

修 士 論 文

崩壊点検出器のための CCD に関する研究

東北大学大学院理学研究科
物 理 学 専 攻

白崎 泰弘

平成 11 年

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	JLC 実験	1
1.2	崩壊点検出器	2
第 2 章	Charge Coupled Device	6
2.1	SCCD と BCCD	6
2.2	電荷転送原理	8
2.3	電荷読み出し	9
2.4	Multi Pinned Phase 動作モード	11
第 3 章	ビームテスト	12
3.1	実験	12
3.1.1	使用した CCD	12
3.1.2	セットアップ	12
3.2	荷電粒子の通過位置決定法	14
3.2.1	クラスタリング	14
3.2.2	重心法	15
3.2.3	補正	17
3.2.4	Ratio Location Mapping 法	19
3.3	アラインメント	21

3.3.1	Residual	21
3.3.2	大まかな位置合わせ	22
3.3.3	Track Selection	23
3.3.4	Residual Minimization	23
3.4	解析結果	28
3.4.1	位置分解能の運動量依存性	28
3.4.2	固有位置分解能	31
3.4.3	重心法と RLM 法	32
3.4.4	クラスタ拡張閾値による位置分解能の違い	32
3.4.5	CCD 通過場所による位置分解能の違い	33
3.5	まとめ	34
第 4 章	放射線耐性	41
4.1	暗電流特性	42
4.2	電荷転送非効率	42
4.3	実験	43
4.3.1	使用した CCD	43
4.3.2	γ 線照射セットアップ	44
4.3.3	暗電流量測定セットアップ	47
4.3.4	電荷転送非効率測定セットアップ	47
4.4	暗電流量測定	48
4.5	CTI 測定	54
4.6	時間経過による変化	59
4.7	まとめ	59

第5章 まとめ	61
5.1 CCD 衝突点検出器	61
5.2 位置分解能	61
5.3 放射線耐性	62
5.4 今後の課題	62
付録A ^{60}Co 線源	64

第1章 はじめに

現代素粒子物理学の標準模型は 6 つのクォークと 6 つのレプトンの存在と電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を統一的に説明していて、これに含まれる粒子のうち、最後のクォークであるトップクォークが 1994 年に TeVatron 実験によってついに発見された。

残るは、この模型において自発的対称性の破れを担うヒッグス粒子の探索である。これまでに行われた実験では CERN LEP-II の度重なるアップグレードによって重心系エネルギー 200GeV/c 付近までの探索が行われたが、未だ発見には至っていない。

今後の高エネルギー物理学実験においては、TeV オーダのエネルギー領域においてヒッグス粒子の探索や、模型における各パラメータの精密決定、更には超対称性理論等の標準模型を越えた理論によりその存在が予想される粒子等の探索を行うことが重要な課題となっている。

このためには LEP-II を超える重心系エネルギーを実現する必要があるが、LEP-II のようにリング型加速器を用いた場合にはエネルギーの放射光損失が問題になってくる。リングを一周する間に得るエネルギーが周長に比例するのに対し、放射光損失によって失うエネルギーがエネルギーの 4 乗に比例して急激に増大するからである。この問題を抑えるためにリングを大きくする方法があるが、費用の問題で実現が難しいと考えられている。

そこで円形ではなく、原理的に放射光損失の発生しない線形加速器を用いて目的とするエネルギー領域を実現する計画が現在進行中である。

1.1 JLC 実験

線形加速器を多段接続し、重心系エネルギーが TeV 領域に達する高エネルギー電子・陽電子ビームを生成し、これを衝突させる事でトップクォークやヒッグス粒子、超対称性粒子の探索やそれらの性質を詳細に調べる実験を計画している。現在この電子・陽電子リニアコライダー実験は Joint Linear Collider (JLC) という名前で ACFA

の将来計画として技術開発が行われている。JLC の概略図を図 1.1 に示す。

電子ビームは電子銃からの放出電子を用い、1.98 GeV まで線形加速器を用いて加速した後、Damping Ring を用いてビームエミッタンスを小さくし、スピン回転、バンチ圧縮、8 GeV 前段加速器、バンチ再圧縮の後、主線形加速器を用いて実験に用いるエネルギーまで加速し衝突させる。陽電子は線形加速器によって電子を 10 GeV まで加速し、標的に当て電磁シャワーを発生させ、その中から分離取り出したものを用いる。以後の加速の方法は電子と同様、1.98 GeV 線形加速器、Damping Ring、8 GeV 線形加速器、主加速器によって加速し、電子と衝突させる。

前述したように、電子・陽電子衝突リングではこれらの粒子のシンクロトロン放射により実際上、高いエネルギーを得る事が困難であるが、電子陽電子リニアコライダーではこのシンクロトロン放射が無く、粒子反応に費されるエネルギーを陽子・陽子衝突型リング加速器実験と同程度に高くできる上に、単粒子同士の衝突であるために現象を明解にしやすいという利点がある。

JLC の諸源を表 1.1 に示す。

	JLC-I	強化後
重心エネルギー [TeV]	0.5	1.5
主加速器全長 [km]	2.07	8.81
ルミノシティ [$10^{33}\text{cm}^{-2}/\text{s}^{-1}$]	4.13	16.72
ビーム周波数 [Hz]		150
消費電力 [MW]	55	234
衝突点での RMS ビームサイズ [nm]	367×4.4	184×2.28

表 1.1: JLC 実験諸源

1.2 崩壊点検出器

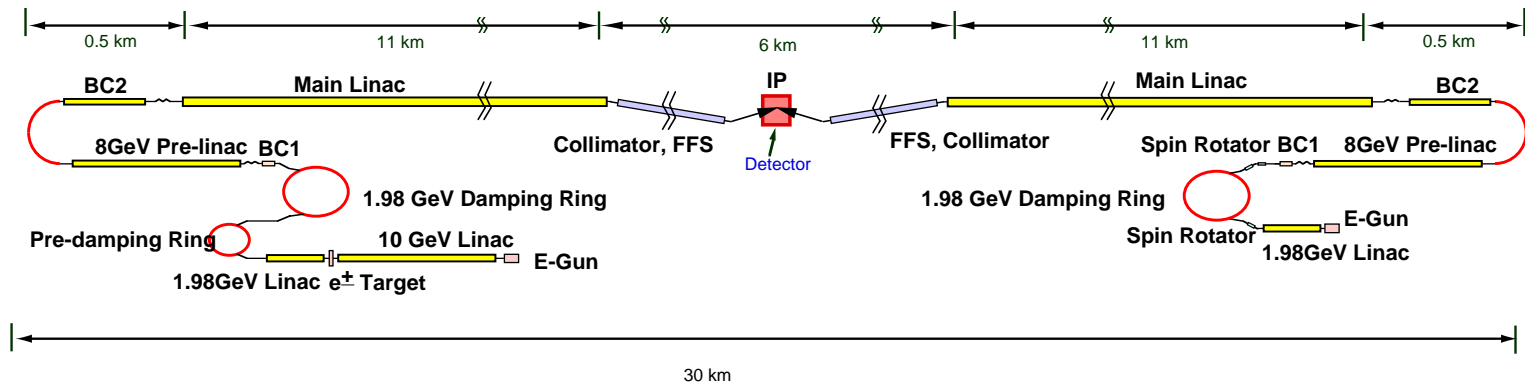
JLC 実験においては多くの興味ある粒子は q/\bar{q} ($q = t, b, c, \dots$) 等を含む短寿命重粒子を経由して崩壊することが期待される。従ってここに生成される短寿命重粒子の検出を可能にする必要がある。例えば実際には t/\bar{t} が生成されたとしても更に b/\bar{b} 等に崩壊した後の軌跡を捉えることになる。そこでこれら b/\bar{b} や c/\bar{c} のタグのため、そしてそれらの崩壊点を検出できるように、JLC では崩壊点検出器を用い (図 1.2)、かつこれが高い位置分解能と検出効率を持つことが重要である。

高精度で崩壊点の決定を行うために現段階では最も精度の高い CCD が有力な候補に挙げられている。昨今の半導体製造プロセスすなわち精密加工技術の進歩によ

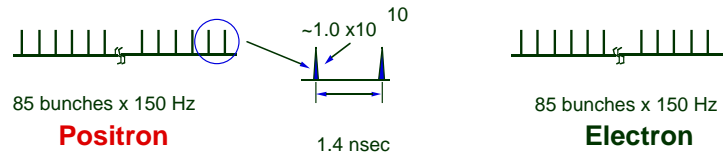
Electron-Positron Linear Collider *JLC*

500 GeV JLC-I → 1.5 TeV JLC

図 1.1: Joint Linear Collider 加速器



1.0 TeV Configuration



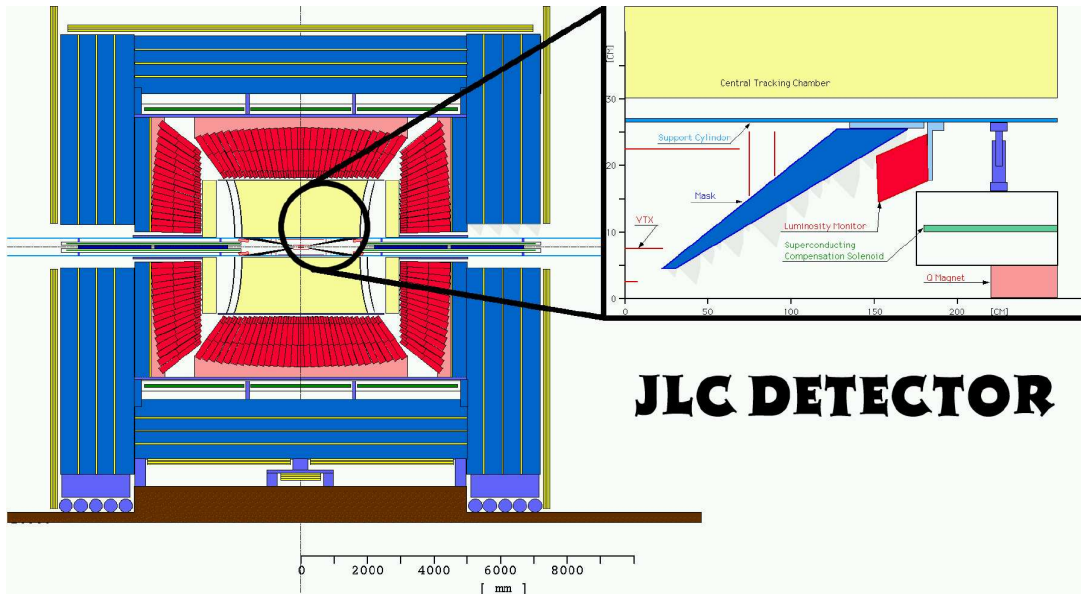


図 1.2: Joint Linear Collider 測定器 (図中の“VTX”が衝突点検出器)

り、高精度かつ極微な検出器を製作する事が可能になってきた。また、これまでの実験でよく用いられてきたシリコンストリップ検出器と比較して、CCD を用いた場合には

- 三次元情報を単独の測定器から直接得る事ができる。
- 高い位置分解能を得る事ができる。
- 高密度の粒子飛跡に対して分離が容易である。
- 薄くできるため、多重散乱が少ない。

等々の利点がある。逆に欠点としては、

- 放射線耐性が劣る。
- 読み出し速度が遅い。

事などが挙げられる。

これまでのビーム衝突型実験において崩壊点検出器として CCD が用いられた唯一の例として Stanford Linear Accelerator Center における SLAC Large Detector 実験があり、約 $4\mu\text{m}$ の位置分解能と 95% 以上の検出効率を得て、B 粒子、チャーム粒子

等の物理において大きな成功を収めた [1][2][3]。この実験においては CCD を 180K 付近まで冷却して使用している。このような低温まで検出器の冷却を行うと、CCD とそれを支える構造体の熱収縮率の違いにより、検出器系に複雑な歪みが発生してしまう [4]。その場合、粒子の通過位置測定に誤差が生じる事になり、結果として崩壊点の位置決定能力が低下する。また、冷却のための装置を通過する事で、粒子がより大きな多重散乱を受けることによっても位置決定能力が低下する。

これに対して JLC の計画においては、歪みの発生や支持構造による多重散乱を極力減らすために冷却装置を簡素化し常温近くで動作させることを目標として開発を進めている。

本研究では CCD を実際の崩壊点検出器として用いる場合に必要となる位置分解能、放射線耐性等の特性を常温付近で測定、解析し、使用の可能性を追求することを目的としている。

第2章 Charge Coupled Device

Charge Coupled Device (以下 CCD) は近接して配置された酸化金属半導体 (MOS) キャパシタとして 1970 年に W.S.Boyle と G.E.Smith が AT&T Bell Laboratory において開発したのがはじまりである。

2.1 SCCD と BCCD

CCD とは与えられた電荷を転送する仕組みを持った電荷蓄積層のことである。CCD には電荷を蓄積する場所の違いによって、Surface channel CCD (SCCD) と Buried channel CCD (BCCD) の 2 種類がある [10]。それぞれの構造を図 2.1 に示す。

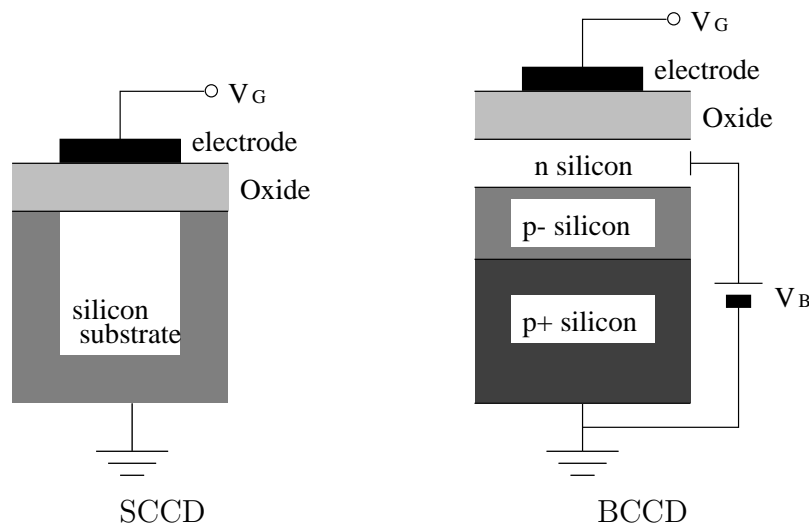


図 2.1: SCCD と BCCD の構造

SCCD では電極に電圧を印加することで図 2.2 のようなポテンシャルをつくり出し、このポテンシャルの底つまり CCD 表面付近に電荷を蓄積する。SCCD ではポテンシャルのカーブが比較的急な場所に電荷を蓄積するので、高い密度で電荷を蓄積することができる。

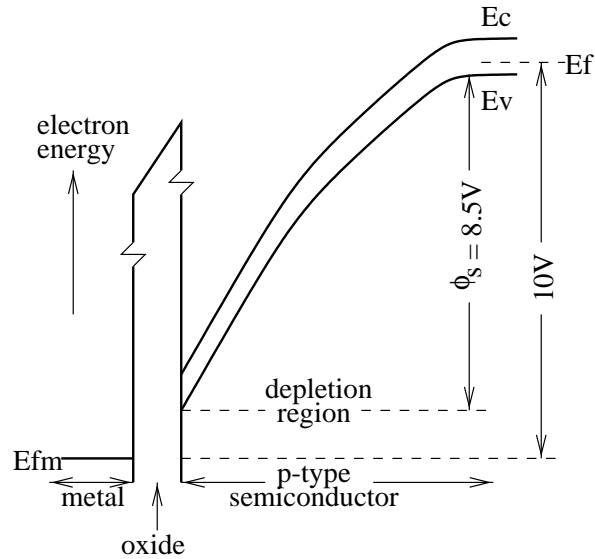


図 2.2: SCCD のポテンシャル

BCCD では電極に電圧を印加することで図 2.3 のようなポテンシャルをつくり出し、このポテンシャルの底つまり CCD 表面から離れた場所に電荷を蓄積する。BCCD では比較的ポテンシャルのカーブが緩い場所に電荷を蓄積するので、SCCD と比較すると低い密度で電荷が蓄積される。そこで一般に蓄積する事のできる電荷量は SCCD の方が多い。

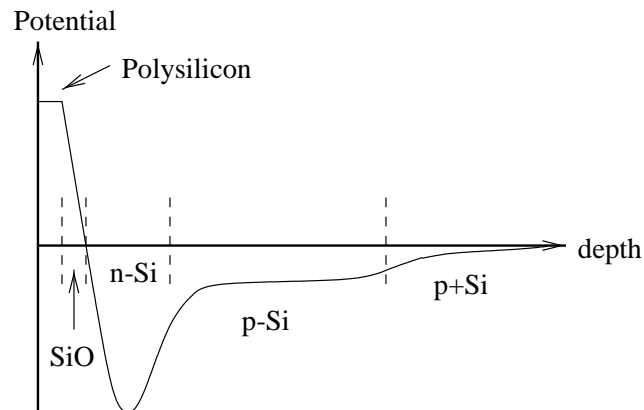


図 2.3: BCCD のポテンシャル

しかし、SCCD では表面近傍で電荷が高密度に蓄積されているため、ゆっくりとしか電荷が移動しないという欠点がある。このため高速化が難しく、現在ではほとんどの CCD が BCCD である。JLC 実験においても高速な読みだしが必要となるため、BCCD を用いる必要がある。

2.2 電荷転送原理

電荷転送方式としていくつかの方式があるが、その内の一つである 2 Phase CCD の構造の概念図を図 2.4 に示す。

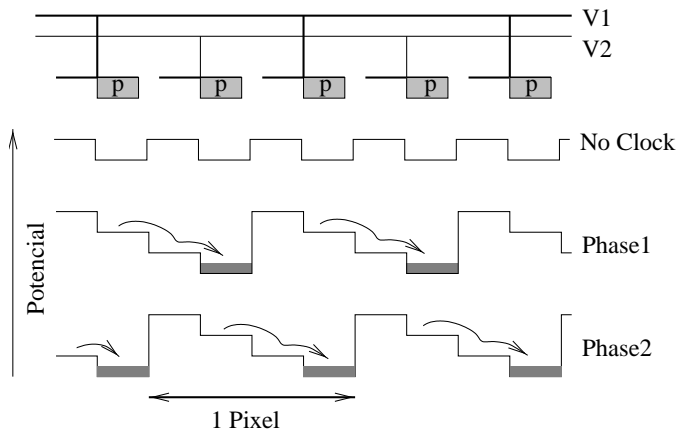


図 2.4: 2 Phase CCD の構造と電荷転送

MOS キャパシタの上にクロック V_1 とクロック V_2 に接続された金属電極膜が交互に並んでいる。電極の下に半分だけ p 型半導体を入れることで、電極に電位を与えると、その電極の下に図のようなポテンシャルをつくり出す事ができる。このポテンシャル場中に電荷を蓄積する事ができる。このポテンシャル場のことを画素 (ピクセル, pixel) と呼び、CCD において電荷を蓄える基本的な単位となっている。

この2つ電極群にかかる電圧を交互にクロックパルスを用いて変化させる事で、その電極下にできるポテンシャル場を変化させる。このポテンシャル場の変化によって、図のような電荷の移動を引き起こす。これを繰り返す事で、電荷を一方向に CCD の端から端まで移動させることができる。

次に 3 Phase CCD の概念図を 2.5 に示す。MOS キャパシタの上にクロック V_1 と V_2 さらに V_3 に接続された電極が並んでいる。この電極群に 3 相にずらしたクロックパルスを印加する事で、図のようにポテンシャルを変化させ、一方向に電荷を転送する事が出来る。

3 phase CCD がクロック電圧で発生するポテンシャルの全ての深さ分だけ電荷を転送できるのに対し、2 phase CCD は埋め込み p 型半導体で発生する深さ分だけの電荷しか転送できない。しかし 2 Phase CCD にはクロック間の干渉等の問題が発生しにくいという利点もある。

一列の CCD では一次元方向にしか電荷を転送できないが、これを図 2.6 のように水平方向と鉛直方向に組み合わせてやる事で、

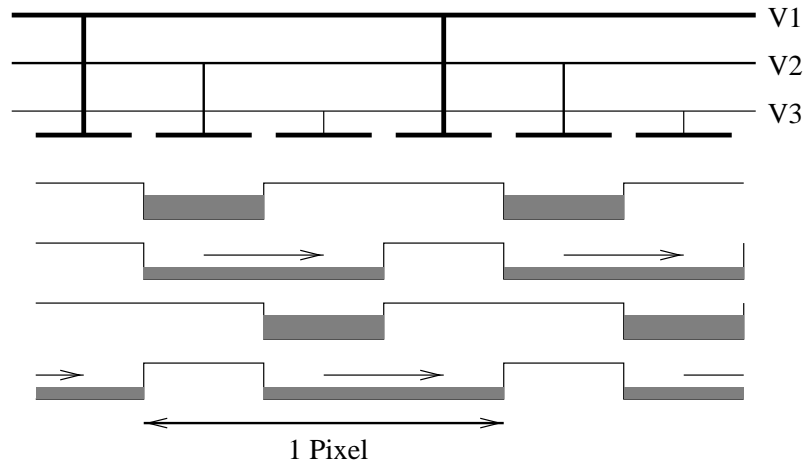


図 2.5: 3 Phase CCD における電荷転送

1. 鉛直シフトを1回行う。
2. 水平シフトを行い、電荷を読み出す。
3. 2を水平ピクセル数だけ繰り返す。
4. 1~3を鉛直ピクセル数だけ繰り返す。

以上により全ピクセル中の電荷を読み出す事が出来る。

CCD には転送部と蓄積部が完全に分かれている Frame Transfer 型のものや、転送部と蓄積部が交互に置かれている Interline Transfer 型のもの、転送部が蓄積部を完全に兼ねている Full Frame Transfer (FFT) 型等がある。素粒子実験等では CCD 全面が有感である FFT 型が用いられる。

