

卒 業 論 文

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

2025年4月13日

柳 凜
神吉 陽介
西田 汐里
猪上 竣
河野 朱慧

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の電子ビーム性能を調べることを目的とした。ビーム形状の位置依存性を測定することにより、ビームラインの最適化に寄与することを目指した。ビーム性能調査のために測定器開発を行い、測定器の検出器効率を測定した後、ビーム形状測定実験を実施した。また、同じ検出器で遮蔽体を置き、電磁シャワーの形状測定も行った。その結果を基に、得られたデータの解析および考察を行った。

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	3
2.1	KEK PF-AR	3
2.2	テストビームラインのビーム生成・輸送方法	4
第3章	電子位置検出器	8
3.1	検出器のコンセプトと設計	8
3.2	MPPC と NIM-EASIROC	10
3.2.1	MPPC	10
3.2.2	NIM-EASIROC	12
3.2.3	ADC 光電子変換	13
3.3	測定時のセットアップ	16
第4章	検出器の性能評価・較正	19
4.1	ファイバーの性能評価	19
4.1.1	平均光電子数による評価	19
4.1.2	クラスタリングによる評価	22
4.2	検出効率による性能評価・較正	25
4.2.1	検出効率測定実験の Setup と読み出し系	25
4.2.2	検出効率の定義と原理	26
4.2.3	シミュレーションの用意	26
4.2.4	検出効率導出にあたって考慮しなければならない現象	27
4.2.5	検出効率実験の結果と検出効率の導出	28
第5章	ビーム形状測定実験の解析と結果	31
5.1	実験のセットアップ	31
5.2	シミュレーションとの比較	32
5.2.1	SAD を用いたシミュレーションの用意	33

5.2.2	ビーム形状の比較	33
5.2.3	焦点位置の比較	37
5.2.4	広がり の比較	39
5.3	測定データとシミュレーション結果の一致度と問題点 . . .	42
第 6 章	電磁シャワー形状測定実験	43
6.1	電磁シャワー生成の原理	43
6.2	実験のセットアップ	44
6.3	解析方法	45
6.4	結果	46
第 7 章	結論	50

第1章 序論

本研究では、高エネルギー加速器研究機構 (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けるビーム形状を測定し、シミュレーション結果と比較する。これにより、シミュレーションの精度向上やビームラインの改善に向けた指針を得ることを目的とする。

ビームラインにおける四重極磁石は、ビームの収束や発散を調整するために用いられている。磁石に流す電流値によって発生する磁場の強さが変化し、それに伴いビームの収束度合いが変化する (詳しくは第2章2.2節)。現在、測定器開発テストビームラインでは四重極磁石を通してより多くの電子を輸送することを重視して、シミュレーションに基づいた最適な電流値を算出し、その値を既定値としてビームの調整が行われている。しかし、下流でのビームの広がり、ビーム輸送シミュレーションプログラムによる結果が実際のビームとずれていることなど、依然としていくつかの課題が残されている。

本研究では、シンチレーションファイバーを用いてビーム形状を二次元で読み取ることが可能な検出器を作成し、これを用いて四重極磁石に流す電流の大きさを変化させた際のビーム形状を測定した。測定データから得られたビームの広がり、最適な電流値の算出のために用いられたシミュレーションから得たビームの広がり、複数の観点から比較し、上記のずれの原因を探った。また、自作の検出器を用いて鉛ブロックによる電磁シャワーの測定も行った。

今回は KEK が実施している「加速器科学インターンシップ」を利用して測定器開発テストビームラインでの実験を行った。そのために2024年11月22日から11月30日まで KEK に滞在した。11月22日から11月24日に装置の準備や予備実験等を行い、11月25日から11月27日に検出器の較正に必要な測定 (詳しくは第4章4.2節)、11月28日から11月29日に電子ビームの形状測定と電磁シャワー測定を実施した。また、実験は東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) と同じエリアで同時に行っ

た。検出器の較正のための測定時にはICEPPの検出器をビーム上流に設置し、本研究のための装置はその下流に設置した。ビーム形状測定および電磁シャワー測定時は本研究の検出器をビーム上流に設置した。

本論文では、まず第2章において測定器開発テストビームラインについて紹介し、第3章で作成した検出器やその他用いた実験装置について述べる。第4章で検出器の検出効率を求め、その結果を踏まえて第5章にて測定したビーム形状とシミュレーションとの比較結果を示す。さらに、第6章で電磁シャワーに関する解析結果を述べる。

第2章 KEK測定器開発テスト ビームライン

2.1 KEK PF-AR

KEKとは高エネルギー加速器研究機構の略称である。高エネルギー加速器は、電子や陽子などの粒子を光速の近くまで加速させ、衝突により高いエネルギー状態を作り出す装置である。本メンバーは、卒業研究として、その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。



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。

PF-ARは大強度パルス放射光を供給する円型光源加速器である（円周377 m）。加速された電子は蓄積リングを周回する。電子が磁場によって進行方向を曲げられる際に生成される放射光を取り出す。この放射光の特徴の一つは「シングルパンチ」という点である。「パンチ」とは群れ・集合を意味する。一般的には、複数の電子の群れ（マルチパンチ）が加速器内のリングを周回している状態で運転され、放射光が連続的に到達するように見える。一方、PF-ARのようにシングルパンチの場合では、ある1点で光を見ると、電子の群れが一周する間に一回だけ光るため、非常に短い時間スケールで起こる現象の一瞬一瞬を観察することができる。また、1発で物質の構造を捉える光には十分な強度が必要であるため、放射光は大電流である。PF-ARは50-60 mAで1.3 μ s間隔の大強度パルス放射光源として利用されている。非常に明るい写真を撮れることは、約1 MHzで繰り返すストロボカメラで写真を撮ることに例えられる。今回私たちは、そのPF-AR内の電子ビームを利用した「測定器開発テストビームライン」にて実験を行った。

2.2 テストビームラインのビーム生成・輸送方法

図2.2はテストビームの構造図である。図2.3のように、PF-AR内のリングにワイヤーターゲット（直径0.1 mmのcarbon nanotubeの燃糸と厚さ40 μ mのグラフェンシートを材質として使用）を挿入する。PF-AR内の6.5 GeVの電子とワイヤー内の原子との間の電磁相互作用の制動放射によってガンマ線を生成する。ガンマ線を銅製コンバータ（図2.4）に入射させ、電子陽電子対を生成する。その電子をQマグネット（Quadrupole magnet：四重極磁石）で収束させ、Bマグネット（Bending magnet：偏向用双極電磁石）で特定の運動量のみ取り出し、再びQマグネットで収束させ、ビームステージにビームを輸送する（図2.5）。テストビームラインでは0.5 GeV程度から5.0 GeVまでの電子ビームを利用できる。

QマグネットにはQFとQDの二種類がある。F、Dは図2.6に表記した x 方向に対してFocus、Defocusの略である。例えば、QFの場合は図のようにN極とS極を配置する。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。よって、電子ビームは x 方向に収束すると同時に、 y 方向には拡散する。逆にQDマグネットでは、ビームは x 方向では拡散し、 y 方向には収束する。Qマグネットの電流値を変化させることで磁場の大きさを変化させ、ビームの収束を調整する。PF-AR

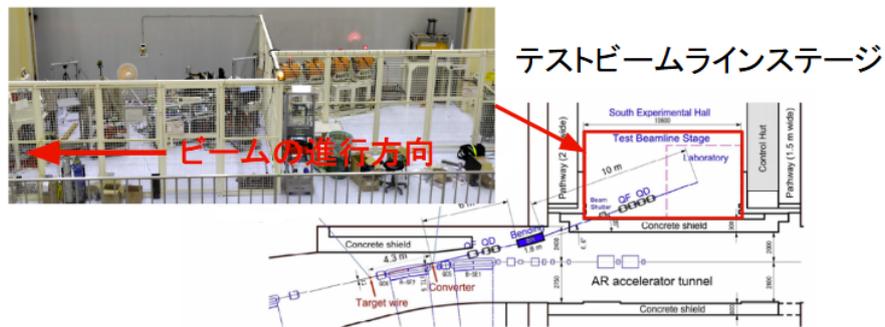


図 2.2: テストビームラインを上から眺めた図とビームステージの写真 [2]

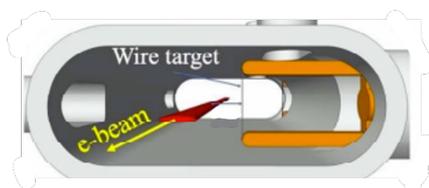


図 2.3: ワイヤターゲットの概略図 [2]

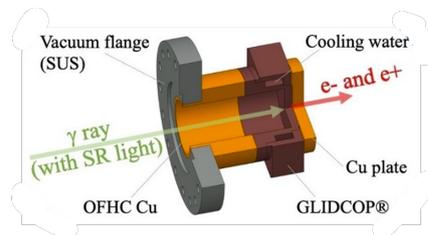


図 2.4: コンバータの概略図 [2]

のリング側に QF が 1 個、QD が 2 個、ビームステージ側に QF が 2 個、QD が 2 個、計 7 個の Q マグネットが設置されている。

B マグネットでは、まずコイルに電流を流し、図 2.7 のようにコイルの両端に N 極と S 極を発生させる。すると、白色の矢印方向に磁場が生じる。黄色の矢印のように紙面奥から手前にやって来た電子は水色の矢印の方向にローレンツ力を受け、円軌道を描く。その円軌道の半径は $r = p/qB$ (r : 半径、 p : 電子の運動量、 q : 電子の電荷量、 B : 磁束密度) で表され、電子の運動量と磁場の大きさに依存する。よって、磁場の大きさ、つまりコイルに流す電流値を調整することで特定の運動量の電子のみを取り出すことができる。

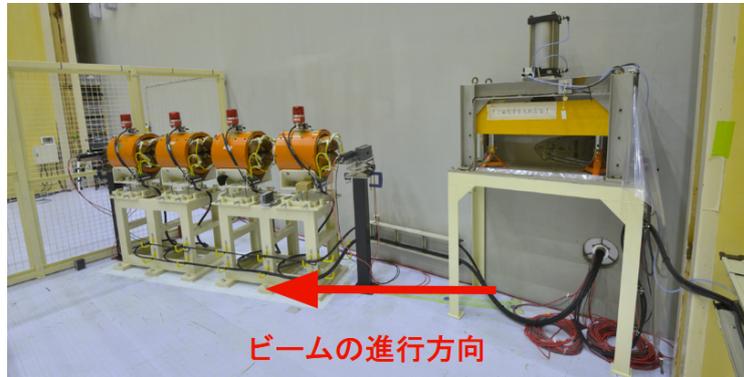


図 2.5: ビームステージの写真。右の黄色の長方形がビームシャッターであり、ビームの使用に合わせてシャッターを開閉する。左の4つのオレンジの円筒で囲われたものはQマグネットであり、右の2つがQF、左の2つがQDである。また、フェンスの向こう側が本実験の検出器を置くスペースである。

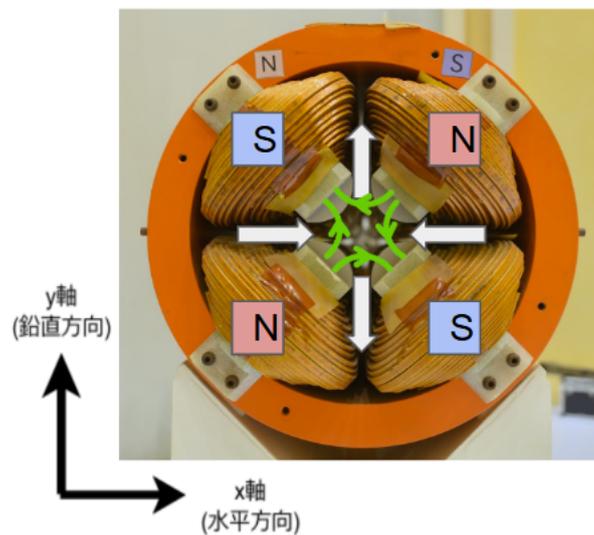


図 2.6: Q マグネットの写真。QF の場合、N 極と S 極を上記のように配置する。磁場は緑色の矢印の方向に発生し、電子は白色の矢印の方向に力を受ける [3]。

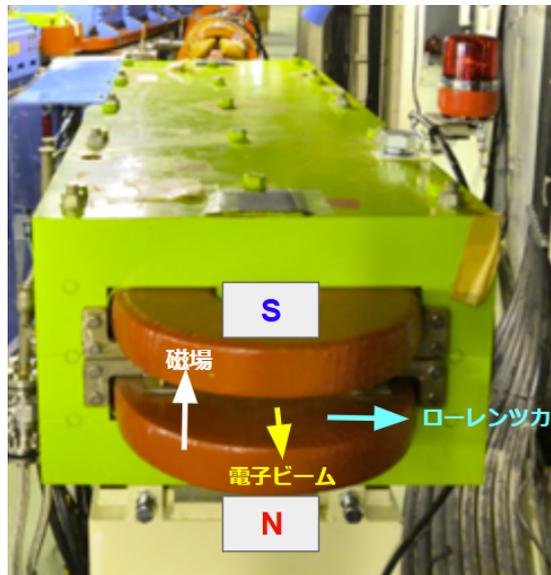


図 2.7: B マグネットの写真。橙色の円がB マグネット。白色の矢印は磁場の方向、黄色は電子ビームの進行方向、水色はローレンツ力の方向を表している [3]。

第3章 電子位置検出器

この章では、本実験で用いた、電子の通過位置を測るための検出器について述べる。本実験の目的は、電子ビームの広がりを2次元で観察することである。そのために、シンチレーティングファイバーを直交させて並べ、電子の通過により発生した光をMPPC(3.2.1章で説明)で読み出す検出器を製作した。読み出しにはNIM-EASIROCモジュール(3.2.2章で説明)を使用した。

3.1 検出器のコンセプトと設計

測定対象の電子ビームの広がりはいくつかのcmを想定している。そのため、数cmの範囲を数mmの分解能で、縦横二方向について測定できるような検出器を設計した。信号の読み出しに用いたNIM-EASIROCモジュールには32チャンネルを読み出せるASICが2つ搭載されていた。そのため、縦横方向にそれぞれ32チャンネルとした。ビーム検出のために、直径0.7mm(発光する有効部分の直径0.658mm)のプラスチックシンチレーションファイバー(SCSF-78M改良11)を使用した。このファイバーは2層に接着されていたため、図3.1のように6本を1セットとして用いた。これにより、およそ2.1mmの検出単位幅を確保しつつ、32チャンネルで2.1mm×32≒7cmという十分な測定範囲を得ることができた。また、エネルギー損失の小さいプラスチックシンチレータを用いることで、ビームに与える影響を小さくした。

