

2025年度 卒業論文

シリコン型検出器多層型飛跡測定系を用いた  
飛跡再構成における多重散乱の影響

2026年2月9日

指導教員 山口 頼人 准教授

主査 山口 頼人 准教授

副査 檜垣 浩之 准教授

広島大学 理学部 物理学科  
クォーク物理学研究室

学籍番号：B223086

氏名：岩澤 舜脩

# 概要

LHC 加速器の ALICE では検出器増強計画を進めており、飛跡再構成性能の大幅向上に向けて、 $5\ \mu\text{m}$  以下の極めて高い位置分解能を持つ次世代シリコンピクセルセンサーの開発が行われている。この新型センサーの性能評価は、すでに性能が既知のシリコンピクセルセンサーからなる多層型飛跡測定系を用いて再構成した飛跡を基準として行うが、粒子は多重散乱によって進行方向に対し散乱されるため、正確な粒子の飛跡を再構成する上で多重散乱の影響の評価は非常に重要である。また異なる粒子実験施設での位置分解能の測定結果において、数  $\mu\text{m}$  の差が生じている。純粋なセンサーの位置分解能は、センサーに設定する電荷に対する閾値が一定であれば、用いるビーム運動量、粒子種に大きく依存しないため、この差を生じる原因の一つとして多重散乱が挙げられる。本論文では、2025 年 12 月に KEK・PF-AR テストビームラインで取得した  $3\text{GeV}/c, 5\text{GeV}/c$  の実験データとシミュレーションを用いて、測定系における多重散乱の影響を評価した。解析した結果、異なるビームエネルギーでの多重散乱の影響を定量的に評価することができた。また実データとシミュレーションの比較では、 $\sigma_{\text{meas}}$  の値の差は  $1\ \mu\text{m}$  以内の差で再現ができた。飛跡の再構成精度は実データの方が良好であり、これは実データにおいて再構成した飛跡は、信頼性の高いものであることが証明された。

# 目次

概要	2
<b>第 1 章 ALICE 実験</b>	<b>5</b>
1.1 Quark Gluon Plasma	5
1.1.1 高エネルギー重イオン衝突実験	5
1.2 LHC	5
1.3 ALICE 実験高度化計画	5
1.4 ITS3	6
1.5 研究目的	7
<b>第 2 章 飛跡検出器</b>	<b>9</b>
2.1 シリコン検出器	9
2.1.1 半導体	9
2.1.2 検出原理	9
2.1.3 CMOS 技術	9
2.2 MAPS 検出器	10
2.3 ALPIDE	10
2.4 新型 MAPS	11
2.5 内部電場構造	12
<b>第 3 章 KEK PF-AR でのビーム実験</b>	<b>14</b>
3.1 PF-AR テストビームライン	14
3.2 飛跡検出器系セットアップ	15
3.3 取得データ	15
<b>第 4 章 データ解析</b>	<b>17</b>
4.1 解析手法	17
4.1.1 Corryvreckan	17
4.1.2 クラスタリング	17
4.1.3 検出器座標の修正	17
4.1.4 Prealignment	18
4.1.5 Alignment	18
4.2 各イベントカットについて	18
4.2.1 バンチイベント	18
4.2.2 空間におけるカット	18

4.2.3	有効領域の選定	19
4.3	多重散乱	20
4.4	評価項目	21
4.4.1	beamprofile	21
4.4.2	$\chi^2$ 値	21
4.4.3	residual	21
4.5	解析結果	22
4.5.1	beam profile	22
4.5.2	$\chi^2$ 値	24
4.5.3	residual	24
<b>第 5 章</b>	<b>シミュレーション比較</b>	<b>26</b>
5.1	シミュレーション方法	26
5.1.1	Geant4	26
5.1.2	Geant4 設定	26
5.1.3	入射ビーム設定	26
5.2	電荷共有設定	27
5.2.1	クラスター設定	27
5.3	実データとの比較	27
5.3.1	クラスターサイズ	27
5.3.2	クラスター形状	29
5.3.3	トラッキングにおけるイベントカットと検出効率	31
5.3.4	residual	32
<b>第 6 章</b>	<b>結論と展望</b>	<b>34</b>
6.1	結論	34
6.2	展望	34
	<b>参考文献</b>	<b>36</b>

# 第1章

## ALICE 実験

### 1.1 Quark Gluon Plasma

現代の宇宙に存在する物質の質量の大部分を担っている陽子や中性子といったハドロンは、クォークとグルーオンによって構成されている。通常的环境下では、クォーク同士の強い相互作用により、単独で取り出すことはできない。

ビッグバン直後のような極めて高温・高密度な環境下においては、クォークとグルーオンが自由に飛び回るプラズマ状態が実現していたと考えられている。この物質相を Quark Gluon Plasma (QGP) と呼ぶ。実験的に QGP を生成し、その性質を解明することは、宇宙初期の物質進化の解明において極めて重要である。

#### 1.1.1 高エネルギー重イオン衝突実験

高エネルギー重イオン衝突実験とは、加速器を用いて高エネルギーの重イオン同士（鉛 pb など）を光速付近まで加速、衝突させることで、QGP を生成するための実験である。高エネルギー重イオン衝突実験によって QGP の性質や、QGP からハドロンへの相転移過程を研究することができる。

### 1.2 LHC

欧州原子核研究機構 (CERN) が運用する Large Hadron Collider (LHC) は、スイスとフランスの国境に位置する世界最大のハドロン衝突型加速器である。地下約 100 メートルに設置された全周 27km のリングを用いて、陽子や重イオンを光速近くまで加速し、正面衝突させることができる。図 1.1 は、LHC の運転スケジュールである。2026 年 2 月現在は第三期運転 (Run3) が進行中であり、将来の高輝度化 (High-Luminosity LHC) に向けたアップグレードが Long Shutdown3 (LS3) と呼ばれる長期運転休止期間中 (2026 年から 2030 年) に行われる。これにより、さらなる衝突エネルギーとルミノシティでの実験が予定されている。

### 1.3 ALICE 実験高度化計画

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) 実験は、LHC における高エネルギー重イオン衝突に特化した実験である。ALICE 実験高度化計画で用いられる LHC は、2026 年中期から 2030 年中期までの期間 LS3 に入り、検出期のアップグレードが行われる。このアップグレードの一つに Inner Tracking System 2 (ITS2) から ITS3 が含まれる。ITS3 についての詳細は次節で述べる。

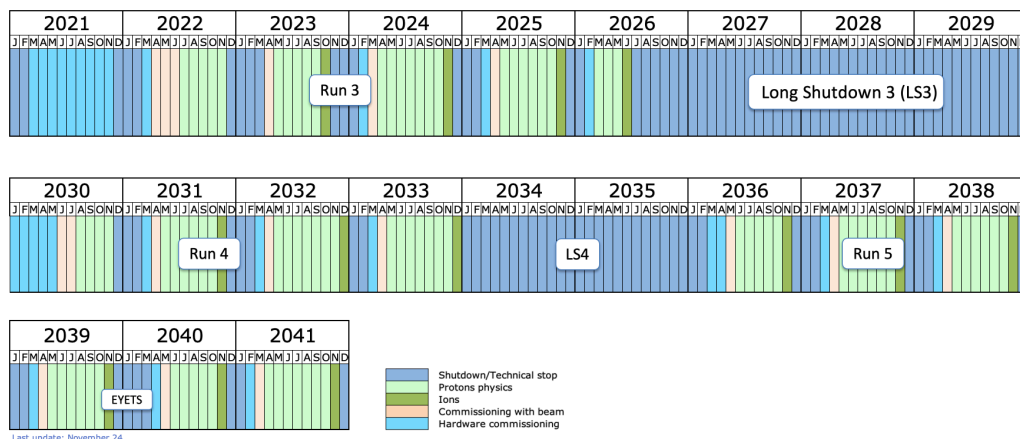


図 1.1: LHC の運転スケジュールと Long Shutdown について [2]

## 1.4 ITS3

ALICE 実験で用いられる検出器は QGP 研究のため、生成されるハドロンやレプトンを低運動量から測定できるよう設計されている。検出器群は大きく 3 つに分けられ、前方領域のミュオン検出器群、中央領域を覆うセントラルバレル、衝突の際の事象の選別を行うグローバル検出器に分けられる。セントラルバレルには粒子識別と粒子の飛跡を再構成するための飛跡検出器があり、この最内層に ITS (Inner Tracking System) が使用されている。現在の Run3 では 2 世代目である ITS2 が使用されており、ITS2 では最新の 180nm-CMOS 技術を用いた読み出し一体型、超薄型の Monolithic Pixel Sensor (MAPS) が用いられている。また重クォークハドロン測定では、高粒子多重度下で行われる。

ITS2 の検出器モジュールを構成するためには、センサーチップに加え、機械的な強度を保つためのサポーターや、読み出し回路からの発熱を除去するための水冷パイプといった、センサー以外の受動的な物質が不可欠である。これらのサポーターや冷却パイプ等の付随物質が存在することは、特に低運動量領域における多重散乱による飛跡再構成精度の劣化を招く主要な要因となっていた。ITS3 に導入される 65nm-CMOS 技術では、回路の集積度向上とウェハー・スケールの大面積センサー（最大 28, cm 程度）を 1 つのチップとして製造することが可能となる。この大面積化されたシリコンウェハーを 50,  $\mu\text{m}$  以下まで薄膜化し、柔軟性を持たせることで、センサー自体を湾曲させて円筒形状に配置する設計を採用している。シリコン自体が構造材としての剛性を持つため、ITS2 で必要とされた外部の支持構造を排除し、センサー単体での自立構造を実現した。

さらに、消費電力の低減と大面積化に伴う放熱効率の向上により、冷却方式を従来の液体冷却（水冷）から気体冷却（空冷）へと移行することが可能となった。サポーターおよび冷却パイプの撤廃により、1 層あたりの物質量は ITS2 の約  $0.35\%X_0$  から約  $0.05\%X_0$  へと劇的に低減される。重クォークハドロン測定での高粒子多重度下では、膨大な数のパイ中間子などが背景ノイズとして発生する。このような環境下で、チャームやボトムといった重クォークを識別するためには、一次衝突点と、重クォークが崩壊した二次衝突点を分離する極めて高い位置分解能が必要不可欠である。ITS3 では、物質量の低減による多重散乱の抑制に加え、ビームパイプをより細径化し、第 1 層を衝突点により近接した位置（半径約 18 mm）に配置することが可能となる。物質量の低減と幾何学的な配置の最適化の相乗効果により、従来困難であった低運動量領域における重クォークハドロン測定での高精度な飛跡再構成を実現する。以下図 1.2 は ITS3 の構造、表 1.1 は ITS2 から ITS3 の具体的なアップグレード内容である。

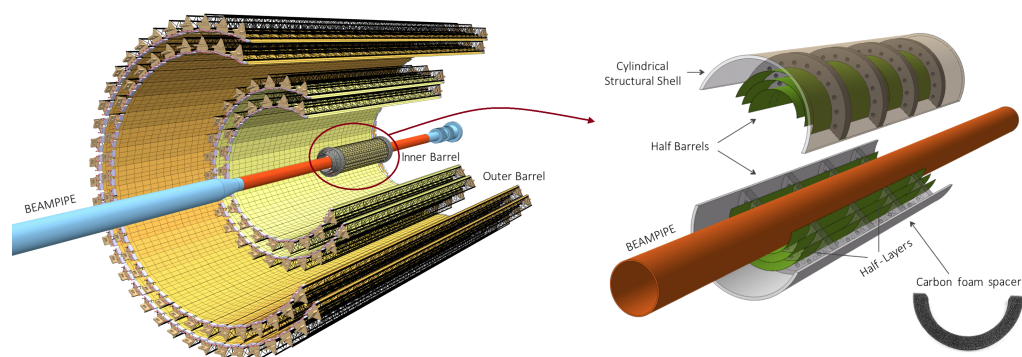


図 1.2: ITS2 から ITS3 へのアップグレード [3]

表 1.1: ALICE ITS2 と ITS3 (Inner Barrel) の性能・仕様比較 [3]

項目	ITS2 (現行)	ITS3 (アップグレード)
CMOS プロセス技術	180 nm	65 nm
センサー形状	平面 (チップを配列)	曲面 (ウェハーサイズ・湾曲)
最内層半径 ( $R_{min}$ )	22 mm	18 mm
物質質量 (1 層あたり $X/X_0$ )	~ 0.35%	~ 0.05%
冷却方式	水冷	空冷
ピクセルピッチ	~ $30 \times 30 \mu\text{m}^2$	~ $20 \times 20 \mu\text{m}^2$
ポインティング分解能	基準	2 倍向上

## 1.5 研究目的

ITS3 で用いられる次世代の測定器においては、より極薄かつ高精細な 65nm-CMOS 技術を応用した新型 MAPS センサーの開発が進められている。新型センサーの性能評価は、性能が既知のシリコンピクセルセンサーからなる多層型飛跡測定系を用いて再構成した飛跡を基準として行う。位置分解能の式は式 1.1 で与えられる。

$$\sigma_{\text{meas}}^2 = \sigma_{\text{true}}^2 + \sigma_{\text{track}}^2 \quad (1.1)$$

