

三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器  
WAGASCIの開発

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻  
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室  
吉田健人

平成27年1月28日

## 概要

T2K(Tokai-to-Kamioka)長基線ニュートリノ振動実験は、茨城県東海村の J-PARC で生成したミューオンニュートリノビームを 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデで検出することにより、ニュートリノ振動のパラメータの精密測定を行うことを目的としている。

現在 T2K 実験ではニュートリノ生成点直後に設置した前置検出器群を用いて、ニュートリノフラックスやニュートリノ反応断面積などの不定性の大部分を削減しているが、今後より統計をためて精密な測定をしていくためにさらなる系統誤差の削減が必要である。T2K 実験ではニュートリノターゲットとして、前置検出器でプラスチックシンチレータ、後置検出器で水を用いており、この原子核標的の差による誤差は、前置検出器による測定では制限できないため主要な系統誤差の一つとなっている。我々は T2K 前置検出器ホールに新型検出器を設置し、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を誤差 3% という高精度で測定することにより、この誤差を軽減することを目指している。

我々が開発している新型ニュートリノ検出器 WAGASCI(WATER Grid And SCIntillator) の特徴は、シンチレータを三次元格子状に組み、その格子でできた空間の中に水またはプラスチックをニュートリノ標的として入れることにより、荷電粒子のトラックに対して  $4\pi$  方向にアクセプタンスを持つことである。また WAGASCI の水標的部分とプラスチック標的部分をほとんど同じ構造にすることにより、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比の測定において、ニュートリノフラックスと検出器由来の系統誤差を大幅に削減できる。WAGASCI のサイズは約  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 2\text{m}$  で、ニュートリノ標的の質量は約 2t である。WAGASCI の周囲にはミューオン飛程検出器(MRD)を配置し、ニュートリノ反応で生じたミューオンの運動量も測定する。

本論文では、新型検出器の概要を述べた後、プラスチックシンチレータや光検出器 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) といった検出器の構成要素の性能評価の結果を述べる。我々の実験で用いる MPPC は次世代型で、現在 T2K 実験で用いられている MPPC から各性能が大幅に向上していることを確認した。我々の用いるシンチレータは標的部分の体積の割合を大きくするため 3mm 厚の薄型シンチレータを用いる。我々はこのシンチレータの性能測定のために、東北大学電子光理学研究センターで陽電子ビームを用いたビームテストを行った。その結果、薄型シンチレータでも MIP に対して 99%以上という高い検出効率が得られ、検出器の要請を満たすことを示した。最後に検出器のプロトタイプとして 62ch の小型検出器を製作し、宇宙線による光量測定やシンチレータ毎の光量のばらつきなどを測定したのでその結果について述べる。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>ニュートリノ振動</b>	<b>4</b>
<b>第 2 章</b>	<b>T2K 実験</b>	<b>6</b>
2.1	T2K 実験の概要	6
2.2	T2K 実験の目的	7
2.3	J-PARC 加速器とニュートリノビームライン	7
2.3.1	off-axis 法	9
2.4	ニュートリノビーム方向の監視	9
2.4.1	ミュオンモニター (MUMON)	10
2.4.2	INGRID	11
2.5	オフアクシス前置ニュートリノ検出器とスーパーカミオカンデ	12
2.5.1	オフアクシス前置ニュートリノ検出器	12
2.5.2	スーパーカミオカンデ	13
<b>第 3 章</b>	<b>WAGASCI(Water Grid And SCIntillator) 検出器</b>	<b>15</b>
3.1	動機	15
3.2	実験原理と基本設計	15
3.2.1	検出器概要	15
3.2.2	実験場所	16
3.2.3	WAGASCI 検出器	16
3.2.4	Muon range detector(MRD)	19
3.2.5	Veto plane	20
3.2.6	Front veto	21
3.3	目標	21
3.4	検出器構成要素	21
3.4.1	プラスチックシンチレータ	21
3.4.2	波長変換ファイバー	23
3.4.3	MPPC	23
3.4.4	その他	24
<b>第 4 章</b>	<b>Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)</b>	<b>25</b>
4.1	Pixelated Photon Detector(PPD)	25
4.2	APD の動作原理	25
4.3	MPPC の動作原理	28
4.4	MPPC の基礎特性	29
4.4.1	ゲイン	29
4.4.2	ブレイクダウン電圧	30

4.4.3	ノイズレート	30
4.4.4	クロストーク	30
4.4.5	アフターパルス	31
4.4.6	Photo Detection Efficiency(PDE)	32
<b>第5章</b>	<b>MPPCの性能評価</b>	<b>33</b>
5.1	第二世代MPPC	33
5.1.1	デバイス比較	33
5.1.2	外観	33
5.1.3	MPPC表面	34
5.1.4	波形	34
5.2	MPPCの性能評価	35
5.2.1	セットアップ	35
5.3	測定結果	39
5.3.1	ゲイン	39
5.3.2	ブレイクダウン電圧	39
5.3.3	キャパシタンス	39
5.3.4	ノイズレート	41
5.3.5	クロストーク・アフターパルス率	43
5.3.6	Relative PDE	44
5.3.7	まとめと考察	45
<b>第6章</b>	<b>WAGASCI検出器で用いるシンチレータの性能評価</b>	<b>47</b>
6.1	水中での宇宙線による光量測定	47
6.1.1	水中光量比較セットアップ	47
6.1.2	水中光量比較測定結果	48
6.1.3	ファイバーの曲げ方による光量の変化	49
6.2	プラスチックシンチレータと波長変換ファイバーの水中での長期性能試験	50
6.2.1	セットアップ	50
6.2.2	測定結果	51
<b>第7章</b>	<b>ビームテストによるシンチレータの性能評価</b>	<b>53</b>
7.1	ビームライン	53
7.2	ビームテスト概要	55
7.2.1	目的	55
7.2.2	測定項目	55
7.3	ビームプロファイル測定	55
7.3.1	セットアップ	56
7.3.2	array型MPPCのキャリブレーション	60
7.3.3	threshold値の設定	61
7.3.4	ビームプロファイル測定結果	63
7.4	薄型シンチレータ光量・Detection Efficiency測定	64
7.4.1	セットアップ	65
7.4.2	測定結果	66

7.5	光学的クロストーク測定 . . . . .	73
7.5.1	セットアップ . . . . .	73
7.5.2	クロストークシンチレータの光量比較 . . . . .	74
7.5.3	ビーム位置ごとのクロストークシンチレータの光量 . . . . .	75
7.6	INGRID 型シンチレータを用いた時間分解能測定 . . . . .	76
7.6.1	セットアップ . . . . .	76
7.6.2	INGRID 型シンチレータ光量 . . . . .	78
7.6.3	INGRID 型シンチレータ時間分解能 . . . . .	78
7.7	fiber 長が 120cm の時の光量と Detection Efficiency . . . . .	80
7.8	ビームテストまとめ . . . . .	81
<b>第 8 章</b>	<b>WAGASCI 検出器のプロトタイプ製作</b>	<b>83</b>
8.1	製作の目的 . . . . .	83
8.2	プロトタイプの構成 . . . . .	83
8.2.1	overview . . . . .	83
8.2.2	シンチレータの形状と配置 . . . . .	84
8.2.3	MPPC とクッキー . . . . .	86
8.2.4	その他の構成要素 . . . . .	88
8.3	プロトタイプの製作 . . . . .	89
8.4	64ch array 型 MPPC のキャリブレーション . . . . .	90
8.5	threshold の設定 . . . . .	94
8.6	宇宙線によるシンチレータの光量試験 . . . . .	94
8.6.1	イベントディスプレイ . . . . .	95
8.7	測定結果 . . . . .	96
8.8	プロトタイプ検出器まとめ . . . . .	97
<b>第 9 章</b>	<b>結論</b>	<b>99</b>

# 第1章 ニュートリノ振動

ニュートリノは弱い相互作用のみが働く中性レプトンで、1930年に W.Pauli によって存在が提唱された。その後実際にニュートリノが観測されたのは1956年のことで、F.Reines と C.Cowan が原子炉からの反電子ニュートリノを逆ベータ崩壊で捉えることによってその存在が確認された。現代の素粒子物理学における標準模型ではニュートリノは三世代存在するとされ、ニュートリノの質量は0とされている。しかし1998年にスーパーカミオカンデグループによる大気ニュートリノの観測から、ニュートリノが質量を持ち、世代間で振動しているということが示唆された。ニュートリノ振動はニュートリノが時間発展とともに別の種類のニュートリノに変化する現象で、1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一によって理論的に提唱されている。

ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量を持ち、弱い相互作用の固有状態 (フレーバー固有状態)  $|\nu_\alpha\rangle (\alpha = e, \mu, \tau)$  と質量固有状態  $|\nu_i\rangle (i = 1, 2, 3)$  が異なり、3つの質量固有状態がひとつに縮退していない場合に起こる。この時、フレーバー固有状態は以下のように質量固有状態の混合状態になっており、質量固有状態の線形結合で書ける。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.0.1)$$

ここで  $U_{\alpha i}$  は牧・中川・坂田 (MNS) 行列と呼ばれる三行三列のユニタリ行列で、以下の式で表される。

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.0.2)$$

ここで  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$  であり、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  である。また、 $\theta_{ij}$  は質量固有状態の混合角であり、 $\delta$  は CP 非保存の位相である。

ここからはニュートリノ振動の定式化のために、ニュートリノの時間発展を考える。質量固有状態が  $|\nu_i\rangle$  であるニュートリノが真空中を時間  $t$  だけ走った時の時間発展の式は、Schrödinger 方程式と MNS 行列を使うことにより

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-E_i t} |\nu_i\rangle \quad (1.0.3)$$

と書ける。ニュートリノは相対論的であるので、以下のように近似することが出来る。

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E_i} \quad (1.0.4)$$

ここで  $E_i, p_i, m_i$  は  $\nu_i$  のエネルギー、運動量、質量である。よって、時間発展後のフレーバー固有状態の式は以下のように書ける。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}t} |\nu_i\rangle \quad (1.0.5)$$

$e^{-ipt}$  は振動確率の計算の時は全体の位相を変えるだけなので無視できるため今後はそのようにする。またここで、ニュートリノのエネルギーを固定されたものと考え  $E_i = E_\nu$  とした。式 (1.0.5) の右辺の質量固有状態の式をフレーバー固有状態の式に書き換えると、

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{i\beta} U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_\nu}t} U_{\beta i}^* |\nu_\beta\rangle \quad (1.0.6)$$

となるので、 $\nu_\alpha$  が時刻  $t=0$  に生成され、時間  $t$  飛行した後には  $\nu_\beta$  になる確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \quad (1.0.7)$$

$$= \left| \sum_i U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_\nu}t} U_{\beta i}^* \right|^2 \quad (1.0.8)$$

$$= \sum_{ij} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} e^{-i\frac{(m_i^2 - m_j^2)}{2E_\nu}t} \quad (1.0.9)$$

となる。ここで  $L$  を飛行距離とすると、自然単位系では  $L \simeq t$  と出来る。また、 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  を用いて計算すると、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \\ &+ 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \end{aligned} \quad (1.0.10)$$

と表される。反ニュートリノの場合は式 (1.0.10) の第三項の符号が反転する。

具体例として二世代間の混合を考えてみると、混合行列は以下ようになる。

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (1.0.11)$$

この時時刻  $t=0$  に  $\nu_\alpha$  が生成され、距離  $L$  だけ飛行したあと、時刻  $t$  に  $\nu_\beta$  に変化している確率は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_\nu [GeV]}\right) \quad (1.0.12)$$

となる。また、飛行後に  $\nu_\alpha$  のままである確率は、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m^2 [eV^2] L [km]}{E_\nu [GeV]}\right) \quad (1.0.13)$$

となる。

式 (1.0.12) などからわかるようにニュートリノ振動の確率は、 $\Delta m^2$  や  $\sin^2 2\theta$  をパラメータとして、飛行距離  $L$  やニュートリノのエネルギー  $E_\nu$  の関数として表されることになる。

後述する T2K 実験では  $\nu_\mu$  ビームを用いたニュートリノ振動を測定することで、この振動パラメータの精密測定を行っている。

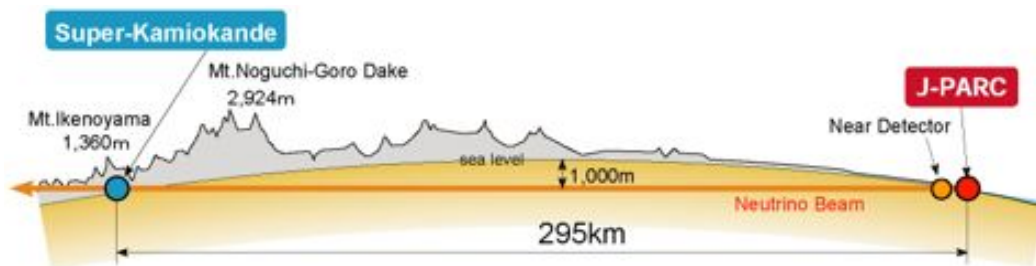
## 第2章 T2K実験

### 2.1 T2K実験の概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験とは加速器からのニュートリノビームを用いた、長基線ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) の大強度陽子加速器において生成されたニュートリノビームを、J-PARC から 295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデに向かって射出する。そしてそのニュートリノビームを生成点直後に設置された T2K 前置検出器群とスーパーカミオカンデにおいて測定し、このニュートリノ振動の前後での測定から、ニュートリノ振動の探索を行う。



(a) T2K 実験鳥瞰図



(b) T2K 実験模式図

図 2.1.1: T2K 実験



## 2.2 T2K 実験の目的

$\nu_e$  出現事象による  $\theta_{13}$ 、 $\delta_{\text{CP}}$  の精密測定

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  の三世代の枠組みでの振動確率は、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \\
 &- \frac{\sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}}{2 \sin \theta_{13}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \sin \delta_{\text{CP}} \\
 &+ (\text{CP even term, solar term, matter effect term}) \quad (2.2.1)
 \end{aligned}$$

このモードでの振動は、特に  $\theta_{13}$  と  $\delta_{\text{CP}}$  に感度がある。T2K 実験では 2013 年に目標統計の 8.4% の POT (Protons On Target) を用いて  $\nu_e$  出現事象を世界で初めて  $7.3\sigma$  で観測した。[1]

$\nu_\mu$  消失事象による  $\theta_{23}$ 、 $\Delta m_{23}^2$  の精密測定

$\nu_\mu$  消失事象は、 $\nu_\mu$  が振動しない確率を考えればよく、その確率は leading term のみで考えると以下ようになる。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E_\nu} \quad (2.2.2)$$

これらの振動モードの精密測定をすることで、ニュートリノ振動のパラメータを精密測定し、レプトンセクターでの CP 対称性の破れの検証など、ニュートリノに関する謎を解明していくことが最大の目的である。

## 2.3 J-PARC 加速器とニュートリノビームライン

J-PARC 加速器の概略図を図 2.3.1 に示す。LINAC (Linear accelerator) 上流部において生成された陽子は約 400 MeV にまで加速され、RCS (Rapid-Cycling Synchrotron) に渡される。RCS は 3 GeV 陽子シンクロトロンで、そこで陽子は加速されたあと MR (Main Ring) に渡され 30 GeV まで加速される。その後加速された陽子は超伝導電磁石を用いた速い取り出し (Fast Extraction) によってニュートリノビームラインに送られる。

ニュートリノビームラインの概略図を図 2.3.2 に示す。ニュートリノビームラインでは、陽子ビームはまずターゲットのグラフィイト標的に照射される。ターゲットに当たった陽子はハドロン反応を起こし、 $\pi$  中間子を含む多数の粒子を生成する。その生成された  $\pi$  中間子を三台の電磁ホーンを用いて収束する。この  $\pi$  中間子は下流の Decay volume ですぐに以下のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.3.1)$$

J-PARC ではこのようにしてニュートリノビームを生成しているのである。

この式 (2.3.1) 反応はニュートリノビームを生成するときのもので、電磁ホーンの電流を変えてやると  $\pi^-$  を収束させることができ、その結果、反ニュートリノビームを生成させることが出来る。現在 T2K 実験ではニュートリノビームモードと反ニュートリノビームモードを交互に行っており、CP 対称性の破れの探索を精力的に行っている。

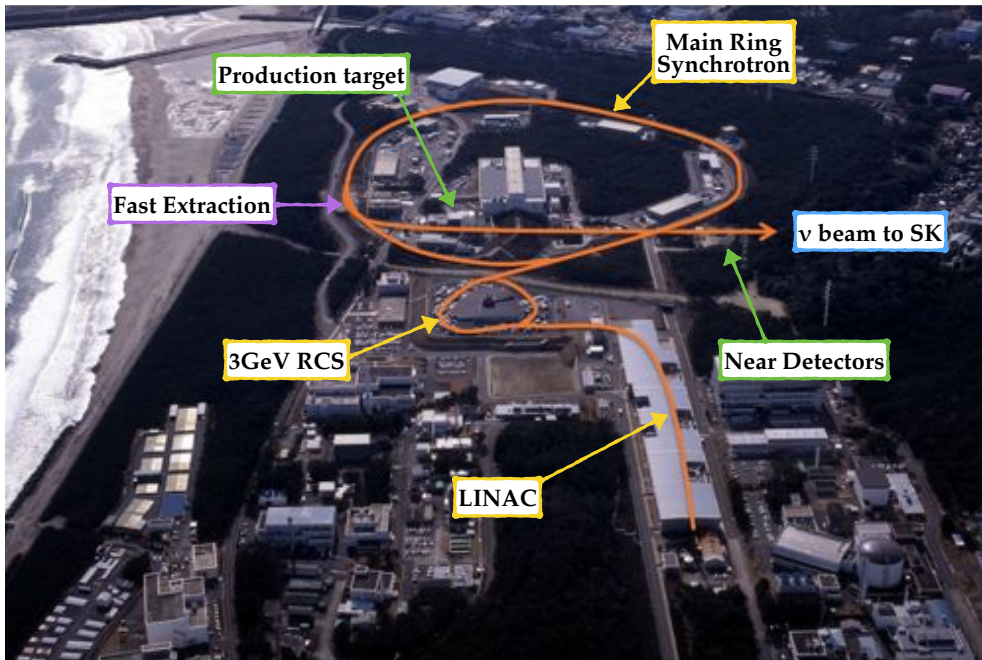


図 2.3.1: J-PARC ビームラインの概略図

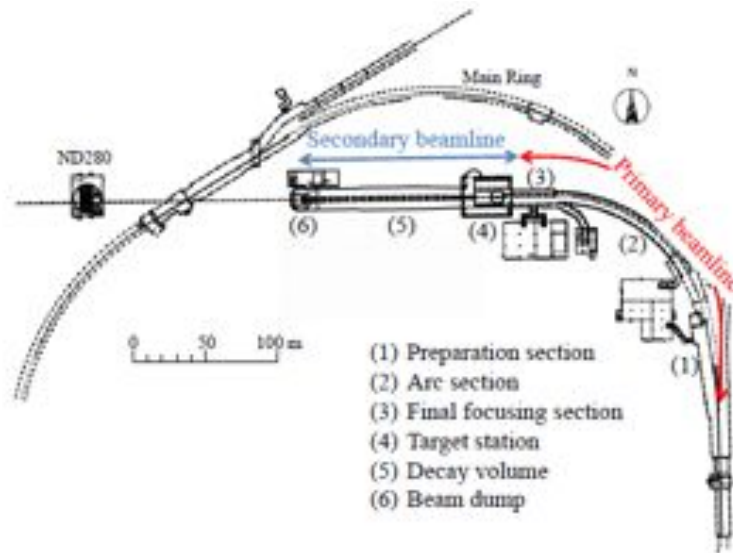


図 2.3.2: ニュートリノビームラインの概観図

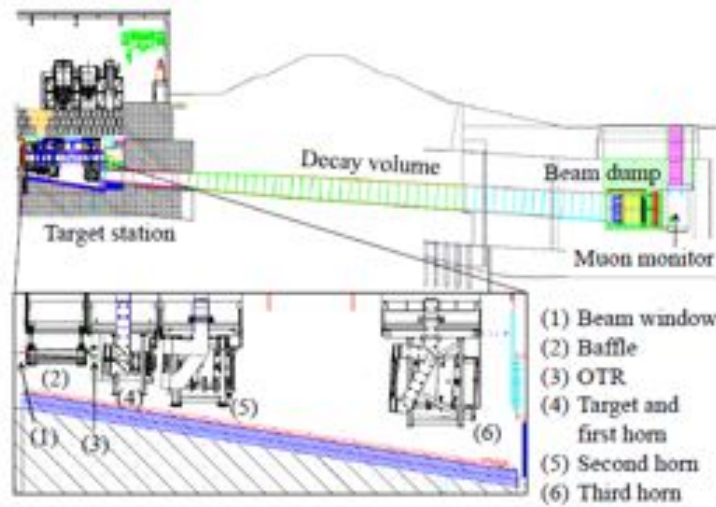


図 2.3.3: Secondary ビームラインの概略図

### 2.3.1 off-axis 法

T2K 実験は off-axis 法を採用した世界初の実験である。off-axis 法とは、ニュートリノビームの方向を SK の方向から少しずらすことにより、SK に向かうニュートリノのエネルギースペクトルに幅の狭いピークをもたせる方法で、ニュートリノ振動の確率が最大になるようにエネルギースペクトルを調整できることが特徴である。

ニュートリノのエネルギーは、 $\pi$  中間子とニュートリノのなす角を  $\theta$  とおくと、簡単な運動学から以下のように表される。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (2.3.2)$$

