

2023年度 卒業論文

ALICE 3実験に向けた
超薄型高集積シリコンピクセル検出器の
電荷共有に関する幾何形状依存性シミュレーション

2024年2月8日

指導教員 山口 頼人 准教授
主査 山口 頼人 准教授
副査 須田 祐介 助教

広島大学
クォーク物理学研究室

学籍番号 B200739
氏名 勝野 永遠

概要

欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器では、2035 年の Run 5 の運転開始とともに始まる ALICE 3 実験が計画されている。ALICE 3 実験では検出器すべてがシリコン検出器で構成される。このシリコン検出器にはセンサー部分と読み出し回路が一体となった最先端シリコン検出器である MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors) を採用する。現在、厚み $50\mu\text{m}$ 以下の超薄型かつピクセルピッチ $10\text{-}20\mu\text{m}$ の高集積な最新型 MAPS の設計、開発を進めている。この最新型 MAPS は非常に優れた位置分解能だけでなく、薄く直接曲げられるという特性を持ち、大きく注目されている。このような特性により、衝突点により近い位置への検出器配置が可能となり、崩壊前の荷電重フレーバーハドロンなど従来は検出できなかった粒子が検出できるようになる。

本研究では、最新型 MAPS の電極配置やピクセルピッチという幾何形状を変更することで電荷の共有度の変化をシミュレーションにより評価した。電荷の共有度を増すことで位置分解能が向上する。新型 MAPS の電極配置やピクセルピッチを変更することにより、電荷の共有度が変化することを確認した。

目次

第 1 章	ALICE 実験	3
1.1	高エネルギー重イオン衝突	3
1.1.1	QGP	3
1.1.2	高エネルギー重イオン衝突	3
1.2	ALICE 検出器アップグレード	3
1.2.1	ALICE 実験計画	3
1.2.2	ITS3	4
1.3	ALICE 3	5
1.4	新型 MAPS	5
1.4.1	シリコン検出器	5
1.4.2	MAPS	6
1.4.3	新型 MAPS	6
1.5	研究目的	7
第 2 章	研究手法	8
2.1	Allpix Squared を用いたシミュレーション方法	8
2.1.1	Allpix Squared	8
2.1.2	Allpix Squared の使用方法	8
2.1.3	電子とホールの様子	9
2.2	電荷共有	11
2.2.1	電荷共有	11
2.2.2	Seed charge と Cluster charge	11
2.2.3	電荷共有における各分解能への影響	11
2.3	幾何形状	12
2.4	電場の様子	13
2.5	位置分解能	13
2.5.1	反応点再構成	13
2.5.2	位置分解能	14
2.6	デジタルデータでの位置分解能	15
2.6.1	デジタル化	15
第 3 章	結果と考察	16

3.1	クラスター	16
3.1.1	クラスターの様子	16
3.1.2	クラスターサイズ分布	16
3.1.3	クラスターの電荷の様子	17
3.2	厚さ依存性	19
3.2.1	クラスターサイズの厚さ依存性	19
3.2.2	位置分解能の厚さ依存性	19
3.3	電圧依存性	20
3.3.1	クラスターサイズの電圧依存性	20
3.3.2	位置分解能の電圧依存性	21
3.4	閾値依存性	22
3.4.1	クラスターサイズの閾値依存性	22
3.4.2	位置分解能の閾値依存性	22
3.5	デジタル化の課題	22
3.6	HSQ 配置の反応点再構成の現状	23
第 4 章	結論と展望	25
4.0.1	結論	25
4.0.2	課題と展望	25
	参考文献	27

第 1 章

ALICE 実験

1.1 高エネルギー重イオン衝突

1.1.1 QGP

クォーク同士の相互作用によって 10^{-13} cm 程度の領域にクォークが閉じ込められている。このクォークの閉じ込めは高温・高密度になると破れ、クォークとグルーオンがプラズマ状態となっている QGP(クォーク・グルーオン・プラズマ) と呼ばれる状態となる。重イオン同士を高エネルギーで衝突させ高温・高密度を生成することで QGP を生成できる [1]。

1.1.2 高エネルギー重イオン衝突

高エネルギー重イオン衝突実験とは QGP を生成するための実験である。加速器を用いて高エネルギーの重イオン同士を正面衝突させ、系の温度が相転移温度を超え QGP が生成される。高エネルギー重イオン衝突によって QGP を作り出し QGP の性質を調べる実験が CERN(欧州原子核研究機構) の LHC 加速器や BNL(ブルックヘブン国立研究所) の RHIC 加速器で行われている [2]。

1.2 ALICE 検出器アップグレード

1.2.1 ALICE 実験計画

ALICE(A Large Ion Collider Experiment) 実験は LHC 加速器を用いて重イオンを加速し、衝突させてから QGP を生成し、その性質を解明する実験を行っている。表 1.1 は、今後の ALICE 実験計画を表している。現在 ALICE2 実験が動いており、2025 年から 2029 年にかけて長期停止期間 (LS3) を経て、2029 年から Run 4 が開始し、ここで ALICE 3 実験が開始する。この長期停止期間 (LS4) に ALICE 検出器に様々な検出器のアップグレードが行われる。またアップグレードの一つに ITS2(Inner Tracking System 2) から ITS3 への増強があり、この ITS3 でのアップグレードは 2035 年から開始する予定である ALICE 3 実験に繋がる増強である [3]。ITS2 と ITS3 については 1.2.2 で紹介する。

2011-2012		2015 - 2018		2022-2025		2029-2032		2035-2037		
Run 1	LS1	Run2	LS2	Run 3	LS3	Run 4	LS4	Run 5	LS5	Run 6
ALICE				ALICE 2				ALICE 3		

表 1.1: ALICE 実験計画

1.2.2 ITS3

ITS3 では現在 CERN で開発が進行している新型 MAPS を使用する。新型 MAPS は以前のものとは異なり直接曲げることができる。この特徴により崩壊点により近い距離で測定することが可能になる。表 1.2 は ITS2 から ITS3 へのアップグレードを示している。新型 MAPS を使用することで円筒形の半径を小さくすることができるようになる。新型 MAPS は曲げられるので ITS2 では検出器を固定するための支えが必要だったが、ITS3 では支えがほとんど必要なくなる。また新型 MAPS による位置分解能の向上により、ITS3 の位置分解能も向上している [4]。図 1.1 は ALICE3 実験での ITS と Outer Tracker で中心部分の検出器が ITS で、それを覆う形で Outer Tracker を配置している。図 1.2 は ITS3 の図である。

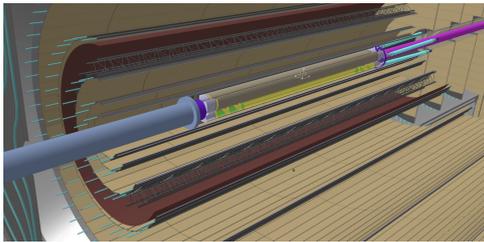


図 1.1: ALICE3 実験での ITS と Outer Tracker[3]

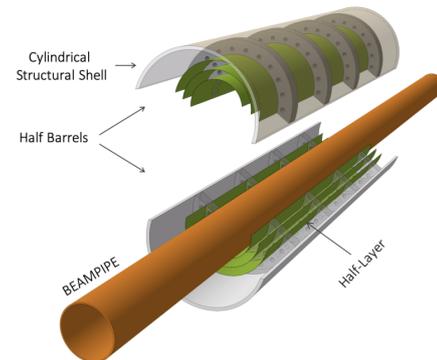


図 1.2: ITS3[4]

Upgrade	ITS2	ITS3
Innermost layer radius [mm]	22.4	18
Beampipe radius [mm]	18	16
Material/Layer [%x/X°]	0.35	0.05
Pixel size [μm^2]	27×29	20×20
Position resolution [μm]	5	2.5

表 1.2: ITS2 から ITS3 へのアップグレード

表 1.3 は ITS3 と、その外側にある Outer Tracker のパラメータである。Outer Tracker は ITS よりも広範囲を覆う検出器なのでコストと検出効率を考慮したシリコン検出器である MAPS を用いる。表 1.3 より Outer Tracker では位置分解能が $10\mu\text{m}$ と ITS3 よりも下がるが消費電力が $20\text{mW}/\text{cm}^2$ と ITS3 よりも低

い。消費電力を抑えることで水冷構造が必要なくなり、物質量を抑えることが可能になる。

Parameter	ITS3	Outer tracker
Position resolution [μm]	2.5	10
Time resolution [ns]	100	100
Hit rate capability [$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}$]	35×10^6	5×10^3
Power consumption [mW/cm^2]	70	20