$\sigma_{\text{meas}}$  は再構成飛跡とヒット位置の差であり、 $\sigma_{\text{true}}$  はセンサーの真の分解能、 $\sigma_{\text{track}}$  は飛跡測定系の分解能である。図 1.3 は、新型試作センサーである CE65<sup>\*1</sup> の  $\sigma_{\text{meas}}$  の結果であり、異なる粒子ビーム施設で行った結果も合わせて図に記載している。この図から、異なる粒子ビーム施設において数  $\mu\text{m}$  の差が確認されている。純粋なセンサーの分解能は、センサーに設定する電荷に対する閾値が一定であれば、用いるビーム運動量、粒子種に大きく依存しない。このような差が生じる要因として考えられるのが、飛跡測定系における多重散乱の影響である。そのため本研究では、多重散乱による影響を評価するため、前半では KEK PF-AR テストビームラインで取得した、異なるビーム運動量の実験データを定量的に評価し、後半では Geant4 を用いた実験環境を再現したシミュレーションを用いて、実験データとの比較を行う。

\*1 第 2 章で詳しく説明する。

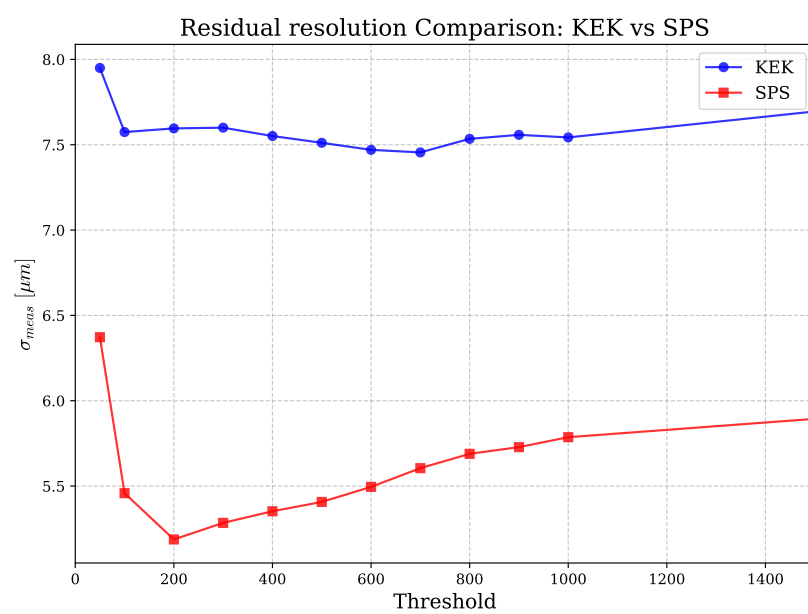


図 1.3: 内部電場構造が異なる新型センサー (CE65) の  $\sigma_{meas}$  の測定結果、縦軸が residual のガウスフィット後の  $\sigma_{meas}$ 、横軸が閾値になっており、異なる実験施設での位置分解能には無視できない差が存在する。純粋な位置分解能はビーム運動量、粒子種に大きく依存しない。

## 第 2 章

# 飛跡検出器

飛跡検出器とは、ALICE 実験に使用される検出器群のうち、セントラルバレル最内層において粒子識別と粒子のトラッキングを目的とした検出器である。

### 2.1 シリコン検出器

ここでは飛跡検出器として使用される半導体の生成、シリコン検出器とその検出原理について説明する。

#### 2.1.1 半導体

シリコンは最外殻電子が 4 つ存在し、これらの共有結合によって結晶を作る。m 殻には最大で 8 つの電子が存在できるため、ここに 5 価、あるいは 3 価の不純物を加えることで自由電子（ホール）が生じる。リンなどの 5 価の原子でドーパしたものを n 型半導体、ホウ素などの 3 価のものを用いたものを p 型半導体と呼ぶ。この n 型半導体、p 型半導体を接合し、逆バイアス電圧を印加することでキャリア（電子、ホール）が逆方向に移動することで空乏層（キャリアが存在しない空間）が生じる。

#### 2.1.2 検出原理

半導体検出器は電離相互作用によって空乏層内で生じた電荷が、電場によって電極に集められることで、この収集電荷を電気信号として取り出す。図 2.1 は半導体検出器の検出原理である。図のように放射線が検出器中に入射した際に軌道中の電子を弾き飛ばし電子・ホールが生じる。この電離に必要なとされるエネルギーは 3.65V である。

#### 2.1.3 CMOS 技術

CMOS<sup>\*1</sup>は MOSFET<sup>\*2</sup> と呼ばれるトランジスタ技術を組み合わせた半導体回路構造である。MOSFET には N チャネル型、P チャネル型が存在し、N チャネル型はソースに対してプラスの電源をゲートに印加することで導通し、P チャネル型はマイナスを印加することで導通する。CMOS はこれらの nMOSFET と pMOSFET を組み合わせたものである。この CMOS 技術は P 型と N 型のトランジスタが補完的に動作し、スイッチング時以外は電流をほとんど流さない。また小さな面積に多くの回路を集積でき、センサーの低消費電力化、高集積化といった利点が存在する。図 2.2、2.3 は MOSFET の動作図である。

<sup>\*1</sup> Complementary Metal Oxide Semiconductor: 相補型金属酸化膜半導体

<sup>\*2</sup> Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor: 金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ

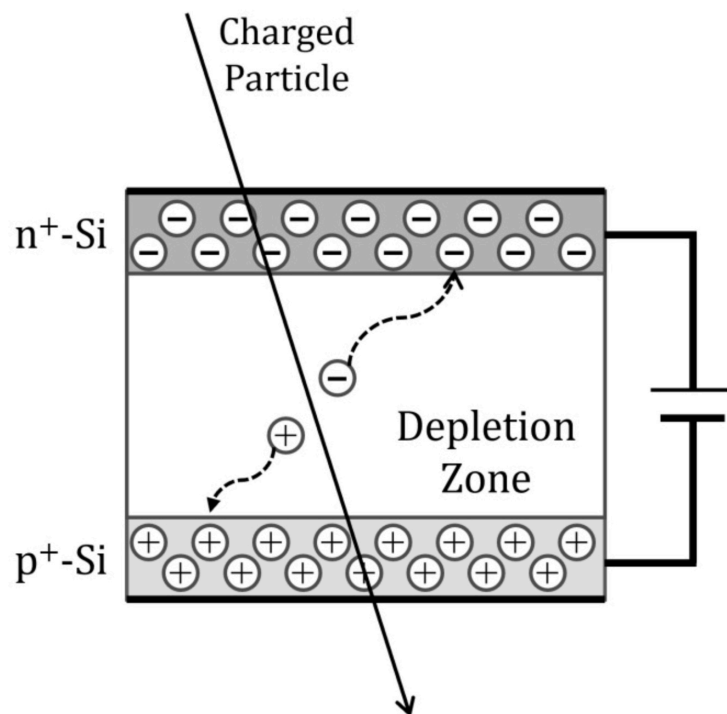


図 2.1: 半導体検出器の検出原理 [10]

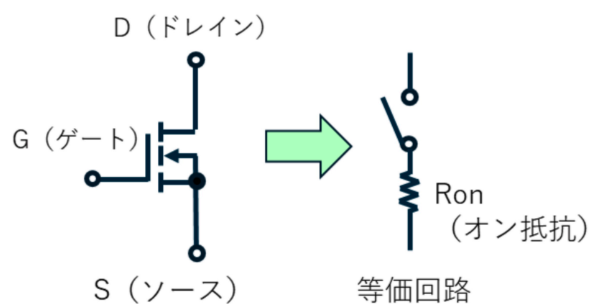


図 2.2: MOSFET のチャネル動作 [7]

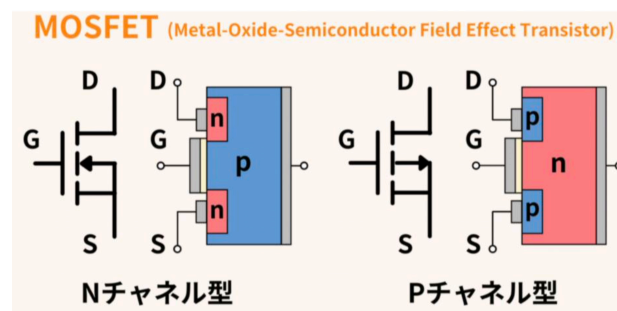


図 2.3: pMOS, nMOS の動作 [7]

## 2.2 MAPS 検出器

MAPS(Monolithic Active Pixel Sensors) は CMOS 技術を応用とした読出一体型ピクセルシリコン検出器である。薄型、高集積という特徴を持ち、原子核実験分野のみでなく、素粒子実験、宇宙線分野でも使用され、ALICE 実験グループによって開発が進められている。

## 2.3 ALPIDE

現在稼働中の ALICE2 実験の飛跡検出器として使用されている ALPIDE (ALice PIxel DETector) は、180nm-CMOS 技術が採用されており、すでに性能が既知として後ほど紹介する新型センサーの飛跡検出器系に使われている。チップサイズは  $30\text{mm} \times 15\text{mm}$  ( $1024\text{px} \times 512\text{px}$ ) であり、1bit<sup>\*3</sup>読み出しである。

\*3 hit/no hit の情報のみを出力する

図 2.4 は実際の ALPIDE センサーチップである。また表 2.1 は ALPIDE の基本性能を表す。

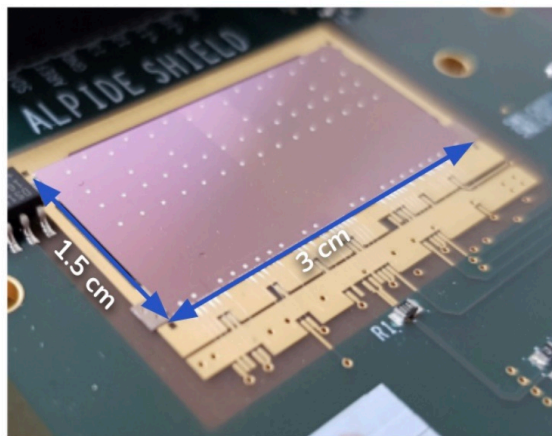


図 2.4: ALPIDE センサー [6]

項目	値
チップサイズ	$30 \times 15 \text{ mm}^2$
ピクセル数	$1024 \times 512$
ピクセルピッチ	$29.24 \times 26.88 \mu\text{m}^2$
検出効率	$> 99 \%$
Fake hit rate	$< 10^{-6} / \text{pixel/event}$

表 2.1: ALPIDE センサーの基本性能 [6]

## 2.4 新型 MAPS

ITS3 導入予定である新型テストセンサー、CE65 について説明する。CE65 は 65nm-CMOS 技術を用いた新型 MAPS であり、電荷収集特性を試験するためのテストチップである。図 2.5 は実際の CE65 センサーチップであり、その主な仕様を表 2.2 に示す。このチップは読み出し方式が特殊であり、ローリングシャッター方式と呼ばれる。これは行または列ごとに順次読み出しを行う。また試作チップである CE65 には 3 種類の異なる内部電場構造を持つチップが存在し、Standard (STD)、Blanket (BLK)、Gap (GAP) となっている。この 3 種類の電場構造については、次節で詳しく説明する。

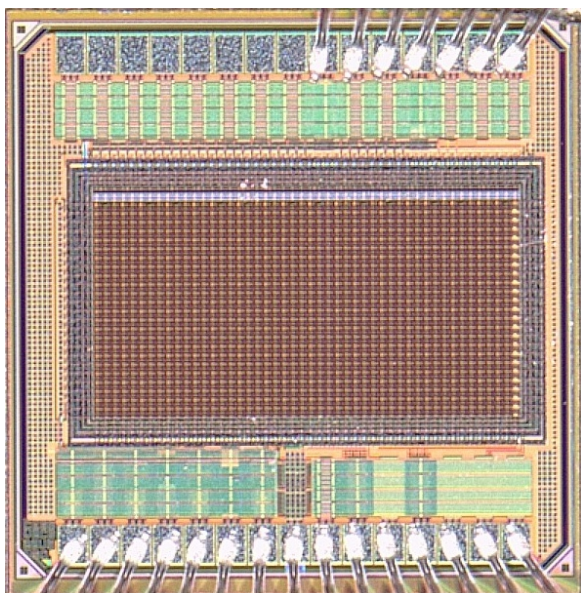


図 2.5: 実際の新型センサーチップ (CE65)

項目	仕様・性能
チップサイズ	$1.0 \times 0.5 \text{ mm}^2$
ピクセル数	$48 \times 24$
ピクセルピッチ	$15 / 18 / 22.5 \mu\text{m}$
読み出し方式	ローリングシャッター

表 2.2: ITS3 に向けた開発用プロトタイプチップ (CE65) の主な仕様 [7]

## 2.5 内部電場構造

3種類の異なる内部電場構造について説明する。

### STD

現行 MAPS である ALPIDE の内部電場構造は STD であり、この構造はセンサー部の電極周辺に広い空乏層が存在する。空乏層外では電荷は自由拡散するため電化収集速度が遅いが、電荷共有しやすいという特徴を持つ。