T2K 実験では off-axis 角として、 $2.5^\circ$  を採用している。off-axis 角が  $2.5^\circ$  のときは、 $E_\nu$  が  $p_\pi$  にそれほど依存しておらず、 $\pi$  中間子の運動量分布の幅が大きかったとしても、ニュートリノのエネルギーは比較的収束する。図 2.3.4 に SK での  $\mu_\nu$  の survival probability と、各 off-axis 角でのニュートリノフラックスの図を載せる。off-axis 角が  $2.5^\circ$  の場合、ニュートリノフラックスのピークエネルギーは約  $0.7\text{GeV}$  となる。このフラックスのピーク付近で survival probability が極小となる。つまりニュートリノ振動を起こしやすいエネルギーにピークを持たせることが出来る。また、高エネルギー側のテールが少ないため、バックグラウンドとなる  $\pi_0$  生成反応を減少させることが出来る。

## 2.4 ニュートリノビーム方向の監視

off-axis 法は上記のように有効な手法であるが、off-axis 角がずれるとエネルギーのピークも変わってしまい、測定に影響を及ぼしてしまう。そのためニュートリノビームの方向を高精度で監視する検出器が設置されており、それが MUMON と INGRID である。

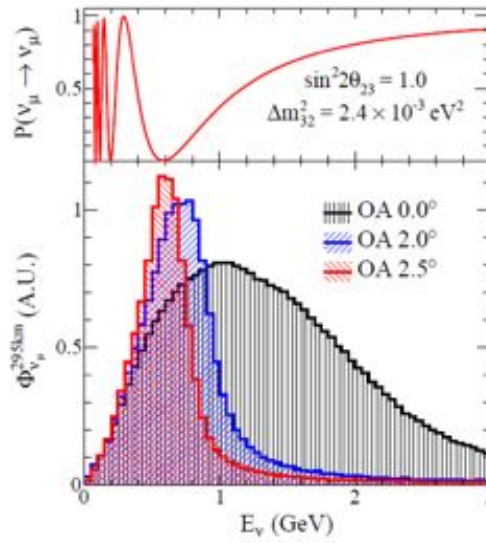


図 2.3.4: SK での  $\mu_\nu$  の survival probability と、各 off-axis 角でのニュートリノのエネルギー分布

### 2.4.1 ミューオンモニター (MUMON)

ミューオンモニター MUMON は、図 2.3.3 のビームダンプ直後に設置されており、 $\pi$  中間子の崩壊で生じたミューオンのプロファイルを実時間で測定することで間接的にニュートリノビームの方向をモニターする事が出来る検出器である。図 2.4.1 にミューオンモニターの全体図を載せる。ミューオンモニターはふたつの検出器からできており、ビーム上流側ではシリコン PIN フォ

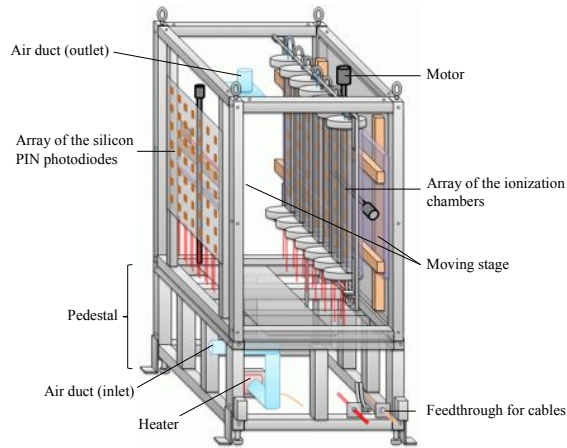


図 2.4.1: ミューオンモニター

トダイオードが設置されており、下流側ではイオンチェンバーが設置されている。ふたつの検出器を併用することで測定可能なビーム強度の範囲を広めている。

## 2.4.2 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino Grid) は on-axis 上に設置されたニュートリノ検出器で、ニュートリノビームの方向と強度を高精度でモニタリングすることを目的とした検出器である。INGRID はグラフィット標的から 280m 下流にある前置検出器ホールに設置されており、縦方向にモジュール 7 台、横方向にモジュール 7 台が並んだ形状をしている。各モジュールは、鉄の層が 9 層、シンチレータの層が 11 層のサンドイッチ構造をしており、大きさが  $1.2 \times 1.2 \times 0.9[\text{m}^3]$  で、重さは約 7t である。この 14 台のモジュールで INGRID はビーム中心  $\pm 5\text{m}$  の領域をカバーする。図 2.4.2 と図 2.4.3 に INGRID 全体図と各モジュールの概略図を示す。図 2.4.2 において、縦横のモジュールの他にふたつのモジュールがあるが、これはニュートリノビームの歪みの測定に用いられる。

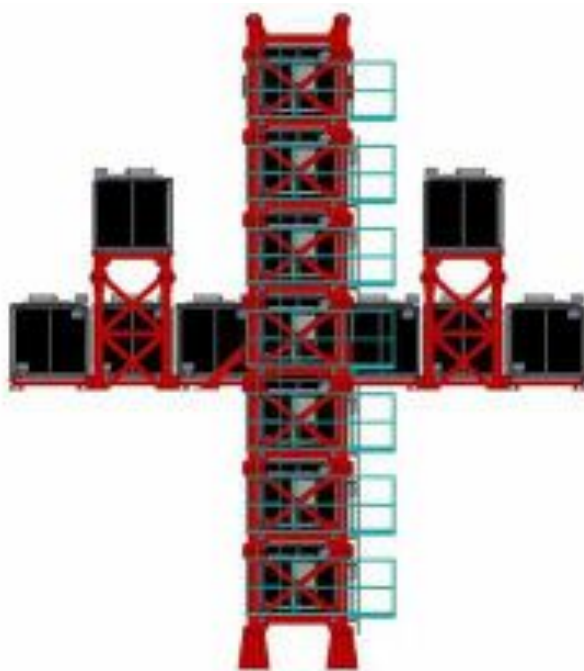


図 2.4.2: INGRID の概観図

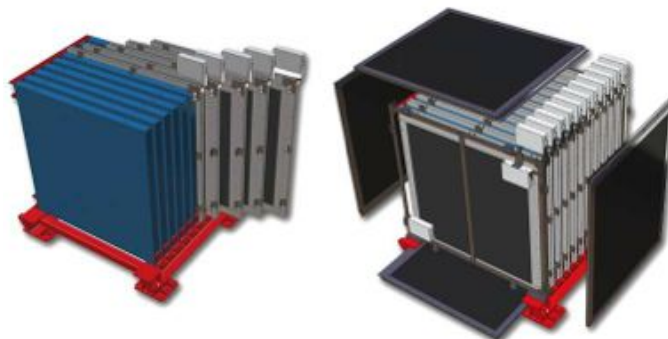


図 2.4.3: INGRID モジュールの概略図

ニュートリノ反応は基本的に鉄との間で起こり、生成された荷電粒子 (主に  $\mu$  の飛跡) をシンチレータで検出し、波長変換ファイバーと光検出器 MPPC で読みだす。各モジュールでのニュートリノ事象数から、ニュートリノビームのプロファイルを再編成し、ニュートリノビームの方向を測定する事ができる。

## 2.5 オフアクシス前置ニュートリノ検出器とスーパーカミオカンデ

ここではオフアクシス前置ニュートリノ検出器と、後置検出器であるスーパーカミオカンデについて述べる。

### 2.5.1 オフアクシス前置ニュートリノ検出器

オフアクシス前置検出器は、後置検出器である SK と同じオフアクシス角を持ち、前置検出器ホールに設置されている。この検出器の役割は、スーパーカミオカンデ方向へ向かう振動前のニュートリノビームフラックスやエネルギースペクトルを測定することである。以下にそれぞれの検出器についての簡単な説明を述べる。

#### Magnet

ND280 で用いられている Magnet は CERN の UA1 実験で用いられていたダイポール電磁石で、ニュートリノ反応で生じた荷電粒子を曲げ、運動量を測定するために検出器全体を覆っている。磁場は 0.2T である。

#### FGD(Fine Grained Detector)

シンチレータを十字状に組んでビームに対して垂直に設置したニュートリノ標的兼、飛跡検出器で、反応点付近の荷電粒子の飛跡の検出を行う。FGD は二台用いられていて、上流側が細分化されたプラスチックシンチレータから構成されており、下流側は水標的部分とシンチレータのふたつの部分から構成されている。

#### TPC(Time Projection Chamber)

オフアクシス前置検出器では 3 台の TPC が用いられ、 $\pi^0$  検出器と 2 台の FGD の後に設置されている。TPC の目的はニュートリノ反応で生じた荷電粒子の種類を同定し、その運動量を測定することである。

#### P0D( $\pi^0$ Detector)

P0D は ND280 Magnet 内最上流部に設置された  $\pi^0$  検出器である。鉛薄膜とプラスチックシンチレータと水標的のサンドイッチ構造をしており、中性カレント反応で生じた  $\pi^0$  粒子の検出に最適化されている。

#### ECAL(Electromagnetic Calorimeter)

ECAL は Magnet 内最外殻に P0D、FGD、TPC を囲むように設置されており、鉛とプラスチックシンチレータにより構成されている。ECAL の目的は内部で生じた  $\pi^0$  などによる  $\gamma$  線や、 $\nu_e$  の荷電カレント反応などにより生じた e などを検出することである。

#### SMRD(Side Muon Range Detector)

SMRD は Magnet のギャップ部分に設置されたプラスチックシンチレータからなる飛程検出

器である。SMRD は TPC に入射しなかったミューオンの運動量を測定する。また、検出器較正時の宇宙線トリガーとしても使われる。

図 2.5.1 と図 2.5.2 に、INGRID を含めた前置検出器の概観図と、オフ軸前置検出器の概略図を載せる。

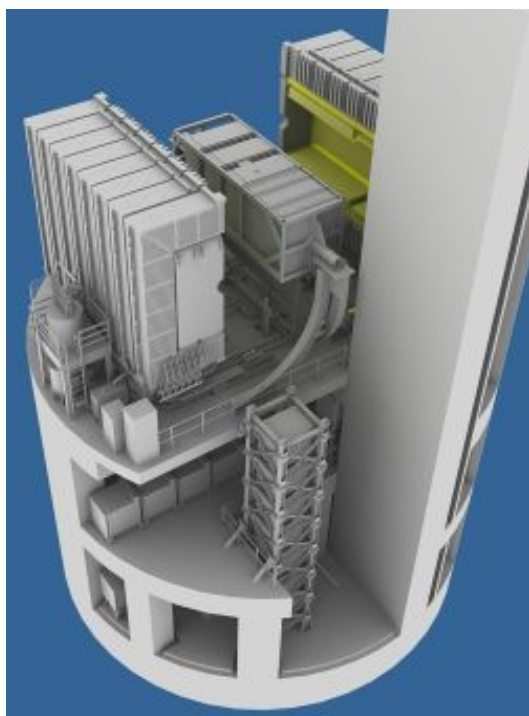


図 2.5.1: 前置検出器の概観図

## 2.5.2 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、J-PARC295km 離れた岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山の地下 1000m に位置する後置検出器であり、50kt の純水を用いた、直径 39.3m、高さ 41.4m の円筒形をした大型の水チェレンコフ検出器である。スーパーカミオカンデの内部は inner detector(ID) と outer detector(OD) に光学的に分離されており、ID には 20 インチ光電子増倍管が内向きに 11200 本設置され、OD には 8 インチ光電子増倍管が外向きに 1885 本設置されている。ニュートリノ反応で生じた荷電粒子はチェレンコフ光を発生させリング状の像を作り、それを上記の光電子増倍管で観測する。宇宙線  $\mu$  由来のバックグラウンドイベントは OD においてチェレンコフ光の信号を作るので、OD の測定で除去することが出来る。このような測定から、スーパーカミオカンデでは粒子の種類の識別や、荷電粒子のエネルギー、生成点、進行方向などを再構成している。

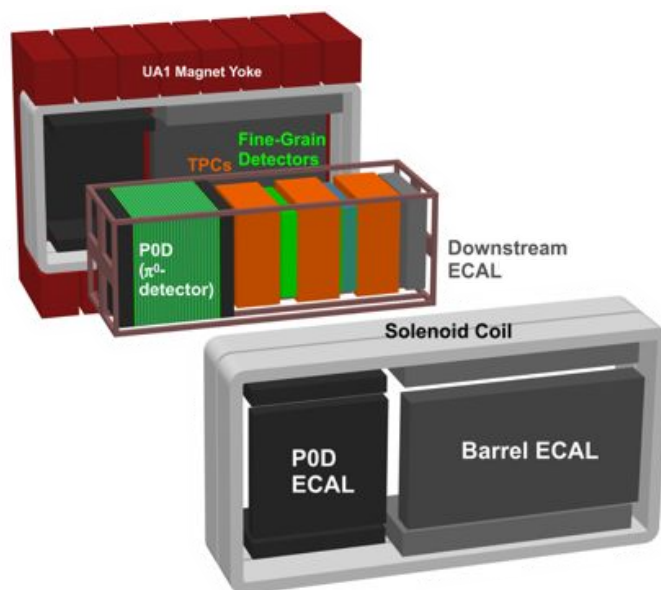


図 2.5.2: ND280 の概略図

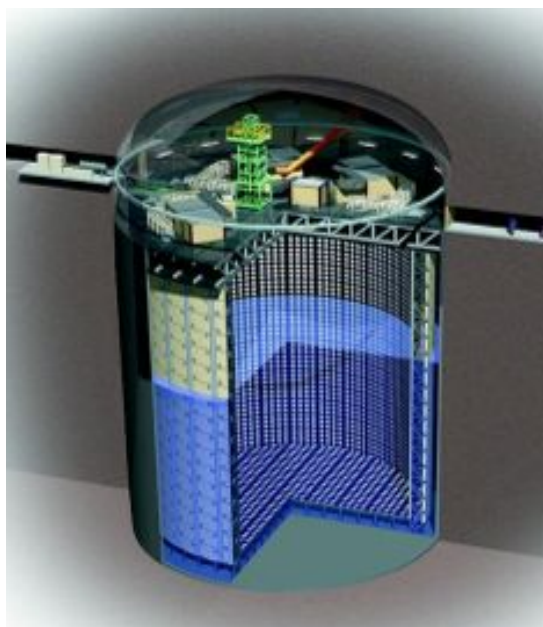


図 2.5.3: スーパーカミオカンデの概観図



## 第3章 WAGASCI(WATER Grid And SCIntillator) 検出器

この章では我々が開発を行っている三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器、WAGASCI について述べる。

### 3.1 動機

前述したとおり T2K 実験ではニュートリノ生成点直後に設置された前置検出器群を用いて、ニュートリノフラックスやニュートリノ反応断面積などの不定性の削減を行っている。表 3.1.1 に T2K 実験のニュートリノ振動解析における系統誤差を示す。この表からもわかるように、前置検出器の測定による制限でニュートリノフラックスとニュートリノ反応の系統誤差が大幅に削減されていることがわかる。しかしながら今後更に統計をためて精密な測定をしていくために、さらなる系統誤差の削減が重要である。現在の最も大きな系統誤差は、表 3.1.1 にもあるように、前置検出器と後置検出器のニュートリノ標的原子核の違いによる、ニュートリノ反応の誤差である。この誤差は、前置検出器ではニュートリノ標的としてプラスチックシンチレータ (CH) を用い、後置検出器では水 ( $H_2O$ ) を用いていることからくる誤差で、前置検出器による測定では制限されていない誤差である。そのため今後、高統計での精密な測定を実現するためには、この誤差を削減することが急務である。

現在オフ軸前置検出器には水を標的とした検出器が設置されており、ニュートリノの水に対する反応断面積の解析が進められている。オフ軸前置検出器は構造上、ニュートリノ反応で生成された荷電粒子を検出できるアクセプタンスが前方方向に限られる。そのため、SK で観測を行う phase space に測定できない領域が存在し、その部分については外部のデータ (MiniBooNE など) に依存している。また水と CH のニュートリノ反応断面積の違いは、ニュートリノ反応モデルからの予測では小さいとされているが、裏付けとなる実験は行われていない。よって、水と CH のニュートリノ反応断面積比を高精度で測定すれば、T2K 実験の系統誤差の削減に大きく貢献出来るはずである。

そのため我々は、三次元格子構造を持つ新型ニュートリノ検出器を製作し、 $4\pi$  のアクセプタンスで、水と CH のニュートリノ反応断面積比を 3% 以内の精度で測定することを目指す。

### 3.2 実験原理と基本設計

#### 3.2.1 検出器概要

図 3.2.1 に検出器の全体図を、図 3.2.2 に検出器の俯瞰図を載せる。中心に置かれている WAGASCI 検出器はニュートリノ標的としての水と CH、またプラスチックシンチレータが用いられており、

表 3.1.1: T2K 実験のニュートリノ振動解析における系統誤差

		$\nu_e$ sample	$\nu_\mu$ sample
$\nu$ flux and cross section	w/o ND measurement	21.8%	26.0%
	w/ ND measurement	2.7%	3.1%
$\nu$ cross section due to difference of nuclear target btw near and far		5.0%	4.7%
Final or Secondary Hadronic Interaction		3.0%	2.4%
Super-K detector		4.0%	2.7%
total	w/o ND measurement	23.5%	26.8%
	w/ ND measurement	7.7%	6.8%

ビーム方向にそって、水標的層、CH 標的層、という順番で合計 4 層から構成される。WAGASCI 検出器の周りには側面に二台、下流側に一台の合計 3 台の Muon Range Detector(MRD) を配置する予定である。WAGASCI 検出器と MRD の間は 50cm ほどの間隔をあけ、ヒットタイミングの時間差から荷電粒子の運動方向を同定しバックグラウンドイベントを除去する。また TOF 情報を用いて荷電粒子の運動方向を決定したり、検出器外部からのバックグラウンドを除去する目的で、WAGASCI 検出器の表面と MRD の内面をプラスチックシンチレータ層で覆う。最後に Front veto として、プラスチックシンチレータを検出器最上流部に配置する。

### 3.2.2 実験場所

T2K 実験前置検出器ホール地下二階に設置し、J-PARC ニュートリノビームを測定に用いる。設置予定場所は off-axis 角が約  $1.6^\circ$  であり、その地点のニュートリノフラックスはオフアクシス前置検出器でのニュートリノフラックスと似た分布をしている。図 3.2.3 に WAGASCI の設置予定場所とオフアクシス前置検出器の設置予定でのニュートリノフラックスのエネルギー分布を示す。図 3.2.3 から、オフアクシス前置検出器のニュートリノフラックスに近いエネルギースペクトルでの測定が可能である。

### 3.2.3 WAGASCI 検出器

WAGASCI 検出器はビーム軸に垂直方向に縦横 1m、ビーム軸と平行に 2m の大きさをしており、ニュートリノ標的である水と CH の質量はそれぞれ約 1t である。WAGASCI 検出器の内部はプラスチックシンチレータを格子状に組むことで三次元的な格子構造を実現している。その様子を図 3.2.4 に示す。プラスチックシンチレータの並び方は、横方向、グリッド構造、縦方向、グリッド構造、横方向という順番になっており、グリッド構造内のプラスチックシンチレータは縦横 5cm 間隔で並んでいる。その中に水または CH を入れる。そのため、5.0cm $\times$ 5.0cm $\times$ 2.5cm の水または CH のセルが並んでいるような構造になる。ニュートリノ反応が起きて生じた荷電粒子はプラスチックシンチレータを通った際にトラックを形成する。WAGASCI 検出器ではプラスチックシンチレータを三次元格子構造に組むことで、荷電粒子に対して  $4\pi$  のアクセプタンスを実現できる。さらにビーム軸方向は 2.5cm 間隔で縦もしくは横方向のシンチレータ層があるので、ニュートリノ反応で生じた陽子や荷電  $\pi$  粒子などの短いトラックも再構成出来る可能性がある。また WAGASCI

