ATLAS実験アップグレード用ピクセル検出器の性能評価

大阪大学大学院 理学研究科物理学専攻 山中卓研究室 博士前期課程2年

荒井 泰貴

2015年2月3日

概 要

欧州原子核研究機構 (CERN) に建設された陽子・陽子衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) では、世界最高のエネルギーである重心系エネルギー 14 TeV で陽 子同士を衝突させることができる。LHC 衝突点の1つに設置された大型汎用粒子 検出器である ATLAS 検出器では、標準理論の検証やそれを超える物理の探索を 行っている。

2025年以降はLHCを高ルミノシティ化し(HL-LHC計画)その後の約10年間 で3000 fb⁻¹のデータ収集を目指している。それに伴い ATLAS 検出器のアップグ レードを予定しており、その1つとしてシリコンピクセル検出器は新たに建設す る検出器と2023年に交換する。現在は新型ピクセル検出器用のセンサーや読み出 し ASIC の開発を行っている。

HL-LHCの放射線環境に耐えうる検出器開発のため、センサーや読み出しASIC の放射線耐性を試験する必要があり、その方法の1つは、電荷収集効率の測定で ある。本研究の目的は、開発しているピクセル検出器での電荷収集効率の測定方 法を確立することである。本研究ではまず使用するピクセル検出器で電荷情報を 得るためのTime Over Threshold (TOT)の較正手法を確立し、その手法を用いて ベータ線、宇宙線による電荷収集量を測定した。測定で得た電荷収集量は予想さ れる値より少なく、その原因を究明するためにGeant4シミュレーション等を行っ た。その結果、TOT 値が低い場合の較正が理想的に行えていないことがわかった。

目 次

第 1章	序論	8
1.1	LHC 実験	8
1.2	ATLAS 検出器	8
	1.2.1 内部飛跡検出器	10
1.3	ATLAS検出器アップグレード	13
	1.3.1 HL-LHC アップグレード	13
	1.3.2 ATLAS 内部飛跡検出器アップグレード	13
	1.3.3 高放射線耐性の検出器の研究開発	15
1.4	本研究の目的	16
	1.4.1 本論文の構成	18
生っキ	2.11 - 2.46山四	
弗2早	ンガンクロンション	10
2.1		19
	2.1.1 干导体	19
	2.1.2 p型丰导体,n型丰导体	20
	2.1.3 半導体候出器の候出原理	22
2.2	シリコン検出器の放射線損傷 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
	2.2.1 ハルク損傷	24
	2.2.2 衣囬損傷	25
2.3	尚	26
2.4	ヒクセル検出器	28
第3章	実験装置	30
3.1	ピクセルモジュール	30
	3.1.1 信号読み出し ASIC : FE-I4	30
3.2	DAQ システム	33
<u></u>		
第4章	TOTの較止 :	35
4.1	V_{cal} の較止	35
4.2	チューニング	36
4.3	TOT 較正	40

第5章	放射線照射前センサーの電荷収集効率の測定	44
5.1	ベータ線を用いた測定	45
	5.1.1 測定方法	45
	5.1.2 クラスタリングによる電荷量の求め方	45
	5.1.3 電荷収集量の測定結果	46
	5.1.4 収集電荷量のバイアス電圧依存性の測定	47
	5.1.5 閾値の効果の検証	49
5.2	宇宙線を用いた測定	49
	5.2.1 測定方法	51
	5.2.2 電荷収集量の測定結果	51
5.3	Geant4 $\mathcal{V} \in \mathcal{I} \cup \mathcal{V} = \mathcal{V}$	53
	5.3.1 シミュレーションの設定	54
	5.3.2 測定結果との比較	55
5.4	考察	56
	5.4.1 クラスタサイズごとの電荷分布の比較	56
	5.4.2 テスト電荷とセンサーからの信号との TOT 応答	57
5.5	まとめ	60
第6章	放射線照射したセンサーの電荷収集効率の測定	61
6.1	測定方法...............................	61
6.2	電荷収集量のバイアス電圧依存性の測定結果........	61
第7章	結論	65

図目次

1.1	LHC と主な実験の概略図 [1]	9
1.2	ATLAS 検出器 [2]	9
1.3	内部飛跡検出器 [2]	10
1.4	ピクセル検出器 [2]	11
1.5	ピクセルモジュール [2]	12
1.6	SCT モジュール [2]	12
1.7	内部飛跡検出器アップグレードのレイアウトの一例 [3]。赤線はピ	
	クセル検出器層,r = 0.4–1.0 m の範囲の青線はストリップ検出器層	
	を表す。	14
1.8	内部飛跡検出器において 3000 fb ⁻¹ の統計量で予想される放射線量 [3]	15
1.9	ストリップセンサーでの電荷収集量の放射線量依存性の測定結果 [4]。	
	照射する放射線量が増えるにつれ,放射線損傷により電荷収集量が	
	減る。	16
1.10	試験用ミニチュアストリップセンサーの写真。大きさ1cm²のセン	
	サーのストリップ電極数本から測定用端子にワイヤーボンディング	
	で接続している。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
1.11	TOT の概念図。(a) 信号がある閾値を超えている時間が TOT であ	
	る。(b) 信号波形が大きくなると,閾値を超えている時間が長くな	
	り,TOT は大きくなる。	17
21	(a) 紬緑休 (b) 半導休 (c) 導休のエネルギー進位のバンド構造	20
$\frac{2.1}{2.2}$	n型半導体の(a)結晶構造と(b)バンド構造の様子.	20 21
2.2	n 型半導体の (a) 結晶構造と (b) バンド構造の様子.	21
$\frac{2.0}{2.4}$	m 接合	22
2.5	<i>逆バイアスをかけ空乏層が広がる様子。</i>	23
2.6	半導体検出器の一般的構造 [6]。n型バルク中に埋め込まれた p ⁺ 読	_0
	み出し電極と、反対側表面のn+ 電極に逆バイアスをかけることで	
	空乏層が広がる。空乏層を荷電粒子が通過すると生成される電荷を	
	集め、信号として読み出す。・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	24
2.7	300 μm 厚 n バルクシリコンセンサーの全空乏化電圧と,NIEL を用	
	いて1MeV 中性子数に換算した被ばく放射線量との関係 [6]。	26
2.8	n-in-p ピクセルセンサーの概略図。p 型であるバルク部は型変換し	
	ないので,空乏層は常に読み出し電極側から広がる。......	26

2.9	p-in-n センサーの空乏層が広がる様子。(a) バルク部の型変換前。空 乏層は読み出し電極側から広がる。(b) 型変換後。空乏層は読み出 し電極と反対側から広がる。全空乏化していないと信号は読み出せ	
2.10	ない。 (a) ピクセル検出器の構造の概念図 [6]。センサーの電極を微細なピ クセル状にすることで高い位置分解能を得る。(b) バンプボンディ ングの断面図 [6]	27 28
2.11	(a) p-spray, (b) p-stop	20 29
3.1 3.2	試験用ピクセルモジュールとデータ収集システムの概念図 (a) ピクセルモジュール。赤枠で示した箇所に,センサーと読み出し ASICが一体となり設置されている。(b) FE-I4。大きさ 250×50 µm ²	30
$3.3 \\ 3.4$	のピクセルが 80 × 336 個配置されている。	31 32 34
4.1 4.2	V _{cal} と PlsrDAC との関係。 検出効率と DAC 値との関係。誤差関数でフィッティング(赤線)し,	36
4.3	検出効率が 50% となる(青線)点が閾値に相当する DAC 値である。 Threshold チューニング。(a) global チューニング後の閾値分布。 $\sigma = 603e$ と閾値に大きなばらつきがある。(b) local チューニング後の閾値分布。ピクセルごとに閾値を細かく調節することで $\sigma = 58e$ まで	37
4.4	ばらつきが小さくなる。 TOT チューニング。(a) global チューニング後の TOT 分布。1つの TOT 値が取り得る電荷量の値の範囲が広いためほとんどのピクセ ルが一定の TOT 値を返すが,一定の TOT のみを返さないピクセル	38
4.5	もわすかに存在する。(b) local チューニング後の TOT 分布。 電荷量を一定間隔で増やし analog injection を行い得られる TOT と 電荷量との関係。ある TOT 値が表す電荷量の範囲が広いため, 階	39
4.6	段状の分布が現れる。 1つのピクセルに対する PlsrDAC スキャンの結果。各 TOT 値のヒ ストグラムの平均値を、その TOT 値が云す雪荷号とする	40
4.7 4.8	ストクノムの平均値を,その IOI 値が小り 电何重とりる。 ひとつのピクセルに対する PlsrDAC スキャンの結果 各 TOT が示す電荷量の、全ピクセルの平均を各ピクセルのばらつ	41 42
	きをガウシアン分布と仮定し、その分散を誤差棒とした。	43
5.1 5.2	センサー厚 150 μm のモジュールの TOT 較正結果	45 46
5.2 5.3	ハーラ縁による側足のセットノッノ	40
	色のピクセルはヒットしたものを表す。	47

5.4	(a) ベータ線による測定のヒットマップ。図中の赤枠はモジュール	
	の下に設置したトリガー用シンチレータの大きさを表す。(b) LV1	
	タイミング分布。クラスタリング前の各ピクセルの分布を表すため,	
	合計エントリー数は測定した事象数よりも多くなる。	48
5.5	(a) ベータ線測定結果から得た電荷量分布。ランダウ関数をガウシ	
	アンで畳み込んだ関数(赤線)でフィッティングし、ピークの電荷	
	量を求める。(b) ベータ線によるヒットのクラスタサイズの分布。.	48
5.6	収集電荷量のバイアス電圧依存性の測定結果。赤点,緑点はそれぞ	
	れセンサー厚150μm, 320μmのモジュールでの測定結果を表す。曲	
	線は平方根の関数でフィッティングしたものである。	50
5.7	閾値を上げ行った測定の結果。横軸の誤差棒はピクセルの閾値のば	
	らつきを表す。	51
5.8	宇宙線を用いた測定のセットアップ............	52
5.9	宇宙線を用いた測定の (a) ヒットマップと (b) LV1 タイミング分布 .	52
5.10	(a) 宇宙線ミューオンの測定から得た電荷量分布。ランダウ関数を	
	ガウシアンで畳み込んだ関数(赤線)でフィッティングし、ピーク	
	値を求める。(b) 測定のクラスタサイズ分布。	53
5.11	Geant4 シミュレーションでの (a) ベータ線, (b) 宇宙線測定シミュ	
	レーションのイベントディスプレイ。赤,青,緑線は粒子の飛跡を	
	表す。	54
5.12	シミュレーションに用いた, ⁹⁰ Sr のベータ崩壊によるベータ線のエ	
	ネルギー分布。	55
5.13	シミュレーションによるベータ線,宇宙線中のミューオンによる電	
	荷収集量分布。青線がベータ線、赤線が宇宙線中のミューオンの結	
	果。	56
5.14	宇宙線ミューオンのシミュレーションで得た電荷量分布をクラスタ	
	サイズごとに分けて図示したもの。黒、赤、青はそれぞれクラスタ	
	サイズ1, 2, 3の電荷量分布を表す。	57
5.15	(a) 宇宙線ミューオン測定で得た電荷量分布をクラスタサイズごと	
	にわけて図示したもの。(b) (a) を与える TOT 分布(クラスタリン	
	グ前)。(a), (b) ともに黒, 赤, 青はそれぞれクラスタサイズ 1, 2,	
	3 の分布を表す。	58
5.16	宇宙線ミューオン測定で得たクラスタサイズ1の電荷量分布。ラン	
	ダウ関数をガウシアンで畳み込んだ関数(赤線)でフィッティング	
	し、ビークの電何量を求める。	58
5.17	2種類のモジュールのTOT 軟止結果の上にクラスタサイスが1の	
	TOT 値をフロットしたもの。亦と縁はそれそれセンサー厚 150 μ m,	
	$320 \mu\text{m}$ のセシュールの結果を表す。丸点が示すのは、閾値を $3000 e$,	
	TOTを基準電何量20keに対し10となるようにチューニングを行っ	
	た後,戦止を行い得られた TOT 較止結果である。	59

