

2024年度 卒業論文

ALICE 3実験に向けた読出一体型65 nm-CMOS
ピクセルセンサー初期試作器の動作性能評価

2025年2月7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 B212964

氏名 寺元 魁

概要

CERN の LHC 加速器では、既存の ALICE 実験の後継として ALICE 3 実験が 2037 年に開始予定である。ALICE 3 実験では新型読出一体型ピクセルセンサー (MAPS) を全面的に導入し、その基礎開発を精力的に行っている。この新型 MAPS は最新の 65 nm-CMOS 技術を採用し、20 μm 程度の極小ピクセルサイズ、超薄型大面積センサーといった革新的特徴を実現する。

本研究では異なる内部電場を持つ初期試作 MAPS の動作性能評価を行った。この初期試作器の目的は新型 MAPS の信号応答確認及び、内部電場の差異による電荷収集能への影響を定量的に評価することである。そのために、実験セットアップを設計・製作し、KEK の PF-AR テストビームラインで電子ビームを用いた実験を行った。本研究では、内部電場構造の異なる 3 種類の初期試作器の動作性能を定量的に評価するために、実験セットアップの開発とビーム実験の実施、およびデータ解析を行った。データ解析では、まず飛跡再構成と実験セットアップの動作評価を行い、再構成した飛跡を用いて内部電場構造の違いが位置分解能やクラスターサイズ等の検出器動作性能にどう影響するかについて議論する。

目次

第 1 章	高エネルギー重イオン衝突実験	3
1.1	Quark Gluon Plasma	3
1.2	LHC	4
1.3	ALICE 実験計画	4
1.3.1	ALICE 実験アップグレード	4
1.4	研究目的	6
第 2 章	MAPS 検出器	7
2.1	半導体検出器	7
2.2	ALICE 実験における先駆的 MAPS 開発	8
2.3	MAPS プロトタイプ	8
2.3.1	チップタイプ	9
2.3.2	内部電場構造	10
第 3 章	ビーム実験	11
3.1	PF-AR テストビームライン	11
3.2	実験セットアップ開発	11
3.2.1	実験用ボックス	11
3.2.2	キャリアボードサポーター	12
3.3	実験セットアップ	13
3.3.1	ALPIDE	13
3.3.2	CE65	13
3.3.3	テレスコープ	14
3.3.4	Trigger Chain	15
3.3.5	DPTS トリガー	16
3.4	取得データ	16
第 4 章	データ解析	18
4.1	解析手法	18
4.1.1	クラスタリング	18
4.1.2	Pre-alignment	19
4.1.3	Alignment	19
4.1.4	DUT Association	19
4.2	評価項目	20
4.2.1	クラスターサイズ	20
4.2.2	RPs で再構成したトラックとの residual	20
4.2.3	検出効率	20

第 5 章	実験系動作評価と Alignment	21
5.1	ヒットマップ	21
5.2	ビームプロファイル	22
5.3	Pre-alignment	23
5.4	トラック再構成 と alignment	25
5.4.1	トラック再構成	25
5.5	DUT Association	26
第 6 章	CE65 動作性能評価	27
6.1	電荷分布と電荷閾値の決定	27
6.1.1	ノイズ分布	27
6.1.2	Associated pixel charge	29
6.1.3	検出効率	30
6.1.4	Neighbor charge 閾値の決定	31
6.2	Cluster charge 分布	32
6.3	クラスターサイズ	33
6.4	Residual 分布	34
6.4.1	STD と GAP の Residual 分布	34
6.4.2	BLK の Residual 分布	35
第 7 章	結論と今後の展望	37
7.1	結論	37
7.2	展望	37
付 録 A	Corryvreckan	40
A.1	モジュール	40
A.1.1	Metronome	40
A.1.2	ClusteringSpatial	40
A.1.3	Prealignment	41
A.1.4	Tracking4D	41
A.1.5	AlignmentMillipede	41
A.1.6	ClusteringAnalog	41
A.1.7	DUTAssociation	42
A.2	使用方法	42
A.2.1	geometry	42
A.2.2	config	43
付 録 B	ピクセル検出器の位置分解能	44

第1章 高エネルギー重イオン衝突実験

重イオン衝突実験とは、鉛 Pb や銅 Cu などの重イオンを加速器で光速付近まで加速して衝突させ、微小領域内に超高温高密度の物質相である Quark Gluon Plasma (QGP) を生成し、その性質やその後起こる QGP-ハドロン相転移に関連する物理事象を研究する実験である。本章では、重イオン衝突の概要と将来計画について論ずる。

1.1 Quark Gluon Plasma

QGP とは、ビッグバン直後の宇宙超初期の高温、高密度下において存在したと考えられている物質相である。現在、ジュネーブ郊外の欧州原子核研究機構 (CERN) の LHC 加速器 (Large Hadron Collider) での高エネルギー重イオン衝突実験を中心としてその性質の研究が進んでいる。

強い相互作用を記述する理論である量子色力学 (QCD) では、陽子や中性子などのハドロンを構成するクォークやグルーオンなどのパートンは強い相互作用によってハドロン内に閉じ込められており、単独で取り出すことはできない。しかし、加速器を用いて原子核をほぼ光速に近い速度で衝突させることによって、クォークやグルーオンが閉じ込めから解放された非常に高温な物質状態を実現できる。この状態を QGP と呼ぶ。ビッグバン直後の宇宙超初期においては、QGP 相から現在のハドロンが支配的な物質層への相転移が起こったとされており、QGP の研究は宇宙の物質進化の過程を明らかにする上で重要である。

重クォーク測定

QGP 内部の様子を研究する上で、重クォークは良いプローブである。QGP の数百 MeV という生成温度に対して、重クォークと呼ばれる c (1.2 GeV), b (4.2 GeV) クォークは質量が大きいため、高エネルギー重イオン衝突実験において、これらのクォークは重イオン初期衝突において稀にしか生成しない。また、一度生成した重クォークは、フレーバーの保存と低い粒子密度によって対消滅によって消える確率が非常に低い。すなわち、初期で生成した重クォークハドロンが長く残留する。以上の特徴に加えて、LHC の高エネルギー化に伴い、稀事象である重クォークハドロンの統計量が増加した。そのため、重クォークは QGP の初期状態を研究する上で非常に有用であるといえる。

重クォークハドロンの特徴は、その比較的長い寿命である。重クォークがより軽いクォークに崩壊する過程には、弱い相互作用が働く必要がある (弱崩壊)。弱崩壊の特徴は、他の相互作用と比べて非常に遅い崩壊過程を持つことである。典型的に数百 μm の $c\tau$ を有し、 b クォークを含む B^0 中間子などは約 $c\tau = 455 \mu\text{m}$ である。つまり、重クォークハドロンは、衝突点から離れた位置で崩壊する。この特徴を利用し、崩壊生成物の飛跡の測定によって二次崩壊点を特定することによって粒子識別を行うため、高精度の飛跡再構成を行うことが必須である。

1.2 LHC

LHC とは、Geneva 近郊にある CERN における世界最大エネルギーの衝突型加速器である。敷地内の地下 100 m に周長 27 km に渡る巨大なリング上のトンネルが設置されており、その中に LHC 加速器が設置されている。時計回りと反時計回りに加速された粒子が 6 つの実験施設において衝突するようになっている。

加速器の運転期間の間には、Long Shutdown と呼ばれる保守開発のための長期運転休止期間が存在し、この期間中に検出器群や加速器のアップグレードが行われる。2025 年 2 月現在は第 3 期運転が進行中である。以下に 2024 年 9 月時点での LHC の運転計画を示す。

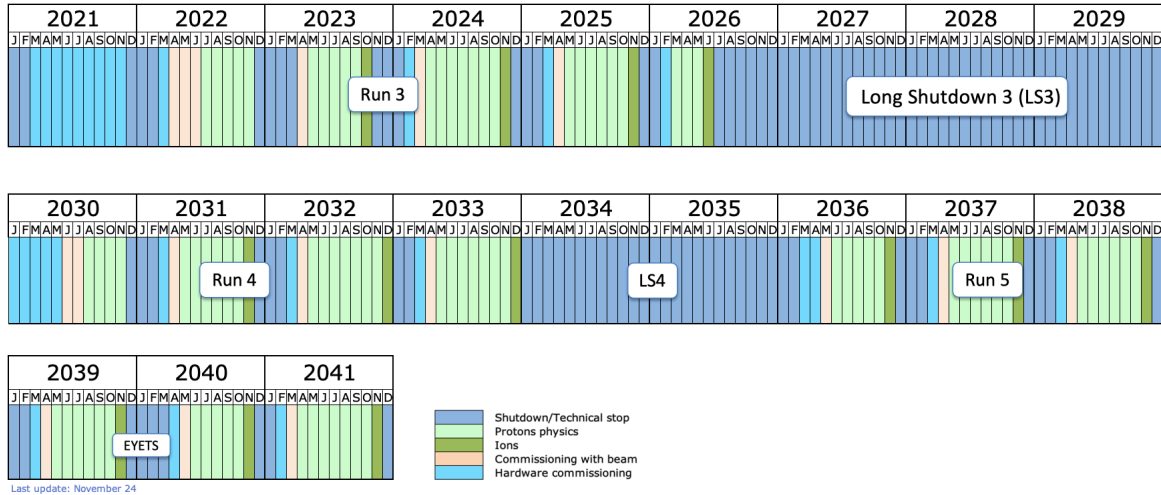


図 1.1: LHC の運転計画 (2024 年 9 月時点)。LS は長期運転休止期間，Run i は第 i 期運転の意味 [1]。

1.3 ALICE 実験計画

ALICE 実験 (A Large Ion Collider Experiment) では重イオン衝突によって生成する QGP の研究を行っている。検出器も QGP 研究に主眼を置いたものとなっており、衝突により生成されるハドロンやレプトンを低運動量から精密に測定できるように設計されている。検出器群は大きく 3 つのグループに分類することができ、中央領域を覆うセントラルバレルと、前方領域で崩壊ミュー粒子を検出するミュオン検出器群、衝突そのものの事象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トラッキングを目的とした飛跡検出器がある。

重クォークハドロン測定では、二次崩壊点の決定のために精密な飛跡再構成を行うことが重要だが、ALICE 実験では高粒子多重度下での測定になるため、より精密な粒子測定が必要である。重クォークハドロン測定やカイラル対称性の回復等の重要な物理目標を達成するために、ALICE 実験グループでは最先端技術を用いた検出器開発を精力的に進めている。次節では、ALICE 次期計画における飛跡検出器アップグレードについて論ずる。

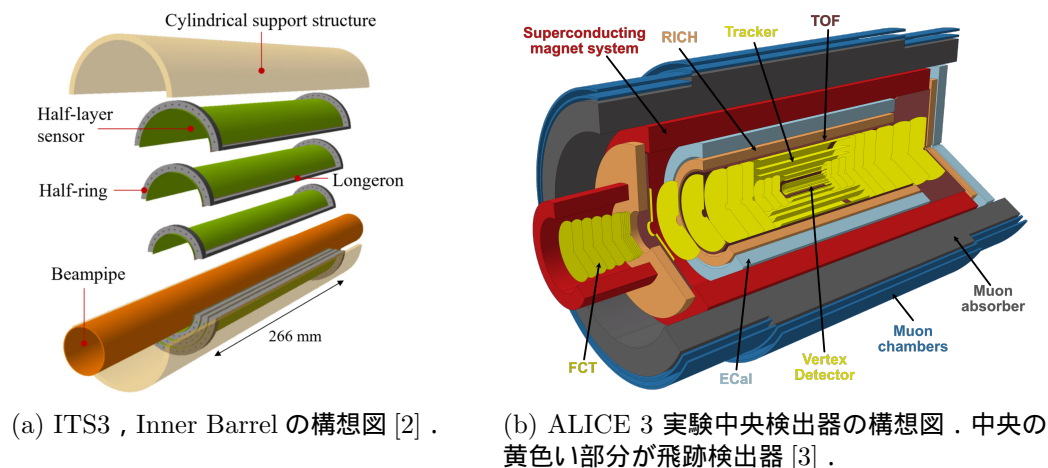
1.3.1 ALICE 実験アップグレード

【ITS3】

中央領域に設置されているセントラルバレルの最内層には飛跡検出器である Inner Tracking System (ITS) がある。2022 年に開始した LHC 第 3 期運転で使用されている 2 世代目 ITS (ITS2) は 180 nm-CMOS 技術を採用したピクセル型シリコンセンサーで構成されており、ビームパイプ

に近い 3 層を Inner Barrel (IB), 残りの 4 層を Outer Barrel (OB) と呼ぶ。ITS2 では, 7 層のシリコンの通過点を測定することにより生成荷電粒子の飛跡を再構成し, 衝突点を決定する。

2030 年開始予定の LHC 第 4 期運転にむけて, 2026 年開始予定の第 3 期長期運転休止期間中に ITS のアップグレードが計画されている。図 1.2a に第 3 世代 ITS (ITS3) の IB の構想図を示した。ITS3 では IB のセンサーに 65 nm-CMOS 技術を採用した新型のシリコンピクセルセンサーを使用する。このセンサーは大面積かつ曲げ可能であり, 図中の緑 (Half-layer sensor) の部分のように, 大きな 1 枚のセンサーを曲げて半円筒形にしてビームパイプを覆う。これにより衝突点により近接できるようになり, 衝突点の測定精度が向上する。



(a) ITS3, Inner Barrel の構想図 [2] .

(b) ALICE 3 実験中央検出器の構想図。中央の黄色い部分が飛跡検出器 [3] .

図 1.2: ALICE 実験次期計画における検出器

【ALICE 3 実験】

2037 年開始予定の LHC 第 5 期運転では, 新たに ALICE 3 実験が開始する。図 1.2b に ALICE 3 実験の検出器の構想図を示す。ALICE 3 実験では Outer Tracker (OT) と Inner Tracker (IT) で構成される 11 層のセンサーを 65 nm-CMOS 技術を採用した新型シリコン検出器で構成する。ALICE 3 実験の飛跡検出器は IB と OB で動径方向 $0.5 \text{ cm} < R < 80 \text{ cm}$, ビーム軸方向 $|z| < 4 \text{ m}$ をカバーする。約 60 m^2 , ピクセル数にして 200 億を超える面積のピクセルセンサーを実現する。表 1.1 には, Run3 以降の飛跡検出器アップグレード内容をまとめた。

表 1.1: ITS2 から ITS3, ALICE 3 へのアップグレード [4] .

parameter	ITS2	ITS3	ALICE 3
CMOS technology	180nm	65nm	65nm
number of layers	7	7	11
pixel pitch of sensor	$29 \mu\text{m}$	$22 \mu\text{m}$ (IB) $29 \mu\text{m}$ (OB)	$10 \mu\text{m}$ (IT) $50 \mu\text{m}$ (OT)
$X/X_0(L_0)$	0.35%	0.09%	0.1%

1.4 研究目的

高エネルギー重イオン衝突を用いた QGP 研究において、重クォークを含むハドロンは衝突初期の状態を探る良いプローブである。衝突のエネルギー増大に伴い重クォークの生成量は増加したものの、他の軽いハドロンに比べるとその生成は稀な事象であり、高粒子多重度下での測定にはより精密な飛跡再構成による 2 次崩壊点の同定が必要である。ALICE 実験次期計画に向けて曲げ可能な CMOS センサーにおける最先端の技術ノードを採用した新型 MAPS の開発が進行しているが、動作性能については未だに測定段階であり、デザインパラメータの最適化には、定性的洞察と測定結果を結びつけ、定量的理解に繋げることが重要である。本研究では、ALICE 3 実験の Outer Tracker 開発に向けた研究の初期段階として、センサーの内部電場構造の変化がクラスターサイズや位置分解能等の動作性能に与える影響の検証を行うことを目的として、電子ビームを用いた実験によるデータ収集と解析を行った。

第2章 MAPS 検出器

Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS) は CMOS 技術を応用した読出一体型ピクセルシリコン検出器であり、ITS3 や ALICE 3 実験のセンサーとして使用する。超薄型、高集積等の特徴を持ち、原子核実験分野のみならず宇宙線、素粒子実験における有望な技術として ALICE 実験グループが中心となって開発を進めている。180 nm-CMOS 技術を用いたシリコン検出器である ALPIDE (ALice PImage DETector) は、2020 年開始の ALICE 2 実験の飛跡検出器として使用された。ALICE 3 実験で用いる新型 MAPS では、65 nm-CMOS 技術により、同様のプロセスでより高集積なピクセルの実装を可能にする。新型 MAPS の設計決定のために、ピクセルピッチや電場構造などのパラメータを改良した試作チップを用いた性能評価を進めており、本研究ではその中でも初期試作器を取り扱う。

