

2019年度 修士論文

国際リニアコライダーのための
高位置分解能シリコンセンサーの開発

九州大学大学院 理学府 物理学専攻
粒子物理学分野 素粒子実験研究室

上杉 悠人

指導教員 末原 大幹

2020年2月25日



九州大学
KYUSHU UNIVERSITY

概要

国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) は次世代の電子陽電子衝突加速器として計画されており、ヒッグス粒子の精密測定や標準理論を超えた物理の探索などに大きく期待されている。ILC の検出器コンセプトの 1 つに International Large Detector (ILD) がある。ILC でターゲットとする物理事象の多くは終状態に複数のジェットを含むため、ILD には高いジェットエネルギー分解能が要求されている。

ILD は Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる事象再構成法に最適化された構造になっている。PFA では、ジェット中の粒子を一つ一つ分離し粒子を対応付けることで、粒子の種類によって最も適した検出器でエネルギーの測定を行う。九州大学では、ILD で使用される候補の一つであるシリコンタンクステン電磁カロリメータ (SiW-ECAL) の開発を行っており、電磁カロリメータ中の光子は主に π^0 に起因する。PFA でクラスタリングされた粒子のうち光子の方向情報を用いて、kinematic fit による π^0 再構成を行うことで、ジェットエネルギー分解能を改善することができる。SiW-ECAL のシリコンセンサーは 5.5 mm の正方形のセルで分割されている。粒子の位置分解能を改善するために、このセンサーの各セルに Position-Sensitive silicon Detector (PSD) 技術を実装する可能性を研究している。

PSD は、SiW-ECAL のセンサーと同じように複数のセルを持つシリコンセンサーである。各セルには四隅に電極があり、信号はセンサー表面の抵抗層で抵抗分割され、電極から読み取られる。検出位置は各電極の信号の比率から取得することができる。SiW-ECAL でシリコンパッドを PSD に置き換えると、読み出しチャンネルの増加を最小限に抑えつつ位置分解能の向上が期待できる。九州大学では数年間 PSD の研究開発を行っており、初期の開発では、読み出しインピーダンスのために電荷分離が最適に行われないことが分かった。この問題を回避するために、表面に抵抗層を追加して、より高い表面抵抗を持つ新しい PSD を作成した。また、位置の歪みを減らし、最適な位置分解能に不可欠な信号対雑音比を高めるためのいくつかの手法を実装した。本論文では、ガンマ線源およびベータ線源による信号を用いた最新の PSD センサーの研究について記述する。

目次

第 1 章	序論	11
1.1	標準理論	11
1.2	国際リニアコライダー計画	12
1.3	ILC の物理	14
1.4	ILD (International Large Detector)	15
1.4.1	崩壊点検出器	16
1.4.2	ガス飛跡検出器	16
1.4.3	カロリメータ	17
1.4.4	超電導ソレノイド磁石と鉄ヨーク	17
1.4.5	ミューオン検出器	17
1.4.6	PFA (Particle Flow Algorithm)	18
1.5	本研究の目的	19
第 2 章	カロリメータ	21
2.1	荷電粒子と物質の相互作用	21
2.1.1	電離損失	21
2.1.2	制動放射	22
2.1.3	原子核近傍での相互作用	23
2.1.4	カスケードシャワー	23
2.2	電磁カロリメータ	24
2.2.1	SiW-ECAL	26
2.3	読み出し ASIC (SKIROC2)	26
第 3 章	シリコンセンサーの基本原理	27
3.1	Si 半導体の性質	27
3.1.1	P 型半導体、N 型半導体	27
3.1.2	p-n 接合	27
3.1.3	空乏層の性質	28
3.2	シリコン半導体検出器の原理	30

第 4 章	高位置分解能センサー	32
4.1	PSD (Positon-Sensitive silicon Detector)について	32
4.2	先行研究	33
4.3	新 PSD の仕様	34
4.4	測定系（読み出しの概要）	39
4.5	センサー基板の作成	41
4.6	PSD のセンサー基板への接着	43
第 5 章	放射線源等を用いた PSD の性能評価	47
5.1	パルス疑似信号を用いた性能評価	47
5.2	^{90}Sr を用いた PSD の性能評価	50
第 6 章	考察と今後の課題	61
第 7 章	結論	64
参考文献		67

図目次

1.1	標準模型 [1]	12
1.2	ILC の概要図 [1]	13
1.3	超電導加速空洞 [2]	13
1.4	$e^+e^- \rightarrow Zh$ 過程におけるヒッグス粒子の質量 $m_h = 125$ GeV の生成断面積と重心系エネルギー \sqrt{s} との関係。更にもう二つのヒッグス粒子生成過程についても示されている。(W ボソンとの結合によってヒッグス粒子を生じる過程 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$ と Z ボソンとの結合によってヒッグス粒子を生成する過程 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-h$) [3]	14
1.5	主なヒッグス粒子生成過程のファインマン図。左から $e^+e^- \rightarrow Zh$, $e^+e^- \rightarrow \bar{\nu}_e\nu_e h$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-h$	15
1.6	ILD[4]	15
1.7	SiD[4]	15
1.8	左: SIT、SET、FTD、ETD の 4 つのコンポーネントで構成される ILD のシリコン検出器系。右: 3 次元のシリコン検出器系の外観図 [4]	17
1.9	モンテカルロシミュレーションによるイベントディスプレイ。左から順に飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータとなっている。[5] . . .	19
2.1	電離損失 [6]	22
2.2	光子の原子核近傍での振る舞い	23
2.3	光子と鉛の相互作用の反応断面積 [6]	24
2.4	電磁カロリメータ [4]	25
2.5	シリコンタングステン電磁カロリメータの模式図	26
3.1	p-n 接合 [7]	28
3.2	シリコンセンサーの断面図	31
4.1	シリコンセンサーと PSD の内部構造の比較。左図が従来の ECAL で用いられるシリコンセンサー、右図が PSD の断面図を示している。	33
4.2	先行研究で使用した test chip [8]	33

4.3	実際のレーザー照射位置 [8]	34
4.4	再構成した位置 [8]	34
4.5	test chip の linearity[8]	34
4.6	従来の PSD と新 PSD の内部構造の比較	35
4.7	1 次元 PSD における抵抗分割と読み出しインピーダンスとの関係	36
4.8	PSD1 の写真	37
4.9	PSD2 の写真	37
4.10	PSD1-1 : 4×4 セルのセンサー 1 枚当たり 2 種類の異なる表面抵抗値のパターンが存在する。	37
4.11	PSD1-1 の 1 セル	37
4.12	PSD1-2 : 4×4 セルのセンサー 1 枚当たり 4 種類の抵抗パターンが存在する。	38
4.13	PSD1-2 の 1 セルにおける低抵抗ライン	38
4.14	PSD1-2 の 1 セル	38
4.15	厚さ 250 μm の PSD の 2D 画像パターンでの α 線源による位置再構成の測定結果 [10]。a は低抵抗ラインなし。b、c 及び d は低抵抗ラインを設けている。表面抵抗値に対する線抵抗値を変化させた場合、このような結果が得られた。	38
4.16	[10] における最も歪みを減らすことができた場合の結果。	38
4.17	SKIROC2CMS のアナログ部	40
4.18	読み出しの模式図	40
4.19	セットアップ	41
4.20	センサー基板と HV 基板の表面	42
4.21	センサー基板と HV 基板の裏面	42
4.22	ブラックテープを貼った表面	42
4.23	ブラックテープを貼った裏面	42
4.24	穴付き PSD1 用センサー基板	42
4.25	allegro 上での PSD1 用センサー基板	43
4.26	PSD のセンサー基板への接着のためのセットアップ	44
4.27	センサー基板固定用治具	44
4.28	PSD 搬送用の真空吸着パッド固定治具	45
4.29	図 4.28 の治具を真空によって上下させる機構	45
4.30	接着剤用シリンジ固定治具	45
4.31	画像認識デバイス	45
4.32	PSD 固定用治具	45
4.33	PSD 固定用治具（横）	45
4.34	塗布用針	46
4.35	導電性接着剤	46

4.36	接着剤塗布直後の様子	46
5.1	ノイズレート（赤）と信号レート（青）。横軸は閾値、縦軸の単位は Hz とした。	49
5.2	PSD1-2-2 におけるトリガーが発生したチャンネルの分布	50
5.3	PSD1-2-2 における線源を 1.6 mm 離して測定した際のチャンネル 24、メモリセル 10 番のペデスタルの ADC 分布及びそれをガウス関数でフィッティングを行った例。	52
5.4	PSD1-2-1 における各チャンネルのペデスタルの平均値分布	53
5.5	PSD1-2-1 におけるペデスタルの幅のチャンネルごとの比較	54
5.6	6 通りの rollpos のズレの値における比較。ズレの値は順に、黄土色：7、水色：6、赤色：5、青色：4、緑色：3、マゼンタ：2	55
5.7	PSD1-2-1 における ^{90}Sr の MIP スペクトルを示している。セル内の 4 つの各チャンネル、ズレの値を考慮した各メモリセルでペデスタルの分布を求め、そのペデスタルのピーク位置の ADC 値を線源による信号の ADC 値から引いた値を用いた。	56
5.8	SKIROC2CMS における高ゲイン ADC 値と電荷量 [fC] の線形関係	56
5.9	PSD1-2-2 における線源がない場合の各セルにおける再構成位置の分布	57
5.10	PSD1-2-2 における線源を近づけた場合の各セルにおける再構成位置の分布	58
5.11	PSD1-2-2 における線源を左に寄せた場合の各セルにおける再構成位置の分布	59
5.12	PSD1-2-2 における線源を 12 mm 遠ざけた場合の各セルにおける再構成位置の分布	59
5.13	PSD1-2-1 における線源を 12 mm 遠ざけた場合の各セルにおける再構成位置の分布	60
5.14	PSD1-2-3 における線源を 12 mm 遠ざけた場合の各セルにおける再構成位置の分布	60
6.1	PSD1-2-3 のチャンネル 44~47 のセルにおける $-1.05 < X_{\text{rec}} < -0.9$ かつ $-1.05 < Y_{\text{rec}} < -0.9$ で条件をかけた場合の各チャンネルの ADC 値の分布	61

表目次

1.1	ジェット中の各粒子の割合	18
4.1	PSD センサーの概要	35
4.2	導電性接着剤の仕様	45
4.3	PSD とセンサー基板の接着の工程表	46
5.1	無効化したチャンネルのリスト	50
5.2	使用線源についての概要	51
5.3	PSD の仕様に関する一覧表。例えば、PSD1-1-3 と呼ぶとき、PSD1-1 のシリアル番号 3 番を指す。	51
5.4	PSD ピクセルの場所とチャンネルの対応表	52
6.1	3 つの主なピクセル内ヒット箇所と検出効率の関係	62

第 1 章

序論

本章では、現代素粒子物理学の基本的な枠組みである標準理論の説明をした後に、国際リニアコライダー計画の概要について説明する。特に、国際リニアコライダー計画における主な物理目標や、国際リニアコライダーを構成する加速器や検出器について説明する。最後に、本研究の目的について説明する。また、2章ではカロリメータの原理についての詳細を説明し、3章ではシリコンタングステン電磁カロリメータに用いられるシリコンセンサーの基本的な原理について、4章では高位置分解能センサーの候補の一つである PSD について、5章では PSD を用いて線源による再構成を行った結果について記述する。

1.1 標準理論

素粒子とは、自然界の物質を構成する最も基本的かつ要素的な粒子である。現代の素粒子物理学において、その理論的指針として 1960 年代後半から 1970 年代後半にかけて確立した標準理論がある。標準理論はこれまで観測された素粒子をもっともよく説明する理論として知られている。素粒子間には四つの力、すなわち電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用、重力が働く。標準理論では 17 種類の粒子を記述しており、物質を構成する基本的な粒子をクォークとレプトン、そして粒子間の力を媒介するゲージ粒子、粒子に質量を与えると言わされているヒッグス粒子で構成されている。

クォークとレプトンは、それぞれ質量が異なる 3 つの世代に分類され、それぞれのスピンは $1/2$ である。そして、クォークは電荷が $+2/3$ と $-1/3$ の 2 種類に分けられ、前者はアップクォーク (u)、チャームクォーク (c)、トップクォーク (t) であり、後者はダウンドクォーク (d)、ストレンジクォーク (s)、ボトムクォーク (b) である。一方で、レプトンは電荷が -1 の荷電レプトンと電荷を持たないニュートリノに分類される。荷電レプトンは、電子 (e)、ミュー粒子 (μ)、タウ粒子 (τ) の 3 つ、ニュートリノは電子ニュートリノ (ν_e)、ミューントリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の 3 つで構成されている。また、クォークやレプトンの間の相互作用が働く際に交換されるゲージ粒子は、電磁相互作用を行う際に媒介される光子 (γ)、弱い相互作用を行う際に媒介される W ボソン (W^\pm)、 Z ボソン (Z^0)、強い相互作用を行う際に媒介され

るグルーオン (g) の 4 種類がある。そして、それらに加え、ヒッグス粒子が、2012 年 7 月大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider, LHC) を用いた ATLAS、CMS 実験で発見された。これにより標準理論で予言されている粒子がすべて発見され、標準理論は完成となるが、いまだに説明できない暗黒物質、暗黒エネルギーの存在や重力の量子化と 4 つの相互作用の統一などの問題がある。そのため標準理論を超える新物理探索に関する研究が盛んにおこなわれている。

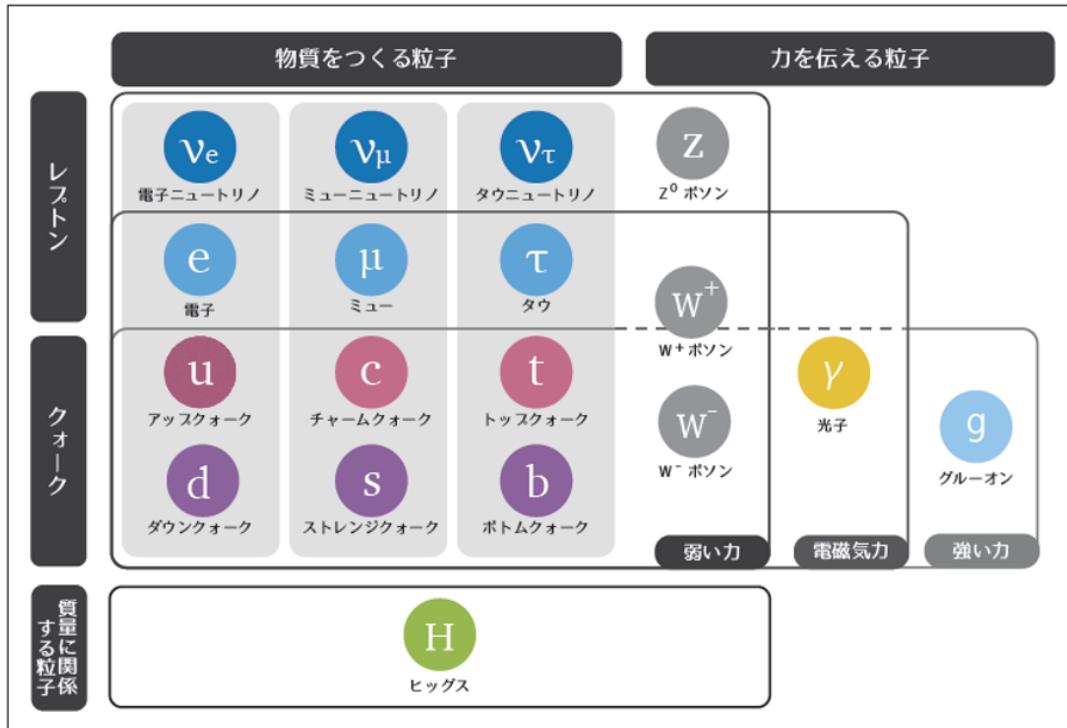


図 1.1 標準模型 [1]

1.2 国際リニアコライダー計画

International Linear Collider (ILC、国際リニアコライダー) は次世代のエネルギー・フロンティア加速器実験計画であり、CERN の LHC と並び標準模型を超える新物理探索に大きく期待されている。ILC は概略図として図 1.2 のようなデザインとなった。ILC は世界最高エネルギーまで電子と陽電子を線形にそれぞれ加速させ、衝突点で起こった現象を探る線形衝突型加速器実験である。ILC では初期計画として、全長が 20.5 km、重心系エネルギー 250 GeV の加速器を想定している。将来的には加速部分の拡張によって、重心系エネルギーが 500 GeV から 1 TeV、全長が 30~50 km までアップグレードが可能である。

ILC 加速器は主に電子・陽電子源、減衰（ダンピング）リング、主線形加速器、最終収束系から成る。電子・陽電子源によってビームが生成され、減衰リングでビームの向きのばらつ

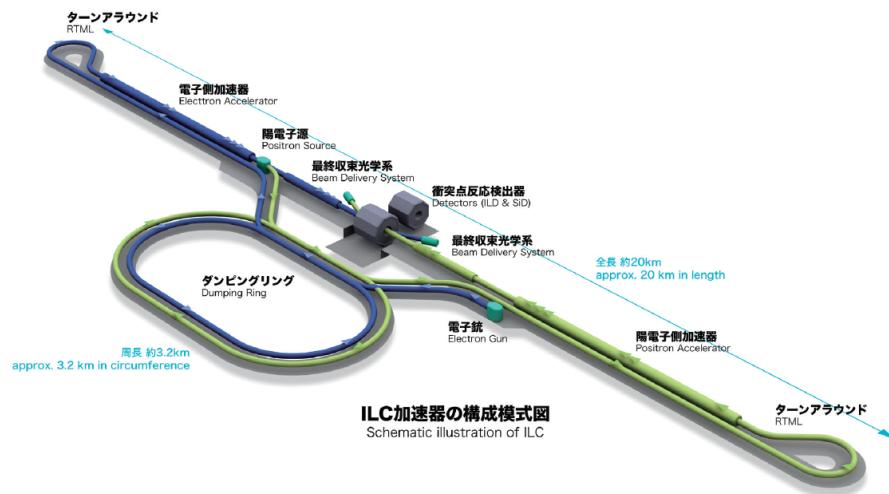


図 1.2 ILC の概要図 [1]

きを抑えてビームを絞る。そして、主線形加速器で直線的に連続加速され、中央の衝突点付近でさらに強くビームを収束させて衝突させる。電子源では、偏光させたレーザーを電圧をかけ



図 1.3 超電導加速空洞 [2]

た電極に照射すると、光電効果により電子が生成される。陽電子の生成には電子ビームを用いる。加速された電子ビームをアンジュレータに通すと放射光が発生する。その光子を金属標的に当て電子陽電子対を生成し、磁場をかけることで陽電子を選択的に取り出し陽電子ビームを生成する。このようにして得られた電子ビームと陽電子ビームを円形加速器の減衰リングに送り、放射光の放出と加速を繰り返すことでビームの向きのばらつきを減衰させる。主線形加速器での直線加速には、図 1.3 のような超電導加速空洞が用いられる。この加速空洞は高純度のニオブ製の 9 セル空洞であり、2 K で運転され平均加速勾配 31.5 MV/m での強電場をかけ欲しいエネルギーまで加速させる。高周波のマイクロ波によって、粒子が 1 セルを通過するごとに位相が反転し次々とビームを加速させる。その後衝突点の直前で 700 m にわたって並べられた四極磁石等による最終収束系によりビームの厚みを 6 nm まで収束させルミノシティを高める。

1.3 ILC の物理

CERN の LHC はハドロンコライダーであり、陽子同士を衝突させる加速器である。陽子のような複合粒子を衝突させると非常に多くの背景事象が発生してしまうが、ILC ではレプトン同士を衝突させるためノイズの少ないクリーンな環境で衝突の中心を観測することができる。

前節で述べたように、ILC は初期段階として重心系エネルギー 250 GeV が予定されているが、これは図 1.4 に示されるように $e^+e^- \rightarrow Zh$ 随伴生成過程の断面積がピークに達するためである。図 1.4 にプロットしてある過程のファインマン図を図 1.5 に示す。この Zh 随伴過程において、4 元運動量の保存則から式 1.1 のようにヒッグス粒子の反跳質量 M_{recoil} を求めることができる。

$$M_{\text{recoil}}^2 = (\sqrt{s} - E_{ff})^2 - |\vec{p}_{ff}|^2 \quad (1.1)$$

ここで E_{ff} はフェルミオン対のエネルギー、 \vec{p}_{ff} はフェルミオン対の運動量である。このように運動学的に質量計算を行い、Z ボソンのフェルミオン対への崩壊を正確に再構成することで、ヒッグス 粒子からの崩壊粒子を再構成して直接測定するより高い精度で測定することができる。

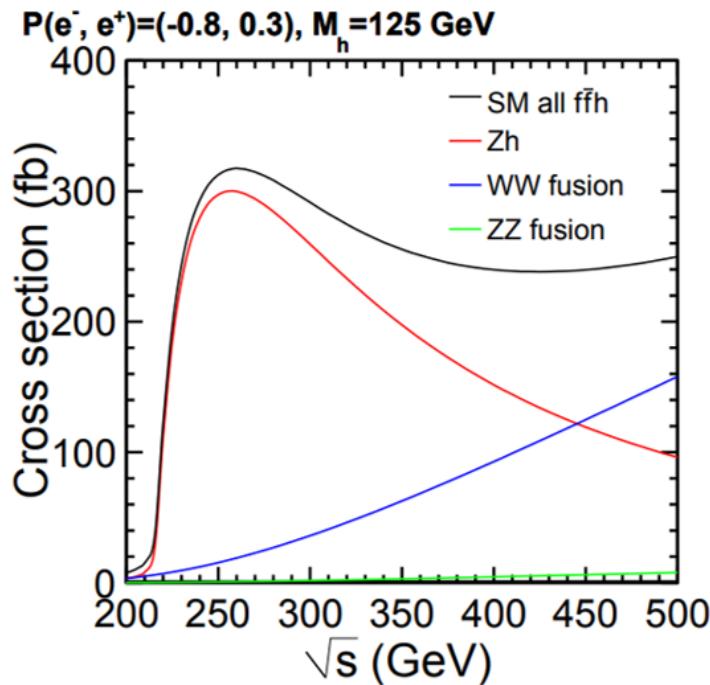


図 1.4 $e^+e^- \rightarrow Zh$ 過程におけるヒッグス粒子の質量 $m_h = 125$ GeV の生成断面積と重心系エネルギー \sqrt{s} との関係。更にもう二つのヒッグス粒子生成過程についても示されている。(W ボソンとの結合によってヒッグス粒子を生じる過程 $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H$ と Z ボソンとの結合によってヒッグス粒子を生成する過程 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-h$) [3]

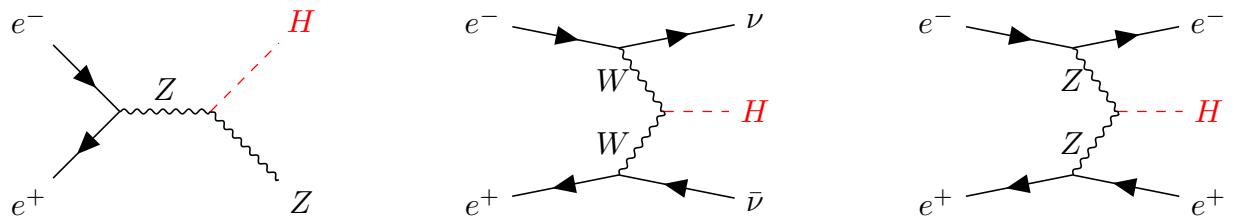


図 1.5 主なヒッグス粒子生成過程のファインマン図。左から $e^+e^- \rightarrow Zh$, $e^+e^- \rightarrow \bar{\nu}_e \nu_e h$, $e^+e^- \rightarrow e^+e^- h$ 。

