

2023年度 修士論文

J-PARC  $\pi 20$  ビームラインで用いる  
TOF-tracker Multi-gap  
Resistive Plate Chamberの開発

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻  
原子核実験研究室

宇田 隆佑

## 概 要

これまでの核子構造の研究では核子の構成要素であるパートンの分布を記述したパートン分布関数 (PDF= Parton Distribution Function) が実験で測定されてきた。しかし、核子スピンパズルをはじめとした PDF だけでは説明できない現象がいくつか知られている。これらの現象を理解するためにパートンの分布を 3 次元に拡張した一般化パートン分布関数 (GPDs = Generalized Parton Distributions) や横運動量依存分布関数 (TMD PDF = Transverse-Momentum-Dependent Parton Distribution Function) の決定がここ 20 年での核子構造の研究の柱の一つである。

我々は、J-PARC のハドロン実験施設に建設予定の高運動量二次粒子ビームラインである  $\pi 20$  ビームラインで排他的ドレリヤン反応 ( $\pi^- p \rightarrow \gamma^* n \rightarrow \mu^+ \mu^- n$ ) の反応断面積の測定を計画している。この断面積は GPDs を用いて記述されるとされており、断面積から GPDs を情報を取り出すことを目的とする。 $\pi 20$  スペクトロメーターの最下流に設置されたハドロンアブゾーバーとアブゾーバーの上流と下流に設置されたミュオン検出器で構成されるミュオン識別 ( $\mu$ ID = Muon Identification) システムでミュオンの識別を行う。また飛跡検出器によって測定されたミュオンの missing mass からミュオン以外に生成されたハドロンの識別を行うことで、排他的ドレリヤン反応の同定をする。ミュオンを識別する上で主なバックグラウンドソースは  $\pi$  中間子や  $K$  中間子が飛行中に崩壊してできたミュオンである。このバックグラウンドを抑制するために  $\mu$ ID システムの上流のミュオン検出器は高い位置分解能および時間分解能を併せ持つ必要がある。この上流ミュオン検出器が覆う面積は  $1.6 \times 2.4 \text{ m}^2$  である。またこのミュオン検出器の要求性能は検出効率が 99 % 以上、時間分解能が 100 ps 以下で、位置分解能が 1 mm 以下である。上流のミュオン検出器として、時間・位置同時測定用の Multi-gap Resistive Plate Chamber を開発している。

MRPC は複数の高抵抗のプレートを数 100  $\mu\text{m}$  の間隔で積層した荷電粒子検出用ガス検出器である。MRPC に荷電粒子が通過すると、ガス原子をイオン化し、発生した電子がアバランシェ増幅を起こす。増幅された電子の信号がガスギャップ外側に設置された読み出しストリップに誘起されることで荷電粒子を検出する。MRPC はギャップ幅が狭く、高い電圧が均一にかかっているため時間分解能がよいという特徴を持つ。そのため MRPC は Time-Of-Flight (TOF) 測定用検出器として用いられてきた。TOF-tracker MRPC は従来の MRPC と違い、読み出しストリップピッチを数 mm 程度に狭くし、上下の読み出しストリップを直交させることで粒子の通過した位置を二次元的に精度よく測定できるようにしており、高い時間分解能と位置分解能を併せ持つ検出器である。

本研究では、読み出しストリップピッチ 5 mm、有感領域  $500 \times 1000 \text{ mm}^2$  のプロトタイプ TOF-tracker MRPC を製作した。製作したプロトタイプ MRPC には読み出しストリップの幅やストリップ反対側のグラウンドの形状が複数のものを用意し、プロトタイプ MRPC に宇宙線がヒットした時の信号をオシロスコープで調査することで最も適したストリップ条件を決定した。また、SPring-8 の LEPS2 ビームラインでプロトタイプ MRPC の性能評価試験を行った。性能評価試験の結果、このプロトタイプ MRPC の検出効率は 99 % 以上を達成できた。時間分解能は 65 ps と要求性能を大きく上回る結果が得られ、ポジティブな信号でも  $\pi 20$  スペクトロメーターで用いるディスクリミネーターや TDC を用いて高い時間分解能を達成できることが示せた。また、位置分解能として 0.8 mm を達成することができた。初めて  $1000 \times 500 \text{ mm}^2$  の大型の TOF-tracker MRPC で十分な検出効率、高い時間分解能・位置分解能を達成できた。本論文では TOF-tracker MRPC の開発目的、MRPC の原理、プロトタイプ TOF-tracker MRPC の製作過程、宇宙線試験及び性能評価試験で得られた結果について詳細に報告する。



# 目次

|                                                    |           |
|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 序論</b>                                    | <b>6</b>  |
| 1.1 核子構造の物理                                        | 6         |
| 1.2 一般化パートン分布関数                                    | 7         |
| 1.3 排他的 Drell-Yan 反応                               | 7         |
| 1.4 J-PARC $\pi$ 20 ビームライン                         | 9         |
| 1.4.1 J-PARC                                       | 9         |
| 1.4.2 $\pi$ 20 ビームライン                              | 9         |
| 1.4.3 本研究の目的                                       | 10        |
| <b>第 2 章 Multi-gap Resistive Plate Chamber の原理</b> | <b>12</b> |
| 2.1 MRPC の基本原理                                     | 12        |
| 2.2 オペレーションモード                                     | 12        |
| 2.2.1 ストリーマーモード                                    | 12        |
| 2.2.2 アバランシェモード                                    | 13        |
| 2.3 ギャップにかかる電圧                                     | 13        |
| 2.4 レート耐性                                          | 13        |
| 2.5 検出効率                                           | 14        |
| 2.6 実験に使用されている TOF MRPC                            | 14        |
| 2.7 TOF-tracker MRPC                               | 14        |
| <b>第 3 章 プロトタイプ TOF-tracker MRPC の開発</b>           | <b>15</b> |
| 3.1 材料                                             | 15        |
| 3.1.1 電極                                           | 15        |
| 3.1.2 高抵抗プレート                                      | 15        |
| 3.1.3 スペーサー                                        | 15        |
| 3.1.4 アクリルケース                                      | 16        |
| 3.1.5 絶縁体と読み出しストリップ                                | 16        |
| 3.1.6 アンプ                                          | 19        |
| 3.1.7 HV モジュール                                     | 20        |
| 3.1.8 ガス                                           | 20        |
| 3.2 製作手順                                           | 20        |
| <b>第 4 章 宇宙線試験</b>                                 | <b>24</b> |
| 4.1 セットアップ                                         | 24        |
| 4.2 グラウンド形状依存性                                     | 24        |
| 4.3 ストリップ幅依存性                                      | 25        |
| <b>第 5 章 ビーム試験</b>                                 | <b>26</b> |
| 5.1 SPring-8                                       | 26        |
| 5.1.1 LEPS2 ビームライン                                 | 26        |
| 5.1.2 RF 信号                                        | 26        |
| 5.2 セットアップ                                         | 27        |

|              |                          |           |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 5.2.1        | 検出効率・時間分解能評価用セットアップ      | 27        |
| 5.2.2        | 位置分解能評価用セットアップ           | 28        |
| 5.3          | ディスクリミネーター               | 30        |
| 5.4          | HUL HR-TDC               | 31        |
| 5.5          | ファイバートラッカー               | 32        |
| 5.5.1        | NIM-EASIROC              | 34        |
| <b>第 6 章</b> | <b>ビーム試験結果</b>           | <b>36</b> |
| 6.1          | 測定項目                     | 36        |
| 6.2          | ケーブル長の違いによる TOT 分布の違い    | 36        |
| 6.3          | 検出効率                     | 37        |
| 6.3.1        | 検出効率評価方法                 | 37        |
| 6.3.2        | ストリップ伝播距離依存性             | 38        |
| 6.3.3        | ケーブル長の依存性                | 39        |
| 6.4          | 時間分解能                    | 40        |
| 6.4.1        | TOT Integral によるスルーイング補正 | 40        |
| 6.4.2        | X、Y 方向の時間分解能             | 41        |
| 6.4.3        | HV 依存性                   | 46        |
| 6.5          | 時間分解能のケーブル長の依存性          | 47        |
| 6.6          | ヒットストリップ数                | 50        |
| 6.7          | 位置分解能                    | 51        |
| 6.7.1        | 位置分解能評価方法                | 51        |
| 6.7.2        | TOT 較正                   | 52        |
| 6.7.3        | TOT Integral を用いた重みづけ    | 54        |
| 6.7.4        | ヒットストリップ数ごとの位置分解能        | 55        |
| 6.7.5        | サイドごとの位置分解能              | 58        |
| 6.7.6        | 全体の位置分解能                 | 59        |
| 6.7.7        | HV 依存性                   | 59        |
| <b>第 7 章</b> | <b>結論と今後の展望</b>          | <b>62</b> |
| 7.1          | 結論                       | 62        |
| 7.2          | 今後の展望                    | 63        |

# 目 次

|      |                                                                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1  | 核子の描像とパートン分布関数の関係 . . . . .                                                                                                               | 6  |
| 1.2  | 排他的 Drell-Yan 反応の反応過程。 . . . .                                                                                                            | 8  |
| 1.3  | J-PARC の全体図 [9]。 . . . .                                                                                                                  | 9  |
| 1.4  | ハドロン実験施設とそこで行われている実験 [9]。 . . . .                                                                                                         | 10 |
| 1.5  | $\pi 20$ ビームラインスペクトロメーター。 . . . .                                                                                                         | 11 |
| 2.1  | MRPC の模式図。 . . . .                                                                                                                        | 12 |
| 2.2  | MRPC のギャップにかかる電圧 . . . . .                                                                                                                | 13 |
| 2.3  | ストリップの形状 (左) 従来の TOF MRPC の読み出しストリップ、(右)TOF-tracker<br>MRPC の読み出しストリップ。 . . . .                                                           | 14 |
| 3.1  | 製作したプロトタイプ TOF-tracker MRPC の構造の断面図。 . . . .                                                                                              | 15 |
| 3.2  | (左) アクリルケース模式図、(右) 釣り糸配置用スペーサー断面図。 . . . .                                                                                                | 16 |
| 3.3  | X 方向の PCB の設計図 . . . . .                                                                                                                  | 17 |
| 3.4  | Y 方向の PCB の設計図 . . . . .                                                                                                                  | 18 |
| 3.5  | PCB に取り付けた U.FL コネクタ . . . . .                                                                                                            | 18 |
| 3.6  | 8 ch アンプの写真 . . . . .                                                                                                                     | 19 |
| 3.7  | 32 ch アンプの写真 . . . . .                                                                                                                    | 20 |
| 3.8  | 電極テープに導線を貼付した様子 . . . . .                                                                                                                 | 21 |
| 3.9  | 釣り糸の張り方。 . . . .                                                                                                                          | 21 |
| 3.10 | アクリルケースの蓋。 . . . .                                                                                                                        | 22 |
| 3.11 | アクリルケースのガス封じをする前までの状態。 . . . .                                                                                                            | 22 |
| 3.12 | アクリルケースのガスを塞いだ状態 . . . . .                                                                                                                | 23 |
| 3.13 | (左) 電圧供給用導線を通す穴を塞いだ状態、(右) ガスチューブ周りを塞いだ状態、左<br>から来ているのがガスチューブ。 . . . .                                                                     | 23 |
| 3.14 | 完成したプロトタイプ MRPC を横から見た写真。 . . . .                                                                                                         | 23 |
| 4.1  | (左) 横から見た宇宙線試験のセットアップ、(右) 上から見た宇宙線試験のセットア<br>ップ。 . . . .                                                                                  | 24 |
| 4.2  | オシロスコープで確認した各グラウンド形状での MRPC の信号の波形、オシロスコー<br>プのスケールは 3 枚とも統一されている。(左)No Ground の信号、(中央)Separate<br>Ground の信号、(右)Full Ground の信号。 . . . . | 25 |
| 4.3  | 各ストリップ幅の信号の波形、オシロスコープのスケールは全ての図で同じである。<br>(上左) ストリップ幅 1.15 mm、(上右) ストリップ幅 1.35 mm、(下左) ストリップ幅<br>1.60 mm、(下右) ストリップ幅 4 mm。 . . . .        | 25 |
| 5.1  | SPring-8 を上空から見た写真 [28]。 . . . .                                                                                                          | 26 |
| 5.2  | 逆コンプトン散乱によって生成された $\gamma$ のエネルギー分布 . . . . .                                                                                             | 27 |
| 5.3  | 横から見た時の時間分解能評価用セットアップ。 . . . .                                                                                                            | 27 |
| 5.4  | 上流側から見た時の MRPC のセットアップ。 . . . .                                                                                                           | 28 |
| 5.5  | 横から見た時の位置分解能評価用セットアップ。 . . . .                                                                                                            | 29 |
| 5.6  | 上流側から見た時の MRPC のセットアップ。 . . . .                                                                                                           | 29 |

|      |                                                            |    |
|------|------------------------------------------------------------|----|
| 5.7  | (左) 上流側から見たセットアップの写真、(右) 下流側から見たセットアップの写真。                 | 30 |
| 5.8  | 使用したディスクリミネーターの写真                                          | 30 |
| 5.9  | HUL HR-TDC の写真                                             | 31 |
| 5.10 | TDC のオフセットによるネガティブ信号とポジティブ信号の TOT の違い。                     | 32 |
| 5.11 | (左)FT の設計図、(右)FT の実際の写真。                                   | 33 |
| 5.12 | FT の各レイヤーの構造 [30]。                                         | 33 |
| 5.13 | (左) 使用した MPPC、(右)FT の光検出部                                  | 34 |
| 5.14 | NIM EASIROC の写真                                            | 35 |
|      |                                                            |    |
| 6.1  | ケーブル長ごとの TOT 分布                                            | 37 |
| 6.2  | X 方向のヒットマップ                                                | 38 |
| 6.3  | Y 方向のヒットマップ                                                | 38 |
| 6.4  | X、Y 方向の検出効率                                                | 39 |
| 6.5  | 検出効率の拡大図                                                   | 39 |
| 6.6  | ケーブルの長さの違いによる検出効率の違い                                       | 40 |
| 6.7  | TOT と TOT Integral                                         | 41 |
| 6.8  | X 方向の MRPC と RF の時間差                                       | 41 |
| 6.9  | Y 方向の MRPC と RF の時間差                                       | 42 |
| 6.10 | MRPC と RF との時間差と TOT との二次元分布                               | 43 |
| 6.11 | X Top の MRPC と RF との時間差                                    | 44 |
| 6.12 | X Bottom の MRPC と RF との時間差                                 | 44 |
| 6.13 | Y Left (280 mm) の MRPC と RF との時間差                          | 45 |
| 6.14 | Y Right の MRPC と RF との時間差                                  | 45 |
| 6.15 | 片側読み出しごとの TOT 分布                                           | 46 |
| 6.16 | 時間分解能の HV 依存性                                              | 47 |
| 6.17 | ケーブル長条件ごとの MRPC-RF                                         | 48 |
| 6.18 | ケーブル長ごとの時間分解能の HV 依存性                                      | 49 |
| 6.19 | ヒットストリップ数ごとのイベントが占める割合 (X 方向)                              | 51 |
| 6.20 | ヒットストリップ数ごとのイベントが占める割合 (Y 方向)                              | 51 |
| 6.21 | ヒット位置の決定方法                                                 | 52 |
| 6.22 | X 方向の TOT が最も大きいストリップ                                      | 53 |
| 6.23 | TOT 分布にガウスフィッティング                                          | 54 |
| 6.24 | X 方向の位置分解能と重み付けの関連性                                        | 55 |
| 6.25 | Y 方向の位置分解能と重み付けの関連性                                        | 55 |
| 6.26 | ヒットストリップ数ごとの MRPC-FT                                       | 57 |
| 6.27 | X 方向各サイドの MRPC-FT、(左)X Top の MRPC-FT、(右)X Bottom の MRPC-FT | 58 |
| 6.28 | Y 方向各サイドの位置分解能、(左)Y Left の MRPC-FT、(右)Y Right の MRPC-FT    | 58 |
| 6.29 | X,Y 方向それぞれの MRPC-FT                                        | 59 |
| 6.30 | X 方向のサイドごとの位置分解能の HV 依存性                                   | 60 |
| 6.31 | Y 方向のサイドごとの位置分解能の HV 依存性                                   | 60 |
| 6.32 | X、Y 方向の位置分解能の HV 依存性                                       | 61 |

# 表 目 次

|     |                                            |    |
|-----|--------------------------------------------|----|
| 6.1 | 片側時間分解能とジオメトリー、TOT、アンプ、反対向きのストリップまとめ . . . | 46 |
| 6.2 | ケーブル長ごとの時間分解能 . . . . .                    | 49 |
| 6.3 | X 方向のヒットストリップ数ごとの位置分解能 . . . . .           | 56 |

# 第1章 序論

## 1.1 核子構造の物理

原子核物理学において核子は原子核の基本的な構成要素である。また、核子を研究することは強い相互作用によって閉じ込められたクォーク・グルーオンの力学を理解するのに適している。核子構造を研究する上で、核子は互いにクォークとグルーオンから構成される多体系という描像で記述されてきた。核子内のクォークとグルーオンは合わせてパートンと呼ばれており、パートンの分布はパートン分布関数 (PDF = Parton Distribution Function) という関数で表される。PDF は核子の進行方向、衝突軸である縦方向の運動量に対する各パートンが担う運動量の割合である変数  $x$  で表される。この  $x$  は Bjorken の  $x$  と呼ばれる。核子が相互作用しない 3 個の価クォークから成り立っていると仮定すると、クォークの PDF は図 1.1(a) のように  $x = \frac{1}{3}$  にピークを持つデルタ型の関数となる。クォーク同士はグルーオンを介して相互作用をしあっているので図 1.1(b) のように  $x = \frac{1}{3}$  まわりに幅を持つような分布となる。実際には、グルーオンからクォーク・反クォーク対、海クォークが対生成されるので、図 1.1(c) のように  $\frac{1}{3}$  以下の  $x$  にも分布を持つ。これが実験で得られる PDF の形となる。

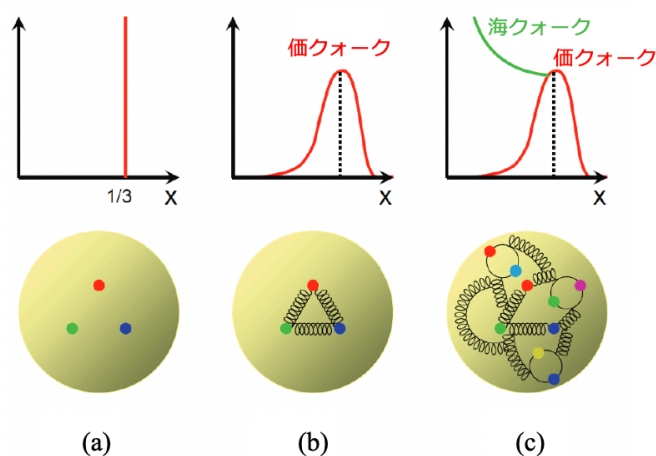


図 1.1: 核子の描像とパートン分布関数の関係、(a) 核子が価クォークのみで構成された描像。(b) 核子が価クォークとグルーオンで構成された描像。(c) 核子が価クォーク、海クォークおよびグルーオンで構成された描像。

この PDF は核子を単純にクォークとグルーオンからなる多体系として扱う高エネルギー実験では十分良い記述ではあるが、この描像では理解できない現象があることもまた知られている。例えばクォークとグルーオンのスピンの寄与だけでは核子のスピン  $\frac{1}{2}$  を説明することができず、クォークとグルーオンの軌道角運動を比較的大きな割合で含めなければならないと考えられている [1]。この問題は核子スピンパズルとして知られている。このスピンパズルを解決するためにも核子の新たな記述が必要であり、それが核子のパートンの分布を縦方向だけでなく、3 次元に拡張したものである。この 3 次元に拡張した核子構造の記述が今後の核子構造研究の目標である。

## 1.2 一般化パートン分布関数

一般化パートン分布関数 (GPD = Generalized Parton Distributions) とは核子内のパートンの分布を粒子の進行方向の運動量に加え、横方向の位置の情報を含んだ関数である。GPDs は 3 つの変数によって記述される。1 つ目は 1.1 節で述べた Bjorken の  $x$  である。2 つ目は skewness  $\xi$  と呼ばれる無次元量である。3 つ目は 4 元運動量移行  $t$  である。初期状態と終状態の核子の運動量をそれぞれ  $p, p'$  としたときに  $\xi, t$  はそれぞれ次のように与えられる。

$$\xi = \frac{(p - p')^+}{(p + p')^+} \quad (1.1)$$

$$t = (p - p')^2 \quad (1.2)$$

ここで、ある 4 次元ベクトル  $a^\mu$  に対して  $a^+$  は次のように定義される。

$$a^\mu = \frac{a^0 + a^3}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

無偏極の GPD はこれらの 3 変数を用いて  $H^q(x, \xi, t), E^q(x, \xi, t)$  と表される [2]。 $q$  はパートンのフレーバーである。また偏極した GPD は  $\tilde{H}^q(x, \xi, t), \tilde{E}^q(x, \xi, t)$  と表される [2]。GPD はいくつかの重要な特徴を持つことがわかっている。GPD の一次のモーメントは、

$$\int_{-1}^1 dx H^q(x, \xi, t) = F_1^q(t) \quad (1.4)$$

$$\int_{-1}^1 dx E^q(x, \xi, t) = F_2^q(t) \quad (1.5)$$

であり、 $F_1(t), F_2(t)$  はそれぞれディラック形状因子、パウリ形状因子と呼ばれている [3]。また、 $t = 0$  での  $H^q + E^q$  の  $x$  の 2 次のモーメントは、

$$J_i = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 dx x [H^q(x, \xi, t=0) + E^q(x, \xi, t=0)] \quad (1.6)$$

であるが、これは核子のスピンに対してクォークのスピンと軌道角運動量を合わせた全寄与であることが  $J_i$  によって示されている [4]。そのため核子スピンパズルを解明する上で GPD は非常に期待されている。これだけでなく GPD 自体がパートンの 3 次元情報を含んだ重要な物理量であり、今後の核子構造の物理において大きな役割を担うと期待されている。

GPD には仮想光子がクォークと直接散乱する深部仮想コンプトン散乱 (DVCS = Deeply Virtual Compton Scattering) 過程や仮想光子とクォークの散乱によって中間子が生成される深部仮想中間子生成 (DVMP = Deeply Virtual Meson Production) 過程などの散乱過程からアクセスすることができる [5, 6]。すでにこれらの散乱過程は DESY の HERMES、H1、ZEUS や JLab の HALL-A、CLAS などの実験で測定されている。GPD のような分布・破碎関数は物理過程によらない普遍性を持っている。そのため異なる実験で測定した GPD に関連した同一散乱過程のデータを統合して解析をするグローバル解析という手法で関数の決定を行うことができる。すでに DVCS 過程や DVMP 過程の結果を用いて決定された GPD のモデルが存在している。今後は GPD にアクセスすることのできる物理的過程の測定を行い、その結果を既存のグローバル解析に加えることで、関数決定の精度をさらに上げていく必要がある。

## 1.3 排他的 Drell-Yan 反応

Drell-Yan 反応とはハドロン同士の衝突によってハドロン内のクォークと反クォークが対消滅し、仮想光子を媒介してミューオン対が生成される反応のことである。Drell-Yan 反応の中でも排他的過

程のことを排他的 Drell-Yan 反応という。例えば、 $\pi^-$  中間子が陽子に衝突すると、Drell-Yan 反応によりミューオン対とあるハドロン  $X$  が生成される ( $\pi^- p \rightarrow \gamma^* X \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ )。その中でも最終状態のハドロン  $X$  が核子であるものが排他的 Drell-Yan 反応 ( $\pi^- p \rightarrow \gamma^* n \rightarrow \mu^+ \mu^- n$ ) である。図 1.2 には排他的 Drell-Yan 反応の反応過程を表した図である。この反応の反応振幅は 1.2 節で述べた GPD と  $\pi$  中間子が真空状態から出現する分布の振幅を記述した分布振幅 (DA = Distribution Amplitude) の 2 つの長距離過程とパートン同士の対消滅を記述した短距離過程の畳み込みによって記述される。

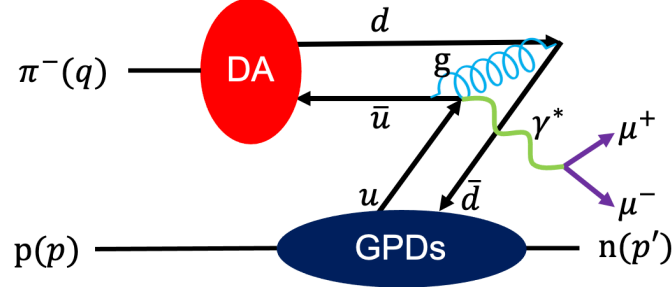


図 1.2: 排他的 Drell-Yan 反応の反応過程。

$\pi$  中間子の運動量を  $q$ 、核子の始状態の終状態の運動量をそれぞれ  $p, p'$ 、反応の前後で仮想光子  $\gamma^*$  が持ち去ったエネルギーを  $q'$  とする。 $Q'^2 = q'^2$  と  $t = (p' - p)^2$  に関する微分断面積は不変量  $\tau = Q'^2 / (2p \cdot q)$  において次のように与えられる [7]。

$$\left. \frac{d\sigma_L}{dt dQ'^2} \right|_\tau = \frac{4\pi\alpha_{\text{em}}^2}{27} \frac{\tau^2}{Q'^8} f_\pi^2 \left[ (1 - \xi^2) \left| \tilde{\mathcal{H}}^{du}(\tilde{x}, \xi, t) \right|^2 - 2\xi \text{Re} \left( \tilde{\mathcal{H}}^{du}(\tilde{x}, \xi, t)^* \tilde{\mathcal{E}}^{du}(\tilde{x}, \xi, t) \right) - \xi^2 \frac{t}{4m_N^2} \left| \tilde{\mathcal{E}}^{du}(\tilde{x}, \xi, t) \right|^2 \right] \quad (1.7)$$

$f_\pi$  は  $\pi$  中間子の崩壊定数である。また、 $\tilde{x} = -(q + q')^2 / (2(p + p') \cdot (q + q'))$  である。断面積の添字  $L$  は縦方向偏極の仮想光子の寄与を示す。畳み込み積分である  $\tilde{\mathcal{H}}^{du}, \tilde{\mathcal{E}}^{du}$  は陽子から中性子に転換する際の核子の GPD と  $\pi$  中間子の DA という 2 つの長距離成分を含んでおり、次式のように与えられる [7]。

$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{H}}^{du}(\tilde{x}, \xi, t) &= \frac{8}{3} \alpha_s \int_{-1}^1 dz \frac{\phi_\pi(z)}{1 - z^2} \\ &\times \int_{-1}^1 dx \left( \frac{e_d}{\tilde{x} - x - i\epsilon} - \frac{e_u}{\tilde{x} + x - i\epsilon} \right) \left( \tilde{H}^d(x, \xi, t) - \tilde{H}^u(x, \xi, t) \right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

$\tilde{\mathcal{E}}^{du}$  は式 1.8 の  $\tilde{H}^q$  を  $\tilde{E}^q$  に置き換えたものである。 $\phi_z$  は  $\pi$  中間子の DA である。 $e_{d,u}$  はクォークの電荷である。式 (1.7)(1.8) から分かるように排他的 Drell-Yan 反応の断面積は短距離部分と長距離部分の積によって記述されており、DA と GPD という 2 つの長距離部分の積を取ることで記述されていることから、DA が分かれば、この反応の断面積を測定することで GPD を容易に取り出すことができる。この長距離部分と短距離部分の積によって断面積が記述されることを因子化という。

排他的 Drell-Yan 反応において適切に因子化をするためには  $Q'$  が 1 GeV 以上であり、 $|t|$  が十分に大きい必要がある。どちらの条件も満たすためには、反応における重心系エネルギー  $\sqrt{s}$  が十分に大きくなければならない。一方で  $\sqrt{s}$  が増加するにつれて、排他的 Drell-Yan 反応の断面積は劇的に小さくなる。実験においては排他的過程かどうかを判断するためにミューオン対の飛跡からミューオン対の missing mass を測定し、生成されたハドロンを同定する方法が好ましい。ミューオンの運動量が低いと運動量分解能がよく、missing mass の分解能も向上する。以上の理由から 1.4 節で述べる J-PARC の高運動量ビームラインで 10~20 GeV の  $\pi^-$  ビームを用いて排他的 Drell-Yan 反応の断面積の測定実験を実施する計画である [8]。



## 1.4 J-PARC $\pi 20$ ビームライン

### 1.4.1 J-PARC

大強度陽子加速器施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) は物質や生命の構造を探る研究や、素粒子や原子核の研究を通して宇宙の誕生初期の謎を解く研究を進める最先端の研究施設である。最大 30 GeV まで加速した一次陽子ビームを用いて、様々な二次粒子ビームを作り出すことが可能である [9]。J-PARC は物質・生命科学実験施設、ニュートリノ実験施設、ハドロン実験施設の 3 つの実験施設を持つ。図 1.3 に J-PARC の全体図を示す。

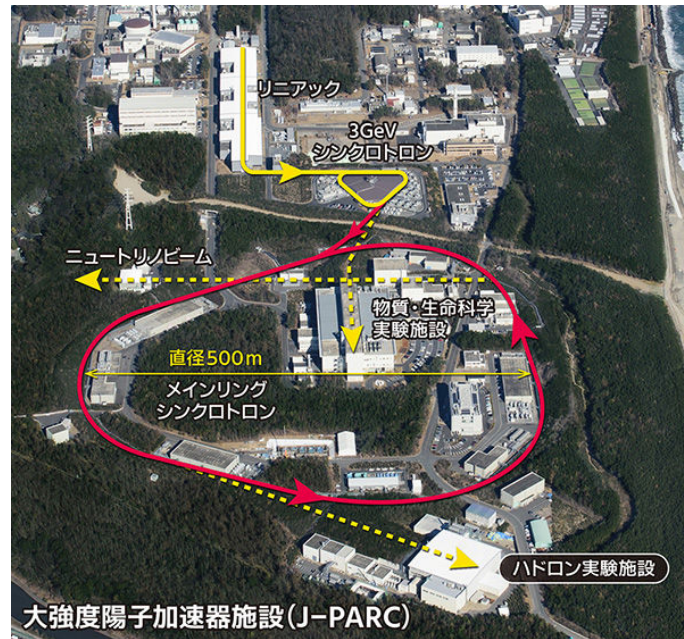


図 1.3: J-PARC の全体図 [9]。

ハドロン実験施設では物質を構成する素粒子やハドロン、それらを結びつける力といった物質の根源を極微のスケールで探索する研究施設である。これらを調べるために、一次陽子ビームもしくは一次ビームから作り出された二次粒子ビームを用いて標準模型を超えるような事象の探索やチャームバリオンやハイペロンの構造研究、ハイパー核などのストレンジネス自由度を含んだ原子核の測定などの実験を行っている。図 1.4 にハドロン実験施設とそこで行われている実験を示す。