6.1	放射線損傷あり(赤),放射線損傷なし(青)のモジュールの較正	
	結果。	62
69	ベニタ娘にとて電荷収集員の測空結果。 表のヒストガラルけ故財娘	

6.2	ベータ線による電荷収集量の測定結果。青のヒストグラムは放射線	
	損傷なしのセンサーにバイアス電圧 100 V を与え全空乏化した場合,	
	赤のヒストグラムは放射線損傷ありのセンサーにバイアス電圧500V	
	を与えた場合の結果を表す。.......................	63

6.3 放射線損傷後のセンサーの電荷収集効率のバイアス依存性。 63

表目次

3.1	FE-I4 の主な特徴	31
5.1	チューニングの目標値	44
5.2	シミュレーションの構成要素の材質と厚さ...........	54

第1章 序論

1.1 LHC 実験

Large Hadron Collider (LHC) は、欧州原子核研究機構 (CERN) に建設された 周長がおよそ 27 km の陽子・陽子衝突型円形加速器である。LHC は世界最高のエ ネルギーである重心系エネルギー 14 TeV で陽子同士を衝突させることができるよ う設計されている。瞬間ルミノシティの設計値は 10^{34} cm⁻²s⁻¹ であり、このとき バンチ衝突あたり 23 個程度の陽子・陽子衝突が起こる。

LHC 実験の主な目的は、史上最高エネルギーでの素粒子反応を観測することに より、標準模型の検証やそれを超える物理現象の探索を行うことである。

LHCは2010年に稼働を始め、2012年末までに重心系エネルギー7TeVおよび、 8TeVで実験を行った。後述するATLAS実験では、これらのデータを解析し2012 年に、標準模型で存在が予言されていたヒッグス粒子を発見した。これによりヒッ グス粒子の存在を予言するヒッグス機構の正しさが証明された。ヒッグス機構は、 ヒッグス場というスカラー場を導入することでゲージボソンおよびフェルミオン がゲージ不変性を破らずに質量を得ることを説明する。

その後 LHC は 2013 年初めから加速器アップグレードのため長期シャットダウン に入り,2015 年 5 月頃から重心系エネルギーを 13 TeV に上げ運転を再開する予定 である。

1.2 ATLAS 検出器

A Troidal Lhc ApparatuS (ATLAS) 検出器は、図 1.1 に示すように、4つある LHC の衝突点のうちの1つに設置された大型汎用検出器である。ATLAS 検出器 では 2010 年から 2012 年までの間に、重心系エネルギー 7 TeV で 5.2 fb⁻¹、8 TeV で 21.3 fb⁻¹ のデータを収集した。

ATLAS 検出器の構造を図 1.2 に示す。ATLAS 検出器はビーム軸を中心とした 円筒状の構造をしており、衝突点に近い側から内部飛跡検出器、ソレノイド電磁 石、カロリメータ、トロイド電磁石、ミューオン検出器が配置されている。

内部飛跡検出器では主に陽子・陽子衝突点付近での荷電粒子の飛跡を再構成す る。外側にはソレノイド電磁石を設置しており,飛跡の曲率から荷電粒子の運動 量を測定する。また,複数の荷電粒子の飛跡から陽子・陽子衝突点や粒子の崩壊 点を測定する。



図 1.1: LHC と主な実験の概略図 [1]



図 1.2: ATLAS 検出器 [2]

ATLAS検出器のカロリメータは内側の電磁カロリメータと外側のハドロンカロ リメータとの2種類で構成されている。これらは電子と光子、ジェットの粒子識別 とエネルギーの測定を行う。電磁カロリメータでは、電子と光子とが入射した際 にカロリメータ中でつくる電磁シャワー全体を測定することで、入射粒子のエネ ルギーと入射位置を測定する。ハドロンカロリメータでは、電磁カロリメータだ けでは通過してしまう多数のハドロンの集まりであるジェットのエネルギーを測定 する。

カロリメータの外側にはトロイド電磁石とミューオン検出器が設置されている。 これらを用い、物質の透過力が高いため検出器中で全エネルギーを落とさずに検 出器を通過してしまうミューオンの通過位置や運動量を精密に測定する。

以上が ATLAS 検出器全体の概要である。以下では、本研究の対象であるピクセル検出器を含む内部飛跡検出器について詳しく述べる。

1.2.1 内部飛跡検出器

ATLAS 検出器の内部飛跡検出器は,内側からピクセル検出器 (Pixel),シリコンストリップ検出器 (SCT),ストローチューブ検出器 (TRT) から成る。図 1.3 に内部飛跡検出器の構造を示す。



図 1.3: 内部飛跡検出器 [2]

以下では、内部飛跡検出器を構成するそれぞれの検出器について説明する。

ピクセル検出器

ピクセル検出器(Pixel)は、内部飛跡検出器の最内層に設置しているシリコン 検出器である。図 1.4に示すように3層の円筒形バレル部とその前後方3層ずつの エンドキャップ部からなる。センサーを細かい長方形型(ピクセル)に分割し、そ れぞれのピクセルが独立した検出器として振る舞うことで高い位置分解能を持ち、 またヒット占有率を下げている。この細分化により、高精度の衝突点、崩壊点の 測定が可能になる。



図 1.4: ピクセル検出器 [2]

現行のピクセル検出器のピクセルサイズは 50 × 400 µm² で,ひとつひとつのモ ジュールは1枚のセンサーと16枚の FE-I3 と呼ばれる読み出し ASIC から構成さ れている。図 1.5 にこのモジュールの構造を示す。バレル部,エンドキャップ部を 合わせたピクセル検出器の総読み出しチャンネル数は約 8000 万チャンネルである。

シリコンストリップ検出器

シリコンストリップ検出器 (SemiCondutor Tracker: SCT) は、ピクセル検出器 の外側に配置されており、4層のバレル部とその前後方に9層ずつのエンドキャッ プ部で構成される。

図 1.6 にバレル部に用いられている SCT のモジュールを示す。SCT のモジュール にはストリップが 80 µm 間隔で並んだシリコンセンサーを 2 枚一組で搭載し,2 枚 のセンサーは 40 mrad の角度をつけて重ねられている。これにより1つのモジュー ルで入射粒子の 2 次元の位置情報を得る。

ストローチューブ検出器

ストローチューブ検出器 (Transition Radiation Tracker: TRT) は、半径4mm のストローチューブで構成された検出器である。バレル部には長さ144cmのスト



図 1.5: ピクセルモジュール [2]



図 1.6: SCT モジュール [2]

ローチューブがビーム軸に平行に並び,エンドキャップ部には長さ 37 cm のスト ローチューブがビーム軸に垂直に放射状に設置されている。

TRT の位置分解能は 130 μm 程度である。またストローチューブ間には遷移放 射を引き起こすための物質を詰めており,遷移放射によるエネルギースペクトル の分布の違いから電子とπ粒子との粒子識別を行う。

1.3 ATLAS 検出器アップグレード

LHC は今後,エネルギーやルミノシティを向上させるための段階的なアップグレードを計画している。それに伴い,ATLAS 検出器もアップグレードが必要になる。この節では,本研究と関わりのある HL-LHC と呼ばれるアップグレード計画と,HL-LHC に向けた ATLAS 内部飛跡検出器のアップグレード計画について述べる。

1.3.1 HL-LHC アップグレード

LHC は,2015 年から重心系エネルギーを 13 TeV,14 TeV と段階的に上げ 2022 年まで稼働し,その後約2年の長期シャットダウンを予定している。2022 年からの シャットダウン時に High Luminosity LHC (HL-LHC) 計画と呼ばれるアップデー トを計画している。

2025年から稼働開始予定のHL-LHCでは、瞬間ルミノシティを $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 程度まで上げ、最終的に積分ルミノシティ 3000 fb⁻¹ の統計量に到達することを目標としている。これにより

- ヒッグス粒子の稀崩壊の観測
- ヒッグス粒子の自己結合定数の測定
- SUSY 粒子の探索範囲の拡大

などが期待される。

1.3.2 ATLAS 内部飛跡検出器アップグレード

HL-LHC での過酷な放射線環境下でそれまでと同様もしくはそれ以上の性能を 維持しデータ収集するために、内部飛跡検出器の総入れ替えを行う。

 $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ という現在の設計値の5倍もの瞬間ルミノシティ下ではバンチ 衝突あたりにおよそ140個の陽子・陽子衝突が起こり、より多数の粒子が生成され る。これにより検出器のヒット占有率が増加し、荷電粒子の飛跡の再構成に失敗 する事象の増加をまねく。特にTRT は、HL-LHC でヒット占有率が100%になっ てしまうため,新たな内部飛跡検出器はピクセル検出器とシリコンストリップ検 出器のみで構成する。

また,生成される粒子の増加によりシリコン検出器は放射線被ばく量が増加し, 深刻な放射線損傷を受ける。これは荷電粒子の検出効率を低下させる。現在使用 しているシリコン検出器は,ピクセル検出器は400 fb⁻¹,SCT は700 fb⁻¹ までの 放射線量に耐える設計である。ピクセル検出器とシリコンストリップ検出器は,セ ンサー,読み出し ASIC ともにより放射線耐性の高いものに入れ替える。



図 1.7: 内部飛跡検出器アップグレードのレイアウトの一例 [3]。赤線はピクセル 検出器層, r = 0.4–1.0 m の範囲の青線はストリップ検出器層を表す。

HL-LHC アップグレードに向け考案されている新たな内部飛跡検出器のレイア ウトの1つを図 1.7 に示す。このレイアウトでは、バレル部に4層とエンドキャッ プ部に6層のピクセル検出器、バレル部に5層とエンドキャップ部に7層のスト リップ検出器で内部飛跡検出器を構成する。現行のピクセル検出器のピクセルサ イズが50×400 μ m であるのに対し、新たなピクセル検出器はバレル部外側2層を ピクセルサイズが50×250 μ m²のもの、内側2層を25×150 μ m²のものにそれぞ れ交換する計画である。センサーを細分化し単位面積当たりのチャンネル数を増 やすことにより、検出器のヒット占有率を下げる。またピクセルセンサーの厚さ を 250 μ m から 150 μ m に薄くすることにより、物質量の減少だけでなく電荷収集 効率の低下を抑え、高放射線耐性が期待される。

HL-LHC において統計量が 3000 fb^{-1} に到達するまでに内部飛跡検出器が受け る放射線量の見積りを図 1.8 に示す。例えばピクセル検出器は、最内層で $1.4 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$,外側の層で $1.7 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ 程度の放射線耐性が要求される。こ こで、 n_{eq}/cm^2 は運動エネルギーが 1 MeV の中性子数に換算した放射線量の単位



図 1.8: 内部飛跡検出器において 3000 fb⁻¹ の統計量で予想される放射線量 [3]

である。この単位については2.2で詳細に述べる。

1.3.3 高放射線耐性の検出器の研究開発

現在,HL-LHC アップグレードに向け,高放射線耐性のピクセルやストリップ センサーの研究開発を行っている。

高放射線耐性をもつシリコンセンサーの研究開発には主に次の工程がある。

- 高放射線耐性が期待される構造をもつ試験用センサーのプロトタイプを作成 する。
- 作成したセンサーに多量の放射線を照射し、放射線損傷を与える。照射する 放射線量は最大で1×10¹⁶ n_{eq}/cm² 程度である。
- ・照射放射線により損傷を受けたセンサーの性能を実験室での試験や加速器 を用いたビーム試験により評価する。照射した放射線量による性能の変化か ら放射線耐性を評価し、作成したセンサーの構造に対しフィードバックを与 える。

