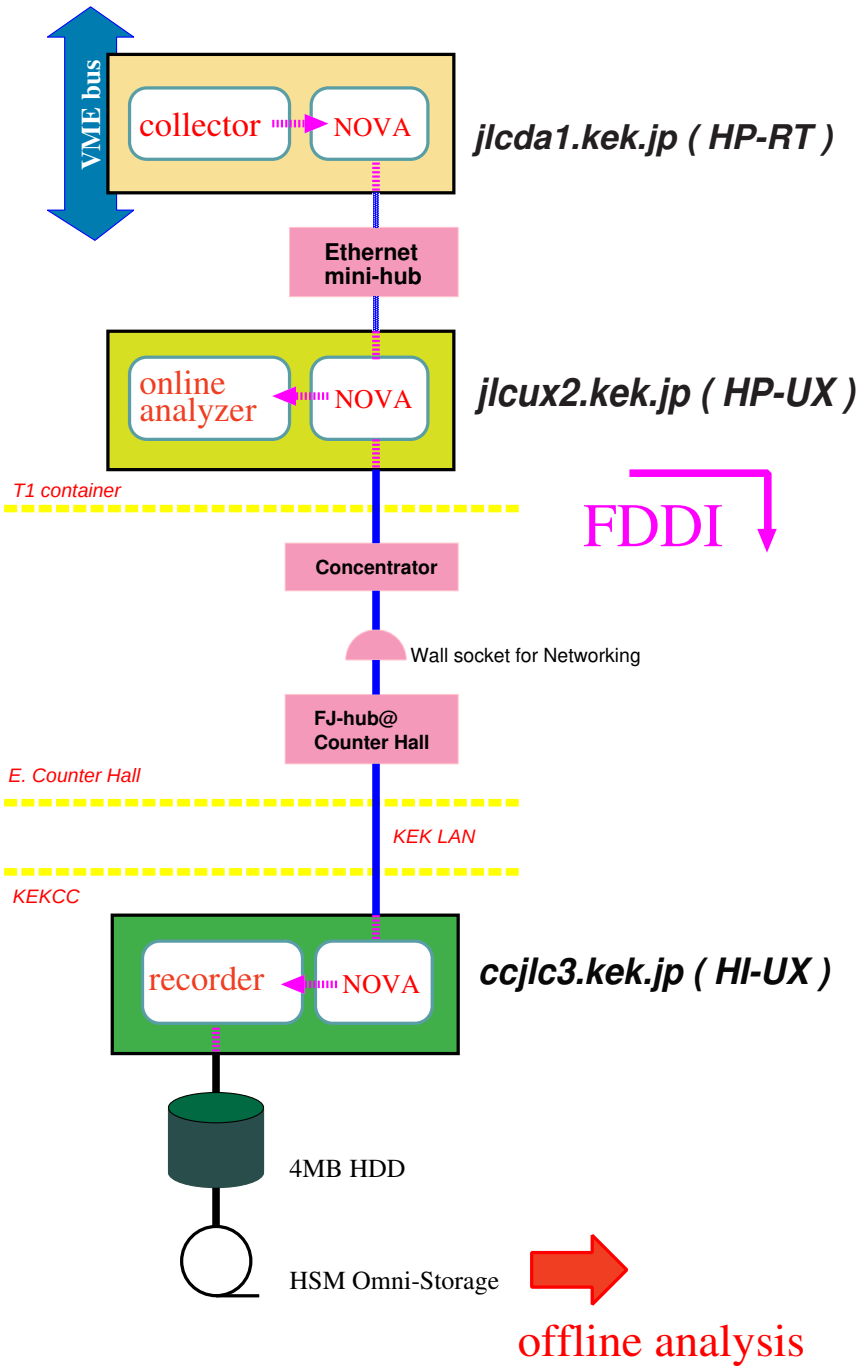


図 D.1: データ収集系構成

- (recorder) データを指定したデバイスに書き込む。

ユーザーがコーディングしなければならないのは collector と analyzer である。

D.4 collector

collector はデフォルトでバッファマネージャとの通信やデータ構造の雛型が与えられているので、ユーザー依存部分のみをコーディングすればよい。具体的には、VME モジュールのメモリ空間へのマッピング、装置の初期化、データのデータの取り込みである。