### 1.4.2 $\pi 20$ ビームライン

$\pi 20$  ビームラインとは J-PARC ハドロン実験施設に建設予定の高運動量二次粒子ビームラインである。 $\pi 20$  ビームラインでは最大 20 GeV/c の  $\pi^-$  ビームが  $1.0 \times 10^7$  Hz を超える強度で供給される予定である。また、運動量分解能  $\Delta p/p$  は 0.1 % (rms) と予想される [10]。 $\pi 20$  ビームラインではチャームバリオン分光実験 (E50 実験) やアイソスピン  $I = 3$  のダイバリオン探索実験、 $\phi$  中間子生成実験などの様々な実験が行われる予定である [10, 11, 12]。また、1.3 節で述べたように排他的 Drell-Yan 反応の断面積の測定もこの  $\pi 20$  ビームラインで行う予定である。

図 1.5 に  $\pi 20$  ビームラインのスペクトロメーターを示す。ターゲットは長さが 570 mm、厚みが 4 g/cm<sup>2</sup> の液体水素標的である。双極磁石の磁極の直径は 2.1 m であり、磁極間のギャップ幅は 1 m である。この双極磁石のリジディティは 2.3 Tm である。ターゲットのすぐ上流と下流に設置されたシンチレーションファイバーによって構成されたファイバートラッカーと双極磁石の内部と磁石下流に設置されたドリフトチェンバーによって粒子の飛跡を再構成する。ターゲットのすぐ上流には T0 カウンターが置かれ、この検出器が粒子の飛行時間のスタートタイミングを決定する。2 GeV/c

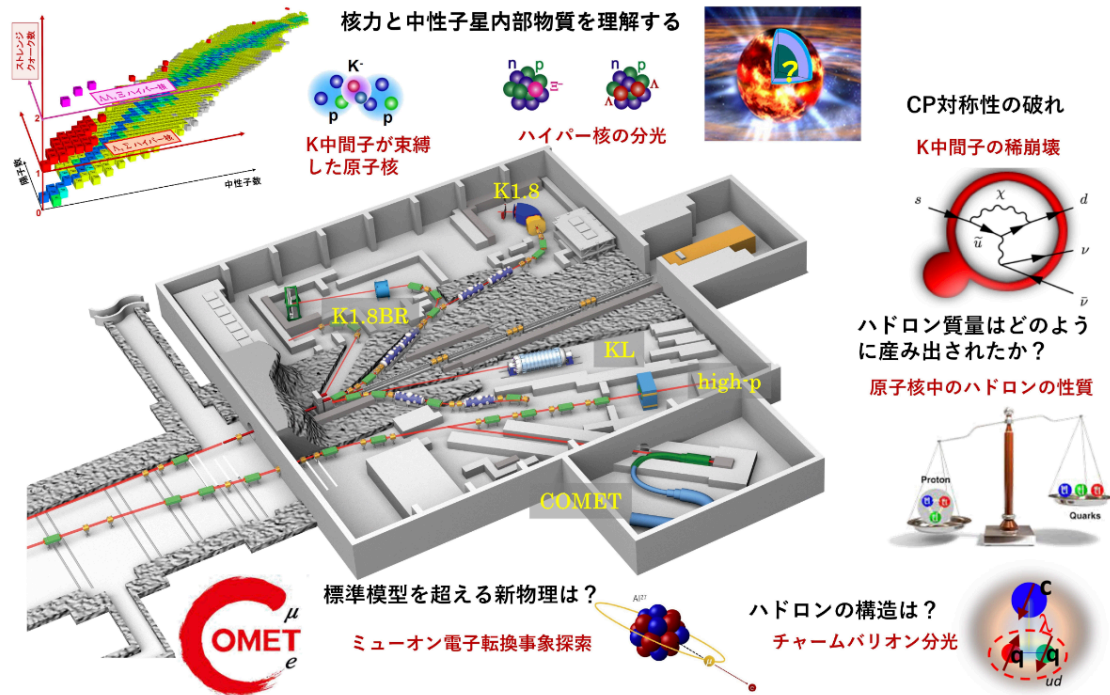


図 1.4: ハドロン実験施設とそこで行われている実験 [9]。

以下の低運動量の粒子は磁石内部に設置された TOF Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) と磁石下流に設置されたシンチレータ検出器により飛行時間が測定され、time-of-flight 法により粒子識別が行われる。2~4 GeV/c の運動量領域の粒子は閾値型エアロゲル・チェレンコフ (th AC = threshold Aerogel Cherenkov) 検出器によって粒子識別される。T0 の上流と th AC 検出器の下流にはリングイメージングチェレンコフ (RICH = Ring Imaging Cherenkov) 検出器が設置されており、上流の RICH 検出器は入射二次粒子の粒子識別を、下流の RICH 検出器は生成された 16 GeV/c までの散乱粒子の識別を行う。

Drell-Yan 反応によって生成されたミュオン対の識別は最下流に設置されたハドロンアブゾーバーとハドロンアブゾーバーの上流・下流に設置されるミュオン検出器で構成されるミュオン識別 ( $\mu$ ID = Muon Identification) システムによって行われる [8]。従来の Drell-Yan 反応の測定では、一次ビームを用いて、イベントレートが高くなりすぎるのを避けるためにハドロンアブゾーバーを標的のすぐ下流に設置していた。ハドロンアブゾーバーを標的のすぐ下流に設置するとハドロンアブゾーバー内でミュオンが多重散乱を起こしてしまい、ミュオンの missing mass の分解能が悪化する。そのためミュオン対の missing mass から Drell-Yan 反応によってミュオン対以外に生成されたハドロンを識別することが困難であり、排他的 Drell-Yan 反応の測定はこれまで行われることがなかった。しかし  $\pi$ 20 ビームラインでは二次粒子ビームを使用することから比較的イベントレートが低いため、ハドロンアブゾーバーを最下流に置くことができる。したがって、分解能が良い状況で missing mass 法により生成されたハドロンを識別を行うことができ、排他的過程の分離が可能となる。ハドロンアブゾーバーは 20 cm のコンクリートと 230 cm の鉄で構成されており、低運動量の粒子を止めるために最適化されている。ハドロンアブゾーバーを通過するミュオンの運動量閾値は 3 GeV/c である [8]。

### 1.4.3 本研究の目的

排他的 Drell-Yan 反応を測定する際のバックグラウンドの主な原因は  $\pi$  中間子や  $K$  中間子を主とする生成されたハドロンが飛行中に崩壊してできるミュオンである。ハドロンが崩壊して生成されたミュオンの場合、 $\mu$ ID システムの上流のミュオン検出器で実際に測定されるミュオンの通過位

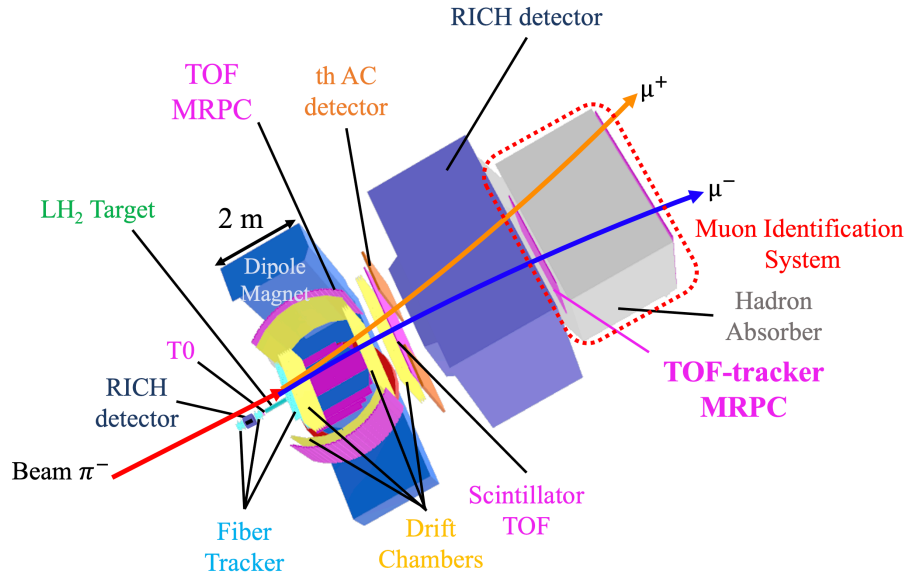


図 1.5:  $\pi 20$  ビームラインスペクトロメーター。

置と上流のドリフトチェンバーやファイバートラッカーによって再構成された飛跡に差が生じるはずである。また、Drell-Yan 反応ではミューオン対が生成されるため同時に 2 つの粒子が通過するはずである。以上の理由からランダム・コンビナトリアルなバックグラウンドミューオンを抑制するために上流のミューオン検出器は時間分解能と位置分解能を併せ持つ必要がある。この時間分解能と位置分解能を併せ持つミューオン検出器として TOF-tracker Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) を開発している。要求される TOF-tracker MRPC の性能は、アクセプタンスが  $1.8 \times 2.4 \text{ m}^2$ 、検出効率が 99 % 以上、時間分解能 100 ps 以下、位置分解能が 1 mm 以下である。

## 第2章 Multi-gap Resistive Plate Chamberの原理

### 2.1 MRPCの基本原理

Resistive Plate Chamber (RPC) とは高抵抗のプレートを用いた荷電粒子検出用のガスチェンバーである。その中でも特に高抵抗のプレートを数  $100\ \mu\text{m}$  の間隔で複数枚積層したものを Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) と呼ぶ [13]。図 2.1 に5ギャップのMRPCの構造の模式図を示す。高抵抗のプレートには一般にガラスやベークライトが用いられる。ガスギャップの幅はスペーサーのサイズによって決められる。最外層のガラスには電極が貼付されており、電極に高電圧 (HV) を印加することで、ガスギャップには数 $\sim 10\ \text{kV/mm}$  程度の電場がかけられている。ギャップに荷電粒子が通過するとガス原子がイオン化され、発生した電子はアノードに向かってアバランシェ増幅を起こす。この電子の増幅によるギャップの電場の変化がガラスの外側にある読み出し用電極に信号として誘起される。正の電圧をかけた電極側の読み出しストリップには負の信号が、負の電圧をかけた電極側の読み出しストリップには正の信号が誘起される。MRPC は各ガスギャップ間の距離が数  $100\ \mu\text{m}$  と狭く、印加電圧が高く、また平行平板であることから電場が均一にかかっているため時間分解能が良いという特徴を持つ。またガスギャップが複数あることで高い検出効率を得ることができる。このような特徴から MRPC は高い時間分解能が要求される Time-Of-Flight (TOF) 測定用検出器として用いられる。

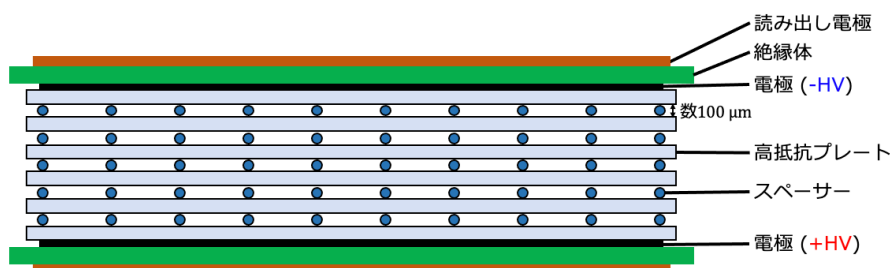


図 2.1: MRPC の模式図。

### 2.2 オペレーションモード

#### 2.2.1 ストリーマーモード

1980 年代始めに RPC が開発されて以来、アバランシェモードが発見されるまでストリーマーモードと呼ばれるオペレーションモードが主に使用されていた。ストリーマーモードではアルゴンベースの混合ガスが使用される。このアルゴンベースのガスでは、アバランシェによって電子が  $10^8$  個以上に増幅される。この増幅がアバランシェ領域外まで広がり、電子がアノード・カソード間全体に広がる状態をストリーマーモードと呼ぶ。アバランシェがストリーマーに遷移する過程は2通りある。1つ目はアバランシェが直接ストリーマーに遷移する過程で、この過程は比較的早い。2つ目は電子の増幅によって発生した紫外線がアバランシェ領域外のガスをイオン化し、電子の増幅を起こす過程で



ある。この過程は先述した過程よりも遅い過程である。ストリーマーモードでは出力信号の電荷量が  $10 \sim 1000$  pC と大きいため、プリアンプを介さず直接信号の読み出しが可能という利点がある。一方、信号の電荷量が大きく、ガスやガラスが定常状態まで戻るのに時間がかかるためレート耐性が  $1 \text{ Hz/cm}^2$  程度しかないという欠点を持つ。また信号の発生時間にもばらつきがあるため、時間分解能も約  $1 \text{ ns}$  と悪い。以上の理由からミュオンのトリガーカウンターや宇宙線、ニュートリノ実験に用いられる RPC はストリーマーモードで使用される。実際には Belle 実験、BaBar 実験などで使用されている [15, 16]。

### 2.2.2 アバランシェモード

アバランシェモードとは電気陰性度の高いフロン系のガスをベースとした混合ガスを使用することでストリーマーの発生を抑制し、アバランシェのみでオペレーションできるモードで 1990 年代に発見された [17]。アバランシェモードでは電子の増幅がストリーマーが発生する前の  $10^8$  個以内に抑えられるため、読み出し電極に誘起される信号の電荷は  $1 \sim 10$  pC と小さく、信号を読み出す際に高い増幅率のアンプが必要となる。しかし、アバランシェで増幅される電子はストリーマーに比べ、数が少なく、定常状態に戻るまでの時間が短縮されるため、 $1 \text{ kHz/cm}^2$  程度のレートでオペレーションすることが可能となる。また、アバランシェモードでは信号が誘起されるタイミングにばらつきが小さく、ストリーマーモードに比べて良い時間分解能が得られる利点を持つ。これらの理由からアバランシェモードでオペレーションされる RPC は TOF 測定用検出器としてよく用いられる。

## 2.3 ギャップにかかる電圧

RPC の電極に電圧を印加すると、電圧印加直後は図 2.2(左) のように高抵抗プレートとガスギャップそれぞれの誘電率に応じた電圧がかかる。しかしプレートは完全な絶縁体ではないため、電荷が移動し、図 2.2(右) のようにプレートにかかる電圧は 0 となり、ギャップのみに電圧がかかるようになる [18]。これはギャップ数を増やした場合も同様で、各ギャップに等しい電圧がかかるようになる。

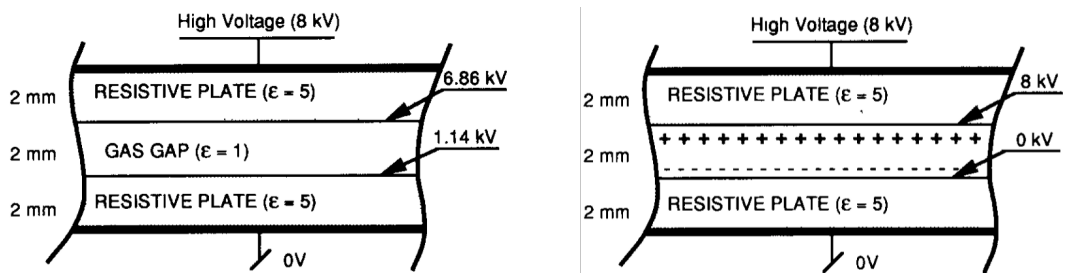


図 2.2: MRPC のギャップにかかる電圧 [18]、(左) 電圧印加直後、(右) 電圧印加後しばらく経ったあと。

## 2.4 レート耐性

2.2.2 節でも述べたようにアバランシェモードでは RPC を高いレートでオペレーションすることが可能である。RPC のレート耐性には、ギャップ内に生じた電子がいかに早くプレートを流れて、定常状態に戻るかが重要となる。そのため高抵抗プレートの抵抗値がレート耐性に密接に関わっている。一般にプレートとして用いられるガラスの体積抵抗率は  $10^{13} \Omega \text{ m}$  であり、この抵抗率であればレート耐性は最大  $1 \text{ kHz/cm}^2$  である。体積抵抗率  $10^8 \sim 10^9 \Omega \text{ m}$  のガラスを使用することでレート耐性が最大  $20 \text{ kHz/cm}^2$  となることが判明している [19]。

## 2.5 検出効率

MRPC の検出効率は基本的にギャップ幅とギャップ数によって決まる。ギャップ幅が広く、ギャップ数が多くなるほど検出効率が高くなる。MRPC のギャップ幅は数 100  $\mu\text{m}$  であるため、シングルギャップだと検出効率は 80 % 程度となる。シングルギャップの検出効率を  $\epsilon_1$  とすると、ギャップ数が  $n$  の時の検出効率  $\epsilon_n$  は

$$\epsilon_n = 1 - (1 - \epsilon_1)^n \quad (2.1)$$

となる。このことより MRPC はギャップ数を増やすことで 100 % 近い検出効率を達成することができる [20]。

## 2.6 実験に使用されている TOF MRPC

### 2.7 TOF-tracker MRPC

MRPC の位置分解能は、読み出しストリップのピッチによって決まっている。ストリップピッチを  $d$  とすると、ストリップ 1 本のみに信号が誘起された場合の位置分解能  $\sigma$  の期待値は、

$$\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}} \quad (2.2)$$

となる。複数本のストリップに信号が誘起されれば、電荷情報を用いて重心をとることによって、期待値よりも良い位置分解能が得られる。従来の TOF 用 MRPC は図 2.3(左) のようにストリップピッチが数 10 mm 程度であった。近年、図 2.3(右) のようにストリップピッチを数 mm 程度と狭くすることで時間分解能と位置分解能を併せ持つ TOF-tracker MRPC が開発されている。また、図 2.3 のように TOF-tracker MRPC はガスギャップの上下のストリップの向きを並行から直交したものに変更することで、二次元的に粒子の通過した位置を測定できるようにする。

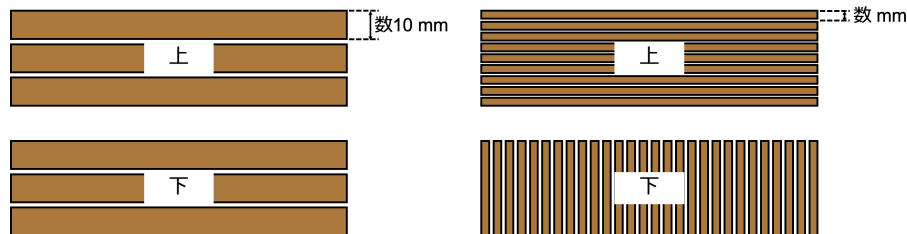


図 2.3: ストリップの形状 (左) 従来の TOF MRPC の読み出しストリップ、(右)TOF-tracker MRPC の読み出しストリップ。

A. Blanco らはストリップピッチが 4 mm、有感領域が  $8 \times 8 \text{ mm}^2$  の TOF-tracker MRPC を開発した [21]。この TOF-tracker MRPC は 400  $\mu\text{m}$  のガラスが使用されており、ギャップ幅は 350  $\mu\text{m}$  である。この MRPC は時間分解能が約 80 ps、位置分解能は 40~80  $\mu\text{m}$  を達成した。また、P. Assis らによってストリップピッチが 2.5 mm、有感領域  $1550 \times 1250 \text{ mm}^2$  の大型 TOF-tracker MRPC が開発された [22]。大型 TOF-tracker MRPC は 2 mm のガラスが使用され、ギャップ幅は 380  $\mu\text{m}$  である。時間分解能は約 150 ps、位置分解能は X 方向で 1.3 mm、Y 方向で 3.4 mm を達成した。

## 第3章 プロトタイプ TOF-tracker MRPC の開発

今回、有感領域  $500 \times 1000 \text{ mm}^2$ 、ストリップピッチ  $5 \text{ mm}$  のプロトタイプ TOF-tracker MRPC を開発した。製作したプロトタイプ MRPC の模式図を図 3.1 に示す。ガスギャップ幅は  $260 \text{ }\mu\text{m}$  でガスギャップ数は 5 である。本章では、製作したプロトタイプ MRPC の材料や製作方法について詳細に述べる。

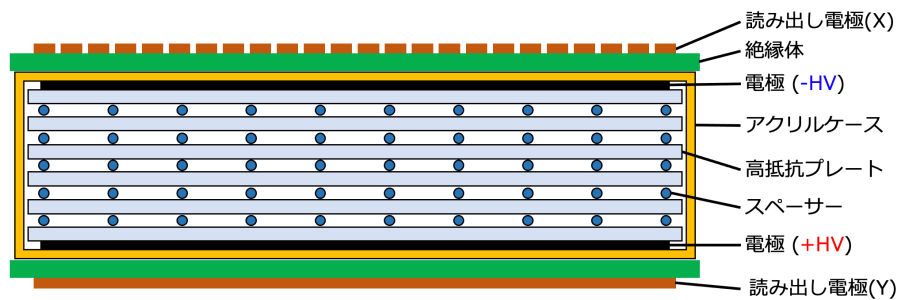


図 3.1: 製作したプロトタイプ TOF-tracker MRPC の構造の断面図。

### 3.1 材料

#### 3.1.1 電極

MRPC に使用する電極の抵抗値が低いと信号が電極に誘起されてしまい、読み出しストリップに誘起される信号の電荷量が減少してしまう。一方、抵抗値が高くなりすぎると電圧が一様に印加されづらくなるため安定した動作が得られなくなる。一般には、 $10^5 \sim 10^9 \text{ }\Omega/\text{cm}^2$  の電極が使用されている。今回、電極には EEEEC 社製の高電気抵抗両面粘着テープ T-9188 を使用した。T-9188 の表面抵抗値は  $1.4 \times 10^7 \text{ }\Omega/\text{cm}^2$  である。T-9188 はすでに生産を終了しており、新たな電極を探索する必要がある。しかし、新たな電極となる素材がまだ見つかっていないため今回はすでに所持している幅  $215 \text{ mm}$  の T-9188 を使用して、有感領域よりも狭い  $215 \times 1000 \text{ mm}^2$  だけテープを貼付した。

#### 3.1.2 高抵抗プレート

高抵抗プレートには平岡硝子工業のソーダライムガラスを使用した。このガラスの厚みは  $400 \text{ }\mu\text{m}$  で体積抵抗率は  $10^{13} \text{ }\Omega\text{m}$  である。また、サイズは  $510 \times 1010 \text{ mm}^2$  である。

#### 3.1.3 スペーサー

スペーサーは導電性が低く、厚みが均一であることが要求される。そのため一般には、ナイロン製の釣り糸が使用されてきた。今回は株式会社サンライン社製のクインスターの 2.5 号を使用した [23]。この釣り糸の直径は  $260 \text{ }\mu\text{m}$  である。日本で購入できる中で、この釣り糸が MRPC に最適であることは先行研究によってすでに示されている [24]。

### 3.1.4 アクリルケース

MRPC はガス検出器であるため、ガスギャップを空気が入り込まないように封じ込めなければならない。従来の MRPC では、読み出しストリップも含めてアルミケースなどで覆い、その中をガス領域としていた。しかし、MRPC はノイズが乗りやすい検出器であり、ノイズを落とすために度々ケースを開ける必要があり、ガス置換や封入のチェックのために大幅な時間のロスがあった。今回、高抵抗プレートと電極のみを覆うアクリルケースを使用し、アクリルケース内のみをガス領域とした。こうすることで読み出しストリップのグラウンド強化を行う際にガス領域を開ける必要がないため、ノイズ落としの工程を短時間にすることができる。アクリルケースを使用した MRPC でも約 60 ps の時間分解能を達成できることが示されている [25]。

今回、株式会社シーアイ工業が製作したアクリルケースを使用した。使用したアクリルケースの模式図を図 3.2(左) に示す。サイズは  $510 \times 1020 \text{ mm}^2$  である。短辺の壁には、ガスを流すための直径 3 mm の穴が二箇所ずつ開いている。また、長辺の壁には、電極に電圧を印加するための導線を通す直径 2 mm の穴が一箇所ずつ開いている。アクリルケース内壁には、図 3.2(右) のような U 字型をしたスペーサーを配置した。実際のアクリルケースは図よりも多くスペーサーが配置されている。この U 字の部分にガラス間のスペーサーである釣り糸を通す。図 3.2(左) の状態は蓋をしていない状態のもので、電極の貼付やガラスの積層を終えたのちに、蓋を上から被せ、ガス漏れしないように塞いだ上で使用する。

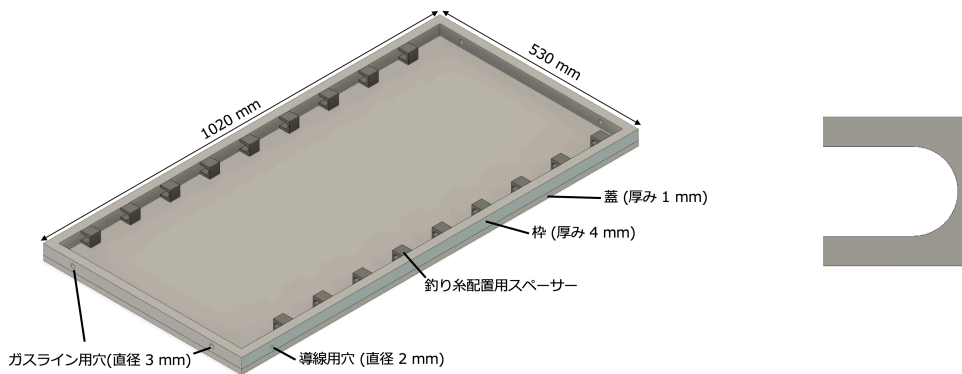


図 3.2: (左) アクリルケース模式図、(右) 釣り糸配置用スペーサー断面図。

### 3.1.5 絶縁体と読み出しストリップ

電極と読み出しストリップ間には 10 kV 以上の電位差が生じるため、高電位に耐えうる絶縁体が必要となる。今回は、多くの MRPC に使用されている読み出しストリップをプリントしたプリント基板 (PCB) を使用した。今回使用した PCB は中国の精華大学で製作した。PCB の設計図を図 3.3、図 3.4 に示す。PCB の表面には読み出しストリップがプリントされている。表面がガスギャップの方を向くように設置する。読み出しストリップのストリップピッチは 5 mm である。伝播距離が短い方のストリップを X 方向、伝播距離が長い方のストリップを Y 方向とした。X 方向と Y 方向は、それぞれ粒子が通過した位置 X と Y 方向に対して感度を持つという意味である。X 方向のストリップの数は 204、Y 方向のストリップの数は 106 である。ストリップの幅は様々なものを用意した。幅はそれぞれ 1.15 mm、1.35 mm、1.6 mm、3 mm、4 mm である。また、裏面にはグラウンド用の電極がプリントされている。グラウンド用の電極には 3 種類の形状があり、ストリップの反対側にグラウンドを持たないものを No Ground、ストリップピッチと同じ間隔のグラウンドを持つものを Separate Ground、ストリップごとに分割せずまとめてグラウンドがプリントしてあるものを Full Ground と呼ぶこととした。MRPC はノイズが乗りやすい検出器である。また、ストリップ端でのコネクタとのインピーダンスマッチングが取れないとストリップ端で信号が反射してしまう。このプロトタイプ



MRPC ではさまざまなグラウンド形状やストリップ幅の読み出しストリップを用意することでノイズが乗らず、ストリップ端で反射が起きないように最適なストリップ条件を探した。

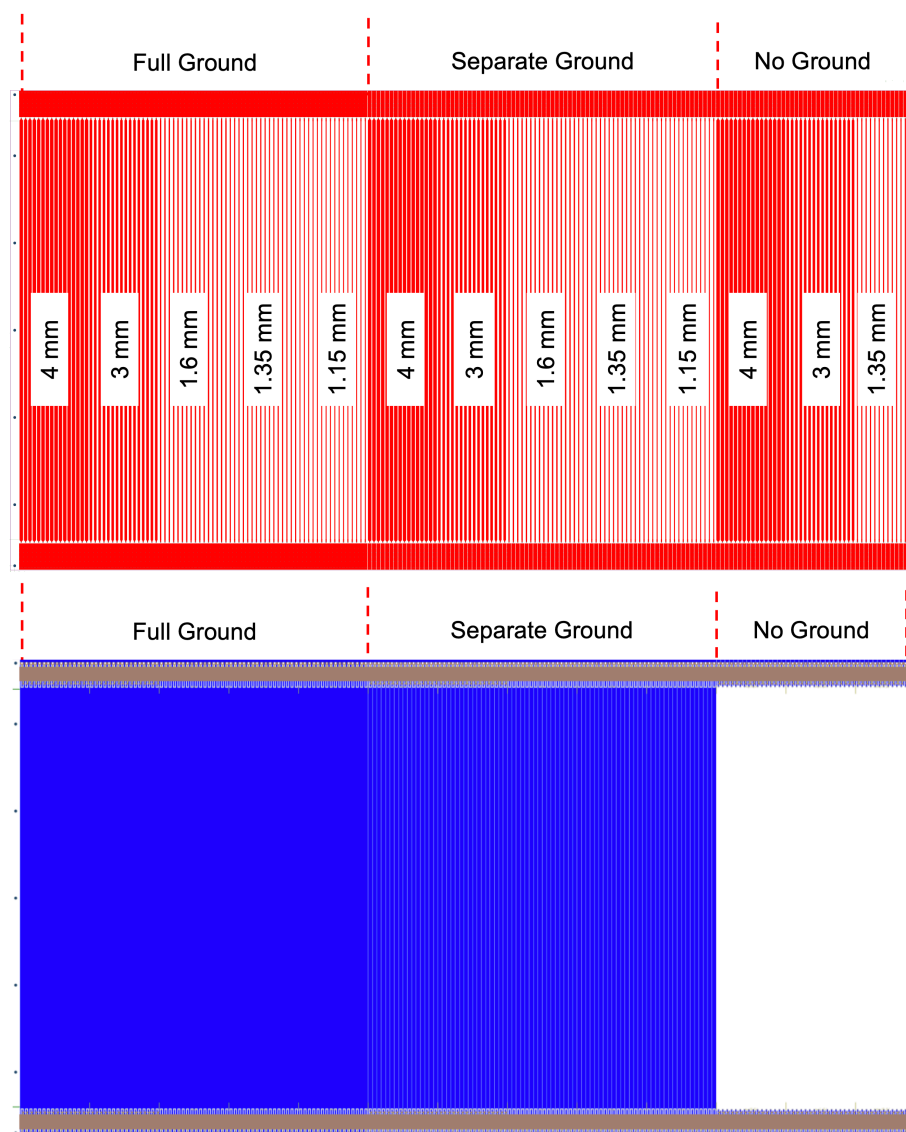


図 3.3: X 方向の PCB の設計図。(上) 読み出し基板の表側、こちらの面に読み出しストリップがプリントされており、この面をガスギャップ側に向ける。(下) 読み出し基板の裏側、こちらの面にグラウンドがプリントされている。またグラウンド側にストリップの信号を取り出すコネクタが取り付けられている。

