

LEPS ビームラインにおける TOP カウンター 試作機  
の性能評価

前島 亮平

名古屋大学 理学研究科  
素粒子宇宙物理学専攻 高エネルギー物理学研究室 N 研

学籍番号:260901490

平成 25 年 2 月 14 日

## 概要

KEK(高エネルギー加速器研究機構)では、2016年よりB中間子等をプローブとして新物理発見を目指した Belle II 実験が稼働予定である。我々は、Belle II 実験で稀崩壊現象を観測する為に重要な  $K/\pi$  粒子の識別において、検出効率  $> 95\%$ 、誤識別率  $< 5\%$  を達成すべく、TOP カウンター (Time Of Propagation Counter) の研究開発を進めている。

粒子識別装置 TOP カウンターは、輻射体である石英板と、石英内部を伝播するチェレンコフ光を検出する光検出器 MCP-PMT(Micro Channel Plate Photo Multiplier Tube) から構成された、RICH(Ring imaging Cherenkov) 型検出器である。

TOP カウンターの粒子識別で重要な要素は、MCP-PMT の時間分解能 ( $< 50$  psec) と量子効率 ( $> 24\%$ )、石英板の内部透過率 ( $> 98.5\%$ ) と表面反射率 ( $> 99.9\%$ ) であり、これまでの研究でそれらの性能は十分に要求を満たしている事が分かっている。従って現在では、TOP カウンター全体としての性能を確認する事が最重要課題になっている。

そこで、実機サイズの TOP カウンターの性能を評価するため、2012年4月と10月に SPring-8 LEPS ビームラインで  $1\sim 2$  GeV/c の電子ビームを用いた照射テストを行った。

私は、この照射テストにおいて RF 信号を用いた時間原点の較正と、TDC の較正の手法を確立した。そして、TOP カウンターの性能を示す上で、重要な指標である、検出光子数と時間分解能をデータとシミュレーションで比較した。その結果、検出光子数が予想よりも少ないチャンネルが多く、また時間分解能も予想より悪い事が分かった。更に研究を進めた結果、前者は、照射テスト中に石英板の表面と MCP-PMT の光電面の接着が剥がれた事に起因していると明らかにした。また、後者の原因を調べるため、ビームのふらつきを考慮に入れたシミュレーションを行ったが、問題を再現する事が出来なかった。この原因を究明し、今後の照射テストに向けてこれらの問題点を改善する必要性を示した上で、改善方法について議論する。

# 目次

<b>第1章 TOP カウンター</b>	<b>6</b>
1.1 BelleII 実験	6
1.2 検出原理	7
1.2.1 TOPcounter の構造	8
1.2.2 Cherenkov 光について	8
1.3 Simulation による性能評価	9
1.3.1 粒子識別について	9
1.3.2 波長分散効果について	12
1.3.3 識別能力の評価	14
1.4 研究課題	14
<b>第2章 LEPS ビームテスト</b>	<b>16</b>
2.1 Introduction	16
2.2 SPring-8 加速器	18
2.3 LEPS ビームラインのコンフィグレーション	18
2.3.1 逆コンプトン散乱	18
2.3.2 スペクトロメータ	19
2.4 4月に行われたビームテスト	20
2.4.1 セットアップ	20
2.4.2 結果	22
2.5 10月に行ったビームテストの目的	23
2.6 ビームテストのセットアップ	23
2.6.1 石英板	23
2.6.2 MCP-PMT	24
2.6.3 フロントエンドモジュール	25
2.6.4 トリガーカウンター	27
2.6.5 DAQ	29
2.6.6 照射テストのセットアップと入射条件	29
2.6.7 $e^+, e^-$ ビーム	32

---

<b>第 3 章 解析</b>	<b>33</b>
3.1 解析の流れ	33
3.2 RF 信号の時間分解能	33
3.3 トリガーカウンターを用いた bunchID	36
3.4 トリガーカウンターの設置精度の評価	43
3.5 RF 信号を用いた TDC の時間分解能の較正	44
3.6 時間原点のまとめ	44
3.6.1 リンゲイメージ	45
3.7 Good チャンネルの評価	46
3.7.1 PDF	46
3.7.2 結果	46
3.8 TOP カウンターの時間分布と PDF の比較によるデータの評価	50
<b>第 4 章 結論</b>	<b>56</b>

# 目 次

1.1	Belle II 検出器のイメージ図	6
1.2	TOP カウンター	7
1.3	RICH カウンターの二次元リングイメージ (左図) と TOP カウンターのリングイメージ (右図)	7
1.4	TOP カウンターの Belle II 実験における設置場所	8
1.5	TOP カウンターの座標系	11
1.6	TOP カウンターのフォーカシング	13
1.7	K 粒子の検出効率と $\pi$ 粒子の誤識別率:赤丸 (1.5GeV/c) 青四角 (2.5GeV/c) 黒三角 (3.5GeV/c)	14
2.1	LEPSbeamline:右図実験ホール、左図レーザー系	17
2.2	SPring-8	18
2.3	反応模式図	19
2.4	スペクトロメータ	19
2.5	4月に行われたビームテストの TOP カウンターのセットアップ	21
2.6	4月に行われたビームテストのセットアップ	21
2.7	4月に行われたビームテストの結果より得られた TOP カウンターと PDF の時間分布の比較:左図 石英板中央の PMT、右図 石英板端の PMT	22
2.8	4月に行われたビームテストの解析結果より得られた速度分解能:左図 測定データ、右図 MC	22
2.9	TOP カウンターのサイズ	23
2.10	MCP-PMT の実物とチャンネルのイメージ図	24
2.11	JT0763 の基本測定 (時間分解能、gain) 及び QE 測定:左図 基本測定、右図 QE 測定 (横軸縦軸:測定ステップ数 [1 ステップ 1.375mm])	25
2.12	CFD ボード (右) と、その時間分布	25
2.13	CFD ボードの時間分布	26
2.14	CFD で見た MCP-PMT のダークヒット	26
2.15	フロントエンドモジュールの全体像	27
2.16	トリガーカウンター構成とサイズ	28
2.17	トリガーカウンターの墨出し器と $\gamma$ ビームによる設置アライメント	28

---

2.18	トリガー系及びデータ収集系	29
2.19	セットアップ ( $\cos \theta = 0.0$ )	30
2.20	セットアップ ( $\cos \theta = 0.4$ )	31
2.21	セットアップ ( $\cos \theta = 0.4$ $z=-200\text{mm}$ )	31
2.22	$e^-$ ビームの運動量分布	32
3.1	RF 信号の二つのヒットの時間差の分布:横軸 psec 縦軸 count	34
3.2	タイミングカウンターの二つのヒットの時間差の分布:横軸 psec 縦軸 count	35
3.3	タイミングカウンターと RF 信号のヒットの時間差の分布:横軸 psec 縦軸 count	35
3.4	取得したトリガーカウンターと RF の TDC の時間分布の差:横軸 TDCcount 縦軸 count	36
3.5	SPring-8 蓄積リング内の bunch 構造のイメージ図	37
3.6	信号の ADC による時間差のイメージ図	37
3.7	exp1 におけるトリガーカウンターと RF の TDC の差と ADC の二次元ヒストグラム (横軸 ADC 縦軸 psec):左図 補正前、右図 補正後	38
3.8	exp2 と exp3 における slewing 補正後のトリガーカウンターと RF の TDC の差と ADC のメイン bunch だけに注目した二次元ヒストグラム (横軸 ADC 縦軸 psec):左図 exp2、右図 exp3	39
3.9	slewing 補正後のメインピークに注目した 1D ヒストグラム (横軸 psec 縦軸 count):左上 exp1(slewing 補正前後の絵を重ねている)、右上 exp3、左下 exp2(run<20)、右下 exp2(run $\geq$ 20)	40
3.10	メイン bunch のピークに対する sigma と mean の値の run 依存性:左図 mean 値 (横軸 run 番号 縦軸 mean 値)、右図 sigma 値 (横軸 run 番号 縦軸 sigma 値)	40
3.11	各 exp で全てのイベントを一つに纏めたトリガーカウンターと RF 信号の時間差の分布:左上 exp1[横軸 psec、縦軸 count]、右上 exp2exp2(run<20)[横軸 psec、縦軸 count]、左下 exp2exp2(run $\geq$ 20)[横軸 psec、縦軸 count]、右下 exp3[横軸 psec、縦軸 count]	41
3.12	各 exp での ADC 分布:横軸 ADC 縦軸 count:左上図 exp1、右上図 exp2、下図 exp3	43
3.13	TDC の時間較正:縦軸はデータから得られた時間分布の mean 値、横軸は bunch 間隔から予想される時間	44
3.14	各 exp でのリングイメージ [横軸:MCP-PMT チャンネル、縦軸:時間]: 左上 exp1、右上 exp2、下 exp3	45
3.15	TOP カウンターの時間分布 (青) と PDF (赤) の比較:横軸 psec 縦軸 N.Hit(左上 bad-ch、右上 good-ch、下 newbad-ch)	47

---

---

3.16	exp1 の MCP-PMT の各チャンネルの評価結果:G=Good チャンネル、NB=NewBad チャンネル、B=Bad チャンネル . . . . .	48
3.17	exp2 の MCP-PMT の各チャンネルの評価結果:G=Good チャンネル、NB=NewBad チャンネル、B=Bad チャンネル . . . . .	48
3.18	exp3 の MCP - PMT の各チャンネルの評価結果:G=Good チャンネル、NB=NewBad チャンネル、B=Bad チャンネル . . . . .	49
3.19	フロントエンドボックスとクォーツバーボックス:左図 横から見た写真、右図 上から見た写真 . . . . .	49
3.20	LEPS スペクトロメータで測定された電子ビームのふらつき:左上 xtop[横軸:入射位置 (mm)、縦軸:count]、右上 ytop[横軸:入射位置 (mm)、縦軸:count]、左下 dx dztop[横軸:入射位置 (rad)、縦軸:count]、右下 dy dztop[横軸:入射位置 (rad)、縦軸:count]) . . . . .	51
3.21	トップカウンター (黒) と PDF(赤) の時間分布:横軸 psec、縦軸 Nhit . . . . .	52
3.22	PDF での電子ビームのふらつき:左上 xtop[横軸:位置 (cm)、縦軸:count]、右上 ytop[横軸:位置 (cm)、縦軸:count]、左下 dx dztop[横軸:位置 (rad)、縦軸:count]、右下 dy dztop[横軸:位置 (rad)、縦軸:count]) . . . . .	52
3.23	ビームを振らつきを考慮する前 (赤) と後 (黒) での PDF の比較:横軸 spec、縦軸 Number of photon . . . . .	53
3.24	ビームを絞る前 (右図) と後 (左図) での TOP カウンターの時間分布の比較:横軸 psec、縦軸 count . . . . .	53
3.25	PDF と TOP カウンターの比較:左上 カット無し [横軸:psec、縦軸:Nphoton]、右上 メイン bunch のみのイベント [横軸:psec、縦軸:Nphoton]、左下 クロストークカット [横軸:psec、縦軸:Nphoton]、右下 メイン bunch+クロストークカット [横軸:psec、縦軸:Nphoton]) . . . . .	54

# 第1章 TOPカウンター

## 1.1 BelleII実験

Belle II 実験は世界最高のピーク luminositiy  $8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  で B 中間子を大量に生成し、 $B \rightarrow \rho\gamma$ 、 $B \rightarrow K^* \gamma$  などの稀崩壊現象を精密に調べることで新物理の発見を目的としている [1]。

Belle II 実験では、検出器を Belle 検出器から Belle II 検出器にアップグレードする。この Belle II 検出器は高い luminositiy に付随する高いバックグラウンド環境に耐える設計になっている。図 1.1 に Belle II 検出器の全体図を示す。内側からピクセル型シリコン検出器 (PXD : Pixel Detector)、シリコンストリップ (Silicon Vertex) 検出器、中央飛跡検出器 (CDC)、TOP (Time Of Propagation) カウンター・A-RICH (Aerogel-Ring Image Cherenkov detector) 検出器、電磁カロリメータ (ECL)、超伝導ソレノイド、KL・ミュオン検出器 (KLM) が配置される予定である。主な変更点は、 $K/\pi$  識別装置を ACC と TOF から、TOP カウンター (パレル領域) と A-RICH 検出器 (エンドキャップ領域) に変更することなどである。

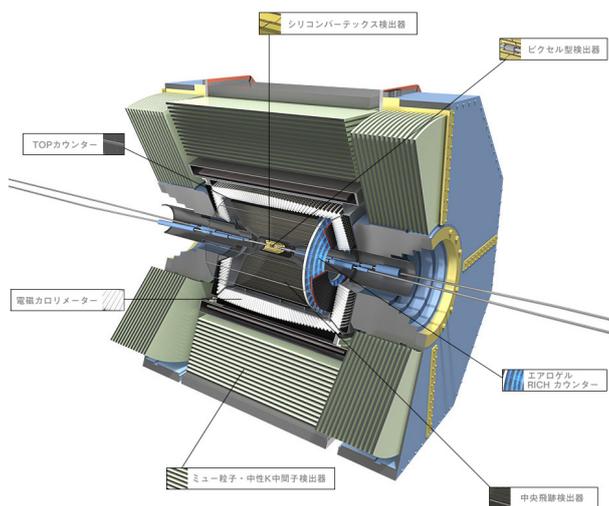


図 1.1: Belle II 検出器のイメージ図

## 1.2 検出原理

TOP(Time Of Propagation) カウンターは TOF の性能を兼ね備えた RICH(Ring Imaging Cherenkov) 型検出器であり、荷電粒子が物質中の光速を超える速度で輻射体を通過した際に円錐状に放出する Cherenkov 光を検出し、そのリングイメージから粒子の速度を算出することで、粒子識別を行なう検出器である (図 1.2)。通常 RICH 検出器はリング

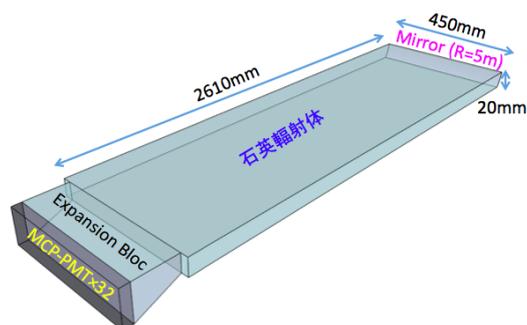


図 1.2: TOP カウンター

イメージを X-Y 平面の二次元位置情報から求めるが、TOP カウンターは一次元の位置情報と時間情報を用いてリングイメージを再構築する (図 1.2)、という点が独創的である。TOP カウンターはその「時間を測定する」という原理から、粒子の質量差より生じる速度の差を測ることで粒子識別を行なう TOF カウンターの性質備えており、TOF と RICH 検出器の性質を兼ね備え、非常にコンパクトな粒子識別装置である。

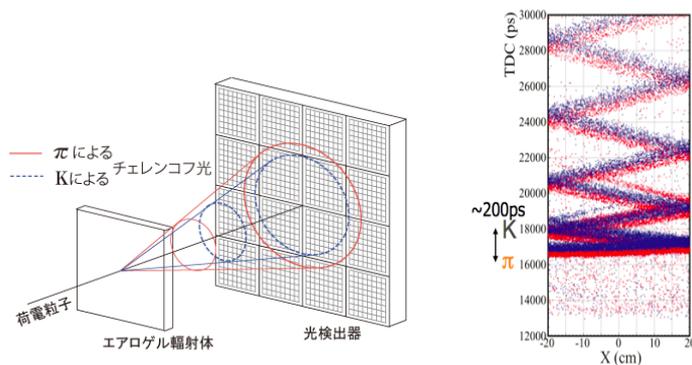


図 1.3: RICH カウンターの二次元リングイメージ (左図) と TOP カウンターのリングイメージ (右図)



- $N$  : 発生光子数  
 $Z$  : 荷電粒子の電荷  
 $\alpha$  : 微細構造定数  
 $L$  : 粒子の通過する輻射体の距離 [m]

上式を積分したもので、Cherenkov 光の放出数は求められる。

$$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi\alpha L}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) d\lambda \quad (1.2.3)$$

Cherenkov 光は低波長領域に多く存在し、これを踏まえて光検出器の Q.E の波長領域は最適化する必要がある。

この Cherenkov 光の分布から光検出器で検出される光子数を計算するには、光検出器の感度である QE を考え、Cherenkov 光の伝播を考える必要がある。たとえば、250nm ~ 900nm の範囲で放出時は 1370 個であった Cherenkov 光が、QE をかけることで ~95 個にまで減少し、収集効率 CE= 60% によって ~57 個になる。また、さらに光検出器にまで届く光は石英の全反射条件 (入射角 < 42.8 °以下) を満たすものであることからファクタ 2 ~ 3 減少すると考えられ、実際に検出される光子数はおよそ 20 ~ 30 個程度になる。

## 1.3 Simulation による性能評価

### 1.3.1 粒子識別について

#### Likelihood 法について

粒子識別の際には、Likelihood 法を使って求める。

$\pi(K)$  粒子が石英に入射しそこから放出された Cherenkov 光の光子がとある MCP - PMT のチャンネルで検出されることを考える。このとき予想される理想的な到達時間を  $t^{\pi(K)}$  とし、実際に検出される時間を  $t$  とする。この時間分布は PMT の TTS (*Time Transit Spread*) や回路系の時間ふらつきなどを含んだ分布をもつが、それが正規分布を作ると仮定し、まったく同じ入射条件ならば検出される光子の時間に関する確率分布は以下のように書ける。

$$P^{\pi(K)} = \frac{\omega}{\sqrt{2\pi\sigma_{\pi}^2(K)}} \exp\left(-\frac{(t - t^{\pi(K)})^2}{2\sigma_{\pi}^2(K)}\right) \quad (1.3.4)$$

ここで、 $\omega$  は光子の発生点から到達したチャンネルまでの見込んだ立体角を表し、 $\sigma_{\pi}(K)$  は PMT などによる時間ふらつきである。実際はひとつの荷電粒子で複数の光子を検出するので、 $N$  個の光子を考えて、そのようなイベントの起こる確率 ( $\pi(K)$  粒子らしさ: Likelihood)  $L$  は、 $P_i^{\pi(K)}$  を用いて、積で表すことができる。

$$L^{\pi(K)} = \prod_{i=1}^N P_i^{\pi(K)} = \prod_{i=1}^N \frac{\omega}{\sqrt{2\pi\sigma_{\pi}^2(K)}} \exp\left(-\frac{(t - t^{\pi(K)})^2}{2\sigma_{\pi}^2(K)}\right) \quad (1.3.5)$$

