

卒業論文
リングイメージ型検出器 (RICH)
の性能評価

戸田 匡哉 徳田 恵

2021 年 5 月 27 日

概要

我々は J-PARC ハドロン実験施設の高運動量ビームラインにおいてチャームバリオン分光実験 (J-PARC-E50) を計画している。実験では運動量 $20 \text{ GeV}/c$ のビーム粒子と標的との反応で生成する $2\sim 16 \text{ GeV}/c$ の高運動量散乱粒子の識別を行う必要がある。この広い運動量領域において粒子識別を行うためにリングイメージチェレンコフ検出器を開発している。

粒子識別性能に関わる角度分解能のうち、収差等の内訳を調べるため、テスト機を用いて SPring-8 の LEPS ビームラインにおいてテスト実験を行った。光センサーとして MPPC アレイを使用し、同時に MPPC の暗電流による角度分解能への影響や電圧依存性を調査した。MPPC アレイは 8×8 の 64 セグメントで、各セグメントの大きさが $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ のものを用いた。実験では空気を輻射体とし、 $0.95 \text{ GeV}/c$ の電子・陽電子からのチェレンコフ光を球面鏡によって MPPC アレイ上に結像させた。また、MPPC の動作電圧を 0.5V ずつ $54.0\text{V}\sim 57.5\text{V}$ の間で変化させ、取得した TDC データからリングイメージを測定した。

得られたリングイメージからリング中心を決定しイベント毎にチェレンコフ角を計算、角度分解能の hit 数依存性から角度分解能をセグメントサイズによる位置分解能 $\Delta\theta_{seg}$ と、収差などによる分解能 $\Delta\theta_{other}$ に分けた。セグメントサイズによる位置分解能は用いた MPPC の 1 セグメントの大きさと球面鏡の焦点距離から計算によって求められ、 $\Delta\theta_{seg} = 2.80 \text{ mrad}$ となる。収差などによる分解能は、角度分解能の hit 数依存性のグラフからフィッティングから見積もり、 $\Delta\theta_{other} = 3.88 \pm 0.02 \text{ mrad}$ となった。ここから焦点面と検出面の位置のずれや、入射粒子の角度分解能、色収差などに細分し、残ったものを暗電流の影響とした。

また各動作電圧でのイベントごとの hit 数から、hit 数の電圧依存性とシミュレーションによる再現を行った。

目次

第 1 章	序論	2
1.1	チャームバリオン分光実験 (E50 実験)	2
1.2	測定原理	3
1.3	研究目的	4
1.3.1	先行研究による RICH 検出器実機の構成と要求性能	4
1.3.2	Multi Pixel Photon Counter	4
第 2 章	実験のセットアップ	5
第 3 章	解析	6
3.1	TDC	6
3.2	hit 数	7
3.3	hit pattern の確認	8
3.4	リングイメージの中心	8
3.4.1	リング中心の決定 1	8
3.4.2	リング中心の決定 2	10
3.5	リング半径	10
3.6	チェレンコフ角・角度分解能	10
第 4 章	結果	12
4.1	hit 数	12
4.2	リング半径・チェレンコフ角	12
4.2.1	リング半径・チェレンコフ角の絶対値のズレ	12
4.2.2	リング半径・チェレンコフ角の電圧依存性	15
4.3	角度分解能	15
4.3.1	1 p.e. あたりの分解能	15
4.3.2	角度分解能の内訳	17
4.3.3	収差などによる角度分解能	17
4.3.4	暗電流の角度分解能への寄与	17
第 5 章	まとめ	18

第 1 章

序論

1.1 チャームバリオン分光実験 (E50 実験)

現在、J-PARC ではダイクォーク相関の解明を目的としたチャームバリオン分光実験、E50 実験が計画されている。この実験ではビーム運動量 20 GeV/c の π^- を液体水素標的に当て、次のチャームバリオン Y_c^{*-} 生成反応を起こす。

$$\pi^- + p \rightarrow Y_c^{*-} + D^{*-} \quad (1.1)$$

この時に生じる D^{*-} の崩壊モード

$$D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \quad (1.2)$$

ここから生じる K^+, π^-, π^- の運動量から D^{*-} を再構成し、Missing Mass 法によって Y_c^{*-} を測定する。

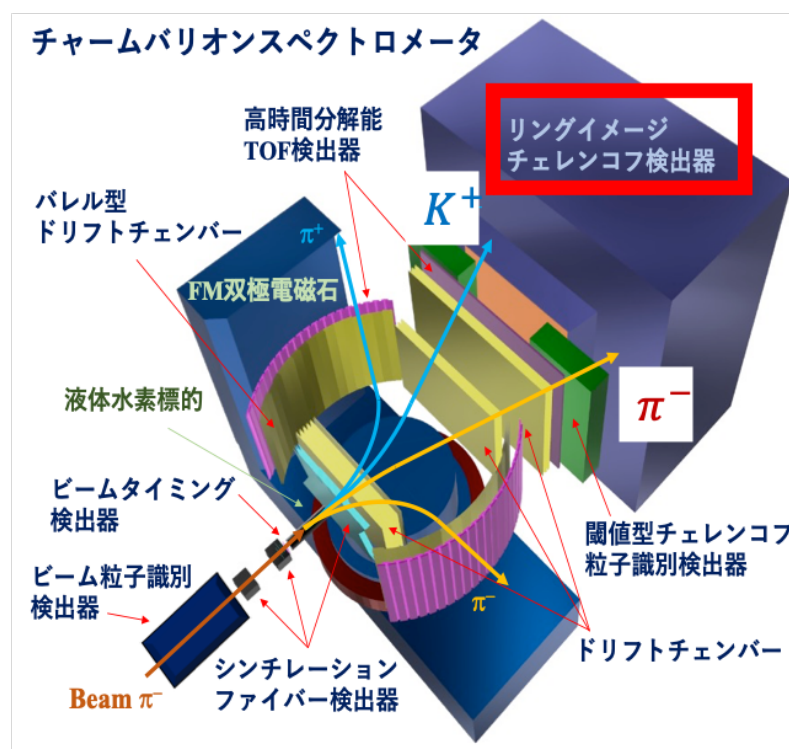


図 1.1 E50 実験のセットアップ。図後方のものがリングイメージチェレンコフ (RICH) 検出器

D^{*-} の一連の崩壊から生じる K^+, π^- を 2~16 GeV/c の広い運動量領域で粒子識別を行う必要がある。そこで用いられる PID 検出器が図 1.1 後方のリングイメージチェレンコフ検出器である。