1.4 ILD (International Large Detector)

ILC における測定器としては、2 種類が予定されている。日本とヨーロッパを中心とする International Large Detector (ILD) (図 1.6) とアメリカを中心とする Silicon Detector (SiD) (図 1.7) の 2 つの実験グループが国際協力のもと測定器開発に携わっている。SiD は 5T の強磁場をかける低コストでコンパクトなシリコン半導体検出器が用いられる。ILC では 2 つの実験が 1 つの衝突点を共有するためにスライド式で測定器の出し引きが可能となっており、これをプッシュプル方式と呼ぶ。ILD は ILC 用多目的検出器で、そのデザインは次節で述べる PFA (Particle Flow Algorithm) という考え方に基づいている。ILD の構造は衝突点から近い順に崩壊点検出器、飛跡検出器、カロリメータ、超電導磁石、ミューオン検出器となっており、それについての概要を以下で示す。

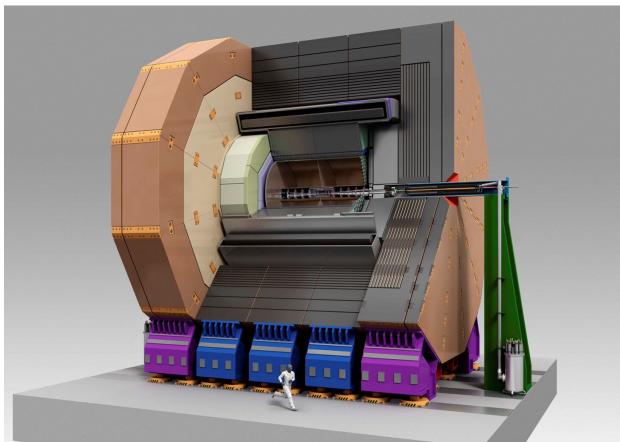


図 1.6 ILD[4]

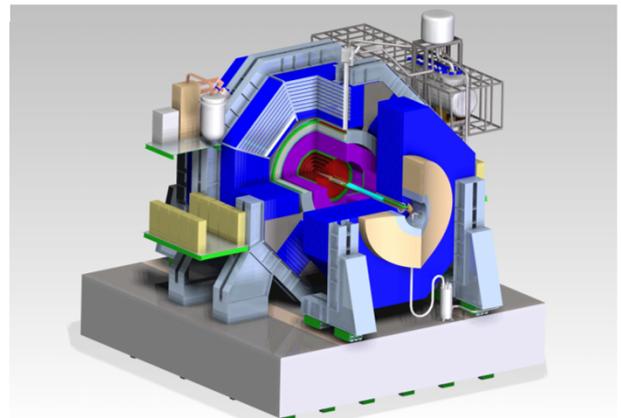


図 1.7 SiD[4]

1.4.1 崩壊点検出器

崩壊点検出器は、最も衝突点近くに設置される検出器である。低い物質量で構成され、可能な限り粒子の通過を妨げないようにになっており、ピクセル型の半導体検出器が用いられる。ILC ではヒッグス粒子と各フェルミオンの結合定数の精密測定のため、 b クオーク, c クオークの識別が重要である。すなわち D 中間子や B 中間子といった短寿命な粒子の崩壊点再構成の精度を高めることが重要となる。そのためには、崩壊点検出器で荷電粒子の飛跡を精密に測定し、その飛跡の外挿を行うことで一次・二次・三次崩壊点の正確な情報を得ることが必要になる。そのため、ILC ではジェットのフレーバーを高精度で識別するための以下 Impact Parameter 分解能が要求されている。

$$\sigma_b < 5 \oplus \frac{10}{p \sin^{\frac{3}{2}} \theta} [\mu\text{m}] \quad (1.2)$$

ここで、 p は運動量、 θ は粒子の進行方向とビーム軸との角度を表す。この条件を満たすために崩壊点検出器には以下の条件が要求される。

- 相互作用点に対して 3 μm 以下の位置分解能
- 多重クーロン散乱を抑えるために各層 0.15% X_0 以下の厚み
- 第一層（最内層）の半径 $\sim 1.6 \text{ cm}$
- 数 % 以下のピクセル占有率

1.4.2 ガス飛跡検出器

飛跡検出器は TPC (Time Projection Chamber) とその周囲を囲むようにして置かれるシリコン検出器で構成される。図 1.8 のように、崩壊点検出器と TPC の間に SIT (Silicon Internal Tracker)、前方に FTD (Forward Tracking Detector)、後述する電磁カロリメータとの間に SET (Silicon External Tracker) と ETD (End-cap Tracking Detector) が配置される。

荷電粒子の磁場中での飛跡を調べることで飛跡の曲率半径から、荷電粒子の運動量を測定することができる。TPC では Ar を主体として CF_4 とアイソブタンを混合した T2K ガスを用いる。荷電粒子が通過すると、その飛跡に沿ってガスがイオン化され、その際に生じる電離電子を電場によりビーム軸 (z 軸) 方向にドリフトさせ、エンドキャップ上 (x, y 平面) の Micro Pattern Gas Detector (MPGD) で信号として検出する。これにより電離電子のドリフト時間と エンドキャップ上の 2 次元の信号の情報により、荷電粒子の飛跡を 3 次元的に再構成することができる。そして、TPC では検出された信号の大きさから粒子の dE/dx を調べ、粒子の識別を行うことができる。

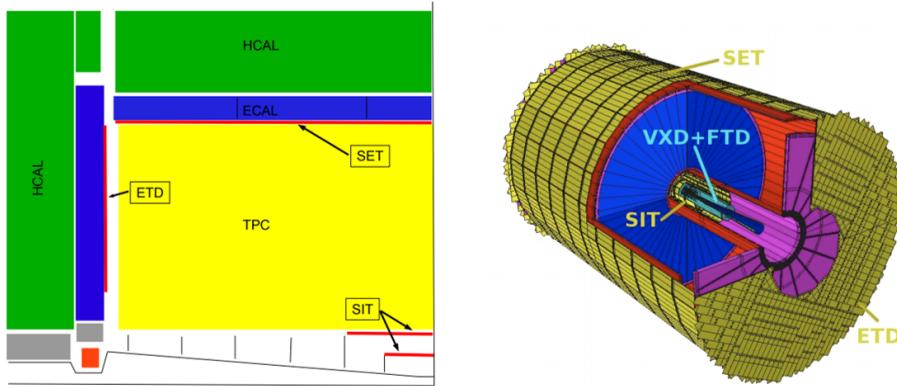


図 1.8 左 : SIT、SET、FTD、ETD の 4 つのコンポーネントで構成される ILD のシリコン検出器系。右 : 3 次元のシリコン検出器系の外観図 [4]

1.4.3 カロリメータ

カロリメータは中性粒子のエネルギーを測定することができる検出器である。ILD ではコストが低く、大型化が容易なためサンプリング型カロリメータを採用している。これは吸収層と検出層が交互に積み重なった多層構造となっている。吸収層には物質量の大きなものが用いられ、物質中の相互作用によって光子は電磁シャワー、中性ハドロンはハドロンシャワーを起こす。吸収層で入射粒子のエネルギーを落としシャワーを発生させ分離させることで、検出層において低エネルギーの大量の粒子群の精密なエネルギー測定を行うことが可能となる。ILD のカロリメータは内側から光子のエネルギーを測定する Electromagnetic CALorimeter (ECAL、電磁カロリメータ)、ハドロンのエネルギーを測定する Hadron CALorimeter (HCAL、ハドロンカロリメータ) と配置される。

1.4.4 超電導ソレノイド磁石と鉄ヨーク

超電導によって、3.5 T の強磁場をかけている。ソレノイドコイルの外側には鉄ヨークがあり、磁場が外部に漏れるのを防ぐのに活用される。

1.4.5 ミューオン検出器

ILD の中に一番外側に配置されるミューオンを検出するための測定器である。ミューオンは内側のカロリメータ、超電導ソレノイド磁石、鉄ヨークなどを貫通する。そのため、鉄ヨークと検出層のシンチレータがサンドイッチ構造になっており、磁場中のミューオンの軌跡からミューオンのエネルギーなどを調べる。ミューオンを他の粒子から分離、識別し、またカロリメータの測定域に収まらなかったエネルギーを測定するために用いられる。

1.4.6 PFA (Particle Flow Algorithm)

ILC でターゲットとする物理事象の多くは終状態に複数のジェットを含むため、ILD には式 1.3 の高いジェットエネルギー分解能が要求されている。

$$\frac{\sigma_{E_{\text{jet}}}}{E_{\text{jet}}} = \frac{30\%}{\sqrt{E_{\text{jet}}(\text{GeV})}} \quad (1.3)$$

ILD は Particle Flow Algorithm (PFA) と呼ばれる事象再構成法に最適化された構造になっている。PFA では、ジェット中の粒子を一つ一つ分離し粒子を対応付けることで、粒子の種類によって最も適した検出器でエネルギーの測定を行う。ジェット中の各種粒子の割合を表 1.1 に示す。

従来の検出器では、カロリメータ内において荷電ハドロンと中性ハドロンを区別せずにエネルギーの測定を行っていた。荷電粒子は主に荷電ハドロンであり、従来の手法では大量の荷電ハドロンのエネルギーをカロリメータで測定するためジェットエネルギー分解能が悪くなる。

粒子の種類	ジェット中の割合	測定を行う検出器
荷電粒子	62%	飛跡検出器
光子	27%	電磁カロリメータ
中性ハドロン	10%	ハドロンカロリメータ
ニュートリノ	1%	測定不可

表 1.1 ジェット中の各粒子の割合

一方、PFA によるイベントディスプレイを図 1.9 に示す。飛跡検出器で得られた荷電粒子の再構成された飛跡や運動量の情報、またカロリメータの再構成されたクラスターやエネルギーの情報などから、さらにはそれらの対応付けを行うことで、荷電粒子のエネルギーは飛跡検出器で得られた飛跡の曲率半径から測定される。その際、飛跡検出器の分解能がカロリメータより圧倒的に高いことが重要である。飛跡検出器の飛跡に対応しない中性粒子のうち、光子のエネルギー測定を電磁カロリメータ、中性ハドロンのエネルギー測定をハドロンカロリメータの検出層で行う。これにより、ハドロンカロリメータで測定するのは中性ハドロンのみとなり、測定器全体としてのジェットエネルギー分解能の精度向上が期待できる。

このようにして式 1.3 の分解能を満たすべく可能な限り、光子と電子（陽電子）の電磁シャワーとの分離や、荷電ハドロン由来の電磁シャワーとの分離などといった、ジェット中の粒子の重複をなくすことが重要である。そのためには、3 次元的に高精細なカロリメータが必要になってくる。

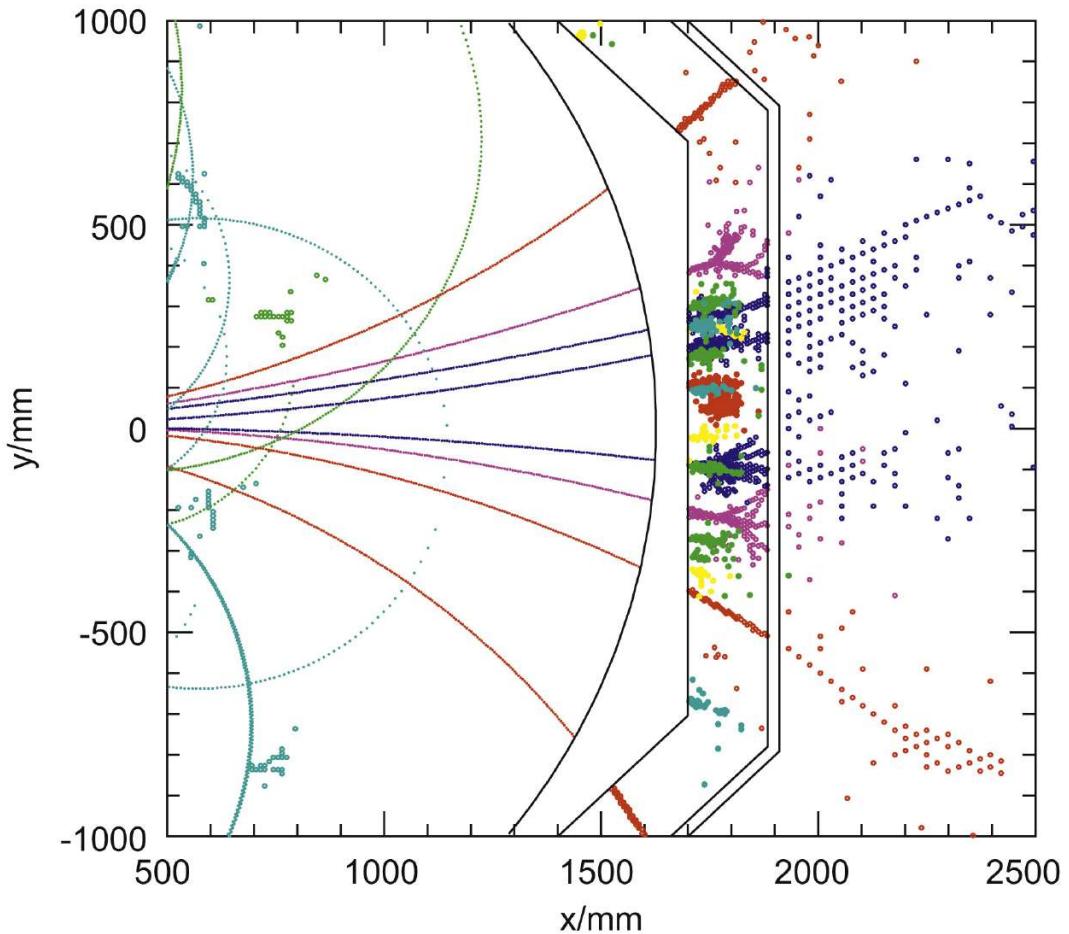


図 1.9 モンテカルロシミュレーションによるイベントディスプレイ。左から順に飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータとなっている。[5]

1.5 本研究の目的

本研究の目的は、後述するシリコンタングステン電磁カロリメータ (Si W Electromagnetic CALorimeter, SiW-ECAL) の性能向上に向けた高位置分解能シリコンセンサーを開発することにある。

九州大学では、ILD で使用される候補の一つである SiW-ECAL の開発を行っており、電磁カロリメータ中の光子は主に π^0 に起因する。そのため、光子の方向情報を用いて、kinematic fit による π^0 再構成を行うことで、ジェットエネルギー分解能の改善が可能である。SiW-ECAL のシリコンセンサーは 5.5 mm の正方形のセルで分割されているが、ECAL 最内層においてこのセンサーの各セルに Position-Sensitive silicon Detector (PSD) 技術を実装することで、粒子の位置分解能を改善し、上述のジェットエネルギー分解能の改善につながることが期待できる。九州大学では数年間 PSD の研究開発を行っており、初期の開発では、読み出

しインピーダンスのために電荷分離が最適に行われないことが分かった。この問題を回避するために、PSD センサーの表面に抵抗層を追加して、より高い表面抵抗を持つ新しい PSD を作成した。

本研究では、最新の異なる抵抗パターンを持つ PSD を用いて、ベータ線源による信号の MIP スペクトル及び再構成位置について調べ、最適な PSD についての評価を行った。

第 2 章

カロリメータ

本章では、カロリメータの検出原理や SiW-ECAL の検出原理と読み出し方法について説明する。

2.1 荷電粒子と物質の相互作用

2.1.1 電離損失

高エネルギーの荷電粒子が物質を通過する際、物質中の原子を励起、電離させることでエネルギーを失っていく。この過程を電離損失と呼び、電離損失による単位長さあたりのエネルギー損失は Bethe-Bloch の式 (2.1) に従う。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (2.1)$$

N_A : アボガドロ数 = $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

r_e : 電子の古典半径 = $2.82 \times 10^{-15} \text{ m}$

m_e : 電子の質量 = $0.511 \text{ MeV}/c^2$

ze : 入射粒子の電荷

Z, A : 吸収体の原子番号と質量数

I : 有効電離ポテンシャル

β : v/c (v は入射粒子の速度)

γ : $1/\sqrt{1 - \beta^2}$

δ : 物質を構成する原子内の電子による電場の遮蔽効果を表すパラメータ

T_{\max} : 1 回の衝突で落とす最大エネルギー

式 (2.1) のエネルギー損失 $-dE/dx$ は入射粒子の質量に依らず、 β に依存する、すなわち $v = \beta c$ に依存する関数である。電離損失によるエネルギー損失を図 2.1 に示す。エネルギー損失 dE/dx は β の増加に伴い減少するが、 $\beta = 0.95$ 付近で最小値を取り、これ以上 β が増

加してもエネルギー損失はわずかに増えるばかりでほぼ一定の値をとる。このような粒子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle, MIP) と呼ぶ。

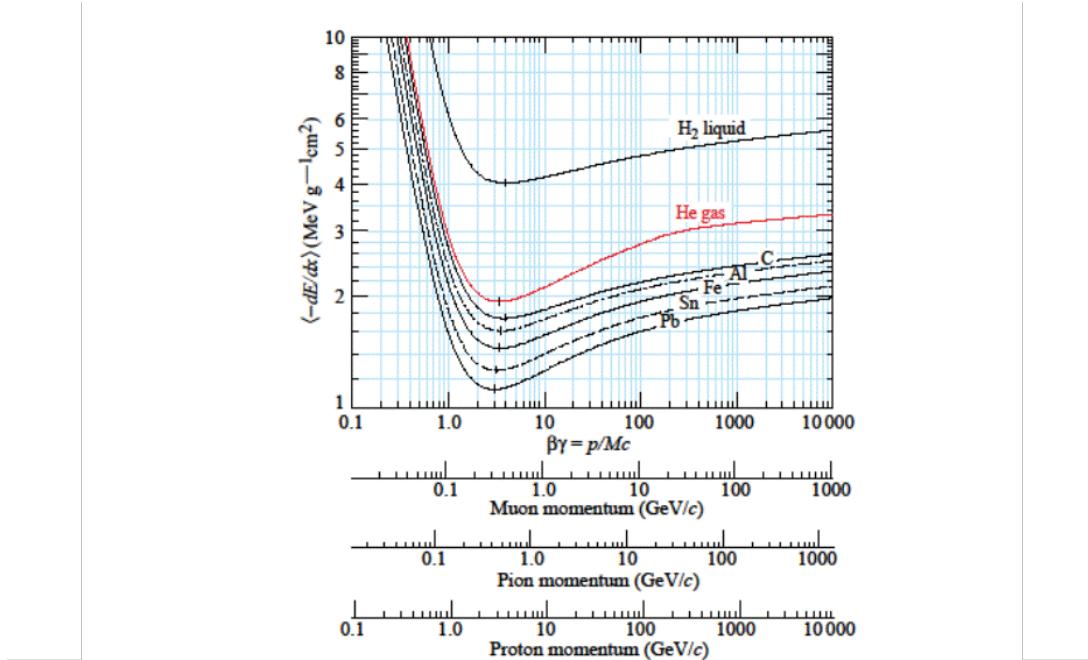


図 2.1 電離損失 [6]

2.1.2 制動放射

物質中を荷電粒子が通過すると、原子のつくる電場や磁場などの影響によって、クーロン力を受けることで、通過粒子は放射光を放出してエネルギーを失う。これを制動放射 (Bremsstrahlung) と呼び、特に高エネルギーの質量の小さい粒子が物質中を通過する場合には重要である。単位長さ当たりのエネルギー損失は以下の式 2.2 で表される。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} = \frac{E}{X_0} \quad (2.2)$$

ここで、 α は、微細構造定数 ($\alpha \sim 1/137$) であり、 X_0 は放射長 (Radiation Length) である。放射長とは、制動放射により電子のエネルギーが入射前の $1/e$ になる平均の長さであり、次の式 (2.3) で表される。

$$X_0 = 16.4 \times \frac{A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} [\text{g}/\text{cm}^2] \quad (2.3)$$

X_0 は物質によって異なり、鉄は 1.76 cm、鉛は 0.56 cm、タンゲステンは 0.35 cm である。また、制動放射により失うエネルギーと電離損失により失うエネルギーが等しくなるとエネルギーを臨界エネルギー (E_c) と呼び、近似的に式 2.4 で表すことができる。

$$E_c \simeq \frac{610}{Z + 1.2} [\text{MeV}] \quad (2.4)$$

タンゲステンの場合は $E_c = 8.0 \text{ MeV}$ となる。

2.1.3 原子核近傍での相互作用

光子と物質中の原子との相互作用には、主に光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の3つの過程がある。それを図2.2に示す。

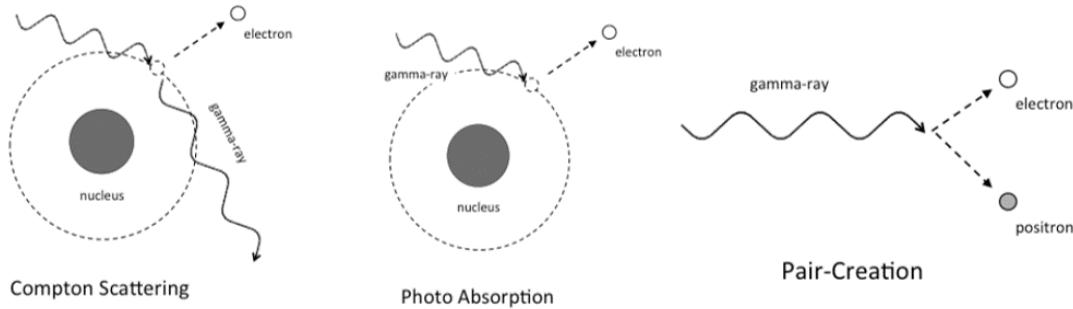


図2.2 光子の原子核近傍での振る舞い

まず光電効果（Photo Absorption）とは、物質中に入射した光子が全エネルギーを原子核に束縛されている電子に与えることで、その束縛から電子が放出される反応である。この反応は光子のエネルギーが電離ポテンシャルより少し上の範囲で支配的であり、鉛の場合だと 500 keV 以下の領域で起こりやすい。次にコンプトン散乱（Compton Scattering）とは、入射した光子と原子中の電子との弾性散乱である。この過程は鉛の場合 0.6 ~ 5 MeV の範囲で支配的となる。次に電子陽電子対生成（Pair-Creation）とは、光子が原子核近傍で消滅し、電子と陽電子の対が生成される過程である。この過程が起こるのは、光子のエネルギーが 1.022 MeV よりも大きい場合である。この値は電子と陽電子の静止質量の和である。鉛の場合、5 MeV 以上で支配的となる。

2.1.4 カスケードシャワー

高いエネルギーを持った粒子は物質内に入射した際、物質と相互作用を起こして二次粒子を生成する。生成された粒子も再び物質と相互作用をし二次粒子を生成する。このようなプロセスが連続して起こることで、粒子数は指数関数的に増加する。この雪崩的に粒子が生成される現象をカスケードシャワーと呼ぶ。入射粒子の違いによりカスケードシャワーは電磁シャワーとハドロンシャワーに分類される。