2.3 電荷読み出し

CCD のシフトレジスタ (2次元読みだしにおいては水平レジスタの) 最終段に到達した電荷はリセット用 MOSFET と 電荷電圧変換 MOSFET の2つを用いて Floating Diffusion Amplifier (FDA) という方法で電圧に変換される (図 2.7)。ここでは

$$Q = CV$$

の関係を用いて、電荷を電圧に変換する。読み出された電圧は、外部の ADC によって計数化される。その後、リセット用 MOSFET によって図 2.7 中の RD に合わせてリセットが行われるので、蓄積電荷が除去される。

SCCD の場合には FDA ではなく、Floating Gate 法と呼ばれる蓄積電荷を失わな

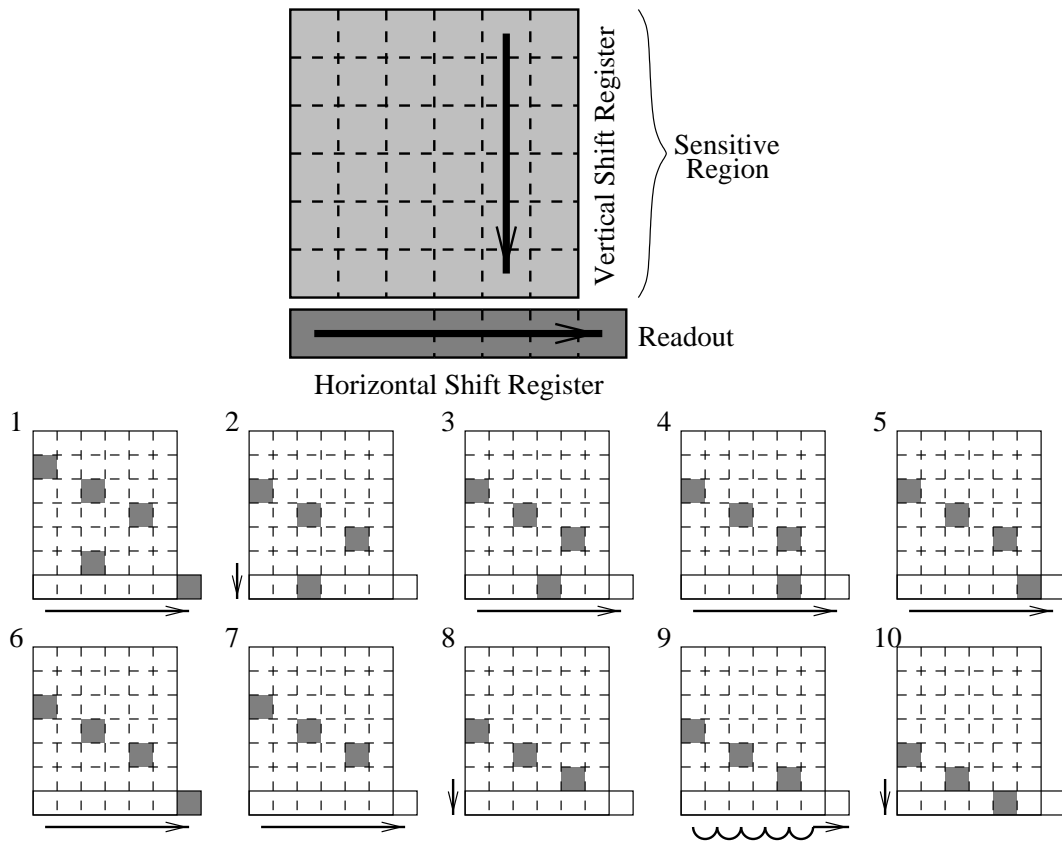


図 2.6: CCD における2次元電荷読みだし

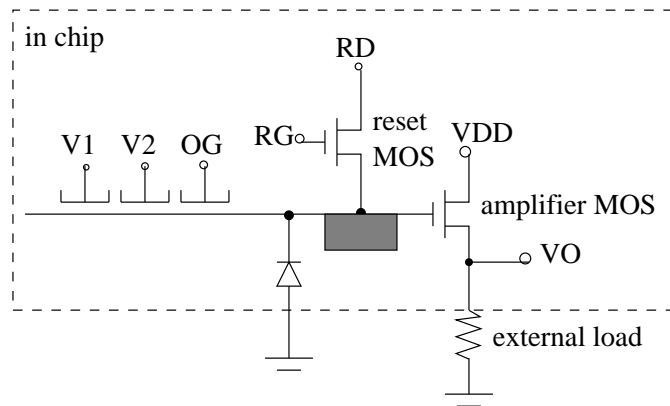


図 2.7: MOSFET 電荷読みだし回路

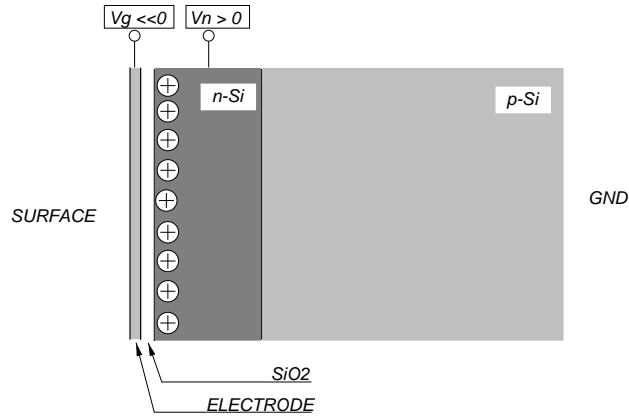


図 2.8: 反転状態

い読み出しを行うこともできる。この方法を用いると、一つの電荷を複数回読み出す事で電荷を詳しく測定することができ、S/N を良くすることも出来る。

2.4 Multi Pinned Phase 動作モード

反転動作モードとも呼ばれる Multi Pinned Phase 動作モードは、CCD を MOS コンデンサとして考えた場合において大きな逆バイアス電圧を印加することで、シリコン中に反転状態の相をつくり出し、図 2.8 のようにシリコン-シリコン酸化物界面下にはチャンネル分離境界から供給された自由正孔が蓄積された状態で駆動する動作モードのことである。

この状態においては、熱励起によって発生する電子は、反転相に蓄積された自由正孔と結合し、暗電流が少ない状態が実現できる。つまり MPP 動作させることによって、暗電流の発生を抑制することができるのである。MPP モードと通常モードでは、20 倍程度単位時間当たりの暗電流の発生量が異なり、常温近傍で崩壊点検出に用いることができる可能性を持っている。

第3章 ビームテスト

これまでに行われた実験 [5][6][7] において、市販のフルフレーム型 CCD を MPP モードで動作させ、 ^{55}Fe 5.9 KeV X 線源を用いて S/N 測定を行い、常温付近での信号検出が可能なことが確認された。

本実験においては、荷電粒子が CCD に対して角度を持って入射した際の位置分解能を測定する事を目的とした。

3.1 実験

本実験は 1998 年 6 月 15 日から 22 日まで KEK Proton Synchrotron の T1 ライン (図 3.1) を利用して行われた。このラインでは $2\text{GeV}/c$ までの π 粒子が利用可能である。

3.1.1 使用した CCD

本実験では浜松ホトニクス社製の S5466 (図 3.2) と英国 EEV 社製の CCD02-06 (図 3.3) について測定を行った。S5466 は有感層の厚さが $10\mu\text{m}$ のものと $50\mu\text{m}$ のものの 2 種類を用いた。これらの CCD の基本的なデータを表 3.1 に示す。

各 CCD はシリコンチップがセラミックパッケージに収められた構造になっている。

3.1.2 セットアップ

実験では 3 枚のリファレンス CCD と 1 枚のターゲット CCD を恒温槽内に設置して測定を行った。実験は -15 、 -5 、 $+5$ 、 $+15^\circ\text{C}$ で行われたが、本解析では -15°C で測定したデータを用いた。また、ビームに含まれる荷電粒子数のモニタリングのため

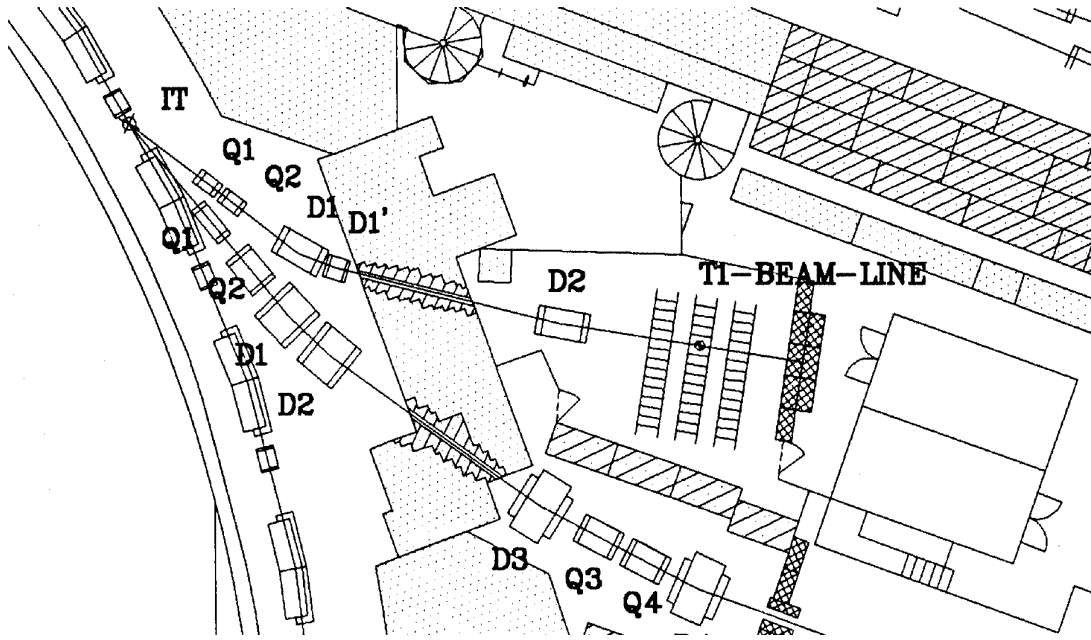


図 3.1: KEK-PS T1 ライン

めに上流に設置した2個のプラスチックシンチレータの同時計数を用いた。図 3.4 はビームを CCD に垂直に入射させた場合の概略図である。又、60 度の角度でビームを CCD に入射させた場合の概略図を図 3.5 に示す。

図中の CCD1 としては裏面のセラミックパッケージに 10 mm 角の穴を開けたものを使用した。こうすることで、荷電粒子がこの部分を通過する際の多重散乱を極力減らすようにした。また、CCD0 と CCD1 のパッケージをビーム上流側に、CCD2 と CCD3 のパッケージを下流側になるように配置する事で、パッケージによる多重散乱が無視できるようにした。さらに、CCD 自体による多重散乱の影響を極力避けるために CCD1 と CCD2 とを向かい合わせにし、間隔を 4mm にした。

CCD	HPK S5466		EEV CCD02-06
	(10um)	(50um)	
電荷転送方式	2 Phase	2 Phase	3 Phase
有効 Pixel	512 × 512	512 × 512	385 × 578
Pixel Pitch	24 μm 角	24 μm 角	22 μm 角
チップサイズ	12.288 mm 角	12.288 mm 角	8.47 × 12.716 mm
有感層の厚さ	10 μm	50 μm	20 μm
Amp. 感度	2.0μV/e	2.0μV/e	1.0μV/e

表 3.1: 各 CCD の諸元

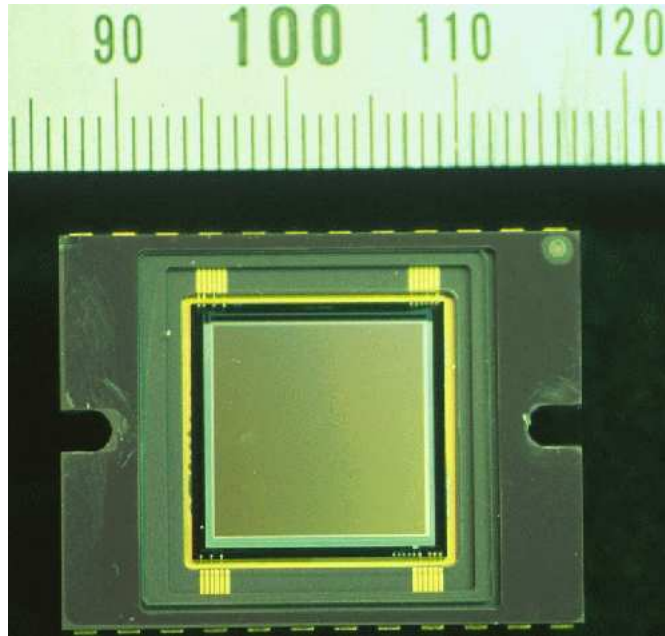


図 3.2: 浜松ホトニクス社製 S5466

荷電粒子として運動量を 2、1、0.7、0.5 GeV/c に設定した π^- 粒子を用いた。これを CCD 面に対して 0 度、45 度、60 度の 3 つの角度で入射させ、それぞれの場合について測定を行った。

3.2 荷電粒子の通過位置決定法

位置分解能を調べるためには、荷電粒子が CCD 上の何処を通過したかを正確に決定する必要がある。そのため、ピクセル上に発生した信号電荷の分布から通過位置を決定する際に以下に述べる幾つかの異なる手法を試みた。

3.2.1 クラスタリング

一般に、荷電粒子が CCD を通過する際に発生した電荷は通過位置近傍の複数ピクセルに渡って収集される。そこで、その総電荷量を測定するためにはこれらの電荷全てを集める必要がある。また、複数のピクセルに広がった電荷分布を調べる事で通過位置をピクセルサイズ以下のよりよい精度で決定できる可能性がある。位置情報や総電荷情報を得るために複数の測定単位に広がった電荷情報を取りまとめる

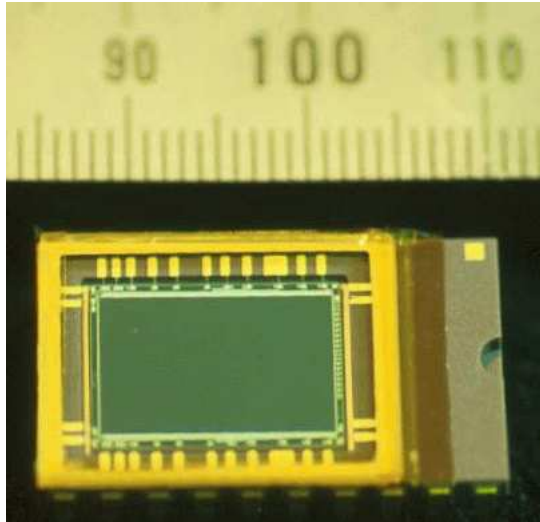


図 3.3: EEV 社製 CCD02-06

ことを「クラスタリング」と呼ぶ。

本解析では以下に示すような幾つかのクラスタリング方法を試すことで、位置分解能の改善の可能性を調べた。

3.2.2 重心法

ある電荷閾値を決めて、この電荷閾値を超えた信号が得られたピクセルを π^- 粒子が通過したものと考える。また、粒子を入射させていない場合に、ノイズによって粒子の通過と誤って判断されるようなものを偽ヒットとする。この偽ヒットの数が実際に π^- 粒子を入射させた場合に粒子の通過点として見つかる数に対して 5% 以下になるように電荷閾値を決定する。更にこの電荷閾値を越えて、かつ隣接するピクセルの電荷がこのピクセルの電荷よりも小さいピクセルを局所電荷極大ピクセルとしてする。この局所電荷極大ピクセルを中心として $m \times n$ ピクセルの矩形領域を考え、 $m = n = 1$ を初期値として、 m もしくは n を 1 つ増やした際に、電荷の和が最大となる方向に m もしくは n を増やしていく。この場合、必ずしも局所電荷極大がクラスタの中心になるわけではない。この手順を、電荷の増加の割合 $\frac{\delta Q}{\sum Q}$ が打ち切り閾値以下になるまで繰り返す。

$$\frac{\delta Q}{\sum Q} = \frac{\sum_{y=y_0}^{y_0+n} Q_{(x_0+m+1,y)}}{\sum_{x=x_0, y=y_0}^{x_0+m, y_0+n} Q_{(x,y)}}$$

クラスタの拡大中に初期位置として使用した局所電荷極大よりも隣接ピクセルの電荷の方が大きかった場合には、その初期局所電荷極大はクラスタ中心ではないとし

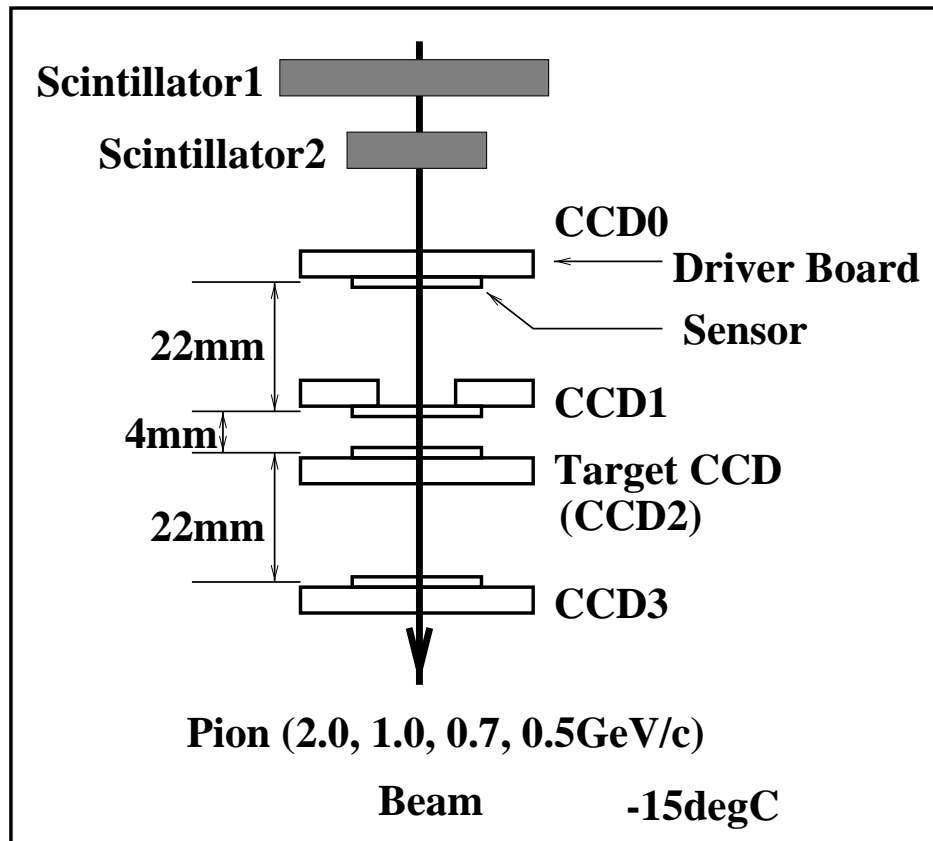


図 3.4: 垂直入射時セットアップ

て、次のピクセルへ移る。こうして得られるクラスタの広がりを図 3.6 に示す。

HPK10、EEV20、HPK50 と有感層が厚くなるにつれて、電荷の広がりも大きくなっていったのがわかる。HPK50 では角度を持って入射すると電荷の広がりが増大するのに加え、非対称になっているのが分かる。

このようにして求めたクラスタ領域に対して、

$$X = \frac{\sum Q_i X_i}{\sum Q_i}$$

という電荷の重心を求めてやり、これを荷電粒子の通過位置と想定する。なお、一つのピクセルにだけ電荷が入ったと判定された場合には、丁度そのピクセルの中心を荷電粒子が通過したものとして扱った。

このような方法を重心法と呼ぶ。

本解析では打ち切り閾値として、0.02、0.05、0.08 と設定し位置分解能の比較を行った。

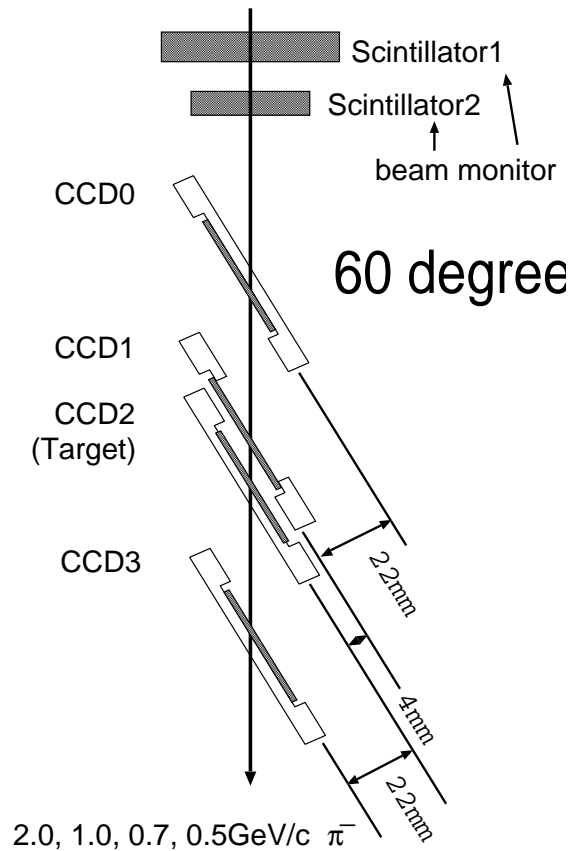


図 3.5: 60度入射時セットアップ

3.2.3 補正

前節の重心法によって求められた荷電粒子の通過位置を X 軸に投影してみると、図 3.7 のようにピクセルサイズの周期を持ったものになった。図中の色を付けた部分は信号がひとつのピクセルに収まったデータで、ピクセルの中心に数えたものである。