表 1.3: ITS3 と Outer Tracker

1.3 ALICE 3

1.1 で示したように ALICE 実験は Run 5 の開始と同時に現在稼働中の ALICE 2 実験から大幅にアップグレードされた ALICE 3 実験が開始する。ALICE 3 はシリコン検出器によって構成される検出器となり高精度な測定を行うことができる。位置分解能が向上し検出効率が上昇することで粒子の飛跡の再構成を高精度で行うことができる。粒子同定精度が向上することで今まで測定することが困難であったビューティークォークが測定可能となる。図 1.3 は ALICE 3 実験で使用される検出器の全体図である。黄色の部分シリコン検出器を表しており、大部分がシリコン検出器で構成される [3]。

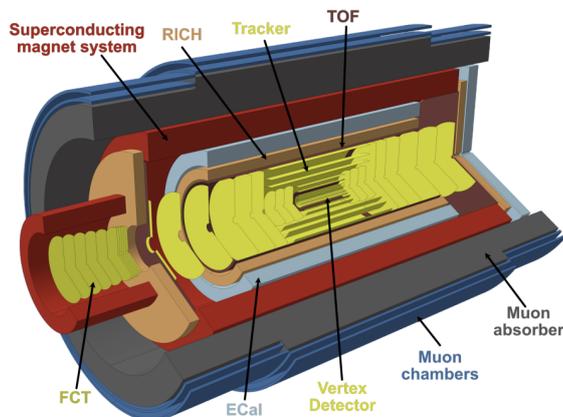


図 1.3: ALICE3 検出器 [3]

1.4 新型 MAPS

1.4.1 シリコン検出器

ここでは一般的なシリコン検出器の原理を紹介する。シリコン検出器は空乏層を P 層と N 層を挟み込む構造になっている。空乏層とは電子とホールが存在しない部分のことである。図 1.4 は荷電粒子がシリコン検出器を通過したときを表している。半導体を荷電粒子が通過したときにクーロン相互作用によって電子とホールのペアが生成される。生成される電子とホールの数は荷電粒子のエネルギー損失に対応する。このとき生成さ

れた電子とホールがそれぞれの電極に移動していくことで電気信号となる。シリコン検出器は他の検出器 (ガス検出器など) と比べ位置分解能が高く、粒子の位置を検出するために用いることが多い。[5]

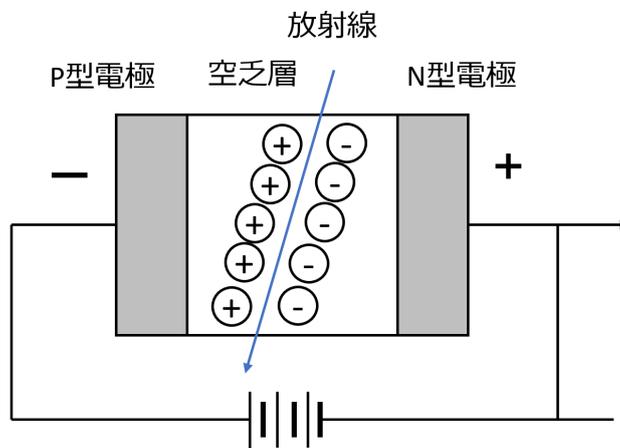


図 1.4: シリコン検出器

1.4.2 MAPS

MAPS (Monolithic Active Pixel Sensor) とはシリコンセンサーと電子回路が一体化されたシリコン検出器である。各ピクセルで信号読み出しが可能であり、信号処理がピクセル単位で行われる。同じシリコン基板上にセンサーと信号処理回路が統合されており、高い感度と位置分解能をもつ。

1.4.3 新型 MAPS

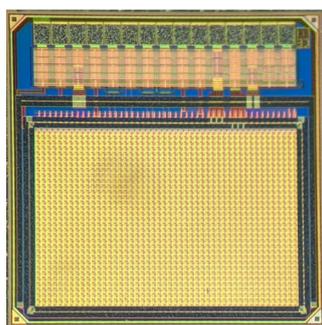


図 1.5: Circuit Exploratoire (CE65)

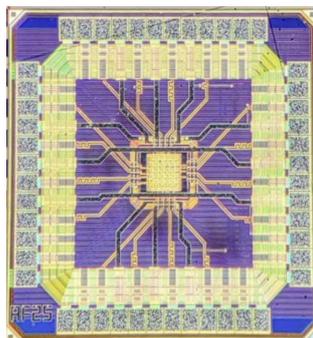


図 1.6: Analogue Pixel Test Structure (APTS)

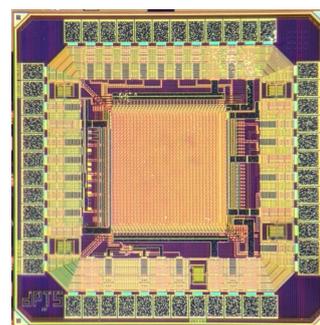


図 1.7: Digital Pixel Test Structure (DPTS)

現在 ITS3 で使用する新型 MAPS が開発されている。図 1.5 はフランスのストラスブルグで、1.6 と 1.7 は CERN で開発されている新型 MAPS である。これら 3 つの新型 MAPS はシリコン検出器開発段階のテスト

Name	CE65	APTS	DPTS
Matrix[pixels]	64×32,48×32	6×6	32×32
Pitch [μm]	15,18,22.5	10,15,20,25	15
Readout	Direct analogue	Rolling shutter	Asynchronous digital

表 1.4: 各新型 MAPS の特徴

トチップなのでそのまま実験に導入するのではないが、今後これらをもとにした新型 MAPS を研究で使用する。ストラスブルクの研究グループと研究を行っているため、本研究では CE65 についてシミュレーションを用いて評価を行った。以前の MAPS との大きな違いは薄さである。非常に薄いため直接検出器自体を曲げることが可能になった。図 1.8 は曲げた MAPS の検出効率を測定した実験結果のデータである。実験では半径 22mm になるように曲げている。実験結果より曲げても 99% 以上の検出効率がある。このことから新型 MAPS は直接曲げて使用しても検出効率は低下しないため曲げて使用できる [6]。

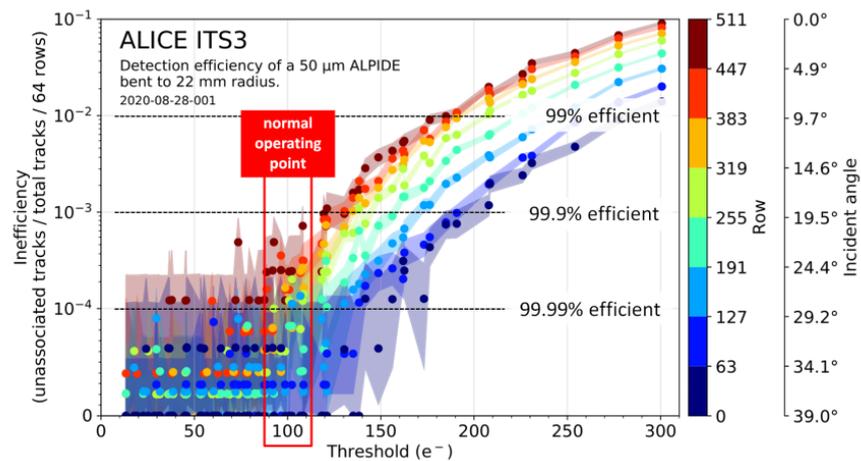


図 1.8: 曲げた MAPS の検出効率 [6]

1.5 研究目的

様々な高エネルギー重イオン衝突実験が計画されており、今後は高精度の測定を行うためにシリコン検出器で構成される検出器が必要となる。そこで使用するシリコン検出器の開発が不可欠であり、ALICE 実験でも新型 MAPS の開発が進行している。この新型 MAPS は厚み $50\mu\text{m}$ 以下の超薄型である。そのため直接曲げることができ検出効率もほとんど低下しない。またピクセルピッチ $10\text{-}20\mu\text{m}$ と高集積なシリコン検出器である。幾何形状の違いであるピクセルピッチと電極配置が提案されている。本研究の目的は新型 MAPS が幾何形状によって電荷共有や位置分解能がどれほど変わるかをシミュレーションで評価することである。