そのプラスチックシンチレーションファイバーからの光を検出するためにMPPCを用いた。6本のファイバーを束ねたものからの光を1個のMPPCが検出できるように、ファイバーの端がMPPCに向くように設置する。これを1つのチャンネルとして扱った。図3.2はこのチャンネルを縦横に並べた図になっている。これにより直交したファイバーが重なった部分が、電子の通過位置を検知する検出領域となる。測定時は、光ったチャンネルの組み合わせから、電子の当たった位置を特定した。

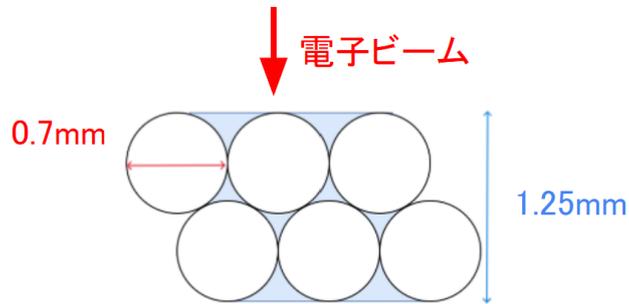


図 3.1: 1つのチャンネルの構造とサイズ

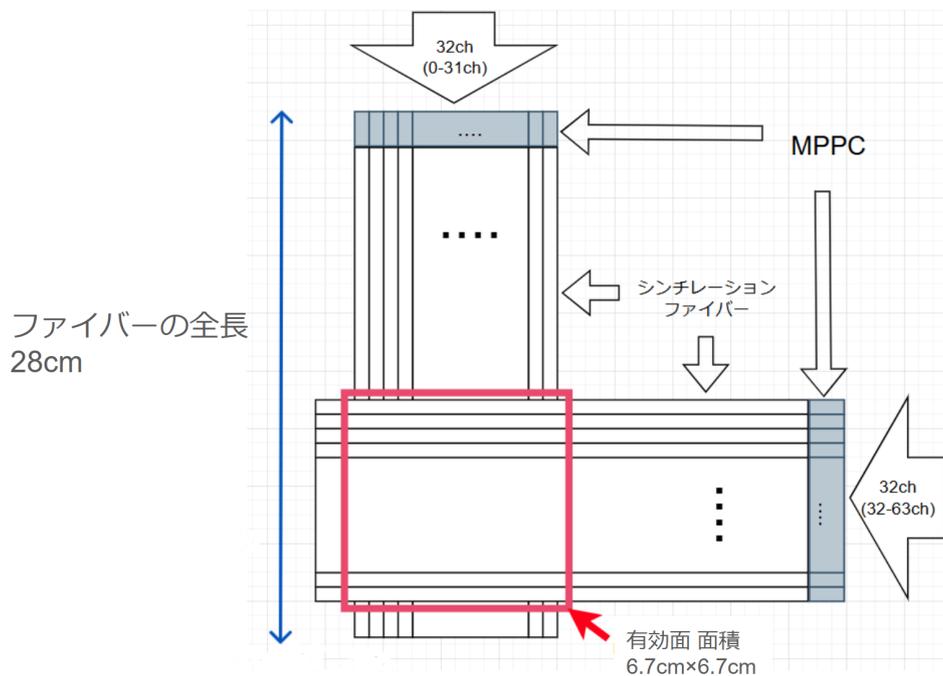


図 3.2: 検出器の有効面とファイバーの構造とサイズ

MPPCからのからの信号を得るために、MPPCの付いた基板を製作し、信号はツイストケーブル経由で電気信号として取得した。このケーブルは後述するNIM-EASIROCに接続し、NIM-EASIROCがMPPCからの信号をデジタル化した。

検出器全体は、プラスチックカバーや暗幕で遮光した。完成した検出器を図3.3に示す。



図 3.3: ファイバー検出器

3.2 MPPC と NIM-EASIROC

本節では、検出器の構成と測定に重要となる MPPC、NIM-EASIROC 及び ADC 光電子変換について述べる。

3.2.1 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) 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 3.4 の通り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た時、半導体内に大きな電場が生じることで半導体内で電子雪崩が起き、信号を増幅させる。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離散化され、何個の APD で光電子が発生したのかが分かる。

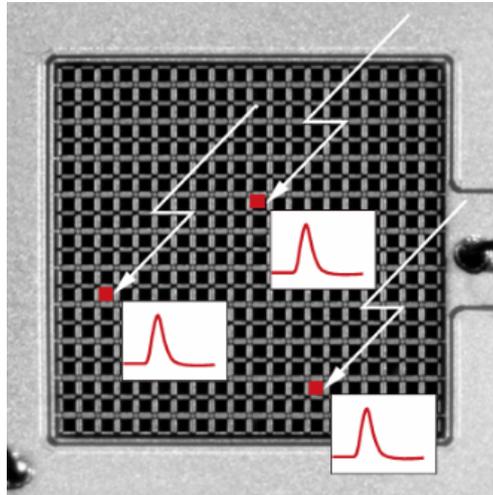


図 3.4: 受光面 [4]

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。

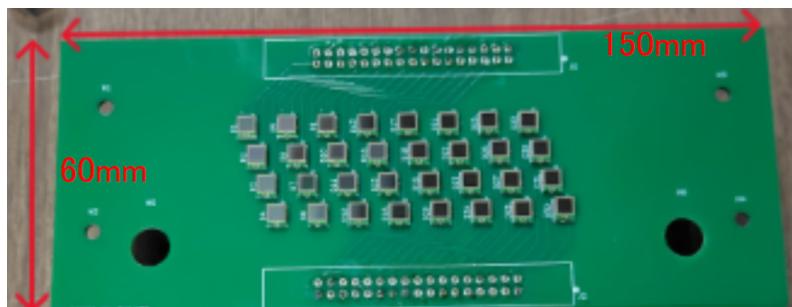


図 3.5: MPPC 基板

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。

- 受光面：3.0 mm×3.0 mm
- MPPC 型番：S13360-3075PE
- ピクセル数：1600
- 検出効率 (PDE)：約 50%
- ガイガーモードを生じる降伏電圧： 53 ± 5 V

各方向それぞれのチャンネルの総数が32であるため、MPPCの総数も32個となる。図3.5はMPPCを32個貼り付けた基板である。

各チャンネルに相当するシンチレーションファイバーとMPPCは、ファイバー断面とMPPCの受光面が対面するように設置した。基板と同じ大きさのゴム版に基板に張り付けたMPPCと同じ位置に穴をあけ、ファイバーと基板を固定した。これにより、シンチレーションファイバーで生じた光をMPPCで検出し、後述するNIM-EASIROCでADC値として読み出せるようにした。

3.2.2 NIM-EASIROC

NIM-EASIROC(Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip)は、64個のMPPCに同時にバイアス電圧をかけて駆動し、信号を読み出すことが出来るモジュールである(図3.6)。



図 3.6: NIM-EASIROC 本体

計測時には、MPPCに高電圧を掛けた状態で入力するトリガー信号のタイミングを調整し、図3.7のようにピークの高さを保持(ピークホールド)させる。その電圧、つまり波のピーク時の波高をADC(Analog Digital Converter)でデジタル情報(ADC値)に変換し、その情報をTCP/IP通信によりネットワーク経由でコンピュータで読み出すことができる。また、NIM-EASIROCは各MPPCにバイアス電圧を供給することができ、またバイアス電圧を調整する機能を持つ。

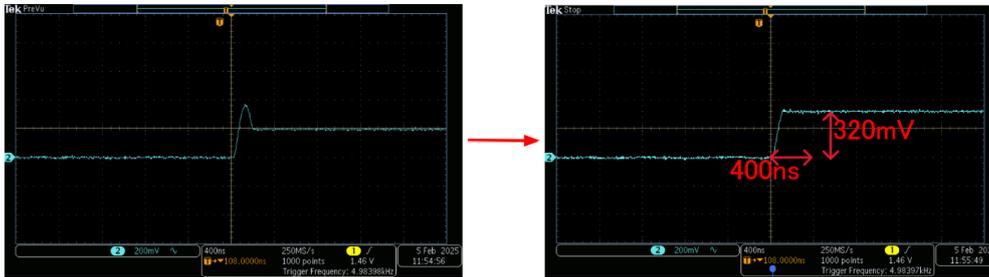


図 3.7: ピークホールドの様子（上図）（縦軸：電圧 横軸：時間）

3.2.3 ADC 光電子変換

MPPC からの信号を NIM-EASIROC で読み出すと、図 3.8 のように離散化されている。この図は MPPC に LED 光を当て、LED が光るタイミングで信号を読み出したときの結果である。

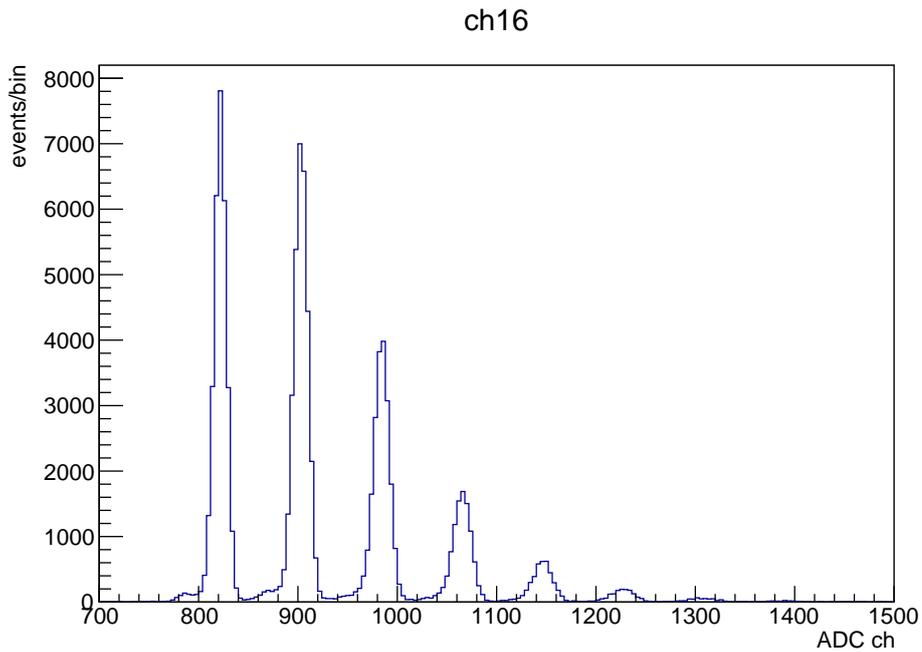


図 3.8: MPPC に LED を当てた時の ADC 値分布

離散化された信号の各ピークが光電子数に対応している。これをもとに各ピークの ADC 値と光電子数の関係を調べると、図 3.9 のようになる。

MPPC が出す信号は APD の飽和信号単位であるから、各ピーク間は一定となり、ADC 値と光電子数の関係は 1 次関数で表せることが、この結果からわかる。各 ch についてこの関係を求め、実験結果の ADC 値を光電子数に変換する。

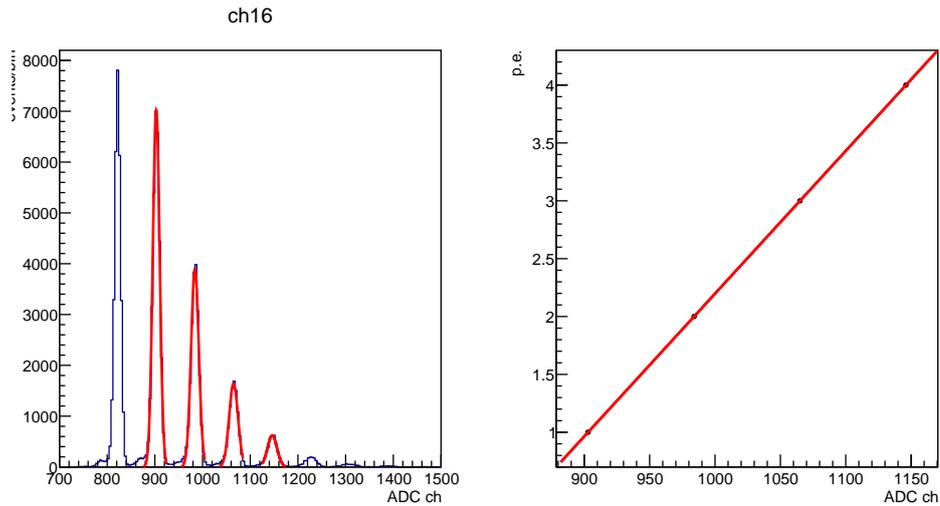


図 3.9: ADC 値光電子数変換の導出。左は 16ch の ADC 値分布の各ピークをガウスフィットしたグラフ。右はピークの ADC 値と光電子数のグラフ。この関係を用いて MPPC から得た ADC 値を光電子数に変換できる。

ただし、多数の MPPC から入力があり、NIM-EASIROC が大きい信号を出さなければならない状況では、MPPC に加わるバイアス電圧が下がることがわかった。一例として、18ch の ADC 値分布を X 方向の ADC 値合計ごとに分類したものを図 3.10 に示す。X 方向 32ch の ADC 値合計が 1 つの EASIROC chip が出した信号の合計になるが、それが大きくなるほど信号の分布が下がっていることが分かる。

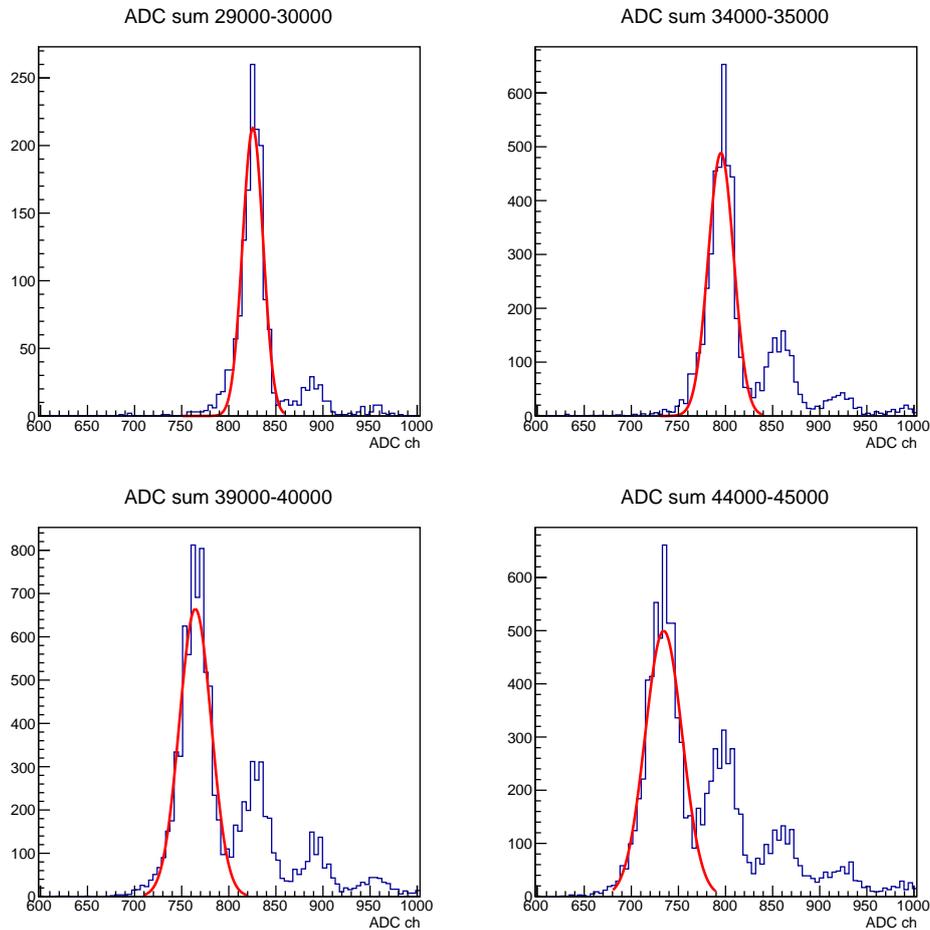


図 3.10: MPPC 15ch の ADC 値分布の ADC 値合計に対する依存性。X 方向 32ch の EASIROC chip からの ADC 値合計が 29000-30000(左上)、34000-35000(右上)、39000-40000(左下)、44000-45000(右下) の場合について、X 方向の 15ch の ADC 値分布を示す。