Tcl/Tk で記述されたグラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) のパネルを通してコントロールが出来るようにコーディングを行った。パネルでは、CCD 素子のタイプ (浜松ホトニクス社製、EEV 社製)・検出器配置順・イメージデータを格納する ADC、ADC や I/O レジスターのコントロールアドレスやデータアドレスを設定できる。これにより、検出器のセットアップが変更になっても RUN のはじめに VME モジュールのメモリ空間への再マッピングやデータ構造の変更を自動的に行うことが出来るようになった。

D.5 receiver

バイトオーダの判定とソートを行う関数[2]にバグが存在する。我々は Hewlett Packard 製またはそれと互換のあるマシンで構築されたので、バイトオーダの判定は必要は無く、関係部分を削除することで完全に回避できた。

D.6 analyzer

analyzer 構築は、PAW を通じて行われるオンライン解析に必要なヒストグラムの定義と PAW マクロを書くことが中心となる。analyzer 本体 (ana_d) は変更の必要がない。

RUN のはじめに collector で生成されたセットアップ情報を参照しデータを適切に展開できるようにした。イベントが発生する毎に FORTRAN で記述されたヒストグラムを扱うプログラムが呼び出される。ヒストグラムはメモリ空間に置かれるが、PAW がこの空間を参照し、PAW マクロがヒストグラムの表示を行う。実験中に定義されているヒストグラムから必要な情報を自由に参照できるよう、PAW マクロを自動的に切替えるコントローラを開発した。このコントローラは Tcl/TK で記述され、グラフィカルユーザーインターフェイス (GUI) の実現に成功した。