第 2 章

研究手法

2.1 Allpix Squared を用いたシミュレーション方法

2.1.1 Allpix Squared

Allpix Squared は CERN が開発した半導体デバイス用のモンテカルロ法を用いてシミュレーションを行うことができるフレームワークである。CERN が開発した物質中における粒子の振る舞いをモンテカルロ法でシミュレーションするためのソフトウェアとして Geant4 があり、Allpix Squared は Geant4 を半導体デバイスシミュレーション用にアップグレードするパッケージである [7]。荷電粒子がシリコンを通過したときに生成される電子とホールペアが半導体デバイス内の電極などに起因してできた電場の中でどのように移動していくかモンテカルロ法でシミュレーションし、またデバイスが読み取ることができるアナログ情報を実際の半導体デバイスのようにデジタル情報に変換することも可能である。半導体デバイス内にできる電場として実際に開発で使用した TCAD による電場情報をもとにして、シリコンに電場の様子を再現でき、実際の半導体デバイス内の電子とホールの動きを再現できる。TCAD では半導体デバイスのシミュレーションが行え、コンピューター上で半導体デバイスの開発を効率的に行うことができ、半導体デバイスの開発では、実際にウェハーを試作せずに、TCAD で行ったシミュレーションデータを用いて評価を行うことで、時間とコストを削減できる [8]。チップレスポンスのシミュレーションにおいては、開発した半導体デバイスのシリコンでの電場情報をシミュレーションに使用することで、シリコン上での電子とホールの動きの精度を向上できシミュレーション結果を実際のものを再現できる。図 2.1 と図 2.2 は CERN によって行われた MAPS のシミュレーション結果と実データでの位置分解能を比較した図である。図 2.1 および 2.2 より、Allpix Squared と線形の電場を組み合わせたものは実データと差異が明確だが、TCAD の電場情報を組み合わせたものは実データを再現できている。

2.1.2 Allpix Squared の使用方法

本研究において、Allpix Squared にて設定したシリコン検出器に対して荷電粒子を当て、そのシリコン検出器の電荷共有に関する幾何形状依存性を評価している。シリコン検出器として CERN で現在開発されている新型 MAPS を Allpix Squared 上で再現し、そこに電子を 1 個だけ検出器の中心に対して垂直に入射させている。Allpix Squared で電子の飛跡に沿って電子とホールペアがどれくらいできるか、そこからセンサーの中心にある電極に電子とホールが集まる様子がどのようになるか、検出器から出てくるデータはどうなるか計算させている。本研究では新型 MAPS のシリコンピクセルのピッチ、配置、シリコンの厚さ、シリコンに

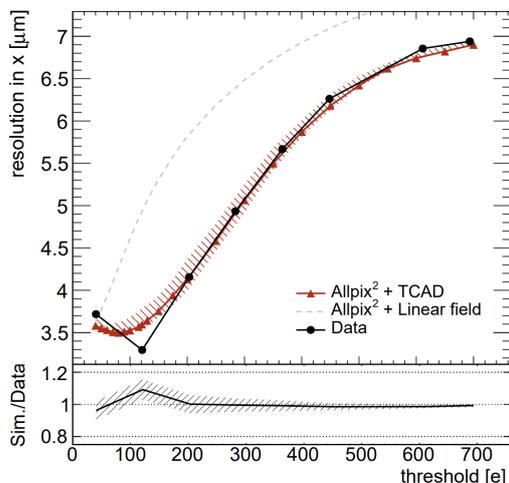


図 2.1: Allpix Squared と TCAD を合わせた x 方向の位置分解能 [9]

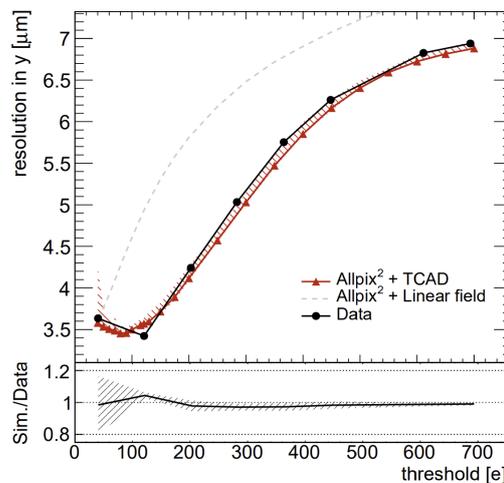


図 2.2: Allpix Squared と TCAD を合わせた y 方向の位置分解能 [9]

かける電圧、センサーの電荷に対する閾値を変更し、電荷共有の様子の変化を見ている。

2.1.3 電子とホールの様子

図 2.3 はシリコンピクセルに 6V の線形な z 軸方向にのみ勾配がある電場をかけた時の様子を x 軸方向に沿った断面図である。図 2.4 はその電場のときに 1 個のパイ中間子を打ち込んだ時の電子とホールの様子である。図 2.3 はシリコンピクセル 1 個だが、図 2.4 はピクセルが複数個並んだ時の様子である。図 2.4 において電子は青色、ホールはオレンジ色で表されている。図 2.5 は図 2.3 と同様だが、TCAD での電場情報をシリコンピクセルの電場として用いており、電極やバックバイアスから想定される電場と同じ様子である。図 2.6 はその電場を持ったシリコンピクセルで構成されたシリコン検出器にパイ中間子を 1 個打ち込んだ時の電子とホールの様子である。図の縦軸はシリコンの厚さに対応している。図 2.4 と図 2.6 では電子の振る舞いにおいて差異があり、シミュレーションの精度を上げるには TCAD による電場の情報を用いる必要がある。

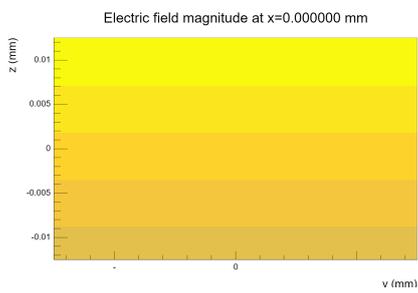


図 2.3: 6V の電圧をかけたときの z 方向の様子

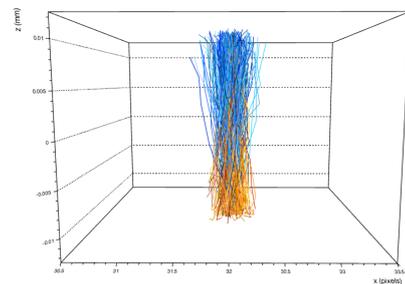


図 2.4: 6V の電圧の時の電子とホールの様子

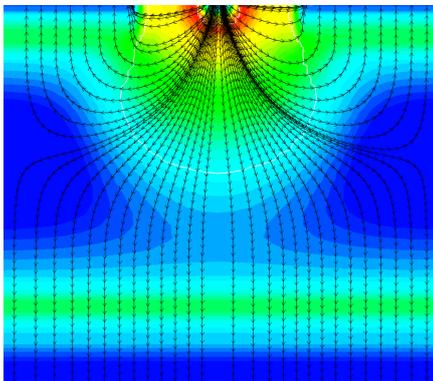


図 2.5: TCAD の電場情報からの z 方向の電場の様子 [9]

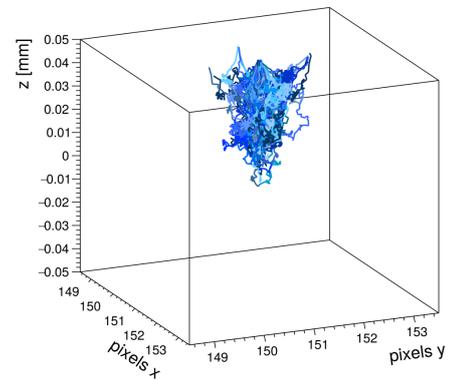


図 2.6: TCAD の電場情報を使用したときの電子の様子 [9]

2.2 電荷共有

2.2.1 電荷共有

図 2.7 は 2 つのピクセルが並んでおり、ある粒子が通過したときの電荷共有の様子を表している。電荷共有は通過したピクセルだけではなく、近くのピクセルに電荷が共有されることである。近くのピクセルまで電荷共有されることで、一つの粒子の通過に対して複数のピクセルが反応する。この複数の反応したピクセルの塊をクラスターと呼び、ピクセルの数をクラスターサイズと呼んでいる。

2.2.2 Seed charge と Cluster charge

Seed ピクセルはクラスターの中で最大の電荷を持つピクセルであり、その電荷の値を Seed charge と呼ぶ。Cluster charge はクラスター内での電荷の総和のことである。Cluster charge は電荷共有に依存しない値だが、Seed charge は電荷共有に依存して変動する値である。電荷共有をすると周りのピクセルに電荷が渡されるので、Seed charge は小さくなる。

2.2.3 電荷共有における各分解能への影響

電荷共有をすることでの利点は位置分解能が向上することである。ピクセル型のシリコン検出器では信号が検出されたピクセルの中心座標と信号の大きさを用いて重心計算を行い反応点を再構成する。反応したピクセルが多ければ多いほどより正確に座標を再構成する。例えば反応したピクセルが一点のみであれば反応したセンサーの中心座標が再構成した衝突点になってしまうが、反応したピクセルが二点以上あれば重心計算を行うことができる。重心計算を行う上で点が多ければ正確に計算を行える。しかし電荷共有をしやすいと電荷の収集効率が悪くなってしまふ。つまり時間分解能が悪くなる。またクラスターサイズが大きくなってしまふと別の荷電粒子のクラスターと重なってしまう問題が起こる可能性がある。ITS3 では時間情報よりも正確な位置情報が重要であるため位置分解能の向上の方が重要なため、電荷共有度を上げる必要がある。

