

卒 業 論 文

荷電粒子モニタを用いたビーム  
プロファイル測定と  
電磁シャワー観測

2026年3月6日

足立 悠介

原 佑

矢野 巧巳

横川 尚弘

神戸大学 理学部 物理学科  
粒子物理学研究室



# 概要

本研究は KEK 筑波キャンパス PF-AR(Photon Factory-Advanced Ring for Pulse X-ray) に設置されている KEK 測定器開発テストビームラインにおいて、製作した荷電粒子の位置分布検出器の性能評価を行うことを目的とした。製作においては、テストビーム環境において有効に機能する検出器を目指した。測定を始めるにあたり、検出器の、領域別の検出効率を算出するために、電子ビームによるスキャンを実施した。その結果、検出器の中心部で、98% 以上の高検出効率を達成した。それと並行して、検出効率による補正を施し、実際にビーム形状の測定実験を行った。これに加えて、検出器の前に遮蔽体として銅板を置くことで、物質による散乱の影響について測定を行った。この結果、銅板による電子の散乱を確認できた。

# 目次

第1章	序論	1
第2章	KEK 測定器開発テストビームライン	2
2.1	KEK PF-AR	2
2.2	テストビームラインのビーム生成および輸送方法	2
第3章	ストリップシンチレータ検出器	7
3.1	検出器のコンセプトと設計	7
3.2	波形記録装置 Cosmo-Z と光検出器 MPPC	10
3.2.1	Cosmo-Z	10
3.2.2	MPPC	11
3.3	読み出し回路	12
3.4	ADC 光電子変換	13
3.5	測定時のセットアップ	15
第4章	検出器の性能評価・較正	17
4.1	MIP(最小電離粒子)による評価	17
4.2	シンチレーション光のスペクトルによるヒット判定の定義	20
4.3	検出効率による性能評価・較正	20
4.3.1	検出効率スキャン	20
4.3.2	検出効率スキャンの解析	25
4.3.3	有感領域端部の検出効率について	25
第5章	ビーム形状測定実験の解析と結果	29
5.1	実験のセットアップ	29
5.2	実際のビーム形状についての議論	30
5.3	Geant4によるシミュレーションについて	30
5.4	Geant4によるシミュレーションと実際のビーム形状との比較	32

第6章	電磁シャワーおよび散乱測定実験	37
6.1	電磁シャワー生成の原理 . . . . .	37
6.2	実験のセットアップ . . . . .	37
6.3	解析方法 . . . . .	39
6.4	結果 . . . . .	40
第7章	結論	43

# 第1章 序論

素粒子物理学実験において、荷電粒子の位置情報を高精度に測定することは重要であり、それを可能にする高性能な荷電粒子の位置分布モニタの開発が求められる。テストビーム実験は、実際の素粒子実験環境とは独立した条件下で検出器の動作確認を行うための重要な手段の一つであり、加速器施設から供給される電子や陽子などのビームを利用する。これにより、検出器単体の性能を詳細に把握することが可能となる。

本研究では、直交2層のプラスチックシンチレータストリップ構造を採用した二次元位置分布モニタを開発し、その性能評価を目的として、KEK つくばキャンパスに設置された測定器開発テストビームラインにてテストビーム実験を実施した。本検出器の有感領域は  $64\text{ mm} \times 64\text{ mm}$  で、この範囲にわたる粒子分布の測定が可能である。この検出器を用いて、以下の評価を行った。

- 電子ビームの位置分布（ビームプロファイル）の測定
- 検出領域内における検出効率の位置依存性
- 物質によるビームへの影響の観測および分布への寄与

これらを通じて、本検出器が荷電粒子モニタとして有効に機能するかを検証した。

## 第2章 KEK測定器開発テスト ビームライン

本研究では、KEKつくばキャンパス内にあるPF-AR (Photon Factory Advanced Ring for Pulse X-Ray、図 2.1) の測定器開発テストビームラインで実験を行った。本章では、そのビームラインの詳細について説明する。

### 2.1 KEK PF-AR

KEKは日本における加速器科学の中核研究機関であり、素粒子物理学、物質構造科学、加速器科学など幅広い分野の研究を推進している。PF-ARは電子蓄積リング型加速器であり、主に放射光実験に利用されるが、テストビーム実験にも利用可能な環境を提供している。

PF-ARでは、線形加速器(LINAC)によって加速された電子を蓄積リングに入射し、磁場によって円軌道を描かせることで高エネルギー電子ビームを安定に周回させる。電子は偏向電磁石によって曲げられる際にシンクロトロン放射を起こすが、そのエネルギー損失は高周波(RF)空洞によって再加速されて元に戻される。このエネルギー補償機構により、電子ビームは長時間にわたり安定した運転が可能である。PF-ARは蓄積リング型加速器であるため、時間的に安定したビーム供給が可能であり、荷電粒子モニタの性能の系統的評価に適した環境を有している。

### 2.2 テストビームラインのビーム生成および輸送方法

テストビームラインには電子が供給されるが、本ビームラインではまず、PF-ARの高エネルギー電子ビームの一部をワイヤターゲットに入射



図 2.1: KEK つくばキャンパスの航空写真 (2023 年) [1]。赤線で囲われた部分が今回実験を行った PF-AR である。

させ、そこで発生する制動放射ガンマ線を利用して電子・陽電子対を生成することで、電子ビームを取り出している。具体的には以下のとおりである。

最初に、加速器から供給される高エネルギー電子ビームの中心から十分離れたビームの位置分布のテールに当たる部分に、細い金属ワイヤからなるワイヤターゲットを挿入する。電子がワイヤ内部の原子核のクーロン場によって急激に減速されると、制動放射が発生し、高エネルギーのガンマ線が放出される。このワイヤターゲットの概略図を図 2.2 に示す。この機構によって入射電子の進行方向に沿ったガンマ線束を生成することができる。

次に、このようにして生成されたガンマ線を銅製のコンバータへ入射させる。このコンバータの概略を図 2.3 に示す。コンバータ内部では、ガンマ線が原子核のクーロン場と相互作用することで、電子陽電子対生成が起こる。生成された電子は、ビームとして取り出され、実験装置が設置されたテストビームエリアへ導かれる。その輸送系は次に示すもので構成される。

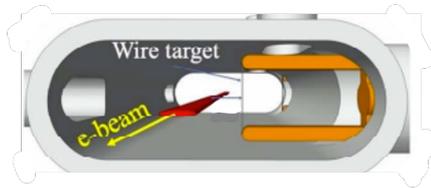


図 2.2: ワイヤターゲットの概略図 [2]

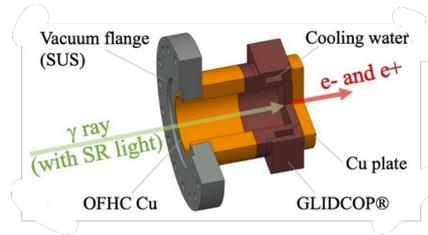


図 2.3: コンバータの概略図 [2]

- 四重極電磁石 (Q マグネット)
- 双極電磁石 (B マグネット)
- コリメータ

これらを組み合わせることでビームの軌道、運動量、および空間分布を制御する。これらのそれぞれの役割は、以下のとおりである。

まず、最初の四重極電磁石によって、ビームの横方向の広がり調整される。四重極電磁石の概略図を図 2.5 に示す。四重極電磁石は、置き方により、QF (Focus) および QD (Defocus) の二種類の働きがある。図 2.5 に示したのは、QF マグネットである。この磁場中を運動する電子は Lorentz 力を受け、 $x$  方向には収束し、 $y$  方向には発散する。一方、QD マグネットでは極性配置が逆となるため、電子ビームは  $x$  方向では発散し、 $y$  方向には収束する。このような収束と発散の作用を組み合わせることで、ビームの横方向の広がりを一定範囲に抑えながら、ビームを輸送することができる。

次に、電子ビームを双極電磁石に導く。双極電磁石の概略図を図 2.6 に示す。この磁場中を運動する電子は Lorentz 力を受け、円弧状の軌道を描きながら進行方向が曲げられる。このとき、電子の軌道半径  $r$  は

$$r = \frac{p}{qB} \quad (2.1)$$

で表される。ここで、 $p$  は電子の運動量、 $q$  は電子の電荷、 $B$  は磁束密度である。式 (2.1) から、電子の軌道半径は運動量および磁場の強さに依存することが分かる。したがって、双極電磁石の磁場強度を調整することで、特定の運動量を持つ電子を選択的にビームラインへ導くことが可能となる。

その後、再び四重極電磁石によってビームの収束条件が調整される。双極電磁石による軌道偏向の後には、ビームの空間分布が変化するため、四

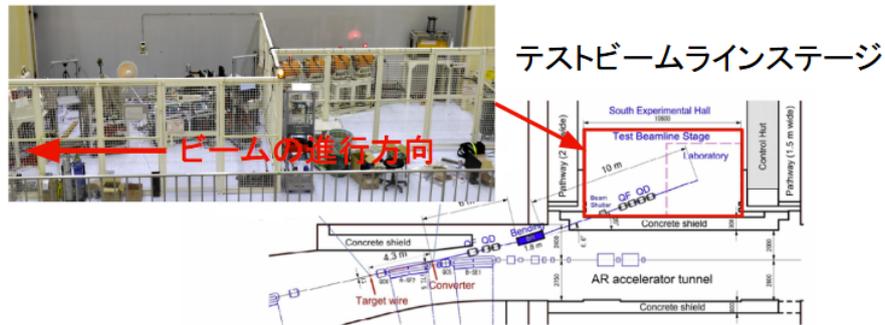


図 2.4: テストビームラインを上から眺めた図とビームステージの写真 [2]

重極電磁石を用いてビームサイズを再度整形することで、安定したビーム輸送が実現される。

続いて、コリメータによってビームの空間的な広がりを制限する。コリメータは開口部を持つ遮蔽体であり、所定の軌道から外れた粒子を除去することで、ビームの形状および広がりを整える役割を持つ。

最後に、下流に配置された四重極電磁石によってビームサイズの最終調整が行われる。この段階で、ビームの横方向分布が実験条件に適した形状となるように調整され、電子ビームは検出器へと照射される。

本研究では、荷電粒子の位置分布モニタに入射する電子ビームの、ビーム進行方向に垂直な面における二次元位置分布の広がりを測定した。本実験では約 3 GeV の電子ビームを使用し、ビームレートは約 2.1 kHz であった。

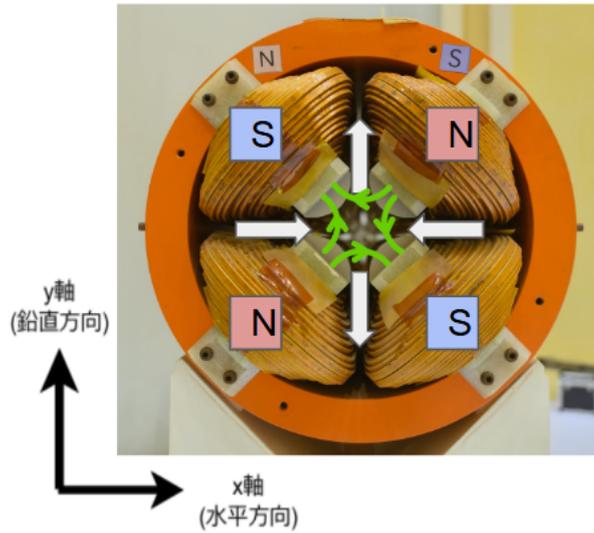


図 2.5: Q マグネットの写真。QF の場合、N 極と S 極を上記のように配置する。磁場は緑色の矢印の方向に発生し、電子は白色の矢印の方向に力を受ける [3]。

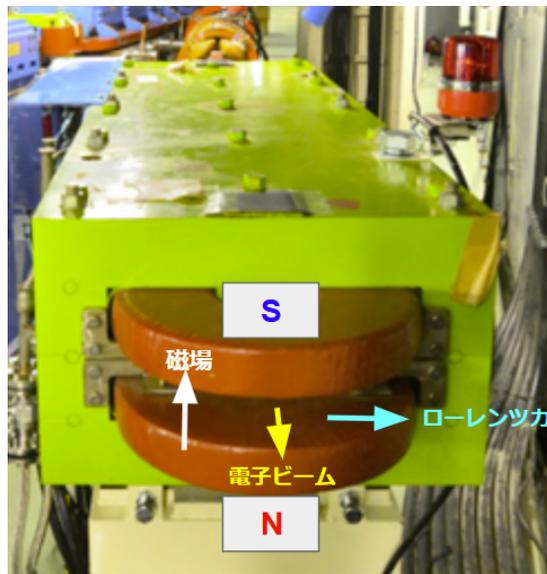


図 2.6: B マグネットの写真。オレンジの円が B マグネット。白色の矢印は磁場の方向、黄色は電子ビームの進行方向、水色はローレンツ力の方向を表している [3]。