2.1 半導体検出器

半導体とはバンドギャップが存在するものの、比較的低い励起エネルギーによって電子が伝導帯に遷移する物質であり、Si や Ge などが代表的である。シリコンの場合、最外殻電子 4 つが共有結合することによって結晶を構成するが、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。シリコンの一部を 5 価のリンなどで置換して電子をドープしたものを n 型半導体、ホウ素などの 3 価原子で置換してホールをドープしたものを p 型半導体という。n 型半導体と p 型半導体を接合 (pn 接合という)

して、逆バイアス電圧 (n 型半導体に正極を接続する) を印加することによって、各半導体のキャリアが互いに逆方向に移動してその間にキャリアの存在しない空乏層を生じる。

半導体検出器の検出原理となる相互作用は電離相互作用であり、空乏層内での電離が重要である。図 2.1 のように放射線が物質中を通過する際に、軌道中の電子をはじき出して正負の電荷ペアを生じる。半導体の場合、正電荷はホールキャリアとして働く。前述のシリコン半導体の空乏層内に放射線が侵入し、電離相互作用によって電子-正孔対を生じる。この電離に必要な平均のエネルギーは 3.65 eV である。発生した電荷は空乏層内の電場によって電極に集められ、押し出された電荷を収集することで、電気信号として取り出すことができる。

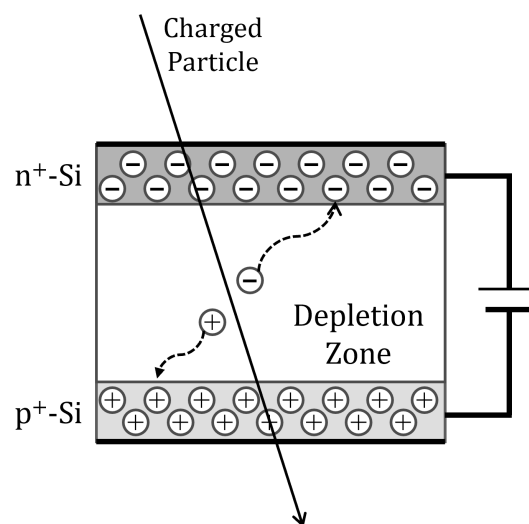


図 2.1: Si 検出器の基本原則

Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) は、トランジスタの一つである Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET) の n チャンネル (nMOSFET) と p チャンネル (pMOSFET) を組み合わせて作られる半導体回路であり、CPU のインバーターやデジタルカメラのイメージセンサーとして用いられる。

2.2 ALICE 実験における先駆的 MAPS 開発

LHC 第 4 期運転以降で用いられる ALICE 検出器の新型 MAPS は、読出一体、超薄型、高集積という特性に加えて、大面積センサー製作技術による曲げ可能検出器という先進的特徴を持つ。これらの特徴は以下の点において、重イオン衝突実験において非常に有用である。

読出一体型、超薄型

読出部とセンサー部が一体であるため、接続部分に空間を作る必要がなく、 $50\ \mu\text{m}$ 以下という超薄型センサーを実装することができる。また、センサー部と読出部の距離が近いこと、信号損失が少なくなる。さらに、物質低減によってエネルギー損失や散乱の影響を最小限に抑えることが可能になる。超薄型センサーの実装は最先端の微細加工技術によって実現しており、後述の曲げ可能という特性の実現に必須の技術である。

高集積、高放射線耐性

半導体集積回路は微細加工技術の発達により、検出器のピクセルを小型化が実現する。より小さな単位で高密度にピクセルを配置することができるため位置分解能が向上する。MAPS のピクセルピッチは $10\ \mu\text{m}$ のオーダーであり、典型的に数 μm の位置分解能を持つ。さらに、ピクセルの小型化によって、放射線損傷の最小面積が小さくなり放射線耐性も向上する。

低コスト、曲げ可能センサー

65 nm-CMOS 技術は半導体集積回路の技術としては既に成熟したプロセスノードとして広範に使用されており、大量生産におけるコストパフォーマンスに優れることも特徴である。また、65 nm-CMOS は大面積かつ超薄型という性質を両立する技術における最先端の最小プロセスサイズであり、この特性によって曲げることのできるセンサーを実現する。曲げ可能という特性によってビームパイプを円筒形に覆う形状を固定具を用いずに作れるため、多層かつ低物質量の検出器を構成できる。また、平坦な検出器では物理的制約のあった領域まで検出器を衝突点に近づけることが可能となるため、粒子飛跡をより高い精度で測定できるようになる。

ALICE 実験グループでは次世代の QGP 研究に向けて上記の特性をもつ新型の MAPS 開発を進めている。曲げ可能なセンサーにおける最先端の CMOS プロセスを扱うこの取り組みは、LHC の実験グループにおいて先駆的であるだけでなく、他の実験にも応用可能な先進的技術である。

2.3 MAPS プロトタイプ

本研究では、65 nm-CMOS プロセスを用いた MAPS 初期試作器を評価対象とする。初期モデルの開発目的は、この MAPS が正常に動作するかを確認し、表 2.1 で示したパラメータを変化させた際にどのような影響が現れるかを精査することである。チップごとに異なるデザインパラメータ (内部電場構造、ピクセル配置、ピクセルサイズ) が様々な組み合わせで割り振られており、これらの差による動作性能への影響を調べる。

表 2.1: 試作チップのパラメータ

parameter	option
内部電場構造構造	standard (STD), modified (BLK), modified with gap (GAP)
ピクセル配置	SQ (SQuare) 配置, HSQ (Hexagonal SQuare) 配置
ピクセルサイズ	10 μm , 15 μm , 22.5 μm

SQ 配置ではピクセルを格子状に並べるが, HSQ 配置では 1 ピクセルの周囲を 6 つのピクセルが六角形状に囲うように配置する. 残りのパラメータについては後述する.

2.3.1 チップタイプ

65 nm-CMOS プロセスにおける MAPS の特性評価のために初期試験器として 3 種類のチップが開発された (図 2.2). チップごとに読み出し方式やピクセルマトリクス的大小が異なる.

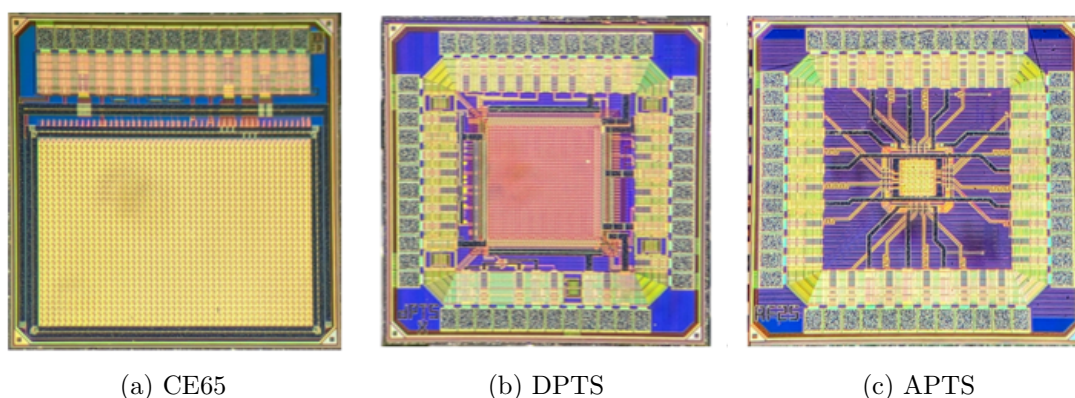


図 2.2: テストチップの写真. チップサイズは規格化している.

CE65

Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien (IPHC) によって開発された CE65 (circuit exploratoire 65 nm) は 65 nm CMOS 技術を用いた新型 MAPS のローリングシャッター読み出し方式¹における電荷収集特性を試験するためのテストチップである. サブストレートを GND にすることで回路部と電極の電圧差を小さくしている.

DPTS

DPTS (Digital Pixel Test Structure) は 32×32 個のピクセルを持つ 1.5 mm 四方のデジタル信号評価のためのテストチップであり, 有感領域の大きさは $0.48 \times 0.48 \text{ mm}^2$ である. 各ピクセルに増幅器と discriminator があり, デジタル変換された信号を読み出す. 本研究では, CE65 とほぼ同じ大きさの有感領域を持つため, イベントトリガーとして使用する.

APTS

APTS (Analog Pixel Test Structure) はアナログ信号特性評価のためのテストチップである. 中央 4×4 個の直接アナログ読み出しが可能である.

¹行, あるいは列ごとに順次読み出しを行う読み出し方式

表 2.2: 各チップタイプのパラメータ一覧

parameter	CE65	DPTS	APTS
ピクセルピッチ	15, 18, 22.5 μm	15 μm	10, 15, 20, 25 μm
マトリクス	48 \times 24	32 \times 32	6 \times 6
読出方式	ローリングシャッター	非同期デジタル読出	直接アナログ読出

電荷共有

電離によって生じたキャリアは隣のピクセルに移動することも可能であり、これを電荷共有という。電荷共有によって隣接したピクセルもヒットするため、これらのヒットをまとめてクラスターと呼ぶ。電荷共有度（電荷共有のしやすさ）は内部に電場が加わることで変化する。

2.3.2 内部電場構造

MAPS 試作器には 3 種類の異なる内部電場構造を持つチップがある。図 2.3 は MAPS 試作器の構造を示し、左から Standard (STD) ・ Blanket (BLK) ・ Gap (GAP) である。本論文では、以降チップを略称 STD, BLK, GAP で記述する。

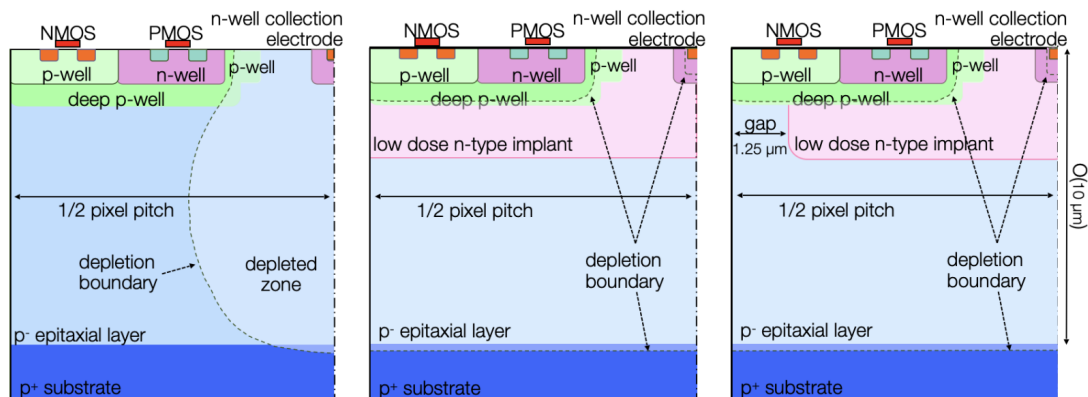


図 2.3: MAPS プロトタイプの構造別の断面図。左から, STD, BLK, GAP[5]。

STD

ITS2 のセンサーである ALPIDE に使用されている構造である。センサー部の電極周辺に風船状の空乏層を持つ。空乏層外では電荷は自由拡散によって移動するため、空乏層の外で発生した電荷の収集が遅い。一方で、電荷共有が起りやすいという特徴を持つ

BLK

基準となる STD のセンサー部に層状の n 型半導体をドーピングすることによって、センサー部全体を空乏化した改良版 (Modified) である。空乏層が広がったことにより STD よりも効率よく電荷収集が可能である。

GAP

BLK のように n 型半導体層でピクセルを覆うのではなく、n 型半導体層のピクセル間にギャップ (間隔) を設けたもの。ピクセル端に電場が生じ、この電場は電荷を集電電極に押し出す役割を果たす。これにより、電荷収集速度は速くなるが周囲のピクセルとの電荷共有は起こりづらくなる。

第3章 ビーム実験

本研究では、65 nm-CMOS 技術採用の新型 MAPS 初期試作器性能評価のために、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の PF-AR 測定器開発テストビームライン (以下、PF-AR テストビームライン) で、ビームに対するチップの応答を調べた。Device Under Test (DUT) として試作器である CE65 をビームに対して垂直に設置し、その前後に Reference Plane (RP) として性能が既知である ALPIDE チップを配置することで簡易的な飛跡検出器群 (テレスコープ) を構成する。テレスコープを用いることで、RP で再構成したビーム粒子のトラックと DUT の交点と DUT のヒット位置を比較できる。本章では、実験の概要と実験に向けたセットアップ開発について報告する。

3.1 PF-AR テストビームライン

KEK 内にある加速器 Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) からは 8 つのビームラインが伸びており、リング内を周回する電子から放射光を取り出して利用することができる。そのビームラインの一つに測定器開発用テストビームラインがあり、検出器の性能評価を行うことができる。

PF-AR から取り出された光子ビームは、銅を主成分としたワイヤーターゲットに衝突すると、電子陽電子対を生成してビームライン内の四重極磁石で収束された後に、双極子磁石で特定の運動量を持った電子ビームのみが選別されてテストエリアに射出される。ビームは PF-AR を周回する電子の運動量にもよるが、最大 5.5 GeV 程度まで運動量を上げることができ、2 ~ 3 GeV 付近でビームレートが最大となる。本研究ではテストビームラインのビームの運動量をビームレートが最大付近になる 3 GeV に固定し、後述の評価項目ごとに各 30000 イベントのデータを取得した。

3.2 実験セットアップ開発

本実験で用いる DUT とトリガーセンサーは有感領域が 1 mm 程度と非常に小さく、センサー同士の正確な alignment が求められる。センサーを単に置くだけでは正確な位置調整ができないため、実験に向けてセットアップの設計と開発を行った。

3.2.1 実験用ボックス

実験を行うにあたり、センサーをビーム軸上に設置するための台が必要である。また、ノイズ抑制のために遮光が必要である。この 2 つの基本的な要求を満たすために光学実験用ブレッドボードを備え付けたアルミ製の箱を作成した (図 3.1)。箱の大きさは DAQ ボードの大きさや作業環境のための余白等を考慮に入れて決定し、セットアップの設置及び調整を容易にするためにボックスには以下の設備を取り付けた。

光学用ブレッドボード

アルミ製のブレッドボード、孔と孔の間隔は各センサーを物理的制約の許す限界まで近づけるために 1 inch (= 2.54 mm) とした。後述の治具を取り付けるためのネジ孔とは別に、箱そのものを架台に固定し、セットアップを安定させるための位置決め孔も開けている。

黒色マイラ

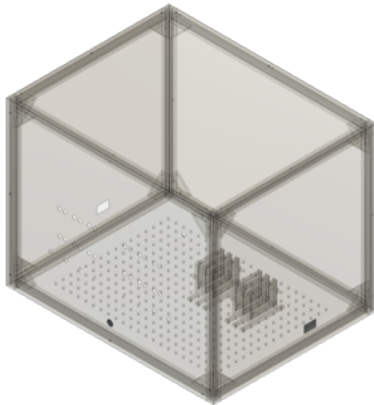
ビームの出入口には窓孔を開け，そこを黒色アルミナイズドマイラで閉じている．これにより遮光とビーム軸上の物質低減を図った．

ガス冷却

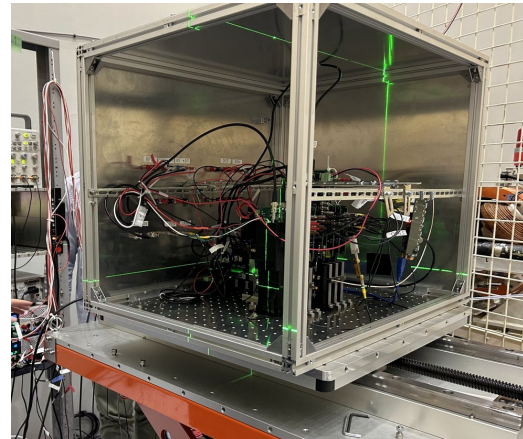
ビームテスト前に行ったラボテストにおいて，30 程度の環境下において，温度に依存した暗電流と考えられるピークが ADC 分布に見られた．本ビームテストでは，これを抑制するためにガス冷却を行った．ボックス内を 28 前後に維持することができ，ラボテストで確認された高温由来のノイズを抑制できた．