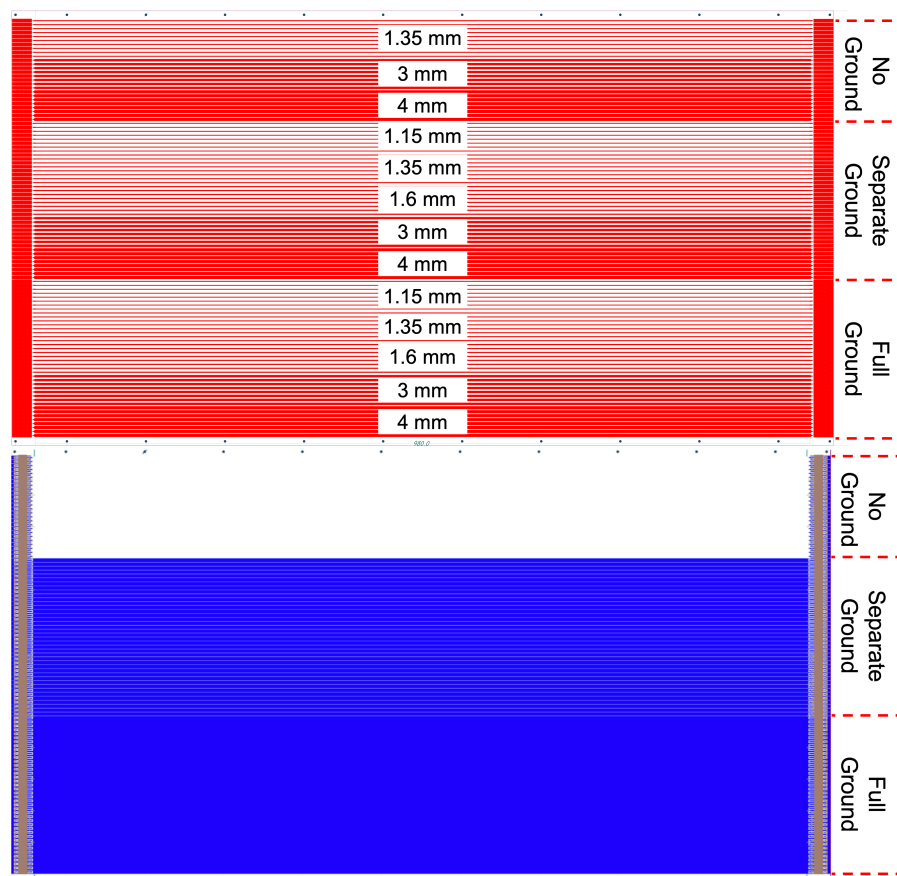


図 3.4: Y 方向の PCB の設計図。(上) 読み出し基板の表側、こちらの面に読み出しストリップがプリントされており、この面をガスギャップ側に向ける。(下) 読み出し基板の裏側、こちらの面にグラウンドがプリントされている。またグラウンド側にストリップの信号を取り出すコネクタが取り付けられている。

読み出しストリップの信号を取り出すために、プリント電子研究所に依頼して、ストリップ端に U.FL コネクタを取り付けた。PCB に取り付けた U.FL コネクタを図 3.5 に示す。この U.FL コネクタから取り出した信号をアンプで増幅する。

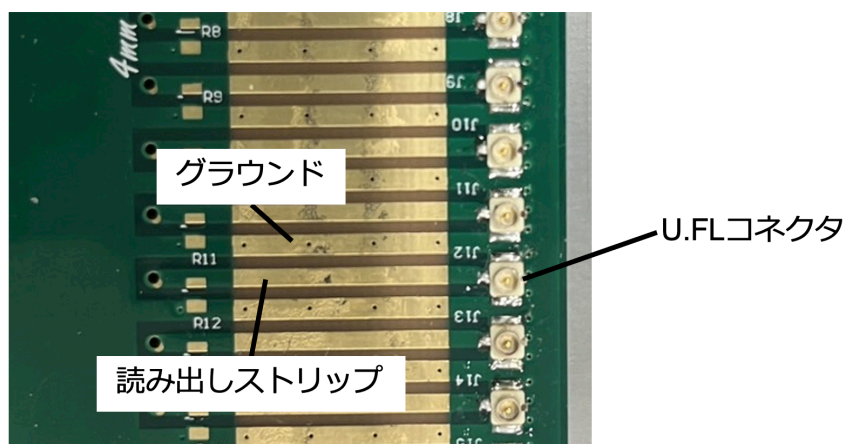


図 3.5: PCB に取り付けた U.FL コネクタ、ここから信号を取り出しアンプに繋いで増幅する。

### 3.1.6 アンプ

MRPC はアバランシェモードで使用するが、2.2.2 節で述べたように誘起される信号の電荷量が  $1 \sim 10$  pC 程度であるためアンプによって信号を増幅する必要がある。台湾中央研究にて開発した 8 ch アンプを図 3.6 に示す。図の U.FL コネクタから信号が入力され、9 つの MMCX コネクタのうち中央の 1 つを除いた 8 つの MMCX コネクタから増幅された信号が出力される。チャンネルピッチは 10 mm である。中央の MMCX コネクタはアンプの電源供給用のコネクタである。ここから 6~7 V の電圧を供給することでアンプが動作する。このアンプは時間応答の速い信号を鈍らせることなく信号を増幅することが可能なアンプである。そのため MRPC のような時間分解能が良い検出器の信号を増幅するのに適している。このアンプによって信号は 14~16 倍の増幅率で増幅され、-6 dB の減衰機によって  $1/2$  に減衰され、その後、35~40 倍の増幅率で増幅される。合計の増幅率は約 250~300 倍である。8 ch アンプの他にチャンネル数を 32 ch に増やしたアンプも使用した (図 3.7)。これは TOF-tracker MRPC のような多チャンネル検出器用に開発したものである。このアンプは 8 ch アンプと同様の増幅率を持つアンプである。チャンネルピッチが 8 ch アンプより狭い、5 mm である。電源供給コネクタが 4 つあり、接続する電源 1 つにつき 8 ch をオペレーションすることができる。32 ch アンプも使用したが、狭いチャンネルピッチのために 16 ch 以上同時に動かすとノイズが乗り易かったため、テストでは 8 ch のみを使用した。

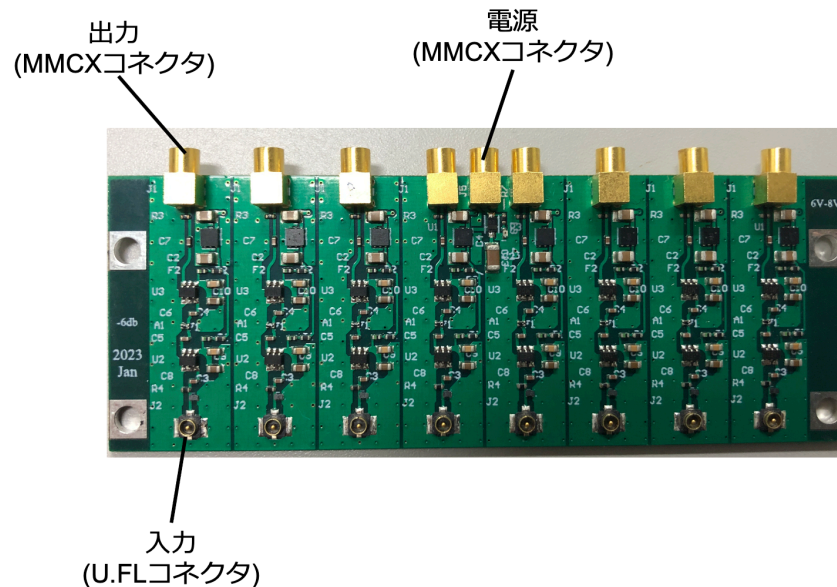


図 3.6: 使用した 8 ch アンプの写真、U.FL コネクタから入力され、中央の 1 つを除いた 8 つの MMCX コネクタから増幅した信号を出力する。中央の MMCX コネクタのアンプは電源供給用である。

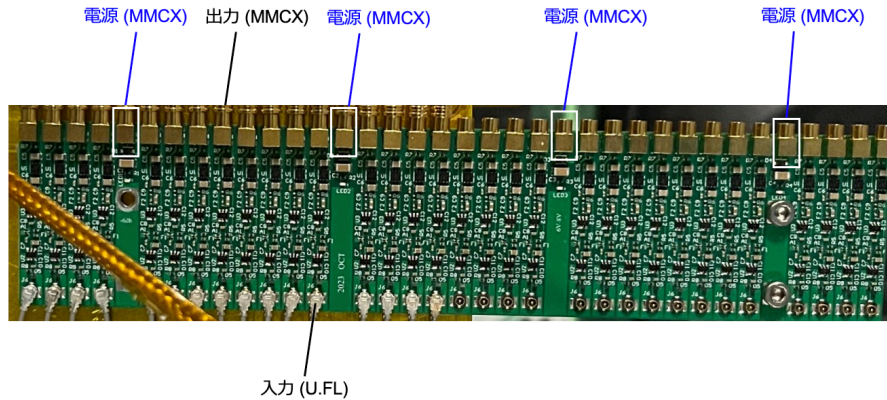


図 3.7: 使用した 32 ch アンプの写真、8 ch アンプ同様 U.FL コネクタから入力し、MMCX コネクタから増幅した信号が供給される。電源供給は 4 つのコネクタで分割されており、8 ch ずつオペレーションすることが可能である。

### 3.1.7 HV モジュール

今回製作した MRPC はギャップ数が 5 であるため、合計で十数 kV の電圧を印加する必要がある。そのため電源モジュールとして、松定プレジジョン株式会社の HV-10P と HV-10N を使用した [26]。HV-10P、HV-10N は低電圧を入力するとそれに比例した正と負の高電圧を出力する電源モジュールである。

### 3.1.8 ガス

使用したガスは 1,1,1,2-テトラフルオロエタン (代替フロン、R134a) をベースとした混合ガスである。R134a 以外には  $\text{SF}_6$  と  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  を使用した。R134a は電気陰性度が高く、ガス分子が電子と吸着しやすい。そのため電子の増幅を抑えることができ、アバランシェモードでのオペレーションが可能となる。 $\text{SF}_6$  は電子親和力が高いため、広い電圧の範囲でストリーマーの発生を抑制することが可能となる。 $\text{C}_4\text{H}_{10}$  はストリーマー発生の原因となる紫外線を吸収するクエンチャーの役割を果たす。ガスは  $\text{R134a} : \text{SF}_6 : \text{C}_4\text{H}_{10} = 90 : 5 : 5$  の比で混ぜて使用した。

## 3.2 製作手順

実際の MRPC の製作手順について述べていく。

1. アクリルケースの底面に電極テープを貼付した。この際、電極テープをガラスと同じサイズに貼ってしまうと放電を起こしてしまうため、ガラスの方が各辺 5 mm 程度長くなるように貼付した。
2. 電極に電圧を供給するための導線の片端を銅テープにはんだ付けし、銅テープを電極テープに貼付した。図 3.8 に実際に銅テープを貼付した状態を示す。銅テープで電極テープと被っていない部分はカプトンテープで絶縁処理をする。もう一方の導線の端を図 3.2(左) に示してある導線を通すための穴から外に出した。

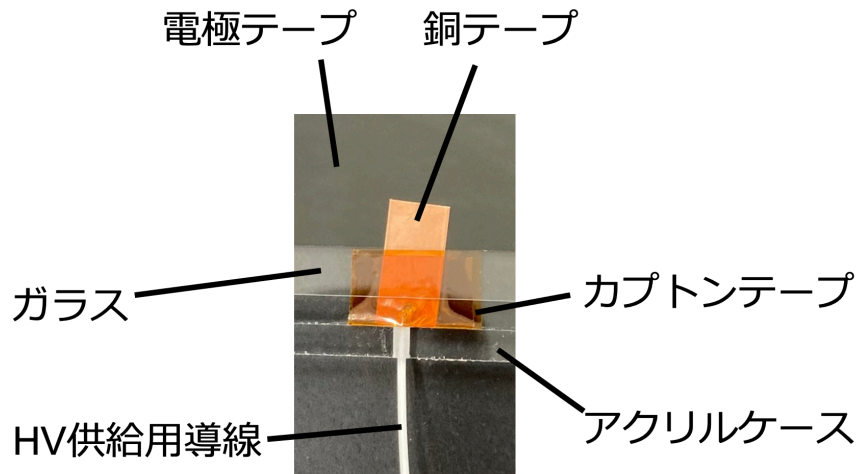


図 3.8: 電極テープに HV 供給用導線を貼り付けた様子。銅テープで電極テープと被っていない部分は放電しないようにカプトンテープを貼る

3. テープの上にガラスを乗せ、その上にスペーサーである釣り糸を張り、その上にガラスを乗せるという作業を複数回繰り返し、ガラスを 6 枚積層した。釣り糸は図 3.9 のように交互になるように、釣り糸を張るためのスペーサーを用いて張った。

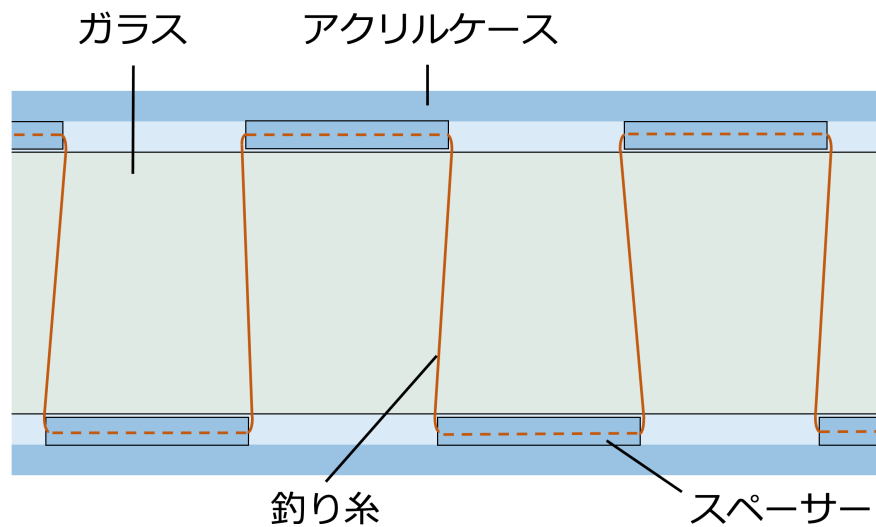


図 3.9: 釣り糸の張り方。

4. あらかじめ電極テープと電圧供給用の導線を貼付していたアクリルケースの蓋を図 3.10 に示す。電極テープが白いのは保護フィルムが貼られている状態だからである。蓋を載せるときにフィルムを剥がす。蓋側の電圧供給用の導線を通す穴から電極用テープまで距離があるため、電極用テープまでを繋ぐ銅テープから放電するのを防ぐため、耐圧性の高いカプトンテープで絶縁処理した。図 3.11 のようにガラスを積層したアクリルケースに乗せた。





図 3.10: アクリルケースの蓋。

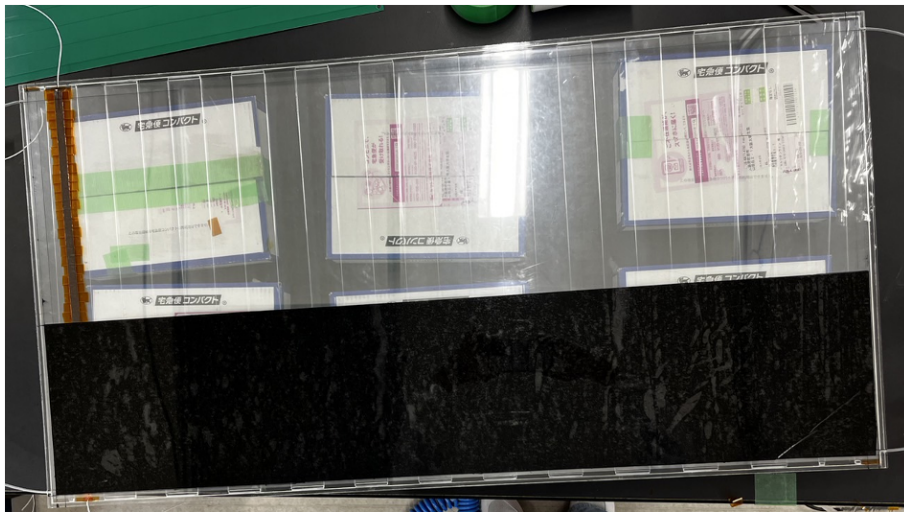


図 3.11: アクリルケースのガス封じをする前までの状態。

5. アクリルケースからガス漏れしないように接着剤とテープで接合部を塞いだ。まず、全体の辺をアクリル樹脂用接着剤で大まかに塞いだ [27]。その後、辺の部分は 50 mm 幅のカプトンテープを貼付することで塞いだ。テープが重なった際にできる小さな段差からでもガスは漏れるため、テープが重なりやすいケースの角の部分はテープでガス漏れを塞ぐことは困難であった。エポキシ樹脂接着剤であるアラルダイトを使用して塞いだ。図 3.12 にアクリルケース全体をガス漏れしないように塞いだ状態を示す。

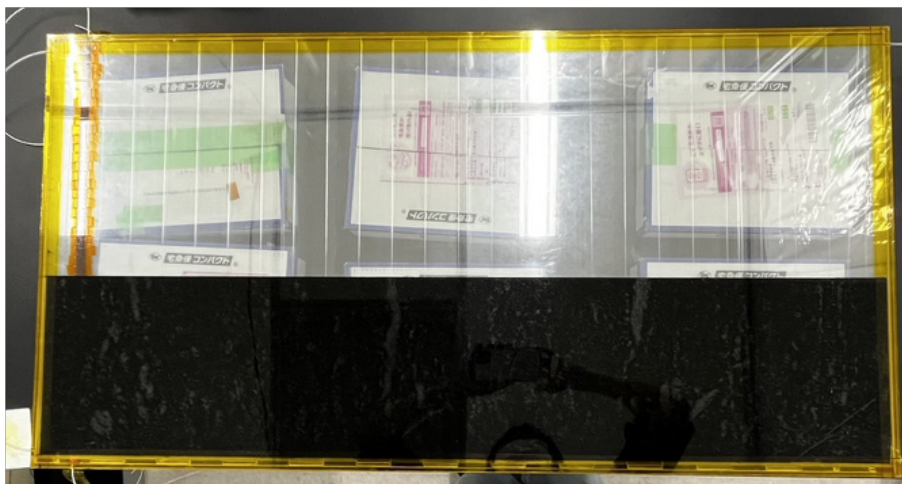


図 3.12: アクリルケースのガスを塞いだ状態

6. ガスの出入口とチューブの繋ぎ目や電圧供給用の導線を通す穴も図 3.13 のようにアラルダイトで塞いだ。

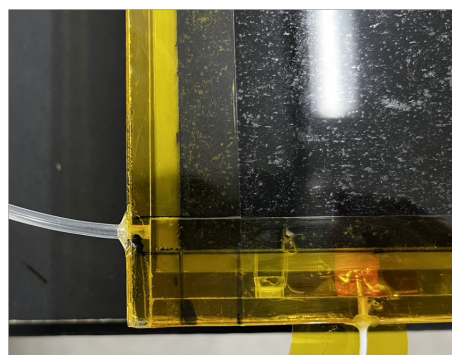
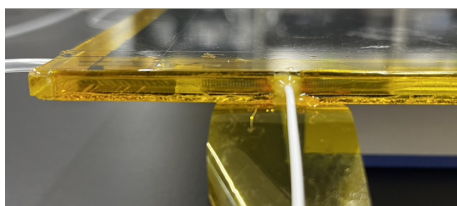


図 3.13: (左) 電圧供給用導線を通す穴を塞いだ状態、(右) ガスチューブ周りを塞いだ状態、左から来ているのがガスチューブ。

7. アルミケース内に完成したアクリルケースとアクリルケースをサンドイッチするように読み出しストリップを配置した。またバッファーとしてハニカムを読み出しストリップとアルミケースの間に配置した。完成したプロトタイプ MRPC を横から見た写真を図 3.14 に示す。

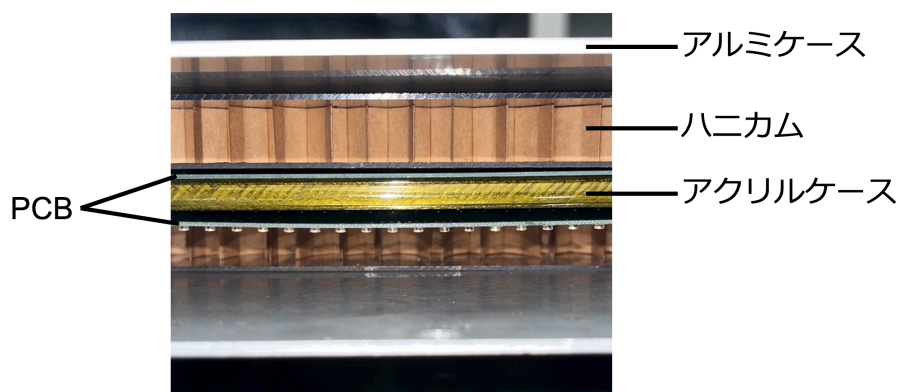


図 3.14: 完成したプロトタイプ MRPC を横から見た写真。



## 第4章 宇宙線試験

3.1.5 節で述べたように、今回開発したプロトタイプ TOF-tracker MRPC の読み出しストリップには3種類のグラウンド形状と5つの異なるストリップ幅がある。最も最適なストリップ条件を決定するために、宇宙線が MRPC を通過した際の信号をオシロスコープで調査した。

### 4.1 セットアップ

図 4.1 に宇宙線試験のセットアップを示す。5 mm 幅のプラスチックシンチレータ 2 本を MRPC の上に設置し、 $100 \times 100 \text{ mm}^2$  のプラスチックシンチレータを 1 つ MRPC の下に設置した。5 mm 幅のプラスチックシンチレータ 2 本は X 方向の読み出しストリップに沿う方向に設置した。この 3 つのシンチレータのコインシデンス信号をオシロスコープで波形を調査する際のトリガーとした。MRPC には X 方向のストリップがある電極に正の電圧、Y 方向のストリップがある電極に負の電圧を印加し、X 方向ストリップに負の信号、Y 方向ストリップに正の信号が誘起されるようにした。MRPC には 13.5 kV 印加した。今回、宇宙線試験は X 方向のストリップに誘起された信号をオシロスコープで調査することにした。MRPC から誘起された信号はアンプによって増幅され、増幅した信号をオシロスコープにて調査した。本試験で使用したアンプは 8 ch アンプである。MRPC は両方のストリップ端で信号を読み出すので 5 mm 幅シンチレータの真下にあるストリップの両サイドの信号を確認した。

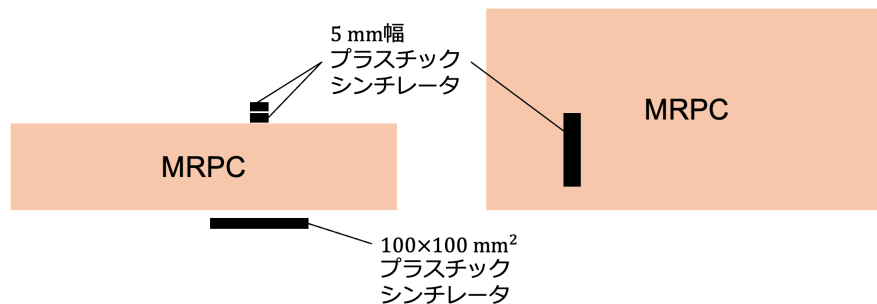


図 4.1: (左) 横から見た宇宙線試験のセットアップ、(右) 上から見た宇宙線試験のセットアップ。

### 4.2 グラウンド形状依存性

ストリップ幅を 1.35 mm に統一して、各グラウンド形状での信号を確認した。図 4.2 にそれぞれのグラウンド形状での信号の波形を示す。1 ch の信号 (黄色) がトリガー領域からストリップ端までが 440 mm 程度の信号で 1 ch の信号 (水色) がトリガー領域からストリップ端までが 100 mm 程度の信号である。図 4.2(左) がストリップ反対側にグラウンドを持たない No Ground の信号、図 4.2(中央) がストリップピッチと同じ間隔のグラウンドの Separate Ground の信号、図 4.2(右) がストリップごとに分割せずまとめてグラウンドがプリントされた Full Ground の信号である。3 種類のグラウンドの形状を比べると、Full Ground のストリップの信号は他の 2 つと比べて十分に反射やノイズが抑えられた信号になった。以降では Full Ground のみで試験することにした。

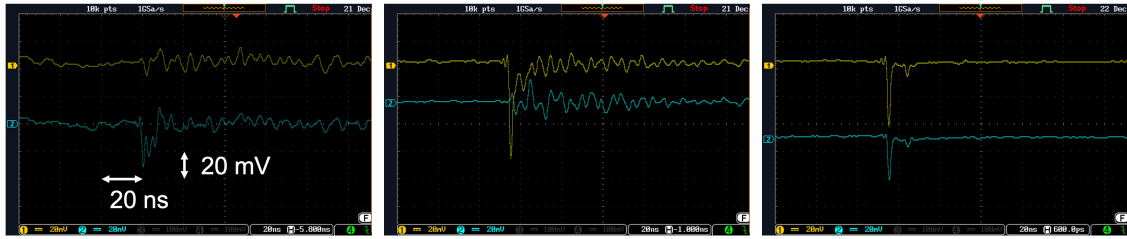


図 4.2: オシロスコープで確認した各グラウンド形状での MRPC の信号の波形、オシロスコープのスケールは 3 枚とも統一されている。(左)No Ground の信号、(中央)Separate Ground の信号、(右)Full Ground の信号。

### 4.3 ストリップ幅依存性

読み出しストリップのグラウンドの形状を Full Ground に統一して、ストリップ幅 1.15 mm、1.35 mm、1.60 mm、4.0 mm の MRPC の信号の波形を確認した。図 4.3 に各ストリップ幅の信号の波形を示す。図 4.3(上左)がストリップ幅 1.15 mm、図 4.3(上右)がストリップ幅 1.35 mm、図 4.3(下左)がストリップ幅 1.60 mm、図 4.3(下右)がストリップ幅 4 mm である。ストリップの幅で信号の波高が異なるがこれはストリップ幅条件によるものではない点に注意する必要がある。4.2 節と同様に、1 ch の信号 (黄色) がトリガー領域から遠い方の読み出しの信号で 2 ch の信号 (水色) がトリガー領域から近い方の読み出しの信号である。ストリップ幅 4.0 mm とそれ以外のストリップ幅での波形を比較してみると、4.0 mm は他のストリップ幅と比べ、信号のストリップ端での反射が大きい。他のストリップ幅はどれも反射が小さく、適切なストリップ幅であることが判明した。また、1.15 mm、1.35 mm、1.60 mm では、波形の見え方がほぼ同じであるため、ストリップ幅は 0.5 mm 程度の違いでは波形に違いがほぼ生じないことがわかった。4.2 節の結果と合わせて、今回製作したプロトタイプ MRPC では、グラウンドの形状が Full Ground でストリップ幅が 1 mm 程度が最適なストリップ条件であることがわかり、そのストリップ条件でビーム試験を行うことを決定した。ストリップ幅が 1 mm 程度で反射が少ないのはストリップ端の U.FL コネクタの抵抗値とインピーダンスマッチングするからである。



図 4.3: 各ストリップ幅の信号の波形、オシロスコープのスケールは全ての図で同じである。(上左)ストリップ幅 1.15 mm、(上右)ストリップ幅 1.35 mm、(下左)ストリップ幅 1.60 mm、(下右)ストリップ幅 4 mm。

## 第5章 ビーム試験

製作したプロトタイプ TOF-tracker MRPC の検出効率、時間分解能及び位置分解能を評価するために SPring-8 の LEPS2 ビームラインでビーム試験を行った。本章ではビーム試験のセットアップや使用したモジュールについて詳細を述べる。

### 5.1 SPring-8

SPring-8 (Super Photon ring-8GeV) とは兵庫県の播磨科学公園都市に位置する大型放射光施設である [28]。図 5.1 に SPring-8 の全体図を示す。SPring-8 では 8 GeV まで加速された電子が周長 1436 m の蓄積リングを周回する。蓄積リングを周回する電子によって生み出された放射光を利用して、ナノサイズの世界での物質の構造などを調べる研究などに利用されている。