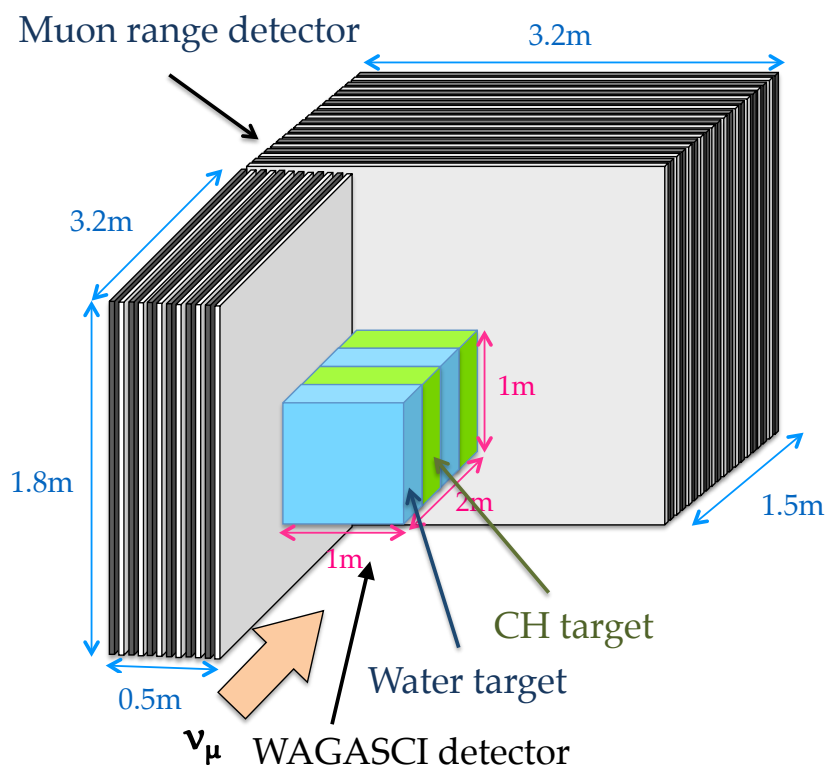


图 3.2.1: WAGASCI 検出器全体図

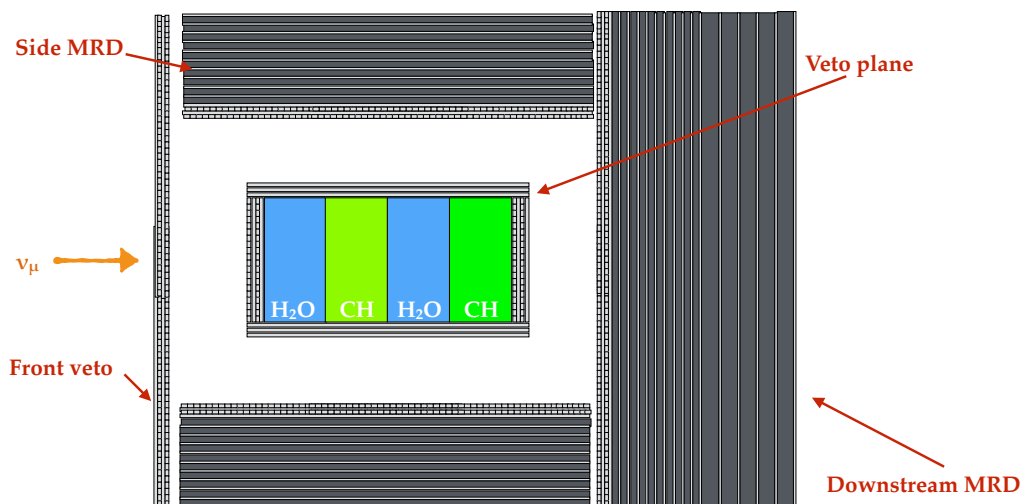


图 3.2.2: WAGASCI 検出器俯瞰図

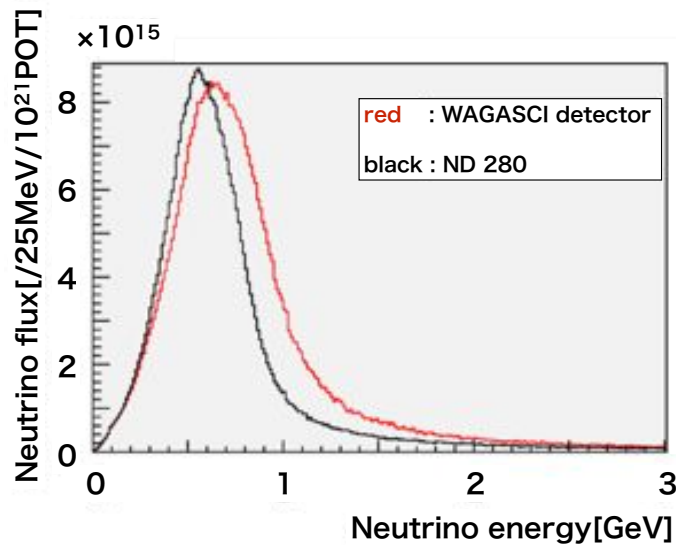


図 3.2.3: MC によるオフ軸前置検出器と WAGASCI 検出器でのニュートリノフラックス

検出器ではプラスチックシンチレータで反応したニュートリノイベントはバックグラウンドになってしまうため、厚さが3mmの薄型シンチレータを用いる。この薄型シンチレータは厚さが3mm、幅が2.5cm、長さが1mの形状をしており、ニュートリノ標的部分とプラスチックシンチレータ部分の体積比は78.8:21.2になる。またこの時のWAGASCI検出器の総ch数は、5120chである。

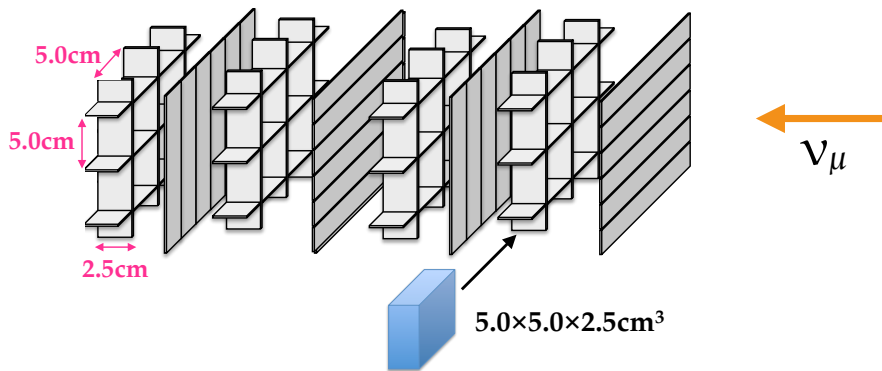


図 3.2.4: WAGASCI 検出器内部図、三次元格子構造

水標的層とCH標的層をビーム方向に対して交互に配置したのは、水標的部とCH標的部でのニュートリノフラックスの違いを、なるべく小さくするためである。各ニュートリノ標的でのニュートリノフラックスが同じであるならば、反応断面積比を取ることで、ニュートリノフラックスのエラーをキャンセルすることが出来る。図3.2.5にMCで見積もった水標的とCH標的部におけるニュートリノフラックスのエネルギースペクトルを載せる。この図からわかるように各ターゲット部分でのニュートリノフラックスはほとんど同じ形をしている。そのため、反応断面積の比を取ることで、ニュートリノフラックスのエラーがキャンセルされる。

最後に、WAGASCI 検出器のイベントディスプレイを図 3.2.6 と図 3.2.7 に示す。図 3.2.6 は、

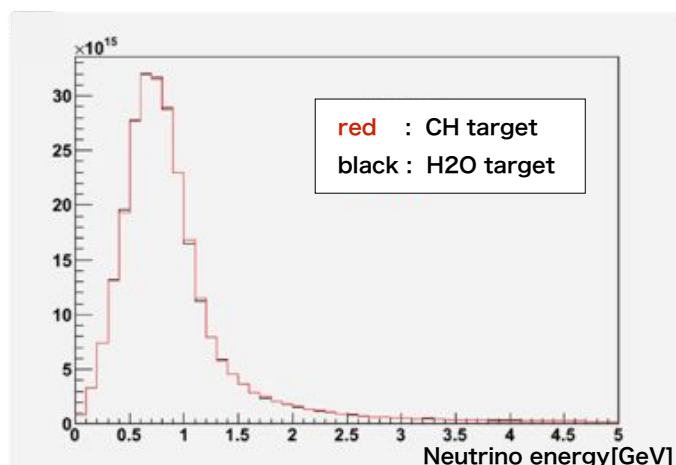


図 3.2.5: WAGASCI 検出器における水標的部と CH 標的部でのニュートリノフラックス

WAGASCI 検出器のグリッド構造がない場合のイベントディスプレイである。この場合、大角度方向に飛んだミューオンに対してはほとんどヒットがなく、検出することは難しい。しかし、図 3.2.7 のように、グリッド構造を追加すると、大角度方向に飛んだミューオンに対して多くのヒットが得られ、検出することが可能になる。よって、三次元格子構造を作ることにより、 $4\pi$  のアクセプタンスを持つことが出来る。

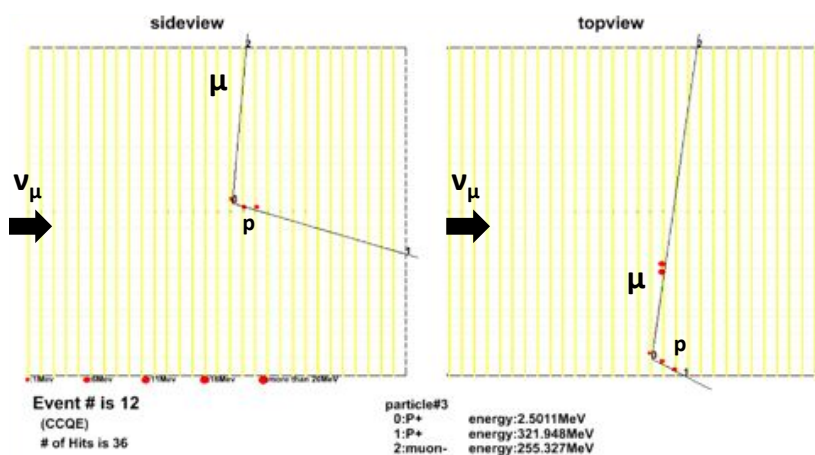


図 3.2.6: WAGASCI 検出器のグリッド構造がない場合のイベントディスプレイ

### 3.2.4 Muon range detector(MRD)

MRD は鉄とプラスチックシンチレータのサンドイッチ構造をした検出器で、ミューオンの検出とその運動量の測定を目的としている。MRD は下流側に一台、側面側に二台設置する予定である。各モジュールは WAGASCI 検出器から 50cm 離れて設置され、ふたつの検出器の間のヒットタイミングの時間差から、荷電粒子の方向を測定する。これにより、壁や床で反応した粒子や、MRD

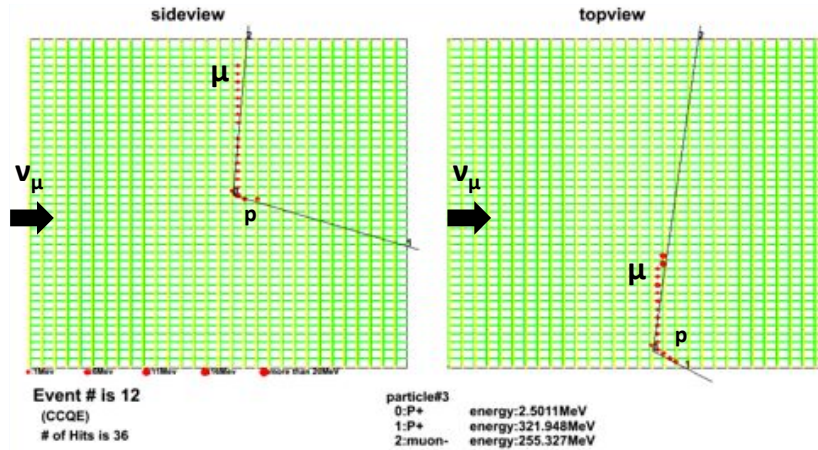


図 3.2.7: WAGASCI 検出器のイベントディスプレイ

自体で反応した粒子などのバックグラウンドとなるイベントを排除することが出来る。

MRD の大きさに関しては、側面側の MRD(Side MRD) が高さが 1.8m、ビーム方向に沿った長さが 3.2m、厚みが 0.5m である。Side MRD は厚さが 3cm の鉄板を 10 層分使用している。下流側の MRD(Downstream MRD) は高さが 1.8m、ビーム方向に垂直な長さが 3.2m、厚みが 1.5m である。Downstream MRD で使用されている鉄板は、厚みが 3cm のものが 20 層分、厚みが 6cm のものが 5 層分用いられ、下流側に厚みが 6cm のものが用いられる。Downstream MRD の厚みが大きいのは、高エネルギーのミュオンはビーム軸との角度が小さくなることが多く、それらのミュオンを止めるためである。Side MRD は約 1GeV まで、また Downstream MRD は約 2GeV までのミュオンの運動量を測定可能である。

MRD で用いるシンチレータは、長さが 1.8m、幅が 20cm、厚みが 7mm の形状をしたものを用い、MRD では一層につき 16 枚使用する。このシンチレータは薄さに対して幅が大きいので、波長変換ファイバーを波状に埋め込んで用いる。その様子を図 3.4.2 に示す。そのため、波長変換ファイバーの長さが長くなるので、MRD で用いるシンチレータに関しては両側読み出しで用いる。また、MRD の内側表面には TOF 測定に重要な時間分解能を向上させるために幅 5cm、厚み 1cm、長さ 160cm または 180cm の INGRID 型シンチレータを用いて、4 層のシンチレータの層を作る。つまり縦方向に 2 層、横方向に 2 層である。こちらは片側読み出しで用いる。よって、MRD の総 ch 数は、2256ch となる。

### 3.2.5 Veto plane

MRD の表面に INGRID 型シンチレータを設置すると同様に、WAGASCI 検出器の周りにも INGRID 型シンチレータを設置する。WAGASCI 検出器の上流側と下流側には、長さが 1m の INGRID 型シンチレータを縦横二層ずつ、合計 4 層のシンチレータを配置する。また WAGASCI 検出器の側面には、長さが 220cm の INGRID 型シンチレータを三層配置する。よって、veto plane の合計の ch 数は 448ch になる。

### 3.2.6 Front veto

WAGASCI 検出器のビーム上流側には MRD を設置しないため、ヒットタイミングの時間差による荷電粒子のバックグラウンドの除去のためにプラスチックシンチレータの layer を設置する。設置位置は WAGASCI 検出器から上流に 50cm 程度離れたところで、プラスチックシンチレータを縦横二層ずつ設置する。Front veto に用いるシンチレータは INGRID 型シンチレータで、Front veto のカバー範囲は Downstream MRD と同様である。よって Front veto は 272ch となる。

## 3.3 目標

我々の WAGASCI 検出器作製における目標は以下のとおりである。

- 検出器の基本性能の確認  
以下の項目を実際にニュートリノビームを用いて確認する
  - － トラックの再構成の efficiency が 10cm 以上の長さのものに対して 99%以上であること
  - － MRD と WAGASCI 検出器の間のヒットタイミングの時間差から、荷電粒子の方向を確認できること
  - －  $dE/dx$  の情報を用いた、ミューオンや荷電  $\pi$  粒子、陽子などの粒子識別能力の確認
- 水と CH の間のニュートリノ反応断面積比を誤差 3%の精度で測定
- 水と CH それぞれに対するニュートリノ反応断面積を誤差 10%の精度で測定

## 3.4 検出器構成要素

### 3.4.1 プラスチックシンチレータ

検出器全体で用いられるプラスチックシンチレータは大きく分けて 3 種類ある。WAGASCI 検出器用の薄型シンチレータ、INGRID 型シンチレータ、MRD 用シンチレータである。WAGASCI 検出器用の薄型シンチレータと INGRID 型シンチレータは、Fermi 国立加速器研究所で開発及び製造された押出成型のプラスチックシンチレータで、INGRID 型シンチレータは INGRID で用いられているシンチレータと同じタイプであり、薄型シンチレータはこの実験のために新たに開発されたものである。INGRID 型シンチレータは断面が  $5\text{cm} \times 1\text{cm}$  の大きさをしており、中央に直径 2~3mm 程度の、波長変換ファイバーを通すための穴が空いている。また薄型シンチレータは断面が  $2.5\text{cm} \times 3\text{mm}$  の大きさをしており、シンチレータの表面、片側から 8.5mm のところにファイバーを通すための深さ 1.2mm の溝が掘ってある。使用の際には、オプティカルセメント等で波長変換ファイバーを溝に固定して、シンチレーション光を集光する。これらのシンチレータは、組成はポリスチレンをベースとして、蛍光剤である PPO と POPOP を質量比で 1%、0.03%混ぜたものである。これらの写真を、図 3.4.1 に示す。

MRD で用いるシンチレータは、幅が 20cm、厚さが 7mm の幅広い形をしており、波長変換ファイバーが、シンチレータの表面に、S 字状に埋め込まれたような形をしている。シンチレータの組成は、押し出し型ポリスチレンに POPOP と para-terphenyl を混ぜたものである。このシンチレータは SMRD で用いられているシンチレータから少し大きさが変わったもので、波長変換ファイバーの光を両側から読み出す。MRD で用いるシンチレータの模式図を図 3.4.2 に示す。

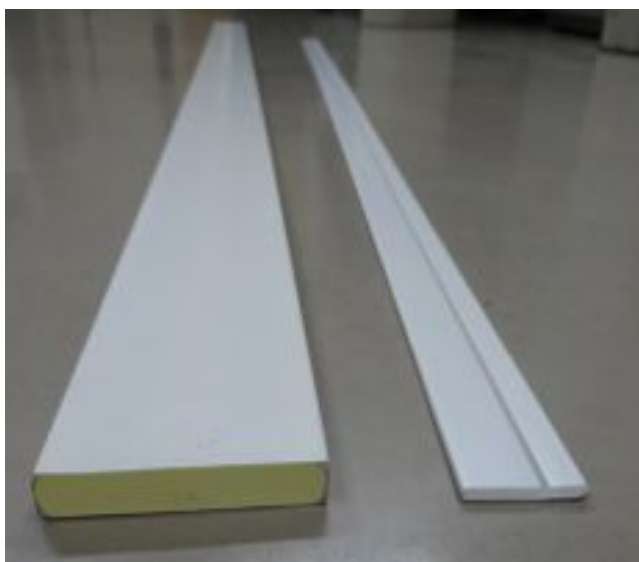


図 3.4.1: WAGASCI で用いるシンチレータと INGRID 型シンチレータ



図 3.4.2: MRD で用いるシンチレータの模式図



### 3.4.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは、WAGASCI 検出器で用いる全てのシンチレータについて、T2K 実験で実績のある Kuraray 社の Y-11(200)MS を用いる。この波長変換ファイバー直径が  $\phi=1.0\text{mm}$  で、マルチクラッド型と呼ばれるコアの部分が屈折率の異なるふたつのクラッドに囲まれたような形をしている。以下の表 3.4.1 に Y-11(200)MS の特性 (カタログスペック) をまとめる。

表 3.4.1: Y-11(200)MS の特性 [2]

直径	1.0mm
Core の屈折率	1.59
Inner cladding の屈折率	1.49
Outer cladding の屈折率	1.42
最大吸収波長	430nm
最大発光波長	460nm
減衰長	~3m

### 3.4.3 MPPC

MPPC は二次元に並列接続された多数の APD(Avalanche PhotoDiode) ピクセルからなる半導体光検出器で、浜松ホトニクス社によって開発された。MPPC の原理などの詳細については後述する。WAGASCI 検出器では数種類の MPPC を用いる。WAGASCI 検出器では、32ch の array 型 MPPC を用いる。これは後述の性能評価で用いている第二世代 MPPC と基本的には同じ性能をしている。この 32ch array 型 MPPC は  $50\mu\text{m}$  ピッチで、受光面が  $\phi=1.5\text{mm}$  の円形をしており、ピクセル数が 716 である。図 3.4.3 に WAGASCI 検出器で用いる 32ch array 型 MPPC の図面を載せる。

また MRD と veto plane と Front veto で用いる MPPC は、第二世代 MPPC で、性能評価で用いた MPPC と同じタイプのものである。この MPPC はピクセルピッチが  $50\mu\text{m}$  で、受光面のサイズが  $1.3\times 1.3\text{mm}^2$  であり、ピクセル数が 667 である。以下の表 3.4.2 に使用する MPPC のまとめを載せる。

表 3.4.2: WAGASCI 実験で用いる MPPC

	WAGASCI 検出器	MRD & Veto plane & Front veto
タイプ	第二世代	第二世代
ピクセルピッチ	$50\mu\text{m}$	$50\mu\text{m}$
受光面	$\phi 1.5\text{mm}$ の円形	$1.3\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ の正方形
ピクセル数	716	667

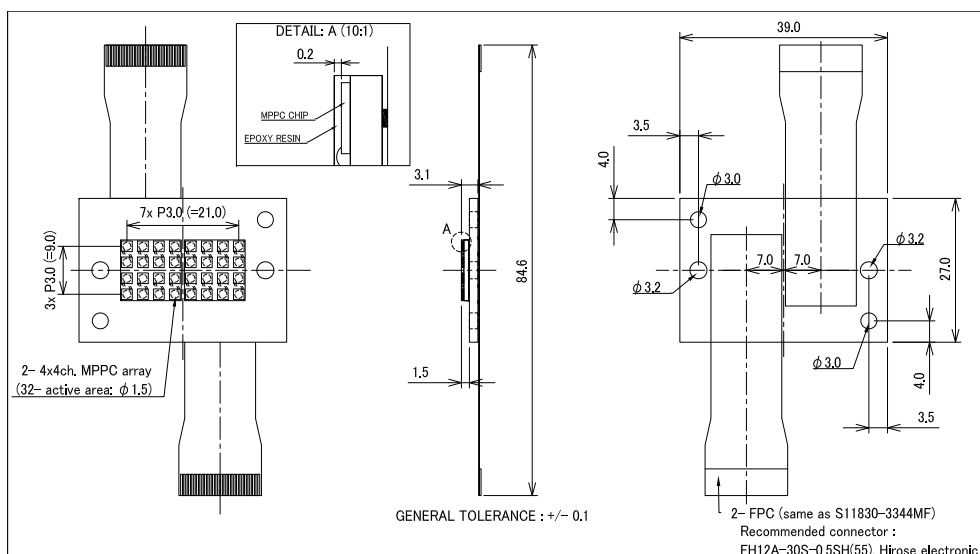


図 3.4.3: WAGASCI 検出器で用いる 32ch array 型 MPPC の図面

### 3.4.4 その他

#### GOMI コネクタ

GOMI コネクタは General Optical MPPC Injection Connector の略で、T2K 京都大学グループが中心となって開発された、MPPC と波長変換ファイバーを接続するためのプラスチック製のコネクタである。GOMI コネクタはファイバーに接着して用いるパーツと MPPC のセラミックパッケージに用いるパーツの二種類があり、これらを組み合わせることで、波長変換ファイバーの端面と MPPC の受光面を接近させることが出来る。これにより、MPPC の光の収量の最大化、光量の安定化などが可能となった。図 3.4.4 と図 3.4.5 に GOMI コネクタの接続の様子を示す。