これらの工程を繰り返し行うことで、より高い放射線耐性をもつセンサーを開発 する。

1.4 本研究の目的

本研究の目的は、ATLAS アップグレード用として開発しているピクセルセン サーの放射線耐性評価のために行う、電荷収集効率の測定方法の確立である。

放射線耐性を評価する方法の1つに,電荷収集効率の放射線被曝量依存性の測 定がある。図 1.9 に,シリコンストリップセンサーにおける電荷収集効率の放射線 被ばく量依存性の測定結果の一例を示す。センサーに照射される放射線量が増え るにつれ,電荷収集量が減っているのがわかる。放射線被ばく量が増加しても電 荷収集効率が下がりにくいセンサーが,より放射線耐性が高いセンサーであると 言える。図 1.9 の結果は, n-in-p センサーが p-in-n センサーよりも高放射線耐性で あることを示している¹。



図 1.9: ストリップセンサーでの電荷収集量の放射線量依存性の測定結果 [4]。照 射する放射線量が増えるにつれ,放射線損傷により電荷収集量が減る。

電荷収集効率の測定は、シリコンストリップセンサーに対しては様々な測定が 行われている。ストリップセンサーからの信号を直接読み出すことは比較的容易 で、例えば図 1.10 のように、試験用センサーの数本のストリップ電極をワイヤー ボンディングで測定用端子に接続し、この端子から直接信号を読み出せる。この ように、ストリップセンサーは検出器としての組み立て以前に、センサー単体で 試験することができる。

一方ピクセルセンサーはセンサーが微細なピクセル状に分かれているため、スト リップセンサーと同様の方法で測定を行うことが難しい。そのため、電荷収集効率 等を評価するには信号読み出しASICを用いた測定を行う。ただし、ATLAS検出器 で使用するピクセル検出器の読み出しASICは多数のチャンネルから信号を高速に 読み出すために出力データ量を減らす必要があることから、ADCを搭載していな

¹n-in-p センサー, p-in-n センサーについては2章で述べる。



図 1.10: 試験用ミニチュアストリップセンサーの写真。大きさ1cm²のセンサーの ストリップ電極数本から測定用端子にワイヤーボンディングで接続している。

い。代わりに、センサーからの電荷情報を得る手段として、Time Over Threshold (TOT)を測定する。ある決められた閾値を信号が超えていた時間が TOT であり (図 1.11(a))、入力電荷量が増えると TOT も大きくなる(図 1.11(b))。よって、 TOT から電荷量に関する何らかの情報を得ることができる。ATLAS 検出器に使 用するピクセル検出器では、TOT を 40 MHz のクロックを単位として数える。



図 1.11: TOT の概念図。(a) 信号がある閾値を超えている時間が TOT である。(b) 信号波形が大きくなると, 閾値を超えている時間が長くなり, TOT は大きくなる。

TOT を用いた電荷収集効率の測定ができればストリップセンサーと同様に放射 線耐性の評価が可能である。そのための電荷収集効率の測定方法を確立すること が本研究の目的である。

1.4.1 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおりである。2章で半導体検出器の一般論を述べ、シリ コン検出器の放射線損傷の仕組みと、放射線損傷が検出器に及ぼす影響について 述べる。3章では本研究で使用する試験用ピクセル検出器とDAQシステムについ て述べる。4章でTOT較正の手順と、実際に較正を行った結果とを述べ、5章で は放射線損傷前のピクセルセンサーの電荷収集量の測定について述べる。

第2章 シリコン検出器

本研究で使用するピクセル検出器は、シリコンを用いた半導体検出器である。こ の章では、シリコン検出器について述べる。

2.1 半導体検出器の一般論

この節では、シリコンを例に半導体の主な性質と半導体検出器の検出原理について述べる。

2.1.1 半導体

結晶構造を持つ物質は、絶縁体、半導体、導体の3つに大きく分類され、これ らはエネルギー準位のバンド構造が異なる。図 2.1 に3つそれぞれのバンド構造 を示す。バンド構造の各領域を、エネルギーの低い側から順に価電子帯、禁制帯、 伝導帯と呼ぶ。価電子帯は全てのエネルギー準位に電子が存在し、伝導帯は一部、 または全てのエネルギー準位に電子が存在しない。伝導帯の一部に電子が存在す る場合や価電子帯に存在する電子が伝導帯へ励起した場合、その電子は自由に動 く電荷の担い手となる。禁制帯は、価電子帯と伝導帯との間の電子が存在できな い領域である。

禁制帯のエネルギー幅を E_g とする。絶縁体は E_g が大きいため室温程度では電子は十分なエネルギーを得られず,熱的には伝導帯へ励起できない(図 2.1(a))。 したがって電子は動くことができず導電性を示さない。一方,導体では禁制帯が 無く価電子帯と伝導帯とが重なっているため,電子は簡単に価電子帯から伝導帯 へと励起し自由に動くことができる(図 2.1(c))。つまり導体は良い導電性を示す。 半導体は E_g が小さいため,電子は室温程度で熱的な励起により禁制帯を超えるこ とができる(図 2.1(b))。シリコンの場合 $E_g = 1.12 \text{ eV}$ である。価電子帯の電子が E_g 以上のエネルギーを受け取り伝導帯へ励起すると、その電子により導電性を示 すようになる。こうして半導体はわずかな導電性を示す。

半導体において,価電子帯から伝導帯へと励起した電子は結晶中を移動できる ようになり,負の電荷の担い手となる。励起した電子が元々存在した位置には電 子の存在しない穴が空く。これを正孔と呼ぶ。正孔は相対的に正の電荷を持つの で,正の電荷の担い手となる。このように半導体には正・負両方の電荷により電 流が生じる。



図 2.1: (a) 絶縁体, (b) 半導体, (c) 導体のエネルギー準位のバンド構造。

2.1.2 p型半導体,n型半導体

p型半導体,n型半導体は,純粋なシリコンの結晶に特定の元素を不純物として 少量添加することで作られる。

図 2.2 は、4 価の元素であるシリコンの結晶にホウ素等の3 価の元素を添加した ときの結晶構造とバンド構造の様子である。シリコン原子より価電子が一つ少な い3 価の元素を加えることで、価電子帯の電子が不足し正孔が多くなる。このと き不純物として加えた原子は禁制帯に新たなエネルギー準位をつくる。この準位 と価電子帯とのエネルギー差はとても小さく、シリコンの場合は0.05 eV 程度であ る。室温で価電子帯の電子は容易にこの準位へと励起することができるので、伝 導帯へと励起する電子が減り、価電子帯では正孔が増える。よって正孔が主な電 荷の担い手となる。このような物質を p 型半導体と呼ぶ。また、この添加された3 価の元素をアクセプターと呼ぶ。

一方シリコン結晶に5価の元素を不純物として加えたときの結晶構造とバンド 構造の様子は図 2.3 のようになる。シリコンに比べ不純物の価電子がひとつ多い ので,価電子帯に収まらずに余る電子が存在するようになる。また5価の原子は 伝導帯のすぐ下に新たなエネルギー準位をつくる。この準位と伝導帯の準位との エネルギー差はシリコンの場合 0.05 eV 程度である。余分な電子はこの準位に存在 し,室温程度で容易に伝導帯へと励起する。伝導帯に存在する電子が増え,その 電子が主な電荷の担い手となる。このような物質をn型半導体と呼ぶ。この添加 された5価の元素をドナーと呼ぶ。

またアクセプター濃度が高いp型半導体をp⁺型半導体,ドナー濃度が高いn型 半導体をn⁺型半導体と呼ぶ。



図 2.2: p型半導体の (a) 結晶構造と (b) バンド構造の様子。



図 2.3: n型半導体の (a) 結晶構造と (b) バンド構造の様子。

2.1.3 半導体検出器の検出原理

現在使用されている半導体検出器の多くは、p型半導体とn型半導体とを接合させた構造の半導体をセンサーとして用いる。この構造は半導体ダイオードとしてよく知られている。

p型半導体とn型半導体とを接合させると,接合部付近ではそれぞれの半導体に 含まれる電子と正孔との数密度の違いによる拡散電流が生じる。p型半導体中の正 孔はn型半導体側へ,n型半導体中の電子はp型半導体側へと移動し,接合部付近 で再結合する。その結果,接合部付近のp型半導体側は負に,n型半導体側は正 にそれぞれ帯電し,接合部付近に電位差が生じる。この電位差を拡散電位と呼ぶ。 図 2.4 はその様子を示したものである。拡散電位の生じる領域には自由な電子や 正孔は存在しない。この領域を空乏層と呼ぶ。



図 2.4: pn 接合

荷電粒子が空乏層を通過するとき,価電子帯の電子にエネルギーを与える。する とこの電子は禁制帯を超え伝導帯へ遷移し,自由に動く電子と正孔が生じる。空乏 層領域で自由に動く電荷が生じると,拡散電位がつくる電場によりすぐに空乏層 領域外に運ばれる。この電荷を電気信号として読み出すのが半導体検出器である。

単に p 型半導体と n 型半導体とを接合させた場合,空乏層は接合部から数 µm 程度しか広がらない。空乏層で生じた電荷が空乏化していない領域に運ばれると, 自由な電子や正孔と再結合し消滅するため電荷を収集できない。そこで空乏層領 域を広げるためために, pn 接合した半導体の n 型半導体側の電位が高くなるよう 電圧をかける。この電圧を逆バイアスと呼ぶ。逆バイアスをかけると, n 型半導体 中の電子, p 型半導体中の正孔はそれぞれの電極側に集まり,電荷のない領域が広 がる。図 2.5 にこの様子を示す。荷電粒子検出器としての半導体検出器は,半導体 センサー全体を空乏化して使用する。pn 接合した半導体全体を空乏化することを 全空乏化と呼び,全空乏化するために必要な電圧を全空乏化電圧と呼ぶ。空乏層 の厚さWと逆バイアスVとの関係は次式で表される。

$$W = x_{\rm n} + x_{\rm p} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} \left(\frac{1}{N_{\rm A}} + \frac{1}{N_{\rm D}}\right) \left(V_{\rm bi} + V\right)} \tag{2.1}$$

ただし, x_n, x_p はそれぞれ n 型, p 型半導体中の空乏層の厚さ, ε はシリコンの誘 電率,eは電気素量, V_{bi} は拡散電位である。



図 2.5: 逆バイアスをかけ空乏層が広がる様子。

通常,逆バイアス電圧は拡散電位よりも十分高いため, $V \gg V_{bi}$ とする。また, 実際の検出器として使用する際は、例えば n 型半導体と p⁺ 型半導体というよう に、ドナー濃度とアクセプター濃度が著しく異なる pn 接合を用いる。この場合, $N_A \gg N_D$ と考えられるので,式 (2.1)から

$$W \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon}{eN_{\rm D}}V} \tag{2.2}$$

を得る。空乏層の厚さは逆バイアス電圧の平方根に比例することがわかる。

半導体検出器では、入射する荷電粒子が空乏層中で一組の電子・正孔対をつくるのに必要なエネルギーが小さい。このエネルギーは入射粒子の種類やエネルギー に依らずほぼ一定で、シリコンの場合は 3.6 eV 程度である。そのため荷電粒子の 通過距離が短くても多くの電荷を収集できる。よって半導体検出器を使用するこ とにより、物質量を減らしつつ高いエネルギー分解能を得られる。