電磁シャワー

電磁シャワーは電子や陽電子、光子などが入射粒子の場合に起こる。高エネルギーの電子が入射したとすると、制動放射によって光子が放出される。この放出される光子はエネルギーが十分に高いため、電子陽電子対生成を起こす。それによって生成された電子、陽電子が制動放射によって光子を放出する。以下このような過程を繰り返していくことで粒子数が増加していく

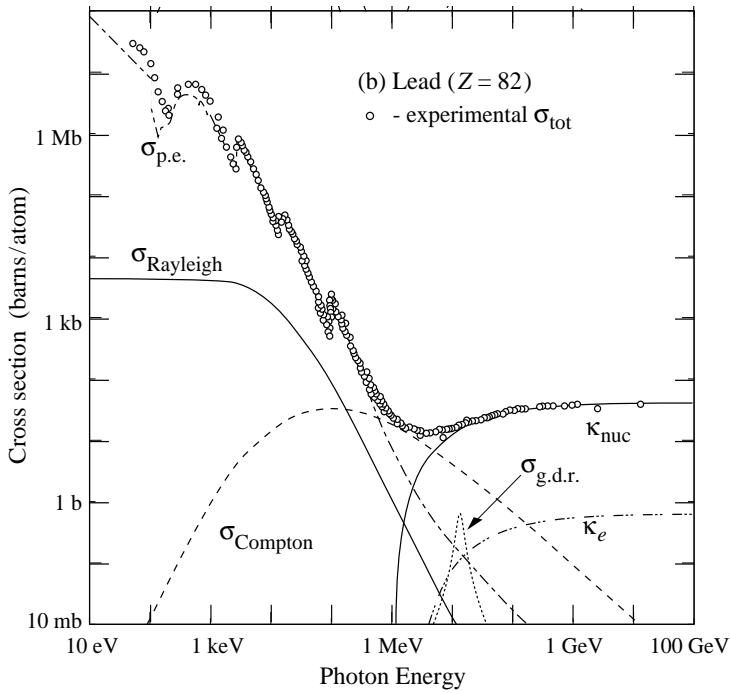


図 2.3 光子と鉛の相互作用の反応断面積 [6]

く。このような電磁シャワーはシャワーを構成する粒子のエネルギーが臨界エネルギー E_c より小さくなると、電離損失が支配的となるため電子は急速にエネルギーを失い、シャワーを構成する粒子数は指数関数的に減少する。電磁シャワーの横方向の広がりを表すパラメータとして、モリエール半径 (R_M) が式 2.5 のように与えられる。

$$R_M = \frac{21(\text{MeV})X_0}{E_c} [\text{g/cm}^2] \quad (2.5)$$

ハドロンシャワー

π^\pm 中間子や K^\pm 中間子などのハドロンが入射粒子の場合に起こる。高エネルギーのハドロンが入射すると、物質中の原子核との強い相互作用によって、陽子や中性子、 π 中間子や K 中間子などの二次粒子が生成される。この過程が次々と起こることで、電磁シャワーと同様にカスケードシャワーが起こる。ハドロンシャワー中には π^0 中間子が生成され、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の光子による電磁シャワーを起こす。すなわち、ハドロンシャワーは発展の最中に電磁シャワーも混ざる。光子とハドロンでは検出器の応答が異なるため、ハドロンカロリメータではジェットエネルギー分解能がその分落ちてしまう要因となる。

2.2 電磁カロリメータ

電磁カロリメータは高密度でコンパクトな電磁シャワーを測定するため、PFAにおいては微細に分割することが要求される。電磁カロリメータは 30 層のタングステン吸収層とセンサーの検出層が交互に積み重なった多層構造となっており、サンプリング型カロリメータと呼

ばれる。全吸収型と比較すると、高精細化が比較的容易かつ安価である。検出層はシリコンセンサー、シンチレータ、両者のハイブリッドが研究されている。吸収層は ECAL 全体で 24 放射長となる。

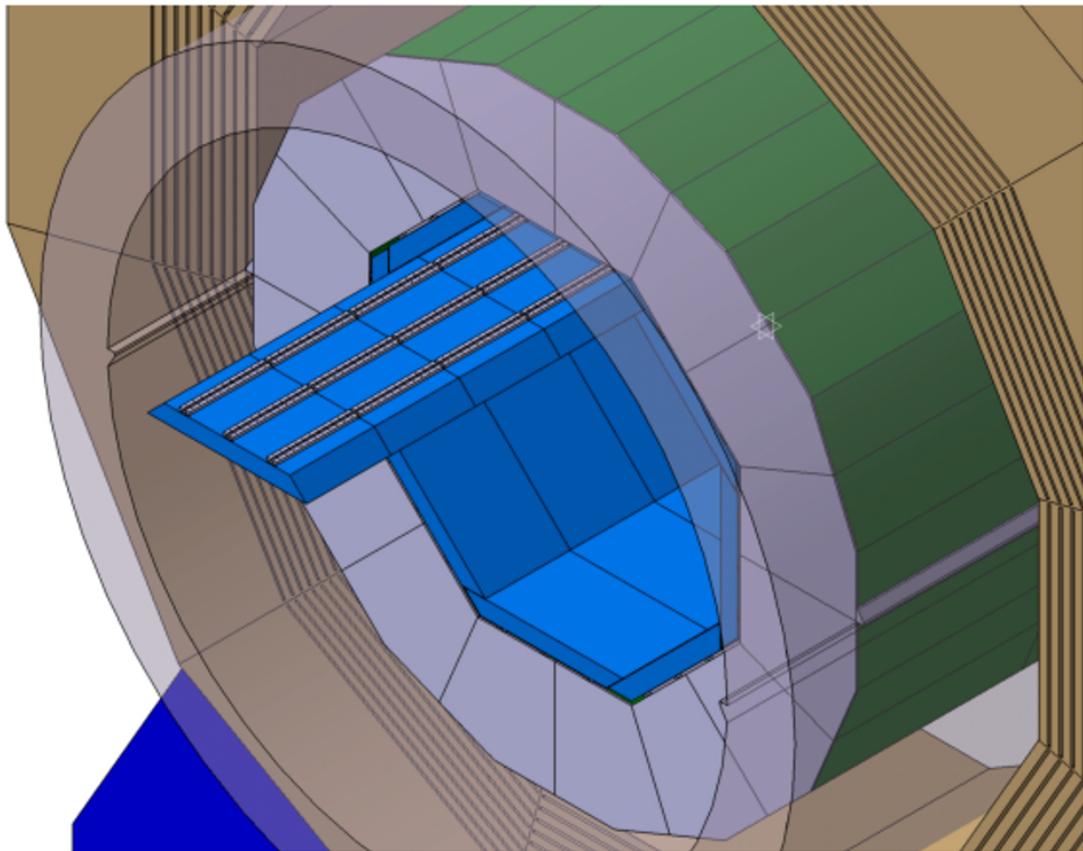


図 2.4 電磁カロリメータ [4]

ジェットエネルギー分解能を上げるためには、以下の項目が要求される。

- 高精細であること
　　ジェット中の粒子を高精度に分離するため
- 大きなサンプリング比
　　統計的なばらつきを抑えるため
- シャワーの広がりの抑制
　　PFA の際に他の粒子のシャワーと重複しないようにするため
- シャワーの漏れの抑制
　　エネルギー分解能の低い HCAL で測定するエネルギーを可能な限り小さくするため
- ハドロンの相互作用長の大きさ
　　電磁シャワーとハドロンシャワーを分離するため
- 短い放射長
　　HCAL で測定するエネルギーを小さくし、検出層をコンパクトにするため

2.2.1 SiW-ECAL

シリコンタングステン電磁カロリメータ（SiW-ECAL）は、正方形のセルを並べたシリコンパッドを敷き詰めたものを検出層のセンサーとして用いる電磁カロリメータである。セルサイズは $5 \times 5 \text{ mm}^2$ が基本的な設計となっている。30 層の ECAL だと全体で 1 億のセル数になる。図 2.5 のような構造をとることで、電磁カロリメータを微細に分割しコンパクトにすることで不感領域を減らすことが可能となる。

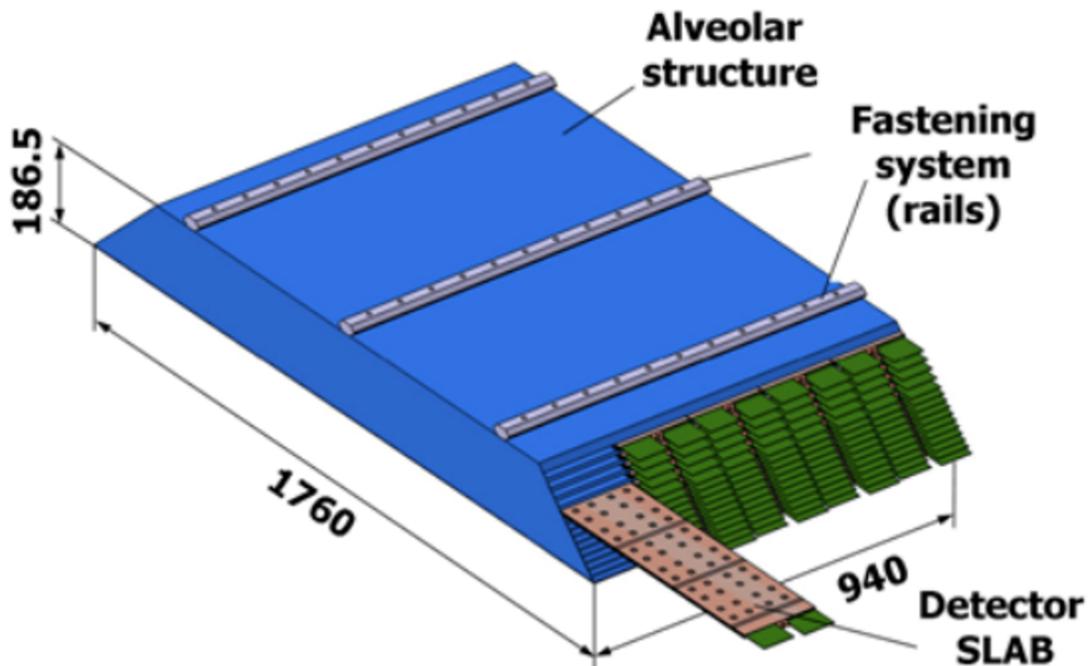


図 2.5 シリコンタングステン電磁カロリメータの模式図

2.3 読み出し ASIC (SKIROC2)

前節で述べたように、SiW-ECAL は全体で総チャンネル数が 1 億にも及ぶ。SiW-ECAL の高精細化のためシリコンセンサー専用の読み出し用に開発された ASIC (Application Specific Integrated Circuit) として、SKIROC (Silicon Kalorimeter Integrated ReadOut Chip) を用いる。各チャンネルにシリコンセンサーを接続し、SKIROC2 を介してデータ収集を行う。本研究では SKIROC2 シリーズの SKIROC2CMS を用いる。SKIROC2CMS の詳細は第 4 章で述べる。

第 3 章

シリコンセンサーの基本原理

第 2 章で述べたように、SiW-ECAL ではシリコン半導体検出器が用いられる。本章ではシリコンの半導体としての性質からシリコンセンサーの検出原理について説明する。

3.1 Si 半導体の性質

3.1.1 P 型半導体、N 型半導体

半導体はドーピングする不純物の種類により、N 型半導体と P 型半導体とに区別される。価電子 4 つのシリコンに対し、価電子を 5 つ持つ原子 (P, As, Sb, Bi) を添加した場合、添加した原子 1 つに対して、シリコンとの共有結合対に寄与しない余分な電子が 1 つ生じる。この電子は室温程度のエネルギーを得て自由電子となる。このように自由電子を供給する不純物をドナーと言い、その添加量に応じて自由電子の量が決まる。このように自由電子が多い半導体を N 型半導体と言う。一方、価電子を 3 つ持つ原子 (B, Al, Ga, In) を添加した場合、添加した原子 1 つに対して正孔が 1 つ生じる。このように正孔を供給する不純物をアクセプタと言い、その添加量に応じて正孔の量が決まる。このように正孔が多い半導体を P 型半導体と呼ぶ。

なお、室温程度の熱平衡状態においては、半導体中における自由電子密度 n と正孔密度 p の間には、次の質量作用の法則が成立する。

$$np = n_i^2 \quad (3.1)$$

ここで n_i は純粋シリコンの常温でのキャリア濃度を表し、 $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ である。

3.1.2 p-n 接合

本節では、P 型半導体と N 型半導体とが、図 3.1 のように 2 層構造をとる p-n 接合について考える。前節で述べたように、P 型半導体は正孔があり、N 型半導体は電子がある。これらの半導体を接合させると、キャリアの拡散が起こり、p-n 接合の接合部では、P 側から N 側

に向けて正孔が、N側からP側に向けて電子が拡散する。拡散した正孔と電子は、互いに再結合して安定化する。その結果、正孔も自由電子も存在しない領域が形成される。この領域を空乏層と呼ぶ。空乏層中では、P型半導体側には負のアクセプタ�이온이 존재하고、N型半導体側では正のドナーア이온이 존재するため、図3.1のように、矢印の向きに内部電界が形成される。熱平衡状態においては、自由電子と正孔の相互移動は妨げられ、ある程度以上には空乏層は広がらない。内部電界によって形成される電位障壁を拡散電位と呼び、この内部電位 φ_{bi} は、

$$\varphi_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_p N_n}{n_i^2} \quad (3.2)$$

で表される。

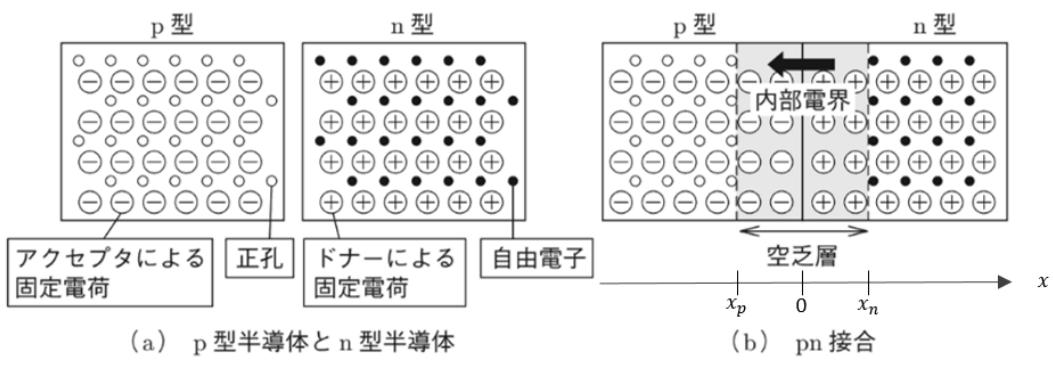


図3.1 p-n接合 [7]

3.1.3 空乏層の性質

次に、p-n接合に電圧を印加する場合を考える。P型半導体に正電圧、N型半導体に負電圧を印加する順方向バイアスでは、空乏層中に生じていた内部電界が外部電圧により減少し、P型半導体側からN型半導体側への正孔拡散およびN型半導体側からP型半導体側への電子拡散が増大して、空乏層厚は減少する。同様に、P型半導体に負電圧、N型半導体に正電圧を印加する逆バイアスでは、空乏層内の内部電界が外部電圧によりさらに増大し、自由電子や正孔の移動は起らず、空乏層厚が増大する。

このときの電圧 V_b と空乏層の幅 d との関係は以下のように求められる。図3.1のように x 軸をとり、p-n接合面を原点、空乏層を $x_p < x < x_n$ とする。P型N型半導体の不純物濃度はそれぞれ、 N_p 、 N_n とし、素電荷を e 、シリコンの誘電率を ϵ とする。空乏層の電位変化は Poisson 方程式を解けばよい。従って、

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (3.3)$$

空乏層中にはキャリアである電子、正孔が存在せず、アクセプタ이온과 드나이온しか存

在しないと仮定すると、電荷密度 $\rho(x)$ は、式 3.4 で表される。

$$\rho(x) = \begin{cases} 0 & (x \leq -x_p) \\ -qN_p & (-x_p \leq x \leq 0) \\ +qN_n & (0 \leq x \leq x_n) \\ 0 & (x_n \leq x) \end{cases} \quad (3.4)$$

さらに、空乏層端 $x = -x_p$ 及び $x = x_n$ において電界強度が 0 であること、および $x = 0$ で電界強度ならびにポテンシャルが連続であると云う条件を課す。すなわち、式 3.3 の微分方程式を境界条件

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_p(x)}{dx} \Big|_{x=-x_p} &= 0 \\ \frac{d\varphi_n(x)}{dx} \Big|_{x=x_n} &= 0 \\ \frac{d\varphi_p(x)}{dx} \Big|_{x=0} &= \frac{d\varphi_n(x)}{dx} \Big|_{x=0} \\ \varphi_p(0) &= \varphi_n(0) \end{aligned}$$

のもとに解く。式 3.3 を一回積分すると、

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi(x)}{dx} &= 0 && (x < -x_p) \\ \frac{d\varphi(x)}{dx} &= -x \left(\frac{-eN_p}{\epsilon} \right) + E_{max} && (-x_p < x < 0) \\ \frac{d\varphi(x)}{dx} &= -x \left(\frac{eN_n}{\epsilon} \right) + E_{max} && (0 < x < x_n) \\ \frac{d\varphi(x)}{dx} &= 0 && (x_n < x) \end{aligned}$$

となる。さらに積分して、

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= 0 && (x < -x_p) \\ \varphi(x) &= -\frac{-eN_p}{2\epsilon}x^2 + E_{max}x + V_1 && (-x_p < x < 0) \\ \varphi(x) &= -\frac{eN_n}{2\epsilon}x^2 + E_{max}x + V_1 && (0 < x < x_n) \\ \varphi(x) &= V_2 && (x_n < x) \end{aligned}$$

となる。ここで、ポテンシャルは基準点を任意に選ぶことができるので、 $\varphi(-x_p) = 0$, $\varphi(x_n) = V_2$ であるとした。従って、

$$E_{max} = \frac{ex_p N_p}{\epsilon} = \frac{ex_n N_n}{\epsilon} \quad (3.5)$$

$$V_1 = \frac{x_p^2 e N_p}{2\epsilon} \quad (3.6)$$

$$V_2 = \frac{x_n^2 e N_n}{2\epsilon} \left(1 + \frac{x_p}{x_n} \right) \quad (3.7)$$

である。電界が $x = 0$ で連続であり、P 型領域の空乏層でのアクセプタイン総量と N 型領域の空乏層でのドナーイオン総量が等しいので、

$$N_n x_n = N_p x_p \quad (3.8)$$

であることを用いた。ここで、ホールの移動度より自由電子の移動度が大きいため、P 型半導体ではなく N 型半導体を通常用いる。従って主に N 型領域を空乏化するため、 $x_n \gg x_p$ となる。従って式 3.8 より、 $N_p \gg N_n$ であり、P 型シリコンの不純物濃度が非常に高い場合を考えると、式 3.7 は、

$$V_2 = \frac{x_n^2 e N_n}{2\epsilon} \left(1 + \frac{x_p}{x_n}\right) \simeq \frac{d^2 e N_n}{2\epsilon} \quad (3.9)$$

となる。 V_2 は内部電圧 φ_{bi} と外部から加えるバイアス電圧 V_b の和である。空乏層の厚さ d は、バイアス電圧の平方根に比例する。

シリコンの抵抗率と不純物濃度

不純物濃度 N_n のシリコン場合、電子の移動度を μ_e とすると、その抵抗率は、 $\Omega = 1/(e\mu_e N_n)$ となるので、式 3.9 より空乏層の厚さ d は

$$d = \sqrt{2\Omega\epsilon\mu_e(V_b + \varphi_{bi})}$$

となる。

ダイオードの接合容量

シリコンが空乏化すると、空乏層の厚み d に応じた静電容量 C

$$C = \epsilon S/d$$

が測定される。 d はバイアス電圧に依存するが、完全空乏化電圧 V_d 以上では d はシリコンの厚みになり、静電容量が変化しなくなる。静電容量のバイアス電圧依存性を測定することで、全空乏化電圧を測定することができる。

3.2 シリコン半導体検出器の原理

前節で述べたように、 P^+ 領域は、ホウ素などの原子を N 型半導体に不純物注入（インプラント）を行うことで形成される。バイアス電圧を掛けたり、信号を取り出したりするために、 P^+ 領域の上に、アルミニウムの電極が取り付けられている。N 型シリコン板の裏側にもアルミニウム電極が取り付けられている。逆バイアス電圧を掛けると、P 型シリコンの接合面から空乏層が広がっていく。この広がりがシリコンセンサーのほぼ厚みまで達した時を完全空乏化と呼び、その時の電圧を完全空乏化電圧 V_d と呼ぶ。

図 3.2 のように、空乏層中を荷電粒子が通過すると、クーロン力でシリコン原子が電離され、軌跡 $1 \mu\text{m}$ あたり 80 程度の電子-正孔対が、軌跡に沿って発生する。本研究で用いる厚さ 650

μm の PSD では、1 MIP で 176.3 keV のエネルギーを損失する。電子正孔対生成に必要なエネルギーは、3.62 eV と知られているため、生成される電子正孔対の数は 48700 となる。それを電荷に換算すると、7.8 fC となる。またイオン化エネルギー以上のエネルギーを持つ光子が通過する場合も電子正孔対を生成することができる。空乏領域には他の正孔や電子がほとんど存在しないため、内部電場によって再結合が起こらずに長距離を移動することができる。それによって、結晶内に電流が発生し、P 層と N 層から電極を取り出し、外部に増幅器を接続すれば粒子の通過が検出でき、通過した荷電粒子のエネルギーを測ることができる。

一方、空乏化していない領域では、電界も小さく、発生した正孔と電子はすぐに再結合を起こすため、電荷が発生しても信号にならない。また同様に、空乏層内に発生した信号のみが検出されるため、空乏層の厚さ d が小さい場合、発生する電子正孔対の数も減少するため、読み出す信号も少なくなる。すなわち、空乏層の厚みに比例して信号が増加する。従って、シリコンセンサー内で発生する信号電荷を効率的に測定するためには、シリコンセンサーの厚みまで完全に空乏化させる必要がある。

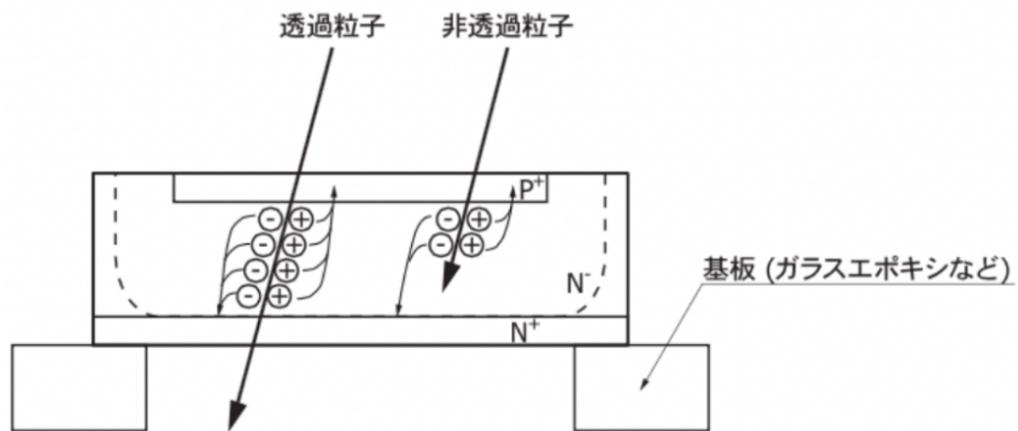


図 3.2 シリコンセンサーの断面図

第 4 章

高位置分解能センサー

4.1 PSD (Positon-Sensitive silicon Detector) について

PSD とは Position Sensitive silicon detector の略称である。PSD はレーザー等の光学においては、位置・角度・歪みの測定、レンズの反射・屈折の測定、測距装置など様々な分野で用いられている。

