

国際リニアコライダーのための崩壊点検出器
FPCCD の宇宙線試験

～ The cosmic ray test for FPCCD vertex detector at
International Linear Colider ～

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

柳川 奨太朗

令和元年

概要

国際リニアコライダー (International Linear Collider : ILC) は電子陽電子衝突型の線形加速器であり、ヒッグス粒子の精密測定を目的の一つとする実験である。そのためにこれまでに様々な実験で用いられてきた検出器の性能を上回る高精度の検出器が必要不可欠となる。目的とするヒッグス粒子の結合定数の測定の為には b クォーク及び c クォークを他のクォークやグルーオンから識別することが必要となり崩壊点検出器はそのために導入され、重要な役割を果たす。

崩壊点検出器は高精度の識別を達成するために崩壊点に最も近い場所に設置される為、多数のビームバックグラウンドによりピクセル占有率が增大してしまう。それを避けるために現在では可能な限り高速に読み出しを行うことでピクセル占有率を下げる方法とピクセルサイズを小さくして占有率を下げる方法の2つのコンセプトのもと崩壊点検出器の研究開発が進んでおり、我々は後者の方法を採用した $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ のピクセルサイズを目標とする Fine Pixeled Charge Coupled Device (FPCCD) を崩壊点検出器として開発を行っている。

本研究ではその FPCCD に要求される性能の一つである位置分解能に関連して、宇宙線による Minimum Ionizing Particle (MIP) を用いて FPCCD の性能評価を行った。位置分解能に関わる要素として信号電荷の拡散があり、宇宙線が小さな天頂角を持って FPCCD を入射する場合には十分に信号電荷の拡散が狭い範囲に限られていることが確認された。また位置分解能の指標となる σ の算出において、現状では統計量の不足、及び測定システムのアライメントが不十分であること等に起因して十分な評価を行うことはできなかった。

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	国際リニアコライダー (ILC) 実験	3
2.1	概要	3
2.2	ILC で期待される物理	3
2.3	ILC の加速器	6
2.4	ILC の測定器	7
第 3 章	FPCCD	15
3.1	FPCCD の諸事項	15
3.2	半導体	19
3.3	CCD	21
第 4 章	宇宙線テスト (セットアップ)	26
4.1	目的	26
4.2	測定システム	26
4.3	セットアップ	31
4.4	解析の手順	42
第 5 章	宇宙線テスト (結果と考察)	44
5.1	チェックシステム	44
5.2	CCD	51
5.3	考察	64
第 6 章	今後の課題	67
6.1	3CCD,4CCD ヒット frame における解析手法の改善	67
6.2	2CCD ヒット frame を利用した電荷拡散取得	69
6.3	FPCCD のアライメント	70

第 7 章	結論	74
7.1	チェックシステム	74
7.2	信号電荷拡散	74
7.3	位置分解能	75
7.4	今後について	75
参考文献		77

目次

2.1	ILCにおける主なヒッグス生成過程（左）Zh 随伴過程（右）WW 融合過程 [16]	4
2.2	質量 250GeV のヒッグス粒子生成過程の断面積 [10]	4
2.3	ヒッグス粒子の崩壊分岐比 [3]	5
2.4	ヒッグス粒子との結合の強さ [10]	5
2.5	ILC の全体図 [1]	6
2.6	ILD 測定器 [1]	7
2.7	100GeV ジェットの PFA による再構成 [12]	8
2.8	崩壊点検出器の外観図 [8]	9
2.9	b ハドロンと c ハドロンの崩壊点 [16]	9
2.10	中央飛跡検出器 (TPC) の外観図 [4]	10
2.11	シリコン飛跡検出器 [4]	11
2.12	ILD 測定器断面図 [4]	11
2.13	電磁カロリメータ (ECAL)[8]	12
2.14	ハドロンカロリメータ (HCAL)[8]	12
2.15	ミューオン検出器 [4]	13
2.16	ミューオン検出器の有無による π 中間子のエネルギー分解能比較 [4]	13
2.17	前方検出器 [4]	14
3.1	ILC のビーム構造 [16]	16
3.2	Z 方向と ϕ 方向のヒット分布 [16]	17
3.3	FPCCD の構造 [16]	18
3.4	ラダーの構造 1 [16]	18
3.5	ラダーの構造 2 [16]	19
3.6	バンド構造	19
3.7	Si,P,B の電子配置 [6]	20

3.8	n 型および p 型半導体の結晶構造 [5]	21
3.9	電子正孔対生成の模式図	22
3.10	表面型 MOS キャパシタ [16]	22
3.11	埋め込み型 MOS キャパシタ [16]	23
3.12	2 相 CCD の動作原理 [18]	24
3.13	CCD の電荷輸送	25
4.1	2 点トラッキングと 3 点トラッキング	27
4.2	電荷拡散の入射角度による変化イメージ図	27
4.3	チェックシステム模式図	28
4.4	Affroc ボード	29
4.5	Affroc Interface Board 2 (AIB6)	29
4.6	SEABAS2 ボード	29
4.7	取得可能な角度の上限変化	29
4.8	ヒット位置の取得模式図	30
4.9	実験セットアップ模式図	31
4.10	露光期間と読出し期間	32
4.11	測定システム模式図	33
4.12	測定システム模式図 (側面)	33
4.13	読み出しセットアップ (恒温槽内)	34
4.14	読み出しセットアップ (恒温槽外)	34
4.15	使用した CCD の模式図	36
4.16	通常型 CCD	36
4.17	裏面照射型 CCD	36
4.18	クロックドライバーカード	37
4.19	シンチレータ	37
4.20	MPPC ボード シンチレータ実装前	38
4.21	MPPC ボード シンチレータ実装後	38
4.22	チェックシステム模式図	38
4.23	中継ボード	38
4.24	Easiroc Module	40
4.25	Easiroc chip 内部回路と NIM モジュール前面 [7] [17]	40
4.26	HOLD 信号の入力タイミングと電圧保持 [17]	41
4.27	解析手順ダイアグラム	42
4.28	データ対応模式図	43

4.29	frame number, cycle number, event number の対応	43
5.1	T1X1(ch0) の ADC 分布	45
5.2	T1 ヒット位置分布 (efficiency チェック)	46
5.3	T2 ヒット位置分布 (efficiency チェック)	46
5.4	各 frame におけるチェックシステムイベント数の分布	47
5.5	T1 ヒット位置分布	48
5.6	T2 ヒット位置分布	48
5.7	T1X,T1Y ADC 値分布	49
5.8	T2X,T2Y ADC 値分布	49
5.9	T1X ADC 値分布	49
5.10	T1Y ADC 値分布	49
5.11	T2X ADC 値分布	49
5.12	T2Y ADC 値分布	49
5.13	天頂角分布 (チェックシステム)	50
5.14	入射した宇宙線の天頂角に対する flux	50
5.15	最終フレームのヒストグラム例	52
5.16	抽出データの一部	52
5.17	CCD ヒットパターン分布	53
5.18	frame view (CCD のみ)	54
5.19	frame view (全体)	54
5.20	CCD1 ヒット位置	55
5.21	CCD2 ヒット位置	55
5.22	CCD3 ヒット位置	55
5.23	CCD4 ヒット位置	55
5.24	ADC 分布 (1 × 1,0-10 deg)	56
5.25	ADC 分布 (1 × 110-20 deg)	56
5.26	ADC 分布 (3 × 3,0-10 deg)	56
5.27	ADC 分布 (3 × 3,10-20 deg)	56
5.28	ADC 分布 (5 × 5,0-10 deg)	56
5.29	ADC 分布 (5 × 5,10-20 deg)	56
5.30	ピクセルの範囲	57
5.31	使用 frame の天頂角分布	58
5.32	CCD ヒットパターン分布 (0-10 deg)	58
5.33	CCD ヒットパターン分布 (10-20 deg)	58

5.34	電荷拡散の定義	59
5.35	adc sum 分布	59
5.36	電荷拡散ピクセル数 (0-10 deg)	60
5.37	電荷拡散ピクセル数 (10-20 deg)	60
5.38	Fit 直線-ヒット位置の差分 (全 CCD)	61
5.39	Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD1)	62
5.40	Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD2)	62
5.41	Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD3)	63
5.42	Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD4)	63
5.43	電荷拡散模式図	65
5.44	1 ピクセルへの最大入射天頂角模式図	65
6.1	4ccd hit, 各 CCD1 点のみヒットの frame	68
6.2	4ccd hit, CCD2 に複数ヒットの frame	68
6.3	宇宙線が 2 本通過したと推測される frame	69
6.4	2CCD ヒットの frame 例	69
6.5	CCD1 x 方向の fit-ヒット位置差分分布	70
6.6	CCD1 y 方向の fit-ヒット位置差分分布	70
6.7	CCD2 x 方向の fit-ヒット位置差分分布	71
6.8	CCD2 y 方向の fit-ヒット位置差分分布	71
6.9	CCD3 x 方向の fit-ヒット位置差分分布	71
6.10	CCD3 y 方向の fit-ヒット位置差分分布	72
6.11	CCD4 x 方向の fit-ヒット位置差分分布	72
6.12	CCD4 y 方向の fit-ヒット位置差分分布	72

表目次

2.1	ILC における重心エネルギーとターゲット現象 [2]	4
4.1	測定システム各部の放射長で書いた厚さ	34
4.2	使用した FPCCD の仕様	35
5.1	各 CCD での σ 及びガウシアン of 平均値	64

第 1 章

序論

現在の素粒子物理学は標準模型と呼ばれる理論に基づき素粒子の性質や相互作用について記述されており、過去に行われた様々な実験においてその正しさが証明されている。しかしながら標準模型では説明できない現象が数多く観測されており、標準模型を超える新しい素粒子物理学理論が提唱されている。2012年に欧州原子核研究機構（CERN）の Large Hadron Collider(LHC) で発見されたヒッグス粒子がその検証と手がかりであるとされているが、それが標準模型において予言されているヒッグス粒子であるかはまだ確認されていない。このヒッグス粒子と他の粒子の結合定数が標準模型との間に程度の差があるかを測定することで新物理の探索を行うことができる。

ヒッグス粒子の精密測定のためには高エネルギーのレプトンコライダーが必要とされており様々なレプトンコライダーが計画されているうちの 하나가 International Linear Collider (ILC) である。LHC と ILC の大きな違いは複合粒子衝突型のハドロンコライダーであるか素粒子衝突型のレプトンコライダーであるかである。ハドロンコライダーは衝突粒子がハドロンであるが故、衝突の際には多量の背景事象が同時に発生し解析が困難になるのに対し、レプトンコライダーは素粒子同士の衝突なので背景事象を比較的少なくすることができ、それに伴って精密な測定が可能になる。現在までに運用されたレプトンコライダーのうち最大の重心エネルギーを持つのは CERN において 1989-2000 年の間稼働していた Large Electron Positron Collider (LEP) である。この加速器は名前の通り電子陽電子衝突型円形加速器であり重心エネルギーは最終的に 209 GeV まで到達した。しかしながら円形加速器には制動放射によるエネルギー損失が存在し、その大きさはビームエネルギーの 4 乗に比例する。従ってより大きな重心エネルギーを得ようとした場合には同時に制動放射によるエネルギー損失も大きくなってしまいう事、加速器半径をより大きくする必要があるので現実的ではなくなってしまう。この問題を解決するために計画されているのが線形加速器である。線形加速器の場合には制動放射が存在しないため効率よく重心エネルギーを大きくすることが可能になる。ILC は全長 30-50 km の線形加速

器であり、重心エネルギーは 250-500 GeV、アップグレード後には 1 TeV を目標としている。

我々は ILC の為の検出器の一つ崩壊点検出器の候補として Fine Pixel Charge Coupled Device (FPCCD) を開発している。崩壊点検出器は b クォーク、c クォークを uds クォーク及びグルーオンから識別するために導入される。b,c クォークの寿命はそれぞれ 1.5 ps, 0.4 ps と短い為高い崩壊点分解能が必要となる。そのため崩壊点検出器はビーム衝突点の最近傍に設置されるが、大量の背景事象に曝され崩壊点検出器のピクセル占有率が高くなってしまふ。これを避けるために我々が開発している FPCCD はピクセルサイズを小さくすることによってピクセル占有率を下げる方法を採用している。

上記の目標達成の為、崩壊点検出器に要求される性能として位置分解能は重要な要素である。本研究ではこの FPCCD の位置分解能に関して Minimum Ionizing Particle(MIP) の宇宙線による信号を利用して信号電荷の拡散及びトラッキングとヒット位置の差分を計算することによって位置分解能の指標となる σ に関して性能評価を行った。電荷拡散については小さな天頂角を持つ宇宙線に対しては十分に狭い範囲にのみ電荷が拡散していることが確認されたが、位置分解能の指標となる σ の取得に関しては統計量が少ないこと、アライメントの問題などにより詳細な性能評価は行うことができなかった。

本論文の構成は以下のようになっている。まず初めに第 2 章で ILC 実験の紹介を行い、続く第 3 章で FPCCD についての説明、第 4 章で本研究で使用した測定システムについての説明を行う。その後第 5 章で測定結果について述べ、第 6 章で課題について議論し、第 7 章で結論を述べる。

第 2 章

国際リニアコライダー (ILC) 実験

2.1 概要

国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) 実験は電子陽電子衝突の線形加速器を用いた次世代の高エネルギー実験である [1]。全長約 30 km で重心エネルギーは実験初期には 250 GeV に設定され、後のアップグレードによって 500 GeV , 1 TeV へエネルギーを増加させる予定である。ピークルミノシティは $2 \times 10^{34}\text{ cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ で、最初の 4 年間で積分ルミノシティ 500 fb^{-1} を目標としている。この実験は素粒子同士の衝突であるため背景事象が少ない精密測定を可能にしている。始状態の電子・陽電子のエネルギーやスピン偏極率を指定することができるため、信号事象の生成率向上や背景事象を抑制も可能である。

ILC 実験の目的として、実験初期はヒッグス粒子の精密測定を行い、アップグレード後にはトップクォークの精密測定、標準理論を超える物理の検証、暗黒物質の候補となる粒子の探索などが挙げられる。本章では ILC で期待される物理や ILC における加速器と測定器について述べる。

2.2 ILC で期待される物理

2.2.1 ILC で期待される物理

ILC ではターゲットとなる物理事象が重心エネルギーによって異なる。以下の表 2.1 に現在考えられている重心エネルギーとそれに対応したターゲットとなる物理事象を示す。また全ての重心エネルギーにおいて新物理の探索が可能である。表 2.1 内の積分ルミノシティのカッコつきの数値はアップグレード後の値である。

表 2.1 ILC における重心エネルギーとターゲット事象

重心エネルギー	積分ルミノシティ	主崩壊過程	目的
250 GeV	500 fb^{-1}	$e^+e^- \rightarrow Zh$	ヒッグス粒子の精密測定
350 GeV 付近	500 fb^{-1}	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}$	トップクォークの精密測定
		$e^+e^- \rightarrow \nu\nu h$	ヒッグス粒子の精密測定
500 GeV	$1000(4500) \text{ fb}^{-1}$	$e^+e^- \rightarrow t\bar{t}h$	トップ湯川結合の測定
		$e^+e^- \rightarrow \nu\nu h$	ヒッグス粒子の精密測定
		$e^+e^- \rightarrow Zh h$	ヒッグス自己結合の測定
1000 GeV	未定	$e^+e^- \rightarrow \nu\nu h h$	ヒッグス自己結合の測定

2.2.2 ヒッグス生成過程

ILC で観測される主なヒッグス生成過程は Zh 随伴過程、WW 融合過程である (図 2.1、図 2.2)。前者は反跳質量法を用いてヒッグス粒子の崩壊に依存しない解析を行うことができる。ILC では始状態である電子陽電子対のエネルギーが既知であるため、Z を再構成し 4 元運動量を測定することでヒッグス粒子の崩壊を見ずに質量を計算することができる。

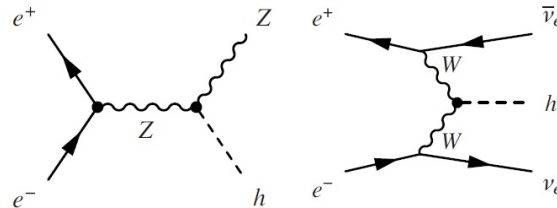


図 2.1 ILC における主なヒッグス生成過程 (左) Zh 随伴過程 (右) WW 融合過程 [16]

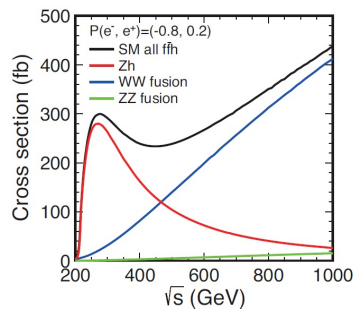


図 2.2 質量 250GeV のヒッグス粒子生成過程の断面積 [10]

2.2.3 ヒッグス崩壊分岐比の測定

ヒッグスの崩壊分岐比の測定によりヒッグスの結合定数を導出できる。ヒッグスは主に b クォークペア、 τ ペア、グルーオンペア、 c クォークペア、 W ボソンペアに崩壊するため、これらを高い分解能で同定することが必要である。この測定精度はフレーバータグの精度を決める崩壊点検出器に依存している。

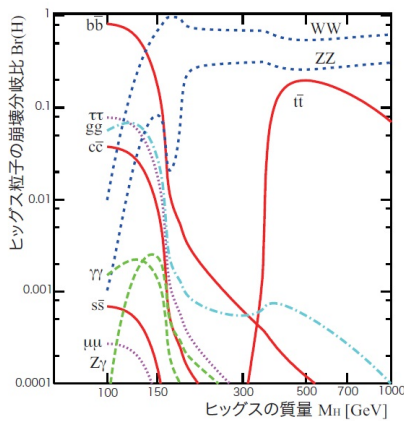


図 2.3 ヒッグス粒子の崩壊分岐比 [3]

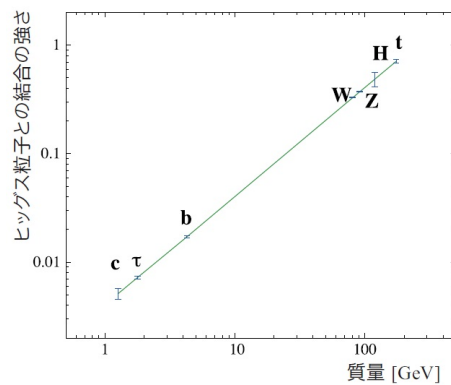


図 2.4 ヒッグス粒子との結合の強さ [10]

2.2.4 ヒッグス自己結合定数の測定

ILC では $e^+e^- \rightarrow Zh h$ モードを利用し、ヒッグスの自己結合を測定することができる。ヒッグス粒子は主に $ee \rightarrow Zh h \rightarrow bbbb + (ll \text{ or } qq)$ に崩壊し、終状態は 4 つの b ジェット + レプトンまたは 6 つの b ジェットとなる。主なバックグラウンドとして $ee \rightarrow tt$ 事象が存在するが、この反応断面積が 1000 倍以上大きいため精度よく b クォークジェットを測定する必要がある。

2.2.5 トップ湯川結合の測定

重心エネルギー 500 GeV 以上で $e^+e^- \rightarrow tth$ モードを用いてトップクォークとヒッグスの湯川結合を測定できる。この事象でも $ee \rightarrow tth \rightarrow bWbWbb$ の崩壊が主であり、終状態に複数の b ジェットが存在する。主なバックグラウンドは $ee \rightarrow ttZ$ で、 tth 反応断面積よりも 3 桁大きい b クォークを精度良く同定できれば十分に排除できる。このようにフレーバータグが測定精度に大きくかかわっており、高精度な崩壊点検出器が求められる。

2.3 ILC の加速器

ILC の加速器は主に電子・陽電子源 (Electron Positron Source)、減衰リング (Damping Ring)、主線形加速器 (Main Linac) の3要素からなり、その全体図が図 2.5 である。

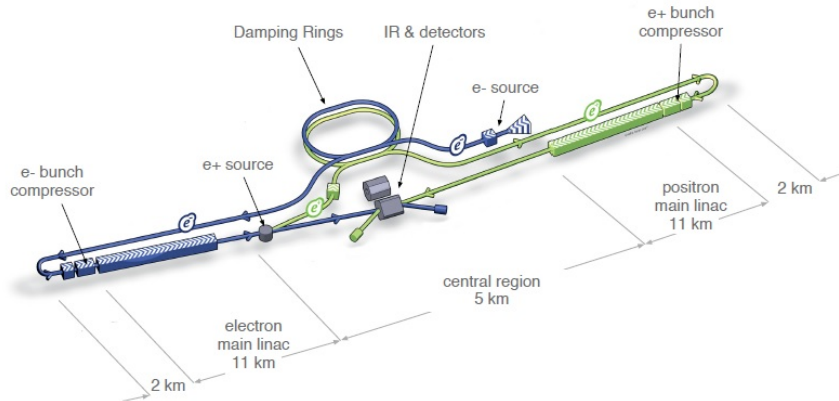


図 2.5 ILC の全体図 [1]

電子源では偏極レーザーを半導体 (GaAs 等) に照射することで生じる光電効果によって電子を生成し、それらを電子ビームとして利用する。これらの電子はバンチとよばれる電子 3×10^{10} 個程度の集合を形成し、常伝導加速空洞、超伝導加速空洞を経て 5 GeV まで加速される。

その後、加速された電子ビームは高いルミノシティを達成する為ビームの広がりを小さくする減衰リングへ輸送される。減衰リングは直線部と円弧部があり、円弧部での制動放射によって進行方向に対して横方向の運動量を失い、ビームが収束される。収束されたビームは RTML(Ring To Main Linac) に入り 5 GeV から 15 GeV まで加速され、全長 23 km、平均加速勾配 31.5 MeV/m の主線形加速器で目標となるエネルギーまで加速される。

次に陽電子ビームについて述べる。陽電子は主線形加速器で 150 GeV まで加速された電子ビームを利用して生成される。この電子ビームはアンジュレーターと呼ばれる周期的に磁場の向きが変わる装置に輸送される。この装置の中で制動放射によって光子が放出され、この光子をチタン合金に衝突させることで電磁シャワーを起こす。そして電磁シャワー中の陽電子を磁場によって分離した後、常伝導加速空洞と超伝導加速空洞を通過して 5 GeV まで加速される。その後は電子の場合と同様な過程を経て目標となるエネルギーまで加速される。

2.4 ILC の測定器

ILC で期待される物理を観測するために。衝突点で起きた反応をより精度よく観測する必要がある。そのためには高精度な粒子の崩壊点、運動量、エネルギーの情報が必要不可欠であり、ILC の検出器には従来の検出器よりも性能を大幅に向上させたものが要求される。

現在では2つの測定器コンセプトがあり、1つはアジア・ヨーロッパを中心とするILD(International Large Detector)、もう一つは北米を中心とするSiD(Silicon Detector)である。ILC は CERN の LHC(Large Hadron Collider) などの円形加速器とは異なり、衝突点が1つしか存在しないので2つの測定器が同時に測定を行うことはできない。従って ILC においては Push-Pull 方式と呼ばれる測定器を一定期間ごとに入れ替えながら測定を行う方法を採用し、衝突点を共有する計画になっている。また、ILC で発生する物理現象の多くは終状態に複数のジェットを含み、これを高精度で再構成するためにそれぞれの測定器は PFA(Particle Flow Algorithm) というジェットの分解能を向上させる解析手法と、ジェットの起源となる粒子の識別を行うフレーバー・タグに最適化されている。

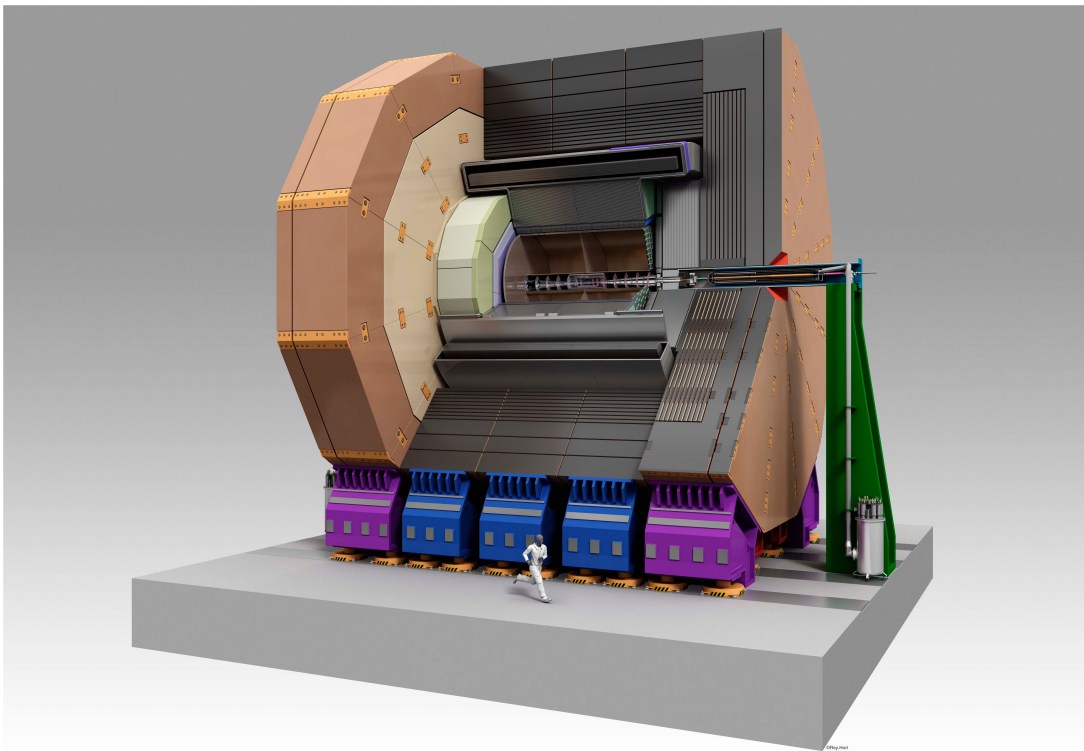


図 2.6 ILD 測定器 [1]

以下ではまず PFA について簡潔に説明した後、個々の測定器について述べる。

2.4.1 PFA(Particle Flow Algorithm)

PFA は ILC においてジェットのエネルギーと運動量を精度よく測定するための検出アルゴリズムである。ILC の測定器は位置測定、エネルギー測定、運動量測定等を行う様々な検出器を組み合わせる事でより多くの情報を得られるようになっている。ILC において重要になるジェットは 64% が荷電ハドロン、25% の光子、11% の中性ハドロンで構成され 75% 程がハドロンで構成されている。しかしながらハドロンのエネルギー測定を行うハドロンカロリメータ (HCAL) の分解能は最大 50% で他の検出器の分解能と比べると最も悪い。しかしながら荷電粒子については飛跡検出器が精度よく測定を行うことができ、ハドロンカロリメータで測定を行うよりも精度の良いデータを収集することができる。このようにジェットを構成する粒子それぞれを最も精度よく測定できる検出器を用いて個別に再構成してジェットの情報を得る手法を Particle Flow と呼ぶ。具体的には荷電粒子は飛跡検出器で、光子は電磁カロリメータ (ECAL) で、中性ハドロンはハドロンカロリメータで測定した後、得られた情報からジェットを再構成する。