1.2 測定原理

荷電粒子が物質中を通過する際にその速度が物質中の光速より早い場合、すなわち次式のような条件を満たす時、円錐状に光が発生する。

$$v > \frac{c}{n} \Leftrightarrow \beta > \frac{1}{n} \quad (1.3)$$

発生するチェレンコフ光と荷電粒子の進行方向がなす角をチェレンコフ角 θ_c と呼び、チェレンコフ角と荷電粒子の速度、物質の屈折率の関係は次式で表される。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (1.4)$$

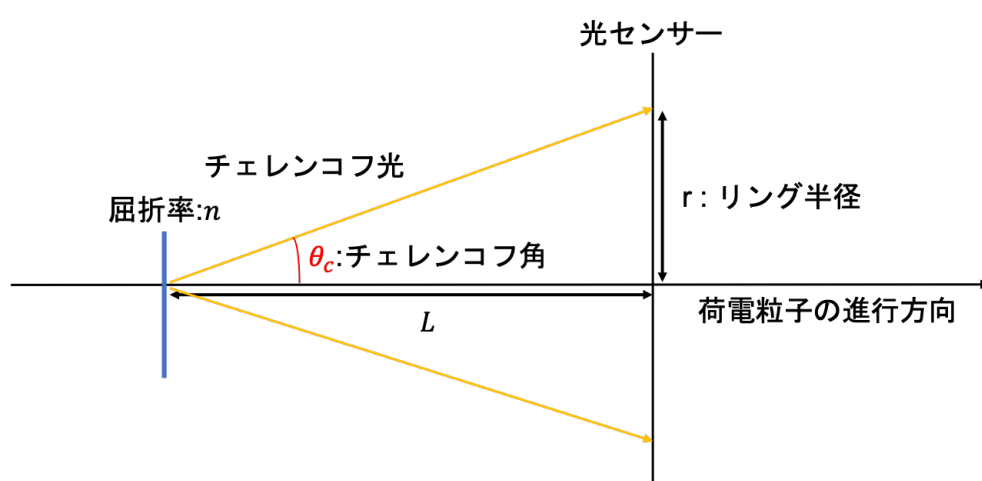


図 1.2 チェレンコフ光が発生する様子

リングイメージチェレンコフ検出器では測定したリングイメージの半径と、輻射体から光センサーまでの距離 L を用いて次の式からチェレンコフ角を算出する。

$$\tan \theta_c = \frac{r}{L} \Leftrightarrow \theta_c = \arctan \left(\frac{r}{L} \right) \quad (1.5)$$

このチェレンコフ角を用いて式 (1.4) より、粒子の速度を求めることで粒子識別を行う。

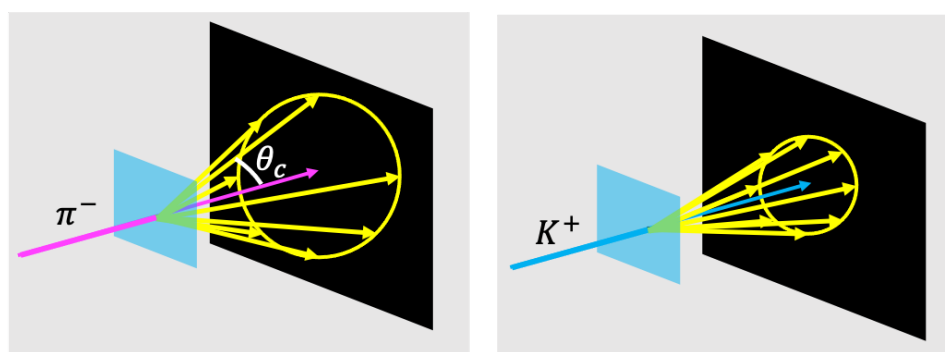


図 1.3 π^- と K^+ によるチェレンコフ光

1.3 研究目的

1.3.1 先行研究による RICH 検出器実機の構成と要求性能

先行研究での実機の構成として、エアロゲル ($n=1.04$) と C_4F_{10} ガス ($n=1.0037$) の2種類の輻射体を用いて、広い運動量領域においてチェレンコフ光を放出させる。このチェレンコフ光を球面鏡で反射させ、光センサー上で収束させることでリングイメージを観測する。

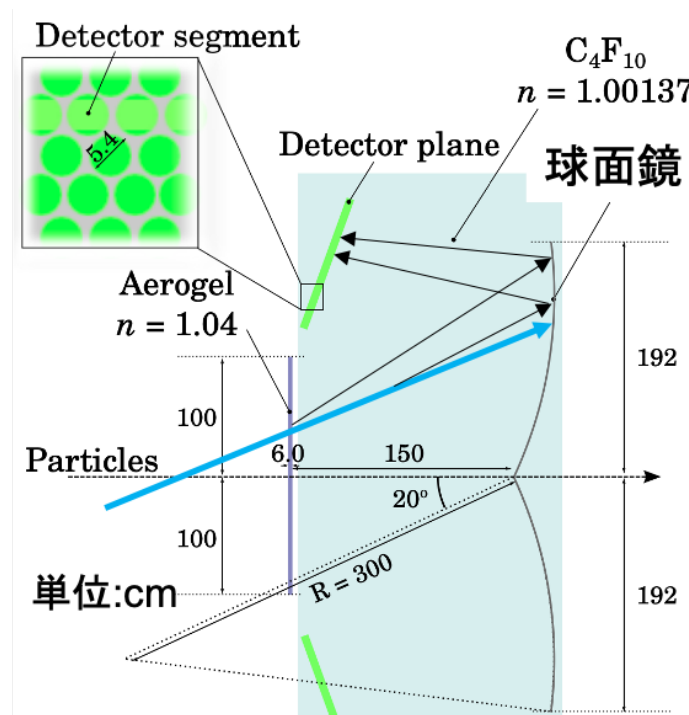


図 1.4 実機のデザイン (先行研究より)

実機の要求性能は次のようになっている。目標とする粒子識別性能 99% に要求される角度分解能は $\Delta\theta_c < 10\text{mrad}$ であり、角度分解能は以下の要素に影響される。