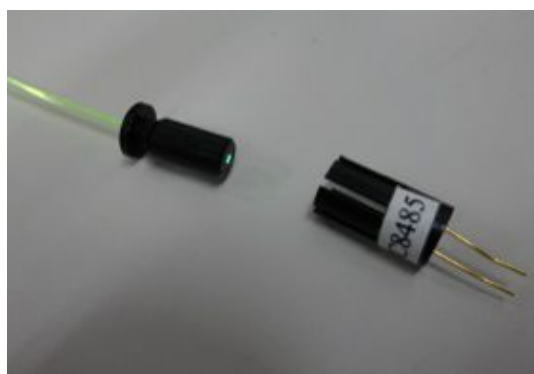


図 3.4.4: 各 GOMI コネクタ



図 3.4.5: GOMI コネクタ接続後

## 第4章 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)

Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)とは浜松ホトニクスによって開発された Pixelated Photon Detector(PPD)の一種である。T2K実験の前置 neutrino 検出器には約60000個のMPPCが用いられており、2009年から現在まで、安定して運転を続けている。また、多数のMPPCを本番の測定に採用したのは、T2K実験が世界初である。本章ではMPPCの動作原理や種々の基礎特性について述べる。

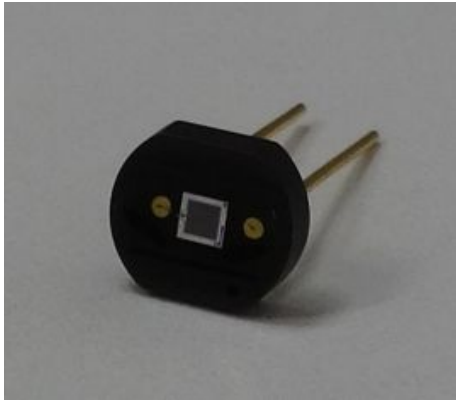


図 4.0.1: MPPC セラミックパッケージの外観。  
このサンプルは受光面が  $1\text{mm}^2$  のもの。

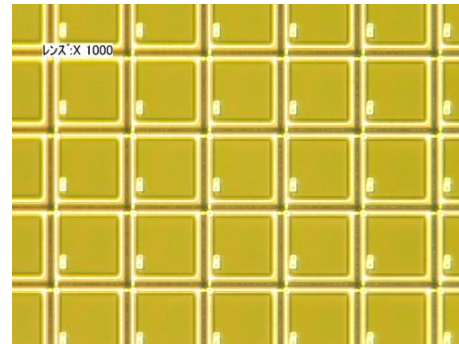


図 4.0.2: MPPC の表面写真。図 4.0.1 の受光面  
を 1000 倍に拡大したもの。(撮影協力:東京大学相  
原・横山研究室)

### 4.1 Pixelated Photon Detector(PPD)

Pixelated Photon Detector(PPD)とは、ガイガーモードで動作する APD(Avalanche Photo Diode)を多数並列に配置した、半導体光検出器の総称である。PPDは、光子を検出したピクセル数を入射した光子の数として考えるため、フォトンカウンティングに優れていると言える。また、小型であること、磁場への耐性、動作電圧の低さ、高い増倍率、高い量子効率、優れた時間分解能など様々な優れた特徴を持っており、大きな将来性を秘めた検出器として世界中の様々な研究所で開発が行われている。

### 4.2 APDの動作原理

MPPCはAPDを多数並列に配置したものであるなので、まずAPDについて説明する。PN接合に逆方向電圧をかけるとn型半導体の電子とp型半導体の正孔は接合部から離れる方向に力を受

け、空乏層が拡大する。その空乏層に光が入射し、価電子帯の電子を励起すると電子正孔対が生じ、それぞれが逆方向に動くことで電流が流れる、というのがフォトダイオードの動作原理である。その時の様子を図 4.2.1 に示す。その際印加電圧が低い場合は増倍領域は存在せず、ひとつの入射光子に対して得られるキャリアは最終的に一組である。この過程で得られる電荷量は非常に小さいため、検出するには非常に大きな光量が必要になってしまう。

そこで APD では、ある一定以上の電場をかけることにより電子を加速し、原子と衝突する際に次々と電子を放出させていく雪崩 (アバランシェ) 増幅を利用する。具体的には、フォトダイオードの PN 接合間に真性半導体を入れることで空乏層を広げるという処置と、N 型半導体側にさらに N 型の極性の強い半導体を付加することで、空乏層中に電場の強い部分 (multiplication region) を生じさせるという処置を行う。図に APD 内の構造とその時の電場の様子を示す。これにより空乏層 (absorption region) に入射した光によって生じた電子は absorption region にかかっている弱い電場によって multiplication region まで移動し、アバランシェ増幅を起こすことで、シグナルを増幅させることが出来る。

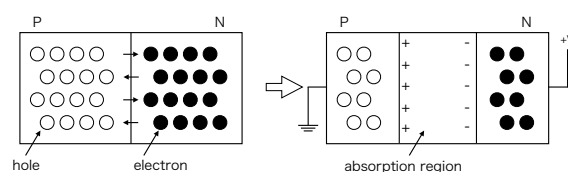


図 4.2.1: 逆電圧をかけた時のフォトダイオードの様子

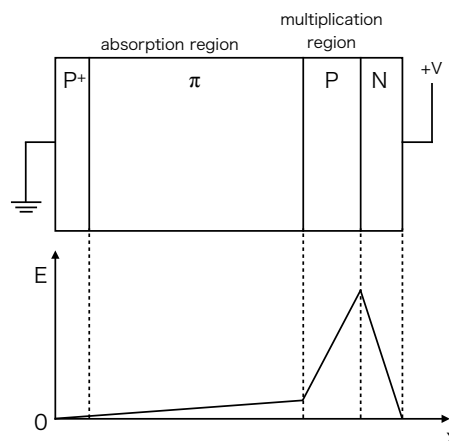


図 4.2.2: APD の構造と電場の様子

APD の動作モードは大きく分けて 2 つあり、ノーマルモードとガイガーモードと呼ばれる。ノーマルモードではゲインが 10~100 倍程度で、印加電圧が一定であれば入射光子数に比例した電化出力が得られる。しかしノーマルモードのゲインでは検出器固有のノイズに対して有意な信号を得るためにはある程度の光量が必要であり、単光子の信号を検出することはできない。それに対してガイガーモードでは、ある一定以上の電圧 (ブレイクダウン電圧) で動作させることで、ゲインが 10 の 6 乗のオーダー程度得られ、入射光子数に関係なく、電圧に依存した一定量の電荷出力が得られる。以下にノーマルモードとガイガーモードの特徴を比較したものを表 4.2.1 に示す。

	ノーマルモード	ガイガーモード
動作電圧	ブレイクダウン電圧以下	ブレイクダウン電圧以上
ゲイン	10~100	~10 <sup>6</sup>
出力	入射光子数に比例	入射光子数に依らず、電圧値に依存した値

ノーマルモードとガイガーモードの変化が起きる原因は正孔にある。電子もしくは正孔が衝突電離を起こす確率は電場の強さと温度によるのであるが、正孔は半導体中の有効質量が電子のそれよりも3倍程度大きいいため、衝突電離の確率が低くなり、増幅を起こしにくい。

電子よりも正孔のほうが3倍程度半導体中の有効質量が大きいいため、それぞれの衝突電離の確率が異なる。よって、ノーマルモードでは電子のみがアバランシェ増幅を起こすことになる。電子のみがアバランシェを起こす場合、電子がドリフトしていくにつれて次々と増倍を起こすが、電子がすべて multiplication region を抜けてしまうとアバランシェ増幅は終了する。しかしバイアス電圧がブレイクダウン電圧以上になると、正孔もアバランシェ増幅を起こすようになる。この場合、電子のアバランシェ増幅で生じた正孔が、新たにアバランシェの起源となり、逆方向にドリフトしていくため、次々とアバランシェ増幅が起こることになる。この状態がガイガーモードであり、これによって高い増倍率が得られるのである。図 4.2.3 にノーマルモードとガイガーモードでの増幅過程の様子 [3] を示す。

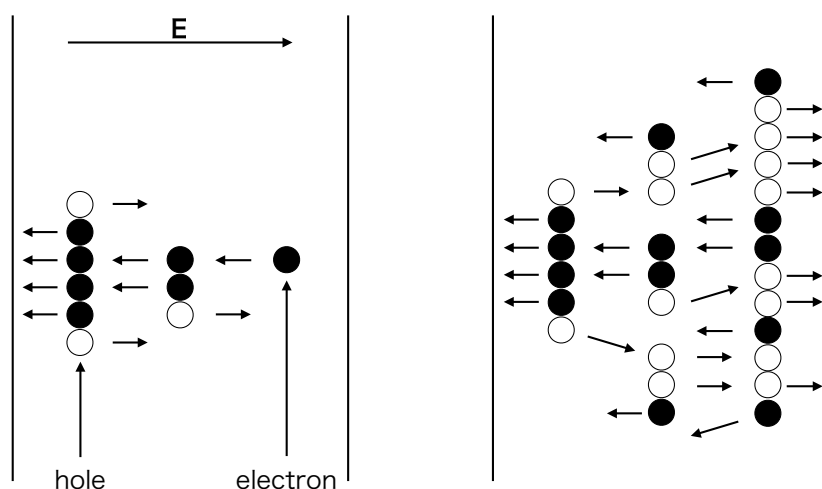


図 4.2.3: ノーマルモードとガイガーモードでの増幅過程の様子

ガイガーモード APD にはこのガイガーモードの増幅機構 (ガイガー放電) を止めるクエンチとして、クエンチング抵抗と呼ばれるものが搭載されている。この抵抗は、増幅された信号が読み出される電極のすぐ後に設置されており、ここに電流が流れると電圧降下を起こす。その結果、半導体部分にかかっている電圧が降下し始め、ブレイクダウン電圧と同じになった時にアバランシェ増幅が収束する。ガイガーモード APD ピクセル 1 つあたりの等価回路 [4] を図 4.2.4 に示す。

ガイガーモード APD からの出力電荷量は以下の式で表される。

$$Q = C(V_{bias} - V_{bd}) = C(\Delta V) \quad (4.2.1)$$

ここで Q は出力電荷量、C は APD の静電容量、 $V_{bias}$  はバイアス電圧、 $V_{bd}$  はブレイクダウン電圧である。バイアス電圧とブレイクダウン電圧の差を  $\Delta V$  とすると、常に  $\Delta V$  の電圧降下を起こすので、出力電荷は入射光子数に依らず、バイアス電圧に対して線形に増加する。

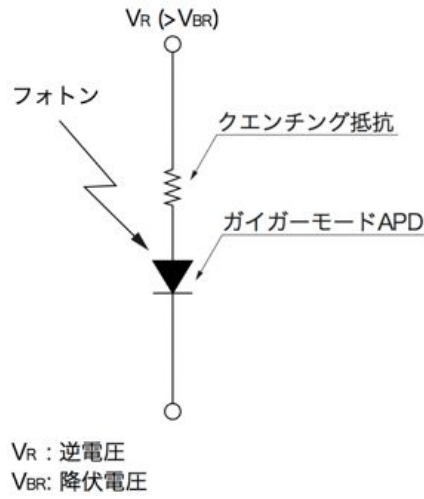


図 4.2.4: ガイガーモード APD ピクセル 1 つあたりの等価回路

### 4.3 MPPC の動作原理

MPPC はガイガーモード APD が二次元に並列に接続された構造になっている。MPPC の等価回路を図 4.3.1 に示す [4]。

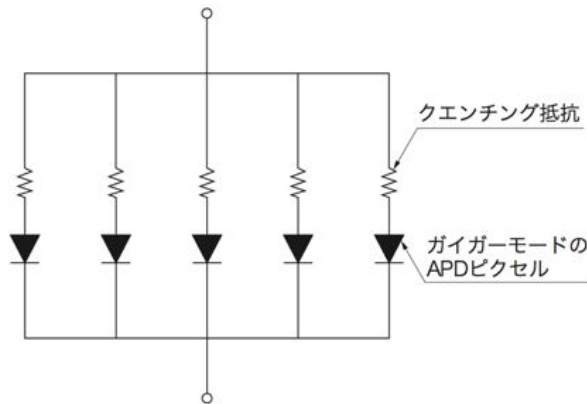


図 4.3.1: MPPC の等価回路

MPPC は様々なタイプのものが開発されているが、MPPC における典型的な APD ピクセル一つの大きさは一辺  $25\mu\text{m}$  や  $50\mu\text{m}$  の正方形で、 $1.0\text{mm}$  や  $1.3\text{mm}$  各受光面に敷き詰められた構造をしている。先ほど述べたように各 APD ピクセルでは入射光子数に依らず一定の出力信号を出し、またすべての APD ピクセルは並列に接続されそれぞれにクエンチング抵抗が付いている。すべての APD ピクセルは同じ読み出し回路につながっているため、MPPC から得られる信号は各 APD ピクセルからの総和となる。よって MPPC から得られるシグナル  $Q_{total}$  は以下の式で表されるように、各 APD ピクセルの信号に、光子を検出した APD ピクセルの数  $N_{fired}$  をかけたものになる。

$$Q_{total} = C(V_{bias} - V_{bd}) \times N_{fired} \quad (4.3.1)$$

したがって、特に低光量の測定の際は、MPPCは非常に高いフォトンカウンティング能力を有しているといえる。図4.3にMPPCの典型的なヒストグラムを載せる。最も左に見えているピークがpedestalであり、そこから右に1p.e., 2p.e.,...と続いていく。(p.e.とはphoto equivalentの略で、1p.e. イベントというと光子一つによる信号のイベントのことである。)

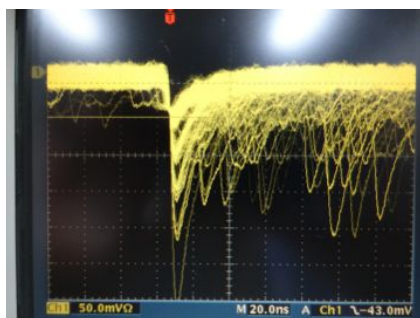


図 4.3.2: MPPC の波形 ( $\Delta V=2.0V$ )

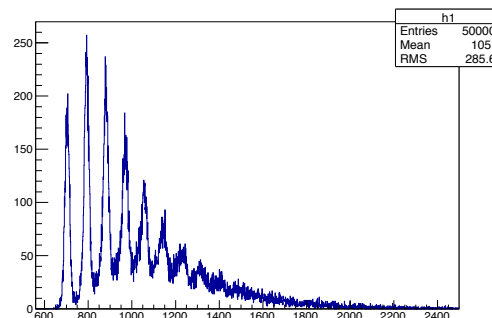


図 4.3.3: MPPC の ADC 分布 ( $\Delta V=2.0V$ )

仮に複数の光子が偶然同じピクセルにほぼ同時に入射した場合は、出力信号と入射光子数の線形性が保たれなくなってしまう可能性があり、その効果は特に光量が大きくなっていくに連れて顕著になっていく。しかしながら、現在 T2K 実験で用いられている MPPC は  $50\mu\text{m}$  ピッチでピクセル数は 667 であり、出力信号の線形性 (パルスリニアリティー) は  $\sim 100\text{p.e.}$  程度まで保たれることが測定によって確かめられている。ちなみに WAGASCI で用いる MPPC は同様に  $50\mu\text{m}$  ピッチで、ピクセル数が 667 もしくはそれ以上である。したがって、我々の実験で用いられる光量範囲である、数十 p.e. 程度では、問題なく出力信号の線形性は保たれる。

## 4.4 MPPC の基礎特性

ここでは MPPC の各基礎特性について述べる。

### 4.4.1 ゲイン

MPPC のゲインは、各 APD ピクセル一つに入った光子による信号がどの程度増幅されたかで定義される。

$$Gain = \frac{Q(1 \text{ ピクセルによる信号の電荷数})}{e(\text{素電荷})} \quad (4.4.1)$$

式 (4.4.1) は式 (4.2.1) を用いて次のように書ける。

$$Gain = \frac{C\Delta V}{e} \quad (4.4.2)$$

この式 (4.4.2) からわかるように、ゲインは  $\Delta V$  にのみ依存する。

#### 4.4.2 ブレイクダウン電圧

ブレイクダウン電圧は前述のように、APD ピクセルがノーマルモードからガイガーモードに変化する際の電圧のことであり、ブレイクダウン電圧は温度依存性を持っている。MPPC の温度が上昇すると、結晶中の原子の格子振動が大きくなるため、電場で加速したキャリアが十分にエネルギーを持たないうちに結晶と衝突することが多くなる。そのため結晶のイオン化を起しにくくなり、アバランシェ増幅が起こりにくくなる。このため、ブレイクダウン電圧の大きさは、温度が上昇するにつれて上昇するということになる。

各温度におけるブレイクダウン電圧を測定する際には、恒温槽等で MPPC の温度を一定に保ち、いくつかの電圧についてゲインを測定する。そしてゲインが 0 になる電圧を外挿して求めることで、その温度におけるブレイクダウン電圧を測定することが出来る。

#### 4.4.3 ノイズレート

MPPC は光子が入射しない場合でもシグナルを出すことが有り、これをダークノイズという。ダークノイズの原因としては二種類の原因が考えられており、 $\Delta V$  に対応した一定の出力信号を出すため、これらは正しい信号とは区別できないという欠点を持つ。

- 熱励起

- 主として空乏層における電子が、半導体自身の温度による黒体輻射を吸収してエネルギーバンドギャップを超えるエネルギーを得ることで、電子正孔対が生成される事により信号が生じる。この効果は温度が高いほど顕著になり、常温においては熱励起による効果が支配的である。

- トンネル効果

- ダイオードに高電場の逆バイアスをかけることにより、価電子帯にある電子が伝導帯にトンネル効果で遷移し、電子正孔対が生成される事がある。この効果は、電場にのみ依存することが知られており、低温中で熱励起を抑えてやることにより支配的になる。

以上のことから、ダークノイズが生じる確率は受光面の面積に比例し、温度と  $\Delta V$  に対して単調に増加するということになる。このようなダークノイズが一秒間に起こる回数をノイズレートと呼ぶ。

#### 4.4.4 クロストーク

アバランシェ増幅が起きている際に、制動放射や再結合などによって二次的光子が放出されることがある。この二次的光子が別の APD ピクセルで観測されてしまうと、そのピクセルでもガイガー放電が起きてしまう。このような現象をクロストークという。二次的光子が生成されてから他のピクセルで増幅が起きるまでの時間は非常に短いと考えられており、クロストークは複数の信号が同時に発生しているかのように観測される。クロストークは本来一つの信号だったものが 2 つ、もしくはそれ以上の信号に見せてしまうので、パルスリニアリティーやダイナミックレンジに悪影響を及ぼす。図 4.4.1 に典型的なクロストークの波形を示す。



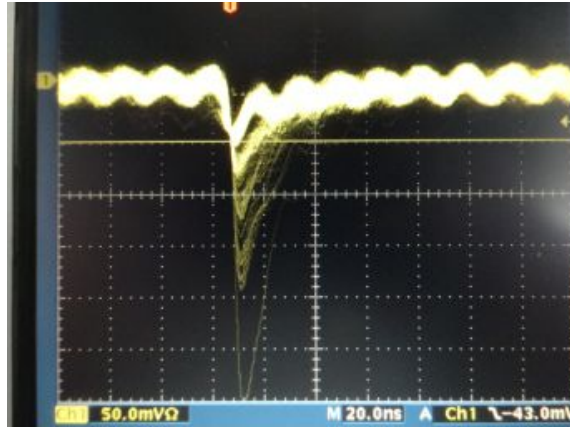


図 4.4.1: crosstalk の波形。本来一つの信号が複数個に見える。

#### 4.4.5 アフターパルス

あるピクセルにおけるガイガー放電の途中で、増倍されたキャリアが一時的に半導体中の格子欠陥に捕獲され、しばらく後に再放出され新たなガイガー放電のトリガとなる事がある。この過程で発生した二次的なパルスをアフターパルスという。捕獲から再放出までの時間は数 ns から数百 ns に及ぶ。アフターパルスはクロストークとは違って最初にアバランシェ増幅が起こったピクセルと同じピクセルで発生する。また、ADC による波高積分型の測定ではゲート幅中にアフターパルスが生じると本来の信号よりも大きな信号に見せてしまう原因になる。温度依存性については、温度が下がるとキャリアが格子欠陥に捕獲される確率が高くなってしまうため、アフターパルスは増加する傾向にある。図 4.4.2 に典型的なアフターパルスの信号を示す。

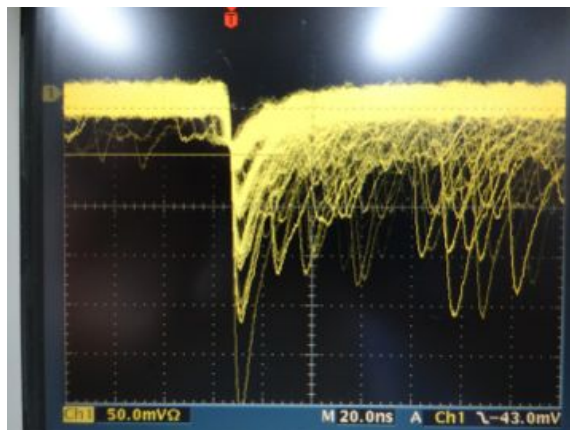


図 4.4.2: アフターパルスの波形。左側のダークノイズとクロストークによる波形の右側がアフターパルスによるものである。

MPPC の各ピクセルに複数個の光子が入射するとき、理想的には得られる信号はポアソン分布に従うはずである。しかしクロストークとアフターパルスの影響により、実際に観測される信号はそれよりも多少大きくなっている。そのため、実際に入射した光子数を見積もる際には、これらの