入射した荷電粒子が  $\pi$  か  $K$  かで Cherenkov 光の経路が変わるため、到達時間の理想点である  $t^{\pi(K)}$  の値は変わる。したがって、光子の検出チャンネル・時間から計算される  $L^\pi$  と  $L^K$  の値はよりその粒子らしい方が高い値になるはずである。実際に扱うときには扱いやすさから対数を取り、その差を  $\Delta L$  としその値によって粒子識別を行なう。

$$\Delta L = \ln L^\pi - \ln L^K \quad (1.3.6)$$

また、 $\pi(K)$  粒子である確率を以下のように定義する。

$$Probability_{\pi(K)} = \frac{L_\pi(K)}{L_\pi + L_K} \quad (1.3.7)$$

また、識別装置として識別能力を考えると、重要となるのは Efficiency(識別効率) と fake rate(誤識別率) である。Efficiency は、たとえば  $K$  粒子の場合、本当の  $K$  粒子が TOP カウンターを通った時に  $K$  粒子として識別される効率であり、fake rate は例えば本当は  $\pi$  粒子が通ったものを  $K$  粒子と間違える確率である。また、 $\ln \Delta L_{\pi(K)}$  のそれぞれ正しい粒子がきたときの分布を並べて比較し、その二山の離れ具合を表わしたものを識別能力  $S$  として、以下の式で表わす。

$$S = \frac{\overline{\Delta L_\pi} - \overline{\delta L_K}}{(\sigma_\pi + \sigma_K)/2} \quad (1.3.8)$$

また、入射粒子の違いによる Cherenkov 角の差はほとんどが到達時間のずれとなって検出されるので、識別能力  $S$  は、TOP カウンター全体の時間分解能  $\sigma_{TOP}$  と粒子が生成しからの時間である  $\Delta TOF + \Delta TOP$  を用いて次式のように近似できる。

$$S = \frac{\Delta(TOF + TOP)}{\sigma_{TOP}} \times \sqrt{N} \quad (1.3.9)$$

ここから、TOP カウンターの粒子識別にとって重要な値は、まず時間分解能と検出光子数であると言える。

$\Delta TOF$  と  $\Delta TOP$  は入射粒子の入射条件(位置、角度)と速度によって決まる。TOF は TOP カウンター入射までの軌跡長と粒子の速度から予想でき、TOP はチェレンコフ光の伝播経路と波長依存の伝播速度によって決まる値である。

### 光伝播経路の計算

放出される Cherenkov 光の光子の運動ベクトル  $\vec{q}$  は、入射粒子の入射角  $(\theta_{inc}, \phi_{inc})$  と、入射粒子を軸とした円錐を作る  $(\theta_c, \phi_c)$  で決まる。まず、入射粒子を  $z'$  軸としたときの座標系を考える。

この座標系での光子の運動ベクトル  $\vec{q}'$  の各成分は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} q'_x &= \sin \theta_c \sin \phi_c \\ q'_y &= \sin \theta_c \cos \phi_c \\ q'_z &= \cos \theta_c \end{aligned} \quad (1.3.10)$$

これに入射粒子の入射角を加え、TOP カウンターを中心にした座標系 (図 1.5) に直すと、以下のようなになる。

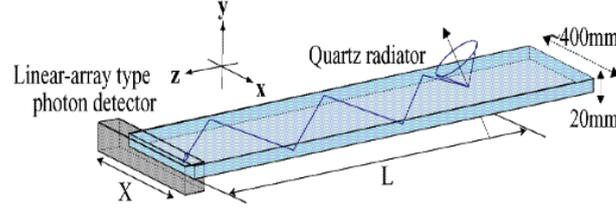


図 1.5: TOP カウンターの座標系

$$\begin{aligned}
 q_x &= q_{x'} \\
 &= \sin \theta_c \sin \phi_c \\
 q_y &= q_{y'} \cos \theta_{inc} + q_{z'} \sin \theta_{inc} \\
 &= \sin \theta_c \cos \phi_c \cos \theta_{inc} + \cos \theta_c \sin \theta_{inc} \\
 q_z &= q_{z'} \cos \theta_{inc} + q_{y'} \sin \theta_{inc} \\
 &= \cos \theta_c \cos \theta_{inc} + \sin \theta_c \cos \phi_c \sin \theta_{inc}
 \end{aligned} \tag{1.3.11}$$

ここで、角度変数 ( $\Theta$ ,  $\Phi$ ) は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 \Theta &= \tan^{-1} \left( \frac{q_y}{q_x} \right) \\
 \Phi &= \tan^{-1} \left( \frac{q_x}{q_z} \right)
 \end{aligned} \tag{1.3.12}$$

Cherenkov 光の伝播距離  $L$  はこの角度変数と光検出器までの距離で決まる値であり、その伝播距離を光の速度で割れば TOP を求めることになる。

$$TOP(\Theta, \Phi) = \frac{L(\Theta, \Phi)}{c/n(\lambda)} \tag{1.3.13}$$

### 1.3.2 波長分散効果について

この節では波長分散効果について述べる。TOP カウンターの時間分解能は光検出器の時間分解能がまず影響を受ける要素のひとつであるが、Cherenkov 光の伝播距離が長くなるにつれて波長分散効果によるふらつきが支配的になる。

波長分散効果による時間ふらつきを考える上で考慮すべき事柄は二つある。それは、Cherenkov 光が発生する際の波長分布の違いによる Cherenkov 角の違い(それに伴う光路の違い)と、波長に依存した速度の違い(群速度)による時間差である。

まず、Cherenkov 光の発光の際の角度分布を考えるときには位相屈折率を考えなければならない。石英中での位相屈折率は以下の式で表わされる。

$$n(\lambda) = 1.44 + \frac{8.22}{\lambda - 126} \quad (1.3.14)$$

$\lambda$ : Wavelength(nm)

TOP カウンターで用いる波長領域である 350nm-800nm の間では 0.02 程度屈折率が違い、Cherenkov 角の差としては 20mrad 程度の差が生まれる。この角度の違いによって生まれる光路差は ~ 数 mm 以下であり、時間にして 1ps 程度で時間ふらつきとしては無視できる値である。

次に考えるのは光の速度である。物質中を光が伝播する速度は、物質の位相屈折率と群屈折率(群速度)に依存する。物質が石英の群速度は、

$$V_{group} = \frac{c}{n(\lambda)} - \frac{8.2 \times \lambda c}{n(\lambda)^2 \times (\lambda - 126)^2} \quad (1.3.15)$$

であり、位相速度よりも群速度の方が大きく速度の差を生んでいることが分かり、さらに低波長領域での変化率が大きいことから、低波長領域を使えば使うほど時間ふらつきが大きくなるということが分かる。実際に検出する cherenkov 光の伝播距離はおよそ 3000mm 以下の距離であり、この距離で例えば 300nm-800nm の速度差である 250ps/m を考えると、およそ 250-750ps 程度の到達時間差が生まれることになる。これでは TOP カウンターの目指す時間分解能を達成することができない。

この群速度の差による時間ふらつきを抑えるひとつの方法として、波長領域を限定するために波長カットフィルタを用いて低波長領域をカットするという方法がある。ところが、前述したように Cherenkov 光は低波長領域に多く存在しその数も少ないため、なるべくカットする領域は小さくしたい、というジレンマがある。そのカットする領域についてはシミュレーションで評価を行っており、350nm 以下の波長領域をフィルタを用いてカットするのが最適だと分かっている。

波長分散効果による時間分解能の悪化は光路長に比例して増加していくため、光検出器の反対の石英端面に一度反射して戻ってくる経路において、特に影響が大きいと考えられる。そこで考えられた対策がフォーカシングミラーを用いた対策である。これは石英端面

で光を反射させるミラー部分を球面にすることで、同じ角度を持つ光を光検出器に向かって集光させ、光検出器に辿りつくときには Cherenkov 光は波長ごとに  $y$  軸の方向に分解されるという原理である。波長分解されることで、検出される光の群速度の差は小さくなり、さらに放出角の差による光路差も小さくなるため、時間ふらつきを抑えることができる (図 1.6)。このミラー曲面については、シミュレーションでの評価によって最適化され

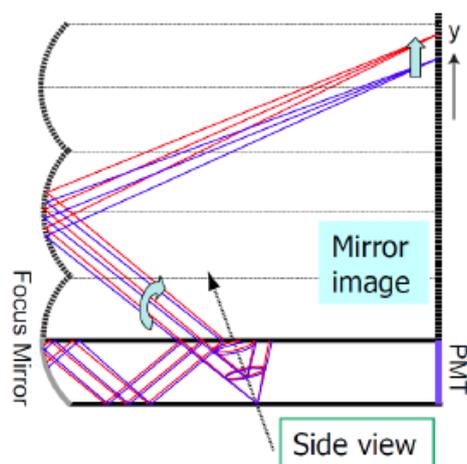


図 1.6: TOP カウンターのフォーカシング

ており、半径 5000mm の球を切り取ったものがデフォルトである。このフォーカシングミラーの機構を使うことで、特に伝播距離の大きい領域において時間分解能が改善し、識別能力が改善することが期待されている。

### 1.3.3 識別能力の評価

以上の条件でシミュレーションを行なって、K 粒子の efficiency と  $\pi$  粒子を K 粒子と間違える誤識別率  $\epsilon_{\pi}^K$  の評価を行なった結果を図 1.7 に示す [2]。横軸の  $\cos\theta$  は前方を  $\theta = 0^\circ$  としたときの値で、衝突点で生成した粒子が角度  $\theta$  で TOP カウンターに入射したときの位置を表わす。

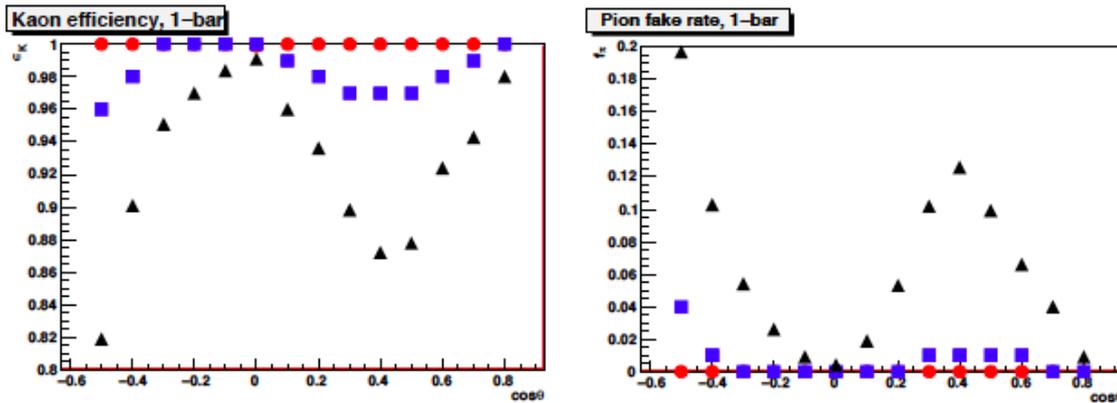


図 1.7: K 粒子の検出効率と  $\pi$  粒子の誤識別率:赤丸 (1.5GeV/c) 青四角 (2.5GeV/c) 黒三角 (3.5GeV/c)

この結果から、TOP カウンターの Belle II 実験に於ける識別能力が粒子の運動量が 2.5GeV/c 以上で検出効率 >95%、誤識別率 <4% である事が分かる。

## 1.4 研究課題

ここ数年の開発現状は、2011 年に MCP-PMT の最終的な仕様を決定して、MCP-PMT が最終的に Belle II に搭載するのに十分な性能を満たしていることを示された。[3] また、石英板についても内部透過率や表面反射率などの要求を十分に満たしている事が分かっている。[4] さらに、フォーカシングシステムについても、実際にテストを行なって、本当に波長分散効果を抑えて時間分解能が改善していることを示されている。

これらの研究の流れの上で、2010 年 12 月にスイス CERN において  $\pi$  粒子を用いてプロトタイプ TOP カウンター (輻射体サイズ 1850mm×400mm×20mm、4ch MCP-PMT 9 個) のビームテストを行った。その結果から、シミュレーション通りに TOP カウンターが動作している事が確認され、フォーカシングによる時間分解能の改善についても評価された。しかし、このプロトタイプ TOP カウンターは、石英板サイズや MCP-PMT の測定領域が実機サイズの半分程度でしかなく、搭載する TOP カウンターとしての評価には

至っていない。また、ビームの入射位置も一点に絞っている為、より Belle II 実験に則した条件での評価も行わなければならない。

そこで、2012 年 10 月には、実機サイズの TOP カウンターの評価を行う事を目的とし、LEPS ビームラインにてビームテストを行った。このビームテストでは、CERN で使われた TOP カウンターではなく実際に BelleII 実験に搭載される予定のサイズ  $2400\text{mm} \times 450\text{mm} \times 20\text{mm}$  の石英板と 16ch-MCP-PMT を 16 個使用した TOP カウンター試作機を用いた。本研究では、その結果から確立した時間構成の手法と、データの詳細な理解によって明らかにした、ビームテストの改善点について述べる。

## 第2章 LEPS ビームテスト

この章では、兵庫県佐用郡にある高輝度放射光実験施設 SPring-8[5] における LEPS ビームライン [6] についての説明と、そこで行った二度に亘る照射テストの目的と概要について述べる。

### 2.1 Introduction

TOP カウンターのビームテスト環境として LEPS ビームラインを選んだ理由とその概要について述べる。

TOP カウンターを用いた照射テストを想定した際に、非常に重要になるのがビームの運動量である。高い運動量のビームを用いる事で、TOP カウンターに照射した際に多重散乱を抑えられる。また、TOP カウンターの評価としての速度分解能を見積もる上で、質量に対して運動量が十分に大きく、ビームの速度が  $\beta = 1$  と見なせる事も重要である。次に重要となるのが、実験を行う場所である。費用や時間等を考えると国内で照射テストを行えるという条件が、海外で行う事に比べて非常に合理的である。これらの条件を満たす実験施設として候補に挙がったのが SPring-8 の LEPS ビームラインである。

LEPS( The Laser Electron Photon experiment at SPring-8) ビームラインは、SPring-8 においてレーザー逆コンプトン散乱によって得られる 3 GeV 以下の  $\gamma$  ビームを用いた、ハドロン物理探索を行っている実験施設である。照射テストでは、 $\gamma$  ビームと鉛固定標的による対生成反応で生じた、電子ビームを用いる。この電子ビームは  $\gamma$  ビームと同程度の運動量をため、その高い運動量は電子の質量に比べ十分に大きく、 $\beta = 1$  と見なせる。このようなビームを利用出来るのは国内では 2012 年現在、LEPS ビームラインだけである。また、 $\gamma$  ビームによって作られる電子ビームは、 $\gamma$  ビームに対して常に  $0^\circ$  で放出される。そのため、前方スペクトメータ系の双磁極電磁石で曲げられた電子は、位置と運動量に強い相関を持つ。よって、トリガー位置を決める事で、容易に高い運動量に絞った実験を行う事が出来る。更に、下流に設置された TOF(Time Of Flight) 検出器は、シャワーなどを起こしたイベントに対する veto カウンターとしても利用出来る。

以上の理由により、我々は 2012 年 4 月 10 月と二度に亘って照射テストを行った。また 2013 年 4 月にも LEPS ビームラインで照射テストを予定している。4 月に行った照射テストは、石英輻射体 (1850mm×400mm×20mm) と 4ch の MCP-PMT×9 個から成るプロトタ

イブ TOP カウンターを用いて、LEPS ビームラインでの照射テストが有用である事を確かめた。10月に行った照射テストは、実機サイズ(輻射体サイズ 2540mm×450mm×20mm、16ch の MCP-PMT×16 個) の TOP カウンターを用いて、実際の Belle II 実験を想定した評価を行う事を目的とした。そのため以降では、10月に行った照射テストに焦点を当て、より具体的な事について述べていく。

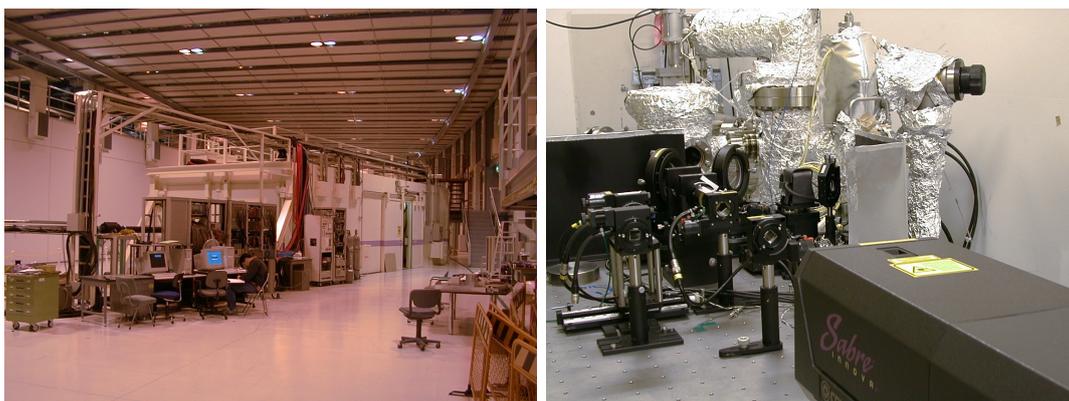


図 2.1: LEPSbeamline:右図実験ホール、左図レーザー系

## 2.2 SPring-8 加速器

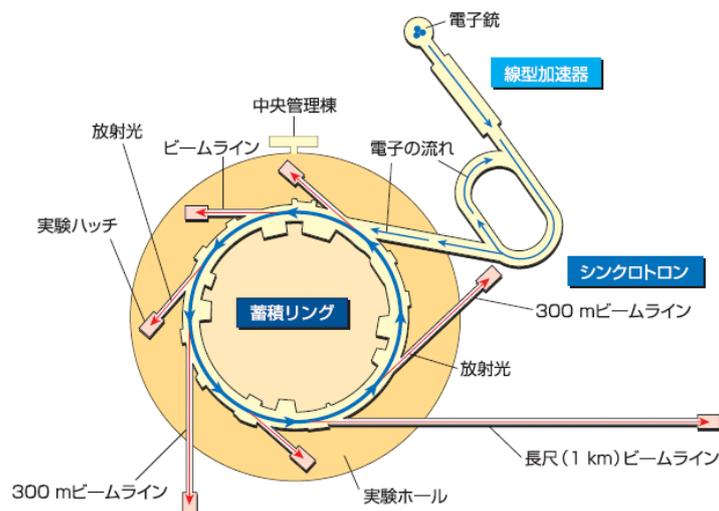


図 2.2: SPring-8

SPring-8 は第三世代の放射光施設であり、図 2.2 のように線形加速器、シンクロトロン、蓄積リングから成る。SPring-8 では、線形加速器で電子を  $1 \text{ GeV}$  まで加速し、シンクロトロンへ入射する。更に、シンクロトロンにより  $8 \text{ GeV}$  まで加速され、周長約  $1.5 \text{ km}$  蓄積リングに蓄積される。蓄積リング内では、 $2436$  個の bunch(電子束) が蓄積され、各実験施設で利用されている。