フィードスルー端子

箱の内外を接続する端子をボックスに取り付けた．ベース電圧印加用ケーブルを中継する LEMO 端子，DAQ ボードや USB ハブへの電源供給のためのバナナソケットの他，シンチレータ用の BNC ソケットも取り付けた．



(a) 設計段階の CAD 図面

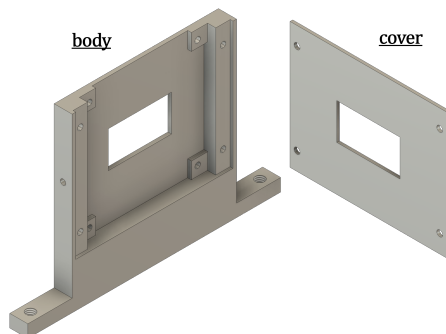


(b) 実際に実験で使用している様子

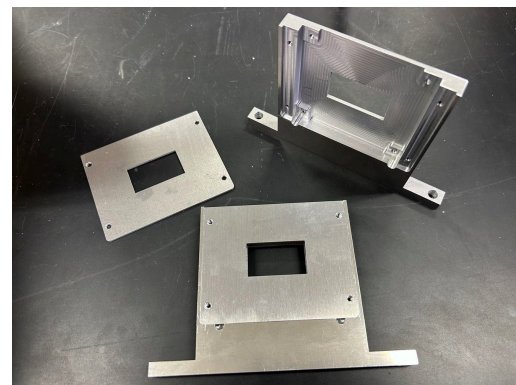
図 3.1: 実験用ボックス開発

3.2.2 キャリアボードサポーター

DUT と RPs をビームに垂直に並べるために，キャリアボードを固定するサポーターを作成した．図 3.2 は 3D-CAD の設計図と実際の写真である．



(a) 設計段階の CAD 図面



(b) 実際作成したもの

図 3.2: チップキャリアボードサポーター開発

3.3 実験セットアップ

3.3.1 ALPIDE

ALPIDE は 180 nm - CMOS 技術を用いた MAPS であり, 2022 年以降の ALICE 実験検出器の ITS で使用されている. チップサイズは $30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ($1024\text{ px} \times 512\text{ px}$) である. ALPIDE は 1 bit 読み出しであり, hit/no hit の情報を出力する. ALPIDE の基本性能を表 3.1 に示す. 各 RP にはキャリアボード上に固定した ALPIDE チップ (図 3.3) を 1 枚配置する. 内部構造は図 3.4 のようになっており, 前章で述べた STD のプロセスによって電荷を収集する. 成熟した技術ノードであり, 性能がよく知られているため, RP として用いる.

表 3.1: ALPIDE の基本性能 [6]

parameter	value
チップサイズ	$30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$
ピクセルピッチ	$29\text{ }\mu\text{m} \times 27\text{ }\mu\text{m}$
検出効率	$> 99\%$
Fake-hit rate	$\ll 1 \times 10^{-6}/\text{event}/\text{pixel}$
Power density	$40\text{ mW}/\text{cm}^2$



図 3.3: 本実験で用いた実際の ALPIDE チップ.

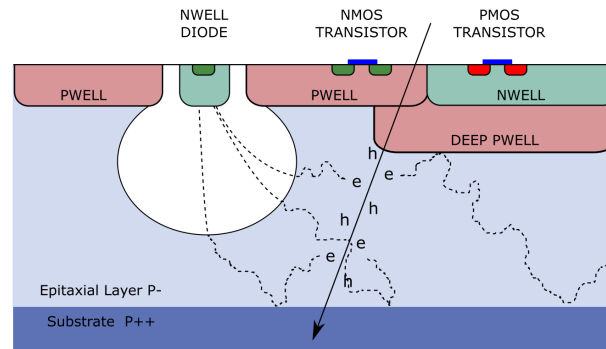


図 3.4: ALPIDE の構造. センサー部で電離相互作用によって発生した電子は自由拡散し, 空乏層に侵入すると, 空乏層内の電場によって電極に収集される [7].

3.3.2 CE65

本実験では, 評価対象として CE65 の初期試作器を用いる. 表 3.2 に本実験で用いる CE65 のデザインパラメータをまとめた. この表にまとめたパラメータが固定パラメータであり, 内部電場構造が異なる 3 つのチップ (STD, BLK, GAP) を比較する. CE65 はピクセルのヒット情報の他に, 収集した電荷量に対応する ADC の値を出力する.

表 3.2: 本実験で用いる CE65 の固定デザインパラメータ

parameter	value
ピクセルピッチ	22.5 μm
ピクセルマトリクス	48 \times 24
センサーサイズ	1080 μm \times 540 μm
ピクセル配置	SQ 配置

3.3.3 テレスコープ

飛跡検出器開発においてビームを用いた性能評価を行う際にテスト対象のセンサー (DUT) とトラック再構成の役割を担う Reference Planes (RPs) を並べた実験セットアップをテレスコープと呼ぶ。これは、RP を複数並べてレンズのように配置することで、トリガーとなる検出器を焦点としたビームの像が各 RP の hit map に投影されることに由来する。本研究では、CE65 の直後に DPTS をイベントトリガーとして配置し、その前後を 6 枚の ALPIDE で挟みこんでトラックの再構成を可能にする (図 3.5)。検出器同士は空気による散乱の影響を抑えるために物理的制約の許す限界程度まで近づけており、間隔は 1 inch (= 2.54 mm) である。また、参照用のトリガーとして 4 cm \times 8 cm のシンチレータをビーム最下流に配置している。このシンチレータでトリガーしたデータで RPs の alignment を行う。

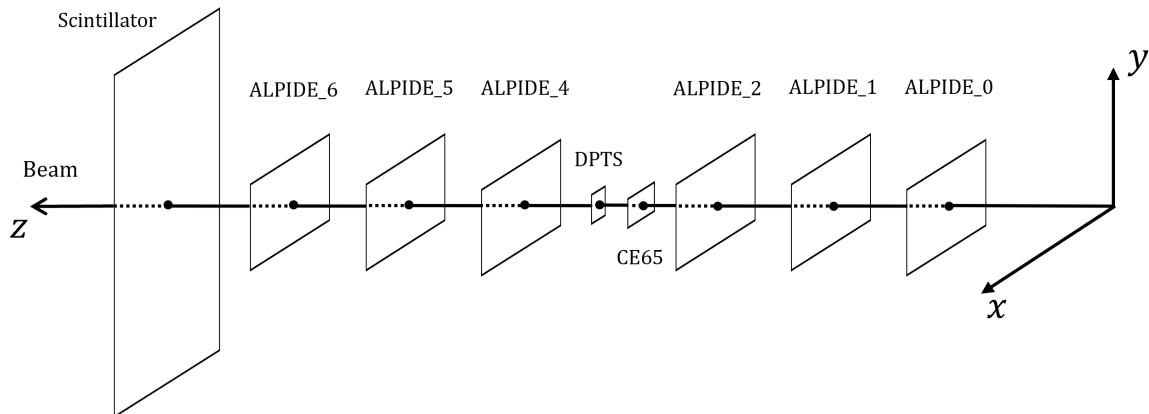
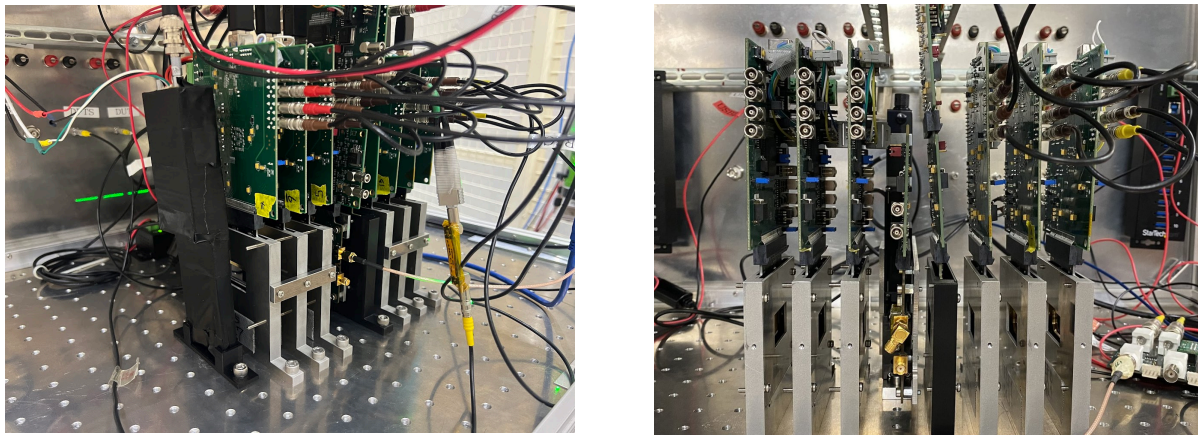


図 3.5: 実験セットアップの模式図。ビーム進行方向を z 軸正の向きとしたデカルト座標系でトラックの再構成を行う。RP である ALPIDE は最上流を 0 として通し番号がつけられ、CE65 が 3 番、その後の ALPIDE が 4 番、最下流の ALPIDE が RP 6 となる。

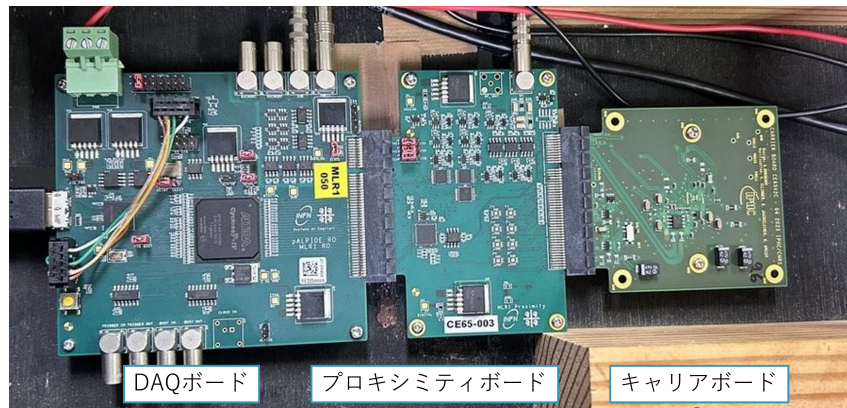
この実験セットアップを実験ボックスに取り付け、ビームラインに設置する。図 3.6 は実験セットアップの実際の写真である。左手前からシンチレータ、ALPIDE 6, ALPIDE 5, ALPIDE 4, DPTS, CE65, ALPIDE 2, ALPIDE 1, ALPIDE 0 の順番で並んでおり、右側がビーム上流方向である。また、図 3.7 に CE65 のセットアップを示す。ビームテストでは、キャリアボードをサポーターに固定してこのセットアップごと鉛直に立てて固定する。



(a) ビーム下流側視点

(b) 真横視点

図 3.6: 実験セットアップの実際の写真 .



DAQボード

プロキシミティボード

キャリアボード

図 3.7: CE65 の DAQ セットアップ

3.3.4 Trigger Chain

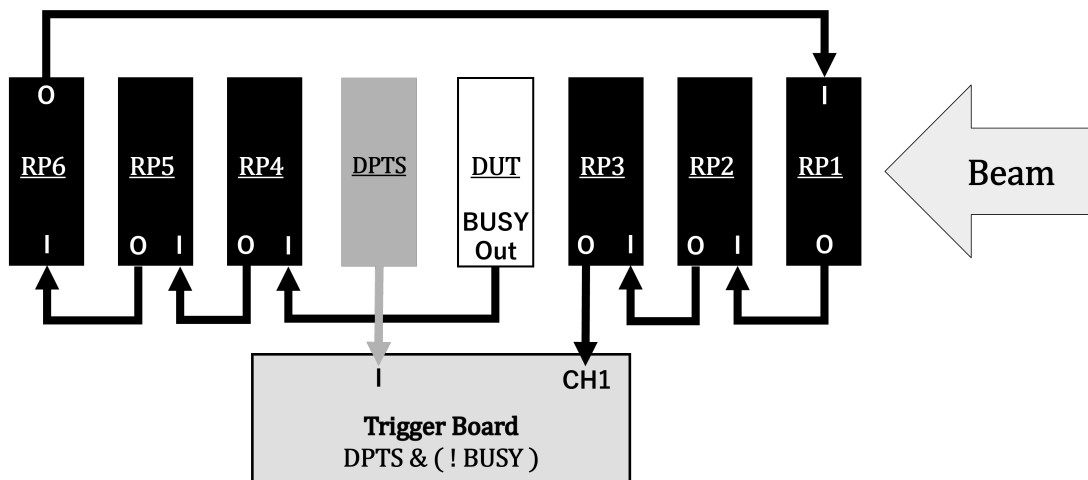


図 3.8: Trigger Chain の概要 . トリガー信号がテレスコープの検出器全体に引き渡されたあと論理判断が行われ, 読み出し指令が送られる .

本研究では、イベントトリガーとして CE65 と同様に MAPS プロトタイプである DPTS を使用する。図 3.8 は DPTS を用いたトリガーシステムの略図である。外付けのトリガーボードでは TRIG&!BUSY というロジックが組まれている。BUSY 信号が 1 (アイドル状態) の時にはトリガー信号を受け付けない。これにより、複数の処理がシステムを操作してリソースが競合することや、処理中の割り込みによるデータ破損等を防ぐ。

3.3.5 DPTS トリガー

DUT である CE65 の有感領域 $22.5 \mu\text{m} \times 48 \times 24 = 1.08 \text{ mm} \times 5.4 \text{ mm}$ に対して、トリガーとして使用する DPTS の有感領域は $15 \mu\text{m} \times 32 \times 32 = 4.8 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$ であり、テレスコープの DUT の位置における視野角は CE65 よりも若干大きくなる。したがって、トリガーの質を向上するには、DPTS と DUT の位置を正確に調整する必要がある。本実験では、DPTS を XY 軸方向に駆動可能なステッピングモーターに取付け、DPTS を動かすことでこれを達成した。具体的な調整手順と実際の様子 (図 3.9) を示す。

1. DPTS の位置を目視で大まかに合わせる。
2. ビームを照射し、1k 程度の triggered event を取得する
3. CE65 のヒットマップに DPTS の形の影が現れることを確認する。
4. 必要であれば遠隔でモーターを動かし、位置を調整する。

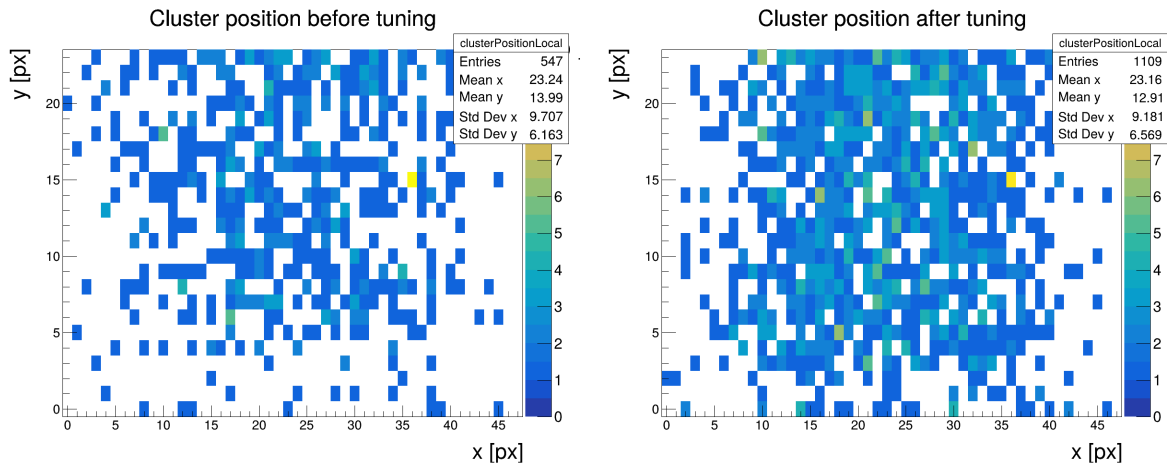


図 3.9: 左: 調整前, $5 \text{ px} \approx 0.1 \text{ mm}$ 程上部にずれている。右: DPTS を動かして DPTS の影が中心になるようにした

3.4 取得データ

以上のセットアップを用いて、2024 年 12 月 11 日から 12 月 16 日にかけて KEK の PF-AR 検出器開発用テストビームラインでビーム実験を行った。性能評価に用いるデータに加えて、ノイズ評価用、比較用のシンチレータトリガーによるデータを収集した (表 3.3)。チップタイプ 3 種とは別に、センサー基板に印加するベース電圧 V_B を 4 V, 7 V, 10 V に変化させてそれぞれデータを取得した。ノイズデータは、DPTS のヒット判定の閾値を下げることで、ビームがない状態でもトリガーできるようにした状態でデータ取得をした¹

¹ ビームや線源がない状態での測定をドライランと言う

表 3.3: 取得したデータセット

目的	Number of triggered events	trigger
動作性能評価	各 30k	DPTS
ノイズ評価	各 50 ~ 70k	DPTS
比較, RPs アライメント	各 600k	シンチレータ

BLK のデータに関しては, BLK の ADC が極端に縮小していたため測定が上手くできず, Fe55 線源を用いた測定においてもベース電圧依存性が見られなかった.