[2]receiver.c 内の void check_buffer_hibytes() 関数

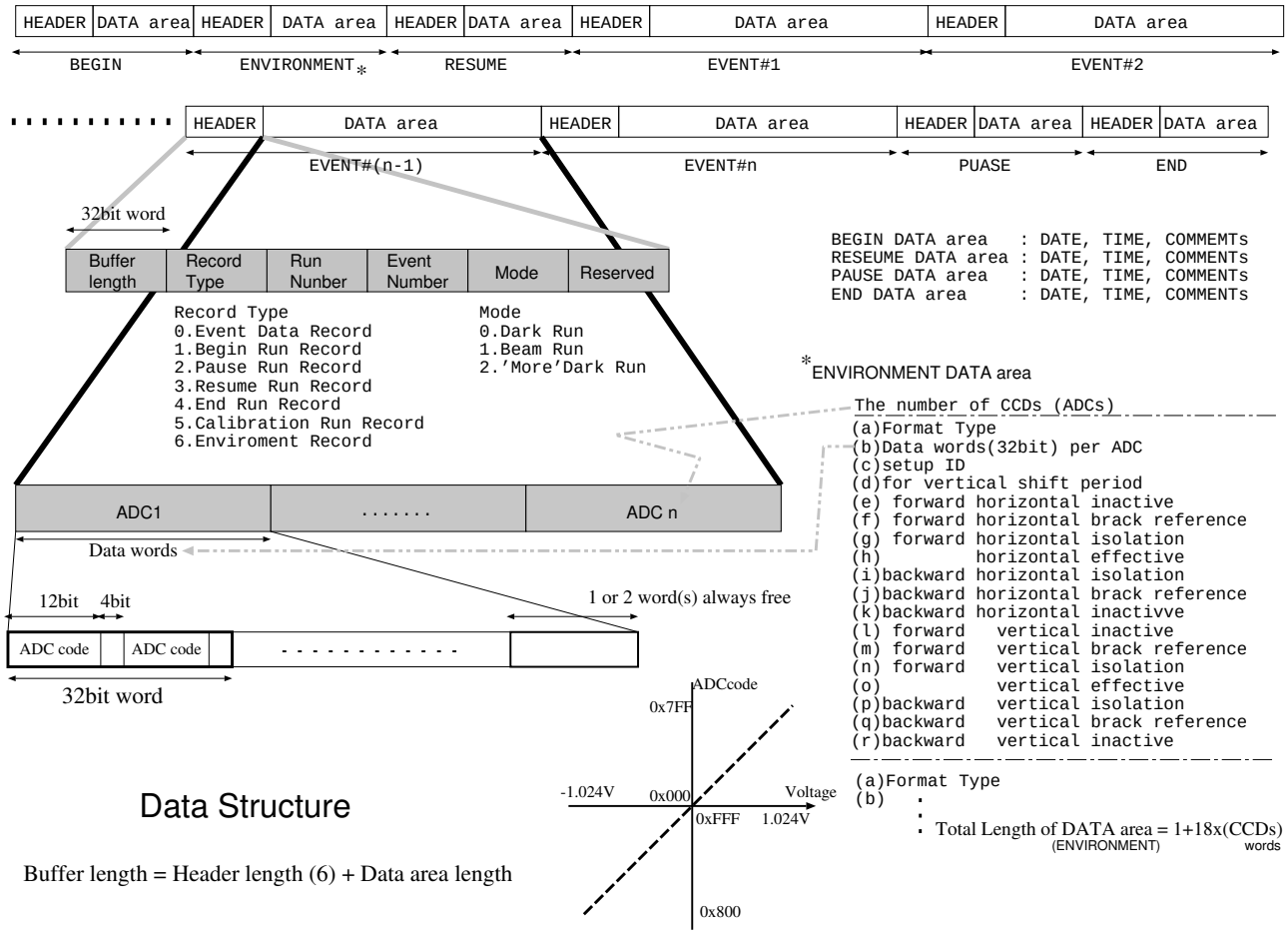


図 D.2: データフォーマット (1997 年 6 月版)