効果を補正してやる必要がある。

#### 4.4.6 Photo Detection Efficiency(PDE)

MPPCにおけるPDEは、受光面のどこかに光子一個が入射した時、その光子を検出できる確率であると定義する。このとき、PDEは以下の式で表すことが出来る。

$$PDE = QE \times \epsilon_{\text{geometrical}} \times \epsilon_{\text{Geiger}} \quad (4.4.3)$$

ここで、各因子は以下のとおりである。

- QE (Quantum Efficiency)
  - APDの量子効率のこと。つまりAPDピクセルに光子がひとつ入射した際に電子正孔対が生成される確率である。QEはMPPCの受光感度 $S[\text{A/W}]$ と、入射光子の波長に依存する。受光感度は入射光量 $[\text{W}]$ に対する光電流 $[\text{A}]$ の割合で、ゲインに比例する値である。
- $\epsilon_{\text{geometrical}}$ 
  - MPPC受光面に対するAPDピクセルの有感領域の占める割合のことで、開口率と呼ばれる。MPPC受光面は各APDピクセルと配線部からなり、配線部は光に対して不感であるので、各APDピクセルのピッチが大きくなるに連れて開口率は大きくなる。T2K実験で用いられているMPPCの開口率は約60%である。
- $\epsilon_{\text{Geiger}}$ 
  - 生成された電子正孔対がガイガー放電を起こす確率のこと。バイアス電圧に依存する値である。

## 第5章 MPPCの性能評価

この章では我々の実験で用いる予定である第二世代の MPPC の性能評価を行ったので、現在 T2K 実験で使われている第一世代の MPPC との比較を交えながらその結果について述べる。

### 5.1 第二世代 MPPC

第二世代 MPPC が浜松ホトニクスで開発された。第二世代 MPPC は印加電圧範囲やノイズレート、クロストーク・アフターパルス率、PDE など、第一世代に比べて様々な性能が向上している。そのため我々の WAGASCI 実験では第二世代の MPPC を用いる予定である。

この節では、T2K 実験で用いられている第一世代 MPPC と第二世代 MPPC の比較として、第二世代 MPPC の大まかな紹介を行う。なお、ここで紹介する第二世代 MPPC は veto plane に使用する予定である MPPC の中間評価版である。最終版では、PDE などの性能のさらなる向上が期待される。なお、それぞれの型番は、第一世代が S10362-13-050C であり、第二世代は S13081-050CX である。次節からそれらの各性能の定量的な評価を行う。

#### 5.1.1 デバイス比較

今回の比較に用いる MPPC の詳細について新旧比較を行う。表 5.1.1 からわかるように、ピクセルピッチ、受光面積、ピクセル数などは全く同じである。

表 5.1.1: 第二世代 MPPC、第一世代 MPPC 比較

	Type No.	Serial No.	Pixel Pitch	Size of Device	Number of Pixels
Old MPPC	S10362-13-050C	TD6600	50 $\mu$ m	1.3 $\times$ 1.3mm <sup>2</sup>	667
New MPPC	S13081-050CX	1095,1096	50 $\mu$ m	1.3 $\times$ 1.3mm <sup>2</sup>	667

#### 5.1.2 外観

今回性能評価したのは第一世代 MPPC と同様セラミックパッケージタイプである。図 5.1.1 にそれぞれ外観を載せる。基本的な見た目は全く同じである。唯一確認できるのは、MPPC のカソードを示す黒い穴と、電圧を付加する側から伸びたピンを設置するためのスペースとの相対位置が異なることである。



図 5.1.1: 第二世代 MPPC と第一世代 MPPC。左側が第二世代で右側が第一世代である。

### 5.1.3 MPPC 表面

MPPC 表面の拡大写真を図 5.1.2 と 5.1.3 に載せる。どちらも Pixel pitch は  $50\mu\text{m}$  で、今回のサンプルでは開口率は第一世代と第二世代で同じである。

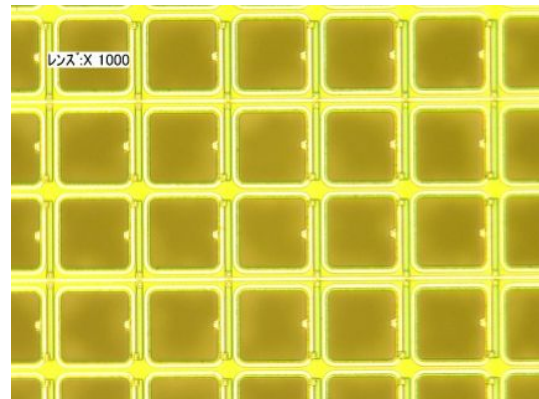
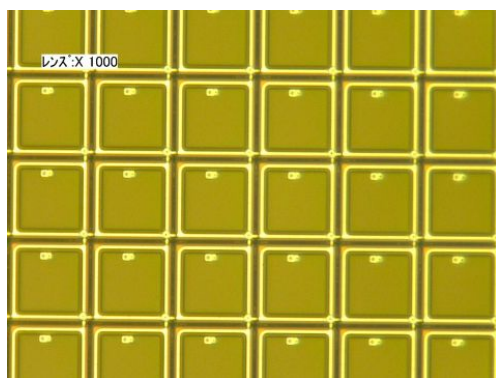


図 5.1.2: 第二世代 MPPC の表面 1000 倍拡大写真 (撮影協力:東京大学相原・横山研究室) 図 5.1.3: 第一世代 MPPC の表面 1000 倍拡大写真 (撮影協力:東京大学相原・横山研究室)

### 5.1.4 波形

同じ  $\Delta V (=2.0\text{V})$  での MPPC の信号のオシロスコープでの波形を図 5.1.4 と 5.1.5 に載せる。なお、光源などは用いておらず、どちらもダークノイズを撮影したものである。

一目見て明らかであるが、第二世代 MPPC はとても綺麗に信号が見えている。

まずトリガがかかっている信号を見ると、第一世代 MPPC では 4p.e. 程度まで信号が見えているが、第二世代 MPPC ではクロストークはほとんど起こっておらず、2p.e. 程度までしか見えていない。このことから、クロストーク率は大幅に減少していることがわかる。またそのトリガー前後の



図 5.1.4: 第二世代 MPPC のオシロスコープでの波形。 $\Delta V=2.0V$ .

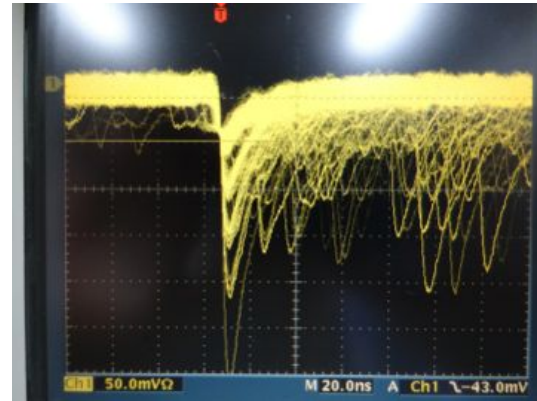


図 5.1.5: 第一世代 MPPC のオシロスコープでの波形。 $\Delta V=2.0V$ .

信号は、それぞれダークノイズとアフターパルスから成り立っているものである。こちらも第二世代 MPPC のほうが、第一世代 MPPC よりも大幅に少なく、ノイズレート、アフターパルス率が共に減少していることがわかる。

## 5.2 MPPC の性能評価

(MPPC not crosstalk suppression ver の性能評価は付録に付ける予定です。)

この節では第一世代 MPPC と第二世代 MPPC の比較のために行った性能評価について述べる。測定に用いた MPPC は、表 5.1.1 に記載されている、第一世代 MPPC 一個と第二世代 MPPC 二個である。測定は全て恒温槽内 20 度の環境のもとで行った。今回測定した項目は以下のとおりである。

- ブレイクダウン電圧
- ゲイン
- キャパシタンス
- ノイズレート
- クロストーク・アフターパルス率
- Relative PDE

### 5.2.1 セットアップ

今回の測定の概略図を図 5.2.1 に、その時の写真を図 5.2.2 と図 5.2.3 に示す。図 5.2.3 中の手前側から波長変換ファイバーが伸びており、そこに付いている白いものが光拡散のためのキャップである。反対側の四角く囲まれた領域には MPPC が設置されている。各測定項目によって、LED の光が必要であるかどうか異なるので、それぞれの MPPC について LED を点灯させて測定する

場合と LED を点灯させないで測定する場合の二回測定を行った。今回の解析ではほとんどの測定項目について LED をつけて測定した時のデータを用い、ノイズレートの解析の時のみ LED をつけないで測定した時のデータを用いる。

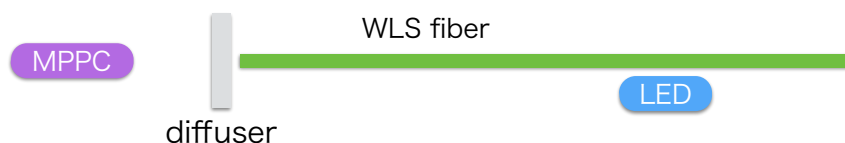


図 5.2.1: MPPC 性能測定のためのセットアップ

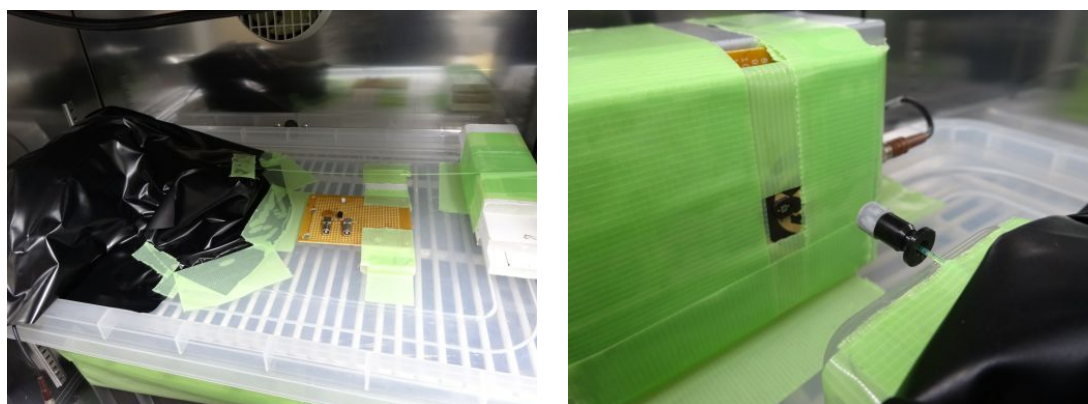


図 5.2.2: MPPC 性能測定のためのセットアップの全体写真

図 5.2.3: MPPC 性能測定のためのセットアップ MPPC 付近の拡大写真。

MPPC は入射光の波長によって PDE が異なるため、できるだけ実際の実験と同じ波長の光を用意して測定することが望ましい。よって今回は、青色 LED の光を波長変換ファイバーを通してから MPPC で読みだした。青色 LED の発光波長の図と、波長変換ファイバーの吸収発光波長、シンチレータの発光波長のスペクトル図をそれぞれ図 5.2.4、図 5.2.5、図 5.2.6 に示す。LED は Kingbright 製 L-934MBD、波長変換ファイバーは Kuraray Y-11(200)MS であり、シンチレータは Fermi 研究所製の押し出し成型でつくったプラスチックシンチレータである。

図 5.2.4 と図 5.2.5 の発光波長を見比べると、LED は 430ns 程度にピークを持ち、シンチレータは 420ns 程度にピークを持っているため、これらの発光波長は似通っていると考えることが出来る。また波長変換ファイバーの吸収波長のピークが 420ns であるため、使用した LED と波長変換ファイバーの組み合わせは問題ないと言える。

PDE の測定をする場合は、それぞれの MPPC での獲得光量を議論することになる。そのため、時間経過や MPPC の付け替え作業に対して MPPC での獲得光量が不変であることが必要である。そのためにいくつか対策を行ったので紹介する。まず LED の発光光量を一定にするため、LED ドライバを導入した。その写真と回路図を図 5.2.7 と図 5.2.8 に示す。この LED ドライバはコンデンサにためた電荷を放出させることで LED を光らせるもので、bias 電圧が一定であるならば光量は一定であると考えられる。

また波長変換ファイバーは固定されているが、LED と波長変換ファイバーの相対位置が多少変

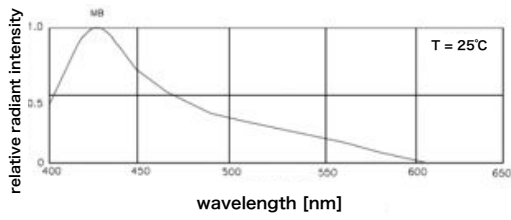


図 5.2.4: 温度 25 度の時の LED の発光波長スペクトル

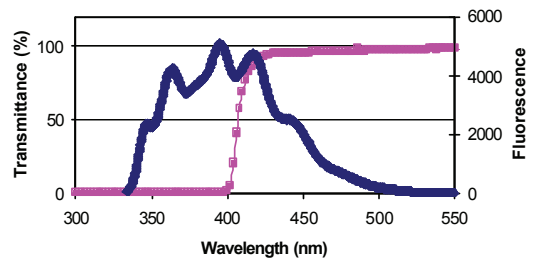


図 5.2.5: シンチレータの発光波長スペクトル (青) と透過率 (ピンク)

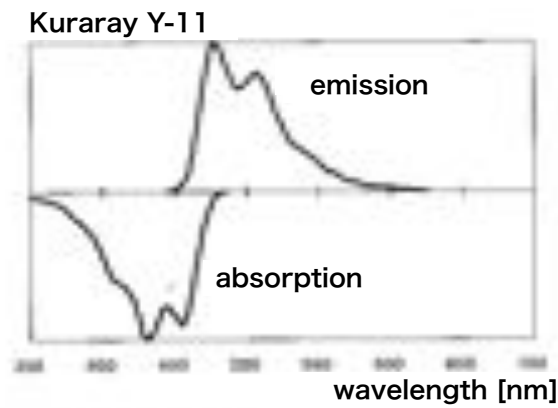


図 5.2.6: 波長変換ファイバーの吸収発光波長スペクトル。下半分が吸収過程で上半分が発光過程。

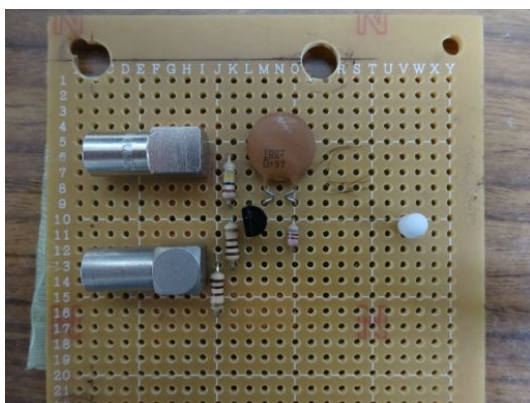


図 5.2.7: LED ドライバ

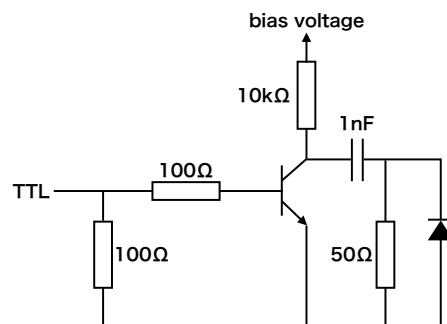


図 5.2.8: LED ドライバの回路図

化してもファイバーに入射する光量が一定になるように、LED の照射部の窓を紙やすりで軽くこすって光を拡散させ、その上からさらに光を拡散させるキャップをかぶせている。これと同様のことが波長変換ファイバーと MPPC の間でも考えられるので、図 5.2.3 にもあるように、ファイバーの MPPC 側の端に接着されたオプティカルコネクタに光拡散のキャップをかぶせている。最後に読み出し回路に対する MPPC の位置調整についてであるが、MPPC の二本の足の先の部分と付け根の部分を両方固定出来るようにし、MPPC の付け外しでアライメントのズレが最小になるように工夫した。その時の MPPC の読み出し回路には図 5.2.9 を使用し、その回路図は図 5.2.10 である。以上の対策を行い、その効果の確認のために LED の光量を一定にし、MPPC を付け直して光量を測定するというのを 10 回行った。その結果、10 回の測定の平均光量が 1.86[p.e.] であったのに対して、測定のばらつきを表す sigma は、0.036[p.e.] となった。よって、MPPC の付け外しによる光量の変化が約 2% に抑えられた。<sup>1</sup>。

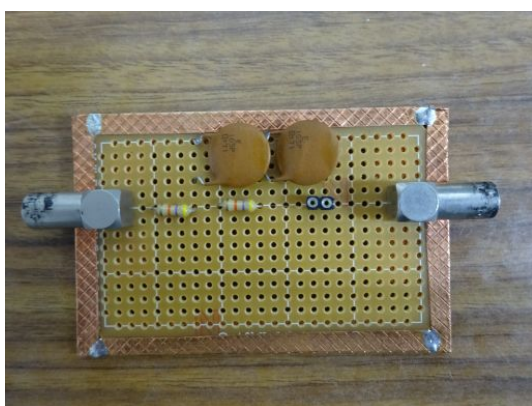


図 5.2.9: MPPC 読み出し回路

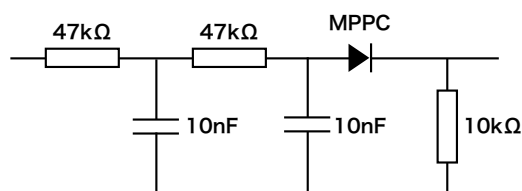


図 5.2.10: MPPC 読み出し回路の回路図

<sup>1</sup>なお今回の測定で、オプティカルコネクタを直接 MPPC に接続しなかったのは、本論文に掲載している MPPC の他に同時に 1mm 角の受光面の MPPC の性能評価も行っていたためである。1mm 角のものに GOMI コネクタで波長変換ファイバーを接着すると、波長変換ファイバーの直径が 1mm であるので、少しのアライメントのずれで光量が大きく変わってしまうことが知られている。



## 5.3 測定結果

### 5.3.1 ゲイン

ゲインは式(4.4.1)より、1p.e.に対応する電荷量を素電荷で割ったものなので、LEDの光を当てた時のADC分布をdouble gaussianを用いてfittingし、pedestalと1p.e.ピークの差(1p.e. ADC ch)から電荷情報を取得した。つまり、

$$Gain = \frac{Q(1p.e.)}{e} = \frac{charge(1ADCch) \times (1p.e.ADCch)}{e} \quad (5.3.1)$$

である。ここで、charge(1 ADC ch)は0.25pCである。図5.3.1にサンプルとしてfittingの様子を示した。pedestalと1p.e.ピークを二回fittingしている。

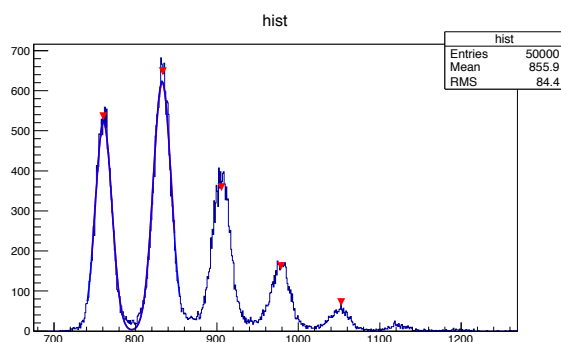


図 5.3.1: LED 照射時の第二世代 MPPC( $\Delta V=2.0V$ ) の ADC 分布。pedestal と 1p.e. のピークを double gaussian でフィットした。

これを各電圧に対して繰り返し、ゲインのバイアス電圧依存性を求めた。その結果を図 5.3.2 に示す。

ゲインはそれぞれこのようにバイアス電圧に対し単調増加し、 $\Delta V$  に比例していることがわかる。第一世代 MPPC と新型 MPPC の大きな違いとして、まず MPPC の動作電圧が大きく異なることがわかる。第一世代 MPPC はバイアス電圧が 68V~70V で動作し、第二世代 MPPC では 53V~57V 程度で動作している。また第二世代 MPPC ではノイズレート、クロストークレート、アフターパルスレートが大幅に減少したため、より大きな  $\Delta V$  での測定が可能になった。なお推奨最大印加電圧は、第一世代で  $\Delta V=2.0V$ 、第二世代で  $\Delta V=4.0V$  となっている。

### 5.3.2 ブレイクダウン電圧

ブレイクダウン電圧は図 5.3.2 のゲインの各プロットを 1 次関数で fitting し、図 5.3.3 のようにゲインが 0 になる点を外挿することで求められる。表 5.3.1 に、この方法で求めた breakdown 電圧のまとめを示す。

### 5.3.3 キャパシタンス

式(4.4.2)より、ゲインの電圧依存性のプロットの傾きを求めれば APD ピクセルのキャパシタンスを求めることが出来る。図 5.3.4 にゲインの  $\Delta V$  依存性を示す。それぞれの傾きはほとんど同