入射ビームには丁度ピクセルサイズの周期をもった密度分布ではなく、ほぼ一様入射であると考えられるので、このような周期的分布は入射粒子によって生じた電荷の広がり方がピクセルを形作るポテンシャルによって妨げられているため、重心法によって求められる位置が電荷量に比例して分配されず、ピクセル中心方向に集められるということが起こっているためと考えられる。すなわち、ピクセル内の通過位置と電荷分布が線形の関係にないことを示しているのである。

逆に一様入射を仮定した上で、重心法によって求められた入射位置 X の各ピクセル中心からのずれに対して補正を行う事で、本来入射したであろう位置に近いものが

Charge Distribution

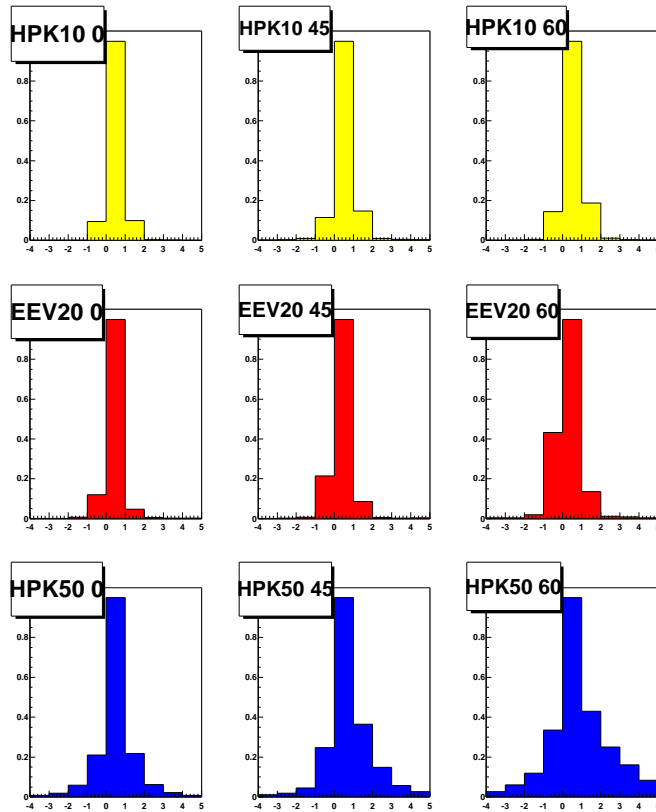


図 3.6: 重心法におけるクラスタの広がり。縦の列は 0 度、45 度、60 度入射に対応し、各行は HPK10、EEV20、HPK50 に対応する。

求まる可能性がある。そこで、ピクセルサイズを単位として、一様入射 ($\frac{dN}{dx} = \text{const}$) を仮定して、

$$\begin{aligned}
 r &= [X + 1] - X \\
 \delta(r) &= \frac{1}{N} \int_0^r \frac{dN}{dx} dx \\
 X' &= X - r + \delta(r)
 \end{aligned}$$

という補正を試みた。ここで $[A]$ は A を超えない最大の整数値を表す。

この補正を行うと、図 3.8 のようにほぼ一様入射を再現する事ができる。ただし、図中に色の付いた部分で表される単一のピクセルに電荷が収まったと判断されたクラスタについては、補正が行われないためこのピークはグラフの整数単位毎に少し残っているのが見える。

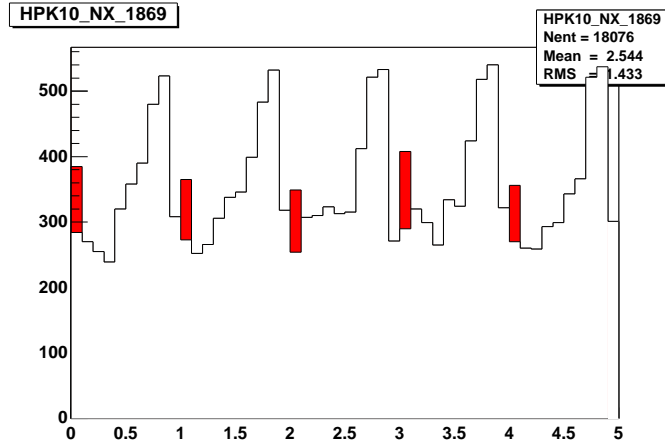


図 3.7: 重心法によって求められたクラスタ中心。横軸はピクセル単位で、色付きは1ピクセルに収まったクラスタをあらわし、ピクセル中心は1、2、3、4と定義してある。

3.2.4 Ratio Location Mapping 法

局所電荷極大ピクセルを中心とした 3×3 の領域に含まれる4つの 2×2 領域のうち、最大のものをクラスタとして選択する。

局所電荷極大と、その隣接ピクセルの電荷比 R_x に対して、荷電粒子の一様入射を仮定すると

$$\frac{dN}{dx} = \text{const}, R_x = \frac{C_{\text{next}}}{C_{\text{peak}}}$$

から、

$$\begin{aligned} X(\log(R)) &= \frac{0.5}{N} \int_{-\infty}^{\log(R)} \frac{dN}{d \log(r)} d \log(r) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n \log^n(R) \end{aligned}$$

とできる。この展開式を実データを元に決定し、さらにこの展開式を用いて入射粒子の位置を決定する。このような方法を Ratio Location Mapping (RLM) 法と呼んでいる。

図 3.9 に 1、3、5、7 次式で近似したものを示す。大まかな外形は 3 次まで表せ、高次の項は補正となる。実際に用いた 5 次式においても 3 次までの項の影響が大きく、4 次、5 次の項の影響は小さい。

良い近似となる奇関数の内、最小の 5 次式を実際には用いた。更に、荷電粒子の CCD への入射角によって、この展開式は変化する。 $r = \log R$ とおいて、例えば

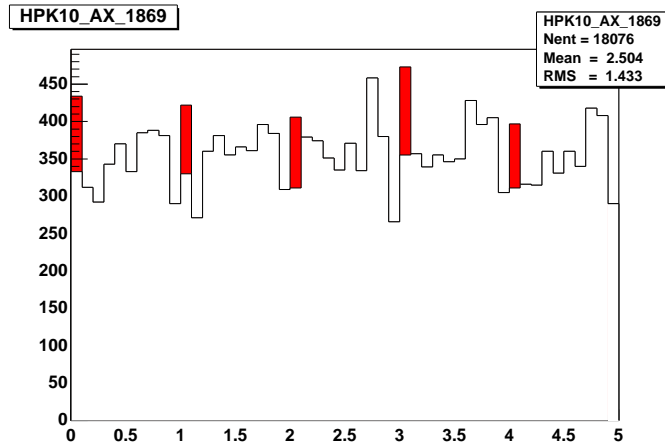


図 3.8: 重心法に補正を行った結果求められたクラスタ中心。横軸はピクセル単位で、色付きは1ピクセルに収まったクラスタ。

HPK10 μm 、垂直入射の場合には

$$X(r) = (0.51 \pm 0.06) + (0.24 \pm 0.09)r - (0.01 \pm 0.08)r^2 + (0.03 \pm 0.06)r^3 \\ + (0.01 \pm 0.02)r^4 - (0.01 \pm 0.01)r^5$$

45度入射の場合には

$$X(r) = (0.62 \pm 0.07) + (0.32 \pm 0.11)r - (0.08 \pm 0.10)r^2 - (0.01 \pm 0.01)r^3 \\ + (0.01 \pm 0.02)r^4 + (0.01 \pm 0.02)r^5$$

60度入射の場合には

$$X(r) = (0.64 \pm 0.08) + (0.51 \pm 0.10)r - (0.13 \pm 0.15)r^2 - (0.14 \pm 0.09)r^3 \\ + (0.03 \pm 0.06)r^4 + (0.02 \pm 0.03)r^5$$

のような式になる。

こうして得られたものを図 3.10 に示す。点線は実際の RLM 関数を表し、濃い線は電荷分布が線形であると仮定した場合に得られる関数を示す。

有感層深部から蓄積層に達するまでに電荷が拡散するため、角度を持って入射した際には2つのピクセルの丁度真中(ポテンシャル壁上)に入射した場合にも、電荷は2つのピクセルに等しく蓄積されるわけではないことが分かる。

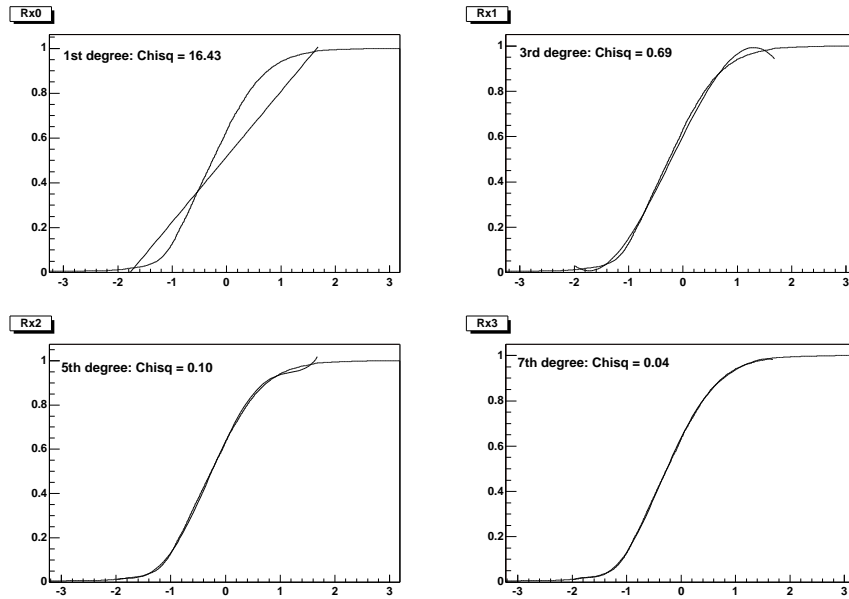


図 3.9: RLM 法の Mapping 近似関数の次数による変化。それぞれ、1、3、5、7次の関数で近似してある。

3.3 アライメント

CCD の位置分解能は μm オーダであるのに対し、実験時には mm オーダの精度でのみ、各 CCD 間の相対位置、傾きが決定されている。そこで、実際にビームを用いて得られたデータから逆算して各 CCD の位置と傾きを補正する必要がある。以下にその方法を述べる。

3.3.1 Residual

CCD0 と CCD1、CCD2 を用いて位置分解能を決定する。その際、CCD3 は偽トラックを取り除くために使用する。

CCD0 上のクラスタと CCD1 上のクラスタを直線で結んで延長し CCD2 面との交点を求める。この交点と実際に CCD2 上でクラスタが見つかった位置との差を residual とする (図 3.11)。

CCD0、CCD1、CCD2 が平行であれば、CCD0 と CCD1 の距離 d_1 と CCD1 と

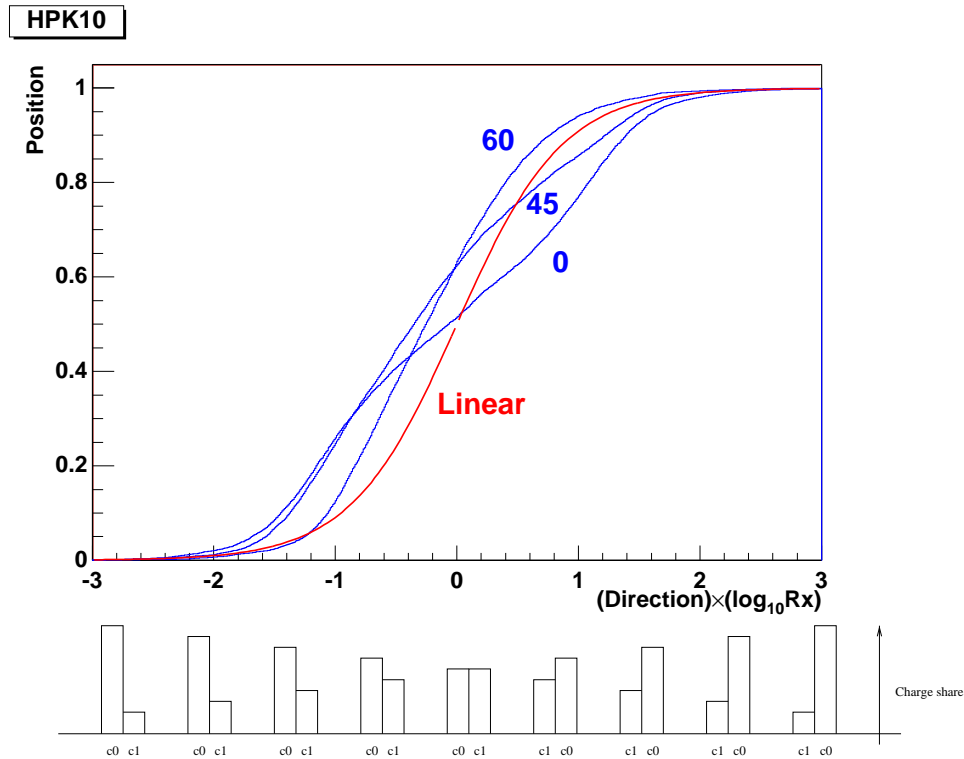


図 3.10: RLM 法の Mapping 関数

CCD2 の距離 d_2 を用いて、residual は

$$\text{Residual} = x_2 - \left\{ x_1 + \frac{d_2}{d_1}(x_1 - x_0) \right\}$$

のように表される。

CCD1 の中心を原点として図 3.11 のように直交座標系をとる。

3.3.2 大まかな位置合わせ

最初に大まかな位置合わせを行うために、全ての CCD が平行であると仮定して、CCD1 上のクラスタ位置に対して、他の CCD 上のクラスタの相対位置

$$\delta X_i = X_i - X_1 (i = 0, 2, 3)$$

に現われるピークを用いて X-Y 平面上での平行移動を決定する。図 3.12 に

更に、

$$Z = \frac{X_2 - X_1}{X_1 - X_0}$$

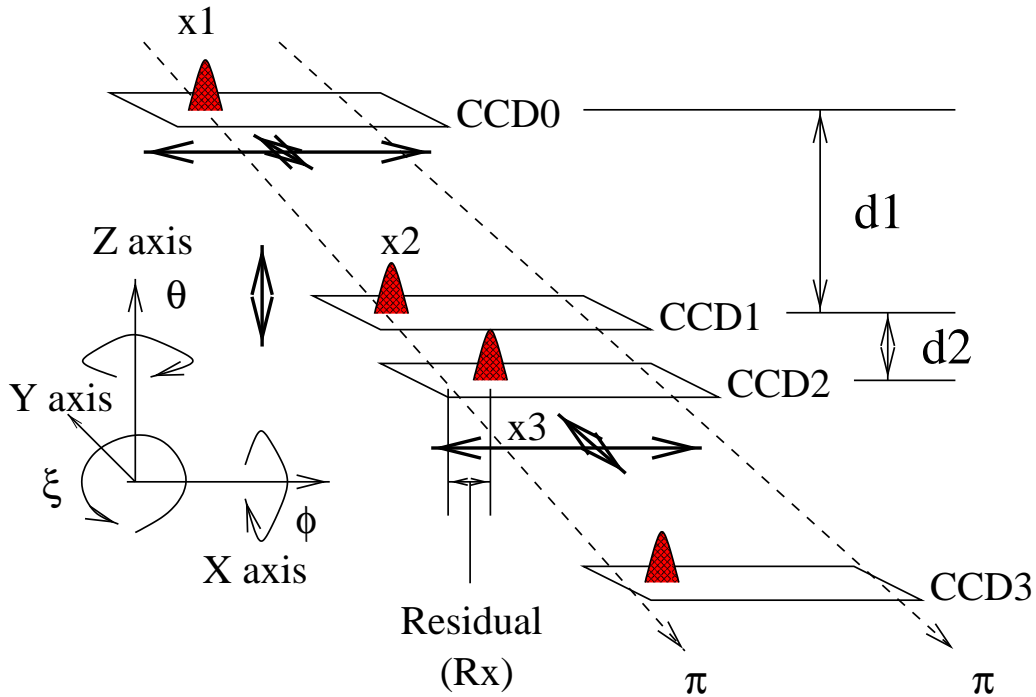


図 3.11: Residual と座標系

を用いて、 $\frac{d^2}{d1}$ (Z 方向のずれ) を決定する。

また、 $dx - Y$ と $dy - X$ の相関を用いて X-Y 平面上での回転を決定する。

3.3.3 Track Selection

ここまでのアラインメント調整によって粒子の軌跡候補がある程度取り出せるようになる。CCD1 - CCD2 間と CCD1 - CCD3 間の比は約 1:5 である。そこで、CCD2 上での residual の広がり σ に対して、CCD3 上での residual の広がりが 5 倍以内に収まったものを真の Track として用いた (図 3.13)。

3.3.4 Residual Minimization

取り出された軌跡の候補を用いて CCD1 における荷電粒子通過位置によって、 4×4 の領域に分割して residual の分布を見てみると、入射角度が 45 度よりも大きくなった場合に、その平均値は場所によって図 3.14 の黒丸の分布に見られるように一定の

規則性を持ってずれていた。なお、図は HPK10 の 45 度入射時のものである。

垂直入射の場合はこのような現象は起こっておらず、これは CCD 面が斜めに傾いているため、各 CCD 面間の平行からのずれの影響が大きく出たものと考えられたので、CCD1 に対して、CCD0 と CCD2 がそれぞれの中心を通る直交 3 軸を軸として回転していると想定して、図 3.11 に示すような

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = (\theta) (\phi) (\xi) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix}$$

のように回転補正を行った場合に residual の自乗和が最小になるように回転と各平行移動のパラメータを決定し、補正を行った。その結果、図 3.14 の四角の分布に見られるようにそれぞれの領域における規則的なずれは非常に小さくなった。その際各パラメータの例を表 3.2 に示す。

パラメータ	値	パラメータ	値
θ_0	0.002 ± 0.005	θ_2	0.000 ± 0.001
ϕ_0	-0.010 ± 0.006	ϕ_2	0.002 ± 0.001
ξ_0	-0.010 ± 0.005	ξ_2	-0.006 ± 0.001
δX_1	-0.094 ± 0.011	δY_1	-0.002 ± 0.011

表 3.2: Residual 最小化パラメータの例 (HPK50、60 度入射時)

従って、実際の加速器実験に用いる場合に角度を持って入射する位置に設置する場合には、CCD 面の傾きを十分小さくなるように微調整をするか、面の傾きを補正する必要がある。

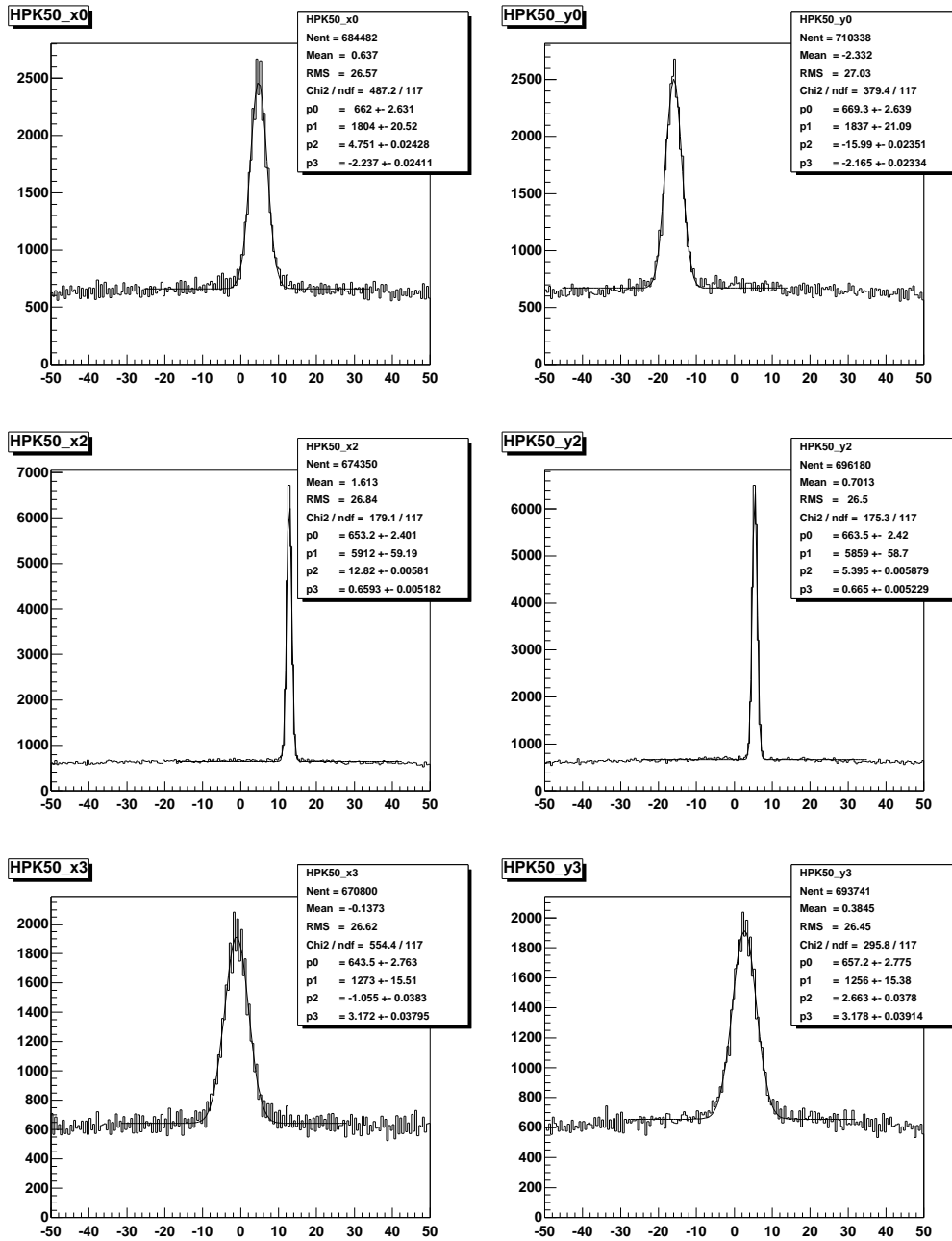


図 3.12: HPK 50 における X-Y 相関のあらわれ

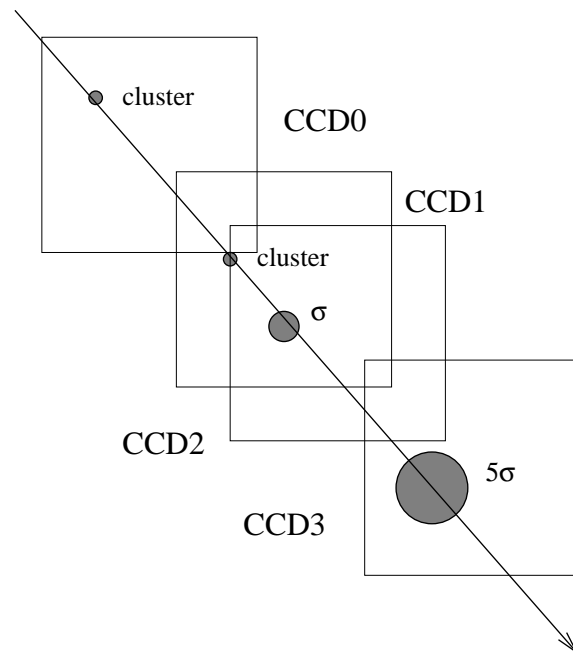


図 3.13: CCD3 上での residual による track selection。Residual の広がりが 5 倍以内に収まったものを真の Track として用いる。