# 第3章 ストリップシンチレータ 検出器

この章では、本研究で製作したストリップシンチレータ検出器およびデータの読み出しに使用した装置について述べる。

## 3.1 検出器のコンセプトと設計

先行研究より、テストビームラインにおける電子ビームは、上下方向に数 cm の広がりを持つことが確認されている [3]。そのため、数 cm 四方程度の有感領域を有し、数 mm の分解能を持つ位置分布モニタの作成を目標とした。

荷電粒子が物質中を通過する際、クーロン相互作用により物質中の原子を励起、もしくは電離させる。その結果として、粒子はエネルギーを損失する。

この粒子の落としたエネルギーを信号として読み出すための検出器を作成した。検出器作成にはプラスチックシンチレータを用いた。

プラスチックシンチレータでは、荷電粒子の通過によって励起された分子が脱励起する過程で可視光（シンチレーション光）が放出される。発生光子数は入射粒子のエネルギー損失  $dE/dx$  におおむね比例する。生成された光はシンチレータ内部で反射を繰り返しながらストリップ端部へと導かれ、そこで光検出器によって電気信号へ変換される。この仕組みにより、荷電粒子の通過を電気信号として検出することが可能となる。本研究で製作した検出器の外観を図 3.1 に示す。

本研究で開発した荷電粒子モニタは、プラスチックシンチレータストリップを、直交する 2 層構造として配置したものである。外観を図 3.1 に示す。電子が検出器を通過すると、上層と下層それぞれの 1 本（もしくは隣接複数本）のプラスチックストリップシンチレータが発光する。有感領域は  $64\text{ mm} \times 64\text{ mm}$  である（図 3.2）。



図 3.1: 作成したシンチレータストリップ検出器の外観

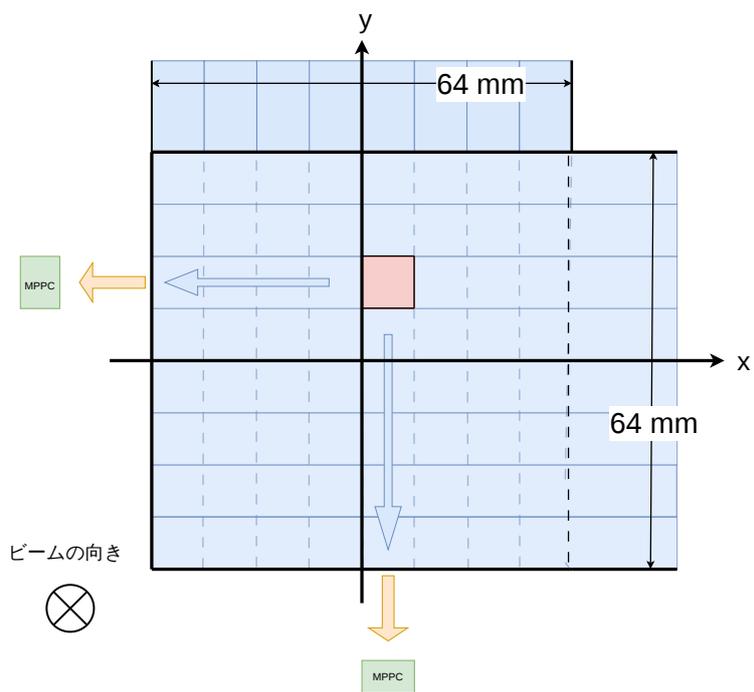


図 3.2: 検出器の読み出し機構と、検出器上の Local 座標

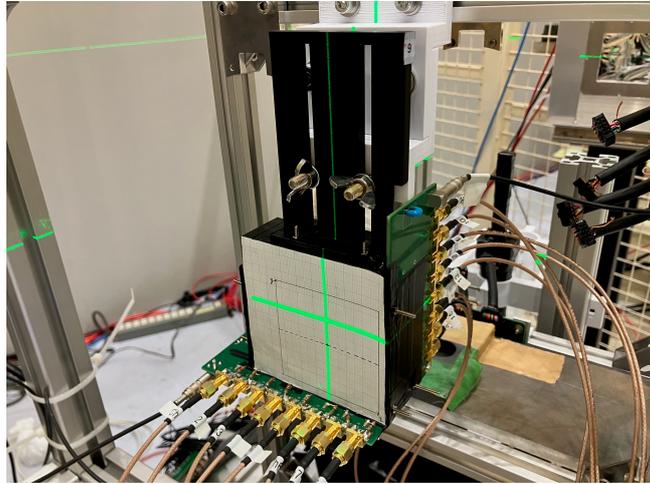


図 3.3: 検出器の様子

本研究では、各シンチレータストリップからのヒット情報を取得し、ヒットマップを作成することでビームプロファイルを評価した。

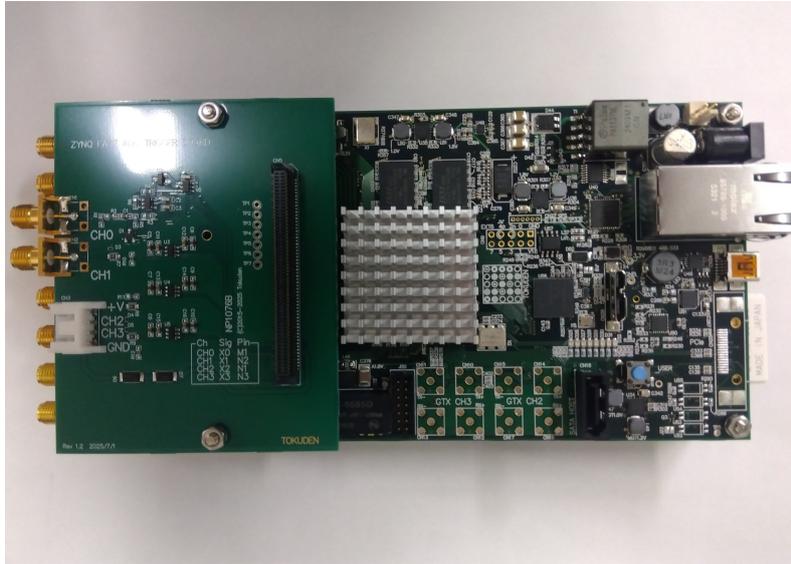


図 3.4: Cosmo-Z

## 3.2 波形記録装置 Cosmo-Z と光検出器 MPPC

### 3.2.1 Cosmo-Z

本研究では、検出器から出力されるアナログ信号をデジタル信号へ変換し、データとして記録するモジュールとして、特殊電子回路株式会社 ([4]) が開発した Cosmo-Z (図 3.4) を用いた。Cosmo-Z は信号の増幅、閾値判定、デジタル化を行い、イベント単位で信号波形を記録する装置である。また、12 bit 分解能、80 MHz のサンプリングレートを有するアナログ - デジタル変換器 (ADC) を内蔵している。閾値設定によりノイズ信号を低減し、有効なヒットを記録することが可能である。

本実験で取得する信号は、数十 ns 幅の電圧パルスとして、Cosmo-Z のアナログ入力端子へ送られる。装置内部では ADC によって、時間ごとのデジタル値として保存される。Cosmo-Z は 3 層構造の基板から構成される。メインボードと拡張ボード合わせて 16 ch の信号を取得可能である。また、中央のメインボードではデータ処理やデジタル制御も行い、拡張ボードの一つではトリガー信号の入力や外部機器との同期を行う。本研究では、ビームトリガーやトリガーシンチのコインシデンスをトリガー信号として拡張ボードへ入力し、そのタイミングを基準として信号を取得した。

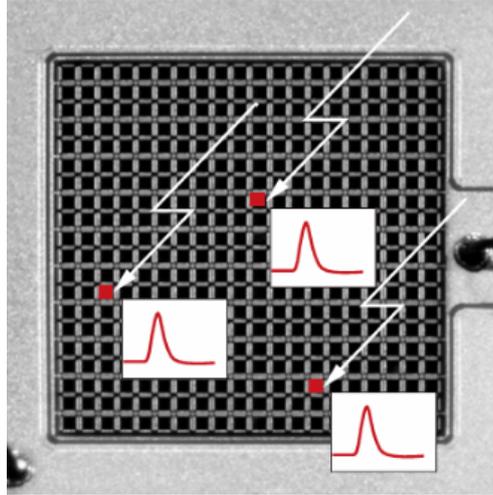


図 3.5: MPPC の受光面 [5]

### 3.2.2 MPPC

Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) は、浜松ホトニクスが製造する SiPM の商品名であり、受光面に入射した光量をパルス状の電気信号に変換する装置である。受光面には多数の Avalanche Photo Diode(APD) が図 3.5 のようにピクセル状に備え付けられている。ダイオードに逆電圧をかけると、半導体内に大きな電場が生じることで電子雪崩が起き、信号を増幅する。入射する光子数が APD の数より十分小さい時には、微細な 1 つの APD に対して 1 つの光子のみが入射すると考えられる。APD に光が入射すると一定の飽和信号を出すように、ガイガーモードでの増幅が起こるような高い電圧を印加する。すると MPPC の出力信号は飽和信号単位で検出され、何個の APD で光電子が発生したのかが分かる。

半導体内部では、光によって生成されたキャリアだけではなく、熱的に発生したキャリアによっても電流が発生する。これを暗電流（ダークカレント）と言い、ノイズの主要因である。

本実験の検出器で使用した MPPC の性能は以下の通りとなる。

- MPPC 型番：S13360 – 3050PE
- 受光面：3.0 mm × 3.0 mm
- ピクセル数：3600
- 検出効率 (Photon Detection Efficiency)：約 40%

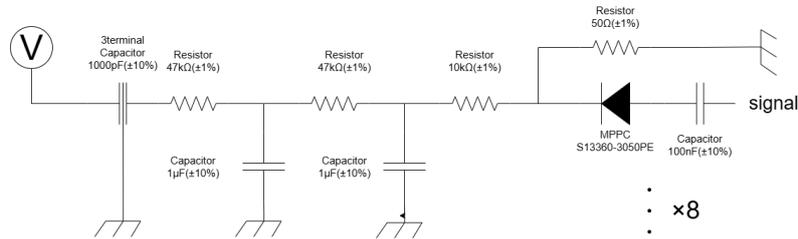


図 3.6: 基板の電気回路



図 3.7: 基盤の写真

右側に並んでいるのが MPPC であり、左側に並んでいるのはチップ型のコンデンサーやレジスタによるフィルターである。

- ガイガーモードを生じる降伏電圧： $53 \pm 5$  V

本検出器では、MPPC をシンチレータ端部に取り付けることで、シンチレーション光を検出する。

### 3.3 読み出し回路

MPPC に降伏電圧を印加するための電源電圧には、高周波のノイズが含まれている。MPPC は、このような高周波ノイズに敏感であり、ノイズを除去しない状態で MPPC に電圧をかけるとゲインに揺らぎが発生する。よって、ノイズを除去する目的で、3 端子コンデンサーと、2 層のローパスフィルターを装着する。信号読み出し回路を図 3.6 に示す。この回路図がデザインされた基板が図 3.7 である。図 3.7 の左側が、3 端子キャパシタをはじめとするフィルター回路が実装、右側には 8 個の MPPC が実

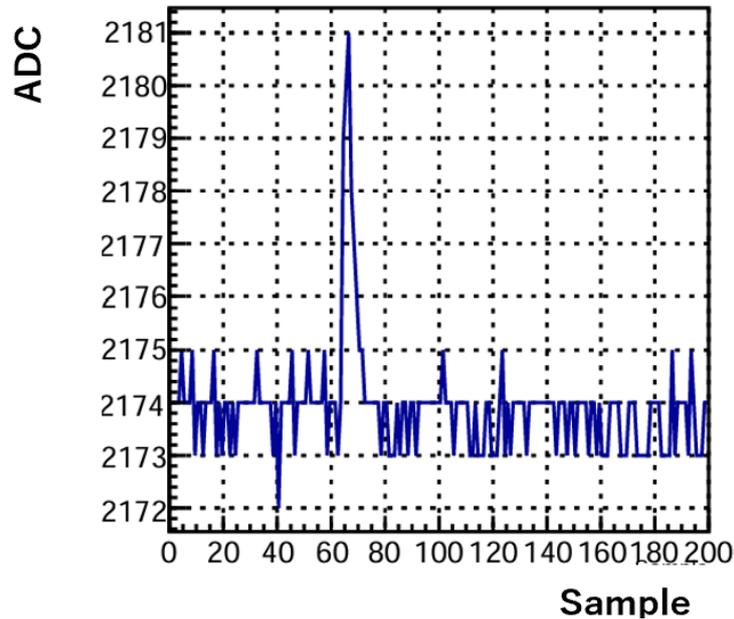


図 3.8: LED を照射した際の MPPC の 1event 分の波形

装されている。それぞれの MPPC から出た信号は、基板株の SMA コネクタを経由して読み出すことができる。また、外部からのノイズが信号にのらないようにするために、GND ビア等を信号ラインの周辺に多数設置した。また、信号の大きさを Cosmo-Z の入力スケールの範囲内に抑える目的で、コンデンサーを設置している。