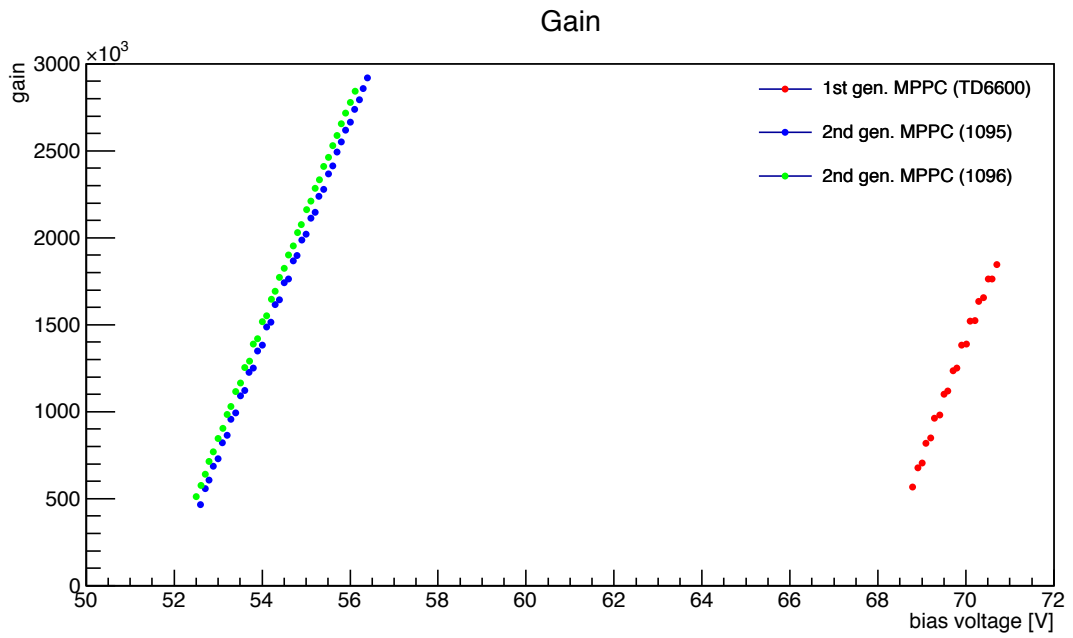


図 5.3.2: ゲインのバイアス電圧依存性

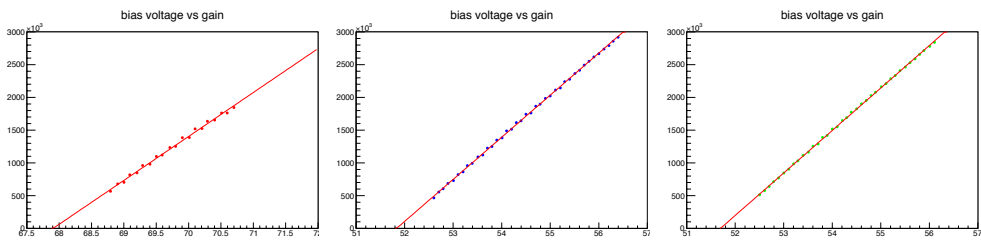


図 5.3.3: ゲイン fitting の様子。左から第一世代、第二世代、第二世代 MPPC

表 5.3.1: ブレイクダウン電圧まとめ

ブレイクダウン電圧 [V]	
1st gen. MPPC TD6600	67.91
2nd gen. MPPC 1095	51.83
2nd gen. MPPC 1096	51.70

じである。キャパシタンスを計算した結果を表 5.3.2 にまとめる。

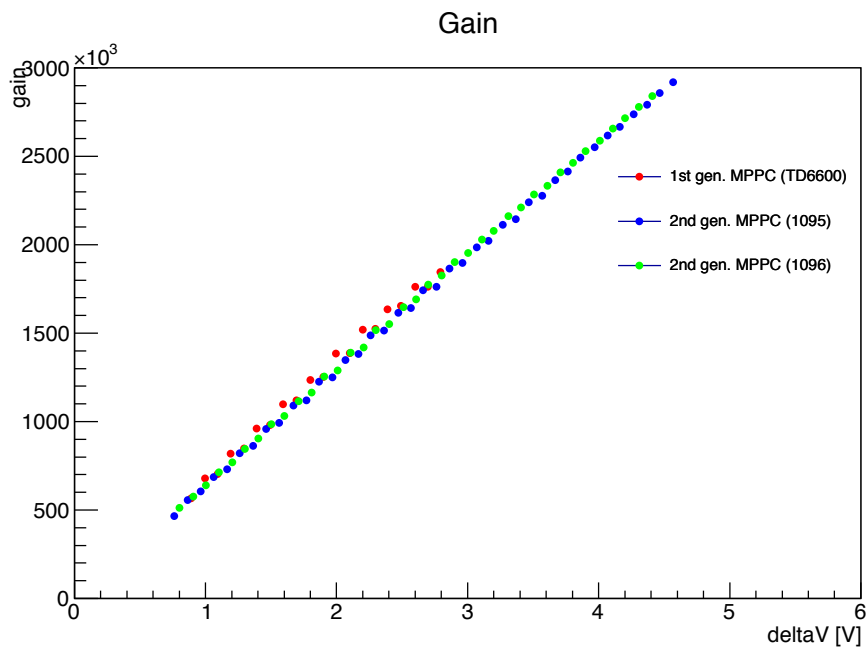


図 5.3.4: ゲインの  $\Delta V$  依存性

### 5.3.4 ノイズレート

ノイズレートの計算は、LED が点灯していない時のデータを用いる。具体的には、ノイズイベントの総数を測定時間で割ることで求められる。今回の測定では、ノイズイベントは ADC 分布の pedestal と 1p.e. ピークの間に 0.5p.e. の threshold を設定し、シグナルの大きさがそれを超えているイベントであると定義した。また測定時間は、ADC のゲート幅と全イベント数を掛け合わせることで求められる。今回の測定では、ゲート幅は 400ns に設定した。

$$Noise\ rate[Hz] = \frac{Events\ over\ 0.5p.e.\ threshold}{Gate\ width \times Total\ events} \quad (5.3.2)$$

今回 0.5p.e. threshold は、1p.e. ピークと pedestal ピークの間であると設定する。そのためには 1p.e. ピークの位置が必要であるが、第二世代 MPPC はノイズレートが非常に低く、pedestal ピークに比べて 1p.e. ピークはほとんど見えない (図 5.3.5 左図)。そのため fitting から 1p.e. ピー

表 5.3.2: キャパシタンス

キャパシタンス [fF]	
1st gen. MPPC TD6600	107.4
2nd gen. MPPC 1095	102.9
2nd gen. MPPC 1096	103.9

クの位置を正しく求めることは困難である。測定時間を長く取れば 1p.e. ピークの位置を決めることは可能ではあるが、長く時間がかかってしまうことと、 $\Delta V$  の小さいところでは pedestal ピークに埋もれてしまうため、今回は別の方法を採用した。

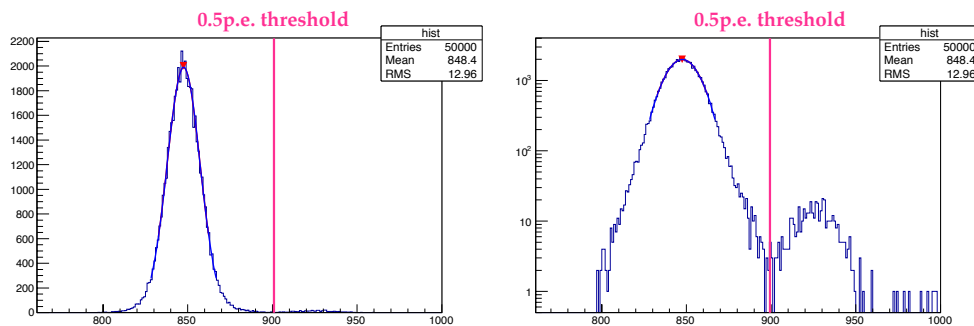


図 5.3.5: 第二世代 MPPC(1095) の  $\Delta V=2.0V$  の時の ADC 分布 (LED 未照射時)。

今回は 1p.e. ピークの位置を求めるために、LED 照射時のデータを用いる。LED 照射時の同じバイアス電圧の時のデータで pedestal ピークと 1p.e. ピークのフィッティングを行う。その時の ADC ch の差を用いて、LED なしの時の 1p.e. ピークの位置を決める。図 5.3.5 にその時の様子を示した。LED 照射時のデータを用いても、うまく threshold が設定できていることがわかる。これによって LED なしの時の 0.5p.e. threshold が決定できる。この方法で求めた noiserate の結果が図 5.3.6 ようになる。

図 5.3.6 を見ればわかるように、第一世代 MPPC と比べて第二世代 MPPC は大幅にノイズレートの減少している。 $\Delta V=2.0V$  のところで比較すると、第二世代 MPPC のノイズレートは第一世代 MPPC のそれに比べて約 3% である。なお今回の測定方法では、ゲートの外で起こったノイズイベントに起因するアフターパルスの信号によりノイズレートが多く観測されているので、実際のノイズレートはこれよりも少し下がるはずである。この効果は、アフターパルス率の高い第一世代 MPPC で大きいと考えられる。

なお、図 5.3.6 の特に新型 MPPC において、 $\Delta V$  が小さいところでノイズレートが高くなっている現象が確認されるが、これは 0.5p.e. threshold の効果に起因する問題である。つまり、pedestal ピークと 1p.e. ピークの距離が小さい時、単純にそれらの中間に threshold を設定してしまうと、1p.e. イベント側に pedestal ピークの一部が入りこんでしまい、実際よりもノイズイベントが多く観測されるように見えてしまう。この件に関しては測定に改善が必要である。

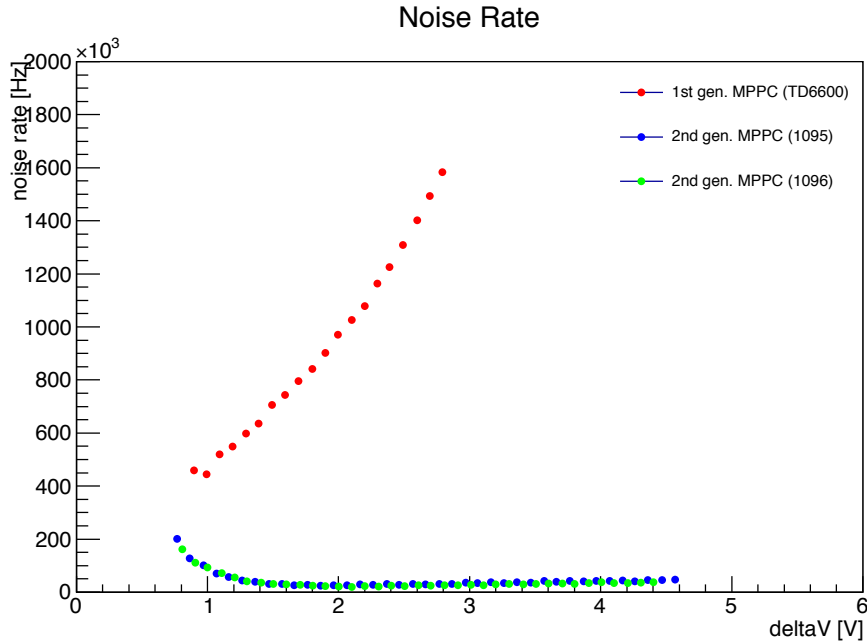


図 5.3.6: ノイズレートの  $\Delta V$  依存性

### 5.3.5 クロストーク・アフターパルス率

クロストークとアフターパルスは、データ取得のゲート幅を変更させたり、波高で threshold などをかけたりすれば区別することは可能である。しかし通常の電荷積分型 ADC を用いた測定では、クロストークとアフターパルスは区別できず、両者の組み合わせとして現れる。よって今回は、両者をまとめてクロストーク・アフターパルス率として測定することにした。

クロストークとアフターパルスの効果により、0p.e. のイベント数からポアソン分布と仮定して見積もられる 1p.e. のイベント数と、実際に観測された 1p.e. のイベント数には違いがあるため、クロストーク・アフターパルス率を以下の式で定義することにする。

$$\text{Crosstalk} \cdot \text{After pulse rate} = \frac{\text{expected 1p.e. events} - \text{measured 1p.e. events}}{\text{expected 1p.e. events}} \quad (5.3.3)$$

新型 LED の場合 1p.e. のイベント数が少ないため、今回は LED 照射時のデータを用いる。そして、以下のようにして *expected 1p.e. events* を求めた。

まず  $P(N)$  を  $N$ p.e. のイベントが観測される確率、 $\lambda$  を光量の平均値とする。MPPC のイベントが生じる原因は、ダークノイズと LED であるので、1p.e. のイベントが観測される確率は以下のように書ける。

$$P(1) = P(1)_{LED} \times P(0)_{Noise} + P(0)_{LED} \times P(1)_{Noise} \quad (5.3.4)$$

LED、ダークノイズによって生じる信号はポアソン分布に従うはずであるので、式 (5.3.4) はそれぞれによる平均値  $\lambda_{LED}$ 、 $\lambda_{Noise}$  を計算すれば求められる。まず  $\lambda_{Noise}$  は先ほどの測定から Noise rate が求められているので、ゲート幅を掛け合わせるにより計算できる。今回の測定でもちいたゲート幅は 400ns である。また  $\lambda_{LED}$  は  $P(0)_{LED}$  より求める。 $P(0)_{LED}$  は  $P(0)$  と  $P(0)_{Noise}$  の間に、

$$P(0) = P(0)_{LED} \times P(0)_{Noise} \quad (5.3.5)$$

の関係があり、 $P(0)$  は実際にヒストグラムを積分することにより求められ、 $P(0)_{Noise}$  は  $\lambda_{Noise}$  が求められているので計算できる。よって  $P(0)_{LED}$  が計算できるので  $\lambda_{LED}$  が求められる。この方法での計算結果を図 5.3.7 示す。

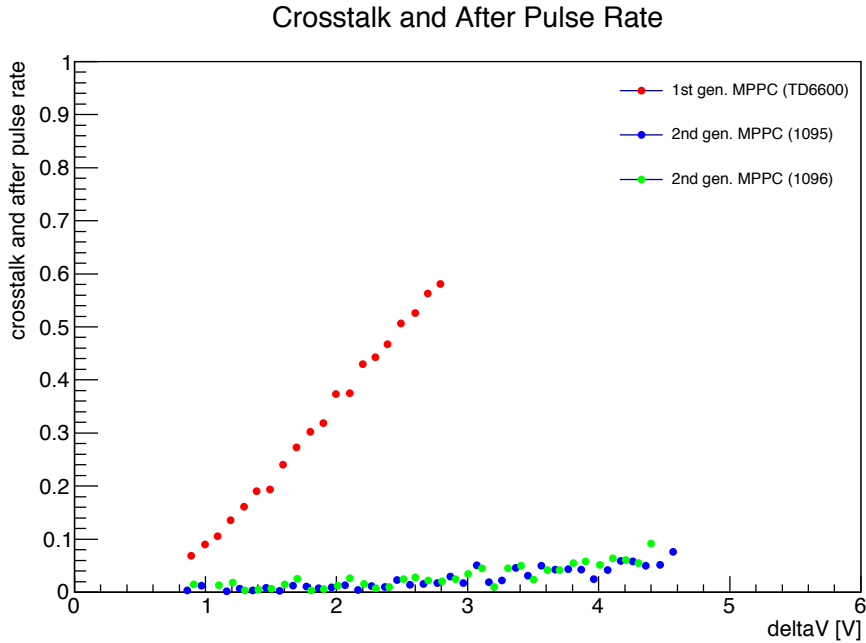


図 5.3.7: クロストーク・アフターパルス率の  $\Delta V$  依存性

新型 MPPC のクロストーク・アフターパルス率は第一世代のそれに比べて大幅に減少していることがわかる。 $\Delta V=2.0V$  のところで比較すると、新型 MPPC のクロストーク・アフターパルス率は第一世代に比べて約 4% である。

### 5.3.6 Relative PDE

今回の測定は第一世代 MPPC との比較を目的としているので、第一世代 MPPC の獲得光量との比を relative PDE と定義し、それを測定する。基準の光量として、第一世代 MPPC の  $\Delta V=1.0V$  の時の PDE を 1 と定義した。5.2.1 で述べたように、MPPC の受光面に入射する光量のばらつきは 2% 程度で一定になるようなセットアップにしている。

relative PDE の解析で用いる光量は、クロストーク・アフターパルス率の時と同じような計算を行い、ダークノイズによる影響を落とした、LED 照射時の獲得光量を用いる。具体的には、式 (5.3.5) を使い、 $P(0)$  と  $P(0)_{Noise}$  から  $P(0)_{LED}$  を計算し、 $\lambda_{LED}$  を求めた。この時に用いたゲート幅は 400ns である。図 5.3.8 に計算結果を示す。

同じ  $\Delta V$  において、新型 MPPC の PDE は第一世代 MPPC の PDE よりも少し低くなっている ( $\Delta V=2.0V$  の時 25% 程度減少)。その理由はおそらく第二世代 MPPC では半導体部分の作りを変化させていて、それによって同じ  $\Delta V$  での電界強度が下がったためであると考えられる。電界強度は、アバランシェ増幅が起きる確率、つまり  $\epsilon_{Geiger}$  が関係しているため、PDE が減少したのである。しかし第二世代 MPPC 試作機では印加可能な電圧範囲が大きくなったため、 $\Delta V=4V$

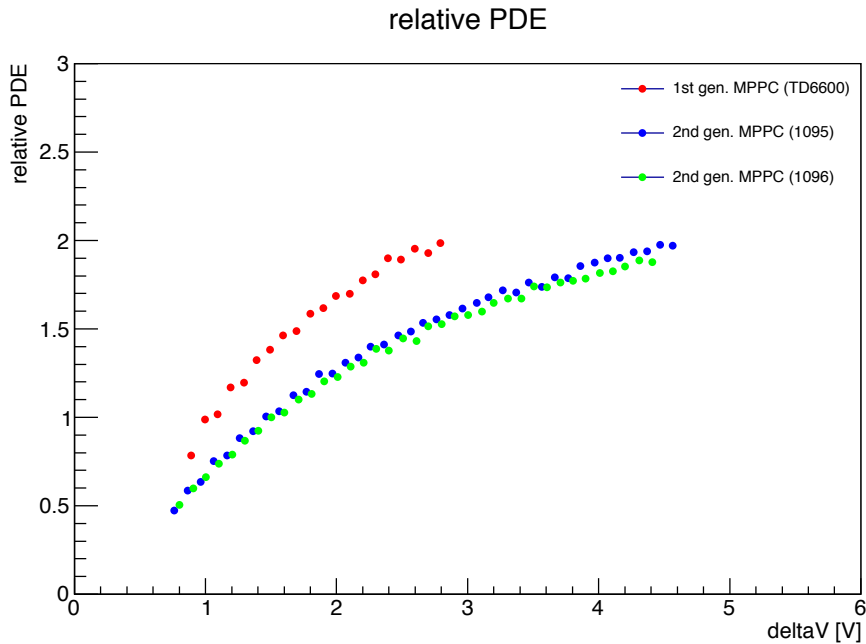


図 5.3.8: relative PDE の  $\Delta V$  依存性

で動作させることが出来る (測定ではもう少し電圧をかけているが、スペックシートでは最大電圧は  $\Delta V=4.0V$  となっている)。その結果、第一世代 MPPC よりも大きな PDE で測定することができ、光量の増加が期待される。第一世代 MPPC の、T2K 実験で用いられている  $\Delta V(=1.1V)$  での PDE と、第二世代 MPPC の  $\Delta V=4.0V$  での PDE を比較すると、第二世代では約 1.8 倍の PDE で測定できることになる。

### 5.3.7 まとめと考察

以下に性能評価のまとめとして、第一世代 MPPC と第二世代 MPPC の同じ  $\Delta V$  での性能比較と、実際に検出器で用いる予定の  $\Delta V$  での性能比較をまとめる。

表 5.3.3 は単純に MPPC の性能の比較のために、同じ  $\Delta V$  での各性能をまとめたものである。最右列は、第二世代の結果の平均値を第一世代の結果で割った値である。

表 5.3.4 は実際に検出器で使われる予定である  $\Delta V$  で性能を比較したものである。第二世代の MPPC では第一世代の MPPC に比べて、より高いゲインと PDE が得られる。一方で、ノイズレートやクロストーク・アフターパルスレートは第一世代よりも減少している。よって、第二世代の MPPC は第一世代の MPPC よりも各性能が大幅に向上しており、非常に有用であることが示された。

表 5.3.3: 同  $\Delta V$  での性能評価まとめ

MPPC	第一世代 MPPC	第二世代 MPPC	第二世代/第一世代	
Serial No.	TD6600	1095	1096	
$\Delta V$ [V]	2.0	2.0	2.0	
ゲイン	$1.38 \times 10^6$	$1.25 \times 10^6$	$1.29 \times 10^6$	92.0[%]
ブレイクダウン電圧 [V]	67.9	51.8	51.7	
キャパシタンス [fF]	107	103	104	
ノイズレート [kHz]	971	26.1	21.7	2.46[%]
クロストーク・アフターパルス率 [%]	37.3	0.805	1.28	2.80[%]
relative PDE	1.71	1.26	1.25	73.5[%]