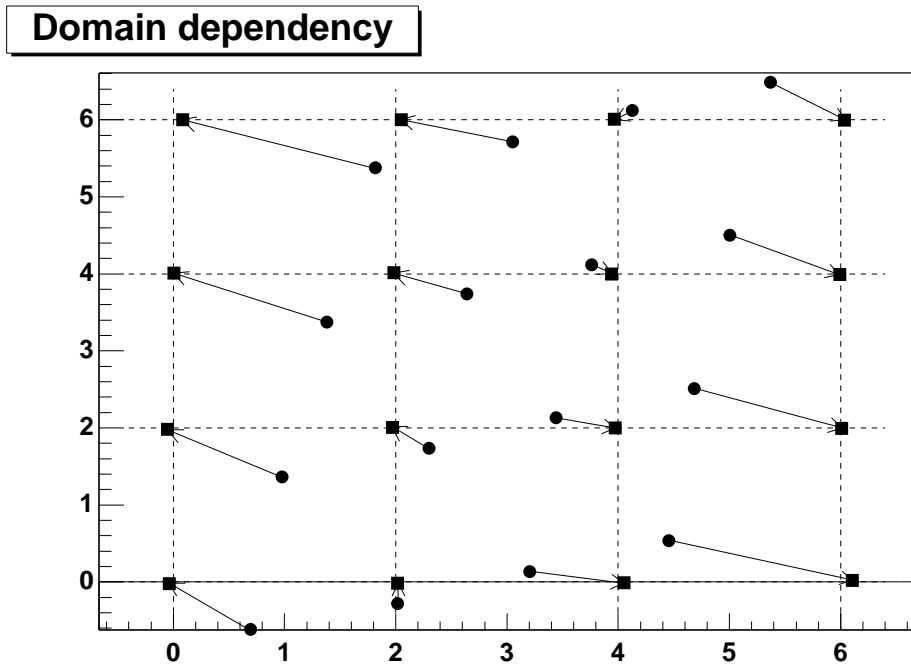


図 3.14: CCD 面を 4×4 分割した場合の Track 通過位置による residual 中心のずれ (HPK10、45度入射時)。それぞれの軸は pixel 単位で、1pixel は $24\mu\text{m}$ であり、丸が補正前のずれを、四角が補正後のずれを表す。

3.4 解析結果

3.4.1 位置分解能の運動量依存性

0.5~2 GeV/c のそれぞれの運動量の場合に得られる位置分解能は固有位置分解能 $\sigma_{\text{intrinsic}}$ と多重散乱によるもの $\sigma_{\text{scattering}}$ の重ね合わせで

$$\sigma_{\text{residual}} = \sqrt{\sigma_{\text{intrinsic}}^2 + \sigma_{\text{scattering}}^2}$$

と表せるものとする。また、 $\sigma_{\text{scattering}}$ は運動量に反比例して

$$\sigma_{\text{scattering}} \propto \frac{z}{\beta cp} \sqrt{\frac{L}{L_R}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{L}{L_R} \right) \right]$$

と表せる [8] ので、

$$\sigma_{\text{residual}} = \sqrt{\sigma_{\text{intrinsic}}^2 + \frac{A^2}{p^2}}$$

に対して各運動量における位置分解能を代入し、fitting を行って $p \rightarrow \infty$ へ外挿することで、固有位置分解能を求めることができる。図 3.15 は RLM 法を用いて求めた垂直入射の場合の位置分解能の運動量依存性を示したものである。また、図 3.16、3.17 はそれぞれ 45 度、60 度入射時の位置分解能の運動量依存性を示したものである。

σ_{residual} は全ての CCD の位置分解能の重ね合わせで

$$\sigma_{\text{residual}}^2 = \sigma_{\text{CCD2}}^2 + (1 + Z)^2 \sigma_{\text{CCD1}}^2 + Z^2 \sigma_{\text{CCD0}}^2$$

と表される。ここで、 Z は $\frac{dz}{d1}$ である。HPK10 をターゲットとした場合には、

$$\sigma_{\text{CCD0}} = \sigma_{\text{CCD1}} = \sigma_{\text{CCD2}}$$

と仮定して

$$\sigma_{\text{HPK10}} = \frac{\sigma_{\text{residual}}}{\sqrt{2(Z^2 + Z + 1)}}$$

を HPK10 1 つに対する固有位置分解能とし、この値を用いて EEV20 と HPK50 の固有位置分解能を求めた。

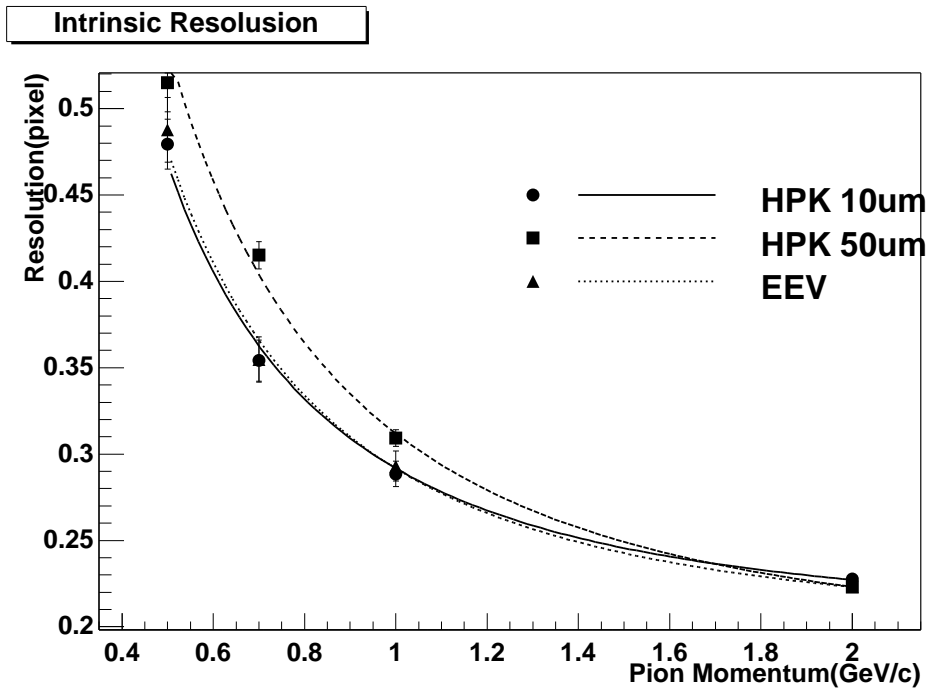


図 3.15: 位置分解能の運動量依存性 (垂直入射時) RLM 法を用いて求めたもので、丸が HPK10 μm を、四角が HPK50 μm を、三角が EEV を表す。

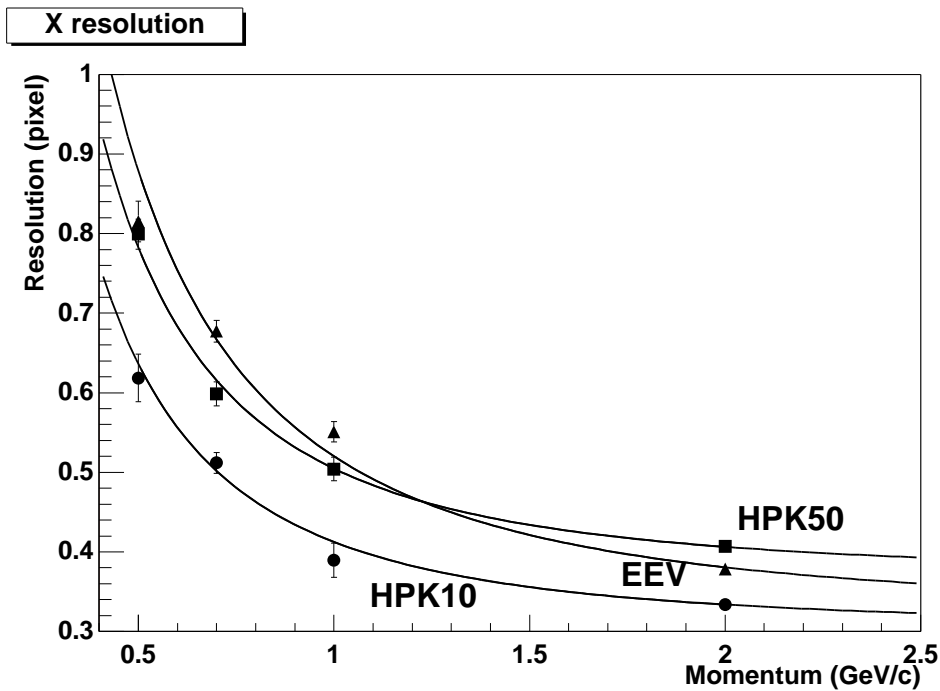


図 3.16: 位置分解能の運動量依存性 (45 度入射時)

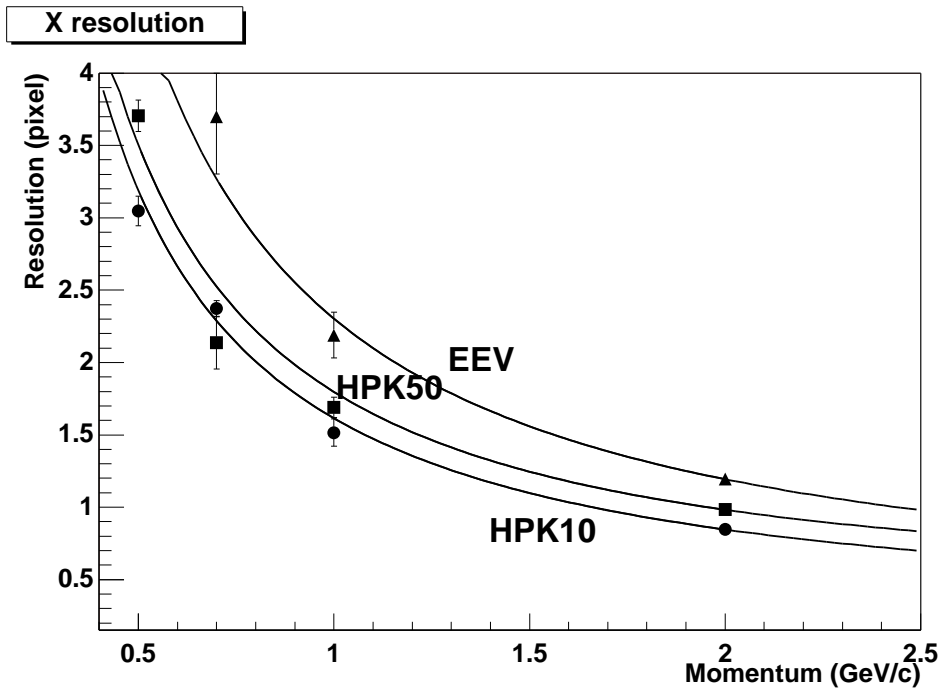


図 3.17: 位置分解能の運動量依存性 (60 度入射時)

3.4.2 固有位置分解能

3.4.1 節で述べた方法によって求められた垂直、45度、60度入射における固有位置分解能を表 3.3、3.4、3.5 に示す。さらにまとめてグラフにしたものを図 3.18 に示す。

CCD	位置分解能 (μm)		
	重心法	重心法 (補正付)	RLM 法
HPK 10	3.87 ± 0.05	3.78 ± 0.06	2.98 ± 0.05
HPK 50	2.35 ± 0.10	2.31 ± 0.13	2.26 ± 0.19
EEV 20	3.90 ± 0.12	3.80 ± 0.15	2.73 ± 0.30

表 3.3: 垂直入射時

垂直入射の場合には、RLM 法では $3\mu\text{m}$ 以下の結果を与えているが、重心法では約 $4\mu\text{m}$ という結果になった。

CCD	方向	重心法	重心法 (補正付)	RLM 法
HPK 10	X	4.65 ± 0.06	4.53 ± 0.06	2.86 ± 0.10
	Y	4.72 ± 0.05	4.30 ± 0.06	2.58 ± 0.07
HPK 50	X	6.15 ± 0.15	6.16 ± 0.14	6.97 ± 0.16
	Y	3.31 ± 0.11	3.20 ± 0.12	3.68 ± 0.12
EEV 20	X	3.98 ± 0.13	3.73 ± 0.13	3.62 ± 0.17
	Y	3.80 ± 0.10	3.41 ± 0.11	3.14 ± 0.12

表 3.4: 45° 入射時

45度入射においては重心法とそれに対する補正を行った場合とで、ほとんど差が見られなかったが、後者がやや良い結果を与えている。重心法を RLM 法とでは、図 3.19 に見られるように HPK10 に対しては後者がかなり良い結果を与えているが EEV ではほとんど同じ分解能となっている。逆に HPK50 では前者の方が良い結果を与えた (図 3.21、3.20)。

また、HPK10 において RLM 法が非常に良い値を与えているため、これによって、HPK50 と EEV の RLM 法の値が大きく見積もられている可能性がある。

60度入射においては、重心法とこれに対して補正を行ったものとは大きな差は見られなかった。また RLM 法との比較は外挿誤差が大きいため、現状では優劣がつけがたい。なお、次に示すような CCD 上の X 方向についての位置分解能の場所依存性や、低運動量時にサンプル数が足りなくなったり、測定点におけるばらつき

CCD	方向	重心法	重心法 (補正付)	RLM 法
HPK 10	X	5.60 ± 0.92	4.33 ± 0.98	7.27 ± 0.85
	Y	5.40 ± 0.34	5.34 ± 0.36	4.61 ± 0.30
HPK 50	X	9.58 ± 1.71	9.47 ± 1.89	16.97 ± 1.92
	Y	5.12 ± 0.72	4.79 ± 0.71	3.61 ± 0.83
EEV 20	X	5.85 ± 3.52	2.47 ± 5.27	5.67 ± 7.51
	Y	6.68 ± 0.91	6.76 ± 1.09	3.48 ± 1.12

表 3.5: 60° 入射時

が多い等の理由で優劣を論じるには誤差が大きい。HPK10 が良い位置分解能を示しているように見える。

3.4.3 重心法と RLM 法

重心法では電荷の広がりに応じてクラスタサイズが動的に取られるため、3ピクセル以上に電荷が広がるような場合に 2×2 の領域だけを用いる RLM 法と比較して良い結果を返すようである。これに当てはまるのは 45 度以上の HPK50 と 60 度入射の場合である。

逆に、ほとんど 2 つ以下のピクセルに電荷が収まってしまうような場合には微妙な電荷比率の変化に敏感な RLM 法の方が有効である。

3.4.4 クラスタ拡張閾値による位置分解能の違い

重心法による clustering の際に、どこまでクラスタを広げるかという問題があり、これまでの解析においては総電荷の変化 ($\frac{\delta Q}{\sum Q}$) が 2% 以下になるように要請した場合の分解能を出したが、HPK50 の 45 度入射に対して重心法を用い、2%、5%、8% と変化させた場合に表 3.6、図 3.22 のような結果を得た。

5%前後が良い値を示し、8%になると再び悪化している。しかしながら、全体として変化はそれほど大きくない。

閾値	X 方向 [pixel]	Y 方向 [pixel]
2%	0.35 ± 0.01	0.27 ± 0.01
5%	0.33 ± 0.01	0.23 ± 0.01
8%	0.37 ± 0.01	0.30 ± 0.01

表 3.6: $\frac{\delta Q}{\sum Q}$ 閾値による位置分解能の違い (HPK50, 45 度入射時)

3.4.5 CCD 通過場所による位置分解能の違い

今回の実験においては、CCD 上の X 方向について部位によって位置分解能に差異が見られるという問題が発生した。この状態を図 3.23 に示す。45 度入射の場合に左側 3 分の 1 の領域において次第に位置分解能の悪化が見られる。また、60 度入射の場合には全体にわたって位置分解能の変化が見られる。

これは、CCD1 において、CCD の大きさが 12mm 角であるのに対し、これを封入してあるセラミックパッケージに空けた穴が 10mm 角程度である為に、入射粒子が通過する部位によってセラミックパッケージを通過するものとそうでないものが発生することが一つの可能性として考えられる (図 3.24)。

そこで、図 3.23 上で左半分にあるようなセラミックパッケージを通過すると考えられるトラックを除いた右半分の部分を通すトラックのみを用いて固有位置分解能を求めてみた (図 3.25、表 3.7)。

CCD	方向	重心法	重心法 (補正付)	RLM 法
HPK 10	X	4.73 ± 0.08	4.56 ± 0.10	3.30 ± 0.06
	Y	4.64 ± 0.07	4.53 ± 0.09	2.57 ± 0.05
HPK 50	X	6.56 ± 0.17	6.68 ± 0.18	6.92 ± 0.14
	Y	4.44 ± 0.14	4.39 ± 0.16	3.79 ± 0.10
EEV 20	X	4.72 ± 0.18	5.05 ± 0.19	4.37 ± 0.16
	Y	5.70 ± 0.15	4.87 ± 0.18	3.34 ± 0.13

表 3.7: 45° 入射時 (CCD の右半分だけ, HPK10, 60 度入射時)

結果として、運動量を無限大に持って行った場合にはあまり大きく数値は変化しなかった。また、EEV は HPK の 4 分の 3 の面積しか持たないため、左半分を削るとサンプルの数が少なくなるため、位置合わせの精度が落ちた可能性がある。図 3.26 に HPK50 の 60 度入射時に全てのトラックを用いた場合と、右半分だけ、左半分だけを用いた場合、また、図 3.27 に CCD0 の回転中心を自由にした場合と、CCD2 の回転中心も自由にした場合の比較を行った結果をまとめた。

いずれの場合も residual の分布にはほとんど変化がない。

3.5 まとめ

浜松ホトニクス社製と EEV 社製の CCD に対して 0 度、45 度、60 度の角度をもたせて π^- を入射させ、その位置分解能を測定した。

浜松 $10\mu\text{m}$ を用いた場合には、角度が付いた場合でも十分良い位置分解能 ($< 6\mu\text{m}$) を示した。

本実験では 45 度、60 度入射時に実験装置の構成によって、CCD の部位によって通過する物質の厚さが異なる等の問題があり、特に 浜松 $50\mu\text{m}$ や EEV $20\mu\text{m}$ を用いた場合に位置分解能の非一様性が問題になった。

垂直入射に近く電荷の広がりが小さい場合には、重心法よりも少しの電荷比の変化にも敏感な RLM 法が有効であった。逆に有感層の厚い CCD で、45 度から 60 度入射にかけて電荷の広がりが大きい場合には中心部の情報しか用いない RLM 法はあまり有効ではなく、重心法の方が良い結果を得られた。