### 3.4 ADC 光電子変換

MPPC に LED を照射し、信号を Cosmo-Z で読み出すと、図 3.8 の様な波形を得ることができる。この図は横軸 Sample、縦軸 ADC 値のヒストグラムであり、これを横軸 ADC 値、縦軸イベント数でヒストグラムを作成することで図 3.9 のような分布が得られる。積分 ADC 値 50 と 250 付近に見られるピークが光電子数に対応している可能性がある。MPPC の出力する信号は MPPC 内にある 1 ピクセルの APD 飽和信号を足し合わせたものであるから、本来各ピーク間は一定となり、ADC 値と光電子数の関係は 1 次関数で表せるはずである。もしそれが成り立っていれば、各 ch についてこの関係を求め、本実験の結果である ADC 値を光電子数に変換することができる。ただ、実際には図 3.9 からそのような等間隔のピー

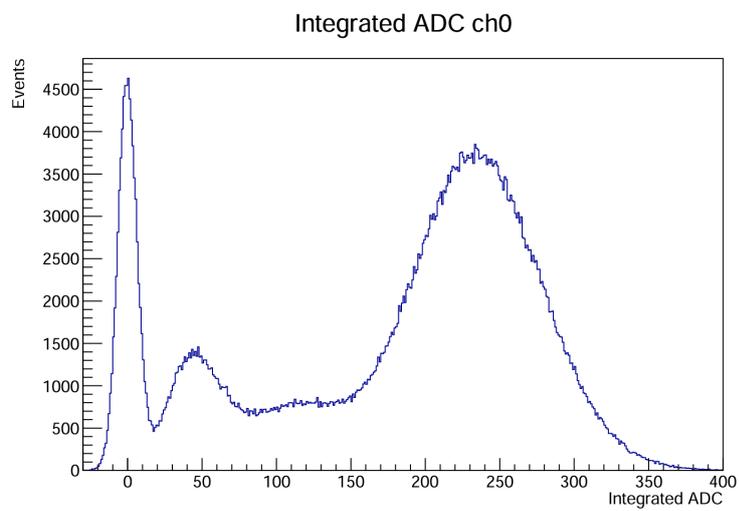


図 3.9: ch0 における LED による信号の分布

クは観測されず、これらのピークは各光電子数に対するピークではない可能性が高い。

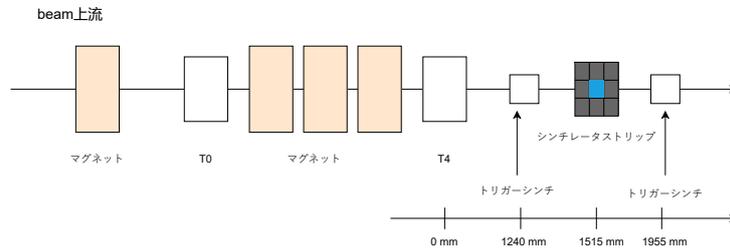


図 3.10: セットアップの一例

### 3.5 測定時のセットアップ

測定時のセットアップの一例を図 3.10 に示す。今実験ではマグネットの上流に設置されている  $T_0$  シンチレータ、マグネットの後方にある  $T_4$  シンチレータ、シンチレータストリップ、シンチレータストリップより上流にある上流トリガーシンチレータ、下流にある下流トリガーシンチレータによって全体のセットアップを構成する。 $T_0$  シンチレータは、ビームシャッターが開き、ビームがステージに来たことを確認するために用いている。 $T_4$  シンチレータはマグネットを通過したビームを選別するために用いる。上流、下流トリガーシンチレータは、1 cm 角のプラスチックシンチレータであり、ビームが指定した範囲を検出器の受光面に対して垂直に通過したことを示すトリガー信号を発行する。

以下の図 3.11 に読み出しのロジック回路を示す。この回路中にあるコインシデンスモジュールによって、トリガー条件をスイッチで切り替えながら、トリガー条件に合わせたデータ取得を可能にする。コインシデンスの出力に対して、適切な delay をかけた (上流トリガーシンチレータには 100ns、下流トリガーシンチレータには 24ns 信号を遅らせる) 状態で、Cosmo-Z にトリガーを入力する。また、コインシデンス出力に delay をかけた信号をコインシデンスの veto に入力することで Cosmo-Z が信号を読み出している時間内に次のトリガーが発行されないようにした。

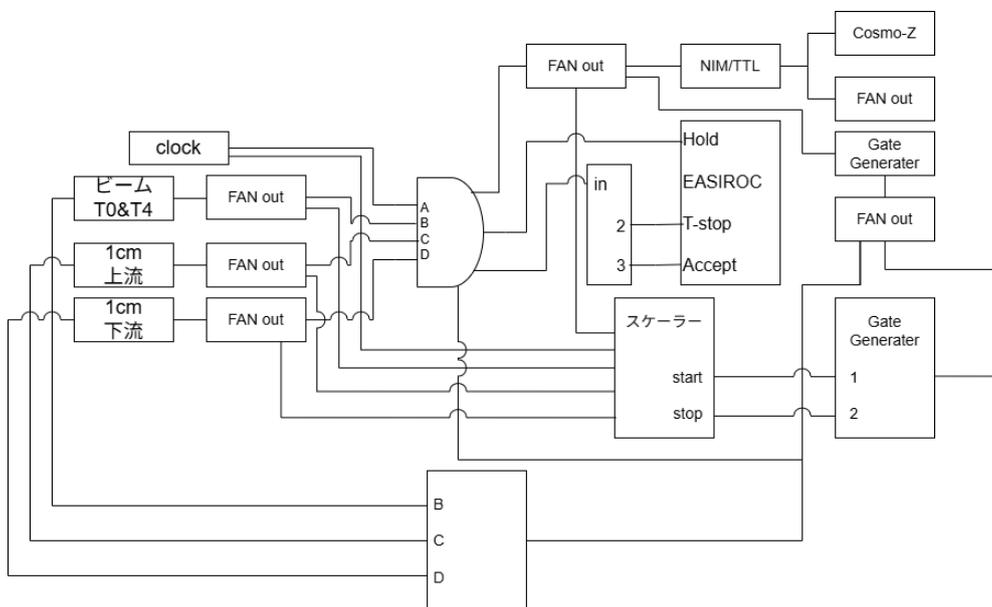


図 3.11: 読み出しロジック回路

## 第4章 検出器の性能評価・較正

### 4.1 MIP(最小電離粒子)による評価

シンチレータに電子ビームが当たった際、MPPCがどれだけの光電子を生成するかを調べる。光電子数の評価にはMIP(Minimum Ionizing Particle)を使用する。荷電粒子が物質中を通過するとき失う平均エネルギーは、以下のBethe-Blochの式[6]で表される。

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = Kz^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$K \simeq 0.307 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$ 、 $z$ は入射粒子の電荷量、 $Z, A$ を媒質の原子番号・質量数、 $\beta = b/c$ 、 $\gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}}$ 、 $m_e$ を電子質量、 $c$ を光速、 $I$ は媒質の平均励起エネルギーである。

Bethe-Blochの曲線(図4.1)において、エネルギー損失が最小になる速度領域があり、この時の粒子をMIP(Minimum Ionizing Particle)と呼び、粒子の運動エネルギーがその質量と比べてかなり高い領域となる。MIPはその名のとおりに、物質を通過する時のエネルギー損失が最も少なく、その値に信号のピークが観測されることが多いため、検出器で検出される信号の基準として、MIP通過時のエネルギーを評価した。

まず、上流トリガーシンチレータ、下流トリガーシンチレータ、ビームトリガーのコインシデンストリガーをかけた。ビームが各チャンネルのシンチレータ中央部に当たっている際の積分ADC値のピークの値をMIPとする。そうして得られたグラフが図4.2である。

各チャンネルにおいてMIP通過によるエネルギー損失をチャンネルごとに比較すると、以下の図4.3となる。これをもとにチャンネル間のゲイン差を補正することによって、各チャンネルの検出器応答を一様に、つまり検出器が較正された状態にすることができる。

また、ゲインがビームのヒット位置とMPPCの距離に依存しているかを確かめると以下の図4.4のようになる。このグラフでは横軸が電子ビー

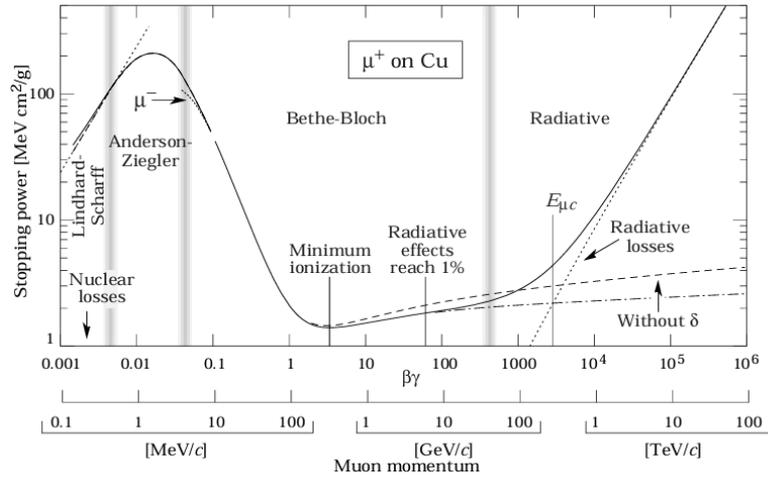


図 4.1: Bethe-bloch に基づく粒子の平均エネルギー損失 [6]