第4章 データ解析

4.1 解析手法

実験データ解析には、検出器評価実験における飛跡再構成と検出器性能評価のための汎用オフライン解析パッケージである Corryvreckan を用いる。Corryvreckan の使用法については付録に記載する。

【解析の手順】

1. トリガーに基づくイベント定義
2. DUT および各 RP のクラスタリング
3. クラスタ位置の Correlation 分布に基づく Pre-alignment
4. トラック再構成と alignment
5. DUT と Track の紐づけ (association)
6. DUT の解析

4.1.1 クラスタリング

クラスタリングとはヒットピクセルをまとめてクラスターを定義することである。クラスターは、一つのイベント中の同じピクセルに隣接するヒットをまとめたものである。クラスターの中心となるピクセルを seed と定義し、その周囲のヒットを neighbor と定義する。図 4.1 はクラスタリングの一例である。neighbor は SQ 配置の場合、同じ行または列にある seed と隣接するヒットである¹。クラスタリングでは、seed charge と neighbor charge に個別の閾値 (通常、seed threshold > neighbor threshold) を設けておき、まず seed の探索を行う。そして、seed に隣接する neighbor をクラスターとしてまとめていく。そのため、検出効率は seed threshold に大きく依存する。

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まとめる。一方、CE65 は電荷を ADC の値で読み出すため、seed と neighbor に個別に閾値を設定してクラスタリングを行う。

¹すなわち、seed と点で接しているヒットは neighbor ではない

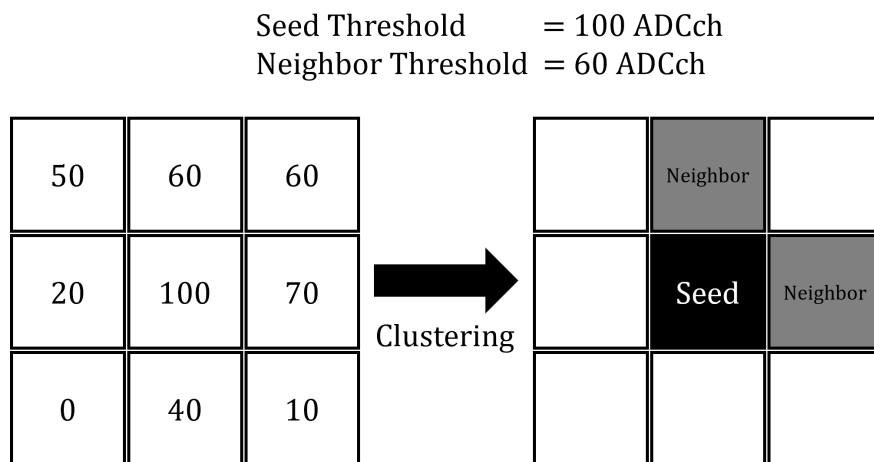


図 4.1: クラスタリングの一例．閾値を超えていたとしても斜めに隣接するヒットは neighbor としてカウントされない．

4.1.2 Pre-alignment

Pre-alignment は alignment の前に行う前段階処理であり，基準となる RP のヒットと各検出器のヒットの位置関係 (correlation) を用いて大まかに調整する．これにより，後述の alignment の convergence factor が正常に収束するようにする．Pre-alignment のソフトウェア上での処理は付録に記載する．本実験ではビーム形状の特異性から，correlation 分布を二つのガウス関数の重ね合わせとしてフィッティングし，そのピークを用いて Pre-alignment を行った．

4.1.3 Alignment

alignment では，Pre-alignment で求めた位置関係を元に，各検出器の位置と角度を調整する．ソフトウェア上での alignment 処理は付録に記載する．Pre-alignment との違いは，一度再構成したトラックを用いて，各検出器の位置を調整する点である．トラックに含むクラスターを探索する範囲の大きさ (サーチウィンドウ) を徐々に狭くしていくことで段階的に alignment を行う．

4.1.4 DUT Association

トラックと DUT のクラスターを紐づけることを association といい，このクラスターを associated cluster と呼ぶ．association される条件は 2 つあり，1 つはトラックと同じ triggered event 内に定義されたクラスターであること，2 つ目はトラックの DUT 通過点の周囲にクラスターが存在することである．

4.2 評価項目

本研究では、チップの構造依存性を調べる。チップの評価に使用されるパラメータには位置分解能、検出効率、クラスターサイズ等がある。本節では各評価項目についてまとめる。

4.2.1 クラスターサイズ

クラスターサイズは、一つのクラスターに含まれるピクセル数である。ALPIDE の場合、クラスターサイズは 1 から 5 の間に分布している。

4.2.2 RPs で再構成したトラックとの residual

ピクセル型半導体検出器は、入射粒子の位置を電荷量で重みづけしたピクセル重心計算によって求める。この再構成の精度を位置分解能と呼ぶ。重心計算による位置再構成は式 4.1 で表される。

$$x = \frac{\sum_i x_i Q_i}{\sum_i Q_i} \quad (4.1)$$

ここで、 x_i は i 番目のヒットピクセルの中心位置、 Q_i は i 番目のヒットピクセルにおける電荷量である。residual は、DUT のクラスター位置とトラックの通過点の差であり、residual 分布の σ が位置分解能の指標の 1 つとなる。

$$\text{residual} = x_i - x_{i;\text{track}} \quad (4.2)$$

ここで、 x_i は i 番目のイベントにおけるクラスター重心の位置、 $x_{i;\text{track}}$ は DUT とトラックの交点である。また、位置分解能の期待値 σ_{pos} はピクセルピッチ l_{pix} に対して、

$$\sigma_{\text{pos}} = \frac{l_{\text{pix}}}{\sqrt{12}} \quad (4.3)$$

で与えられる。本研究で用いた CE65 のピクセルピッチは $22.5 \mu\text{m}$ なのでこれを $\sqrt{12}$ で割ることで、位置分解能期待値約 $6.5 \mu\text{m}$ を得る。この式の導出については付録 B に記載する。

4.2.3 検出効率

検出効率は、RPs で再構成したトラックであって DUT を通過するものの内、DUT のクラスターと紐づけられるトラックの本数の割合で定義される。検出効率は、DUT のクラスタリングに用いる閾値の値と、トラックの精度、associated cluster の探索範囲等に依存する。

$$\text{Detection Efficiency} = \frac{N_{\text{assoc_trk}}}{N_{\text{trk_dut}}} \quad (4.4)$$

ここで、 $N_{\text{assoc_trk}}$ は DUT クラスタと紐づけられたトラックの数、 $N_{\text{trk_dut}}$ は DUT を通過したトラックの数である。

第5章 実験系動作評価と Alignment

5.1 ヒットマップ

まず、望遠鏡にビームが当たっていることを確認した。図 5.1 は DPTS をトリガーにしたデータの RP_s のヒットマップである。DPTS から離れるほど視野角が広がるため、DPTS 直後にある RP 4 が最も DPTS の像がはっきり見え、RP 0 で最も像が広がって見える。DPTS がビーム粒子を正常にトリガーしていることが分かる。

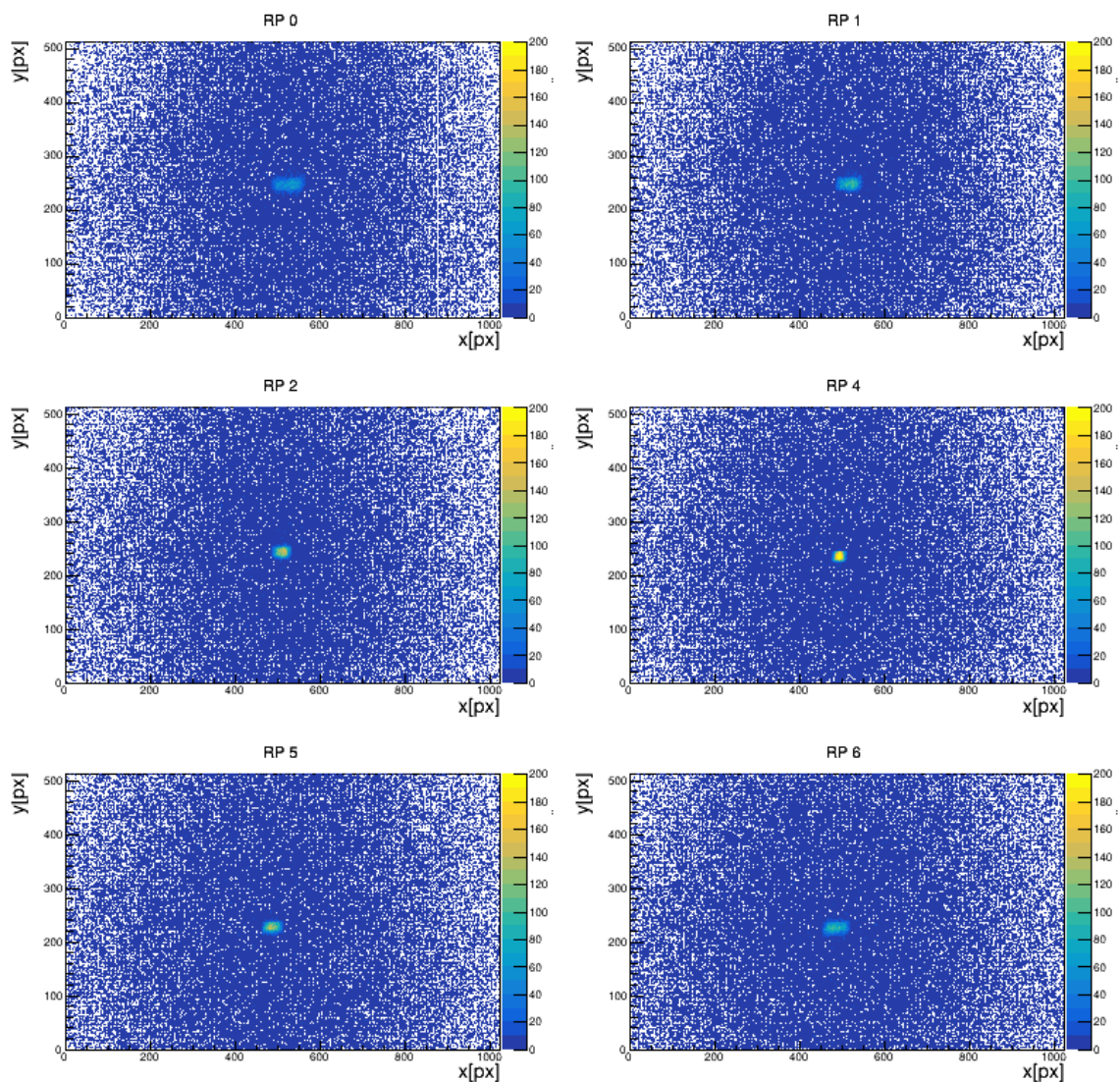


図 5.1: DPTS をトリガーとして DAQ した際の RP のヒットマップ。RP 中央付近に DPTS の影が確認できる。

5.2 ビームプロファイル

望遠鏡が正常に機能していることを確認するために、ビームプロファイルを測定した (図 5.2, 図 5.3). シンチレータは ALPIDE よりも十分大きいため、シンチレータをトリガーにして ALPIDE のヒットマップを取得することで、ビームプロファイルを見ることができる.

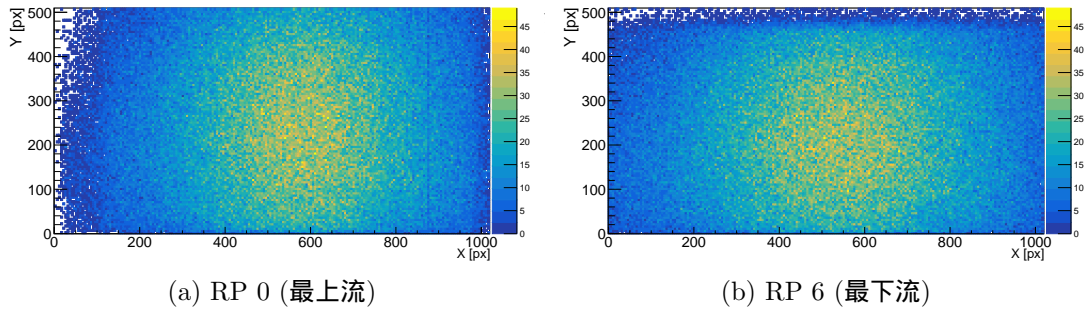


図 5.2: シンチレーターでトリガーしたイベントの RP の 2D ヒットマップ.

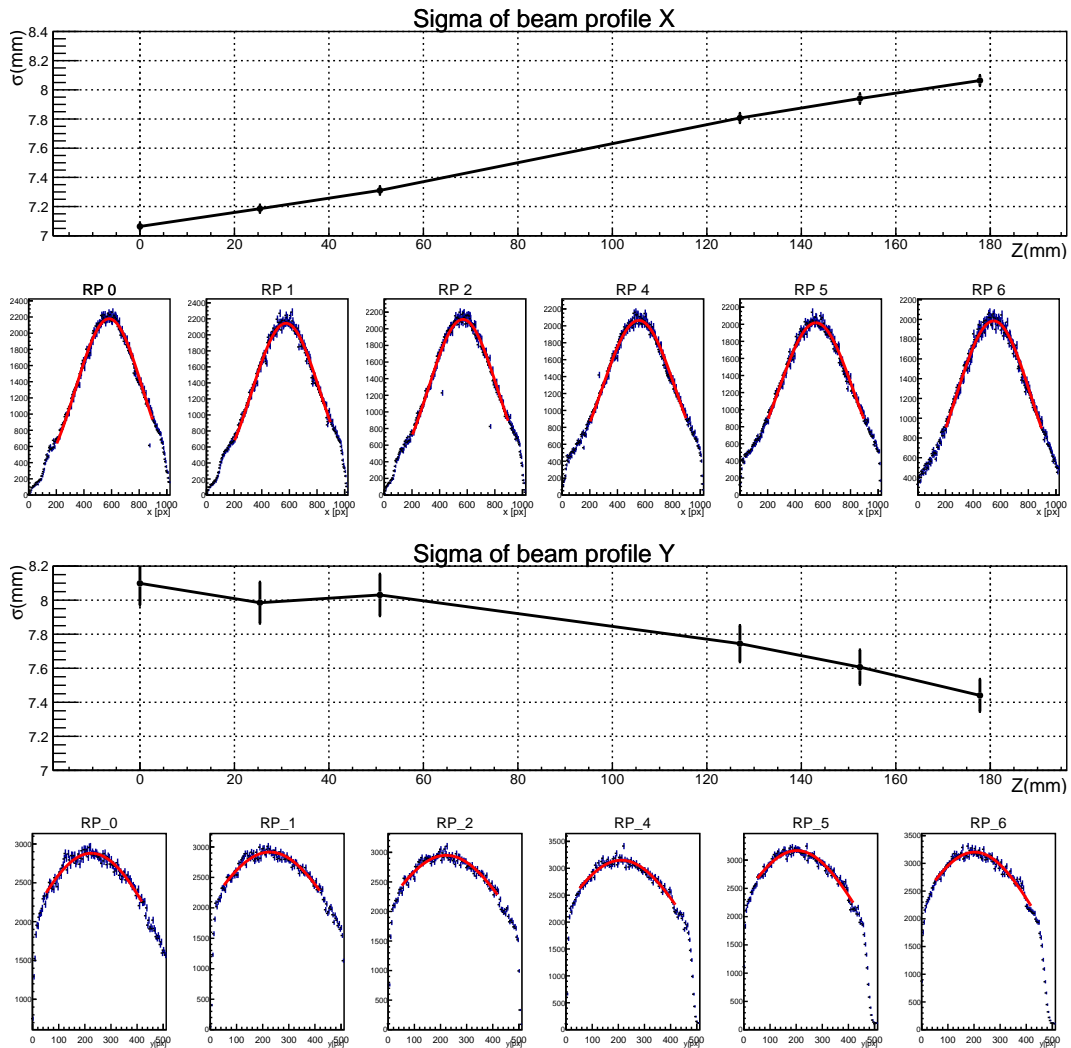


図 5.3: ビームプロファイルのフィット結果. 上が X 軸方向への射影, 下が Y 軸方向への射影である. ガウス分布でフィッティングし, σ の Z 位置依存性をプロットした.