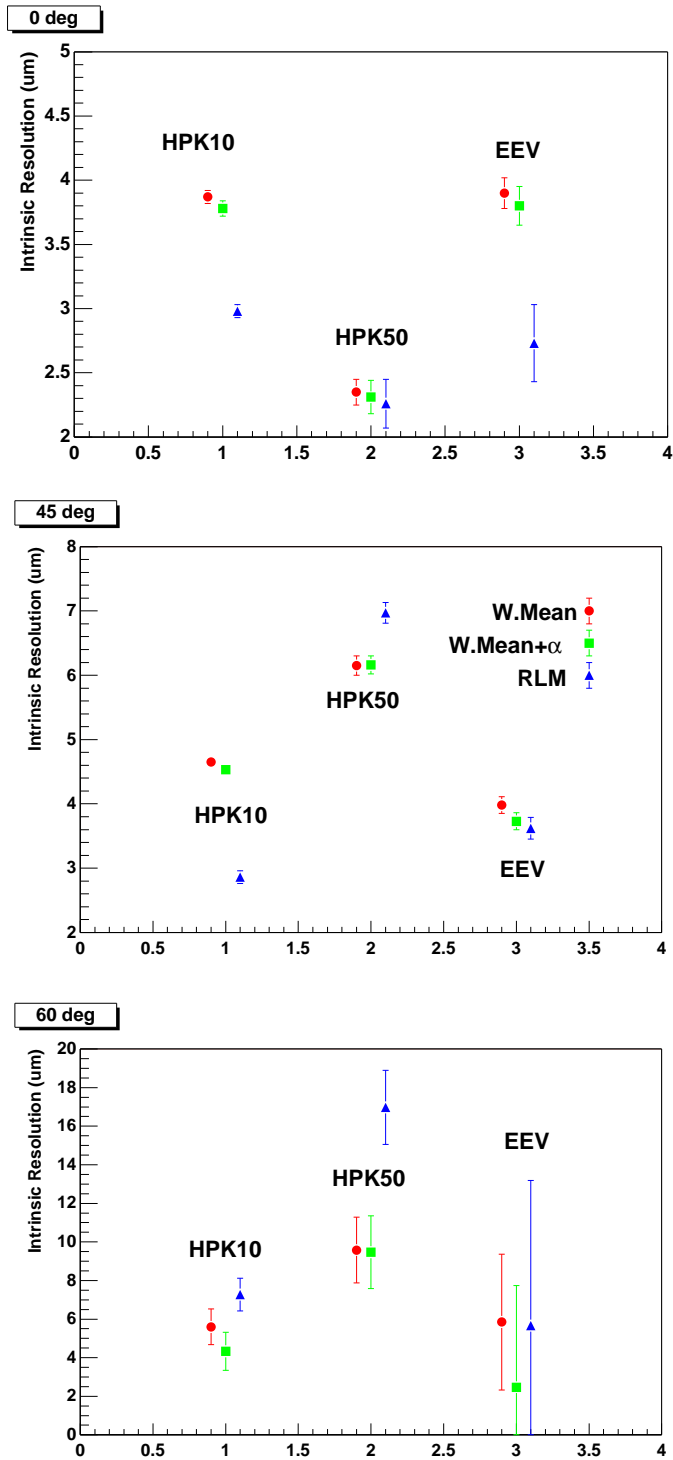


図 3.18: それぞれの角度における固有位置分解能。上図は垂直入射時、中図は 45 度入射時、下図は 60 度入射時で丸は重心法、四角は重心法の補正を行ったもの、三角は RLM 法を用いたものを示す。

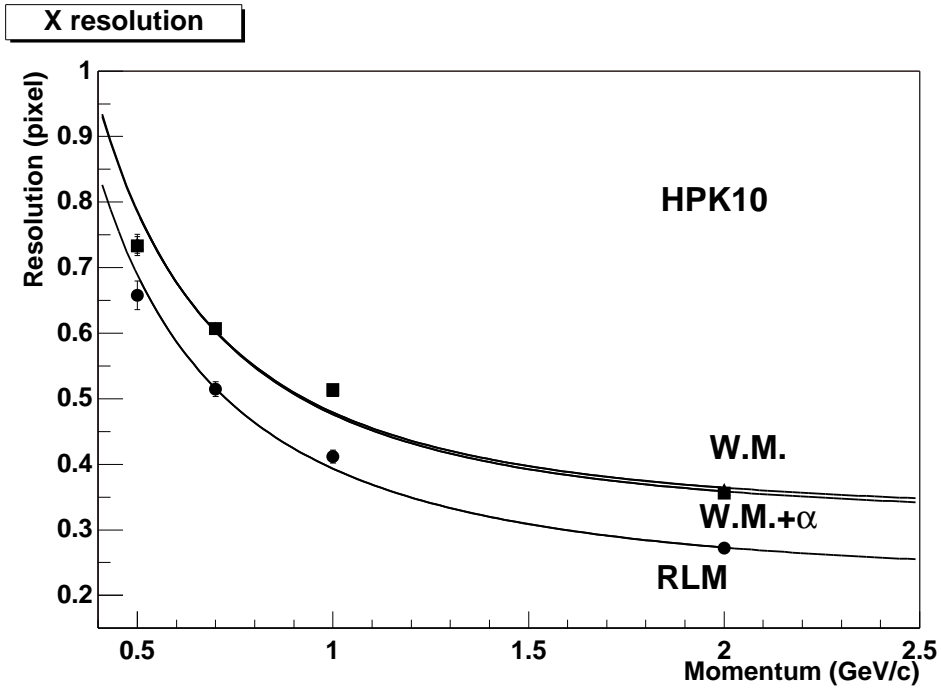


図 3.19: 45度入射時 HPK10 μm

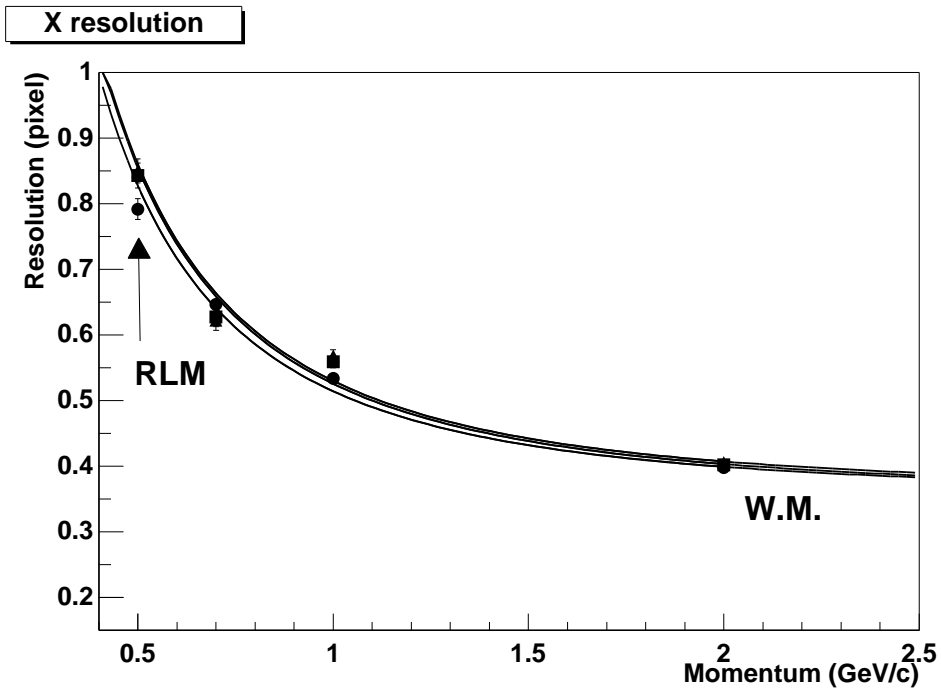


図 3.20: 45度入射時 HPK50 μm

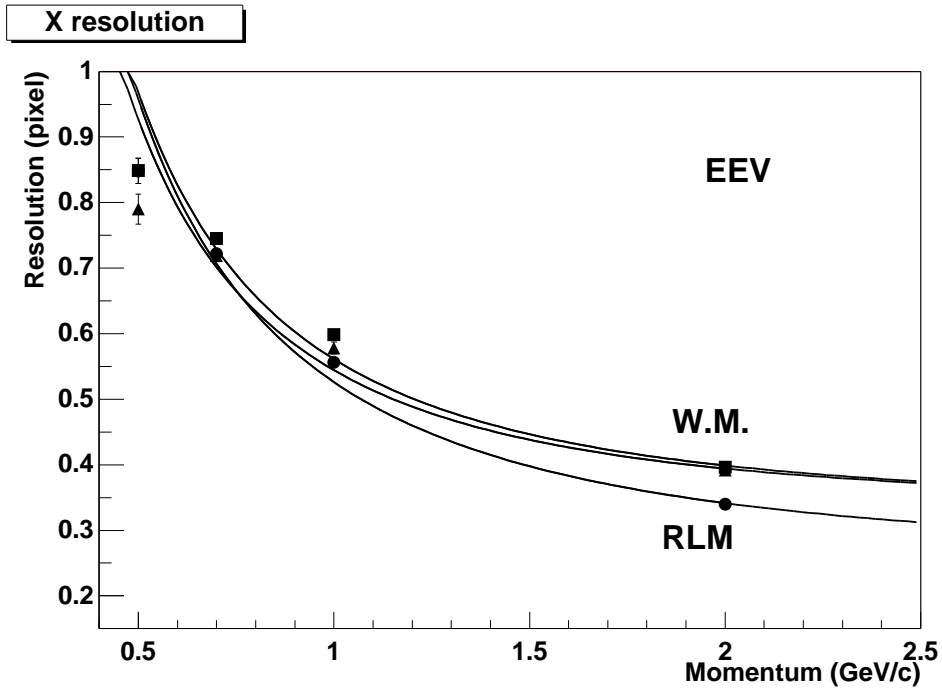


図 3.21: 45度入射時 EEV20 μ m

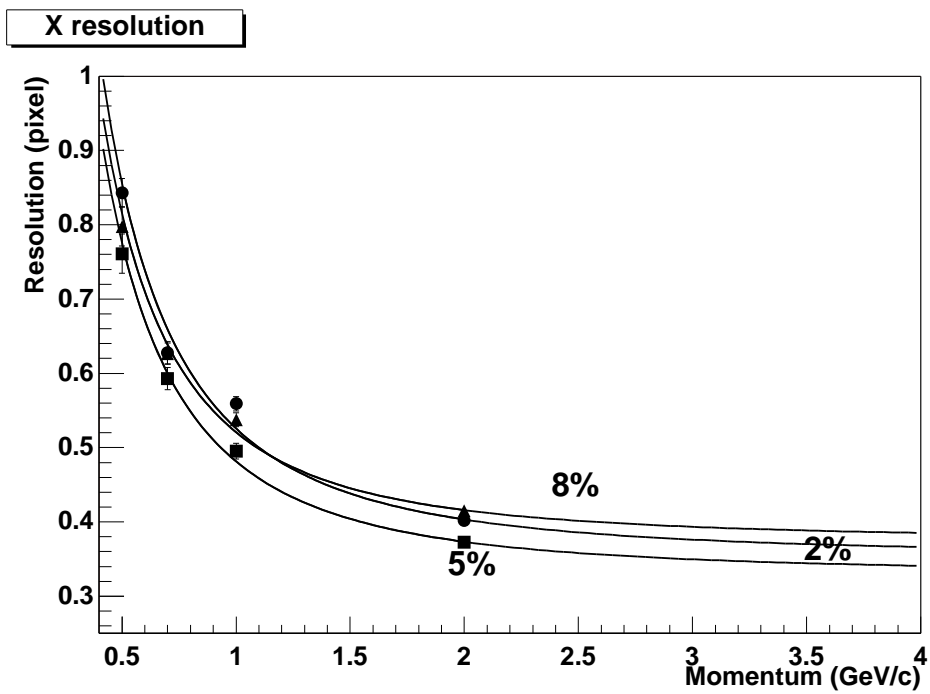


図 3.22: $\frac{\delta Q}{\sum Q}$ 閾値による位置分解能の違い (重心法)

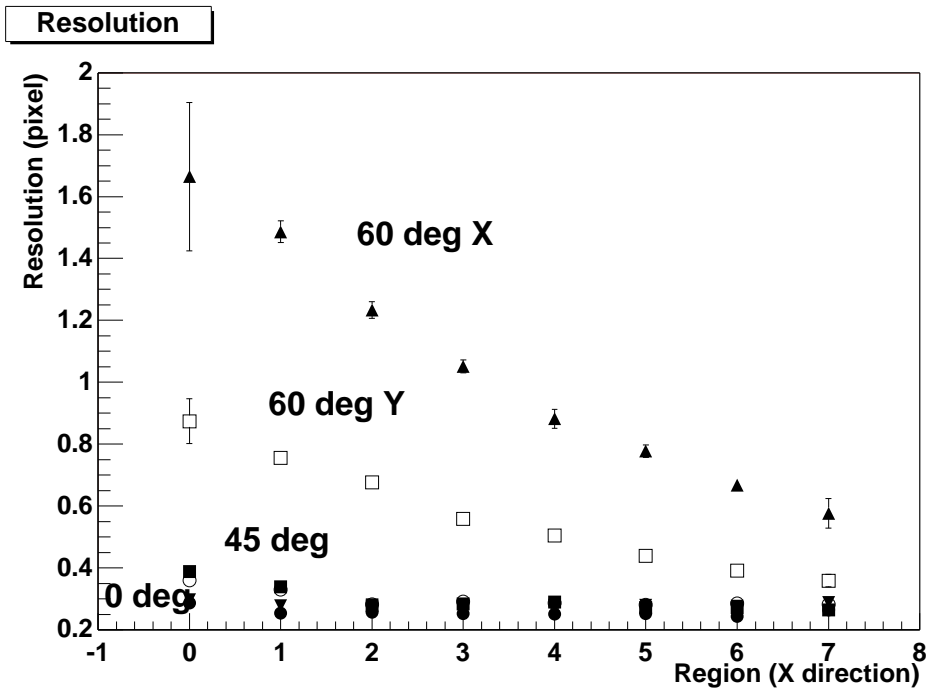


図 3.23: 場所によって異なる位置分解能 (2GeV/c)

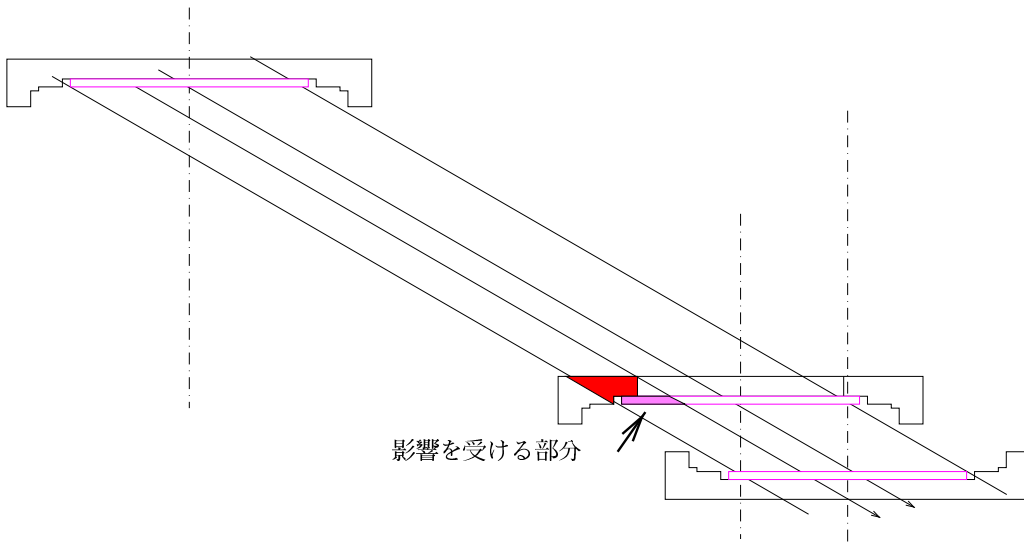


図 3.24: セラミックパッケージを通過するトラック

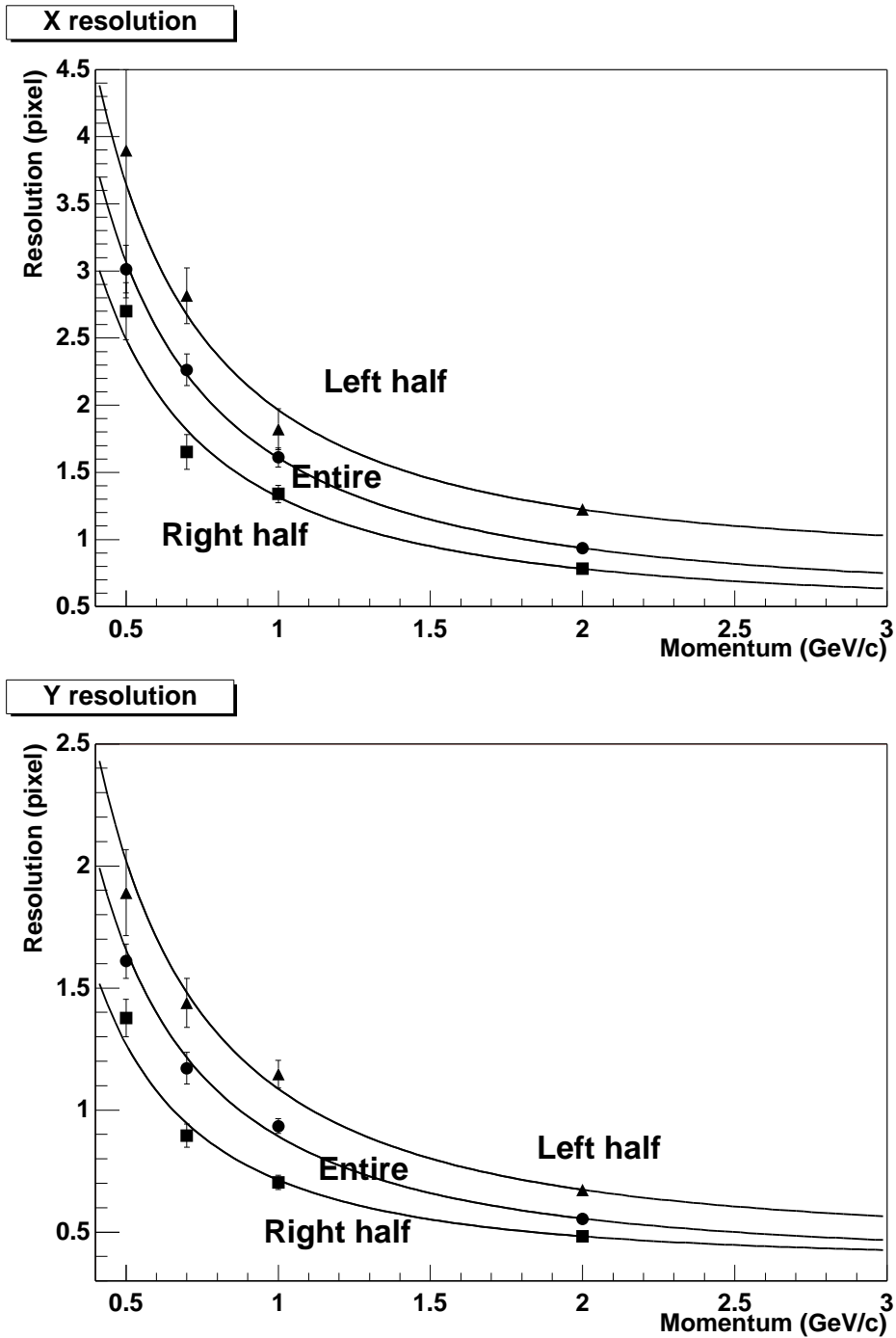


図 3.25: パッケージを通過しない半面、残りの半面、全面を使った場合で位置分解能を求める。上図は X 方向、下図は Y 方向を示す。

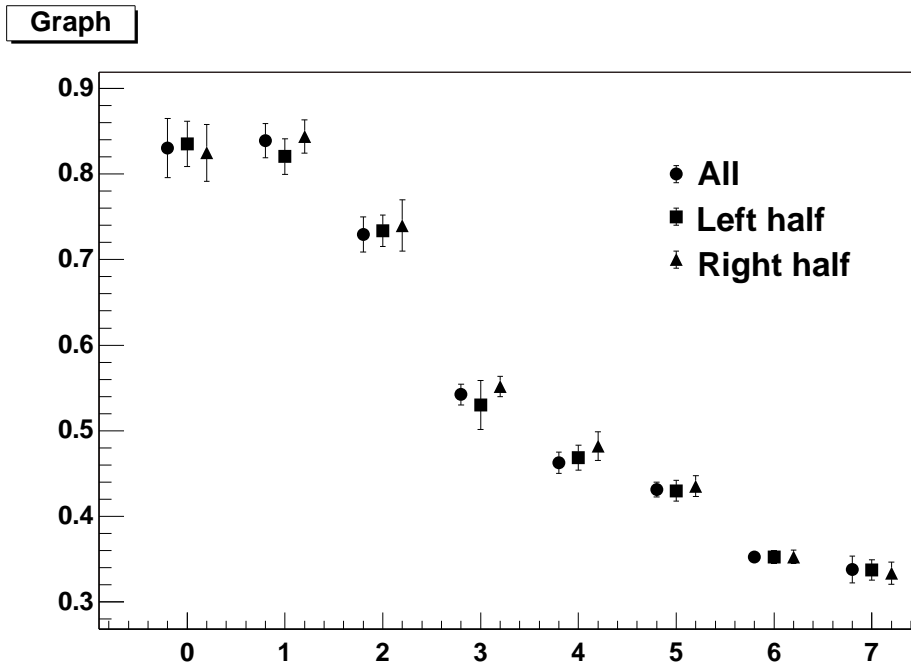


図 3.26: パッケージを通過しない半面、残りの半面、全面を使った場合で位置分解能を求める

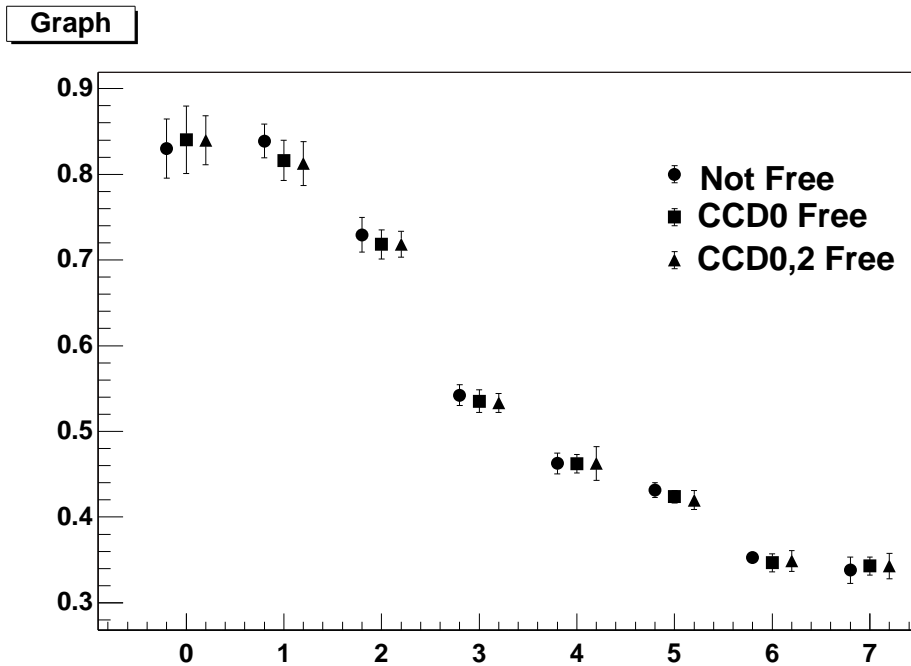


図 3.27: CCD0 の回転中心を自由にした場合、CCD2 の回転中心も自由にした場合

第4章 放射線耐性

CCD を衝突点検出器として用いる場合に問題になるのは、放射線被曝に対する耐性である [11]。JLC では鉛直方向に数 nm ($10^{-9}m$) 水平方向に数百 nm という超扁平ビーム同士を衝突させるため、ビームストラールングによって低エネルギーの電子、陽電子のバックグラウンドが大量に生じる。また、ビームのエネルギーが高くなるにつれ、粒子の生成断面積が小さくなるために、高い Luminosity での実験が要求される。これらの要求環境から発生する高密度のバックグラウンド粒子は、測定器内にはビーム軸と平行に磁場がかけられているために、ビーム軸から遠くまで及ぶことはないが、衝突点最近傍に置かれる衝突点検出器の最内層ではその強度が $10^4/(cm^2 \cdot sec)$ にも達する。この被曝量は年間およそ 15 krad と見積もられており、10 年間の運転において 150 krad に達する。このような放射線被曝に対しては、通常の CCD においてはイオン化損傷と格子欠陥が原因で性能の劣化が発生し問題となると予想されている。