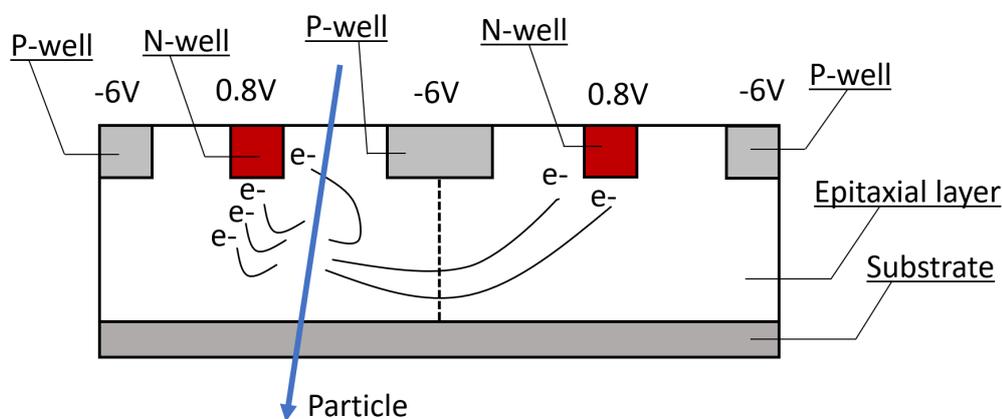


図 2.7: シリコン検出器の Charge sharing の様子

2.3 幾何形状

本研究で考慮した幾何形状は以下の3個に関してである。

1. シリコンピクセルのピッチ
2. シリコンピクセルの配置
3. シリコンの厚さ

シリコンピクセルのピッチ

シリコンピクセルのピッチはシリコン検出器においてシリコンに挿入する電極間の距離のことである。現在、 $15\mu\text{m}$ と $18\mu\text{m}$ と $22.5\mu\text{m}$ のものが開発されており、本研究では、各ピッチに設定して電荷共有に関しピッチ依存性を評価している。電極間の距離が小さいと隣の電極による影響が大きくなり、電荷がより共有しやすくなると考えられる。

シリコンピクセルの配置

図 2.8 の SQ(SQuare) 配置と図 2.9 の HSQ(Hexagonal SQuare) 配置が提案されている。SQ 配置は電極を横に並べた配置で、1つのピクセルに対して隣接するピクセルが4つある。一方で HSQ 配置は電極をピッチの半分だけずらして配置し、1つのピクセルに対して隣接するピクセルが6つある。隣接ピクセルが HSQ 配置の方が多いため電荷共有はしやすいと考えられる。配置の違いにより電子とホールの拡散の様子が変化し、クラスターサイズが変化する。今回の研究では SQ 配置と HSQ 配置を比較している。

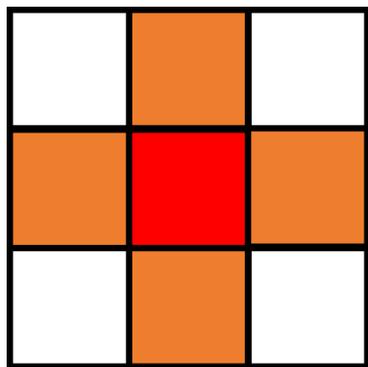


図 2.8: SQ 配置

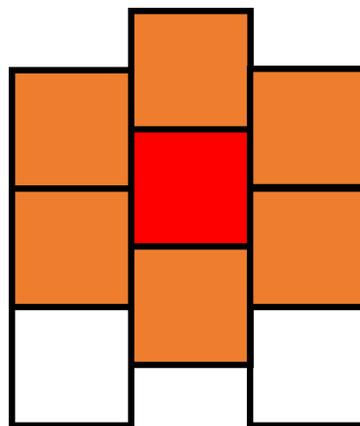


図 2.9: HSQ 配置

シリコンの厚さ

センサーの厚さは荷電粒子の飛跡の距離に関係する。荷電粒子による電子とホールのペア生成量が増加する。本研究では $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ に設定して比較を行った。

2.4 電場の様子

実際には電場として TCAD で計算した電場の情報で行いたいですが以下の図 2.10 が現在シミュレーションを行っているときのセンサーの電場である。

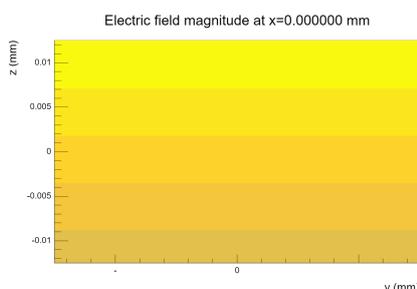


図 2.10: シリコンに線形の電圧 6V をかけた時の電場の様子

2.5 位置分解能

2.5.1 反応点再構成

1 イベントに対して反応したピクセルの中心座標と信号の大きさを用いて重心計算を行い、反応点を再構成する。以下は反応点再構成に用いる式である。

$$x_{reco} = \frac{\sum_n x_n \times signal_n}{\sum_n signal_n} \times pitch \quad (2.1)$$

ここで x_{reco} は重心計算後の座標、 x_n はピクセルの中心座標、 $signal_n$ はシリコン検出器によって反応したピクセルでの集めた電荷の大きさを、 $pitch$ は新型 MAPS のピクセルピッチを表している。y 方向の再構成も同様にして行う。表 2.1 は実際のデータの一部である。またピクセルピッチは $15\mu\text{m}$ である。Signal はピクセ

Event	Signal	Index x	Index y
0	30	31	16
0	35	32	15
0	1073	32	16
1	71	32	15
1	2371	32	16
1	149	33	16

表 2.1: 実際のデータの一部

ルが反応したときのアナログ信号で Index x は反応したピクセルの x 方向の番号で y も同じである。第 1 イ

ベントのときの反応点の再構成の手順を示す。

$$x_{reco} = \frac{71 \times 32 + 2371 \times 32 + 149 \times 33}{71 + 2371 + 149} \times 0.015$$

$$x_{reco} = 32.0575067541 \times 0.015 = 0.4808626013(\text{mm})$$
(2.2)

その後、再構成した座標とシミュレーションの情報から取り出した反応点の座標の差を以下の式で求める。

$$x_{resi} = x_{reco} - x_{MC}$$
(2.3)

表 2.1 の第 1 イベントの x_{MC} は 0.4816140101 なので x_{resi} を求めると

$$x_{resi} = 0.4808626013 - 0.4816140101$$

$$= -0.0007514088(\text{mm})$$
(2.4)

このように各イベントの x_{resi} を求める。実際の反応点と再構成後の反応点の座標の差はガウス分布 (図 2.11) に従う。

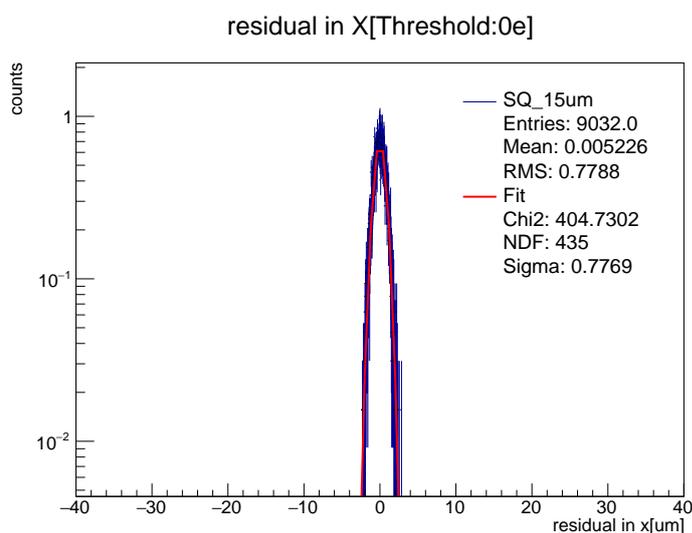


図 2.11: 再構成点と実際に当たった場所との差の分布

2.5.2 位置分解能

ガウス分布 (図 2.11) に対して 1 シグマ区間の RMS を求めて位置分解能として定義する。具体的な計算は以下の通りである。

$$\text{RMS}_{\pm 1\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n x_n^2}$$
(2.5)

n はデータの総数、 x_n はデータの値 (x_{resi}) を用いている。

2.6 デジタルデータでの位置分解能

2.6.1 デジタル化

今まではアナログデータで位置分解能を求めていた実際の実験ではデータ転送容量の関係からアナログデータのまま転送することは難しい。そのため数ビットのデジタルデータに変換してからデータ転送をして解析を行うことになる。