図 5.2b について，最下流に位置する RP 6 では $y \simeq 500$ px の領域のヒットが極端に少なくなっており，図 5.2 の Y 方向のプロファイルからはビームの σ が徐々に小さくなっていることが分かる．ALPIDE はセンサー部とキャリアボードが一部重複している部分 ($y = 500$ px 付近) があり，キャリアボードとの衝突によるエネルギー損失によって抑制を受け，ガウス分布から外れていくことが原因であると考えられる．一方で，X 方向のプロファイルからは下流側ほどビームが散乱によって広がっていく様子を確認できる．

5.3 Pre-alignment

RP 0 を基準とした correlation 分布をもとに，RP 間の位置関係を求めて pre-alignment を行った．

【Event Cut 1】加速器への電子注入による多バンチイベントのカット

KEK の PF-AR ではトップアップ運転¹によって蓄積電子ビームの電流を一定にしている．そのため，この電子注入に対応した多バンチイベントが検出される．図 5.4 に，1 triggerd event ごとの RP のクラスター数の時間変化を示す．平均して 150 triggerd event ごとに 1 回程度，数百から千個のクラスター多重度をもつ多バンチイベントが存在することがわかる．

1 つのセンサーに 1 イベントで数百のヒットがある場合，トラックの精度が保証できないため，解析ではクラスター多重度カットによって多バンチイベントを除外している．図 5.5 はカットによって，correlation 分布の正相関からはずれたヒットをカットできる様子を示している．これにより 30k の DPTS triggered events のうちの 1 ~ 2 %ほどがカットされる．

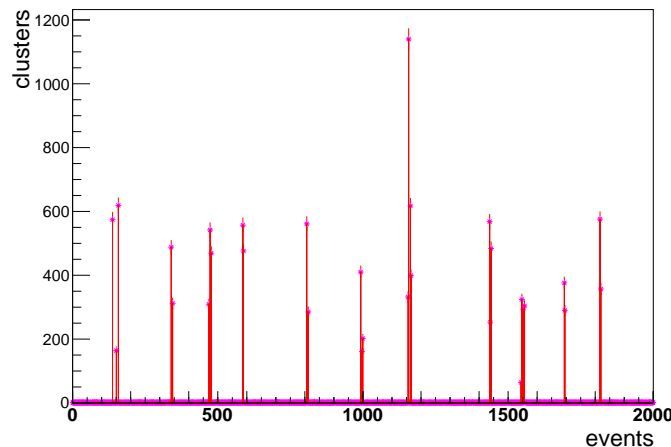


図 5.4: 1 イベントの RP 0 のクラスター数の変遷を示した．約 150 triggerd event ごとに多量のクラスターが検出されるイベントがあることがわかる．

¹加速器に蓄積されている電子の減少を定期的な電子注入によって補う運転方式のこと

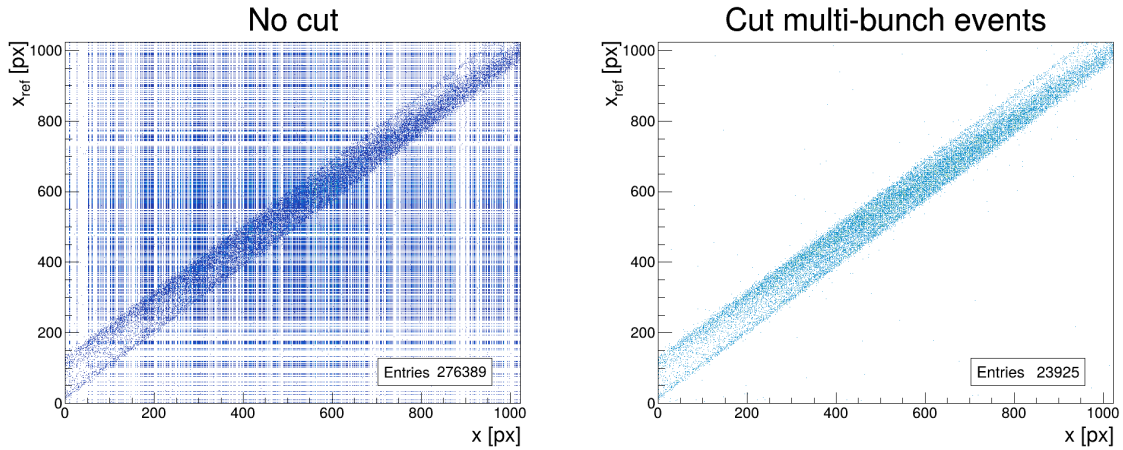


図 5.5: ALPIDE 0 を基準とした correlation 分布．左がカットなしの場合，右が多バンチイベントをカットした後の correlation 分布．ALPIDE のクラスターサイズが最大で 5 個まで分布するので，RP あたりのクラスター多重度が 5 を超えるイベントは多バンチイベントとみなしてカットした．

【correlation 分布】

図 5.6 に，RP 0 と RP 6 の correlation を示す．Y 方向の correlation 分布はビーム角のばらつきを反映したガウス分布になっているが，X 方向の correlation 分布にはピークが 2 つ存在する．X 方向に 2 方向のビーム成分が存在すると考えられるため，図 5.7 のように 2 つのガウス分布の重ね合わせでフィットした．通常は correlation 分布をガウス分布でフィットしてその mean が 0 になるようにセンサーを再配置する．本解析では，pre-alignment に際して，中央に近い方のピークの mean 値を用いて pre-alignment を行った．

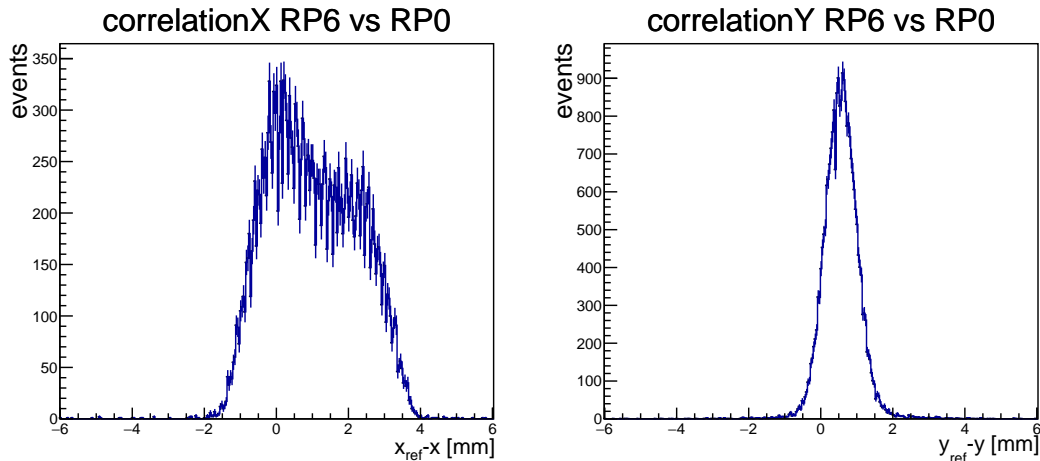


図 5.6: 最上流の RP (ALPIDE 0) のヒット位置との correlation 分布．左図は X 方向であり，2 mm の位置に 2 つ目のピークがある．

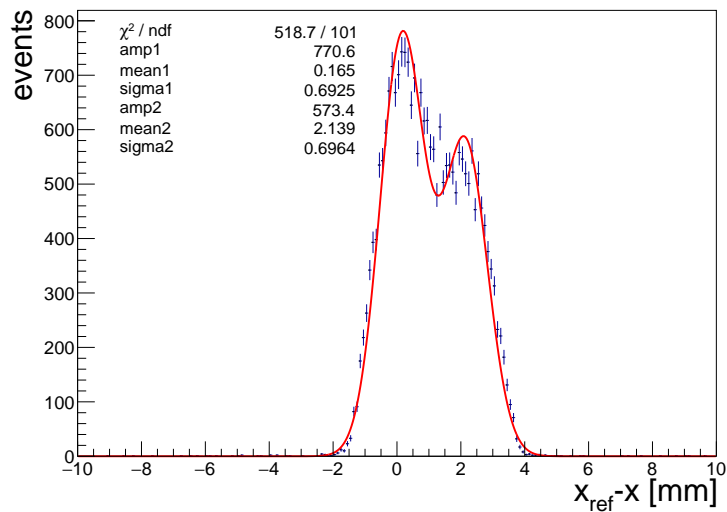


図 5.7: Correlation 分布をガウス関数の重ね合わせでフィットした．中央付近のガウス分布の mean 値だけ RP をずらす．

5.4 トラック再構成 と alignment

Pre-alignment 後のセンサーの geometry でトラックを再構成し，そのトラックを用いて線形最小二乗法によるセンサーの geometry とトラックの修正を行う．alignment には 6 枚全ての RP にヒットが存在するトラックのみを使用した．まず，有感領域の大きいシンチレータトリガーのデータを用いて RPs のみでトラックを再構成し，固定したトラックに対して DUT の alignment を行った．

DUT の alignment では，最上流と最下流の RP のヒットを結んで直線を構成し，設定したサーチウィンドウ範囲内にある DUT のヒットをトラックに紐づけていく．associated cluster とトラックの距離が $mean = 0$ のガウス分布に近づくように DUT の位置を調整する．Pre-alignment は粗雑な調整であるため，初めはサーチウィンドウを広めに設定して，徐々に狭くしていく手法を採用した．

【Event Cut 2】 6 枚全ての RP にヒットがあるトラックのみを使用

ALPIDE の有感領域に対して，DPTS と DUT の有感領域は 1/100 以下である．DPTS と DUT に入射している粒子の RP における立体角は ALPIDE に対して十分小さいため，6 枚全ての RP にヒットを要求することは妥当である．

このカットにより 30k の DPTS triggered event の内の約 3k ($\simeq 10\%$) がカットされる．

5.4.1 トラック再構成

まず，RP のみでトラック再構成と alignment を行った結果を示す．サーチウィンドウを $500 \mu\text{m} \rightarrow 250 \mu\text{m} \rightarrow 100 \mu\text{m} \rightarrow 50 \mu\text{m}$ の順に徐々に狭くしていった．1 回目の alignment 以降は RPs の geometry が $0.01 \mu\text{m}$ 程度しか変化しなくなった．次に，トラックを固定して DUT の alignment を行った過程を図 5.8 に示す．Alignment を繰り返すことで，DUT のクラスター重心とトラックの距離の分布の mean が 0 に近づき， σ が小さくなっていく様子が分かる．

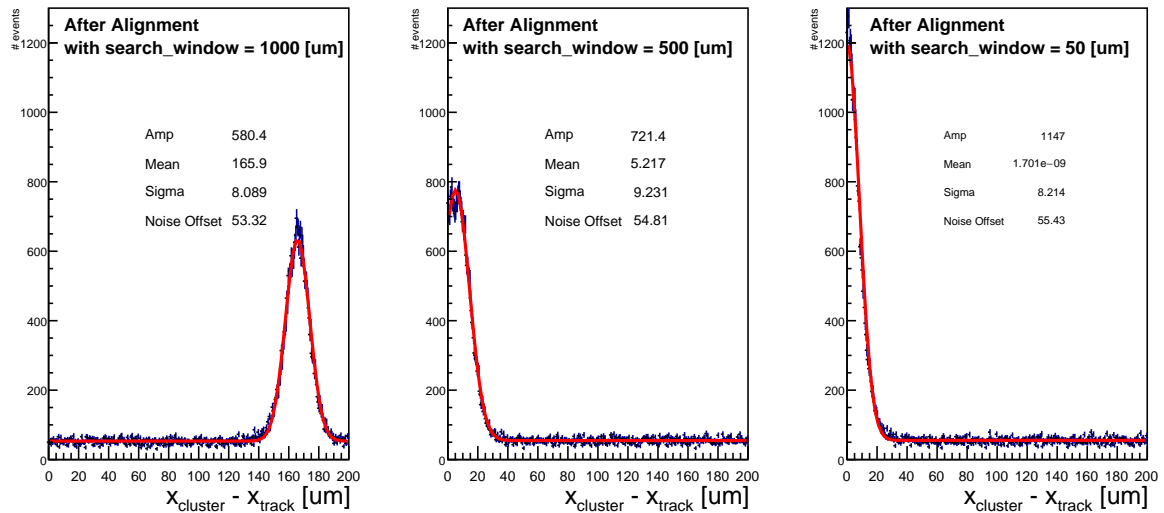


図 5.8: Alignment 後のクラスターとトラックの距離の分布．左図から順に 1 回目 → 2 回目 → 3 回目の alignment 結果

はじめは $200\ \mu\text{m}$ ほどトラックと DUT のクラスター重心が離れていたが，一回目の alignment によってトラックとクラスター重心がある程度一致する．その後， χ^2 値によって直線に近いトラックを選別した上で alignment を繰り返すことで，徐々に residual の幅を小さくしていく．使用したトラックは $\chi^2/ndf < 4$ を満たすものであり，最終的に DUT の再配置後の位置が変化しなくなった段階 (図 6.7 の右図) で alignment を終了した．

5.5 DUT Association

前段階解析の最終プロセスは，センサーの geometry を固定した状態で DUT とトラックを紐づけることである．トラックが DUT を通過した位置と DUT のクラスター重心を用いて紐づける．本解析では，RP で再構成したトラックと DUT の交点から $50\ \mu\text{m}$ (図 5.8 右図のガウス分布の 6σ) の範囲内にあるクラスターをトラックと紐づけた．

第6章 CE65 動作性能評価

BLK において，出力された ADC 分布が極端に縮小しているという結果が得られ，解析結果は電圧が正常に印加されていない可能性を示唆しているため，本章では STD，GAP と BLK は分離して結果をまとめる．本研究で用いた DUT はクラスターサイズが 1 ～ 3 程度であり，クラスターにノイズが含まれた場合の影響が大きい．そこで，ノイズ分布や検出効率，ピクセル電荷分布を多角的に検証しながら，ノイズを効率的に除去する方法を探り，その後 residual 分布やクラスターサイズの評価を行う．

6.1 電荷分布と電荷閾値の決定

本解析では，全ての DUT 解析プロセスにおいて neighbor と seed の電荷閾値の設定が必要である．そのために，まずは neighbor の閾値を決める．通常 seed threshold よりも neighbor threshold を低く設定するため，neighbor threshold によってノイズカットの閾値が決まる．

6.1.1 ノイズ分布

ビーム停止状態でのドライランでノイズ測定を行った．図 6.1 にノイズの ADC 分布を示した．単一のガウス分布とは異なる裾の長い成分が見られたため，2 つのガウス関数の重ね合わせでフィットした (式 6.1)．このフィット結果を元に，alignment のための暫定的な電荷閾値を 100 ADC に決定した．解析の際に用いる電荷閾値は，別途検証を行った．

$$F_{\text{double gauss}}(x) = G_1(x) + G_2(x) = A_1 \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (6.1)$$

フィッティングの結果から，ペDESTAL 付近の細いノイズ分布 (図 6.1 における G_1) とは別に，裾野の分布の原因となる 2 つ目のノイズ分布 G_2 があることが分かる．定性的には，独立な 2 つのノイズ因子によるものであると考えられる．どちらのノイズの電圧に依存しないため，電荷の増幅後のノイズだと考えられる．また，幅の広いノイズはチップごとに異なる分布を持っており，これがチップタイプに依存するものかは検証が必要である．