イオン化損傷は電極絶縁部に電荷が蓄積されることで、実際に Si にかかる電圧の変化が発生し、またシリコン-酸化物境界での欠損準位の密度増加が発生する。また、高いエネルギーの粒子によってシリコン原子が格子位置からずれることによってバルク損傷が発生する。

これまでに実際に問題が発生した例として SLAC で行われた SLD 実験がある。CCD を用いた衝突点検出器である VXD3 に、偶発的被曝によって電荷転送効率の低下という形で測定器の劣化が現われて問題となった。

従って、放射線被曝の影響を定性的に調べる事は重要課題であり、これまでに KEK において HPK S5466 の中性子線と β 線に対する常温での放射線耐性の測定が行われている [9]。

そこで本実験では γ 線を用いて CCD の耐性を測定することを目的として研究を行った。

4.1 暗電流特性

2.4 節でも述べたように、CCD を MPP モードで駆動するためには大きな逆バイアス電圧をかける必要がある。一定の閾値電圧を境として、通常モードから MPP モードに変わり、単位時間当たりの暗電流発生量が大きく減少する。

β 線を用いて行われた測定では、イオン化損傷を測定するために、MPP モードを達成するために必要な逆バイアス電圧つまり、CCD を駆動するクロック電圧の負電位と被曝量との関係が測定された。CCD の駆動に使用できる電圧には限度があるため、限度電圧を用いても MPP モードにならなくなった場合には室温近傍での測定器としての利用が雑音が多く不可能となると考えられる。そこで、本実験においては総被曝量と MPP モード閾値電圧の関係を調べることにした。

4.2 電荷転送非効率

電荷転送非効率 (Charge Transfer Inefficiency, CTI) は CCD によって隣のピクセルに電荷が転送される際に、電荷が失われる割合を表すものである。ある大きさ Q の電荷が隣のピクセルに転送された際に Q' となった場合の電荷転送効率 (Charge Transfer Efficiency, CTE) は

$$\text{CTE} = \frac{Q'}{Q}$$

と表せる。これに対して CTI は

$$\text{CTI} = 1 - \text{CTE} (= 1 - \frac{Q'}{Q})$$

である。

さて、通常の状態の浜松ホトニクス社製 S5466 では CTI は 5×10^{-5} 程度と推定されているが、その場合でも 1024 pixel 転送した場合には

$$(1 - 5 \times 10^{-5})^{1024} = 0.95$$

であり、CCD の端から端まで転送されると 5% 程度の電荷が失われることになる。近年の半導体技術の発達によって 2000×2000 pixel を越す大型 CCD の作成が可能になり、これを用いた場合には数千回の転送が必要となり、電荷転送効率の劣化問題は重要な課題となっている。CTI が発生する原因として格子欠陥による電荷のトラップが考えられている。

これまでの実験によって、CTI は温度や駆動クロック、バックグラウンド電荷の量等様々なパラメータに依存していることが分かっている。本実験では被曝量と温度に対する CTI の変化について調べることにした。

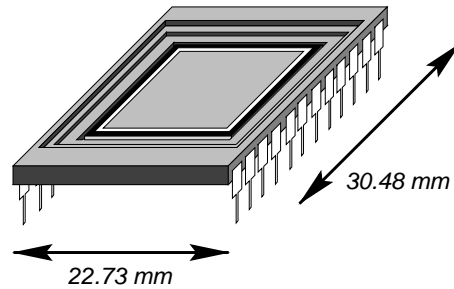


図 4.1: S5466

CCD 種別	フルフレームトランスファー型
開口率	100 %
電荷転送方式	2 Phase %
有効領域	12.288mm(H) × 12.288mm(V)
有効ピクセル	512(H) × 512(V)
ピクセルサイズ	24 μ m(H) × 24 μ m(V)
読みだしノイズ	8 e^- rms
スペクトル領域	400 – 1,100 nm
電荷転送効率	0.99995 (25 度動作時)
標準動作モード	MPP モード

表 4.1: S5466 諸元

4.3 実験

4.3.1 使用した CCD

実験には浜松ホトニクス社製 CCD の標準品である S5466 (図 4.1) を使用した。S5466 の諸元を表 4.1 に示す。S5466 は放射線耐性を強くするような技術は用いていない。本実験では S5466 を 250KHz で駆動し、諸々の測定を行った。

CCD からの出力は PC98 C-bus 内蔵 12bit ADC を用いてデータ化した。制御回路には KEK の杉本氏¹が製作した独自のものを用いたため、読みだし形式には図 4.2 に示すように 512 × 512 ピクセルの有効領域の他に Horizontal overclock (HOC) 領域という空読みの部分や鉛直シフトの間もデータを取り込んでいる。本解析では HOC 領域を用いることで、CCD チップ上にある MOSFET 出力の温度変化の補正を行った。

¹yasuhiro.sugimoto@kek.jp

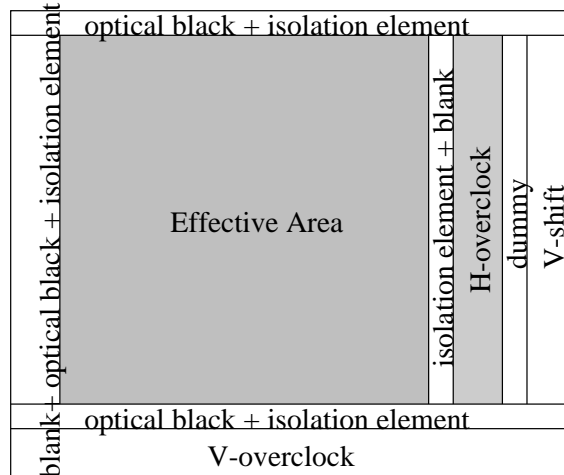


図 4.2: S5466 読みだしフォーマット

4.3.2 γ 線照射セットアップ

γ 線の照射は東北大学におけるコバルト 60 ガンマ線照射のための全学共同利用施設²で行った。

図 4.3 に γ 線照射時のセットアップを示す。CCD は光を遮蔽するためにアルミケースに封入されている。CCD は接地した状態のもの、すなわち駆動電圧を印加しない状態のもの、動作させた状態のものを同時に設置し γ 線を照射した。前者は線源中心から 10cm の距離に、後者は線源から 15cm の距離に設置し、駆動回路は CCD 本体とプリント基板を用いて離して接続し、保護のため厚さ 5cm の鉛ブロックを用いて γ 線から遮蔽された。

線源には ^{60}Co を用いた。 ^{60}Co からは 1.173MeV/c と 1.333MeV/c の γ 線が分岐率 100% で等方的に放出されている³。

β 線による実験 [9] において、同じ線量に対する影響が動作させた状態のものに対する効果が接地したものに対する効果の 2 倍程度であるという測定結果が出ているので、それに準拠して本実験では距離を変えて設置することで、同じ時間照射した場合の影響が同じになり、実験が容易になるように調整した。

線源は長さ 10cm、直径 1cm 程度の円柱状のものが 36 本円環状に並べてあり、これが半径 9cm のステンレス筒 (図 4.4) の内側に固定されるようになっている。その強度は合計で約 200Ci であった。また照射時には微小電流計を用いて CCD のリ

²東北大学コバルト 60 ガンマ線照射実験室

³付録 A 参照

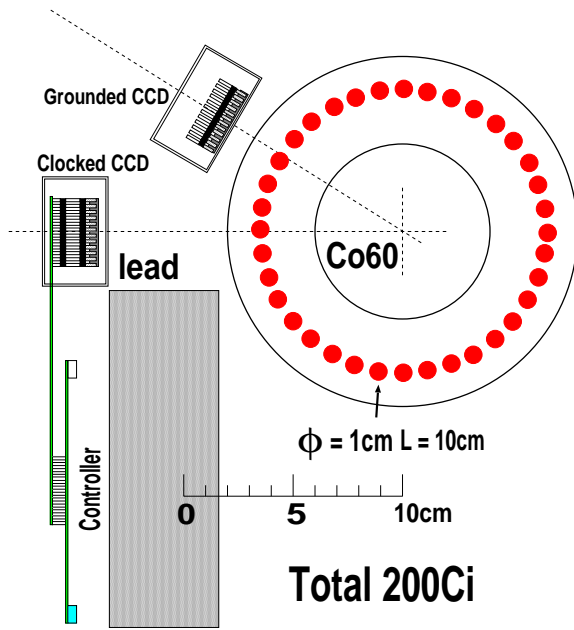


図 4.3: γ 線照射セットアップ



図 4.4: γ 線源

セットドレインに流れる電流の測定を行った (図 4.5)。 γ 線を照射している時とそうでない時とでは $4.4 \pm 0.1 \text{ nA}$ の差であった。シリコンのイオン化エネルギー 3.6 eV を用いると、 $1530 \pm 34 \text{ rad/hour}$ と算出される。

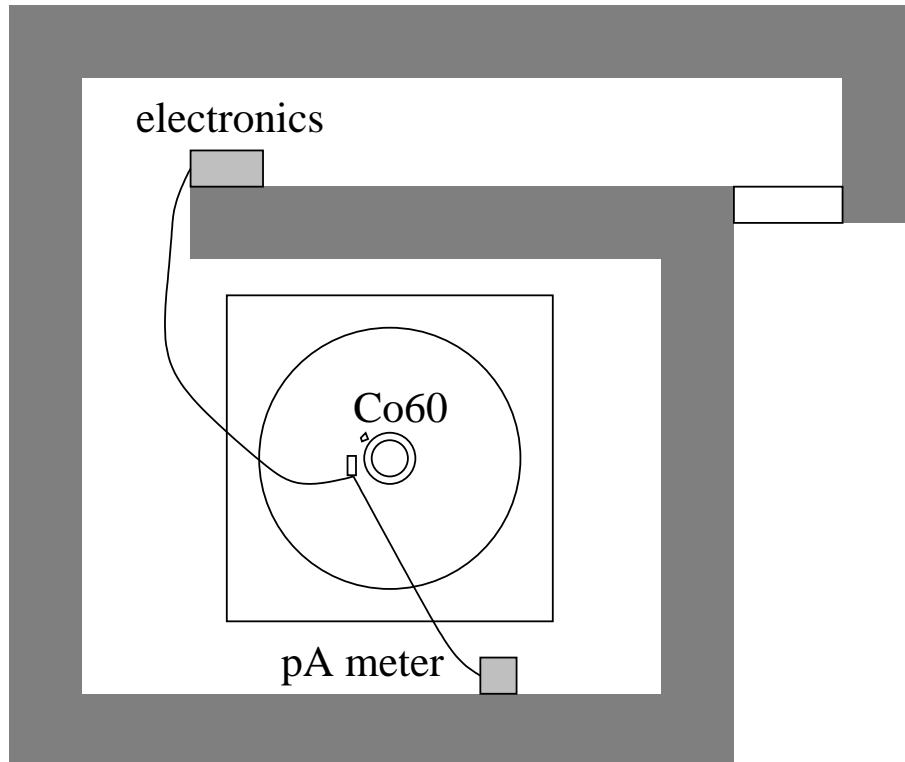


図 4.5: γ 線照射実験室内設置図

しかし、実際には照射線量はコバルト 60 ガンマ線照射施設において、線源中心からの距離に対して詳細に測定されており、それによるとそれぞれの CCD を設置した場所での強度は $1.0 \times 10^4 \text{ R/h}$ と $5.1 \times 10^3 \text{ R/h}$ であった。これに対して、Si に対する吸収線量 $D_a(\text{Si})[\text{rad}]$ は

$$D_a(\text{Si}) = \frac{\mu_{\text{Si}}}{\mu_{\text{空気}}} 0.87 D_e(\text{空気})$$

$D_e(\text{空気})$: 照射線量 [R], μ_X : 質量エネルギー吸収係数

であり、このエネルギー領域においては Si と空気の質量エネルギー吸収係数はほぼ等しく [12]、それぞれ $8.7 \times 10^3 \text{ rad/h}$ 、 $4.4 \times 10^3 \text{ rad/h}$ の吸収線量に相当する。

γ 線の照射は二回に分けて行い、第一回、第二回の照射時間はそれぞれ 6 時間、4 時間とした。それぞれの CCD に対する吸収線量は表 4.2 のように推定された。

	接地 CCD	動作 CCD
第一回	5.2×10^4 rad	2.7×10^4 rad
第二回	3.5×10^4 rad	1.8×10^4 rad
計	8.7×10^4 rad	4.4×10^4 rad

表 4.2: それぞれの CCD に対する推定吸収線量

4.3.3 暗電流量測定セットアップ

暗電流量の測定はペルチェ素子を用いた小型恒温槽 (図 4.6) 内に CCD のみを置き、駆動回路は常温の室内に置いて行った。この恒温槽は 20°C から -10°C までの範囲で温度制御が可能である。

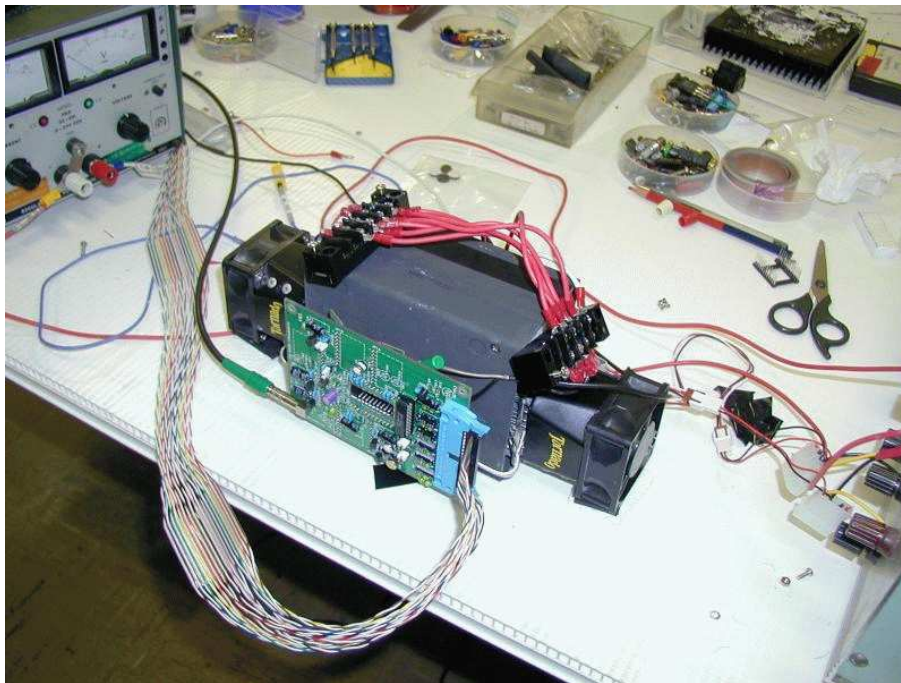


図 4.6: 暗電流測定小型恒温槽

4.3.4 電荷転送非効率測定セットアップ

γ 線照射前と照射後恒温槽中に CCD を設置し、MPP 動作をさせるために必要な電圧を印加した上で、 ^{55}Fe を用いて CTI の測定を行った。S5466 は FFT 型であって、受光部が電荷蓄積部や電荷転送部を兼ねているため、電荷転送中に入射した X

線によっても信号が発生し、この場合、入射位置が不定となる。そこで正確に CTI を測定するために、コパル製の電磁シャッター EC-601 を用いて、蓄積時にはシャッターを 0.25 秒開放し、続く約 1.3 秒間の電荷転送中読みだし中にはシャッターが閉じ X 線が入射しないようにした。

図 4.7 に CCD および電磁シャッターの駆動回路のブロック図を示す。CCD 用の電源としては専用の安定化電源を用い、他の電源と分離した。Beam spill gate generator は 0.8 hz 以下の発振、および単純 delay として用いてある。

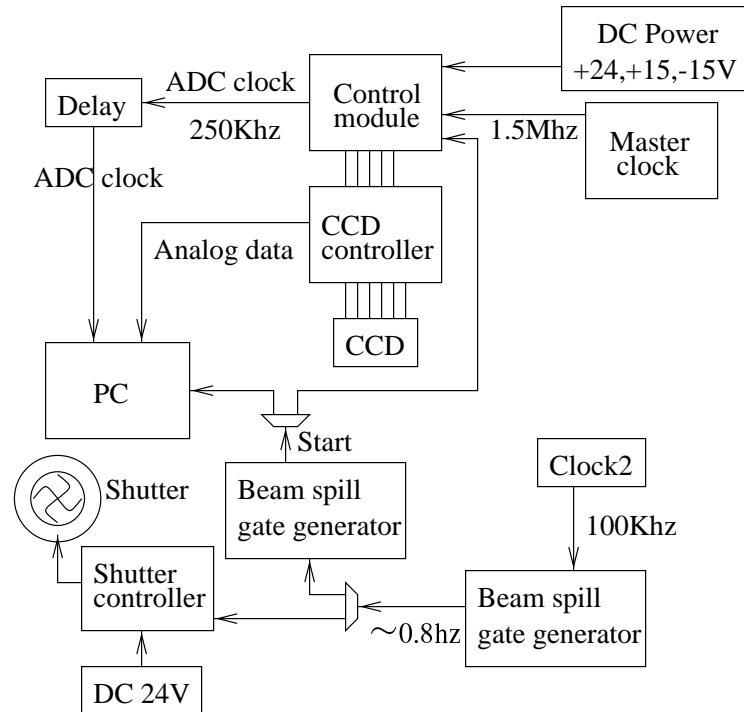


図 4.7: CTI 測定用回路セットアップ

4.4 暗電流量測定

まず γ 線を照射する前に、-10、0、10、20°C の各温度における鉛直方向負クロック電圧 V_{cc} と単位時間当たりの暗電流発生量の関係を測定した。測定は CCD の蓄積時間を 1、2、3、4 秒と変えて、暗電流のピーク位置の変化を調べることによって行った。

浜松ホトニクス標準ドライバ回路 C5934 を用いた場合には鉛直方向クロック電圧は正側 V_{cc} を 6V、負側 V_{ee} を -8V を出力するように設計されている。そこで、本

蓄積時間 [秒]	暗電流量 [ADC count]		
	通常モード (-5.5V)	MPP モード (-8V)	比率
1.0	408 ± 18	32 ± 4	0.078
2.0	652 ± 34	47 ± 8	0.072
3.0	900 ± 49	61 ± 12	0.068
4.0	1142 ± 65	75 ± 15	0.066

表 4.3: 蓄積時間に対する暗電流量の変化。単位は ADC count

実験ではクロック電圧は正電位と負電位の差が 14V 以下になるように V_{ee} と V_{cc} を独立に変化させて測定を行った。表 4.3 と図 4.8 は MPP モードと通常モードでの蓄積時間に対する暗電流量の変化の違いを示したものである。MPP モードでは暗電流量が通常モードの 10 分の 1 以下になることが観測された。

図 4.9 には暗電流量を蓄積時間の関数として示した。蓄積時間に正比例して、暗電流量が増加していることが分かる。

^{55}Fe を照射して全吸収された場合に得られる信号分布を図 4.10 に示す。 ^{55}Fe の K_{α} 線 (5.9KeV) と K_{β} 線 (6.49KeV) に相当するピークが明確に観測されている。 K_{α} 線のピークは $1620e^{-}$ 発生に相当しており、これを基準とする。このようにして得られた各温度における V_{ee} に対する単位時間当たりの暗電流発生量の変化を図 4.11 に示す。

この状態では、温度に関係なく、垂直シフトレジスタの V_{ee} が -7V ~ -11V の間では MPP モードで動作し、-6.75V を境に急激に暗電流発生量が増加し、-3V ~ -6.5V の間では MPP モードにならずに動作していることが分かる。

γ 線を照射した後の V_{ee} に対する暗電流発生量を図 4.12 に示す。上図は CCD を接地した状態で γ 線を照射した場合であり、下図は実際に動作させた状態で照射した場合のものである。図中の丸点は照射前、四角点は第一回照射後、三角点は第二回照射後の測定結果を表している。