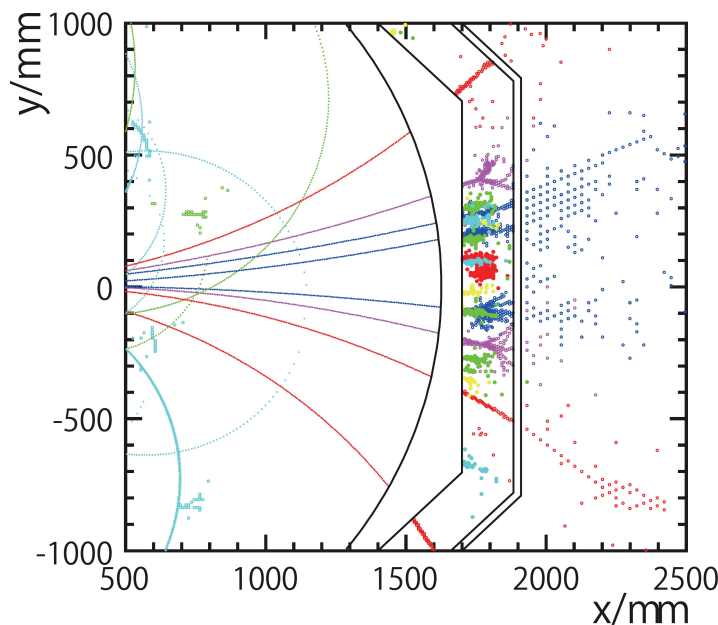


図 2.7 100 GeV ジェットの PFA による再構成 [12]

我々は ILD 測定器の為の崩壊点検出器について研究を行っているため、以下では ILD 測定器の構成要素である個々の検出器について述べる。

2.4.2 飛跡検出器

ILD の飛跡検出器は崩壊点検出器 (Vertex Detector, VTX)、中央飛跡検出器 (Time Projection Chamber, TPC)、シリコン飛跡検出器 (Silicon Inner Tracker, SIT) で構成されている。

崩壊点検出器 (Vertex Detector)

崩壊点検出器は ILC 測定器全体の中で再内層に位置し、粒子の飛跡と崩壊点の決定、クォークの識別を行うことを目的としたシリコンピクセル検出器である。特に ILC ではジェットが b クォークと c クォークのどちらに由来するか識別することが重要である。崩壊は $b \rightarrow c \rightarrow s$ と起こるので、b ハドロンは 1 次崩壊点を含む 3 つの崩壊点を持つのに対し c ハドロンは 2 つの崩壊点を持つ。従って崩壊点を正確に測定することによってクォークを識別することができる。このためには以下の性能が要求される。

- 位置分解能が $3 \mu\text{m}$ 以下
- 多重クーロン散乱を抑えるために 1 層当たりの物質量が $1 X_0$ 以下
- 最内層の半径が 1.6 cm
- ピクセル占有率が数 % 以下

また、要求される崩壊点分解能は以下の式 2.1 で表される。

$$\sigma = 5 \oplus 10/p\beta \sin \theta^{3/2} [\mu\text{m}] \quad (2.1)$$

ここで第 1 項は検出器自体の分解能であり、第 2 項は多重散乱による影響の項である。

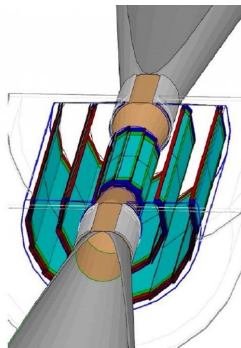


図 2.8 崩壊点検出器の外観図 [8]

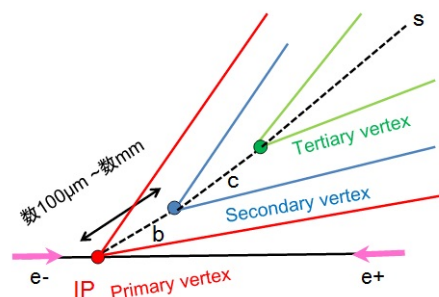


図 2.9 b ハドロンと c ハドロンの崩壊点 [16]

中央飛跡検出器 (Time Projection Chamber, TPC)

TPC は荷電粒子の飛跡を3次的に再構成することを目的としたガス検出器である(図2.10)。検出器内部にはアルゴンを主成分としたガスが充填されており、荷電粒子が検出器内部を通過した際に飛跡に沿ってガスがイオン化される。イオン化の際に生じた電子は検出器にかけられた電場によってビーム軸に沿った z 軸方向にドリフトされ、エンドキャップに取り付けられた信号増幅を行うことのできる GEM や Micromegas などの Micro Pattern Gas Detector(MPGD) で検出される事により $r-\phi$ 方向の2次的な飛跡を得ることができる。 z 軸の情報はドリフト時間から得られ、これと2次的な飛跡を組み合わせることによって粒子の飛跡を3次的にとらえることができる。また TPC 内部にはソレノイドにより $3.5 T$ の磁場がかけられているため、粒子の軌跡の曲率半径を測ることによってその粒子の運動量を決めることができる。

TPC の主な利点としては以下のものがあげられる。

- ガス検出器であるため低物質質量であり、TPC 以外の検出器への影響が少ない。
- 飛跡1つ当たりの測定点が200点以上と多く取ることができる。
- 内部の電場と磁場の向きがほぼ平行であるためドリフト中の信号電荷の拡散が抑えられ高い位置分解能 ($< 100 \mu m$) を持つ。
- TPC 内部での de/dx を得る事で粒子の識別が可能であること。

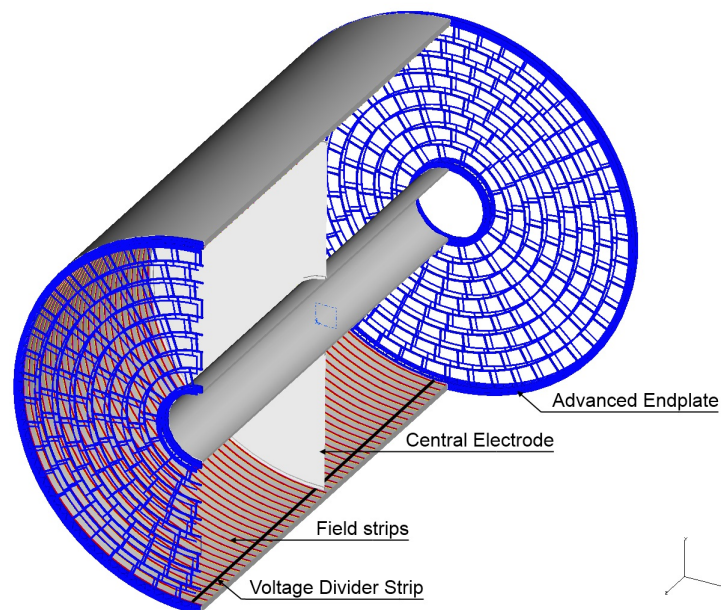


図 2.10 中央飛跡検出器 (TPC) の外観図 [4]

シリコン飛跡検出器

シリコン飛跡検出器は VTX のすぐ外側に位置する内部検出器 (SIT)、TPC の外側に位置する外部検出器 (SET)、TPC のエンドキャップ部に位置する ETD、そして前方検出器 (FTD) の4つで構成される。これらのシリコン検出器は TPC とのギャップを埋めることによって時間分解能や運動量分解能の向上させることを目的としている。この為 SIT と SET は飛跡再構成にバンチ衝突間隔よりもはるかに長い時間を必要とする TPC を挟むように設置され、時間情報を取得することにより飛跡のタイムスタンプを行う。また ETD は後述する電磁カロリメータへの粒子入射位置を同定することによって荷電トラックの運動量分解能を向上させる。FTD は飛跡検出器の最内層に位置し前方をカバーする。

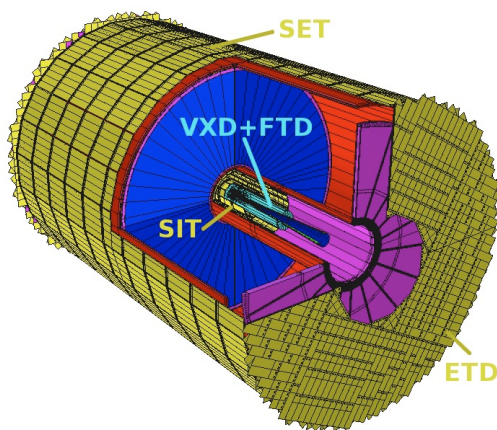


図 2.11 シリコン飛跡検出器 [4]

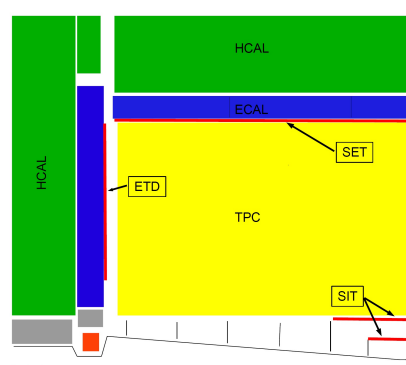


図 2.12 ILC 測定器断面図 [4]

2.4.3 カロリメータ

ILD においてカロリメータは内側に電磁カロリメータ (ECAL)、外側にハドロンカロリメータ (HCAL) を設置される。カロリメータは内部を通過した粒子にシャワーを発生させエネルギーを測定することを目的とした検出器である。ECAL は電磁シャワーを、HCAL はハドロンシャワーを測定する。以下ではそれぞれのカロリメータについて説明する。

電磁カロリメータ (ECAL)

電磁カロリメータは粒子ジェット中の電子と光子のエネルギーを測定する。ECAL は吸収層とセンサー層を交互に配置したサンドイッチ型である。吸収層には ECAL の小

型化と粒子分解能の向上の為にモリエール半径と放射長が短いタングステンが使用される。モリエール半径とはシャワーの横方向の広がりを表し、シャワー全体の90%が収まる長さのことである。これにより他の物質を吸収層に採用した場合と比較してシャワーが小さくなるため、他のシャワーとの重複が減少し粒子分解能を向上させることができる。センサー層にはシンチレーターを用いるもの、シリコンを用いるもの、それらのハイブリッド型が開発されている。

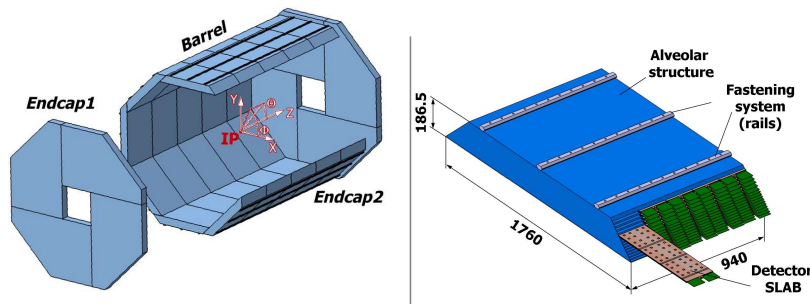


図 2.13 電磁カロリメータ (ECAL)[8]

ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータはジェット中の中性ハドロンエネルギーを測定する。中性ハドロンが作るシャワー内では同時に電磁シャワーも発生しているため電磁シャワー単独の場合と比べて分解能は悪くなる。またハドロンシャワーは相互作用長が長く範囲も広がる。さらに吸収層に使用される鉄の放射長と相互作用長の差は小さく、ハドロンシャワー中で電磁シャワー成分の観測も可能である。センサー層にはシンチレーターを使用するタイプとガス検出器を使用するタイプなどが候補に挙げられている。

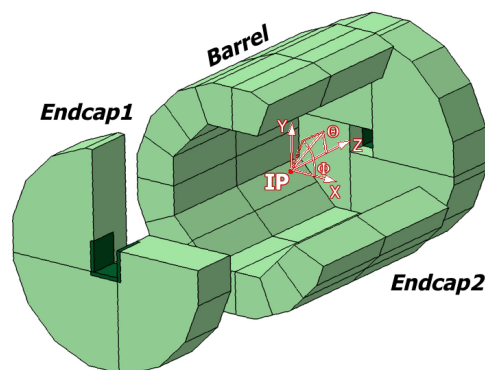


図 2.14 ハドロンカロリメータ (HCAL)[8]

2.4.4 ミューオン検出器

ミューオン検出器はILD測定器の再外層に位置し、カロリメータに収まりきらなかったシャワー同定とミューオンの識別を目的とした検出器である。リターンヨークとしての鉄と検出器としてのシンチレーターのサンドイッチ型構造になっている。カロリメータとミューオン検出器を併用することによってジェットエネルギーの分解能を向上させることができる。

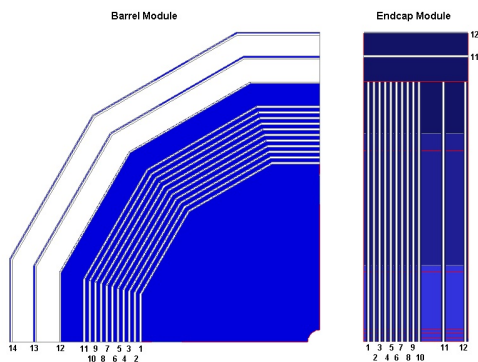


図 2.15 ミューオン検出器 [4]

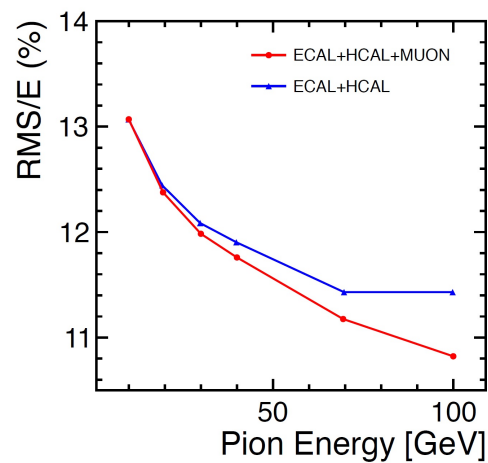


図 2.16 ミューオン検出器の有無による π 中間子のエネルギー分解能比較 [4]

2.4.5 前方検出器

ビーム衝突点より上流のビーム軸付近に設置される特別なカロリメータを総称して前方検出器という。前方検出器にはルミノシティを測定する LumiCal、ビームパラメータやバンチ毎のルミノシティを測定する BeamCal、ペアモニタが存在する。以下ではそれぞれの検出器について簡潔に述べる。

LumiCal

LumiCal は積分ルミノシティを測定するシリコンとタングステンのサンプリング型カロリメータである。ビーム軸から 32-74 mrad の範囲をカバーするように設置される。ルミノシティの測定には反応断面積が大きい Bhabba 散乱 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$) が用いられ、理論的に精度よくわかっているため次の関係式から計算することができる。

$$L = N/\sigma \quad (2.2)$$

ここで N は Bhabba 散乱のイベント数であり、 σ は反応断面積である。ILD 検出器では断面積 σ の計算精度からルミノシティの測定精度として 0.1% を目指している。

BeamCal

BeamCal はビームパラメータとバンチ毎のルミノシティを測定することを目的としたカロリメータで、ビーム軸から 5-40 mrad の範囲をカバーするようビーム軸から設置され、最終収束マグネットの手前かつビームパイプのすぐ外側に位置する。ビーム衝突時にペアバックグラウンドが発生し BeamCal にエネルギーが蓄積される。このエネルギーを測定することによりバンチ衝突ごとのルミノシティとビームパラメータを取得することができる。

ペアモニター

ペアモニターは衝突点におけるビーム形状を測定するためのシリコンピクセル検出器である。ILC のビームは衝突点においてナノサイズまで絞ることを目標としているため、精度の高いビーム情報を得ることは重要である。ペアモニターはビーム衝突時のペアバックグラウンドのヒット分布からビーム形状を測定する。

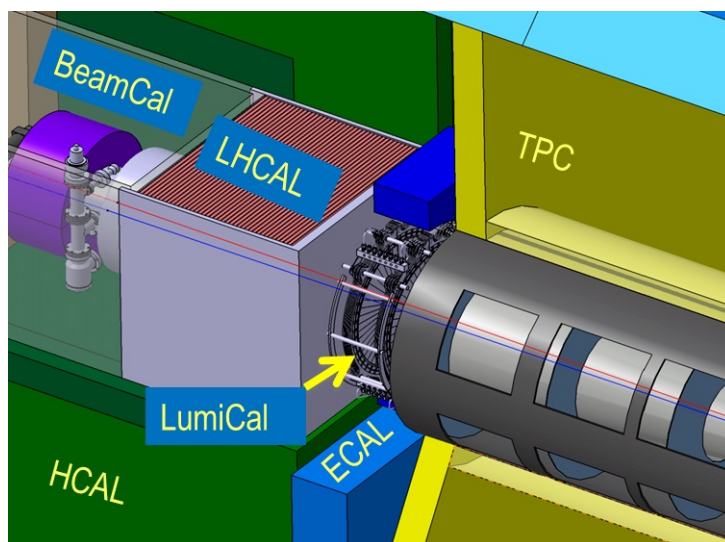


図 2.17 前方検出器 [4]

第 3 章

FPCCD

ILC における崩壊点検出器には前章で述べた 4 つの要求性能があり、それらの中で特に問題とされているのはピクセル占有率である。この問題の解決の為、世界中で様々な種類の崩壊点検出器が開発されている。我々が開発を行っている Fine Pixel Charge Coupled Device (FPCCD) はピクセルサイズ $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ を目標とし、ピクセルサイズを小さくすることで占有率を下げるという方法を採用している。

本章ではの FPCCD 諸事項について説明した後、基礎となる半導体に関する説明、CCD の動作原理についての説明を行う。

3.1 FPCCD の諸事項

3.1.1 概要

崩壊点検出器は崩壊点の測定精度を上げる為、ビーム衝突点の最近傍に位置する。しかし衝突点付近ではビーム同士の相互作用によって、ペアバックグラウンドと呼ばれる比較的低エネルギーの電子陽電子対が大量に発生する。これらによって検出器のピクセル占有率が大きくなってしまいがトラッキングのためにはピクセル占有率が数 % 以下になるよう可能な限り小さくする必要がある。図 3.1 は ILC におけるビーム構造の模式図である。ILC においては 1312 バンチが 1msec の間に衝突し、 199msec の間は衝突が起こらない。この 1312 バンチのまとまりをトレインと呼ぶ。1 トレイン分のペアバックグラウンドによって最内層では $160 - 220\text{hits}/\text{mm}^2$ が発生する。例えば 1988 年から 2000 年までの間、米スタンフォード大で行われた SLD 実験において使用された崩壊点検出器は標準的な $22\mu\text{m} \times 22\mu\text{m}$ のピクセルサイズを持つ CCD 検出器であった。この検出器を利用した場合 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の範囲には約 2025 個のピクセルがあり、1 トレイン分の信号を蓄積した場合には最内層におけるピクセル占有率がペアバックグラウンドだけでも約 8-11%

となり、ペアバックグラウンドによるヒット位置を見たい信号のヒット位置と誤認してトラッキングを行ってしまう問題が発生する。この問題に対しての解決方法は大きく分けて2つある。一つは1トレイン分の信号を分割して蓄積して複数回読み出す方法で、この場合は高速読み出しが必要となる他、トレインの衝突中にも読み出しを行う為 EMI ノイズの影響も受けてしまう。もう一つは1トレイン分の信号を蓄積する代わりにピクセルサイズをできるだけ小さくしてピクセル占有率を下げるという方法である。我々が開発している FPCCD は後者の方法を採用した $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 角のピクセルを持つ崩壊点検出器である。上記の例と同様に最内層におけるペアバックグラウンドに対するピクセル占有率を計算すると、 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の範囲にはピクセルが 40000 個となりピクセル占有率はペアバックグラウンドに対して 0.4-0.55% とピクセル占有率を小さくすることができる。



図 3.1 ILC のビーム構造 [16]

3.1.2 FPCCD の特徴

FPCCD の主な特徴としては次の4点がある。

- 空間分解能が $1.4\mu\text{m}$ と非常に良い
- 全空乏化
- EMI ノイズを受けない
- ヒット分布からバックグラウンドを除去できる。

全空乏化について詳しくは後述するが、有感領域を全空乏化することによって信号電荷が周囲のピクセルへ拡散することを抑えることができる。これによって粒子のトラック分解能が向上する。

EMI (Electro Magnetic Interference) ノイズは高周波電流による電磁波で、電子・陽電子ビームによって発生する。この EMI ノイズは前述の SLD 実験で問題になり、ILC においても発生する。しかしながらトレイン中にも読み出しを行う検出器は EMI ノイズの影響を受けながら読み出しを行うことになるが、FPCCD の場合にはトレイン衝突のない 199msec の間に読み出しを行うため、この影響を受けないという特徴がある。

FPCCD は衝突点の最近傍に位置するため大量のバックグラウンドが存在する。このためより精度よく必要なデータを収集するためにはバックグラウンドの除去が重要になる。ペアバックグラウンドの横方向運動量は数 MeV 程度と小さい為、 $3.5T$ の磁場中では半径数 cm の螺旋運動をする。この運動によって $r-\phi$ 平面において CCD に浅い角度で入射した粒子が複数のピクセルを通過する。その結果 Z 方向には複数のヒット分布、 ϕ 方向においては連続的なヒット分布が生じる。これに対して横方向運動量が高い粒子、つまりペアバックグラウンドではない粒子は ϕ 方向には少ないピクセルのヒットを生じ、 Z 方向には衝突点からの距離に比例して広がるヒット分布を生じる。これらのヒット分布の差異を利用することで、ペアバックグラウンドを除去することが可能になる。

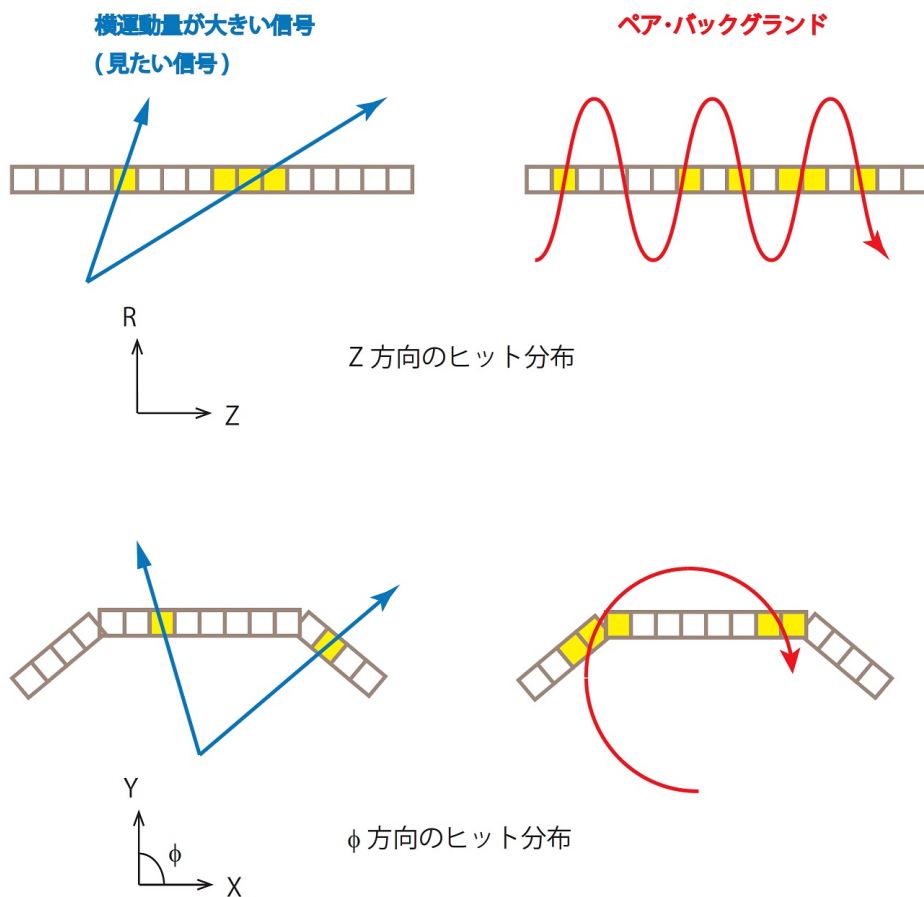


図 3.2 Z 方向と ϕ 方向のヒット分布 [16]

3.1.3 FPCCD 崩壊点検出器の構造

次の図 3.3 は FPCCD 崩壊点検出器の全体図である。CCD チップを読み出し ASIC を設置したラダーが円筒状に 3 層配置される。図 3.3 の右側には、各層の設置位置が z 軸と y 軸に示されている。ラダーは図 3.4 と図 3.5 のように、炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP) と Kapton FPC からなる支持基盤の両面に CCD と ASIC を配置したダブルレイヤーの構造になっている。両面にヒットすることでヒット位置をベクトルとして捉える事ができ、他のレイヤーからの情報と組み合わせてバックグラウンドを除去することができる。

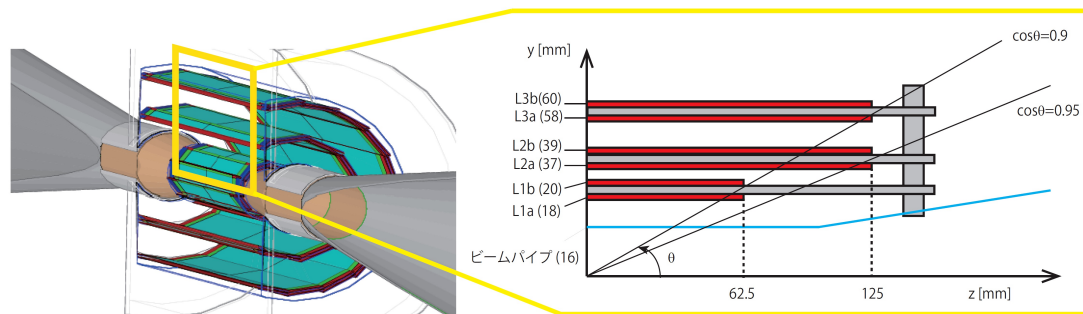


図 3.3 FPCCD の構造 [16]

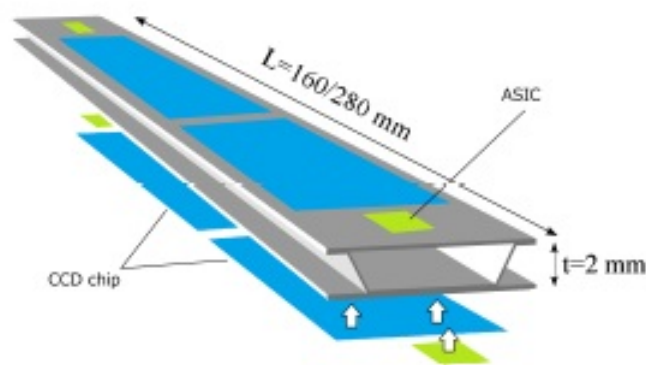


図 3.4 ラダーの構造 1 [16]

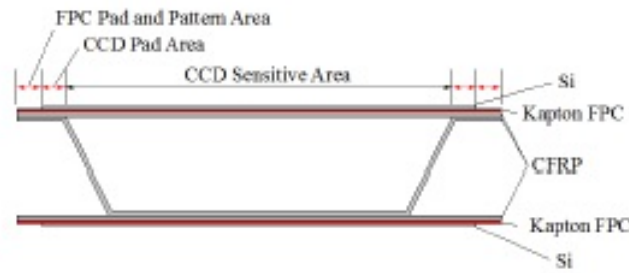


図 3.5 ラダーの構造 2 [16]

3.2 半導体

この節では CCD の電荷輸送原理の理解に必要な半導体に関する基礎的事項についての説明を行う。

3.2.1 バンド構造

シリコンや鉄、ゴムなど周期的な結晶構造を持つ物質中に存在する電子が取りうるエネルギーは量子力学的に離散した値を持ち、そのエネルギー準位は帯状の構造を持つようになる。それを図で表すと以下の図 3.6 のようになる。