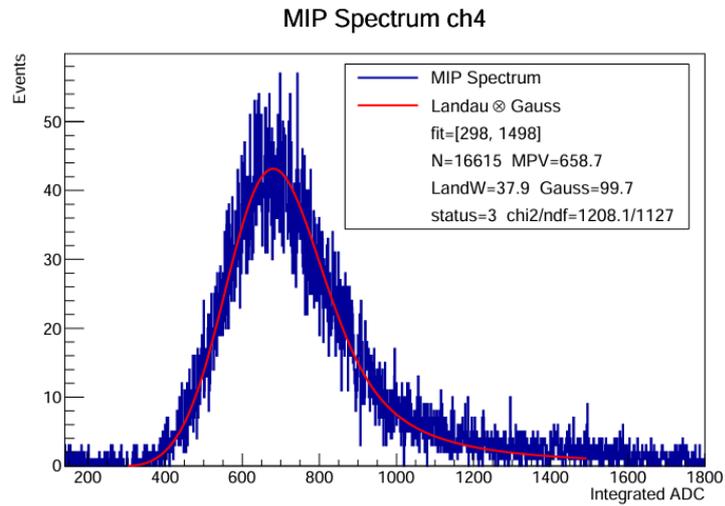


図 4.2: ch4 の積分 ADC 値の分布

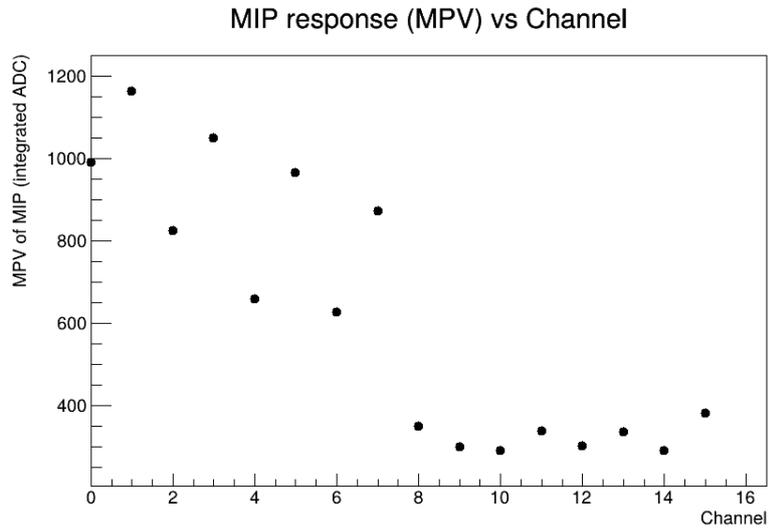


図 4.3: 各チャンネルの MIP の値

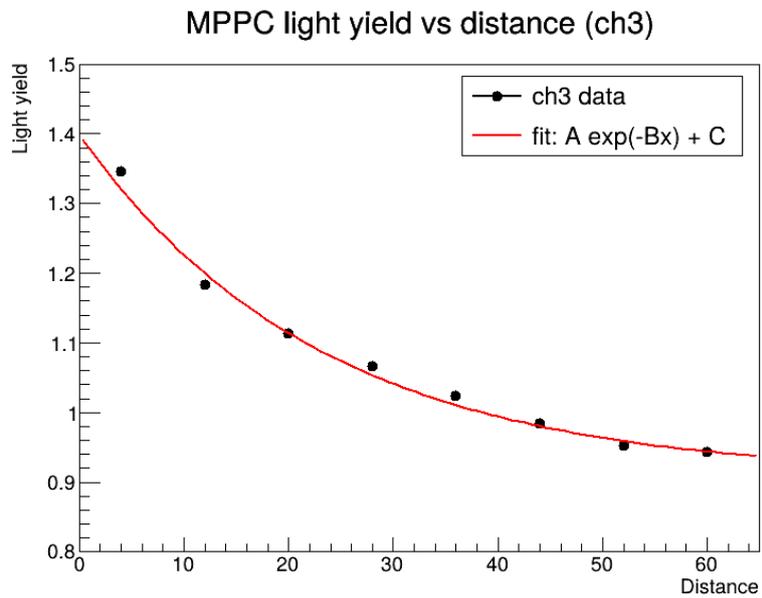


図 4.4: ゲインの距離依存性

ムのヒット位置と MPPC の距離、縦軸には光量を表している。距離が離れるにつれて光量が減少することがわかる。

これより、検出器の座標によつてのゲイン差を補正することができる。

## 4.2 シンチレーション光のスペクトルによるヒット判定の定義

MPPC から検出された波形の解析手順について述べる。図 4.5 に、検出された波形の例を示す。

まず、各イベントにおいて、波形のペDESTAL を補正する。そのため、波形が立ち上がる前の、最初の 10 samples の平均値をペDESTAL と定義し、その値を全体から除いた。次に、ペDESTAL 区間に続く 25 samples の範囲で ADC 値を積分し、これを電荷量とした。得られた電荷量は、MIP 換算を行い評価する。図 4.6 に、こうして得られた電荷量の分布を示す。0 付近にペDESTAL ピークがあり、その後にもう一度、波形のピークが現れる。これが粒子の通過によつて生じた電荷に対応する成分と考えられる。

ペDESTAL ピークと通過粒子のピークを識別するために、ペDESTAL ピークの平均値を求め、そこから  $5\sigma$  離れた値を閾値とし、これ以上の値を持つイベントをヒットとみなした。

## 4.3 検出効率による性能評価・較正

本検出器を用いた測定から、物理現象を正確に再構成するためには、検出器の検出効率を正確に評価することが肝要である。そこで、電子ビームに対する応答に補正を加えるために、検出器の検出効率を評価した。

### 4.3.1 検出効率スキャン

本検出器の検出効率を評価するために、図 4.7 に示すセットアップで、測定を実施した。この測定では、図 4.8 に示すように、検出器を挟むように設置された 1 cm 角トリガーシンチレータを要求してトリガー領域を絞り、検出器を 4 mm ずつ動かすことにより、トリガー領域を検出器内で移

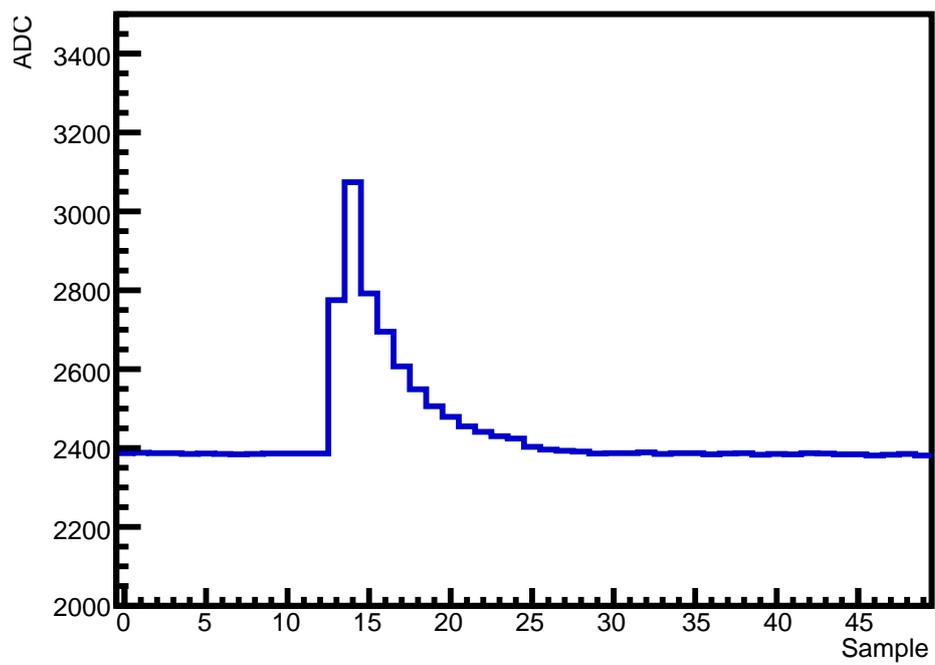


図 4.5: DAQ システムから得られた波形

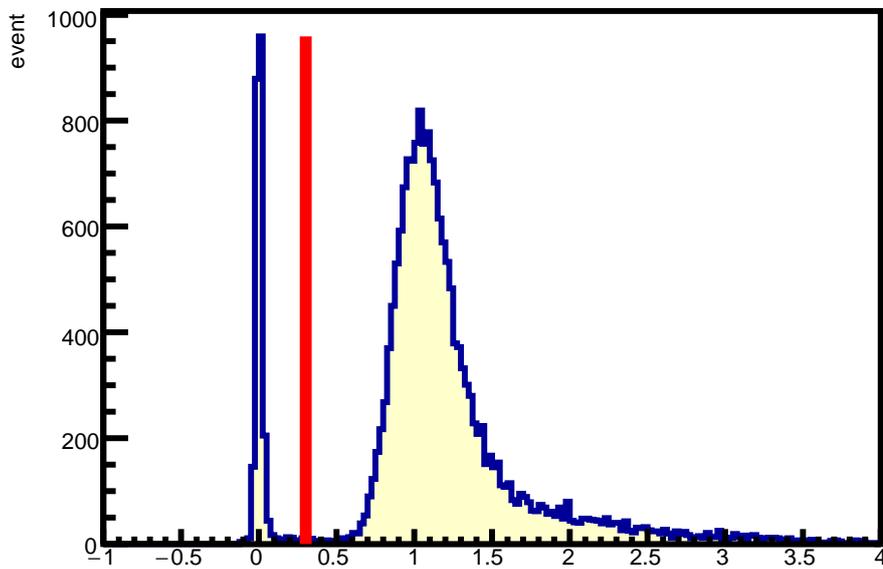


図 4.6: ヒット判定に用いた、電荷量のプロット。0 付近にペデスタルピークが立ち上がっている。閾値を赤線で示した。

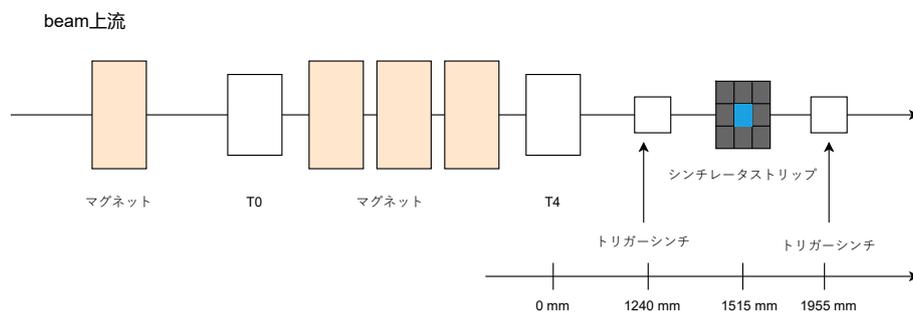


図 4.7: 検出効率スキンのセットアップの模式図。検出器の前後に 1 cm 角トリガーシンチレータでの粒子検出を要求している。

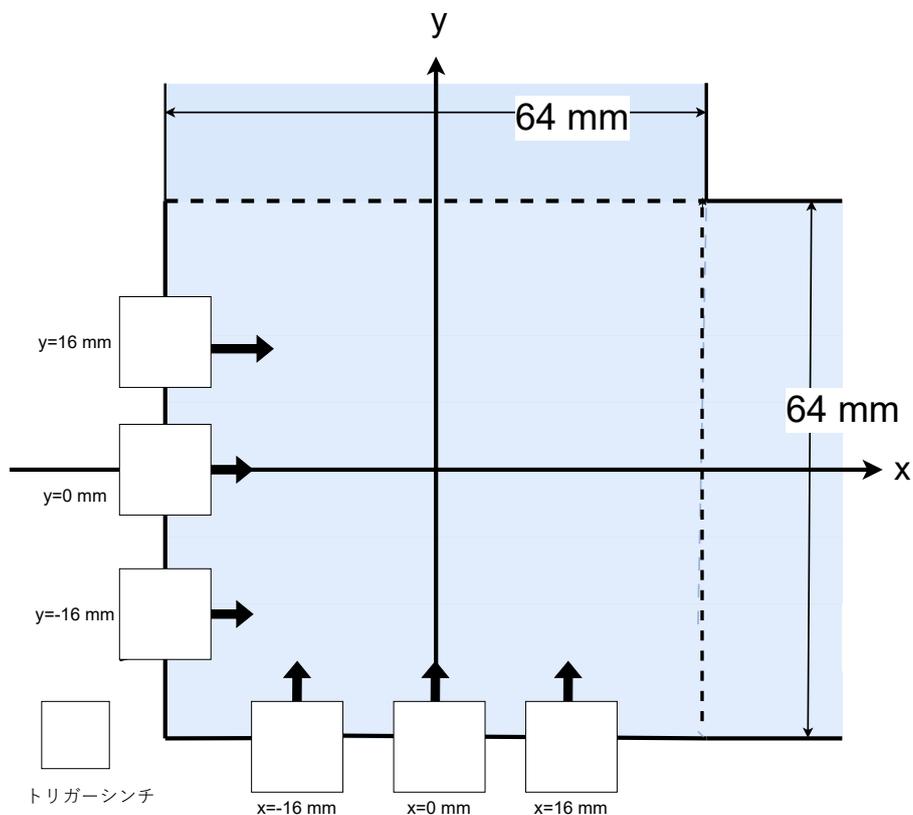


図 4.8: 検出効率スキンの位置。検出器の Local 座標上の、 $x = 0, \pm 16$  mm にトリガーカウンタを固定し、 $y$  座標を 4 mm ずつ移動するように検出器を動かす。また、 $y = 0, \pm 16$  mm にトリガーカウンタを固定し、 $x$  座標を 4 mm ずつ移動するように検出器を動かす。

動かせることで、検出器領域内全体を測定した。各 run に対して、20000 イベントを取得した。

各 run によって得られる検出効率  $\varepsilon$  を、以下のように定義する。

$$\varepsilon \equiv \frac{\text{ヒットと判定された事象数}}{\text{トリガー事象数}}$$

実際に、 $y$  座標を  $y = 0, \pm 16$  mm に固定し、 $x = -32 \sim 32$  mm までを 4 mm ずつスキャンすることによって求められた  $\varepsilon_y(x)$  の値を、図 4.9 に示す。スキャンの各点間は、距離の加重平均で補完する。