1. セグメントサイズの大きさによる位置分解能
2. 色収差、輻射体の厚さによる分散、検出面での収束等の収差などの影響
3. ビームの角度分解能

このうち、収差などの影響の内訳は詳細にわかっていないため、球面鏡と光センサーとして MPPC を用いた小型のテスト機を用いて収差の内訳について調査を行なった。

1.3.2 Multi Pixel Photon Counter

今回のテスト実験で用いた光センサーである Multi Pixel Photon Counter、MPPC は安価である、磁場に強いといった利点がある。一方で熱電子が増幅され、1 光電子が常にノイズとして出ており、暗電流が大きいという特徴がある。その計数率は 100 ~ 300 kHz であり RICH 検出器では 1 光電子を捉えるため、その影響についても併せて調査しシミュレーションによる再現を行なった。また電圧によってゲインと検出効率が変化するといった特徴もあり、以降では MPPC の動作電圧 $V_{operation}$ から、信号が出始める電圧 $V_{breakdown} \sim 51V$ を引いた $V_{overvoltage}$ という表記を用いる。

第2章

実験のセットアップ

2020年12月に SPring-8 の LEPS ビームラインにて実験を行なった。0.95 GeV/c の電子・陽電子をビームとして用い、空気を輻射体とした。暗箱内にはビーム軸に対してチェレンコフ光が 15° の角度で反射するように球面鏡を配置し、MPPC 上に収束させた。暗箱外側の先端と後部にはトリガーカウンターとして 10mm 角のプラスチックシンチレーターをそれぞれビーム軸上に配置した。

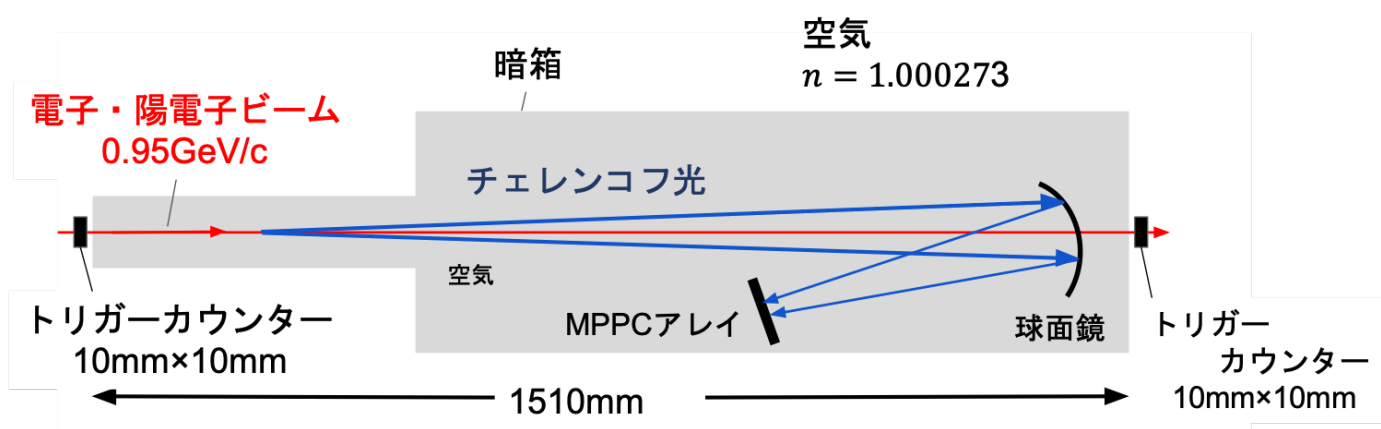
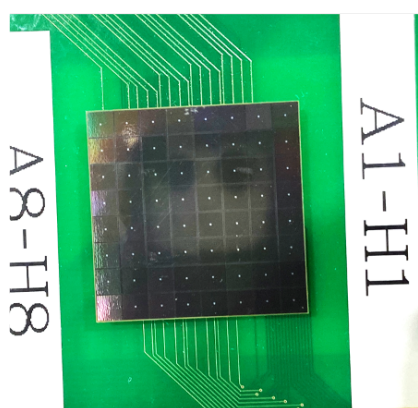
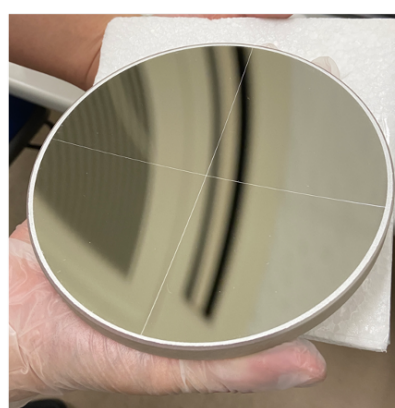


図 2.1 実験のセットアップ

MPPC は 8×8 の 2 次元アレイ、64 セグメントのものを使用し、1 セグメントの大きさは 3.2mm 角である。動作電圧は 54 57.5V まで 0.5V 刻みで測定を行なった。読み出しには NIM-EASIROC module を使用し、TDC 情報を取得した。使用した球面鏡は直径が 150mm、曲率半径は 660mm、焦点距離はその半分の 330mm である。



[1] MPPC



[2] 球面鏡

図 2.2 使用した MPPC と球面鏡

第 3 章

解析

3.1 TDC

TDC を取得するための閾値は動作電圧が最も低い $V_{ov} = 3.0V$ の時の 1p.e. にかけた。取得した TDC のヒストグラムが図 3.1 である。図 3.1 より、今回の TDC cut 幅は 20 ch と決定した。また、cut position は cut