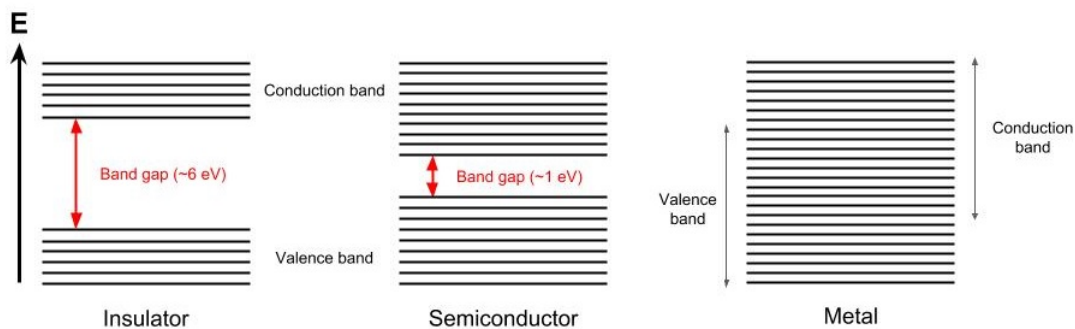


図 3.6 バンド構造

この構造は伝導帯・価電子帯の2つに分かれ、それらの間に禁制帯と呼ばれる電子が存在することのできないエネルギーギャップが存在する。このエネルギーギャップの大きさに対応して物質は金属などの導体、Si 結晶などの半導体、そしてゴムなどの絶縁体に分類される。金属の場合エネルギーギャップは存在せず電子は自由電子として振る舞うことができる。それ以外では半導体の場合数 eV 程度、絶縁体においては数 eV よりも大きな

エネルギーギャップが存在し結晶中の電子は自由に動くことができない。しかしながら放射線が入射する事等によって価電子帯中の電子がエネルギーギャップよりも大きいエネルギーを獲得することができれば、その電子は伝導帯のエネルギー準位へ励起され、結晶中を自由に動きまわることができる。また励起された電子が元居た価電子帯のエネルギー準位には空きができて、それらが正孔(ホール)と呼ばれる正電荷として結晶中を自由に動きまわることができる。この電子と正孔ができる反応のことを電子正孔対生成(e-h pair creation)という。また、この際生じた自由に動き回る電子と正孔を総称してキャリアと呼び半導体を用いた検出器はこれらのどちらかを信号として利用するが、FPCCDの場合には電子を信号として利用する。

3.2.2 n型半導体とp型半導体

一般にシリコンのみの結晶など、不純物を含まない半導体においてはキャリアとして励起された電子のみが供給される。しかしながらこのままでは半導体素子として用いるにはキャリアが少なく、意図的に微量の不純物を混ぜる(ドーピング)ことにより原子の価電子数に差を生じさせることでキャリアとして利用できる電子・正孔を増加させる。半導体に価電子数4のシリコンを主として利用されている場合、価電子数5のリンを混ぜるとシリコンのみで結晶を構成する場合よりも1つ多くの電子をキャリアとして利用することができる。このように不純物を混ぜることでキャリアとしての電子を増加させた半導体のことをn型半導体と呼ぶ。同様にシリコン結晶に価電子数3のホウ素を混ぜた場合にはキャリアとしての正孔を増やすことができ、これをp型半導体と呼ぶ。FPCCDは前者を利用した半導体検出器である。

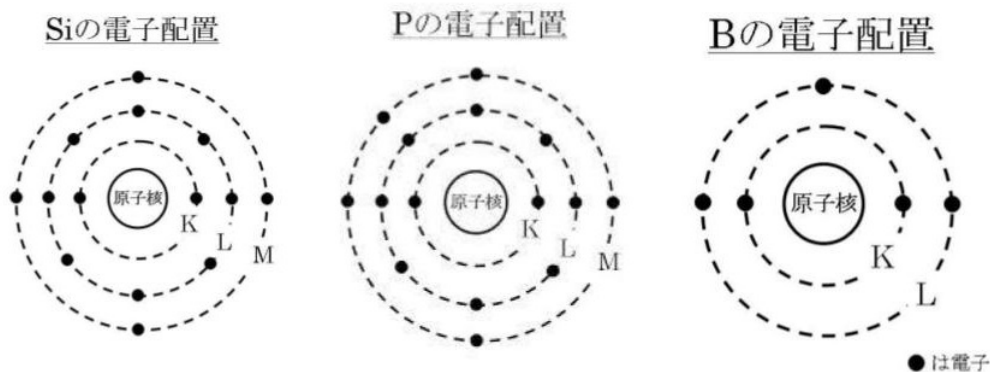


図 3.7 Si,P,B の電子配置 [6]

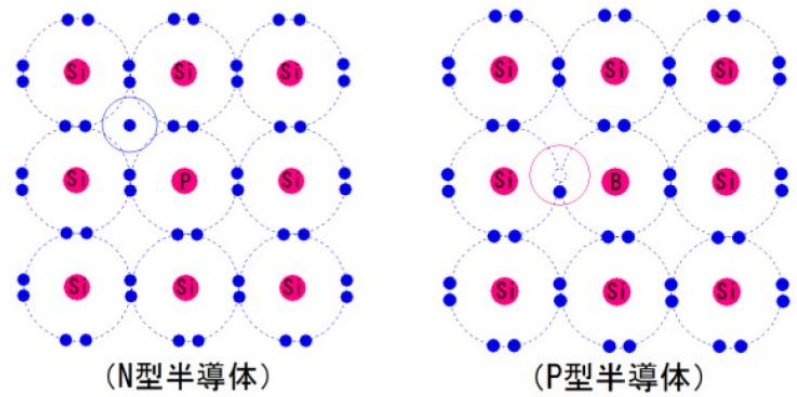


図 3.8 n 型および p 型半導体の結晶構造 [5]

3.3 CCD

CCD とは Charge Coupled Device の略で、電荷転送デバイスの 1 種である。一般に CCD はデジタルカメラ等に利用されており、光を信号に変換して画像に変換するためのイメージセンサーとして用いられている。構造は半導体に酸化膜を接合し、電極を取り付けた MOS (Metal Oxide Semiconductor) 素子が多数結合することでできている。今回はこの CCD を粒子が通った位置を検出するためのピクセル検出器として利用する。

3.3.1 動作原理

CCD は主に以下の 4 つの動作で信号を検出する。

- 1 粒子の検出
- 2 信号電荷の蓄積
- 3 信号電荷の輸送
- 4 信号電荷の検出

粒子の検出

デジタルカメラ等に用いられる一般的な CCD は光子が物質に入射した際に光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の 3 種類の相互作用を通じて生じた電子を信号とする。FPCCD は荷電粒子が入射した際に生じる前述の電子正孔対生成によって生じた電子を信号として利用する。信号電荷となる電子正孔対の数は放射線のエネルギー損失に比例しており、正しく信号を得るためには電子が正孔と再結合する前に収集する必要がある。

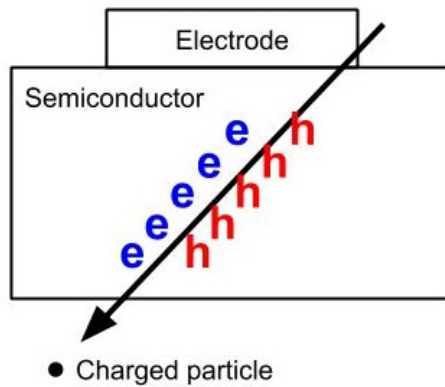


図 3.9 電子正孔対生成の模式図

信号電荷の蓄積

生成された電子を輸送動作まで蓄積しておくのに電位の井戸を作る。半導体素子の一つである MOS キャパシタを利用する。下の図 3.9 は p 型半導体を利用した表面型 MOS キャパシタと呼ばれるものの模式図である。この素子の電極に正の電圧を印加することで、酸化膜を挟んで半導体中に電場が発生する。電場により多数キャリアである正孔は電極から遠ざかり、電極周辺にキャリアの存在しない空乏層ができる。この領域は電位が高くなっていて正孔が存在しないため、電子を蓄積することができる。しかしながらこの場合、p 型半導体と酸化膜の境界部に電位の井戸が生じる。境界面には製造上の格子欠陥が多数存在し、その欠陥に信号となる電子がトラップされ電荷損失が発生してしまう可能性がある。

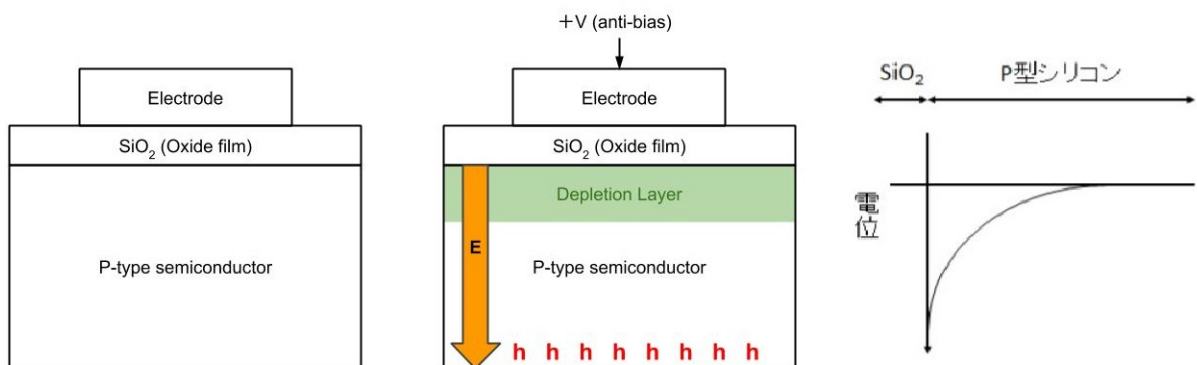


図 3.10 表面型 MOS キャパシタ [16]

それを避けるため FPCCD は埋め込み型 MOS キャパシタと呼ばれる構造を採用しており、その模式図が次の図 3.10 である。埋め込み型の場合、境界部をさけて電位の井戸を作るために酸化膜と p 型半導体の間に n 型半導体を挿入する。このようにすることによって p 型半導体と n 型半導体の境界部付近でキャリアの電子と正孔と電子を結合させ、空乏層を形成することができる。さらに逆バイアス電圧を印加することによってそれぞれの半導体中に残っているキャリアが互いに遠ざかることで空乏層が広がり、シリコン中に電位の井戸を形成することができ酸化膜の格子欠陥に電子がトラップされるのを避けることができる。

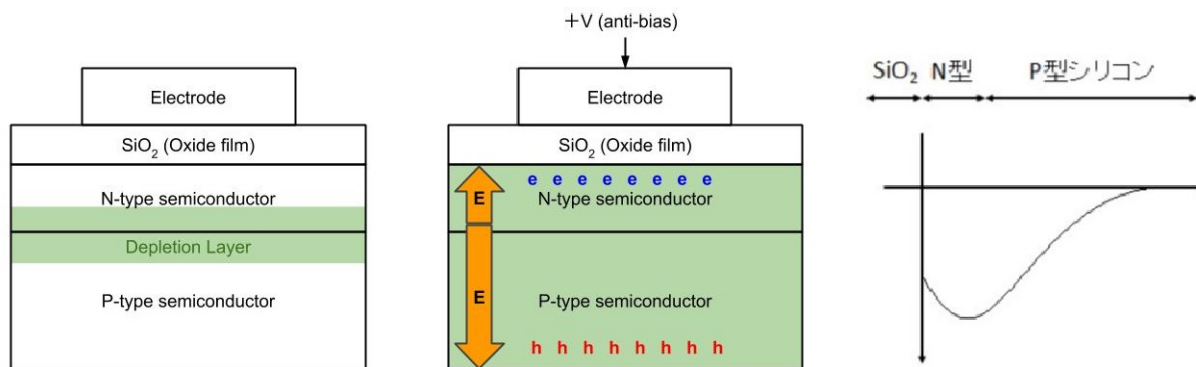


図 3.11 埋め込み型 MOS キャパシタ [16]

信号電荷の輸送

CCD の信号電荷の読み出し口は CCD チップの終端についており、検出の為には信号電荷を読み出し口に転送する必要がある。転送の原理は電荷が蓄積されている電位の井戸を移動させることにある。CCD には 1 ピクセルに割り当てられた電極の数と転送方式の違いにより様々な種類があるが、FPCCD は 2 相-Full Frame Transfer (FFT) 方式を採用している。2 相-FFT 方式とは 1 ピクセルに 2 つの電極 (P1,P2) が割り当てられ、各ピクセルで信号電荷の検出・蓄積・転送をすべて行うタイプの CCD である。

2 相式の CCD では取り付けられた電極にハイレベルとローレベルの 2 つの電圧レベルを駆動パルスによって交互に印加することで輸送を行う。2 つのうち片方の電極に不純物をドーピングすることで 1 ピクセル内でポテンシャル差をつけている。仮に 1 ピクセルに電極が 1 ししか取り付けられておらず、電圧も 2 つのレベルしか使用しないと電荷を輸送した方向とは逆方向に電荷が輸送されてしまう可能性があるが、1 ピクセル内で前述の方法によりポテンシャル差を作り出せば、ポテンシャルの低い方の電極が逆流弁のような働きをすることで逆流を抑えることができる。

以下、具体的な電荷の輸送方法について説明する。図 3.11 は輸送の模式図である。ある時刻 t_1 に P1 をハイレベル、P2 をローレベルにすることで P1 に電荷を蓄積する。そして電極のレベルを切り替えると時刻 t_2 の状態を経由して時刻 t_3 の状態に移り、隣のピクセルへの電荷輸送が行われる。この動作を繰り返していくことによって読み出しピクセルまで電荷を輸送する。

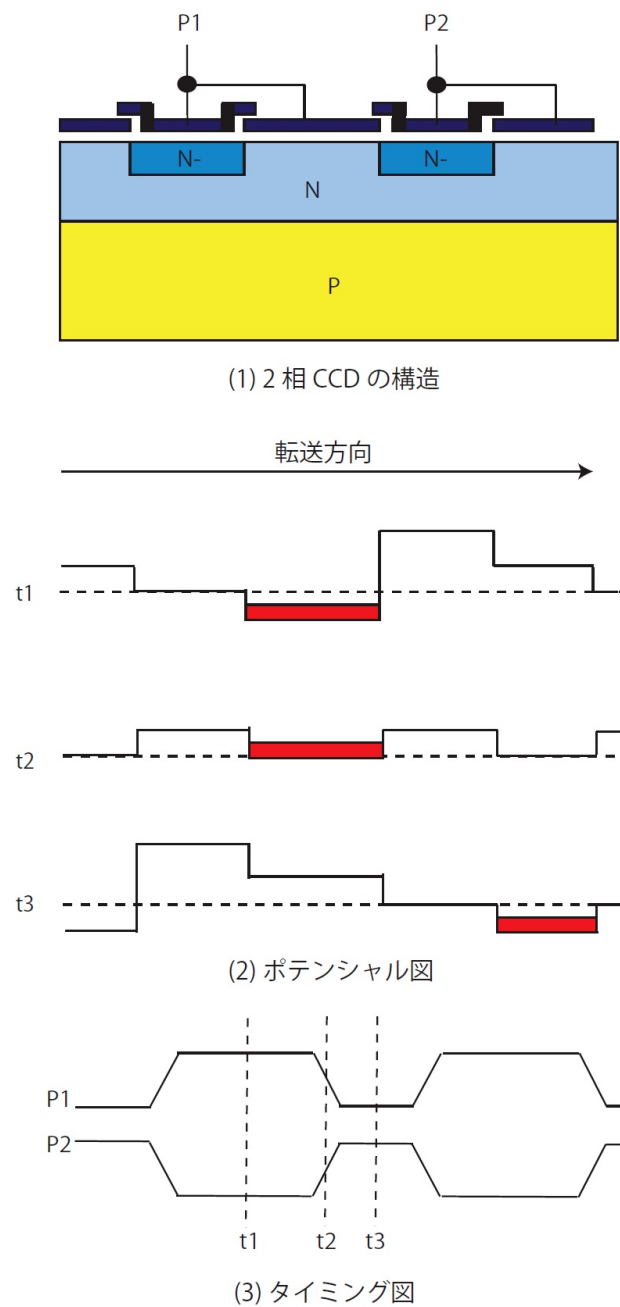


図 3.12 2相 CCD の動作原理 [18]

次に CCD 上での電荷の動きについて説明する。CCD チップの模式図が図 3.13 である。CCD には電荷の輸送方法により水平輸送ピクセルと垂直輸送ピクセルの 2 種類がある。はじめに水平輸送ピクセルに蓄積された電荷を読み出しピクセルへ輸送することによって水平 1 列に蓄積された電荷を読み出す。次に垂直輸送を 1 度行い、垂直輸送ピクセル最下段の電荷を水平輸送ピクセルへ輸送する。このとき最上段の垂直輸送ピクセルは空になる。この動作を全ピクセルの電荷を読み出すまで行い、各ピクセルの信号を読み出していく。

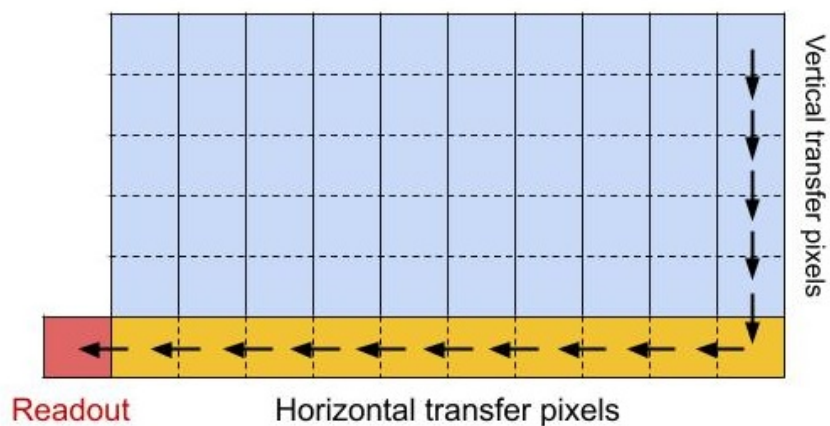


図 3.13 CCD の電荷輸送

信号電荷の検出

輸送された電荷は読み出し口において電荷量に対応した電圧へ変換されて出力される。FPCCD では電荷の検出方式として広く利用されている Floating Diffusion Amplifier (FDA) を利用する。この方式では電荷を検出するノードと、それに接続された 1 組のリセット用 MOSFET と電荷電圧変換用 MOSFET により構成される。検出ノードに転送された電荷は電荷電圧変換用 MOSFET で $Q = CV$ の関係により電圧へ変換され、次の信号を読み出すために検出ノードはリセット用 MOSFET によってリファレンスレベルの電圧にリセットされる。このため電圧の読み出し自体は非破壊であるが、FDA は一般に破壊読出しに分類される。

第 4 章

宇宙線テスト (セットアップ)

4.1 目的

現在開発中の FPCCD は浜松ホトニクス社の協力のもと、ピクセルサイズを小さくしたモノ・大型 CCD 等の試作が段階的にされており、現在では $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ のピクセルサイズを持つ FPCCD が試作されている。

先行研究においてノイズの原因となる Dark current や Hot pixel fraction、転送効率等について性能評価が行われたが、現時点では前章で述べた位置分解能やヒット分布からのバックグラウンド除去に関しては性能評価がされておらず、それらについて研究を行う必要がある。

本研究の目的はそれらのうち FPCCD の位置分解能に関連して、宇宙線を最小電離粒子 (MIP) として使用し、宇宙線の信号を FPCCD で取得することによってトラッキングを行い、直線 fit とヒット位置の差分を計算することで位置分解能の指標となる σ を算出する事及び宇宙線ヒット時の電荷拡散について性能評価を行うことである。

4.2 測定システム

4.2.1 測定システムへの要求

本研究の目的の達成のために、測定システムに要求される要件は以下の点である。

- 3 個以上の FPCCD を同時に動作させられること
- 出来る限り広い範囲の入射天頂角を持つ宇宙線の信号を取得できること
- あるイベントが確かに宇宙線によるものか確かめられること
- 3 点目に関して FPCCD の動作に対して時間的な対応を取れるものであること

まず 1 点目について、位置分解能の算出の為には 3 個以上の CCD を用意してヒット位

置を取得し、3点以上でのFitによるトラッキングを行った後、トラッキングで得られた直線と実際のヒット位置の差分を計算する必要がある。1点のみの場合にはトラッキングができず、2点のみの場合には差分は0になってしまう位置分解能の評価という点では意味を為さないので3個以上のFPCCDを同時駆動する必要がある。

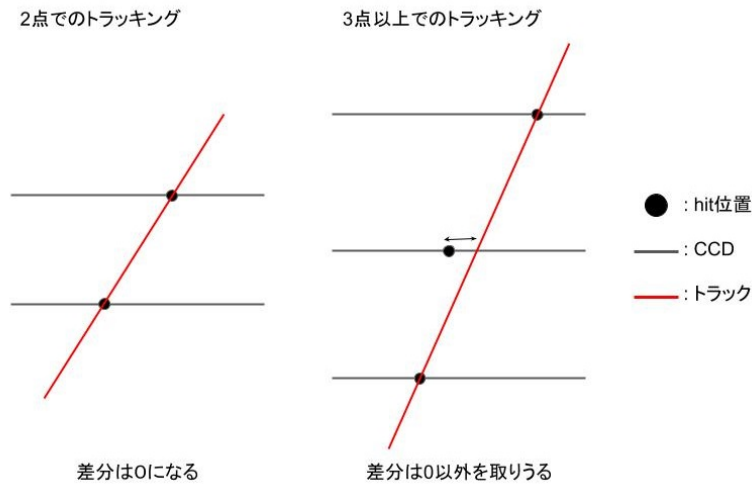


図 4.1 2点トラッキングと3点トラッキング

2点目について、前章で述べたFPCCDの特徴のうちペアバックグラウンドの除去に関連して、信号電荷の拡散が信号を生成する粒子の入射角度によって変化するかどうか評価を行う必要がある。ヒット点が2個以上であれば宇宙線の入射角度をヒット位置から幾何学的に計算することができ、それに対して信号電荷の拡散がどの程度になるか等の評価を行うことができる。

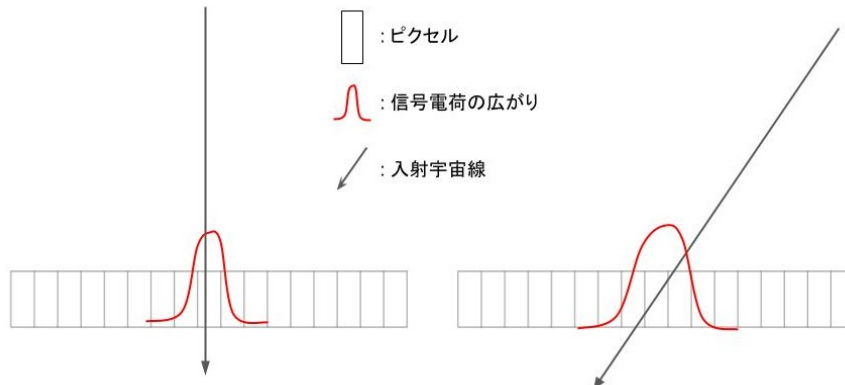


図 4.2 電荷拡散の入射角度による変化イメージ図

3点目について、ホットピクセル等のノイズを信号と誤認して電荷拡散や位置分解能の評価を行ってしまわないように、ある信号が確かに宇宙線によるものか確認する必要がある。上記2点の要求も満たすように確かに宇宙線による信号かどうかの判定には判定を行う測定器にもヒット位置や入射角度の計算を行える機能が備わっている必要がある。以下この判定の為に測定器をチェックシステムと呼称する。

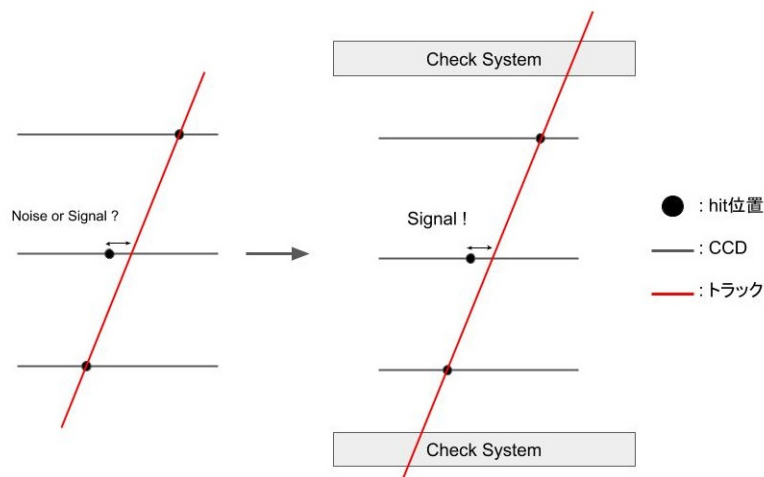


図 4.3 チェックシステム模式図

4点目について、FPCCD は一定周期事に露光・読み出しを繰り返すデータ取得方法を採用する為、チェックシステムには FPCCD 側における時間情報を取得する機能が必要である。この情報をもとに FPCCD で得られた信号とチェックシステムで得られた信号の対応を取り、確かに宇宙線によるイベントであったか判定を行う。

4.2.2 設計

要求を達成するために本研究では FPCCD を 4 個同時駆動することにした。FPCCD1 つの駆動には FPCCD1 つの駆動及び信号の転送を行える Affroc ボードを使用した。また FPCCD4 個の同時駆動のため Affroc ボード 4 枚に対して電荷輸送のためのクロックパルス供給、信号の転送を行えるボードとして信州大学・KEK で開発された Affroc Interface Board 2 (AIB2) を使用した。またこれらのボードに露光時間や読み出しのクロックパルスの供給、及び読み出したデータの処理・PC への転送に関する制御を行う為に SEABAS2 ボードを使用した。

電荷拡散の評価に関して、FPCCD を設置する間隔は幾何学的に重要な要素である。FPCCD の有感領域は $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 程度であり、間隔が大きいと宇宙線信号に対するアクセプタンスが小さくなるのに加えて、限られた小角度のイベントのデータしか取得する

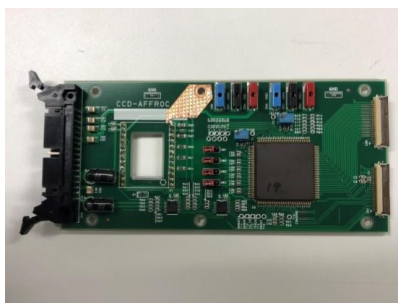


図 4.4 Affroc ボード (縦 7cm × 横 15cm)

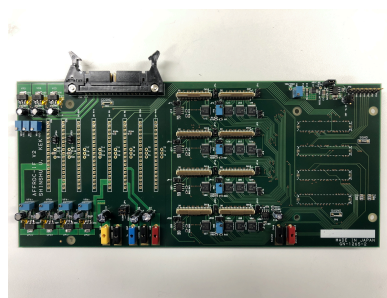


図 4.5 Affroc Interface Board 2 (縦 11cm × 横 25cm)

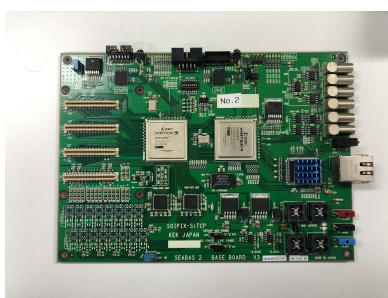


図 4.6 SEABAS2 ボード (縦 14cm × 横 19cm)

ことができない。できるだけ FPCCD 同士の間隔を狭めた上で、FPCCD4 個のうち 1 個を後述する他のものと性能は同じで設計が異なるタイプを採用することによって 4 個の FPCCD のうち 2 個の間隔をさらに狭めることができ、より大きな天頂角を持って入射する宇宙線の信号を取得できるようにした。