従来の ECAL で用いられるシリコンセンサーにおいては 図 4.1 中の左図のように、空乏層である有感領域を荷電粒子が通過すると電子正孔対を生成しながらエネルギーを検出器内で失っていく。逆バイアス電圧を印加することによって、図 4.1 のように正孔は P^+ パッドに移動する。さらに、 P^+ パッドの上部は測定電極に覆われているため信号電荷は直接電極に到達することができ、そのまま信号の読み出しを行う。しかし、図 4.1 中の右図のように、PSD ではセンサー表面に P^+ パッドの抵抗層を設けることで、信号電荷を抵抗分割し、その電荷比を四隅にある電極で読み出す。その得られた電荷比を用いて入射位置の再構成を行う。このため、PSD を用いることで、読み出しチャンネルの増加を最小限に抑えながら、位置分解能の向上が期待できる。

PSD は、ECAL 内においては、ヒット密度がシャワーの最大領域よりも非常に小さい ECAL 最内層で使用することができる。これは、各粒子の広がりが各粒子の測定精度より大きいためである。ECAL の最内層で PSD を用いることで、PSD によって角度分解能が求まり、位置分解能の向上を図ることができる。PSD の 1 cm^2 セルでの位置分解能は 0.5 mm であると予想される。これは、 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ セルの従来のパッドでの分解能よりも大幅に性能が良い。ECAL でより良い位置分解能を出す利点には主に 2 つある。まず、2 つの光子からの π^0 の再構成を改善できること、次に改善された位置分解能は π^0 再構成の kinematic fit に使用でき、ジェットエネルギー分解能の改善につながることである。

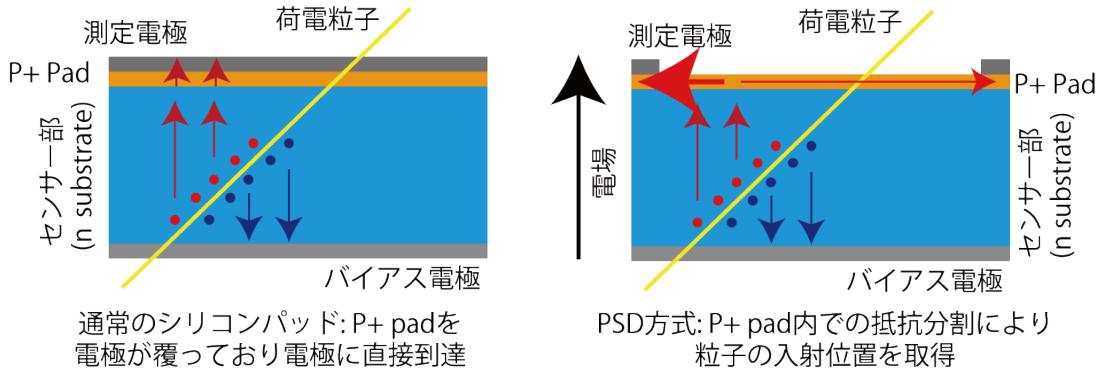


図 4.1 シリコンセンサーと PSD の内部構造の比較。左図が従来の ECAL で用いられるシリコンセンサー、右図が PSD の断面図を示している。

4.2 先行研究

九州大学で以前に行われた PSD の研究 [8] では、1 ピクセルが 7 mm 角のセンサー（図 4.2）に対して、 $500 \mu\text{m}$ 間隔でレーザーを照射していき、四隅の電極から電荷比を読み取って再構成した。図 4.2 のようにセンサー中心を原点にとり、四隅の電極から読み出される電荷量を $Q_1 \sim Q_4$ とし、式 4.1 と 4.2 を用いて電荷量の重心位置を再構成位置とした。

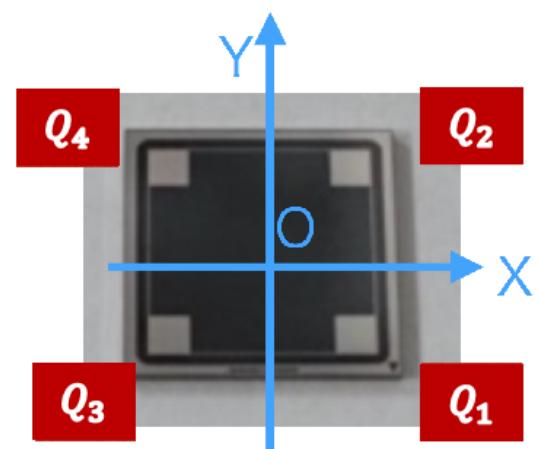


図 4.2 先行研究で使用した test chip [8]

$$X_{\text{rec}} = \frac{(Q_1 + Q_2) - (Q_3 + Q_4)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (4.1)$$

$$Y_{\text{rec}} = \frac{(Q_2 + Q_4) - (Q_1 + Q_3)}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \quad (4.2)$$

この結果によると、レーザーを実際に照射した位置（図 4.3）に対し、再構成したものが図 4.4 になり、ピクセル端部でグリッドの歪みが大きいことが分かった。また、ダイナミックレンジは 1 セルの $7000 \mu\text{m}$ に対して、 x 方向が 0.33、 y 方向が 0.34 と非常に小さいことが分

かった。ここでダイナミックレンジとは、レーザーをピクセルの x, y 座標の最小値から最大値まで照射した際に、再構成によって得られた点の x 座標と y 座標のそれぞれの最小値と最大値の幅の、ピクセル幅 $7000 \mu\text{m}$ に対する比率である。式 4.1 と 4.2 の最大値と最小値はそれぞれ $-1, +1$ であるためダイナミックレンジは理想的には 2 に近づく。ここで、 $7000 \mu\text{m}$ は 2 に相当する。先行研究においては放射線読み出しに適した読み出し回路でなかったため、放射線による測定は行っていない。先行研究の結論として、再構成位置の読み出しに成功した。

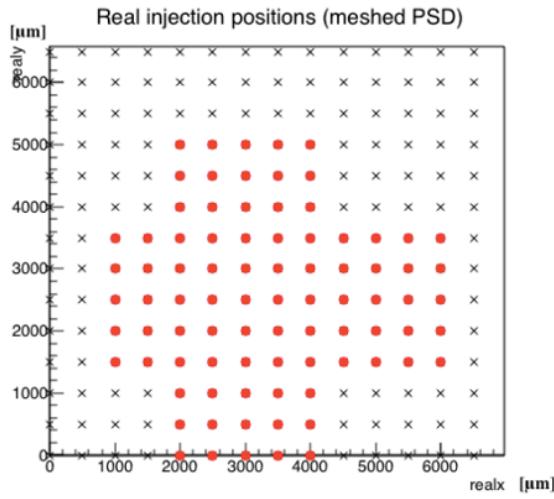


図 4.3 実際のレーザー照射位置 [8]

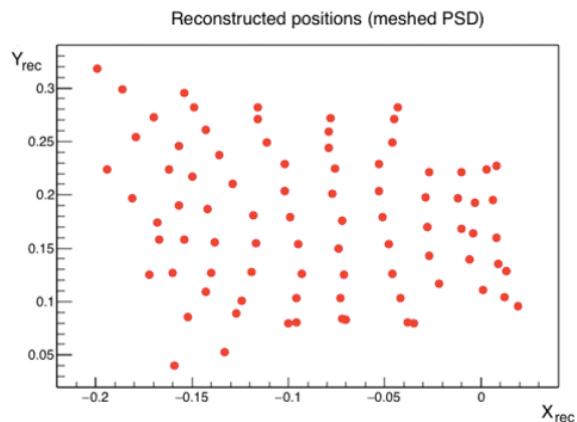
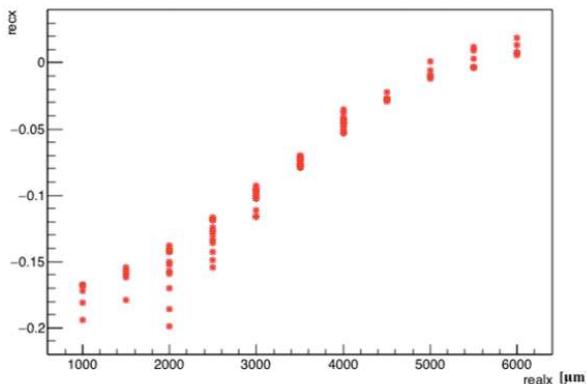
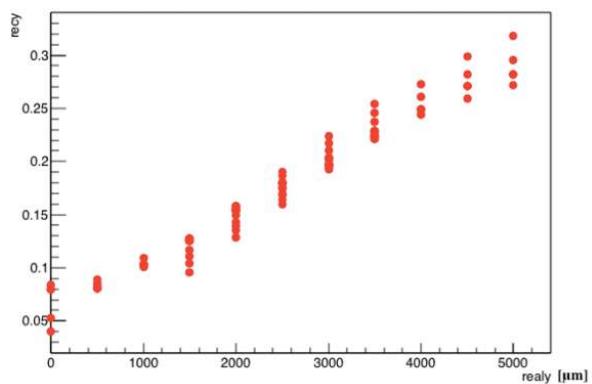


図 4.4 再構成した位置 [8]



(a) X 座標



(b) Y 座標

図 4.5 test chip の linearity[8]

4.3 新 PSD の仕様

まず、本研究で用いる PSD の概要について表 4.1 に示す。前節において、ダイナミックレンジが小さいという問題点があったが、その解決策として、現在我々が使用している PSD ではいくつか改良が加えられている。ダイナミックレンジが小さいのは、センサー抵抗層の抵抗

製造会社	浜松ホトニクス
型番	S10938-7008
サイズ	22 × 22 mm ²
セルサイズ	5.5 × 5.5 mm ²
セル数	4 × 4 = 16
厚さ	650 μm
完全空乏化電圧	150 V

表 4.1 PSD センサーの概要

値に対しての読み出しインピーダンスの値が大きいため、それを無視できないということが分かった。そのため、抵抗層の抵抗値を上げる必要が出てきた。一方、抵抗値を上げ過ぎてもノイズが多くなる点は否めない。そのため最適な抵抗値も探る必要がある。従来の PSD では抵抗層の P⁺ はメッシュ方式（図 4.6 左）を用いていた。この方式だと、抵抗値をコントロールするためにはメッシュを作り直す必要があり、コストが高くなってしまう。また、メッシュ方式では抵抗値をそこまで高くできない。そのため改良版 PSD では P⁺ ドット方式（図 4.6 右）を用い、その上に抵抗層を配置することで、抵抗層の厚さによって抵抗値を上げたりとコントロールでき、マスクを変える必要がなくなる。このため、現在の PSD ではセンサーの半面にドット方式がもう半面にメッシュ方式が比較のため使用されている。

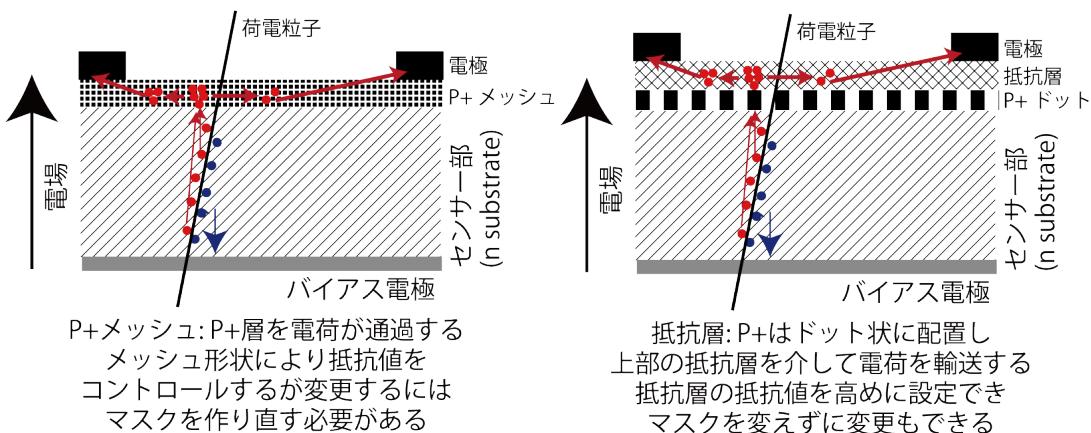


図 4.6 従来の PSD と新 PSD の内部構造の比較

図 4.7 のように PSD 中心を原点として x 軸をとり、両端に読み出し電極 (ch0, ch1) を持つような 1 次元 PSD の場合を考えると、入射粒子の再構成位置 X_{rec} は式 4.3 で表される [9]。

$$X_{rec} = \frac{L_X}{2} \frac{I_1 - I_0}{I_0 + I_1} \quad (4.3)$$

ここで、 L_X は読み出し電極間の距離、 I_0, I_1 はそれぞれ電極 ch0, ch1 における出力電流である。図 4.7 中の r は PSD の抵抗分割に関する読み出しインピーダンス値であり、 $R_0 + R_1$

は PSD 内の両端の電極間の抵抗値に相当する。ここで、ch0 と ch1 における電位が等しく、読み出しインピーダンスがチャンネル間で等しいとすると、 X_{rec} は

$$X_{rec} = \frac{L_X}{2} \frac{R_0 - R_1}{R_0 + R_1 + 2r} \quad (4.4)$$

となる。 $r = 0$ のとき $X_{rec} = X_0$ 、 $r = r$ のとき $X_{rec} = X_r$ とすると、読み出しインピーダンス r による検出誤差 E は、

$$E = X_r - X_0 = L_X \frac{R_1 - R_0}{R_0 + R_1} \frac{1}{\frac{R_0 + R_1}{r} + 2} \quad (4.5)$$

となる。よって、PSD 電極間の抵抗値 $R_0 + R_1$ に対して、読み出しインピーダンス値 r が大きいとダイナミックレンジが減少し、検出誤差 $|E|$ が大きくなることが分かる。

図 4.8、4.9 は、それぞれ PSD1、PSD2 の写真である。図 4.9 のように隣り合うセルの読み出し電極を共有することで、読み出しチャンネルの増加を最小限に抑えることができる設計になっている。PSD を従来のシリコンパッドと読み出しチャンネル数を変えずに、ECAL の最内層に実装する場合を考えると、セルサイズはほとんど変わらない。そのため、位置分解能の精度を向上させることができる。このことを具体的に示す。従来のシリコンセンサーの設計としては 16×16 セルのセンサーでセルの大きさが 5.5 mm である。これと同じチャンネル数の PSD を ECAL に実装する場合、隣り合うセルの電極が共有されている PSD は、 15×15 セルとなり、セルサイズは理論上 $5.5 \times 16/15 = 5.86$ mm となる。

本研究において用いたのは PSD1 の 2 種類のチップであり、それぞれ PSD1-1 (図 4.10) と、PSD1-2 (図 4.12) である。

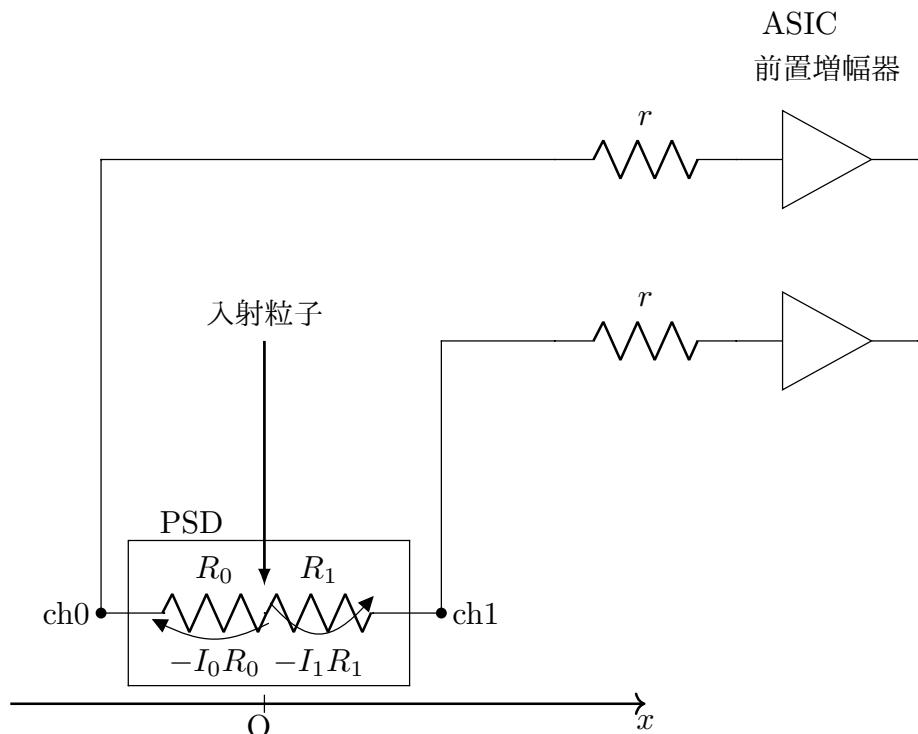


図 4.7 1 次元 PSD における抵抗分割と読み出しインピーダンスとの関係

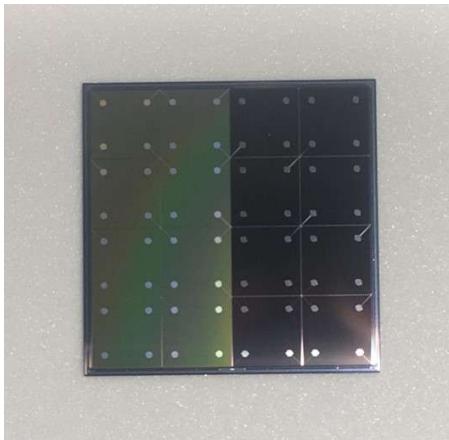


図 4.8 PSD1 の写真

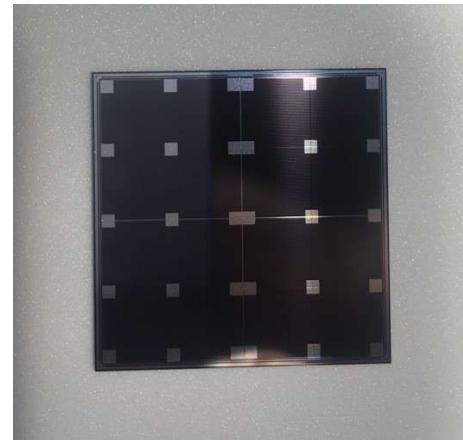


図 4.9 PSD2 の写真

まず、PSD1-1 に関しては、図 4.10 の赤で示された部分の抵抗値が小さく、P⁺ メッシュ方式を用いており、先行研究で用いた test chip の抵抗値と等しい。青の部分は P⁺ ドット方式を用いており、赤の部分の抵抗値の 10 倍、20 倍、30 倍のものを用意した。3 種類設けたのは読み出しインピーダンスの影響が問題にならないような最適な抵抗値を探るためである。図 4.11 は、PSD1-1 の 1 セルを表した図である。端部に極めて小さい電極を設け、読み出しパッドの役割を果たす。接続用パッドは直径 0.5 mm で辺から 1 mm 程度の位置に位置している。これは、端部にレーザーを照射することで端部での歪みを測定するためである。

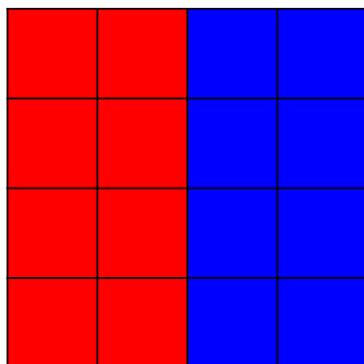


図 4.10 PSD1-1 : 4×4 セルのセンサー 1 枚
当たり 2 種類の異なる表面抵抗値のパターン
が存在する。

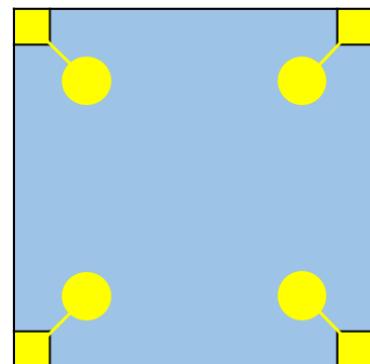


図 4.11 PSD1-1 の 1 セル

次に、PSD1-2 に関しては PSD1-1 の各セルの縁に、図 4.13 のような低抵抗の線抵抗を設けた。この低抵抗ライン以外の面部は、PSD1-1 と同じであり、1 ピクセルは図 4.14 のようになる。低抵抗ラインの線抵抗値は、センサーの上下で 2 種類設けた。図 4.12 の赤と青の部分の線抵抗値は各セルの表面抵抗値の 1/4 倍、紫と水色の部分の線抵抗値は各セルの表面抵抗値の 1/8 倍である。従って、併せて 4 種類の抵抗パターンを一つのセンサーに実装することになる。赤と紫の部分は P⁺ メッシュ方式を用いており、青と水色の部分は P⁺ ドット方式を用いている。このような低抵抗ラインを設ける理由は、表面抵抗値に対して、低抵抗ラインの線

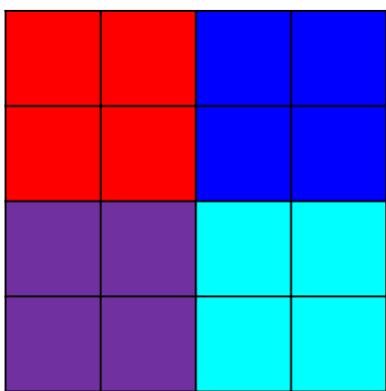


図 4.12 PSD1-2 : 4×4 セルのセンサー 1 枚当たり 4 種類の抵抗パターンが存在する。

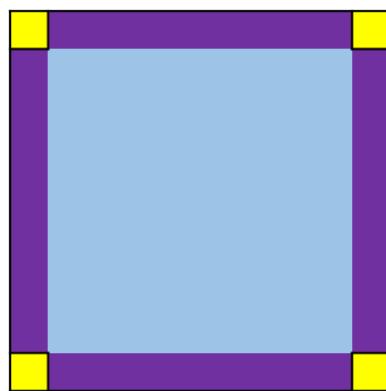


図 4.13 PSD1-2 の 1 セルにおける低抵抗ライン

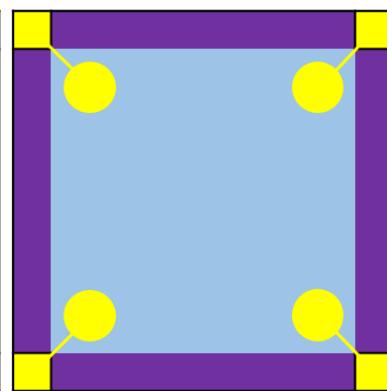


図 4.14 PSD1-2 の 1 セル

抵抗値を最適なものにすることで図 4.15、図 4.16 のように歪みの抑制が可能となるからである。[10]