図 5.1: SPring-8 を上空から見た写真 [28]。

#### 5.1.1 LEPS2 ビームライン

今回ビーム試験を行った LEPS2 (Laser Electron Photon at SPring-8) ビームラインは SPring-8 から割り当てられた専用ビームラインの 1 つである。LEPS2 ビームラインではペンタクォーク  $\Theta^+$  の探索をはじめとした実験を行っている LEPS2 実験と中間子の光生成を研究している BGOegg 実験が行われている。LEPS2 ビームラインでは、レーザー光を蓄積リングを周回している電子に入射し、逆コンプトン散乱により生成される GeV 領域の高エネルギー  $\gamma$  線を実験に用いる。レーザー光の波長ごとの逆コンプトン散乱によって生成された  $\gamma$  線のエネルギー分布を図 5.2 に示す。今回のビーム試験では、レーザーの波長は 351 nm のものを使用したので、最大 2.4 GeV の  $\gamma$  線を使用した。

#### 5.1.2 RF 信号

SPring-8 の蓄積リングを周回している電子をバケット数は 2436 であり、バケットの時間間隔は 1.966 ns である [29]。したがって連続して電子が来る場合、逆コンプトン散乱によって生成される  $\gamma$  線の時間間隔は同様に 1.966 ns となる。また、この電子バケットと同期した RF 信号が 1.966 ns 間隔で加速器側から供給される。レーザーの衝突から標的まで  $\gamma$  線は光速で飛行するため、エネルギーによって時間差は生じない。また、電子のバケット幅が 14 ps 程度であり、RF 信号の時間分解能は LEPS2 実験棟で約 4 ps である。以上のことから RF 信号は検出器の時間分解能評価のためのリファレンスとして利用可能である。RF 信号の間隔は約 2 ns ごとであり、そのまま TDC で取ろうとするとチャンネル当たりのデータ取得数を超えてしまっており取りきれないので、間引いて取得する必要がある。今回は 420 回に 1 回ごとに RF 信号のタイミングを TDC によって記録した。

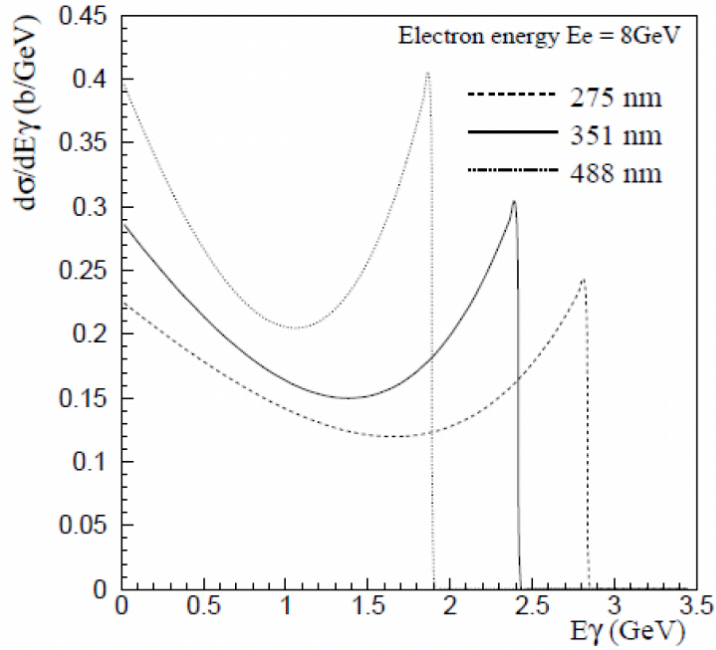


図 5.2: 逆コンプトン散乱によって生成された  $\gamma$  のエネルギー分布

## 5.2 セットアップ

### 5.2.1 検出効率・時間分解能評価用セットアップ

図 5.3 に時間分解能評価用のセットアップを示す。逆コンプトン散乱によって LEPS2 ビームラインに入射してきた  $\gamma$  線は鉛標的内で電子・陽電子対を生成する。生成された電子・陽電子対は標的のすぐ下流に設置された永久磁石によって上方向と下方向に曲げられる。永久磁石の磁場の強さは 0.5 T である。今回の試験では、上方向に曲げられた陽電子を使用した。磁石の約 4 m 下流に MRPC を設置した。MRPC は上流側に X 方向の読み出しストリップ、下流側に Y 方向の読み出しストリップとなるように設置した。MRPC には 13~15.5 kV の電圧を印加し、X 方向のストリップに正の信号、Y 方向のストリップに負の信号が誘起されるようにした。図 5.3 のように MRPC の上流と下流にはそれぞれ 2 本ずつプラスチックシンチレータを設置し、このプラスチックシンチレータ 4 本のうち 3 本が同時になったイベントをトリガーとした。

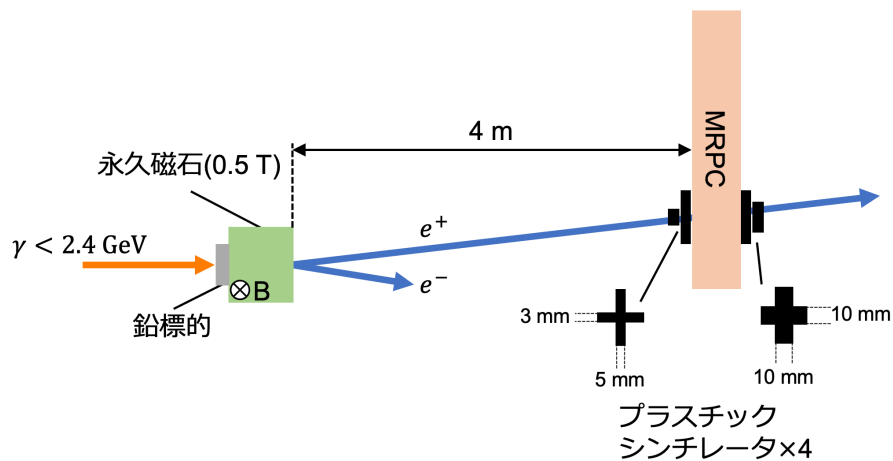


図 5.3: 横から見た時の時間分解能評価用セットアップ。

今回、MRPC は 4 章の結果をもとに X 方向は Full Ground の 1.35 mm の読み出しストリップを 16 本を、Y 方向は Full Ground の 1.35 mm の読み出しストリップ 8 本、1.60 mm の読み出しストリップ 4 本の計 12 本を読み出した。MRPC のデータを取得する TDC のチャンネル数に限りがあったため、読み出すストリップを限定した。MRPC は両読みの検出器であるためそれぞれの読み出しストリップを図 5.4 のように X Top (XT) 1~16、X Bottom (XB) 1~16、Y Left (YL) 1~12、Y Right (YR) 1~12 と呼ぶこととした。トリガーエリアは X 方向の 9 番のストリップと Y 方向の 7 番のストリップ上になるように両方向の中心付近に設置した。トリガーエリアからストリップ端までの距離は、X Top、X Bottom、Y Left、Y Right それぞれで 390 mm、140 mm、280 mm、740 mm だった。X Top と Y Right には 32 ch アンプを X Bottom と Y Left には 8 ch アンプを使用した。3.1.6 で述べたように 32 ch アンプはノイズが乗らないように一台につき 8 ch ずつ使用するので、X Top と Y Right でそれぞれ 2 台ずつ使用した。8 ch アンプは一台ではチャンネル数が足りないので X Bottom と Y Left でそれぞれ 2 台ずつ使用した。

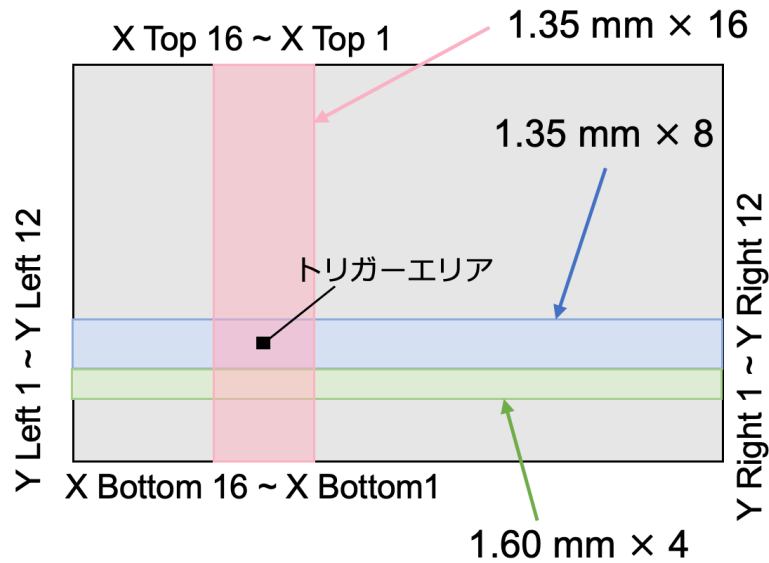


図 5.4: 上流側から見た時の MRPC のセットアップ。

MRPC の読み出しストリップからの信号はアンプによって増幅された後、ディスクリミネータによって LVDS 信号に変換され、Hadron Universal Logic (HUL) High Resolution (HR) -TDC によって時間情報のデータを記録した。MRPC 側のアンプとディスクリミネータは両端が MMCX コネクタの長さが 3 m の同軸ケーブルで接続した。図 5.3 のセットアップで取ったデータから MRPC の検出効率及び時間分解能を評価した。

### 5.2.2 位置分解能評価用セットアップ

図 5.5 に位置分解能評価用のセットアップを示す。MRPC の位置分解能を評価するためのリファレンスとして直径 0.5 mm のプラスチックシンチレーションファイバーによって構成されたファイバートラッカー (FT) が MRPC の上流、下流をそれぞれ一台ずつ設置した。また、図 5.5 のように MRPC の上流 FT の上流に  $100 \times 100 \text{ mm}^2$  のプラスチックシンチレータ、最下流に  $30 \times 30 \text{ mm}^2$  のプラスチックシンチレータを設置した。この 2 つのシンチレータのコインシデンス信号をトリガーとした。このセットアップでも  $\gamma$  線が入射し、標的で電子・陽電子対に生成されて、磁石によって曲げられるまでは 5.2.1 節で述べたセットアップと同じである。また、MRPC の設置位置、信号を読み出したストリップ及びデータ取得方法も変更はない。

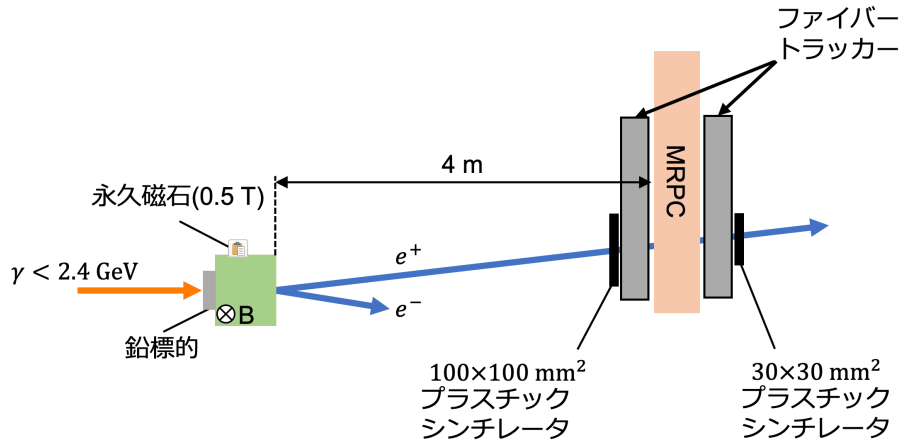


図 5.5: 横から見た時の位置分解能評価用セットアップ。

図 5.6 に位置分解能評価用セットアップの際の上流から見た MRPC のセットアップを示す。先述したように読み出しているストリップの条件は検出効率・時間分解能評価用のセットアップとアンプは検出効率・時間分解能評価用セットアップと同じである。ファイバートラッカーの有感領域の中心を、MRPC の X 方向は読み出している領域の中心に、Y 方向は読み出している 1.35 mm のストリップ領域の中心 (図 5.6 の水色の部分) になるように設置した。MRPC からの信号は時間分解能評価のセットアップと同様で、アンプで増幅した信号をディスクリミネータで LVDS 信号に変換し、HR-TDC で記録した。アンプとディスクリミネーター間の同軸ケーブルの長さは、X 方向は 15 m、Y 方向は 3 m のものを使用した。

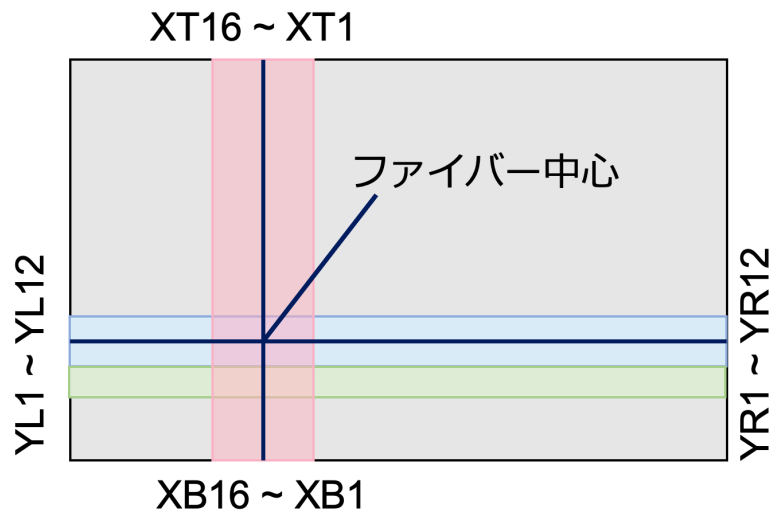


図 5.6: 上流側から見た時の MRPC のセットアップ。

図 5.7 に実際のセットアップの写真を示す。左の図が上流側から見た写真で、右の図が下流側から見た写真である。FT は光検出器であるため遮光をした。また、2 台の FT が並行でなかったり、傾いてしまうと再構成した飛跡の精度が悪化し、MRPC の位置分解能の悪化に繋がってしまうため、フレームを精度良く製作し、測量を丁寧に行って、FT 間で傾きや位置のずれが無いようにした。



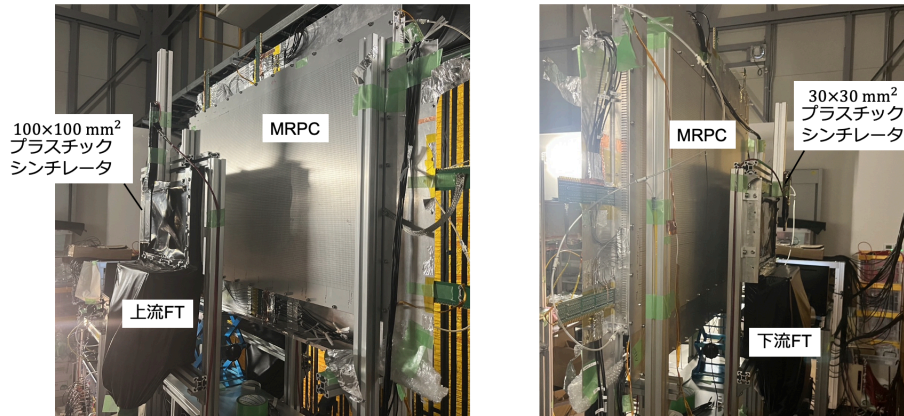


図 5.7: (左) 上流側から見たセットアップの写真、(右) 下流側から見たセットアップの写真。

### 5.3 ディスクリミネーター

図 5.8 に MRPC に使用したディスクリミネーターを示す。このディスクリミネーターは台湾中央研究院によって開発された。図 5.8 下側の MMCX コネクタが入力側であり、ディスクリミネーターによってデジタル変換された LVDS 信号が図 5.8 上側のフラットケーブルコネクタから出力される。このディスクリミネーターは 1 台につき 16 ch 入力できるが、左右の電源を使い分けることで 8 ch ずつ使用することも可能である。図中の左右の電源コネクタから 6~15 V の電圧を供給することで 8 ch ずつ使い分けることが可能である。また図中のスレッシュホールドコネクタに電圧を供給することで、電圧に応じて任意のスレッシュホールド電圧を決定することができる。1 V 印加でスレッシュホールド電圧は  $-35 \text{ mV}$  となり、印加電圧に比例したスレッシュホールド電圧をかけられる。また、かける電圧を負にすることでスレッシュホールドは正の値を取ることができ、ポジティブな信号も LVDS 信号に変換できるという特徴を持つ。

このディスクリミネーターは MRPC の信号のような時間応答の早い信号に帯域を持ち、時間分解能を悪化させることなく信号を変換できる。 $\pi 20$  スペクトロメーターではデータの取得には TDC 情報のみを使う予定である。しかし、信号の電荷量によってディスクリミネーター出力のタイミングがずれるスルーイングを補正するためには信号の電荷情報が必要である。 $\pi 20$  スペクトロメーターでは、信号の電荷情報の代わりに time-over-threshold (TOT) を用いる。このディスクリミネーターはアナログ信号の TOT を保ったまま LVDS 信号に変換する。以上の 2 つの点からこのディスクリミネーターを使用することで、TDC 情報のみで時間分解能の良い TOF 検出器の実現が可能となる。

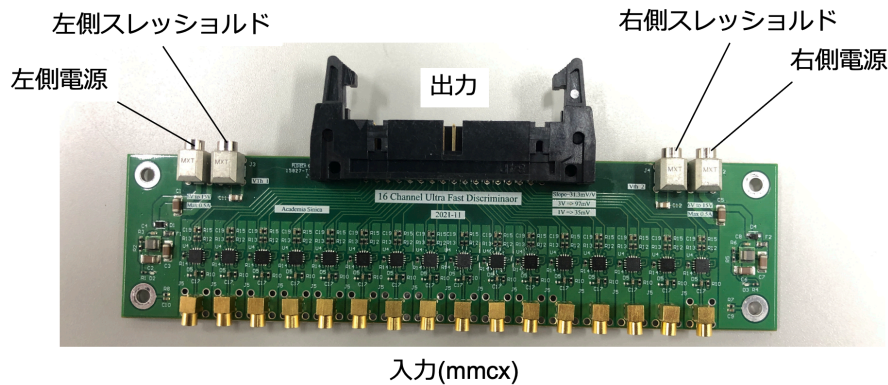


図 5.8: 使用したディスクリミネーターの写真

## 5.4 HUL HR-TDC

J-PARC におけるハドロンビーム実験用に開発された HUL モジュール [31] を本テスト実験で利用した。この HUL モジュールにはさまざまな拡張機能を持ったメザニンカードを 2 枚まで取り付けることが可能であり、このメザニンカードを用途に合わせて、付け替えることでは汎用性の高いモジュールとして使用可能である。HUL モジュールは VME クレートに挿し、VME クレートから電源を供給して使用する。本試験では HUL モジュールにメザニン HR-TDC カードを 2 枚取り付けて使用した。図 5.9(右) にメザニン HR-TDC を 2 枚取り付けた HUL モジュールを示す。図中のオレンジの四角で囲まれたボードがメザニン HR-TDC である。このメザニン HR-TDC は実際に  $\pi 20$  スペクトロメーターで使用するモジュールにも載せて使用する予定である。HR-TDC の測定の精度は 20 ps で最大 1 Gbps であり、目標とする MRPC の時間分解能 100 ps より十分良い。HR-TDC のフロントパネルを図 5.9(左) に示す。入力は 2 つに分かれておりそれぞれ 32 ch ずつ、合計 64 ch 読み出すことが可能である。フロントパネル下部に 8 つある LEMO コネクタのうち 1 番右上のコネクタが HR-TDC の common stop であり、各チャンネルの入力信号がそれぞれのスタートタイミングとなる。取得されるデータとしてスタートタイミングと common stop との時間差が記録される。LEMO コネクタのうち右列の上から 3 番目のコネクタからは HR-TDC の busy 信号が出力され、他のモジュールの busy と組み合わせてトリガー入力に veto をかける。HR-TDC の LAN ポートと PC を LAN ケーブルで繋いで、取得したデータを転送する。

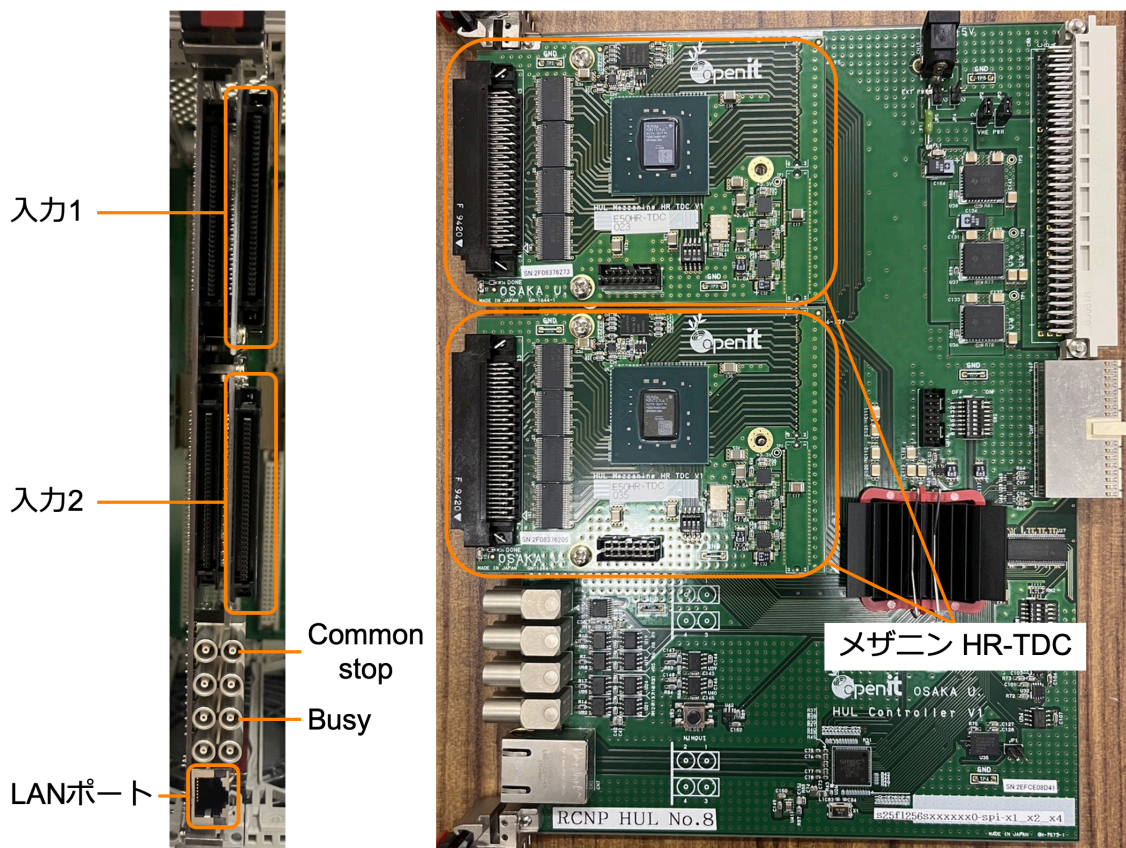


図 5.9: HUL HR-TDC の写真、(左)HR-TDC のフロントパネル、HR-TDC として使用する際にはメザニンカードの入力コネクタに信号を入れる。(右)HR-TDC を横から見た図、図中のオレンジの四角に囲まれているのが HR-TDC である。

この HR-TDC は、信号が正から負に行くタイミングである立ち上がり時間と信号が負から正に行くタイミングである立ち下がり時間をそれぞれ読み出しており、それぞれ異なったオフセットを持っている。HR-TDC の仕様として、立ち上がり時間のオフセットは立ち下がり時間のオフセットより

も小さい値となってしまう。そのため図 5.10 のように、本来の TOT が同じであっても TDC 上ではポジティブな信号のデータの方がネガティブな信号のデータよりも小さな値として記録されてしまうという性質を持っている。

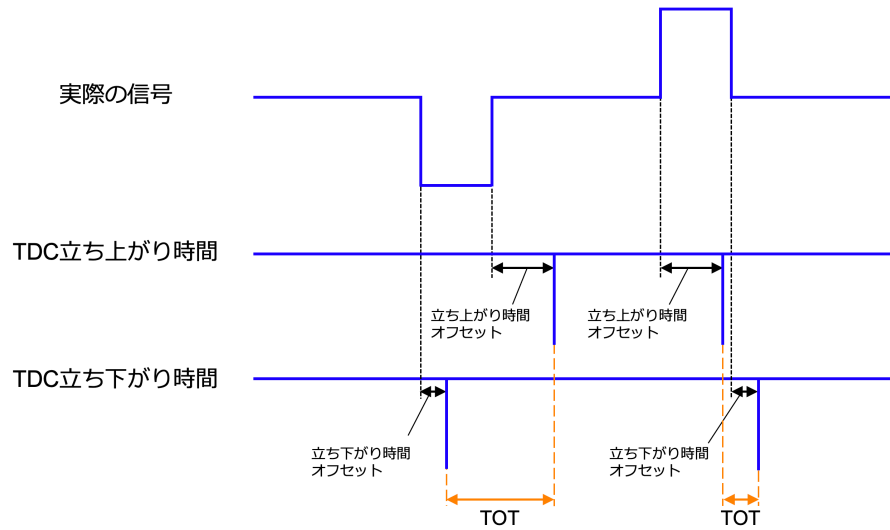


図 5.10: TDC のオフセットによるネガティブ信号とポジティブ信号の TOT の違い。

また、この HR-TDC は最小 1 ns の幅の信号を受け付けることができるという特徴を持つ。しかし、TDC がポジティブな信号の立ち下がりタイミングを過小評価し、MRPC の信号の TOT が小さい場合では、ポジティブな信号の TOT の検出ができずに、検出効率が低下する可能性がある。また、TOT が狭い場合、TOT の測定ミスによってスルーイング補正が正しく行えず、時間分解能が悪化する可能性がある。

## 5.5 ファイバートラッカー

今回使用したファイバートラッカー (FT) は直径 0.5 mm のプラスチックシンチレーションファイバーによって構成された飛跡検出器である。この FT は実際に  $\pi$ 20 スペクトロメーターで使用する予定の実機であり、図 1.5 のターゲット上流に 2 台置かれる予定である。図 5.11 左に今回使用した FT の設計図を示す。FT1 台につき X 方向 (垂直方向にファイバーが設置) と垂直方向から  $\pm 30^\circ$  に回転した UV 方向の計 3 レイヤーで構成されている。本試験では 2 台使用したため、計 6 レイヤーで飛来した陽電子の飛跡を再構成した。また、図 5.11 右に実際に使用した FT の写真を示す。



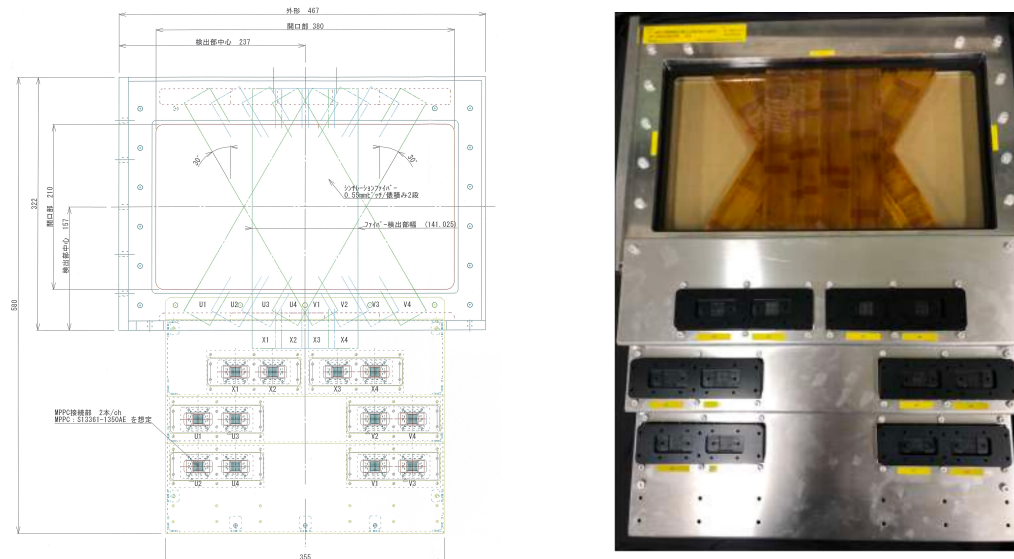


図 5.11: (左)FT の設計図、(右)FT の実際の写真。

FT の各レイヤーの構造は図 5.12 のようになっている。1 レイヤーはシンチレーションファイバー 128 本で構成されるシート 4 つから成っており、1 レイヤー 512 本のシンチレーションファイバーからなる。また、シートは端を構成するタイプ A と中間を構成するタイプ B の 2 種類からなる。シンチレーションファイバーは 2 段の俵積み構造となっており、各ファイバー間には 0.05 mm の隙間がある。タイプ A の片方の端とタイプ B の両側の端においては 16 本のファイバーが飛び出す構造をしており、隣のシートと重なり合わせることで 2 段構造となる。

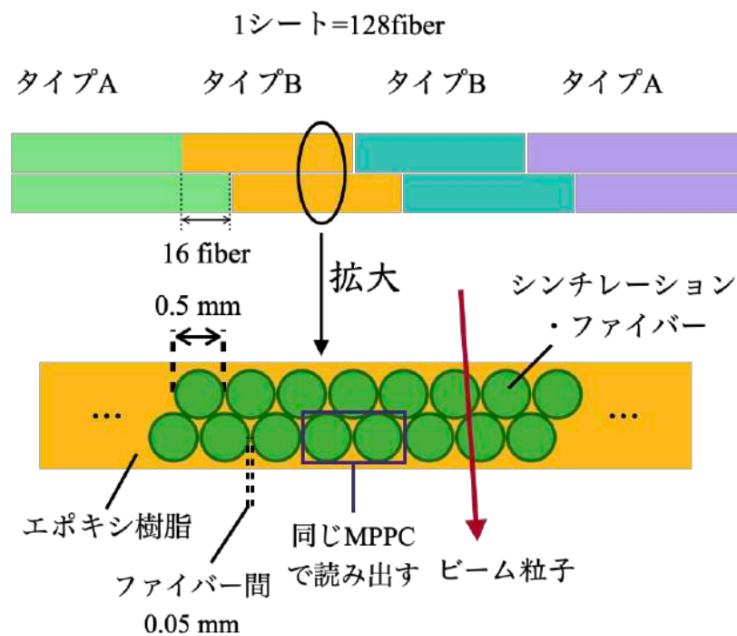


図 5.12: FT の各レイヤーの構造 [30]。

FT は多くのシンチレーションファイバーの光をコンパクトな構造で検出する必要があるため、図 5.13(左) のようなアレイタイプの Multi Pixel Photon Counter (MPPC) を用いた。この MPPC アレイ一台でレイヤーの 1 シート分 (ファイバー 128 本) を読み出すことが可能である。この MPPC アレイは 1 つで 64 ch 読み出し可能であり、1 ピクセルのピッチは 50  $\mu\text{m}$  である。FT は図 5.12 に示されたように 2 本のファイバーを 1 つのピクセルで読み出しているため、シンチレーションファイ