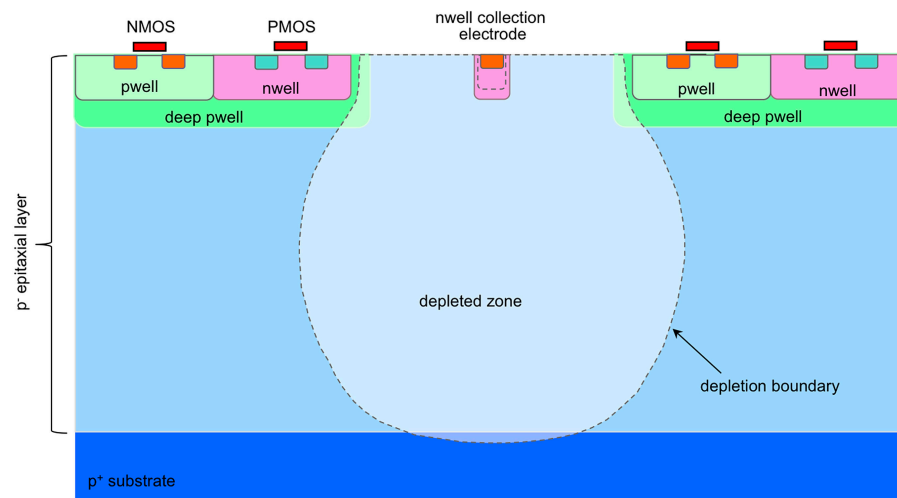


図 2.6: STD の内部電場構造 [10]

### BLK

従来 MAPS には STD を採用していたため、電荷収集が遅いという欠点が存在した。そこで、新たに BLK、GAP と呼ばれる内部電場構造を持つチップが作られた。BLK は STD 構造のセンサー部に n 型半導体を層のように重ねることで、内部が完全に空乏化することでセンサー全体に強い電場が発生する。そのため、拡散しながら収集される STD よりも、電場の影響を大きく受ける BLK は電荷収集速度が速い。また構造上、電荷共有は起こりにくい。

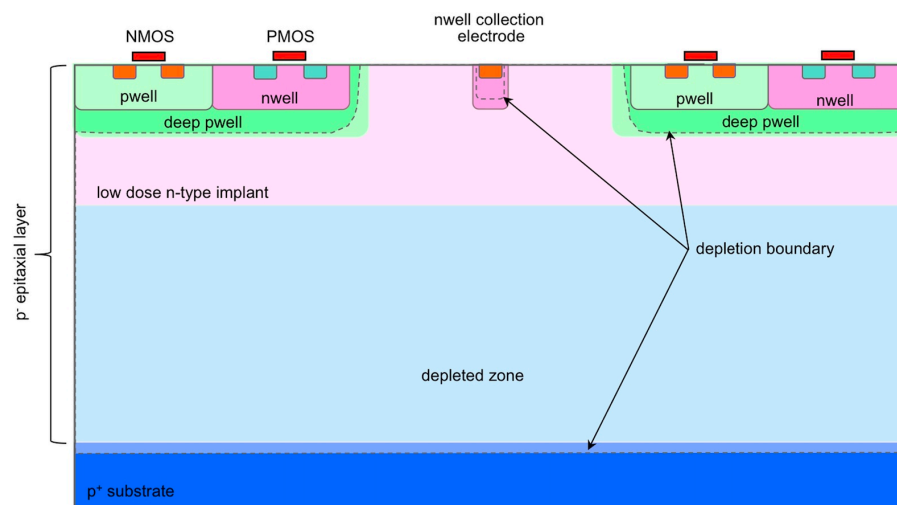


図 2.7: BLK の内部電場構造 [10]

## GAP

GAP は STD 構造センサーに、ピクセル間に一定の間隔を空けながら、n 型半導体を重ねたものである。生成方法は BLK と似ているが、電極付近に間隔を空けることでピクセル端にも電場が存在でき、電荷が電極に収集しやすくなる。そのため電荷収集速度が BLK よりも速い。また BLK 同様、電荷共有は起こりにくい。

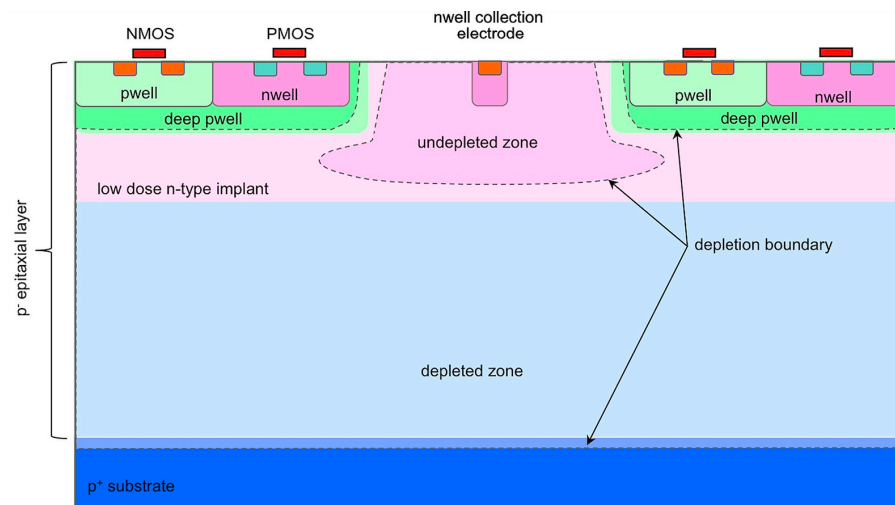


図 2.8: GAP の内部電場構造 [10]

## 第3章

# KEK PF-AR でのビーム実験

本研究では KEK（高エネルギー加速器研究機関）の PF-AR テストビームラインを用いて実験データの取得を行なった。RP（Reference Plane）として性能が既知である ALPIDE センサーを 6 枚並べた飛跡測定系にビームを照射し、それぞれの hit 位置を用いてビーム粒子のトラックを再構成した。再構成したトラックの各 RPs に対する外挿点と hit 位置の差を見ることで、多重散乱の影響を評価する。

### 3.1 PF-AR テストビームライン

PF-AR は、周長 377 m のシングルバンチ電子蓄積リングであり、主としてパルス X 線源として運用されている。通常運転時の蓄積電子ビームのエネルギーは 6.5 GeV または 5.0 GeV であり、電流値は約 50 mA で維持されている。テストビームラインでは、この PF-AR の蓄積電子ビームを利用して、検出器開発のための 2 次粒子ビームを生成・供給している。具体的なビーム生成の原理は、蓄積リング中を周回する光子ビームのハロー部（中心軌道から外れた部分）に対して、可動式のカーボンワイヤー標的を挿入する。光子ビームが標的と相互作用することで制動放射が生じ、高エネルギーのガンマ線が放射される。このガンマ線は、蓄積リングの偏向電磁石チェンバー端部に設置された銅製コンバーター（厚さ数 mm 程度の Cu 板）に入射し、電子・陽電子対生成を引き起こす。生成された粒子のうち、双極電磁石と四重極電磁石によって特定の運動量を持つ電子のみが選別され、実験エリアへと輸送される。このラインで利用可能な電子ビームの運動量は、1GeV から 5GeV の範囲で調整可能である。ビーム強度は標的の挿入深度によって制御され、典型的には数 Hz から数 kHz 程度のレートで供給される。図 3.1、3.2 は本実験で使用した、実際のビーム射出口と実験エリアである。

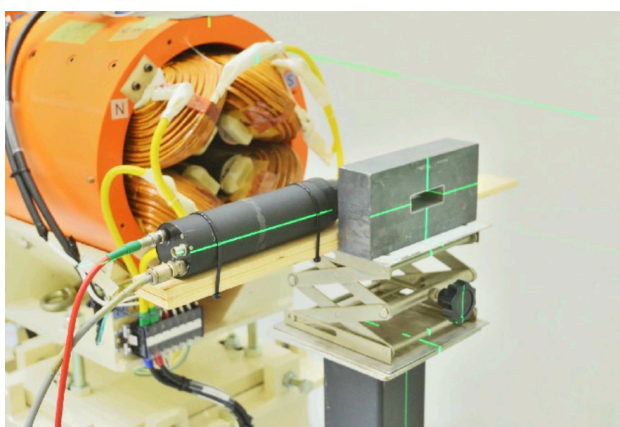


図 3.1: ビーム射出位置 [8]

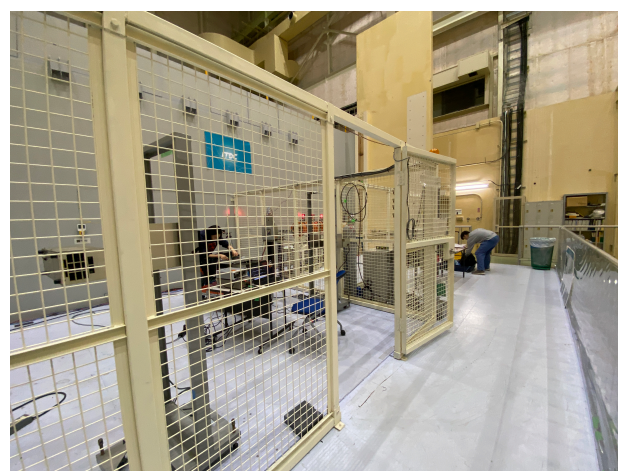


図 3.2: 実験エリア

## 3.2 飛跡検出器系セットアップ

ALPIDE センサーを 6 枚用意し、それぞれを可能な限り限界まで近づけて設置した。なお、実際にテストセンサーの評価をする際のセットアップを再現するため、3 枚目と 4 枚目の間は少し間を空けている。図 3.3 は実際に用いた飛跡検出器群である。

飛跡検出器系とは、飛跡検出器開発において、テスト対象センサー性能評価を行う際に飛跡の再構成の役割を担う ALPIDE センサーを複数枚並べた実験セットアップのことである。各 ALPIDE をキャリアボードに取り付け、これを DAQ ボード、プロキシミティボードに繋ぐことでデータ収集を可能にした。実験用ボックスのブレッドボードには、治具を固定するための間隔が 1inch のネジ孔が存在する。実験中はノイズ除去のため、実験用ボックスに黒色の遮光用シートを被せた。

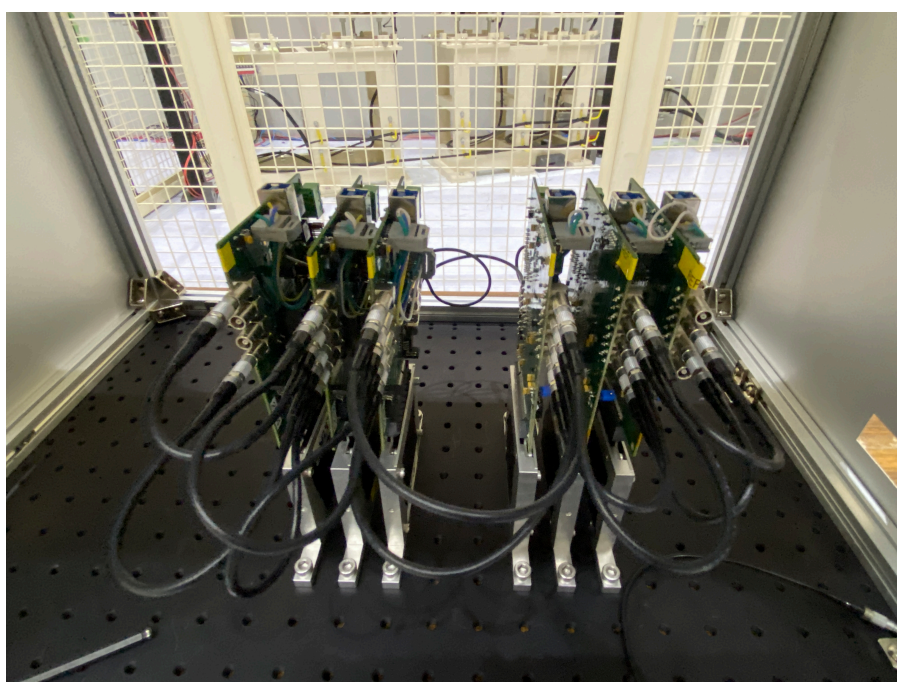


図 3.3: 実験の際に用いた飛跡検出器群

ビーム最下流の位置にはイベントトリガーとして  $3\text{cm} \times 3\text{cm}$  の ALPIDE と同程度の大きさのシンチレータを設置している。ALPIDE は前後 3 枚の構成になっており、ビーム上流から RP\_0、RP\_1、RP\_2、RP\_4、RP\_5、RP\_6 としている。隣り合う RP の間隔は 1inch であり、RP\_2 と RP\_4 のみ間隔が 3inch となっている。これは実際のテストチップの性能評価実験時のセットアップを再現したものであり、通常では RP\_2 と RP\_4 の間にテスト用チップを置くためこのように設置している。図 3.4 は本実験で使用した飛跡検出器系のイメージ図である。本研究では飛跡検出器系そのものの多重散乱の影響を評価するため、テスト用センサーは設置していない。また RP\_2 と RP\_4 以外の隣り合う RP の間隔が 1inch であるのは、テストチップの性能評価時と同様に、可能な限り飛跡検出器系による多重散乱の影響を低減するためである。

## 3.3 取得データ

以上のセットアップを用いて 2025 年 12 月 3 日から 12 月 10 日にかけて KEK PF-AR テストビームラインを用いて実験を行った。この実験は ALICE3 プロジェクトに参加している韓国チームと共同で実験を行った。本実験で取得したデータはこの期間中に測定したデータの一部であり、この期間中には様々なテ