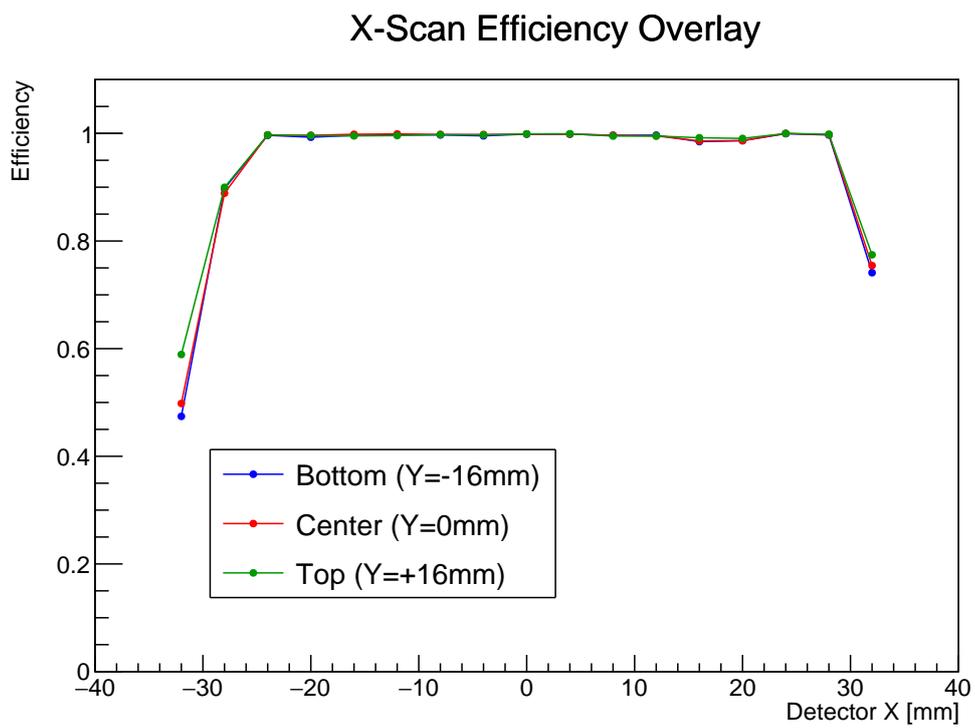


図 4.9:  $y = -16, 0, 16$  mm における検出効率スキャン。縦軸が  $\varepsilon_y(x)$ 、横軸が  $x$  座標。

### 4.3.2 検出効率スキヤンの解析

節 4.3.1 にて、検出効率スキヤンの概要について述べた。

図 4.9 を参照すると、 $-26 \leq x \leq 30$  mm において、 $\varepsilon > 99\%$  とわかる。この領域において、検出効率の  $x$  座標依存性はほぼ見られなかった。また、 $x$  座標を固定し、 $y$  軸方向にスキヤンすることによって得られる  $\varepsilon_y(x)$  についても、同様の傾向が見られた (図 4.10)。

$x$  座標を固定し、 $y$  軸方向にスキヤンすることによって得られる  $\varepsilon_y(x)$  と、 $y$  座標を固定し、 $x$  軸方向にスキヤンすることによって得られる  $\varepsilon_x(y)$  とは、互いに独立であると考えられる。これを仮定すると、検出器の Local 座標  $(x, y)$  における検出効率  $\varepsilon(x, y)$  は、

$$\varepsilon \equiv \varepsilon(x, y) = \varepsilon_x(y) \times \varepsilon_y(x)$$

となる。スキヤン領域外は、スキヤンした点の、距離の加重平均によって補完する。検出器の各セルについて、 $\varepsilon$  を図 4.11 に示す。

図 4.11 に示したように、検出効率  $\varepsilon$  は、有効範囲  $-26 \leq x, y \leq 30$  mm で、 $\varepsilon > 98\%$  を達成した。以降の議論では、今得られた  $\varepsilon$  を用いて、下記のようにヒット数を補正する。

$$\text{真のヒット数} = \text{観測されたヒット数} \times \frac{1}{\varepsilon}$$

### 4.3.3 有感領域端部の検出効率について

以上に述べたように、本検出器は、有効範囲  $-26 \leq x, y \leq 30$  mm の範囲で、 $\varepsilon > 98\%$  を達成した。しかしながら、図 4.11 からわかるように、有感領域端部においては、 $\varepsilon$  の値の低下がみられた。このことは、図 4.12 に示すような理由により、検出効率の正確な評価ができていないことによると考えられる。現時点では、今回のスキヤン方法で正確に評価できた  $-26 \leq x, y \leq 30$  mm を有効範囲として議論を進める。

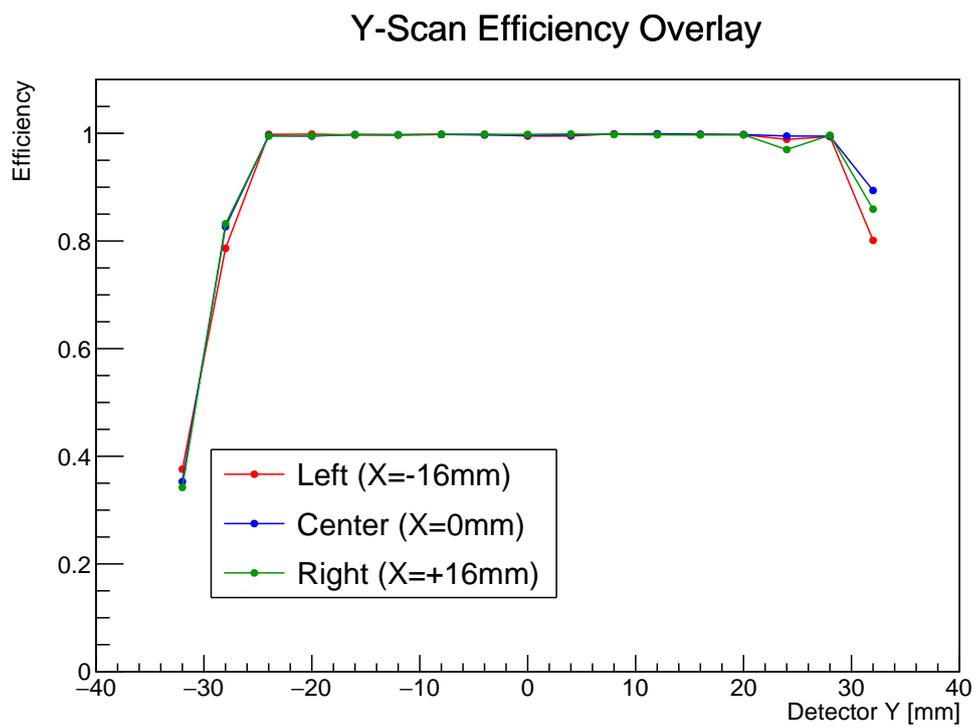


図 4.10:  $x = -16, 0, 16$  mm における検出効率スキャン。縦軸が  $\varepsilon_x(y)$ 、横軸が  $y$  座標。

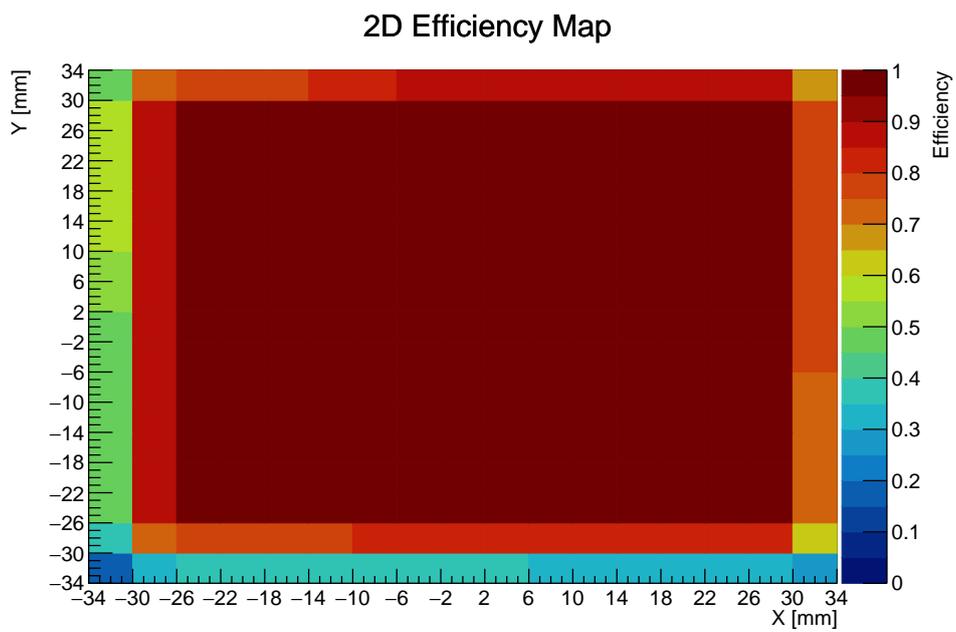


図 4.11: 本シンチレータストリップ検出器の、各セルごとの検出効率  $\varepsilon$  を領域ごとに示した検出効率マップ。

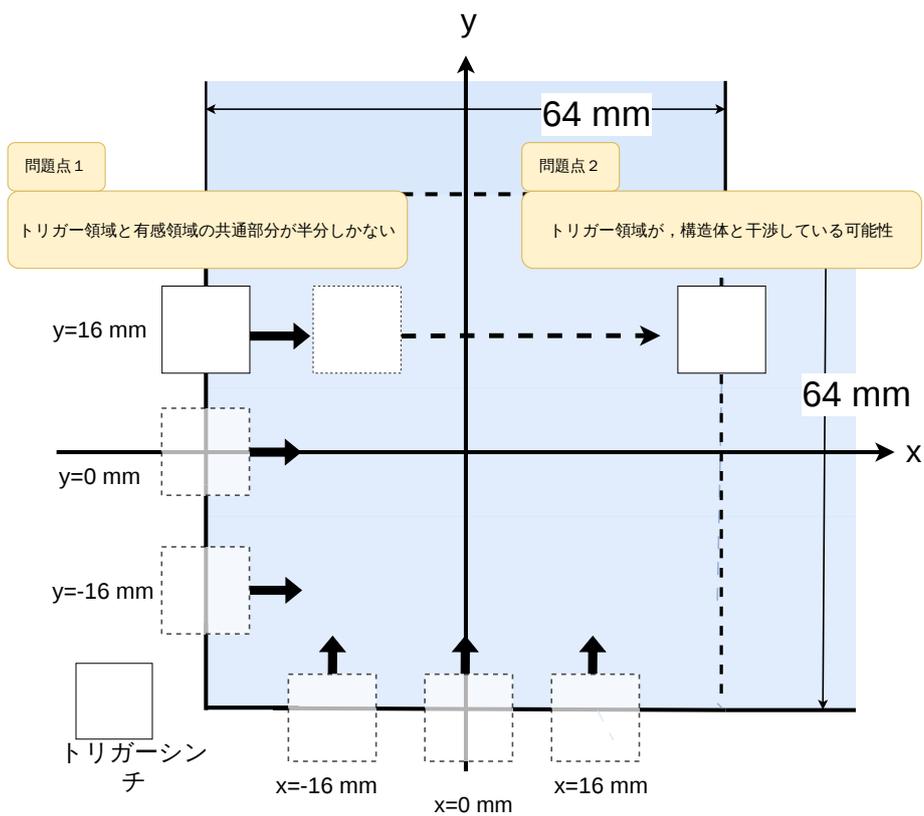


図 4.12: 今回行った検出効率測定に関する問題点。MPPC 側 ( $x = -32 \text{ mm}$  と  $y = -32 \text{ mm}$ ) では、トリガー領域と検出器の有感領域の共通部分が半分しかない。また、 $x = 32 \text{ mm}$  と  $y = 32 \text{ mm}$  側では、トリガー領域が、検出器を形作る構造体と干渉してしまっている可能性がある。

# 第5章 ビーム形状測定実験の解析と結果

本章では、第3章で製作した検出器を用いて測定した、ビーム形状の詳細について述べる。また、放射線シミュレーションプログラム「Geant4」を用いたシミュレーションとの比較についても論じる。

## 5.1 実験のセットアップ

実際のビーム形状を測定するにあたって、図5.1に示すセットアップで測定を行った。本測定では、座標 $z$ を $T_4$ からの距離として定めた。

トリガーとして、ビームトリガー $T_0$  &  $T_4$ を要求した。検出器は、 $z = 1515 \text{ mm}$  と  $z = 1605 \text{ mm}$  の二か所で測定を行った。