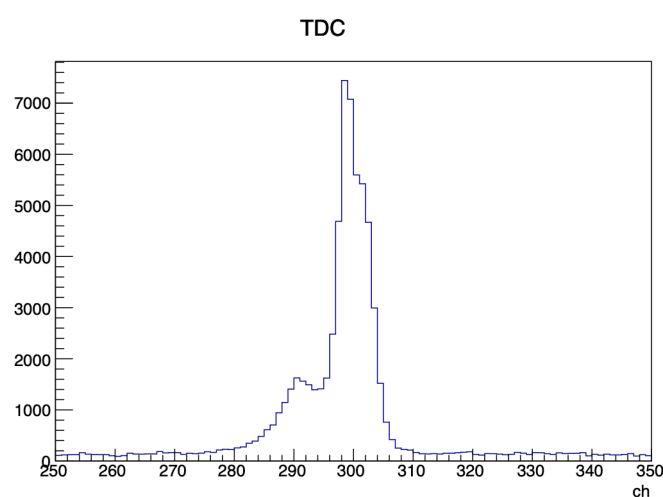


図 3.1 得られた TDC のヒストグラム。全てのチャンネルを足し合わせている。

幅を 20 ch に固定した状態で $\frac{signal}{bg}$ 比が最も良くなるところを scan によって決定した。図 3.2 より、今回の

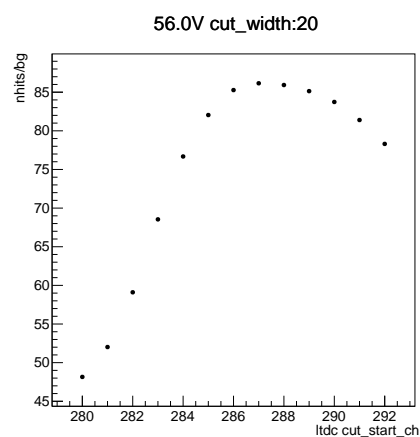


図 3.2 V_{ov} 5V での scan の様子。横軸は cut のスタート位置で cut 幅は 20 で固定している。287 ~ 307 ch で signal/bg 比が最もよくなっていることが分かる。

TDC cut position は 287 ~ 307 ch に決定した。

3.2 hit 数

先ほど決定した TDC cut を用いて、1 イベントあたりに光子が入ってきたセグメントの数を数え、それを hit 数とした。ただし、今回は TDC で hit の有無のみを見ているため、1 セグメントに光子が複数個入っても 1hit として数えた。

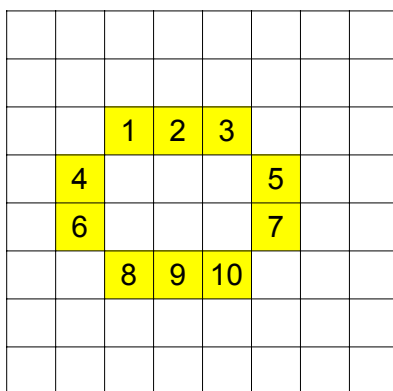


図 3.3 あるイベントで黄色のセグメントに光子が入ってきた場合の図。この場合だと 10hit となる。

各イベントで hit 数を出し、全イベント分を積み上げたヒストグラムを描いた。そのヒストグラムをガウスフィットすることで、mean から各電圧での平均の hit 数を決定した。また、TDC の cut をトリガーのタイミングからズラすことで暗電流による hit 数を見積もった。このとき、cut の幅は 20 ch で固定した。今回は、TDC の cut 範囲を 400 ~ 420 ch にしたときの hit 数を暗電流による hit 数とした。図 3.4 は $V_{ov} 5V$ のときの生の hit 数と暗電流の hit 数である。

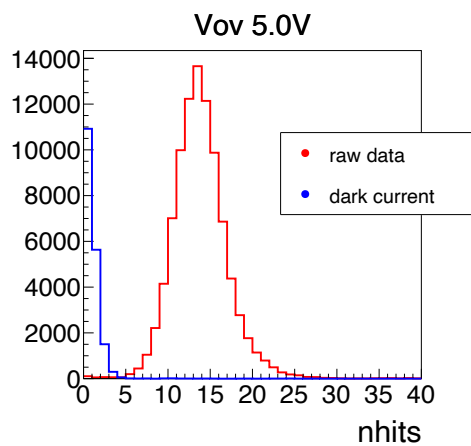


図 3.4 $V_{ov} 5V$ の nhits

3.3 hit pattern の確認

先ほど求めた hit 数をセグメントごとに全イベント分足し上げることで、hit pattern を確認したところ、図 3.5 のようにチェレンコフリングを確認することができた。

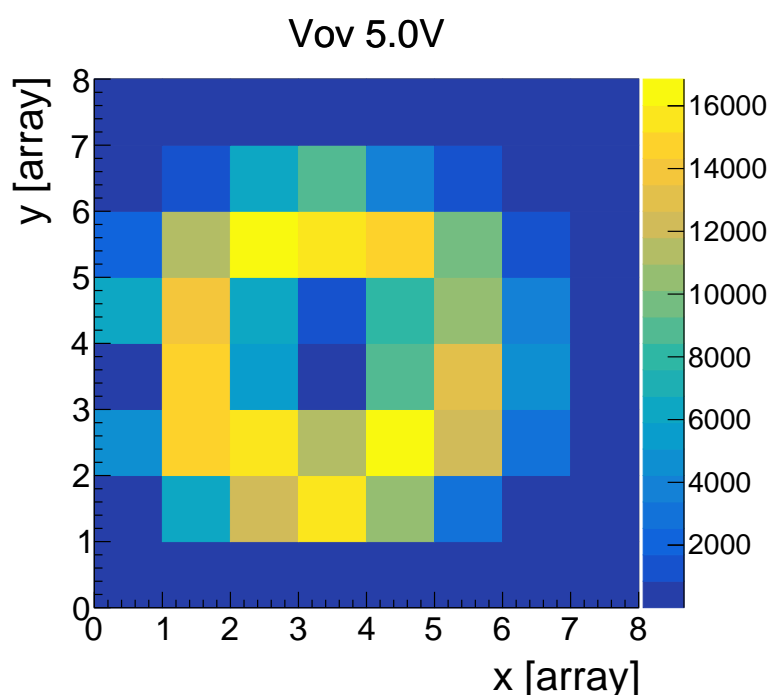


図 3.5 Vov5 V の hitpattern

3.4 リングイメージの中心

図 3.5 を見るとわかるように、今回の実験ではアレイの中心とリングの中心がズレていることがわかった。実機で使用する際は、リングイメージチェレンコフ検出器の前方にある飛跡検出器によってリング中心を決定するが、今回のテスト機ではリングイメージチェレンコフ検出器のみなので、セグメントの hit の様子からリング中心を決定する方法を考えた。