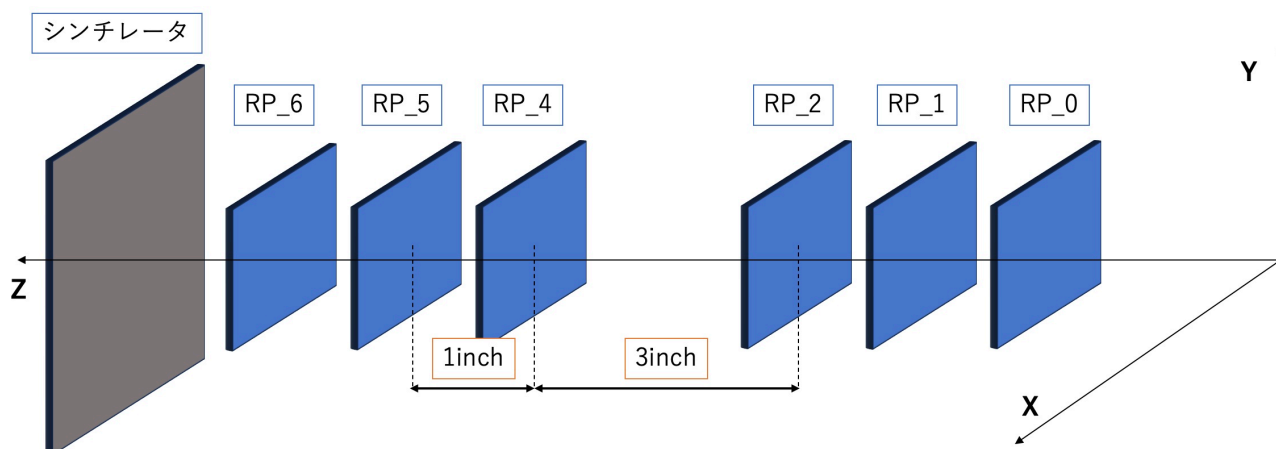


図 3.4: telescope の概念図

ストリップの試験を行った。

本論文で用いるデータは、 $3\text{GeV}/c$  と  $5\text{GeV}/c$  の異なる 2 種類のビーム運動量において、各 600k ずつ、シンチレータをイベントトリガーとして取得した。以下の表 3.1 は測定したビーム運動量と、その時のトリガーレートである。

表 3.1: ビーム運動量に対するトリガーレートと取得データ数

ビーム運動量	トリガーレート (Hz)	取得データ数
$3\text{ GeV}/c$	850Hz	600k
$5\text{ GeV}/c$	430Hz	600k

## 第4章

# データ解析

本研究における実験データの飛跡の再構成および解析には、汎用解析フレームワークである Corryvreckan を用いた。実験で取得したデータ (3GeV、5GeV) による解析を行い、異なるビームエネルギーでの多重散乱の影響を評価した。

### 4.1 解析手法

#### 4.1.1 Corryvreckan

Corryvreckan は、CERN の CLICdp コラボレーションによって開発されたオープンソースソフトウェアであり、主にピクセル検出器を用いたビーム実験のデータ解析を目的として設計されている。Corryvreckan は C++ で記述されており、高い柔軟性と拡張性を持つモジュラー構造を採用していることが最大の特徴である。データ読み込み、クラスタリング、トラッキング、Alignment、DUT (Device Under Test) の解析といった一連の処理プロセスは、それぞれ独立したモジュールとして実装されている。

解析フローは設定ファイルによって制御され、ユーザーは実験のセットアップや解析目的に応じて必要なモジュールを選択し、パラメータを調整することで解析フローを構築することができる。各モジュールは、共通のクリップボードを介してイベントデータをやり取りし、前のモジュールが処理した結果を次のモジュールが利用する形式で処理が進められる。

#### 4.1.2 クラスタリング

クラスタリングとは、センサーのヒットピクセルの集合を一つの塊として、クラスターと定義することである。クラスターの中心となるヒットピクセルを seed と定義し、その周囲のヒットを neighbor と定義する。これらには個別にピクセルに落とした電荷量に対する閾値を設定する。本実験で用いた ALPIDE は 1bit 読み出しであるため、クラスタリングでは閾値を設定せずに隣接するヒットを収集する。またヒット中心の座標は、生成したクラスターの幾何学中心の座標を取得する。

#### 4.1.3 検出器座標の修正

ビームテスト実験において、各検出器平面の幾何学的な位置情報を正確に把握することは、高い飛跡再構成効率と位置分解能を得るために不可欠である。理想的には、すべての検出器は設計された座標通りに配置されるべきであるが、実際には設置時の機械的な公差により、数百マイクロメートル程度の位置ずれや回転ずれが不可避免的に生じる。これらの物理的な設置誤差をソフトウェア上で補正し、正確な検出器座標を決定するプロセスを Alignment と呼ぶ。本研究では、Corryvreckan に実装されているモジュールを

用いて、飛跡検出器系全体の精密な Alignment を行った。

#### 4.1.4 Prealignment

Prealignment は、Alignment の前段階の位置情報の処理である。基準となる RP を設定し、この RP のヒットと各検出器のヒットの情報から、ソフトウェア内部での位置情報を大まかに調整する。

#### 4.1.5 Alignment

Alignment では、Prealignment の後、各検出器のヒット情報をもとに、粒子の飛跡であるトラックを再構成し、各検出器の位置をより詳細に調整する。トラックの再構成では、ビーム最上流と最下流の plane のクラスター重心から大まかなトラックを取得し、このトラックをもとに最小二乗法を用いてカイ二乗値が最小になるよう、トラックモデルの適用と反復的な位置情報のパラメータ最適化を行う。このトラックモデルには直線近似モデルを採用している。

## 4.2 各イベントカットについて

実験データには、検出器やビーム由来のノイズが存在する。これらはデータ解析において正常に結果を取得できない原因となるため、適切なイベントカットを行った。

### 4.2.1 バンチイベント

KEK PF-AR では蓄積電子ビームの電流値を一定にするため、トップアップ運転と呼ばれる、電子の減少数を補うように定期的に電子を注入する運転方式をとっている。そのため、粒子がごくわずかな時間に大量に検出される、バンチイベントが存在する。RP に対し、1 イベントに数百のヒットがある場合、これらは時間によるイベントの区別ができないため、トラックの精度が保証できない。本解析では各 RP に対し 2 以上のクラスター多重度イベントカットを取り入れることで、バンチイベントのカットを行った。このカットにより取得したデータ数 600k に対し 4k ほどがカットされる。

### 4.2.2 空間におけるカット

トラックを再構成するにあたって、RP のヒットとトラックは関連づけられなければならない。そこで明らかに不適なクラスター重心とトラックを区別するために、空間におけるトラックイベントカットを行った。クラスター重心とトラックの関連付けのために、トラックの外挿点を中心とした円形のサーチウインドウを設定しており、図 4.1 は、空間におけるイベントカット値に対するトラックの検出効率である。ここでは効率が 99 %を超えている、かつ分布幅がほぼ一定である値 (100 $\mu$ m) を採用した。

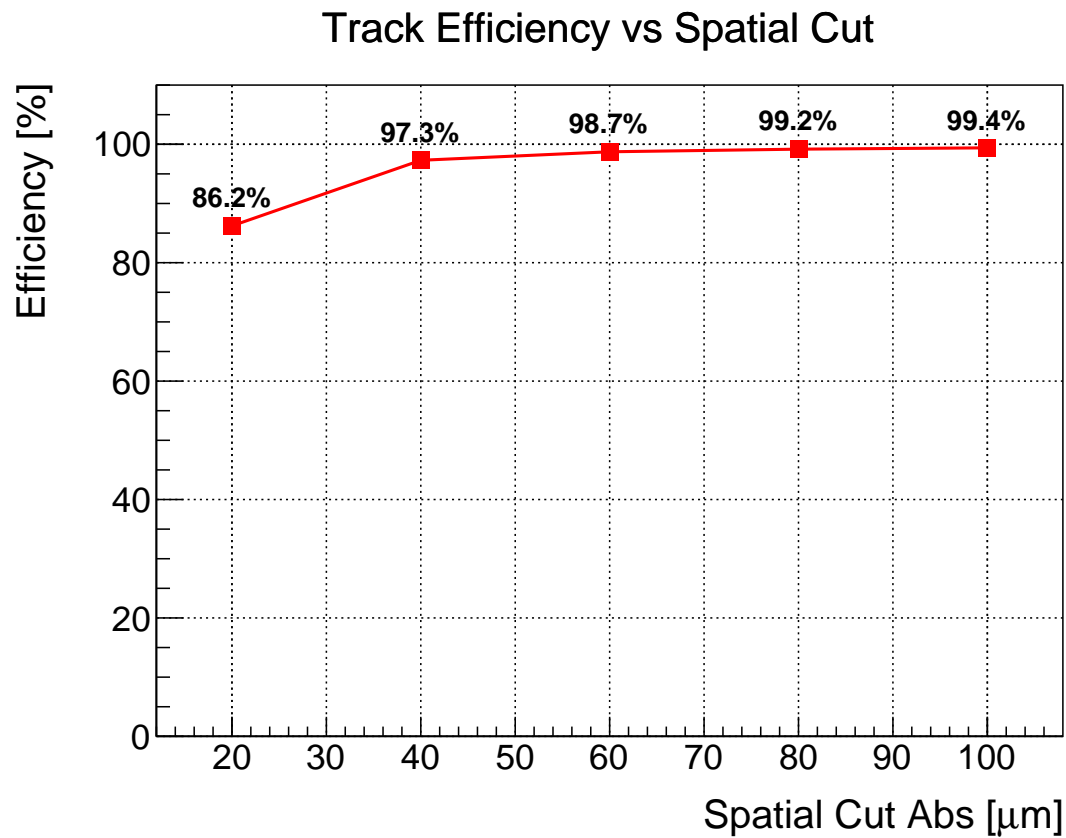


図 4.1: 空間におけるサーチウィンドウの値と検出効率

#### 4.2.3 有効領域の選定

トラッキング解析に先立ち、取得した実験データの空間的なヒット分布を確認した。図 4.2 はカット前、カット後のヒットグラフである。カット前の図において、Y 座標が 400 ピクセルを超える領域において、イベント検出数の顕著な減少（不連続性）が観測された。この現象の要因は、実験データ取得の際に ALPIDE センサーを固定し、読み出しを可能にする基板と ALPIDE の上部と重なることで生じる。この上部ではセンサー以外の物質質量によって散乱の影響が大きいため、トラッキング効率や位置分解能の算出精度に悪影響を及ぼす懸念がある。そのため、本解析においてはデータの信頼性を担保する目的で、ノイズが大きいセンサー端と当該領域 ( $y > 400$  pixel) を解析対象から除外し、健全性が確認された領域のみに限定して評価を行うこととした。

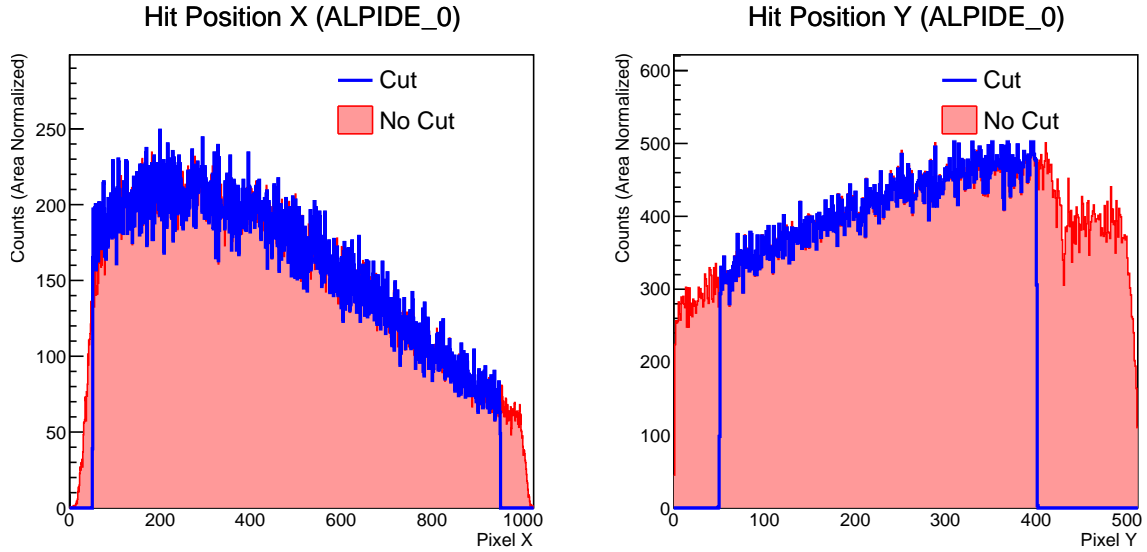


図 4.2: カット前とカット後のヒットポジションのグラフ、Y 座標系において 400px 以降でイベント数が落ちることが確認できる。

### 4.3 多重散乱

荷電粒子が物質中を通過する際、物質中の原子核が作るクーロン場によって多数回の小角散乱を受ける。これを多重散乱と呼ぶ。これらの散乱はランダムな過程であり、十分な厚さの物質を通過した後の最終的な散乱角の分布は、中心極限定理により中心を 0 とするガウス分布で近似することができる。このガウス分布の幅 (RMS 散乱角)  $\theta_0$  は、Highland の公式を用いて以下の式で近似される。

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right] \quad (4.1)$$

ここで、各変数は以下の通りである。

- $p$  : 入射粒子の運動量 [MeV/c]
- $\beta c$  : 入射粒子の速度
- $z$  : 入射粒子の電荷数 (電子や陽子の場合は 1)
- $x$  : 物質の厚さ [cm]
- $X_0$  : 物質の放射長 (Radiation Length) [cm]