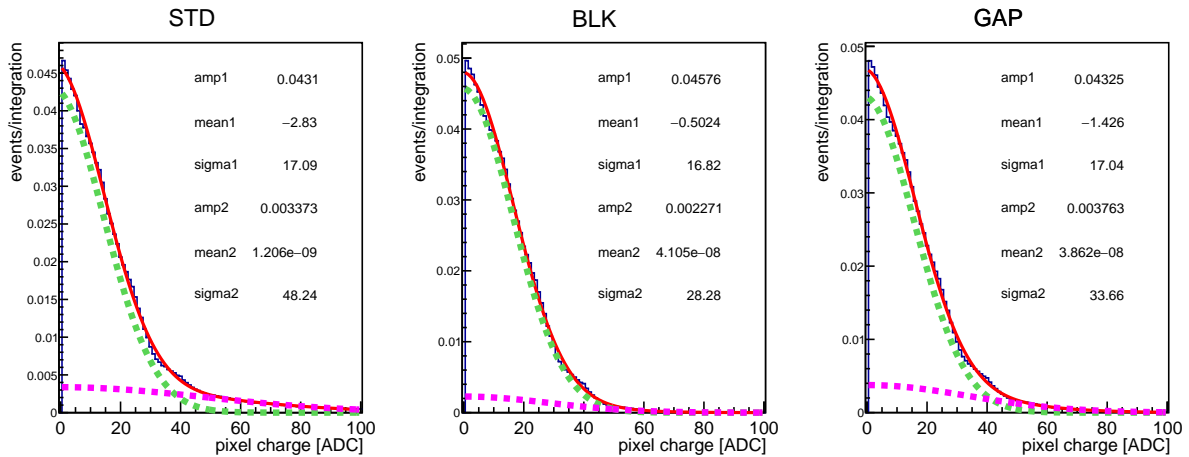


図 6.1: チップ別のノイズの ADC 分布．2つのガウス分布の重ね合わせでフィットした．幅の広い分布 (桃色) とノイズの大部分を占める分布 (緑) がある．

【Noise Rate】

ノイズレートによる電荷閾値の検証のために，ノイズレートの閾値依存性を確認した．図 6.2 は 1 イベントあたりの 1 ピクセルのノイズレートの閾値依存性を示したものである．

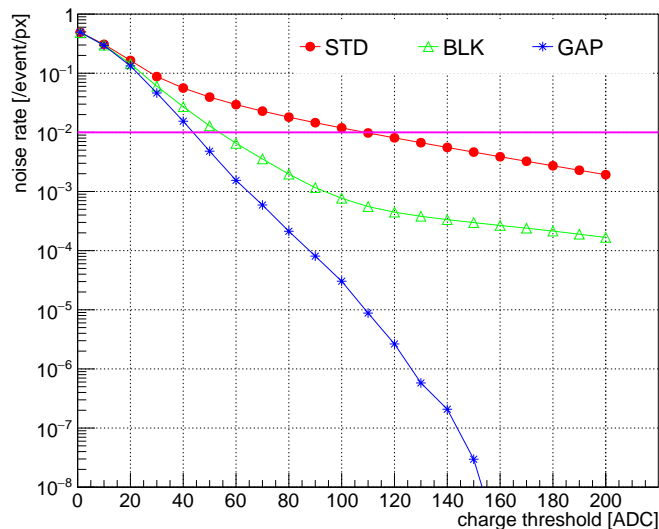


図 6.2: ノイズレートの電荷閾値依存性．横軸は電荷閾値を表している．桃色の線はノイズレートが 0.01 のラインである．

チップタイプによるばらつきもあるが，ノイズレートが 1% 程度になるのは 40 ~ 100 ADC 程度からである．STD のノイズレートは BLK や GAP よりも高い 1% のオーダーで推移しているため，ノイズレートを BLK や GAP と同じ基準にするには閾値を大きく設定する必要がある．本実験で用いた DUT は，閾値を大きくしすぎるとシグナルを棄却してしまうため，単に高い閾値を設定することは適切ではないものの，本解析では，ノイズカットの一つの基準として，ノイズレートが 1% 以下になる点を neighbor として設定する．表 6.1 に実際に設定した閾値をまとめた．

表 6.1: neighbor threshold の設定値

chip type	neighbor threshold [ADC]
STD	100
BLK	50
GAP	60

6.1.2 Associated pixel charge

電荷閾値をノイズレートが 1% (= 0.01 hit/event · pixel) を 1 つの基準として電荷閾値によるノイズカットを行うが、シグナルとノイズの混在する電荷分布においてその閾値が適切かどうかを検証するには、ドライランの結果のみを参照するのは十分ではない。そこで、ビーム照射時のピクセルの電荷分布を調べ、暫定的なピークとノイズレベルの推定を行った。図 6.3 は STD と GAP のトラックに associate されたピクセル¹の電荷分布である。クラスタリングを行っていないため、ヒット位置はピクセル中心で計算している。ピクセルの電荷分布をノイズのガウス分布とビーム粒子の電離損失によるランダウ分布の重ね合わせでフィットした。Association によって、トラックの周辺に存在しているヒットのみを抽出することで、ノイズを大きく除去できるものの、ノイズのガウス分布が残っていることがわかる。このノイズ分布は前節の図 6.2 で示した通り 100 ADC よりも大きいところではほとんど 0 とみなせる。ドライランでのノイズレート評価によるノイズカットのための閾値決定は、シグナルが混在する電荷分布においても有用であると言える。GAP のガウス分布の σ が図 6.1 のペDESTAL 分布とコンシステントなため、このガウス分布はノイズ成分と同定できる。一方で、STD のガウス分布はドライランのペDESTAL 分布よりも大きな σ をもつ。これは、STD が電荷共有しやすく、1 ピクセル当たりの電荷量は cluster charge よりも小さくなり、それがノイズ分布に係ってしまうためと考えられる。

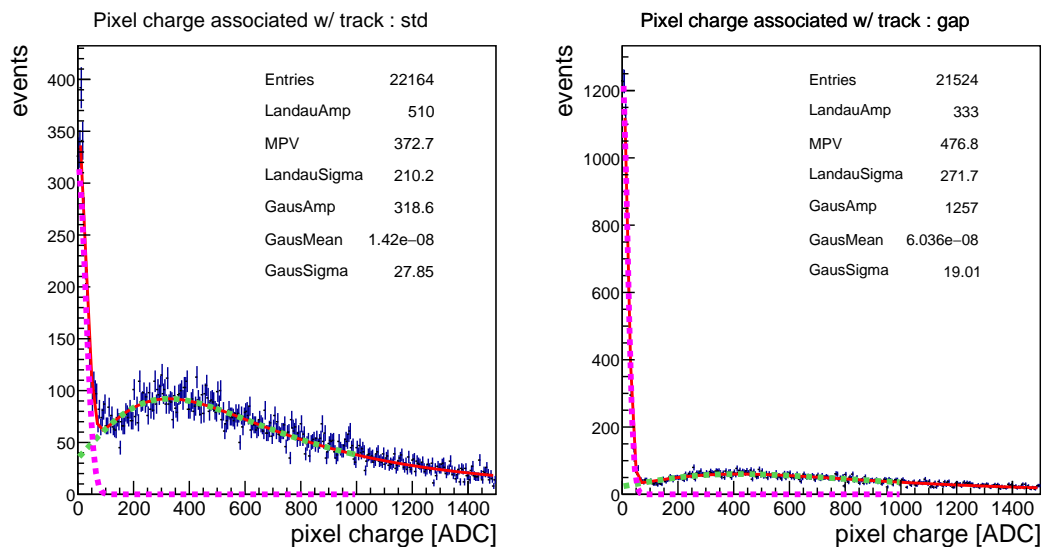
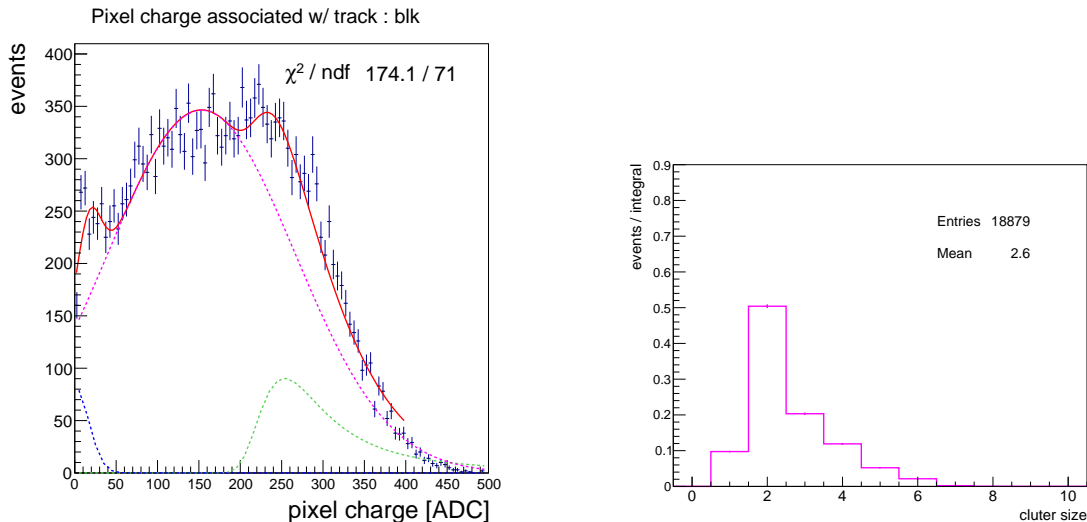


図 6.3: BLK のトラックの DUT 通過点から 1 px \approx 25 μ m 以内にあるヒットの電荷分布。ノイズの分布とシグナルの分布があることがわかる。

図 6.4a は、同様に BLK の associated pixel の電荷分布をプロットしたものである。STD, GAP と異なり、ノイズのガウス分布に加えて 2 つのピークのようなものが見える。図 6.4b は BLK のクラスタサイズ分布であり、2 にピークがたつ。これは、BLK のベース電圧が十分に印加され

¹ クラスタの電荷分布ではない

ていない可能性を考慮すると、空乏層が十分に広がりきらず、電子が拡散の影響を強く受けてしまっていたためだと予想した。つまり、2つのシグナルピークのうち、電荷量の大きい方は seed の電荷分布であり、他方は neighbor の電荷分布であると考えられる。したがって、BLK に関しては、ガウス分布 2 つとランダム分布 1 つによるフィットを行った。



(a) トラックの DUT 通過点から $1\text{ px} \approx 25\ \mu\text{m}$ 以内にあるヒットの電荷分布を 2 つのガウス分布と 1 つのランダム分布でフィットした。

(b) BLK のクラスターサイズ .1 ではなく 2 にピークがある

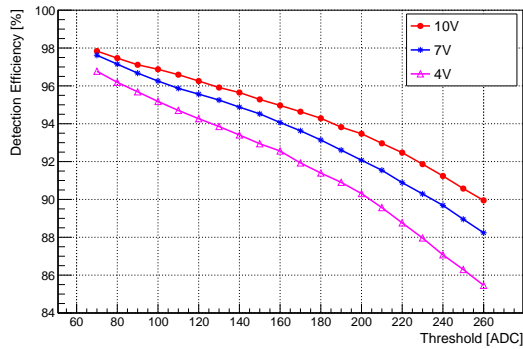
図 6.4: BLK の電荷分布とクラスターサイズ

フィット結果の青色のガウス分布は、ペDESTル分布とコンシステントな σ をもつため、これはノイズ成分であると考えられる。グローバルフィットの結果 (赤色の線) はシグナル分布が 2 つのピークを持つ可能性を示唆しているが、正確な原因究明が課題である。現状、このダブルピークに関する妥当な解釈はできていないものの、BLK の逆バイアス印加が正常でないかと仮定すると、以下のように解釈できる。まず、図 6.4b は後節で論ずる予定の BLK のクラスターサイズである。本実験における BLK のクラスターサイズの特徴は、 $\text{size} = 2$ が最頻値であることである。逆バイアスが印加されていない場合、センサー内の完全空乏化が達成されず、電子は自由拡散に近い状態でセンサー内を運動する。すると、各ピクセルの電荷収集能力は低くなるため、電荷共有によってクラスターサイズが 2 に集中する。このとき、neighbor が一定の割合で、seed の電荷量に比例する量の電荷を共有されるため、seed と neighbor の 2 つのピークをもつと考えることができる。この推定の妥当性に関しては、seed と neighbor の電荷を個別に見ることで確認できるため、今後の解析で明らかにする必要がある。

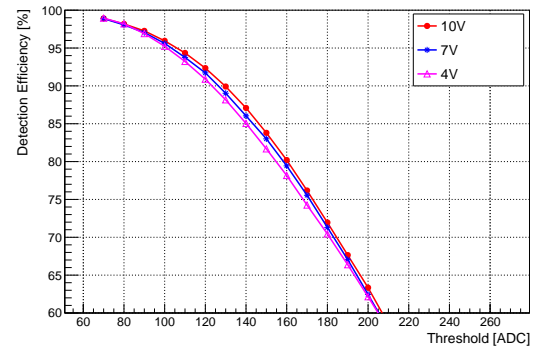
6.1.3 検出効率

ノイズカットのための閾値は上記のように見積もることができる一方で、電荷の閾値に依存する量としては検出効率も重要な指標であり、S/N と検出効率のバランスをとる必要がある。閾値を上げると S/N は良くなるが、検出効率は悪くなるからである。S/N と検出効率を考慮した閾値の最適化は検証段階であるため本論文では紹介しないが、本章では、検出効率についての独立した解析結果を示す。本実験の DUT は、図 6.3 で示したようにシグナルとノイズが完全に分離していないため、neighbor threshold を大きくしすぎると、シグナルも棄却してしまう。そこで、ノイズカットの電荷閾値最低ラインは $3\sigma \approx 60\ \text{ADC}$ とし、チップごとの検出効率の電荷閾値依存性を検

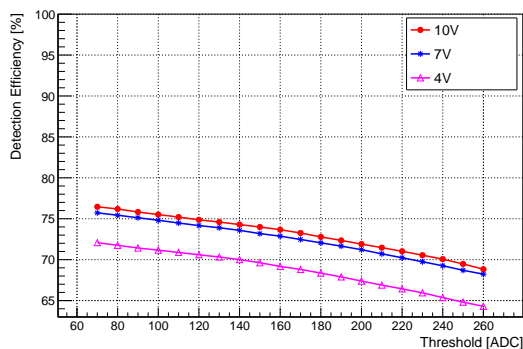
証した．クラスタリングでの neighbor threshold を 60 ADC に固定し，seed threshold を 70 ADC から 10 ADC ずつ変化させて検出効率をプロットした (図 6.5)



(a) STD



(b) BLK



(c) GAP

図 6.5: 各チップの検出効率の電荷閾値依存性．

検出効率は，閾値を 10 ADC 程度大きくすると，平均的に数%程度のオーダーで低下することが分かった．STD も BLK も 100 ADC 程度の閾値では 95%以上の検出効率があるものの，GAP に関しては，検出効率が 80%以下で推移している．この原因については現在調査中である．

6.1.4 Neighbor charge 閾値の決定

閾値をノイズレートが 1%となる 100 ADC (STD)，50 ADC (BLK)，60 ADC (GAP)，に設定すると検出効率は STD と BLK で 90%以上，GAP で 70%程度になる．閾値の変化に対して検出効率が大きく変わらないため，ノイズレート 1%の閾値を検出効率の面からも妥当と判断した．このことを踏まえて，neighbor threshold を以下のように設定した．

【STD】

STD はノイズレートが他のチップと比較して高くなっており， $threshold = 100$ ADC 以上でノイズレートが 1%以下になる．また，トラックとの association カットによりノイズを抑制した後のピクセル電荷分布のガウスフィットの 1σ は 27.18 ADCch であり，電荷閾値を 100 ADC に設定すれば十分にノイズカットができると言える．

【BLK】

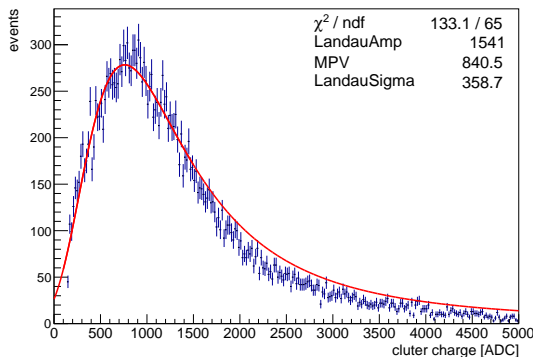
ノイズレートが他のチップと比べて2桁以上小さくなっており, $threshold = 50$ ADC 以上でドライランにおけるノイズレートが1%未満になる. association カットによって, シグナルの抽出は可能であると判断し, 電荷閾値を 50 ADC に設定した.