3.4.1 リング中心の決定 1

アレイを 1 列ずつ取り出しセグメントごとの hit 数を見ると、円周上に来るセグメントのところで 2 つのピークが見える。また、円周上の高さが同じ 2 点 x_1, x_2 とその高さ y_0 の間には円の方程式より、式 3.1 ような関係が成り立つ。よって、ピーク間距離 $(x_2 - x_1)$ を求め、式 3.1 でフィッティングすることで円の中心を求めた。(図 3.6)

$$x_2 - x_1 = 2\sqrt{p_0^2 - (y_0 - p_1)^2} \quad (3.1)$$

この方法では、リングの中心はアレイのマス目を単位として (3.3, 4.1) と決定された。

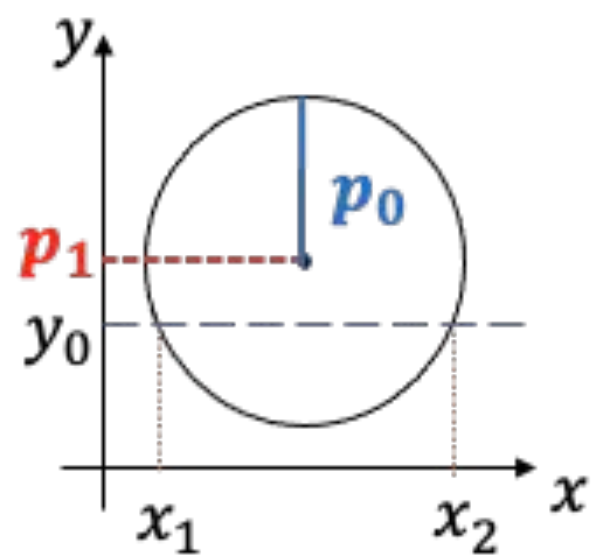


図 3.6 y を固定した時の図。 x_1, x_2 の 2 点のピークが見えるので、ピークの間隔から $x_2 - x_1$ を求める。

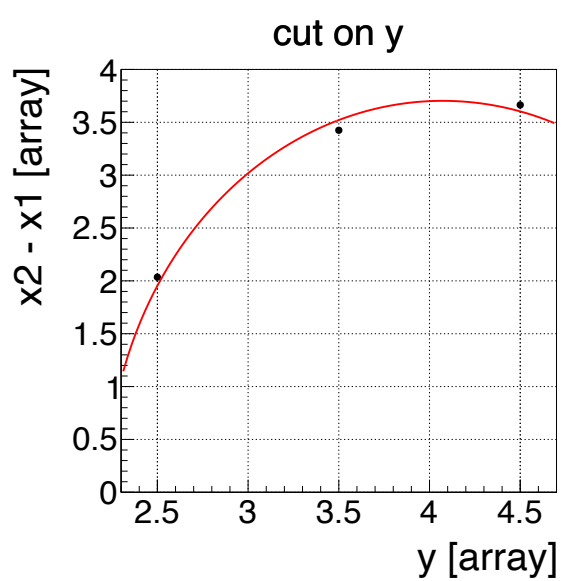


図 3.7 ある y で切った時の x_1, x_2 の差

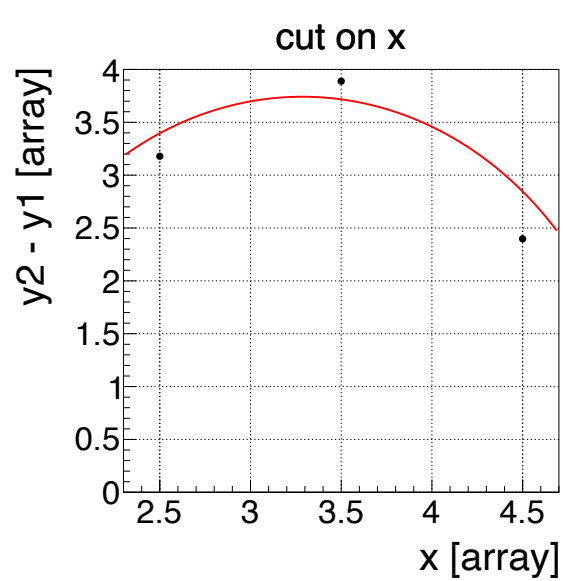


図 3.8 ある x で切った時の y_1, y_2 の差

3.4.2 リング中心の決定 2

ここにはリング中心の求め方の二つ目を書く

3.5 リング半径

イベントごとに、リング中心から hit したセグメントまでの距離を平均し、それを全イベントで積み上げてヒストグラムを描いた。1 イベントで n hit した場合、hit した各セグメントから中心までの距離を r_1, r_2, \dots, r_n とすると、そのイベントでの平均半径 r は

$$r = \frac{r_1 + r_2 + \dots + r_n}{n} \quad (3.2)$$

となる。そのヒストグラムをガウスフィットし、mean をその電圧での平均半径とした。(図 3.9)

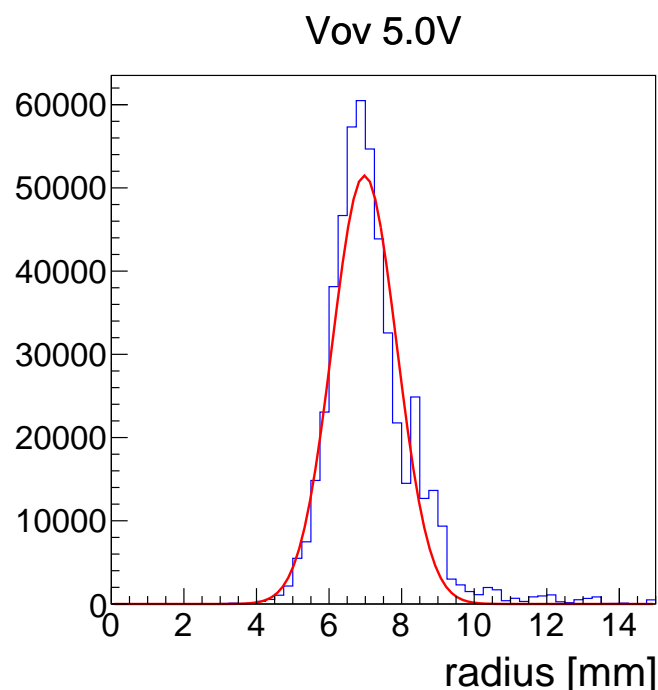


図 3.9 イベントごとに計算したリング半径を全イベント分で積み上げたヒストグラム

3.6 チェレンコフ角・角度分解能

チェレンコフ光の式より、チェレンコフ角 θ_c は、鏡の焦点距離 f とリング半径 r を用いて次のように表せる。

$$\theta_c = \arctan\left(\frac{r}{f}\right) \quad (3.3)$$

この式より、イベントごとのリング半径からイベントごとのチェレンコフ角 θ_c を計算し、それを全イベント分積み上げたヒストグラムを描いた。そのヒストグラムをガウスフィットすることで mean と sigma を求め、mean をその電圧での平均チェレンコフ角、sigma をその電圧での角度分解能とした。