この式から、散乱角  $\theta_0$  は粒子の運動量  $p$  に反比例することがわかる。したがって、低運動量の粒子ほど物質による散乱の影響を大きく受け、飛跡再構成における位置精度や運動量決定精度が悪化する要因となる。本実験のようなシリコン検出器においては、低運動量領域でこの多重散乱が位置分解能の支配的な項となる。本解析では異なる運動量 (3GeV、5GeV) での実験データを用いて、多重散乱による影響を調べた。

## 4.4 評価項目

### 4.4.1 beamprofile

飛跡検出器系のデータ収集が正常に動作しているかを確認するためにビームプロファイルを取得した。本実験では ALPIDE と同程度の大きさのシンチレータをトリガーとしているため、ビーム最上流と最下流での層でのアライメント後のトラックとヒット位置の 2D マップを取得し、アライメントの精度を確認した。また次章で扱うシミュレーション再現のため、ビームサイズとビーム入射角についても取得した。

### 4.4.2 $\chi^2$ 値

トラックにおける最適な飛跡パラメータの決定には最小二乗法を用いている。検出器の総数を  $N$ 、各検出器  $i$  におけるクラスター重心の位置を  $(x_{m,i}, y_{m,i})$ 、再構成されたトラックによる外挿位置を  $(x_{fit}(z_i), y_{fit}(z_i))$ 、各検出器の固有分解能を  $(\sigma_{x,i}, \sigma_{y,i})$  とすると、 $\chi^2$  値は以下の式で定義される。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{x_{m,i} - x_{fit}(z_i)}{\sigma_{x,i}} \right)^2 + \left( \frac{y_{m,i} - y_{fit}(z_i)}{\sigma_{y,i}} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

本解析でのトラックモデルでは直線近似を採用した。そのため  $x_{fit}(z)$  および  $y_{fit}(z)$  は  $z$  の一次関数として表される。また、自由度 (ndf) あたりのカイ二乗値 (reduced  $\chi^2$ ) は、トラックパラメータの数を  $n_{par}$  (直線近似の場合は 4) として、以下の式で評価される。

$$\chi_{ndf}^2 = \frac{\chi^2}{2N - n_{par}} \quad (4.3)$$

この  $\chi^2$  値が最小になるようにトラックパラメータ (傾きと切片) が決定される。 $\chi_{ndf}^2$  値は 1 に近づくほど値は良好であり、フィッティングのズレが少ないと言える。トラックの精度は多重散乱による影響を大きく受けるため、この値を比較することで異なるビームエネルギーでの多重散乱の与える影響を確認する。

### 4.4.3 residual

residual とは、再構成したトラックの各 RP に対する外挿点とクラスター重心位置の残差である。実データ解析でのトラックは Alignment の基準を ALPIDE\_2 としている。また各層における多重散乱の影響を評価するため、ビーム上流から 2 枚のみの層でトラックした際の residual を取得した。

## 4.5 解析結果

ここでは Corryvreckan を用いて解析した評価項目の結果を示す。

### 4.5.1 beam profile

Alignment が正常に行われているか、トラックとヒット位置の 2D マップから確認した。図 4.3 はビーム最上流の ALPIDE\_0 におけるヒット座標とトラックとの residual の 2D マップである。

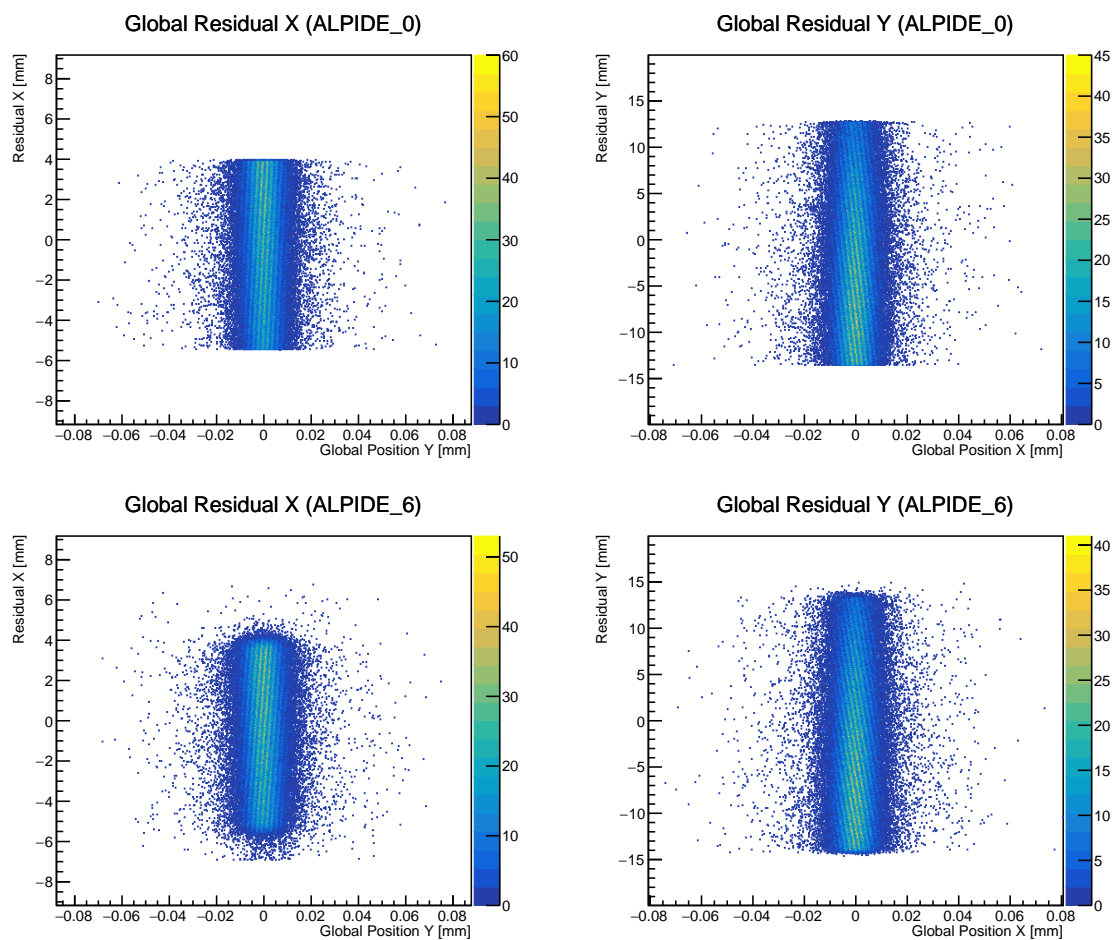


図 4.3: 最上流（上）と最下流（下）の residual と Global 位置の 2D マップ

Global 位置に対する residual は横軸に垂直な直線になっており、Alignment 後の位置関係において、ビームが中心を正しく通っていることが読み取れる。

次にビームサイズとビーム入射角についての結果を示す。図 4.4、図 4.5 は ALPIDE\_0 でのデータから取得したビームサイズ、ビーム入射角のガウスフィットの結果である。本研究で使用したシミュレーションは、この  $1\sigma$  の値を仮想粒子ビームに採用することで、実験データの再現を行なった。

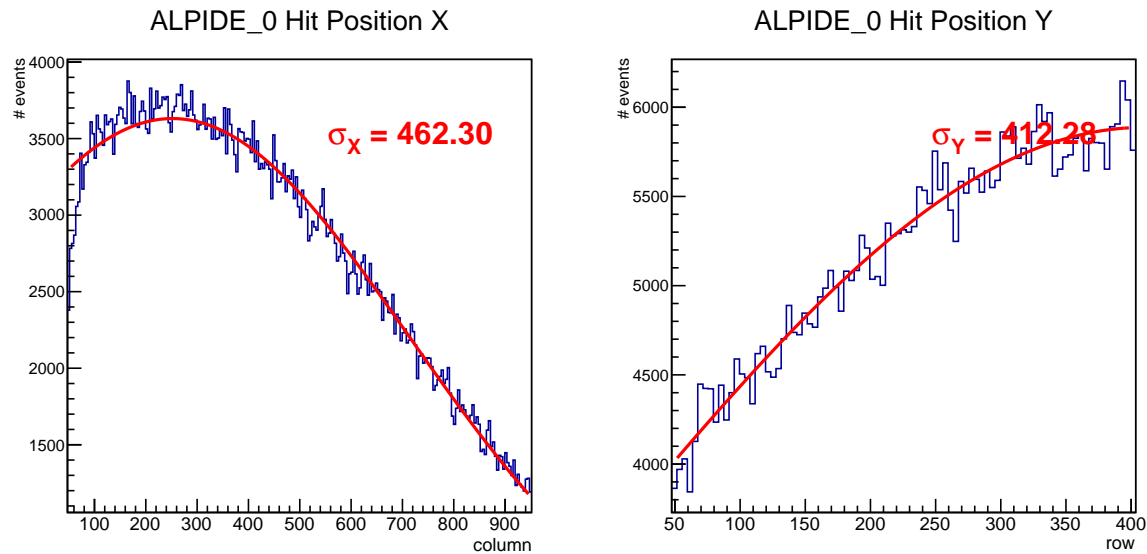


図 4.4: 3GeV におけるビームサイズ、縦軸はイベント数、横軸はピクセル数である。グラフはガウスフィットをし、 $1\sigma$  を表示している。この  $1\sigma$  はピクセル数であるため、ここにそれぞれ ALPIDE のピクセルピッチをかけることでビームサイズが取得できる

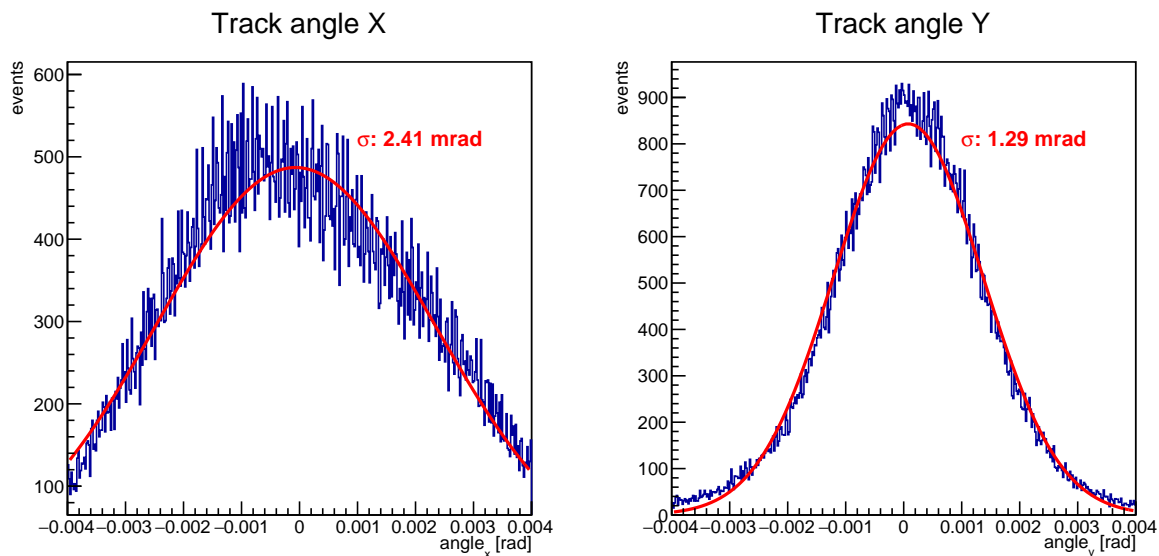


図 4.5: 3GeV におけるビーム入射角のガウスフィットの結果である。ビームサイズ同様、 $1\sigma$  をグラフ上に記載している

### 4.5.2 $\chi^2$ 値

異なるビームエネルギー（3GeV,5GeV）での  $\chi^2_{ndf}$  を比較し、多重散乱による影響を評価した。図 4.6 から、ビームエネルギーが高いほど  $\chi^2_{ndf}$  は良好であり、粒子が多重散乱によって受ける影響が少ないことが分かる。

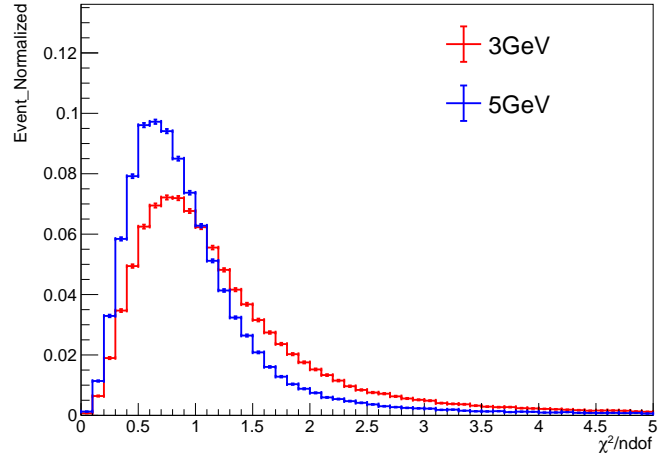


図 4.6: 3GeV (赤)、5GeV (青) の  $\chi^2_{ndf}$  値の比較、形状を比較できるように縦軸は規格化している。

### 4.5.3 residual

図 4.7 は各 RP における 6 層でトラッキングした場合の residual 分布幅 (X、Y) である。表 4.1 内の値は  $1\sigma$  の値をまとめたものである。図 4.7 の横軸は検出器の Z 座標であり、実験の際の位置と一致している。表 4.1 から residual の値は 5GeV の方が良好であり、多重散乱の影響は低運動量において大きくなることが確認できる。また、傾向としては X、Y ともに同様の傾向が見られる。