Data Structure

Buffer length = Header length (6) + Data area length

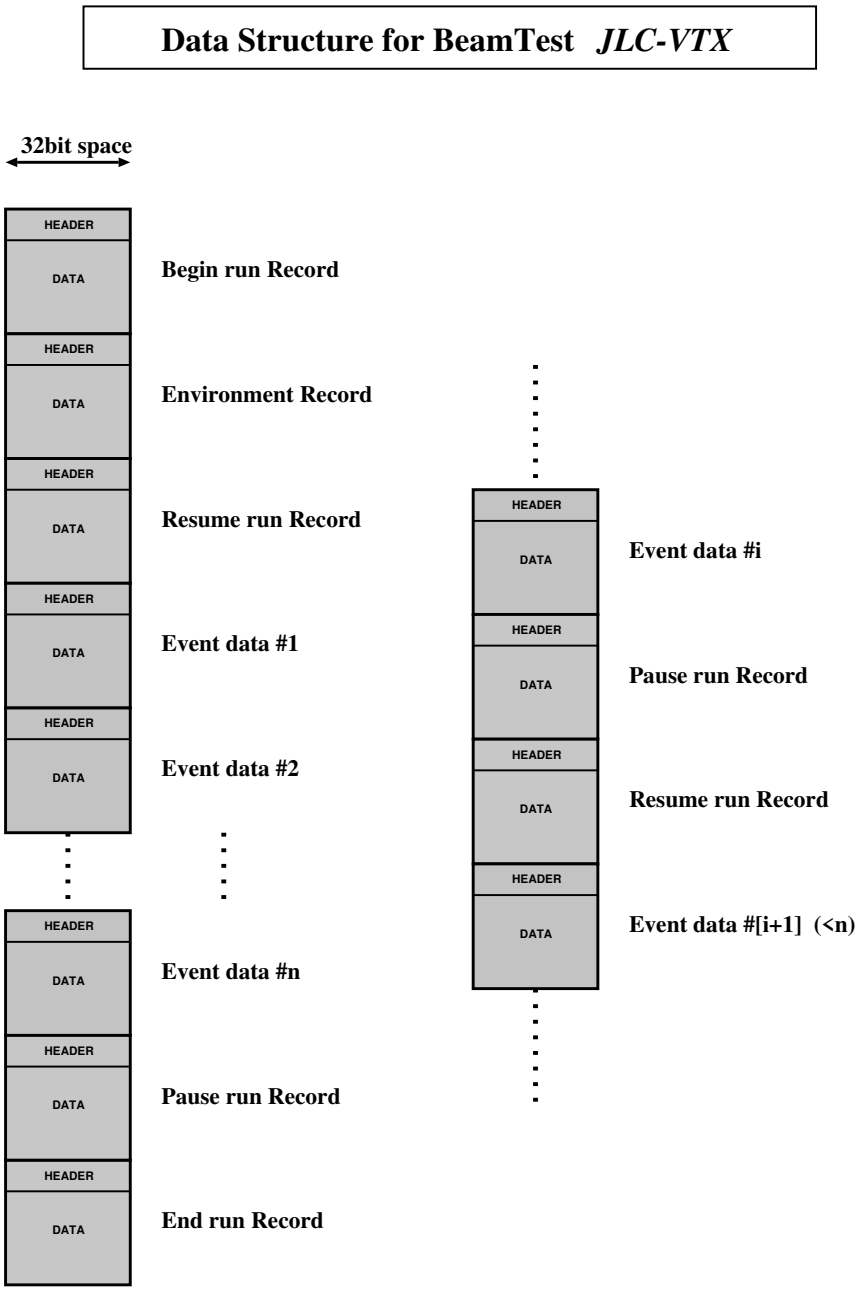
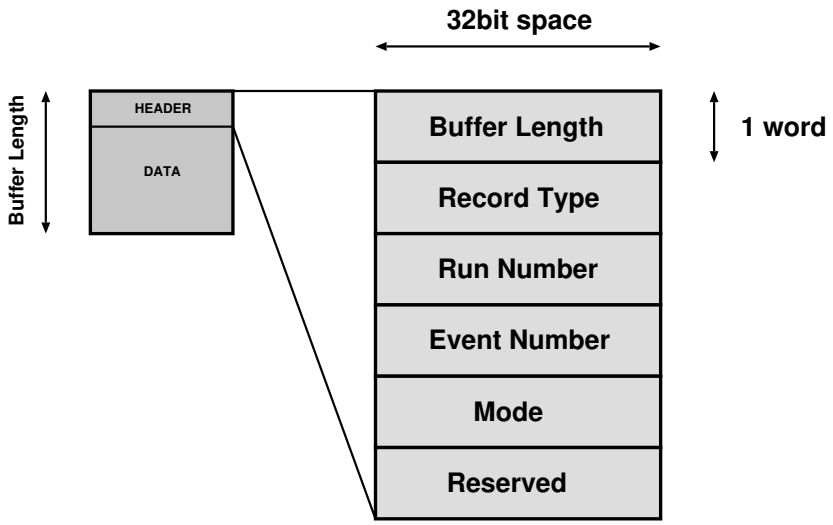


図 D.3: データフォーマット (1998 年 1 月版)

ALL HEADERs



Record Type

0: [Event data] record
1: [Begin run] record
2: [Pause run] record
3: [Resume run] record
4: [End run] record
5: [Calibration run] record
6: [Environment] record