バーの光検出部は図 5.13(右) のように 2 本をひとまとめにしてある。そのため FT の実際の 1 ch あたりの有効幅は 1 mm であり、各レイヤーのファイバー間隔から計算される位置分解能の期待値は約 0.28 mm 程度である。

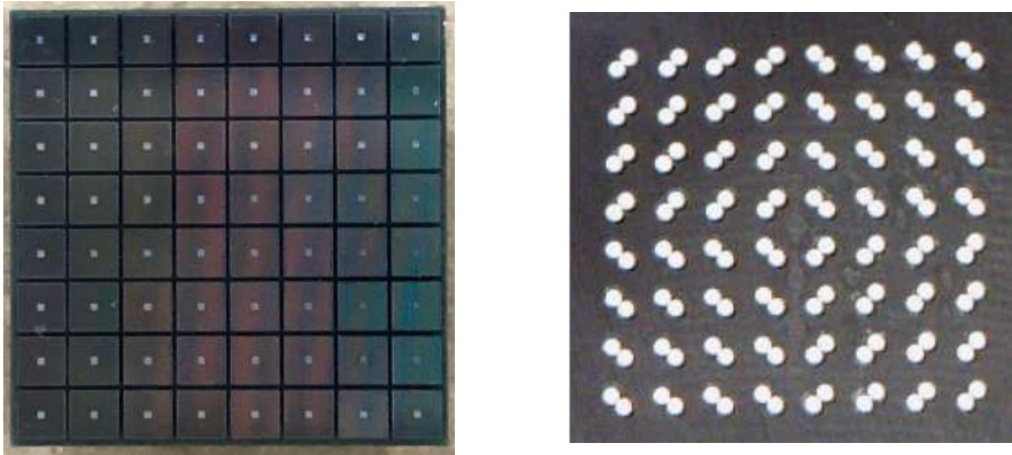


図 5.13: (左) 使用した MPPC、(右)FT の光検出部

本試験では、上流の FT は 5.11(左) の面が上流を向いている。また、各レイヤーで 2 番のシートだけ読み出した。X,U,V の 2 番のシートの位置は 5.11(左) で示している。下流の FT は上流の FT に対して反対向きに設置したので 5.11(左) の面が下流を向いている。上流の FT との位置を合わせやすくするために下流の FT は各レイヤーで 3 番のシートだけ読み出した。同様に X,U,V の 3 番のシートの位置は 5.11(左) で示している。また、今回使用したシートは全てタイプ B である。光を検出した MPPC からの信号の ADC と TDC を NIM-EASIROC で取得した。

解析上で飛跡を再構成するには、6 レイヤー全部に  $\pm 10$  ns 以内にトリガーシンチレーターと同期したタイミングでヒットがあることを要求した。飛跡は最小二乗法を用いて再構成した。レイヤーで複数のファイバーにヒットがあった場合は、全ての候補の飛跡を再構成した。例えば 6 レイヤーあり、各レイヤーのヒットの数がそれぞれ 2、3、2、5、1、2 だった場合、120 本の飛跡の候補を再構成する。そこから飛跡と各レイヤーの実際のヒット位置との差の二乗の和である  $\chi^2$  が 100 以下で最小である候補を選んだ。また、本試験では飛跡の候補数はほぼ 1 であった。

### 5.5.1 NIM-EASIROC

NIM-EASIROC とはチャンネル数の多い MPPC の制御と読み出しを Ethernet を介して行えることを目的として開発された汎用 MPPC 読み出しモジュールである [32]。図 5.14(右) に NIM-EASIROC の内部の回路の写真を示す。図中のオレンジの四角で囲まれた ASIC が EASIROC の本体であり、ここで MPPC からの信号の処理を行っている。EASIROC は MPPC の信号の時間情報 (TDC) と波高情報 (ADC) を記録することが可能である。図 5.14(左) に NIM-EASIROC のフロントパネルを示す。入力コネクタは 2 つあり、各 32 ch ずつ、合計 64 ch 読み出すことが可能である。Hold は信号の ADC を取得する際に、信号の波高を固定するタイミングを決定する。ADC を正しく取得するためには Hold のタイミングが信号のピーク位置になるように調節しなければならないが、本試験では FT で飛跡を検出する際には TDC の情報しか用いなかったため、タイミング調整は行わず、モジュールの動作のためだけに Hold 信号の入力を行った。Accept は信号が来た際にデータを取得するか否かを決定する。Tstop は NIM-EASIROC の TDC の common stop のタイミングを決定する。Busy からは NIM-EASIROC の busy 信号が出力され、他のモジュールの busy と組み合わせて、トリガー入力に veto をかける。LAN ポートから LAN ケーブルで PC と繋ぐことで MPPC の制御のための Slow control およびデータ取得を行う。本試験では 64 ch の MPPC アレイを 6 つ使用したため、NIM-EASIROC も 6 台使用した。

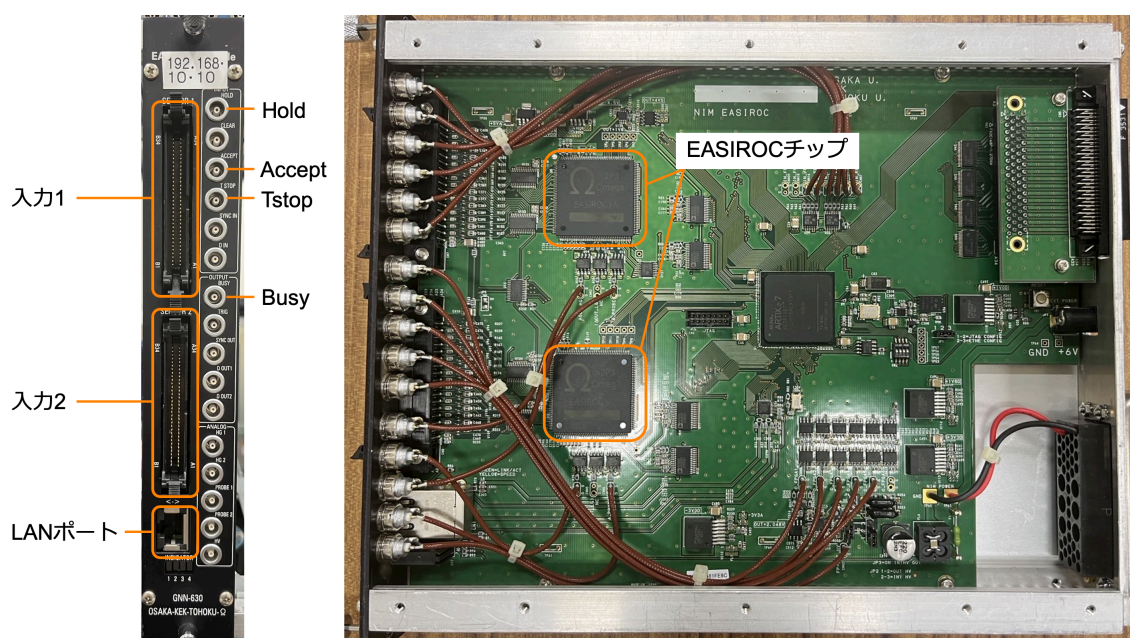


図 5.14: NIM-EASIROC の写真。(左) フロントパネル、(右)NIM EASIROC の内部、図中のオレンジの四角で囲まれた ASIC が EASIROC のチップである。



## 第6章 ビーム試験結果

### 6.1 測定項目

本試験では、製作したプロトタイプ TOF-tracker MRPC の検出効率、時間分解能および位置分解能を評価した。本解析では各性能の以下の項目を評価した。

- HV 依存性
- ストリップ伝播距離依存性
- アンプからディスクリミネーターまでのケーブル長の依存性

本試験では X 方向にポジティブな信号、Y 方向にネガティブな信号が誘起される。5.4 節で述べたように、今回使用した TDC はポジティブな信号の TOT を過小評価し、また TOT の狭いイベントを受け付けないことから性能がネガティブな信号に比べて悪化する可能性がある。本試験では、X 方向でアンプからディスクリミネーターまでの 3 m の同軸ケーブルを追加で 15 m 延長することで、ケーブル長の違いによる検出効率と時間分解能を比較した。信号幅の処理の影響で X 方向の性能が悪化している場合、ケーブルを延長し、信号をなまらせることによって性能の改善が見込まれるからである。一方で、Y 方向はケーブル長は常に 3 m だった。また、読み出しストリップの伝播距離の違いによる性能差を比較した。トリガーエリアから各ストリップ端までの距離は以下の通りである。

- X Top : 390 mm
- X Bottom : 140 mm
- Y Left : 280 mm
- Y Right : 740 mm

### 6.2 ケーブル長の違いによる TOT 分布の違い

6.1 節で述べたように信号幅が 1 ns 以下のポジティブな信号を TDC で測定できていない可能性があるため、アンプからディスクリミネーターまでのケーブルを延長することで、信号をなまらせて信号幅が大きくなるか確認した。X Bottom の 9 番のストリップのケーブルのケーブル長を 18 m まで延長し、ケーブル長が 3 m の時の TOT 分布と比較した。図 6.1 にケーブル長が 3 m と 18 m の X Bottom9 の TOT 分布を示す。青がケーブル長が 3 m の TOT 分布であり、赤がケーブル長が 18 m の TOT 分布である。TOT の値がケーブル長が 3 m の時に比べ大きくなり、TDC の性能限界である TOT が 1 ns 以下のイベントが減ったことが確認できた。

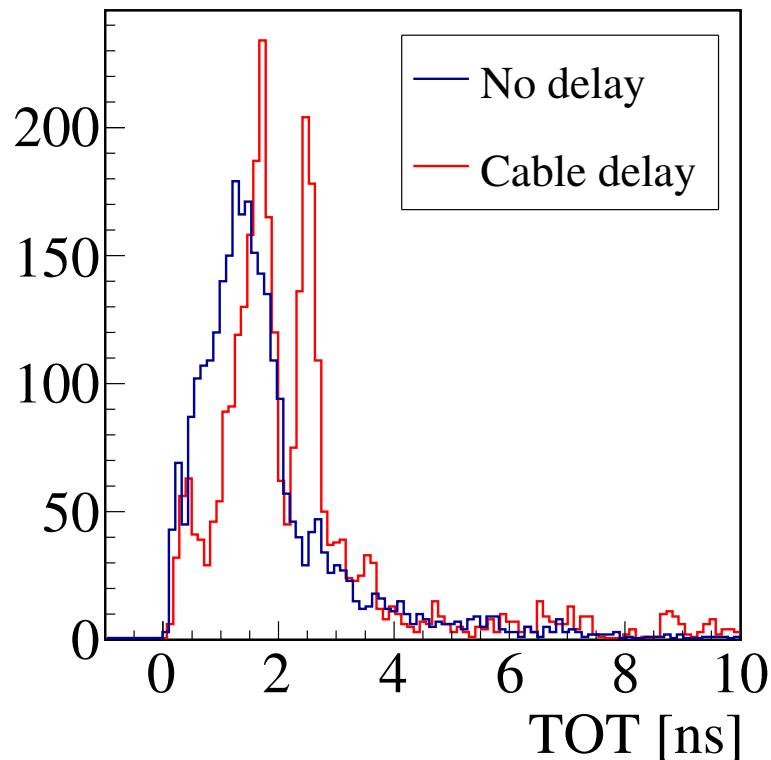


図 6.1: ケーブル延長する前とケーブルを延長した後の TOT の分布。青色がケーブル延長前で赤色がケーブル延長後

## 6.3 検出効率

### 6.3.1 検出効率評価方法

検出効率は 5.2.1 節で述べた検出効率・時間分解能評価用のセットアップで取得したデータを用いて評価した。MRPC の上流と下流に設置した合計 4 つのプラスチックシンチレータ全部に陽電子が通過したタイミングのイベントを母数として、その母数に対して実際に MRPC でも信号があったイベントの割合を検出効率とした。検出効率を評価する際、電荷が複数のストリップにまたがって誘起されるので、トリガーエリアよりも広い範囲を解析に使って検出効率を評価した。図 6.2、図 6.3 に HV が 14.5 kV での X、Y 方向のヒットマップを示す。スレッシュホールドは X 方向が 21 mV、Y 方向が -53 mV であった。スレッシュホールドが X 方向と Y 方向と異なっているのは、Y 方向ではノイズレベルが高かったためである。また、このヒットマップはディレイケーブルを追加していない時のものである。Y 方向ではヒットは 3 ストリップ程度に広がっており、X Bottom では 5 ストリップ程度に広がっていた。X Top ではストリップ全体に広がる分布が観測されたが、スレッシュホールドの設定を低くしすぎたためであると考えられる。

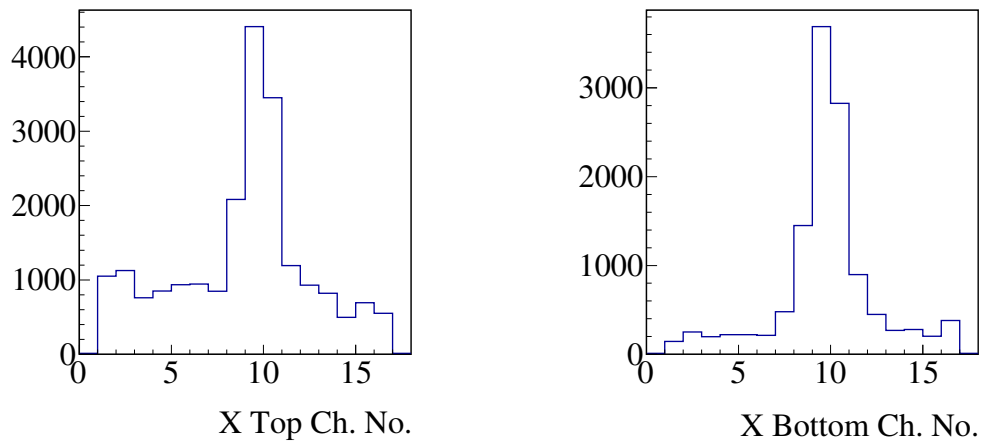


図 6.2: (左)X Top のヒットマップ、(右)X Bottom のヒットマップ

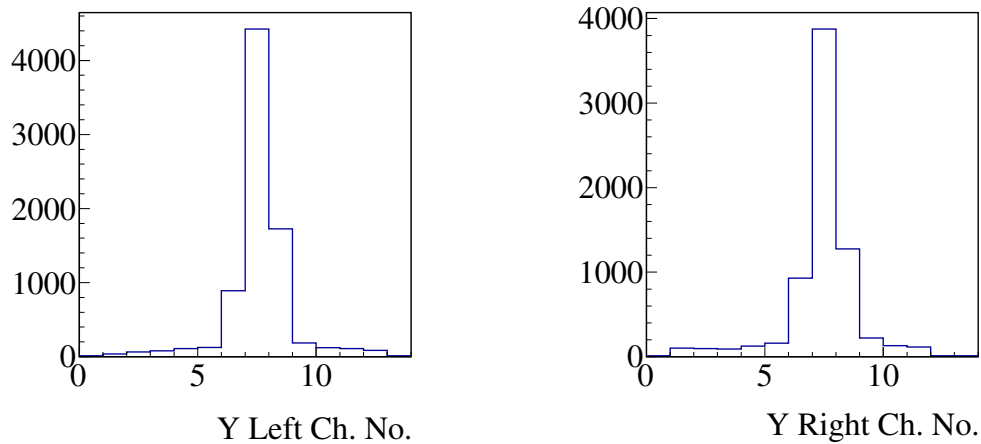


図 6.3: (左)Y Left のヒットマップ、(右)Y Right のヒットマップ

本解析では、トリガーエリア真下のストリップだけでなく、真下のストリップとその隣の 2 ストリップずつ、合計 5 ストリップを解析に用いて検出効率を評価した。

### 6.3.2 ストリップ伝播距離依存性

検出効率をストリップの伝播距離が異なる位置で測定し、検出効率のストリップ伝播距離依存性を評価した。ストリップ伝播距離はそれぞれ以下の通りであった。

- X Top : 390 mm
- X Bottom : 140 mm
- Y Left : 280 mm
- Y Right : 740 mm

検出効率は 12.0～15.5 kV の範囲で評価した。スレッシュホールドは X 方向は 21 mV、Y 方向は -53 mV に設定した。ケーブル長が全て 3 m の時の X、Y それぞれの検出効率を図 6.4 に示す。また検出効率 80 % 以上を拡大したものを図 6.5 に示す。

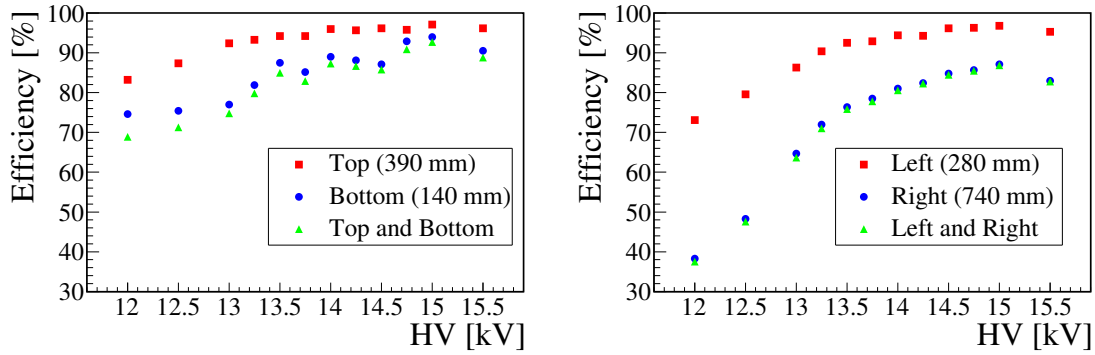


図 6.4: X、Y 方向それぞれの検出効率、(左)X の検出効率、赤が X Top の検出効率、青が X Bottom の検出効率、緑が X Top、X Bottom の両方にイベントがあった時の検出効率。(右)Y の検出効率、赤が Y Left の検出効率、青が Y Right の検出効率、緑が Y Left、Y Right の両方にイベントがあった時の検出効率。

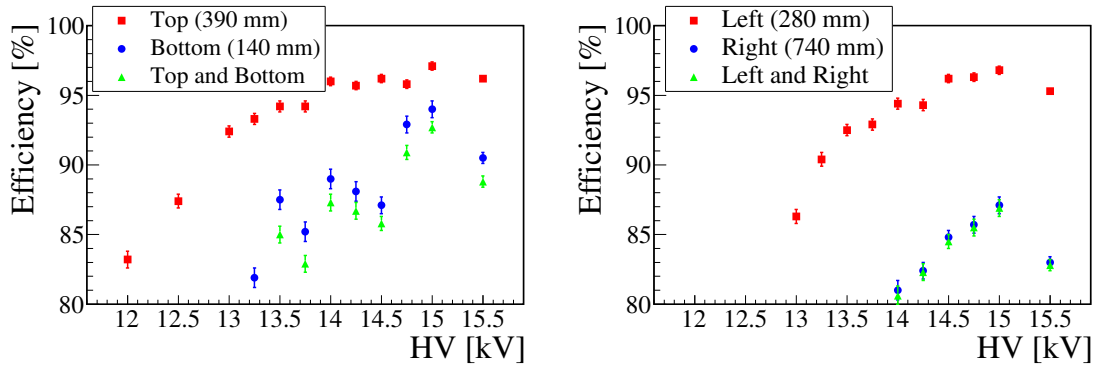


図 6.5: 図 6.4 の拡大図、(左)X の検出効率の拡大図、(右)Y の検出効率の拡大図。

Y 方向はストリップ端とトリガー位置に近い Y Left (280 mm) で 95 % 以上を達成することができた。Y Right (740 mm) の検出効率は Y Left に比べて低く、プラトーに達しても約 90 % 以下である。Y Right が Y Left よりも検出効率が低くなったのは、Y Right のストリップ伝播距離が Y Left のストリップ伝播距離と比べて長く、信号が伝播の間に波高が下がり、ディスクリミネーターのスレッシュホールドを超えなくなったことが原因だと考えられる。

X 方向では、X Top (390 mm) で検出効率 95 % 以上を達成することができた。一方、X Bottom (140 mm) はストリップの伝播距離が X Top よりも短いのに関わらず、X Top よりも検出効率が低く、また X Top や Y 方向で見られた綺麗なプラトーカーブが見られない。これはストリップの伝播距離が短すぎたことにより、信号の TOT が小さく TDC が信号を受け付けることができなかったことが原因だと考えられる。

### 6.3.3 ケーブル長の依存性

6.2 節でケーブルを延長することで TOT が大きくなることが確認できたので、X Bottom の検出効率がケーブルを延長することで回復するかを確認した。X Bottom のトリガーエリア近傍の 8,9,10 番のストリップのケーブルを 18 m まで延長した。ケーブル延長前後での X Bottom の検出効率を図 6.6 左に示す。青がケーブル長が 3 m の検出効率で、赤がケーブル長が 18 m の検出効率である。ケーブルを延長すると検出効率が大幅に回復した。また、X Bottom 8,9,10 にケーブルを延長した時の X 方向の検出効率を図 6.6 右に示す。X Bottom の検出効率は回復し、X Top の検出効率を上

回った。また、X Bottom は検出効率 99 % 以上を達成することができた。検出効率が低下の原因は MRPC に信号が誘起されていないのではなく、TOT が小さすぎて TDC が受け付けられないことだと考えられる。アンプからディスクリミネーターまでのケーブルを長くすることで伝播の間に信号幅を大きくし、検出効率が回復したのだと考えられる。したがって、X Top や Y 方向でもケーブルを延長して波高が小さくなった信号の TOT を大きくすることで、検出効率が回復する可能性がある。今後の課題としてより狭い信号を受け付けられる TDC の開発、または TDC が受け付けられるような信号処理を行うことが可能なアンプの開発が挙げられる。

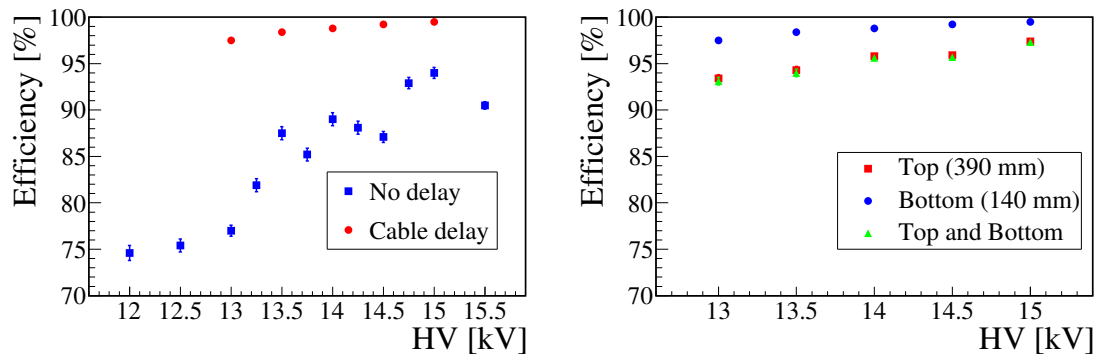


図 6.6: (左) ケーブル延長前後の X Bottom の検出効率、(右) ケーブル延長後の X の検出効率

## 6.4 時間分解能

MRPC の時間分解能は 5.1.2 節で述べたように加速器から供給される RF 信号と MRPC との時間差 (MRPC-RF) から MRPC の時間分解能を評価する。MRPC に入射する陽電子の速度は電子ごとに異なるが、全てがほぼ光速で飛来してくるので、RF 信号と MRPC との時間差は一定であると考えてよい。また、RF 信号や HR-TDC の時間分解能は MRPC の時間分解能に対して十分に良いので、TOF の時間分解能に及ぼす影響は無視できる。

### 6.4.1 TOT Integral によるスルーイング補正

5 章でも述べたように  $\pi 20$  スペクトロメーターでは TDC 情報のみのデータを取得するので、電荷情報の代わりとして TOT を用いてスルーイング補正を行う。しかし、図 6.7(左) のように MRPC のような TOT が小さい信号では TOT の分布が一部分に偏ってしまい、補正関数が TOT の分布が偏った領域の影響を大きく受けてしまう。したがって、最もスルーイングの影響が大きくなる TOT が小さいエリアの補正をうまく行うことができない。そのため、今回補正は TOT を TOT Integral という量に変換し TOT Integral を用いてスルーイング補正を行った。TOT Integral とは TOT を大きさ順に並べ、正規化し、割合で表したものである [33]。TOT Integral は図 6.7(左) のような一部分に偏在する TOT の分布を均一な分布に変換することができる。TOT integral を用いることによって効果的にスルーイング補正を行うことが可能であることは R. X. Yang らによって示されている [33]。図 6.7 右には TOT と TOT Integral の関係を示す。本解析でも TOT Integral を用いてスルーイング補正を行った。



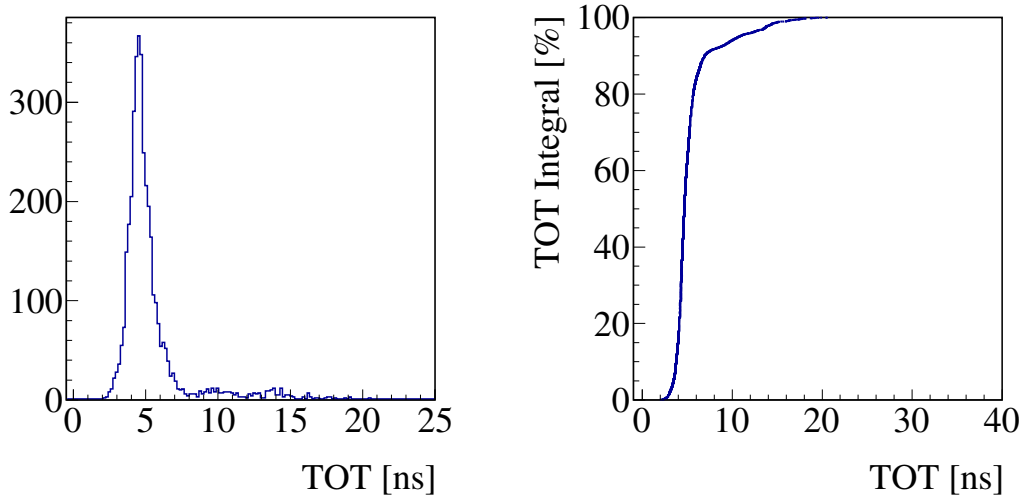


図 6.7: (左)TOT の分布、(右)TOT と TOT Integral との関係、TOT Integral とは TOT を大きさ順に並べ、正規化し、割合で表したものである。

#### 6.4.2 X、Y 方向の時間分解能

##### 平均の時間分解能

図 6.8(左) にスルーイング補正前の MRPC の X Top と X Bottom の平均時間と RF との時間差を、図 6.9(左) にスルーイング補正前の MRPC の Y Left と Y Right の平均時間と RF との時間差の分布を示す。この図の測定条件は HV が 14.5 kV で、スレッシュホールドは X 方向は 21 mV、Y 方向は -53 mV である。時間分解能評価に使用したストリップは図 6.2、図 6.3 から 1 番ヒットの多いストリップだった X9 と Y7 である。X 方向のケーブル長は X Top、X Bottom の両サイドともに 15 m とした。スルーイング補正前で MRPC の時間分解能は X 方向が  $(78.0 \pm 1.2)$  ps だった。Y 方向が  $(85.5 \pm 1.5)$  ps だった。