表 4.1: 各 RP における Residual 値の  $1\sigma$  評価結果

検出器 ID	Residual X ( $\mu\text{m}$ )		Residual Y ( $\mu\text{m}$ )	
	3 GeV	5 GeV	3 GeV	5 GeV
RP_0	4.58	3.80	4.42	3.64
RP_1	3.69	3.79	3.68	3.54
RP_2	5.03	4.40	4.76	4.13
RP_4	5.05	4.39	4.88	4.19
RP_5	3.89	3.72	3.77	3.60
RP_6	4.70	3.88	4.60	3.71

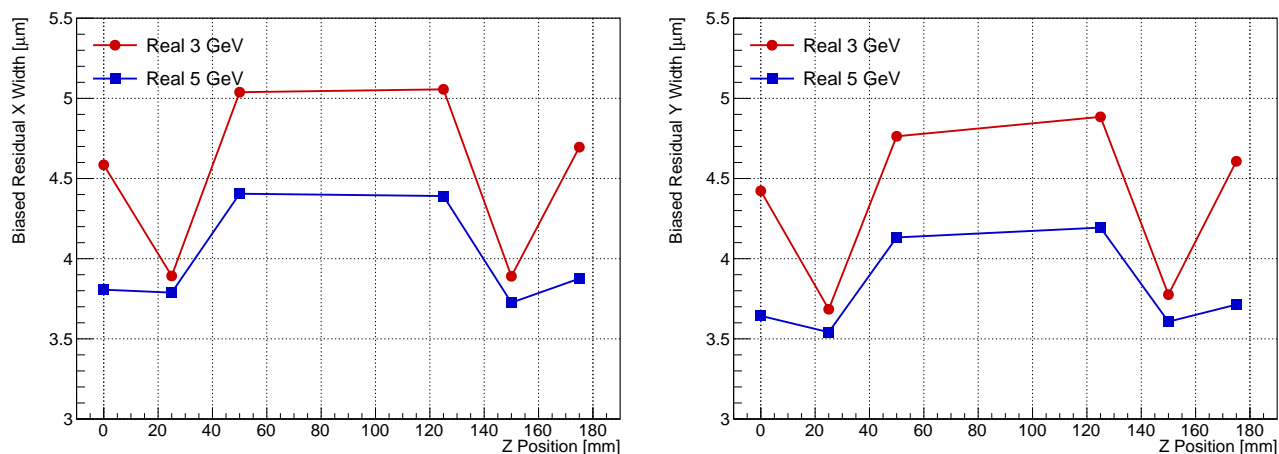


図 4.7: 各 RP における Residual 分布 (左: X 方向、右: Y 方向)。グラフの横軸の値は分布の幅  $1\sigma$  を表す。

また図 4.8 はビーム上流側から 2 枚の層でトラックを引いた際の residual 分布の  $1\sigma$  を縦軸に、横軸を検出器の位置 (Z) として 3GeV、5GeV の場合を重ねてプロットしたものである。全体の傾向としてビーム下流側に行くほど residual の値は大きくなるが見取れる。3GeV、5GeV での多重散乱による影響は良好に確認できたが、トラックの精度が 2 枚の層のみでは 6 層のトラックと比較して十分でなかったため、ビーム下流側に行くほど多重散乱の影響が大きくなることは定量的には示すことができなかった。しかしながら、これら実データの解析結果からはビーム運動量の差による多重散乱影響の定量性はよく示すことができた。

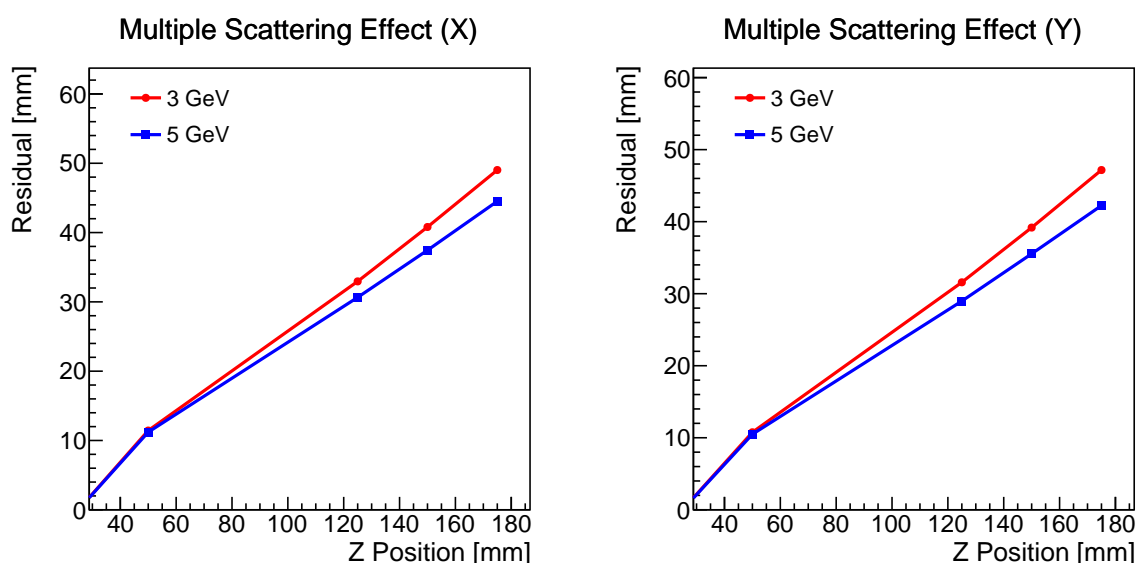


図 4.8: ビーム上流側から 2 層でトラッキングした場合の各層における residual 分布 (左: X 右: Y)

## 第5章

# シミュレーション比較

本研究では、ビームテストで使用した ALPIDE テレスコープのセットアップを Geant4 上に再現した。

### 5.1 シミュレーション方法

#### 5.1.1 Geant4

Geant4 (GEometry ANd Tracking) は、CERN (欧州原子核研究機構) を中心に開発された、物質中における粒子の通過および相互作用をシミュレーションするための C++ 製ツールキットである。高エネルギー物理学、核物理学、宇宙線物理学、医療物理学など幅広い分野で標準的に使用されている。Geant4 はモンテカルロ法に基づき、入射粒子が物質中で引き起こす電磁相互作用や核反応、崩壊などを確率的に計算し、粒子の飛跡やエネルギー付与をステップごとに追跡することができる。ユーザーは C++ のクラスを継承することで、実験体系の幾何学形状、物質定義、粒子生成、物理プロセスを自由に構築することが可能である。

#### 5.1.2 Geant4 設定

実験セットアップに基づき、6 層の ALPIDE をビーム軸上に配置した。各検出器層は、厚さ  $50\ \mu\text{m}$  のシリコン層 ( $30\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ ) として定義した。また、多重散乱の影響を現実的に評価するため、実験時の遮光環境を考慮した物質の再現を行った。具体的には、各シリコン層の両面に厚さ  $70\ \mu\text{m}$ 、密度  $0.9\ \text{g}/\text{cm}^3$  のセルローズ (紙テープ相当) を配置し、検出器および周辺物質による散乱を模擬した。

#### 5.1.3 入射ビーム設定

入射ビームは実験条件に合わせ、 $3\ \text{GeV}$ 、 $5\ \text{GeV}$  の電子線とした。また実験データから取得したビームプロファイルを用いて、ガウス分布の広がりや運動量方向に微小な角度分散を再現した。これにより、特定のピクセル位置へのヒット集中を防ぎ、実験データと同様の連続的な残差分布が得られるように調整を行った。

## 5.2 電荷共有設定

Geant4 の標準的なトラッキングでは、エネルギー付与は点状の相互作用として計算される。一方、実際の ALPIDE センサーでは、生成された電荷キャリアが熱拡散によって広がり、隣接するピクセルに信号がまたがる電荷共有が発生する。本研究では、幾何学的確率モデルを導入し、この電荷共有を再現した。

### 5.2.1 クラスタ設定

クラスタリングは、ピクセル内の局所座標に基づき、ピクセル中心からの有効距離を定義し、ピクセル内を中心領域、境界領域、コーナー領域に分類することで行なった。各領域において観測されるクラスタサイズ（1 から 4pixel）の発生確率を実データの分布の平均と一致するよう再現している。

## 5.3 実データとの比較

Geant4 によるシミュレーション結果が実験環境を再現できているかどうかの確認と、データの比較から多重散乱による影響を評価した。

### 5.3.1 クラスタサイズ

Geant4 における電荷共有設定の妥当性を検証するため、実データとシミュレーションデータを規格化し、クラスタサイズ分布を比較した。図 5.1 は実データとシミュレーションとのクラスタサイズ分布である。比較の結果、クラスタサイズが小さい領域（1~4 ピクセル程度）においては両者の分布の特徴は一致している。しかしながら、実データは各 RP においてクラスタサイズ分布にばらつきが存在する。シミュレーションではこの細部までは再現することができなかった。

また、実データにはクラスタサイズが 5 以上のイベントがわずかながら存在するが、これらはシミュレーションでは再現していない。この乖離は、シミュレーションが単一粒子の入射のみを仮定しているのに対し、実データには複数の粒子が近接して入射するパイルアップイベント（またはデルタ線生成など）が含まれることに起因すると考えられる。このシミュレーションの主目的であるセンサー応答の再現において、これらの稀な多重粒子イベントは主要な評価対象ではないため、高クラスタサイズ領域における不一致は、モデルの妥当性を損なうものではない。したがって、本シミュレーションにおいては再現の対象外とした。

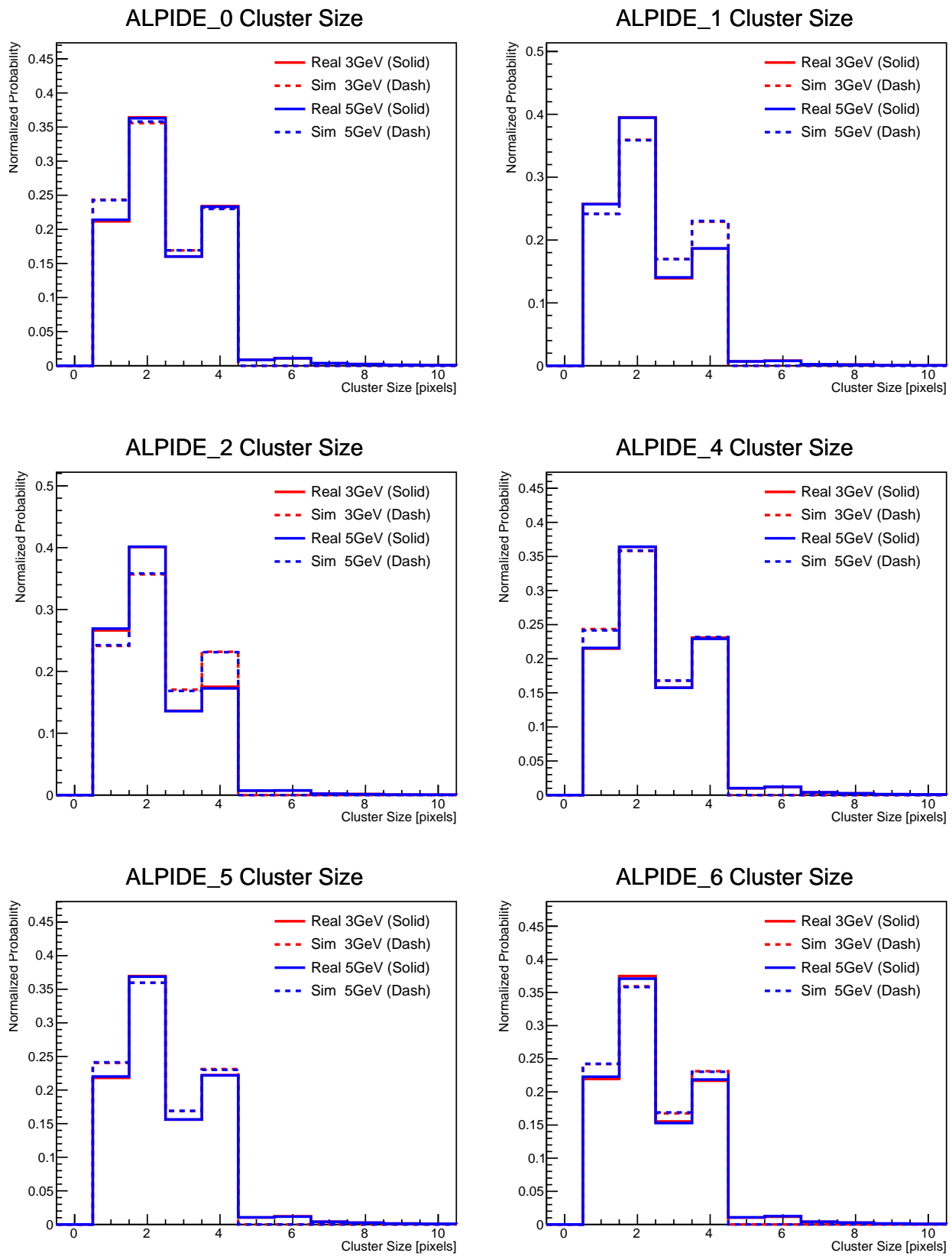


図 5.1: 実データ (赤) と simulation (青) のクラスターサイズの比較

### 5.3.2 クラスタ形状

ヒット位置の再構成にはクラスタの重心情報が用いられるため、サイズ分布だけでなく、クラスタ形状の整合性も重要となる。形状の差異は再構成位置の系統的なズレを引き起こし、シミュレーションの再現精度を低下させる要因となる。そのため、主要なクラスタサイズ（1～4 pixels）における形状パターンについて、実データとシミュレーションの比較を行った。図 5.2 は実データ、図 5.3 はシミュレーションにおいて確認されるクラスタ形状であり、これらはほぼ一致している。