表 5.3.4: 使用する  $\Delta V$  での性能評価まとめ

MPPC	第一世代 MPPC	第二世代 MPPC	第二世代/第一世代	
Serial No.	TD6600	1095	1096	
$\Delta V$ [V]	1.1	4.0	4.0	
ゲイン	$7.03 \times 10^5$	$2.55 \times 10^6$	$2.59 \times 10^6$	365[%]
ブレイクダウン電圧 [V]	67.9	51.8	51.7	
キャパシタンス [fF]	107	103	104	
ノイズレート [kHz]	520	42.3	36.6	7.59[%]
クロストーク・アフターパルス率 [%]	10.5	2.50	5.19	36.6[%]
relative PDE	1.03	1.90	1.84	181[%]



## 第6章 WAGASCI検出器で用いるシンチレータの性能評価

### 6.1 水中での宇宙線による光量測定

WAGASCI 検出器ではシンチレータと波長変換ファイバーを水中に入れて測定を行うため、水中でも空気中と同様に十分な光量が得られることと、水中で長期間安定した光量が得られることを確認する必要がある。その確認のために、ここでは INGRID 型シンチレータと波長変換ファイバーを水中に入れ、空気中と水中での光量の比較と、水中での光量の安定性の測定を行った。第3章で述べたように、WAGASCI 検出器で用いる薄型シンチレータは INGRID 型シンチレータと組成などは同じである。

#### 6.1.1 水中光量比較セットアップ

測定に用いたシンチレータは今回は INGRID 型であり、30cm の長さにして4枚重ねにし、一番上と一番下のシンチレータの光量を測定した。間の二枚のシンチレータはスペーサーとして用いているため、シンチレータ間のクロストークは抑えられている。また測定に用いた波長変換ファイバーは WAGASCI 検出器でも用いる Kuraray 社の WLS fiber Y-11 であり、長さを約 70cm にして用いている。使用した MPPC は T2K 実験で用いられている第一世代 MPPC で、 $\Delta V=1.3V$  に設定した。測定時の温度は、約 30 °C である。その時のセットアップの様子を図 6.1.1 に示す。空気中と水中での比較のために、水がある場合とない場合のそれぞれで、ファイバーの曲率半径を変えて測定を行った。

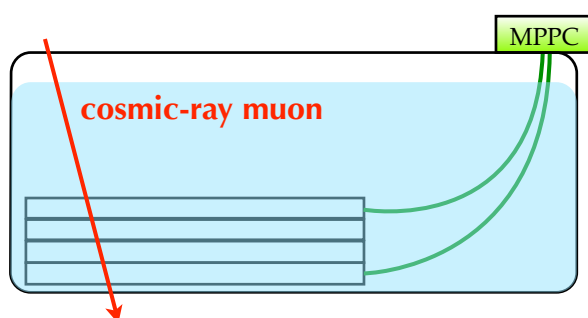


図 6.1.1: 水中での宇宙線光量測定のセットアップ

### 6.1.2 水中光量比較測定結果

水中と空気中での宇宙線による光量測定の結果を図 6.1.2 に示す。図中凡例の upper, lower は上下のシンチレータを意味し、r はファイバーの曲率半径を表す。グラフから分かるように空気中と水中では水中のほうが平均光量が 40%ほど大きいという結果になった。これは水と空気の屈折率の差により、ファイバーの集光率が変化したためであると考えられる。

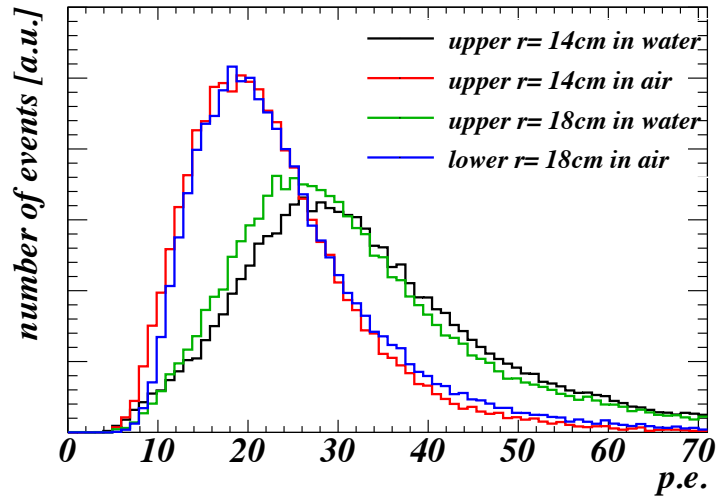


図 6.1.2: 水中と空気中での光量

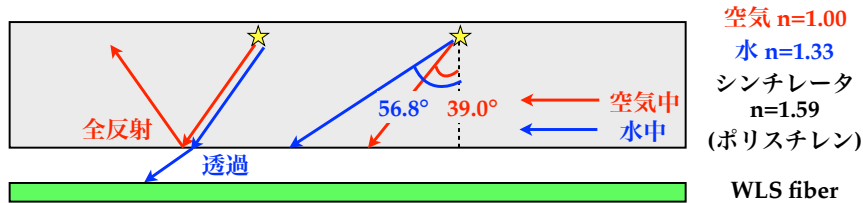


図 6.1.3: 水中でのファイバーの集光率の変化

図 6.1.3 は集光率の変化の様子を詳しく説明したものである。各物質の屈折率は、空気の場合  $n=1.00$ 、水の場合  $n=1.33$ 、シンチレータ (ポリスチレン) の場合  $n=1.59$  である。シンチレータで発生した光は普通にファイバーに入るものと、シンチレータから出る際に全反射しファイバーに入らないものが存在し、その割合が空気中と水中で異なるため、集光率に差が生じる。図中に示したようにシンチレータから空気中、または水中に光が出る際、境界面で全反射せずに透過するには光はある円錐の領域内を通って行くことになる。その時の円錐の半頂角がそれぞれ、屈折率の関係から、 $39.0^\circ$  と  $56.8^\circ$  と計算される。よって、それぞれの場合で作られる円錐の領域の立体角を  $2\pi(1 - \cos \theta)$  で計算すると、 $1.40\text{str}$  と  $2.84\text{str}$  になる。シンチレータ内での減衰や反射などを考慮に入れなくてはならないため立体角の差がそのまま光量差になっているわけではないが、これが水中で光量が増えたことの一因であると考えられる。

シンチレータからファイバーに行くところの他に、もう一つ水と空気の屈折率の差による効果が働くのが、波長変換ファイバー内を光が伝搬するところである。その時の図を図 6.1.4 に示した。

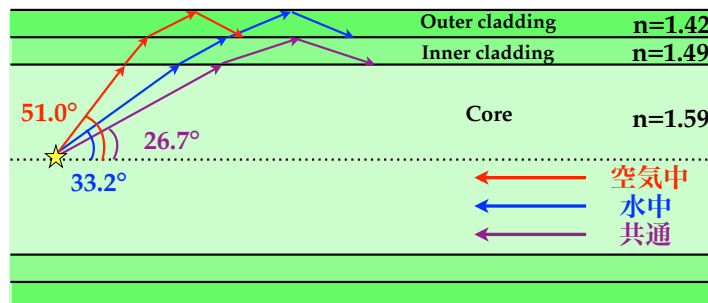


図 6.1.4: 水中と空気中でのファイバー内の光の伝搬

第 3.4.2 節で示したように、この実験で用いる WLSfiber Kuraray Y-11 は Multi-clad type であり、core, Inner cladding, Outer cladding の三層構造になっている。波長変換ファイバー内で発生した光は全反射を繰り返し伝搬していくため、光がある円錐内に入っていれば、全反射を繰り返すことになる。Inner cladding と Outer cladding の境界で全反射するものは水中と空気中で違いはないが、Outer cladding まで行った光は空気中と水中で全反射の割合が異なってくる。図 6.1.3 と同様に図 6.1.4 中に記載してある角度がそれぞれの場合での、円錐状の全反射する領域の半頂角である。この時の円錐の立体角を先程と同様に計算すると、空気中の場合が 2.33str、水中の場合が 1.03str となる。先ほどのファイバーに光が入る時の集光率の違いの影響と今回の結果を合わせるとそれぞれの効果が相殺して空気中と水中で獲得光量があまり変化しないことが予想されるが、実際にはそうはなっていない。この理由として考えられるのが、Outer cladding における光の減衰である。Outer cladding は減衰しやすいため、ある程度の長さの波長変換ファイバーであるならば、空気中でも水中でも伝搬する光量はほとんど変わらないということになる。この結果、空気と水の屈折率の違いによる波長変換ファイバーにおける光の伝搬の違いよりも、シンチレータから波長変換ファイバーへの集光率の差が、獲得光量に大きく効いてくるのである。

### 6.1.3 ファイバーの曲げ方による光量の変化

図 6.1.1 のセットアップで、シンチレータの位置を変えることによりファイバーの曲率半径を変更し、光量の変化を見た。その測定結果を図 6.1.5 に示す。グラフからわかるように、水中でファイバーの曲率半径を変更しても、獲得光量に変化はないことがわかる。これは波長変換ファイバーの Outer Cladding での光の伝搬がほとんど無いということの裏付けでもある。

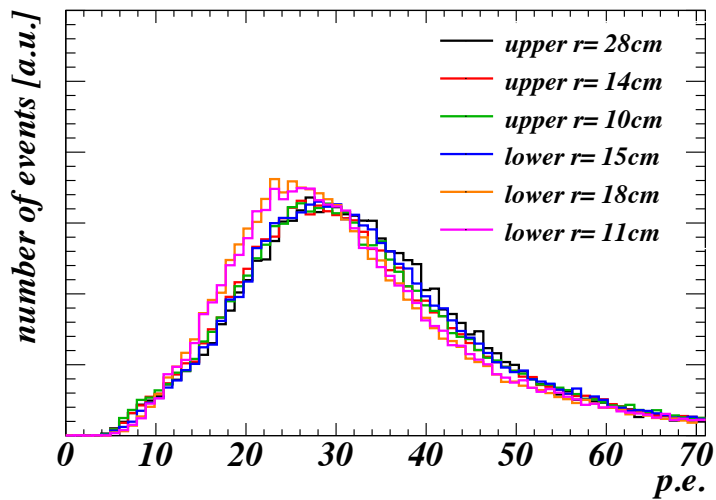


図 6.1.5: 水中でファイバーの曲率半径を変えた時の光量の変化

## 6.2 プラスチックシンチレータと波長変換ファイバーの水中での長期性能試験

### 6.2.1 セットアップ

WAGASCI 検出器ではプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、反射材、オプティカルセメントを長期間ニュートリノ標的である水中に入れて測定を行う。そのため水中においてそれらが劣化して性能が落ちないかどうか確かめる必要がある。今回は二種類の測定を行って、これらの長期的な性能試験を行った。

一つ目の測定は、プラスチックシンチレータと、押出成形シンチにおける酸化チタンドープの反射材、波長変換ファイバーの長期性能を調べたものである。図 6.1.1 のセットアップで水中における宇宙線の光量やファイバーの曲げ方による光量の変化などを測定した後、同じセットアップで長期間光量の測定を行った。水槽は恒温槽に入れて 20 度に保ち、第一世代 MPPC を用い、 $\Delta V=1.1V$  で測定を行った。また恒温槽内は外部とは遮断されているため、恒温槽内の湿度の上昇を抑えるために、水槽部分をラップフィルムで覆い、恒温槽内に乾燥剤としてシリカゲルを配置した。それに加えて新たに宇宙線以外の光源として LED と、その LED の光量のモニタリングのための PMT を導入した。その時のセットアップを図 6.2.1 に示す。写真左上の基板が MPPC 二個の読み出しのための基板であり、その下の基板が LED ドライバである。その横にモニター用 PMT を設置している。LED とモニター用 PMT を導入したのは、もし光量に変化があった場合にその原因が何かを特定するためである。光量が落ちる原因として考えられるのが、シンチレータや波長変換ファイバーの劣化の他に、湿気により波長変換ファイバーと MPPC の間に水滴がついてしまうことや、MPPC 読み出し基板での結露により MPPC への印加電圧が下がってしまうことなどである。もし宇宙線をトリガにした場合の光量が落ちて、LED による光量も同じように落ちていれば、光量低下の原因はシンチレータや波長変換ファイバーの劣化ではないと言える。ただそのためには LED の光量がいつも安定しているということを保証する必要があるので、図 6.1.1 のアルミ部品を

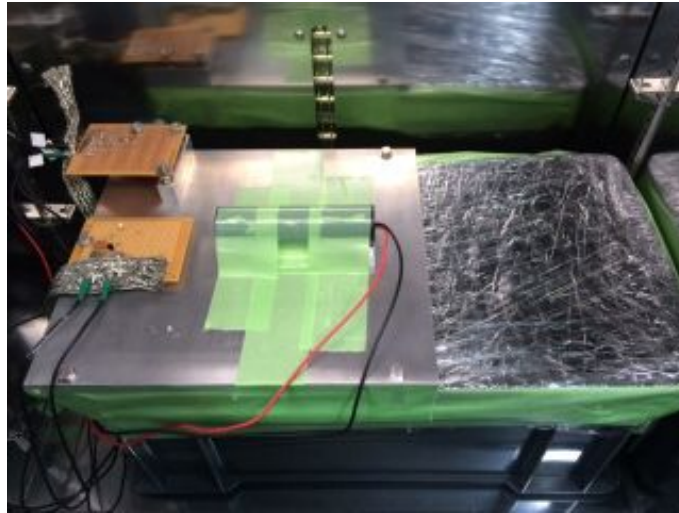


図 6.2.1: 長期安定製試験のセットアップ

用いて、LED と波長変換ファイバーの相対位置を一定に保つようにした。図 6.2.1 中のアルミ部品がそれに対応する。また LED の光を拡散させ、MPPC と LED の相対位置のずれの影響を抑えるために、LED の照射窓を紙やすりで傷をつけて曇らせ、その上からシリコンで出来た光拡散キャップを装着した。また、モニター用 PMT も同時に設置し、宇宙線による光量測定の前後で LED の光量を測定し、LED の安定性を保証した。PMT や MPPC には温度依存性が有り、測定結果に影響を与える。そのため、測定の際には温度湿度計を恒温槽内に入れることで温度、また湿度のモニタリングをした。恒温槽は常に一定の温度を保っているというわけではなく、約 10 分の周期で約 0.4 度程度上下する。しかし宇宙線による測定の際には測定に数時間かかるため、恒温槽内の温度の上下は平均化されて測定に影響を与えないと思われる。

## 6.2.2 測定結果

図 6.2.2 に長期性能試験の結果を示す。横軸がプラスチックシンチレータと波長変換ファイバーを水中に入れたおいた日数で、縦軸がその時の上下それぞれのシンチレータの宇宙線による平均光量を表す。各シンチレータのプロットの平均を取ると、上のシンチレータでは 28.1[p.e.]、下のシンチレータでは 25.9[p.e.] となった。またばらつきとして標準偏差を計算すると、上のシンチレータでは 0.68[p.e.]、下のシンチレータでは 0.61[p.e.] となった。どちらも平均光量に対するばらつきの割合は約 2.5%程度であり、1[p.e.] 以下に抑えられているので、光量は安定しているといえる。よって、シンチレータと波長変換ファイバーを水中で長期間使用しても、光量などが低下することはないことが示された。

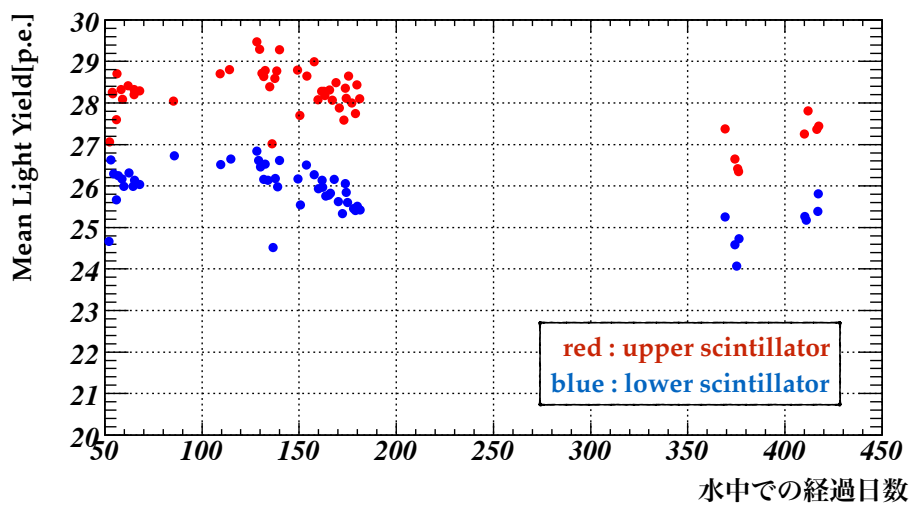


図 6.2.2: 長期安定製試験の測定結果

## 第7章 ビームテストによるシンチレータの性能評価

本章では WAGASCI 検出器で用いられるシンチレータの性能評価として、東北大学電子光物理学研究センターにおいて 2014 年 5 月と 2014 年 12 月に行われた、陽電子ビームを用いたビームテストについて述べる。我々が使用する薄型シンチレータは格子構造のための切れ込みを入れるなど、特徴的な形状をしているため、そのシンチレータの詳細な理解は必須である。宇宙線を用いた測定ではイベントレートが小さく、宇宙線での細かい場所ごとの測定は現実的ではない。そのため我々は、東北大学電子光物理学研究センターの加速器からの陽電子ビームを用いた短時間かつ高統計の測定により、シンチレータの光量や Hit Efficiency の場所依存性などの測定を行うことにした。

### 7.1 ビームライン

東北大学電子光物理学研究センターには検出器テスト用のビームラインとして、陽電子ビームラインが存在する。図 7.1.1 に施設全体のレイアウトを示す。

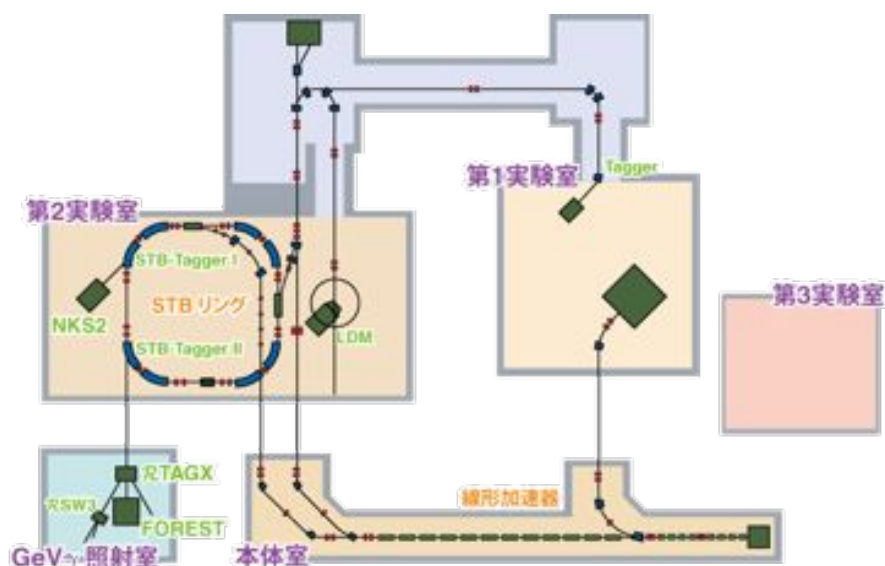


図 7.1.1: 東北大学電子光物理学研究センター実験室レイアウト

まず線形加速器(ライナック)最上流において、熱電子銃により電子が取り出され、加速管で電子が加速される。この時電子はバンチに分けられ、RF でうまく加速位相にあったものだけが加速される。ライナックの写真を、図 7.1.2 と図 7.1.3 に示す。その後電子は、ストレッチャーブース

ターリング (STB リング) に送られる (図 7.1.4)。STB リングは電子円形加速器であり、リニアックからのパルスビームを連続ビームに変換するストレッチャー機能と、電子を加速するブースター機能、リング中にビームを蓄積するストレージ機能を持っている。この中の特にブースター機能を用いて加速された電子は、ラジエータに当てられて制動放射により高エネルギーガンマ線を発生させる。ラジエータは直径 11 $\mu$ m の炭素ファイバーでできており、制動放射を起こした電子は運動量が下がるため偏向電磁石で大きく曲げられる。その軌道を 232 本のシンチレーションファイバーを用いて測定することにより高エネルギーガンマ線のエネルギーが求まる。制動放射により生じたガンマ線は、GeV $\gamma$  照射室まで進み、金もしくはタングステンの薄膜標的にあたり、対生成を起こす。GeV $\gamma$  照射室最上流には RTAGX という双極電磁石が設置されており、対生成で生じた電子・陽電子を 30 度に運動量分析しビームとして用いる。ビームのエネルギーは RTAGX のコイル電流を変えることによって調節され、最大で 850MeV である。今回の実験では、実験で用いたビームエネルギーは 589MeV である。2010 年にはその下流に真空パイプと三連四極電磁石が増設され、100MeV/c の陽電子ビームに対して  $\sigma_x=11$ mm、 $\sigma_y=7$ mm まで収束できるようになり、それぞれ従来の約半分にすることが可能になった。



図 7.1.2: リニアック上流部



図 7.1.3: リニアック下流部



図 7.1.4: STB リング (側面図)。青い磁石が偏向電磁石で、赤い磁石が四重極電磁石である。



図 7.1.5: 三連四極電磁石。運動量選別用の鉛コリメータが真空パイプ中に埋め込まれている。



## 7.2 ビームテスト概要

ビームテストは東北大学電子光物理学研究センターに置いて行われ、第一回目のビームテストの日程は2014年5月9～11日であり、第二回目のビームテストの日程は2014年12月19日～20日である。