位置スキャンとプロファイル測定では3つ以上のMPPCから信号が来る事象が少なかったため、この特性は問題にならない。しかし、電磁シャワー測定の場合は検出器に当たる粒子数が多くなるため、このことを考慮する必要があった。そのため、電磁シャワー測定のデータのみ解析時にデータの補正を行った。

補正は、0 光電子数の信号の位置 (ペDESTAL) が ADC 値合計の 1 次関数で表せると考えて行った。具体的には、各 ADC 値合計についてペDESTAL の位置を調べ、ADC 値合計が 27000 の時のペDESTAL に合うように

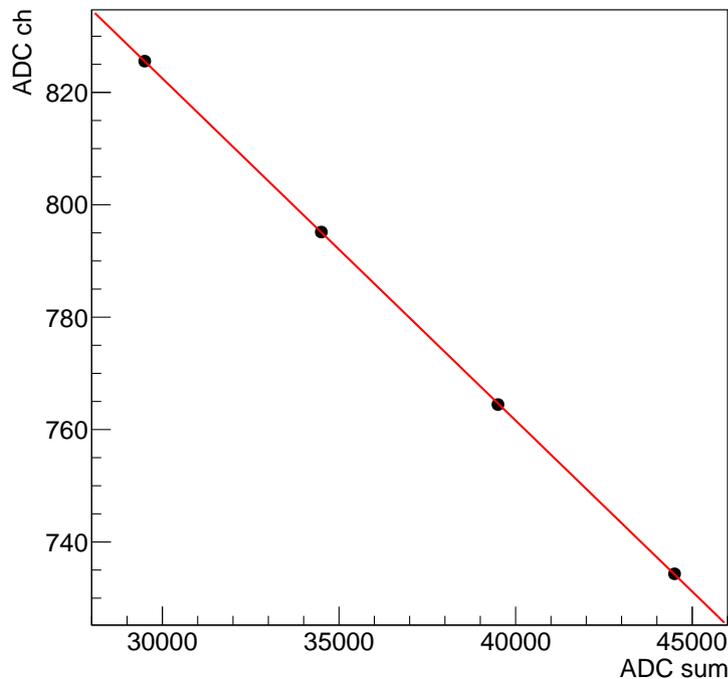


図 3.11: ADC 値合計とペデスタルの位置

した。ピーク間の間隔は変化していないと考えて補正した。補正結果が図 3.12 である。補正を行うことで信号が離散化され、補正がうまく行ったことがわかる。これにより、検出器に多数の粒子が入った場合も光電子数を正確に評価できるようになった。

3.3 測定時のセットアップ

上記のファイバー検出器を用いて、2024 年 11 月 22 日から 11 月 29 日まで測定器開発テストビームラインで測定を実施した。ビームタイムの制限の関係で、東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) と同時に測定を行った。そのため、ビーム上流、もしくは下流に東京大学の装置 (パラサイト実験検出器) が存在した。

測定時のセットアップの一例を図 3.13 に示す。

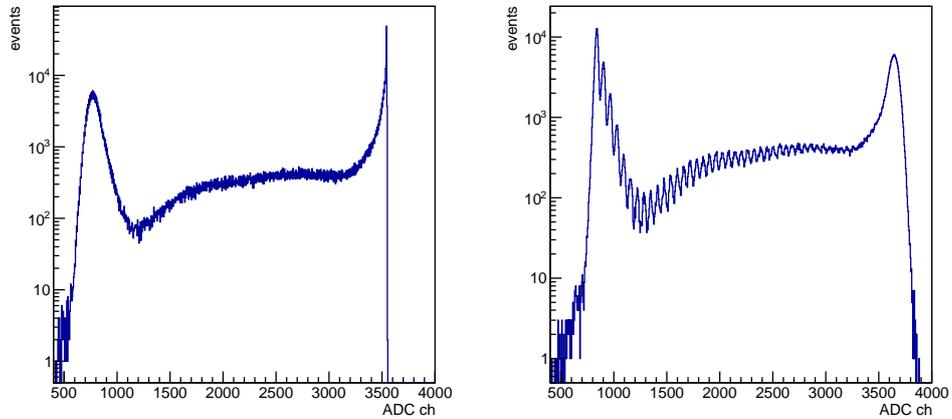


図 3.12: 補正前後の ADC 値分布

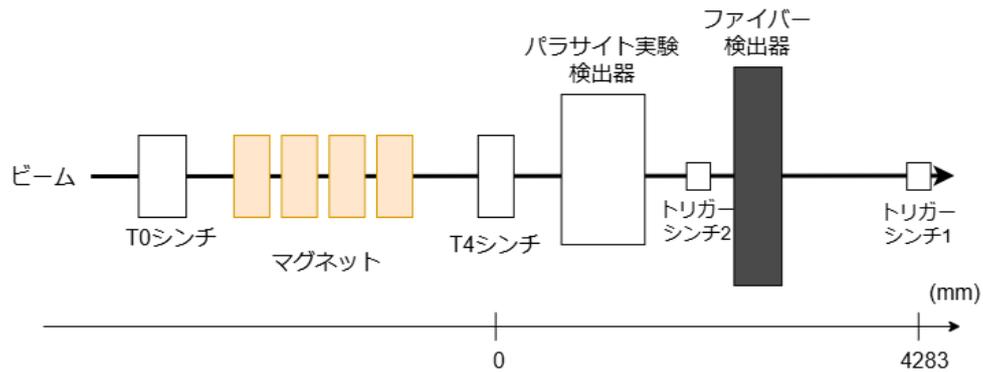


図 3.13: 本実験全体のセットアップ図

マグネット前の T0 シンチ、マグネット後の T4 シンチ、検出器直前のトリガーシンチ 2、検出器後のトリガーシンチ 1 を組み合わせてトリガー論理を構成した。シンチレータはいずれもプラスチックシンチレータである。T0 シンチは、ビームシャッターが開き、ビームがステージに来たということを確認するために用いた。T4 シンチはマグネットを通過したビームを選別するために用いた。トリガーシンチ 1、2 は 1 cm 角のプラスチックシンチレータで、ビーム軸を基準として同じ位置に配置した。2 つのトリガーシンチの同時検出により、荷電粒子がビーム軸に垂直な平面の 1 cm 角の範囲を通過したことを示すトリガー信号を生成する。また、図 3.13 では、東京大学の検出器がビーム上流にある場合を示す。

検出器の読み出し回路を図 3.14 に示す。この回路のコインシデンスモジュール (図中の”Coinc”) により、トリガー条件をスイッチで切り替えられるようにした。コインシデンスの出力に適切な delay をかけて NIM-EASIROC のトリガーに入力した。コインシデンス出力に delay をかけたものをコインシデンスの veto に入力することで、NIM-EASIROC がデータを読み出している間に次のトリガーが入ることを避けた。また、クロック信号を veto に入れてマスター信号として用い、読み出し機器の動作をコントロールした。クロック信号が動いていない場合に常に veto が on になるようにすることで、クロックの開始により測定を開始できるようにした。

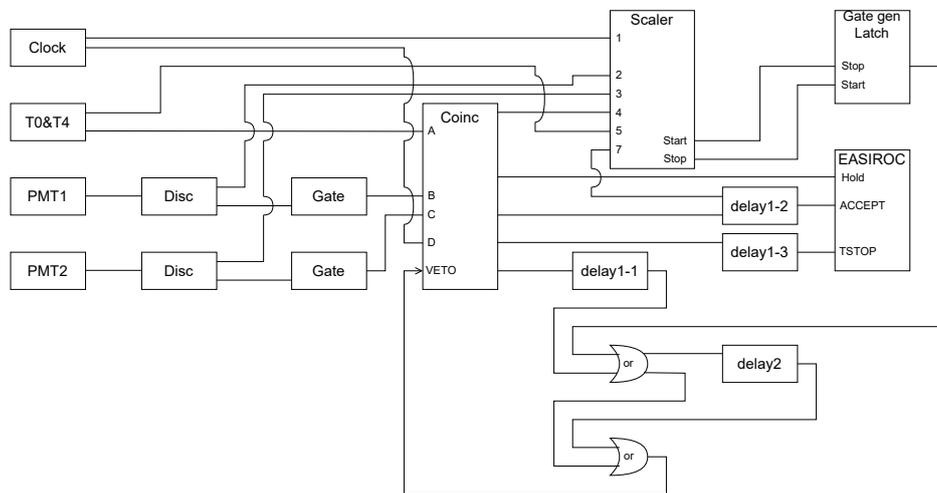


図 3.14: 検出器からの読み出し回路

第4章 検出器の性能評価・較正

この章の最終目標は、電子位置検出器の効率測定である。それに向けて、まずファイバーの性能評価を、平均光電子数・ファイバーのクラスタリングに着目して行った。その後、検出効率を決定した。

4.1 ファイバーの性能評価

4.1.1 平均光電子数による評価

ある ch に電子ビームが当たったとき、その ch が発した光がもととなり、各光検出器にどれだけの光電子が生成されたかを調べた。まず、トリガーシンチ 1、トリガーシンチ 2 のコインシデンスでトリガーをかけたときに、ビームが当たる 1cm 角の範囲（これを以下「ビーム面」と呼ぶ）に含まれる X 軸のあるチャンネルについて見る場合について説明する。図 4.1 のように、ビーム面に含まれている Y 軸の 3 つの ch いずれかが光ったとき、その X 軸の ch がいくつ光電子を出したかを調べる。

そうして得られた X 軸の 1 つの ch の光電子数の分布（図 4.2）の 0 光電子のイベント数と、ランダムトリガーで取得したノイズランの分布（図 4.3）の 0 光電子のイベント数の値を合わせて規格化し、図 4.2 から図 4.3 を引く。そうして得られた分布が図 4.4 である。

ここで、図 4.4 の分布をポアソン分布とみなし、図 4.4 の mean をポアソン分布の μ とする。この μ を該当 ch の平均光電子数とする。Y 軸についてもこの作業を同様に行うことで、全 ch の平均光電子数を求めることができる。図 4.5 の青線が各 ch の平均光電子数である。

図 4.4 を見ると、信号に対して光電子数のピークが見え、閾値を設定することにより、電子を通過した事象を選別できると考える。今回は、 $\mu - 1.5\sqrt{\mu}$ を各 ch の閾値とする。ただし、 $\mu - 1.5\sqrt{\mu} < 3.5$ となる場合には、閾値を 3.5 として下限を設ける。図 4.5 の赤線が各 ch の閾値である。以降の解析ではこの閾値を用いる。

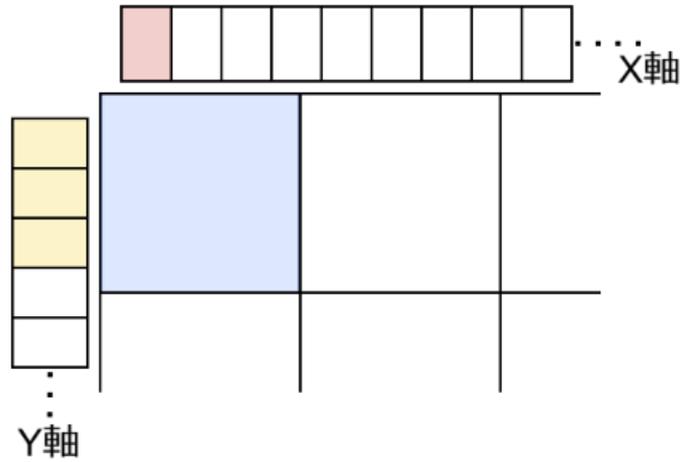


図 4.1: 検出器の一部に電子ビームが当たったときの概略図。青色の正方形はビーム面 (1cm 角)、黄色の長方形はビーム面に含まれている Y 軸の 3 つの ch、赤色の長方形は今注目している X 軸の ch を表している。