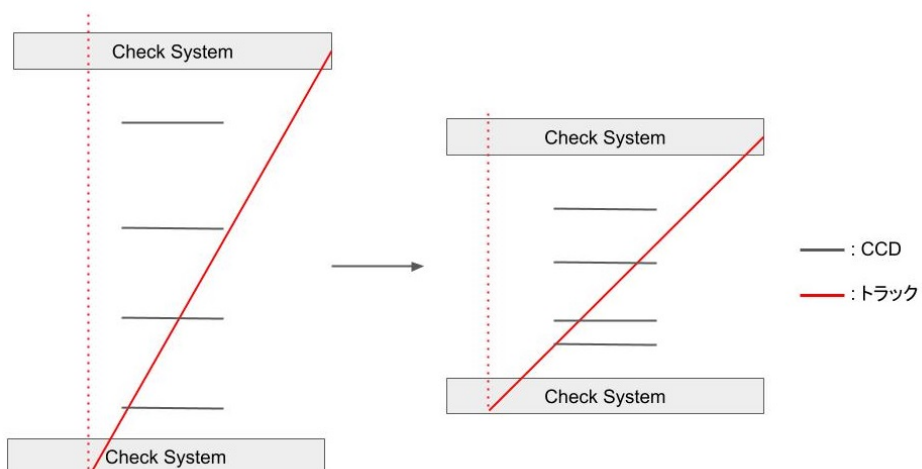


図 4.7 取得可能な角度の上限変化

チェックシステムはヒット位置の取得が求められる為、棒状のシンチレータとシンチレーション光を検出するための浜松ホトニクス社の光検出器の一つである MPPC との組合せを基礎として、その組み合わせを平行に並べることで1方向のヒット位置を特定できるように設計したボードを2枚組み合わせ、2方向のヒット位置をピクセル状に記録できるようにした。

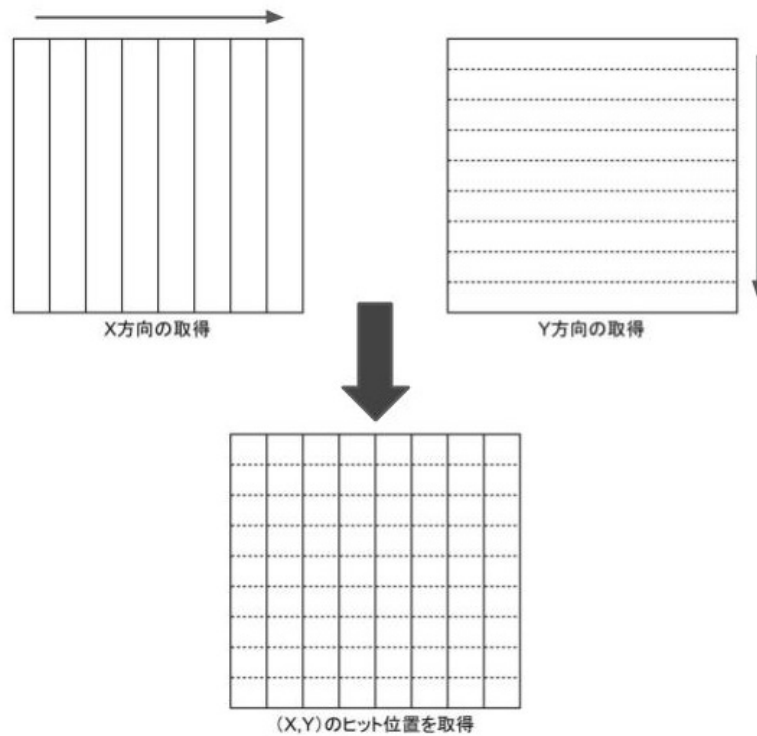


図 4.8 ヒット位置の取得模式図

これによってチェックシステムには MPPC の複数同時駆動・読み出しが可能なエレクトロニクスが必要である。このエレクトロニクスには大阪大学、KEK、東北大学が共同で開発した最大 64 個の MPPC を同時駆動・読み出しできる EasirocModule を採用した。また FPCCD の動作に合わせた時間情報の取得のためには信州大学で開発された EasirocModule 動作の為のファームウェアを使用した。詳しくは後述するがこのファームウェアは FPCCD の露光時間・読み出しのサイクルが何度あったかを記録してデータ出力することができ、その情報をもとに FPCCD で取得された宇宙線入射のイベントとの対応づけを行うことができる。EasirocModule に関しては詳細に後述する。

4.3 セットアップ

本節では測定システムのセットアップ、測定システムを構成する各要素、解析の手順についてこの順序で解説する。

4.3.1 セットアップ概要

次に示す図 4.9 は実験セットアップの模式図である。

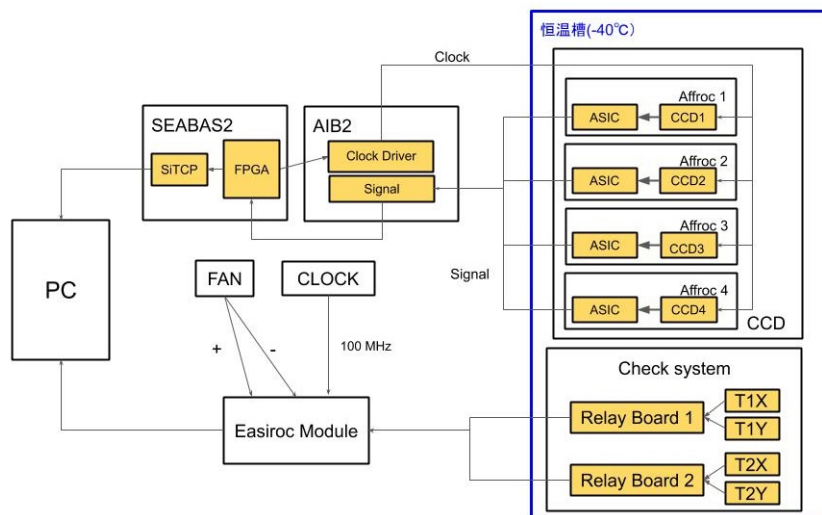


図 4.9 実験セットアップ模式図

FPCCD は次の図 4.10 のオシロスコープ画像 ch2(青線) のように露光期間 10 秒の間宇宙線等による信号を蓄積し露光期間が終了すると読出しを行う。

以下本論文ではこの 1 サイクルの事を”1 frame” と呼称する。1 frame のうち露光期間は 10 秒に設定しており 720 frame を繰り返すことで 1 つのデータファイルとした。この露光期間を示す信号 EXPOSE は SEABAS2 から出力され、それを FAN に入力する。出力 FAN+ が図 4.10 の ch4(緑線) である。この信号は後述する EasirocModule 間同期の機能を利用して FPCCD の frame との同期を行うために使用される。信州大で作成されたファームウェアを使用すると EasirocModule 前面の ACCEPT 端子にこの信号が Low で入力された際に EasirocModule はこの信号をカウントし”cycle number”としてデータに記録する。この cycle number は FPCCD の frame と同期している為、解析の際には frame と cycle number の対応を取ることによって FPCCD で得られたデータが確かに宇宙線のヒットによるものか確認するのに役立つことができる。また EasirocModule 前面の CLEAR には 100 MHz 等の高い周波数のクロックパルスを入力

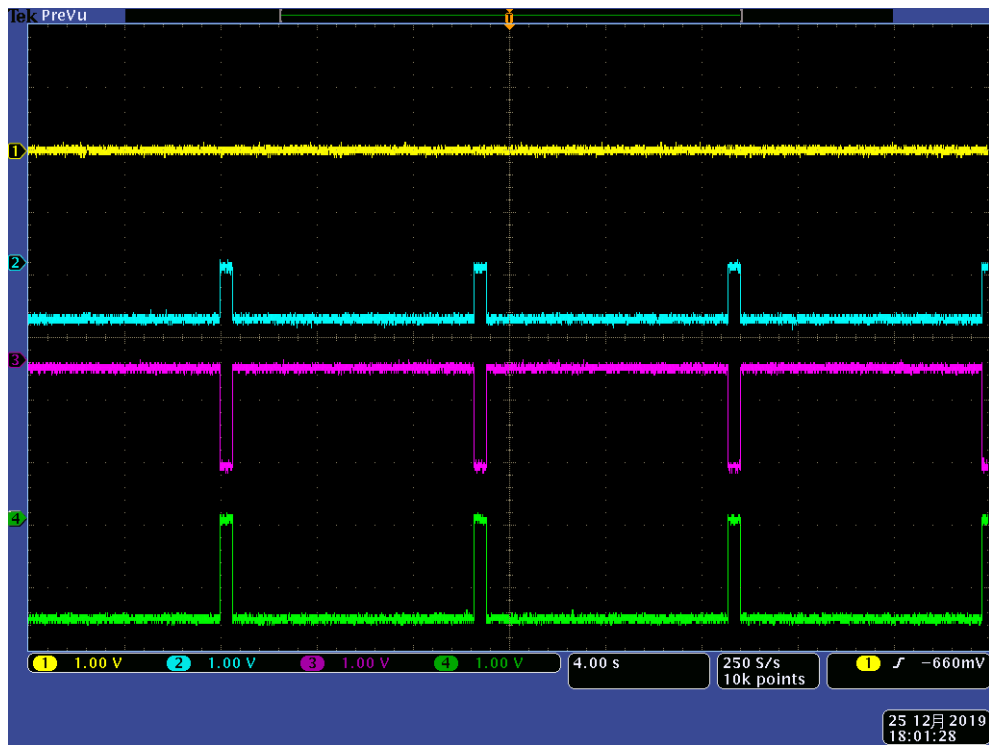


図 4.10 露光期間と読出し期間。青線が Low の部分は露光期間、赤線は FAN によって反転された-出力、緑線は FAN からの + 出力を示す。

することで MPPC からの信号が得られた際にある何番目のイベントがどの cycle number に属するかという情報も得ることができる。ch3(赤線)は FAN-から出力される信号で、これを EasirocModule の Veto に接続すると出力が Low の時 EasirocModule の内部トリガー信号を出力しないようにできる。これによって露光期間中のみ MPPC の信号を取得するよう設定することができる。また FPCCD は ILC において -40°C での運用が予定されており、本研究においても図 4.9 の青枠の範囲にある FPCCD 及びチェックシステムを -40°C に設定した恒温槽内に設置した。

次の図 4.11、図 4.12 は測定システムの模式図、表 4.1 は測定システム各部の放射長で書いた厚さの表である。以下本論文ではチェックシステム及び FPCCD の各部を図 4.12 に記載されている名称で呼称する。

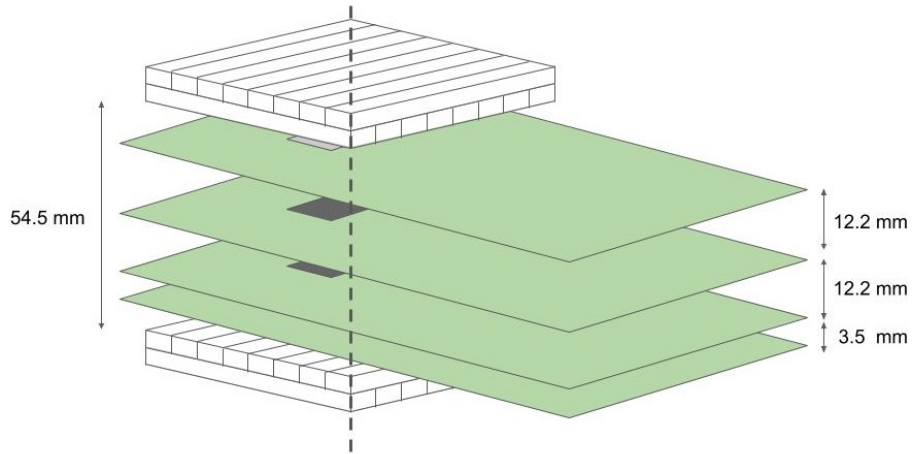


図 4.11 測定システム模式図。白色部はチェックシステム、緑色部は Affroc ボードである。Affroc ボード無いの四角形は CCD を表す。

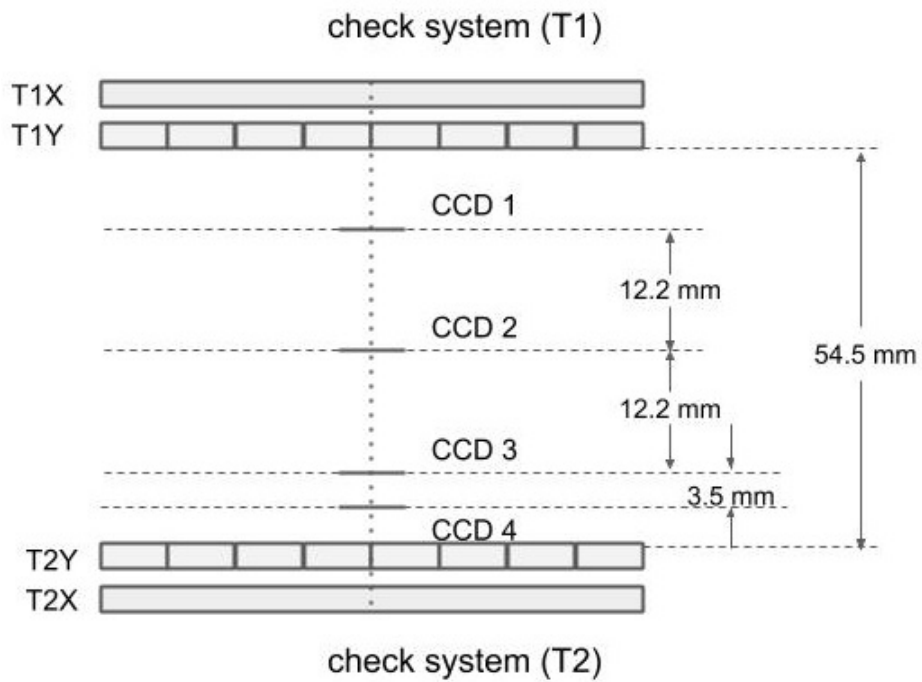


図 4.12 測定システム模式図 (側面)

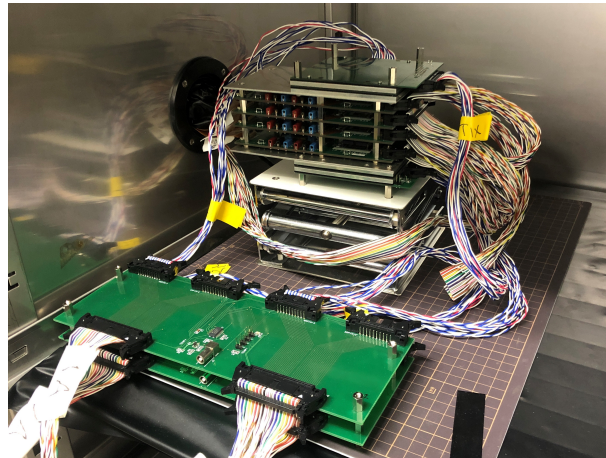


図 4.13 読み出しセットアップ (恒温槽内)

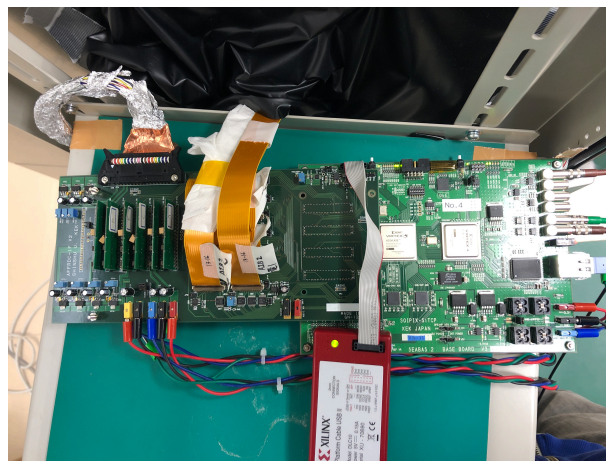


図 4.14 読み出しセットアップ (恒温槽外)

表 4.1 測定システム各部の放射長で書いた厚さ [9]

素材	使用箇所	放射長で書いた厚さ x/X_0
プラスチック	プリント基板	0.002
	シンチレータ	0.006
	CCD プラスチックカバー	0.002
シリコン	CCD 本体	0.0005
ガラス	CCD ガラスカバー	0.0079

4.3.2 FPCCD

本研究で使用した FPCCD の仕様を以下の表に記載する。FPCCD は水平転送ピクセルの大きさにより 4 区画に区分けされておりそれぞれ OS1-4 と名付けられている。その内 OS 1 は製造段階で欠陥があり動作しないことがわかっている。

表 4.2 使用した FPCCD の仕様

	OS1	OS2	OS3	OS4
垂直転送ピクセル	$6\mu m \times 6\mu m$			
水平転送ピクセル	$6\mu m \times 6\mu m$	$6\mu m \times 12\mu m$	$6\mu m \times 18\mu m$	$6\mu m \times 24\mu m$
ピクセル数	1024 × 255	1024 × 254	1024 × 253	1024 × 252
有感層厚	$15\mu m$			
型番	CPK1-14-CP502-9,11,25,37			

また使用した CCD4 枚のうち型番の末尾が 11,25,37 の 3 枚は裏面照射型と呼ばれるもの、残りの 9 番は通常の CCD である。通常型 CCD の場合には受光面と電極が同じ面にあり、信号となる光が電極や酸化膜に吸収される事等によって電荷収集の効率が落ちる。これを避けるために裏面に受光面を配置し、できる限り装置本体を薄くすることによって電極への電荷収集を可能にした裏面照射型 CCD が開発された。本研究では通常型 CCD と裏面照射型 CCD を併用しているが測定対象は光ではなく宇宙線 MIP であるためこの構造の違いは影響しない。これらの CCD は Affroc ボードに装着されており、CCD で得られた信号は Affroc に実装されている ASIC に送られた後リボンケーブルを経由して Affroc Interface Board 2 (AIB2) に送られる。AIB2 に送られた信号は SEABAS2 に送られデータに変換された後 Ethernet ケーブルと通して PC へ転送される。また CCD 駆動の為にクロックパルス電圧の調整はクロックドライバーカードに取り付けられた可変抵抗の値を調整する事によって行うことができる。

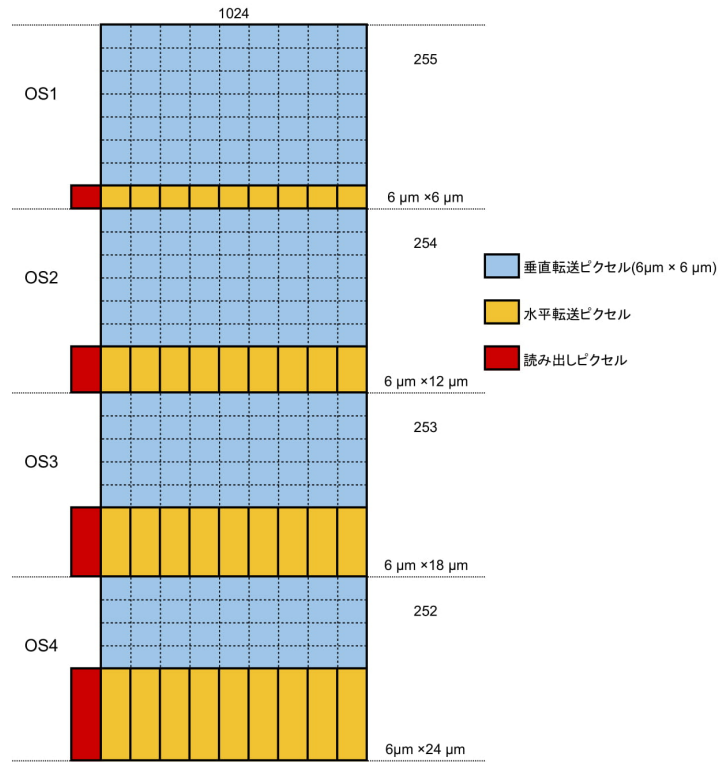


図 4.15 使用した CCD の模式図

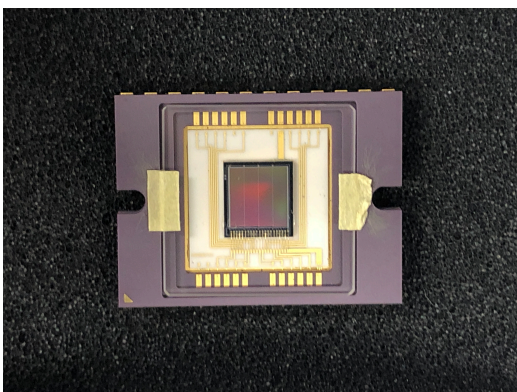


図 4.16 通常型 CCD

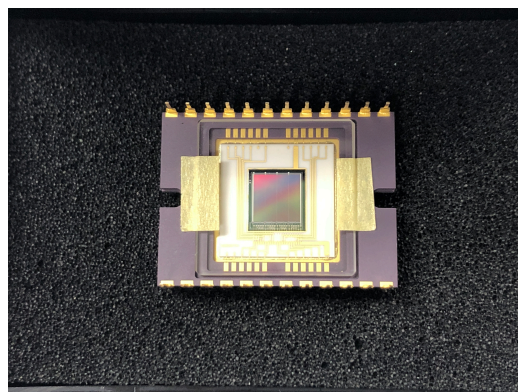


図 4.17 裏面照射型 CCD

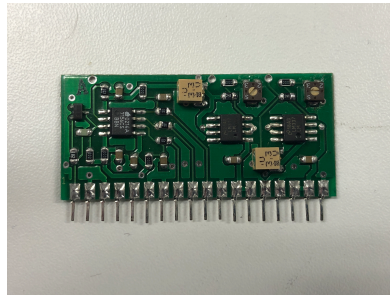


図 4.18 クロックドライバーカード

4.3.3 チェックシステム用 MPPC ボード

本研究におけるチェックシステムは、平行に並べられた棒状のシンチレータ 8 本と浜松ホトニクスの MPPC 8 個を組み合わせを 1 枚の MPPC ボードとし、宇宙線が入射した際にデポジットされたエネルギーに対応する光子を収集する事でヒット情報を取得する。

棒状のシンチレータは単純な直方体ではなく図 4.19 のように MPPC に近い側にテーパ部分がある。これは単純な直方体では粒子がシンチレータのどこに入射するかによって集光効率に依存性が生じる現象が ILC のための ECAL 用シンチレータに関する先行研究で報告されており、それを抑制する為に導入した構造である [13]。

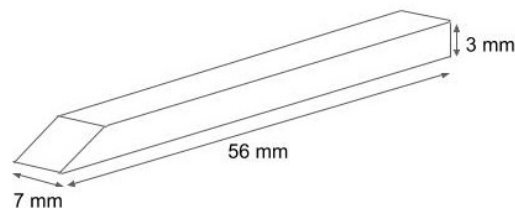


図 4.19 シンチレータ

この MPPC ボード 2 枚を 2 方向に組み合わせて 1 組をする事で、ピクセル状のヒット位置を特定することができる。この 2 枚 1 組の組み合わせ 2 つを CCD 4 枚の上下に配置する事で、CCD において信号が得られた際にそれがホットピクセル等によるノイズなのか宇宙線による信号なのか判定することができる。

MPPC ボードに実装されている MPPC からの信号は前述のとおり以下の図 4.23 の中継ボードを経由して EasirocModule に転送されバイナリデータに変換された後 PC に送られる。

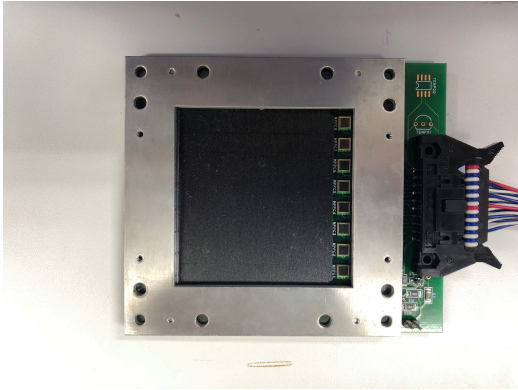


図 4.20 MPPC ボード シンチレータ実装前 (本体縦 9cm × 横 10.5cm)

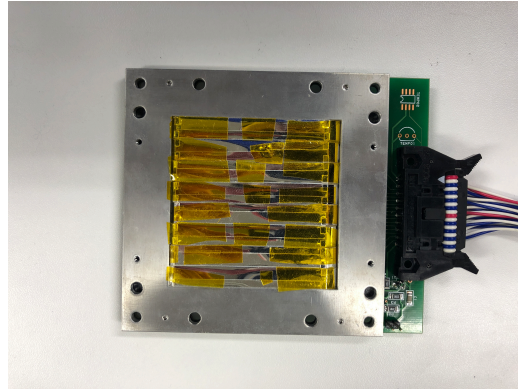


図 4.21 MPPC ボード シンチレータ実装後 (シンチレータ部 縦 56mm × 横 56mm)

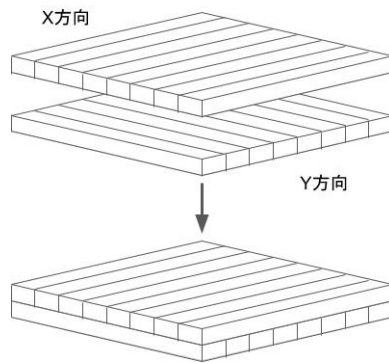


図 4.22 チェックシステム模式図

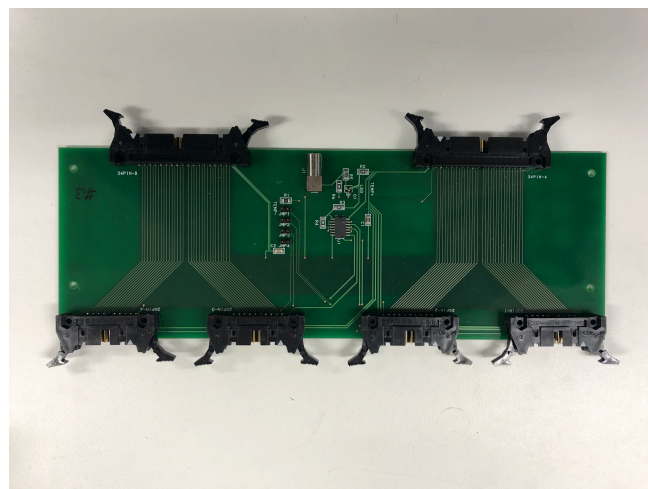


図 4.23 中継ボード

4.3.4 Easiroc Module

チェックシステムの MPPC による信号の読み出しには Easiroc Module を使用した。Easiroc Module は大阪大学、KEK、東北大学の共同で開発された最大 64 個の MPPC を同時読み出しできる NIM モジュールである。EasirocModule には Omega グループが開発した PPD(Pixelated Photon Detector) の読み出し用 ASIC である Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip (EASIROC)2 個が搭載されている。使用した浜松ホトニクス社の MPPC は PPD の一種である。

標準の EasirocModule の機能は以下の通りである。

- MPPC への印加電圧 (HV) の内部生成 (外部からの印加も可能)
- EASIROC でのアナログ信号処理
- ADC での AD 変換
- 0-4.5 V の範囲での MPPC 印加電圧の調整
- High gain amp, Low gain amp
- Fast shaper, Slow shaper
- Discriminator
- 各 chip での Discriminator 閾値の設定
- Peak 保持型の電圧保持機構

これに加え信州大学において改良された FPGA ファームウェアを使用すると以下の機能が追加される [17][14]。

- EasirocModule 内部でのコインシデンス取得・内部トリガーシグナルの生成
- Veto 入力によるデータ取得タイミングの制御
- EasirocModule 間の同期

これらの機能は setup 用のレジスタファイルの値を編集することによって設定でき、これらの設定値は EasirocModule の起動時及び起動後のメニューで反映させることができる。なお 3 つ目の追加機能に関して、本研究では EasirocModule は 1 台で測定を行った為複数台の同期という面では使用していないが同期の為の機能は利用している。

次に EasirocModule における信号取得プロセスについて述べる。次の図 4.25 は Easiroc chip の内部回路と NIM モジュール前面である。

まず HV の内部生成を行う回路で HV の生成を行う。本研究ではこの回路は使用せず、外部の直流安定化電源からモジュール前面の HV 端子に HV を供給することによって HV を MPPC に印加した。MPPC の駆動に十分な電圧が印加されているとき、MPPC に