## 2.3 LEPS ビームラインのコンフィグレーション

### 2.3.1 逆コンプトン散乱

レーザー光を蓄積リングに入射することで、電子とレーザーの逆コンプトン散乱により、高エネルギーの  $\gamma$  線が得られる。図 2.3 に逆コンプトン散乱の模式図を示す。このとき散乱光子のエネルギー  $k'$  は入射レーザーのエネルギー  $k$ 、電子ビームのエネルギー  $E_e$ 、 $\beta = k/E_e$  を用いて次式のように表される。

$$k' = \frac{k(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta_2 + \frac{k(1 - \cos(\theta_2 - \theta_1))}{E_e}} \quad (2.3.1)$$

例えば入射レーザーとして、約  $350 \text{ nm}$  のアルゴンイオンレーザーを用いれば、最大  $2.4 \text{ GeV}$  の  $\gamma$  線が得られる事が分かる。

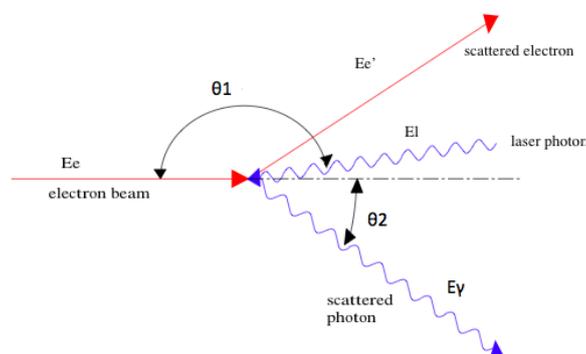


図 2.3: 反応模式図

### 2.3.2 スペクトロメータ

実験に使用した電子ビームの解析を行う為の検出器について述べる。図 2.4 に荷電粒子の運動量及び速度を測定する LEPS スペクトロメータの模式図を載せる。上流から UPVeto カウンター、シリコンバテックス検出器、DC(Drift Chamber)1、双曲電磁石、DC2、DC3、TOF カウンターの順に並んでいる。また、蓄積リング内に  $\gamma$  線のエネルギーを測定する為のタギング検出器が置かれている。

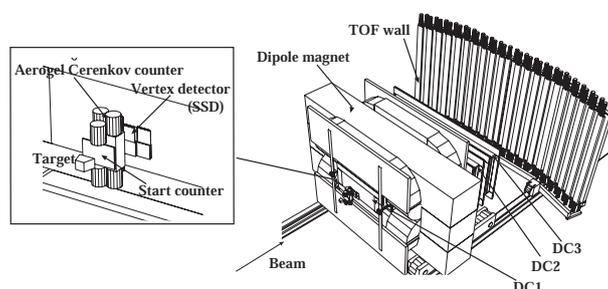


図 2.4: スペクトロメータ

#### ドリフトチェンバー

荷電粒子の飛跡を検出し、運動量の測定に用いられる。双曲電磁石の上流に DC1、下流に DC2、DC3 が設置されている。位置分解能は約  $200 \mu\text{m}$  である。

#### 双曲電磁石

荷電粒子の運動量分析の為に電磁石。電流 800 A、中心磁場 0.7 T で運転される。

### TOF 検出器

40 本のプラスチックシンチレータで構成されている。角プラスチックシンチレータは長さ 2000 mm、幅 120 mm、厚さ 40 mm でそれぞれ 10 mm の重なりを持って配置されている。現在の時間分解能は約 120 psec で、2 GeV/c の運動量の  $\pi$  中間子と K 中間子に対して約  $3\sigma$  の分解能を持つ。

## 2.4 4月に行われたビームテスト

この章では 2012 年 4 月に行われた LEPS ビームラインに於けるビームテストについて述べる。

この照射テストでは、石英輻射体 (1850mm×400mm×20mm) と 4ch の MCP-PMT×9 個から成るプロトタイプ TOP カウンターを用いてテストを行った。主な目的は、LEPS ビームラインでの照射テストが有用であることを確かめる事である。照射テストに用いたビームは運動量 1 ~ 2 GeV/c を持つ電子ビームである。

### 2.4.1 セットアップ

4 月に行われた照射テストで使用した TOP カウンターのセットアップを図 2.5 に示す。石英板のサイズは (1850mm×400mm×20mm) で、使用した MCP-PMT のチャンネル数は 4 チャンネルであり、石英板端面の中央に 9 個並べて実験を行った。また、照射テストのセットアップは図 2.6 の様に、左から DC、トリガーカウンター ×2、TOP カウンター、トリガーカウンター ×2、タイミングカウンター ×2、TOF 検出器の順番で配置した。また、3 つのトリガーカウンターのコインシデンスをトリガー信号としてデータ (トリガー数 3,141,667) を取得した。

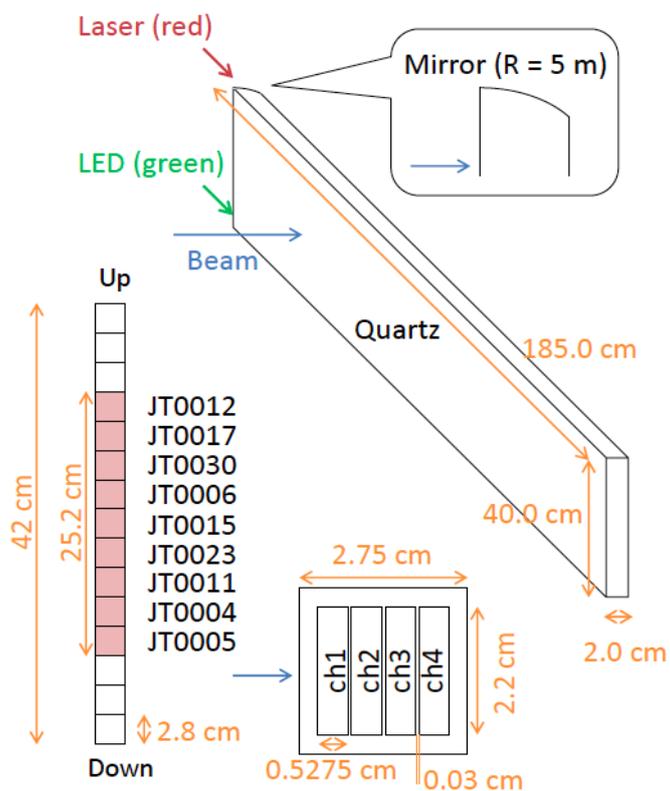


図 2.5: 4 月に行われたビームテストの TOP カウンターのセットアップ

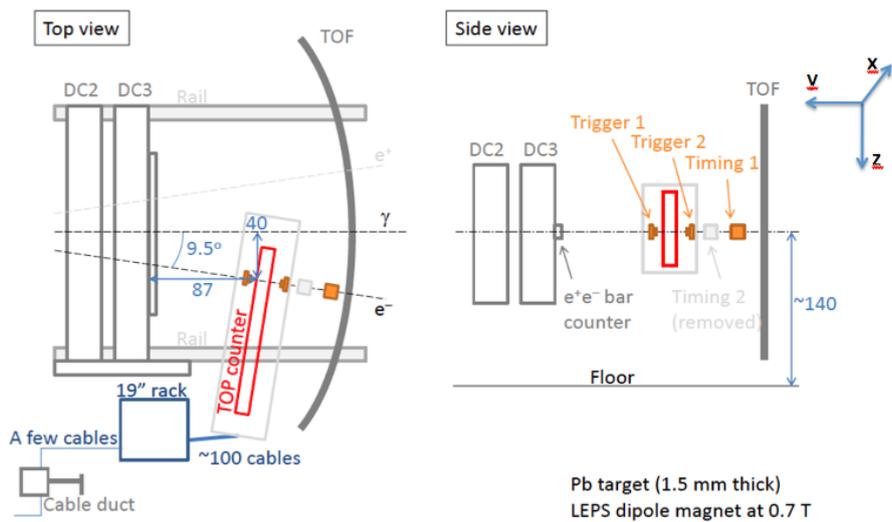


図 2.6: 4 月に行われたビームテストのセットアップ

## 2.4.2 結果

4 月に行われたビームテストについての解析結果について述べる。まず、TOP カウンターの時間分布と、シミュレーションで予想された時間分布を比較した結果を図 2.7 に示す。得られた時間分布が予想された時間分布と良く一致している事が分かる。

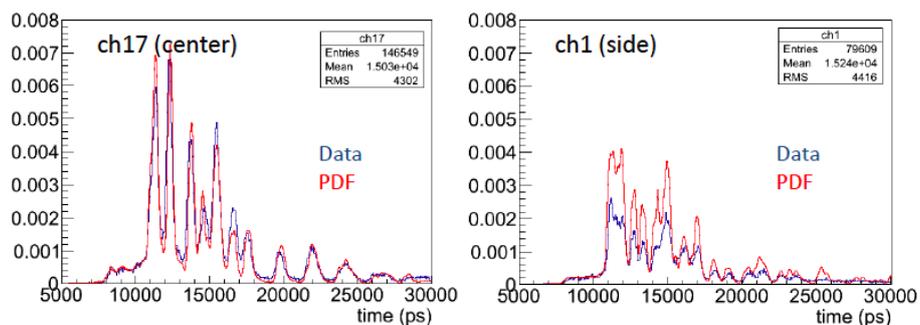


図 2.7: 4 月に行われたビームテストの結果より得られた TOP カウンターと PDF の時間分布の比較:左図 石英板中央の PMT、右図 石英板端の PMT

次に、TOP カウンターの評価として速度分解能を見積もった。結果は図 2.8 の通りであり、速度分解能  $\sigma_\beta = 0.0085$  の結果が得られた。これらの結果はモンテカルロで予想された結果と良く一致しており、LEPS ビームラインにおける照射テストが有用である事が確認出来た。

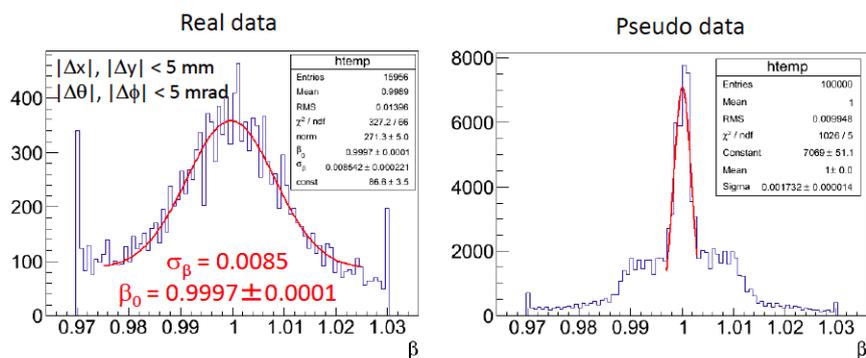


図 2.8: 4 月に行われたビームテストの解析結果より得られた速度分解能:左図 測定データ、右図 MC

## 2.5 10月に行ったビームテストの目的

4月に行った照射テストで用いたプロトタイプ TOP カウンターは、実機サイズの半分程度であった。それに対して、今回のビームテストではサイズ 2540mm×450mm×20mm の石英板と、16ch MCP-PMT×16 個を使用し、今まで行われていなかった実機サイズの TOP カウンターの性能評価を行う事を目的とした。また、実機サイズの石英板とその全領域をカバーした MCP-PMT を使用した今回のビームテストは以下の三点が Belle II 実験の為の最終的な評価につながる事が期待される。

1. 石英板を長くする事でチェレンコフ光がより長い距離を伝播する事で精確な粒子識別が可能
2. 4ch MCP-PMT から 16ch MCP-PMT にする事で色収差をより詳細に分ける事が可能
3. 石英板の端面の全領域をカバーする事でヒット数が増え、より正確なリングイメージを見る事が可能

## 2.6 ビームテストのセットアップ

### 2.6.1 石英板

今回のビームテストではより TOP カウンター実機に近いものを製作し、ビームテストを行った。これまでに製作されたプロトタイプとの違いを図 2.9 に示す。

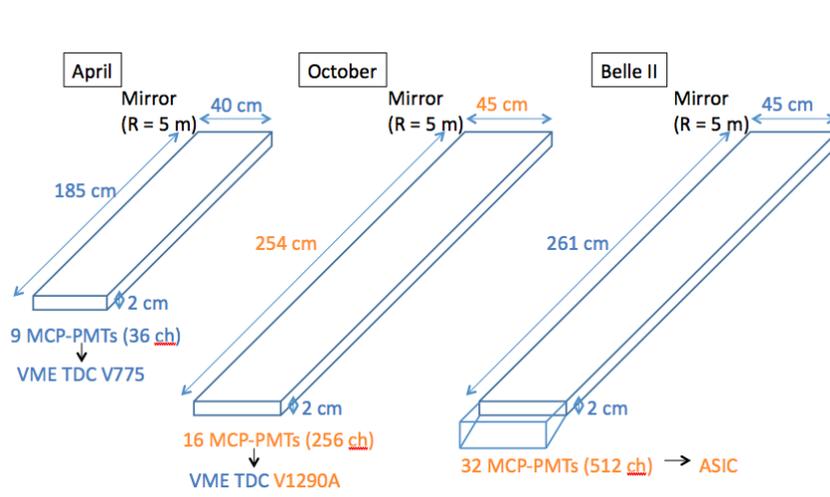


図 2.9: TOP カウンターのサイズ

4月に行われた照射テストで使用された石英板のサイズは 1850mm×400mm×20mm であり、10月に使用した石英板のサイズは 2540mm×450mm×20mm である。それに対して実際に Belle II 実験で使用される石英板のサイズは 2610mm×450mm×200mm である。10月に使用した石英板がより実機サイズに近い事が分かる。また、今回の照射テストでは 16 チャンネルの MCP-PMT を 16 個使用しているが、Belle II 実験では更に検出光子数を増やす為にエキスパンションブロックを用いて、16 チャンネルの MCP-PMT を 32 個使用する予定である。

### 2.6.2 MCP-PMT

4月と10月に用いられた MCP-PMT の違いについて述べる。4月に用いられた MCP-PMT のチャンネル数は 4 チャンネルになっており、10月に用いられた MCP-PMT は 16 チャンネルである。そのチャンネルのイメージと実際の写真を図 2.10 に載せる。また 10月に使用した 16 本の内、JT0763 の時間分解能と QE を図 2.11 に示す。その時間分解能は 35 psec であり、QE は平均 >25% となっている。

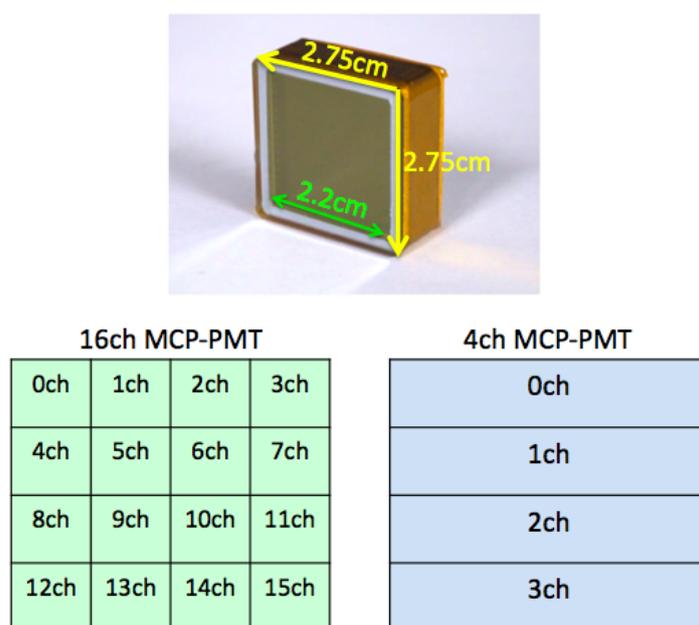


図 2.10: MCP-PMT の実物とチャンネルのイメージ図

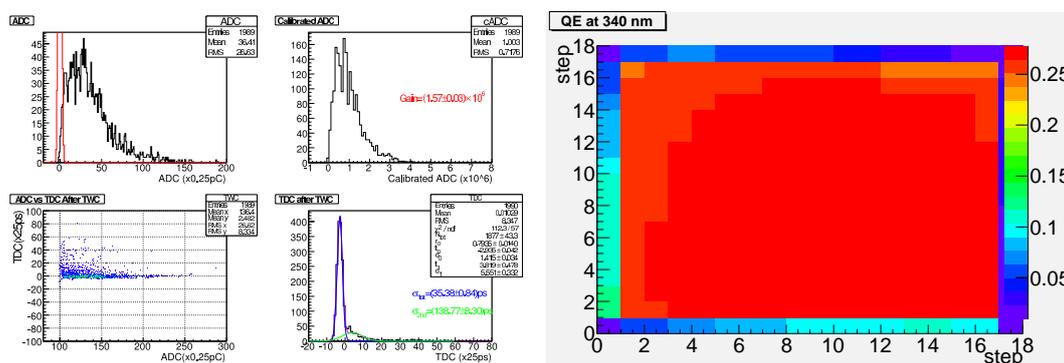


図 2.11: JT0763 の基本測定 (時間分解能、gain) 及び QE 測定:左図 基本測定、右図 QE 測定 (横軸縦軸:測定ステップ数 [1 ステップ 1.375mm])

### 2.6.3 フロントエンドモジュール

今回の照射テストで使われた MCP-PMT の読み出し回路基板と HV モジュールについて説明する。読み出し回路基板として使われたのが CFD(Constant Fraction Discriminator) ボードである (図 2.12)。この CFD の原理について説明する。まず、ある閾値を超えた入力