本研究ではアナログデータを 2bit のデジタルデータに変換した。現在の ITS2 では 0 か 1 の 1bit で測定を行っている。1bit でも複数層の MAPS を通過するため位置分解能がそこまで低下しない。今後の実験ではより高位置分解能の実現のために 2bit で行いたい。ため本研究では 2bit でのデジタル化について議論する。2bit なので 0 から 3 までの整数への変換である。データは 0 から 100、101 から 200、201 から 300、301 以上の信号を 0 から 3 までの整数に変換した。表 2.2 は表 2.1 のアナログデータを実際にデジタルデータに変換した例である。Event はある粒子が入ってきたときのあるイベントを表している。Analog signal はピクセルが反応したときのアナログ信号の大きさで、Digital signal はそのアナログ信号をデジタル化したときのデータである。位置分解能を求める際には 2.5 節で求めた方法において $signal_n$ をデジタル化した値に変えることでデ

Event	Analog signal	Digital signal(2bit)	Index x	Index y
0	30	0	31	16
0	35	0	32	15
0	1073	3	32	16
1	71	0	32	15
1	2371	3	32	16
1	149	1	33	16

表 2.2: デジタル化したデータ

ジタルデータに対する位置分解能を求めている。

実際に第 1 イベントを計算してみる。

$$\begin{aligned}x_{reco} &= \frac{0 \times 32 + 3 \times 32 + 1 \times 33}{0 + 3 + 1} \times 0.015 \\x_{reco} &= 32.25 \times 0.015 = 0.48375(\text{mm}) \\x_{resi} &= 0.48375 - 0.4816140101 = 0.00214(\text{mm})\end{aligned}\tag{2.6}$$

第3章

結果と考察

3.1 クラスタ

3.1.1 クラスタの様子

図 3.1 は、電子をセンサーに打ち込んだ時に反応したピクセルのクラスタの様子である。このイベントにおける Cluster size は 5 である。

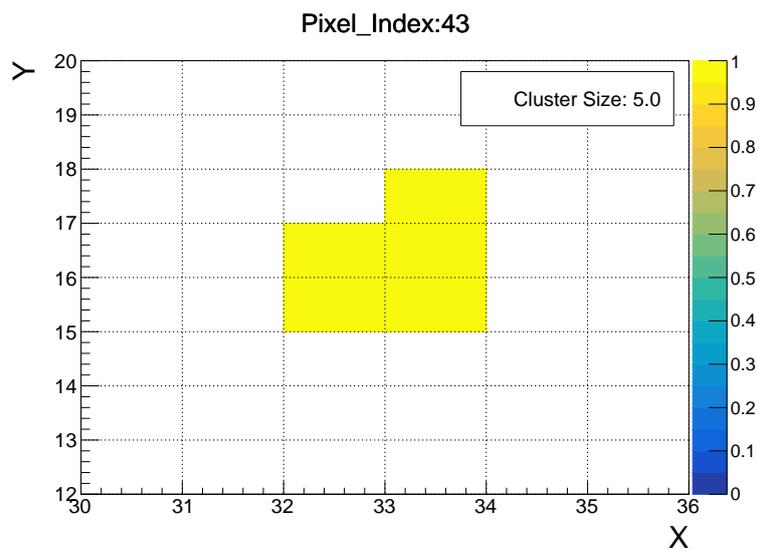


図 3.1: Cluster の様子

3.1.2 クラスタサイズ分布

図 3.2 から、SQ 配置と HSQ 配置におけるクラスタサイズの分布の違いが見られる。HSQ 配置の方がクラスタサイズが大きいため、SQ 配置に比べ、HSQ 配置の方が電荷共有において優れていることが分かる。また、SQ 配置と HSQ 配置において幾何形状による差異が見られる。

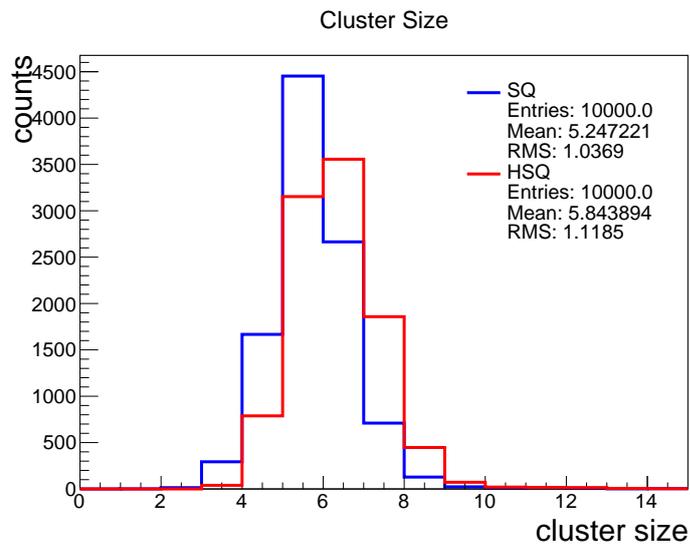


図 3.2: Cluster size 分布

3.1.3 クラスターの電荷の様子

図 3.3、3.4、3.5 は Seed charge と Cluster charge の各配置と各ピクセルピッチごとの様子の違いのプロットである。Seed charge がどのピクセルピッチでも HSQ 配置の方がピークが左側にある。また SQ 配置と HSQ 配置において Cluster charge はほとんど変わらない。つまり HSQ 配置の方が電荷共有をしている。