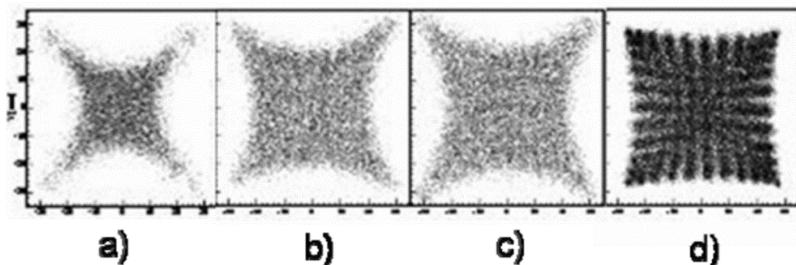


図 4.15 厚さ $250 \mu\text{m}$ の PSD の 2D 画像パターンでの α 線源による位置再構成の測定結果 [10]。a は低抵抗ラインなし。b、c 及び d は低抵抗ラインを設けている。表面抵抗値に対する線抵抗値を変化させた場合、このような結果が得られた。

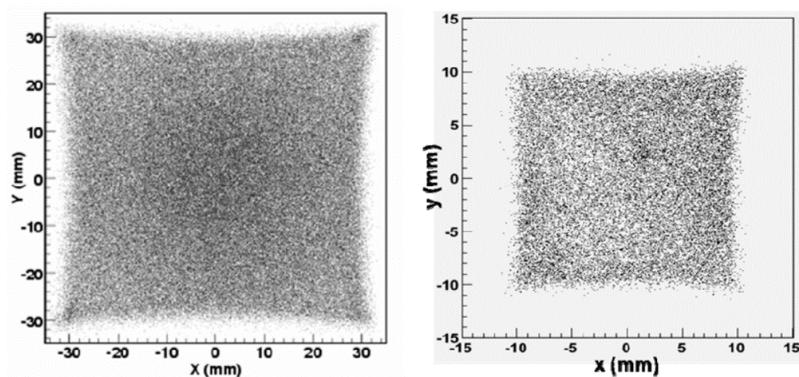


図 4.16 [10] における最も歪みを減らすことができた場合の結果。

4.4 測定系（読み出しの概要）

本研究では、SKIROC2 シリーズ ASIC である SKIROC2CMS 及びその評価基板を用いて PSD の信号読み出しを行った。SKIROC2CMS とは前述の SKIROC2 シリーズの特性評価を行うためにフランスの Omega/IN2P3 グループが開発し、改良を施したものである。SKIROC2CMS は 64 個の読み出しチャンネルを備え、データ収集は 64 チャンネルが同時に行われる。アナログ信号のデータ収集の概要を図 4.17 に示す。データ収集の方法はシリコン半導体または評価基板の C_test ピン（図 4.17 左）から送る疑似信号を 3 pF のコンデンサーを介して前置増幅器に入り増幅が行われる。この時の増幅率を feedback capacitance によって調整することができる。feedback capacitance は値が小さいほど増幅率は大きくなる。前置増幅器で増幅された信号は、fast shaper、低ゲインの slow shaper（ゲインが 1）、高ゲインの slow shaper（ゲインが 10）の 3 つに分けて送られる。

- fast shaper

SKIROC2CMS は信号に対して ASIC 自身で自己トリガーを発行することができる。fast shaper はそのトリガーをつくるラインである。fast shaper に送られた信号は CRRC shaper によって増幅され、時定数を調整される。その後、トリガー閾値を超えた信号がトリガーとして成形され、遅延される。トリガー閾値は、10-bit DAC によって 64 チャンネル一斉に設定できる。

- slow shaper

高ゲインと低ゲインの slow shaper は CRRC shaper によって preamplifier の信号に対してそれぞれ増幅率 10 と 1 で増幅される。fast shaper からの信号によってトリガーされる。SKIROC2A よりも時定数が短いため信号の立ち上がりが早く、そのため時間分解能に秀でている。しかし、ノイズが SKIROC2A よりも大きくなることが分かっている。本研究では低ゲインは使用せず、高ゲインを使用した。

SKIROC2CMS では、メモリセルがリングバッファになっており、13 個のメモリセルで 1 メモリセル当たり 25 ns の間隔でデータ取得を行う。読み出しの際には、ピーク値からある一定数分のメモリセル過ぎたところで STOP 信号が入力され、STOP したメモリセルから 13 個前までのメモリセルのデータを読み出す。

本研究では、SKIROC2CMS 用評価基板に後述のセンサー基板を HRS 社製のコネクタで直接接続し、ノイズの低減を図った。評価基板に実装された外部接続端子は 68 ピンのコネクタ用（端子 1）と横 8 mm 縦 3 mm 間隔で 3 列 24 行に並んだ（端子 2）2 箇所に実装されていた。その後に、範囲が広い端子 2 に HRS 社製コネクタを実装するための変換基板がはんだ付けされた。本研究では、その変換基板に実装されたメスコネクタに対して、センサー基板に実装された HRS オスコネクタを接続した。さらに、センサー基板に導電性接着材により接着された PSD に対して高電圧を印加するための HV 基板を PSD 裏面に導電性テープを介して

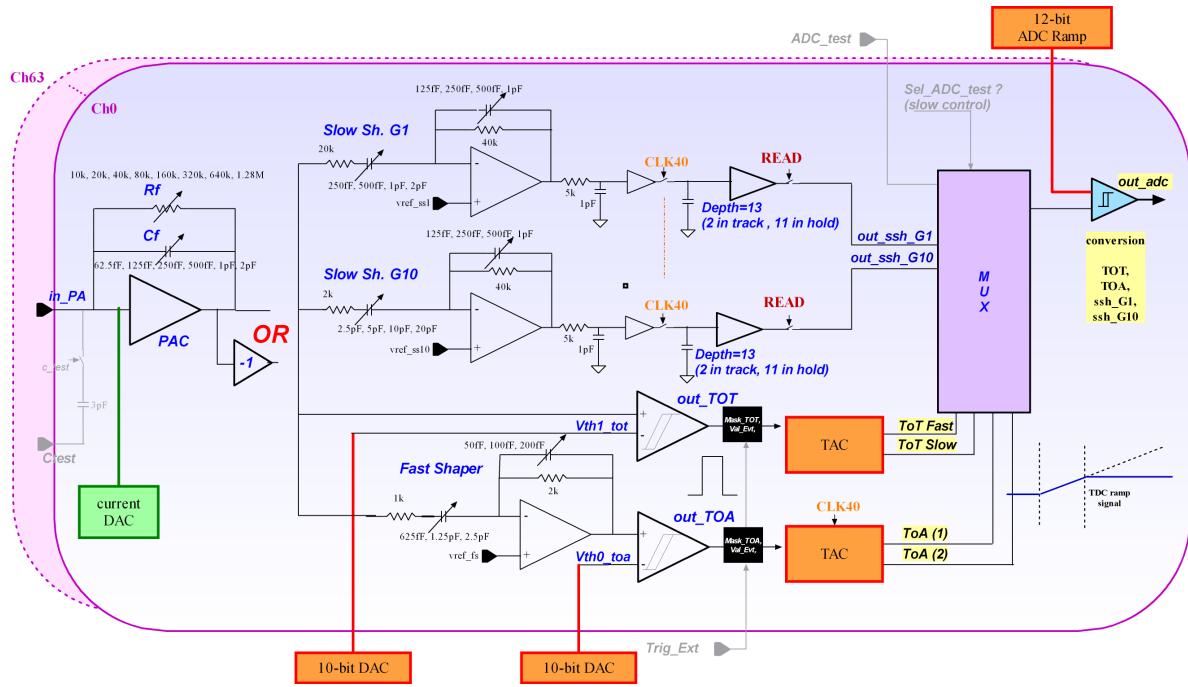


図 4.17 SKIROC2CMS のアナログ部

接着した。PSD はセンサー基板と HV 基板とに挟まれる形をとる（図 4.18）。また、先行研

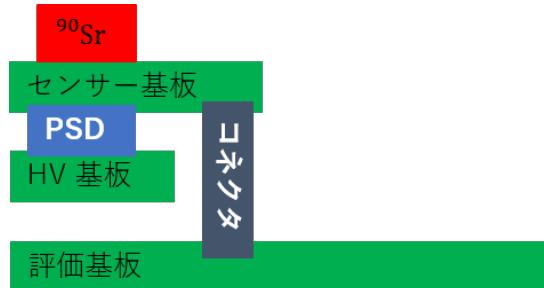


図 4.18 読み出しの模式図

究 [11] より HV 基板に高電圧フィルタを実装することで電圧減由来のノイズを大幅に低減できることが分かっており、本研究においても HV 基板に高電圧フィルタを実装した。実験において高電圧は、ピコアンメーターから高電圧フィルタを介して印加した。

本来であれば、よりノイズ特性に優れた SKIROC2A の ASIC が実装された評価基板を使用する予定であったが、SKIROC2A の ASIC チップが故障したため、本研究においては、SKIROC2CMS を実装した評価基板を急遽用いることとなった。

外観

図 4.19 がセットアップの写真である。図 4.19 の左下にあるのが PSD とそれが接続されているセンサー基板になる。また、図 4.19 の上から伸びている LEMO ケーブルは ASIC のアナログ信号を確認する analog probe という端子につながっており、アナログ信号を出力する

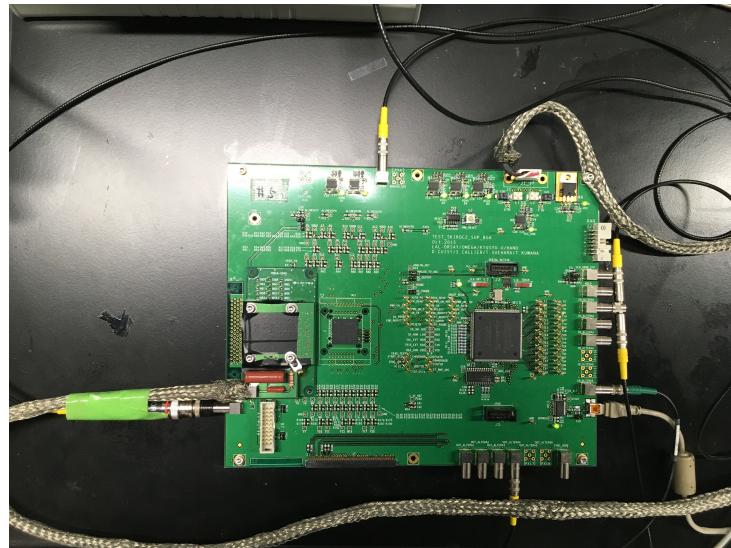


図 4.19 セットアップ

ため、オシロスコープへと接続されている。図 4.19 の右上は電源ケーブルであり、接地線で覆われている。さらに、そのすぐ右端のねじ止めに固定されており、評価基板の接地線へと接続されている。また、START 信号を図 4.19 の右下 IN_ALTERA6 へ入力し、図 4.19 の下側 OUT_ALTERA4 から出力される STOP 信号を図 4.19 の右側 IN_ALTERA1 へ入力すると同時にオシロスコープへ接続し、波形が観察できるようになっている。図 4.19 の右下側にあるミニ USB 端子は PC へと接続されている。

本研究における測定については、START 信号は 5 Hz、 $3.3 \text{ V}_{\text{pp}}$ 、 $1.65 \text{ V}_{\text{DC}}$ 、width $1 \mu\text{s}$ の矩形波を用いた。

PSD の光漏れを防ぐためにセンサー基板と HV 基板で挟まれたセンサーの周りとセンサーの via（基板の面間接続のための小孔）で見えている部分をブラックテープで覆った。その様子を図 4.20 ~ 4.23 に示した。

4.5 センサー基板の作成

センサー基板の作成に当たっては、4 層基板で設計することにより表面、裏面を接地線で覆い内層で配線を行って、ノイズの低減を図った。また、実装するコネクタを HRS 社製の新しいものに変更した。具体的な基板作成の工程を示す。まず、OrCAD を用いて回路図の設計を行った。その後、PSD 用のセンサー基板を CADENCE allegro と呼ばれるソフトウェアを使用して作成した。Allegro 上では、回路データの取り込み、シンボルの配置、配線、via やメカニカルホールの設計を行った。その際、レギュラーパッド、サーマルパッド、アンチパッド、ソルダーマスクの大きさを決定した。via は全て 4 層 through via で設計を行った。また、4 層で上下の層と配線が並行にならないようにした。これはクロストークを増やさないためである。可能な限り内 2 層で配線し、外 2 層の配線は少なくなるように調整した。読み出しチャ

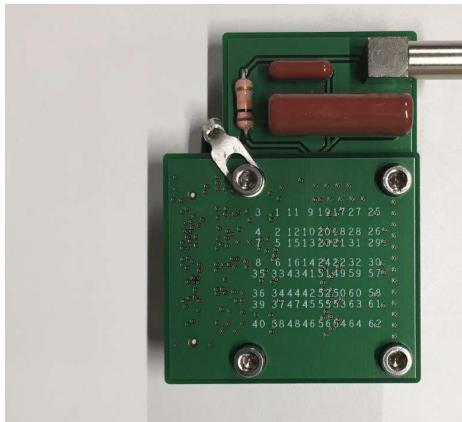


図 4.20 センサー基板と HV 基板の表面

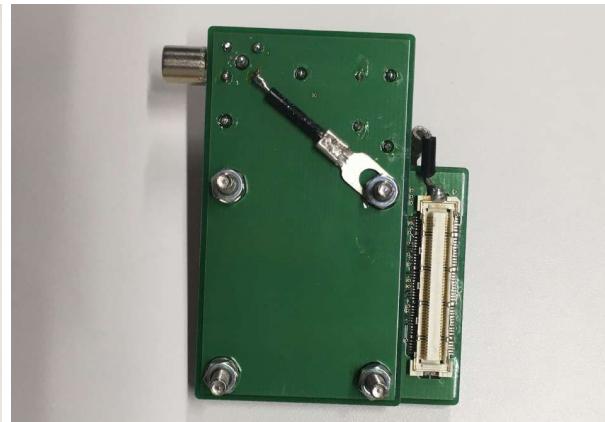


図 4.21 センサー基板と HV 基板の裏面

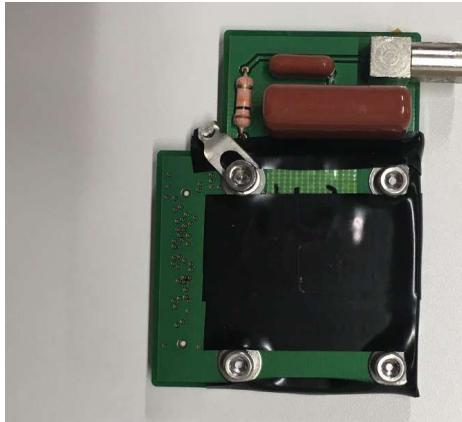


図 4.22 ブラックテープを貼った表面



図 4.23 ブラックテープを貼った裏面

ンネルが把握できるようにセンサー基板上面にシルクを入れた。以上の工程を経た設計図を図 4.25 に示す。図 4.25 左の穴付きセンサー基板は、PSD にレーザーを照射するためのものである。また、同じく図 4.25 右の穴付きではない基板に関しては線源による測定に使用した。

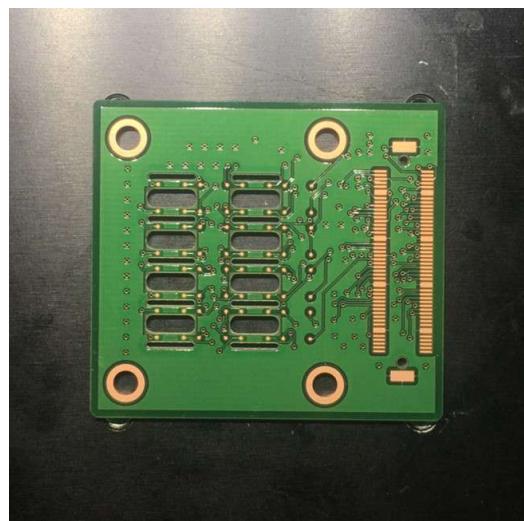


図 4.24 穴付き PSD1 用センサー基板

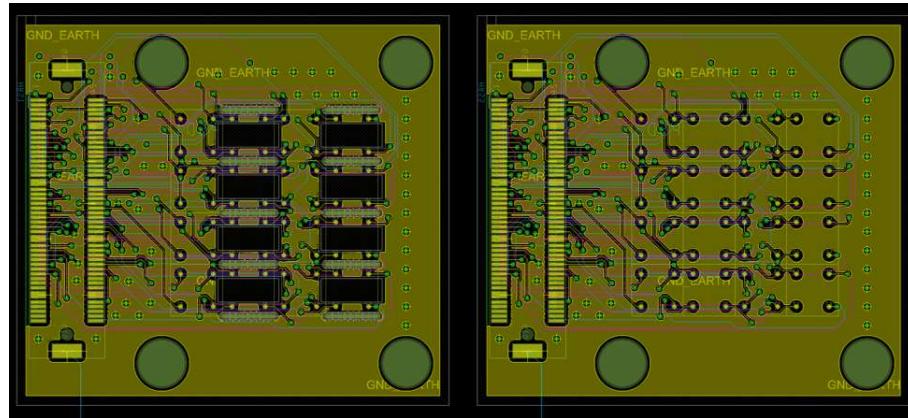


図 4.25 allegro 上での PSD1 用センサー基板

4.6 PSD のセンサー基板への接着

本研究では、センサー基板への導電性接着剤塗布を行うに当たって、武蔵エンジニアリング社製のディスペンサー（ML-808GX）と高精度汎用卓上門型ロボット（SHOTMASTER400ΩX）（ステージ）を使用した。ディスペンサーとは液体定量吐出装置であり、液体を精度良く定量供給するコントローラ及びその周辺機器の総称である。正確な位置に塗布するために卓上ロボットを用いた。

図 4.26 にセットアップを示す。塗布方法は、 y 方向はステージを使用して、 x 方向はロボットアームで移動し、塗布を行いたい座標に移動し、ディスペンサーの圧縮空気の圧力によって、シリンジから接着剤を押し出して行う。シリンジの先から銀ペーストの導電性接着剤が塗布される。センサー基板の PSD 用の電極がある面に対して接着を行う。次に、センサー基板や PSD、接着剤を固定する治具、接着剤について説明する。図 4.27 はセンサー基板固定用の治具である。基板の位置に穴があり、そこから真空吸着して、基盤が動かないようになっている。図 4.32 は PSD 固定用の治具である。基板を固定する治具と高さをそろえてある。そして、PSD 位置合わせ用の L 字型のアクリル版、その位置を合わせるためのゴム製クッショングを用いた。また、中央に穴をあけ、そこから真空吸着することによって、PSD が動かないようになっている。次に、図 4.34 はシリンジに装着させる針である。図 4.30 は塗布する接着剤を入れるシリンジを固定するための治具であり、ねじで取り外しができる仕組みとなっている。図 4.28 はセンサー輸送用の真空吸着パッド固定治具であり、1 点で PSD を真空吸着させる。図 4.29 は、上記治具を真空によって上下させる機構であり、センサー基板の塗布する面とシリンジの先に装着させるシリンジ用針（図 4.34）との距離を調節するためのものである。

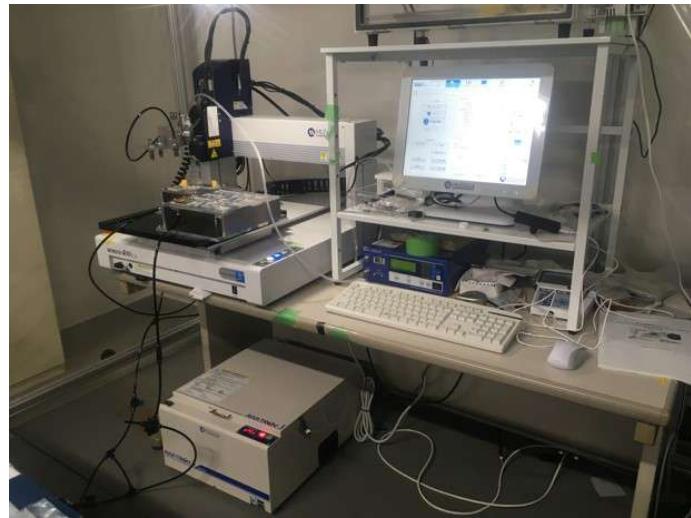


図 4.26 PSD のセンサー基板への接着のためのセットアップ

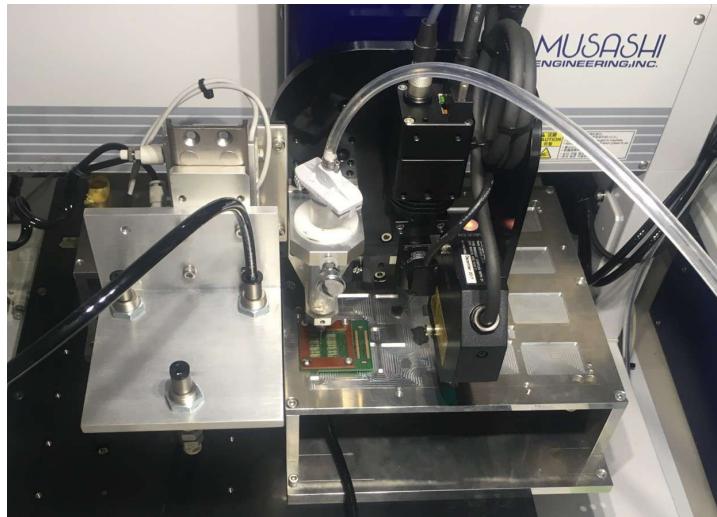


図 4.27 センサー基板固定用治具

そして、本研究で使用した接着剤を図 4.35 に示した。この接着剤は導電性接着剤であり、銀ペースト入りエポキシ接着剤（EPO-TEK 社 E4110-LV）である。接着剤の仕様を表 4.2 に示した。これは 2 液性フィラー接着剤で、エポキシ樹脂の中に銀ペーストが含まれている。透明の part A と part B に分かれており、A : B = 1 : 10 が理想的な混合比となっている。塗布量最適化のために塗布後 PSD と同じ大きさにカットした厚さ 2 mm のアクリル板を接着し、接着剤が接着後に広がっていく様子を目視で確認した。その結果、ディスペンサーの塗布圧力が 250 kPa、シリンジの針の内径が 0.18 mm、塗布時間が 0.5 秒が最適であることが分かった。

次に、PSD とセンサー基板の接着手順を表 4.3 に示す。図 4.36 の直後、可及的速やかに PSD の接着を行う。卓上ロボットに取り付けられたアームでセンサーを吸着、移動し、接着場所でアームによって基板の上からセンサーを下ろし、接着がなされる。その後は数日間接着剤が乾くまで固定したまま放置した。