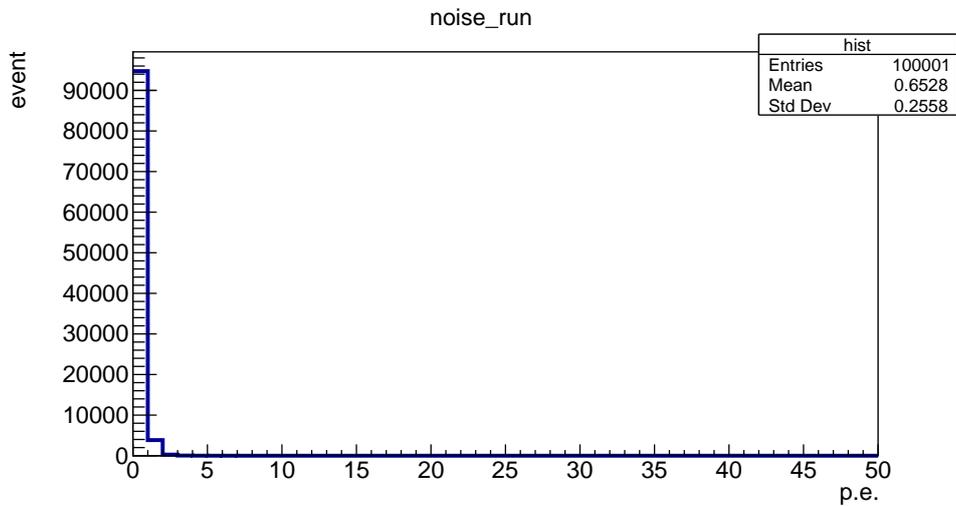


図 4.3: ノイズランをしたときの 3ch の光電子数の分布

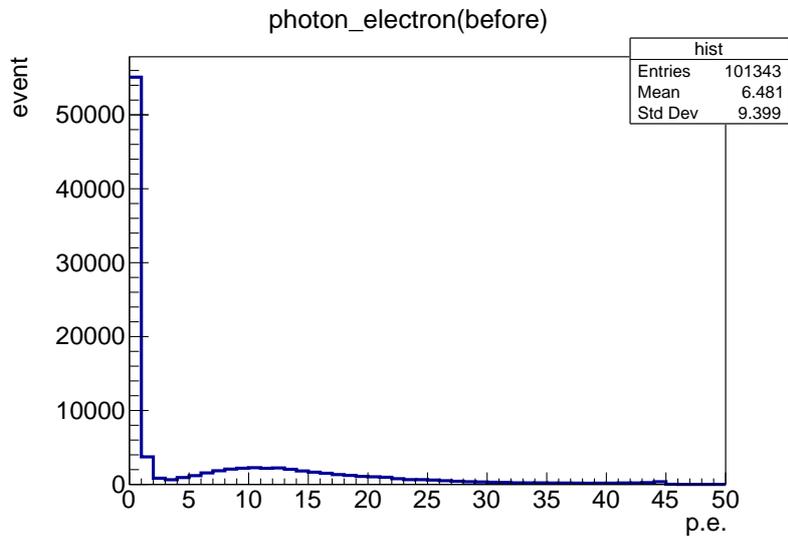


図 4.2: 3ch の光電子数の分布

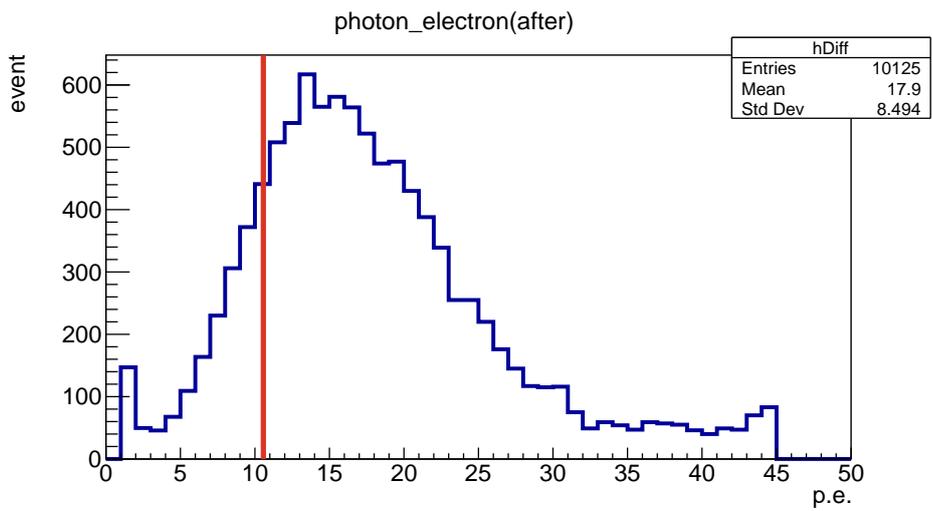


図 4.4: 図 4.2 と図 4.3 の 0 光電子のイベント数を合わせて、図 4.2 から図 4.3 を引いたときの、3ch の光電子数の分布。赤線はこの ch の閾値である。

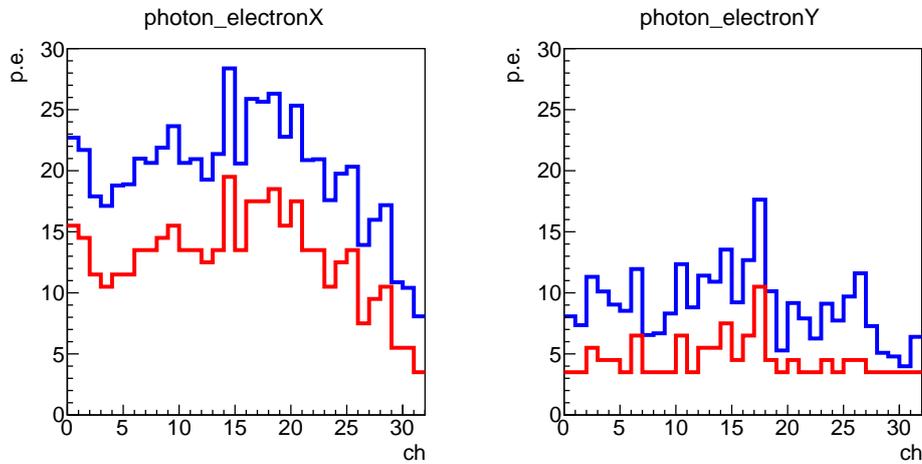


図 4.5: 青線が各 ch の平均光電子数、赤線が各 ch の閾値。右図が X 軸、左図が Y 軸に関する分布。

4.1.2 クラスタリングによる評価

検出器の構造上、電子ビームが異なるチャンネルの間を通過すると、連続して異なるチャンネルが同時に光る可能性がある。また、前方に他の実験の検出器などの物質があり、その物質が放射長の程度以上であれば、電子は多くの場合制動輻射を起こす。さらに放射された光子が対生成を起こすと、複数の電子・陽電子がビーム軸から小角度に放射され、やはり複数のチャンネルが光る可能性がある。ファイバー検出器の前方にパラサイト実験検出器が設置されていた場合とされていない場合を比較した際、連続して光ったファイバーの割合がどれほど増減するのかを調べるためにクラスタリングを行った。

先に求めた閾値以上の光量が MPPC に伝わったチャンネルに「1」、伝わっていないチャンネルに「0」と判定結果を割り当てる。「1」がどれほど連続しているのか、つまり 1 クラスタに含まれるファイバーのチャンネル数を求め、その規格化された分布を見る。

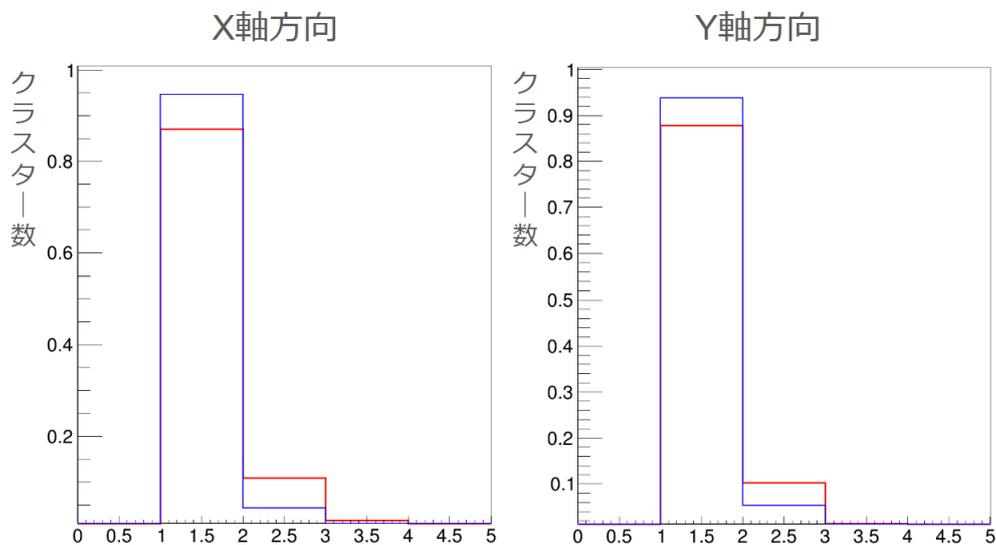


図 4.6: クラスタ内のチャンネル数の分布を規格化したもの。青線がパラサイト実験検出器が前方に無い場合におけるクラスター数の分布、赤線がパラサイト実験検出器が前方にある場合におけるクラスター数の分布を示す

図 4.6 から、3 チャンネル以上連続して光るクラスター数は 1 チャンネル・2 チャンネル連続して光るクラスター数と比較して無視できる大きさである。パラサイト実験検出器が前方に無い場合と比較して、パラサイト実験検出器が前方にある場合における 2 チャンネル連続して光るクラスター数は、X 軸・Y 軸共に増加している。これは、制動放射によって生じた電子・陽電子がチャンネル間に入射したからであると考えられる。

次に、X 軸・Y 軸の各チャンネルの位置で 1 チャンネルのみ光ったクラスター数の位置分布を見る。パラサイト実験検出器が前方に設置されていない場合、ファイバー検出器の有効面の中心にトリガーシンチレータをかけた測定データを調べると図 4.7 の通りとなる。

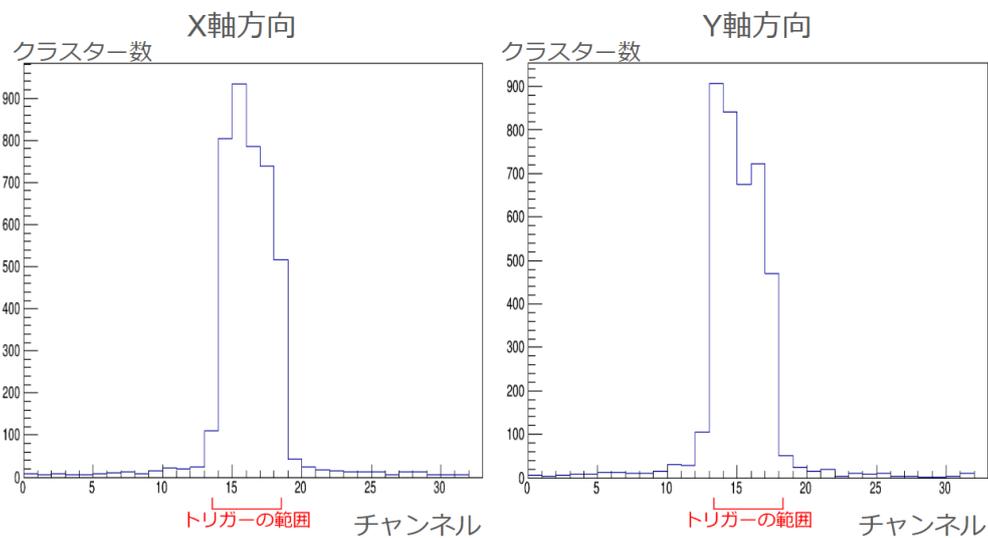


図 4.7: クラスターの位置分布をチャンネル数で表したもの。トリガーがかかっている範囲を横軸に赤文字で記載。

トリガーシンチレータを通過した電子ビームが信号を残していることが、トリガーした位置に相当するチャンネルでのクラスター数の増加として確認することができる。また、トリガーの外側ではクラスターがほぼ見られないことも確認できる。

パラサイト実験検出器による制動放射の影響を調べるため、パラサイト実験検出器が前方に設置されている場合、ファイバー検出器の有効面の中心にトリガーシンチレータをかけた測定データを図 4.7 に追加して比較する。なお、分布は両者ともに正規化されている。

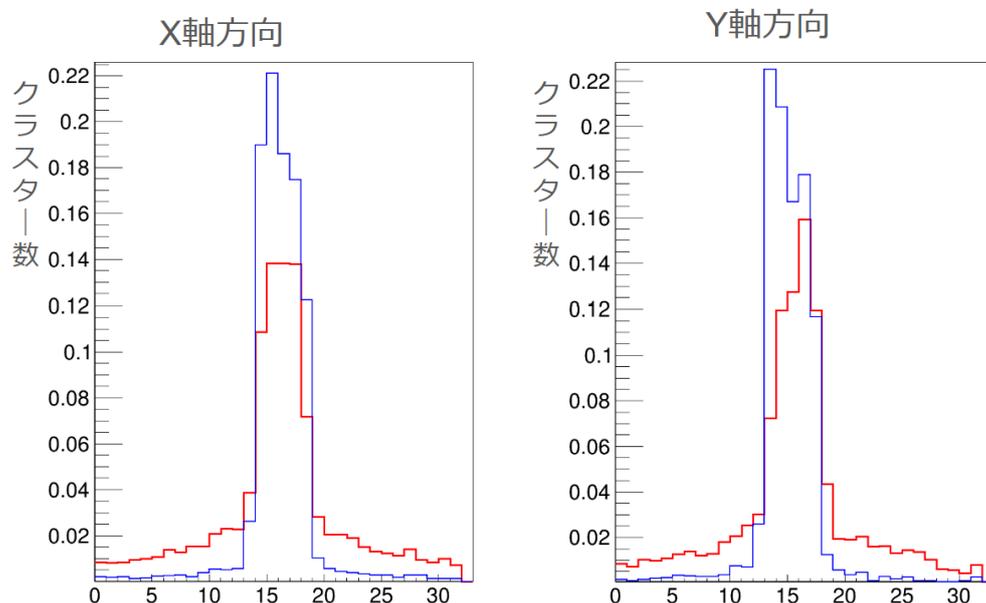


図 4.8: クラスターの位置分布をチャンネル数で表したもの。青線がパラサイト実験検出器が全面に無い場合におけるクラスター数が1つの分布、赤線がパラサイト実験検出器が全面にある場合におけるクラスター数が1つの分布を示す

図 4.8 におけるトリガー外側の赤線に注目すると、制動放射の影響によるビーム中心からの広がりが確認できる。

以上のような影響は見られるが、トリガーを通過した電子ビームの中心位置の確認は可能である。

4.2 検出効率による性能評価・較正

検出効率を求めることで、本章の目的である検出器の性能評価・較正を行う。検出効率により検出器を補正することで、ビーム形状測定実験や電磁シャワー形状測定実験の解析に活用することができる。

4.2.1 検出効率測定実験の Setup と読み出し系

まず、検出効率を導出するために行った実験の Setup と読み出し方法について説明する。検出効率測定実験のセットアップを図 4.9 に示す。

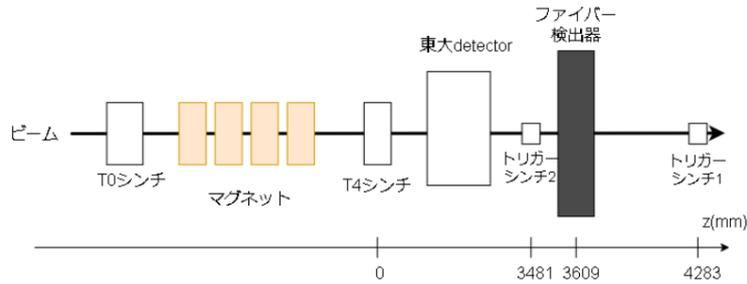


図 4.9: 検出効率測定実験のセットアップ

図 4.9 に示してあるトリガーシンチ 1,2 は 1 cm 角であり、ビームを 1 cm 角に絞るために 4 つのシンチレータのコインシデンスでトリガーを出している。検出器の位置を 1 cm 間隔で上下左右に動かし、1cm 角に絞ったビームを検出面のすべての場所に当てた。また、Q マグネットの電流値は規定値、ビームのエネルギーは 3.0 GeV に設定した。