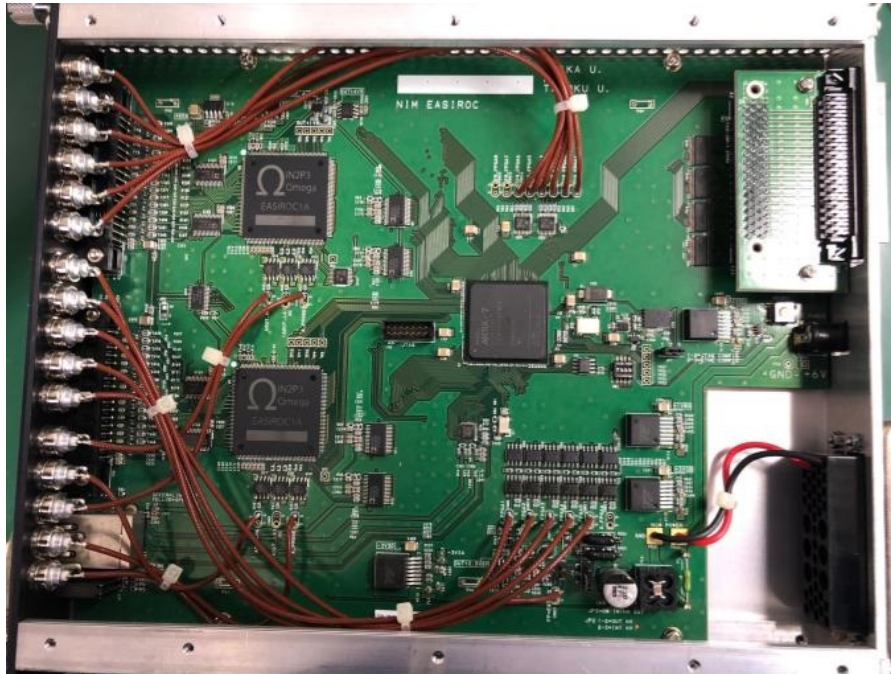


図 4.24 Easiroc Module

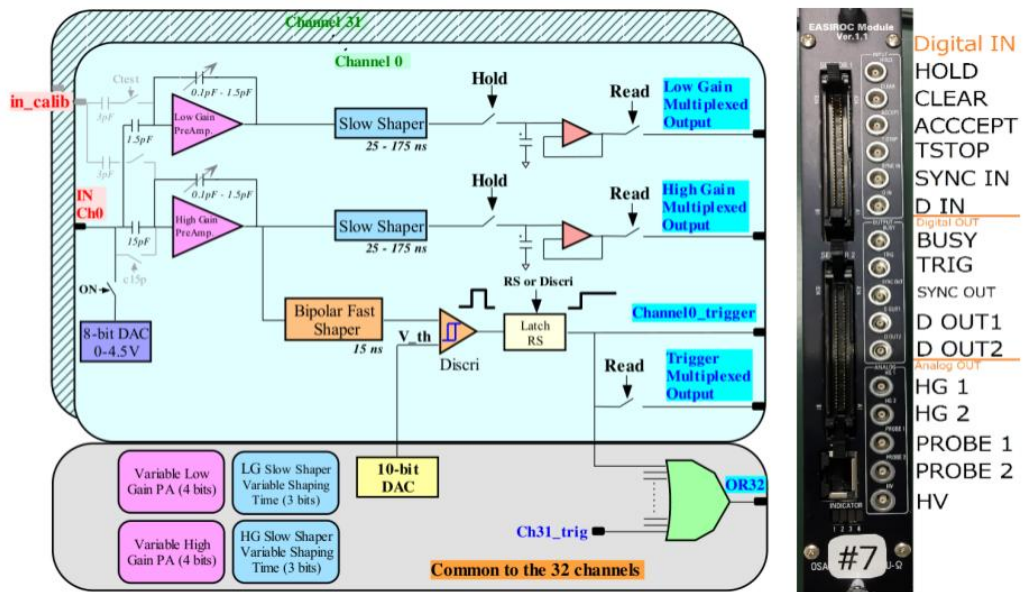


図 4.25 Easiroc chip 内部回路と NIM モジュール前面 [7] [17]

光子が入射すると光子数に応じた電圧の信号が Easiroc chip に転送される。この信号は Easiroc 内部の Pre amp で増幅されたのち fast shaper, slow shaper に送られ波形の調整が行われる。fast shaper を通過した信号は Discriminator に送られ各 chip での閾値より波高が大きな信号であれば出力を High にし、32ch の or を通って FPGA に送られる。信州大学で改良されたファームウェアを使用するとこれらの信号を元に設定したコインシデンス条件と照らし合わせて FPGA から TTL-NIM の変換を行った内部トリガーシグナルを前面の SYNCOUT から出力することができる。この信号を前面の HOLD 端子に入力すると再び NIM-TTL 変換を行った信号が FPGA を介して Easiroc chip に送られる。この HOLD 信号は Slow shaper を通過し時間的に緩やかな形に整形された信号の電圧保持のタイミングを調整する信号として用いられる。

図 4.26 は HOLD 信号とそれによって保持された slow shaper を通った信号のタイミングを示したものである。図のように HOLD の入力タイミングが slow shaper を通過した信号のピーク位置に合っていない場合には実際の波高のピーク位置よりも低い位置で電圧を保持してしまい、正しい結果が得られない為 HOLD の入力タイミングは重要である。保持された電圧値は ADC によって 12 bit の AD 変換をされ、その値は FPGA・Ethernet ケーブルを通して PC へ送られる。得られるデータはバイナリーデータなので扱えるように変換を行った後、解析を行う。

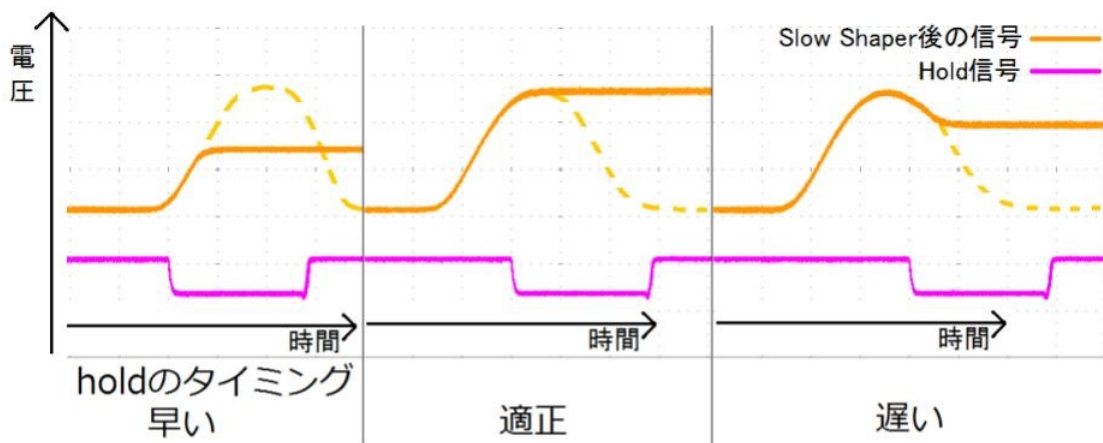


図 4.26 HOLD 信号の入力タイミングと電圧保持 [17]

4.4 解析の手順

本節では解析の流れについて簡潔に説明する。以下の図 4.27 は解析の流れを示したダイアグラムである。

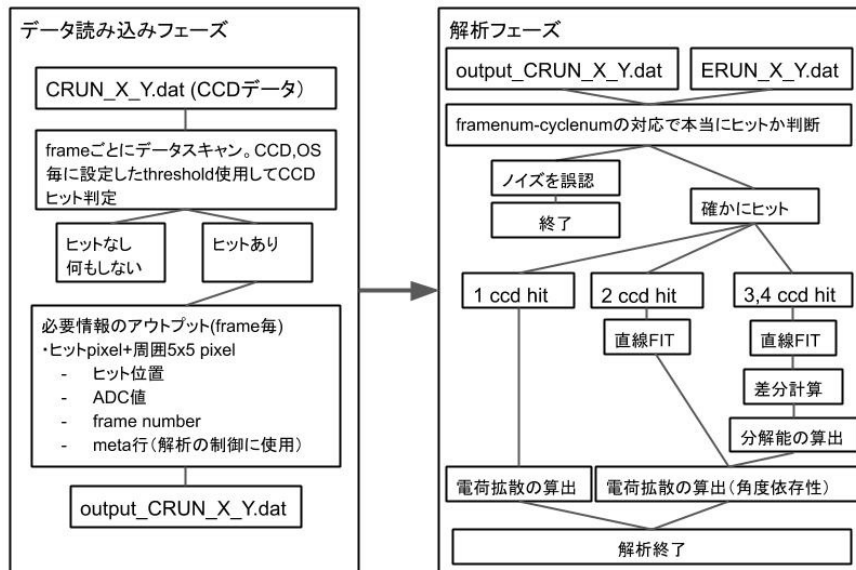


図 4.27 解析手順ダイアグラム

まず CCD のデータから各 CCD・OS における閾値を超えたピクセルの内、ADC 値が最大であったピクセルの周囲 5×5 ピクセルの座標、ADC 値を別のファイルにアウトプットする。これは CCD データは 720 フレーム当たり 3.6 GB と大容量であるがその多くが宇宙線ヒットのないフレームであり、CCD データをそのまま読み込んでしまうと多大な時間を消費してしまうためである。前述のように 1 測定 720 フレームの CCD データを多数取得している為、全測定のデータを解析するには必要な部分の抽出が終了した 1 測定分のデータを 1 つにまとめる必要がある。このため抽出したデータにはフレームの開始・終了及び測定の終了を制御するためのメタ行を出力するようになっている。一方で EasirocModule によって生成されたデータは 720 frame の測定を数回続けている間はデータを取得し続ける設定になっているので、このデータ構造の違いを補正しつつ frame number と cycle number の対応を取る為にメタ行は使用される。

また frame number と cycle number 及び EasirocModule における event number の対応は次の図 4.29 のようになっている。EasirocModule で取得したイベントデータにはどの cycle number(frame number) でのイベントかという情報も含まれている。従って、ある cycle number 中には数個の event が属する場合がある。

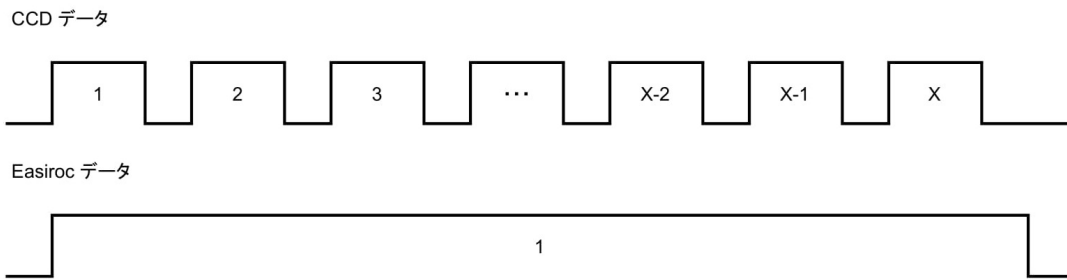


図 4.28 データ対応モード図。1つの EasirocModule (チェックシステム) データには複数の FPCCD データが属する。

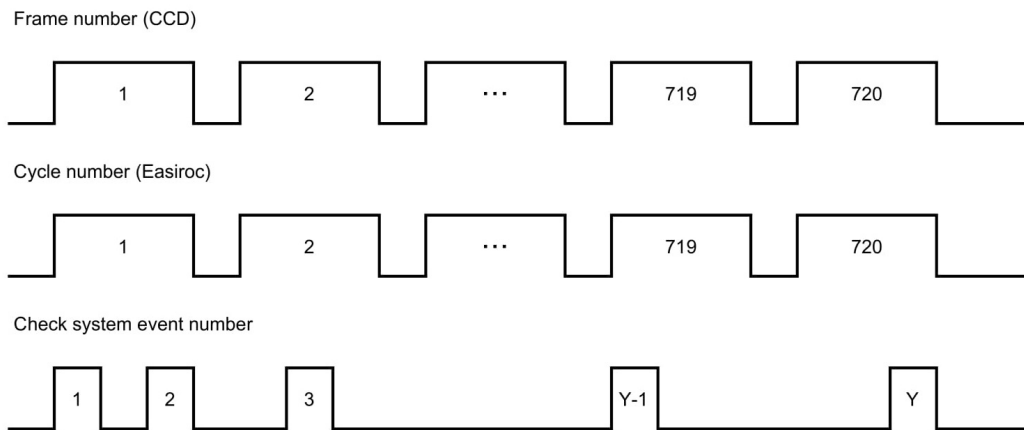


図 4.29 frame number, cycle number, event number の対応。ある frame には複数のチェックシステムにおけるイベントが含まれる場合がある。

frame number と cycle number の対応が取れた場合にはその frame での CCD へのヒットパターン (ccd2,ccd3,ccd4) 等を取得し、その CCD ヒットパターンから推測できるチェックシステムのヒットがあったかどうか判定する。CCD へのヒットが確かに宇宙線によるものであると判定された場合には CCD のヒットパターンによってその後の解析手順を変える。CCD1 個のみのヒットだった場合には電荷拡散を見積もるのみ、CCD2 個へのヒットの場合にはヒット座標から宇宙線の入射角度を計算し、入射角度によってどの程度電荷拡散が起きるかを見積もる。CCD3 個以上のヒットの場合には直線フィットを行った後、分解能を算出するために直線フィットから得られた直線と実際のヒット位置の差分を計算する。その後 CCD2 個の場合と同じ様に入射角度の計算及び電荷拡散の見積もりを行う。CCD3 個、4 個のヒットの場合の直線フィットと実際のヒット位置の差分のヒストグラムにはガウシアンフィットを行って得た σ を位置分解能の指標とした。

第 5 章

宇宙線テスト (結果と考察)

以下に述べる結果は測定環境温度 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 10 sec/frame として $720\text{ frame} \times 368$ (29 日間) 測定したデータについてである。

5.1 チェックシステム

5.1.1 各条件設定

印加電圧

本研究に使用した MPPC の浜松ホトニクスが推奨する動作電圧は 54.86V から 55.74V の範囲であり、ブレークダウン電圧はそれらの値から 3V 引いた値である。さらに低温条件の下では MPPC の信号増倍率が高くなることを考慮してそれよりも少し低い 52V を EasirocModule の外部 HV として印加した。 52V からさらに個々の MPPC にバイアス電圧調整を EasirocModule の設定で行った。

Discriminator 閾値

discriminator の閾値は設定ファイルにおいて 100 とした。EasirocModule の仕様として設定ファイルで設定した値が小さいほど discriminator の閾値は高くなり、スペック上は設定ファイルにおいて値を 600 にすると ADC 値ではペDESTAL 程度の値となる。

内部コインシデンス

本研究における内部コインシデンスの条件は (T1 の 16 個のシンチレータのうち 1 つへの hit) and (T2 の 16 個のシンチレータのうち 1 つへの hit) とした。これは信州大学で開発されたファームウェア (ver1-2-4) のコインシデンス条件設定で設定可能な条件のうち T1 and T2 を最大の面積で可能な設定である。

5.1.2 ヒット判定閾値の決定

次の図 5.1 は T1X1 で得られた ADC 値のヒストグラムである。

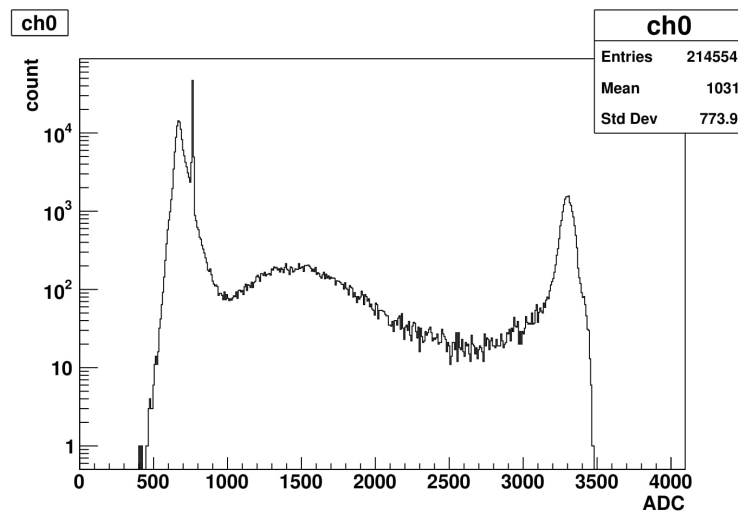


図 5.1 T1X1(ch0) の ADC 分布

シンチレータ及び MPPC がアサインされている EasirocModule の ch においては全て似たヒストグラムが得られており、このことからペDESTALから十分に離れた ADC 値 1500 をヒットとみなす閾値とした。これらのヒストグラムに 1500 以下の値が fill されているのは他の ch に宇宙線が入射して内部コインシデンス条件が満たされ、データを取得した場合でも全 ch の信号を読み出すように EasirocModule が設計されているためである。また前章で解説したように Easiroc chip は MPPC で取得した信号を 12bit の ADC で AD 変換するため理論的な ADC の最大値は 4096 であるが、設計に起因して ADC 値が 3500 付近で飽和することが先行研究によって確認されている [15]。

5.1.3 Efficiency チェック

前述の通り、FPCCD とチェックシステムのヒット情報の対応を取る際にチェックシステムの efficiency は重要となる。本研究での主な測定対象は使用した CCD4 個うち 3 個以上を通過した宇宙線による信号であり、その宇宙線はチェックシステムの限られた領域を通過するのでチェックシステムの T1 及び T2 のうち中心付近 4×4 の領域の efficiency チェックを行った。この際内部コインシデンスの条件は ((or T1X3-6) and (or T1Y3-6)) or ((or T2X3-6) and (or T2Y3-6)) とした。まず $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の範囲には 1 Hz の頻度で宇宙線が入射すると仮定し 2 時間の測定では 7200 個の宇宙線が通るとする。その値に

efficiency チェックの対象となるシンチレータの面積 $28\text{mm} \times 28\text{mm}$ との面積比を乗じると、この範囲に2時間の測定で入射する宇宙線の数はいくつと見積もることができる。次の図 5.2, 図 5.3 は宇宙線のヒットがあった位置の分布である。

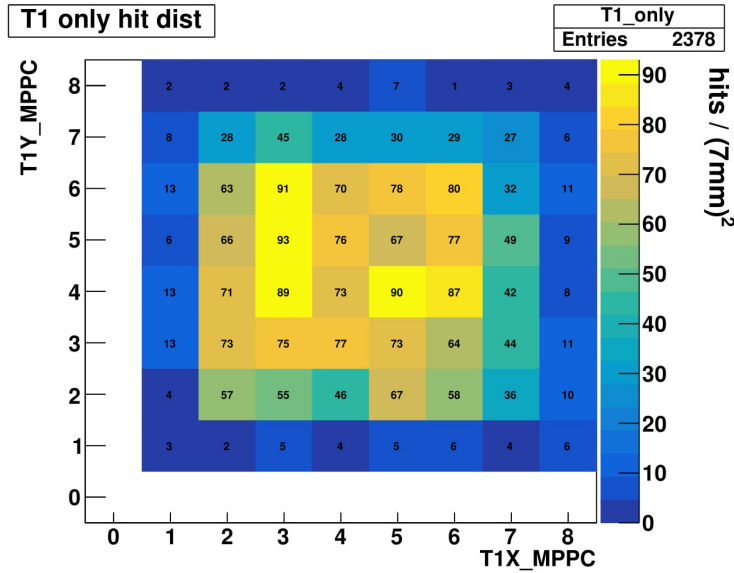


図 5.2 T1 ヒット位置分布 (efficiency チェック)

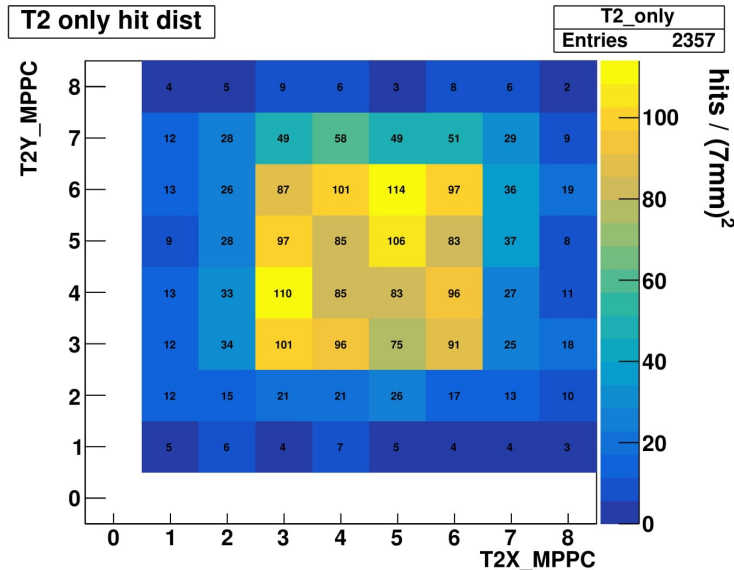


図 5.3 T2 ヒット位置分布 (efficiency チェック)

この図より中心 4×4 の範囲にヒットが記録されている回数を合計すると T1 では 1260, T2 では 1507 となり、十分な efficiency が得られていることが確認できた。

5.1.4 解析結果

19日間の測定で frame number と cycle number の対応が取れたのは 164160 frame 中 162946 frame であった。この中には CCD へのヒットがなかった frame も含まれており、対応が取れなかった frame はチェックシステムへの宇宙線ヒットがなかった frame であると考えられる。次の図 5.4 は各フレームにおけるチェックシステムで取得したイベント数の分布である。これより 1frame では平均約 2.5 イベントをチェックシステムで取得していた事がわかる。

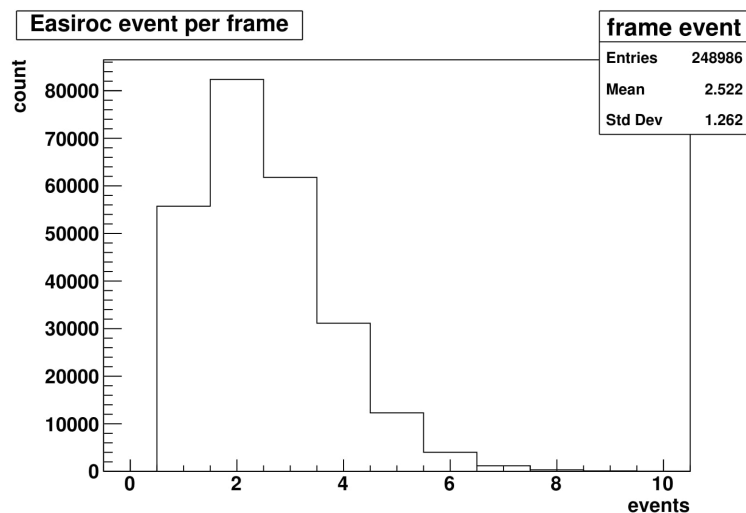


図 5.4 各 frame におけるチェックシステムイベント数の分布

これらのイベントのうちノイズ+宇宙線の信号などでイベントと取得してしまったイベントを排除するために T1X,T1Y,T2X,T2Y それぞれにアサインされている MPPC8 個のうち信号が上で述べたヒットとして判断する閾値である ADC1500 を超えている信号が各部で 1 つずつあったイベントのみを抽出すると、そのイベント数は 214554 となった。次の図 5.5, 図 5.6 はそれらのイベントにおけるヒット位置分布である。

T1 のヒット分布に着目すると T1X2 が関わるヒット位置のエントリー数が他と比べて少ないことから T1X2 は efficiency が十分ではなかったことがわかる。これは上記の efficiency チェックにおいて efficiency をチェックしていなかった部分であり、主な宇宙線の測定対象に CCD2 個へのヒットがあった frame も加える場合にはトラッキング効率が重要な要素になるため注意する必要がある。

次に示す図 5.7, 図 5.8 は上のヒット分布が得られたイベントにおける T1X,T1Y の ADC 値の組及び T2X,T2Y の ADC 値の組の 2 次元ヒストグラムである。また図 5.9 から図 5.12 はそれぞれの軸の射影である。この図からヒットとして記録されたイベントの

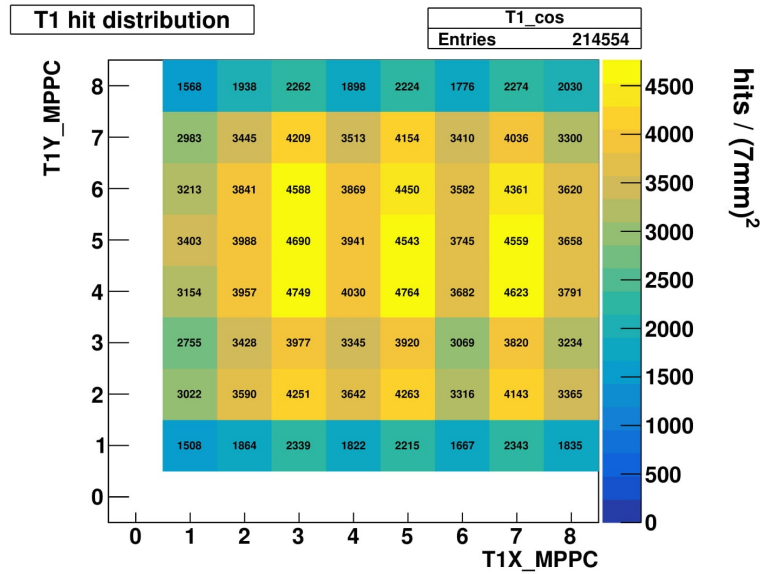


図 5.5 T1 ヒット位置分布

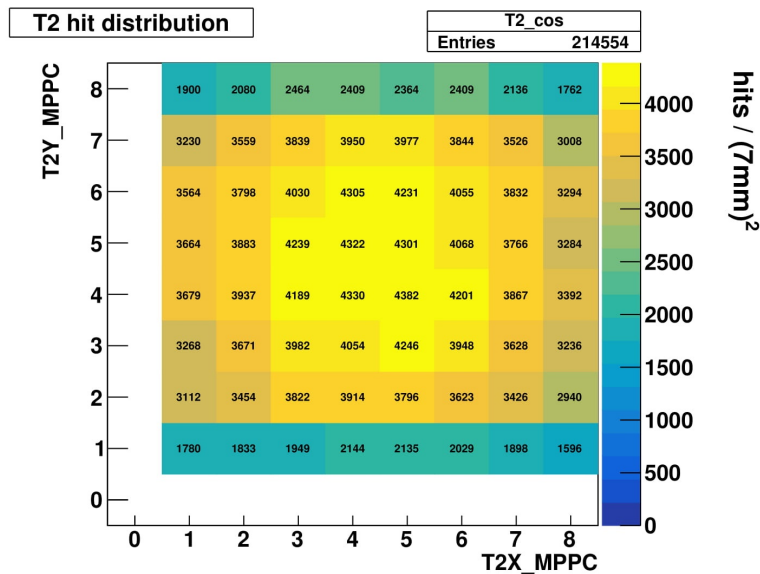


図 5.6 T2 ヒット位置分布

多くは T1、T2 どちらも ADC3500 付近の値を信号として出力していたことがわかる。また T1 と T2 の ADC 値の分布には違いが見られる。これは T1 の Efficiency が T2 の物に比べて小さいものであった可能性がある。本実験では-40 °C の環境下で測定システムの CCD および MPPC を動作させた。今回使用した MPPC の浜松ホトニクスが保証する温度範囲は-20 °C 以上であり、スペックシート等から増倍率を推測することができなかった。また MPPC は低温度になるにつれて増倍率が大きくなり信号の飽和が起こる可能性が高くなる。今回の環境下では各 MPPC に印加した電圧は MPPC が動作する最低

電圧に近かった為、飽和が起きるか動作しないかの境界の電圧について詳細に調べる必要がある。特に後述するチェックシステムも併用しての詳細なトラッキングが必要な場合には注意する必要がある。