図 2.12: CFD ボード (右) と、その時間分布

信号を二つに分け、一方を反転し減衰させ、更に遅らせる。次に、その二つの信号を合成し、合成した信号の波高が 0 となった時間でデジタル信号を出力するという仕組みになっている。この仕組みを利用する事で、通常のディスクリミネータを使用した際の信号の積分電荷量の違いによる時間のふらつきがなくなる。このような基板を使う事は、時間情報を使って評価を行う TOP カウンターにとって重要である。CFD の時間分解能を調べる為に CFD にアナログ信号を入れ、今回の照射テストで用いた TDC を使って、時間分解能を評価した (図 2.13)。評価結果は  $\sigma = 34$  psec である。この値は TDC が持つ時間分解の値と一致するので、照射テストに用いても問題ない事が分かっている。また、今回の照

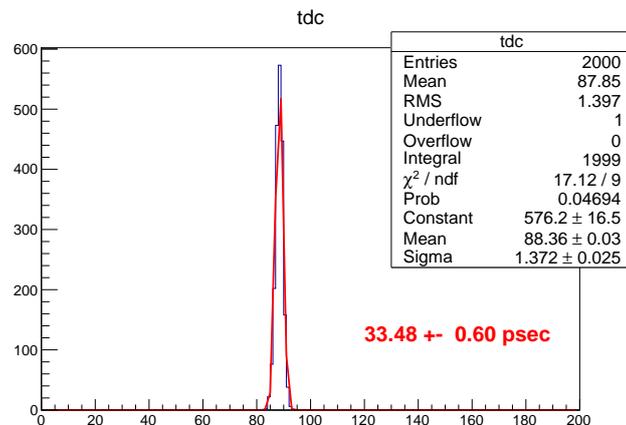


図 2.13: CFD ボードの時間分布

射テストでは、MCP-PMT のチャンネル数が 256 チャンネルと多いので、この CFD を使用した際にクロストークが懸念される。それを調べる為に MCP-PMT に CFD を実装し、MCP-PMT のダークヒットが CFD でどのように見えるかを確認めた (図 2.14)。図からも分かる様に CFD が接続されているダークヒットの他にグラウンドの揺れが確認出来る。そのため、実際に使用した際はクロストークの影響を加味しなければならない。また、HV

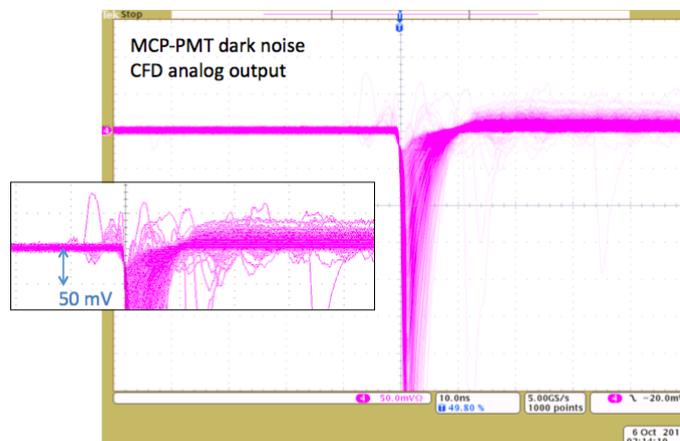


図 2.14: CFD で見た MCP-PMT のダークヒット

モジュールについては MCP-PMT は 16 チャンネルになっているので、HV を 16 チャンネル分を分配するモジュールが必要になる。実際の Belle II 実験では、読み出しと HV の回路は ASIC を用いたものになる。しかし、今回は研究室で読み出し回路と HV モジュー

ルを用意しなければならなかったため、HV モジュールについても事前に放電テスト等を行って問題なく使用出来る事を確認した。HV モジュールとフロントエンドモジュール全体の写真を図 2.15 に示す。

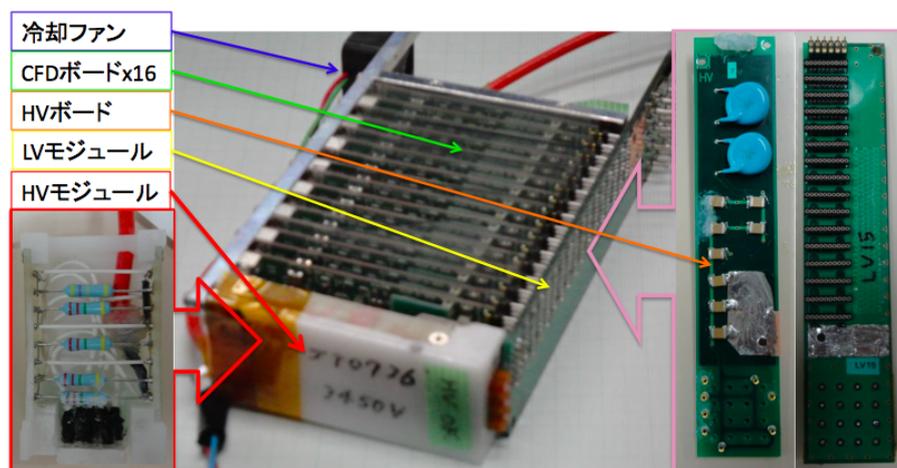


図 2.15: フロントエンドモジュールの全体像

#### 2.6.4 トリガーカウンター

今回の照射テストの為に  $5\text{mm} \times 5\text{mm}$  (図 2.18 の S1 と S2) と  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$  (図 2.18 の L1 と L2) のアクリルシンチ (Saint-Gobain 社 BC-418)、ライトガイド、時間分解能  $0.2\text{ nsec}$  の光検出器 (浜松ホトニクス R9880U-01) から成るカウンターを時間精度の良いトリガーカウンターとして作成した (図 2.16、表 2.1)。用意した 4 つの内の 3 つのコインシデンスをトリガー信号として使用した。このトリガーカウンターは設置する際のアライメントについては、まず、横方向に対しては、LEPS のシミュレーションにより得られた電子の位置と運動量の関係を基に、ビームの運動量が多重散乱の効果が小さい  $2\text{ GeV}/c$  になる位置に設置した。次に高さ方向に対しては、墨出し器によって電子ビームの高さに合わせ、更に  $\gamma$  ビームを照射して、その検出率の最も多い位置をスキャンする事でアライメントを行った (図 2.17)。

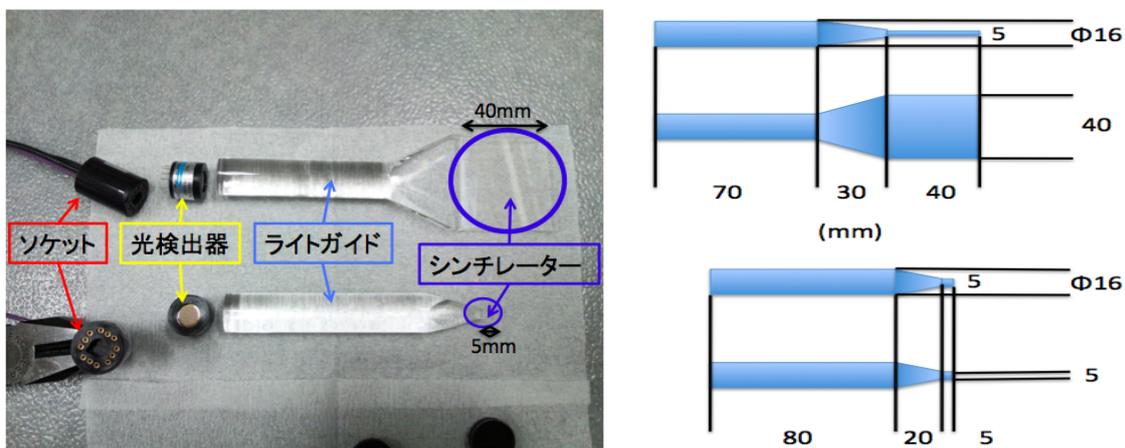
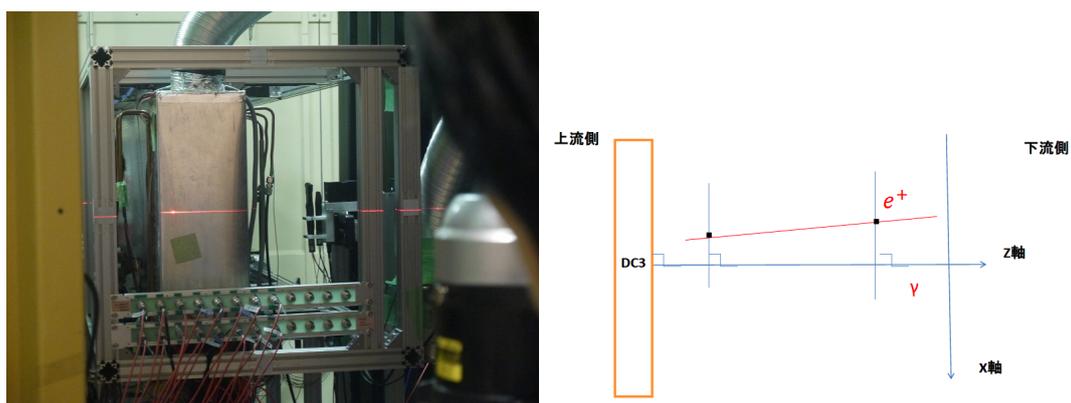


図 2.16: トリガーカウンター構成とサイズ

名称	有効面積 (mm×mm)	厚さ (mm)	PMT
S1	5 × 5	5	HAMAMATSU R9880U-01 [7]
S2	5 × 5	5	HAMAMATSU R9880U-01 [7]
L1	40 × 40	5	HAMAMATSU R9880U-01 [7]
L2	40 × 40	5	HAMAMATSU R9880U-01 [7]

表 2.1: トリガーカウンター

図 2.17: トリガーカウンターの墨出し器と  $\gamma$  ビームによる設置アライメント

## 2.6.5 DAQ

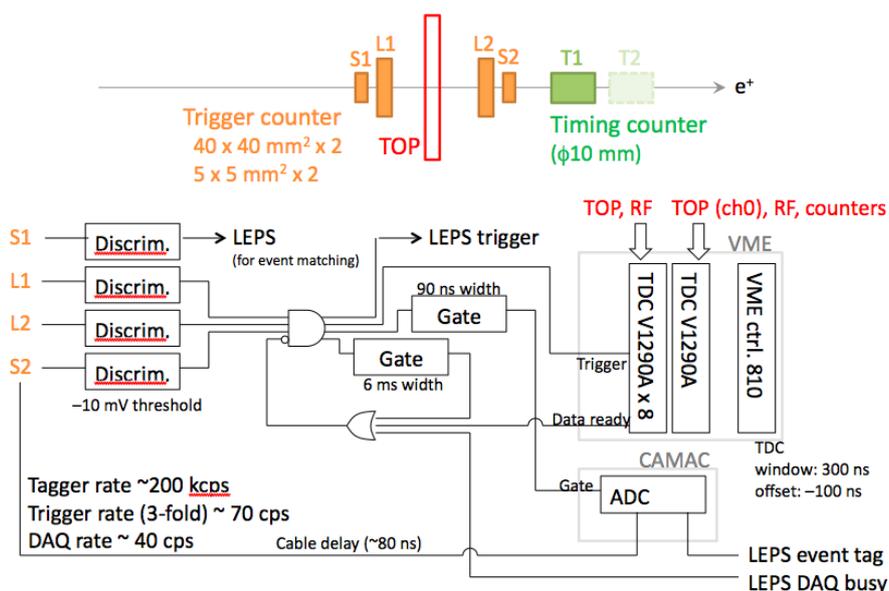


図 2.18: トリガー系及びデータ収集系

今回のビームテストでは図 2.18 の様にデータ収集を行った。全ての時間情報は VME 規格の TDC を用いて取得した。3 つのトリガーカウンターを用いてコインシデンスを取り時間情報のトリガーとした。更に、加速器の RF 信号の時間精度がバンチ幅の 10 psec 程度である事を利用し、時間原点として使用する為、そのデータも取得している。また下流側にある TOF カウンターはシャワーイベントの除去等に用いられる。

## 2.6.6 照射テストのセットアップと入射条件

今回のビームテストでは基本となるデータと、より Belle II 実験に近いデータを取得する為に、次の 3 つ入射条件で実験を行った。exp1 : 垂直入射 ( $\cos \theta = 0.0$ ) トリガー数 2,397,532(図 2.19)、exp2 : 60° 入射 ( $\cos \theta = 0.4$ ) トリガー数 4,090,821(図 2.20)、exp3 : 端への 60° 入射 ( $\cos \theta = 0.4$ ) トリガー数 4,960,424(図 2.21)(表 2.2)。

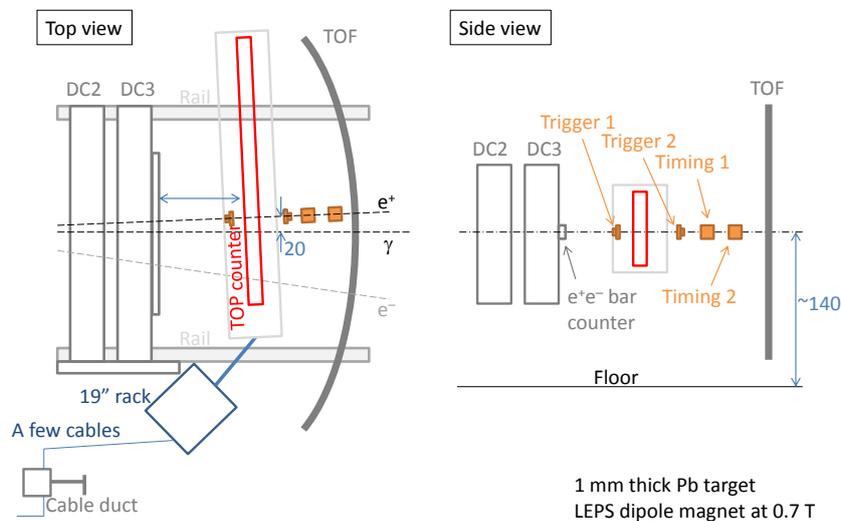
1. exp1 : 図 2.19:クォーツに対して垂直に電子ビームを照射している。  
この条件では最もリングイメージが見やすく光子数のロスも少ないので、この条件での性能が基準と成る

2. exp2 : 図 2.20:クォーツに対して  $30^\circ$  傾けた状態で電子ビームを照射している。
3. exp3 : exp2 の状態からそのまま  $z$  軸に対して水平に 200 mm TOP カウンターの位置を下げた。
- exp2 と exp3 の条件で得られる光子数のロスやリングイメージの結果が、実際の Belle II 実験に即した結果になると考えている。

exp	$\cos \theta$	高さ (mm)	トリガー数
exp1	0	0	2,397,532
exp2	0.4	0	4,090,821
exp3	0.4	+200	4,960,424

表 2.2: ビームテスト条件

10

Setup ( $\cos \theta = 0$ )図 2.19: セットアップ ( $\cos \theta = 0.0$ )

Setup ( $\cos\theta = 0.4$ )

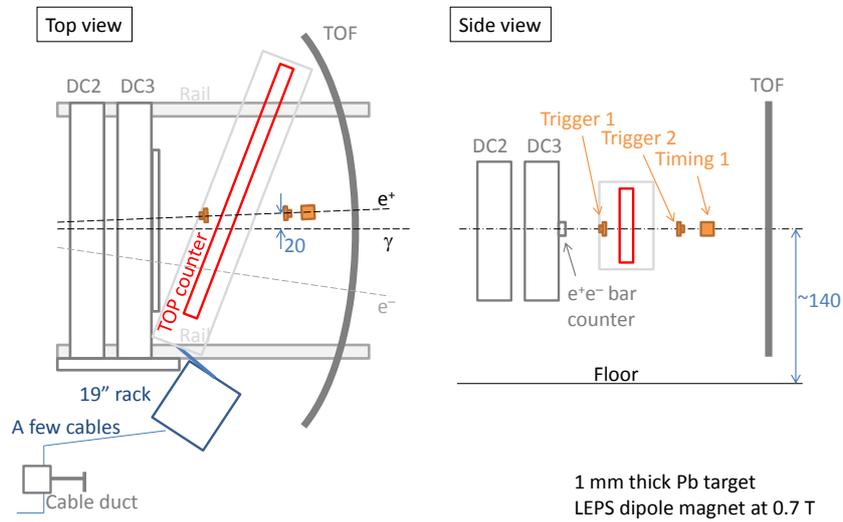


図 2.20: セットアップ ( $\cos\theta = 0.4$ )

Setup ( $\cos\theta = 0.4$   $z=-200\text{mm}$ )

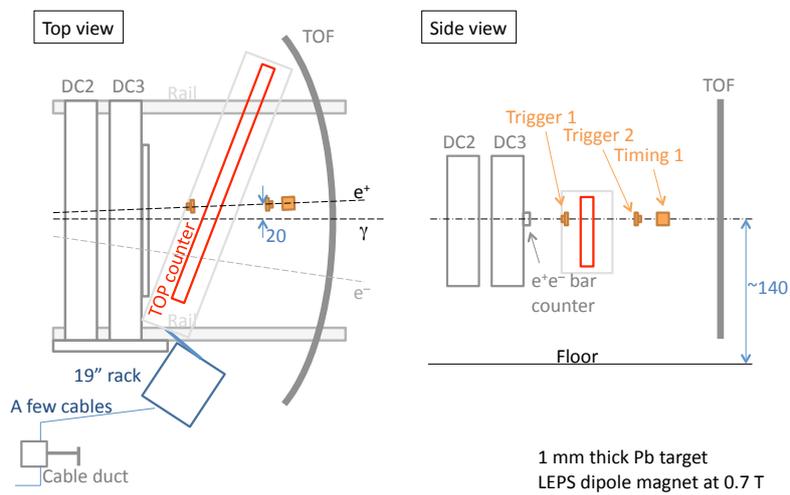
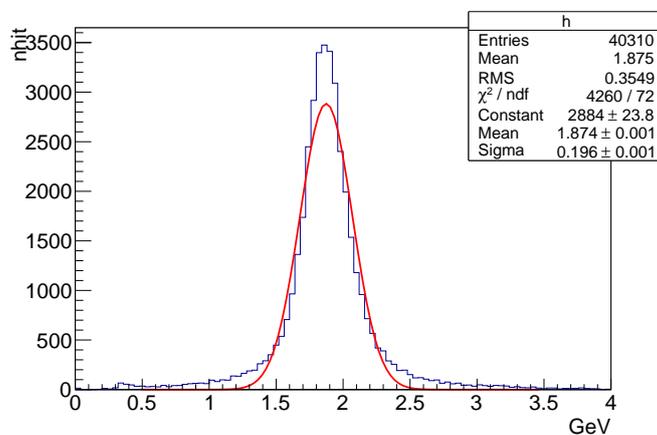