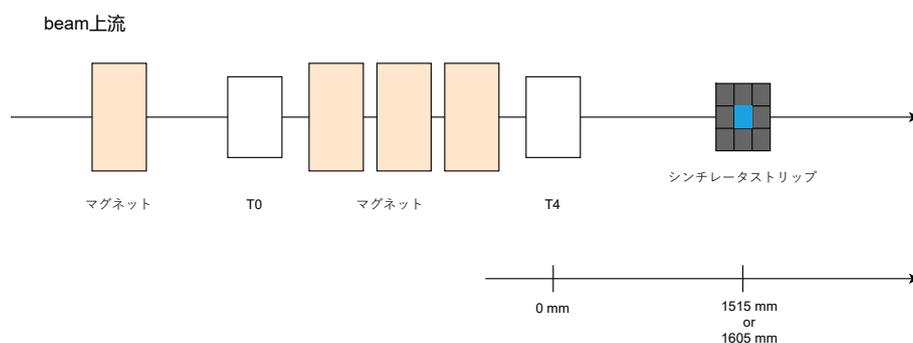


図 5.1: ビーム形状測定の設定アップ図。

## 5.2 実際のビーム形状についての議論

各セルごとに、検出効率による補正を行い、ビーム形状を視覚化する。各セルごとのヒット数をプロットしたヒットマップを図5.2、図5.3に示した。T<sub>4</sub>ビームトリガーは、 $x$ 軸方向に長い長方形をしている(図5.4)。当ヒットマップは、ビームトリガー形状と整合性があり、 $x$ 軸方向に広がったビーム形状が見て取れる。

より定量的な議論のため、当該ヒットマップを $x, y$ 軸に射影したプロットを図5.5に、統計情報を表5.1に示した。ここで、縦軸のヒット数は、全体を規格化してある。今回、 $z = 1515$  mmの測定はイベント数 = 91129であり、 $z = 1605$  mmの測定はイベント数 = 181777と十分な統計量が得られた。

検出器は1 mm方眼紙でアラインメントしたので、 $x, y$ 座標それぞれに1 mm程度の誤差があると見積もられる。したがって、2つの観測点のビーム位置の差には $\sqrt{2} \approx 1.4$  mmの誤差があると考えられる。実際には、レーザー墨だし器のレーザーの太さによる誤差や、方眼紙と検出器座標のずれのなどの影響もある。表5.1の統計情報、からビームの重心位置については、

$$\Delta \text{Mean}_x \simeq 1.6 \text{ mm}$$

$$\Delta \text{Mean}_y \simeq 0.5 \text{ mm}$$

であり、 $z$ 方向に90 mm移動したことで、上記の誤差を考えるとビームの入射位置に有意な変化は見られなかった。また、ビームの広がりについては、

$$\Delta \sigma_x = 0.17 \text{ mm}$$

$$\Delta \sigma_y = -0.02 \text{ mm}$$

となった。これから、この区間において電子ビームは進行方向に対してほぼ平行に到来していると考えられる。

## 5.3 Geant4によるシミュレーションについて

実測データとの比較のためにGeant4[7]によるシミュレーションも行った。図5.6にシミュレーションにおける検出器の位置関係を示しており、

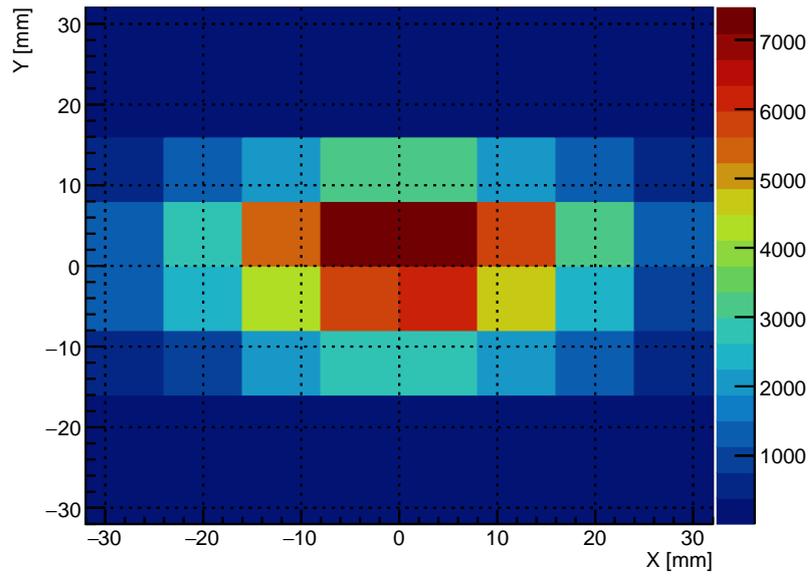


図 5.2: 検出器を  $z = 1515$  mm に設置したときのヒットマップ。

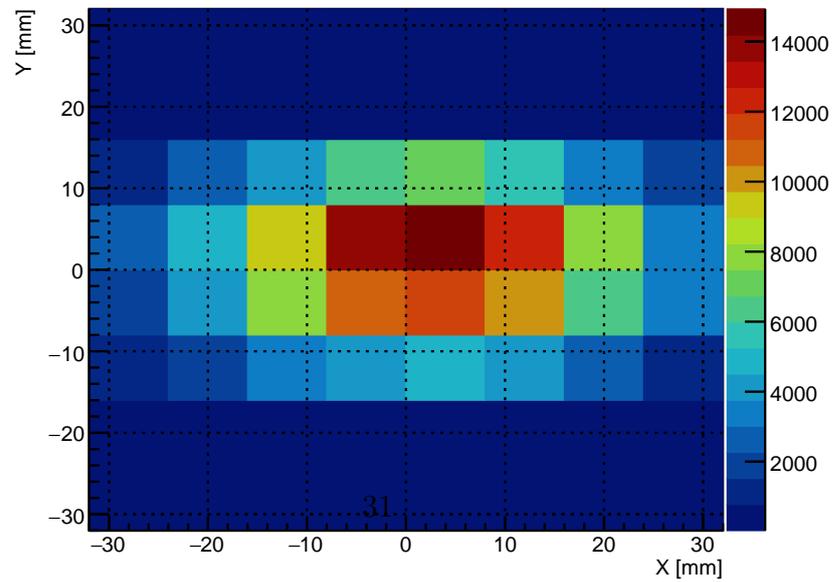


図 5.3: 検出器を  $z = 1605$  mm に設置したときのヒットマップ。



図 5.4: ビーム上流から見た  $T_4$  の形状。

表 5.1: 解析により得られたビームの重心位置 (Mean) と標準偏差  $\sigma$ 。

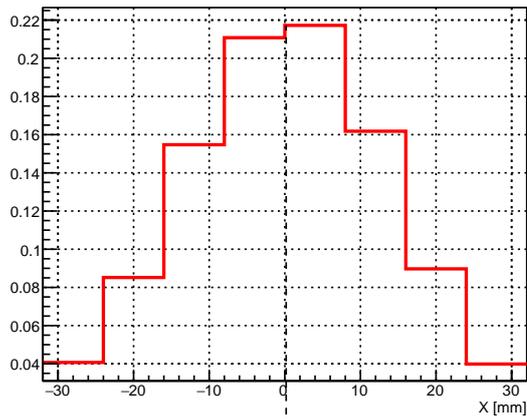
測定位置 $z$ [mm]	Mean <sub><math>x</math></sub> [mm]	$\sigma_x$ [mm]	Mean <sub><math>y</math></sub> [mm]	$\sigma_y$ [mm]
1515	0.18	13.60	0.29	7.86
1605	1.80	13.77	0.78	7.88

実験と同様の位置関係で設置した。ただし、検出器はプラスチックシンチレータ部分のみを再現した。方法として、実験時に得られたデータを較正して得たビームプロファイルに対して、シミュレーション結果から得られるビームプロファイルの形状が合うように発生条件を調整した。発生位置はビームトリガのうち  $T_4$  シンチより 45 mm 上流側として、ビーム生成時に方向と位置 (図 5.7) に分布を持たせた。

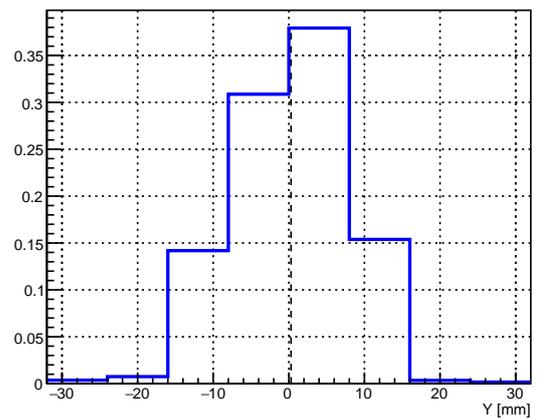
シミュレーションデータのヒット判定の閾値はシンチレータ内でのエネルギー損失を用いた。1チャンネルでのエネルギー損失の分布を図 5.8 に示す。この図からエネルギー損失の閾値は 0.8 MeV とした。

## 5.4 Geant4によるシミュレーションと実際のビーム形状との比較

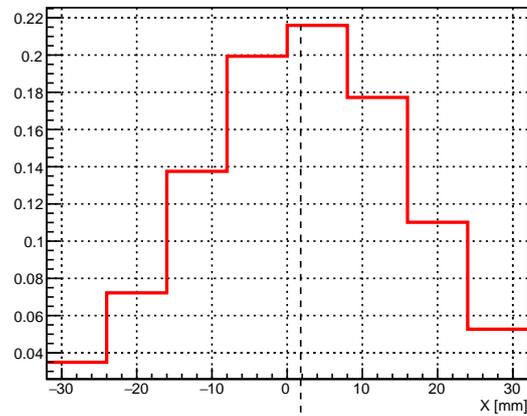
節 5.3 で導入したセットアップの元での、シミュレーションと実測データの比較を行う。 $z = 1605$  mm のビーム形状測定データについて、シミュ



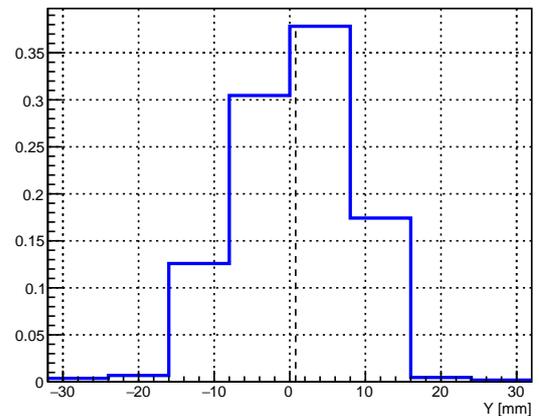
(a)  $z = 1515$  mm における  $x$  軸方向射影



(b)  $z = 1515$  mm における  $y$  軸方向射影



(c)  $z = 1605$  mm における  $x$  軸方向射影



(d)  $z = 1605$  mm における  $y$  軸方向射影

図 5.5: 各測定位置におけるビームプロファイルの  $x, y$  軸への射影分布。  
上段は  $z = 1515$  mm、下段は  $z = 1605$  mm での結果を示す。

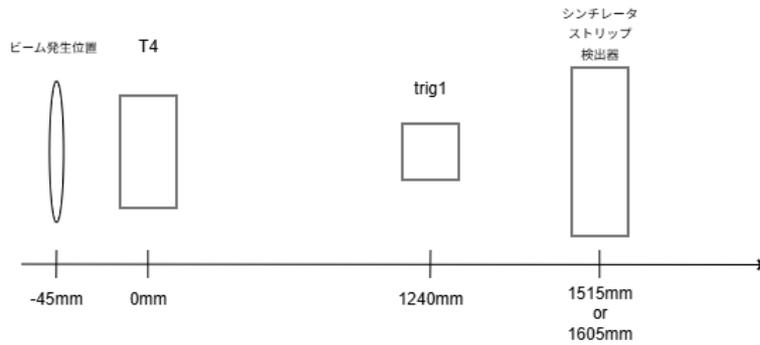


図 5.6: シミュレーションのセットアップ

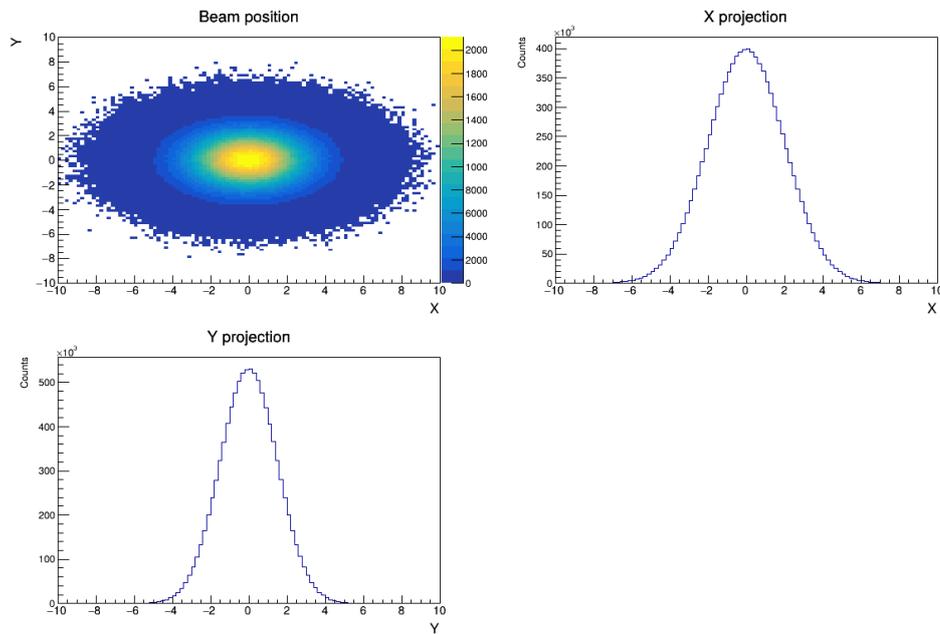


図 5.7: ビーム発生位置での分布

表 5.2: Geant4 によるシミュレーションと実測データのビームプロファイルの比較

Source	Mean <sub>x</sub> [mm]	$\sigma_x$ [mm]	Mean <sub>y</sub> [mm]	$\sigma_y$ [mm]
Simulation	0.01	12.27	-0.01	7.91
Experiment	1.80	13.77	0.78	7.88