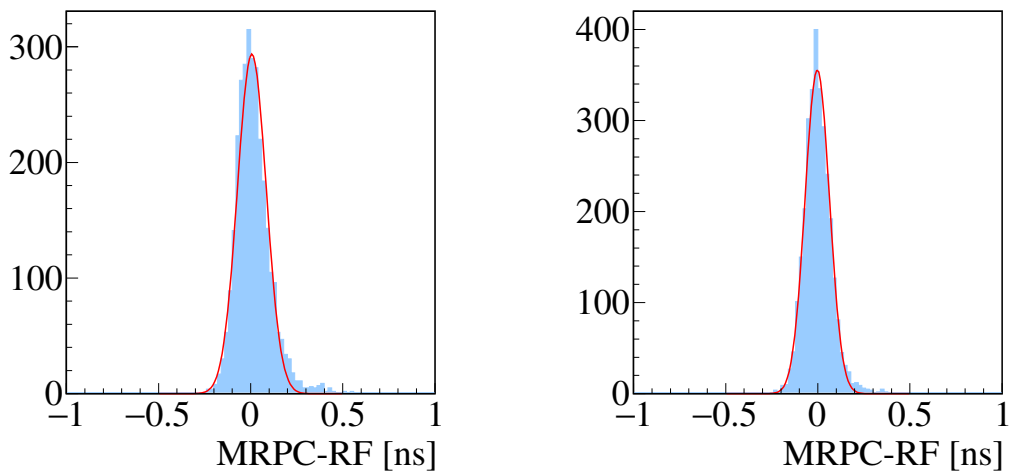


図 6.8: X 方向の MRPC と RF の時間差、(左) 補正前の MRPC と RF の時間差、(右) 補正後の MRPC と RF の時間差。

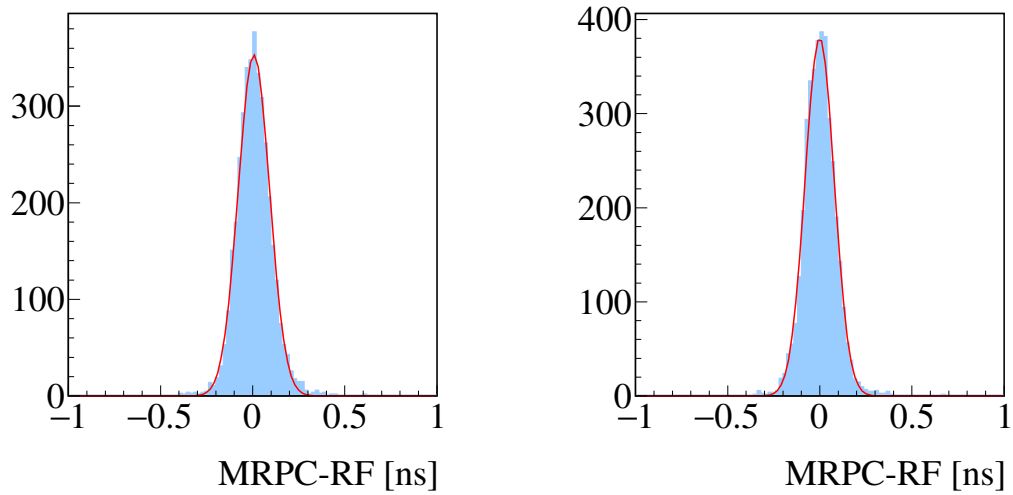


図 6.9: Y 方向の MRPC と RF の時間差、(左) 補正前の MRPC と RF の時間差、(右) 補正後の MRPC と RF の時間差。

図 6.10(上左) に X 方向の TOT と MRPC-RF の二次元分布を示す。また、図 6.10(上右) は TOT Integral と MRPC-RF の二次元分布であり、この分布を用いてスルーイング補正を行った。補正関数には二次関数を用いた。Y 方向でも同様の方法でスルーイング補正を行った。スルーイング補正を行った後の X 方向の TOT と MRPC-RF および TOT Integral と MRPC-RF の二次元分布を図 6.10(下左)(下右) に示す。この図からスルーイングが適切に補正されていることがわかる。補正後の X、Y 方向それぞれの MRPC-RF を図 6.8(右)、図 6.9(右) に示す。補正後の時間分解能は X 方向は  $(66.0 \pm 1.0)$  ps、Y 方向は  $(79.8 \pm 1.2)$  ps であった。また、MRPC は 14.5 kV では目標である時間分解能 100 ps 未満を十分に達成することができた。MRPC の時間分解能をポジティブな信号出力で評価するのは初めての試みであったが、ポジティブな信号出力でも良い時間分解能が得られることを本研究にて実証した。

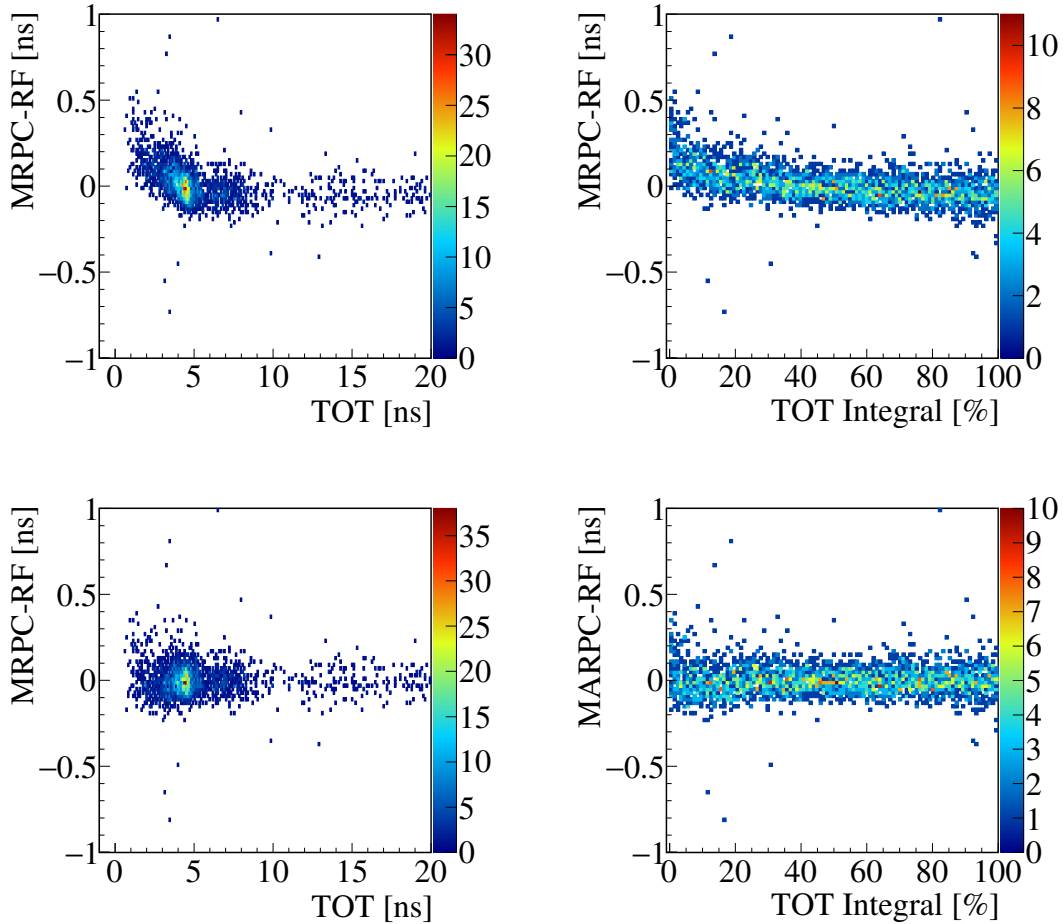


図 6.10: X 方向の TOT と MRPC-RF の二次元分布、(上左) 補正前の TOT と MRPC-RF の二次元分布、(上右) 補正前の TOT Integral と MRPC-RF の二次元分布、(下左) 補正前の TOT と MRPC-RF の二次元分布、(下右) 補正前の TOT Integral と MRPC-RF の二次元分布

### 片側読み出しごとの時間分解能

図 6.11、図 6.12 に補正前後の X Top と X Bottom それぞれの MRPC-RF を示す。HV は 14.5 kV で、スレッシュホールドは 21 mV である。ケーブル長は X Top、X Bottom とともに 15 m である。X Top の時間分解能は補正前が  $(93.9 \pm 1.6)$  ps、補正後が  $(78.7 \pm 1.3)$  ps であった。X Bottom の分解能は補正前が  $(68.8 \pm 1.1)$  ps、補正後が  $(61.0 \pm 0.9)$  ps であった。図 6.13、図 6.14 には補正前後の Y Left と Y Right それぞれの MRPC-RF を示す。HV は X 方向と同様で 14.5 kV で、スレッシュホールドは -53 mV である。Y 方向のケーブル長はどちらも 3 m である。Y Left の時間分解能は補正前が  $(112.9 \pm 1.4)$  ps、補正後が  $(101.5 \pm 1.2)$  ps であり、Y Right の時間分解能は補正前が  $(80.8 \pm 1.2)$  ps、補正後が  $(76.8 \pm 1.2)$  ps であった。X 方向ではストリップの伝播距離が短い X Bottom (140 mm) の方が伝播距離の長い X Top (390 mm) よりも時間分解能がよかった。一方 Y 方向では、ストリップの伝播距離が長い Y Right (740 mm) の方が伝播距離の短い Y Left (280 mm) よりも時間分解能がよいという、真逆の結果が得られた。表 6.1 にそれぞれの読み出しとトリガー領域までの距離、補正後の時間分解能、TOT の大小、使用したアンプ、信号が伝播する際の反対側のストリップのグラウンド条件をまとめた表を示す。また、図 6.15 に X、Y 方向それぞれの片側読み出しごとの TOT 分布を示す。この図から時間分解能のよい方が TOT が小さいという共通点が見られる。使用したアンプは読み出しによって異なっている。また、上下の読み出しストリップの向きを直交させており、ストリップにさまざまなグラウンド形状が存在するため信号が伝播する際の反対側のストリップのグ

ラウンド条件が読み出しのサイドで異なっている。この反対側のストリップのグラウンド形状の違いが時間分解能に影響を与えた可能性がある。一般的に、時間分解能は伝播距離が短い方が良くなる [25]。X 方向では伝播距離の短い X Bottom (140 mm) の分解能の方が良く、矛盾しない。TOT が X Bottom に比べ X Top の方が大きくなったのは X Bottom で反射した信号が直接 X Top に向かった信号と伝播距離に差がほぼないために重なってしまい、TOT を過大評価してしまったと考えれば説明が可能である。一方、Y 方向の TOT 分布である図 6.15(右) より、Y 方向では TOT 分布に反射の影響は及んでおらず、伝播距離が短い方が TOT が大きいという説明ができる。しかし、時間分解能は伝播距離が長い Y Right (740 mm) が良かった。時間分解能が伝播距離の短い Y Left (280 mm) の方が悪いのはアンプの違い、もしくは信号が伝播する際の反対側のストリップのグラウンド形状の違いが原因だと考えられる。しかし、表 6.1 より Y Left のアンプと反対側のストリップのグラウンド形状が同じ条件の X Bottom は時間分解能が良かった。そのため本解析では、Y Left の時間分解能が Y Right よりも悪い原因を特定することができなかった。今後の試験で、対照実験を行い、原因を特定する予定である。

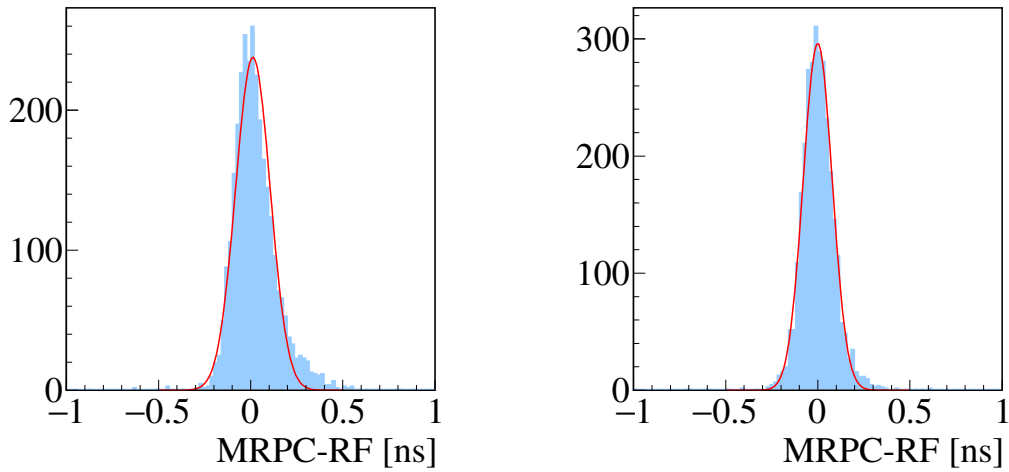


図 6.11: X Top (390 mm) の MRPC-RF、(左) 補正前の X Top の MRPC-RF、(右) 補正後の X Top の MRPC-RF。

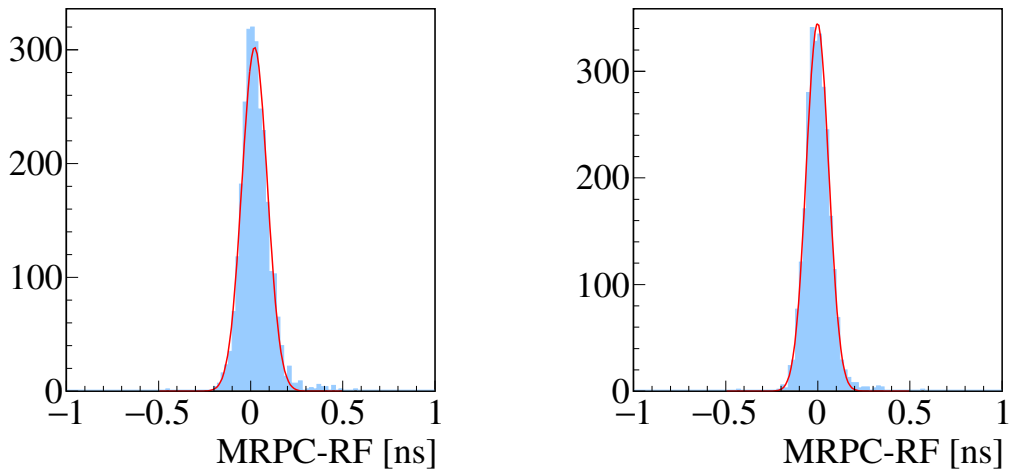


図 6.12: X Bottom (140 mm) の MRPC-RF、(左) 補正前の X Bottom の MRPC-RF、(右) 補正後の X Bottom の MRPC-RF。

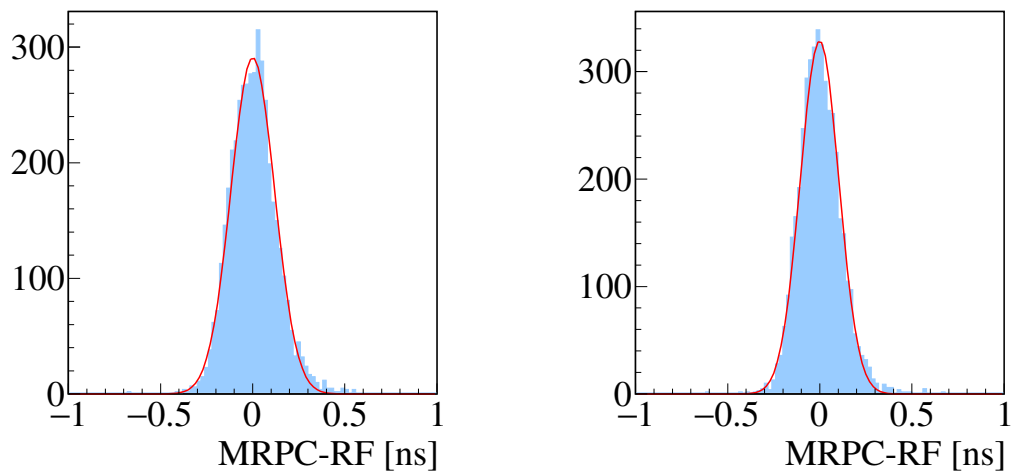


図 6.13: Y Left の MRPC-RF、(左) 補正前の Y Left の MRPC-RF、(右) 補正後の Y Left の MRPC-RF。

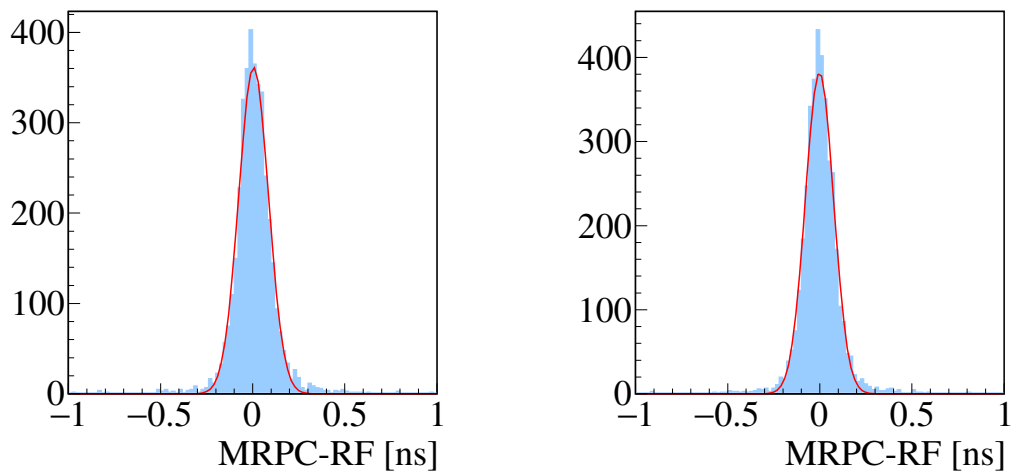


図 6.14: Y Right (740 mm) の MRPC-RF、(左) 補正前の Y Right の MRPC-RF、(右) 補正後の Y Right の MRPC-RF。



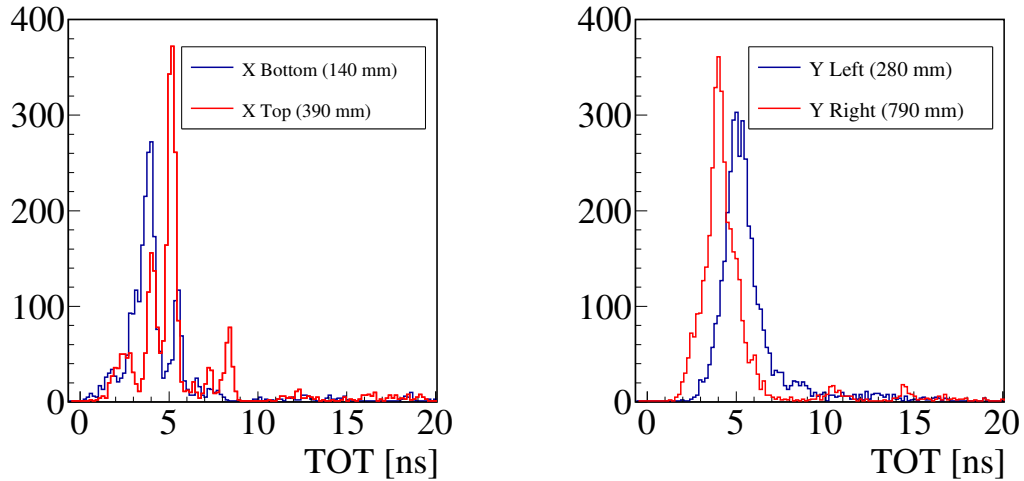


図 6.15: 片側読み出しごとの TOT 分布、(左)X 方向の TOT 分布、赤が X Top の TOT で青が X Bottom の TOT。(右)Y 方向の TOT 分布、青が Y Left の TOT で赤が Y Right の TOT。

|                   | 補正後時間分解能             | TOT の大小 | 使用したアンプ   | 反対方向のストリップ条件         |
|-------------------|----------------------|---------|-----------|----------------------|
| X Top (390 mm)    | $(78.7 \pm 1.3)$ ps  | 大きい     | 32 ch アンプ | Y Separate/No Ground |
| X Bottom (140 mm) | $(61.0 \pm 0.9)$ ps  | 小さい     | 8 ch アンプ  | Y Full Ground        |
| Y Left (280 mm)   | $(101.5 \pm 1.2)$ ps | 大きい     | 8 ch アンプ  | X Full Ground        |
| Y Right (780 mm)  | $(76.8 \pm 1.2)$ ps  | 小さい     | 32 ch アンプ | X Separate/No Ground |

表 6.1: 片側読み出しごとにストリップ伝播距離、時間分解能、TOT の大小、使用したアンプ、信号が伝播する際の反対方向のストリップのグラウンド条件をまとめた表。X 方向は TOT の大きさや時間分解能とストリップの伝播距離との関係が説明可能であるが、Y 方向は時間分解能とストリップの伝播距離との関係が X 方向と真逆であり、説明が可能でない。

### 6.4.3 HV 依存性

図 6.16 に X、Y 方向の時間分解能の HV 依存性について示す。スレッシュホールドは X 方向が 21 mV、Y 方向が -53 mV である。またケーブル長は X 方向が 15 m、Y 方向が 3 m である。X 方向では、今回測定した HV の範囲では補正後の時間分解能はほとんど HV によらなかった。しかし、補正前では HV が減少するにつれて時間分解能が悪化しており、13.5 kV 以下でさらに悪化していくと考えられる。また、X では 13.5～15.5 kV の範囲において時間分解能が 70 ps を下回るという目標性能が達成できた。Y 方向では、時間分解能は HV が 14.5 kV で最も良く、14.5 kV より HV を増加もしくは減少させるにつれ、分解能は悪化した。これは以前行ったビーム試験の結果と同様の傾向であった [34]。Y 方向でも、X 方向には及ばないものの 12～15.5 kV という広い電圧の範囲で目標性能である 100 ps 未満という時間分解能を達成することができた。

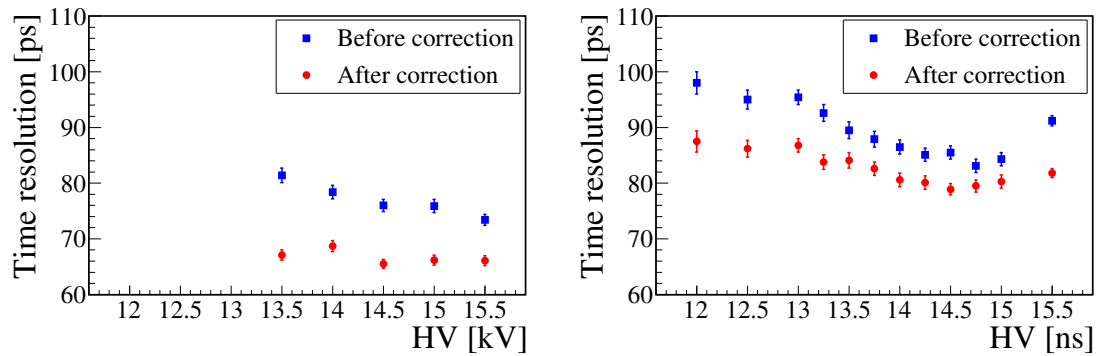


図 6.16: X、Y 方向の時間分解能の HV 依存性、青が補正前の時間分解能で、赤が補正後の時間分解能。(左)X 方向の時間分解能の HV 依存性、(右)Y 方向の時間分解能の HV 依存性。

## 6.5 時間分解能のケーブル長の依存性

X 方向でアンプからディスクリミネーターまでの同軸ケーブルの長さを変えることによって、ケーブル長の違いによる時間分解能を比較した。X Top、X Bottom 両方でケーブル長 3 m、X Bottom だけケーブルを 18 m に延長、X Top、X Bottom 両方でケーブルを 15 m に延長の 3 条件で比較した。図 6.17 に X 方向の 14.5 kV での各ケーブル長の条件での補正前後の MRPC-RF を示す。MRPC の時間は X Top と X Bottom の平均の時間である。また、各条件での時間分解能を表 6.2 に示す。時間分解能は両サイドともケーブルを延長した条件が最も良くなった。

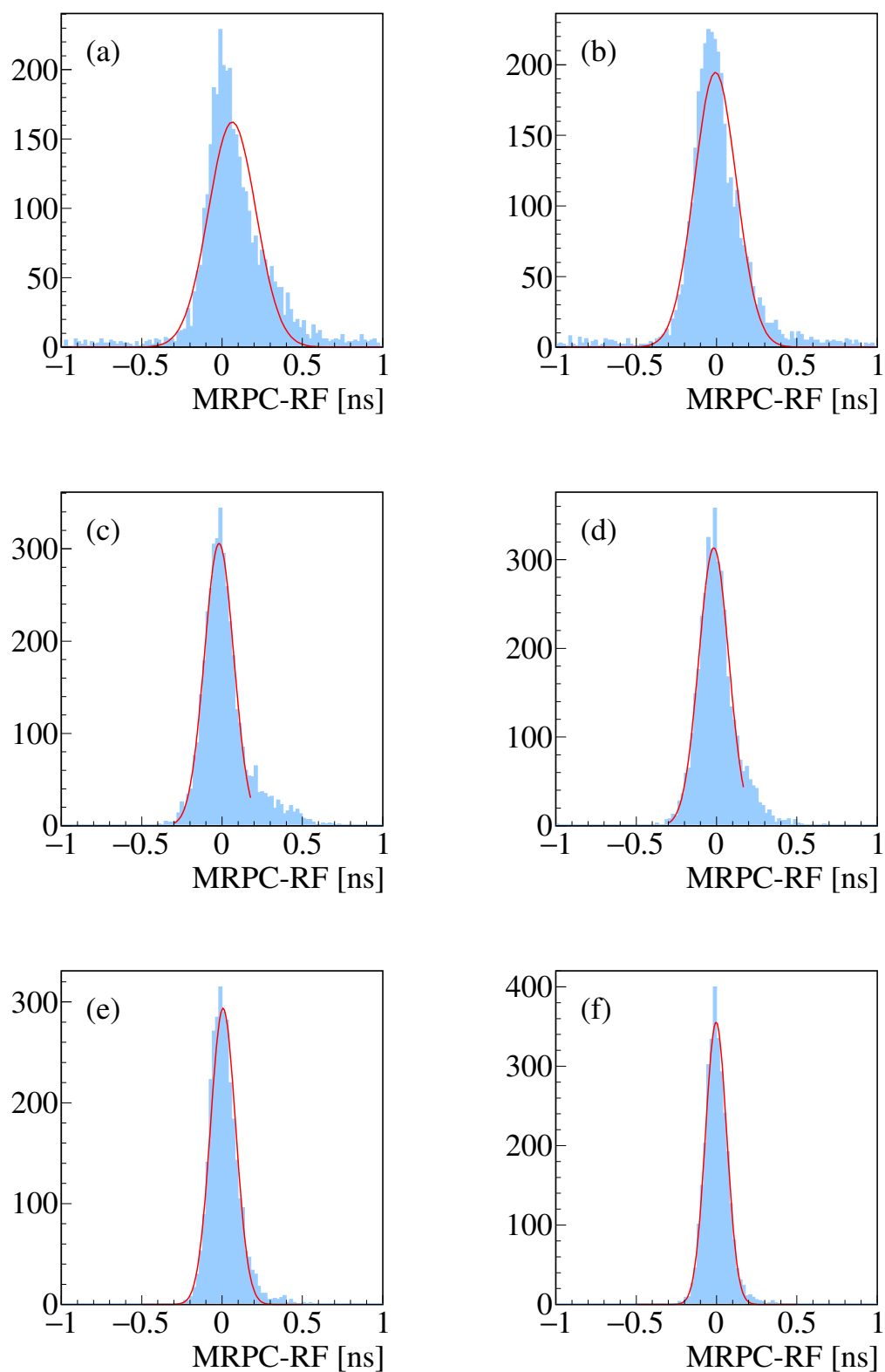


図 6.17: 補正前後でのケーブル長の条件ごとの MRPC-RF、(a)X Top、X Bottom ともにケーブル長 3 m の補正前の MRPC-RF。(b)X Top、X Bottom ともにケーブル長 3 m の補正後の MRPC-RF。(c)X Bottom のみケーブルを 18 m に延長した時の補正前の MRPC-RF。(d)X Bottom のみケーブルを 18 m に延長した時の補正後の MRPC-RF。(e)X Top、X Bottom ともにケーブルを 15 m に延長した時の補正前の MRPC-RF。(f)X Top、X Bottom ともにケーブルを 15 m に延長した時の補正後の MRPC-RF。

|     | 両方延長なし           | Bottom だけ延長         | 両方とも延長              |
|-----|------------------|---------------------|---------------------|
| 補正前 | $(148 \pm 4)$ ps | $(91.1 \pm 1.5)$ ps | $(78.0 \pm 1.2)$ ps |
| 補正後 | $(130 \pm 2)$ ps | $(93.0 \pm 1.5)$ ps | $(66.0 \pm 1.0)$ ps |

表 6.2: X 方向の各ケーブル長での時間分解能。HV は 14.5 kV、スレッシュホールドは 21 mV である。

また、いくつかの HV での各ケーブル長の条件ごとの時間分解能を図 6.18 に示す。先述の両サイドでケーブルを延長した時が時間分解能が最も良くなるという結果は、どの HV においても変わらなかった。X Bottom のみケーブルを延長した時でも時間分解能は 100 ps 以下を達成しているが、図 6.17(c)(d) のように裾の部分に多くのイベントがあった。X Top のケーブルも延長することで時間分解能が向上するだけでなく、裾のイベントもほとんどいなくなっているのので、X Top のケーブルを延長することは時間分解能の数値以上に信号の形状を良くする効果があったと考えられる。従って、本研究で行えなかったが、Y 方向もケーブルを延長することで時間分解能が向上する可能性がある。

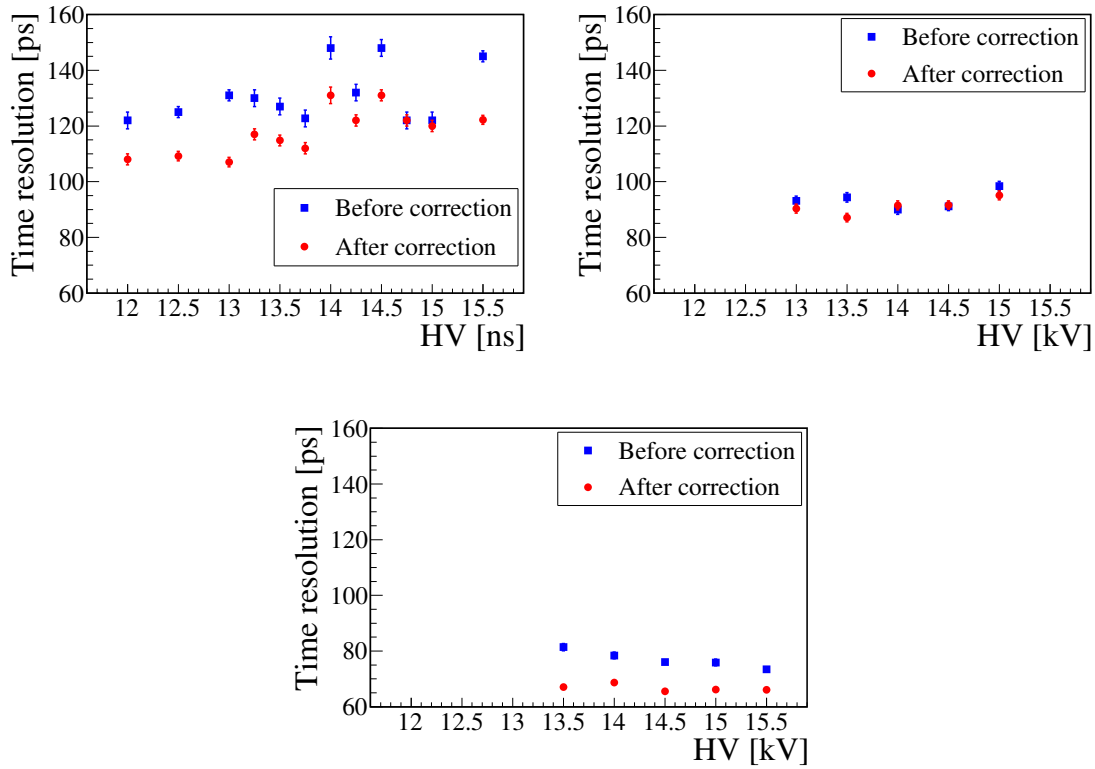


図 6.18: ケーブル長ごとの時間分解能の HV 依存性。青が補正前の時間分解能、赤が補正後の時間分解能。(上左) 両サイドケーブル長が 3 m の時間分解能。(上右) X Bottom のみケーブル長を 18 m まで延長した時の時間分解能。(下) 両サイドケーブル長を 15 m に延長した時の時間分解能。