4.2.2 検出効率の定義と原理

検出効率を求めるにあたり、ファイバーの束と MPPC の 1 セットを 1 つのチャンネルとして、チャンネルごとの検出効率を求める。本来、検出効率はそのチャンネルに粒子が通過したことをトリガーなどで保証できれば、実際のチャンネルの感度を絶対値として求めることができる値である。しかし、以下で論じる通り、1 cm 角のトリガーシンチに対してファイバーがどこに位置しているかの影響を非常に大きく受けていることから、絶対値として求めることが困難である。したがって、本実験では検出効率実験のシミュレーションを用意し、実験と比較することで、検出効率を相対値として求めた。検出効率の導出に用いた式を式 4.1 に示す。

$$\text{相対検出効率} = \frac{\frac{\text{実験のチャンネルごとのイベント数}}{\text{実験のトリガーイベント数}}}{\frac{\text{シミュレーションのチャンネルごとのイベント数}}{\text{シミュレーションのトリガーイベント数}}} \quad (4.1)$$

4.2.3 シミュレーションの用意

相対検出効率を求めるために geant4 を用いた検出効率測定実験のシミュレーションを用意した [5]。シミュレーションでは実験と同様の位置関係

にトリガーシンチと検出器を設置し、チャンネルの形状も模倣した（図 4.10）。また、初期粒子は図 4.9 の T4 シンチ（2.5cm × 5.0cm）から打ち出し、ビームが検出面で縦 12.6 mm, 横 12.6 mm の広がりになるように設定した。シミュレーションの配置図を図 4.11 に示す。

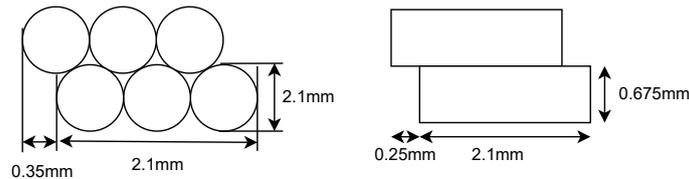


図 4.10: シミュレーションで再現したチャンネルの形状 [5]

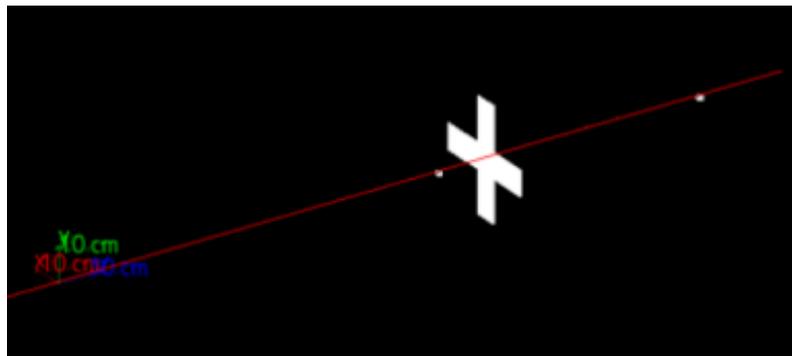


図 4.11: シミュレーション配置図 [5]

4.2.4 検出効率導出にあたって考慮しなければならない現象

検出効率を求める前に考慮しなければならない現象がある。隣り合ったファイバー間を電子が通過した際に複数のファイバーが光る現象があるが、この問題は 4.1 のクラスタリングを用いることで解決できた。しかし、図 4.12 のように四角で囲った範囲の対角線上の頂点を電子が同時に通過した際、矢印の位置にも電子が来たように見える問題がある。この事象を排除するためには見たいチャンネルでない方向のチャンネルについて、1チャンネルのみを要求する必要がある。取得イベント数は減少してしまうが、この方法でデータを解析した。また、実験データとシミュレーションデータには閾値を設定する必要がある。実験データの閾値は 4.1 で説明した平均光電子数をもとにチャンネルごとに決定した。

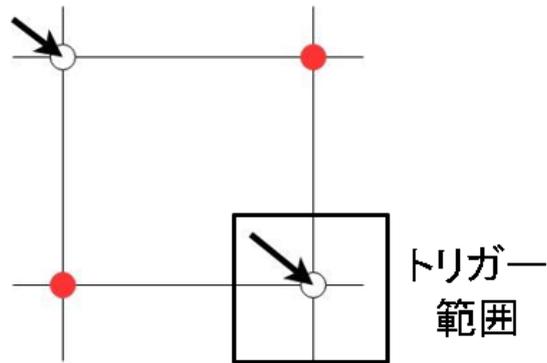


図 4.12: 排除すべき事象

これに対してシミュレーションデータの閾値はファイバー内でのエネルギー損失に課した。図 4.13 は 1 チャンネルのみを見たときのエネルギー損失分布である。これを見ると、山が二つできており、エネルギー損失が小さい山は一つのファイバーしか通過しなかった場合であると考えられる。よって、実験データの閾値がファイバーのシンチレータ部分をほぼ 2 本分通過しているものを選別していると仮定すると、エネルギー損失の閾値は 0.15 MeV が適切であるとわかる。

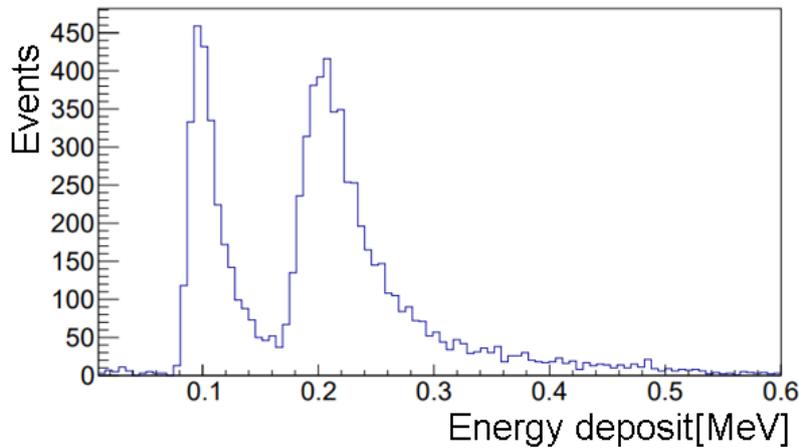


図 4.13: 1 チャンネルにおけるエネルギー損失の分布

4.2.5 検出効率実験の結果と検出効率の導出

まず、検出効率実験によるチャンネルごとの取得イベント数分布を示す(図 4.14)。

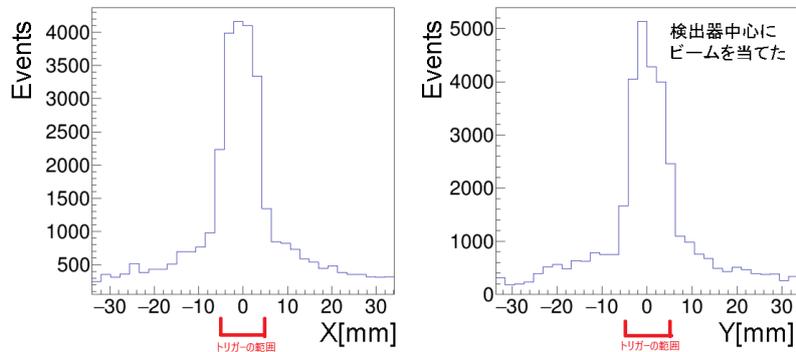


図 4.14: 検出効率実験のチャンネルごとの取得イベント数分布 (実験値)

次に、図 4.15 に示すように、チャンネルごとの取得イベント数をトリガーによる取得イベント数で割ったもの (式 4.1 の分母と分子) を、実験とシミュレーションで比較する。

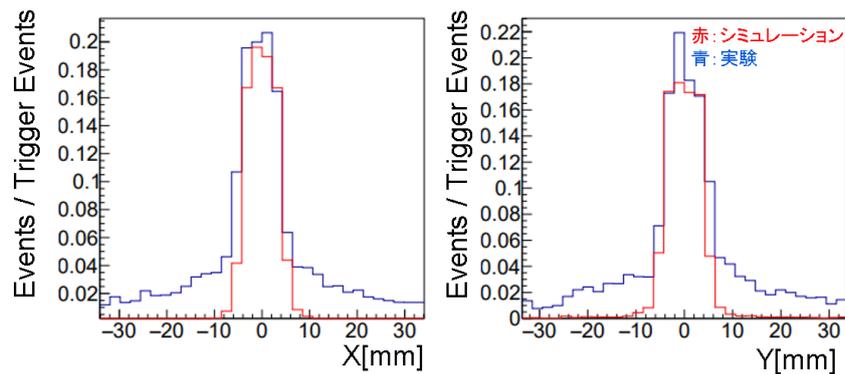


図 4.15: チャンネルごとのシミュレーションと検出効率測定実験の比較 (赤線がシミュレーション、青線が実験値)

対象範囲 1cm の実験結果とシミュレーションの結果が、少なくともトリガーシンチレータの中央付近では類似しており、比較することができるとひとまず仮定する。これをもとに式 4.1 からチャンネルごとの検出効率を求めると 図 4.16 のようになる。ここで、図 4.16 を見ると一定間隔で凸凹が生じていることが分かる。これは、トリガーシンチに対してファイバーが位置する場所の影響を大きく受けていることを示している。図 4.15 をもう一度見ると、トリガーシンチレータの端面付近ではシミュレーションがデータの効率の振る舞いを再現しておらず、それが原因だと考えられる。

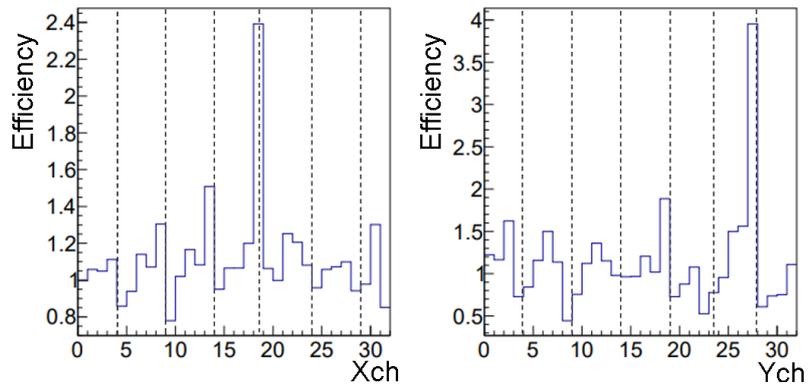


図 4.16: チャンネルごとの相対検出効率：点線はトリガーシンチの端

以上で検出効率を求めることができたが、1cm ずつ検出器を動かすのではなく、0.5 cm ずつ動かすことで、どの検出器チャンネルに対してもトリガーシンチレータの中央付近で効率を測定でき、トリガーシンチレータの位置関係による影響を受けることがなかったのではないかと推測される。

以上で求めた各チャンネルのシミュレーションとの相対検出効率を 5 章で導出された実験結果に適用し、チャンネルごとの性能差を考慮したビーム形状を導くことに活用した。

第5章 ビーム形状測定実験の解析と結果

この章では、第3章で製作した検出器を用いて測定したテストビームラインのビーム形状について示す。特に、QSD、QSFの電流値とビーム形状の関係について述べる。また、得られたビーム形状をシミュレーション結果と比較する。

5.1 実験のセットアップ

ビーム形状測定のための実験セットアップを図5.1に示す。

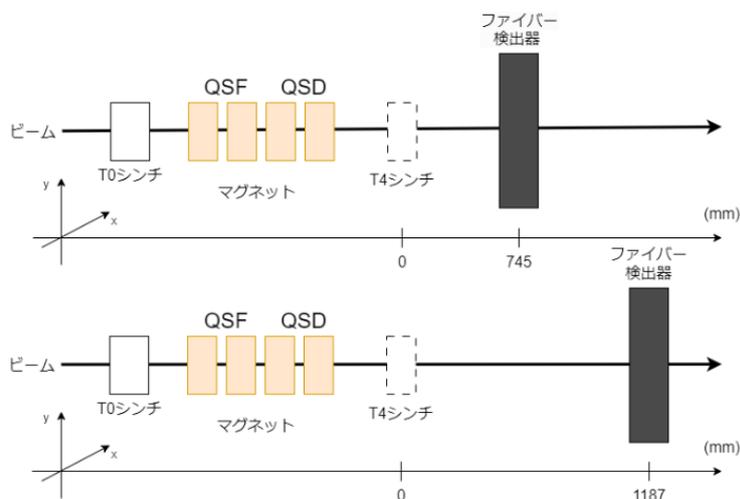


図 5.1: ビーム形状測定実験のセットアップ

ビームがステージまで到達していることを保証するため、T0シンチレータのみをトリガーとして使用した。また、ビームの焦点を求めるために検出器の設置場所として $z = 745 \text{ mm}$ 、 $z = 1187 \text{ mm}$ の2点を設け、それ

それぞれについて測定を行った。 $z = 0$ mm の点は T4 シンチレータの位置としている。以下、 $z = 745$ mm の位置を上流、 $z = 1187$ mm の位置を下流と呼ぶ。Q マグネットの電流値については QRF と QRD では既定値から変更せず、QSF と QSD のみを変化させた。各ビームエネルギーにおける電磁石の規定の電流値を以下の表 5.1 に示す。また、QSF、QSD における変化の割合と電流値について表 5.2、表 5.3 に示す。ただし、QSF、QSD の最大定格電流は 28A である。

表 5.1: 各ビームエネルギーにおける電流値

p [GeV/c]	BEND [A]	QRF [A]	QRD [A]	QSF [A]	QSD [A]
0.5	15.61	8.0	3.4	3.9	4.2
1.0	32.93	15.9	6.7	7.8	8.4
2.0	66.50	31.7	13.3	15.7	16.7
3.0	100.23	47.5	20	23.5	25
4.0	133.89	50	26	28	28
5.0	168.08	50	28	28	28

表 5.2: QSF の変化割合と電流値

change ratio [%]	QSF [A]
15	27.025
10	24.675
0	23.5
-10	22.325
-15	19.975

表 5.3: QSD の変化割合と電流値

change ratio [%]	QSD [A]
10	27.5
5	26.25
0	25
-5	23.75
-10	22.5

利用したビームのエネルギーは 3.0 GeV であった。また、コリメータを用いなかったため広めのビームとなっていた。

5.2 シミュレーションとの比較

測定で得られたビーム形状とシミュレーション結果について、概形、焦点位置、広がり の 3 つの観点から比較し、一致度について述べる。なお、実測データについては第 4 章で議論した閾値、クラスタリングを考慮し、検出器の効率を反映させたものを用いる。

5.2.1 SADを用いたシミュレーションの用意

ビーム形状のシミュレーションのために、SAD(Strategic Accelerator Design)を用いた。SADとは、1986年よりKEKにおいて開発されてきた加速器設計のための計算機コードである。現在テストビームラインにて規定値として設定されているQマグネットの電流値を決定するために用いられてきたSADスクリプトを利用し、コンバータで発生した初期粒子の経路のシミュレーションを行った。シミュレーションでたどったビームの経路を図5.2に示す。