高エネルギー実験分野で最も一般的に使われているシリコン検出器は、図 2.6 に 示すような構造になっている。n型半導体バルクの片側の表面に p^+ 型半導体を読 み出し電極として埋め込み、反対側の表面には n^+ 型半導体を埋め込む。 p^+ 電極 と n^+ 電極とに逆バイアスをかけることで、図 2.6 のように p^+ 電極側から n 型バ ルク中へと空乏層が広がる。空乏層中を荷電粒子が通過し電子・正孔対が生じる と、 n^+ 型電極両側にそれぞれ収集される。この電荷を信号として読み 出す。



図 2.6: 半導体検出器の一般的構造 [6]。n 型バルク中に埋め込まれた p⁺ 読み出し 電極と,反対側表面の n⁺ 電極に逆バイアスをかけることで空乏層が広がる。空乏 層を荷電粒子が通過すると生成される電荷を集め,信号として読み出す。

この例のように n 型バルクに p⁺ 型電極を埋め込む構造のセンサーを p-in-n セン サーと呼ぶ。

2.2 シリコン検出器の放射線損傷

加速器実験においてシリコン検出器は、ATLASのピクセル検出器やストリップ 検出器のようにビーム衝突点のすぐ近くに配置されることが多い。ビーム衝突点 付近では生成された多数の粒子が検出器に入射するため、検出器は放射線による 損傷を受ける。この節ではシリコン検出器が受ける放射線損傷とその影響につい て述べる。

シリコンの放射線損傷は、バルク損傷と表面損傷の2つに大別される。以下で はこの2つについて順に述べる。

2.2.1 バルク損傷

バルク損傷とは、シリコンセンサーのバルク部の原子と入射粒子との相互作用 により格子欠陥が生成されることである。また、反跳された原子はさらに結晶中 の原子を反跳することもある。これが繰り返し起こると格子欠陥のクラスタがで きる。

一般的に,異なる種類の粒子はそれぞれ異なる相互作用でバルクに損傷を与える。例えば荷電粒子は結晶格子の原子だけでなく周囲の電子とも電磁相互作用を

起こすが、中性子など中性粒子は原子核のみと相互作用する。このため、異なる 種類の粒子では、落とすエネルギーが等しい場合でも格子欠陥の生じ方に違いが 出る。

しかし入射粒子が異なっても反跳された原子による2次的な相互作用は等しい。 そのため、生じる格子欠陥の量は入射粒子のエネルギー損失のうち結晶格子の原子 を反跳し失うエネルギー(Non Ionizing Energy Loss: NIEL)と線形性があると仮 定することで、NIELで放射線量を換算し、放射線損傷度を比較できる。基準の単 位として、1 MeV の中性子の個数を用いることが多い。この単位を1 MeV n_{eq}/cm² または単に n_{eq}/cm² と書く。中性子数に換算する際の変換係数は粒子の種類やエ ネルギーに依存し、これらは実験的に決められる。

バルク損傷は検出器に次のような影響を及ぼす。

- 暗電流の増加 格子欠陥は、エネルギーバンド構造の禁制帯に新たなエネルギー準 位をつくる。この準位が電子・正孔を捕獲・放出するため、価電子帯の電子 はこの準位を経由して伝導帯に励起しやすくなる。また同様に正孔も生じ、 これらが電流をつくる。したがって暗電流が増す。この電流はバルクが浴び る放射線量に比例し増加する。
- バルクの型変換と全空乏化電圧の増加 バルク部の格子欠陥は,実効的にドナー濃度 N_D を減少させる。同時に,アクセプターのように作用する状態をつくり実効的にアクセプター濃度 N_A を増加させる。実効的な不純物濃度を $N_{\text{eff}} = N_D N_A$ とすると,はじめ $N_{\text{eff}} > 0$ であるn型半導体は放射線損傷によりやがて $N_{\text{eff}} < 0$ となり,p型半導体のように振る舞う。これが半導体の型変換(type inversion)である。また不純物濃度が増加すると全空乏化電圧が増加する。図 2.7 はn型バルクのシリコンセンサーの全空乏化電圧の放射線量による変化を測定した結果である。型変換後は放射線量が増加するほど,センサーを全空乏化するには高い電圧が必要となる。
- **電荷のトラップ** 放射線損傷による格子欠陥が,荷電粒子がつくる電子や正孔を捕 獲することで電荷収集量を減少させる。

2.2.2 表面損傷

表面損傷は、センサー表面を覆う誘電体などが受ける放射線損傷の総称である。 特に重要なものの一つは、表面を覆う SiO₂ 層が受ける損傷である。

SiO₂ 層内で電子・正孔対ができるとその大部分は再結合するが,SiO₂ 層内での 電子の移動度 ($\mu_{p,oxide} \approx 20 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) に比べ正孔の移動度が小さい ($\mu_{n,oxide} \approx 2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) ため、一部の電子は読み出し電極に集まる。残った正孔はSiO₂ 層とバルク層との境界付近に集まり正の電場をつくり、この電場に電子が引きつ けられることにより電荷収集効率が下がる。



図 2.7: 300 µm 厚 n バルクシリコンセンサーの全空乏化電圧と, NIEL を用いて 1 MeV 中性子数に換算した被ばく放射線量との関係 [6]。

2.3 高放射線耐性のセンサー

ATLAS 日本グループは,HL-LHCの厳しい放射線環境に耐えうる高放射線耐性のピクセルセンサーとして,n-in-pセンサーの研究・開発を行っている。本研究ではこの n-in-pセンサーを使用する。

この節では、従来多く使用されている p-in-n センサーとの比較をしながら, n-in-p センサーの特徴を述べる。



図 2.8: n-in-p ピクセルセンサーの概略図。p 型であるバルク部は型変換しないので、空乏層は常に読み出し電極側から広がる。

図 2.8 に n-in-p センサーの概略図を示す。p 型シリコンバルクに n⁺ 型の電極が ピクセル状に埋め込まれた構造になっている。n-in-p センサーの特徴は

• バルク部がp型であるので型変換を起こさない,

- 読み出し電極側から空乏層が広がるため、全空乏化していなくても信号を読み出すことができる、
- 読み出す電荷は正孔ではなく電子である,
- 半導体プロセスは片面のみで良いため低コストで製造できる

ことが挙げられる。これらの特徴を持つ n-in-p センサーが高放射線耐性である理由を,次に述べる。

従来のp-in-nセンサーの場合,初めは読み出し電極側にpn接合面があるため,読 み出し電極側から空乏層が広がる(図 2.9(a))。しかし放射線損傷によりバルクの型 変換が起きると,読み出し電極の反対側から空乏層が広がるようになる(図 2.9(b))。 このため,型変換が起こった後に信号を読み出すにはセンサーを全空乏化する必 要がある。2.2.1 で述べたように,型変換後には被曝放射線量が増えるほど高い全 空乏化電圧が必要であるため,全空乏化電圧が検出器の耐圧電圧を超えたとき検 出器としての機能を失う。一方 n-in-p センサーの場合, pn 接合面が読み出し電極 側にありバルクが型変換を起こさないため,放射線損傷を受けても常に読み出し 電極側から空乏層が広がる。部分的な空乏化で信号を読み出すことができるので p-in-n センサーと同程度の耐圧でも n-in-p センサーのほうが電荷収集効率が格段 に高く,結果として放射線耐性の高い検出器となる。



図 2.9: p-in-n センサーの空乏層が広がる様子。(a) バルク部の型変換前。空乏層 は読み出し電極側から広がる。(b) 型変換後。空乏層は読み出し電極と反対側から 広がる。全空乏化していないと信号は読み出せない。

また, n-in-p センサーは読み出し電極が n⁺ 型半導体であるため,信号として収 集する電荷は正孔ではなく電子である。シリコン結晶中での電子の移動度が正孔 よりも高いため,収集する電荷が放射線損傷で生じる格子欠陥などにトラップさ れにくい。この点からも, n-in-p センサーは p-in-n センサーよりも放射線耐性が 高い。

2.4 ピクセル検出器

シリコン検出器には様々な構造のものが存在する。この節ではピクセル検出器 について説明する。

図 2.10(a) のように、ピクセル検出器はセンサーに電極を格子状に配置し、それ ぞれの電極から独立した信号を読み出す。どのピクセルから信号が読み出された かによって荷電粒子の入射位置を 2 次元的に測定できる。各ピクセルを小さく分 割することで高い位置分解能を得られる。



図 2.10: (a) ピクセル検出器の構造の概念図 [6]。センサーの電極を微細なピクセル状にすることで高い位置分解能を得る。(b) バンプボンディングの断面図 [6]。

バンプボンディング

ピクセルセンサーと信号を読み出す ASIC とはバンプボンディングという技術 で接続する。図 2.10(b) は,バンプボンディングで接続されたセンサーと ASIC の 断面の模式図である。現在はバンプに AgSn はんだがよく用いられる。

バンプボンディングは技術的に難しく、歩留まりが悪い。バンプボンディングに 不備があると、バンプの接着が剥がれたり、隣接するピクセルのバンプがつなが ることでピクセルどうしがショートしたりしてしまう。現在 ATLAS アップグレー ド用のピクセル検出器として、センサー、読み出し ASIC ともに現行のピクセル検 出器よりもピクセル数を増やし、大きなサイズのものを開発している。そのため バンプボンディングは以前よりもさらに技術的に難しくなっており、バンプボン ディングの技術開発も、重要な課題である。

ピクセル電極の分離構造

高放射線耐性が要求されるピクセル検出器には,前節で述べた p-in-n センサー や,n-in-n センサーを用いるのが理想的である。これらのセンサーは,放射線損 傷により読みだし電極側の表面に電子の層をつくる。この層により読みだし電極 間がショートしてしまう。そのため,電極間を分離する構造が必要である。分離 のための構造として,p-spray または p-stop という構造が用いられる。図 2.11 に, p-spray, p-stop 構造を持つピクセルセンサーの概念図を示す。放射線損傷後はこ れらの構造付近で検出効率が下がりうることが調べられており,高い放射線量を被 ばくしても高い検出効率を維持するため様々な形状や配置のパターンのセンサー を研究開発している。



⊠ 2.11: (a) p-spray, (b) p-stop

第3章 実験装置

この章では、本研究で使用する試験用ピクセル検出器とデータ収集(DAQ)システムについて述べる。図 3.1 に本研究で使用する試験用ピクセル検出器とデータ収集システムの概念図を示す。PCは、汎用データ収集基板を介してピクセルモジュールへモジュールの挙動を設定するためのコマンドを送り、またモジュールから送られてくるデータを記録する。汎用データ収集基板は2つのFPGAを使いPCとモジュール間の通信を仲介する。ピクセルモジュールがデータを出力するために必要なトリガーは、汎用データ収集基板が外部からのNIM 信号として受け取り、それをトリガーコマンドに変換してモジュールへ送る。



図 3.1: 試験用ピクセルモジュールとデータ収集システムの概念図

3.1 ピクセルモジュール

本研究で使用するピクセルモジュールの1つを図 3.2(a) に示す。バンプボンディ ングで一体となったピクセルセンサーと信号読み出し ASIC が基板上に設置され ている。センサーからの信号は読み出し ASIC が処理し,デジタル信号としてモ ジュールから送り出される。

3.1.1 信号読み出しASIC: FE-I4

ピクセル検出器アップグレードに向け、センサーだけでなく読み出し ASIC も新 たに開発している。本研究では FE-I4 と呼ばれる、新ピクセル検出器用に開発さ



(a)

(b)

図 3.2: (a) ピクセルモジュール。赤枠で示した箇所に,センサーと読み出し ASIC が 一体となり設置されている。(b) FE-I4。大きさ 250×50 µm² のピクセルが 80×336 個配置されている。