図 2.21: セットアップ ( $\cos\theta = 0.4$   $z=-200\text{mm}$ )

2.6.7  $e^+, e^-$  ビーム図 2.22:  $e^-$  ビームの運動量分布

今回行ったビームテストでは、逆コンプトン散乱で得られた  $\gamma$  線を厚さ 1mm の鉛の固定標的に当て、対生成によって得られた電子ビームを使用した。その運動量分布を図 2.22 に示す。この運動量は前項で述べたスペクトロメータによってトリガーカウンターの位置の測定している。この結果から、TOP カウンターに入射される電子ビームがほぼ 2 GeV であることが分かる。また、トリガーカウンターが正しい位置に置かれている事が分かった。

## 第3章 解析

### 3.1 解析の流れ

この節では、この章で行った解析の流れについて述べる。TOP カウンター評価において重要になるのが時間情報である。そこで TOP カウンター自体の解析を行う前に、使用した全てのカウンターに対して時間の基準となる時間原点を決める必要がある。その時間原点として使用したのが RF 信号である。まず RF 信号の時間精度を調査し、時間原点として利用し得るものであるかを評価した。次に、SPring-8 の蓄積リング内にはいくつもの bunch があるため全てのイベント毎に、どの bunch に属するイベントであるかを定める必要がある。そこで、トリガーカウンターに対して slewing 補正を行い、イベント毎に bunchID を決める解析を行った。以上の解析により正しく TOP カウンターの時間分布を解析出来る事を確認した。その上で、TOP カウンターの解析を行った。始めに、TOP カウンターの評価を見積もるにあたって、TOP カウンターの要である MCP-PMT の全チャンネルに対して、どのチャンネルが解析に用いる事が出来るかを評価した。次に TOP カウンターとしてのデータが正しく理解できているを確認する為に、照射テストでの TOP カウンターの振る舞いを再現した PDF を用いて比較する事でデータの質を評価した。以上の内容で解析を進めた。以降の節でそれぞれの解析について詳しく述べていく。

### 3.2 RF 信号の時間分解能

LEPS ビームラインに於けるビームテスト解析を行う上で、全てのカウンターに対して時間原点として用いる信号の評価を行う事は重要である。今回の照射テストで、その時間原点として使用した RF 信号の評価とその結果について述べる。

RF 信号は、SPring-8 加速器から提供される信号で、その蓄積リング内を回っている bunch(電子束)の時間間隔である約 2 nsec の周期で繰り返されるデジタル信号である。しかしながら、約 2 nsec 間隔で繰り返される信号を全て TDC で収集する事は困難である。そこでプリスケalerを用いて、全 bunch 数の約数である 1/87 の周期で繰り返すよう信号を間引いている。(以降では、その 1/87 に間引いた信号を指して RF 信号とする)

この RF 信号が、時間原点に使用出来る程度の時間分解能を有しているを確認する為に、二つの方法で RF 信号の時間分解能を評価した。RF 信号は約 2 nsec の bunch 間隔の

87 倍である約 170 nsec 間隔で信号が繰り返されている。それに対してトリガーされたイベントに対する TDC のタイムレンジは 300 nsec になっている。そのため、トリガーされたイベントに対して RF 信号は 2 回 TDC に入力される可能性が高い。そこでまず、その二つの HIT 情報を使い、TDC のスタートタイミングのイベント毎の違いを消す為に二つの差を取った。その時間分布を図 3.1 に示す。その差の分布に対してガウス関数を使ってフィッティングを行い、その sigma の値を  $\sqrt{2}$  で割ったものを RF 信号の時間分解能とした。

時間差の分布の sigma の値が 38.6 psec であるので、RF 信号の時間分解能は 27.3 psec となる。次に、RF 信号と同等以上の時間分解能を持つタイミングカウンターを 2 台用い

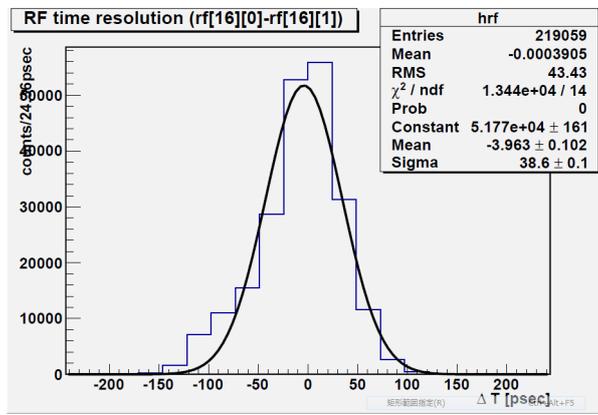


図 3.1: RF 信号の二つのヒットの時間差の分布:横軸 psec 縦軸 count

て RF 信号の時間分解能を評価した。2.6.5 節で述べた位置に設置したタイミングカウンターと RF 信号の差から上で述べた方法と同様に時間分解能を求めた。まず、二つのタイミングカウンターの時間差の分布を図 3.2 に示す。この図から得られたタイミングカウンター間の時間分解能は  $\sigma_{\text{timingA-timingB}} = 32.2 \text{ psec}$  と評価できる。一方で、タイミングカウンターと RF 信号の時間差の分布は図 3.3 の通りであり、タイミングカウンター A と RF 信号間の時間分解能は  $\sigma_{\text{timingA-RF}} = 37 \text{ psec}$  と評価出来る。また、タイミングカウンター B と RF 信号間の時間分解能は  $\sigma_{\text{timingB-RF}} = 37 \text{ psec}$  であった。全ての時間分解能には次式が成り立つ。

$$\sigma_{\alpha-\beta}^2 = \sigma_{\alpha}^2 + \sigma_{\beta}^2 \quad (3.2.1)$$

この関係式を用いれば RF 信号固有の時間分解能は

$$\sigma_{RF}^2 = (\sigma_{\text{timingA-RF}}^2 + \sigma_{\text{timingB-RF}}^2 - \sigma_{\text{timing-timing}}^2)/2 \quad (3.2.2)$$

と表す事が出来る。これにより見積もられた RF 信号固有の時間分解能は  $\sigma_{RF} = 28 \text{ psec}$  である。この結果は RF 信号のみを用いて行った評価  $\sigma_{RF} = 27 \text{ psec}$  と良く一致している。また同様に見積もったタイミングカウンターの時間分解能は  $\sigma_{\text{timing}} = 23 \text{ psec}$  である。

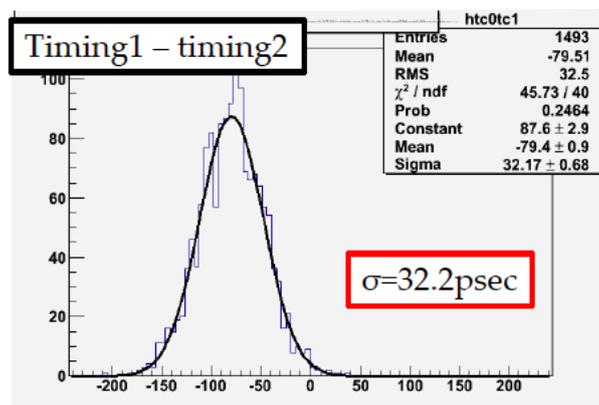


図 3.2: タイミングカウンターの二つのヒットの時間差の分布:横軸 psec 縦軸 count

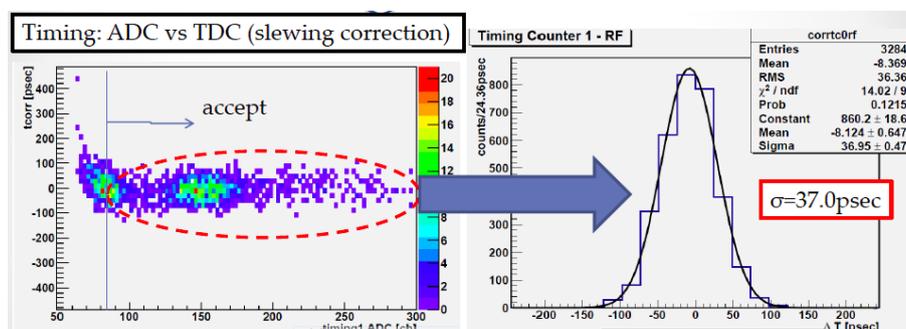


図 3.3: タイミングカウンターと RF 信号のヒットの時間差の分布:横軸 psec 縦軸 count

このようにして見積もられた RF 信号固有の時間分解能は MCP-PMT の時間分解能 50 psec に対して十分に小さいので、この RF 信号が非常に精度が良く、TOP カウンターの時間原点に使用出来る事が分かった。

### 3.3 トリガーカウンターを用いた bunchID

TOP カウンターの解析の為にイベント毎に時間原点を決める必要がある。前節では、加速器側から提供される RF 信号を十分に良い時間分解能で測定できており、TOP カウンターの時間原点としても使用できる事を示した。この節では bunch 構造の識別方法と、bunch 毎の時間原点の調整の方法について述べる。

我々は、2.6.5 節で述べた様にトリガーカウンター 3 つのコインシデンス信号を TDC のスタートタイミングとし、全てのカウンターの時間情報の収集を行った。実際に得られたトリガーカウンターと RF 信号との差の時間分布 (図 3.3) を見るとピークが数多くある事が確認出来る。この時間分布は、SPring-8 加速器の蓄積リング内の bunch 構造と、RF 信

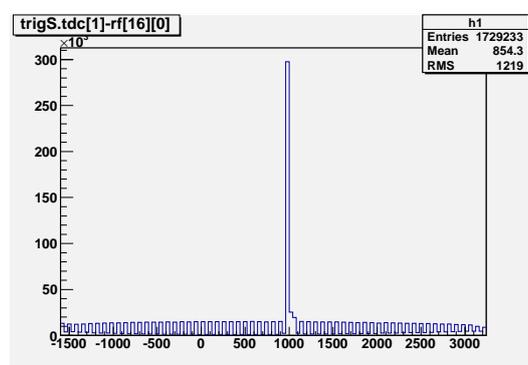


図 3.4: 取得したトリガーカウンターと RF の TDC の時間分布の差:横軸 TDCcount 縦軸 count

号の prescale によって説明が出来る。それらの概要を図 3.3 に示す。図の様に蓄積リング内には 342.1 nsec おきに電子数の多い bunch (メイン bunch: 図 3.3 の赤丸) が入っており、ある区間だけに全 bunch の 80% の bunch が約 2 nsec 間隔で詰まっているという構造になっている (図 3.3 の黄色の枠内)。その区間にある bunch に対応した電子ビームのイベントでは、常に時間原点に対して  $2\text{nsec} \times (\text{RF 信号のタイミング (図 3.3 の青線)})$  と電子ビームが作られる bunch との差) の時間でデータが取られる為、その bunch 構造が見えており、それらは高さが小さく、数の多いピークに対応している。また、一つだけある大きなピークは、蓄積リング全体に 342.1 nsec 間隔で存在するメイン bunch に対するピークである。メイン bunch は、電子の数が他の bunch に比べ多く、電子ビームが TOP カウンターに照射される確率が高い。更に、RF 信号の間隔 (171 nsec) とメイン bunch 間隔 (342.1 nsec) が倍数関係になっており、全てのメイン bunch に対して常に RF 信号と一定の時間差でデータが取得される為、このように一つだけ高いピークになっている。そこで、TOP カウンターの解析を行う為にはイベント毎に、どの bunch で発生したイベントであるかを定める必要がある。以下にその手法と結果について述べる。

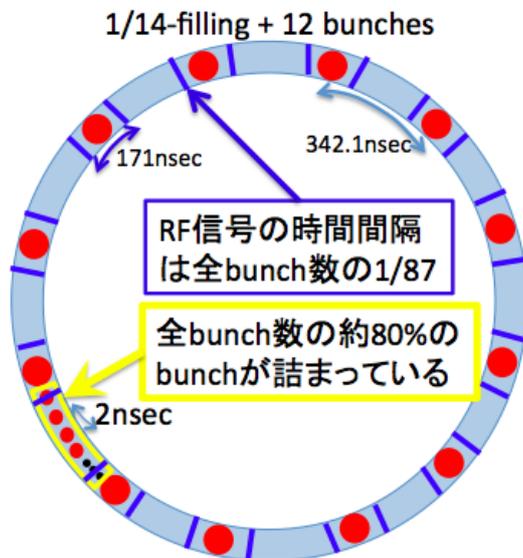


図 3.5: SPring-8 蓄積リング内の bunch 構造のイメージ図

今回の照射テストでは、トリガーカウンターの時間情報はアナログ信号をリーディングエッジタイプのディスクリミネーターを使用し、出力されたデジタル信号を TDC で取っている。そのため、トリガーカウンターの信号の積分電荷量に対してデジタル信号が出力されるタイミングが異なり、相関を持ってしまう。そのイメージ図を 3.6 に載せる。我々

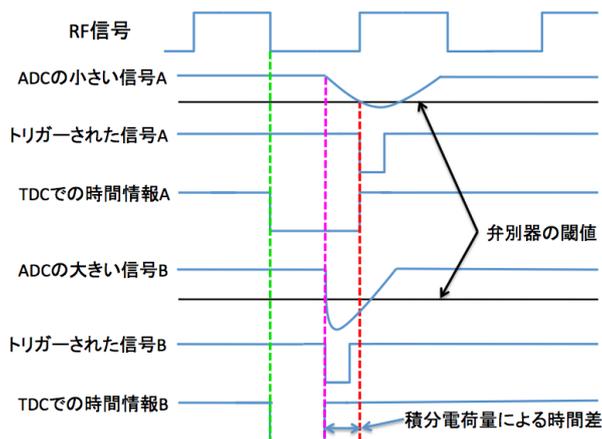


図 3.6: 信号の ADC による時間差のイメージ図

が見る事が出来る時間分布は、図 3.3 の様に 2 nsec 置きに並んだ分布をしている。積分電荷量との相関を持ったままでは、得られた時間分布を解析する際に、隣の RF 信号のタイミングで取られたイベントと bunchID を間違えてしまう可能性がある。どの RF 信号のタイミングで取られた HIT 情報であるかを正しく判断する為に、トリガーカウンターの信号の積分電荷量によるタイミングの違いを補正する必要がある。そこで slewing 補正を行った。また、解析を進めた結果、exp1 の条件での実験中は、トリガーカウンターの設置精度があまり良くなかった為に、本来トリガーカウンターの ADC 分布の高い領域にあるべき、構造物等によってシャワーなどを起こさなかった電子ビームのイベントがトリガーカウンターのライトガイドに電子ビームが当たる事で、低い ADC 領域に分布している事が分かった。更に、タイミングカウンターの設置精度も良くなかった為、検出効率が悪く、タイミングカウンターのデータを使って解析した場合、統計をかなり減らさなければいけない事も分かった。その為、時間分解能の良いタイミングカウンターのデータは使用出来ない。そこで時間分解能が悪く難しいが、確実にイベントが取得出来ていたトリガーカウンターを用いて、bunchID の決定を行った。また、slewing 補正のために使用した関数は下記の通りである。

$$\begin{aligned}
 & 387.882 - 11.2542 \times x + 0.073641 \times (x^2) \\
 & + 9.01063 \times 10^{-4} \times (x^3) - 1.75865 \times 10^{-5} \times (x^4) \\
 & + 1.21216 \times 10^{-7} \times (x^5) - 4.28595 \times 10^{-10} \times (x^6) \\
 & + 7.77884 \times 10^{-13} \times (x^7) - (5.75499 \times 10^{-16} \times x^8)
 \end{aligned} \tag{3.3.3}$$

( $x$  はトリガーカウンターの ADC)

まず始めに exp1 について slewing 補正を行い (図 3.7 右図)、exp2、exp3 については同様の slewing パラメータを使用し、補正を行った。結果を図 3.7、3.8 に示す。各 exp の図を見

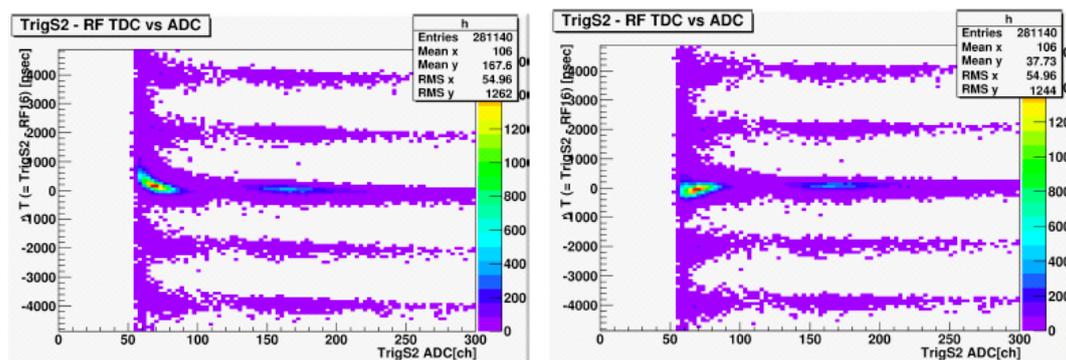


図 3.7: exp1 におけるトリガーカウンターと RF の TDC の差と ADC の二次元ヒストグラム (横軸 ADC 縦軸 psec) : 左図 補正前、右図 補正後

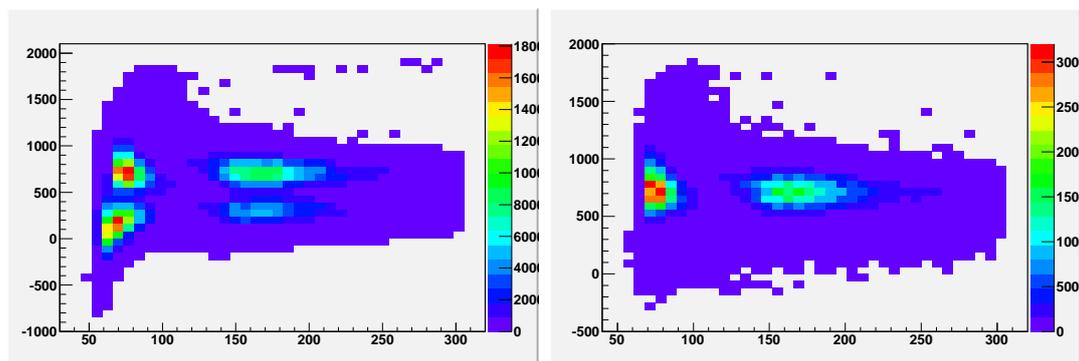


図 3.8: exp2 と exp3 における slewing 補正後のトリガーカウンターと RF の TDC の差と ADC のメイン bunch だけに注目した二次元ヒストグラム (横軸 ADC 縦軸 psec) : 左図 exp2、右図 exp3