図 4.28 PSD 搬送用の真空吸着パッド固定治具



図 4.29 図 4.28 の治具を真空によって上下させる機構

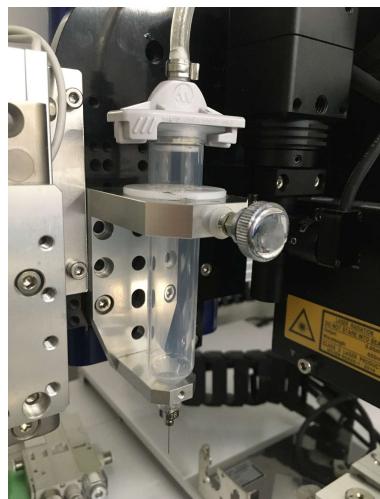


図 4.30 接着剤用シリジン固定治具



図 4.31 画像認識デバイス

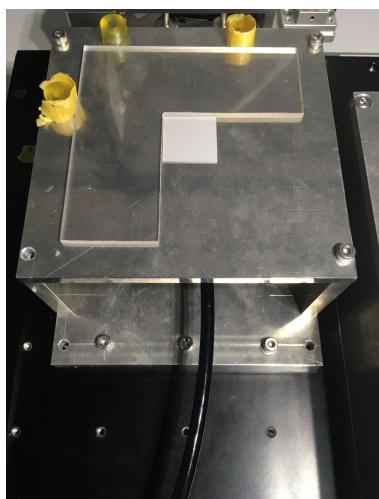


図 4.32 PSD 固定用治具

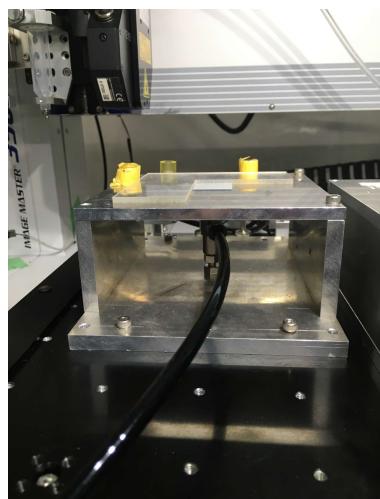


図 4.33 PSD 固定用治具(横)

混合比	A 液 : B 液 = 10 : 1
粘度 (23 °C)	3350 - 850 cPs (サラダ油程度)
2 液混合後の使用可能時間	6 時間
硬化時間	23 °C/3 日
電気伝導性	0.006 Ω (23 °C)

表 4.2 導電性接着剤の仕様



図 4.34 塗布用針



図 4.35 導電性接着剤

工程	実行内容
1	センサー基板を基板用治具に設置し、真空吸着により固定する
2	PSD を PSD 固定用治具にセットし、真空吸着により固定する
3	センサー基板の PSD パッド側の面に接着剤を塗布する (64 points)
4	PSD を真空吸着パッドで持ち上げ、接着させるセンサー基板のポイントまで搬送する
5	PSD とセンサー基板を接着させる
6	1-5 の操作を繰り返す

表 4.3 PSD とセンサー基板の接着の工程表

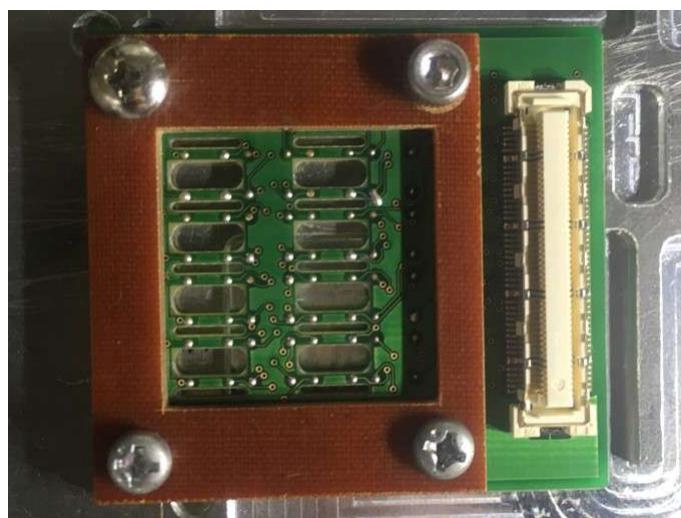


図 4.36 接着剤塗布直後の様子

第 5 章

放射線源等を用いた PSD の性能評価

ここでは、 ^{90}Sr を用いて PSD の放射線検出器としての性能について述べる。新仕様の PSD を用いて線源による再構成を行った。

5.1 パルス疑似信号を用いた性能評価

本実験は、疑似的な信号を直接 SKIROK2CMS が実装されている評価基板に入力して、PSD センサーが接続されている場合の評価基板の性能を評価する。

まず、PSD センサーを取り付けた状態でピコアンメーターから 150 V を PSD に印加し、オシロスコープで評価基板の analog probe より出力されるアナログ信号の確認、応答性の確認を行った。SKIROC2CMS では、前置増幅器の極性を正か負に選択できる。前置増幅器の極性を正にした場合、FastShaper と SlowShaper は反転されて正に出力された。ADC 値が正常に取得できるため、前置増幅器の極性は正にして測定を行った。

閾値の決定

次に測定を行う際の閾値の決定を行った。まずは、閾値 170 の場合における 19 fC、7.7 fC、3.8 fC、1.9 fC のパルス疑似信号を入力した。FastShaper が閾値を超えていた場合にセルフトリガーが作動するため、FastShaper がノイズに埋もれないことが重要である。3.8 fC と 7.7 fC の疑似信号を閾値を変化させながら、FastShaper が閾値を超えていた場合に発生する STOP 信号をオシロスコープで観察した。

閾値が 169 の場合、3.8 fC の疑似信号を入力した場合、Fast Shaper が発生している際は必ず STOP 信号も発生し、疑似信号が入力されていない際であっても STOP 信号が発生していることが分かった。閾値が 170 の場合、STOP 信号が発生している際は必ず疑似信号も入力されており、Fast Shaper も発生していること、また、疑似信号が入力されていて、Fast

Shper が発生している際でも STOP 信号が出力されないことが分かった。以上のことから、3.8 fC が閾値 169 に相当することが分かった。

次に 7.7 fC の疑似信号を入力した場合、閾値 169 では Fast Shaper が発生している際は必ず STOP 信号も発生していること、また、Fast Shper が発生していない際であっても STOP 信号が発生することが分かった。閾値 170 の場合、STOP 信号が発生している際は、必ず疑似信号が入力され Fast Shaper も発生しており、また、疑似信号が入力され FastShaper が発生していても、STOP 信号も必ず発生していることが分かった。閾値 171 の場合、STOP 信号が発生している際は必ず疑似信号が入力されているが、ごくまれに FastShaper が発生していても STOP 信号が出力されない場合があった。閾値 172 の場合、閾値が 171 の場合と比較して、STOP 信号の発生頻度が低いことが確認できた。

ノイズ対策

次にノイズ対策を行った。 ^{90}Sr による信号は、PSD では信号が 4 分割されるため、従来のシリコンセンサーと比べて波高が低い。そのためノイズに埋もれやすい。従って、ノイズ対策が非常に重要になる。次のような方法でノイズ対策を行った。評価基板より出力される STOP 信号をオシロスコープで確認しながら、同時に 7.7 fC のパルス疑似信号を評価基板に入力し、オシロスコープでもその疑似波形が見えるようにした。ノイズがない場合は、疑似信号の周波数と STOP 信号の周波数は一致しているが、ノイズが発生した際には、STOP 信号が疑似信号の頻度より多く出力される。このようなセットアップにおいてノイズ対策を行ったうえで、ノイズ低減の効果があった項目について列挙する。

- センサー基板と評価基板間のコネクタ接続部分の接触具合
- 評価基板の電源ケーブルを接地線で覆った。その接地線は電源の接地線と評価基板の接地線に接続した。
- HV 基板から HV 電源へは LEMO ケーブルを用いているが、それを接地線で覆った。その接地線は HV 基板の LEMO コネクタの接地部分と疑似信号入力用の減衰器の接地部分に落とした。これが一番効果的であった。
- 電磁遮蔽用に HV 基板をアルミニウム箔で覆った。

HV 基板には高電圧フィルタを用いて電圧減からのノイズを低減しているが、その HV 基板から PSD 用センサー基板への接続 LEMO ケーブルにもノイズが乗りやすいことが分かった。これは、評価基板、オシロスコープ、パルスジェネレータ、評価基板用電源などすべての電源に対して LEMO ケーブルを近づけた場合にノイズが乗っていることを確認したためである。

このようなノイズ対策を行ったうえで、ノイズレートと線源による信号レートを測定した。測定方法としては、閾値を変えながら PSD1-2-2 の STOP 信号の周波数の計測を行った。評価基板より出力される STOP 信号を NIM 信号に変換し、visual scalar を用いてカウントを測定した。 ^{90}Sr 線源をセンサー基板の上に置いて、350 秒間、チャンネル 38 と 45 を無効化

した状態で STOP 信号のカウントの測定を行った(チャンネルの無効化については後述する)。線源はセンサー基板の上に直接置いているため、PSD と線源との距離はセンサー基板の厚さに等しく、1.6 mm である。このカウントから信号レートを求めた。この STOP 信号は 64 チャンネルのうちの チャンネル 38 とチャンネル 45 以外のどこかのチャンネルでトリガーが発生した際の信号である。線源が置いてある状態での STOP 信号の周波数は信号レート、線源を置いていない状態の STOP 信号の周波数はノイズレートとした(図 5.1)。

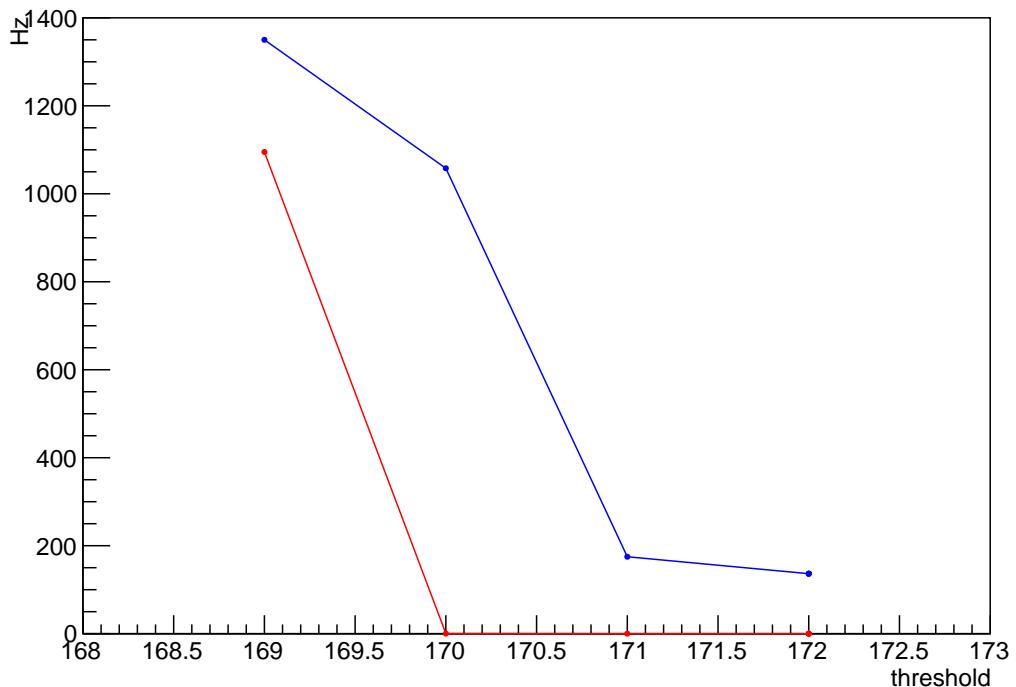


図 5.1 ノイズレート(赤)と信号レート(青)。横軸は閾値、縦軸の単位は Hz とした。

線源の信号レートがおよそ数百 Hz だとすると、ノイズレートは、1 kHz 以下でないと S/N 比が小さくなってしまう。また、信号数は線源のレートと検出効率を掛け合わせたものになる。そのため閾値を上げると、検出効率が下がり、信号数も減ってしまうため可能な限り閾値は下げる必要がある。従って、図 5.1 からこの 2 つの条件を満たすために、閾値を 170 に決定した。

無効化したチャンネルについて

本研究では、全チャンネルの閾値を 170 に設定したうえで、チャンネルの無効化を行った。線源を置かずに、センサーだけ取り付けた状態で閾値 170 でデータ取得を行う。そして得られたデータより、他のチャンネルと比較して 10 倍以上のトリガーヒットを持つチャンネルは無効化した。図 5.2 は PSD1-2-2 を評価基板に接続し、線源を周りに置かない状態における、トリガーが発生したチャンネルの分布である。図 5.2 を見ると、ch38 と ch45 が他のチャンネ

ルと比べ数十倍もトリガーが発行したことが分かる。この二つのチャンネルについては以降の PSD1-2-2 のデータ取得では、トリガーをオフにして測定を行った。同様に他のチップ、他のシリアル番号の PSD についてもチャンネルの無効化を行った。それを表 5.1 に示す。

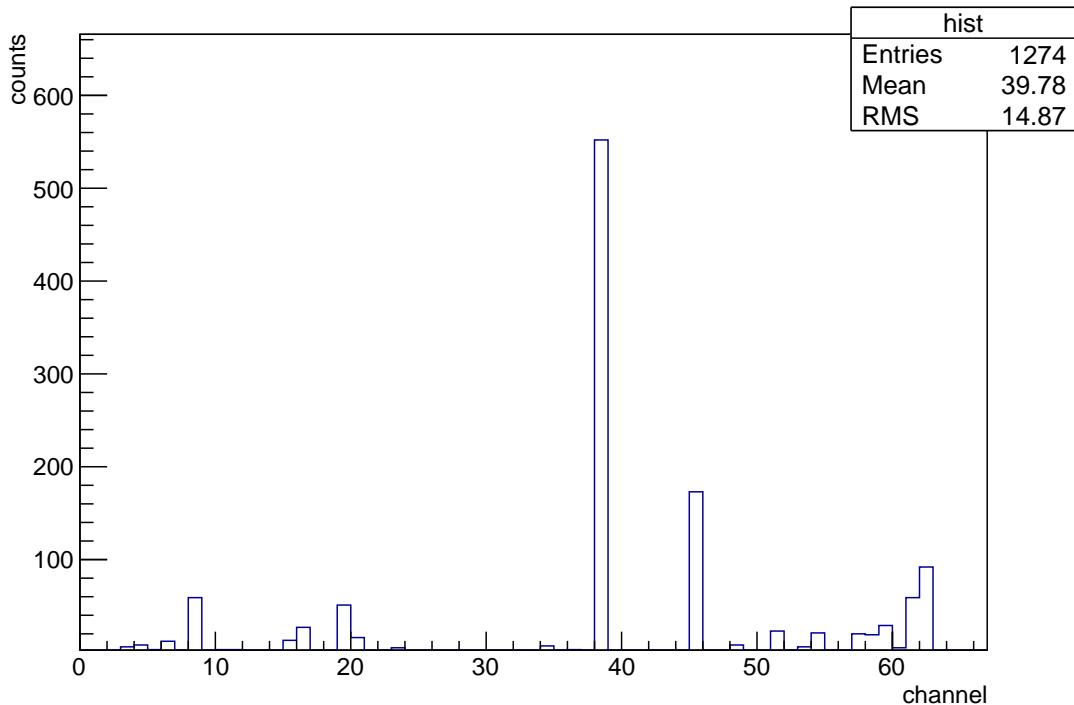


図 5.2 PSD1-2-2 におけるトリガーが発生したチャンネルの分布

PSD のチップとシリアル番号	マスクチャンネル
PSD1-1-3	45, 61
PSD1-1-4	42, 54
PSD1-2-1	16, 17, 18, 19, 45
PSD1-2-2	38, 45
PSD1-2-3	無し

表 5.1 無効化したチャンネルのリスト

5.2 ^{90}Sr を用いた PSD の性能評価

ここでは、 ^{90}Sr を用いての PSD の位置検出器としての性能について記述する。用いた線源については表 5.2 にまとめた。PSD の仕様については表 5.3 にまとめた。

物質の阻止能は最小値 (MIP) を取った後はほとんど一定の値を取る。エネルギーが高く、シリコン を通り抜ける β 線の信号の大きさは有感領域の厚みに比例する。 ^{90}Sr 線源は PSD

線源	粒子	エネルギー	強度 [Bq]
^{90}Sr	β	2.28MeV	9.54×10^3

表 5.2 使用線源についての概要

チップの種類	シリアル番号	表面抵抗の値	低抵抗ラインの有無	センサー 1 枚中の抵抗パターンの数
PSD1-1	3	20 倍	無	2
PSD1-1	4	20 倍	無	2
PSD1-2	1	10 倍	有	4
PSD1-2	2	10 倍	有	4
PSD1-2	3	20 倍	有	4

表 5.3 PSD の仕様に関する一覧表。例えば、PSD1-1-3 と呼ぶとき、PSD1-1 のシリアル番号 3 番を指す。

用センサー基板の上に直接置いた状態 (PSD と線源の距離はセンサー基板の厚さと等しく 1.6 mm である) と、浮かせて 12 mm の距離をあけた場合との比較を行った。 ^{90}Sr 線源を机の上において評価基板を下向きに ^{90}Sr 線源の上に設置した。 β 線が通過するのはセンサー基板のみとし、 β 線が PSD に到達するまでに存在する物質量が最小化した。

線源を置かない場合、信号は取得できなかったことから評価基板を用いたセットアップで β 線の信号を取得できることの確認ができた。

^{90}Sr から放射される β 線の多くは、650 μm のシリコンセンサーを突き抜けてエネルギーを損失する。 ^{90}Sr は MIP に非常に近いため、シリコンセンサーの MIP を疑似的に測定することに適している。今回の実験では、650 μm の PSD センサーに 150 V を印加して実験を行い、MIP の測定、位置の再構成の評価を目的とする。

測定結果

PSD とチャンネルの対応表を表 5.4 に示す。

まず、各チップにおいて、ペデスタルの平均値と幅を算出した。ペデスタルは信号が入力されていないときの ADC の基準値である。ペデスタルの標準偏差をペデスタルの幅とした。各チャンネル、各メモリセルごとに取得したデータの全イベントにおいて作成したペデスタルのヒストグラムを式 5.1 に示すガウス関数でフィッティングを行い、その平均値 (μ) と幅 (σ) を算出した。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.1)$$

ペデスタルの例とそれをガウス関数でフィッティングを行った分布の例を図 5.3 に示した。これは、PSD 1-2-2 において線源を 1.6 mm 離した時のチャンネル 24、メモリセル 10 番の全

61	63	53	55	45	47	37	39
60	62	52	54	44	46	36	38
57	59	49	51	41	43	33	35
56	58	48	50	40	42	32	34
29	31	21	23	13	15	5	7
28	30	20	22	12	14	4	6
25	27	17	19	9	11	1	3
24	26	16	18	8	10	0	2

表 5.4 PSD ピクセルの場所とチャンネルの対応表

イベントにおける分布である。

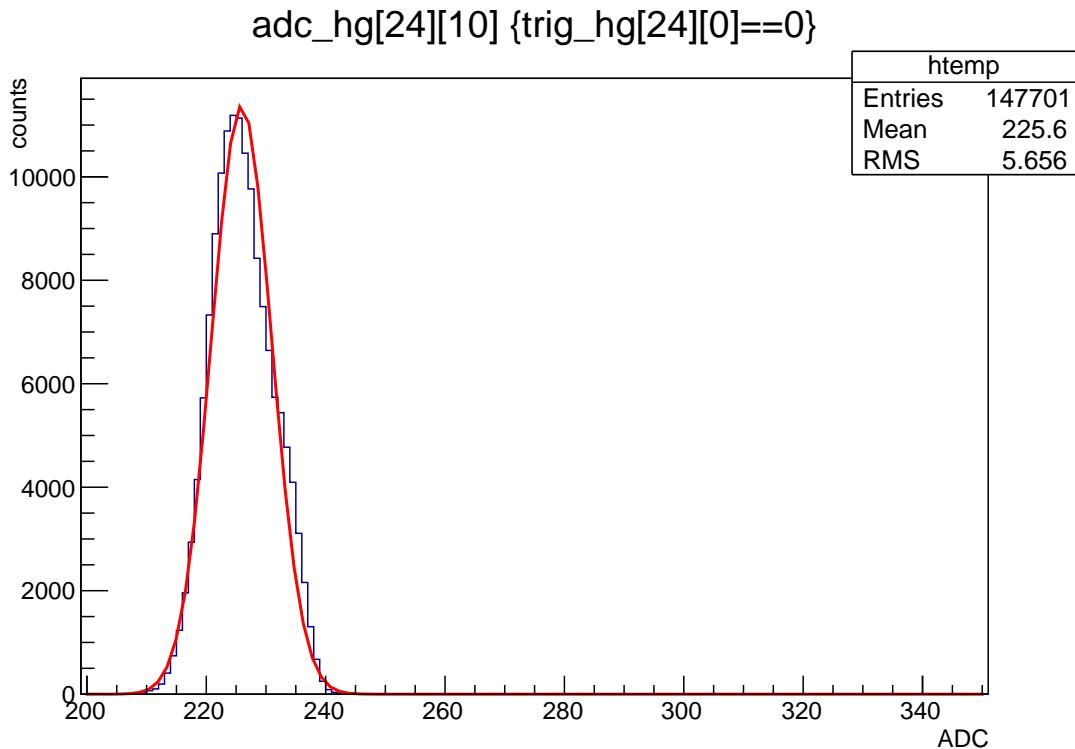


図 5.3 PSD1-2-2 における線源を 1.6 mm 離して測定した際のチャンネル 24、メモリセル 10 番のペデスタルの ADC 分布及びそれをガウス関数でフィッティングを行った例。

次に、ペデスタルの平均値と幅の各チャンネルにおける分布を求めた。図 5.4 では、PSD1-2-1 を用いて、 ^{90}Sr 線源を 12 mm 離した状態で 10 時間ほど取得したデータを用いて、各チャンネルにおけるメモリセル 0 番のペデスタルの平均値を算出し、その分布を示した。図 5.5 では、PSD1-2-1 を用いて、 ^{90}Sr 線源を 12 mm 離した状態で 10 時間ほど取得したデータを用いて、各チャンネルにおけるメモリセル 0 番のペデスタルの幅の分布を示した。

SKIROC2CMS はリングバッファで読み出しを行っており、前述のように一定のメモリセ

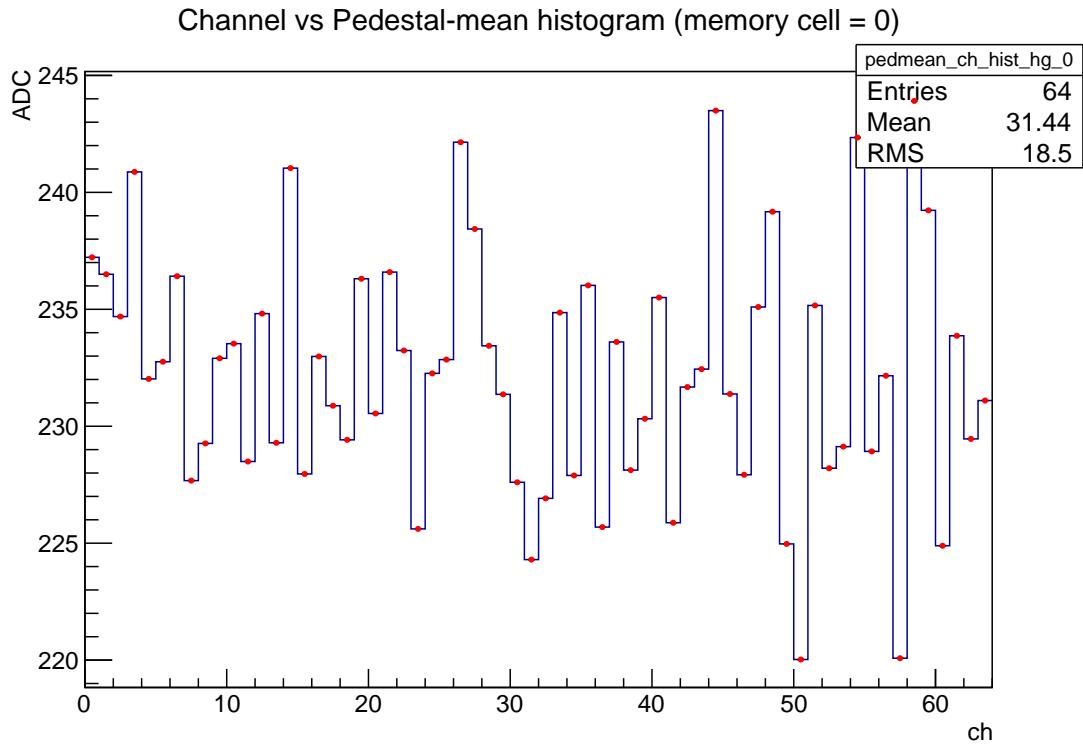


図 5.4 PSD1-2-1 における各チャンネルのペデスタルの平均値分布

ル数だけずれたメモリセルから 13 個のメモリセルのデータの読み出しが行われた。ここでは、 ^{90}Sr の線源を PSD から 1.6 mm 離した状態で、PSD1-2-2 を用いて 8 時間ほど取得を行ったデータを 6 通りのズレの値で固定して ADC 値を計算した際の ADC の分布を比較した。図 5.6 に、ズレの値が 4 の場合、5 の場合、6 の場合、7 の場合の全チャンネル全イベントで足しあげた ADC 値のヒストグラムを示した。図 5.6 より、赤色のズレの値 5 の場合が最も平均値が大きいことが分かった。従って、ズレの値を以降のデータ解析では、5 に固定して解析を行った。