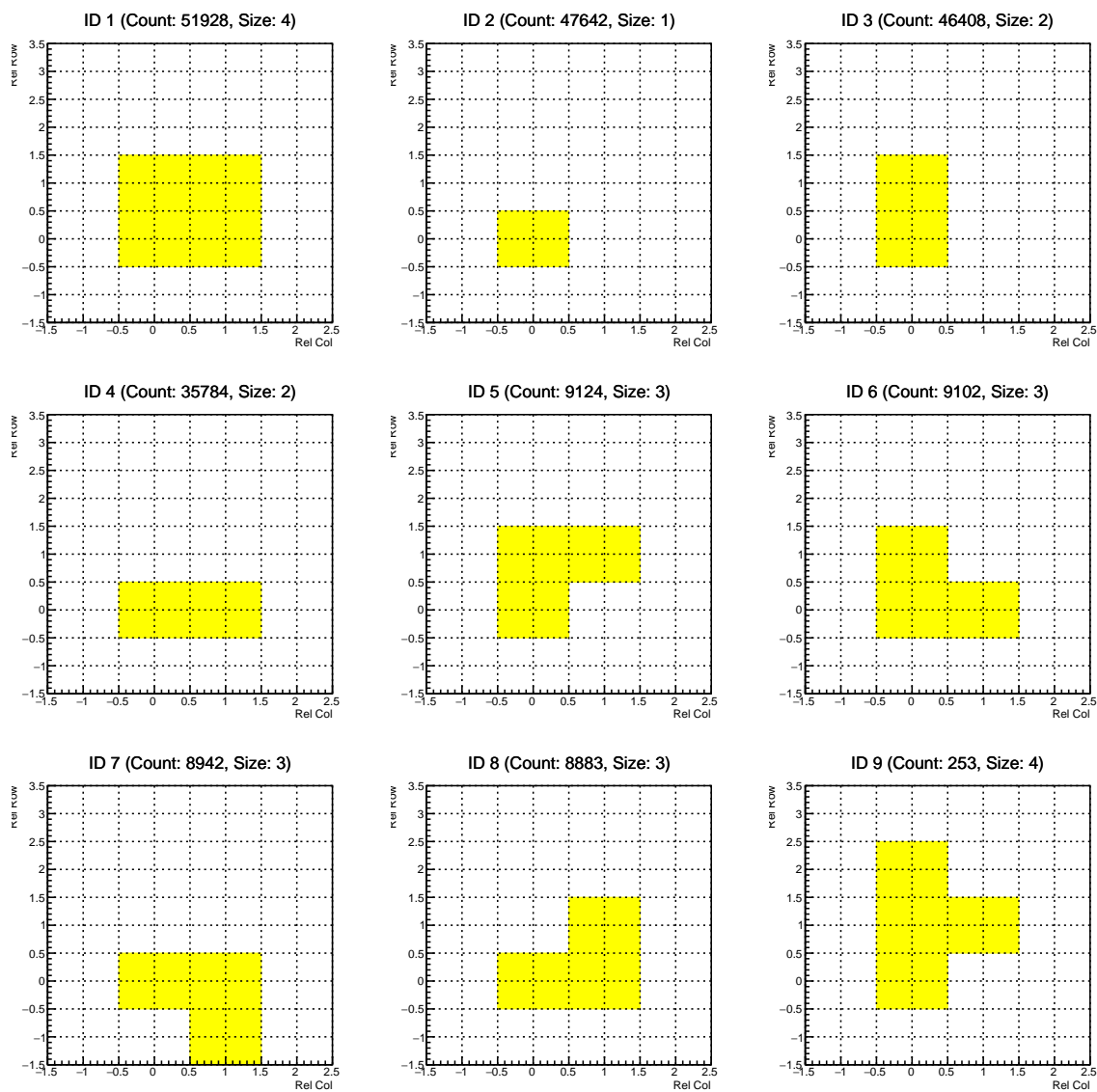


図 5.2: 実データでのクラスタ形状

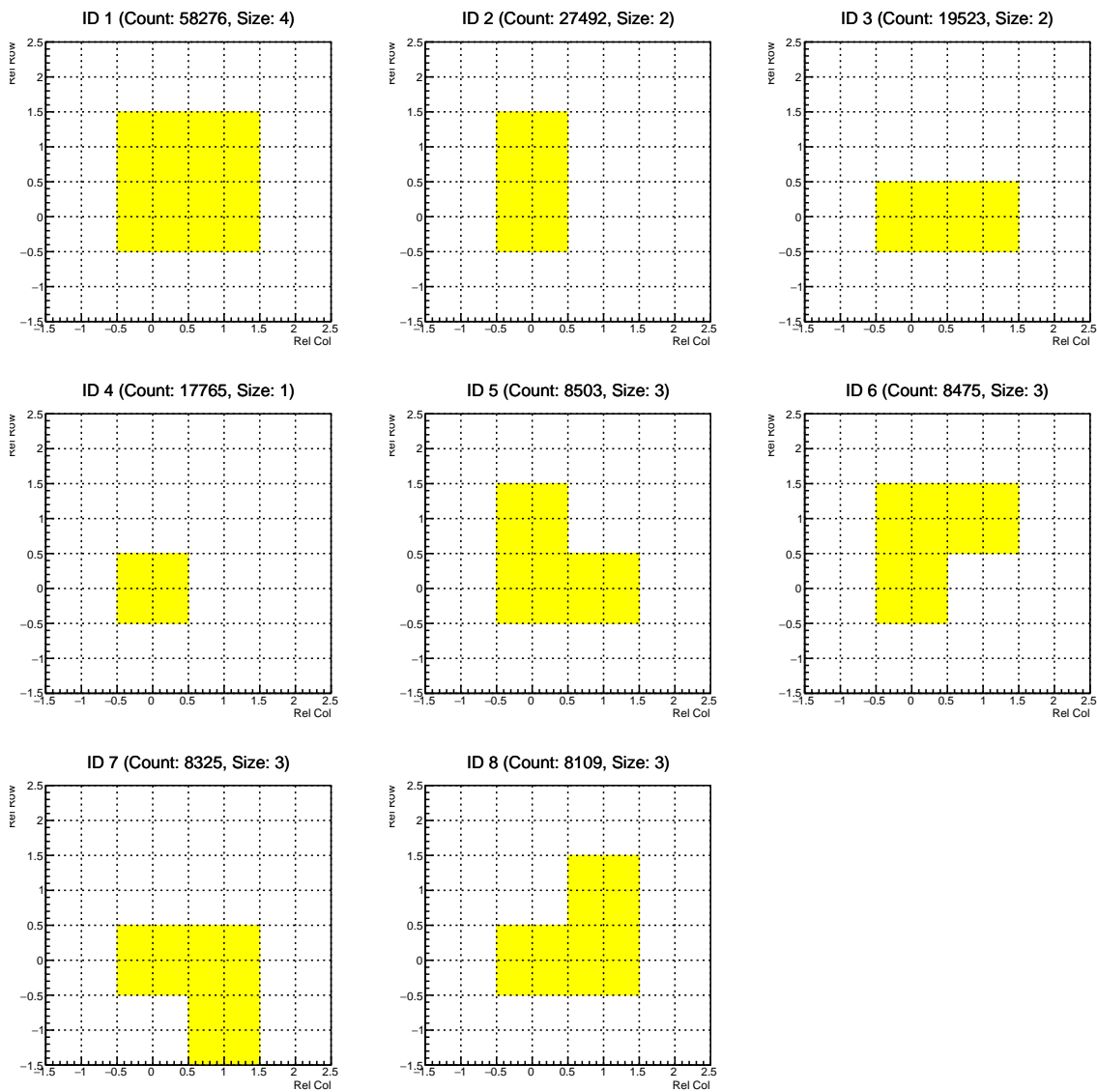


図 5.3: シミュレーションでのクラスター形状

シミュレーションでは seed 中心からの距離に対してクラスターサイズを決定している。またクラスターの形はヒットピクセル中心からの距離に対して neighbor を決定する。そのため、シミュレーションではクラスターサイズが 4 のものは正方形のもののみが生成される。実データではクラスターサイズが 4 の形状において、イベント数は少ないが、シミュレーションと異なるクラスター形状が確認された。

### 5.3.3 トラッキングにおけるイベントカットと検出効率

Geant4 によるシミュレーションデータ解析では、実データ解析との整合性を保つため、解析ソフトウェア Corryvreckan と同様のトラッキングアルゴリズムを採用した。具体的には、上流層のヒットからトラックシードを形成し、下流層へ外挿して空間的なサーチウィンドウ (Spatial Cut) 内にあるヒットを探索する。その後、各層の位置分解能  $\sigma_i$  を重みとした最小二乗法により、トラックパラメータ (傾き  $a$ 、切片  $b$ ) を決定する。ここで、ビーム軸方向を  $z$  とした際の粒子軌跡  $x(z) = az + b$  に対する  $\chi^2$  を式 (5.1) のように定義する。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_i - (az_i + b)}{\sigma_i} \right)^2, \quad \frac{\partial \chi^2}{\partial a} = \frac{\partial \chi^2}{\partial b} = 0 \quad (5.1)$$

上式を満たすパラメータ  $a, b$  を解析的に求め、得られたトラックの適合度 ( $\chi^2/\text{ndf}$ ) が基準を満たさない場合は、残差が最大のヒットを除外して再フィットを行うことで最適なトラックを選定する。

このロジックの妥当性を検証するため、実データ解析と同様に空間探索範囲 (Spatial Cut) を変化させた際のトラック採用率を評価した (図 5.4)。

その結果、実データ (図 4.1) と同様に  $20 \mu\text{m}$  付近で検出効率の急激な低下が確認され、シミュレーションと実データにおけるトラッキング挙動が高い精度で一致していることが示された。

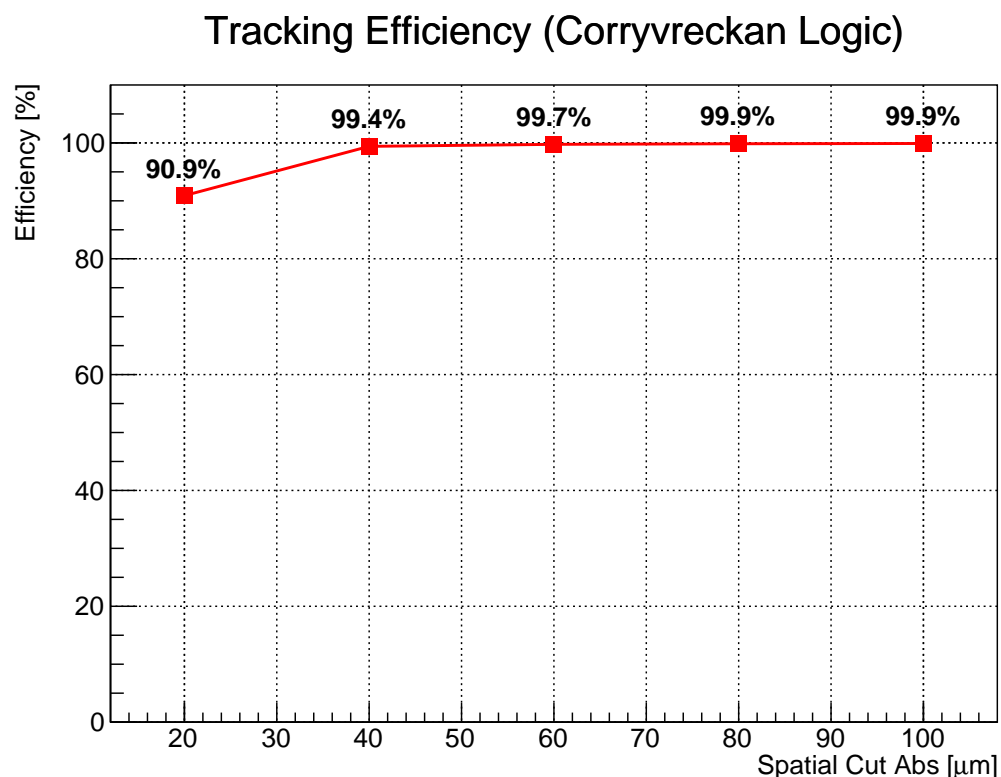


図 5.4: 空間におけるサーチウィンドウの値と検出効率 (シミュレーション)