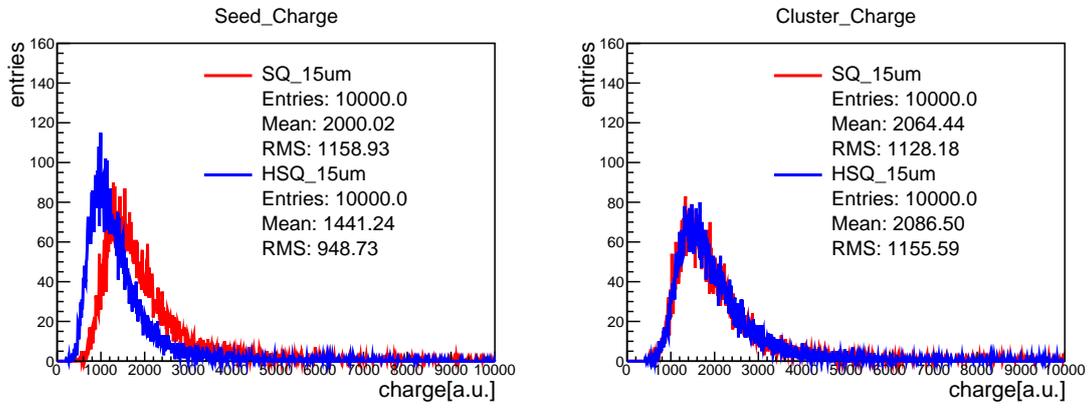


図 3.3: ピクセルピッチ 15 μm の Charge の様子

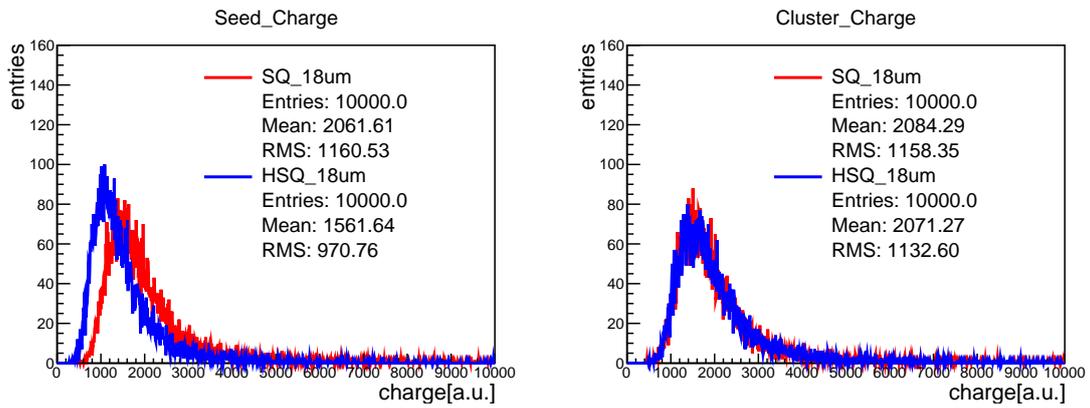


図 3.4: ピクセルピッチ 18 μm の Charge の様子

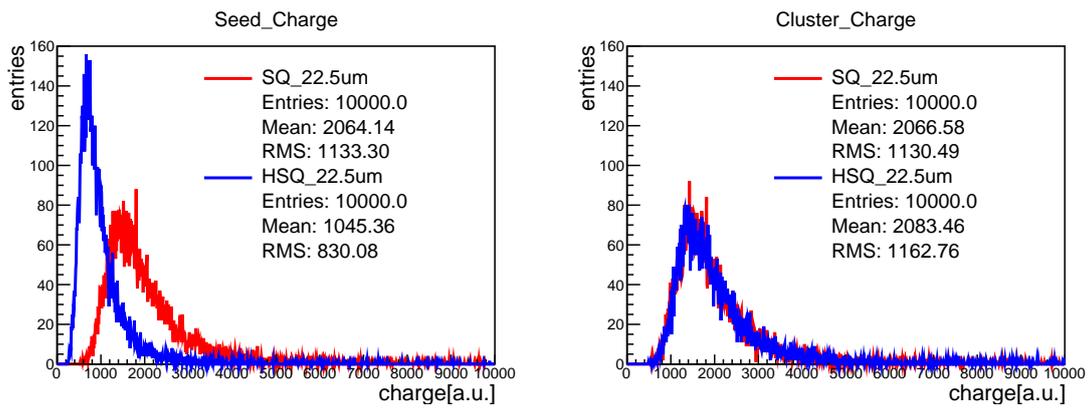


図 3.5: ピクセルピッチ 22.5 μm の Charge の様子

3.2 厚さ依存性

現在 HSQ 配置の再構成がうまくいっていないため位置分解能は SQ 配置のみとなる。これについての議論は 3.6 で行う。センサーの厚さパラメータを変更し、クラスターサイズの平均値を求めて厚さ依存性を評価した。シミュレーション条件では、閾値は $0e$ 、電圧は $-6V$ 、温度は 0 度に設定した。また、各厚さに対して 1 イベントごとに $1GeV$ の電子を当てるのを 10000 イベント実行している。

3.2.1 クラスターサイズの厚さ依存性

図 3.6 から、ピッチの大きさに比例してクラスターサイズが増加する。また、同じピッチにおいても HSQ 配置は SQ 配置に比べてクラスターサイズが大きくなる。クラスターサイズはチップの厚さに比例して増加する。

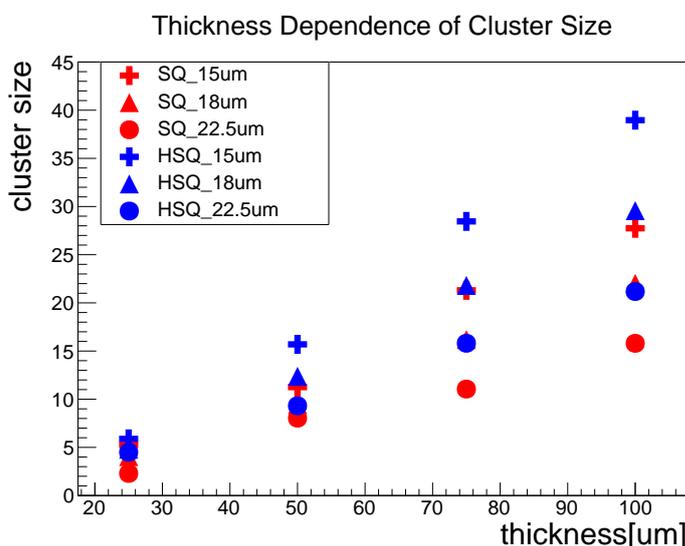


図 3.6: Cluster size におけるセンサーの厚さ依存性

3.2.2 位置分解能の厚さ依存性

図 3.7 は各ピッチおよび配置におけるセンサーの位置分解能の厚さ依存性を示している。赤色の点はアナログデータでの位置分解能、青色の点はデジタルデータでの位置分解能を表している。位置分解能は厚さを大きくするにつれて良くなる。新型 MAPS は $50\mu m$ 以下のものを使用する。図 3.7 よりアナログデータでの位置分解能はピクセルピッチ $15\mu m$ で厚さ $25\mu m$ の時が $1.7\mu m$ と最も良いが、デジタルデータでは厚さ $25\mu m$ でピクセルピッチ $15\mu m$ が $5.3\mu m$ と最も良い。以上のことから位置分解能はピクセルピッチが小さく厚さが大きければ向上するが、デジタル化した場合はピクセルピッチと厚さも重要だが電荷を 2bit にどのように分けるかが重要だと考える。図 3.7 の $50\mu m$ のところを見ると明らかに 2bit にすることで位置分解能が悪くなっている。図 3.8 は厚さ $25-100\mu m$ における Seed ピクセルを除いたクラスターでのピクセル一つ当りの電荷である。厚さによって周辺に共有される電荷が変わる。デジタル化するとき $50\mu m$ の時は周辺のピクセルが 1

以上になるピクセルが多い。これによって中心から周辺のピクセルに対する重心計算の影響が大きく、位置分解能が悪くなっているのではないかと考えられる。詳しくは 3.5 で述べる。

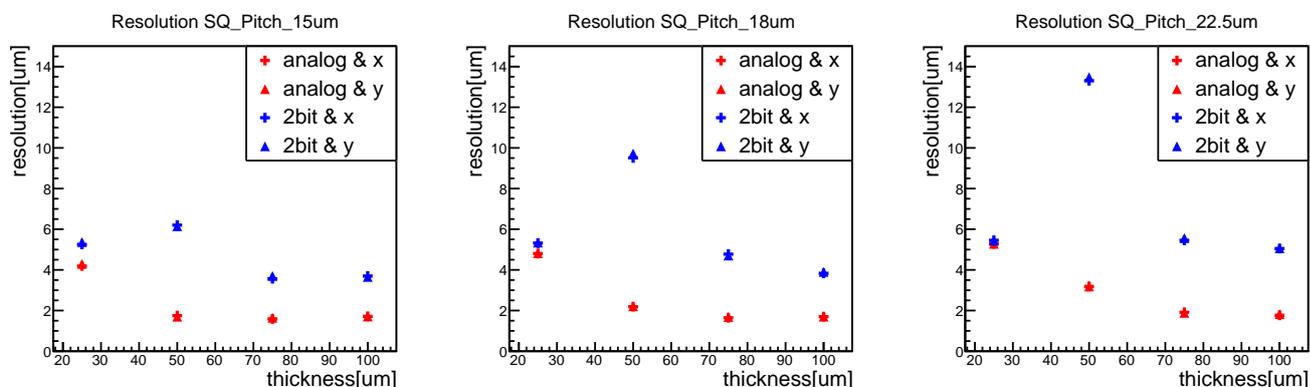


図 3.7: 各厚さによるセンサーの位置分解能

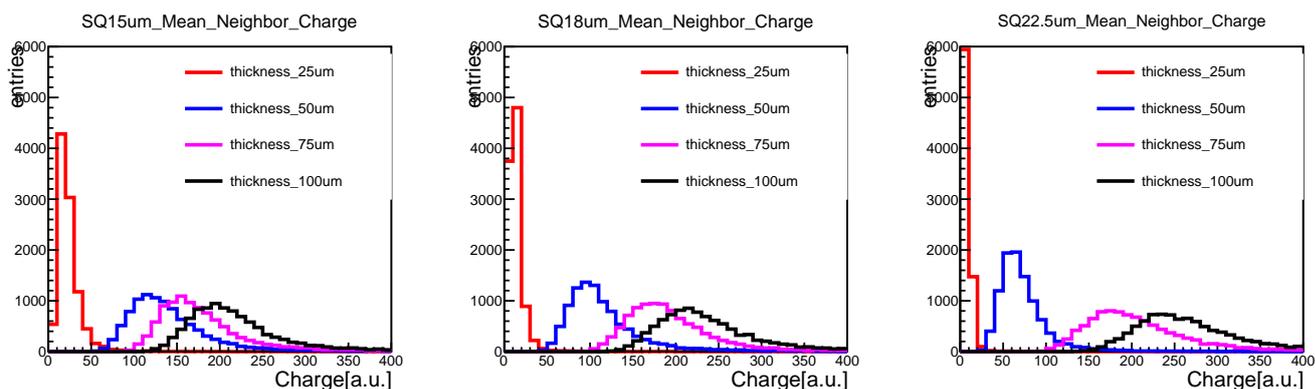


図 3.8: 各ピッチでの周辺電荷の厚さによる違い

3.3 電圧依存性

センサーにかかる電圧パラメータを変更し、クラスターサイズの平均値を求めて電圧依存性を評価した。シミュレーション条件はセンサーの厚さを $25\mu\text{m}$ 、閾値を $100e$ 、温度を 0 度になっている。また、センサーに対して 1 イベントで 1GeV の電子をチップの中央に当て、合計で 10000 イベント実行した。