MIP スペクトル

図 5.7 は、PSD1-2-1 における ^{90}Sr の MIP スペクトルである。図 5.7 は、線源をセンサー基板から 12 mm 離して 10 時間ほどデータ取得を行った際に得られた、チャンネル 24、25、26、27 で構成されるセルの ADC 値をセル内の 4 つのチャンネルで合計した値の分布を示す。ADC 値は 4 つのセルのうち一つ以上にヒットがあった場合のものを用いた。また、4 つすべてのチャンネルでヒットがあった場合を除いた。これは、PSD を接続した評価基板に疑似信号の入力を行った際に、全チャンネルでトリガーが発行し、かつ全チャンネルで等しい ADC 値を取るような事象が確認されたため、そのような事象を除くためである。

今回用いた PSD の厚さは $650 \mu\text{m}$ であるため、1 MIP は 7.8 fC に相当する。図 5.8 より、 7.8 fC は ADC 値 ≈ 420 であり、ペデスタルの平均値 235 を引いて、185 付近に Most

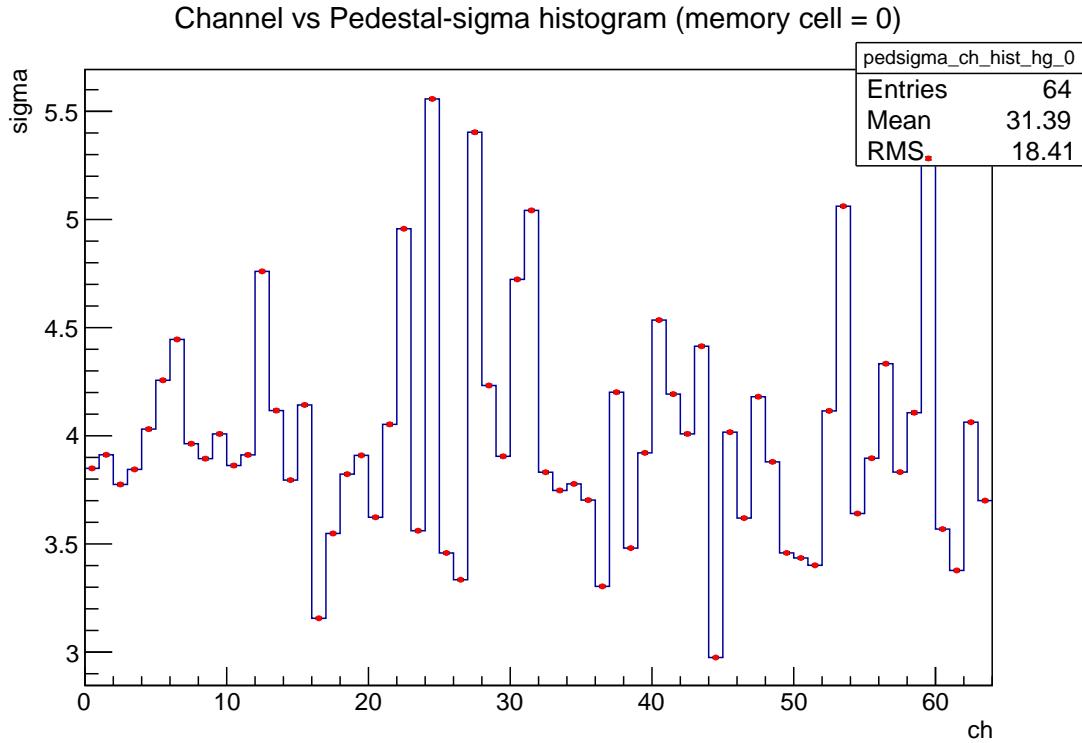


図 5.5 PSD1-2-1 におけるペデスタルの幅のチャンネルごとの比較

Probable Value (MPV) があれば、それは MIP によるスペクトルであるということができる。図 5.7 より、⁹⁰Sr による MIP を確認することができた。各チャンネル間のペデスタルの誤差は ± 6.5 程であるが、MIP の ADC 値に対するペデスタルの誤差の割合は $\sim 7.0\%$ であり、許容範囲であった。また、ペデスタルの幅についても、幅を 5 とした場合、MIP の ADC 値に対するペデスタルの幅の割合は $\sim 2.6\%$ となり、これも許容範囲であった。

再構成位置

次に位置の再構成を行った。再構成位置 ($X_{\text{rec}}, Y_{\text{rec}}$) の導出には式 5.2 と式 5.3 を用いて計算を行った。

$$X_{\text{rec}} = \frac{-ch0 - ch1 + ch2 + ch3}{ch0 + ch1 + ch2 + ch3} \quad (5.2)$$

$$Y_{\text{rec}} = \frac{-ch0 + ch1 - ch2 + ch3}{ch0 + ch1 + ch2 + ch3} \quad (5.3)$$

それぞれのチャンネルの信号の値は高ゲインの slow shaper の ADC 値をガウス関数でフィッティングして算出したペデスタル値から引いて算出した。MIP による信号は同じセル内の 4 チャンネルから同時に取得できるとは限らないため、セル内の 4 チャンネルのうち 1 チャンネル以上に信号が入った時でカット条件をかけた。

これ以降 PSD の位置を再構成した 2 次元ヒストограмを示していくが、これらの 2 次元ヒストograms は 4×4 の各セルごとに描かれた。ヒストograms の場所と実際上のセルの場所を

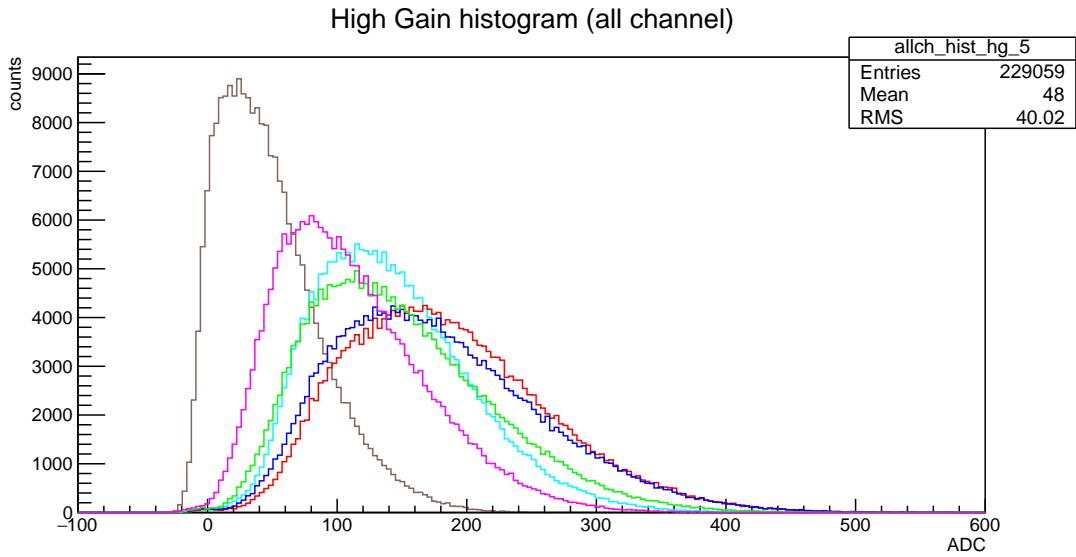


図 5.6 6 通りの rollpos のズレの値における比較。ズレの値は順に、黄土色：7、水色：6、赤色：5、青色：4、緑色：3、マゼンタ：2

対応させた。ヒストグラムの右の目盛りの通り、赤や黄色で描かれたビンはイベント数が多くヒットが集中している。一方、青い部分はヒットが少なく、白の箇所はヒット数 0 である。式 5.2 と式 5.3 を用いて再構成を行ったので、 x, y はそれぞれ -1 から $+1$ までの値を取るのが理想である。 -1 から $+1$ までがセルの範囲に相当する。図 5.9~5.14 の 2 次元ヒストグラムは -2 から $+2$ までの範囲で作成した。これは -1 から $+1$ までのセルの領域に再構成のヒットが収まりきらない事象があったためである。

まず線源を置いていない場合の PSD1-2-2 における再構成位置の分布を図 5.9 に示した。チャンネル 52~55 のセルはヒットがセル全体に散らばった。他のセルの約 10 倍のヒット数であった。そのためこれはそのセル内のチャンネル由来のノイズである。一方他のセルに関しては、左側の抵抗 1 倍のセルは上述のノイズの大きなセルを除いて、ヒットが集中している箇所が存在した。この位置は線源を置いた場合に最もヒットが集中する場所(図 5.12)である傾向が左側のすべてのセルについて言える。そのため、このヒットは宇宙線の可能性が考えられる。右側の抵抗 20 倍のセルは、チャンネル 8~11 のセルとチャンネル 0~3 のセルは他のセルよりヒット数が約 1.5 倍~4 倍であり、ノイズが少し多かった。そのセルを除くと、ヒットが集中している位置は線源を置いた場合(図 5.12)も集中している傾向があることから、同様にこれも宇宙線である可能性が考えられる。左右の異なる抵抗値の面で共通の上記のことが確認できた。

次に線源をセンサー基板の上に直接置いた場合の再構成位置の分布を図 5.10 に示した。線

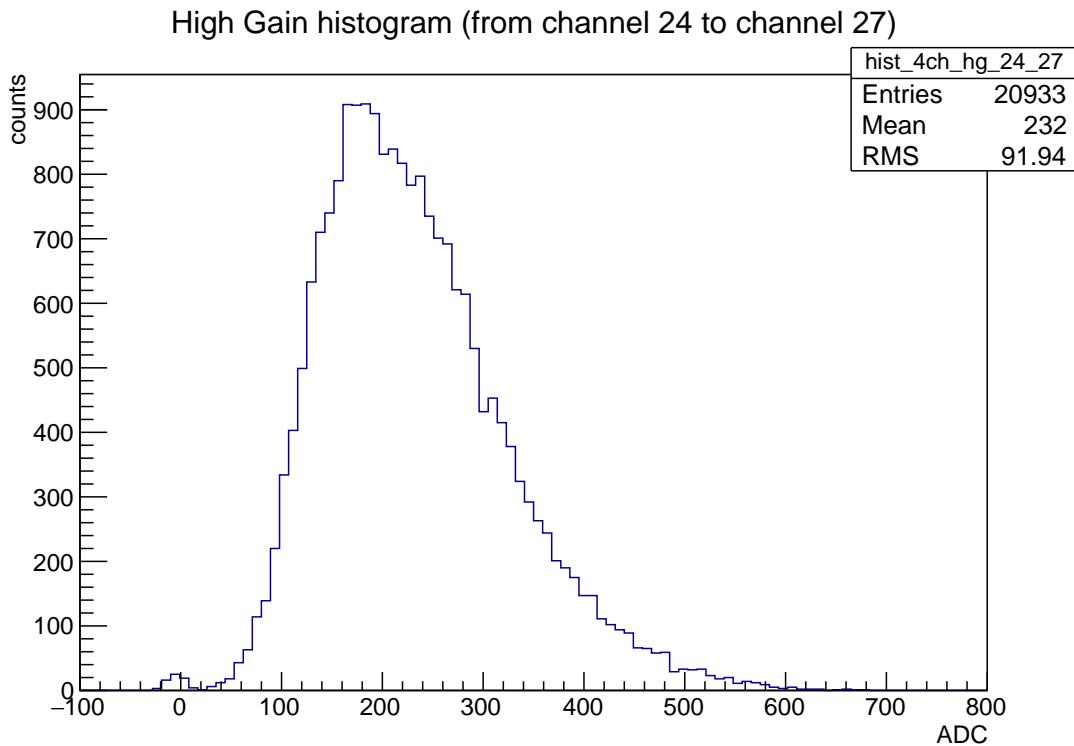


図 5.7 PSD1-2-1 における ^{90}Sr の MIP スペクトルを示している。セル内の 4 つの各チャネル、ズレの値を考慮した各メモリセルでペデスタルの分布を求め、そのペデスタルのピーク位置の ADC 値を線源による信号の ADC 値から引いた値を用いた。

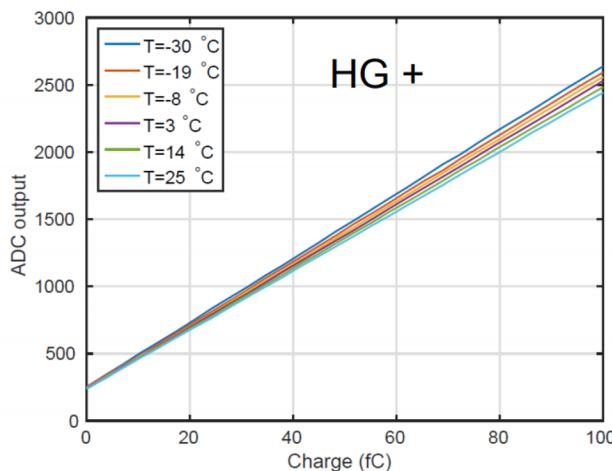


図 5.8 SKIROC2CMS における高ゲイン ADC 値と電荷量 [fC] の線形関係

源の位置をセンサー基板の上に置いた状態で、16 時間ほどデータ取得を行った。PSD と線源の距離は 1.6 mm であった。PSD 四隅の 4 つのセルのヒット数が非常に低く、さらに中央の 4 つのセルは PSD の中央に近いチャンネル付近にヒットが集中した（ただしチャンネル 20~23 のセルに関しては、線源を離した場合（図 5.12）と比較するとヒットが集中している箇所は右に寄っていた）。このように線源を近づけると四隅のセルと中央のセルの顕著な違いが確認

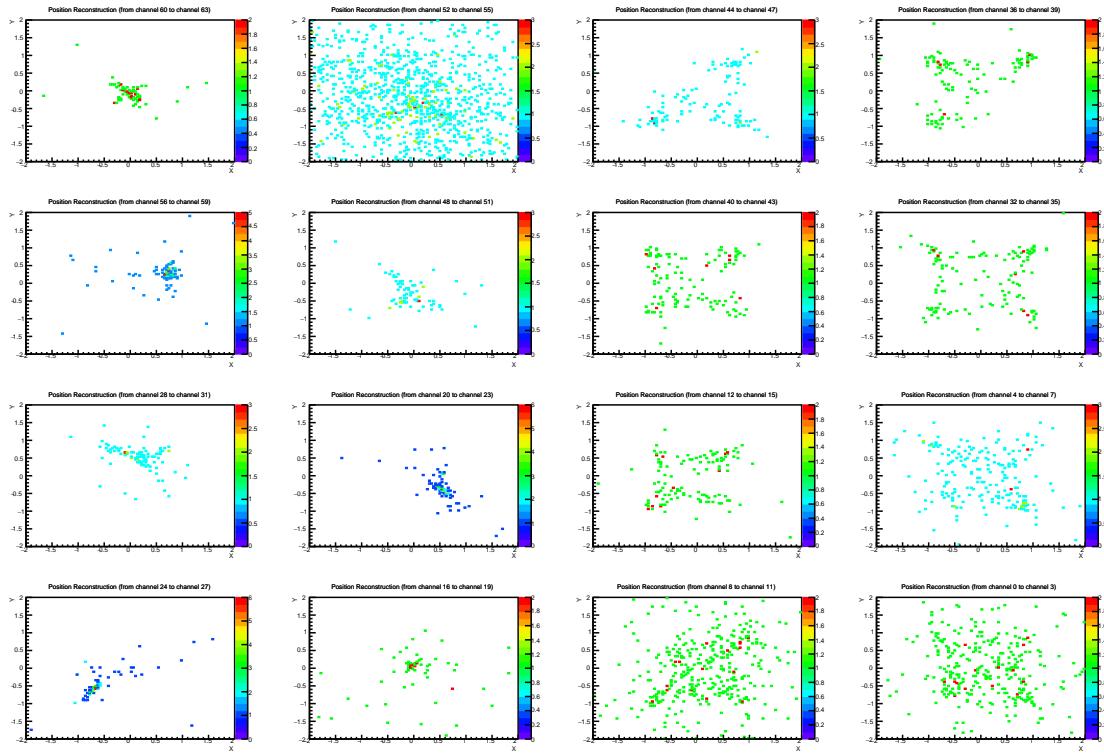


図 5.9 PSD1-2-2 における線源がない場合の各セルにおける再構成位置の分布

できた。

次に、線源をセンサー基板に置いた状態で、そのまま左に寄せた場合の再構成位置の分布を図 5.11 に示した。線源を左に寄せて 26 時間データを取得した。他のセルと比較して、チャンネル 52~55 のセルの点が散らばっているのが確認できた。ノイズによるものであると考えられる。これも線源に近いチャンネルにヒットが集中した。線源から最も遠いチャンネルについては、線源を置かない場合と似たような分布になっていることが確認できた。

次に、評価基板を上下反転させることで線源との間に 12 mm の距離をあけ、センサー基板の中央から垂直線上に線源の中心が位置する場合の再構成位置の分布を図 5.12 に示した。線源を遠ざけて、10 時間データ取得を行った。チャンネル 52~55 のセルはノイズによりヒットが全体に散らばっていた。左側の抵抗値 1 倍のセルに関しては、図 5.10 と比較してセル間でヒット数の顕著な差は見られず全体のセルに均一にヒットしていると言える。セルによって分布は違うが、線源を置いていない場合にヒットが集中している位置にヒットが集中している傾向があった。また、右側の抵抗値 10 倍のセルについても同様であった。

以上、線源の 3 次元的な位置によって、ヒットするセルの場所、ヒットするチャンネルの違いが確認できた。線源を遠ざけるとセル全体に均一に当たり、近づけた場合は線源に近いセルの中の、線源に近いチャンネルにヒットが集中することが分かった。

低抵抗ラインの 2 種類の線抵抗値 (1/4 倍と 1/8 倍) については顕著な違いは見られなかった。また、抵抗値 1 倍のセルと抵抗値 20 倍のセルにおいては、低抵抗ラインが無いセルとあ

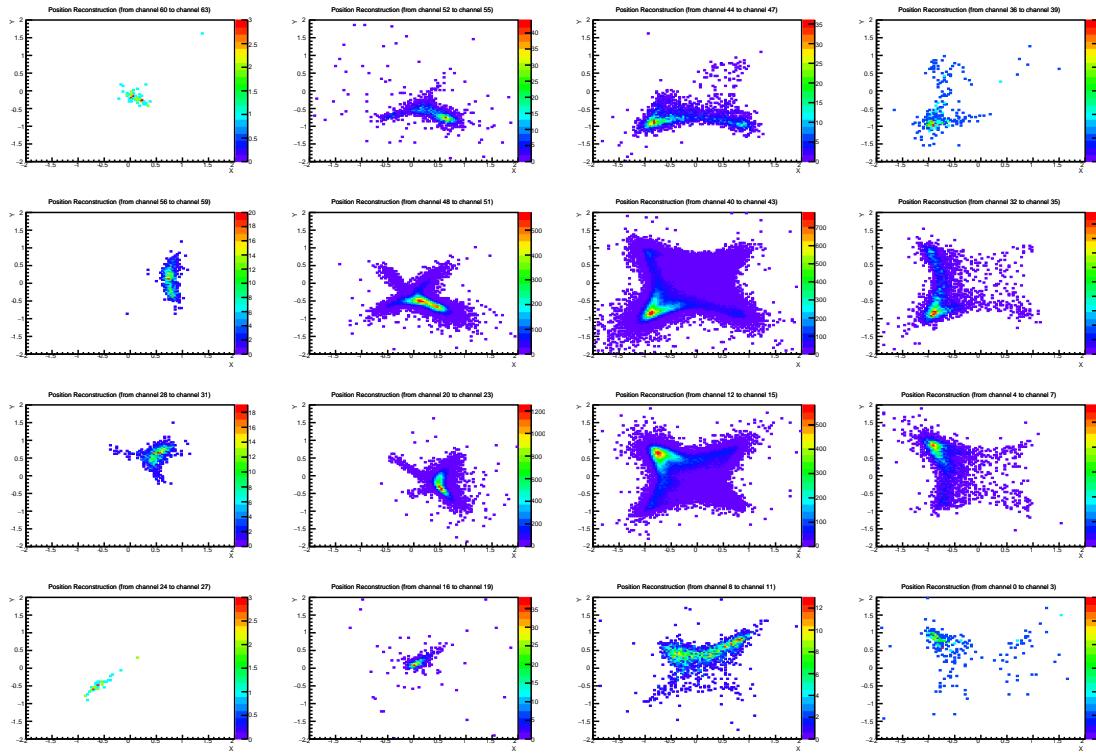


図 5.10 PSD1-2-2 における線源を近づけた場合の各セルにおける再構成位置の分布

るセルを比較した場合も顕著な違いは見られなかった。抵抗値 10 倍のセルに関しては測定を行っていないので比較はしなかった。

次に最適な PSD について調べるために異なるチップで性能の比較を行った。線源の位置によって各セルのヒットに違いがみられるため、線源を 12 mm 離した状態で測定したデータを用いて異なるチップの比較を行った。可能な限りすべてのチップにおいて PSD の中心と線源の中心を合わせるようにして測定を行った。

本研究においては、PSD1-2-1（表面抵抗値 10 倍）と、PSD1-2-3（表面抵抗値 20 倍）の比較を行った。図 5.13において、抵抗値 1 倍のセルはどれもセルの中心付近にヒットが集中しており、その周りをヒット数が少ない分布で×型になった。このことはすべてのセルで共通した。一方、図 5.13 の抵抗値 10 倍のセルにおいては、ダイナミックレンジは抵抗値 1 倍のセルよりも大きいが、セルの四隅にヒットが集中した。さらに、pin-cushion 型の歪みが見られた。そして、ピクセル中央にヒットが少ない領域が存在した。図 5.14において、抵抗値 20 倍のセルのダイナミックレンジは抵抗値 10 倍のセルのそれよりも大きいが、セルの四隅にヒットが集中しており、pin-cushion 型の歪みが見られた。そして、セル中央のヒットが少ない領域が存在し、その広さは、抵抗値 10 倍のセルのそれよりも広いということが確認できた。この考察については次章で述べる。結論としては、従来の抵抗値 1 倍のピクセルセンサーと比較して、表面抵抗値が 10 倍と 20 倍になると再構成位置分布が広がることを確認した。