れている ASIC を使用する。

FE-I4には2つのバージョンがあり、それぞれFE-I4A、FE-I4Bと呼ばれる。は じめに試験的につくられたのがFE-I4Aであり、その改良版がFE-I4Bである。本 研究で使用するのはFE-I4Aであり、AとBでは多くの特徴や機能が共通なので以 降の説明ではFE-I4Aのことを単にFE-I4と記述する。Bとの違いを述べる必要が あるときは改めてFE-I4A、FE-I4Bと記述する。

図 3.2(b) に示すのが FE-I4 の画像である。130 nm CMOS プロセスでつくられ, チップの大きさは 20 × 18.6 mm² である。大きさが 250 × 50 µm² のピクセル状の 読み出しチャンネルを 26880 (80 columns × 336 rows) チャンネル持つ。動作クロッ クは 40 MHz である。FE-I4 の主な特徴を表 3.1 にまとめる。

項目	値	単位
CMOS プロセス	130	nm
チップの大きさ	20×18.6	mm^2
ピクセルの大きさ	250×50	$\mu { m m}^2$
ピクセル数	80×336	$\operatorname{columns}\times\operatorname{rows}$
アナログ電圧	1.5	V
デジタル電圧	1.2	V
動作クロック	40	MHz
データ転送速度	160	Mbps

表 3.1: FE-I4 の主な特徴

FE-I4 は, global register と pixel register の2種類のレジスタへ任意の値の書き 込みを行うことで挙動を設定できる。Global register は FE-I4の全ピクセルに対す る共通の設定値を保持するレジスタである。Pixel register は FE-I4 の各ピクセル ごとの設定値を保持するための13 bit のレジスタであり、アナログ回路の挙動を設 定する。



図 3.3: FE-I4 アナログピクセル回路

図 3.3 に FE-I4 の各ピクセル内に搭載されているアナログ回路の概略図を示す。 センサーは FE-I4 と DC 接続されており,センサーからの負の電荷がパッド(Qin) に入ると,その入力電荷は2段階のアンプ(Preamp, Amp2)で増幅し三角形状に 整形され,後段のディスクリミネータへと伝えられる。FDAC と呼ばれる4bitの pixel register が保持する値でフィードバック電流を制御できる。信号がディスク リミネータに定めた閾値を超えると HitOut からヒットしたという信号が出力され る。閾値は TDAC と呼ばれる5bitの pixel register が保持する値で調節できる。ま た,Preampの前にはセンサーからの信号を模した負の信号(テスト電荷)をつく るための回路とキャパシタ(V_{cal}, C_{inj1,2})が存在する。この回路からの電荷は、セ ンサーからの信号を使わずに読み出し回路の動作確認をするのに使用される。

以下では FE-I4 の様々な機能・特徴のうち、本研究にとって特に重要なものを いくつか説明する。

テスト電荷

テスト電荷は図 3.3 に示したアナログ回路において, Preamp の上流にある Vcal

とキャパシタ C_{inj1,2} の組み合わせにより生成される。以降 V_{cal} から与える電圧の ことを単に V_{cal} と呼ぶ。

 C_{inj1}, C_{inj2} の静電容量の設計値はそれぞれ 3.9 fF, 1.9 fF である。ただし、 C_{inj1}, C_{inj2} の静電容量を測定するための回路は FE-I4B にのみ搭載されており、FE-I4B での測定では 10 % 程度のばらつきがあることが知られている。

V_{cal}は、PlsrDACと呼ばれる 10 bit の global register に設定した値で決めること ができるため、既知の電荷量のテスト電荷を送ることができる。電荷量を指定す るためには V_{cal} と PlsrDAC との関係を較正する必要があり、その関係は 1 次式

$$V_{cal} = a + b \left(\text{PlsrDAC} \right) \left[\text{mV} \right]$$
(3.1)

で与えられる。V_{cal} と PlsrDAC との関係は FE-I4 ごとに個体差があるため,この 較正はモジュールごとに行う。

Trigger latency

DAQシステムから,決められたビット列であるトリガーコマンドを受け取ると, FE-I4 は内部でトリガー信号を全ピクセルに向け発行する。以降このトリガーコ マンドを LV1 コマンドと呼ぶ。LV1 コマンドを受け FE-I4 が内部で発行するトリ ガー信号を LV1 trigger と呼ぶ。

通常, ヒットと同期した外部からのトリガーはヒットからいくらかの遅延を持 つ。ヒットから LV1 コマンドを受け取るまでの遅延を trigger latency と呼ぶ。ピ クセルが LV1 trigger を受け取ると, FE-I4 は予め設定された時間だけさかのぼっ たタイミングのヒット情報を送り出す。さかのぼる時間は, global register の設定 値を変更することで動作クロックを単位として設定・調節することができる。こ の時間と trigger latency とを一致させることにより, 適切なタイミングのヒット情報を得ることができる。

Multi trigger 機能

FE-I4 は、LV1 コマンド1つに対して、複数の連続した LV1 trigger を発行する ことができる。FE-I4 が LV1 コマンドを受け取ると、最大16 クロック分連続して LV1 trigger を発行できる。この機能を使用するとトリガーとタイミングのあった ヒット情報だけでなくその前後のタイミングの情報も得ることができる。

3.2 DAQ システム

本研究では、SEABAS2(図 3.4)と呼ばれる汎用データ収集基板を用い、PC と FE-I4 との通信を行う。SEABAS2 はユーザが独自にファームウェアを実装できる FPGA を搭載しており、ユーザが使用するフロントエンド回路に対応した補助基 板とファームウェアを開発することで様々な ASIC の通信・制御ができる。また SEABAS2は, FPGA上に TCP/IP 通信を実装した SiTCP と呼ばれる技術により, イーサネットを通じて PC との通信が可能である。



図 3.4: 汎用データ収集基板: SEABAS 2

本研究での FE-I4 との通信には,J.J Teoh 氏が SEABAS2 の前バージョンである SEABAS1 用に開発したもの [5] を元に,廣瀬穣氏が SEABAS2 用に移植したファームウェアとソフトウェアを使用する。

第4章 TOTの較正

この章では, 1.4 節で説明した Time Over Threshold (TOT) を, 3 章で説明した試験用ピクセル検出器および DAQ システムを用いて較正する方法について述べる。

TOTの較正のために必要な操作を,以下にまとめる。

● V_{cal}の較正

TOT 較正に用いるテスト電荷の電荷量を求めるために行う。

- Threshold スキャン・チューニング
 各ピクセルの閾値を、目標値になるように調整する。
- TOT スキャン・チューニング
 各ピクセルの、ある電荷量に対する TOT を、目標値になるように調整する。
- PlsrDACスキャン
 電荷量を変えながらテスト電荷を入射してTOTの較正を行う。FE-I4のTOT
 上限値が小さいため、電荷量とTOTとの関係式の求め方に工夫が必要である。

以下でこれらの操作の詳細を,センサー厚 320 µm のモジュールで行った結果を例 に説明する。

4.1 V_{cal}の較正

3.1.1 で述べたように、テスト電荷の電荷量を求めるために V_{cal} と PlsrDAC と の関係を測定する。 V_{cal} は、ピクセルモジュールの基板上にプローブ用のピンが 存在するので、ここから電圧値を測定する。PlsrDAC の設定値を変えながら、各 DAC 値での V_{cal} をデジタルマルチメータを使って測定し、その結果から式 (3.1) の係数 b を求める。測定結果を図 4.1 に示す。PlsrDAC の値が 900 以降は DAC 値 に対し電圧値が飽和しているため、PlsrDAC=0-900 の範囲を 1 次式でフィッティ ングし、b = 1.51 mV/PlsrDACを得た。テスト電荷を生成するキャパシタ C_{inj} に ついては設計値である 5.8 fF を使い、設定した PlsrDAC 値に対応するテスト電荷 量を求める。

既知の電荷量のテスト電荷を FE-I4 のアナログ回路に入射しデータ収集することを analog injection と呼ぶ。



図 4.1: V_{cal} と PlsrDAC との関係。

4.2 チューニング

各ピクセルの閾値の値と、ある基準電荷量の信号に対する TOT の値とを任意の 値に調節することをチューニングと呼ぶ。

閾値や TOT を調節するための DAC の設定値が全ピクセルで共通であっても, 実際に設定される閾値や TOT を調整するためのバイアス電流値はピクセルごとに ばらつきがある。そのため、ピクセルごとに DAC の値を調整することで、実際に 設定される閾値や得られる TOT の値を目標値に近づけ、各ピクセル間のばらつき を最小限に抑えるのがチューニングの目的である。

- ここでは,センサー厚 320 µm のモジュールに対しチューニングの目標値を,
- 閾値: 3000 e
- TOT: 基準電荷量 20 ke に対し 10

とする。

以下で threshold, TOT チューニングの手順と結果を述べる。

Threshold スキャン

Threshold スキャンでは、各ピクセルのディスクリミネータの閾値とノイズの大きさを測定する。1つのピクセルに対する threshold スキャンの手順を説明する。

PlsrDACの値を変えながら,各DAC値で100回ずつ analog injection を行い閾値 を超えヒットとなる検出効率をDAC値(入射電荷量)の関数としてプロットす る。図 4.2 にこの結果の一例を示す。このプロットはS字を描く分布をするため,



S-curve

図 4.2: 検出効率と DAC 値との関係。誤差関数でフィッティング(赤線)し、検出 効率が 50 % となる(青線)点が閾値に相当する DAC 値である。

Sカーブと呼ばれる。得られるSカーブを誤差関数でフィッティングし、検出効率 が 50% となる点の PlsrDAC の値を電荷量に変換した値を、閾値の測定値と定義 する。また、誤差関数の幅 1 σ 相当の電荷量をノイズと定義する。

Threshold チューニング

Threshold チューニングは global threshold チューニング, local threshold チュー ニングという手順を踏み行う。

Global threshold チューニングは, 閾値を制御する global register の設定値を調 節し全ピクセルの閾値の平均値を目標値に合わせる,大まかなチューニングであ る。全ピクセルの閾値分布はガウシアン分布であるが,この段階では平均値を中 心に数 100 e の大きな分散を持っている。Global threshold チューニング後の閾値 分布を図 4.3(a) に示す。

Global チューニングにより全ピクセルに対する閾値平均値を目標値に合わせた 後, local threshold チューニングで各ピクセルの閾値を目標値に合わせる。各ピク セルの pixel register の設定値を調節し, ピクセルごとに閾値の細かな調節をする。 Local threshold チューニング後の全ピクセルの閾値分布の分散は, FE-I4 の仕様 上は 100 *e* 以下になる。Local threshold チューニング後の閾値分布を図 4.3(b) に 示す。分布の分散は 58 *e* であり、仕様を満たす。



図 4.3: Threshold チューニング。(a) global チューニング後の閾値分布。 $\sigma = 603 e$ と閾値に大きなばらつきがある。(b) local チューニング後の閾値分布。ピクセル ごとに閾値を細かく調節することで $\sigma = 58 e$ までばらつきが小さくなる。

TOT スキャン

TOT スキャンでは、ある任意の電荷量のテスト電荷に対する各ピクセルの TOT の値をまず測定する。任意の電荷量に固定した analog injection を全ピクセルに対 し 100 回ずつ行い、各ピクセルが返す TOT 値の平均値をその電荷量に対する TOT とする。このため、各ピクセルが返す TOT は整数値であるが、ある電荷量に対す る TOT は小数値を取り得る。

TOT チューニング

Threshold チューニングと同様, TOT も global TOT チューニング, local TOT チューニングという手順でチューニングを行う。

Global TOT チューニングは、ある基準となる電荷量のテスト電荷に対する全ピ クセルの TOT の平均値が目標値になるよう調整するおおまかなチューニングであ る。Global register で全ピクセル共通にフィードバック電流を調整し、TOT の平 均値を目標値にあわせる。Global TOT チューニング後の TOT 分布を図 4.4(a) に 示す。