図 5.8: 一つのチャンネルにおけるエネルギー損失分布

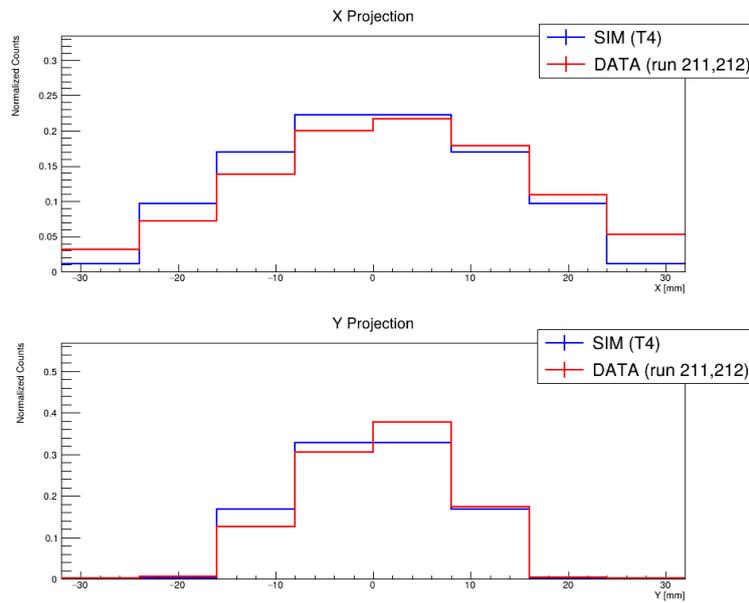
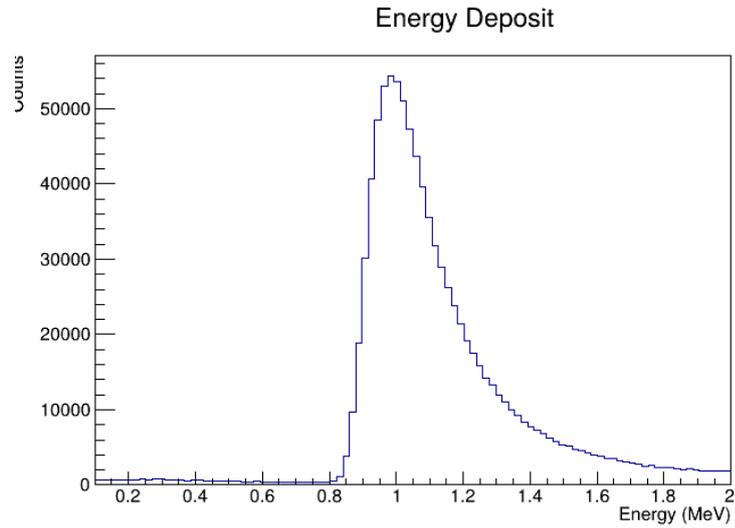


図 5.9: Geant4 によるシミュレーション (青線) と実測データ (赤線) の比較

レーションと実際のデータを比較すると、図 5.9、表 5.2 のようになる。 $\sigma_y$  についてはよく一致しているものの、 $\sigma_x$  については、 $\Delta\sigma_x \simeq 1.50 \text{ mm}$  程の違いがみられた。また、実験データでは  $y$  方向に対して非対称な分布となっている。これについては、シミュレーションの設定が、実際のテストビームラインにおけるビームの角度分布や運動量分散などの影響を考慮できていないのではないかと考えられる。

## 第6章 電磁シャワーおよび散乱 測定実験

この章では、シンチレータストリップ検出器を用いた物質によるビームの散乱測定について述べる。本測定の目的は、検出器上流側に物質を置いた際のビームの散乱および電磁シャワーの形状などから、物質による影響を調べることである。

### 6.1 電磁シャワー生成の原理

電磁シャワーとは、高エネルギーの粒子が物質中を進む際に、制動放射と電子陽電子対生成が連鎖して起きることによって多数の粒子が生成される現象である (図 6.1)。物質中を距離  $X$  進んだ際の電子のエネルギーは放射長  $X_0$  を用いて

$$E = E_0 e^{-x/X_0}$$

と表せる。ここで放射長  $X_0$  は電子のエネルギーが  $1/e$  倍に減衰するまでの距離である。今回の実験では、3 GeV の電子ビームを使用し、銅による散乱、電磁シャワーを測定することで、物質の違による電子ビームへの影響を考える。銅の放射長は  $X_0 = 1.44$  cm であり、使用した銅の厚さは 0.6 cm、物質量は  $0.42X_0$  である。

### 6.2 実験のセットアップ

実験のセットアップの概略図を図 6.2 に示す。ストリップシンチレータ検出器の前に銅板を置き、ビームを当てることでシャワー、散乱を測定した。また、このほかにも物質の小さいガス検出器も上流に設置していたため、

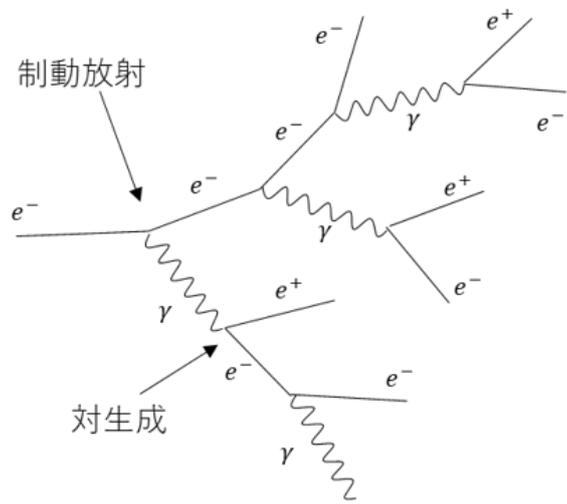


図 6.1: 電磁シャワーの略図

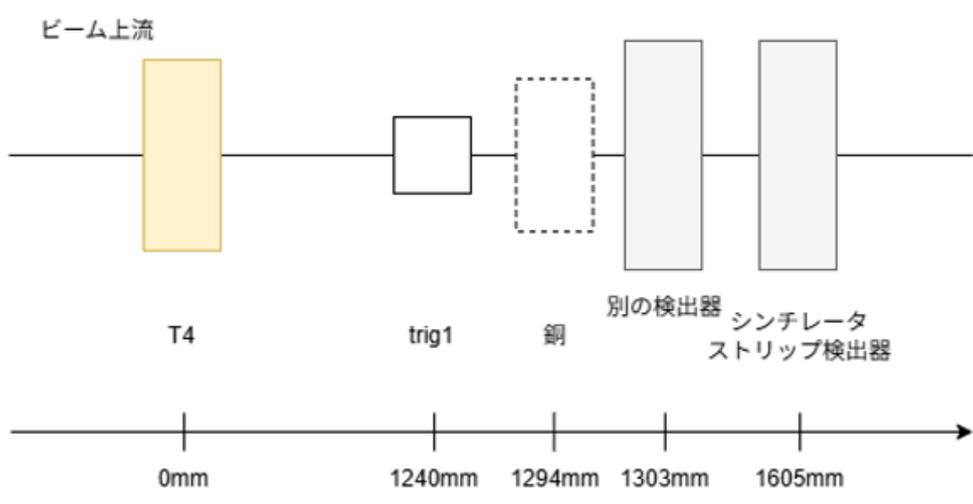


図 6.2: 電磁シャワーおよび散乱測定の設定アップ

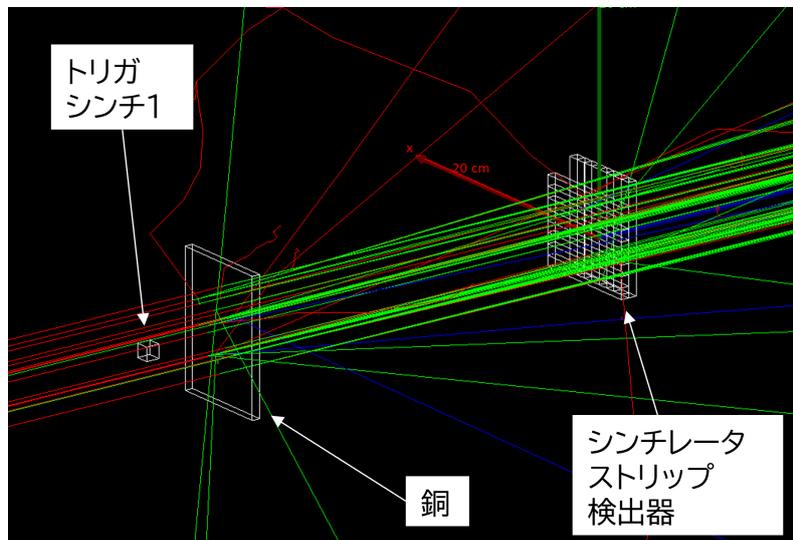


図 6.3: Geant4 によるシミュレーション

- ガス検出器のみがある場合
- 銅とガス検出器がある場合
- 何もない場合

の3パターンで測定を行った。実験時のトリガーはビームトリガー、1 cm 角のトリガーシンチのコインシデンスをトリガーとして、シンチレータストリップ検出器の中心付近を通る荷電粒子を測定した。ここで、図 6.2 とはビームトリガーのうち、ビームの進行方向に対してマグネット後方においてあるトリガーカウンタのことである。

### 6.3 解析方法

解析は Geant4 によるシミュレーションとの比較により行った (図 6.3)。シミュレーションでは節 5.3 で用いた設定を用い、銅については実験時のセットアップを再現して設置した。

解析では、各イベントで粒子を検出したチャンネル数について、シミュレーションと測定結果を比較した。ヒット判定については、測定結果は ADC 値を用いて、シミュレーションではエネルギー損失から判定を行った。測定結果の閾値は節 4.2 で行った操作と同様に設定しており、シミュレーションでの閾値は図 5.8 から 0.8 MeV とした。