Mode

0: Dark run
1: Beam run
2: 'More' dark run

DATA for
Begin run, Resume run, Pause run, and End run

Date, Time, Comments in free format

図 D.4: データフォーマット (1998 年 1 月版)：ヘッダ

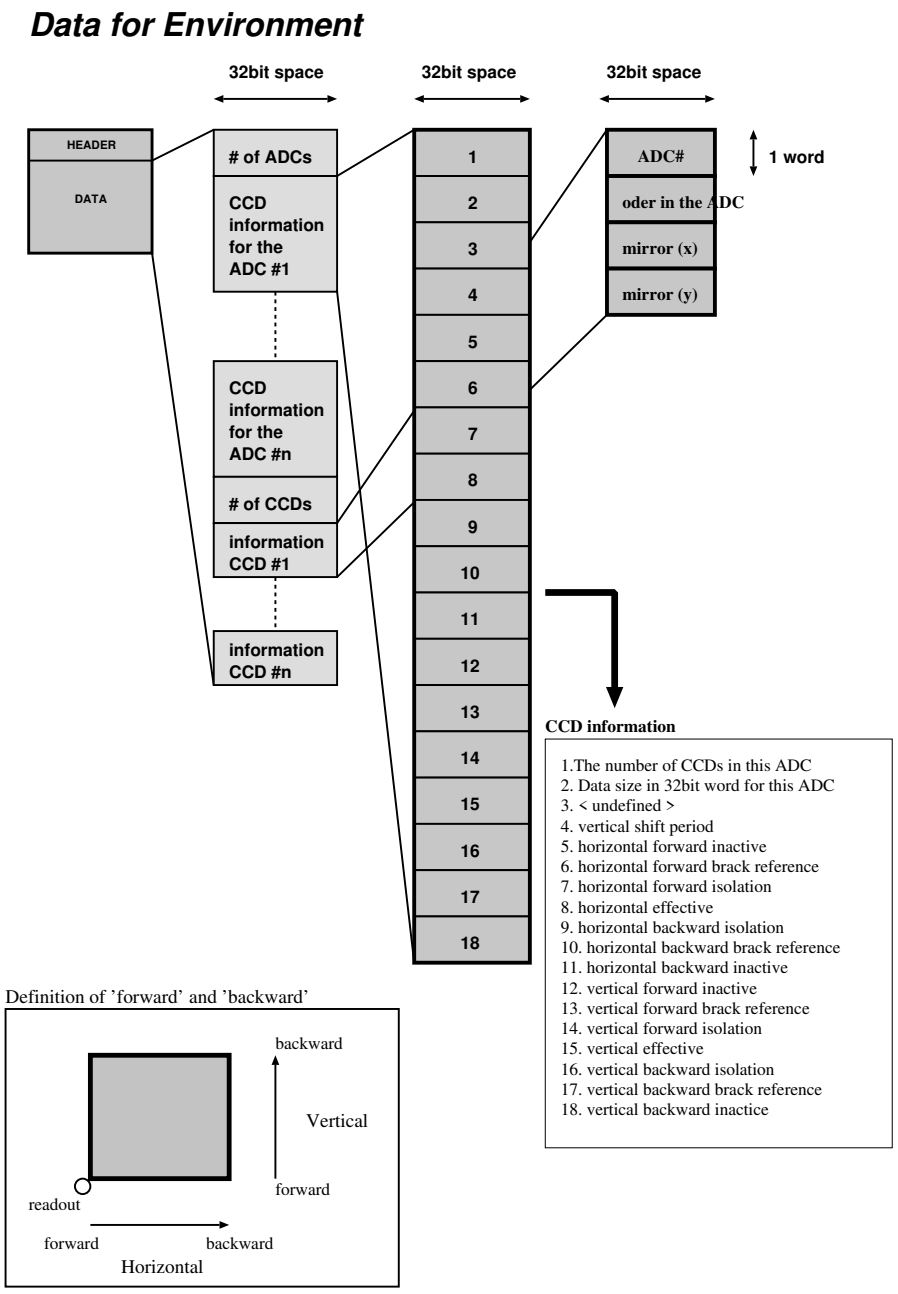
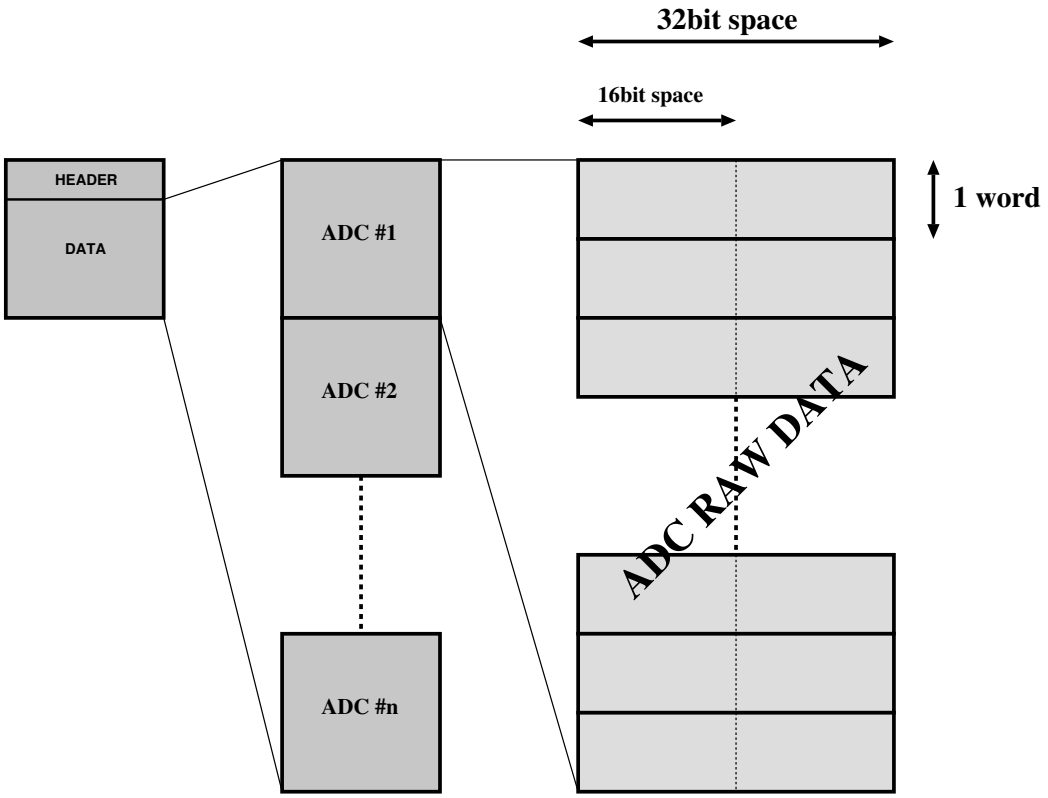