ても分かるように、補正後で相関が小さくなっている事が確認出来る。次に、補正後の時間分解能がどうなっているかを確認する為に、メイン bunch に注目してガウス関数を用いてフィッティングを行った。その結果を図 3.9 に示す。それぞれの sigma の値から得られた分解能は exp1→151.5 psec、exp2(run<20)→132ps、exp2(run≥20)→103ps、exp3→104.5 psec となっている (表 3.1)。

exp	分解能 (psec)
exp1	151.5
exp2(run<20)	132
exp2(run≥20)	103
exp3	104.5

表 3.1: 各 exp のメイン bunch の分解能

また、図 3.8 の左図で二つ見る事が出来るピークは run=20(各 exp で実験を複数の run に分けてイベントを取っている)以降で、使用しているディスクリミネーターの閾値を変更した事によってデジタル信号が出力されるタイミングが全体にシフトした事に起因している。

次に slewing 補正後に run によって個性がないかを調べる為に、各 exp について run の依存性を確認した (図 3.10:run#5~25→exp1、run#55~85→exp2、run#126~146→exp3)。図 3.10 から分かるように mean、sigma 共にふらつきは 15psec 程度であり、slewing 補正の結果が良い事が分かる。このふらつきは MCP-PMT の時間分解能 45psec に比べても小さく TOP カウンターの時間分解能には影響がない事が分かった。

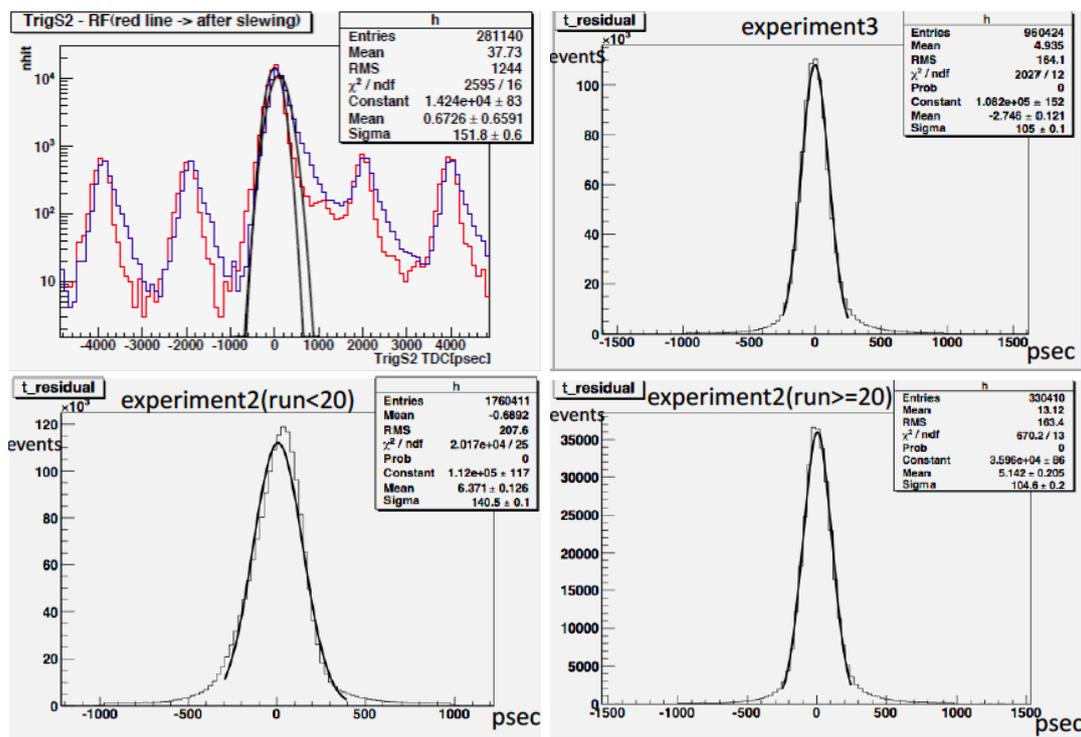


図 3.9: slewing 補正後のメインピークに注目した 1D ヒストグラム (横軸 psec 縦軸 count): 左上 exp1(slewing 補正前後の絵を重ねている)、右上 exp3、左下 exp2(run<20)、右下 exp2(run $\geq$ 20)

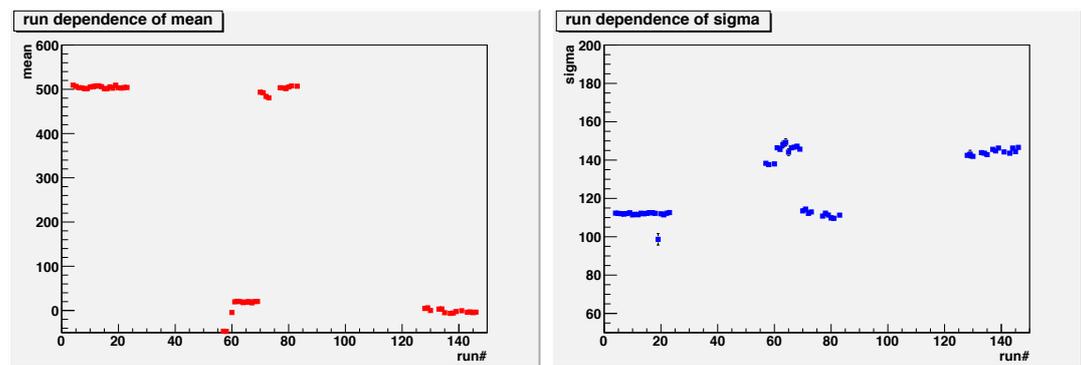


図 3.10: メイン bunch のピークに対する sigma と mean の値の run 依存性:左図 mean 値 (横軸 run 番号 縦軸 mean 値)、右図 sigma 値 (横軸 run 番号 縦軸 sigma 値)

最後に RF の時間間隔である約 2 nsec で並んでいる時間分布に対して、それぞれの bunch のイベント毎にオフセットを決めてやり、全てのイベントを一つに纏めた結果を示す。オフセットは加速器の解析から得られた RF 信号の時間間隔  $1.96626 \pm 0.000001$  nsec を用いて、メインピークからそれぞれのピークがいくつ隣にあるかを見て、その値を RF の時間分解能にかける事でオフセットとした。その結果を図 3.11 に示す。各 exp で sigma の値から得

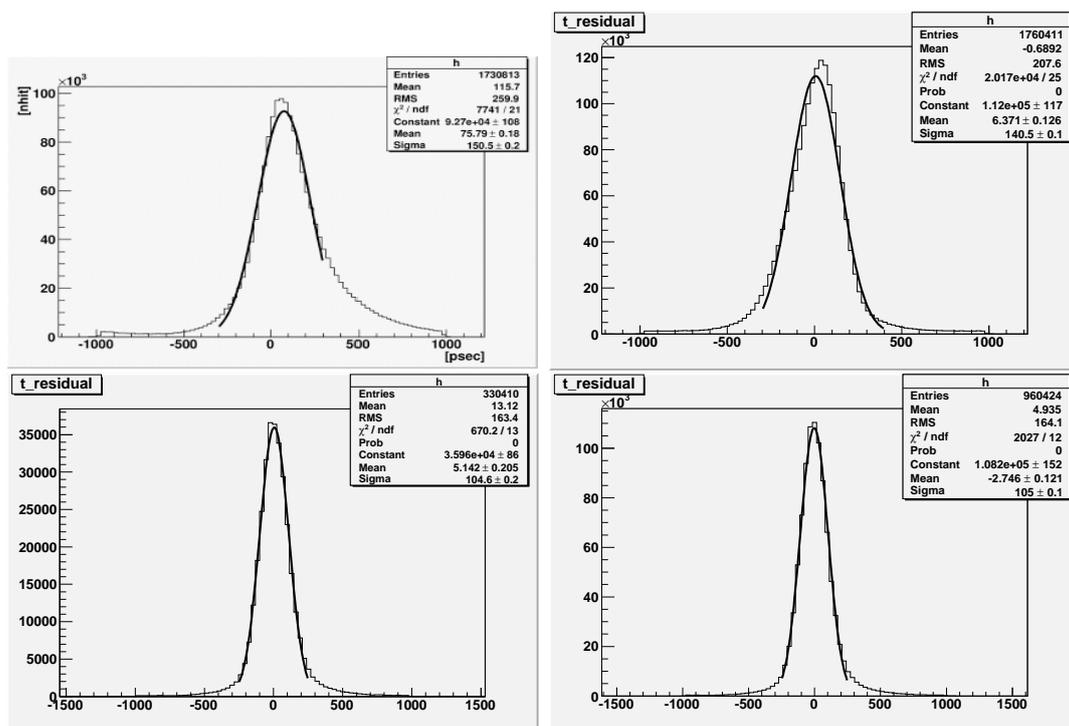


図 3.11: 各 exp で全てのイベントを一つに纏めたトリガーカウンターと RF 信号の時間差の分布: 左上 exp1 [横軸 psec、縦軸 count]、右上 exp2 (run < 20) [横軸 psec、縦軸 count]、左下 exp2 (run  $\geq 20$ ) [横軸 psec、縦軸 count]、右下 exp3 [横軸 psec、縦軸 count]

られた値が exp1  $\rightarrow$  151 psec、exp2 (run < 20)  $\rightarrow$  140 ps、exp2 (run  $\geq 20$ )  $\rightarrow$  104 ps、exp3  $\rightarrow$  105 ps となっている (表 3.2)。

この値は図 3.9 で示した値と良く一致しており正しく offset が決められている事が分かった。また、RF 信号の時間間隔の 2 nsec に比べ十分に小さい値であるので、全てのイベントに対して bunchID が正しく出来ている事も分かった。

---

exp	分解能 (psec)
exp1	151
exp2(run<20)	140
exp2(run $\geq$ 20)	104
exp3	105

---

表 3.2: 各 exp の全イベントを纏めた分解能

### 3.4 トリガーカウンターの設置精度の評価

ここで、今回の照射テストでトリガーカウンターの設置精度が各 exp でどのように見えるかを確認した。

exp1 でトリガーカウンターの設置精度が悪い事は、トリガーカウンターの ADC の分布を見れば判断出来るが、今後の照射テストの為に簡単にその事について述べておく。図 3.12 の各 exp の ADC 分布をみて分かる様に exp1 から exp3 に移るにつれて ADC 分布の二つのピークが左のピークが小さくなるに従い右のピークが大きくなっている事が分かる。これは、exp1 から exp3 にかけて電子ビームが正しくトリガーカウンターのシンチレータに当たる事で、ADC の大きいイベントが増えた為である。トリガーカウンターの構造は図 2.16 のようになっており、トリガーカウンターがビーム軸からズレた場合、電子ビームがライトガイドに当たってしまう。その際、シンチレータに当たった場合に比べ、光検出器で検出されるチェレンコフ光の光量が減ってしまい、電荷量の小さい信号が多くなる事が原因となっている。

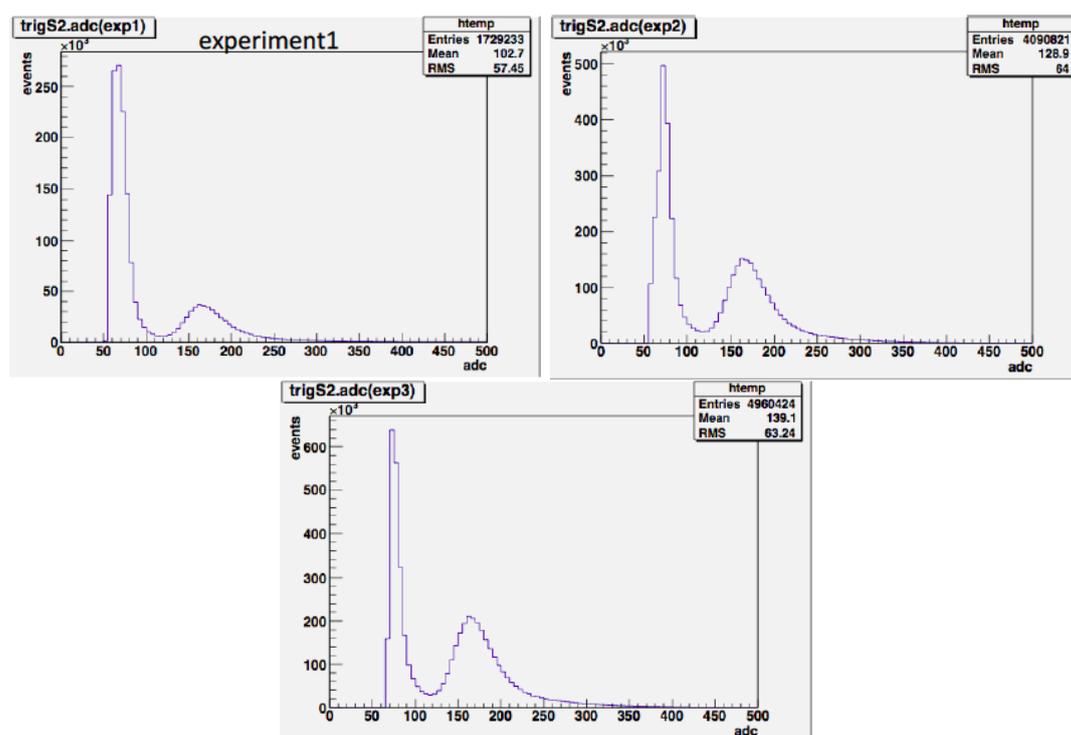


図 3.12: 各 exp での ADC 分布:横軸 ADC 縦軸 count:左上図 exp1、右上図 exp2、下図 exp3

### 3.5 RF 信号を用いた TDC の時間分解能の較正

TOP カウンターの評価を行う上で、重要な時間情報の収集を行うのが TDC である。今回使用した TDC は TDCtester を使用して照射テストを行う前に事前に較正を行っており、その較正により得られた TDC の時間分解能は 24.36 psec である。しかし、より正確な較正を行う為に RF 信号の時間間隔が  $1.96626 \pm 0.1 \text{ psec}$  である事を利用し TDC を較正を行った。実際に TDC で取得した RF の時間情報から得られた bunch 間隔に対して、予想される bunch 間隔をプロットした。その結果を図 3.13 に示す。この比較によって得られた傾きは両者にズレがあるため 0.9979 となっている。この傾きから正確な TDC の時間分解能は 24.41psec であることが分かった。

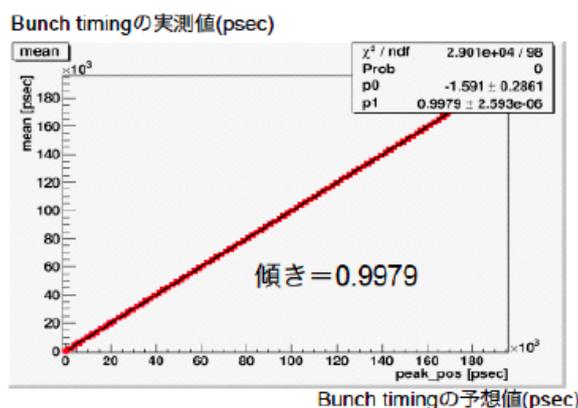


図 3.13: TDC の時間較正:縦軸はデータから得られた時間分布の mean 値、横軸は bunch 間隔から予想される時間

### 3.6 時間原点のまとめ

ここまでの節で TOP カウンターの時間原点の較正とビームテストの評価について述べてきた。今後の節では、TOP カウンターについての解析手法とその結果を述べていく。そこで時間原点の較正について今一度まとめておく。

全てのカウンターに対して時間原点として使用する RF 信号の時間分解能は  $\sigma_{RF} \simeq 27 \text{ psec}$  であり、この値は MCP-PMT の時間分解能 50 psec に比べ、十分に小さいので時間原点として使用出来る事が分かった。

次に、全てのイベントに対して bunchID を正しく決める為に、トリガーカウンターに対して slewing 補正を行った。その上で、RF 信号の時間間隔が  $1.96626 \pm 0.00001 \text{ nsec}$  で

ある事を利用し、全 bunch を一つに纏めた。その結果得られた時間分布の sigma の値は exp1→151 psec、exp2(run<20)→140ps、exp2(run≥20)→104ps、exp3→105ps となっており、この値は纏める前のメイン bunch のピークから得られた値と良く一致している。また、RF 信号の間隔約 2 nsec に比べ十分に小さい事から、bunch を纏める事は時間分布の広がりに影響を与えないことが分かったので、以降の TOP カウンターの解析を問題なく進める事が出来る。