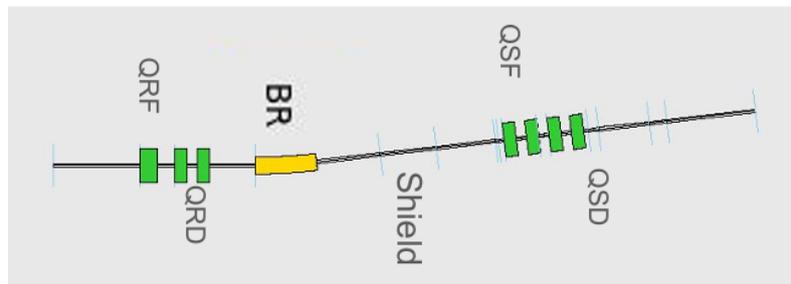


図 5.2: シミュレーションの経路

ここで考慮するものは、図5.2に緑と黄色の四角で示された5種類の電磁石による磁場が及ぼす影響、リングとステージを隔てるシールドおよび各電磁石について設定したビーム開口範囲の2点のみであり、相互作用やそれに伴い生成された二次粒子等については考慮しない。また、ビーム開口範囲を逸脱した粒子についてはその時点で検出器まで到達しなかったものと見なす。

ビーム開口範囲は、Bマグネットについて x 方向 $\pm 30\text{mm}$ 、 y 方向 $\pm 17\text{mm}$ 、Qマグネットについて半径 26mm 、シールドについて半径 28mm とした。

5.2.2 ビーム形状の比較

いくつかの条件での測定データとシミュレーション結果を図5.4、図5.7、図5.8、図5.9に示す。ここでは、4.2.4節でも述べたように、図5.3において赤い点2カ所に電子が到達した場合でも黒矢印で示された2点を含む計4点に電子が到達したと扱われる事象を排除するため、1イベントにおいて1クラスターのみが閾値を超えた場合に限り有効なデータとして扱っている。

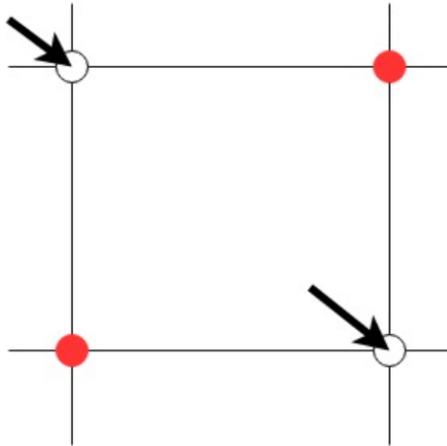


図 5.3: 排除すべき事象 (図 4.12 再掲)

図 5.4 について測定データとシミュレーション結果を見比べると、どちらも $x = 0\text{mm}$ 、 $y = 0\text{mm}$ の位置に最も強くビームが当たっており、 x 方向に少し長い楕円形となっていることが確認できる。ビームの広がりに関しては測定データの方がかなり大きくなっていた。特に y 方向についての差が大きくなっており、これは QSF で y 方向に広げられるため、シミュレーション上にてその後の QSD に設定したビーム開口範囲の外を通過する電子が x 方向よりも多くなることが要因として考えられる。また測定データには縦横に青い筋が見られるが、これらは検出器の性能によるものであり、4.2.5 節で述べたように実験セットアップの問題で検出効率が正確に求められなかったチャンネルの影響が見えていると考えられる。図 5.5、図 5.6 に示した各方向の一次元ヒストグラムにて大きくへこんでいる部分がこれにあたる。

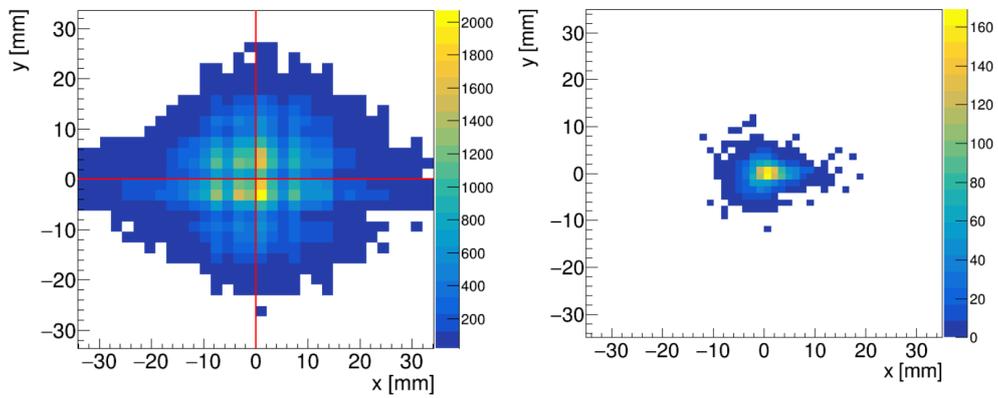


図 5.4: 上流において全て既定値の場合の二次元ヒストグラム。

(左) 測定データ

(右) シミュレーション結果

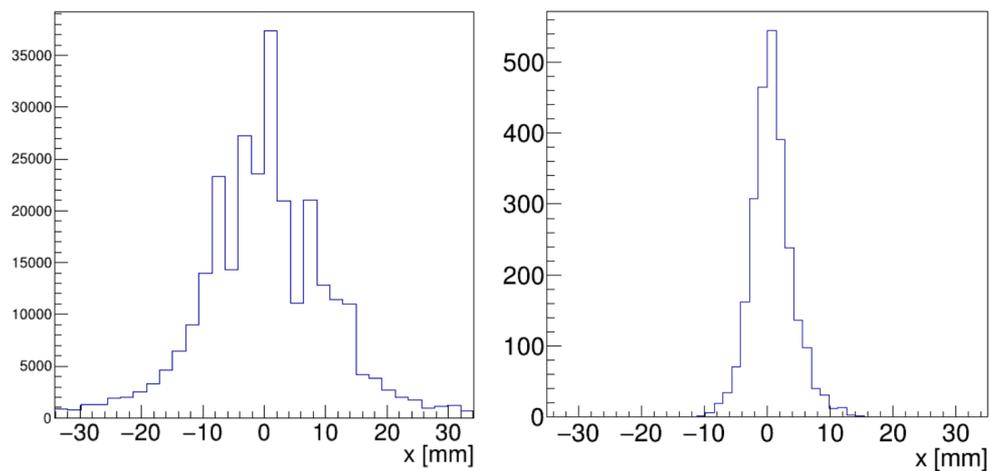


図 5.5: 上流において全て既定値の場合の x 方向一次元ヒストグラム

(左) 測定データ (std.dev: 10.43 ± 0.01 mm)

(右) シミュレーション結果 (std.dev: 3.36 ± 0.05 mm)

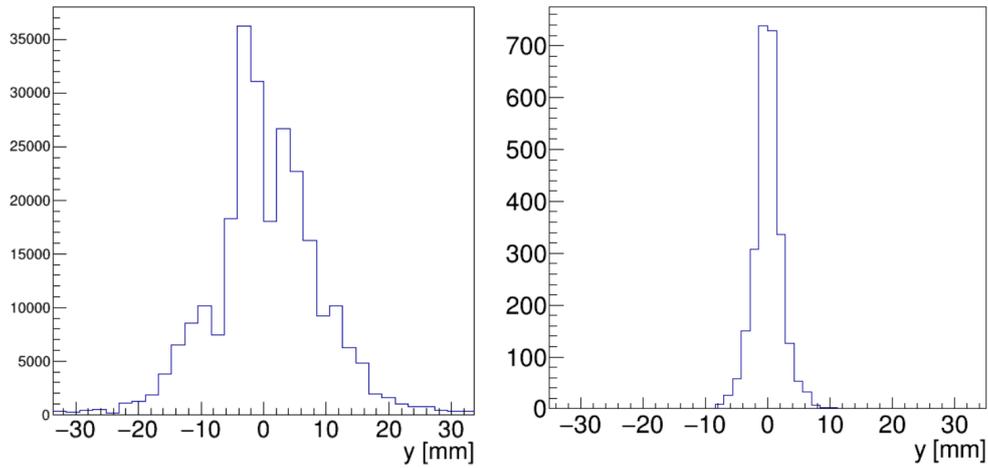


図 5.6: 上流において全て既定値の場合の y 方向一次元ヒストグラム
 (左) 測定データ ($std.dev : 8.59 \pm 0.01$ mm)
 (右) シミュレーション結果 ($std.dev : 2.31 \pm 0.03$ mm)

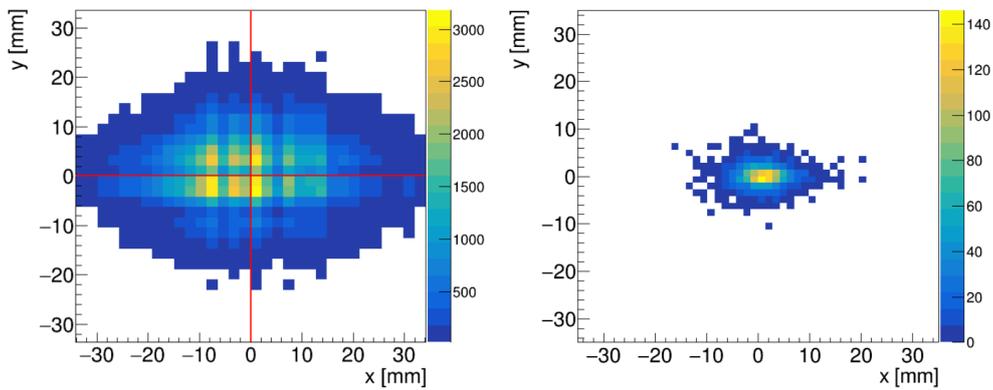


図 5.7: 下流において全て既定値の場合の二次元ヒストグラム
 (左) 測定データ
 (右) シミュレーション結果

電流値を変えずに検出器を下流に移動させたときの形状を図 5.7 に示す。図 5.4 と比較すると、測定データ、シミュレーション結果ともに x 方向により広げられ y 方向により絞られるようになっている。このことから、 x 方向の焦点は検出器上流に、 y 方向の焦点は検出器下流に位置していると推測できる (詳しくは 5.2.3 節で議論する)。

検出器を下流に設置したまま Q マグネットの電流値を変化させたとき

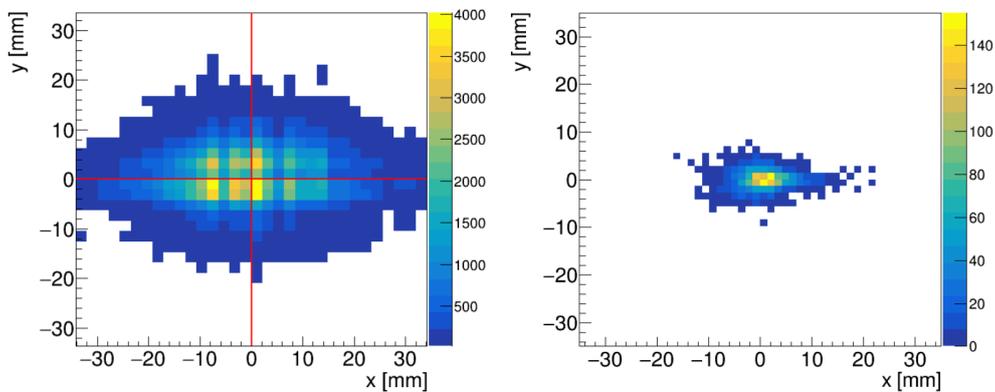


図 5.8: 下流において QSD のみ 10 % 強めた場合の二次元ヒストグラム
 (左) 測定データ
 (右) シミュレーション結果

の形状を図 5.8、図 5.9 に示す。図 5.8 は QSD のみ 10% 強めた場合、図 5.9 は QSF のみ 15% 強めた場合のものである。まず図 5.7 と図 5.8 を比較すると、QSD を強めると x 方向により広げられ y 方向により絞られるようになっている。QSD は x 方向にビームを広げ y 方向に収束させる向きに力を働かせるので、QSD の理解と実測、シミュレーションでの形状変化が一致していると言える。図 5.9 についても図 5.7 と比較すると、どちらも x 方向に大きく広げられている。図 5.7 の考察において x 方向の焦点が検出器上流にあると推測したが、QSF を強めると x 方向の焦点はより上流に動くはずであることからこの変化を説明できる。 y 方向については測定データでは少し広げられたがシミュレーション結果ではあまり変化がないように見える。これは図 5.4 の考察で述べたように、シミュレーションにおいて QSD に設定したビーム開口範囲による制限の影響が大きいからだと考えられる。

5.2.3 焦点位置の比較

Q マグネットの電流値を変化させた際の焦点位置の変化について比較を行う。焦点位置の導出方法として、Q マグネットの電流値を変更せずに検出器を上流および下流にそれぞれ設置した場合におけるビームの広がりを求め、これらの値から広がりがゼロとなる位置を計算する手法を採用した(図 5.10)。今回、ビームの広がりとして図 5.5、図 5.6 に示したような一次元ヒストグラムの標準偏差を用いた。