【GAP】

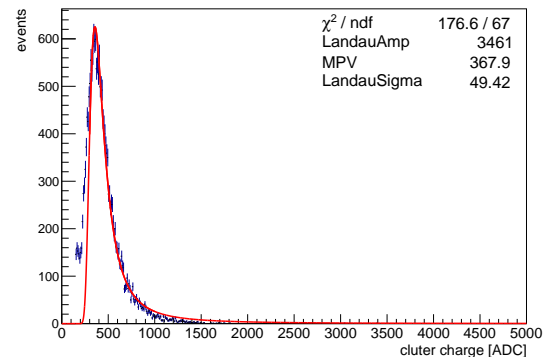
GAP は association カット後のノイズの広がりが $1\sigma = 18.5$ ADC であり, $3\sigma \simeq 60$ ADC 以上でノイズレートが0.1%未満になる. したがって, 閾値を 60 ADC とした.

6.2 Cluster charge 分布

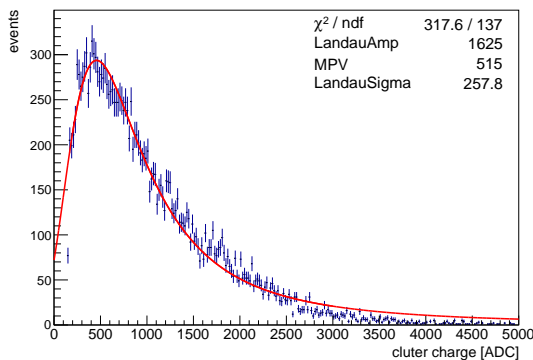
前節で決定した neighbor threshold で, クラスタリングを行い, associated cluster の電荷分布を調べた. クラスタリングに混じるノイズを抑制できていれば, cluster charge は 1 ビーム粒子がセンサー内で落としたエネルギーに相当するため, ランダウ分布でフィットできる. 図 6.6 は, ベース電圧 $V_B = 10$ V の際の各チップのクラスターチャージをランダウ分布でフィットしたものである. Seed threshold は 150 ADC に設定した. フィット結果は cluster charge が概ね電離によるエネルギー損失を反映していることを示しているが, 線源による ADC 較正によって, エネルギー損失の具体的な値を得られるようにし, ピーク位置の妥当性を検証する必要がある. BLK については, 分布の範囲が最大で 1500 ADC 程度と, 他のチップよりも ADC 分布がせまく, やはり, 電圧印加における異常が疑われる.



(a) STD



(b) BLK



(c) GAP

図 6.6: 各チップの cluster charge の分布. MPV はランダウ分布のピーク位置である.

6.3 クラスターサイズ

図 6.7 は各チップの associated cluster のクラスターサイズ (=クラスターに含まれるピクセルの個数) の分布である．seed threshold は 150 ADC に設定した．Seed threshold はノイズを十分に棄却できる 150 ADC とした．ヒストグラムは全イベント数で規格化している．

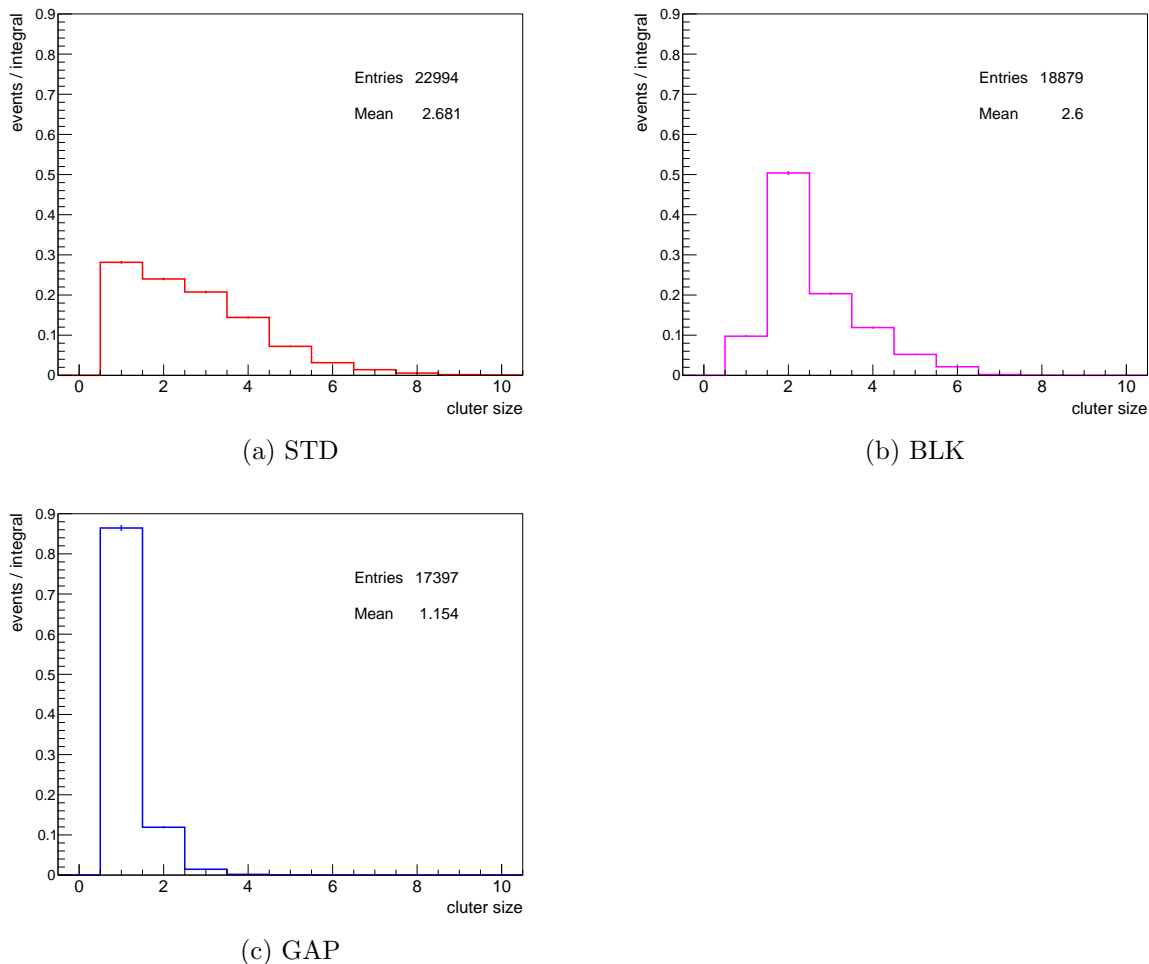


図 6.7: 各チップのクラスターサイズの分布．STD はクラスターサイズが広く分布しているが，GAP はクラスターサイズが 1 に集中している．BLK はクラスターサイズ 2 にピークが立っているのが特徴である．

図 6.7 より，STD と GAP については内部電場構造の違いから定性的に予想される描像と測定結果が合致しているといえる．すなわち，STD ではセンサー内の電荷は自由拡散によって移動するため電荷共有を起こしやすく，他の構造よりも比較的大きなクラスターを形成するはずである．一方で，風船状の空乏層内に一度入れれば電場によって電極に収集されるため，クラスターサイズ 1 にピークがあり，比較的大きなクラスターサイズまでサイズ分布が広がる．GAP は n 型ドープがピクセルごとに分離されており，ピクセル中央に向かって電荷を押し出すような電場構造になっていると考えられる．したがって，電荷共有を起こしづらく，クラスターサイズ 1 に強いピークが立つと考えられる．BLK については，ベース電圧が正常に印加されていない場合，空乏層が広がらないため電荷が拡散してしまうが，内部構造によって集電電極に向かう電場が少なからず存在するため，クラスターサイズが 2 にピークが立っていると考えられる．

6.4 Residual 分布

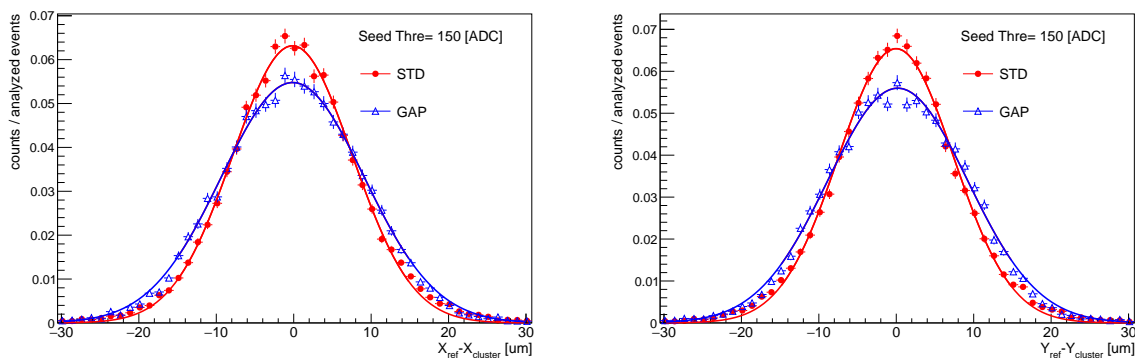
Residual とは、RP で再構成したトラックの DUT 平面での外挿点と DUT のクラスター重心の距離である。Residual 分布はガウス関数でフィットすることができ、この幅が位置分解能の 1 つの指標となる。

Seed threshold を上げることで、クラスターにノイズが混じりづらくなるため、閾値と residual 分布には相関があると考えられる。また、電荷共有度によっても位置分解能は変化するはずである。本節では、位置分解能の 1 つの指標として residual 分布のパラメータ依存性について論ずる。

6.4.1 STD と GAP の Residual 分布

まず、seed threshold をノイズカットが十分であると考えられる 150 ADC で固定した上で、residual 分布がチップタイプによってどう変化するかを示す。図 6.8 は STD と GAP の $V_B = 10\text{ V}$ における residual 分布のガウスフィットの結果を示している。左図が X 方向、右図が Y 方向の Residual 分布である。概ね、 $1\sigma = 9\ \mu\text{m}$ 前後である。ピクセル検出器の典型的な位置分解能は、原理的にピクセルサイズの $1/\sqrt{12}$ と期待できる。本実験で用いた DUT のピクセルサイズ $22.5\ \mu\text{m}$ なので、この値は 約 $6.5\ \mu\text{m}$ となる。本実験で得た約 $9\ \mu\text{m}$ という期待よりも大きな値は多重散乱の影響によるものであると考えられる。シミュレーションによって、多重散乱で residual 分布幅が広くなることは確認しており、定量的な検証はまだ行っていないものの、位置分解能としては概ね期待値に添った結果である。

内部電場構造依存性に関しては、STD と GAP で σ に差があることがわかる。ベース電圧による位置分解能の差は後述するが、STD よりも GAP のほうが分布の幅が広い。このことは、内部電場構造から予想できる描像と合致している。内部電場構造の違いにより STD が最も電荷共有しやすく、GAP が最も電荷共有しづらい。クラスターの位置は電荷量による重みづけをした重心計算によって行われるため、電荷共有をしやすく²、重心計算に用いるソースの量が多いほうが系統誤差は小さくなる。



(a) x 方向 Residual 分布。

(b) y 方向 Residual 分布。

図 6.8: STD と GAP の residual 分布をトラック数で規格化し、ガウス関数でフィットした。

次に、residual 分布の seed threshold 依存性を示す。図 6.9 は STD と GAP の X-residual 分布の σ の seed threshold 依存性をプロットしたものである。Seed threshold は neighbor threshold から 10 ADC ずつ大きくしていった。その結果、residual 分布の広がりには STD で $7.6 \sim 8\ \mu\text{m}$ 、GAP で $9.2 \sim 9.5\ \mu\text{m}$ で推移していることが分かった。また、内部電場構造とベース電圧の違いによっ

²電荷共有しやすいことでクラスターサイズが大きくなる

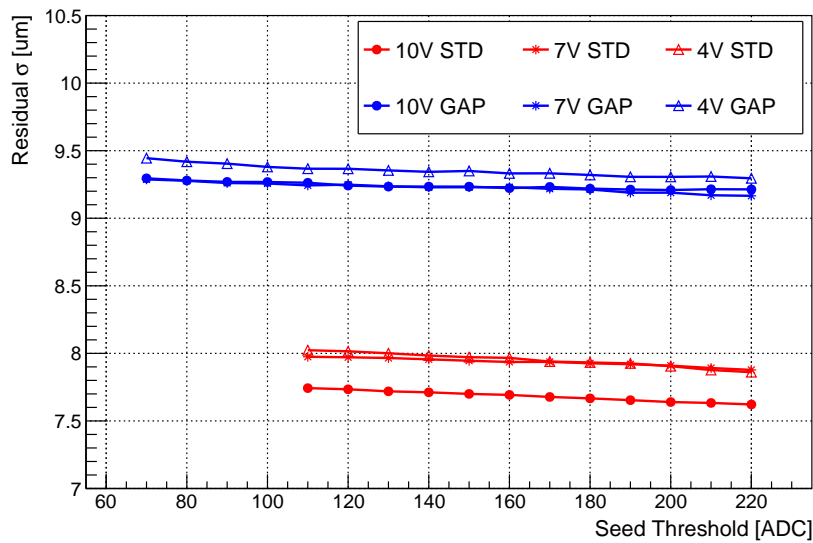
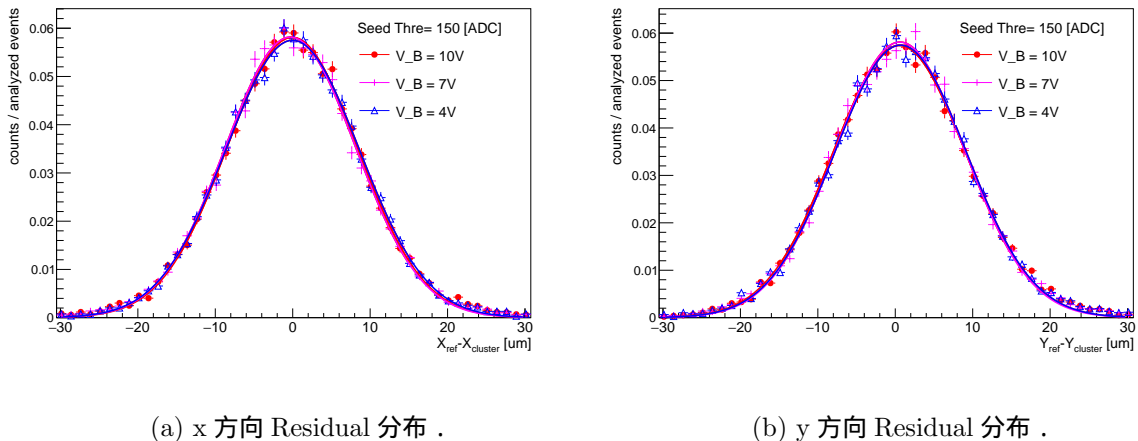


図 6.9: Residual 分布の 1σ の Seed threshold 依存性 .

て residual 分布の広がりが異なる．閾値の増大とともに σ が小さくなるのは，Seed threshold が大きいほどトラックに関係のないシグナルが棄却される（2 粒子同時入射など）ことが主な原因として考えられる．電圧によって，residual 分布の σ が異なるのは，空乏層の広がりが変わるからであると考えられる．半導体検出器には，完全空乏化電圧があり，逆バイアス電圧が十分大きくないと完全に空乏化しない．この場合，キャリアの一部が空乏層外で自由拡散し，電荷収集が不完全になると考えられる．STD では， $V_B = 10V$ で最も σ が小さくなる．GAP では， $4V$ の σ が最も大きい， $7V$ と $10V$ の σ に有意な差がない．印加電圧による空乏化率の差については未だ検証段階であるものの，電圧に応じて位置分解能が変化することが分かった．

6.4.2 BLK の Residual 分布

次に，BLK の residual 分布を図 6.10 に示す．BLK の residual 分布にはベース電圧による差異がないことがわかる．このことは，BLK に正常に逆バイアス電圧が印加されていない可能性を示唆している． $\sigma = 8.2 \mu\text{m}$ 程度であり，GAP より位置分解能が高い．



(a) x 方向 Residual 分布 .

(b) y 方向 Residual 分布 .