## 5.3.4 residual

実データとシミュレーションにおける多重散乱の影響を比較するためのデータとして各層での residual を採用した。表 5.1 は 3GeV,5GeV における residual をガウスフィットをした際の各層の  $1\sigma$  をまとめたものであり、図 5.5 は実データとシミュレーションの residual 分布幅 ( $1\sigma$ ) を縦軸、各検出器の位置を横軸としたグラフである。グラフ内では 3GeV、5GeV でのデータを重ね合わせており、点線が実データ、実線がシミュレーションである。分布の様子は実データとシミュレーションで一致しており、 $1\sigma$  値では  $1\mu\text{m}$  程度での一致が確認された。この結果から実データとシミュレーションでのトラックの分解能はよく再現していると言える。またトラックの分解能は実データの方が良好であった。

表 5.1: 各 RP における Residual 値 ( $1\sigma$ ) のエネルギー比較 (実データ / Sim)

ID	Residual X [ $\mu\text{m}$ ] (Real / Sim)		Residual Y [ $\mu\text{m}$ ] (Real / Sim)	
	3 GeV	5 GeV	3 GeV	5 GeV
RP_0	4.59 / 4.80	3.81 / 4.29	4.42 / 4.61	3.64 / 4.14
RP_1	3.89 / 4.52	3.79 / 4.42	3.68 / 4.38	3.54 / 4.35
RP_2	5.04 / 5.46	4.40 / 5.15	4.76 / 5.27	4.13 / 4.92
RP_4	5.06 / 5.50	4.40 / 5.14	4.88 / 5.32	4.19 / 4.91
RP_5	3.90 / 4.53	3.73 / 4.41	3.78 / 4.41	3.61 / 4.32
RP_6	4.70 / 4.81	3.86 / 4.31	4.61 / 4.62	3.71 / 4.11

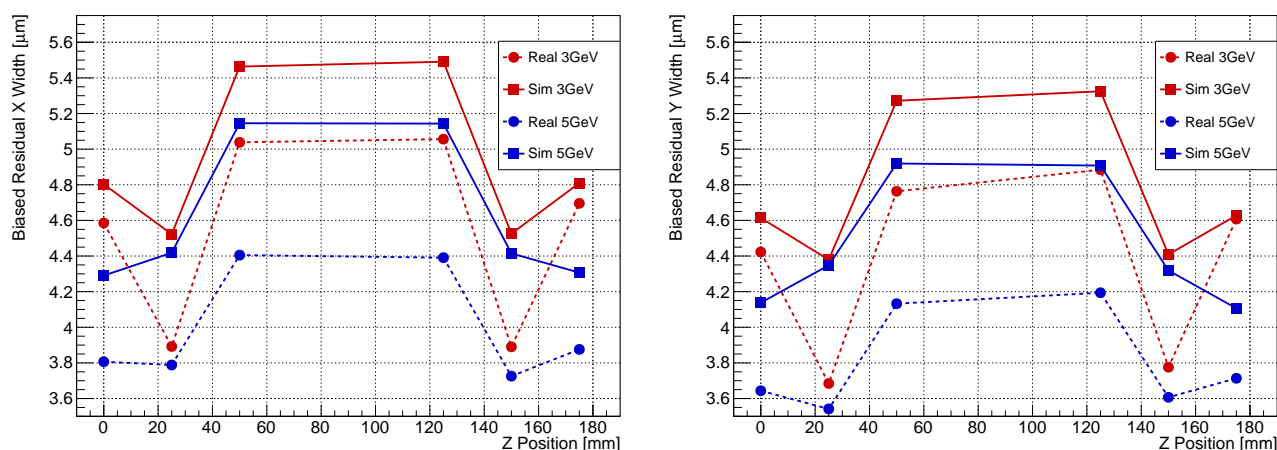


図 5.5: 実データとシミュレーションにおける Residual 分布の  $1\sigma$  値の比較 (左図: X 成分、右図: Y 成分) 横軸は各検出器の Z 座標であり、3GeV、5GeV ともに実データとシミュレーションは最大で  $1\mu\text{m}$  の差で、概ね一致している。

次に解析上で各層の任意の1つを評価対象センサー（DUT）とし、DUTを除き5層のみでトラックを行った場合のDUTとのresidualを取得した。このresidualは6層におけるトラックと比較して、1層分物質質量が少ない状態でトラックを行う。そのためDUTとして設定したセンサーの物質質量の差による飛跡の再構成精度を、実データとシミュレーションで比較することができる。図5.6はDUTを設定した場合の横軸をDUTとして設定した検出器の位置、縦軸をresidual分布から取得した $1\sigma$ の値としたグラフである。この値において実データとシミュレーションは6層でのトラックによるresidual同様、 $1\mu\text{m}$ 程度での一致が確認された。これは物質質量の変化に対しても、シミュレーションの再現性が実データとよく一致していると言える。この評価結果から、評価対象センサー（CE65など）を実験系に加え、系全体の物質質量が増加した場合でも、 $1\mu\text{m}$ 程度の精度でトラックの分解能が見積もれることが期待される。

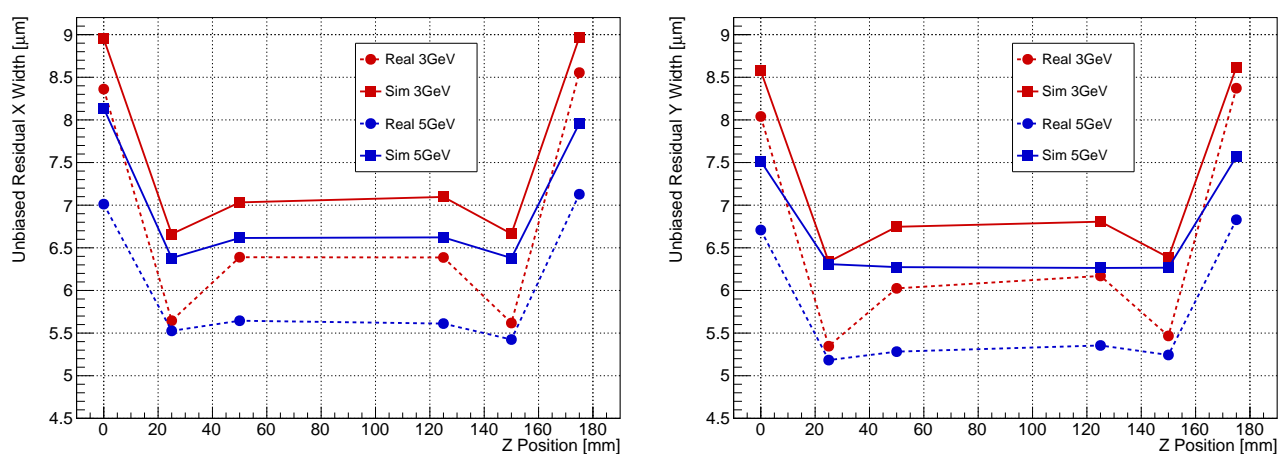


図 5.6: X 座標および Y 座標における任意の層を DUT とした場合の、5 層でトラックを再構成した場合の residual (左: X 成分、右: Y 成分) 3GeV と 5GeV の比較結果を示しており、residual の  $1\sigma$  値はこの場合でも実データの方が良好であった。

## 第6章

# 結論と展望

### 6.1 結論

本研究では、飛跡検出器系における多重散乱の影響を評価した。データ解析においては、アライメントおよびビームプロファイルの取得を通じてデータの健全性を確認し、これらをシミュレーションに反映させた。また、異なるビームエネルギーでの実データ比較により、多重散乱の影響を定量的に明らかにした。シミュレーションでは、実験環境の物質質量とセンサー構造を詳細に再現することで、実データと  $1, \mu\text{m}$  の値での一致を確認した。特に、任意の層を DUT (被測定器) とした解析において、5層を用いた飛跡分解能が実データとシミュレーションで良く一致したことは、物質質量が変化する環境下でも本シミュレーションが実データを十分に再現可能であることを示している。residualに見られる微小な乖離については、Alignmentの誤差やセンサー内部の電場構造に加え、センサーごとのクラスターサイズ分布のばらつきが支配的な要因であると考えられる。最終的に、実データの residual がシミュレーションと同等以上の精度を示したことから、本実験系における飛跡再構成は十分な信頼性を有していると結論付けられる。

この要因として実データにおけるアライメントの誤差とクラスターサイズ分布が考えられる。特にアライメントの誤差の影響により、センサーに対してビームの角度がシミュレーションで想定したよりも大きくつくことで、反応するピクセル数が増加し、ヒット位置の検出において精度の良い結果が出ると想定されるが、定量的な判明には至っていない。

### 6.2 展望

本研究の今後の展望として、構築したシミュレーションが、実際に物質質量を考慮した環境下である性能評価実験においてもトラック分解能を  $1, \mu\text{m}$  程度の精度で再現可能であるか、実測データを用いて定量的に検証する必要がある。具体的には、今後行うであろうビームテスト等で取得するデータと、本シミュレーションの結果を比較することで検証を行う。

また、現状の実データとシミュレーションにおけるトラック分解能の乖離は、実験データでの Alignment のズレによる原因以外に、クラスターサイズ分布の差異による影響も存在する。したがって、クラスター生成過程の再現性を評価するために、トラックの入射角度に対するクラスター形状の依存性について詳細な解析を行う。これらの解析を通じて実データとシミュレーションの差異の要因を特定し、より高精度な性能評価手法の確立を目指したい。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、終始多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました指導教員の山口頼人准教授に深く感謝いたします。山口先生には、研究の方向性から論文の細部に至るまで熱心にご指導いただきました。解析の論理性や研究に対する姿勢など、物理学研究において重要となる考え方を説いていただくとともに、様々な面から手厚いサポートをしていただきました。ここに心より御礼申し上げます。

日々の研究活動において、親身になって相談に乗ってくださった研究室の先輩方にも深く感謝いたします。修士課程2年の勝野永遠氏、和田滯太氏には、解析ソフトウェアの使用法から物理的な解釈に至るまで、有意義な知識を数多くご教授いただきました。時として優しく、時として厳しく、多くの議論を交わしていただいたことは、私にとってかけがえのない経験となりました。修士課程1年の寺元魁氏には、右も左も分からなかった私に対し、ソフトウェアの基礎から建設的な議論に至るまで、論文執筆の最後まで、根気強く丁寧にご指導いただきました。先輩方のご支援のおかげで、本研究を形にすることができました。

本研究室のスタッフの皆様にも多大なるご支援をいただきました。志垣賢太教授と八野哲助教には、定例ミーティングにおいて物理の本質を突く鋭いご指摘や、研究を多角的に捉えるための示唆に富むアドバイスをいただきました。議論を通じて学んだ研究者としての姿勢は、私にとって大きな指針となりました。本間謙輔准教授には、前期のラボエクササイズを通じて、実験物理学の基礎となる手法や論理的な思考プロセスをご教授いただきました。そこで培った経験は、本研究を遂行する上での揺るぎない土台となっております。三好隆博助教には、学部生ゼミにおいて原子核物理の基礎理論を丁寧にご指導いただき、物理学に対する知見を深める貴重な機会をいただきました。皆様に厚く御礼申し上げます。

本研究は、多くの共同研究者の協力のもとで遂行されました。実験の遂行にあたり多大なるご協力をいただきましたALICE-Jグループの皆様、ならびにデータ解析において連携させていただきました韓国チームの皆様に、この場を借りて深く感謝申し上げます。

最後に、大学生活を温かく支え、励まし続けてくれた家族と友人に心からの感謝を捧げます。

2026年2月

岩澤 舜脩

## 参考文献

- [1] CERN, "Updated schedule for CERN ITS3", <https://home.web.cern.ch/news/opinion/accelerators/updated-schedule-cerns-accelerators> (accessed 2026-01-16).
- [2] CERN, "LHC Schedule", <https://lhccommissioning.web.cern.ch/schedule/LHC-long-term.htm> (accessed 2026-02-09).
- [3] ALICE Collaboration, "Technical Design Report for the Upgrade of the ALICE Inner Tracking System", *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **41** (2014) 087002, (Updated for ITS3 in CERN-LHCC-2023-013).
- [4] The ALICE Collaboration, "Letter of Intent for ALICE 3: A next-generation heavy-ion experiment at the LHC", CERN-LHCC-2022-009, LHCC-I-038 (2022), <https://cds.cern.ch/record/2803563> (accessed 2026-01-15).
- [5] ALICE Collaboration, "ALICE 3 - Next-generation heavy-ion experiment", [https://alice-collaboration.web.cern.ch/menu\\_proj\\_items/ALICE-3](https://alice-collaboration.web.cern.ch/menu_proj_items/ALICE-3) (accessed 2026-01-16).
- [6] G. Aglieri Rinella (ALICE Collaboration), "The ALPIDE pixel sensor for the ALICE ITS upgrade", *Nucl. Instrum. Meth. A* **845** (2017) 583–587.
- [7] M. Munker et al., "Optimization of a 65 nm CMOS imaging process for monolithic CMOS sensors for high energy physics", *Nucl. Instrum. Meth. A* **1039** (2022) 166886.
- [8] KEK Inter-University Research Institute Corporation, "Test Beam Line at PF-AR", <https://itdc.kek.jp/testBeamLine/index.html> (accessed 2025-12-05).
- [9] R.L. Workman et al. (Particle Data Group), "Review of Particle Physics", *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022** (2022) 083C01, Sec. 34.3: Multiple scattering through small angles, <https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2023-rev-passage-particles-matter.pdf> (accessed 2026-1-18).
- [10] [https://www.quark.hiroshima-u.ac.jp/thesis/b202503\\_teramoto.pdf](https://www.quark.hiroshima-u.ac.jp/thesis/b202503_teramoto.pdf) (accessed 2025-12-01)