### 3.6.1 リングイメージ

この段階でのリングイメージを確認した (図 3.14)。

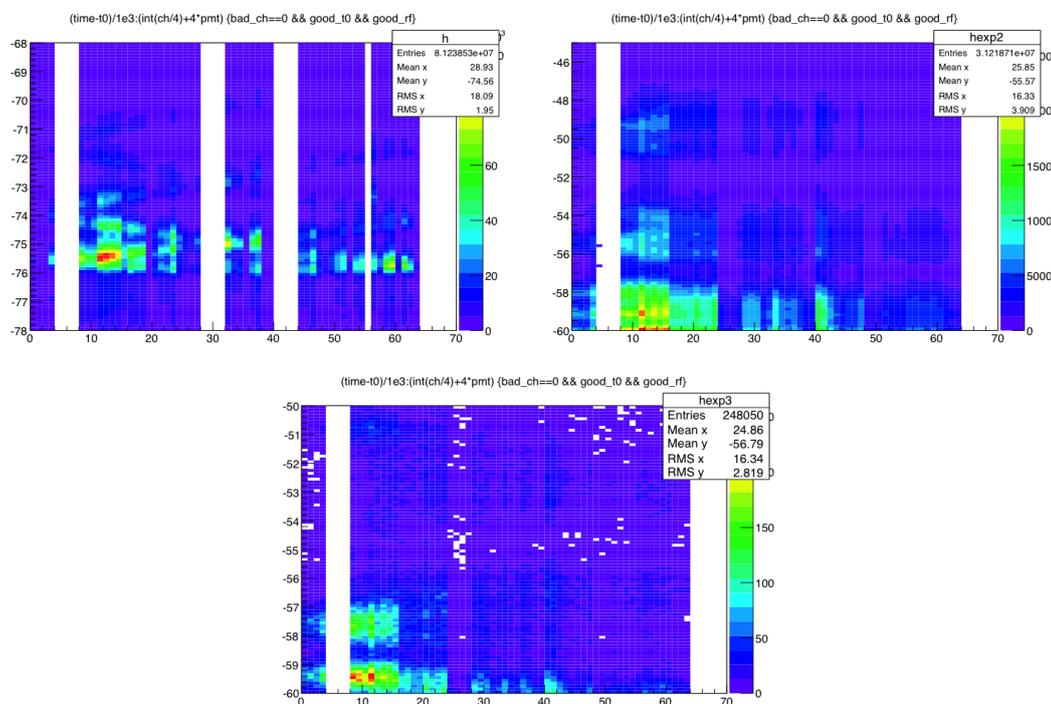


図 3.14: 各 exp でのリングイメージ [横軸:MCP-PMT チャンネル、縦軸:時間] : 左上 exp1、右上 exp2、下 exp3

図 1.2 の右図のようなリングイメージが確認できた。

## 3.7 Good チャンネルの評価

TOP カウンターの性能評価を行う前に、各 MCP-PMT チャンネルのデータをチェックした結果、解析に使えない Bad チャンネルがある事が分かった。以下では、Good チャンネルと Bad チャンネルの類別について述べる。

解析結果について述べる前に PDF について説明をする。

### 3.7.1 PDF

我々は、TOP カウンター全体の構造や MCP-PMT 等が持つ各パラメータを考慮して、照射テストでの TOP カウンターの各 MCP-PMT チャンネルの時間分布を、モンテカルロシミュレーションで再現した。その予想された全時間分布で、積分した値が 1 になる様に規格化したものを PDF と読んでいる。

### 3.7.2 結果

TOP カウンターの評価を行う上で、MCP-PMT の時間情報が重要になる。そこで、各 exp で MCP-PMT 全てのチャンネルについて PDF との比較を行い、解析に用いる事が出来るだけのデータが取れているかを確認した。その典型例を図 3.15 に示す。既に MCP-PMT の実験中の放電や、照射テスト後のヒットレートのチェック等から使えないと判断された Bad チャンネルは時間分布は示されていない。次に、PDF に比べピークの高さが同等もしくはそれ以上になっているものを Good チャンネルと評価した。最後に、PDF に比べピークの高さがおよそ半分以下になっているものを NewBad チャンネルとして評価している。(比較した PDF はビームのふらつきを考慮していない。ビームのふらつきを考慮に入れた PDF は後述する。) exp 毎に各 MCP-PMT チャンネルを Good チャンネル、Bad チャンネル、NewBad チャンネルと評価した結果を図 3.16、3.17、3.18 に示す。また、Bad 又は NewBad チャンネルとしたものは今後の解析では使用しないものとした。その上で、各 exp で使用出来るチャンネル数は exp1→100 チャンネル、exp2→114 チャンネル、exp3→107 チャンネルである。

NewBad チャンネル及び Bad チャンネルは、石英板の表面と MCP-PMT の表面の接着が剥がれていた為、石英板表面で光子が全反射し MCP-PMT に光が当たらなかった事によると考えられる。今回の照射テストでは、使用した MCP-PMT のチャンネル数の増加に伴って MCP-PMT と信号の読み出し回路基板とその配線を収納しているフロントエンドボックスの重量が 4 月に行った照射テストに比べ、大きくなってしまった(図 3.19)。その為、石英板を収納するクォーツカバーボックスと、フロントエンドボックスを固定する治

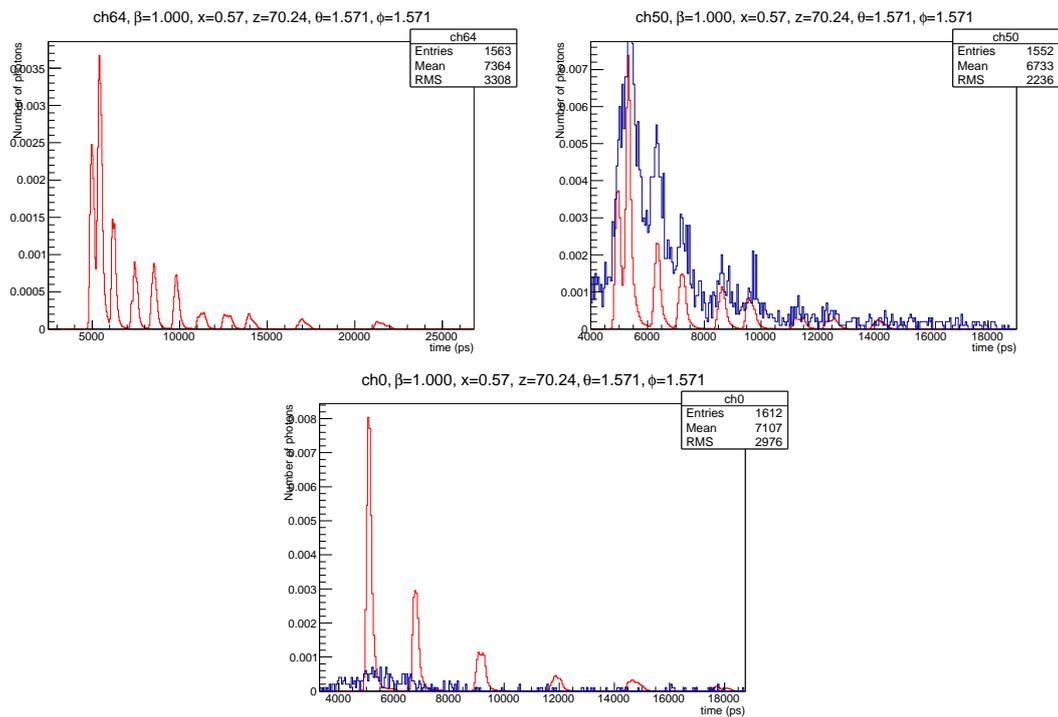


図 3.15: TOP カウンターの時間分布 (青) と PDF (赤) の比較:横軸 psec 縦軸 N.Hit(左上 bad-ch、右上 good-ch、下 newbad-ch)

具に予想を上回る荷重がかかり、石英板の表面と MCP-PMT の表面の接着が剥がれやすい状態になっており、光が当たらない MCP-PMT を作ってしまった可能性が高い。

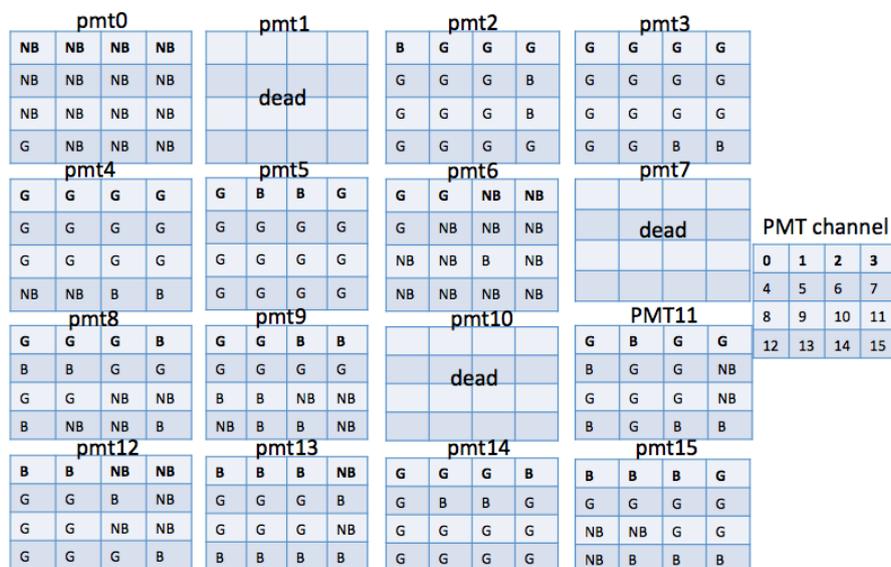


図 3.16: exp1 の MCP-PMT の各チャンネルの評価結果:G=Good チャンネル、NB=NewBad チャンネル、B=Bad チャンネル

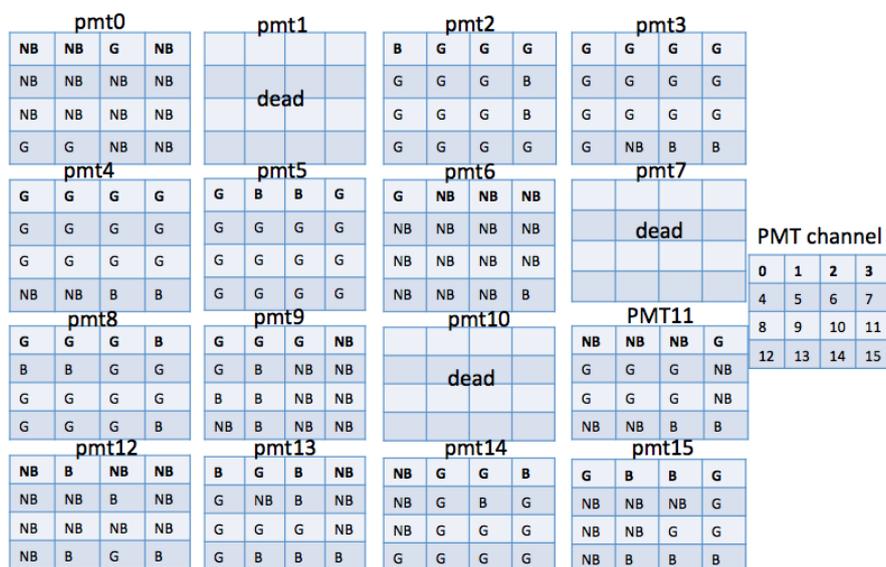


図 3.17: exp2 の MCP-PMT の各チャンネルの評価結果:G=Good チャンネル、NB=NewBad チャンネル、B=Bad チャンネル

pmt0				pmt1				pmt2				pmt3							
NB	NB	G	NB					NB	G	G	G	G	G	G	G				
NB	NB	NB	NB			dead		G	G	G	B	G	G	G	G				
NB	NB	NB	NB					G	G	G	G	G	G	G	G				
G	G	NB	NB					G	G	G	G	G	G	B	B				
pmt4				pmt5				pmt6				pmt7							
G	G	G	G	NB	NB	NB	NB	G	NB	NB	NB								
G	G	G	G	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB			dead					
G	G	G	G	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB								
NB	NB	B	B	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB								
pmt8				pmt9				pmt10				PMT11				PMT channel			
G	G	G	B	B	B	B	G					G	G	G	G	0	1	2	3
B	B	G	G	G	G	G	G			dead		G	G	G	NB	4	5	6	7
G	B	G	NB	NB	B	B	G					G	G	B	NB	8	9	10	11
NB	G	G	B	B	G	G	B					G	G	B	B	12	13	14	15
pmt12				pmt13				pmt14				pmt15							
NB	B	NB	B	B	B	B	G	G	G	G	B	G	B	B	G				
NB	NB	NB	NB	G	NB	B	NB	G	B	G	G	G	G	G	G				
NB	NB	NB	NB	G	G	NB	NB	G	G	G	G	NB	G	NB	NB				
G	G	G	B	G	B	B	NB	G	G	G	G	G	B	B	G				

図 3.18: exp3 の MCP - PMT の各チャンネルの評価結果:G=Good チャンネル、NB=NewBad チャンネル、B=Bad チャンネル

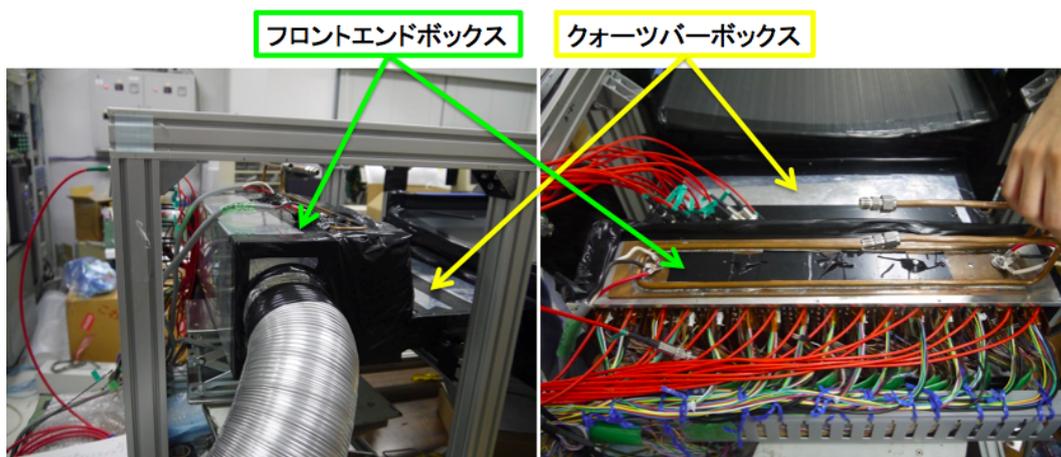


図 3.19: フロントエンドボックスとクォーツパーボックス:左図 横から見た写真、右図 上から見た写真

## 3.8 TOP カウンターの時間分布と PDF の比較によるデータの評価

この節では測定データの理解を進める為に、PDF と測定データを比較した結果について述べる。

まず、電子ビームのふらつきを考慮した PDF 作成について述べる。照射テストに用いた電子ビームは毎回同じ位置に照射される訳ではなく、運動量や元の  $\gamma$  ビームの位置の広がりによってイベント毎に違う場所に照射される。その電子ビームがどのような軌道を描くかは LEPS スペクトロメータによって測定されている。電子ビームが TOP カウンターに照射される際にどの様に分布するかを測定した結果を図 3.8 に示す。電子ビーム分布は四つのパラメータで表現でき、それぞれ  $x_{top}$  → 石英板の長手方向の分布、 $y_{top}$  → 石英板の短手方向の分布、 $dx_{dztop}$  → 石英板の長手方向の角度分布、 $dy_{dztop}$  → 石英板の短手方向の角度分布となっている。これらをそれぞれ Gauss 関数で fit し、得られた  $\sigma$  は  $x_{top}=0.396$  cm、 $y_{top}=0.679$  cm、 $dx_{dztop}=0.00400$  rad、 $dy_{dztop}=0.00421$  rad であり (表 3.3)、この値をビームのふらつきとして PDF を作成した。

パラメータ	$\sigma$
$x_{top}$	0.396cm
$y_{top}$	0.679cm
$dx_{dztop}$	0.00400rad
$dy_{dztop}$	0.00421rad

表 3.3: ビーム分布のパラメータ

次に作成した PDF とデータの時間分布についての比較を行った (図 3.8)。図を見ても分かる様に PDF のピークに対してデータのピークの時間的広がりが大きくなっている。この原因を追求する為に以下の事について調べた。

1. PDF のふらつき
2. トリガーに使用していないトリガーカウンターを使ってビームを絞る
3. クロストークチェック
4. bunch にたいするイベントセレクション

まず、PDF 自身についてビームのふらつきが正しく考慮されているかを確認する為に、PDF に対して各パラメータの分布を確認した (図 3.8)。この結果から見積もられた値はそ

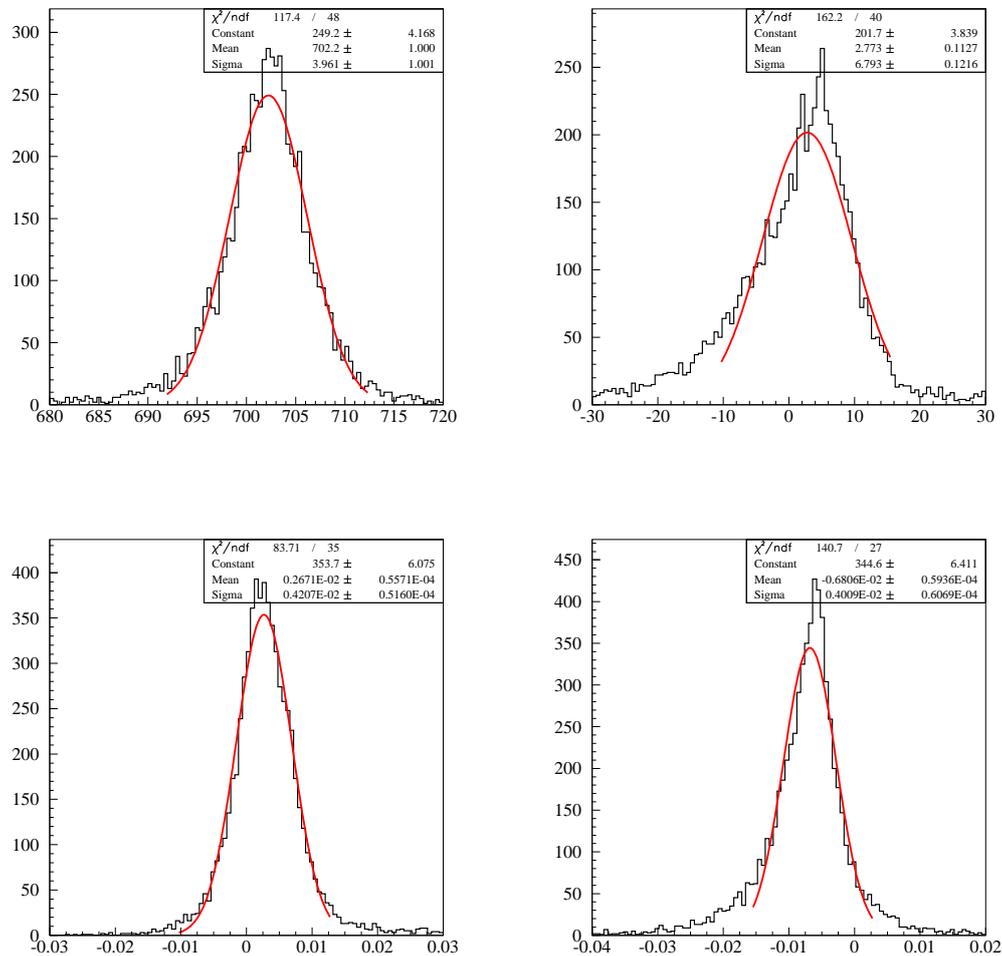


図 3.20: LEPS スペクトロメータで測定された電子ビームのふらつき:左上 xtop[横軸:入射位置 (mm)、縦軸:count]、右上 ytop[横軸:入射位置 (mm)、縦軸:count]、左下 dxdztop[横軸:入射位置 (rad)、縦軸:count]、右下 dydztop[横軸:入射位置 (rad)、縦軸:count]