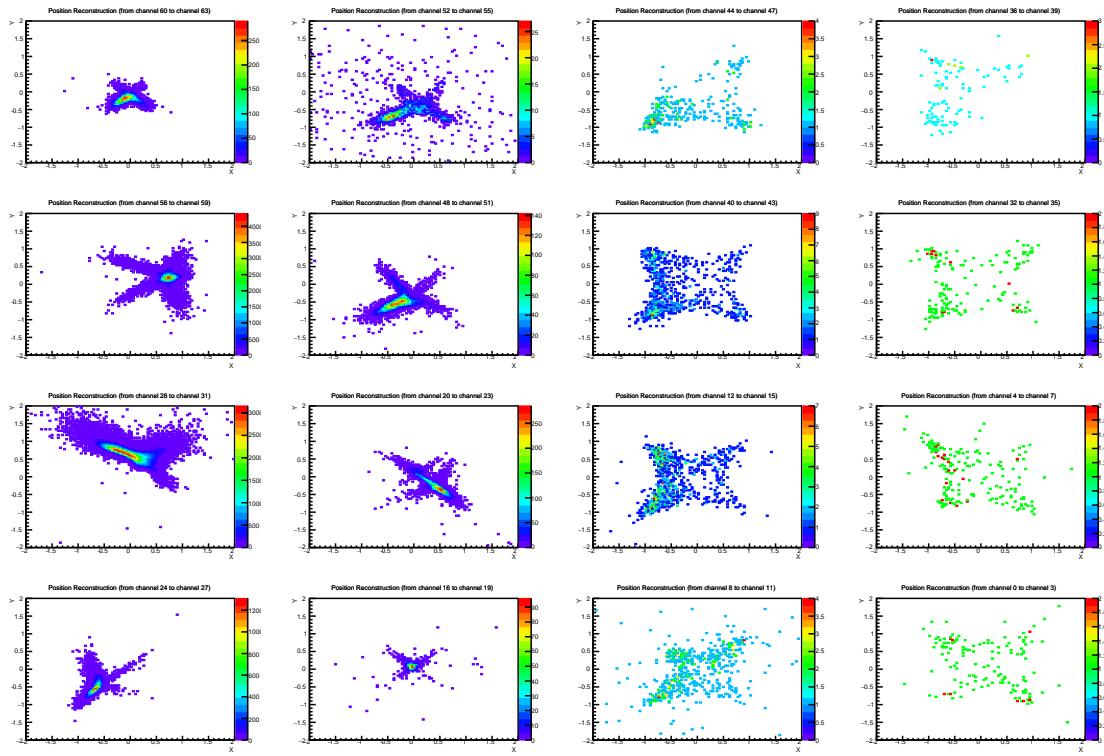


図 5.11 PSD1-2-2 における線源を左に寄せた場合の各セルにおける再構成位置の分布

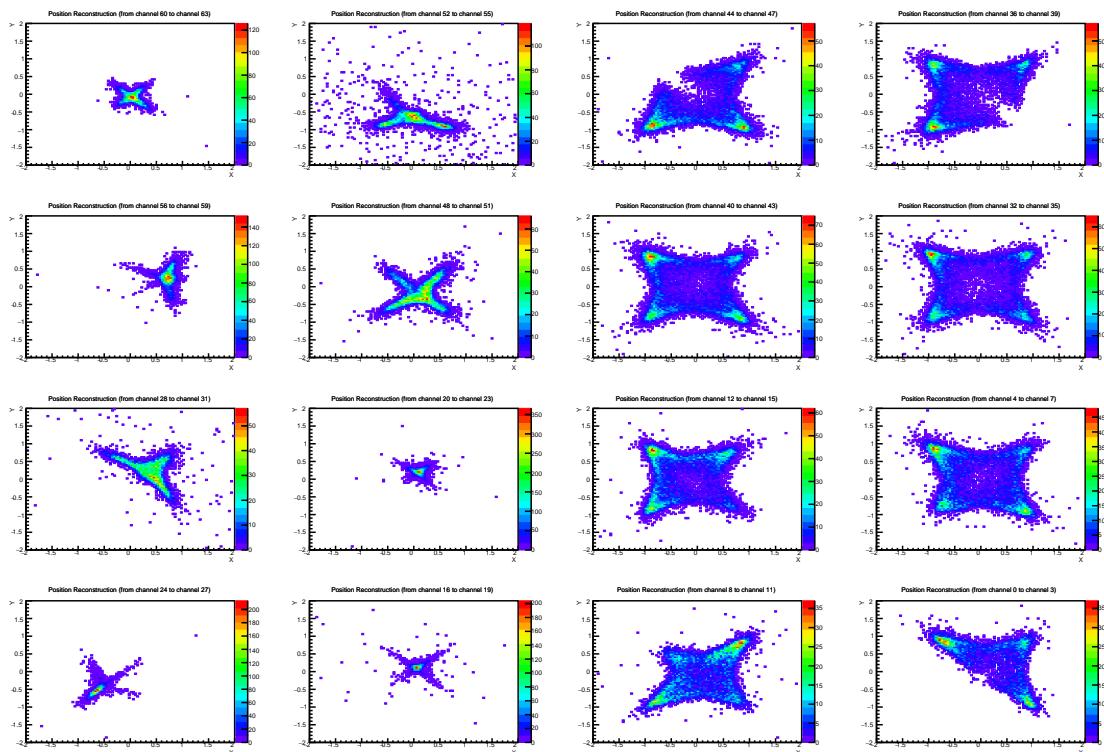


図 5.12 PSD1-2-2 における線源を 12 mm 遠ざけた場合の各セルにおける再構成位置の分布

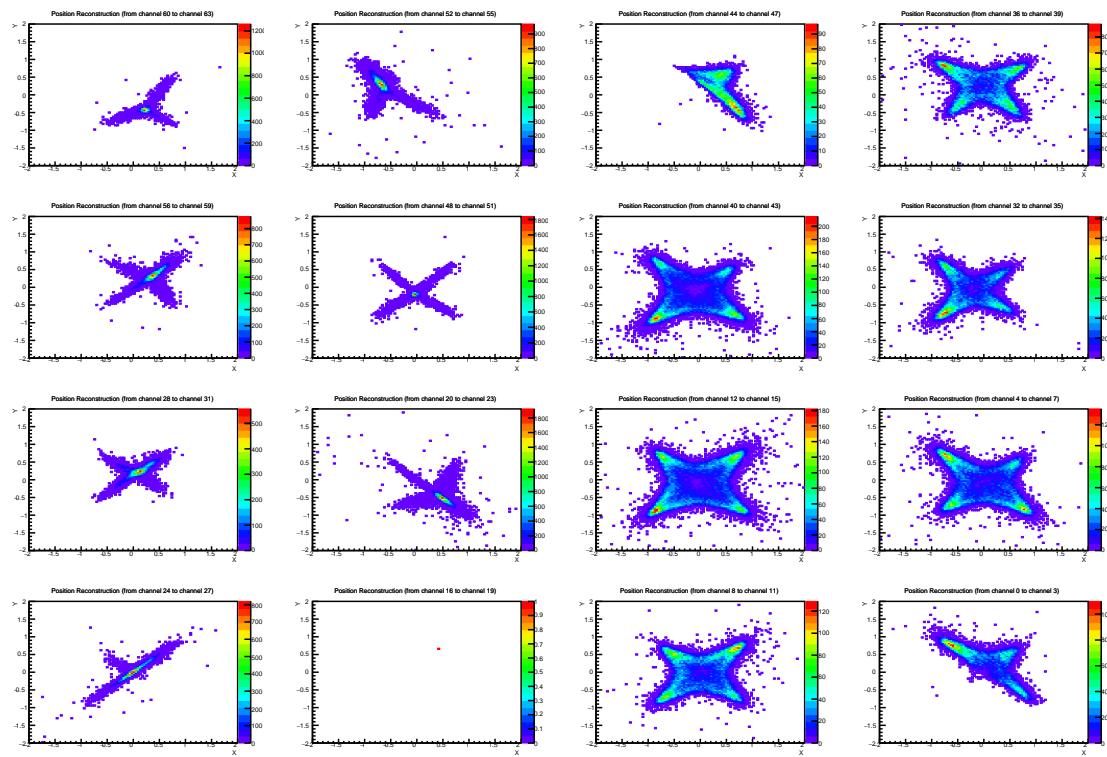


図 5.13 PSD1-2-1 における線源を 12 mm 遠ざけた場合の各セルにおける再構成位置の分布

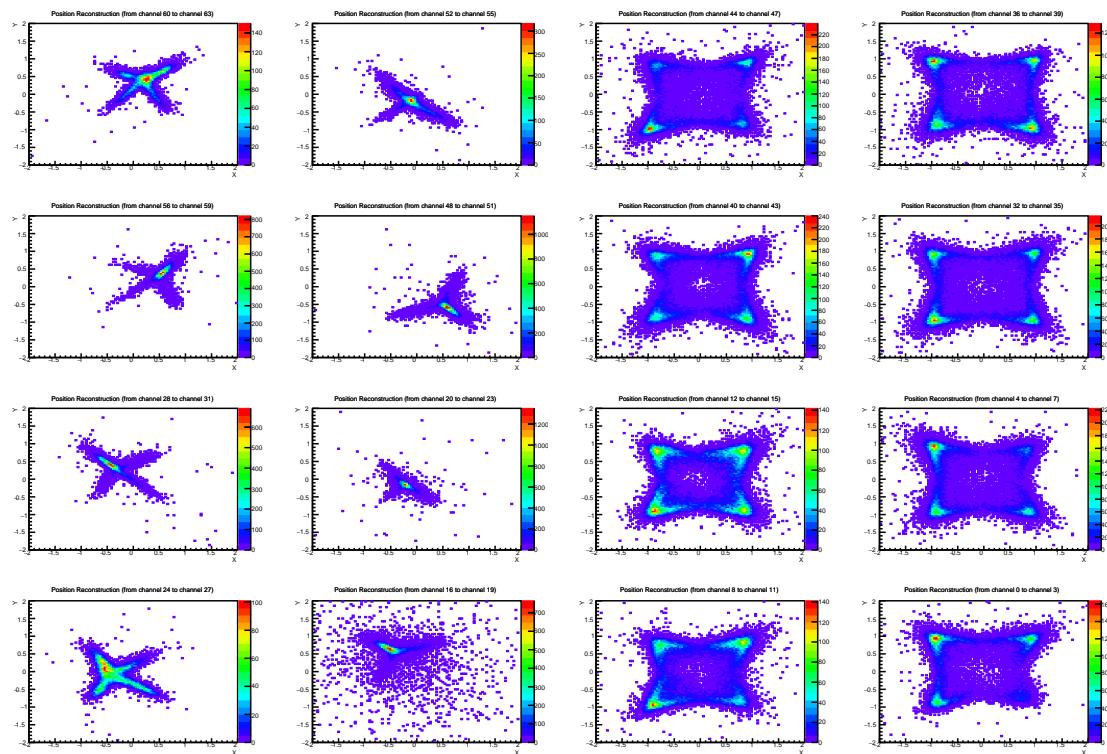


図 5.14 PSD1-2-3 における線源を 12 mm 遠ざけた場合の各セルにおける再構成位置の分布

第 6 章

考察と今後の課題

線源の 3 次元的な位置によって、ヒットするセルの場所の違いが確認できた。一方、表面抵抗値の高いセルの隅においてヒットの集中が見られた。これは図 6.1 に示すようにトリガーが一つのチャンネルでしか発行しておらず、他の 3 つのチャンネルの ADC 値がほとんど 0 に近い事象によるものである。

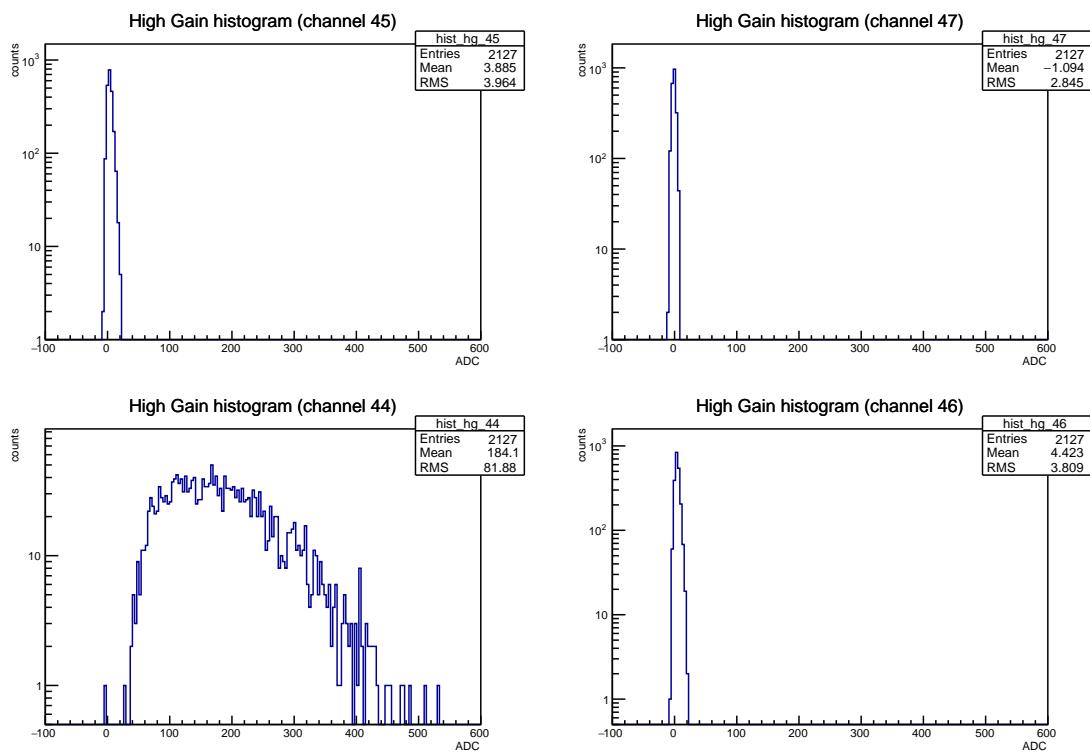


図 6.1 PSD1-2-3 のチャンネル 44~47 のセルにおける $-1.05 < X_{\text{rec}} < -0.9$ かつ $-1.05 < Y_{\text{rec}} < -0.9$ で条件をかけた場合の各チャンネルの ADC 値の分布

以下の二つのことを探るとして考察した。まず一つ目は、抵抗分割による検出効率の低下である。セル中央のヒットが少ない原因として、中央へのヒットは抵抗分割され、4 つの読み出しチャンネルで読み出される電荷量が小さくなる。そのため、閾値を超えるとトリガーが

発生しにくくなるので、検出効率は下がると考えられる。本研究の測定における閾値は 170 であり、3.8 fC が閾値 169 に対応していた。ここで、閾値 170 が 0.5 MIP (3.9 fC) に相当するとする。セル中央 (X_{rec}, Y_{rec}) = (0, 0) へヒットがあった場合、4 つの読み出しチャネルに信号分割され、読み出される電荷量は 1/4 倍になる。各読み出しチャネルの閾値が 0.5 MIP であるため、セル内では 2 MIP 以上の信号が検出されることになる。また、セル四隅 (X_{rec}, Y_{rec}) = ($\pm 1, \pm 1$) へのヒットの場合、ヒット箇所に最も近い読み出しチャネルのみで読み出しを行い、残りの 3 つのチャネルについては図 6.1 よりほとんど電荷量は 0 であるため、信号分割はされないとする。すなわちセル内で信号分割されるチャネル数は 1 とする。この場合、検出される信号は 0.5 MIP 以上になる。同様に、セル端 (X_{rec}, Y_{rec}) = (0, ± 1), ($\pm 1, 0$) の場合を表 6.1 に示した。そして、各々の場合において、図 5.7 のヒストグラムよりピクセル当たりの検出効率を算出し表 6.1 に示した。セル中央へのヒットの検出効率はセル四隅の検出効率の 10 % になることが分かる。

ヒット箇所	座標 (X_{rec}, Y_{rec})	分割チャネル数	検出される信号	検出効率
セル中央	(0, 0)	4	2 MIP 以上	0.10
セル端	(0, ± 1), ($\pm 1, 0$)	2	1 MIP 以上	0.70
セル四隅	($\pm 1, \pm 1$)	1	0.5 MIP 以上	0.96

表 6.1 3 つの主なピクセル内ヒット箇所と検出効率の関係

次に二つ目としては、前置増幅器の応答遅延によるものである。表面抵抗値が高い場合、セル中央の信号は、前置増幅器を通した時の応答が遅くなる。そのため、前置増幅器の時定数が低いと、完全に電荷は収集されず、セル中央のヒットは Fast Shaper の波高が下がるため、4 チャンネル全てトリガーが発生しにくくなる。そのため検出されず、検出されない領域は表面抵抗値が上がるにつれて大きくなる。一方、セルの四隅へのヒットの場合を考える。表面抵抗値が大きいため、セルの隅であっても、読み出しインピーダンスの影響を受けずに正しく抵抗分割される。電極に近接した箇所へのヒットだと、最も近い電極への抵抗分割された抵抗値は低いためヒットは検出されるが、残りの 3 つの電極については、抵抗値が高くなるため、前置増幅器の信号の立ち上がりが遅くなり、fast shaper の波高が下がるためトリガーが発生しにくくなる。また、抵抗値 1 倍のセルの場合は、表面抵抗値は十分に低いため、前置増幅器を通して応答には影響がない。そのため、セル中央のヒットであってもトリガーは発行する。しかし、読み出しインピーダンスの影響によりダイナミックレンジは下がる。以上の考察をまとめると、ダイナミックレンジは表面抵抗値に依存するが、セルの中央のヒットの検出は、表面抵抗値を上げた場合、トリガーが発行しにくくなるため検出されないと考えられる。

今後の課題としては、この四隅にヒットが集中している理由を調べる必要がある。また、レーザー試験を行い、レーザーによる位置分解能の算出、及びセルの四隅での再構成位置分布を確認する必要がある。さらには、表面抵抗値が 30 倍の PSD1-1 と PSD1-2 についても同様の線源測定を行い、ダイナミックレンジとヒットの 2 次元分布から、表面抵抗値との関係を調

べる必要がある。また、前置増幅器の時定数を変えて、信号の立ち上がり方によって、2次元分布にどのような違いが見られるのかを調べる必要がある。

第 7 章

結論

本研究では、SiW-ECAL の性能向上に向けた高位置分解能シリコンセンサーとして PSD の検出器としての特性を調べた。SKIROC2CMS、及びその評価基板を用いて信号の読み出しを行った。その際、センサー基板を変更しノイズの低減を図った。浜松ホトニクス社製の PSD を用いて、MIP スペクトルの測定および放射線源を用いて位置の再構成を行った。線源の 3 次元的な位置によって、ヒットするセルの場所の違い及びチャンネルの違いが確認できた。また、従来のセンサーと比較して、表面抵抗値が大きくなると再構成位置分布が広がることを確認した。表面抵抗値を上げることでダイナミックレンジは増えたが、センサーの四隅にヒットが集中したため、今後はこの原因について調べていく必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたって、大変多くの方のお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。

まず、指導教員である末原大幹先生におかれましては、ドイツでの実験、アメリカでの国際学会に参加させていただくなど、貴重な経験を数多くさせていただきました。会議や学会では夜遅くまで発表練習をしていただきました。川越清以先生におかれましては、お忙しい中、進捗報告など様々な場面でご指導いただきました。基幹物理学の TA の際には大変お世話になりました。また、学部 4 年次の輪講を担当していただきました。東城順治先生におかれましては、ミーティングの際に多くのご指導をいただきました。吉岡瑞樹先生におかれましては、ILC 関係、特に福岡で開催された国際学会で大変お世話になりました。織田勧先生には論文紹介の際に多くのご指導をいただきました。また素粒子実験学の授業でもお世話になりました。音野瑛俊先生には、月一ミーティングの際に多くの質問をいただき新しい視点を持つきっかけを作っていました。中山隆志先生には、学生部屋や測定器開発室、エレキ部屋、シリコン検出器開発室、あらゆる場面でお世話になりました。小林大先生には、研究内容について多くの的確なアドバイスをいただきました。重松さおりさんには、出張に関する事務手続きやミーティングでお世話になりました。福岡で開催された国際学会の会場運営時にもお世話になりました。豊村和子さんには特に ALCW の会場運営でお世話になりました。

研究室の先輩である、中居勇樹氏、角直幸氏、高田秀佐氏、古賀淳氏、関谷泉氏、山口尚輝氏、野口恭平氏、宮崎祐太氏、竹内佑甫氏には研究やそれ以外の面でも大変お世話になりました。

すでに卒業された大石航氏、調翔平氏、富田龍彦氏、伊藤拓実氏、斎藤貴士氏、山城大知氏、上原英晃氏、堤裕樹氏、橋本獎平氏、藤野主一氏、三浦裕氏、森涼介氏には大変お世話になりました。特に、三浦祐氏と森涼介氏は ILC 実験の先輩であり、研究を遂行していく上で多くのアドバイスをいただきました。お二方には就職活動においても多くのアドバイスを頂き、参考にさせていただきました。

後輩の菅野颯人氏、来見田将大氏、後藤輝一氏、莊司大志氏、松本岳氏、森山健太郎氏、矢野浩大氏、姚舜禹氏、濱住周斗氏、久原真美氏、岩津祐輝氏、松崎俊氏、嶋津省吾氏、岩下侑太郎氏には研究に一生懸命取り組む姿に大変励まされました。特に、ILC 実験の後輩である後藤輝一氏には大変助けられました。また、松本岳氏にはミーティング係として私が忙しい間、多々お世話になりました。

川島僚介氏、佐田智也氏、出口遊斗氏、永野智也氏、牧瀬壯氏、彌吉拓哉氏、HERNANDEZ BARAHONA JOCSAN ARIEL 氏には同じ研究室の同期として一緒に研究ができたことを嬉しく思います。特に、ILC 実験の同輩である出口遊斗氏には数々の場面で助けられました。

最後に、これまでお世話になった家族に、心より感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 国際リニアコライダー その展望と KEK の取り組み https://www2.kek.jp/ilc/ja/contents/docs/ilc_201806_01.pdf
- [2] T.Behnke et al., The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary, arXiv:1306.6327
- [3] H.Bear et al., The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics, arXiv:1306.6352
- [4] T.Behnke et al., The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detector, arXiv:1306.6329
- [5] M.Thomson, Nucl.Instrum.Meth.A611:25-40, 2009, Particle Flow Calorimetry and the Pandora PFA Algorithm.
- [6] Particle Data Group 2017, Review of Particle Physics, Passage of particles through matter, <http://pdg.lbl.gov/2017/reviews/rpp2017-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [7] 内富直隆, (2014) 半導体が一番わかる (しくみ図解), 技術評論社
- [8] H.yamashiro et al., Performance evaluation of PSD for silicon ECAL, (2017) arXiv:1703.08091
- [9] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/02_handbook.pdf
- [10] A. Banu et al., Performance evaluation of position-sensitive silicon detectors with four-corner readout Nucl. Instr. and Meth. A, 593 (2008), p. 399-406
- [11] 森涼介, 国際リニアコライダーのための高位置分解能シリコンセンサーの開発研究, (2019) 九州大学, 修士論文