Local TOT チューニングは、全ピクセルの TOT 平均値をあわせた後に行う、各

ピクセル毎の細かなチューニングである。各ピクセルの pixel register の設定値を 調節することによってピクセル毎のフィードバック電流を調節し, TOT を目標値 にあわせる。Local TOT チューニング後の TOT 分布を図 4.4(b) に示す。



図 4.4: TOT チューニング。(a) global チューニング後の TOT 分布。1 つの TOT 値 が取り得る電荷量の値の範囲が広いためほとんどのピクセルが一定の TOT 値を返 すが,一定の TOT のみを返さないピクセルもわずかに存在する。(b) local チュー ニング後の TOT 分布。

チューニングの反復

Threshold チューニングを行い閾値を目標値にあわせた後,TOT チューニング を行いTOT を目標値にあわせる。TOT チューニングではフィードバック電流を調 節するため,ディスクリミネータへの入力波形が変わる。このため,TOT チュー ニング後には目標値にあらかじめあわせておいた閾値が変わってしまう。反対に, threshold チューニングでディスクリミネータの閾値が変わるとTOT チューニン グであわせたTOT が変わってしまう。

このお互いの影響による変化は、それぞれのチューニングを繰り返すことで小 さくなり、最終的にほぼ変化しない状態に収束する。この状態にすることがチュー ニングの最終目標である。

FE-I4 は threshold チューニング, TOT チューニングをそれぞれ 2 回もしくは 3 回ずつ行うと, 閾値, TOT ともに目標値に揃う。

4.3 TOT 較正

TOT と電荷量との対応式を得る最も単純な方法として,電荷量を何点か変えな がら analog injection により返される TOT を電荷量の関数としてプロットし,何 らかの関数を用いてフィッティングすることにより対応式を得る方法が考えられ る。しかし FE-I4 では,TOT の分解能が悪く幅広い電荷量に対して TOT 値が1 つの値を取り得るため,図 4.5 のような不連続な結果になり TOT 値と電荷量との 対応式を求めるのが難しい。



図 4.5: 電荷量を一定間隔で増やし analog injection を行い得られる TOT と電荷量 との関係。ある TOT 値が表す電荷量の範囲が広いため, 階段状の分布が現れる。

本研究では、テスト電荷の電荷量を細かく増加させることによって各 TOT 値ひ とつひとつが取り得る電荷量の範囲を求め、その平均値を TOT 値が示す電荷量で あるとし、各 TOT 値に対応する電荷量を決定する。

以下では、1つのピクセルに対する TOT 較正の手順を述べる。

- 1. ある PlsrDAC の値で analog injection を 100 回行い,返される TOT 値と その回数を記録する。
- 2. 1 を全 DAC 値(0-1023) について行う。結果として図 4.6 を得る。100 回の injection に対して常に一定の TOT 値を返すとは限らず,また閾値に近い電 荷量を入射した場合は合計して 100 回に満たないこともある。



図 4.6: 1 つのピクセルに対する PlsrDAC スキャンの結果。各 TOT 値のヒストグ ラムの平均値を,その TOT 値が示す電荷量とする。

3. 2 で得られた分布より,各 TOT に対しヒットのある PlsrDAC 値の平均値を その TOT が示す DAC 値とする。

この一連の操作を PlsrDAC スキャンと呼ぶ。この結果を図示したのが図 4.7 で, 横軸にテスト電荷量,縦軸に TOT をとっている。



PlsrDAC scan 2D (Col, Row)=(20, 150)

図 4.7: ひとつのピクセルに対する PlsrDAC スキャンの結果

PlsrDAC スキャンを全ピクセルに対して行い,各ピクセルごとに TOT を電荷 量に変換する対応式を得る。ある TOT が示す電荷量は,ピクセルごとに多少のば らつきを持つ。図 4.8 は各 TOT が示す電荷量の全ピクセルの平均値を表す。

図 4.8 の較正結果から, TOT=10 の点は電荷量 20 ke に相当していることがわ かる。これはチューニングの目標値・結果と一致している。また, TOT の高い側 でほぼ線形になる。一方, 閾値を下回る電荷量は TOT を返さないはずであるが TOT=1, 2, 3 が示す電荷量はチューニングで設定した閾値を下回っている。閾値 付近では較正が理想的に行えていない可能性がある。



図 4.8: 各 TOT が示す電荷量の,全ピクセルの平均を各ピクセルのばらつきをガ ウシアン分布と仮定し,その分散を誤差棒とした。

第5章 放射線照射前センサーの電荷 収集効率の測定

4 章で述べた手法により較正した TOT を用いて,放射線損傷前センサーのベー タ線,宇宙線による電荷収集量を測定した。この章では測定の詳細と結果につい て述べる。また結果の考察のため Geant4 による測定を再現したシミュレーション を行った。それについても述べる。

これらの測定の目的は, MIP がシリコンセンサーを通過したときに生成する電荷量が既知であることを用いて,4章で述べた手法で較正した TOT から予想される電荷量を得られるかを測定し,確立した TOT 較正の手法で電荷収集効率の測定を行えるか検証することである。

本測定ではセンサー厚が150 µm, 320 µm の2種類のピクセルモジュールを使用 する。MIP がシリコンセンサーを通過したときに生成される電荷量は,過去の実験的研究で求められた

- 150 µm センサーに対し 11 ke
- 320 µm センサーに対し 23 ke

という値を仮定する。

び 5.1. ノム ーンノの日际旭					
センサー厚 [µm]	Threshold 目標值 [e]	TOT 目標值 [25 ns]	TOT 基準電荷量 [ke]		
150	2400	7	10		
320	3000	10	20		

表 5.1: チューニングの目標値

表 5.1 に,以下の測定においてそれぞれのセンサー厚のモジュールに対し定める threshold, TOT チューニングの目標値を示す。それぞれのピクセルモジュールの TOT 較正を,4章で述べた手順で行った。センサー厚 320 µm のモジュールの 較正結果は4章に示したとおりである。図 5.1 に,センサー厚 150 µm のモジュー ルの較正で得た較正の結果を示す。電荷量 10 ke に対し TOT 値が7 に平均値があり、チューニング目標値と一致している。



図 5.1: センサー厚 150 µm のモジュールの TOT 較正結果

5.1 ベータ線を用いた測定

この節では⁹⁰Sr ベータ線源を用いた電荷量測定について述べる。

5.1.1 測定方法

図 5.2 にベータ線測定のセットアップの概略図を示す。ピクセルモジュールの下に、トリガー用のシンチレーション検出器を置いた。シンチレータの大きさは 6.5×6.5×5 mm³ である。ピクセル検出器の上にアルミニウムのコリメータをはさ み⁹⁰Sr ベータ線源を置いた。コリメータの厚さは 25 mm で穴の直径は 1.5 mm で ある。コリメータを用いているのは、センサーに対しほぼ垂直に入射するベータ線 を測定に使用するためである。これらは遮光のため暗箱の中に設置した。150 µm, 320 µm のピクセルセンサーにはそれぞれ 100 V, 200 V の逆バイアスを与え、全空 乏化した。シンチレーション検出器からのトリガー信号を外部トリガーとし、デー タ収集した。

5.1.2 クラスタリングによる電荷量の求め方

荷電粒子が複数のピクセルにまたがりセンサーを通過すると、荷電粒子がつく る電荷が複数のピクセルに分割されるため、ヒットのあるピクセルがクラスタを



図 5.2: ベータ線による測定のセットアップ

つくる。よって1事象で隣り合う複数のピクセルにヒットがある場合は、それらを まとめてひとつのヒットクラスタとして扱う。これをクラスタリングと呼ぶ。ク ラスタリングの概念図を図 5.3に示す。荷電粒子がクラスタをつくった場合の電荷 量を求める方法を述べる。

- 1. ヒットしたあるひとつのピクセル (seed) を基準にとる。
- 2. Seed のまわり 8 つのピクセルにヒットがあるか調べる。
- 新たに見つけたヒットのまわり8つのピクセルにさらにヒットがあるか調べる。
- 4. 新たなヒットが見つからなくなるまで手順3を繰り返す。

クラスタ中のピクセルごとに TOT を電荷量に変換した後,それら変換した電荷量 を各クラスタ内で足し上げたものをクラスタの電荷量とする。

5.1.3 電荷収集量の測定結果

センサー厚 320 µm のモジュールを用いた測定結果について述べる。



図 5.3: クラスタリングの概念図。長方形領域がピクセルを表す。オレンジ色のピ クセルはヒットしたものを表す。

図 5.4(a) に本測定で得たヒットマップを示す。また、3.1.1 で述べた multi trigger 機能を用い、trigger latency を中心に前後それぞれ 7 クロック、合計 15 クロック 分のタイミングのデータを取得する。各タイミングごとにヒット数をプロットす ると図 5.4(b) のようになる。この分布のことを LV1 タイミング分布と呼ぶ。

ヒットマップを見ると、ピクセル検出器の下に設置したトリガー用シンチレータ の大きさ程度にヒットが分布している。また LV1 タイミング分布では中心にピー クをつくっていることから、シンチレータがつくるトリガー信号に同期したヒッ トであることがわかる。以上により、ベータ線によるヒットを正しく測定できて いることを確認した。

前節で述べた方法で、クラスタリングを行い電荷量の分布を得た。クラスタリ ングは、LV1 タイミング分布のピーク値とその前後 2 クロック分のタイミング内 のヒットに対して行った。このタイミングの範囲内のヒットであれば、タイミン グが異なっていても隣接したピクセルのヒットをクラスタとみなす。電荷量分布 をランダウ関数をガウシアンで畳み込んだ関数でフィッティングしピーク値を求め た。この値が MIP がつくる電荷量である。図 5.5(a) にクラスタリング後の電荷量 分布,図 5.5(b) に、クラスタリングを行い得たクラスタサイズの分布を示す。

測定結果より得られた電荷分布をフィッティングして求めた電荷量は 14.4 ke となった。これは予想される電荷量 23 ke の 6 割である。

5.1.4 収集電荷量のバイアス電圧依存性の測定

センサーに与えるバイアス電圧を少しずつ上げると、空乏層が徐々に広がり電 荷収集量も徐々に増える。放射線損傷を受ける前のシリコンセンサーの電荷収集 量は、空乏層の厚さに比例すると考えられる。つまり式 (2.2) より、電荷収集量は 逆バイアス電圧の平方根に比例する。さらにバイアス電圧を上げていくと、全空



図 5.4: (a) ベータ線による測定のヒットマップ。図中の赤枠はモジュールの下に 設置したトリガー用シンチレータの大きさを表す。(b) LV1 タイミング分布。クラ スタリング前の各ピクセルの分布を表すため,合計エントリー数は測定した事象 数よりも多くなる。



図 5.5: (a) ベータ線測定結果から得た電荷量分布。ランダウ関数をガウシアンで 畳み込んだ関数(赤線)でフィッティングし、ピークの電荷量を求める。(b) ベー タ線によるヒットのクラスタサイズの分布。

乏化したときに電荷収集量が最大となり,それ以降バイアス電圧を上げても電荷 収集量は変わらず一定となる。バイアス電圧と電荷収集量との関係を測定するこ とで、センサーの全空乏化電圧を知ることができる。

センサー厚 150 µm, 320 µm 両方のモジュールに対しこの測定を行った。セン サーに与えるバイアス電圧を 10 V または 20 V ずつ上げ,各電圧値でベータ線によ るデータを取得した。