図 (Vov5V の時のチェレンコフ角)

第 4 章

結果

4.1 hit 数

全電圧での hit 数をまとめると、図 4.1 の様に V_{ov} 5 V でサチュレーションしていることがわかる。そこで、このサチュレーションしている hit 数がもっともらしいことを計算により確かめた。

チェレンコフ光の発生光子数 N_0 は、次の式で求めることができる。

$$N_0 = 2\pi\alpha L \left(1 - \frac{1}{(n\beta)^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (4.1)$$

ここで、 α は微細構造定数、 n は輻射体の屈折率、 β は粒子の速度、 L は輻射体の長さ、 λ_1, λ_2 は MPPC の感度のある波長である。ただし、実際に検出される光子数 N_{det} はこの N_0 に鏡の反射効率 ϵ_{mirror} や MPPC の量子効率 ϵ_{MPPC} を考慮すると次のようになる。

$$N_{det} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} N_0(\lambda) \epsilon_{mirror}(\lambda) \epsilon_{MPPC}(\lambda) d\lambda \quad (4.2)$$

また、今回は 1 つのセグメントに同時に複数個の光子が入ってきても 1hit と数えるので、いくつかの光子を数え落としてしまう可能性がある。式 (4.2) より検出光子数を計算し、シミュレーションによって消えてしまう光子数の見積もりも行った。具体的には、hit pattern からリング上に来ているセグメントを決定し、そのセグメントに計算された検出光子数をランダムに振り分け、セグメントが被ってしまう光子数を消える光子数をした。その結果、図 4.2 のように、サチュレーションしているところでは解析値と一致していることがわかった。このことから、MPPC の使用は $V_{ov} \geq 5$ V が良さそうであることが分かった。

4.2 リング半径・チェレンコフ角

各電圧でのチェレンコフ角とリング半径は図 4.3, 4.4 のようになった。

4.2.1 リング半径・チェレンコフ角の絶対値のズレ

まず、得られたチェレンコフ角・リング半径の絶対値について考える。ただし、チェレンコフ角とリング半径は式 (3.3) より 1 対 1 対応なので、ここではリング半径について考える。MPPC が球面鏡の焦点面に配置されていた場合、MPPC 上でのリング半径 r は球面鏡の焦点距離 $f = 330\text{mm}$ 、チェレンコフ角 θ_c から $r = f \tan \theta_c$ とかける。今回は $0.95\text{GeV}/c$ の電子 (陽電子) を用いたので、速度 β は、相対論の式より

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

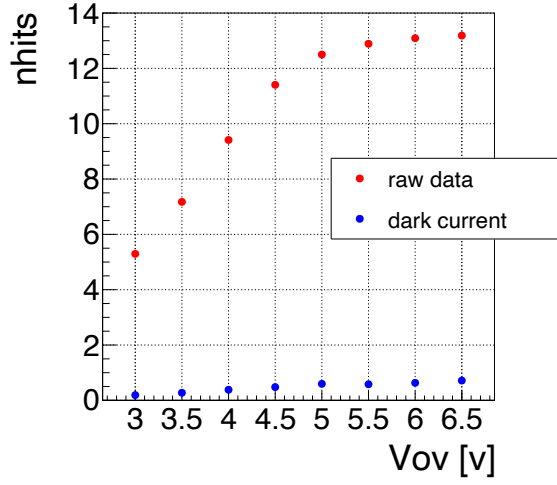


図 4.1 信号と暗電流の hit 数

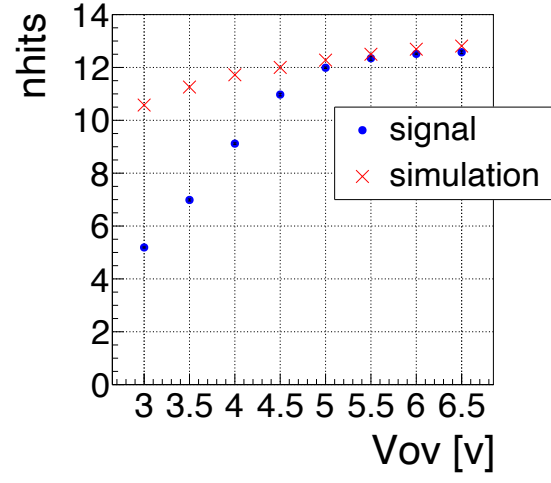


図 4.2 信号と simulation の hit 数

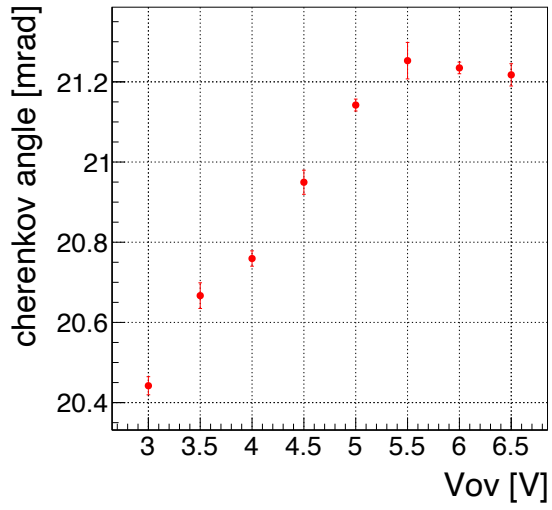


図 4.3 各電圧でのチェレンコフ角

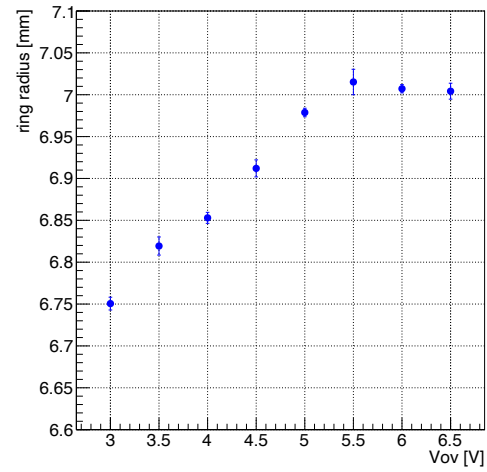


図 4.4 各電圧でのリング半径

$$pc = \frac{mc^2 \cdot \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

よって、

$$\begin{aligned} \beta &= \sqrt{\frac{pc^2}{(mc^2)^2 + pc^2}} \\ &= \sqrt{\frac{(0.95 \times 10^9)^2}{(0.51 \times 10^6)^2 + (0.95 \times 10^9)^2}} = 0.999 \end{aligned}$$