いずれの CCD においても、MPP 動作をさせるために必要な閾値電圧 V_{ee}^{MPP} が負の方向に移動していったことが分かる。接地状態で被曝したものについては、-6.75、8、10V 付近が、駆動状態で被曝したものについては、-6.75、-9.75V 付近が閾値電圧であり、動作させた状態のものよりも接地した状態のものの方がより多く被曝しているにも関わらず、閾値電圧 V_{ee}^{MPP} の移動はより少ない。2 回目の照射後には V_{ee} を -11V に設定しても MPP モードに到達できなくなった。これ以上の測定は装置上の制限により行えなかった。CCD 接地した状態で被曝した場合には、MPP モードにおいても通常モードにおいても暗電流量の増加が観測された。

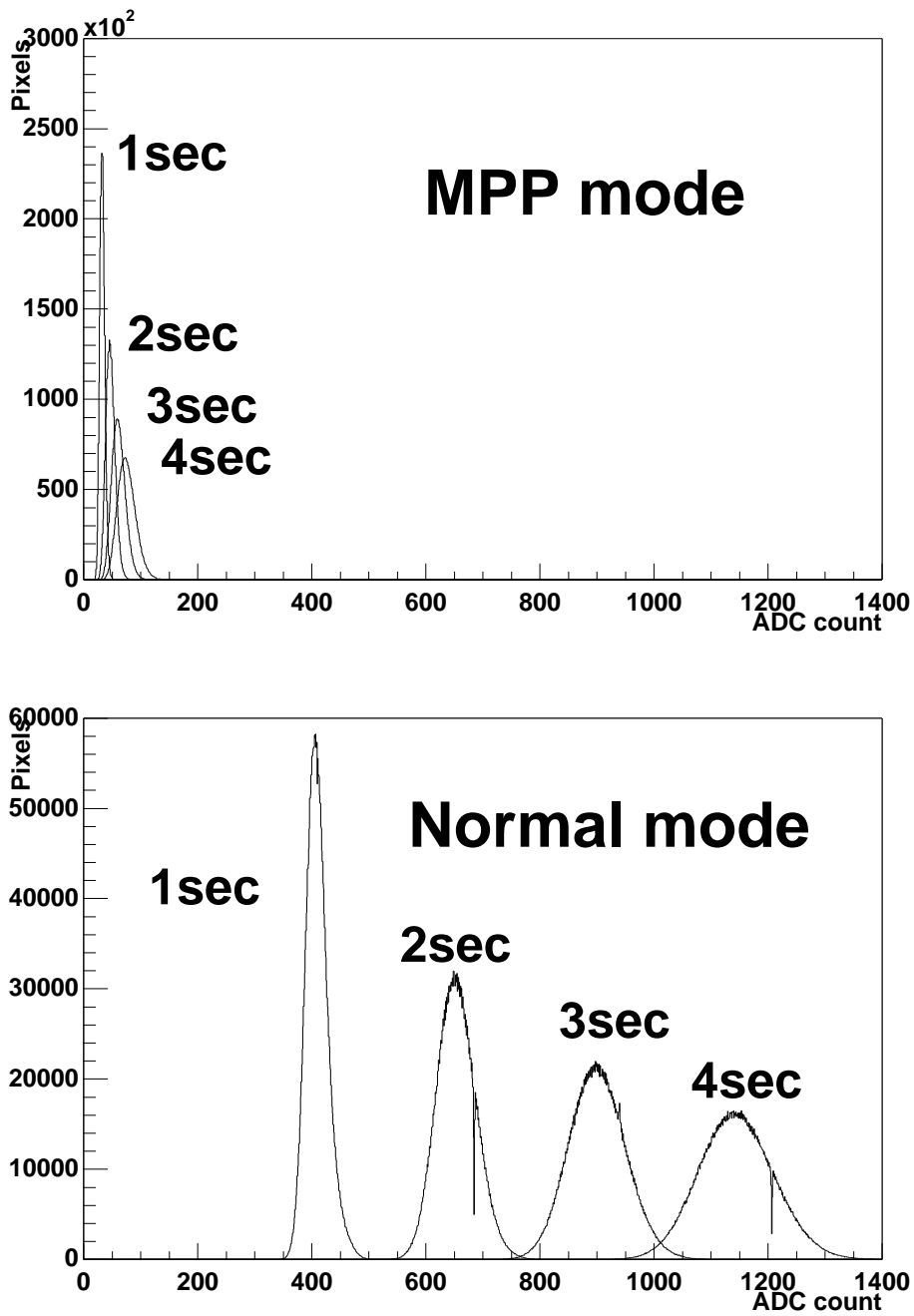


図 4.8: γ 線照射前の蓄積時間に対する暗電流の発生量の変化。上図は 10°C、-8V の負駆動パルス電圧で測定したもの、下図は 10°C、-5.5V で測定したもの。

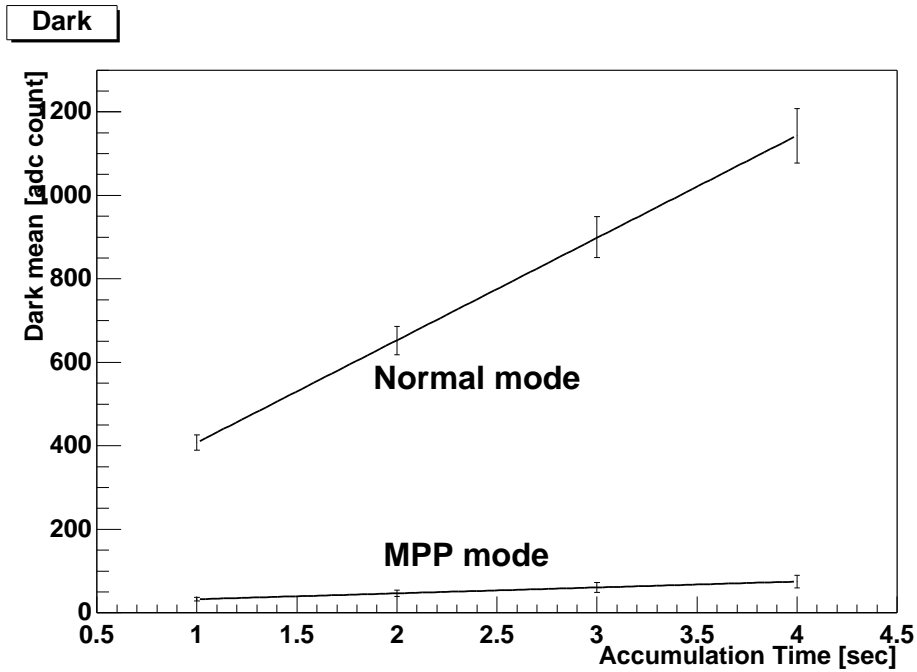


図 4.9: 蓄積時間に対する暗電流の発生量の変化。図は図 4.8 に対して直線で傾きを求めたもの

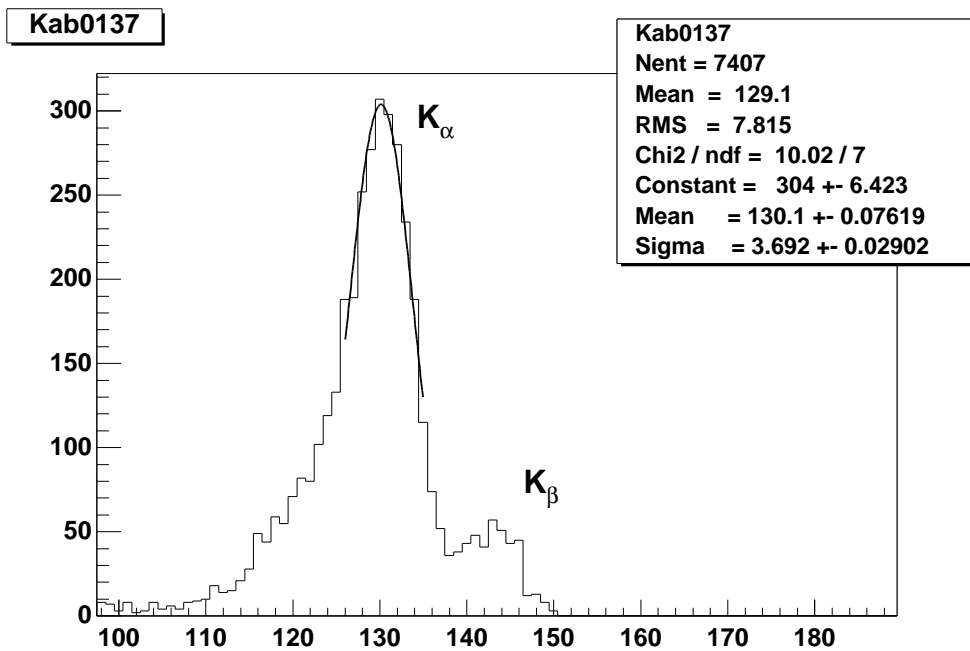


図 4.10: ⁵⁵Fe の K_α 線の信号分布

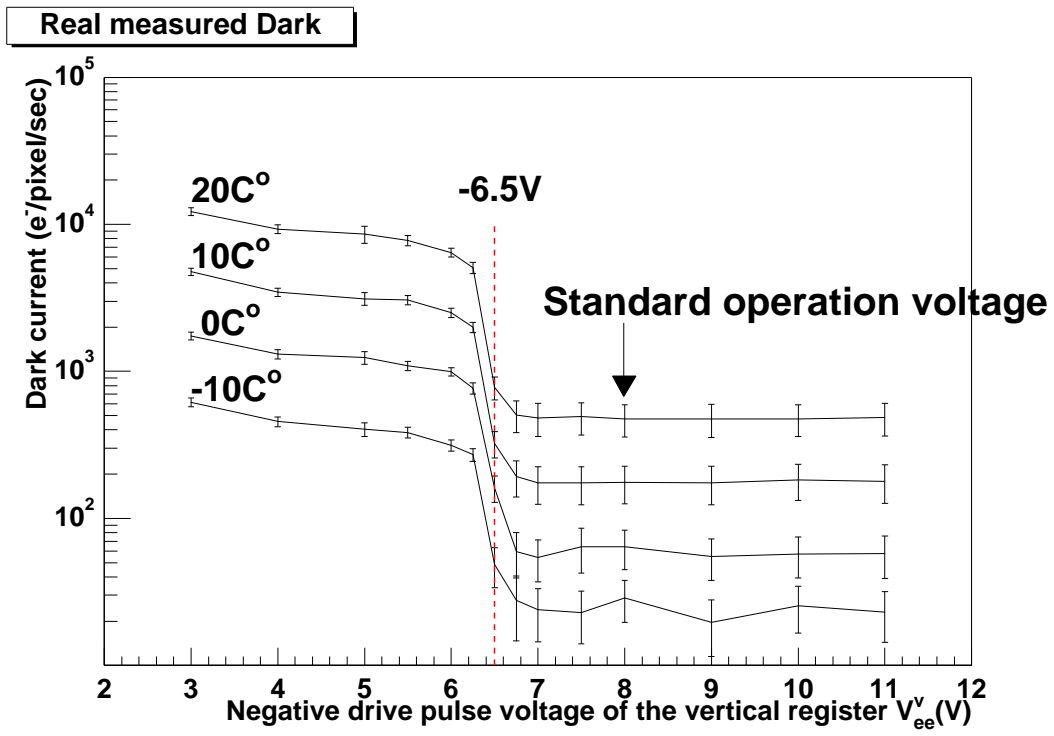


図 4.11: 各温度でのバイアス電圧に対する単位時間当たりの暗電流発生量の変化。通常は -8V で駆動されるように設計されている

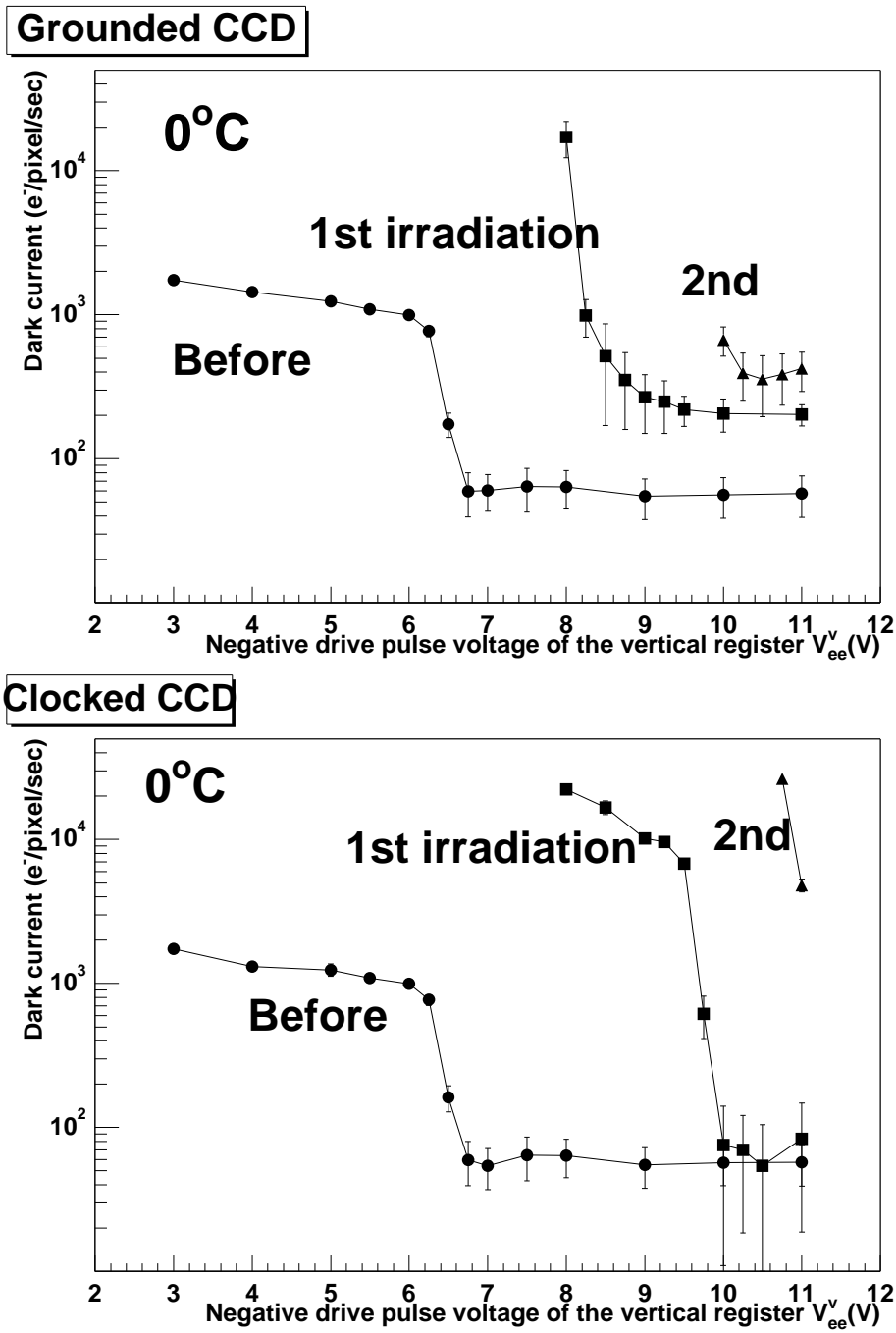


図 4.12: 0°Cにおけるバイアス電圧に対する単位時間当たりの暗電流発生量の変化。上図は接地してγ線を照射した場合の、下図は動作させつつ照射した場合のものである。

4.5 CTI 測定

CTI の決定は以下のような手順で行った。

まず、暗電流部分の広がり σ の3倍よりも大きな電荷を持ち、かつその周りに σ よりも大きな値を持つピクセルが無いピクセル、つまり X 線によって発生した電荷がほとんど一つのピクセルに収まったピクセルを探し、これを X 線が当たったピクセル (ヒットピクセル) とする。こうして得られた信号分布とピクセルの水平位置との関係を図 4.13 に示す。上図は γ 線照射前の電荷分布で、中図は接地した状態での照射後の分布、下図は動作させた状態での照射後の分布である。照射前は、信号分布は電荷転送と共にゆるやかに変化しているのに対し、照射後は急激に変化しているのが分かる。

X 方向の CTI は CCD 面を X 方向に 100 pixel ずつ 5 つに、Y 方向の CTI は CCD 面を Y 方向に 100 pixel ずつ 5 つの領域に分割し、それぞれの領域でヒットピクセルの電荷分布のピークを求める。図 4.14 は上図が γ 線照射前の電荷分布で、中図が接地した状態での照射後の分布、下図は動作させた状態での照射後の分布である。

得られたピーク値に対して図 4.15、4.16、4.17 に見られるように、

$$Q_i = Q_0(1 - \text{CTI})^{100i} \quad (i = 0, 1, 2, 3, 4)$$

の式を当てはめて CTI を決定する。図はそれぞれ、照射前、接地照射後、動作照射後のものである。

このようにして求められた γ 線照射前と 1 回目照射後の -15°C から 20°C の間での水平方向 CTI の値を図 4.18 に、鉛直方向 CTI の値を図 4.19 に示す。なお、接地した状態で被曝した CCD の高温部分や、2 回目照射後については、暗電流の増加によって X 線の信号が確認できなくなったため、測定できなかった。

S5466 においては 30krad 程度の被曝によって、CCD の端から端まで X 線による信号の転送量は約半分に減少することが判明した。

また、測定した温度区間においては、低温になるほど CTI 大きく、水平シフトレジスタによる水平方向 CTI よりも、CCD 面における CTI、つまり鉛直方向の CTI の方が大きいことが分かった。

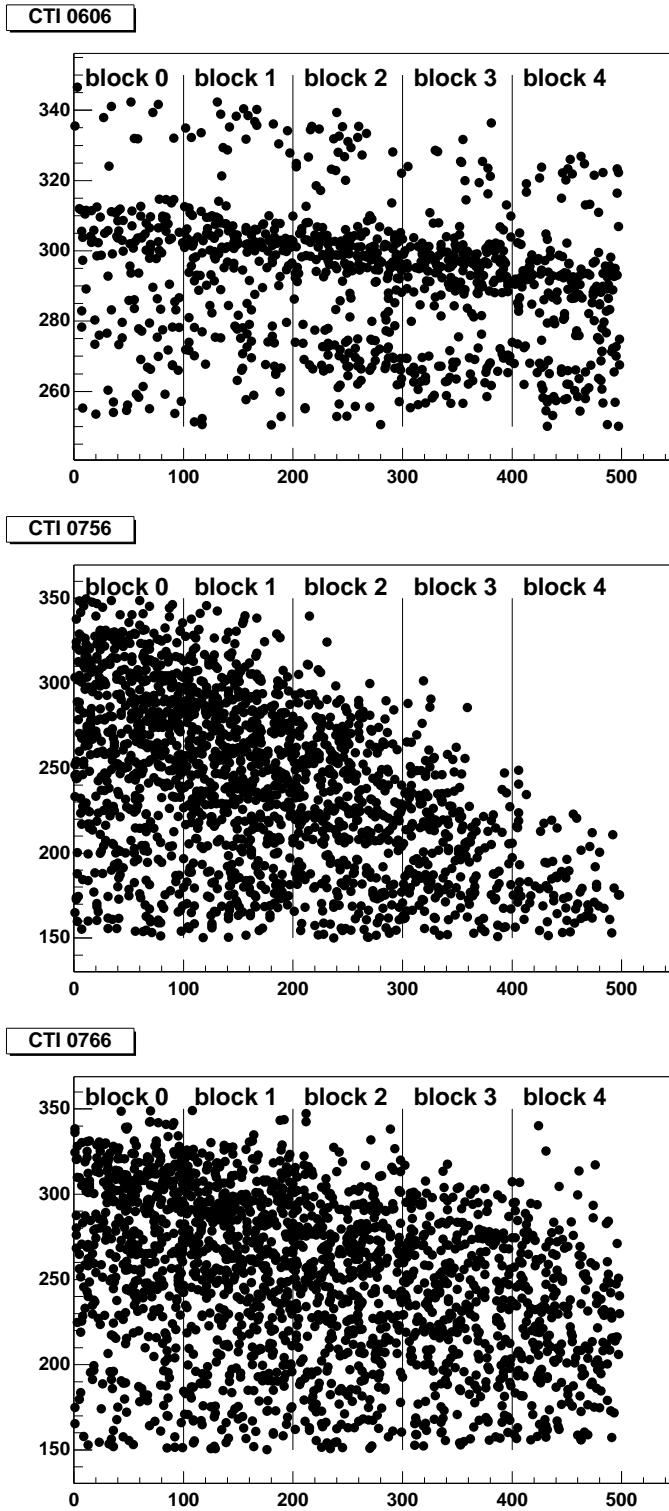


図 4.13: 0°Cで測定した照射前と照射した後の ^{55}Fe X 線信号分布。上図は照射前であり、中図は接地して照射した場合で、下図は動作させつつ照射した場合である。