図 6.10: BLK の residual 分布のフィット結果 . residual 分布のベース電圧依存性はない

また、前節と同様に、BLK の X 方向の residual 分布の σ を図 6.11 に示す。BLK の residual 分布の σ も seed threshold を上げると小さくなるが、図 6.10 で示したように一定のベース電圧依存性があるとは言い難い。特に、 $V_B = 4 \text{ V}$ の σ が最も大きくなることは前述の完全空乏層化の議論と矛盾する。このように、BLK に関しては、単なるチップの性質として解釈できない測定結果が得られており、原因の究明が急務である。

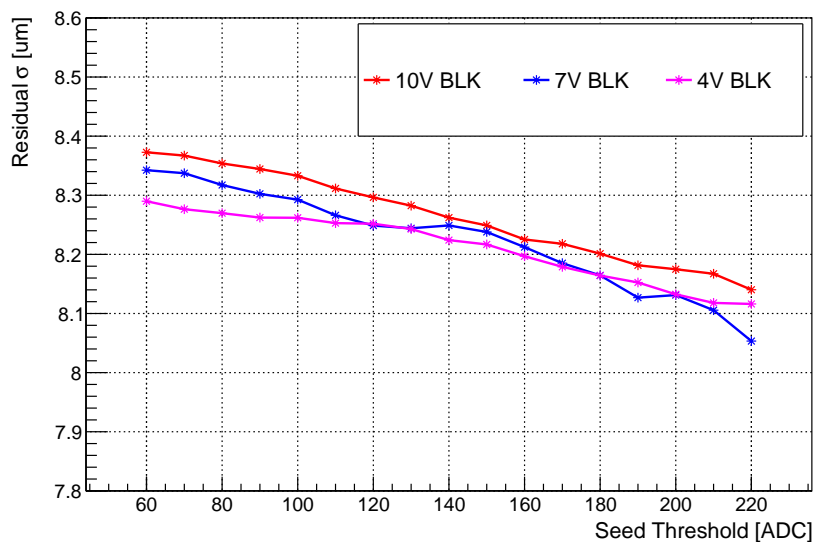


図 6.11: BLK の Residual 分布の 1σ の Seed threshold 依存性。

第7章 結論と今後の展望

7.1 結論

本研究では、6枚のRPを用いてビーム粒子のトラックを再構成し、DUTの位置分解能を測定した。アライメントの過程では、作成した実験セットアップが正常に動作し、飛跡再構成が可能であることを確認した。また、ノイズレートとビームに対するADC分布を解析することで、ノイズカットのための電荷閾値を検証した。電荷閾値を設定することで、ノイズレートを0.01 hit/event/pixel未満にすることができる。電荷閾値の設定によりノイズを選択的に除去できるが、閾値を高く設定しすぎるとシグナルも棄却されてしまう。そのため、ノイズレートのみならずS/Nの閾値依存性や検出効率を多角的に考慮しながら、最適な閾値設定の方法を模索する必要がある。

性能評価に関しては、STDとGAPでは概ね測定結果を定性的に考察することができたが、BLKの解析結果は逆バイアスが正常に印加されていない可能性を示唆している。クラスターサイズ分布の分析では、STDとGAPにおけるクラスターの広がり方の違いが電荷共有度の差に起因することが示された。具体的には、電荷共有度の高いSTDは大きなクラスターを形成するが、電場の電極への集中度の高いGAPは小さなクラスターを形成する。しかし、BLKのクラスターサイズが2に偏る理由については、定性的な結論には至っていない。位置分解能の評価では、residual分布を指標として解析を行い、内部電場構造の違いによる電荷共有度の差が位置分解能に影響を与えることを確認した。全てのチップにおいてresidual幅は典型的に10 μm 以下であり、多重散乱の影響も考慮すれば、期待値に対して一貫性のある結果を得た。また、電場構造やベース電圧を変化させることで位置分解能が変動することも明らかとなり電場構造差によって確かに性能差が生じることが確認できた。

7.2 展望

今後の展望として、まず放射線源を用いたADCのキャリブレーションを実施し、cluster charge分布の妥当性を検証したい。現在、ADCによる電荷分布の評価を行っているが、その妥当性を確かめるためには、cluster chargeのピークが3 GeV電子ビームと対応するかを確認する必要がある。この検証を通じて、クラスタリングの閾値をより適切に設定できると考えられる。さらに、トラックの χ^2 による選別や閾値の変更が、クラスタリング後のS/Nに与える影響についても調査を進める。本論文では、ノイズレートや検出効率の向上を最適な閾値決定の指標としたが、解析の目的に沿った閾値設定を行うには、S/Nやトラックそのものに対するカットも重要な要素となる。今後は、これらのカット手法を試行しつつ、解析結果の妥当性についてさらなる検証を行う予定である。

謝辞

まず，指導教員である山口頼人准教授に深く感謝申し上げます．本研究の準備期間から実験の実施，データの解析にいたるまで，研究を含め様々な面から私をサポートし，相談に乗ってくださいました．また，本論文の執筆においても解析の論理性の確認や添削をしていただき，より良い論文に仕上げることができました．本当にありがとうございました．

次に，修士課程1回生の先輩である和田澗太さんと勝野永遠さんにも深く感謝します．同じMAPS研究の先輩として，解析ソフトウェアの使用方法や研究のアドバイスだけでなく，生活面も含めてご支援いただきました．初めての研究室生活で困ったことがあればすぐに手を差し伸べてくださり，研究の作法なども教えていただきました．また，同じく修士過程2回生の山田蓮斗さんにも深く感謝します．本論文執筆にあたり，文章の論理性や表現の模索の過程で多くの議論をしていただきました．先輩の皆様，本当にありがとうございます．

研究室では，多くのスタッフの皆様にご支援いただきました．志垣賢太教授と八野哲助教からは定例ミーティングにおいて研究への鋭い指摘，有意義なアドバイスをいただいただけでなく，研究への姿勢のようなものも説いていただきました．本間謙輔准教授には，前期のラボエクササイズで素粒子原子核実験の基礎ともなる知識，思考方法を教えていただき，現在も私の研究を支えてくれる経験となりました．三好隆博助教には，前期の学部生ゼミで原子核物理の基礎について有意義で興味深い補足説明をしていただきました．スタッフの皆様，本当にありがとうございました．これからもよろしくお願いたします．

実験においては，ALICE-Jグループの皆様だけでなく，韓国の Pusan National University, Strasbourg の IPHC の皆様の多大なるご協力がありました．この場を借りて深く感謝申し上げます (Thank you very much, 감사합니다)．実験セットアップ開発では，広島大学ものづくりプラザの皆様には設計の相談や金属加工をしていただきました．短い納期にも真摯に対応していただき，ありがとうございました．

また，直接研究には関わらないものの研究生活に花を添えてくれた物理学科同期の木村君，水野君，福本君，浜田君，河本君，松本君に感謝します．君たちのおかげで良いリフレッシュができました．

最後になりますが，4年間の学費と生活費を工面し，私を22年間支えてくれた母に深く感謝します．この場に挙げきれなかった人も含めて全ての関係者の皆様への感謝を申し上げ，本論文の〆とさせていただきます．本当にありがとうございました．

Reference

- [1] LHC CERN. Longer term lhc schedule, 2024. Accessed on Jun. 28, 2025.
- [2] Jian Liu. Alice its3: A truly cylindrical vertex detector based on bent, wafer-scale stitched cmos sensors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1064, p. 169355, 2024.
- [3] The ALICE Collaboration. Letter of intent for alice 3: A next-generation heavy-ion experiment at the lhc, 2022.
- [4] Luca Aglietta. Alice silicon tracker upgrades for lhc run 4 and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1069, p. 169812, 2024.
- [5] Gianluca Aglieri Rinella, Luca Aglietta, Matias Antonelli, Francesco Barile, Franco Benotto, Stefania Maria Beolè, ..., and Andrea Turcato. Time performance of analog pixel test structures with in-chip operational amplifier implemented in 65 nm cmos imaging process. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1070, p. 170034, January 2025.
- [6] F. Reidt. Upgrade of the alice its detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1032, p. 166632, June 2022.
- [7] B Abelev et al and (The ALICE Collaboration). Technical design report for the upgrade of the alice inner tracking system. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, Vol. 41, No. 8, p. 087002, jul 2014.

付録A Corryvreckan

Corryvreckan は高エネルギー物理学分野において、センサー開発とテストビームのデータの解析を行うために設計された柔軟かつ高速なモジュール型ソフトウェアフレームワークである。本フレームワークは CERN を中心とした国際的な研究者コミュニティにより C++ で開発され、次世代半導体センサーの性能評価を容易に行うことを目的の一つとする。データ処理の各段階をモジュール化することで、多彩なセンサーやデータ解析プロセスに柔軟に対応できるだけでなく、カスタムモジュールも追加できるように設計されている。表 A.1 に、Corryvreckan のモジュールの一部を簡潔に示す。多くのモジュールは Corryvreckan 内で独自に定義されたイベントに対してループ処理を行い、その結果を ROOT ファイルに出力する。

モジュール名	説明
EUDAQ2	生データを取り込むためのデータ入力モジュール
Prealignment	望遠鏡や DUT の相対的位置と向きを校正するモジュール
ClusteringSpatial	シグナルの位置に基づいてクラスタを生成するモジュール
Tracking4D	クラスタを参照して粒子の飛跡を再構成するモジュール
AnalysisDUT	センサー応答の特性を解析するモジュール

表 A.1: Corryvreckan のモジュールの一例

A.1 モジュール

本研究で使用したモジュールをごく簡単に説明する。

A.1.1 Metronome

Metronome モジュールはイベントが厳密に定義されていないデータセットにおいて、指定された長さのタイムフレームでデータをスライス (分割) するための event building モジュールである。デフォルトでは、フレームの長さは $event_length = 10 \mu\text{m}$ でスライスされる。

A.1.2 ClusteringSpatial

Metronome によりスライスされた Corryvreckan event の各 detector のヒットをクラスタリングするモジュールである。1 イベント内のヒットの内、となりあうものを 1 つのクラスタに格納する。隣り合うものがない場合はサイズ 1 のクラスタが生成される。クラスタサイズの分布や、1 イベントにおける各センサーのクラスタの個数分布などが出力される。

A.1.3 Prealignment

トラックを用いたアライメントに入る前に、暫定的なアライメント (プリアライメント) を行うためのモジュールである。プリアライメントの結果は新しい geometry ファイルとして出力される。アライメントメソッドがガウスフィットに設定されている場合、本モジュールは以下の手順でプリアライメントを行う。

1. 同イベント内でレファレンスに設定されているセンサーと各センサーのクラスターの correlation ヒストグラムを作成する
2. time cut を行う
3. correlation 分布をガウス分布でフィットして、その Mean の値だけセンサーの位置をシフトさせる

本論文では、上記のプロセスを一部改変し、2つのガウス分布でフィットするようにした。

A.1.4 Tracking4D

以下の手順でトラッキングを行うモジュールである。トラックモデルが”straight line”に設定されている場合、

1. 最上流と最下流のヒットの全ての組み合わせに対して直線を引く
2. 時空間カット内のクラスターをトラックに追加していく。
3. トラックのうち、全てのセンサーにヒットがないものをカットする
(*min_hits_on_track* で要求ヒット数を変更可能)

の手順でトラッキングを行う。このモジュールではアライメントは行わず、トラックインスタンスの生成を行う。また、トラックモデルとして多重散乱を考慮してトラッキングを行う”gbl (General-Broken-Lines)”を選択することも可能であるが、未完成であり、実装はされていない。

A.1.5 AlignmentMillipede

トラック修正とアライメントを同時に行うことのできるアライメントモジュールである。Millipede¹と呼ばれる線形最小二乗法アルゴリズムに基づいており、パラメータの合計が設定した収束値より小さくなると処理が終了する。Tracking モジュールにより再構成したトラックの χ^2 を極小にするようにアライメントをし、その結果に応じてトラックを再度生成することを繰り返す。

A.1.6 ClusteringAnalog

電荷に閾値を設定してクラスタリングを行うモジュールである。Seed threshold 以上の電荷をもつヒットを Seed として、その周囲の Neighbor threshold 以上の電荷をもつヒットを Neighbor としてクラスタリングする。また、クラスターの重心計算も行う。

¹Millipede は日本語でヤスデのこと

A.1.7 DUTAssociation

DUT と再構成トラックの紐づけを行うモジュールである。同イベント内の DUT 上のトラック外挿点から設定値範囲内にあるクラスターを探索して AssociatedCluster のインスタンスを生成する。

A.2 使用方法

Corryvreckan に必要なものは、主に以下の 3 つのファイルである。

1. 検出器の幾何情報を設定する geometry ファイル
2. 使用するモジュールとパラメータの設定を行う config ファイル
3. データファイル (拡張子: .raw)

モジュールの実行は config ファイルに書かれた順番に行われる。モジュールのソースコードのうち、メンバ関数 initialize を全てのモジュールに対して実行したあとに、各モジュールのメンバ関数 run で定義された処理をイベントごとに行う。最後にメンバ関数 finalize を実行する。本節では、config ファイルと geometry ファイルの一例を紹介する。

A.2.1 geometry

geometry ファイルは各検出器の幾何情報を記述するファイルである。ソースコード A.1 に geometry の一例を示す。roi (region of interest) の記述によって使用するピクセルを制限することができる。また、この geometry ファイルはアライメントごと書き換えられる。

Listing A.1: geometry ファイルの一例

```
1 [ALPIDE_0]
2 coordinates = "cartesian"
3 material_budget = 0.005
4 number_of_pixels = 1024, 512
5 orientation = 0deg, 0deg, 0deg
6 orientation_mode = "xyz"
7 pixel_pitch = 29.24um, 26.88um
8 position = 0um, 0um, 0um
9 roi = [[480,213], [480,280], [573,280], [573,213]]
10 spatial_resolution = 5um,5um
11 time_resolution = 2us
12 type = "alpide"
```

A.2.2 config

次にソースコード A.2 に config ファイルの一例を示す。モジュール名と使用するオプション、パラメータ等を記述する。

Listing A.2: config ファイルの一例

```
1 [Corryvreckan]
2 log_level = "WARNING"
3 log_format = "DEFAULT"
4 detectors_file_updated = "update.geo"
5 histogram_file = "hist.root"
6
7 [Metronome]
8 triggers = 1
9
10 [EventLoaderEUQA2]
11 file_name = "input_file.raw"
12
13 [ClusteringSpatial]
14 type = ALPIDE
15 reject_by_roi = true
16
17 [ClusteringAnalog]
18 name = CE65
19 threshold_type = "fix"
20 threshold_seed = 200
21 threshold_neighbor = 100
22 method = cluster
23 seeding_method = multi
```

上記の例では、RP と DUT のクラスタリングを行っている。detectors file は geometry ファイル、histogram file は出力先を指定する。また、シェルコマンドの引数としてこれらのファイルを設定することも可能である。

付 録 B ピクセル検出器の位置分解能

1つのピクセル内に荷電粒子が侵入し，電離相互作用によって生成したキャリアが同ピクセルの電極に収集される場合を考える．ピクセル内のビーム粒子の通過位置は，ピクセルに対してビームの広がり十分大きければ一様分布であるから，1ピクセルの位置分解能期待値はこの一様分布の標準偏差によって求めることができる．ピクセルサイズを l_{pix} とすると， $-l_{\text{pix}}/2 < x < l_{\text{pix}}/2$ における一様分布の確率密度関数 $f(x)$ は，

$$f(x) = \frac{1}{l_{\text{pix}}} \quad (\text{B.1})$$

で与えられる (図 B.1)．したがって，位置 x の標準偏差は

$$\sqrt{V(x)} = \sqrt{\int_{-l_{\text{pix}}/2}^{l_{\text{pix}}/2} f(x)x^2 dx} = \frac{l_{\text{pix}}}{\sqrt{12}} \quad (\text{B.2})$$

となる．これは，ピクセル検出器の典型的な位置分解能期待値を求める式であるが，多重散乱による分布のばらつきや重心計算による精度向上を考慮していない点には注意が必要である．

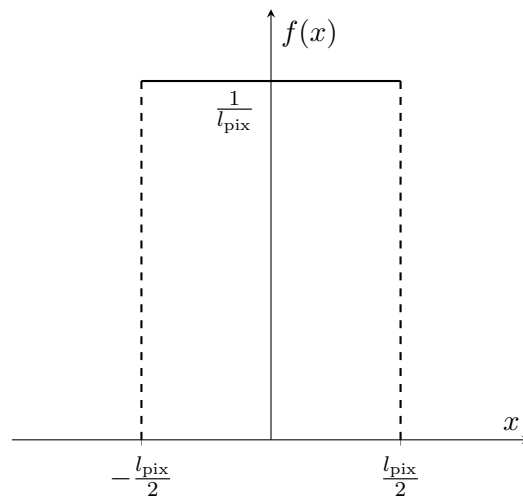


図 B.1: 一様分布の確率密度関数