この時、チェレンコフ角 θ は空気の屈折率 $n = 1.000273$ とすると、式 (1.4) より $r = 7.7 \text{ mm}$ となった。この値は解析で得られた値より 10% ほど大きいが、今回の実験では MPPC の配置が球面鏡の焦点面から 42 mm ほどズレていたため、それが原因ではないかと考えた。このズレによる影響を、簡単のために平面鏡の場合で考えた。図 4.5 のように、MPPC が焦点面からズレていた場合焦点面で収束されるはずの光が内側と外側に広がってしまい、上流側の光が多いほど内側にくる光が多くなる。今回のセットアップによるズレを考慮して計

算を行うと表 4.2.1 のようになった。この平均値が解析で得られる値と考えると、先ほどとは逆に解析値の方が 5% ほど大きくなっている。逆に解析値の方が大きくなってしまう原因として考えられるのが、暗電流の効

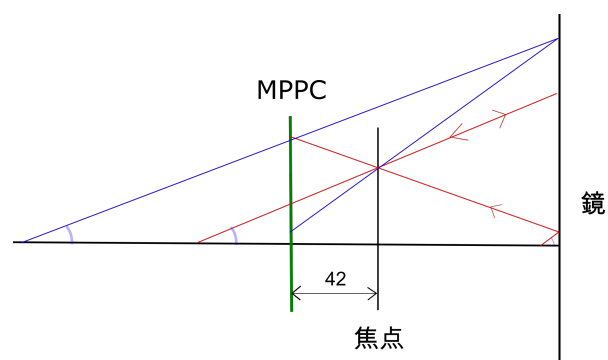


図 4.5 光学系

表 4.1 リング半径の広がり (mm)

min	avg	max
4.54	6.62	8.69

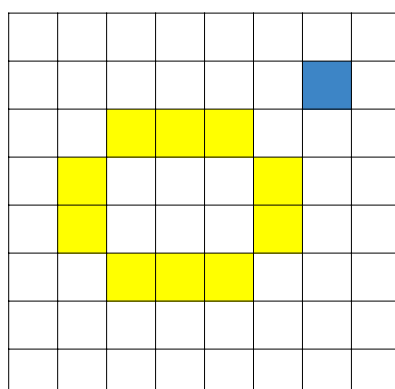


図 4.6 黄：実際に光子が当たったセグメント、青：暗電流による hit があったセグメント

果である。例えば図 4.6 のように、暗電流がリングの外側に出てしまった場合そのイベントのリング半径は実際よりも大きくなってしまう。リングの内側に暗電流が発生した場合はリング半径は小さくなるが、今回のリングと MPPC アレイのサイズ関係だと内側よりも外側の方が面積が大きいため、暗電流によってリング半径が大きく見積もられてしまう。図 4.7 は実際に暗電流のイベントのみの場合にリング半径を計算したものである。理論値よりも大きい値が得られることが分かる。

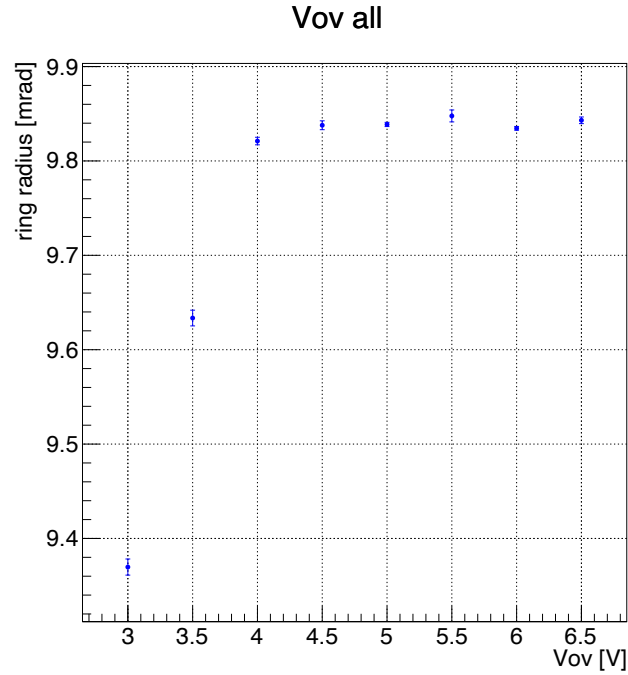


図 4.7 暗電流のみでの各電圧のリング半径

4.2.2 リング半径・チェレンコフ角の電圧依存性

続いて、リング半径・チェレンコフ角の電圧依存性について考える。本来は MPPC の電圧を上げても、チェレンコフリングの半径やチェレンコフ角は一定のはずである。しかし、今回の実験では MPPC の電圧を上げていくとリング半径・チェレンコフ角も増加していることが分かった。この電圧依存性の原因を考えるために、簡単なシミュレーションをおこなった。

以下はそのシミュレーションの条件である。

リング中心は (3.3, 3.9)、リング半径は 4.54 ~ 8.69 mm の範囲でランダムに決定。1 イベントごとの発生光子数は式 (4.1) の計算より 68 個、MPPC の検出確率は浜松ホトニクスホームページに記載の各電圧での値を用い、鏡の反射効率は全波長で 0.9 とした。また、1 セグメントに複数の光子が同時に入る効果やセグメント間の隙間も考慮した。

以上の条件で、実際の解析と同様の手順でリング半径を求めた。図 4.8 を見ると、シミュレーションでもリング半径に電圧依存性が見られることがわかる。これは暗電流の効果が原因と考えられる。図 4.7 から分かるように暗電流にはリング半径を大きくする効果があり、電圧を上げていくと暗電流が増加していくので、その効果が大きくなり、リング半径・チェレンコフ角に電圧依存性が生じてしまう。

4.3 角度分解能

各電圧での角度分解能をまとめると図 4.9 のようになった。分解能も Vov 5 V あたりでサチュレーションしていることがわかる。

4.3.1 1 p.e. あたりの分解能

1 p.e. あたりの分解能を求めるために、イベントごとの hit 数で場合分けをし分解能を求めた。さらに、1 p.e. あたりの分解能を $\Delta\theta_{1p.e.}$ として、 $\frac{\Delta\theta_{1p.e.}}{\sqrt{n_{hits}}}$ でフィッティングを行うと、図 4.10 のようになった。図 4.10 のパラメータの値より、 $\Delta\theta_{1p.e.} = 4.85 \pm 0.01$ mrad と求められた。