図 D.5: データフォーマット (1998 年 1 月版)：実験条件変数部

Data for Event data



For Pentland MPX201

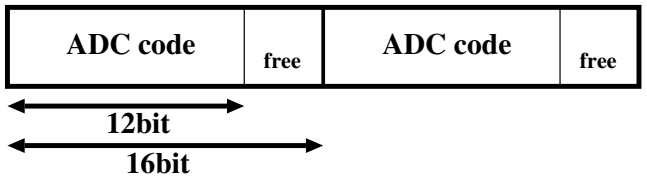


図 D.6: データフォーマット (1998 年 1 月版)：イベントデータ

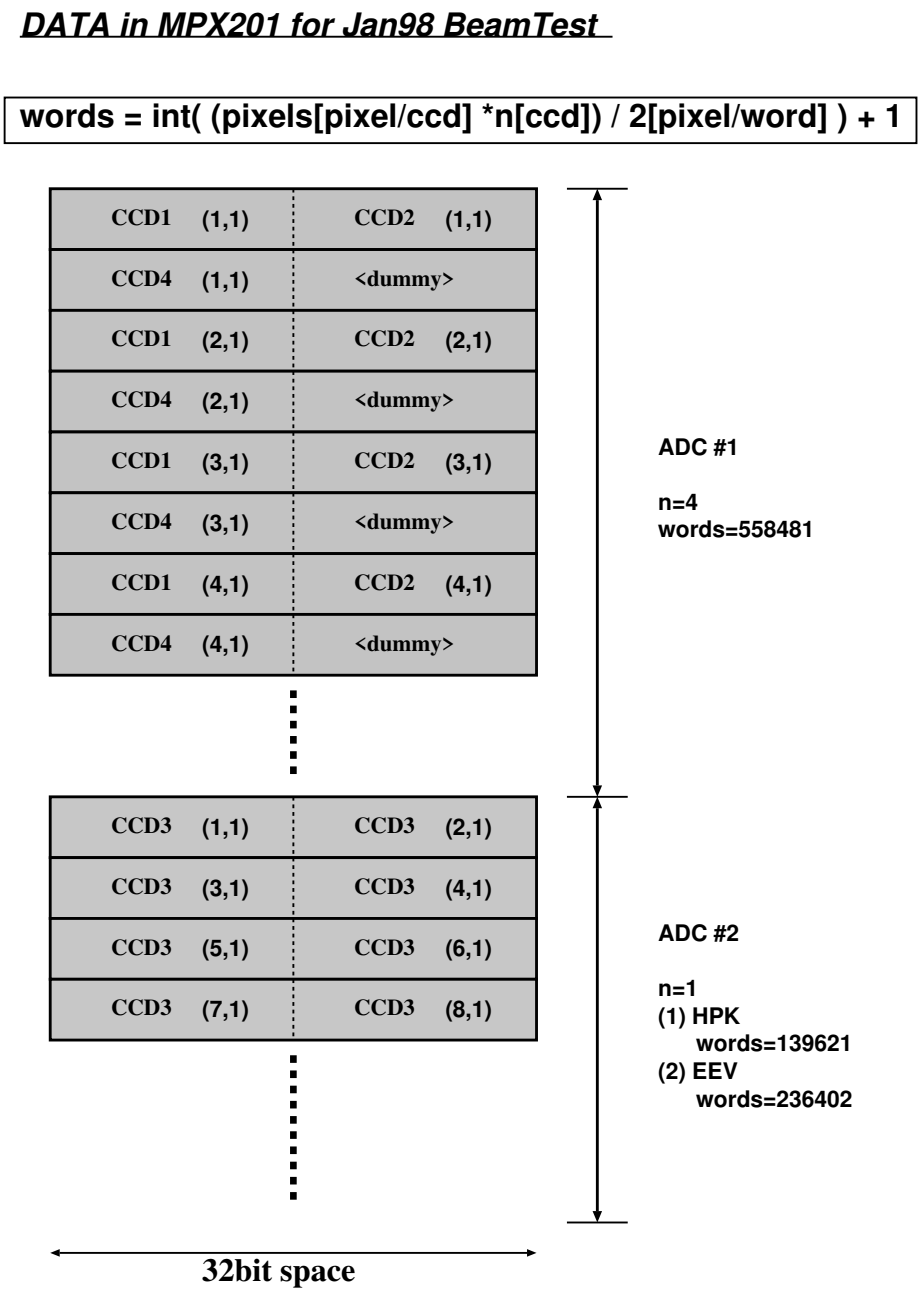


図 D.7: ネットワークから送られるイベントデータのフォーマット (1998 年 1 月版)