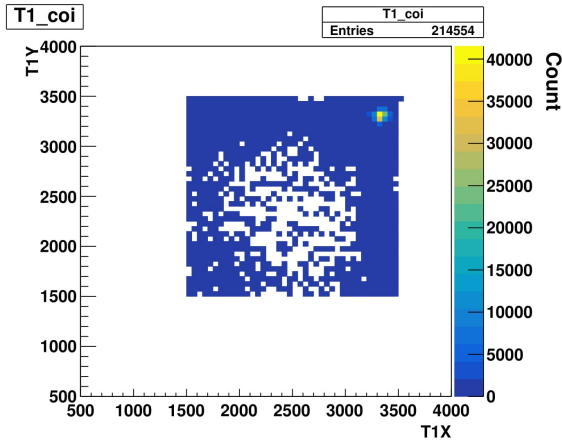


図 5.7 T1X,T1Y ADC 値分布

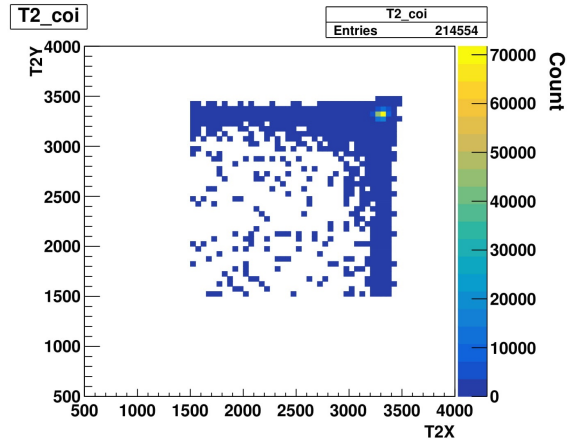


図 5.8 T2X,T2Y ADC 値分布

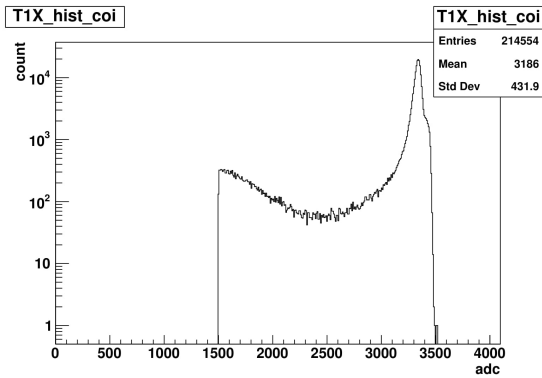


図 5.9 T1X ADC 値分布

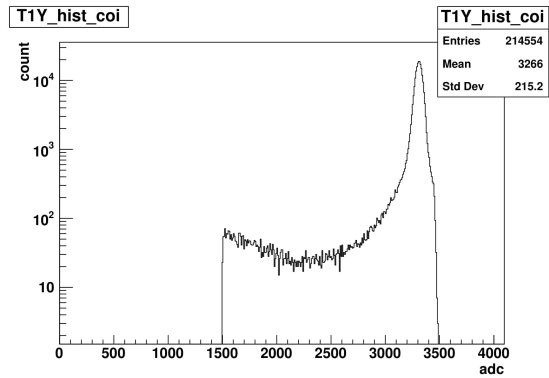


図 5.10 T1Y ADC 値分布

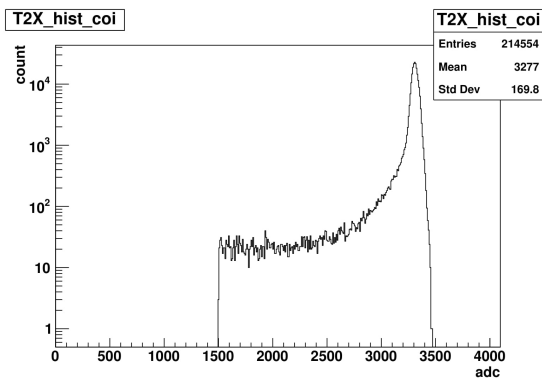


図 5.11 T2X ADC 値分布

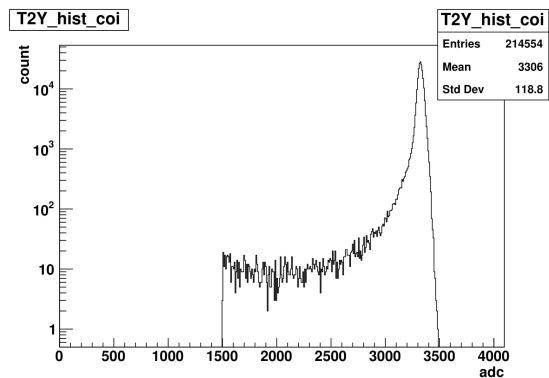


図 5.12 T2Y ADC 値分布

またこれらイベントについてヒット位置から宇宙線の入射天頂角も計算した。その天頂

角の分布が次の図 5.13 であり flux を計算したものが図 5.14 である。

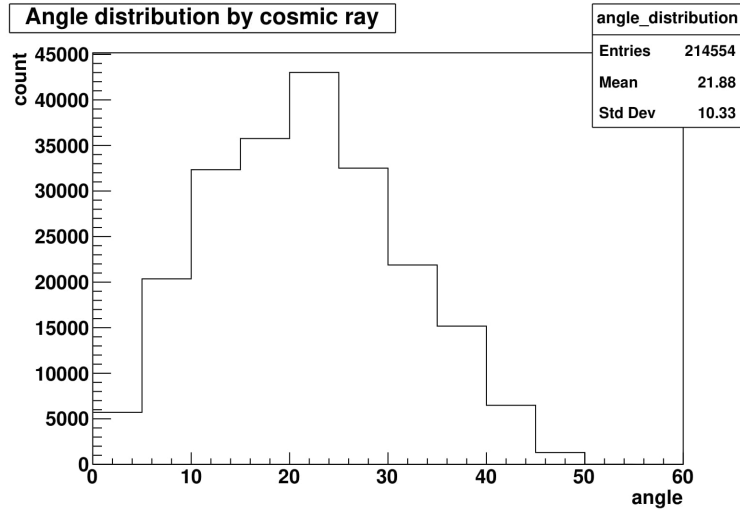


図 5.13 天頂角分布 (チェックシステム)

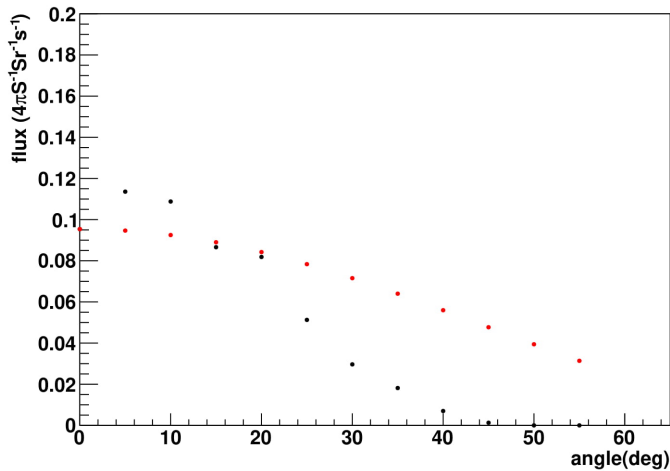


図 5.14 入射した宇宙線の天頂角に対する flux

図 5.14 において黒点が実験から得られた値であり、赤点は以下の式 5.1 に従ってプロットした理論値である [11]。

$$I(\theta) = I_{(0)} \cos(\theta) \tag{5.1}$$

flux の図において角度が大きくなるにつれて理論値との差が大きくなっている原因は測定システム的设计にある。大きな天頂角を持って入射した宇宙線の信号を得るには T1、T2 とともにチェックシステムの外側を宇宙線が通る必要がある。しかしながら大きな天頂

角を持って入射した宇宙線の方位角が T1 と T2 を両方通過する方向でなかった場合にはイベント取得ができない。ある天頂角を持って入射する宇宙線の数は天頂角が大きくなるにつれて減少するのに加え、チェックシステムの設計上取得できるイベントには制限があることがこの差が生じる原因であると考えられる。

5.2 CCD

5.2.1 データ抽出

初めに前章で述べたデータの抽出条件について説明する。

今回使用したデータ解析のソフトウェアの1つは各測定最終フレームの各 FPCCD の ch 毎に、ADC 値を2次元ヒストグラムに fill したもの、その ch で各ピクセルが取得した ADC 値を fill する1次元ヒストグラム、横方向のピクセル番号の奇数・偶数で分けた ADC 値の1次元ヒストグラムを取得する機能を持つ。

初めにその偶数・奇数ピクセルがどちらも含まれているヒストグラムから閾値となる ADC 値を仮決定する。その上で1秒間に $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の範囲には 1 Hz 程度で宇宙線が入射することを仮定して CCD の各 ch との面積比から宇宙線がどの程度各 ch の有感領域に入射するか見積もる。CCD の有感領域は約 6mm 角であり、各 ch はその4分の1程度の面積を持つので、720 frame (2時間) 当たり 20 から 30 の宇宙線が各 CCD に入射すること、また1つの宇宙線の入射で複数のピクセルが閾値を超える事を考慮して閾値を超えるピクセル数は 100 ピクセル程度と見積もった。このピクセル数を元に 720 フレームの測定でどの程度の数のピクセルが閾値を超えたかをカウントする。このピクセル数が大きすぎる場合には閾値が低くペDESTAL成分の値を持ったピクセルがカウントされていると判断して閾値を上げる。この操作を繰り返すことによって各 ch で適切な閾値を決定した。

図 5.15 において最上段は CCD の光画像である。この場合有感領域は水色の部分で、宇宙線による信号が検出された場合には画像で信号が得られたピクセルの周辺が赤色に近くなる。上から2段目は偶数・奇数ピクセルの ADC 値を同じヒストグラムに fill したもの、下から2段目は偶数ピクセルのみ、一番下は奇数ピクセルのみの1次元ヒストグラムである。ヒストグラムの横軸中心値は0であり、この場合赤線が示す閾値は-10である。

このようにして各 ch での閾値を決定した後、CCD から得られた抽出前のデータを前章図 4.28 で述べたデータ読み込みフェーズの抽出プログラムに読み込ませる。

この際に出力する各ピクセルの ADC 値はオーバークロック領域と呼ばれる領域の ADC 値の平均値を使用して補正された値を出力するようになっている。オーバークロック領域とは CCD 等のイメージセンサにおいて有感領域の信号電荷を一通り読みだした後、余分なクロックパルス印加することによって信号電荷の無いピクセルの ADC 値を

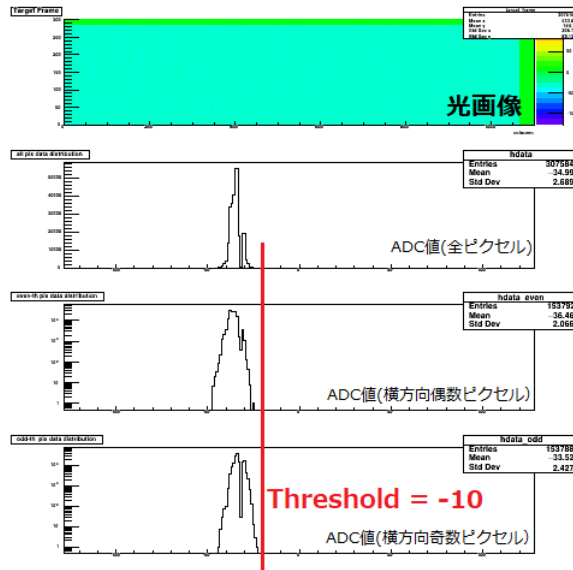


図 5.15 最終フレームのヒストグラム例。赤線は設定した閾値を表す。

取得することでノイズの見積もり等に使用する見かけ上の領域のことである。この補正をした上で、宇宙線ヒットによる信号があった周囲 5×5 ピクセルの座標・ADC 値等のデータを別のデータファイルに出力させた。またこの出力には前章で述べたメタ行に各 frame での CCD へのヒットパターンも記録されている。

次の図は抽出されたデータの一部を抜粋した例である。

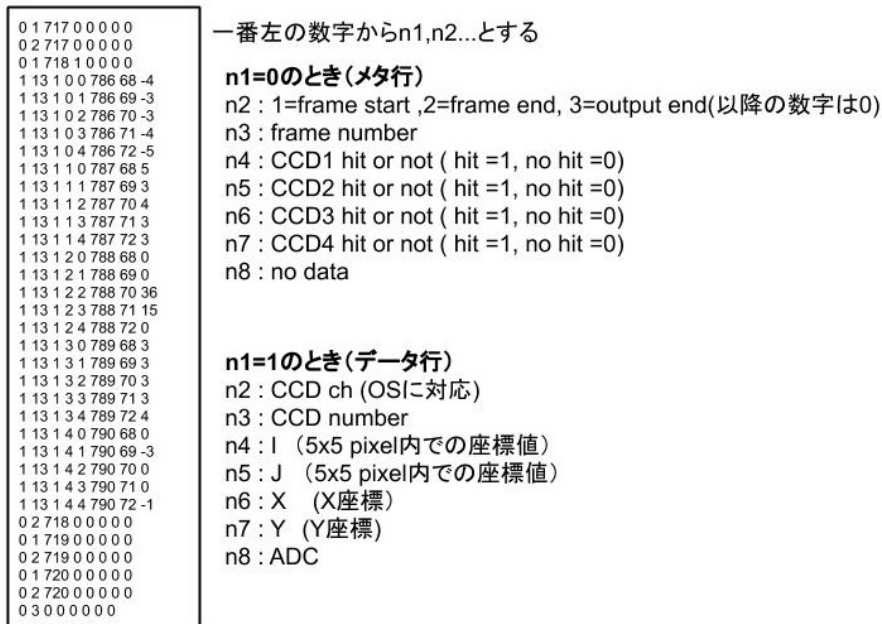


図 5.16 抽出データの一部

5.2.2 使用する frame への制限

チェックシステムのヒットパターンと対応が取れ、確かに宇宙線による CCD のヒットパターンと認識されたもののヒットパターン分布を図 5.17 に示す。

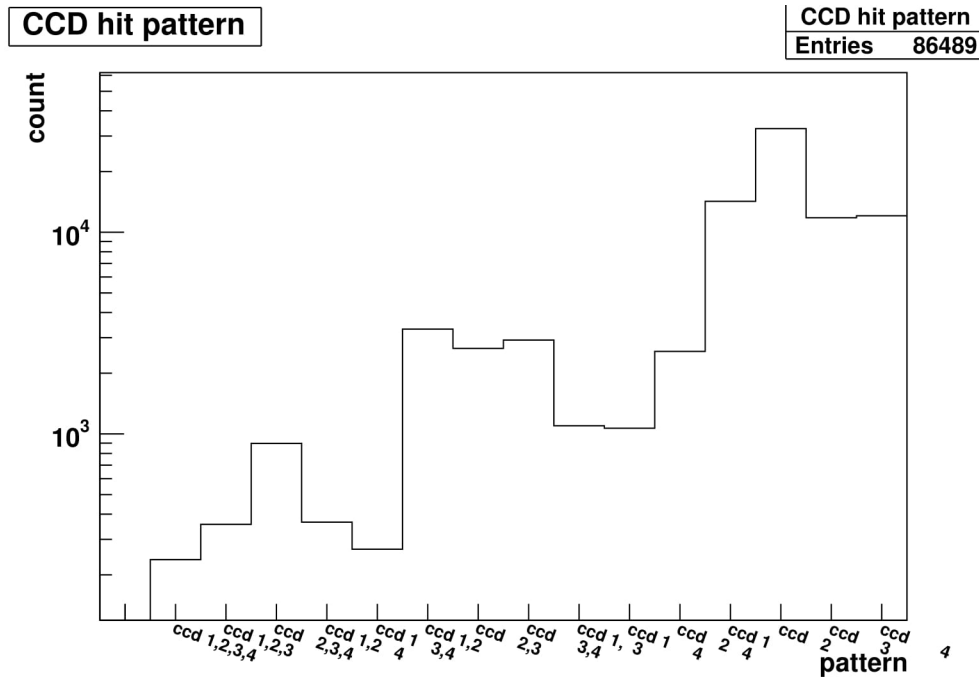


図 5.17 CCD ヒットパターン分布。CCD の番号と位置の対応は図 4.12 参照。

これらのうち (ccd1,2,3,4)、(ccd1,2,3)、(ccd2,3,4) と判断された frame について解析を行なった。これらのヒットパターンを記録した frame 数の合計は 679 frame である。3ccd ヒットの frame のうち他のヒットパターンは 2ccd ヒットの宇宙線と 1ccd ヒットの宇宙線またはノイズ等によって 3ccd ヒットとして記録された frame と判断し今回の解析には使用していない。加えて上記の 3 つの CCD ヒットパターンのうち 1 つの CCD に複数のヒットが記録されている場合にはその frame のデータも使用していない。これは fit する際に 1 つの CCD に複数のヒット点があると実際に 3 個以上の CCD を通過したと考えられる宇宙線の軌跡から fit によって得た直線がずれてしまう事を避けるためである。

上記の条件を満たした frame のデータについて fit を行った例が次の図 5.18 から 5.23 である。図 5.18 は CCD のみの frame view であり、図 5.19 はチェックシステムの情報も加えた図で、青色の部分はその frame において宇宙線ヒットが確認されたシンチレータである。各図の左側は XZ 平面での frame view、右側は YZ 平面での frame view である。図 5.20 から図 5.23 は各 CCD におけるヒット位置を示したものであり、青色の四角形は CCD の有感領域を意味する。

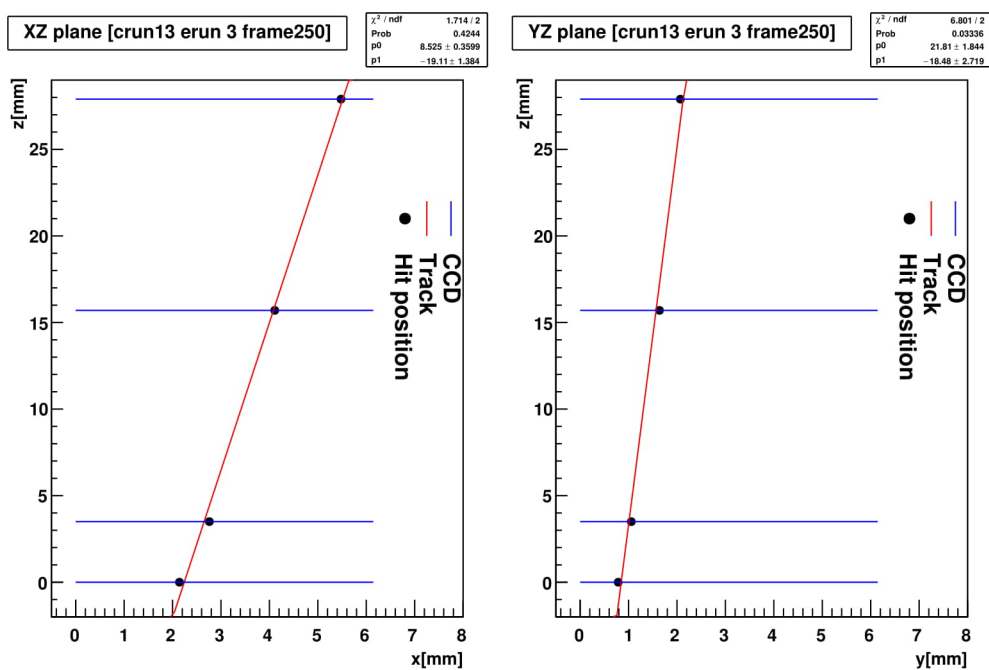


図 5.18 frame view (CCD のみ)

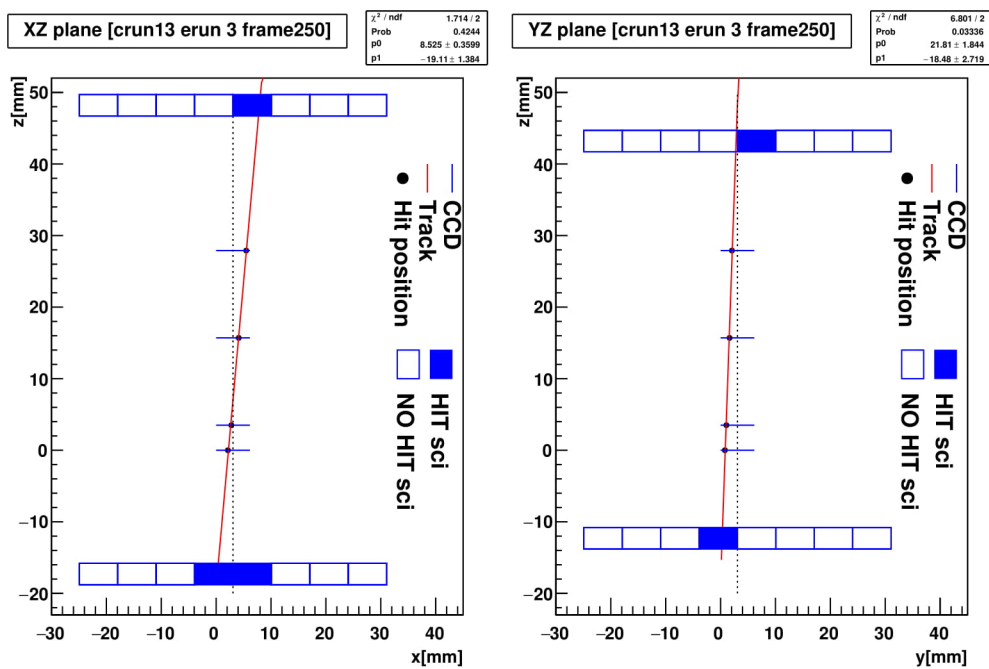


図 5.19 frame view (全体)

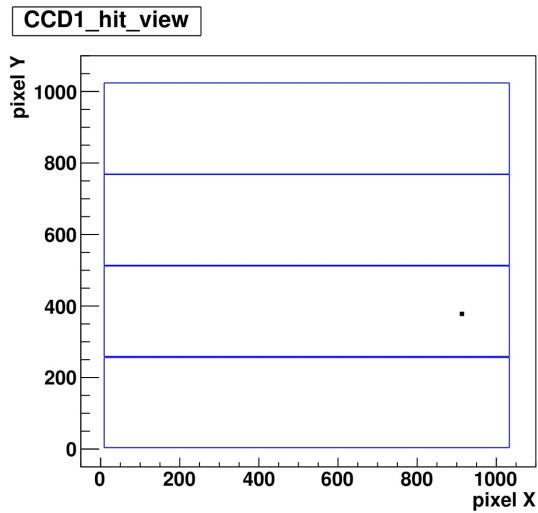


図 5.20 CCD1 ヒット位置

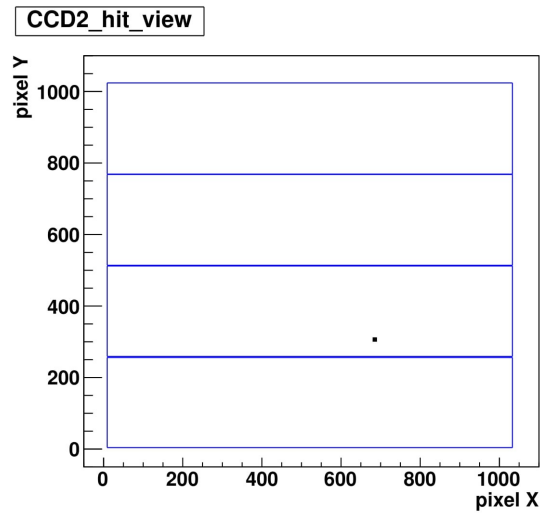


図 5.21 CCD2 ヒット位置

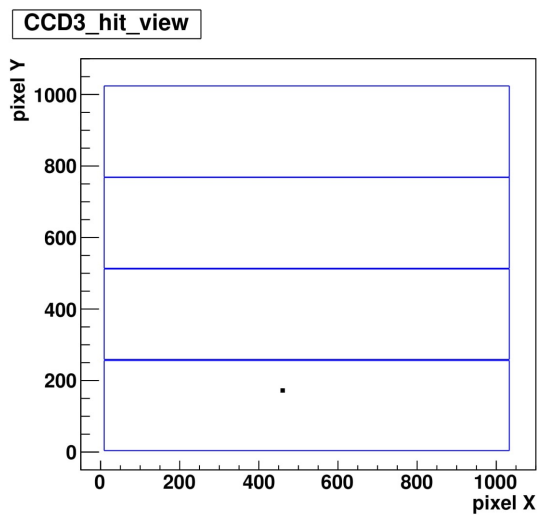


図 5.22 CCD3 ヒット位置

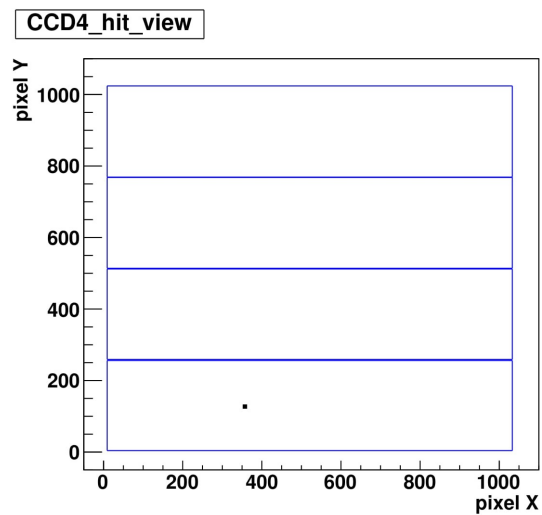


図 5.23 CCD4 ヒット位置

この際に fit から得られた χ^2 が XZ, YZ 平面で両方とも 20 を下回る場合のみを使用して電荷拡散及び差分の計算に用いることにした。これは例えば CCD3,4 の 2 個を通過した宇宙線による信号と CCD2 のみを通過した宇宙線による信号を 3 CCD ヒットと認識していると推測される frame を排除するためである。

これまでに電荷拡散及び差分の計算に使用する frame として課した条件を以下にまとめる。

- CCD ヒットパターンは (ccd1,2,3,4)、(ccd1,2,3)、(ccd2,3,4) のいずれか
- 各 CCD で記録したヒットは 1 点のみ
- fit して得られた χ^2 が XZ 平面、YZ 平面で両方とも 20 以下である

5.2.3 使用した frame 概要

以下の図 5.24 から図 5.29 は使用した frame のデータから得られた ADC 値の分布である。

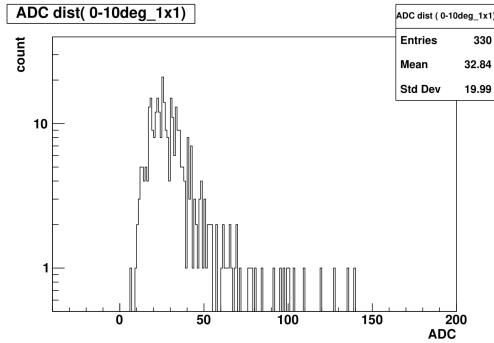


図 5.24 ADC 分布 (1 × 1,0-10 deg)

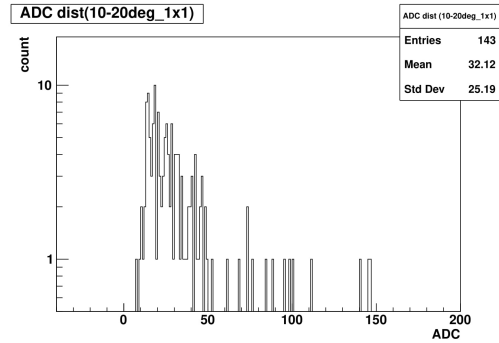


図 5.25 ADC 分布 (1 × 110-20 deg)

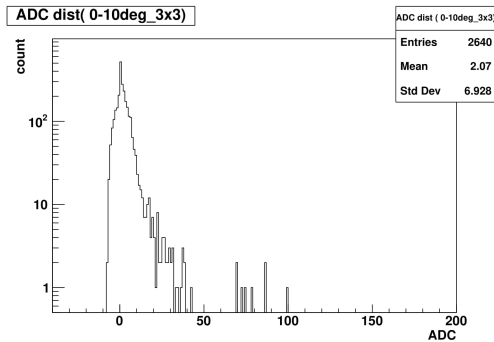


図 5.26 ADC 分布 (3 × 3,0-10 deg)