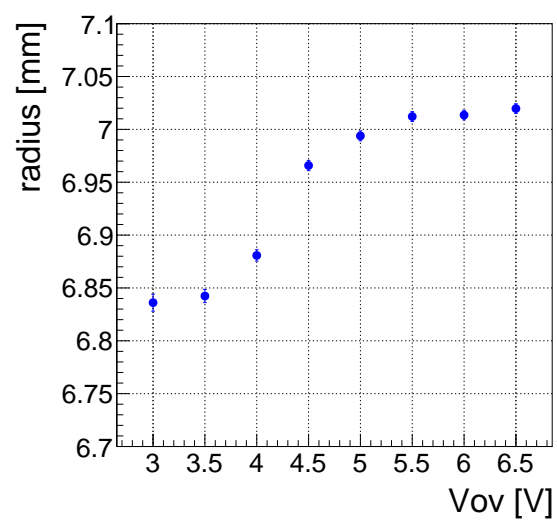


図 4.8 シミュレーションによるリング半径

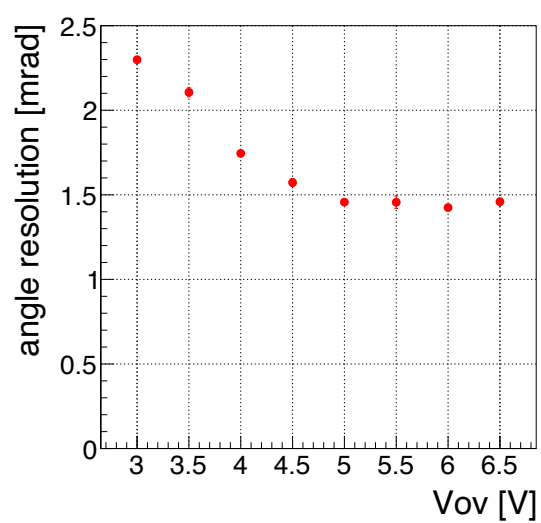


図 4.9 各電圧での角度分解能

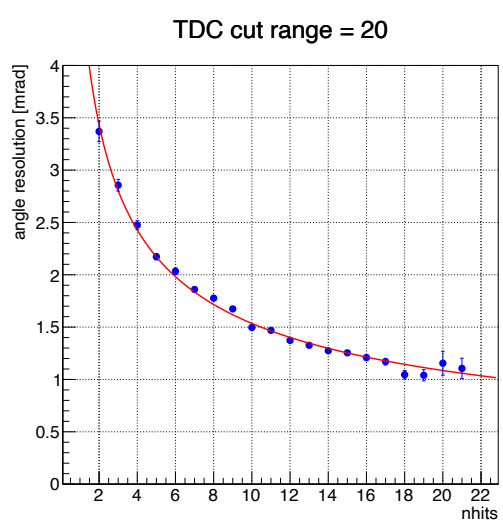


図 4.10 hit 数ごとの分解能。横軸はイベントごとの hit 数、縦軸は角度分解能。

4.3.2 角度分解能の内訳

4.3.3 収差などによる角度分解能

4.3.4 暗電流の角度分解能への寄与

暗電流の角度分解能への影響を調べるために、暗電流がある場合と、暗電流なしの極限 (TDC の cut 幅を 0 にした極限) での角度分解能と 1 p.e. あたりの分解能をそれぞれ調べた。まず、TDC の cut 幅を 100 ch まで 20 ch ずつ広げていき暗電流の割合を増加させた時の分解能を調べることで、暗電流なしの極限での角度分解能を求めた。図 4.11 に外挿して、cut 幅 0 で暗電流なしの極限を見ると $\sim 1.38\text{mrad}$ の分解能を得られる。また、角度分解能と 1 p.e. あたりの分解能の関係式 $\frac{\Delta\theta_{1p.e.}}{\sqrt{nhits}} = \Delta\theta$ より、cut 幅 20 の場合から

$$\begin{aligned}\frac{4.85\text{mrad}}{\sqrt{nhits}} &= 1.45\text{mrad} \\ \sqrt{nhits} &= 3.34\end{aligned}$$

が求まる。よって、cut 幅 0 での 1 p.e. あたりの分解能 $\Delta\theta_{1p.e.}$ は $\frac{\Delta\theta_{1p.e.}}{\sqrt{nhits}} = 1.38\text{mrad}$ より $\Delta\theta_{1p.e.} = 4.62\text{mrad}$ となる。

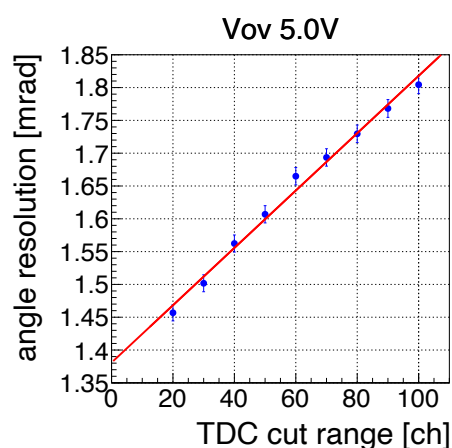


図 4.11 TDC の cut 幅を広げていった時の分解能

第 5 章

まとめ

チャームバリオン分光実験では広い運動量領域 ($2 \sim 16 \text{ GeV}/c$) での粒子識別が必要となるので、広い運動量領域に対応できるリングイメージ・チェレンコフ (RICH) 検出器を用いる。今回は、球面鏡を使用したテスト機によって MPPC の暗電流の影響や電圧依存性、収差の角度分解能への影響を調査した。まず暗電流の寄与は、TDC cut で十分抑制可能ではあるが、1 p.e. あたりの分解能への影響が $\sim 1.47 \text{ mrad}$ ほどあり、セグメントサイズが 13% ほど大きく見えてしまう効果となることがわかったので、実機では暗電流の効果も含めてセグメントサイズを決定する必要がある。MPPC の電圧依存性については、hit 数や分解能のサチュレーションしている値から $V_{ov} 5V$ あたりでの使用が良いとわかった。また、暗電流の効果によって、リング半径やチェレンコフ角に電圧依存性が生じるため、実機を使用する際はデータによるチェレンコフ角の較正が必要となることが分かった。