得たデータから電荷量分布を求め、その分布のピーク値をバイアス電圧の関数 としてプロットした。結果を図 5.6 に示す。曲線は、Qを電荷量、Vをバイアス電 圧として

$$Q = \sqrt{p_0(V - p_1)} + p_2 \tag{5.1}$$

でフィッティングした結果である。両センサーともに電荷収集量は,一定値になる まではバイアス電圧の平方根に比例して増加している。

 $320 \,\mu\text{m}$ センサー、 $150 \,\mu\text{m}$ センサーともに、バイアス電圧を上げると電荷収集量 がほぼ一定となる。使用したセンサーは、過去行われた静電容量のバイアス電圧 依存性の測定から、 $150 \,\mu\text{m}$ 厚のものは約 44 V、 $320 \,\mu\text{m}$ 厚のものは約 200 V でそれ ぞれ全空乏化することがわかっており、今回の測定結果はこれと一致する。

両モジュールで、全空乏化後の収集電荷量の値は MIP により予想される電荷量 よりも3,4割少ないが、320 µm センサーの電荷収集量は150 µm センサーの電荷 収集量のほぼ2倍であるため、空乏層の厚さと収集電荷量との関係を相対的には 再現している。

5.1.5 閾値の効果の検証

粒子があるピクセルの中心に入射せず,生成された電荷が複数のピクセル間に分割された場合,ヒットとみなされず失われてしまう電荷量が存在するはずである。 このように,TOTの較正を正しく行っても閾値を設定したことで測定で得られる 電荷量が小さくなる可能性がある。そこで全ピクセルの閾値の平均を3000*e*から 7000*e*まで1000*e*ずつ上げ電荷収集量を測定した。なおこの測定では厚さ320 µm のセンサーを用いた。

測定で得た電荷量分布の,平均値とフィッティングで得たランダウ分布のピーク 値の, 閾値に対する依存性を図 5.7 に示す。横軸の誤差棒は各点での全ピクセル の閾値のばらつき幅を表す。閾値を上げると,電荷量の平均値は若干減少するが, ピーク値は減少せず,予測値との差を説明することはできない。

5.2 宇宙線を用いた測定

この節では宇宙線中のミューオンを使った測定について述べる。宇宙線中のミュー オンは真に MIP と考えられるため、ミューオンでの測定結果を、前節のベータ線 を使った測定結果と比較する。



図 5.6: 収集電荷量のバイアス電圧依存性の測定結果。赤点,緑点はそれぞれセン サー厚 150 µm, 320 µm のモジュールでの測定結果を表す。曲線は平方根の関数で フィッティングしたものである。



図 5.7: 閾値を上げ行った測定の結果。横軸の誤差棒はピクセルの閾値のばらつき を表す。

5.2.1 測定方法

図 5.8 に宇宙線を用いた測定のセットアップの概略図を示す。ピクセル検出器 の上下に、シンチレーション検出器を設置した。上側のシンチレータの大きさは、 $30 \times 10 \times 5 \text{ mm}^3$ であり、下側のシンチレータの大きさはベータ線測定と同様に $6.5 \times 6.5 \times 5 \text{ mm}^3$ である。この上下2つの検出器のコインシデンスをトリガーと して用い、データ収集した。

5.2.2 電荷収集量の測定結果

ベータ線での測定と同様に,320 µm 厚のセンサーに200 V のバイアス電圧をか け宇宙線を用いた測定を行った。その結果について述べる。図 5.9(a) にヒットマッ プを,図 5.9(b) に LV1 タイミング分布を示す。ヒットの分布がモジュール下に設 置したシンチレータの大きさ程度に広がっていること,LV1 タイミング分布がピー クをもっていることから、ノイズ等ではなく宇宙線のヒットを正しく測定できて いることがわかる。

ベータ線による測定と同様,LV1タイミング分布のピーク値とその前後2クロッ ク分のタイミング内のヒットに対しクラスタリングを行い得られたクラスタリン グ後の電荷量分布とクラスタサイズ分布を図 5.10(a), 5.10(b)にそれぞれ示す。宇



図 5.8: 宇宙線を用いた測定のセットアップ



図 5.9: 宇宙線を用いた測定の (a) ヒットマップと (b) LV1 タイミング分布

宙線による測定で得られたクラスタサイズ分布の平均値は,ベータ線による測定 よりも小さくなっている。これはベータ線よりも宇宙線中のミューオンが多重散 乱の影響を受けにくいためである。電荷量分布を,ランダウ関数をガウシアンで



図 5.10: (a) 宇宙線ミューオンの測定から得た電荷量分布。ランダウ関数をガウシ アンで畳み込んだ関数(赤線)でフィッティングし、ピーク値を求める。(b) 測定 のクラスタサイズ分布。

畳み込んだ関数でフィッティングし、ピーク値が17.8keと求まった。ベータ線に よる測定で得た電荷量よりも10%程度大きい結果を得た。ベータ線による測定で 得た電荷量よりも宇宙線による測定で得た電荷量がより MIP で予想される値に近 いことから、ベータ線がピクセルセンサー中で MIP として振る舞っていないと言 える。ただし宇宙線中のミューオンによる測定も、MIP で予想される電荷量を再 現しない。

5.3 Geant4シミュレーション

この節では Geant4 を用いたシミュレーションについて述べる。ベータ線と宇宙線を用いた測定で得た結果について、

- ベータ線,宇宙線ともにシリコンセンサー内で MIP 相当のエネルギーを落とすのか,
- ベータ線と宇宙線とで落とすエネルギーに差はあるのか,

を調査するのが目的である。

5.3.1 シミュレーションの設定

図 5.11(a), 5.11(b) にそれぞれベータ線,宇宙線測定のシミュレーションの簡 易的なイベントディスプレイを示す。センサー厚 320 µm のモジュールを用いた測



図 5.11: Geant4 シミュレーションでの (a) ベータ線, (b) 宇宙線測定シミュレー ションのイベントディスプレイ。赤,青,緑線は粒子の飛跡を表す。

定を再現するよう,ベータ線源,コリメータ,プラスチックカバー,ピクセルモジュール,シンチレータを配置した。ピクセルモジュールはセンサー,ASIC,アルミニウムプレートのみ再現した。表 5.2 に,配置した物質の厚さをまとめる。

F • • • • • •			
項目	材質	厚さ [µm]	
アルミニウムコリメータ	アルミニウム	25×10^3	
プラスチックカバー	ポリエチレン	1×10^3	
センサー	シリコン	320	
読み出し ASIC	シリコン	700	
アルミニウムプレート	アルミニウム	500	
シンチレータ	ポリビニルトルエン	5×10^3	

表 5.2: シミュレーションの構成要素の材質と厚さ

シミュレーションで用いるベータ線、宇宙線は、次のように設定した。

ベータ線 ⁹⁰Sr はベータ崩壊により ⁹⁰Y を生成し, ⁹⁰Y はさらにベータ崩壊し ⁹⁰Zr を 生成する。このとき放出されるベータ線の最大エネルギーはそれぞれ0.546 MeV と 2.28 MeV である。そのため ⁹⁰Sr からのベータ線として,図 5.12 に示すエ ネルギー分布の電子を用いた。

宇宙線 宇宙線としてはミューオンを用いた。エネルギーは 100 MeV から 1 GeV までの一様分布とし、入射角度の分布は宇宙線ミューオンの天頂角分布 cos² θ に従うとした。



図 5.12: シミュレーションに用いた,⁹⁰Sr のベータ崩壊によるベータ線のエネル ギー分布。

5.3.2 測定結果との比較

シミュレーションによって得られるのは、粒子がシリコンセンサー中で落とす エネルギーである。FE-I4を用いた測定と比較するために、エネルギーを電荷量に 変換した。エネルギーから電荷量へは、垂直に入射した宇宙線が厚さ 320 µm のシ リコン中で落とすエネルギーが 23 ke の電荷量となるように変換した。ベータ線が 生成する電荷量は、ベータ線によるエネルギー損失からミューオンと同じ変換係 数を使って求めた。

電荷量に変換した後,全ピクセルに対し 3000 e の閾値を設定し,閾値を超えた 場合ヒットとする。複数ピクセルにヒットがあった場合は,5.1.2 で説明した方法 でクラスタの電荷量を求めた。

粒子がシンチレータで 0.5 MeV 以上のエネルギー失った事象をシンチレータへ のヒットとし、ベータ線シミュレーションでは、モジュール下側のシンチレータ にヒットがあった事象を、宇宙線シミュレーションでは、モジュール上下のシン チレータにヒットがあった事象を選択した。 ベータ線,宇宙線それぞれによる電荷量分布を,図 5.13に示す。シミュレーショ



図 5.13: シミュレーションによるベータ線,宇宙線中のミューオンによる電荷収 集量分布。青線がベータ線,赤線が宇宙線中のミューオンの結果。

ンで得た電荷量分布をランダウ関数をガウシアンで畳み込んだ関数でフィッティングしピーク値の電荷量を求めると、ともに 23.4 ke となった。

以上から,ベータ線と宇宙線中のミューオンがセンサーを通過するとき失うエ ネルギーに差はないという結果を得た。この調査では実際の測定で得られたベー タ線による電荷量と宇宙線による電荷量との差の原因を特定できない。

5.4 考察

5.4.1 クラスタサイズごとの電荷分布の比較

収集電荷量の測定では、宇宙線中のミューオンによる測定で得た電荷量分布が、 より MIP 予想値に近い分布であった。宇宙線による電荷量分布について、より詳 細に実測とシミュレーションとの比較を行う。

まず、クラスタサイズごとの電荷量分布について考える。シミュレーション結果 において、閾値を設定しているにもかかわらず得られた電荷量が予想値よりも小 さくならないのは、閾値により減少する電荷量の寄与と、粒子がセンサーに対し 斜めに入射しセンサー中の通過距離が長いヒットで得られる電荷量の寄与が重なっ た結果であると考える。斜めに入射することで粒子は複数ピクセルを通過し、ヒッ トクラスタをつくる。また、ピクセルサイズは 250 × 50 µm² の長方形であり、同 じクラスタサイズであっても長辺方向にクラスタをつくる場合はより多くの電荷 が生成される。よってクラスタサイズが大きいとより多くの電荷が生成され、得ら れる電荷量分布はより大きい側へ分布するはずである。図 5.14 に、宇宙線ミュー オンのシミュレーションで得た電荷分布をクラスタサイズ 1 から 3 に分けて示す。 クラスタサイズが大きくなると、電荷量も大きくなるのがわかる。図 5.15(a) に 宇宙線中のミューオンによる測定で得た電荷分布をクラスタサイズ 1 から 3 に分 けた分布、図 5.15(b) にそのときのクラスタリング前の各ピクセルの TOT 分布を 示す。シミュレーションによる電荷量分布は、上記の予想通りになっている。一



図 5.14: 宇宙線ミューオンのシミュレーションで得た電荷量分布をクラスタサイ ズごとに分けて図示したもの。黒,赤,青はそれぞれクラスタサイズ1,2,3の電 荷量分布を表す。

方,測定結果はクラスタサイズが1のとき電荷量が最も大きい。図 5.16 に,宇宙 線ミューオン測定で得たクラスタサイズ1の電荷量分布を示す。電荷量のピーク 値は 20.0 ke であり,MIP で予想される電荷量 23 ke と 15 % しかずれていない。

図 5.15(b)を見ると、予想値に近い電荷量を得たクラスタサイズ1の TOT 分布 は、ほとんどが TOT=8 以上の大きな値を持つ分布になっている。それに対し予 想よりも少ない電荷量を得たクラスタサイズが2、3の分布は小さな TOT 値を持 つヒットでクラスタが構成されている。以上から、大きな TOT 値の較正は正しく 行えているが、小さな値は較正が正しくない可能性があると考える。

5.4.2 テスト電荷とセンサーからの信号との TOT 応答

図 5.17 に,テスト電荷とセンサーからの信号とに対する,TOT の応答を比較 する。センサー厚 150 µm と 320 µm 2 つのモジュール間の TOT と電荷量との関