それぞれ  $x_{top}=0.394$  cm、 $y_{top}=0.672$  cm、 $dx_{dztop}=0.00402$  rad、 $dy_{dztop}=0.00414$  rad となっており、正しくふらつきが考慮されている。

次に前節で述べたふらつきを考慮に入れていない PDF との比較を行った (図 3.8)。ふらつきを加える前後で大きな差が見られない。

この結果をデータを用いて確認する為に、実際のデータでトリガーに使われていないトリガーカウンターを使ってビームのふらつきを絞りビームがふらつく事による影響を調べた。このトリガーカウンターは我々の用意したカウンター類の中でビームに対して最も上

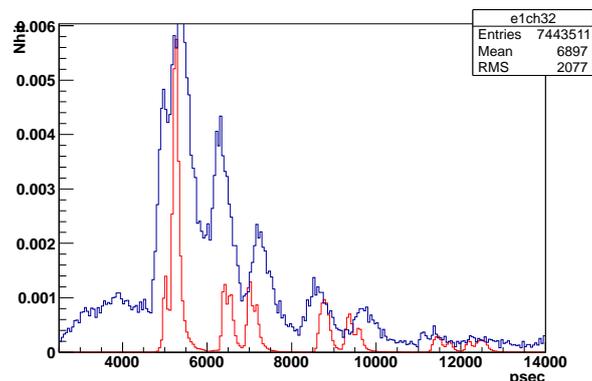


図 3.21: トップカウンター (黒) と PDF(赤) の時間分布:横軸 psec、縦軸 Nh1t

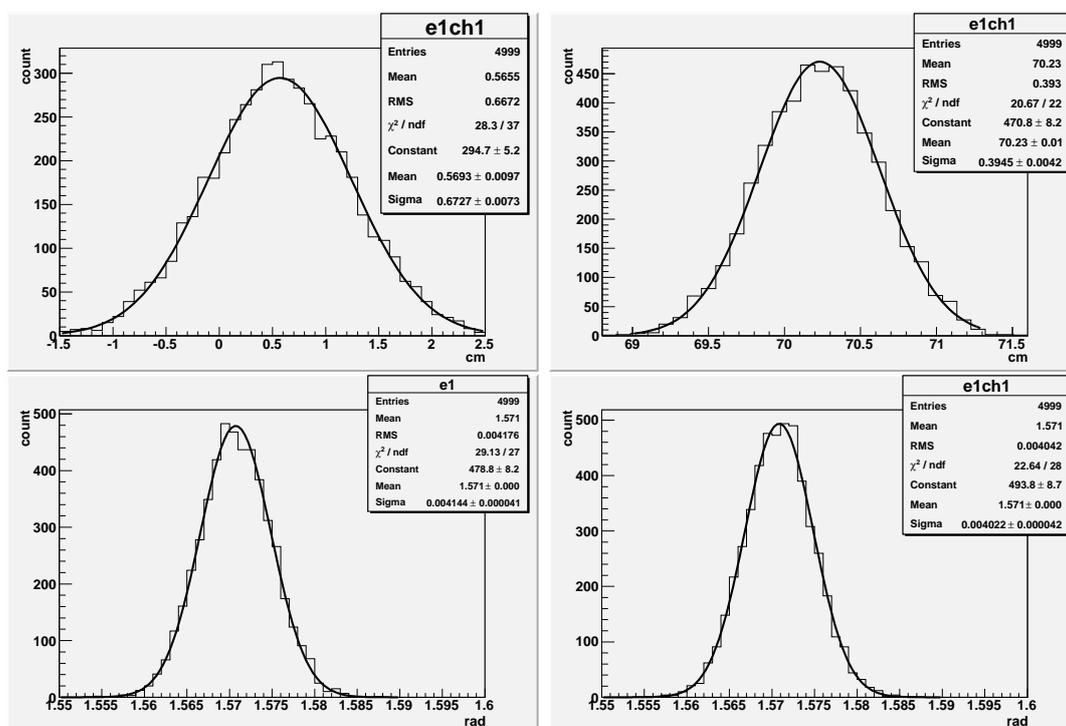


図 3.22: PDF での電子ビームのふらつき:左上 xtop[横軸:位置 (cm)、縦軸:count]、右上 ytop[横軸:位置 (cm)、縦軸:count]、左下 dx dztop[横軸:位置 (rad)、縦軸:count]、右下 dy dztop[横軸:位置 (rad)、縦軸:count]

流側にあり、それまで使われていたトリガークウンターのサイズ (40mm×40mm×5mm) に対してサイズは (5mm×5mm×5mm) となっている。そのためビームを絞る為の条件と

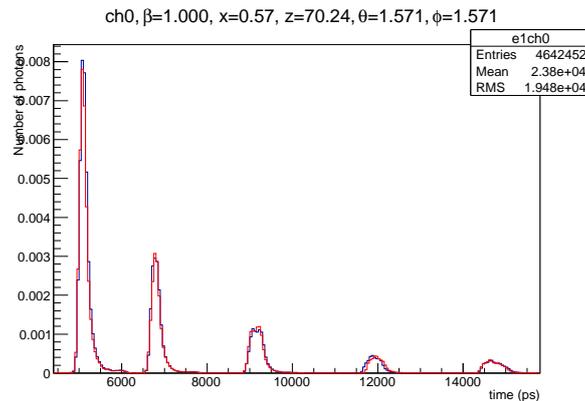


図 3.23: ビームを振らつきを考慮する前 (赤) と後 (黒) での PDF の比較:横軸 spec、縦軸 Number of photon

しては充分である。その結果を図 3.8 に示す。この結果から得られた sigma の値がビーム

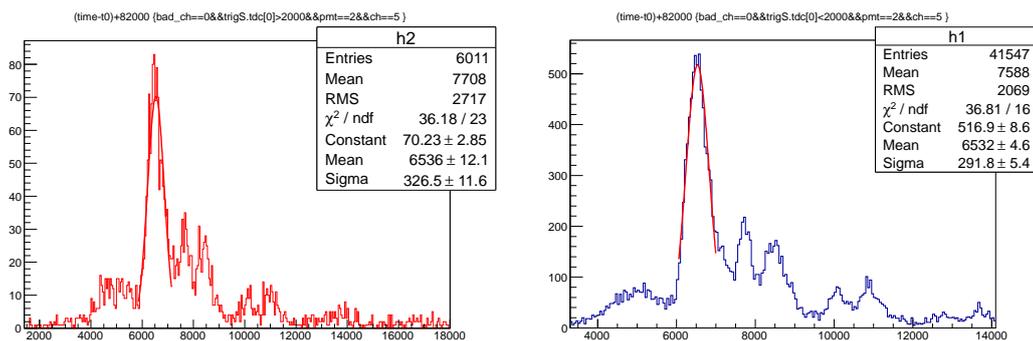


図 3.24: ビームを絞る前 (右図) と後 (左図) での TOP カウンターの時間分布の比較:横軸 psec、縦軸 count

を絞る前 326.5 psec、ビームを絞った後 291.8 psec となっており、あまり変化が無い。この事からビームのふらつきに依る影響はあまり無いと考えられる。次に、クロストークによる影響について調べた。今回の照射テストで使用された MCP-PMT の読み出し回路基板 CFD ボードは照射テストを行う前の事前チェックでクロストークが多い事が分かっている事は 2.6.3 節で述べた (図 2.14)。そこで、クロストークのカット条件として、一つのイベントに対して MCP-PMT 内で、1つのチャンネルだけにヒットのあるイベントを選び、その時間分布を PDF と比較した。その結果、得られたファーストピークの幅は  $\sigma = 187$  psec である。また、メイン bunch 以外のイベントではピークが 80 psec シフトしていると

いう解析結果を受けて、更にメインバンチだけを取り出す条件を加え PDF との比較を行った。メイン bunch のみでは  $\sigma=210$  psec と改善は見られなかった。二つのカット条件から得られた結果は 185 psec であった。シミュレーションによる予想は  $\sigma=80$  psec である。それらの結果を図 3.8、表 3.4 に示す。

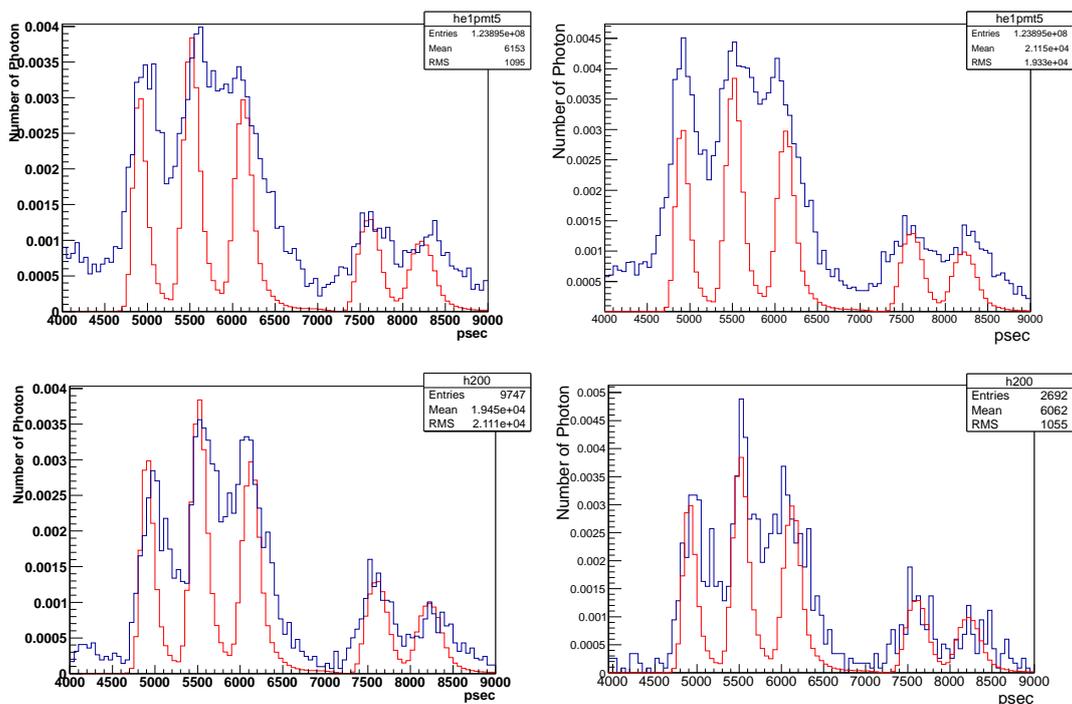


図 3.25: PDF と TOP カウンターの比較:左上 カット無し [横軸:psec、縦軸:Nphoton]、右上 メイン bunch のみのイベント [横軸:psec、縦軸:Nphoton]、左下 クロストークカット [横軸:psec、縦軸:Nphoton]、右下 メイン bunch+クロストークカット [横軸:psec、縦軸:Nphoton])

以上の結果から、考えられるカット条件から 185 psec の時間分解能が得られたが、シミュレーションで予想される 80 psec に比べ、未だ 100psec の不確定要素が解明出来ない。

カット条件	時間分解能 (psec)	統計誤差
no cut	215	$\pm 7.351$
メイン bunch	210	$\pm 7.826$
クロストーク	187	$\pm 7.096$
メイン bunch, クロストーク	185.2	$\pm 12.007$

表 3.4: 各カット条件での時間分解能

## 第4章 結論

我々は、2012年4月と10月にLEPS ビームラインにて1~2 GeV/cの電子ビームを用いた照射テストを行った。本研究では、この照射テストにおいてRF信号を用いた時間原点の較正と、TDCの較正の手法を確立した。そして、今後の照射テストに向けての問題点を明らかにし、改善する必要性を示した。以下にそれぞれについてまとめる。

### RF信号を用いた時間原点の較正

全てのカウンターの時間情報に対して使用するRF信号の時間分解能は $\sigma_{RF} \simeq 27\text{psec}$ であり、この値はMCP-PMTの時間分解能50 psecに比べ十分に小さいので時間原点として使用出来る。

次に、全てのイベントに対してbunchIDを正しく決める為に、トリガーカウンターに対してslewing補正を行った。その上で、RF信号の時間間隔 $1.96626 \pm 0.00001\text{ nsec}$ を利用し、bunchを一つに纏めた。その結果、トリガーカウンターの時間分解能は、実験条件にもよるが、150 psec以下という値が得られた。これらの値はbunch間隔2 nsecに比べて十分に小さいので、問題なく較正を行う事が出来ている。

### TDCの較正

TDCはTDCTesterを使用して事前に較正を行っており、得られたTDCの時間分解能は24.36 psecである。しかし、より精確な較正を行う為にRF信号の時間間隔が $1.96626 \pm 0.1\text{psec}$ である事を利用し、TDCを較正した。

データから求められたbunch間隔とRFの時間分解能から予想されるbunch間隔の比較を行う事で、その較正を行った。図3.13にあるように実際にTDCで取得したRFの時間情報に対して縦軸にLEPS実験の解析から得られたRFの時間分解能を元に予想される間隔をプロットすると両者にズレがあるため傾きが0.9979となっている。この傾きから正確なTDCの時間分解能は24.41psecであることが分かった。

### ビームテストの問題点について

本研究では、今回のビームテストについて以下の三点の問題点を明らかにした。

#### 1. トリガーカウンターの設置精度

トリガーカウンターの設置精度については、設置後に $\gamma$ ビームのイベントレートに

対するトリガーカウンターのイベントレートや、トリガーカウンターの ADC を照射テスト中に監視することで未然に防ぐ事ができる。この事によって slewing 補正をより精確に行う事が出来る。

## 2. 石英板端面と MCP-PMT 表面の接着

接着については、フロントエンドボックスの軽量化及びクォーツカバーボックスとフロントエンドボックスの接合強化によって改善できる。この問題を改善する事で、MCP-PMT の検出光子数が向上し、TOP カウンターの識別能力を正しく見積もる事が出来る。

## 3. PDF との整合性

最後に PDF との整合性については、表 3.4 で示した通りである。まず最初に、PDF とデータの比較を行ったが、ピークの太さが大きく違う事が分かった。そこで、この原因を調べた。まずビームサイズの影響を調べる為に、ビームサイズを考慮していない PDF との比較を行った。しかし、違いが見られなかった。また、データでもビームサイズの影響を確認する為に、トリガーカウンター (5mm×5mm×5mm) を使ってビームのふらつきを抑える条件で比較を行った。ビームを絞る前の値が 326 psec となっており、絞った後の値が 291 psec で大きな違いは見られず、ビームサイズの影響ではない事が分かった。

次に、2.6.3 節で述べた様に今回使用した CFD はクロストークが多い事が懸念されていたので、クロストークをカットする条件を加えて時間分解能を見積もった。その結果は 187 psec であった。この値は、カット条件を加えていない場合の時間分解能 215 psec に比べ大きく改善したが、PDF で予想される時間分解能の値 80 psec に比べると、不十分である。そこで、更に上での条件を加えて、メイン bunch のみのイベントを選ぶカットを加えて、時間分解能を評価した。PDF での時間分解能 80 psec に対して、評価結果として 185 psec の時間分解能が得られたが、この値はクロストークのカット条件から大きな改善は見られなかった。今後、このデータと PDF の違いについて原因究明する事が必要である。この違いの理由の一つの候補としては、PDF では考慮に入られていない電子ビームが TOP カウンターに照射される際に起こりうる多重散乱の効果がある。この効果は石英板に電子が当たる際に散乱し、Cherenkov 光が様々な角度で放射される事で MCP-PMT が一度のイベントに対して時間的に幅を持った時間分布を持つ事になる。この多重散乱が原因である場合、次回の照射テストの際の改善策として、ビームトラッキング精度の向上が考えられる。TOP カウンターの前後 (特に後ろ) に 1mm 程度の位置分解能の tracker をおいて、 $x_{top}$ ,  $y_{top}$  は数 mm に、 $dx_{dztop}$ ,  $dy_{dztop}$  は 1mrad 程度の分解能で抑える事で、多重散乱やシャワーイベントなどを大幅にカット出来る。

## 関連図書

- [1] A.Abeshian et al.,”The Belle Detector,”Nucl.Instrum.Methods Phys.Res.,Sect.A479,117-232(2002).
- [2] T.Abe et al.,”Belle II Technical Design Report,”KEK Report 2010-1,arXiv:1011.0352(2010).
- [3] 有田義宣,「Belle II 実験 TOP カウンターの実機仕様決定に向けた光検出器の改良と K / 識別性能評価」, 修士論文, 2011。
- [4] 古賀裕介,「Belle II 実験 TOP カウンター実機の光学性能評価」, 修士論文,2012。
- [5] SPring-8,webpage:<http://www.spring8.or.jp>,H. Kamitsubo, Nucl. Inst. Meth. A 303, 421 (1991).
- [6] T. Nakano, J. K. Ahn, H. Ejiri, M. Fujiwara, T. Hotta, N. Matsuoka, T. Matsumura and T. Mibe *et al.*, Nucl. Phys. A **670**, 332 (2000).
- [7] 浜松ホトニクス,R9880U-01,[http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/R9880U\\_TPMH1321E01.pdf](http://jp.hamamatsu.com/resources/products/etd/pdf/R9880U_TPMH1321E01.pdf)

## 謝辞

本研究を遂行し、修士論文としてまとめる為に多くのご指導をいただいた、飯嶋徹教授、戸本誠准教授、居波賢二准教授、早坂圭司准教授、鈴木一仁特任助教、堀井泰之特任助教、松岡広大研究員、早川知克研究員、加藤悠司研究員をはじめとする研究室の皆様へ深く感謝いたします。特に指導教官である飯島教授には、本研究の実施の機会を与えていただき、その遂行にあたって終始ご指導をいただきました。また、早川研究員、加藤研究員、松岡研究員には研究を進めていく中で、様々なことを一つ一つ丁寧に教えていただきました。一緒にビームテストを行い、TOP カウンターの構築等の苦勞を共にした有田義宣君、廣瀬茂輝君にも深くお礼申し上げます。最後に、長い学生生活を支援していただいた両親に深く感謝の意を表して謝辞と致します。