6.4 節、6.5 節では製作したプロトタイプ MRPC の時間分解能について述べてきた。時間分解能はケーブルを長くした X 方向では  $(66.0 \pm 1.0)$  ps、ケーブル長が 3 m と短いままだった Y 方向で  $(79.8 \pm 1.2)$  ps と X、Y 両方向で目標性能である 100 ps を大きく上回る性能を得ることができた。また、時間分解能の HV 依存性も評価し、X、Y 両方向で広い範囲の HV で時間分解能 100 ps 未満を達成した。時間分解能という点ではこの MRPC は広い HV の範囲でオペレーションすることが可能である。X 方向で各ケーブル長条件での時間分解能の依存性も評価し、ケーブルを長くすることで時間分解能が向上することがわかった。本試験では Y 方向ではケーブル長を 3 m に固定していた

が、Y 方向もケーブルを延長することで時間分解能がさらによくなる可能性がある。ケーブル長によらずとの高い時間分解能を達成するために、今後、より狭い信号を受け付けられる TDC の開発、または TDC が受け付けられるような信号処理を行うことが可能なアンプの開発を行う。

## 6.6 ヒットストリップ数

2.7 節で述べたようにストリップピッチが 5 mm で、ストリップ 1 本に信号が誘起された時の位置分解能の期待値は  $5/\sqrt{12} = 1.4$  mm である。また、複数本のストリップに信号が誘起された場合は信号の電荷情報を組み合わせることによってさらに位置情報の精度を向上させることができる。したがって 5 mm ピッチの MRPC で要求される位置分解能 1 mm を達成するには、一度のイベントで、複数本のストリップに信号が誘起されているかどうかが性能の達成のために不可欠である。

また、全イベントに対してヒットストリップ数ごとのイベントが占める割合の HV 依存性を図 6.19、図 6.20 に示す。これは位置分解能評価用セットアップで取得した。スレッシュホールドは X、Y 方向それぞれ 21 mV と -35 mV である。X 方向は X Top、X Bottom どちらもアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長は 15 m である。Y 方向は Y Left、Y Right どちらもケーブル長は 3 m である。青がヒットストリップ数が 1 のイベントが占める割合、オレンジがヒットストリップ数が 2 のイベントが占める割合、緑がヒットストリップ数が 3 以上のイベントが占める割合である。X 方向では、ヒットストリップ数が 1 のイベントが占める割合がどの電圧でも低く、電圧を増加するほど割合は減少していく。ヒットストリップ数が 2 のイベントが占める割合は、どの電圧でも 50 % 程度あり、電圧が増加するほど減少する。ヒットストリップ数が 3 以上のイベントが占める割合は、電圧が 13.5 kV だと約 10～20 % だが、電圧を上げるほど増加し、15.5 kV では約 40～50 % まで増加する。一方、Y 方向はヒットストリップ数が 1 のイベントが 13.5 kV では 50 % 程度占めており、電圧を上げると減少する。ヒットストリップ数が 2 のイベントが占める割合は 50 % 程度であり、X 方向とは違い電圧を増加すると増加する。ヒットストリップ数が 3 以上のイベントが占める割合は全体を通して低く、15.5 kV でも 10 % を上回る程度である。

X Top (390 mm) と X Bottom (140 mm) を比べると、X Top の方がヒットストリップ数が 3 以上のイベントが占める割合が大きく、ヒットストリップ数 1 のイベントが占める割合が小さい。これは X Bottom のストリップの伝播距離が X Top よりも短く、ストリップの伝播によって TOT が広がらずに取りこぼしているストリップがあるためと考えられる。また、ストリップの伝播距離に近い X Top (280 mm) と Y Left (390 mm) でヒットストリップ数が占める割合の傾向が大きく異なっている原因は、ディレイケーブルの有無の違いだと考えられる。Y 方向もディレイケーブルを追加し、信号をなまらせることで現状取りこぼしている TOT の小さい信号も取得することができれば、ヒットストリップ数が複数のイベントが占める割合が大きくなると考えられる。

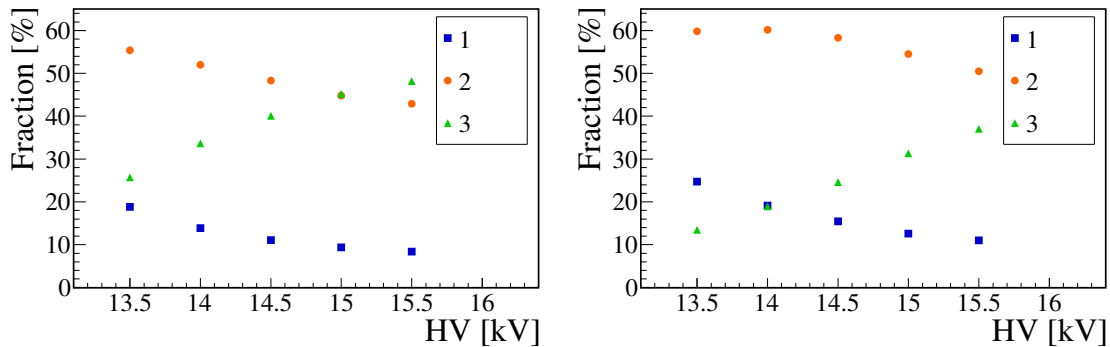


図 6.19: 全イベントに対して X 方向での各ヒットストリップ数のイベントの占める割合。青がヒットストリップ数が 1 のイベントが占める割合、オレンジがヒットストリップ数が 2 のイベントが占める割合、緑がヒットストリップ数が 3 以上のイベントが占める割合である。(左)X Top のヒットストリップ数ごとの占める割合、(右)X Bottom のヒットストリップ数ごとの占める割合。

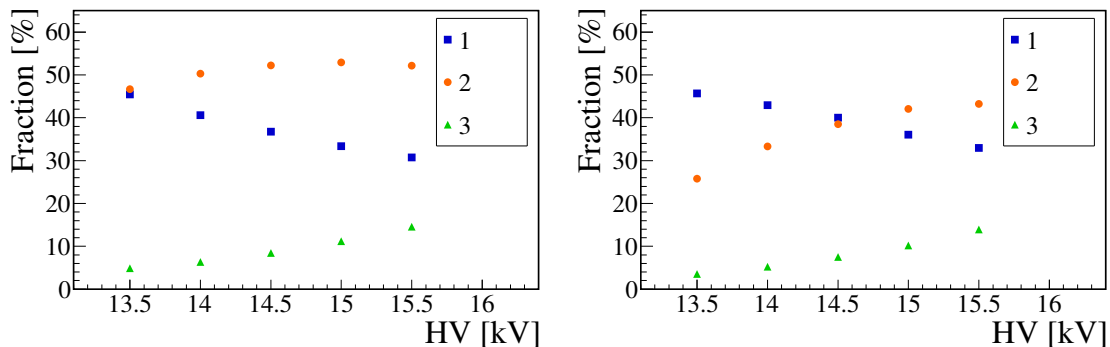


図 6.20: 全イベントに対して Y 方向での各ヒットストリップ数のイベントの占める割合。青がヒットストリップ数が 1 のイベントが占める割合、オレンジがヒットストリップ数が 2 のイベントが占める割合、緑がヒットストリップ数が 3 以上のイベントが占める割合である。(左)Y Left のヒットストリップ数ごとの占める割合、(右)Y Right のヒットストリップ数ごとの占める割合。

## 6.7 位置分解能

### 6.7.1 位置分解能評価方法

MRPC でのヒット位置の決定方法を図 6.21 に示す。ヒットストリップ数が 1 の時は、ヒットのあったストリップの中心位置をヒット位置とする。ヒットストリップ数が複数の時は、アバランシェが発生した位置により近いストリップほど誘起された信号の電荷は大きいので、電荷情報を重みとした加重平均をヒット位置とする。5.3 節でも述べたように、 $\pi 20$  スペクトロメーターでは TDC のみでデータを取得するので、信号の電荷情報の代わりに TOT を用いた。また、本解析では重みとして TOT Integral を用いた。ヒットストリップ数は読み出しのサイドによって異なるため上記の方法で各サイドのヒット位置の決定した後、両サイドのヒット位置の平均の位置を最終的な MRPC で測定した位置とする。片方のサイドにしかヒットがない場合は、そのサイドで求めたヒット位置を最終的なヒット位置とする。決定した MRPC の位置と FT で測定した位置の差 (MRPC-FT) から MRPC と FT を合わせた位置分解能を評価する。FT の位置分解能は 0.2 mm となっているため、MRPC-FT はほぼ MRPC の位置分解能を反映する。



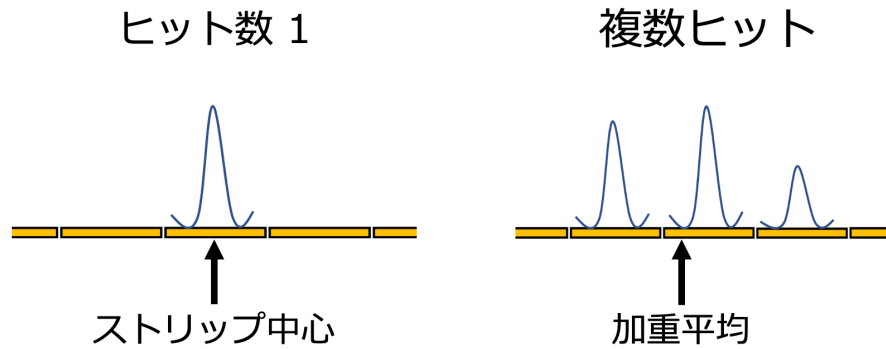


図 6.21: ヒット位置の決定方法、ヒットストリップ数が 1 の時はヒットしたストリップの中心、ヒットストリップ数が複数の時は信号の電荷情報を重みとした加重平均をヒット位置とする。

### 6.7.2 TOT 較正

MRPC の複数ストリップにヒットがあった場合、各ストリップの重みとして TOT を用いる。実際にはアンプの増幅率のばらつき、ディスクリミネーターのベースラインの違い、TDC のオフセットなどの個性により僅かではあるがストリップごとの TOT 分布に個体差が生じている。そのため各ストリップで TOT の較正が必要である。図 6.22(左上)(右上) に TOT 較正前の X Top と X Bottom の TOT が最も大きいストリップを示す。この時は HV は 14.5 kV、スレッシュホールドは 21 mV である。図 6.2 に示したヒットマップと見比べると、X Bottom 8 の TOT が最も大きいイベントが少なくなっており、X Bottom 8 の TOT が他のストリップよりも狭く出力されていることがわかる。

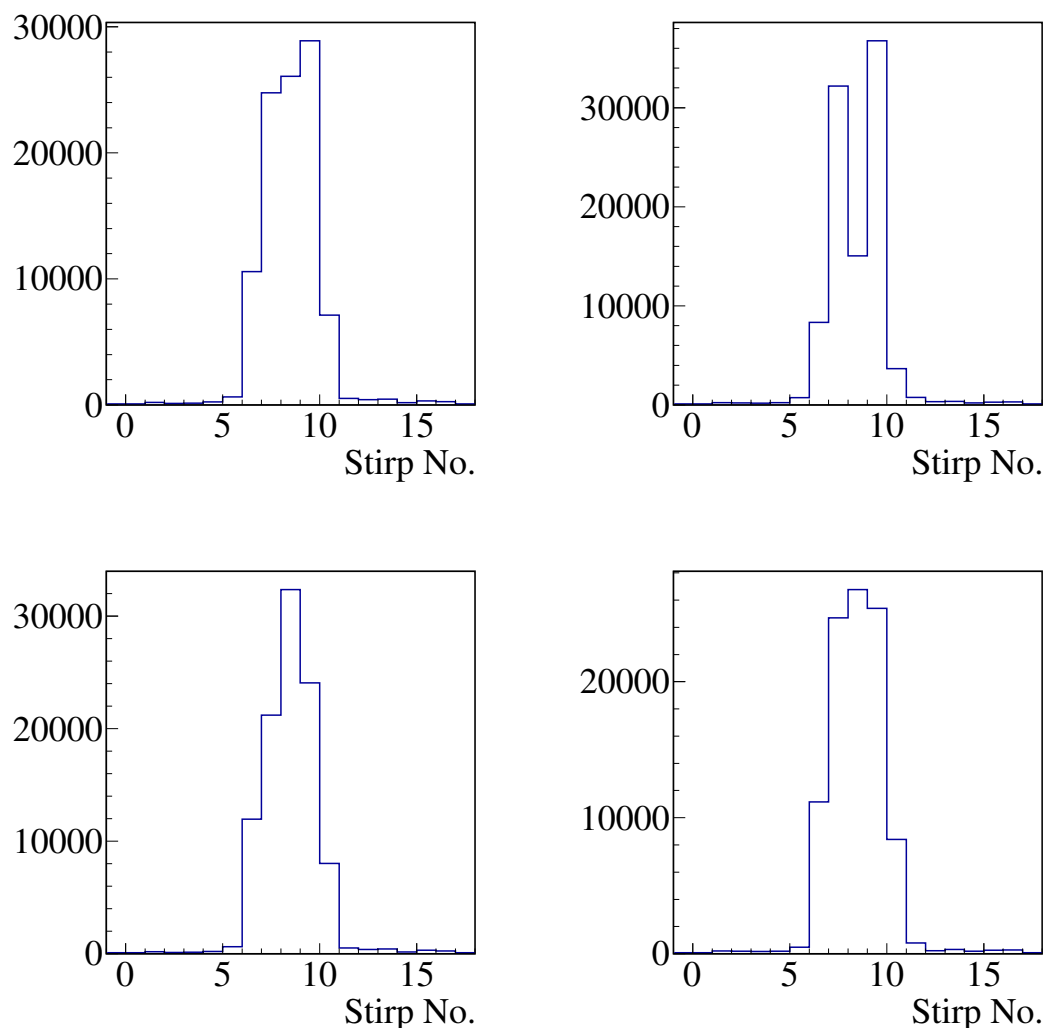


図 6.22: X 方向のストリップの中で最も TOT が大きいストリップ、(左上)TOT 較正前の X Top の最も TOT が大きいストリップ、(右上)TOT 較正前の X Bottom の TOT が最も大きいストリップ、(左下)TOT 較正後の X Top の最も TOT が大きいストリップ、(右下)TOT 較正後の X Bottom の最も TOT が大きいストリップ

TOT の分布で最もイベントの多いピーク位置が各ストリップで揃うように較正を行う。図 6.23 のように TOT 分布の中でも最もイベント数が多いピークの部分だけガウシアンフィッティングを行う。これを最もヒットの多いストリップ 8 の周りの合計 7 ストリップ分、つまりストリップ 4、5、6、7、8、9、10、11 で行った。それ以外のストリップはイベント数が少なくフィッティングが困難であったため、行わなかった。得られた 7 ストリップのガウシアン mean が等しくなるように、mean が最も大きかったストリップを基準として他のストリップに定数をかけた。この較正を行った後の X 方向の TOT が最も大きいストリップを図 6.22(左下)(右下) に示す。図 6.2 に示したヒットマップとも似た分布をしており、正しく TOT 較正が行えたと考えられる。Y 方向でも同じように TOT 較正を行った。

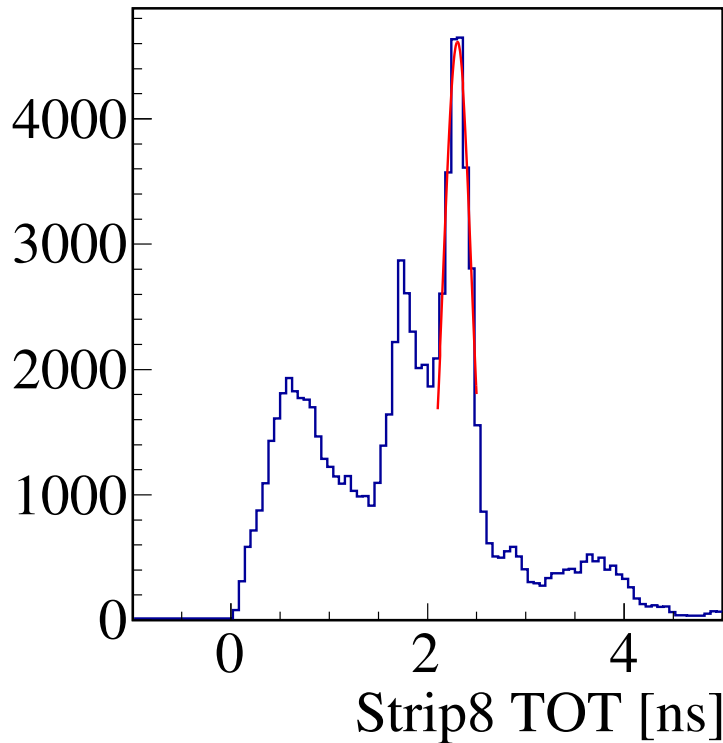


図 6.23: X Top 8 の TOT 分布にガウスフィッティングした様子。他のストリップも同様にガウスフィッティングを行い、得られたガウシアン of mean の値が他のストリップと等しくなるようにそれぞれのストリップの TOT に定数をかけた。

### 6.7.3 TOT Integral を用いた重みづけ

複数ストリップにヒットがあった場合、TOT Integral の情報を重みとして用いた加重平均でヒット位置を決定する。そのため位置分解能を向上するためには正しい重み付けでヒット位置を決定することが重要となる。本解析では、重みとして TOT Integral そのものと  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  の 2 種類の方法を試して、最適な重みづけの方法を決定した。図 6.24、図 6.25 に X、Y 方向それぞれの位置分解能と重み付けの手法との関係性を示す。青がヒットストリップ数が 2 で  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  で重み付けした時の位置分解能、オレンジがヒットストリップ数が 3 以上で  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  で重み付けした時の位置分解能である。また、緑はヒットストリップ数が 2 で TOT Integral を重み付けした時の位置分解能、紫はヒットストリップ数が 3 以上 TOT Integral を重み付けした時の位置分解能である。

X、Y の両方において位置分解能は  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  で最もよかった。それぞれで分解能が最もよくなる定数は異なっていたが、同じサイドであればヒットストリップ数が 2 でも 3 以上でも位置分解能が最もよくなる定数は同じであった。また、ヒットストリップ数が 2 の時は重みが  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  と TOT Integral とで位置分解能にほぼ違いは見られなかったが、ヒットストリップ数が 3 以上の時は X Bottom と Y 方向では、重み付けを  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  にした方が重みが TOT Integral に比べて大幅に位置分解能が向上した。これらのことから重みは TOT Integral そのものよりも  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$  にした方が良いと考えられる。また、それぞれのサイドごとに位置分解能が最もよくなる定数が異なる理由はストリップの伝播距離と関係があると考えられる。今回は測定位置を固定して試験を行ったため比較することはできないが、今後は測定位置を移動させ、何点かで取ることでストリップの伝播距離と最適な重みづけの手法との関係性を

明らかにしていく。これ以降の解析結果では複数ストリップにヒットした際のヒット位置決定の重み付けの手法は X Top は  $\exp(3 \times \text{TOT Integral})$ 、X Bottom は  $\exp(1.5 \times \text{TOT Integral})$ 、Y Left は  $\exp(1.5 \times \text{TOT Integral})$  Y Right は  $\exp(2 \times \text{TOT Integral})$  で行った。

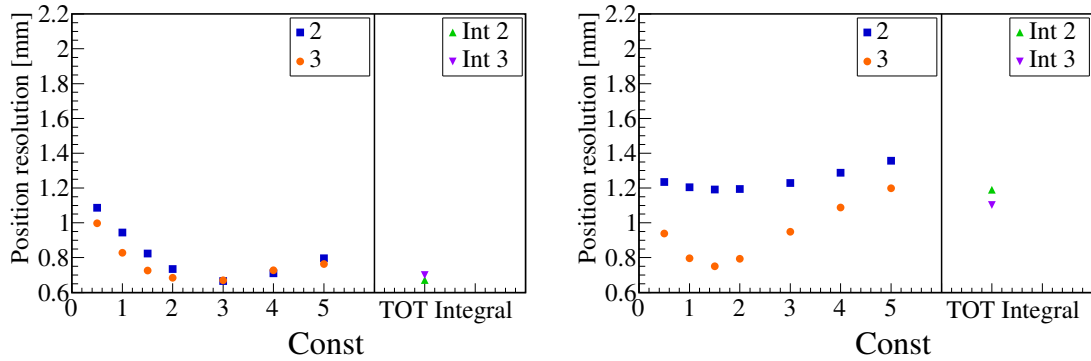


図 6.24: X 方向の位置分解能と重み付けの手法との関係性、青がヒットストリップ数が 2 で重みづけが  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$ 、オレンジがヒットストリップ数が 3 以上で重みづけが  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$ 、緑がヒットストリップ数が 2 で重みづけが  $\text{TOT Integral}$ 、紫がヒットストリップ数が 3 以上で重みづけが  $\text{TOT Integral}$ 。(左)X Top の位置分解能と重み付けとの手法の関係性、(右)X Bottom の位置分解能と重み付けの手法との関係性

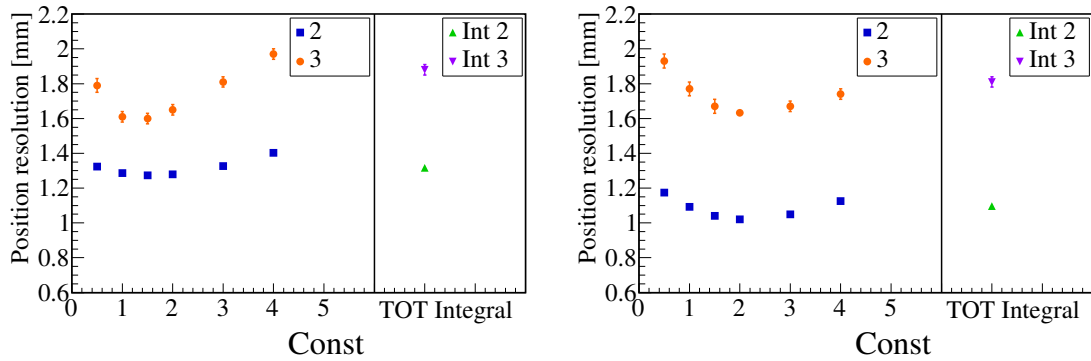


図 6.25: Y 方向の位置分解能と重み付けの手法との関係性、青がヒットストリップ数が 2 で重みづけが  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$ 、オレンジがヒットストリップ数が 3 以上で重みづけが  $\exp(\text{定数} \times \text{TOT Integral})$ 、緑がヒットストリップ数が 2 で重みづけが  $\text{TOT Integral}$ 、紫がヒットストリップ数が 3 以上で重みづけが  $\text{TOT Integral}$ 。(左)Y Left の位置分解能と重み付けとの手法の関係性、(右)Y Right の位置分解能と重み付けの手法との関係性

#### 6.7.4 ヒットストリップ数ごとの位置分解能

X 方向の HV が 14.5 kV、スレッシュホールドが 21 mV の時のヒットストリップ数 1,2,3 以上の時の各サイドの MRPC-FT を図 6.26 に示す。また、各条件の位置分解能を表 6.3 示す。X Top、X Bottom のアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長は 15 m、Y Left、Y Right のケーブル長は 3 m である。ヒットストリップ数が 1 の時はどちらも位置分解能が約 1 mm と、1 ストリップにのみヒットした時の位置分解能の期待値 1.4 mm よりかなり良いとなった。位置分解能が期待値より良くなった、粒子の通った位置がストリップ間の場合は複数本のストリップに信号が誘起されるので、実際に 1 ストリップのみにイベントがある範囲はストリップピッチの 5 mm よりも小さいためだと考えられる。実際に求められた位置分解能から 1 ストリップのみに信号が誘起される範囲は  $1 \times \sqrt{12} = 3.5$  mm 程度であると予想される。ヒットストリップ数が 2 の時の X Top、ヒットストリップ数が 3 以上の

両サイドでは位置分解能はヒットストリップ数が 1 の時の分解能である 1 mm よりかなり良い結果となった。複数のストリップにヒットがあることで詳細に位置の情報を含むため、複数ストリップにヒットがある方が位置分解能が良いという予想と一致した。しかし、ヒットストリップ数が 2 の時の X Bottom では位置分解能が  $(1.190 \pm 0.004)$  mm と 1 mm よりも悪かった。これは X Bottom がストリップの伝播距離が短く、TOT が小さいストリップのデータが欠落したことで本来ヒットストリップ数が 3 以上だったイベントのヒットストリップ数が 2 となり、位置分解能が悪化したと考えられる。ヒットストリップ数が 3 以上では、他のヒットストリップ数と比べて裾の部分にイベントが多くある。これらは実際の位置分解能とは関係ない要因で存在すると考えており、また裾の部分は全体のイベント数に対して割合が非常に小さいため、今回は裾を含まずに位置分解能を評価した。この裾の部分は原因を究明し解決する予定である。

| ヒットストリップ数 | X Top (390 mm)         | X Bottom (140 mm)      |
|-----------|------------------------|------------------------|
| 1         | $(1.031 \pm 0.009)$ mm | $(1.007 \pm 0.009)$ mm |
| 2         | $(0.666 \pm 0.003)$ mm | $(1.190 \pm 0.004)$ mm |
| 3 以上      | $(0.678 \pm 0.004)$ mm | $(0.751 \pm 0.006)$ mm |

表 6.3: X 方向のヒットストリップ数ごとの位置分解能、HV が 14.5 kV、スレッシュホールドが 21 mV、X Top、X Bottom とともにケーブル長は 15 m。ストリップの伝播距離は X Top が 390 mm、X Bottom が 140 mm。

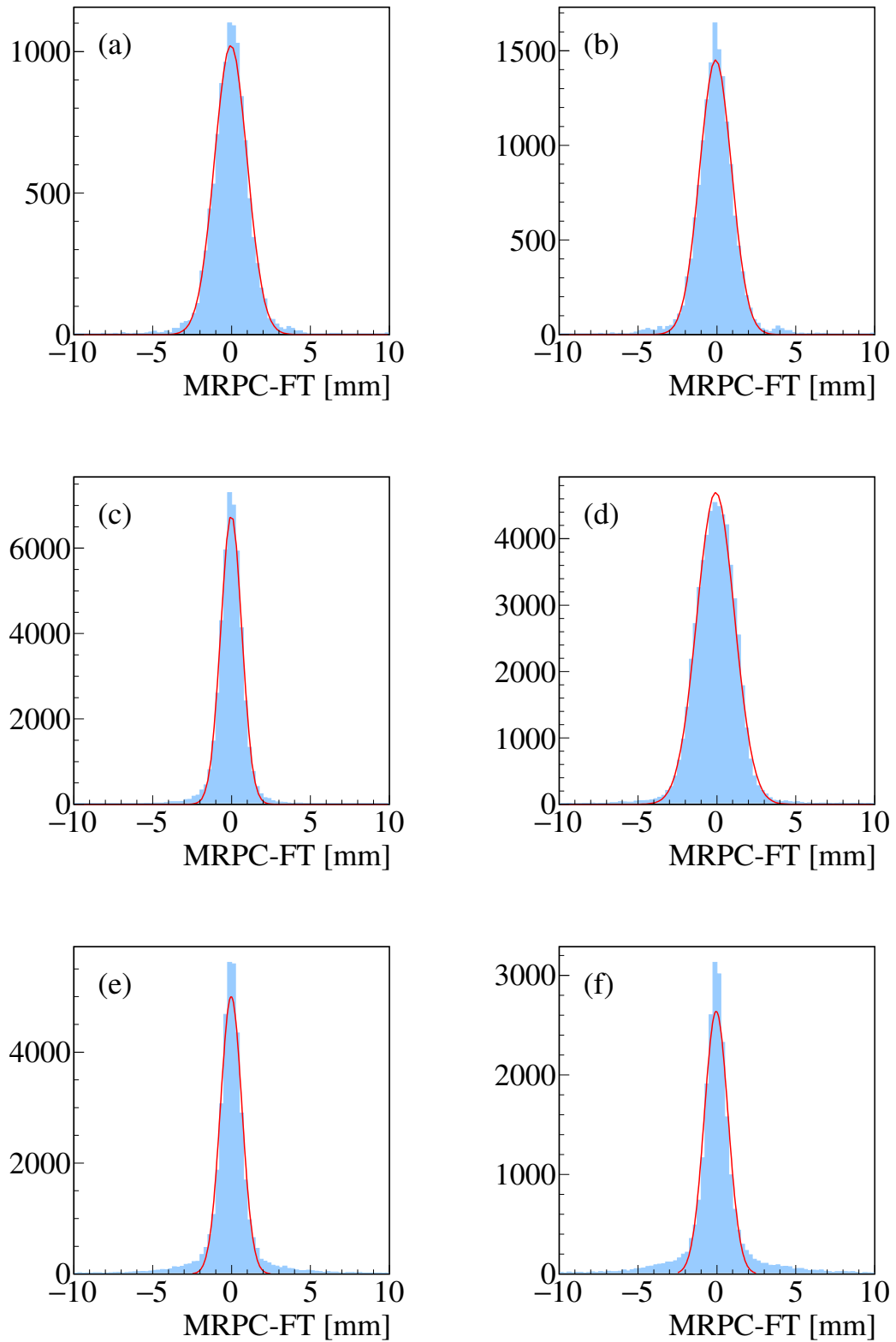


図 6.26: 各サイドのヒットストリップ数ごとの MRPC-FT。(a)X Top のヒットストリップ数 1 の MRPC-FT、(b)X Bottom のヒットストリップ数 1 の MRPC-FT、(c)X Top のヒットストリップ数 2 の MRPC-FT、(d)X Bottom のヒットストリップ数 2 の MRPC-FT、(e)X Top のヒットストリップ数 3 以上の MRPC-FT、(f)X Bottom のヒットストリップ数 3 以上の MRPC-FT