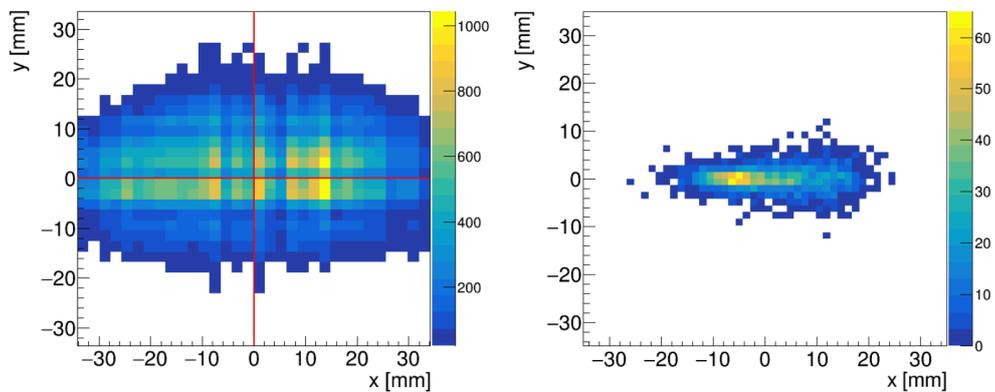


図 5.9: 下流において QSF のみ 15 % 強めた場合の二次元ヒストグラム
 (左) 測定データ
 (右) シミュレーション結果

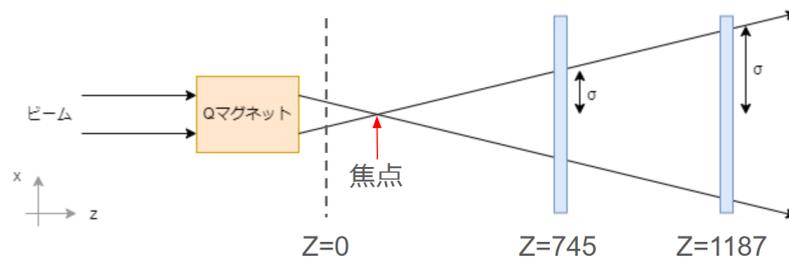


図 5.10: 焦点位置の導出

QSF を規定値に固定し、QSD のみ電流値を変化させた場合の焦点位置の変化を図 5.11、図 5.12 に示す。

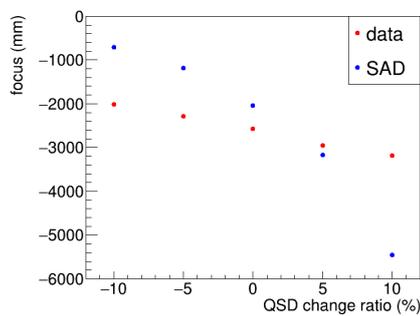


図 5.11: QSD を変化した場合の x 方向焦点位置

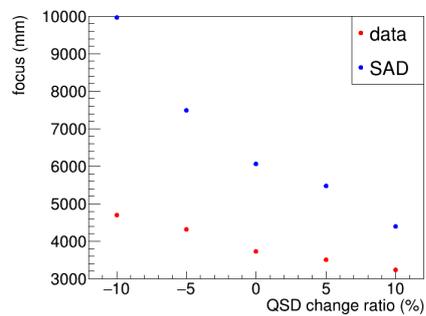


図 5.12: QSD を変化した場合の y 方向焦点位置

x 方向、 y 方向ともに QSD を強めると焦点位置が z の負の向き、すなわち上流に移動することが確認できる。 x 方向については、図 5.13 のように QSD が働くと QSF で収束された後に x 方向に広げられるため (図 5.13 赤矢印)、見かけ上の焦点が上流に移動すると考えられる。 y 方向については、QSD を強めると y 方向に強く収束されることになるため、焦点が上流側に移動する。

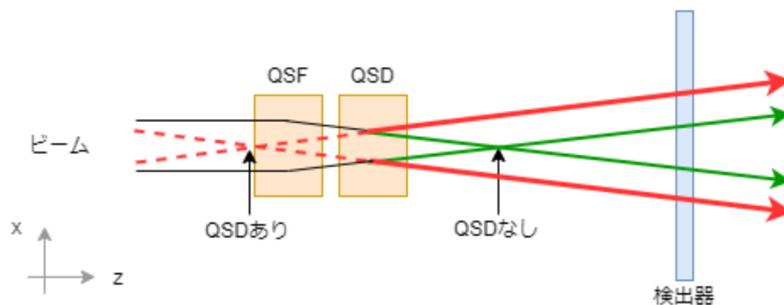


図 5.13: QSD の変化に伴う x 方向焦点の移動

測定データ、シミュレーション結果ともに変化の傾向は同じであったが、測定データのほうが傾きが小さくなっていたことから、QSD の影響について実際はシミュレーションほど強く出ないということが推測できる。

5.2.4 広がり比較

Q マグネットの電流値を変化させた際のビームの広がりの変化について比較を行う。ここでも 5.2.3 節と同様にビームの広がりとして次元ヒストグラムの標準偏差を用いた。

以下の図 5.14、図 5.15、図 5.16、図 5.17 に測定データとシミュレーション結果の広がりについてのグラフを示す。

図 5.14、図 5.15 は QSF を変化させたとき、図 5.16、図 5.17 は QSD を変化させたときの x 方向、 y 方向の広がりをそれぞれ表したものである。いずれの条件であっても前節で述べた通りビームの広がり絶対値は測定データのほうがはるかに大きい。測定データとシミュレーション結果は概ね同様の変化をしていることが確認できた。

QSF を変化させたときの x 方向の変化 (図 5.14) について、QSF の電流値を大きく変化させるとより x 方向に広がっていた。これより、現在の QSF の規定値は x 方向にビームを絞る観点からは悪くない値であると言

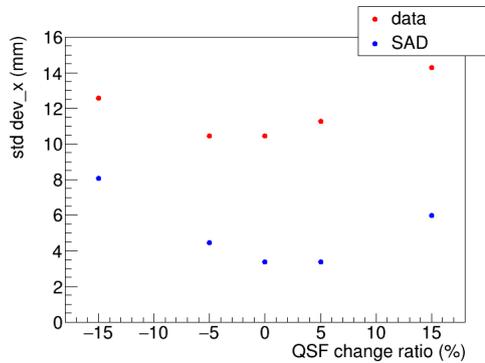


図 5.14: QSF を変化させた場合の x 方向の広がり

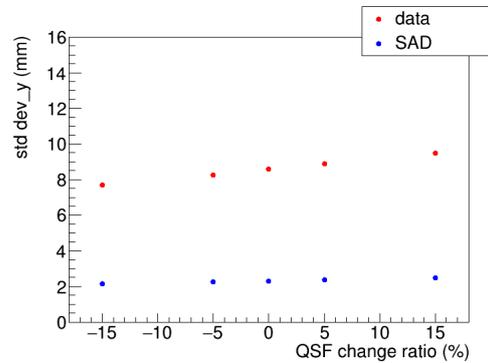


図 5.15: QSF を変化させた場合の y 方向の広がり

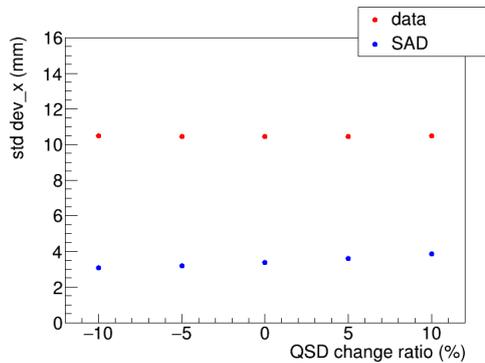


図 5.16: QSD を変化させた場合の x 方向の広がり

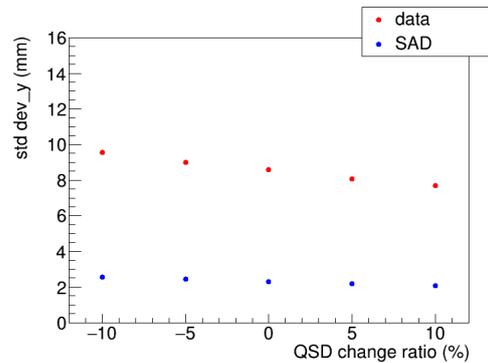


図 5.17: QSD を変化させた場合の y 方向の広がり

える。対して y 方向の変化 (図 5.15) については、QSF の電流値を強くするほど広がりが大きくなっていった。測定データの方が変化が大きかったことから、QSF の y 方向への影響は実際はシミュレーションより強く出るだろうと推測できる。

次に QSF を変化させたときの変化について、 x 方向 (図 5.16) ではシミュレーション結果では QSD の電流値を強くするほど広がりが大きくなっていったが、測定データはあまり変化しなかった。反対に y 方向 (図 5.17) ではどちらも QSD の電流値を強くするほど広がりが小さくなっていき、変化の程度は測定データの方が大きかった。変化の程度の差より、シミュレーションと比較して実際の QSF の影響は x 方向には弱く、 y 方向には強く出ていることが推測できた。

また、5.2.2節でも述べたように測定データの方がシミュレーション結果よりも広がりが大きくなっていた。この要因についてはいくつか考えられる。まず測定データ側の要因として、二次粒子の影響がある。今回は二次粒子によるイベントも含めてクラスタリングを施した後に5.2.2節の冒頭で述べたイベント選択(図5.3)を行ったものを測定データとして扱った。この手順ではクラスタリングの時点で二次粒子の影響を受けることとなり、実際よりもビームが広がって検出される可能性が考えられる。次にシミュレーション側の要因として、ビーム開口範囲の設定により起こる問題と二次粒子による影響がある。シミュレーションを行う際に、5.2.1節で述べたようにQマグネットでは磁場の乱れが少ないと考えられる半径26mmのビーム開口範囲を設定した(図5.18の赤い○で囲んだ範囲)。しかし、実際にはこの外側を通った粒子もQマグネットの磁場の影響を受けて検出器に到達する可能性は十分に考えられる。また、今回のシミュレーションではビームと加速器を構成する物質との相互作用や二次粒子については全く考慮していない。これらのことからシミュレーション上では実際のビームよりも絞られた結果が現れたと考えられる。

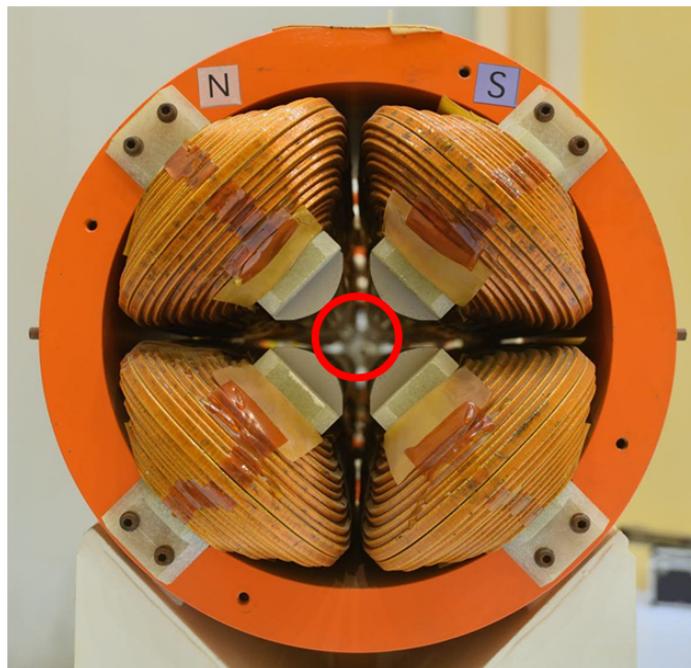


図 5.18: Q マグネットの通過可能範囲 [6]

5.3 測定データとシミュレーション結果の一致度と問題点

5.2 節での議論より、測定データとシミュレーション結果では電流の変化に対するビーム形状の変化傾向は一致しているものの、各磁石の影響の強さについては差異が見られることが確認された。したがって、SAD は概ね実際のビームを再現できているといえるが、再現度の向上にはさらなる改良の余地があると考えられる。具体的には、5.2.4 節で述べた通過可能範囲設定の見直しや、二次粒子の考慮などが挙げられる。磁石の影響の強さにおける差異の原因については、さらに詳細な調査が必要である。

SAD の改良に加えて、測定データに関してより正確な結果を得るためには、いくつかの課題が残されている。まず、検出器の検出効率を正確に求めるために手法の見直しが必要である。特に 4.2 節で述べた効率測定実験の方法に問題があり、トリガーシンチレータの移動幅を 5 mm 程度に狭めて再測定を行うことで改善が期待される。また、今回の解析では二次粒子について考慮せずに行ったが、これらを考慮した解析を行うことでさらに正確性の向上が見込まれる。

これらの改善を施した上で同様の実験を行うことで、ビームの改良に向けたより詳細な指針を得ることができると考えられる。

第6章 電磁シャワー形状測定 実験

この章では、ファイバー検出機による電磁シャワー測定について述べる。目的はシャワーの進んだ距離に対するシャワーの発展を調べることである。シャワーの広がりや数を反映した数値として1 イベント中で信号が来たチャンネル数を測定し、シャワーの進んだ距離との関係を調べた。

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ときに、制動放射と電子陽電子対生成が連鎖的に起こり、多数の粒子が生成される現象である (図 6.1)。

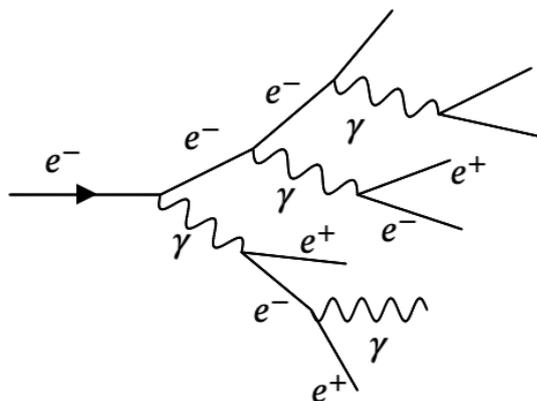


図 6.1: 電磁シャワーの概略

シャワーの振る舞いは、放射長 X_0 と critical energy E_c を用いて表すことができる。エネルギー E_0 の電子が物質中を x 進んだ後のエネルギー E

は、

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

と表せる。シャワーは電子のエネルギーが E_c を下回るまで広がる。 E_c は、制動放射と電離作用の起こる確率が等しくなるエネルギーである。ビームエネルギー E_b としてシャワーが進む距離を計算すると、

$$\begin{aligned} E_c &= E_b e^{-x/X_0} \\ e^{-x/X_0} &= \frac{E_c}{E_b} \\ x &= \ln\left(\frac{E_b}{E_c}\right) X_0 \end{aligned}$$

この実験では 3GeV のビームを使用し、鉛と鉄による電磁シャワーを測定した。 X_0 鉄 = 17.6mm, X_0 鉛 = 5.6mm であるから、 x 鉄 $\simeq 5X_0$, x 鉛 $\simeq 6X_0$ 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を図 6.2 に示す

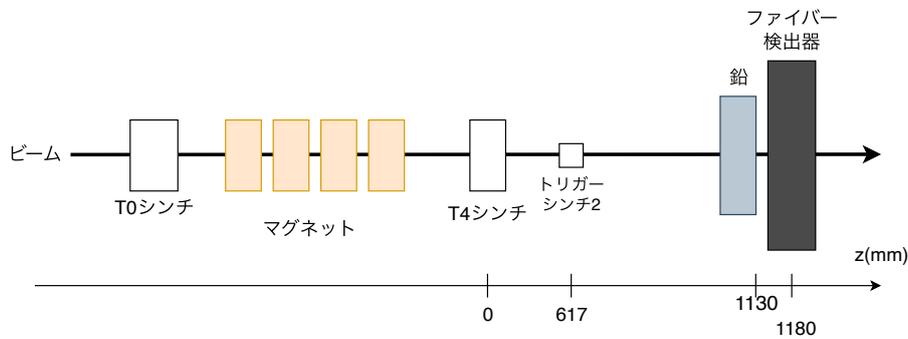


図 6.2: 電磁シャワー測定の設定アップ

検出器の前に鉄または鉛のブロックを置き、ビームを当てることでシャワーを観測した。用いた金属ブロックは、鉄 12mm、鉛 20mm、50mm である。これらのブロックを組み合わせて設置することで、シャワーの進む物質量を調節した。調べたブロックの組み合わせを表 6.1 に示す。