3.3.1 クラスターサイズの電圧依存性

図 3.9 から、SQ 配置においてピッチの大きさに比例してクラスターサイズが増加しているが、 6V 以上の電圧では明確な違いが見られなくなる。HSQ 配置においては、 6V 以上の領域では Pitch の大きさに比例して、クラスターサイズも増加している。ただし、 6V 以下の領域ではピッチとクラスターサイズの振舞いは異なる。

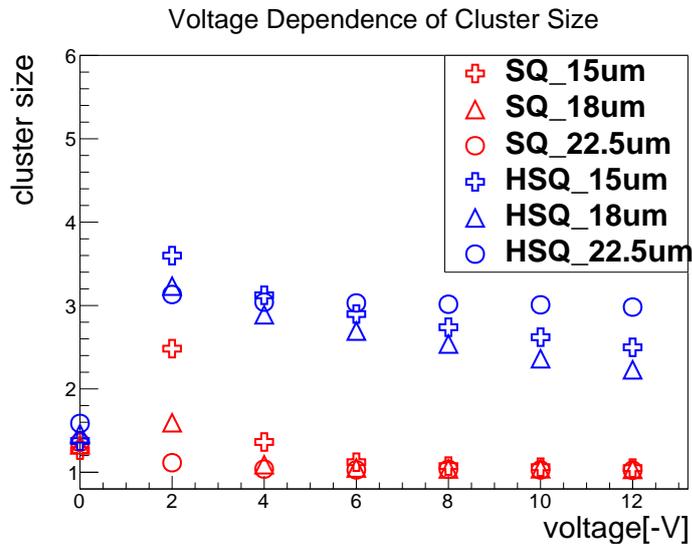


図 3.9: Cluster size におけるセンサーの電圧依存性

3.3.2 位置分解能の電圧依存性

図 3.10 は各ピッチおよび配置におけるセンサーの位置分解能の電圧依存性の様子である。赤色の点はアナログデータでの位置分解能、青色の点はデジタルデータでの位置分解能を表している。電圧を増加させると電子やホールの拡散が減少し、クラスターサイズが小さくなり、位置分解能が悪くなる。位置分解能に関してはアナログデータのときは電圧が小さい方が位置分解能は良くなっている。しかしデジタルデータでの位置分解能に関しては電圧が大きい方が位置分解能は良い。これは電圧が大きい方がクラスターサイズがおよそ 1 でデジタル化したときに 0 以外の値を持つピクセルが Seed ピクセルのみで再構成するときに隣接ピクセルの影響がほとんどなくなるためだと考えられる。

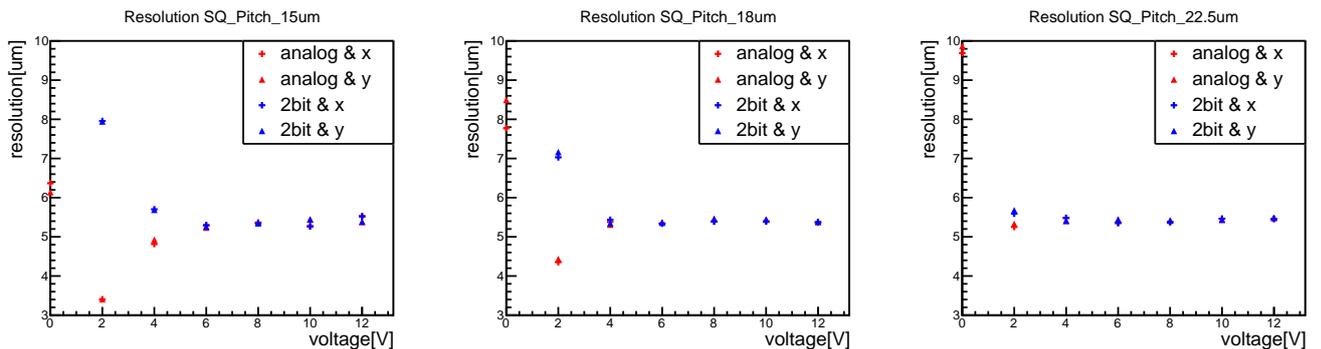


図 3.10: 各電圧によるセンサーの位置分解能

3.4 閾値依存性

センサーの閾値パラメータを変更し、クラスターサイズの平均値を求めて閾値依存性を評価した。シミュレーション条件は、センサーの厚さを $25\mu\text{m}$ 、電圧を -6V 、温度を 0 度にして実行した。また、センサーに対して 1 イベントごとに 1GeV の電子をチップの中央に当て、合計で 10000 イベント実行した。

3.4.1 クラスターサイズの閾値依存性

図 3.11 より、クラスターサイズはピッチの大きさに比例していることが分かる。どちらの配置も閾値が大きくなるにつれてクラスターサイズが小さくなる。また、SQ 配置と HSQ 配置を比較すると HSQ 配置の方がクラスターサイズが大きい傾向がある。

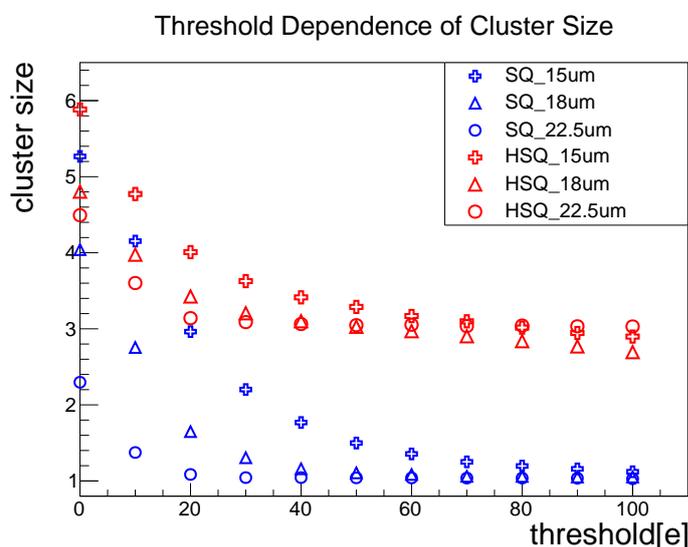


図 3.11: Cluster size におけるセンサーの閾値依存性

3.4.2 位置分解能の閾値依存性

図 3.12 は各ピッチおよび配置におけるセンサーの位置分解能の閾値依存性の様子である。赤色の点はアナログデータでの位置分解能、青色の点はデジタルデータでの位置分解能を表している。閾値を上げると信号が小さいものはピクセルが反応しなくなるため、位置を特定する上では閾値を下げるとクラスターサイズを大きくでき、位置分解能が向上する。デジタルデータでは位置分解能は閾値によって変化していない。

3.5 デジタル化の課題

再構成するときには重心計算を行うがデジタルデータでは電荷の値を 2bit に制限する。図 3.13、図 3.14 は同じイベントでのピクセルごとの電荷の値を表している。赤色の点は実際に当たった場所で、青色の点は再構成したときの点の位置、破線の点はアナログデータの時の再構成したときの点の位置を表す。デジタル化をす

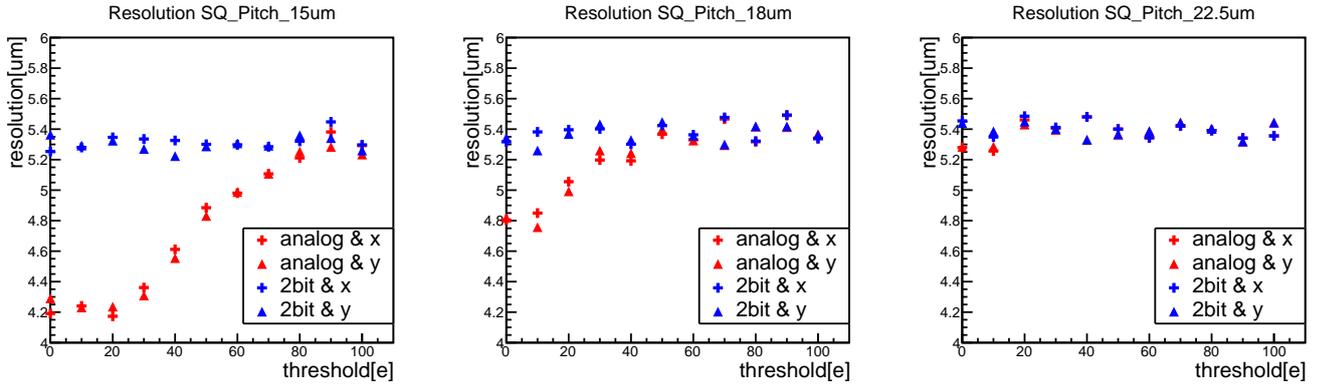


図 3.12: 各閾値によるセンサーの位置分解能

ると反応していた隣接ピクセルを切り捨ててしまうことがある。また電荷を 0 から 3 までの整数に変換しているため 2371 と 149 での重心計算と 3 と 1 での重心計算だとデジタル化したとき Seed ピクセル側にうまく寄ってくれなくなる。つまりデジタル化をすると反応した周辺のピクセルの影響が大きくなってしまい、実際に当たった場所から外側に寄ってしまう。今後はこの影響を減らすためのデジタル化の設定を議論する必要がある。