図 5.15: (a) 宇宙線ミューオン測定で得た電荷量分布をクラスタサイズごとにわけ て図示したもの。(b) (a) を与える TOT 分布(クラスタリング前)。(a), (b) とも に黒,赤,青はそれぞれクラスタサイズ 1, 2, 3の分布を表す。



Cluster charge (Cluster size 1)

図 5.16: 宇宙線ミューオン測定で得たクラスタサイズ1の電荷量分布。ランダウ 関数をガウシアンで畳み込んだ関数(赤線)でフィッティングし,ピークの電荷量 を求める。

係がよく一致していることがわかる。三角点は宇宙線中のミューオンによる測定 結果を示したもので,TOTとしてはクラスタサイズ1の時のTOT分布のピーク 値を,電荷量としてはそれぞれのセンサー厚に対して MIP で予想される値を使っ た。この2点が較正の結果と重なっていることから,TOT=7以上の領域では,テ スト電荷とセンサーからの信号に対するTOTの振舞いが等しいことがわかる。こ れは5.4.1 節で述べた,大きなTOT 値の較正は正しく行えているという予想を支 持する。

一方, TOT が小さい領域についてはテスト電荷とセンサーからの信号に対する TOT の振舞いが等しくないことが考えられる。これにより, 5.4.1 節で述べたよ うに小さな TOT 値で構成されたクラスタサイズ 2, 3の電荷量分布が予想値より も少ない分布となり,結果として得られる電荷量分布のピーク値を小さくしてい ると考える。



図 5.17: 2 種類のモジュールの TOT 較正結果の上にクラスタサイズが1の TOT 値をプロットしたもの。赤と緑はそれぞれセンサー厚 150 µm, 320 µm のモジュー ルの結果を表す。丸点が示すのは、閾値を 3000 e, TOT を基準電荷量 20 ke に対 し 10 となるようにチューニングを行った後、較正を行い得られた TOT 較正結果 である。

5.5 まとめ

4 章で述べた手法により較正した TOT を用いて,電荷収集量を測定した。測定 により得た電荷量は MIP から予想される電荷量と比べ,ベータ線による測定では 4 割程度,宇宙線による測定では 2 割程度少ない値であった。

宇宙線を用いた測定よりもベータ線を用いた測定で電荷収集量が少ないのは、 ベータ線がシリコンセンサー中で MIP として振る舞っていないためであると考え る。しかし、Geant4 によるシミュレーションを行いベータ線と宇宙線とのエネル ギー損失の違いを調べたが、違いは認められなかった。得られた電荷量が予想値 よりも小さいのは、クラスタサイズが2以上のときはクラスタ内の各ピクセルの TOT 値が小さく、TOT が小さな値の場合は較正が正しくないためであると考え る。TOT が小さな値で得られる電荷量が少ないことについての理解が、課題とし て残る。

電荷収集量のバイアス電圧依存性の測定では,空乏層の広がりに対する電荷収 集量の増加量を正しく測定できた。また厚さの異なるセンサーの全空乏化後の電 荷収集量は,相対的には正しい値が得られた。

第6章 放射線照射したセンサーの電 荷収集効率の測定

放射線損傷したセンサーの電荷収集量をベータ線を用いて測定し,放射線損傷 のないセンサーとの電荷収集量を比較することで,センサーの電荷収集効率の放 射線照射量依存性を測定できることを確認した。この章では測定の詳細と結果に ついて述べる。

測定には、いずれもセンサー厚 150 μ m の、放射線損傷したモジュールと放射線 損傷のないモジュールとの2つを使用した。センサーへの放射線損傷は 70 MeV 陽 子ビームの一様な照射で与え、被ばく放射線量はおよそ 5.1 × 10¹⁵ (1 MeV) n_{eq}/cm² である。

使用する2つのモジュールに対し、threshold、TOTチューニングを次の目標値

- 閾値: 3000 e
- TOT: 基準電荷量 20 ke に対し7

となるように行い,それぞれのモジュールの TOT 較正を4章で述べた手順で行った。図 6.1 に,放射線損傷あり,なしのモジュールでの各 TOT に対する電荷量の 全ピクセルの平均値を示す。どちらのモジュールも TOT=7 の点が電荷量 10 ke に 相当しており,チューニングの目標値と一致している。

6.1 測定方法

測定のセットアップは図 5.2 と同様である。ただし、放射線損傷したモジュー ルの較正や測定の際は、セットアップ全体を恒温槽内に設置し、温度を –40 °C に 保った。これは、2.2 節で述べた暗電流の増加によるノイズと熱暴走を抑えるため である。また、冷却による結露を防ぐために恒温槽内に乾燥空気を流しながら測 定等を行った。

6.2 電荷収集量のバイアス電圧依存性の測定結果

放射線損傷したセンサーに対しバイアス電圧を100Vから1000Vまで変化させ、 ベータ線による電荷収集量を測定した。また比較のため、放射線損傷のないセン



図 6.1: 放射線損傷あり(赤),放射線損傷なし(青)のモジュールの較正結果。

サーに対し全空乏化に十分なバイアス電圧 100 V を与えベータ線による電荷収集 量を測定した。

図 6.2 に,放射線損傷したセンサーにバイアス電圧 500 V をかけたときに得た電 荷収集量の分布と,放射線損傷のないセンサーにバイアス電圧 100 V をかけたと きに得た電荷収集量の分布を示す。それぞれの電荷量分布をランダウ関数をガウ シアンで畳み込んだ関数でフィッティングしピーク値を求め,それぞれの電荷量と して放射線損傷なしのモジュールで 8.0 ke,放射線損傷したモジュールで 4.6 ke を 得た。放射線損傷のあるセンサーでは放射線損傷のないセンサーよりも電荷量が 少なくなっていることがわかる。

5.1.4 節で述べたように、測定した電荷量は異なる測定対象に対して相対的に正 しい値であることから、放射線損傷なしのモジュールのセンサーが全空乏化した ときの電荷収集量を *Q*_{non-irrad},放射線損傷ありのモジュールのセンサーの電荷収 集量を *Q*_{irrad} として、その比を

$$R = \frac{Q_{\rm irrad}}{Q_{\rm non-irrad}} \tag{6.1}$$

と定義し, Rのバイアス電圧依存性を示したのが図 6.3である。バイアス電圧を上 げていくと徐々に Rが一定に近づいていく。測定結果より,バイアス電圧 1000 V で R は 76 % となった。100 % に達しないのは 2.2 節で述べたように,センサーで 生成された電荷のトラップの効果によるものだと考える。

以上の結果から、放射線損傷したセンサーの電荷収集効率の測定方法を確立で



図 6.2: ベータ線による電荷収集量の測定結果。青のヒストグラムは放射線損傷な しのセンサーにバイアス電圧 100 V を与え全空乏化した場合,赤のヒストグラム は放射線損傷ありのセンサーにバイアス電圧 500 V を与えた場合の結果を表す。



図 6.3: 放射線損傷後のセンサーの電荷収集効率のバイアス依存性。

きたと結論付ける。

第7章 結論

ATLAS検出器アップグレード用に開発されている試験用ピクセル検出器の, TOT を用いた電荷収集効率の手法を確立した。

この手法によりベータ線,宇宙線を用いて電荷収集量を測定した。放射線損傷 のないセンサーで得られた電荷量は MIP で予想される電荷量と比べ少ない値であ り,またベータ線と宇宙線とで得られる電荷量に違いが見られた。Geant4 による シミュレーションを行いベータ線と宇宙線とのエネルギー損失の違いを調べたが, 違いは認められなかった。TOT から得られた電荷量が小さい原因としては,TOT の小さい側でセンサーからの信号とテスト電荷との振舞いが異なるため較正が理想 的に行えていない可能性が考えられ,この原因についての理解が課題として残る。 放射線損傷のないセンサーでの電荷収集量に対する相対値から,放射線損傷し

たセンサーでの電荷収集効率を測定する方法を確立した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、山中卓教授には素晴らしい研究環境に加え、素粒子 実験に関するたくさんの知識や考え方を教えて頂きました。心より感謝いたしま す。また、日常の中でもふとしたことに興味や関心を持ち、気になることは何で も追求していく姿勢はとても勉強になりました。

花垣和則准教授には,論理的に考え研究を進める方法や研究成果のまとめ方,報 告の仕方など,研究に必要な様々な能力を身につける手助けをして頂きました。ま た本論文をなんとか完成することができたのも,花垣さんの添削のおかげです。本 当にありがとうございました。

KEK の海野義信さん,池上陽一さんには,シリコン検出器に関する知識を教え ていただいたり,私の研究に関するいろいろな質問に答えていただきました。シ リコンセンサーの難しい原理や性質について教えていただいたおかげでシリコン 検出器に大きな関心を持ち研究を行うことができました。ありがとうございます。

ATLAS大阪グループのスタッフの山口洋平さんには物理解析に関する話や,解 析する立場からの検出器の話などをしていただいて,ATLAS実験への興味がいつ も深まっていました。先輩の Teoh Jia Jian さんには,ASICの動作がわからず困っ ているときはすぐに解決策やチェックすべきことを教えていただき,何度も助けて いただきました。遠藤理樹さん,石島直樹さん,辻嶺二さん,渡辺誠さんからもた くさんの助言やアイディアを頂きました。また研究に関係することから全く関係 ないことまで日々たくさんの話をしていただいて,楽しい研究生活をおくること ができました。後輩である私の生意気な態度もおおらかに受け止めてくれていた こともとてもありがたく感じています。元ATLAS大阪グループの廣瀬穣さんにも 非常にお世話になりました。研究をしている中で出てきた疑問の大部分を廣瀬さ んに質問し,解決することができました。後輩の矢島和希くん,山内洋子さんの 研究に対する姿勢からいつも多くの刺激を受けていました。また二人からは,改 めて考えさせられるような鋭い質問を受けて何度も自分の勉強になっていました。

助教の外川学さん,佐藤和史さん,村山理恵さん,杉山泰之さん,礒江麻衣さん,宮崎康一くんには,実験グループは違うものの,機会があるごとに研究に対するたくさんの意見や助言を頂きました。普段自分では思いつかない視点からの 指摘,助言を頂いたことで自分の研究への理解をさらに深めることができました。

4年生の今坂俊博くん,原口弘くん,森哲平くんが卒業研究発表間近や発表が終わったあとにも実験に熱心に励む姿には大変良い刺激を受けていました。

秘書の川原さんには,様々な事務手続きで大変お世話になっただけでなく,面倒 な作業やお願いごとも快く聞いていただき,いつも非常に助かっていました。ま た世間話やくだらない話にも付き合っていただいてとても楽しく毎日を過ごせま した。本当にありがとうございました。

ここには書ききれませんが,私の研究生活に関わり支えてくれたすべての方々 に感謝いたします。



- [1] Overall view of lhc experiments. http://cds.cern.ch/record/841555.
- [2] The ATLAS Collaboration, "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", JINST, Vol. 3, p. S08003, (2008).
- [3] The ATLAS Collaboration, "Letter of Intent for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Experiment", Technical Report CERN-LHCC-2012-022, LHCC-I-023, CERN, Geneva (2012).
- [4] M. Moll, "Recent Advances in the Development of Radiation Tolerant Silicon Detectors for the Super-Lhc", ed. C. Leroy, P.-G. Rancoita, M. Barone, A. Gaddi, L. Price, and R. Ruchti, Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, pp. 101–110 (2010).
- [5] Teoh Jia Jian, "Development of SiTCP Based Readout System for The ATLAS Pixel Detector Upgrade", Master's thesis, Osaka University (2012).
- [6] L. Rossi, P. Fischer, T. Rohe, N. Wermes, *Pixel Detectors*. Springer, Berlin Heidelberg (2006).