全厚さ z (mm)	Fe(12mm)	Pb(20mm)	Pb(50mm)	z/X_0
12	1	0	0	0.7
20	0	1	0	3.6
24	2	0	0	1.4
32	1	1	0	4.3
36	3	0	0	2.0
40	0	2	0	7.1
48	4	0	0	2.7
50	0	0	1	8.9
60	0	3	0	10.7
70	0	1	1	12.5
90	0	2	1	16.1
100	0	0	2	17.9
120	0	1	2	21.4

表 6.1: ブロックの組み合わせ

トリガー条件としては加速器リング内、マグネット後、検出器直前の 1cm 各のシンチのコインシデンスとし、検出器の中心付近で起こるシャワーを捉えられるようにした。

6.3 解析方法

解析は、geant4 シミュレーションとの比較により行った。シミュレーションは、金属ブロックと検出器を実際と同じ位置に置いて行った。検出器はファイバーのみとして、断面は図 4.10 のように長方形で再現した。初期粒子は、検出器直前のシンチから生成 (図 6.3)。検出器の位置での位置と分散が測定値と一致するようにした (図 6.4)。

解析では、各イベントで光っ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。ファイバーが光ったかどうかは、測定結果では ADC 値、シミュレーションではエネルギー損失から判定する。測定結果の閾値は、平均光電子数から求めたものを用いた。シミュレーション結果の閾値は図 4.13 より、0.15 MeV とした。

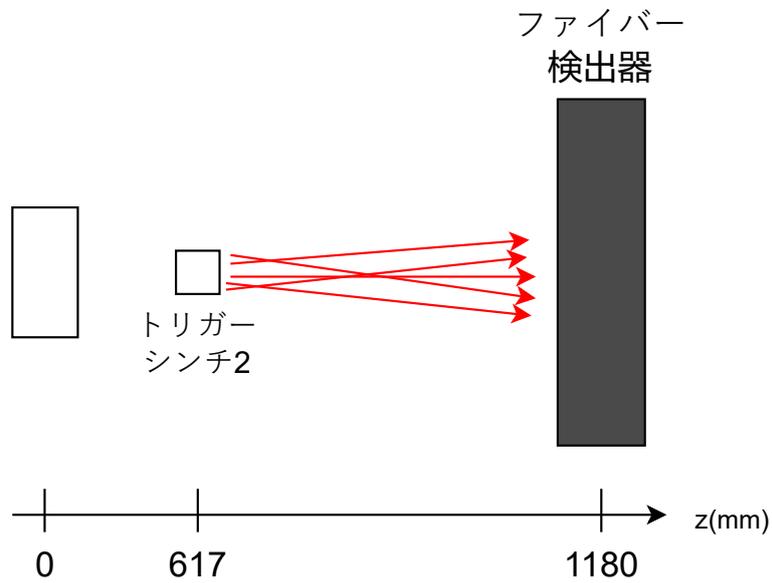


図 6.3: シミュレーションのセットアップ

6.4 結果

各チャンネルが光った回数を図 6.5 に示す。

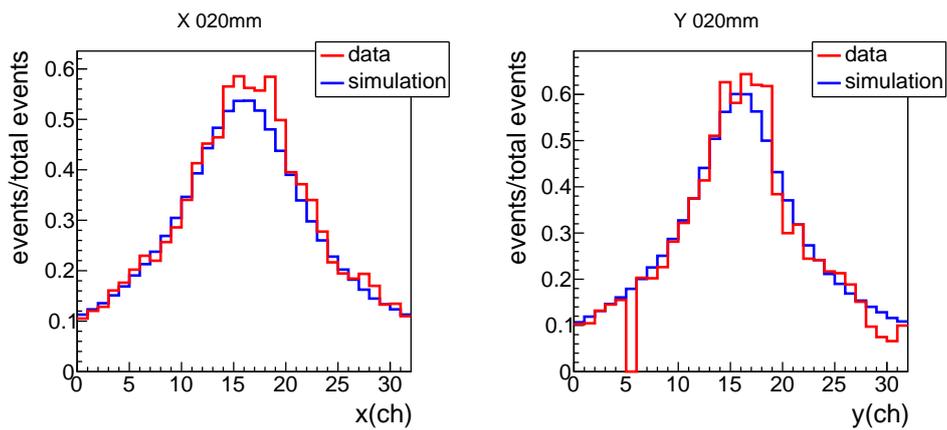


図 6.5: 各チャンネルの光った回数/全イベント数

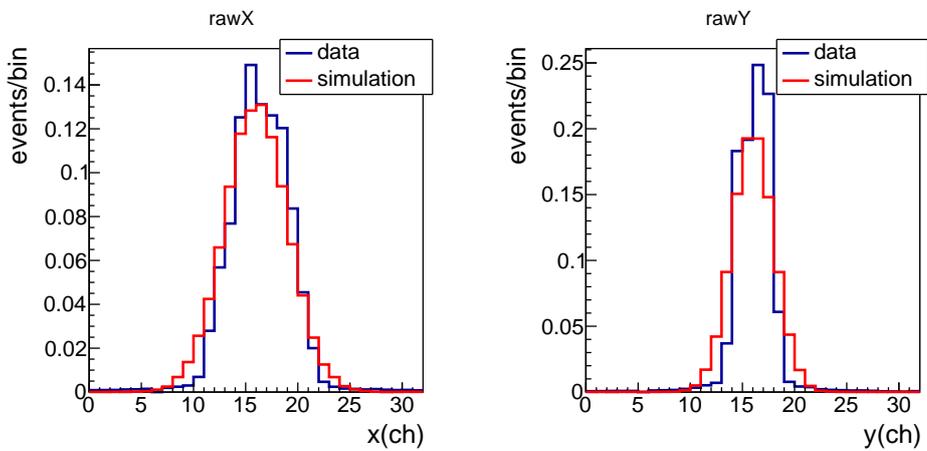


図 6.4: 初期粒子の分布

シャワーの横方向の広がりを検出器が捉えられていることが分かる。1 イベントで光った本数を図 6.6 に示す。

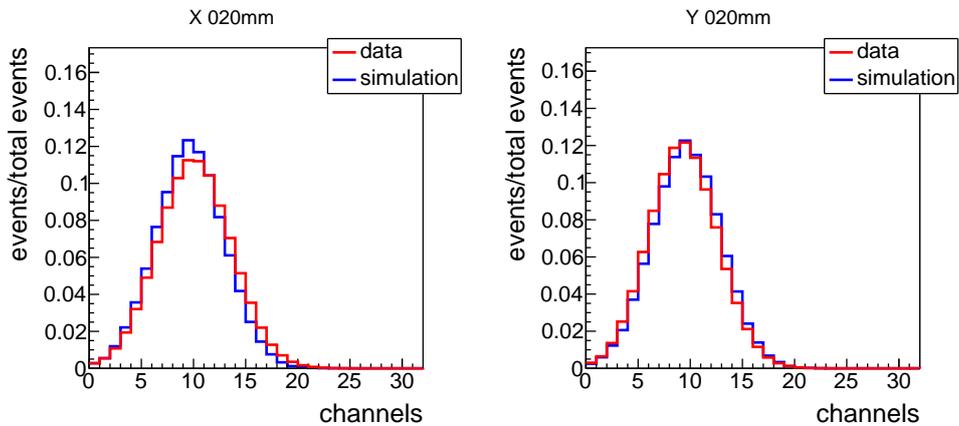


図 6.6: 1 イベントで光ったチャンネル数 (規格化)

この本数の平均値をシャワーの粒子数を表す数と考え、これとシャワーの進んだ距離との関係を調べた。シャワーの距離は放射長で換算した。これにより、シャワーの縦方向の発展が分かる (図 6.7)。

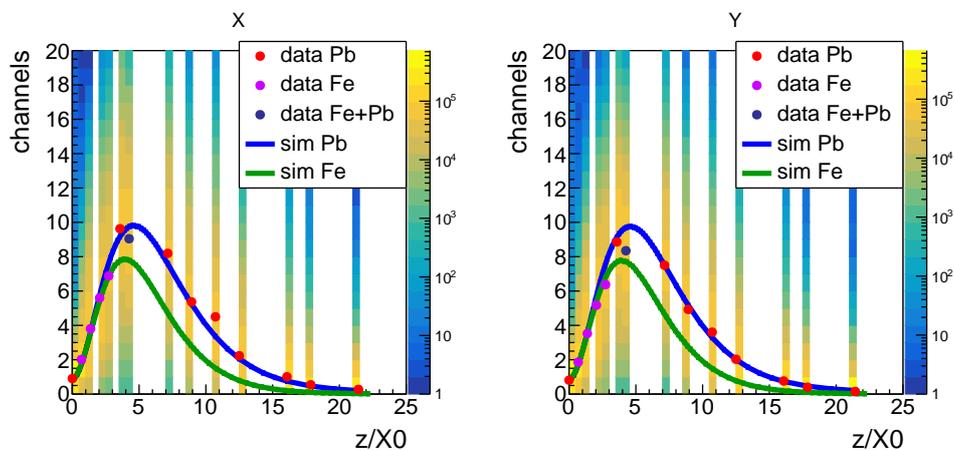


図 6.7: シャワーの縦方向の発展

鉄のみ、鉛のみを設置した場合の実験結果はシミュレーション結果と一致した。しかし、鉛 20 mm と鉄 12 mm を組み合わせて設置した実験結果 ($4.3X_0$) は、鉄のみ、鉛のみのシミュレーションのいずれとも一致していない。一方で、実際の測定と同じように鉄 12 mm と鉛 20 mm を設置したシミュレーションは、測定結果と一致している (図 6.8)。6.1 節では、シャワーの終点が最後の物質の critical energy に依存すると考えた。だが、実際にはシャワーの広がりには終点以外の物質の影響も受けていると考えられる。

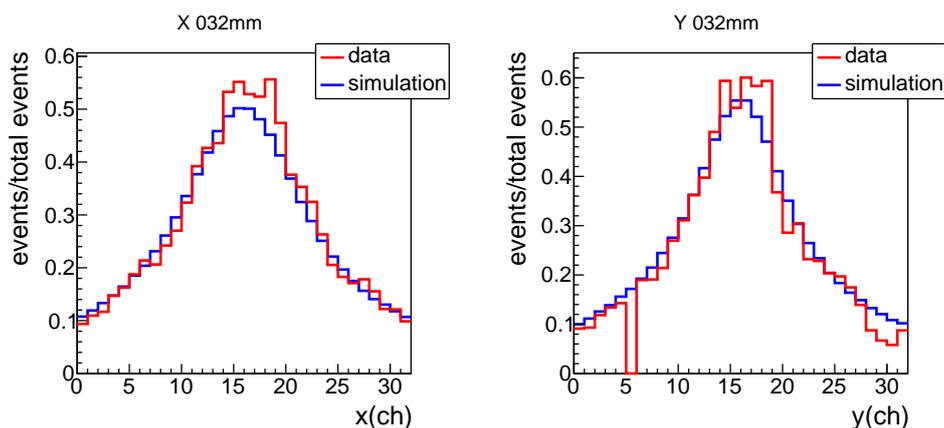


図 6.8: 鉄 20 mm+鉛 12 mm の結果

また、シミュレーション結果のシャワーの広がる距離 (同時に光るチャ

ンネル数がピークとなる放射長)は、6.1節の計算より1放射長程度小さい。これは、粒子数が増えると複数の粒子が同じファイバーに入る事象が増え、ファイバーの光る本数の方が先にピークになるためであると考えられる。

以上より、1種類の物質を通ったシャワーに関しては、その振る舞いが放射長で説明できることがわかった。

第7章 結論

本研究では、KEK 測定器開発テストビームラインにおけるビーム形状についてシミュレーション結果と測定で得られた結果の一致度を調査した。その結果、四重極磁石の電流値を変化させた際のビーム形状の変化は測定データとシミュレーション (SAD) で傾向が一致していることが確認された。この結果より、SAD は概ね実際のビームの変化を再現できており、また、ファイバー検出器の結果に基づいてビーム最適化の方針を立てるのは適切であると考えられると結論づけられる。ただし、測定データと SAD の各磁石の影響の強さについては差異が確認されたため、再現度の向上にはさらなる改良の余地があるといえる。

また、電磁シャワーの測定結果はシミュレーション結果と概ね一致しており、シャワーの振る舞いが放射長で説明できることも確かめられた。さらに、解析時に NIM-EASIROC の特性についても明らかとなり、補正を行うことで測定でのデータ収集において適切に機能することが確認された。

しかし本研究には複数の問題が残されており、これらによる結果への影響は無視できないと考えられる。まず、より正確な結果を得るためにはより精度の高い検出効率が必要であり、そのためには効率測定実験の手法の改善が求められる。また、ビームの広がりには両者に大きな差が見られたため、この点についても改善が必要である。手法としては、より実際の実験セットアップにより近い形となるようシミュレーションのセットアップを変更することや、二次粒子について考慮するための追加実験や解析を行うことが挙げられる。さらに本研究ではビーム形状測定において測定位置として2点取ったが、より詳細に形状変化の傾向を把握しビーム最適化の指針とするためには、マグネットの上流側も含めて測定点を増やすことも必要だと考えられる。

本研究を通じてビーム形状の観点から測定データとシミュレーションの一致度を概ね把握し、シミュレーションの精度向上やビームラインの改善に向けた指針を得ることができた。今後、シミュレーションの修正

や測定点を増やした測定を行うことでさらに詳しい指針を得ることが可能であり、それによってKEK測定器開発テストビームラインの電子ビームをより絞ることができるかと期待される。

謝辞

本研究にご協力いただいた皆様に、心より感謝申し上げます。

まず、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構の ARTBL をご担当の皆様には、ビーム利用許可をいただき、誠にありがとうございました。特に、素粒子原子核研究所の中村勇講師には、受け入れ手続きや責任者としてのご指導において多大なご支援を賜り、深く感謝しております。

また、素粒子原子核研究所の岡崎佑太助教には、シミュレーションツール SAD についてのご指導をいただき、非常に有益な助言を得ることができました。さらに、神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程 1 年の佐野友麻氏、佐倉慶汰氏、浅見優輝氏、笹田真宏氏には、実験シフトの実施にご協力いただきましたことに、心から感謝申し上げます。

皆様のご支援に心より感謝いたします。

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/>.
- [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.
- [3] 測定器開発テストビームライン 写真集
URL: https://photos.google.com/share/AF1QipPCV90fzabSD4eY7q_pV6a-zLWwr06enSFR00_Ucn8p01FWrqEVYAbhrB2YPIu4bg?key=Yy1uaFlkVElvWFJiaV9vUmZuNzZoRk5SeGRPX1N3.
- [4] HAMAMATSU 技術資料 URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf.
- [5] Geant4 Home Page URL: <https://geant4.web.cern.ch/>.
- [6] AR Test Beamline 写真集
URL: <https://photos.app.goo.gl/dBiR6omGe1bnChRz9>.
- [7] KEK, “PF-AR 計画”
URL: <https://www2.kek.jp/ja/tour/electron-31.html>.
- [8] KEK, SAD Home Page URL: <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>.