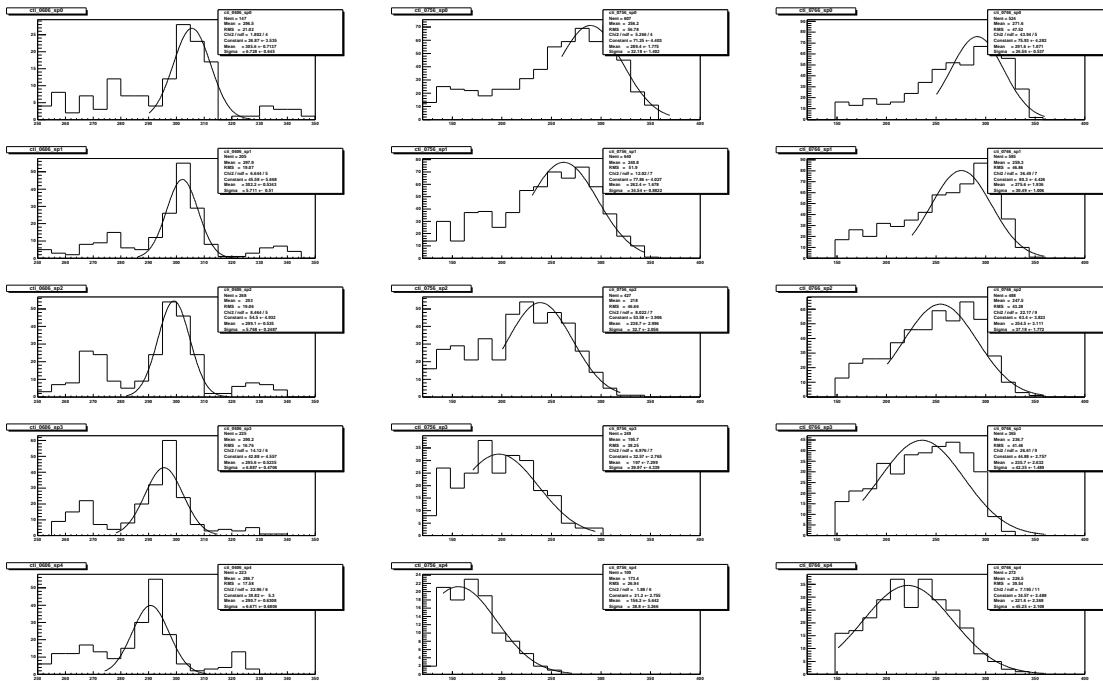


図 4.14: 0°Cで測定した照射前(左図)、接地した状態での照射後(中図)、動作した状態での照射後(右図)の電荷分布

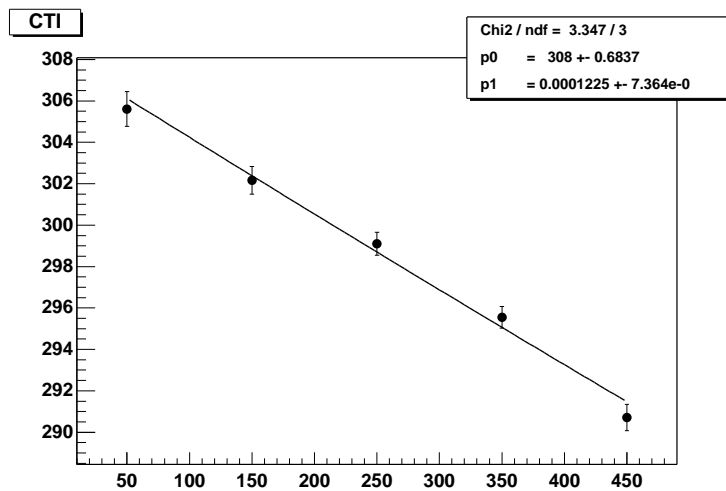


図 4.15: 0°Cで測定した照射前の CTI フィット

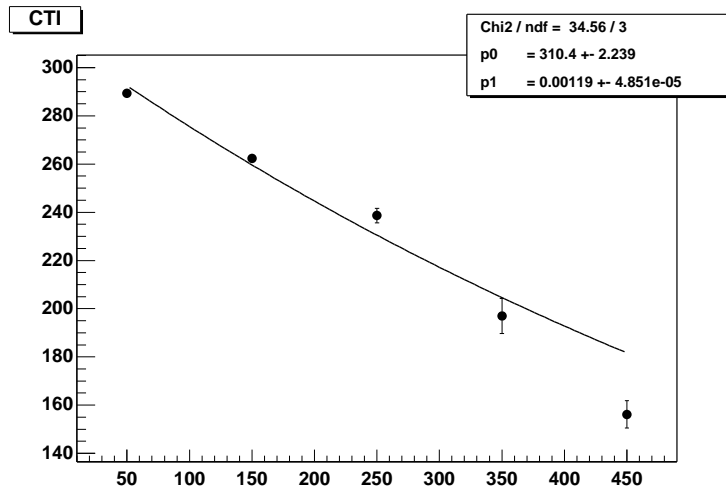


図 4.16: 0°Cで測定した接地して照射した後の CTI フィット

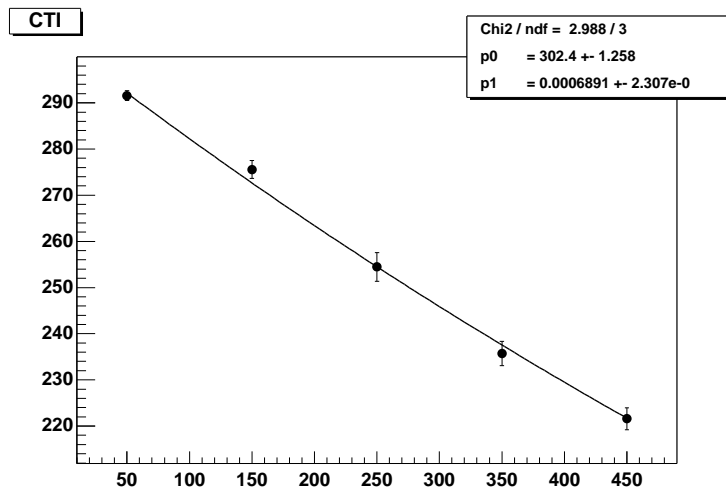


図 4.17: 0°Cで測定した動作させつつ照射した後の CTI フィット

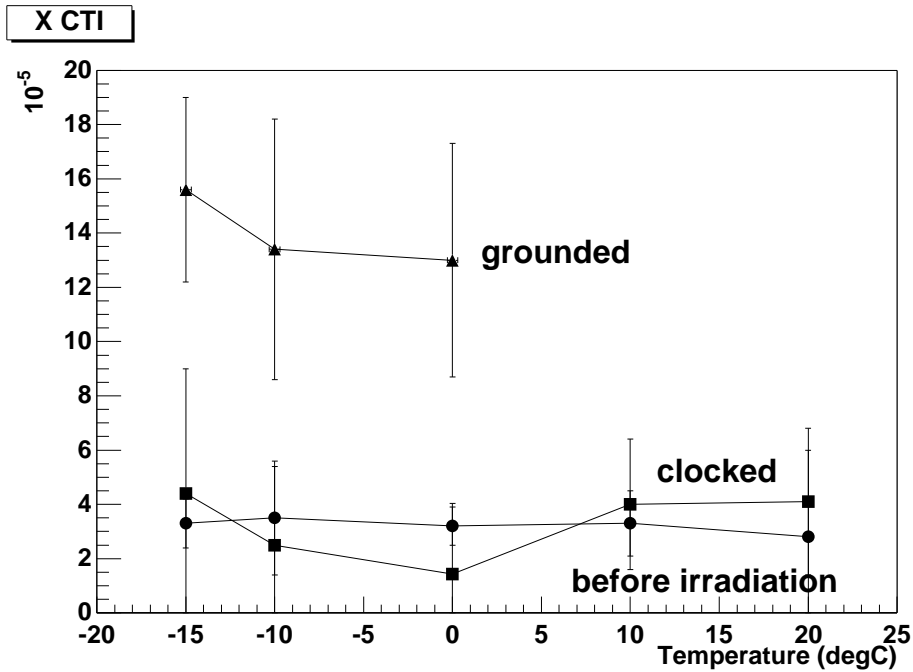


図 4.18: 水平方向 CTI : 丸は照射前を、四角は動作させた状態で 1 回目の照射をした後を、三角は接地した状態で 1 回目の照射をした後のもの。

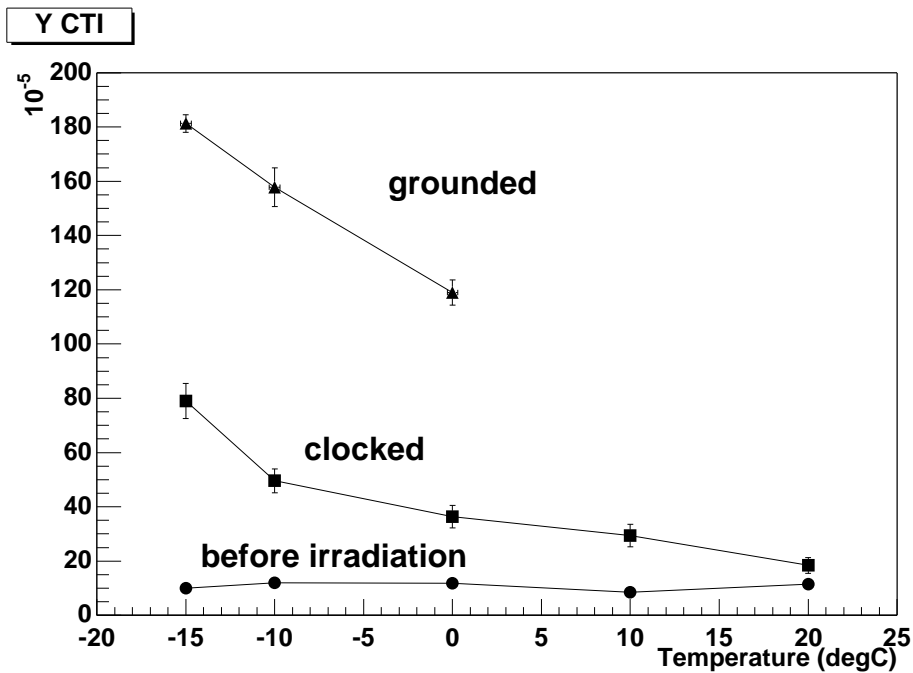


図 4.19: 鉛直方向 CTI : 丸は照射前を、四角は動作させた状態で 1 回目の照射をした後を、三角は接地した状態で 1 回目の照射をした後のもの。

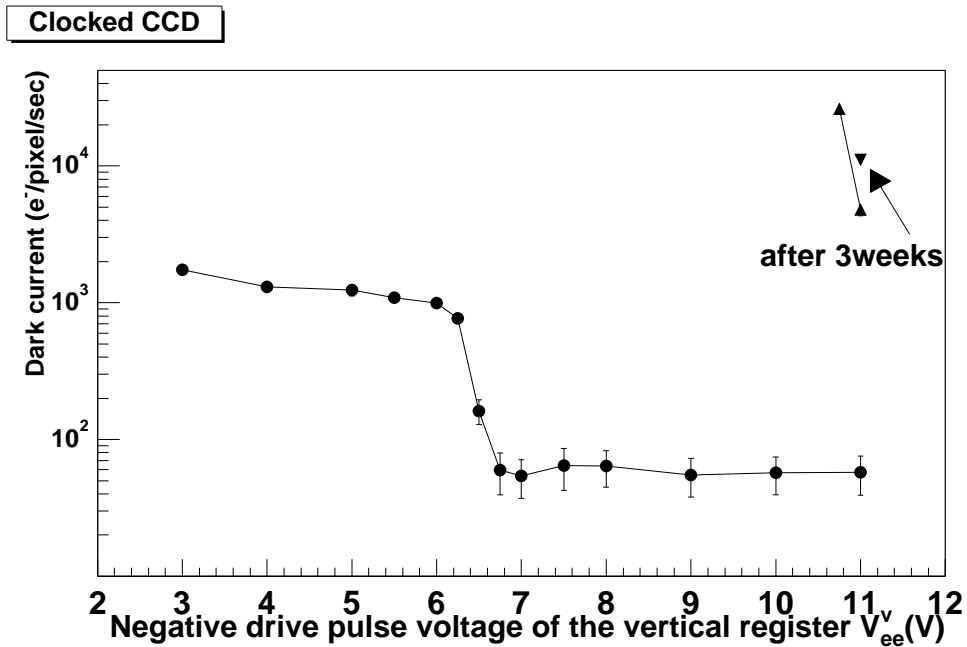


図 4.20: 動作させての γ 線照射から 3 週間後に再測定した暗電流発生量

4.6 時間経過による変化

γ 線照射後 3 週間の期間において、再びそれぞれの CCD において暗電流発生量を測定したところ、動作させて照射した CCD については図 4.20 に示すように、暗電流発生量が約 2 倍になっていた。また、非動作の状態では、出力信号が飽和しており、暗電流発生量を測定できなくなった。時間経過によって CCD に変化が発生した可能性がある。

また別 CCD を使用して、駆動回路自体が被曝によって劣化していないかを調べたが、 $V_{ee}=9\text{V}$ に対して、0 度で $(1.2 \pm 0.2) \times 10e^-/\text{pixel}/\text{sec}$ となっており、 $(0.7 \pm 0.2) \times 10e^-/\text{pixel}/\text{sec}$ と比較してあまり大きく変化していないことが確認された。

4.7 まとめ

接地した状態の CCD に計 87 krad、駆動した状態での CCD に計 44 krad の γ 線を当ててその放射線損傷を測定した。

イオン化損傷によるダメージが MPP モードになる電位 V_{ee}^{MPP} の負の方向への移動

という形で観測された。また、駆動した状態の CCD においては MPP モードでの動作ができなくなった。

格子欠陥の影響は暗電流量と CTI の増加という形で確認され、30krad 程度の被曝によって、室温近傍において崩壊点検出器として用いた場合に信号が失われることが分かった。

また、被曝の後の時間経過によって暗電流発生量に変化が見られた。

第5章 まとめ

5.1 CCD 衝突点検出器

SLAC SLC/SLD 実験において崩壊点検出器として CCD が用いられ、成功を収めた。これを受けて CCD は将来の高エネルギー電子・陽電子衝突型加速器実験である JLC 計画においても衝突点検出器の有力な候補となっている。

JLC 計画では冷却のために必要な装置を減らして、多重散乱を少なくするために常温近傍で CCD を動作させて測定器として用いることを計画している。

そこで本研究では、衝突点検出器として用いる場合に重要な位置分解能や放射線耐性を調べるために、常温近傍において、浜松ホトニクス社製の CCD と EEV 社製の CCD について高エネルギービーム照射による飛跡検出実験とその解析、および γ 線照射による暗電流特性と信号伝送特性変化を調べ、その使用可能性について研究した。

5.2 位置分解能

浜松ホトニクス社製と EEV 社製の CCD に対して 0 度、45 度、60 度の角度をもたせて π^- を入射させ、その位置分解能を測定した。

垂直入射時には全ての CCD において電荷極在部の情報を活かす Ratio Location Mapping 法と呼ばれる電荷分布から入射位置を決定する方法を用いた場合に、 $3\mu\text{m}$ の分解能が達成され、浜松ホトニクス社製の有感層 $10\mu\text{m}$ CCD においては 60 度入射時においても $6\mu\text{m}$ の位置分解能が得られた。しかし、斜めに入射した場合には CCD 間の傾きに強く影響を受けており、その補正が必要であった。SLD 実験の例にもこのような補正があり、実際の JLC 実験においても必要となる可能性がある。

EEV 社の有感層 $20\mu\text{m}$ CCD や浜松ホトニクス社製の有感層 $50\mu\text{m}$ CCD においては入射角度がついた際に RLM 法はあまり有効ではなく、線形重心を用いて位置を決定する方法が有効であった。

全体として、有感層の薄い浜松ホトニクス社製の有感層 $10\mu\text{m}$ CCD が他の2つの CCD と比較して良い結果を出している。

本実験では45度、60度入射時に実験装置の構成によって、CCDの部位によって通過する物質の厚さが異なる等の問題があり、特に浜松 $50\mu\text{m}$ や EEV $20\mu\text{m}$ を用いた場合に位置分解能の非一様性が見られた。これは CCD の保持部分であるセラミックパッケージに開けた窓の枠部分を通過する時に粒子が大きな多重散乱を受けたことが原因の一つとして考えられる。

5.3 放射線耐性

接地した状態の CCD に2回に分けて計 87 krad、駆動した状態での CCD に計 44 krad の γ 線を当ててその放射線損傷度を測定した。

常温近傍で検出器として動作させるために有効な、暗電流の発生を抑制する動作モードである MPP モードで動作させるためには大きな負バイアス電圧をかけて動作させる必要がある。被曝によって、この MPP モード動作に必要な電圧の負の方向への移動が観測された。更に、駆動した状態の CCD においては制限を超えたため、MPP モードでの動作ができなくなった。

また MPP モードであっても暗電流量が増加し、電荷転送効率が落ちるという現象も確認された。つまり、30 krad 程度の被曝によって、室温近傍において崩壊点検出器として用いた場合には信号が失われる可能性があることが分かった。

JLC 実験において予想される年間およそ 15krad という被曝量に対しては、この実験で用いた浜松ホトニクス社製の有感層 $10\mu\text{m}$ CCD では特に放射線に対して強化する技術を用いていないこともあり、耐性が不十分であるということが判明した。

5.4 今後の課題

浜松ホトニクス社製の CCD の位置分解能は崩壊点検出器として用いるに十分な性能を持っていることが分かった。CCD 面に垂直に入射した場合には十分な測定精度で位置分解能が得られたが、大角度で入射した場合には統計数や精度が不十分であるため、今後、ターゲットとなる CCD のみを回転させるような装置を用いて構造上の問題を無くし、更に詳しい測定を行う必要がある。

放射線損傷度測定実験においては、6時間という短時間に 30 krad の大量の放射線

を照射したため (毎時約 5000 rad)、実際の実験における毎時約 3 rad という予想被曝条件とは大きくことなっている。そこで、今後時間をかけてゆっくりと照射した場合や、照射後に時間を置いた場合、高温や低温状態にし annealing を行った場合等に測定を行い、違いや回復の可能性を追求する必要がある。また、被曝後の時間経過による変化の原因も調べる必要がある。

放射線耐性という点では現状のものでは不十分であり、放射線耐性の高い CCD の開発が要求され、開発されたものについては被曝した場合の暗電流量や分解能等の性質を測定し、使用可能性を確かめる等の課題が残されている。

付録A ^{60}Co 線源

^{60}Co は $^{60}\text{Ni}(4+)$ に崩壊する際に Endpoint エネルギー E_{max} が 0.316 MeV の β^- を放出する。 ^{60}Co の崩壊図を図 A.1 に示す。

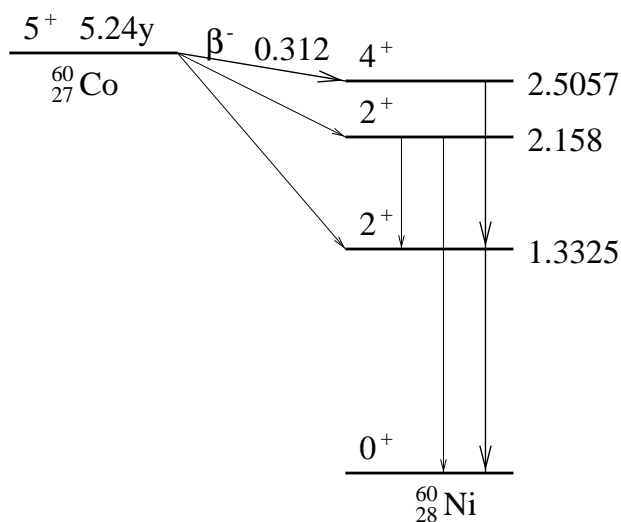


図 A.1: ^{60}Co 崩壊図



の反応において、3体崩壊であるので β^- の持つエネルギー E_{β^-} は Endpoint Energy $E_{\text{max}} = 0.312 \text{ MeV}/c$ の連続スペクトルを持つ。

β^- の質量を m_0 とすると、その分布は

$$\frac{dn}{dE} = (E_0 - E_e)^2 \times (E_e^2 - m_0^2 c^4)^{\frac{1}{2}} E_e dE_e$$

となる。ここで、 E_0 はエンドポイント運動量 0.316 MeV/c の際の全エネルギーで、

$$E_0 = \sqrt{0.316^2 + 0.511^2} = 0.601 \text{ MeV}/c$$

である。なお、この β^- の飛程は約 0.3mm である。

参考文献

- [1] Kenji.Abe et al.(SLD Collaboration) Direct Measurement of A_b and A_c at the Z^0 Decay Using Charged Kaon Tagging, Physical Review Letters 83, No. 10, 1902-1907(1999)
- [2] Kenji.Abe et al.(SLD Collaboration) Direct Measurement of A_b and A_c at the Z^0 Pole Using a Lepton Tag, Physical Review Letters 83, No. 17, 3384-3389(1999)
- [3] Kazumi Hasuko, “A Study of B_s^0 Mixing using Topologically Reconstructed Semileptonic Decays at SLD” 東北大学 (1999)
- [4] K. Abe *et al.*, “Design and performance of the SLD vertex detector, a 307 Mpixel tracking system,” Nucl. Instrum. Meth. **A400**, 287 (1997).
- [5] 高橋 貴紀、修士論文「電荷結合素子によるバーテックス検出器の研究開発」、東北大学 (1995)
- [6] 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)
- [7] 国谷 俊夫、修士論文「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 (1998)
- [8] 真木晶弘、パリティ物理学コース「高エネルギー物理学実験」、丸善 (1997)
- [9] K.D. Stefanov et al., “Electron and Neutron Radiation Damage Effects on a Two-Phase CCD”, KEK Preprint 99-114, (1999)
- [10] J.D.E. Beynon, D.R. Lamb, “Charge-coupled devices and their applications“, McGRAW-HILL (1980)
- [11] 小林 富雄他、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)
- [12] ニコラス ツルファニディス著、阪井 英次訳「放射線計測の理論と演習下巻」現代工学社 (1986)

- [13] Particle Data Group, Caso et al., “Review of Particle Physics” The European Physical Journal C, Springer (1998)
- [14] 浜松ホトニクス、「S5466、C5943 製品カタログ」浜松ホトニクス (1993)