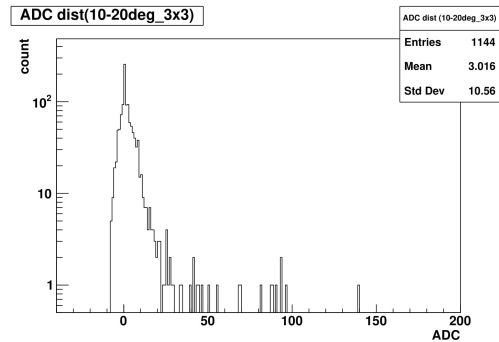


図 5.27 ADC 分布 (3 × 3,10-20 deg)

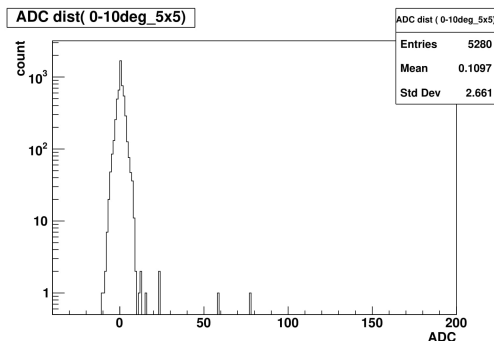


図 5.28 ADC 分布 (5 × 5,0-10 deg)

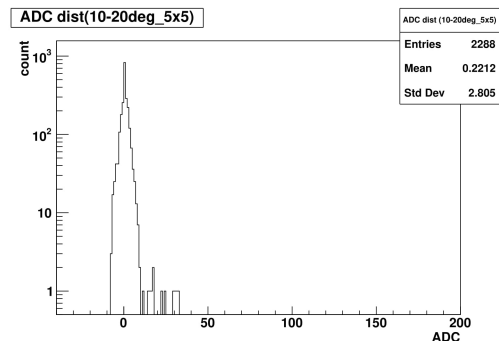


図 5.29 ADC 分布 (5 × 5,10-20 deg)

図 5.24, 図 5.25 は 5 × 5 の範囲内の中心のピクセル、図 5.26, 図 5.27 はその 1 ピクセル外周、図 5.28, 図 5.29 は最も外側のピクセルの ADC 値をそれぞれ Fill したものである。

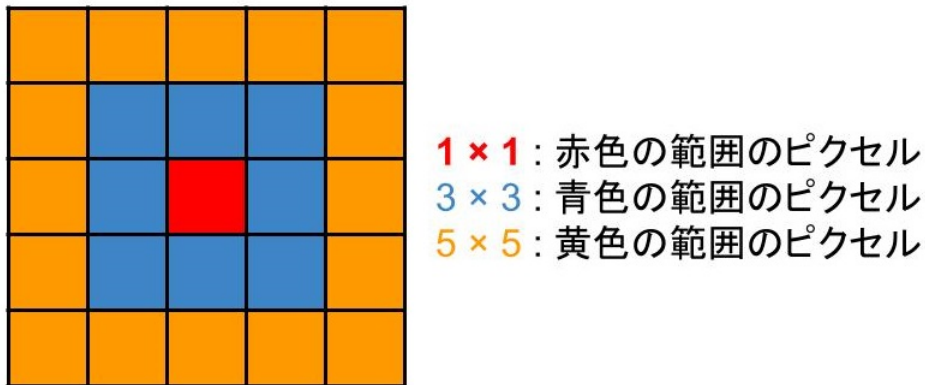


図 5.30 ピクセルの範囲

中心のピクセルは宇宙線のヒットがあったピクセルであり、ADC 値はランダウ分布と似た形の分布を取っている。また 1 ピクセル外周のヒストグラムを見ると多くのピクセルが 0 付近の ADC 値を持っており、50 付近の ADC 値を取得したピクセルには信号電荷の拡散があったと推測できる。最外周のピクセルに関してはほとんどが 0 付近の値が fill されており、信号電荷の拡散は無かったと推測できる。

次に示す図 5.31 は上記の条件を満たした frame で計算された宇宙線の入射天頂角分布である。また図 5.32, 図 5.33 は各角度における CCD ヒットパターンの分布である。

現時点では 80 frame のみが条件を満たした為十分な統計量は得られていない。また CCD ヒットパターンの制限により取得できる角度には制限があることがわかる。これは次章で議論するが 2ccd ヒットのイベントも使用する frame とすることが可能になれば解決される。

5.2.4 信号電荷の拡散

まず拡散の定義方法について述べる。次の図 5.34 は定義方法の模式図である。

初めに上記の条件を満たした frame のヒット点周囲 5 × 5 ピクセルのデータラインを読み込む。この 25 行のうち最小の ADC 値を特定する。これをもとに 25 行のデータラインの ADC 値から最小値を引く。これによって 25 個ある ADC の最小値は 0 に補正される。次に補正された値の和を計算する。次の図 5.35 は計算された和の分布である。

このように計算された ADC 値の和をもとにそれぞれのピクセルで得られた ADC 値がこの和にどの程度寄与するか計算を行う。このときそのピクセルの ADC 値が和に 10% 以上寄与している場合は、そのピクセルを電荷拡散があったピクセルと判定する。図 5.34 の右側において赤色のピクセルは電荷拡散があったと判定されたピクセルであり、この場

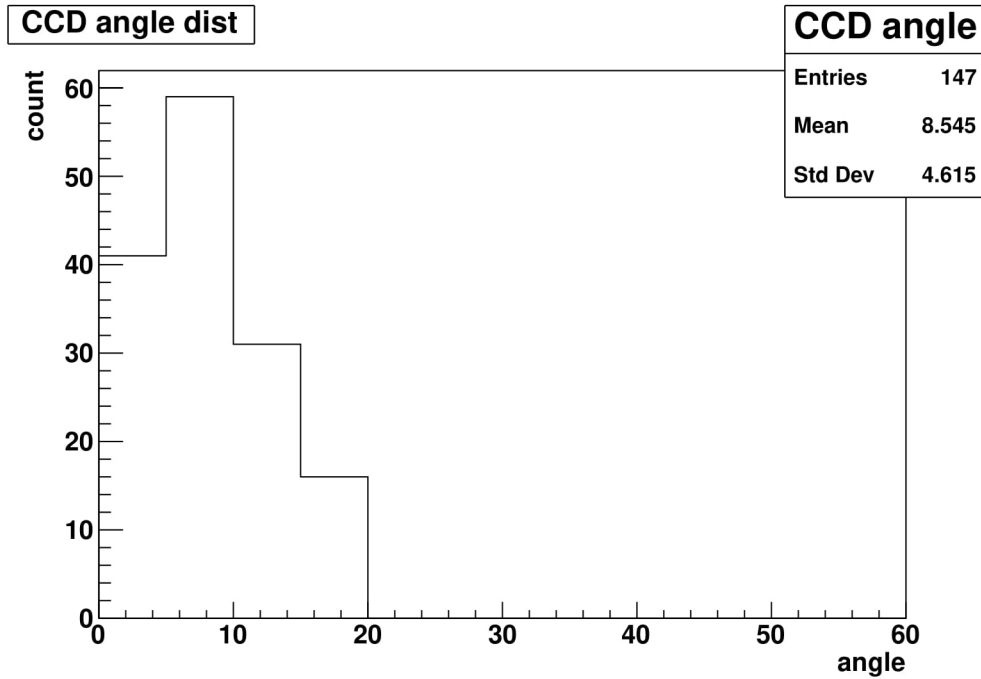


図 5.31 使用 frame の天頂角分布

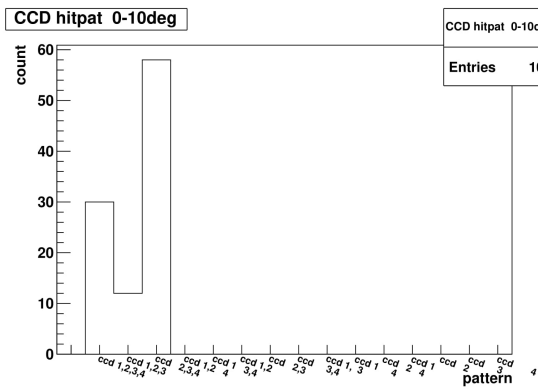


図 5.32 CCD ヒットパターン分布 (0-10 deg)

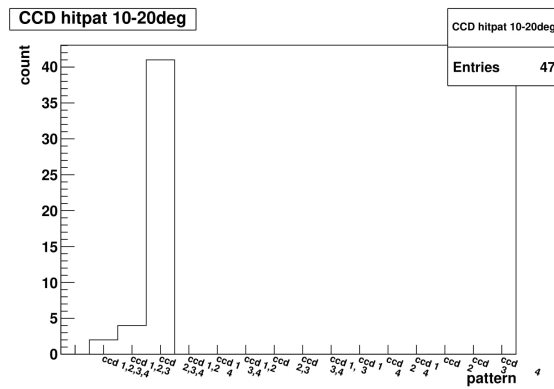


図 5.33 CCD ヒットパターン分布 (10-20 deg)

合電荷拡散があったピクセルは 3 個となる。前述の条件を満たした frame のデータに対して 10°刻みで分けて計算を行った結果が次の図 5.36 と図 5.37 である。

なお現在の条件では 20°以上の天頂角を持って入射する宇宙線の信号を取得することはできず、20°以上の結果に関しては entry 数が 0 となっていた。

この図を見ると天頂角 20°以下の範囲の宇宙線による信号電荷の拡散は、上記の方法で拡散があったピクセルを見積もった場合には最大 4 ピクセルであることが分かった。

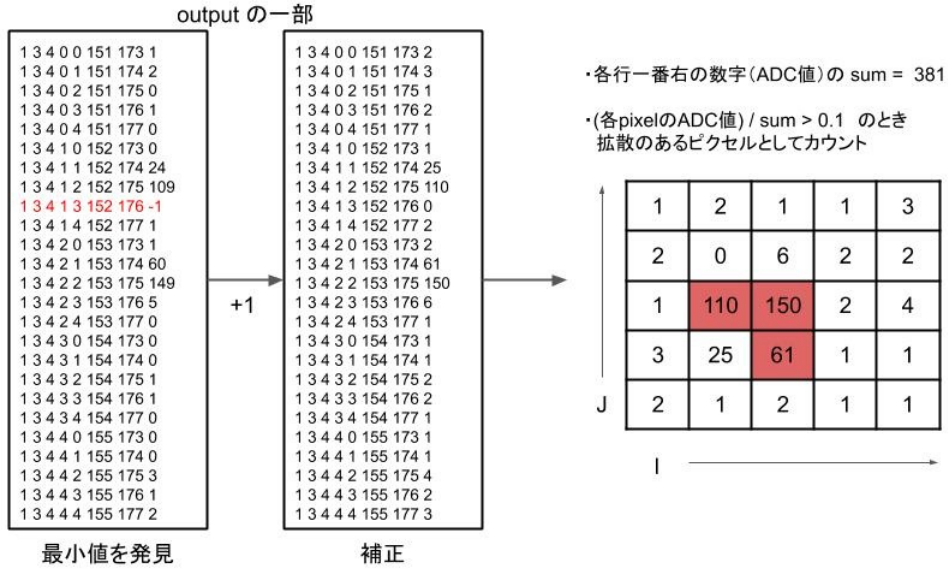


図 5.34 電荷拡散の定義

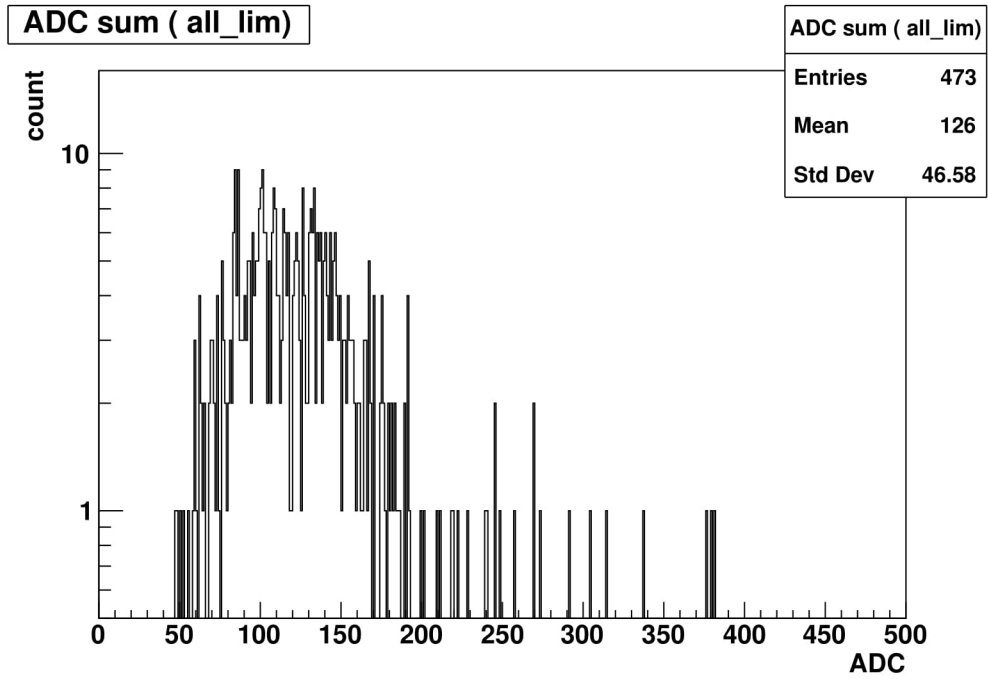


図 5.35 adc sum 分布

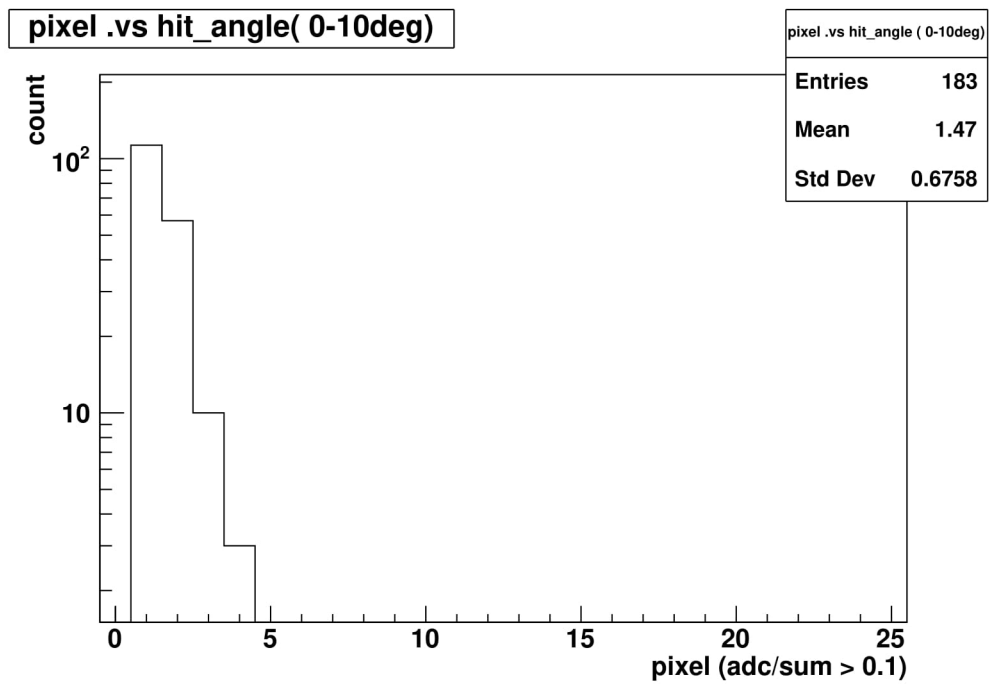


図 5.36 電荷拡散ピクセル数 (0-10 deg)

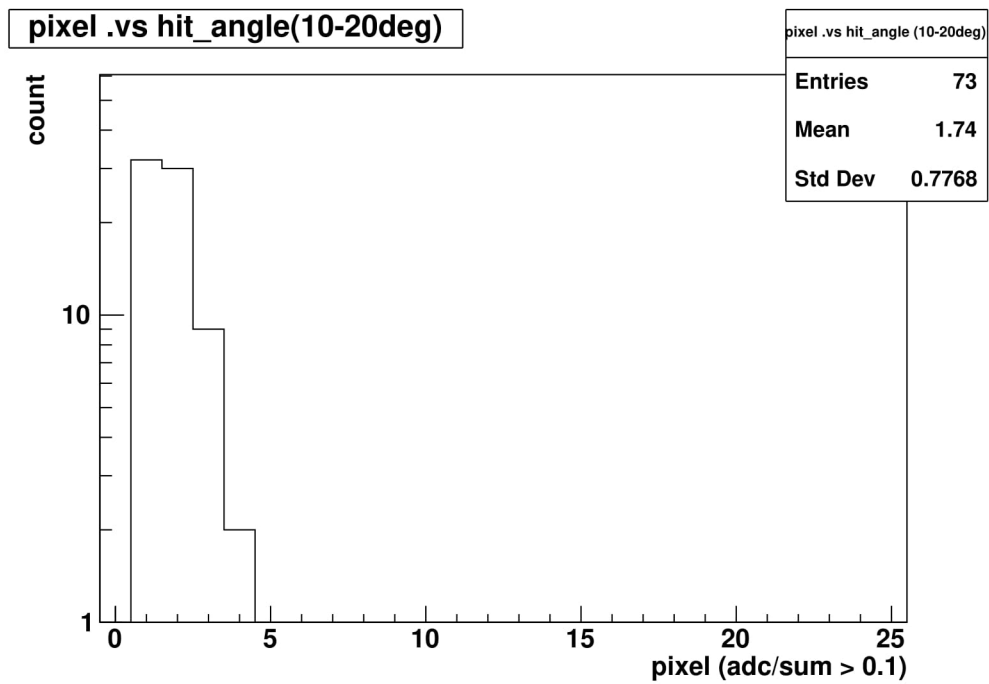


図 5.37 電荷拡散ピクセル数 (10-20 deg)

5.2.5 差分及び σ の算出

次に示す図 5.38 は fit によって得られた直線とヒット位置の差分を計算してヒストグラムに fill し、ガウシアン Fit を行って σ を得たものである。

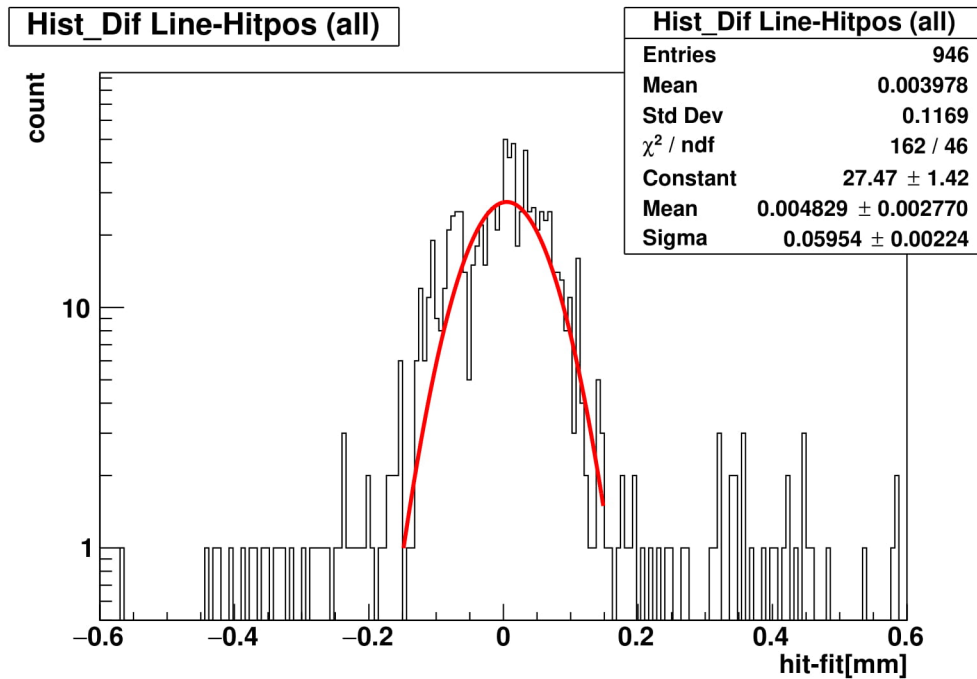


図 5.38 Fit 直線-ヒット位置の差分 (全 CCD)

この測定システムにおいて $\sigma = 0.060 \pm 0.002(\text{mm})$ という結果が得られた。これは FPCCD のピクセルサイズ $6\mu\text{m}$ よりも 10 倍程度大きい値になっている。この原因としては FPCCD4 個のアライメントが不十分であることが挙げられる。実際にこれについて確かめるためそれぞれの FPCCD において得られた差分のヒストグラムを取得したところ以下の図 5.39 から図 5.42 のようになった。

これを見ると CCD2 は比較的アライメントが上手くいっていることがヒストグラムの平均値が 0 に近い値であることから推測できる。しかしながら CCD1, CCD3, CCD4 においては平均値が 0 から 5 ピクセル分程度ずれていることからアライメントが不十分であることがわかる。アライメントが不十分であることによって図 5.38 のヒストグラムにはより広い範囲での差分の計算結果が fill され、 σ が大きくなってしまっている。

以下の表 5.1 に全 CCD と各 CCD で取得した σ の値とガウシアン fit の平均値をまとめる。

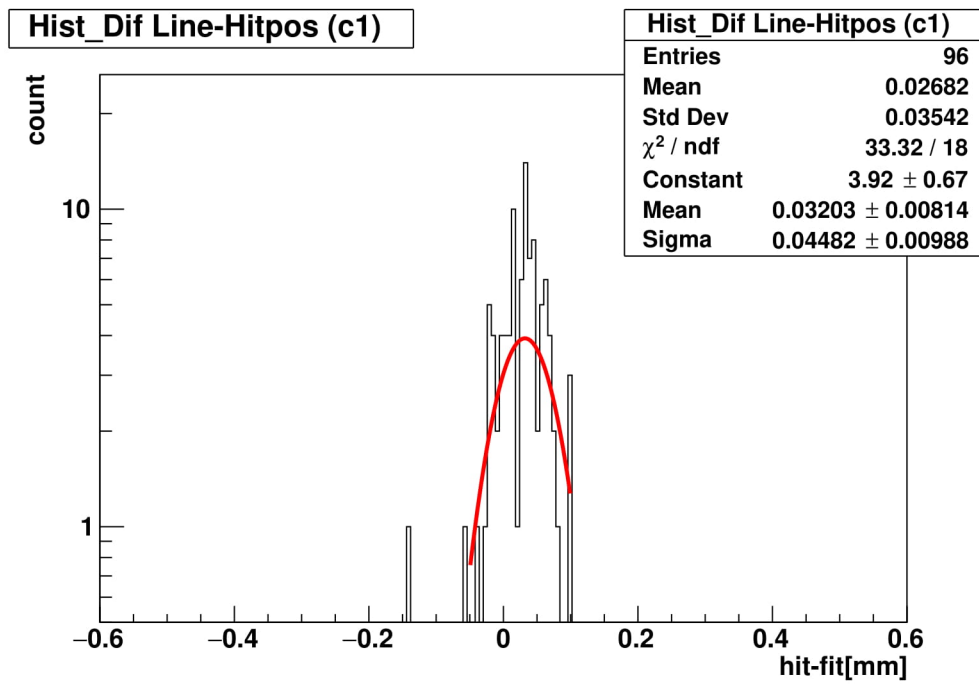


図 5.39 Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD1)

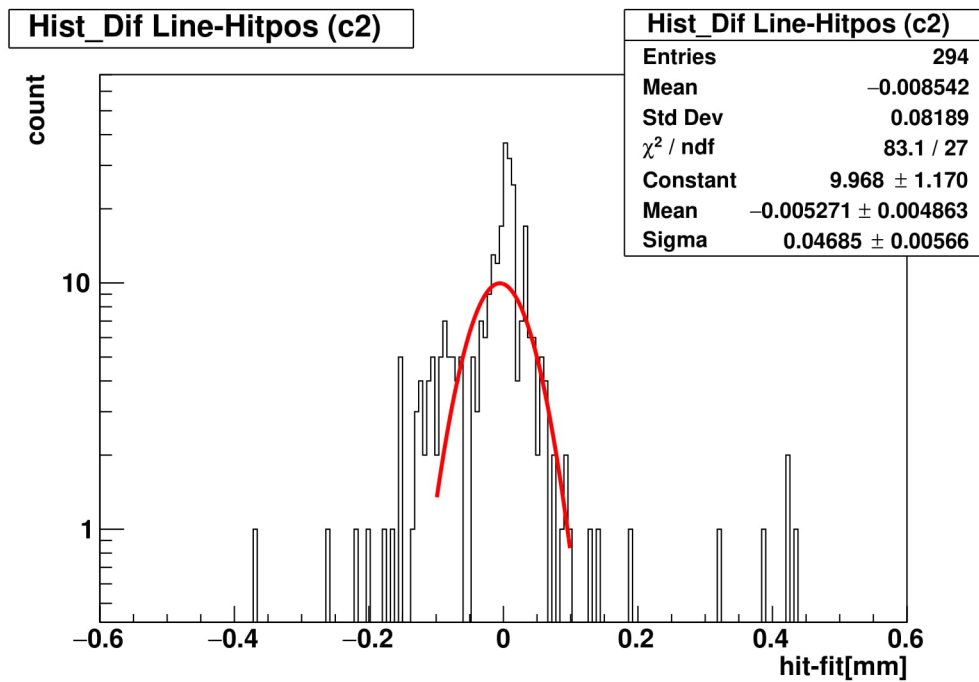


図 5.40 Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD2)

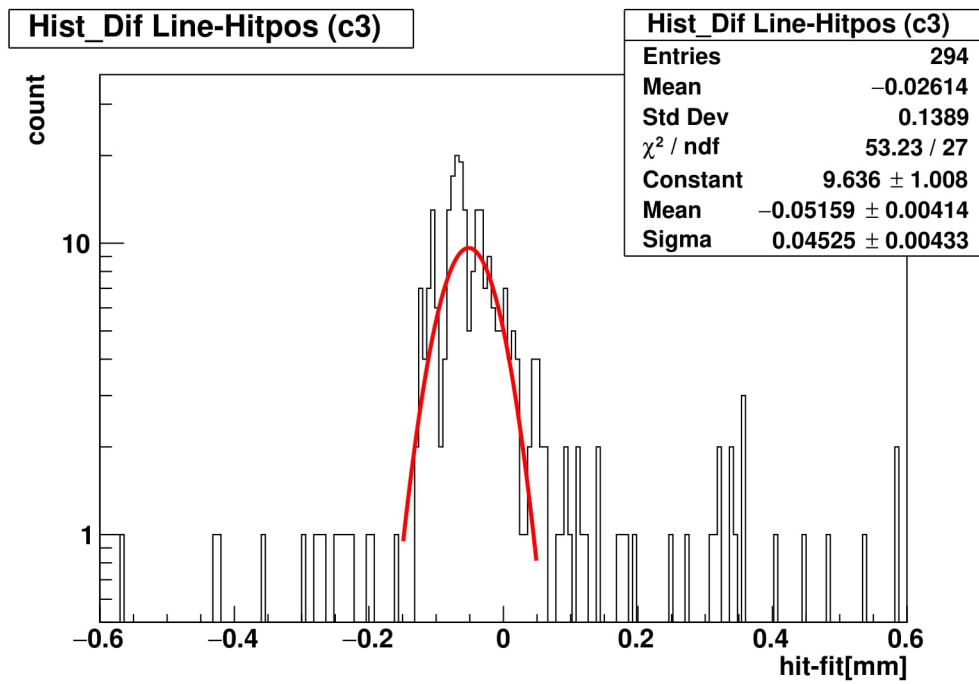


図 5.41 Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD3)