### 6.7.5 サイドごとの位置分解能

ヒットストリップ数で区別せずに、サイドごとの MRPC-FT を図 6.27、図 6.28 に示す。HV は 14.5 kV、スレッシュホールドは X 方向が 21 mV、Y 方向が -35 mV である。X Top、X Bottom のアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長は 15 m、Y Left、Y Right のケーブル長は 3 m である。X 方向の各サイドの位置分解能は X Top (390 mm) が  $(0.712 \pm 0.003)$  mm、X Bottom (140 mm) が  $(1.107 \pm 0.003)$  mm であった。X Top では目標の位置分解能である 1 mm を達成することができた。X Bottom は X Top よりも分解能が悪いが 6.7.4 節でも述べたように X Bottom がストリップの伝播距離が短く、TOT の小さいストリップのイベントが欠落している可能性があるのもそれによって X Top よりも分解能が悪いと考えられる。

また Y 方向の各サイドの位置分解能は Y Left (280 mm) が  $(1.358 \pm 0.004)$  mm、Y Right (740 mm) が  $(1.257 \pm 0.004)$  mm であった。Y 方向はディレイケーブルを追加しておらず、ディレイケーブルを追加した X 方向の位置分解能が良いことと検出効率や時間分解能がケーブル長を長くすることで性能が向上したことを鑑みると、Y 方向もケーブルを延長することで位置分解能が向上する可能性が考えられる。

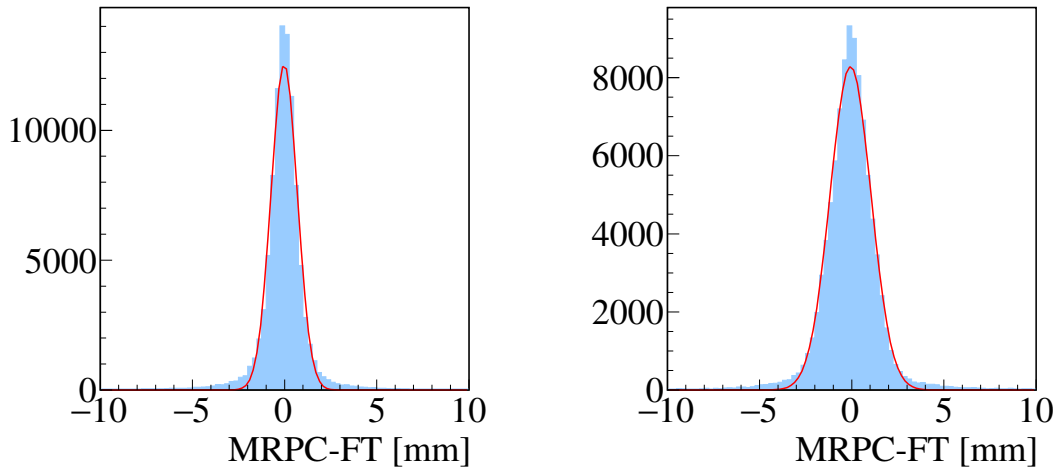


図 6.27: X 方向各サイドの MRPC-FT、(左)X Top の MRPC-FT、(右)X Bottom の MRPC-FT

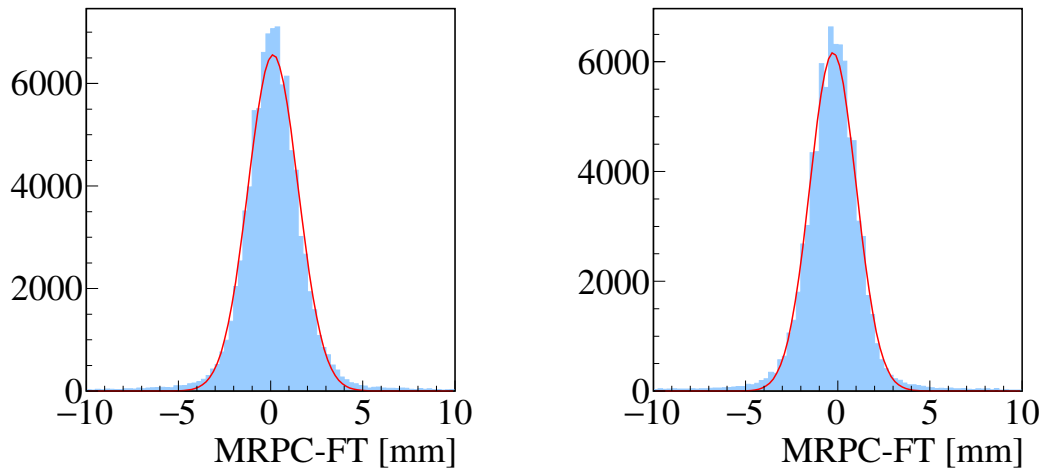


図 6.28: Y 方向各サイドの位置分解能、(左)Y Left の MRPC-FT、(右)Y Right の MRPC-FT

### 6.7.6 全体の位置分解能

6.7.1 節でも述べたように、MRPC の位置は各サイドで求めた位置の平均とする。図 6.29 に HV が 14.5 kV で X のスレッシュホールドが 21 mV、Y のスレッシュホールドが -35 mV の時の X、Y 方向それぞれの MRPC-FT を示す。X Top、X Bottom のアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長は 15 m、Y Left、Y Right のケーブル長は 3 m である。位置分解能は X 方向で  $(0.793 \pm 0.003)$  mm、Y 方向で  $(1.170 \pm 0.003)$  mm であった。X 方向では要求される位置分解能 1 mm を達成することができた。Y 方向では達成することはできなかったが、1 ストリップのみにヒットした時の分解能の期待値 1.4 mm よりも良い分解能を達成することができた。X 方向では X Top と X Bottom の平均を取ることで X Top の位置分解能よりも悪くなった。一方、Y 方向では Y Left と Y Right で平均を取ることで片側の分解能よりも良くなった。今回は測定位置を一点でしか取っていないため MRPC で位置を決定する際に、平均を取る方がいいのか、分解能を良い方を採用した方がいいのかわからない。今後の試験で、測定位置を動かして何点かで測定することでどちらの手法が良いのか明らかにする予定である。Y 方向で分解能が悪かった原因はストリップの伝播距離が X 方向に比べて長いこと、もしくはアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長が短いということが挙げられる。今後はこれらの要因が位置分解能にどれだけ作用するかを調べていく。

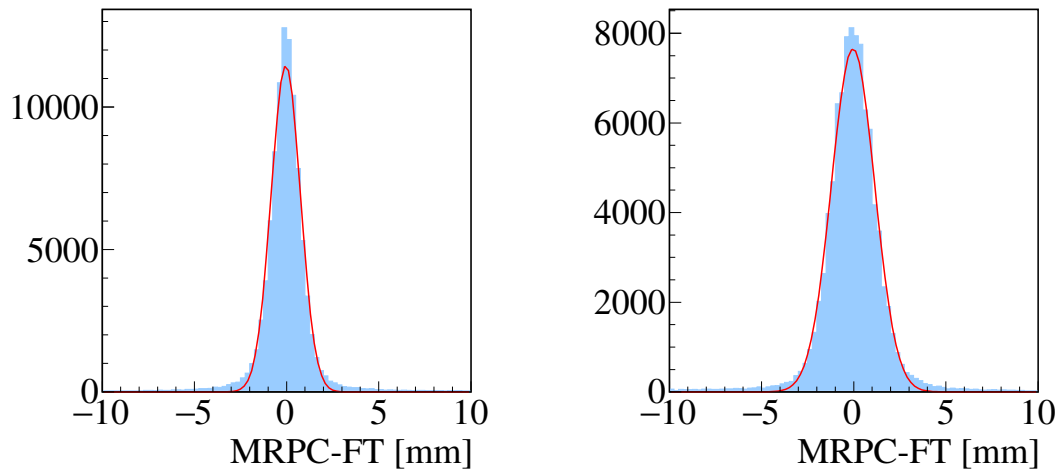


図 6.29: X,Y 方向それぞれの MRPC-FT、(左)X 方向の MRPC-FT、(右)Y 方向の MRPC-FT

### 6.7.7 HV 依存性

図 6.30 に X 方向の位置分解能の HV 依存性を示す。スレッシュホールドは 21 mV で、X Top、X Bottom のアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長は 15 m である。青がヒットストリップ数 1、オレンジがヒットストリップ数 2、緑がヒットストリップ数 3 以上、紫がヒットストリップ数で区別しない位置分解能である。X Top、X Bottom の両サイドでヒットストリップ数が 1 の時は位置分解能が HV にほぼ依らないことがわかる。また、X Top ではヒットストリップ数が 2 の時にわずかに HV 依存性があり、14~14.5 kV あたりで位置分解能が最も良くなった。また、X 方向の両サイドのヒットストリップ数が 3 以上の分解能も HV 依存性があり、14~14.5 kV あたりで位置分解能が最も良くなった。ヒットストリップ数によらず、位置分解能が最も良くなる電圧は等しいと考えられる。またヒットストリップ数に依らない全体の分解能も HV 依存性はある。しかし、両サイドにおいて分解能の絶対値が違うものの分解能の範囲は 0.1 mm 程度であり、HV による位置分解能への影響は小さいと考えられる。

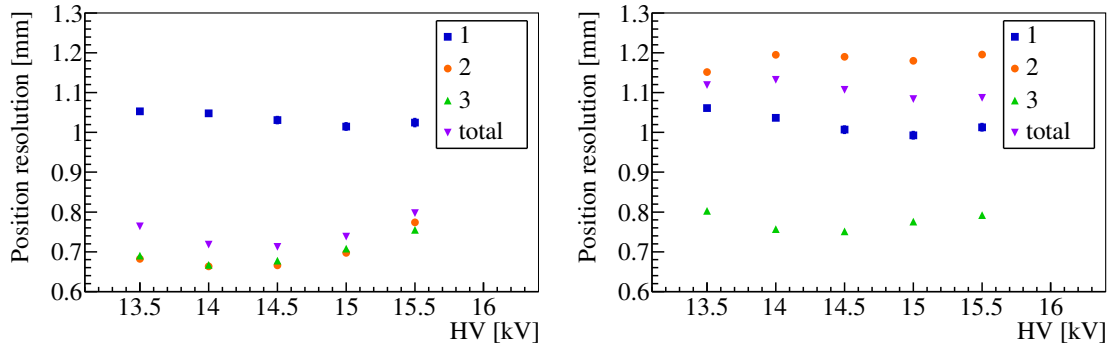


図 6.30: X 方向のサイドごとの位置分解能の HV 依存性、青がヒットストリップ数 1、オレンジがヒットストリップ数 2、緑がヒットストリップ数 3 以上、紫がヒットストリップ数で区別しない全イベントの位置分解能。(左)X Top の位置分解能の HV 依存性、(右)X Bottom の位置分解能の HV 依存性

図 6.31 に Y 方向の位置分解能の HV 依存性を示す。スレッシュホールドは  $-35$  mV であり、Y Left、Y Right のアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長は 3 m である。X 方向の図と同様で、青がヒットストリップ数 1、オレンジがヒットストリップ数 2、緑がヒットストリップ数 3 以上、紫がヒットストリップ数で区別しない位置分解能である。ヒットストリップ数が 1 の分解能は X 方向と比べ、HV に依存性を持っており、HV を減少するほど分解能が悪化する。これは HV が下がることによって、TOT が小さいストリップのデータが欠落したことで 1 ストリップにしかヒットがなく、分解能が悪化したと考えられる。またヒットストリップ数が複数のイベントの分解能の HV 依存性を見ると、分解能が最も良くなるのは 15~15.5 kV であった。6.6 節で述べたように Y 方向は X 方向に比べ、ヒットストリップ数が少ないイベントが占める割合が大きかった。6.7.4 節で述べたように、位置分解能はヒットストリップ数が 1 の時よりも複数の時の方が良かった。複数のストリップにヒットしていた場合、データが欠落したストリップがあっても影響が小さくなった可能性が考えられる。そのため Y 方向は X 方向に比べヒットストリップ数のイベントが多くなる高い HV の方で分解能が最も良くなったと考えられる。

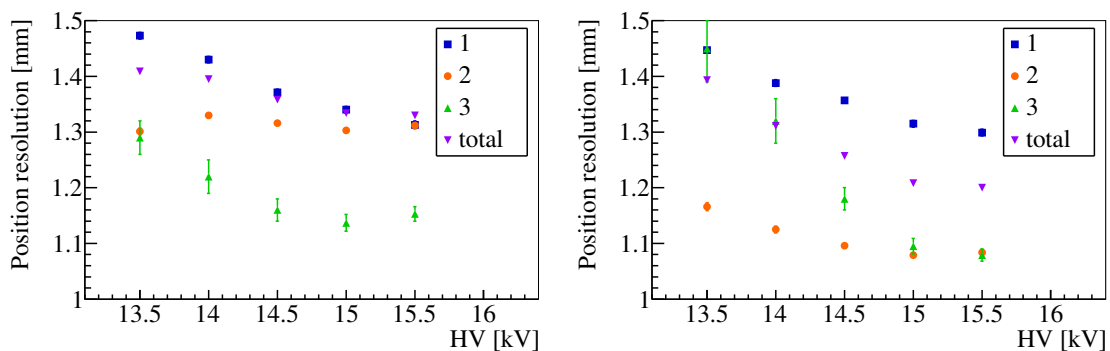


図 6.31: Y 方向のサイドごとの位置分解能の HV 依存性、青がヒットストリップ数 1、オレンジがヒットストリップ数 2、緑がヒットストリップ数 3 以上、紫がヒットストリップ数で区別しない全イベントの位置分解能。(左)Y Left の位置分解能の HV 依存性、(右)Y Right の位置分解能の HV 依存性

図 6.32 には X、Y 方向それぞれの全体の位置分解能の HV 依存性を示す。X 方向では、13.5~15.5 kV の範囲で要求される位置分解能 1 mm を大きく上回る位置分解能が得られた。また、Y 方向でも 1 mm より良い位置分解能を達成することはできなかったが、位置分解能の期待値 1.4 mm を

上回ることができた。今後は Y 方向でも目標分解能 1 mm を達成できるようにストリップの伝播距離とケーブル長と分解能の関係を調査していく。

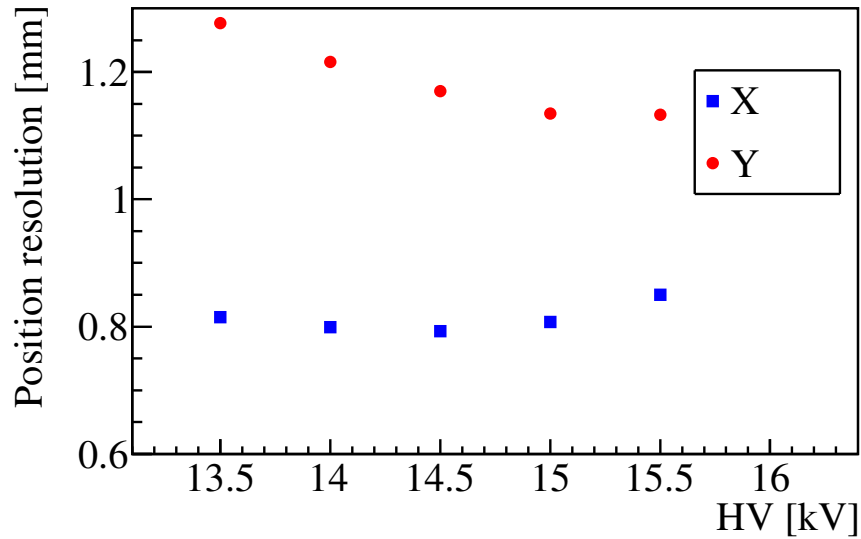


図 6.32: X、Y 方向の位置分解能の HV 依存性、青が X 方向の位置分解能の HV 依存性、赤が Y 方向の位置分解能の電圧依存性。

6.7 節ではプロトタイプ MRPC の位置分解能について述べてきた。位置分解能は最適な条件で、X 方向では  $(0.793 \pm 0.003)$  mm であり、X 方向では要求性能 1 mm を余裕を持って達成する値が得られた。また、Y 方向では  $(1.133 \pm 0.003)$  mm であり、要求性能を達成できなかったものの 1 ストリップのみにヒットした時の分解能の期待値 1.4 mm を上回った。またこれらは FT で求めた飛跡の位置分解能も含めた値であるので、飛跡の位置分解能が 0.2 mmであることを考慮すると MRPC の位置分解能は、X 方向が  $(0.767 \pm 0.003)$  mm、Y 方向が  $(1.115 \pm 0.003)$  mm である。位置分解能の HV 依存性も評価し、一般的な MRPC に印加する範囲で HV を変化させても一分解能には大きく影響しないことがわかった。X 方向と Y 方向の違いは主にストリップの伝播距離とアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長であり、今後の試験でこれらの違いによる位置分解能の差をより詳細に調査し、Y 方向でも要求性能を達成できるよう取り組む。また、ヒットストリップ数が 3 以上の時では、裾の部分にイベントが多く、実際の位置分解能はガウスフィッティングで得られた  $\sigma$  よりも悪いと考えられる。この裾の部分にイベントが多い原因はまだ判明しておらず、今後の研究で究明し、解決する予定である。

## 第7章 結論と今後の展望

### 7.1 結論

本研究では、J-PARC のハドロン実験施設に建設予定の  $\pi 20$  ビームラインで予定されている排他的ドレラン反応の反応断面積測定に用いられるミュオン検出器である TOF-tracker MRPC のプロトタイプの開発および性能評価を行った。TOF-tracker MRPC は  $\pi$  中間子や  $K$  中間子が飛行中に崩壊してできるバックグラウンドミュオンを抑制するために時間分解能 100 ps 以下、位置分解能 1 mm 以下と時間分解能と位置分解能を併せ持つ必要がある。

製作したプロトタイプ MRPC のストリップの伝播距離は 500 mm と 1000 mm である。ガスギャップ幅は 260  $\mu\text{m}$  であり、ガスギャップ数が 5 である。読み出しストリップピッチは 5 mm で、上下のストリップの向きを直交させ、粒子の通った位置を二次元的に測定できるようにした。読み出しストリップの幅は 1.15 mm、1.35 mm、1.60 mm、3 mm、4 mm、読み出しストリップの反対側のグラウンドの形状はグラウンドなし、ストリップごとに分割されたグラウンド、ストリップごとに分割せずにまとめてプリントされたグラウンドとさまざまなストリップの形状を用意した。

製作したプロトタイプ MRPC のストリップの形状の中で最もよい条件のものを決めるために、宇宙線がヒットした時に誘起された信号をオシロスコープで確認した。この試験の結果ストリップ幅は 1 mm 程度で、分割せずにまとめてプリントされたグラウンドを持つストリップがストリップ端での反射が少なく、ノイズレベルが低い最も優れたストリップ形状だということが判明した。

宇宙線を用いた試験結果をもとに、1 mm 幅、分割なしのグラウンドの読み出しストリップについて SPring-8 の LEPS2 ビームラインで試験を行った。試験ではプロトタイプ MRPC の検出効率、時間分解能及び位置分解能の HV 依存性やストリップ伝播距離依存性、ケーブル長依存性を確認した。ストリップ伝播距離は、それぞれ X Top が 390 mm、X Bottom が 140 mm、Y Left が 280 mm、Y Right が 740 mm である。試験の結果、X 方向の検出効率はアンプからディスクリミネーターまでのケーブル長が全ストリップで 3 m の時、X Top (390 mm) の検出効率は 95 % 以上であった。一方、X Bottom (140 mm) はストリップの伝播距離が X Top よりも短いにもかかわらず、検出効率は 95 % 以下であった。しかし、X Bottom のケーブルを 18 m まで延長することで、TOT が大きくなり、検出効率が回復した。ケーブル延長後の X Bottom の検出効率は 99 % 以上であった。Y 方向の検出効率は、Y Left (280 mm) では 95 % 以上であった。しかし、Y Right (740 mm) の検出効率はプラトーに達しても 90 % 以下であった。しかし、X Bottom と同じでケーブルを延長することで検出効率は回復すると考えられる。

時間分解能は最適な条件で X 方向で  $(66.0 \pm 1.0)$  ps、Y 方向で  $(79.8 \pm 1.2)$  ps と X、Y 両方向で要求性能 100 ps を余裕を持って達成することができた。X 方向はポジティブな信号であり、ポジティブな信号でも高い時間分解能が得られることが判明した。時間分解能のストリップ伝播距離依存性を調べるために、片側読み出しごとに時間分解能を評価したが、X 方向は伝播距離が短い方がよく、Y 方向は伝播距離が長い方がよいという真逆の結果が得られた。ケーブル長の違いなどのいくつかの可能性は挙げられるものの、断定できる要因がないため、今後の試験で原因を究明し、解決する予定である。また、X 方向のケーブル長を変更することで時間分解能のケーブル長依存性を評価した。解析の結果、X Top、X Bottom 両方ともケーブルを 15 m 程度まで延長した方が時間分解能が最も良かった。本試験では Y 方向でケーブル長を変更しなかったが、Y 方向もケーブル長を長くすることで時間分解能が向上する可能性がある。

本解析を通して、MRPC を用いてヒット位置の測定方法を確立することができた。位置分解能は最適な条件で X 方向では  $(0.793 \pm 0.003)$  mm、Y 方向では  $(1.133 \pm 0.003)$  mm を達成した。X 方向は

要求性能である 1 mm よりも大幅により分解能が得られた。片側読み出しごとの位置分解能はそれぞれ X Top で  $(0.712 \pm 0.003)$  mm、X Bottom で  $(1.087 \pm 0.003)$  mm、Y Left で  $(1.330 \pm 0.004)$  mm、Y Right で  $(1.200 \pm 0.003)$  mm であった。Y 方向は両側で平均を取ることで分解能が向上したが、X 方向は平均を取ることで X Top の最も良かった分解能よりも悪化した。今回は測定位置は一点だけだったため MRPC の位置の決定は片側で行った方がいいのか平均を取った方がいいのかを決めることはできなかった。今後、測定位置を移動させ、何点かで測定することで MRPC での位置決定手法をより確立させる予定である。Y 方向でも X 方向と同程度の位置分解能を達成できるように、Y 方向が X 方向に比べ悪かった原因を究明していく。

本研究の結果、初めて  $500 \times 1000$  mm<sup>2</sup> という大型の TOF-tracker MRPC で十分な検出効率と高い時間分解能および位置分解能を達成することができた。この TOF-tracker MRPC は本来の目的である排他的ドレルヤン反応の断面積測定に用いるミュオン検出器としてだけでなく、一台で精度の良い時間・位置の測定を行うことのできる汎用性の高い検出器としても用いることが可能である。

## 7.2 今後の展望

本研究を通して大面積の TOF-tracker MRPC でポジティブ、ネガティブ両方の信号を用いて、検出効率、時間分解能、位置分解能の評価し、また手法を確立することができた。まずは、この開発したプロトタイプ MRPC を用いて、更なる試験を行う予定である。今回は測定位置を一点でしか行わなかったため、次回の試験では測定位置を動かし、何点か取ることによってそれぞれの性能のストリップ伝播距離依存性をより明らかにする予定である。また、ケーブル長依存性のテストは X 方向でしか行わなかったため、次回は Y 方向でもケーブル長依存性の試験を行う予定である。

また、本試験で TOF-tracker MRPC の覆う領域は  $1.8 \times 2.4$  m<sup>2</sup> であり、これを一台の TOF-tracker MRPC でカバーしたいと考えている。しかし、現在我々が把握している製作可能な PCB の最大サイズは一辺 1.6 m であり、全面積をカバーすることができない。これを解決するために読み出しを PCB ではなく、ドリフトチェンバーのように導線のワイヤーを用いて信号を読み出すという手法を考えている。すでにワイヤーでも信号が誘起されることは確認できているため、今後はワイヤー読み出し部のプロトタイプを開発し、今回製作したプロトタイプ MRPC のアクリルケースと組み合わせて試験を行う予定である。



# 謝辞

本研究、本論文を執筆するにあたって多くの方にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。指導教員である阪口篤志教授には、毎週のミーティングで解析に関する助言を多く頂きました。ありがとうございました。京都大学の富田夏希助教には学部4年からMRPCの製作、テスト実験、解析、発表練習など何から何まで大変お世話になりました。また、国際学会への参加など貴重な機会も多く提供していただきました。本当にありがとうございました。大阪大学核物理研究センターの野海博之教授と白鳥昂太郎助教にはテスト実験や解析の助言でお世話になりました。ありがとうございました。川畑貴裕教授をはじめとする川畑研究室のスタッフの方には、学会の発表練習で助言や指導をいただきました。ありがとうございました。

川畑研究室ハイパーグループの方にもお世話になりました。木村さんと辰巳さんには短い期間でしたが、とても良くしていただきました。戸田さんと徳田さんにはテスト実験に手伝いに来てもらいました。同期の林さんはMRPCの製作など人手の必要な作業を多く手伝ってもらい、また共にテスト実験行った際にもセットアップを手伝ってくれるなど大変お世話になりました。川畑研究室の同期である白井君、杉崎君、田口君、本多君にも親しくしていただき、楽しい大学院生活を送ることができました。みなさん大変ありがとうございました。

最後に、大学から大学院進学まで金銭面、生活面で支えていただいた両親に深く感謝します。

## 参考文献

- [1] J. J. Ethier, N. Sato, and W. Melnitchouk, [Phys. Rev. Lett. 119 132001 \(2017\)](#).
- [2] M. Diehl, [Phys. Rept. 388 \(2003\) 41-277](#).
- [3] M. R. Shojaei and N. S. Nikkhoo, [Nuclear Physics A 943 \(2015\) 137-146](#).
- [4] X. Ji, [Phys. Rev. Lett. 78 \(1997\) 610](#).
- [5] X. Ji, [Phys. Rev. Lett. 55 \(1997\) 7114](#).
- [6] L. Favart, M. Guidal, T. Horn and P. Kroll, [Eur. Phys. J. A 52, 158 \(2016\)](#).
- [7] E. R. Berger, M. Diehl and B. Pire, [Phys. Lett. B 523 \(2001\) 265-272](#).
- [8] Takahiro Sawada, Wen-Chen Chang, Shunzo Kumano *et al.*, [Phys. Rev. D 93 \(2016\) 114034](#).
- [9] J-PARC, <https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/hadron.html>
- [10] Y. morino, T. Nakano, H. Noumi *et al.*, [J-PARC P50 Proposal \(2012\)](#).
- [11] T. Ishikawa, H. Ohnishi, J. K. Ahn *et al.*, [J-PARC P79 Proposal \(2020\)](#).
- [12] T. Ishikawa, H. Ohnishi, K. Aoki *et al.*, [J-PARC P95 Proposal \(2022\)](#).
- [13] E. Cerron Zeballos, I. Crotty, D. Hatzifotiadou, *et al.*, [Nucl. Instr. and Meth. A 374 \(1996\) 132](#).
- [14] Lippmann and Christan, [CERN-THESIS-2003-035 p58-p.60](#)
- [15] M. Yamaga, A. Abashian, K. Abe *et al.*, [Nucl. Instr. and Meth. A 456 \(2000\) 109-112](#).
- [16] F. Anulli, R. Baldini, H. Band *et al.*, [Nucl. Instr. and Meth. A 515 \(2003\) 322-327](#).
- [17] R. Cardarelli, A. DiCiaccio and R. Santonico, [Nucl. Instr. and Meth. A 333 \(1993\) 399-403](#).
- [18] I. Crotty, J. Lamas Valverde, G. Laurenti *et al.*, [Nucl. Instr. and Meth. A 337\(1994\)370-381](#)
- [19] V. Ammosov, M. Ciobanu, F. Dohrmann *et al.*, [Nucl. Instr. and Meth. A 576 \(2007\) 331-336](#)
- [20] W. Riegler, C. Lippmann, R. Veenhof, [Nucl. Instr. and Meth. A 500 \(2003\) 144-162](#)
- [21] A. Blanco, P. Fonte, L. Lopes *et al.*, [JINST 7 P11012 \(2012\)](#).
- [22] P. Assis, A. Bernardino, A. Blanco *et al.*, [JINST 11 C10002 \(2016\)](#).
- [23] 株式会社サンライン クインスター, <https://fishing.sunline.co.jp/line/197/>
- [24] 富田 夏希, 2011 年度京都大学大学院理学研究科修士論文, <https://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/articles-wp/>
- [25] N. Tomida, F. Hayashi, W. C. Chang *et al.*, [Nucl. Instr. and Meth. A 1056 \(2023\) 168581](#)

- [26] 松定プレシジョン株式会社 HV シリーズ, <https://www.matsusada.co.jp/product/power-supplies/high-voltage-modules/hv/>
- [27] アクリサンデー株式会社 アクリサンデー接着剤, <https://www.acrysunday.co.jp/product/tools/supplies/305/>
- [28] SPring-8, <https://new.spring8.or.jp/index.php>
- [29] SPring-8 セベラルバンチ運転モード対応表, [http://www.spring8.or.jp/ja/users/operation\\_status/schedule/bunch\\_mode](http://www.spring8.or.jp/ja/users/operation_status/schedule/bunch_mode)
- [30] 木村 祐太, 2021 年度大阪大学大学院理学研究科修士論文, <http://nucl.phys.sci.osaka-u.ac.jp/public.html>
- [31] Hadron Universal Logic Module, <https://openit.kek.jp/project/HUL>
- [32] 汎用 MPPC 読み出しモジュール, <https://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public>
- [33] R. X. Yang, C. Li, Y. J. Sun *et al.*, *JINST* 12 C01012 (2017).
- [34] R. Uda, F. Hayashi, N. Tomida *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. A* 1056 (2023) 168580