Format of Dark frame file

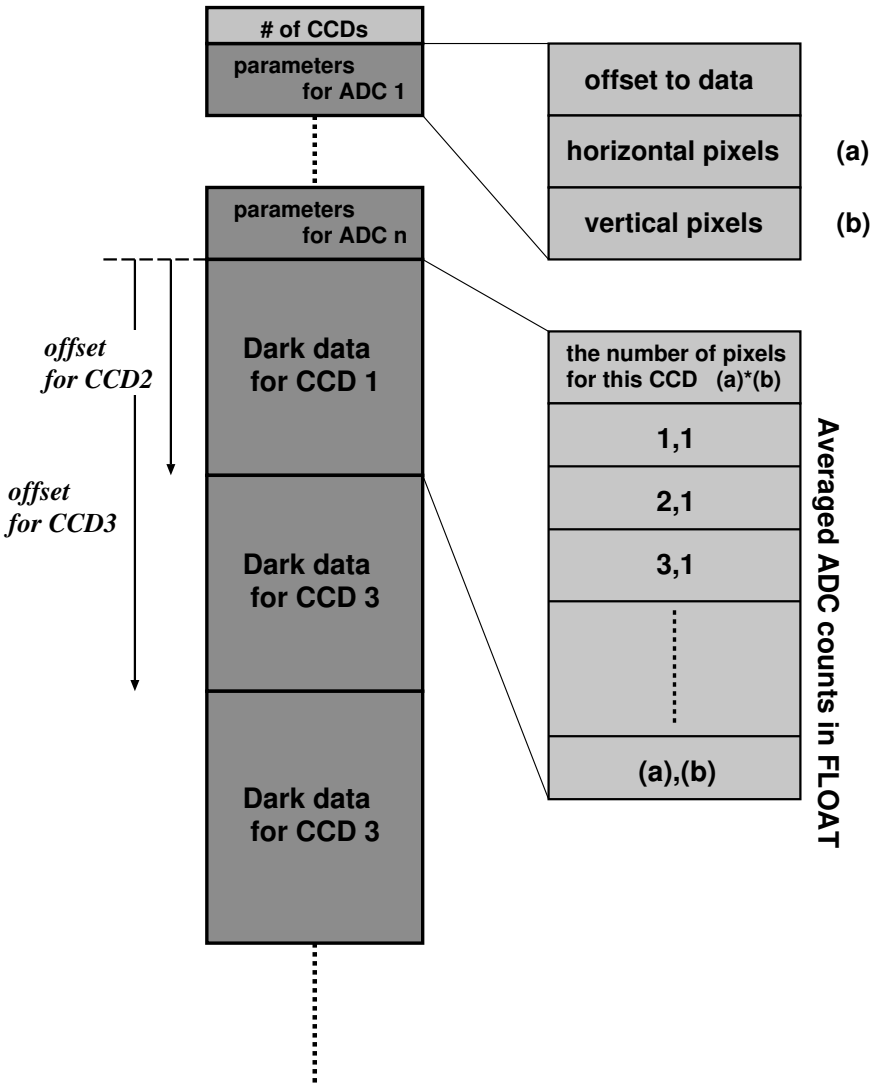


図 D.8: dark frame ファイルのデータフォーマット (1998 年 1 月版)

参考文献

[1] JLC-Design Study、KEK Report 97-1 (1997)

[2] 平成 8 年度科学研究費補助金研究成果報告書「電子陽電子リニアコライダー実験における測定器の開発研究」(1997)

[3] 藤井恵介、リニアコライダーの物理

[4] 亀井亨、木原元央、加速器科学、丸善

[5] 塚本俊夫、修士論文「TeV 領域における e^+e^- 衝突実験の検討」、東京大学 (1985)

[6] 技術資料:「FFT-CCD エリアイメージセンサの特性と使い方」、SD-25、浜松ホトニクス

[7] C.J.S.Daerell, "Vertex Detectors: The State of the Art and Future Prospects", RAL-P-95-008 (1995)

[8] 出崎順一、修士論文「崩壊点検出器のための電荷結合素子の特性測定」、東北大学 (1997)

[9] 冨田洋、修士論文「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」、京都大学 (1996)

[10] 真木晶弘、高エネルギー物理学実験、丸善

[11] Andrew S.Grove、垂井康夫監訳、半導体デバイスの基礎、オーム社

[12] R.S.Muller and T.I.Kamis, "DEVICE ELECTRONICS FOR INTEGRATED CIRCUITS." , JOHN WILEY & SONS (1986)

[13] Masaru TAIRADATE, "Tutorial for Running UNIDAQ on DECstation with VME-CAMAC Interface" , KEK Internal 94-17 (1994)

[14] A.Miyamoto, Talk at JLC group Friday meeting on 6th March and JLC-VTX subgroup meeting on 7th March.

謝辞

大変にやりがいのあるテーマを与えて下さった、塚本先生に深く感謝いたします。塚本先生には、データ収集システムからデータ解析に至るまて、実に適切な指示を数多くして下さいました。また、本論文執筆にあたっては超多忙中であるにもかかわらず、平日・祝日を問わず指導して下さったことに大変感謝しております。

浜松ホトニクスの宮口様には、データ収集システムの構築やフルシミュレーションを行うために参考となる極めて重要な情報を多く提供して下さいました。また、関連書籍の紹介もしていただきました。

データ収集システム用ソフトウェアの構築の際は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の安先生に大変お世話になりました。安先生には HP-RT の導入から UNIDAQ インストールやソフトの開発に多くの助言をいただきました。

ビームテストの際、KEK の杉本先生にはエレクトロニクスのノウハウやデータ解析のポイントを助言して頂きました。KEK の宮本先生にはデータ収集系のマシンの扱いや、ソフトの開発、オフライン解析について助言を頂きました。

佐賀大学塚本グループの渡辺氏には、オンライン解析のソフト全般を担当していただきました。GUI の開発をしていただき大変に助かりました。また、X 線による素子の calibration の解析を手伝っていただきました。

解析結果は、東北大学の阿部先生、長嶺先生、新潟大学の田村先生にコメントをいただきました。

そして、ビームテストに参加して下さった、富山商船高等専門学校の阿蘇先生、東北大学の白崎氏、墨谷氏、新潟大学の大川氏、高橋氏、冨樫氏に深く感謝します。

平成 10 年 3 月　国谷 俊夫