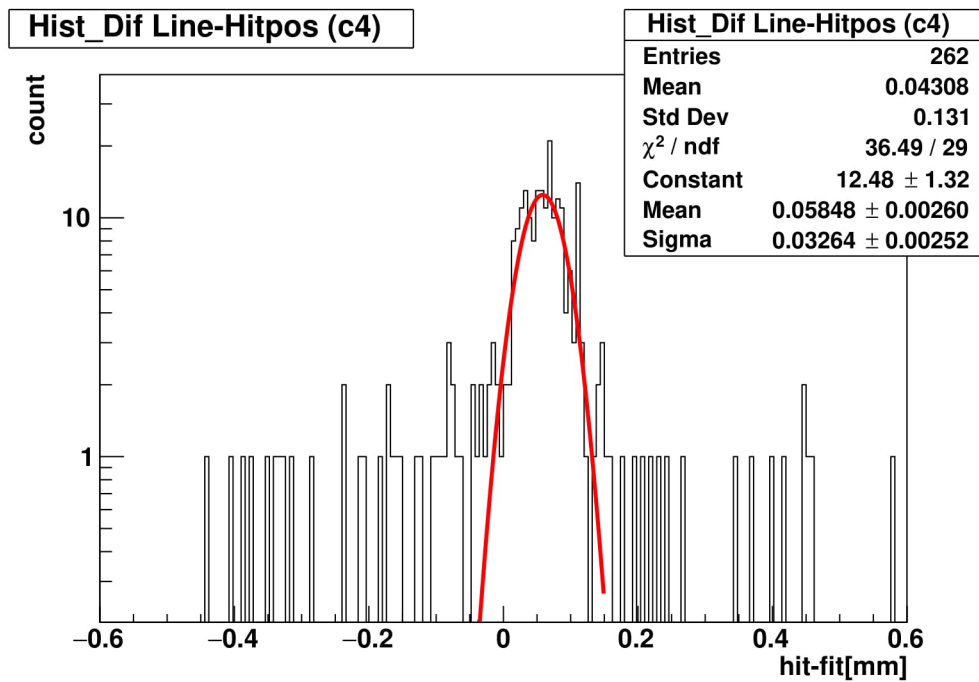


図 5.42 Fit 直線-ヒット位置の差分 (CCD4)

表 5.1 各 CCD での σ 及びガウシアン of 平均値

	σ (mm)	ガウシアン of 平均値 (mm)
all	0.060 ± 0.002	0.005 ± 0.003
CCD1	0.045 ± 0.010	0.032 ± 0.008
CCD2	0.047 ± 0.006	-0.005 ± 0.005
CCD3	0.045 ± 0.004	-0.052 ± 0.004
CCD4	0.033 ± 0.003	0.058 ± 0.003

5.3 考察

5.3.1 電荷拡散の考察

今回得られた電荷拡散の結果についての考察を行う。CCD の有感層には明確なピクセル同士の区分けはなく、電極に電圧を印加して生じたポテンシャルの広がり方がピクセル状になる。電荷拡散の範囲が全空乏化によって $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m}$ の範囲に限られていると仮定すると、CCD に入射した宇宙線が信号を生成した際この範囲のみに電荷拡散が抑えられていたとしても最大4ピクセルに信号電荷が拡散する可能性があり、本実験で得られた結果はこれを再現しているものだと考えられる。また図 5.44 に示すように、スペック上1ピクセルと定義されている $6\mu\text{m} \times 6\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ の範囲のみに宇宙線が入射した際にとる最大天頂角は約 29.5° であり、この角度を超えた入射天頂角を宇宙線が持っていた場合には宇宙線が複数のピクセルを通ることになるので、より広い範囲での電荷拡散が得られると推測できる。これを確かめる為にはより広い範囲の入射天頂角を持つ宇宙線の信号を取得できるような解析方法の開発が必要となる。

5.3.2 位置分解能の考察

結果として得られた位置分解能の値に関連して、FPCCD のチップ本体による多重散乱の影響について考える。裏面照射型 FPCCD (CCD1-3) のチップは約 1mm のガラスカバー、電極を含めた Si 層 $50\mu\text{m}$ 、約 1mm のプラスチックカバーで構成されている。これらの値を使用して各部の放射長で書いた厚さを計算したものが前述の表 4.1 である。CCD はごみやちりに弱く、それらの影響によって CCD が壊れてしまう事を防ぐためにこれらのカバーは取り付けられている。また Affroc ボードの CCD 取り付け部には穴が開いており、各 CCD 間での信号取得に関してプリント基板のプラスチックによる散乱は

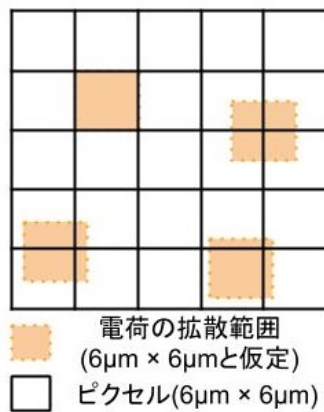


図 5.43 電荷拡散模式図

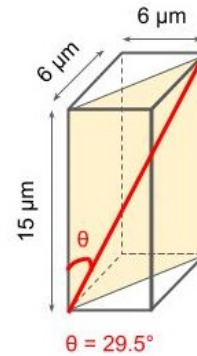


図 5.44 1 ピクセルへの最大入射天頂角模式図

考える必要はない。計算に使用した多重散乱による平均散乱角 θ_0 の計算には以下の式を利用した [9]。

$$\theta_0 = \frac{13.6 [MeV]}{\beta pc} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} (1 + 0.038 \ln \frac{x}{X_0}) \quad (5.2)$$

- p : 粒子の運動量
- βc : 粒子の速度
- z : 粒子の電荷
- x/X_0 : 放射長で書いた物質の厚さ

宇宙線が FPCCD に垂直に入射した場合を仮定して、この式に宇宙線ミューオンの平均エネルギー 4GeV 及び各素材の放射長、長さ、密度等を代入して計算を行うと平均散乱角はガラスカバーにおいて $\theta_0 = 0.014^\circ$ 、Si 層において $\theta_0 = 0.003^\circ$ 、プラスチックカバーで $\theta_0 = 0.007^\circ$ という値が得られた。この値をもとに各 CCD 間の間隔 12.2mm, 3.5mm 離れたところで XY 方向にどれほどずれるかを計算したところ最大平均散乱角が計算されたガラスカバーでは 12.2mm の間隔を持つ部分で $3\mu m$ 程度、3.5mm の間隔を持つ部分で $0.9\mu m$ 程度のずれが多重散乱によって生じる事がわかった。この計算結果からアライメントが理想的であったとしても平均 4GeV のエネルギーを持つ宇宙線を利用して測定を行った場合には多重散乱の影響によって位置分解能が悪くなってしまうと推測できる。また多重散乱によるずれが $1\mu m$ 以下になる為のエネルギーは 12.5GeV 程度であることも計算から分かった。

従って多重散乱の影響を避けつつより正確に FPCCD の位置分解能を算出する場合には以下の方法を導入する必要があると考えられる。

- より高いエネルギーを持つ宇宙線の信号のみを利用する
- ごみやちりに十分に配慮した環境下でカバーを外して測定を行う
- 12.5GeV 以上のエネルギーを持った粒子のビームテストを行う

第 6 章

今後の課題

本章では宇宙線を用いた FPCCD の性能評価における今後の課題について述べる。

6.1 3CCD,4CCD ヒット frame における解析手法の改善

3CCD 及び 4CCD ヒットの frame の内、第 5 章では使用する frame のデータに制限をかけて解析を行った結果について述べた。しかしながら 3CCD,4CCD ヒットとして記録された全 1491 frame のうち 147 frame のみを使用できた為より多くの統計量を得るためには現状の解析では測定時間を増やすしかない。これを解決するためには 3CCD,4CCD ヒットの frame で複数の宇宙線が通ったと推測される frame も解析対象することが 1 つの改善策である。

今回解析の対象としなかった frame には以下の 2 つのパターンがある。

- 1 つの CCD に複数のヒットがあった場合
- 各 CCD では 1 つのヒットしかないが、2 個の宇宙線による異なるヒットパターンが混在している場合

前者は第 5 章において明記した条件設定であり、両方とも χ^2 への制限に関わるものである。まず前者の例について述べる。以下の図 6.1 は各 CCD に 1 点のみのヒットがあった例で、図 6.2 は CCD に 2 点のヒットがあった場合である。

図 6.1 では各点の近傍を fit によって得られた直線が通っており、FPCCD の位置分解能を計算する為の fit 直線と実際のヒット位置の差分の計算は正しく行うことができる。しかしながら図 6.2 のように CCD に複数のヒットがあった場合には fit による直線がヒット位置からずれてしまい差分を正しく計算できなかつたり、4CCD を貫通した宇宙線によるものではないヒット点との差分も計算してしまう。

後者の例が図 6.3 である。これは CCD3,4 の 2 個に大きな天頂角をもって入射した宇

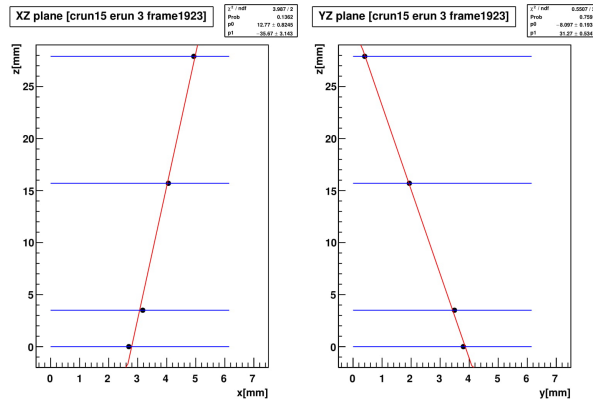


図 6.1 4ccd hit, 各 CCD1 点のみヒットの frame

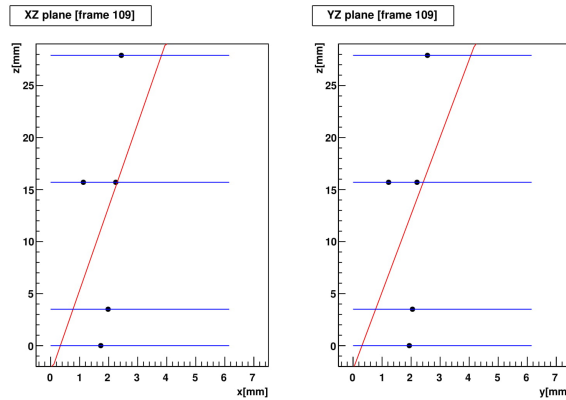


図 6.2 4ccd hit, CCD2 に複数ヒットの frame

宇宙線がヒットし、CCD2 のみを別の宇宙線が通過したと推測できる frame である。この場合に fit を行うと得られる直線はヒット点から大きくずれてしまい差分を計算するとピクセルサイズが $6 \mu\text{m}$ なのに対して mm のオーダーで計算されることがある。

この問題の解決には以下の解析方法の確立が必要である。

- χ^2 が最小となる点の組み合わせを探して fit する解析手法
- 1 frame 内で複数の宇宙線が入射した場合の宇宙線イベントの分離

これら方法を導入することによって位置分解能の算出に必要な 3CCD ヒット・4CCD ヒットの使用できる frame 数が増加する。また 1 frame 内に複数のヒットパターンが混在する場合の宇宙線イベントの分離が可能になれば、電荷拡散の算出や上記の位置分解能の計算においてより多くの情報を得ることができるようになると考えられる。この為には χ^2 が最小となるようなヒット点の組合せを使用する解析手法の開発やチェックシステムも含めたより詳細なトラッキング手法が必要となる。

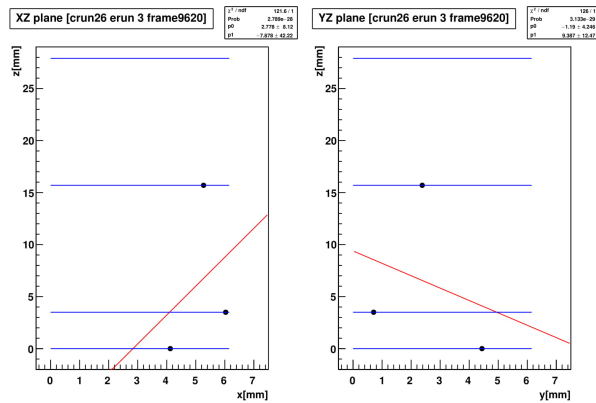


図 6.3 宇宙線が2本通過したと推測される frame

6.2 2CCD ヒット frame を利用した電荷拡散取得

次の図 6.4 は CCD3, CCD4 の 2CCD ヒットを記録した frame の例である。

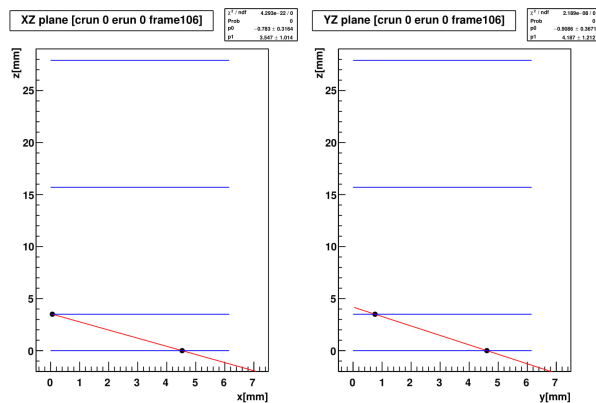


図 6.4 2CCD ヒットの frame 例

この2点を通るように直線を引くと天頂角が大きくなることがわかる。しかしながらこのままではこの frame において CCD にヒットとして記録された点の確かに宇宙線が通過したことによるものか確かめられない。したがってチェックシステムでの詳細なトラッキングが重要となる。このトラッキングによって得られた直線の延長線上に T1 及び T2 を通るヒット情報があればこの frame で得られた 2CCD ヒットは確かに宇宙線によるものであると判断できる。このようにしてチェックシステムを合わせてのトラッキング精度が向上すれば 2CCD ヒット frame も解析対象に加えることができ、より広い範囲の天頂角を持って入射する宇宙線の信号を使用することができるようになる。従って電荷拡散についてより広い粒子の入射角度について研究を行うことが可能になる。

加えて、第3章で述べたようにFPCCDの特徴の一つとしてヒット分布によるペアバックグラウンドの排除があり、これについても検証可能となる可能性がある。

6.3 FPCCD のアライメント

次の図6.5から6.12は各CCDにおけるfit直線とヒット位置の差分をx方向、y方向に分けたヒストグラムである。CCD4個が正しくアライメントされている場合には各ヒストグラムの平均値は0に近い値になる。しかしながら前章でも述べたように多くの図において平均値が0にはあまり近くなくアライメントにずれが生じていることがわかる。このアライメントのずれはヒストグラムにガウシアンfitをした際に σ が大きくなってしまいう等の影響を及ぼしていると考えられる。

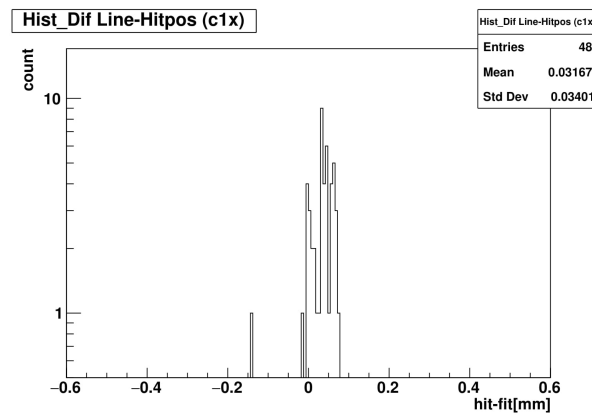


図 6.5 CCD1 x 方向の fit-ヒット位置差分分布

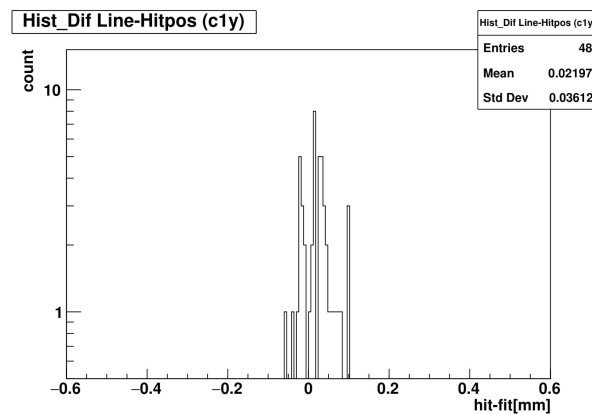


図 6.6 CCD1 y 方向の fit-ヒット位置差分分布

この問題の改善のためには測定システムの設計と組立の精度を上げることや測定システムにアライメントを μm のオーダーで調整できる機構の導入が方法として挙げられるが、

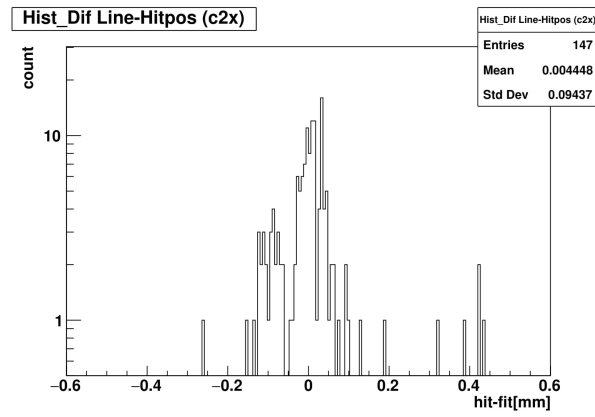


図 6.7 CCD2 x 方向の fit-ヒット位置差分分布

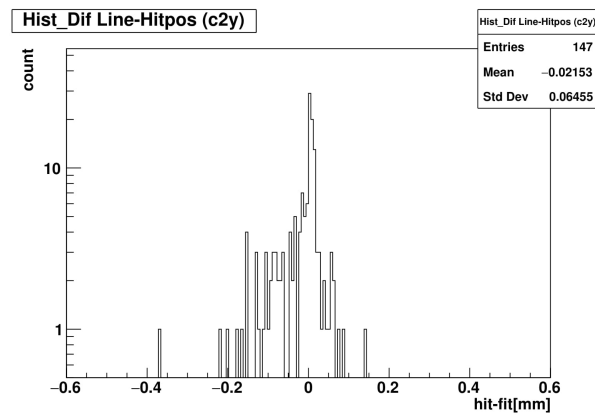


図 6.8 CCD2 y 方向の fit-ヒット位置差分分布

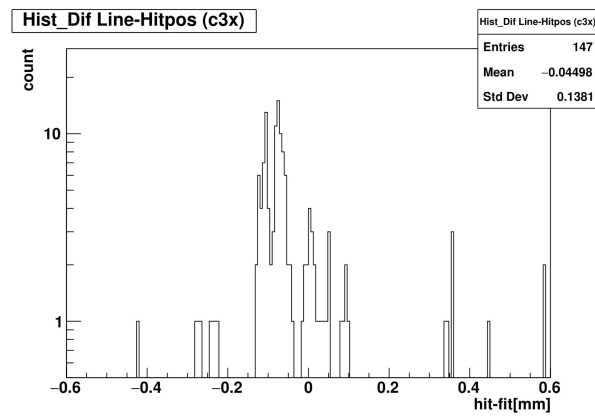


図 6.9 CCD3 x 方向の fit-ヒット位置差分分布

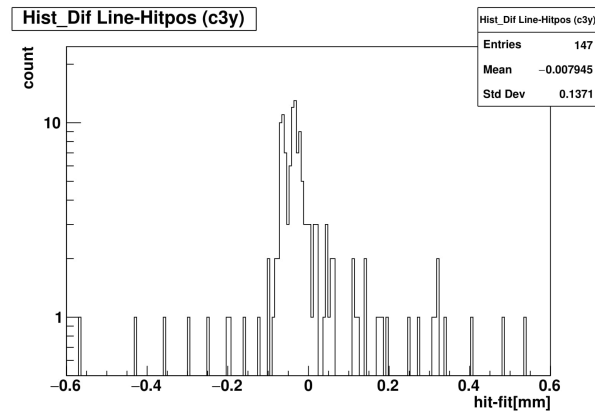


図 6.10 CCD3 y 方向の fit-ヒット位置差分布

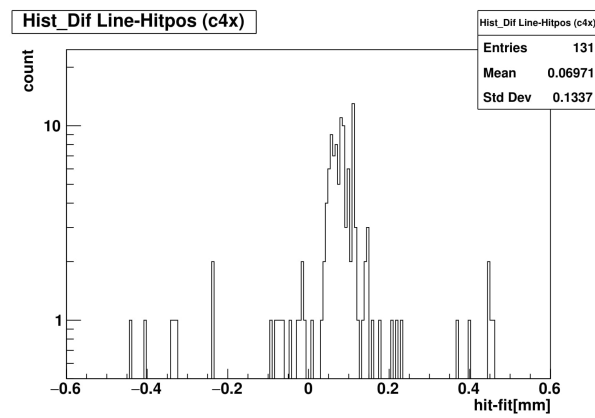


図 6.11 CCD4 x 方向の fit-ヒット位置差分布

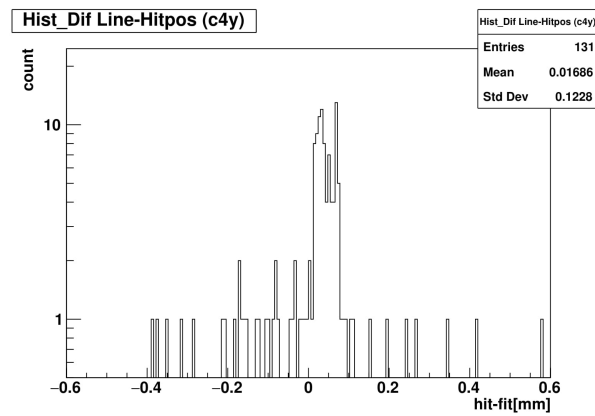


図 6.12 CCD4 y 方向の fit-ヒット位置差分布

FPCCD のピクセルサイズは $6\mu m \times 6\mu m$ のサイズであるためアライメントは容易ではない。

もう一つは解析的に補正を入れる事である。具体的には得られたヒストグラムの平均値をヒストグラムの各要素の値から差引し、別のヒストグラムに fill し直す等の方法である。

第7章

結論

我々は ILC 用崩壊点検出器の候補として Fine Pixel CCD を開発している。ILC における主目的の一つであるヒッグス粒子の結合定数の測定には b クォーク、c クォークを uds クォーク及びグルーオンから識別する必要がある。また bc クォークの寿命は ps のオーダーを持つため崩壊点検出器には高い崩壊点分解能が要求される。

本研究ではこの崩壊点分解能に関連して、FPCCD における信号電荷の拡散及びヒット位置を fit によってトラッキングした直線と実際のヒット位置の差分を計算することにより位置分解能の指標となる σ について、Minimum Ionizing Particle(MIP) の宇宙線を用いて性能評価を行った。

7.1 チェックシステム

本研究では FPCCD で得られた信号が確かに宇宙線によるものであるか確かめるために棒状のシンチレータと浜松ホトニクス社の MPPC を組み合わせたチェックシステムを設計した。MPPC の信号取得には大阪大学、KEK、東北大学が共同で開発を行った EasirocModule を使用した。このチェックシステムにより FPCCD の信号とチェックシステムのヒット情報の対応が取れることが確認され今後はより多くの FPCCD で得られた信号を解析対象に入れるためにチェックシステムにおけるヒット情報を用いたより詳細なトラッキング手法を開発することが重要である。

7.2 信号電荷拡散

本研究において入射した宇宙線の天頂角が $0-20^\circ$ の時信号電荷の拡散があるピクセルを、ヒットしたピクセルの周囲 5×5 ピクセルの ADC 値の sum に 10% 以上寄与する ADC 値を持つピクセルと定義した場合にはヒットしたピクセルを含め最大 4 ピクセルで

あるという結果が得られた。これは FPCCD において素子を構成する半導体の全空乏化によって信号電荷の拡散が狭い範囲に限られていることを意味する。より大きな天頂角での信号電荷拡散について調べるには 2CCD ヒット frame のデータも使用できるように解析を改良する必要がある。

7.3 位置分解能

本研究では fit によるトラッキングとヒット位置の差分の分布から得られる σ は $\sigma = 0.060 \pm 0.002(mm)$ という値であるという結果が得られた。これはピクセルサイズ $6\mu m \times 6\mu m$ よりも 10 倍程度大きい値であり、この原因としてはアライメントが不十分であることや統計量の不足が挙げられる。また平均 4GeV のエネルギーをもつ宇宙線ミュオンを使用した場合には FPCCD を構成する物質における多重散乱の影響は最大ピクセルサイズの半分程度 ($3\mu m$) と計算された。この影響をできるだけ小さくするには FPCCD をゴミやちりから守るガラスカバー等を外しての測定を行うか、より高いエネルギーを持つ粒子による信号を取得しての測定を行う必要があることがわかった。

7.4 今後について

信号電荷の拡散をより広い範囲の粒子入射角度について調べるためにはチェックシステムの情報を含めたより詳細なトラッキング手法の開発が必要である。また位置分解能の算出のためには統計量の増加及びアライメント調整方法の確立等の課題が挙げられる。このためには χ^2 を利用した fit に使用するヒット点の決定方法等の解析手法の改良による統計量の増加、またアライメント調整が可能である測定システム機構の開発等が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東北大学素粒子実験研究室の方々、VTX グループの方々等多くの方にお世話になりました。ありがとうございました。

山本先生には様々な形でお世話になりました。日々のセミナーで素粒子物理学に関わる様々なことを教えて頂いたりミーティングでは本研究の為に多くのアドバイスを頂きました。佐貫先生には日ごろから私の研究について進め方や解析について様々なアドバイスを頂きました。与那嶺さんには解析で悩んでいるときに様々なアドバイスを頂きました。長峰さんにはネットワーク構成が上手くいかなかったときにお世話になりました。また VTX グループの杉本さん、宮本さんにはミーティングで多くのアドバイスを頂きました。信州大学の佐藤さんには日ごろから研究で必要なことに関して様々な助言を頂きました。また信州大学へ訪問した際は今回使用した測定機器について多くの事を教えて頂きました。また研究室のメンバーにはお世話になりました。

多くの方々のおかげで、無事修士課程を修了することができます。今まで本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] Ilc technical design report volume 1 - exective summery. <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [2] Ilc technical design report volume 2 - physics. <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [3] Ilc technical design report volume 2 - physics at the ilc. <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [4] Ilc technical design report volume 4 - detector. <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>.
- [5] N 型、p 型半導体とは. <https://alllearnhobby.com/archives/575.html>.
- [6] 電子殻と電子配置. <http://kagakuimage.com/densihaiti.html>.
- [7] Easiroc datasheet version:5. Omega, April 2011.
- [8] The international large detector letter of intent. Febguary, 2010.
- [9] C. Patrignani et al.(Particle Data Group). Chinese ‘physics c, review of particle physics. IOP Publishing, Oct 2016.
- [10] D.M.Asner et al. Ilc higgs white paper.
- [11] Peter K.F Grieder. Cosmic ray at earth. ELSEVIER.
- [12] M.A.Thomson. Particle flow calorimetry and the pandorapfa algorithm.
- [13] 家城齊. 修士論文 国際リニアコライダーのためのシンチレータ電磁カロリメータの新しいシンチレーション光読み出しデザインの開発. 2017.
- [14] 内木英一佐藤比佐夫. Easiroc module の変更 (ver1.2) とマニュアル, 2017.
- [15] 石島直樹. 修士論文 atlas アップグレード用シリコン検出器用システムの開発. 2014.
- [16] 村井峻亮. 修士論文 国際リニアコライダーのための崩壊点検出器 fpccd の中性子耐性の研究. 2018.
- [17] 内木英一. 卒業論文 ビームテストに向けた easiroc module の fpga 書き換えによる daq システムの改良. 2016.

- [18] 米本和也. Ccd/cmos イメージセンサの基礎と応用. CQ 出版社.