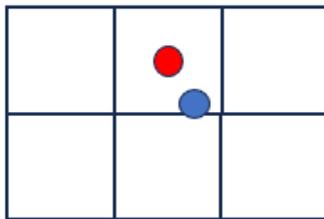
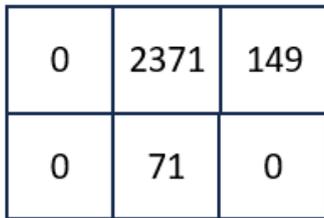


図 3.13: アナログデータでの再構成点

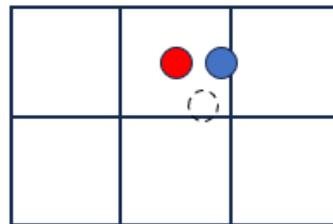
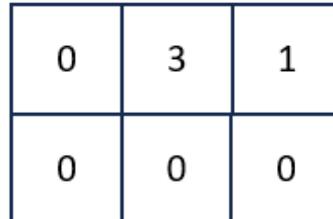


図 3.14: デジタルデータでの再構成点

3.6 HSQ 配置の反応点再構成の現状

現在 HSQ 配置での反応点再構成ができていない。図 3.15 と図 3.16 は再構成点と実際に当たった場所の差の分布である。ガウス分布になるはずが X 方向はランダウ分布のように少しプラス方向に崩れた形をしている。また Y 方向はピークの位置がプラス方向にずれてピークが立っている。この原因は再構成するときの計

算式が違うことだと考えられる。

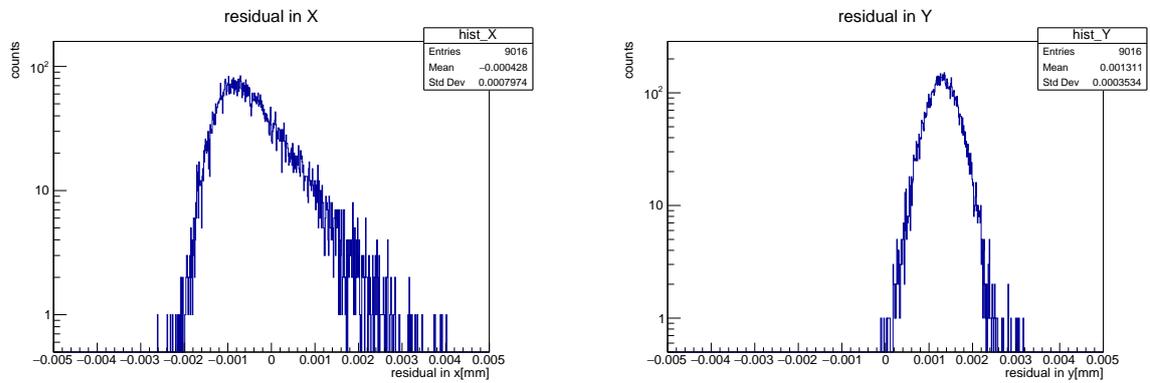


図 3.15: HSQ 配置の X 方向の再構成点と実際に当たった場所との差の分布
図 3.16: HSQ 配置の Y 方向の再構成点と実際に当たった場所との差の分布

第 4 章

結論と展望

4.0.1 結論

本研究では ALICE 3 実験や今後の高エネルギー重イオン衝突実験のために開発されている新型 MAPS のピクセルピッチや電極配置の違いによる電荷共有や位置分解能での振る舞いをシミュレーションで評価した。シミュレーションには半導体検出器用に CERN が開発した Allpix Squared というソフトウェアを用いた。各幾何形状での電荷共有や位置分解能の違いを見ることができた。ピクセルピッチを小さくすることで電荷共有をさせ、位置分解能も向上させることができる。SQ 配置と HSQ 配置を比較すると HSQ 配置の方が電荷共有をしやすことが分かった。シリコン検出器において厚さを増やすことで電荷共有をさせ位置分解能が向上するが、実験の際に相互作用する物質が増えてしまう問題があるため、そこも考慮する必要がある。電場に関しては、現在簡易的な線形の電場を使用している。閾値に関しては、閾値を上げると反応するピクセルが少なくなり、電荷共有しにくくなり位置分解能も悪くなってしまふ。しかし今回のシミュレーションにおいてはノイズを考慮せずに行ったため、ノイズが加わった場合のシミュレーションを行う必要がある。またデジタル化に関してはアナログデータよりは位置分解能が悪くなってしまふ。

4.0.2 課題と展望

今後の研究として実際の電場に近いデータが手に入り次第行いたい。現在は HSQ 配置に関する位置分解能を求める際の反応点再構成をするときの計算がうまくいっていない。これを改善することで SQ 配置と HSQ 配置の比較を行うことができる。この計算式を修正することが今後の課題である。また現在行っているシミュレーションではシリコン検出器にかける電場を簡易的なものを用いて行っている。電場を変えると生成された電子とホール動きがかなり変わる。つまり実際の新型 MAPS の電場を用いることで実データでの結果に沿うようになる。実際の電場を用いてシミュレーションすることが今後の展望である。また現在のシミュレーションではノイズを考慮していないので、実際のシリコン検出器を使用したときのノイズを考慮することで実際の結果に沿ったシミュレーションを行いたい。デジタル化に関しては 2bit への割り当て方で位置分解能を今の 2bit での位置分解能よりも良くできるので、割り当て方の決定に取り組みたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々に支えられましたことを心より感謝申し上げます。まず第一に、指導教員である山口頼人准教授に深く感謝の意を表します。研究結果に関してこまめに話をすることで自分にはなかった視点で考えられ、検出器に関するアドバイスにより、この研究を進めることができました。志垣賢太教授にはミーティングでのアドバイスで、自分では気付かなかった点に気づけ研究を進めることができました。本間謙輔准教授には前期の LabEx で実験の取り組み方や考え方を教えていただき、研究に大きな影響をもらいました。三好隆博助教には前期のゼミにて原子核物理の基礎を学びました。八野哲特任助教には HI ミーティングにて質問やアドバイスをいただき研究を進めることができました。クォーク物理学研究室の皆さんには温かいサポートと協力をいただき大変感謝しています。最後に家族にも感謝をしたいと思います。おかげさまで大学生活を最後まで楽しんで過ごすことができました。この場で挙げきれなかった方を含め、関わったすべての方に深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 永江知文/永宮正治, 原子核物理学, 裳華房 (2005).
- [2] LHC ALICE 実験 日本グループ, <http://alice-j.org/> (Accessed on 01/29J/2024).
- [3] ALICE Collaboration, Letter of intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC (2022).
- [4] ALICE Collaboration, Letter of Intent for an ALICE ITS Upgrade in LS3 (2019).
- [5] 浜松ホトニクス, 高エネルギー粒子用 Si 検出器, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/high_energy_kspd9002j.pdf (Accessed on 01/29/2024).
- [6] B.-M.Blidaru on behalf of the ALICE collaboration, Testbeam performance results of bent ALPIDE monolithic active pixel sensors in view of the ALICE Inner Tracking System 3, (2022).
- [7] S.Spannagel et al., Allpix2: A modular simulation framework for silicon detectors, Nucl. Instr. Meth. A 901 (2018) 164-172.
- [8] Synopsys, TCAD, <https://www.synopsys.com/ja-jp/silicon/tcad.html> (Accessed on 01/29/2024).
- [9] D.Dannheim et al., Combining TCAD and Monte Carlo methods to simulate CMOS pixel sensors with a small collection electrode using the Allpix2 framework, Nucl. Instr. Meth. A 964(2020).
- [10] Jory Sonneveld for the ALICE Collaboration, ITS3: A truly cylindrical inner tracker for ALICE (2023).
- [11] Domenico Colella, Upgrade of the ALICE experiment beyond LHC Run 3 (2022).