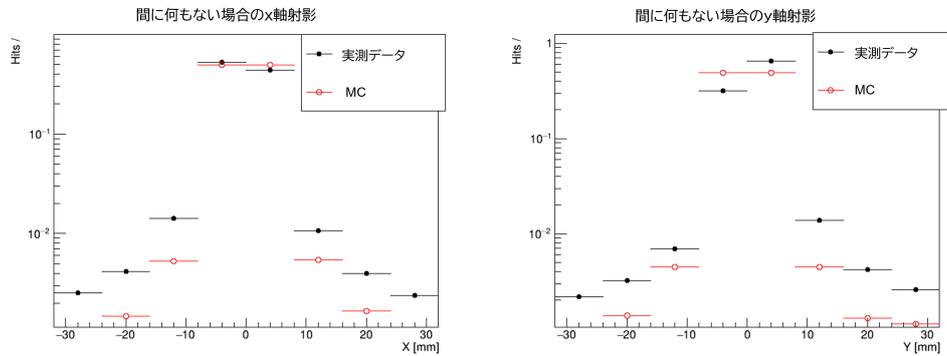


図 6.4: 間に何も入っていない場合のヒット位置  
左図： $x$  軸射影 右図： $y$  軸射影

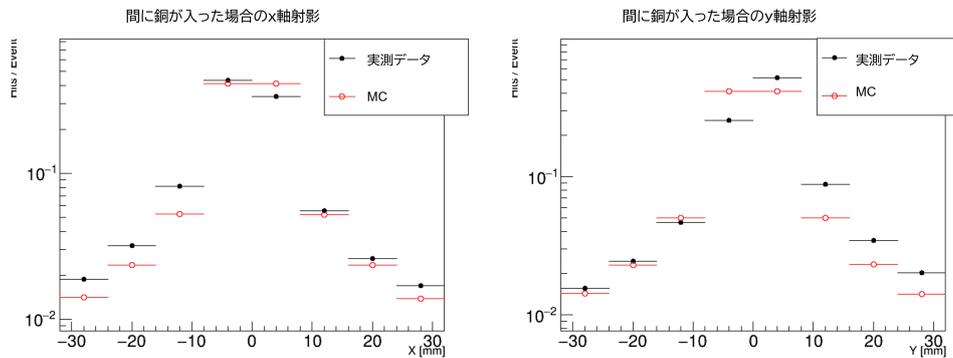


図 6.5: 間に銅が入っている場合のヒット位置  
ただし、実測時にはガス検出器あり  
左図： $x$  軸射影 右図： $y$  軸射影

## 6.4 結果

条件ごとに、間に何も入れていない場合と、間に銅とガス検出器が入っている場合について、シミュレーションと実測データの  $x, y$  座標でのヒット位置をプロットした図をそれぞれ図 6.4 と図 6.5 に示す。ただし、シミュレーションにおいてはガス検出器は実装しておらず、銅のみが実装されている。

ヒット位置ごとのプロットでは、イベントごとの散乱と電磁シャワーの区別がつかないが、銅による影響で分布が広がっていることが確認できる。続いて、散乱と電磁シャワーを区別するために 1 イベントあたり

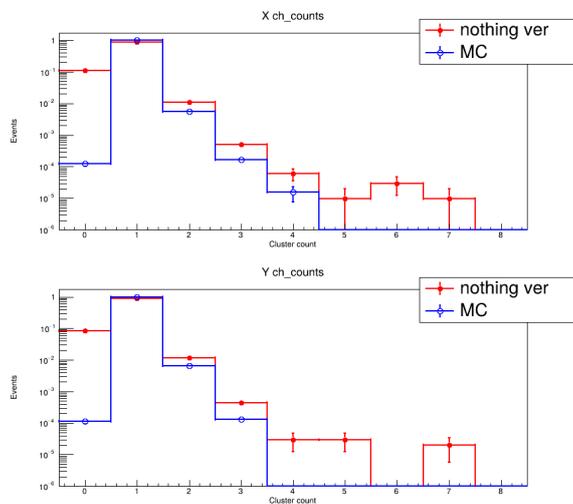


図 6.6: 間に何も入っていない場合のヒット本数  
 左図:  $x$  軸射影 右図:  $y$  軸射影

のヒット本数でプロットを行った図 6.6 と図 6.7 を示す。

シミュレーションとの比較において、ヒット本数が大きくない場合はある程度一致したと言える。ヒット本数が 2~5 本の部分を見ると、銅のあるなしによる違いが出ていると考えられ、電磁シャワーが起きたことがわかる。ヒット本数については複数のヒットがある場合、連続した本数から 1 を引いた数をヒット数として処理した。例として、ch1, 2, 3, 5 ならば 3 本ヒットという処理を行った。ここで、何も入っていない場合とガス検出器のみ、銅とガス検出器が入った場合の 3 パターンでの測定結果を重ねた図 6.8 を記載する。この図から、銅を入れた場合の分布では、明らかに分布が広がっている一方で、低物質量のガス検出器のみが入っている場合の分布では何も入っていない場合との違いが見えなかった。

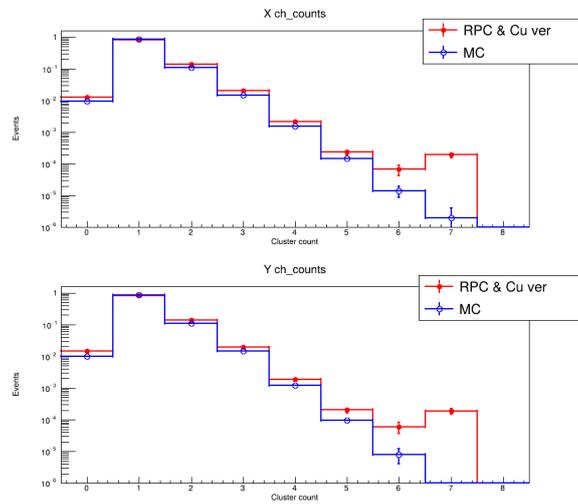


図 6.7: 間に銅が入っている場合のヒット本数  
 ただし、実測データではガス検出器あり  
 左図： $x$  軸射影 右図： $y$  軸射影

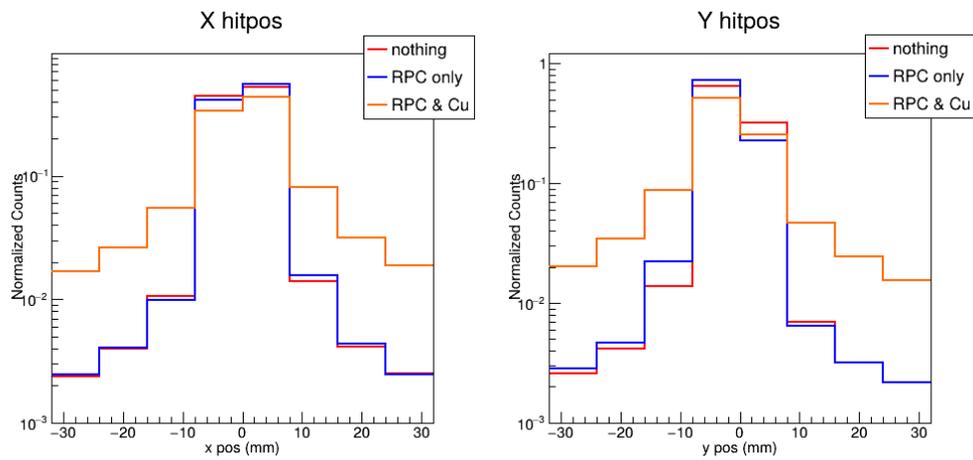


図 6.8: 3 パターンでのヒット位置  
 左図： $x$  軸射影 右図： $y$  軸射影

## 第7章 結論

本研究は、KEK 測定器開発テストビームラインにおいて、シンチレータストリップ検出器を製作し性能評価を行った。検出効率の測定の結果、有効領域において98%以上の高い検出効率を達成し、この検出器が荷電粒子の検出に十分適用可能であることを確認した。この検出効率をもとにビームプロファイル測定の結果を再構成した。

物質中での粒子の散乱および電磁シャワーの測定では、放射長  $X_0$  を基準として物質質量  $0.42X_0$  の銅を挿入した場合に分布の変化が観測され、散乱および電磁シャワーの影響を捉えることができた。一方で、物質質量  $0.002X_0$  のガス検出器のみの場合には分布変化がほとんど観測されなかった。このことから、本検出器は少なくとも約  $0.42X_0$  程度の物質質量に対する散乱および電磁シャワーの測定が可能であることが示された。

実測データとシミュレーションとの比較では、散乱および電磁シャワーによるヒット本数の分布について同様の傾向が見られ、本検出器の応答が物理的に妥当であることが確認された。その一方で、一定の差異も見られた。この差が出る原因として、ビーム生成過程における実験時とシミュレーションの違いに加え、実際の測定においてDAQレートに対してビームレートが大きかったことが挙げられる。特に、1イベント中に複数粒子が同時に入射する事象が発生していた可能性があり、これがヒット本数の分布に影響を与えたと考えられる。

また、本実験では入れた物質は銅1種類のみであり、厚さも  $0.42X_0$  のみであった。そのため、物質質量や物質の種類に対する依存性についての十分な検証が行えていない。今後は、より厚い物質や複数種類の物質を用いた測定を行うことで、散乱および電磁シャワーの発達過程をより詳細に評価し、検出器性能の定量的理解を深める必要がある。

本研究は、製作したシンチレータストリップ検出器の高い検出効率と物質応答特性を実証した。特に、98%以上の検出効率を安定して達成できたことから、本検出器はビームレートや位置分布を高精度に測定する荷電粒子モニタとして十分な性能を有することが示された。

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、多くの方々より多大なるご指導とご支援を賜りました。

まず、本研究の機会を与えてくださり、終始丁寧なご指導を賜りました、前田順平准教授、山崎祐司教授に、心より感謝申し上げます。研究の進め方から論文執筆に至るまで、数多くの貴重な助言をいただきました。また、KEKにおけるテストビーム実験の実施に際し、装置準備および実験運営において多大なるご協力をいただきました、KEKの江成祐二氏に深く感謝申し上げます。実験環境の整備ならびに技術的助言は、本研究の遂行に不可欠なものでした。

同研究室博士課程前期課程1年で、前年度のテストビーム実験経験者である神吉陽介さんには、TAとして我々の研究に携わっていただき、ことあるごとに様々な助言をいただきました。お忙しいときも我々の質問や相談に快く応じてくださいました。神吉さんの存在がなければ、本実験はなかったと思います。しかし、肝心の12月にCERN出張に行ってしまうので、ビームテスト本番には来てくださらなかったことが残念でなりません。何やってるんですか。

同研究室博士課程後期課程の高橋真斗さんには、共同実験者として、そして頼りになる先輩として、多大なるご指導をいただきました。毎週の進捗報告会で、高橋さんの進捗に度肝を抜かれたのも、今ではいい思い出です。不在の神吉さんの代わりに、我々の相談に親身に乘ってくださいました。我々の事前実験が深夜に及び、終電を逃させてしまったときは大変申し訳なかったです。そういえば、神吉さんからTAの分け前もらえました？

同研究室特命助教の東野聡氏には、我々が設計した読み出し基盤の致命的欠点を発見していただきました。東野さんの「え、大丈夫なんすか、コレ？」の一言がなければ、我々はKEKに旅行に行った人になっていました。ありがとうございました。同研究室のスタッフの皆様には、ビームテスト直前に行われた研究室内の卒研中間発表会において、修正版の

基板の致命的欠点を指摘していただきました。KEK 出発前々日に届いた基板に、無理やり抵抗をはんだ付けするという暴挙に出たのもまた、いい思い出です (図 3.7)。

同研究室 B4 の木下雄太氏には、検出器のキャリブレーションにおいて、有益な一言をいただきました。素粒子宇宙理論研究室 B4 の佐野博亮氏には、Cosmo-Z のデータ読み出しについて、貴重な助言をいただきました。いいタイミングでフラッと粒子物理学研究室に来ていただきありがとうございました。

本研究に携わっていただいたすべての方々への感謝の気持ちをもって、謝辞とさせていただきます。

## 関連図書

- [1] KEK, “つくばキャンパス 2023”, ID:38230  
URL: <https://www.kek.jp/ja/imagearchive/38226/>. Accessed: 2026-03-06.
- [2] “PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画”, PASJ2021 MOP049 URL: [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MOP0/MOP049.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MOP0/MOP049.pdf). Accessed: 2026-03-06.
- [3] 猪上 竣, 河野 朱慧, 柳 凜, 西田 汐里, 神吉 陽介, シンチレーションファイバーを用いたビームプロファイル測定と電磁シャワー観測 神戸大学, 2025, URL: [https://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/seminar/pdf/ARBL\\_2024.pdf](https://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/seminar/pdf/ARBL_2024.pdf).
- [4] 「特殊電子回路株式会社」 URL: <https://www.tokudenkairo.co.jp/>. Accessed: 2026-03-06.
- [5] HAMAMATSU, 技術資料 URL: [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/ssd/mppc\\_kapd9008j.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf). Accessed: 2026-03-06.
- [6] D.E. Groom (LBNL) and S.R. Klein (NSD LBNL; UC Berkeley), Passage of Particles Through Matter  
URL: [https://pdg.lbl.gov/2025/reviews/contents\\_sports.html](https://pdg.lbl.gov/2025/reviews/contents_sports.html). Accessed: 2026-03-06.
- [7] Geant4 Home Page URL: <https://geant4.web.cern.ch/>. Accessed: 2026-03-06.