### 7.2.1 目的

ビームテストの目的は、各シンチレータの性能評価による光量や検出効率などの基礎的な情報を得ることである。それにより、検出器のデザインを決めるインプットとして用いたり、検出器の要求を満たしているかどうかを確認したりすることができる。特に薄型シンチレータの光量や検出効率の場所依存性を測定することが第一の目的である。

### 7.2.2 測定項目

ビームテストで測定した項目は以下の通りである。

- 薄型シンチレータの光量と Detection Efficiency の場所依存性
  - － シンチレータの性能評価において最も基本的な項目である。WAGASCI 検出器で用いるシンチレータは切れ込みを入れた特徴的な形であるので光量や Detection Efficiency の場所依存性を測定することは重要である。また、厚さが3mmと薄いので光量が低いことが予想される。そのため、十分高い Detection Efficiency を得ることがより難しくなってしまう。よって今回は、Detection Efficiency がシンチレータ全域で99%以上であることを確認することを第一の目的として測定を行った。またこれは、WAGASCI 検出器用に Fermi 研究所で作られた押出型シンチレータのテストサンプルであり、マスプロダクション前の、要求性能を満たしているかの確認でもある。
- シンチレータを格子状に組んだ時のシンチレータ間での光学的クロストーク
  - － WAGASCI 検出器での特徴の一つである格子状に組んだシンチレータは、シンチレータ同士が接触するためシンチレータ間でのクロストークが起これらる。そこで第一回目のビームテストにおいて、特にシンチレータを組む場所付近にビームがあたった場合のクロストークの有無の確認を主眼として測定を行った。
- INGRID 型シンチレータの光量と時間分解能
  - － INGRID 型シンチレータは WAGASCI 検出器の Front veto や Veto plane などに用いられる予定である。これらはヒットタイミングの時間差からの荷電粒子の方向決定に用いられるため、INGRID 型シンチレータの時間分解能を測定することは、シンチレータの枚数などを決める重要な情報である。

## 7.3 ビームプロファイル測定

今回の実験で用いる陽電子ビームは、589MeV/c のものを用いる。これはビームの範囲が狭く安定している設定で、我々の実験に適していると考えられる設定である。まずシンチレータの性能評価をする前に、ビームプロファイルの測定を行ったのでその結果について述べる。

### 7.3.1 セットアップ

図 7.3.1 に第一回目のビームテストでの、図 7.3.2 に第二回目のビームテストでのデータ取得の際の基本的なセットアップの写真を載せる。写真奥がビーム上流側である。第一回目のビームテストでは、ビーム上流側から、トリガーシンチレータ、ホドスコープ、トリガーシンチレータの順で並んでおり、性能測定するシンチレータはホドスコープと下流側トリガーシンチレータの間に設置する。データ取得の際のトリガーは、トリガーシンチレータ二枚の信号とホドスコープの信号のコインシデンスのタイミングで行った。

第二回目のビームテストでは、奥からホドスコープ、トリガーシンチレータが並んでいる。その際、ホドスコープ自体をトリガーとして用いた。つまりホドスコープの horizontal ch、vertical ch、トリガーシンチレータの三点コインシデンスでデータ取得を行った。これは第二回目のビームテストではビームレートが第一回目と比べて大幅に上がっているという情報を得ており、DAQ が追いつかないと考えられたため、できるだけ解析に使えないイベントを落とすようにと考えてのことである。この時 EASIROC module(後述) はセルフトリガで 64ch の OR 信号を出すため、二台の module を使うことによりトリガー信号をふたつ確保した。表 7.3.1 にセットアップの構成をまとめる。

表 7.3.1: 第一回目と第二回目のビームテストでのセットアップの比較

	第一回目ビームテスト	第二回目ビームテスト
トリガーシンチレータ	2 枚	1 枚
EASIROC module	1 台	2 台
データ取得トリガー	トリガーシンチレータ ×2+ ホドスコープ ×1	トリガーシンチレータ ×1+ ホドスコープ ×2



図 7.3.1: 第一回目のビームテストでのデータ取得の際の基本的なセットアップ

図 7.3.2: 第二回目のビームテストでのデータ取得の際の基本的なセットアップ

以下にそれぞれの構成要素の詳しい説明を述べる。

#### トリガーシンチレータ

第一回目のビームテストでのトリガーシンチレータには、BICRON 製のプラスチックシンチレータ、BC-404 を用いた。このシンチレータは厚さが 3mm のシンチレータで、高さ 3cm、幅 4cm に加工し、1.2mm の深さの溝を掘り波長変換ファイバーをオプティカルセメントで

接着した。この溝の位置は、溝を彫ることによりシンチレータが薄くなり、光量が落ちてしまうのではないかという懸念から、溝の位置を図 7.3.3 の様に端の方にずらしたものを作成し、これを使用した。この際に用いた波長変換ファイバーの長さは、約 50cm である。

トリガーシンチレータの読み出しに用いた MPPC は、T2K 実験で用いられているものと同じ、第一世代の MPPC を用いた。その時の  $\Delta V$  は 1.2V で使用し、threshold として 4.5[p.e.] を設定し測定に用いた。最後に、作成したシンチレータの表面全体に反射材を塗布し、測定に用いた。その時に用いた反射材は Eljen Technology 社の EJ-510 である。塗布の際には、ムラを無くするために三回塗り直しを行った。

第二回目のビームテストでも同様に BC-404 をトリガーシンチレータとして使用した。今回は一辺が 2.5cm の正方形の大きさにし、ホドスコープの vertical ch と horizontal ch が重なっている領域と同じ大きさにした。また波長変換ファイバーを接着する位置は、第一回目のビームテストで光量や Efficiency はファイバーからの距離に大きく依存することがわかったため、シンチレータの中心に接着した。この時のファイバーの長さは 90cm 程度である。

読み出しに用いた MPPC は第二世代の MPPC の not crosstalk suppression type を用い、 $\Delta V=1.2V$  で使用し、threshold として 4.5[p.e.] を設定した。この MPPC はノイズレートやアフターパルス率は第一世代の MPPC に比べて大幅に改善されているが、クロストーク率はほとんど変わっていないという声質を持つ。反射材やその塗り方などは同様である。図 7.3.3 に第一回目のビームテストでのトリガーシンチレータを、図 7.3.4 に第二回目のビームテストでのトリガーシンチレータを示す。

最後に、第一回目と第二回目のビームテストでのトリガーシンチレータの比較をまとめる。

表 7.3.2: 第一回目と第二回目のビームテストでのトリガーシンチレータの比較

	第一回目ビームテスト	第二回目ビームテスト
枚数	2 枚	1 枚
dimension	3cm×4cm×3mm	2.5cm×2.5cm×3mm
溝の位置	端から 5mm	中央
波長変換ファイバー	50cm	90cm
読み出し MPPC	第一世代 MPPC	第二世代 MPPC not crosstalk suppression type
$\Delta V$	1.2V	1.2V
threshold	4.5p.e.	4.5p.e.

## ホドスコープ

ホドスコープはビームの通過位置を測定するためのモジュールで、32 本のシンチレーションファイバーからなっている。今回用いたシンチレーションファイバーは Kuraray 社の SCSF-78SJ であり、シングルクラッドタイプで発光波長のピークは約 450nm である。また断面は角型の 1.5mm×1.5mm の大きさで、縦方向に 16 本、横方向に 16 本並べることで、2.4cm×2.4cm の範囲を、1.5mm×1.5mm の分解能で位置の測定ができるようにした。製作の際にはシンチレーションファイバー間のクロストークを抑えるため、それぞれのシンチレーションファイバーに先述の反射材を塗布した。そのため反射材の厚みが加算され、実際に完成したホドスコープでは有効面積が約 2.6cm×2.6cm の範囲になっている。図 7.3.5 と図 7.3.6 にホドスコープの完成図を示す。

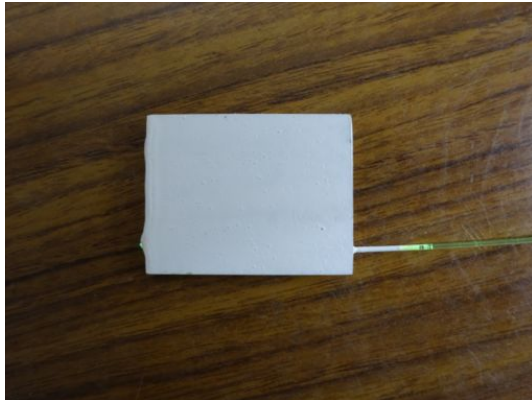


図 7.3.3: 第一回目のビームテストでのトリガーシンチレータ

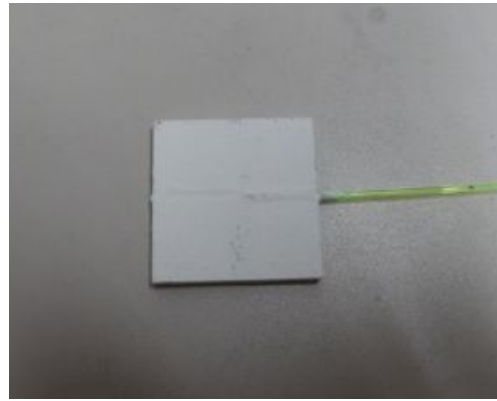


図 7.3.4: 第二回目のビームテストでのトリガーシンチレータ



図 7.3.5: ホドスコープに使用したシンチレーションファイバー 16 本



図 7.3.6: ホドスコープシンチレーションファイバーの array 型 MPPC 接続面

ホドスコープのシンチレーションファイバー 32 本の読み出しには、浜松ホトニクス社製の array 型 MPPC、S11830-3344MF を用いた。この array 型 MPPC は一つが  $4 \times 4$ ch の 16ch の MPPC から出来ており、それぞれの MPPC は受光面が  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  でピクセルピッチは  $50\mu\text{m}$  である。今回は縦横それぞれのシンチレーションファイバー 16 本ずつに対して array 型 MPPC 一つを使用した。この array 型 MPPC は後述の EASIROC module をもちいて読みだす。以下の表 7.3.3 に MPPC の各項目を簡単にまとめる。

型番	S11830-3344MF
ch 数	16( $4 \times 4$ )
有効受光面 (1ch)	$3\text{mm} \times 3\text{mm}$
ピクセルピッチ	$50\mu\text{m}$
ピクセル数 (1ch)	3600
開口率	61.5%
最大感度波長	450nm

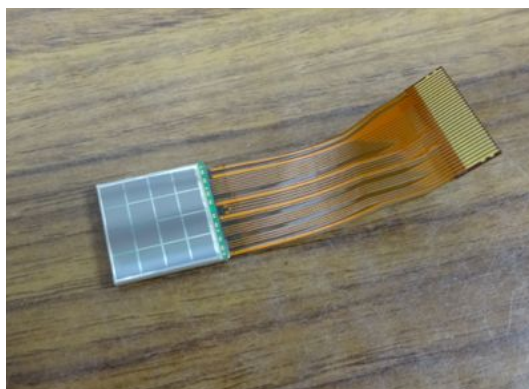


図 7.3.7: array 型 MPPC S11830-3344MF

### EASIROC module

EASIROC とは Extended Analogue Silicon pm Integrated Read Out Chip の略称で、フランスの  $\Omega$  グループが開発した汎用 MPPC 読み出し用 ASIC である。EASIROC module は EASIROC を二個使った 64ch MPPC 読み出し可能な NIM モジュールで、KEK、東北大学、大阪大学などが中心となって開発された。EASIROC module の特徴を下にまとめる。

- 64 個の MPPC の同時駆動と読み出し
- MPPC 用 bias 電源内蔵 ( $\sim 90\text{V}$ )
- 各 ch の bias、gain、shaping time の調整
- 各 ch の ADC(波高分析型)/TDC 読み出し

- SiTCP<sup>1</sup>の実装による Ethernet を用いた PC による制御
- NIM ビンから電源供給することが可能

図 7.3.8 に EASIROC module の写真、図 7.3.9 に前面、背面パネル図を示す。



図 7.3.8: EASIROC module の前面写真

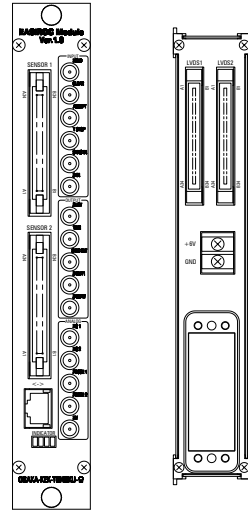


図 7.3.9: EASIROC module の前面、背面パネル図

図 7.3.9 の SENSOR1,SENSOR2 のフラットケーブル端子が MPPC の ch0~31 と ch32~63 に対応しており、今回の測定ではそれぞれに array 型 MPPC を対応させた。また、EASIROC module の出力するトリガ信号は 64ch の OR 信号である。

### 恒温槽

MPPC は温度依存性を持つため、できるだけ一定の温度で測定することが望ましい。実験を行う GeV $\gamma$  照射室は空調が効いており温度変化はそれほど大きくはないが、さらに一定にするために発泡スチロールで容器を作り、その中に MPPC を入れることで温度変化の影響を抑えた。

### 7.3.2 array 型 MPPC のキャリブレーション

array 型 MPPC は各 ch ごとに少しずつ性能が異なるため、全 ch に一定の bias 電圧をかけると各 ch での  $\Delta V$  が一定ではなくなってしまう。したがって、各 ch での  $\Delta V$  を一定にするため、EASIROC module の bias 電圧の調整を行った。キャリブレーションは LED の光を MPPC にあて、1p.e. のピークと 0p.e. のピークの差を、ダブルガウシアンで fitting することにより求め、それが一定になるように EASIROC module のパラメータを変更する。図 7.3.10 に第一回目のビームテストの時の fitting の様子を示す。array 型 MPPC それぞれに対して、1p.e. ピークと 0p.e. ピークの差は 20[ADC ch] に設定し、ビームテスト中はその値を用いた。また array 型 MPPC の各 ch のそれぞれのゲインはほぼ一定であることを確認した。

<sup>1</sup>SiTCP は KEK の内田智久博士によって高エネルギー物理実験のために開発されたネットワークプロセッサで、SiTCP を FPGA に実装することで FPGA を Ethernet に接続することが出来る。

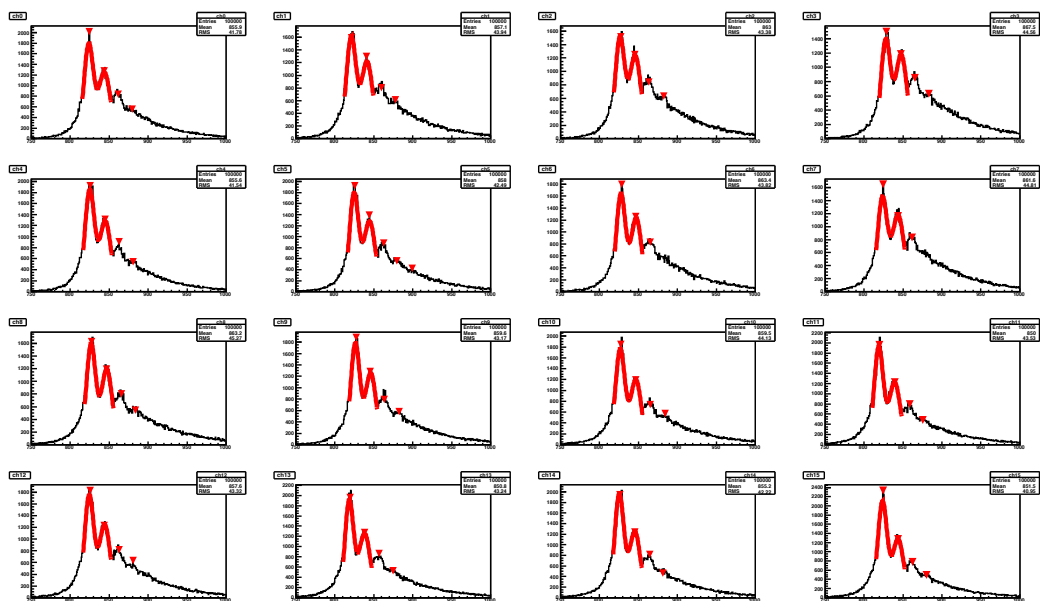


図 7.3.10: 第一回目のビームテストでの array 型 MPPC のキャリブレーション

第二回目のビームテストでも同様に array 型 MPPC のキャリブレーションを行った。用いた array 型 MPPC は第一回目のビームテストと同様であるが、今回は dead ch やゲインが小さい ch が発生してしまった。array 型 MPPC の各 ch のゲインが一定ではなければ、一律の threshold を使うことができない。そのため threshold の値を各 ch でそれぞれ設定した。これについては次の節で述べる。

### 7.3.3 threshold 値の設定

測定されたイベントがビームによるものなのか、MPPC のダークノイズやクロストークによるものなのかを判定するため、ホドスコープが threshold 以上光量が出ていれば、ビームによる有効なイベントであると解釈する。図 7.3.11 に第一回目のビームテストでのビーム照射時のホドスコープの典型的な ADC 分布を示す。第一回目のビームテストにおける threshold は、ペDESTAL によるピークとビームによるピークの谷になっているところと定義した。また先ほど述べたように、array 型 MPPC のキャリブレーションにおいて各 ch のゲインは一定であることが確認されているので、全 ch で同じ threshold の値を採用した。そのため第一回目のビームテストでは、threshold として 1000[ADC ch] を用いることにした。

第二回目のビームテストでは、先述の通りゲインが小さい ch などの挙動のおかしい ch が発生してしまった。よって、第二回目のビームテストでは threshold の値を ch それぞれで個別に設定する。図 7.3.12 と図 7.3.13 に正常な ch と挙動のおかしい ch のビーム照射時のホドスコープの ADC 分布を載せる。図中の青のプロットが全てのイベントで、赤のプロットがそのホドスコープの ch がトリガーになったイベントである。第二回目のビームテストでも第一回目の時と同様に、プロットの谷になっているところを threshold と定義した。この時の threshold は図 7.3.12 で 1150[ADC ch] であり、図 7.3.13 で 1800[ADC ch] である。このように全ての ch で threshold をそれぞれ設定し、以下ではその値を用いて解析を行った。

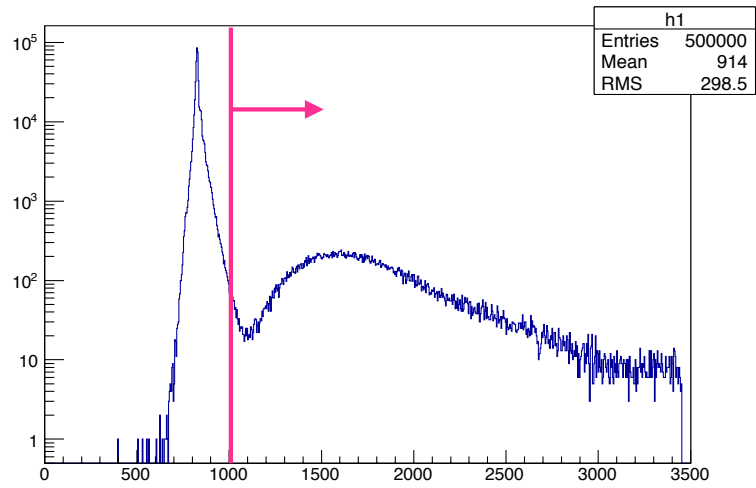


図 7.3.11: 第一回目のビームテストでのビーム照射時の典型的なホドスコープの ADC 分布

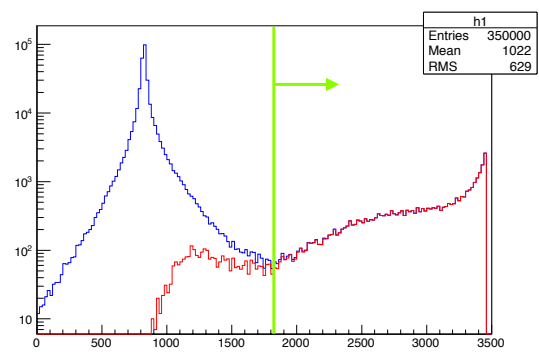
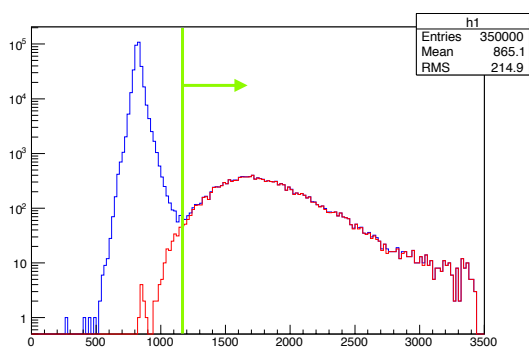


図 7.3.12: 第二回目のビームテストでのビーム照射時の典型的なホドスコープの ADC 分布

図 7.3.13: 第二回目のビームテストでのビーム照射時の挙動のおかしいホドスコープの ADC 分布



### 7.3.4 ビームプロファイル測定結果

ビームプロファイルは、ホドスコープが縦横各 16ch に分かれているため、256 つの領域それぞれに対して計算する。それぞれの領域は 1.5mm×1.5mm である。またビームプロファイルは各領域を通ったビームの有効なイベント数をプロットしたものである。それぞれのイベントにおけるビームの位置は、ホドスコープの縦横各 16ch のうち ADC の値が最大である ch が交差する位置として定義した。またその縦横それぞれでの最大の ADC の値が、threshold を超えているかどうかでそのイベントが有効であるかどうかを判別した。このような手順によってビームプロファイルを求め、プロットを作成した。

第一回目のビームテストの時のビームプロファイルを図 7.3.14 に示す。

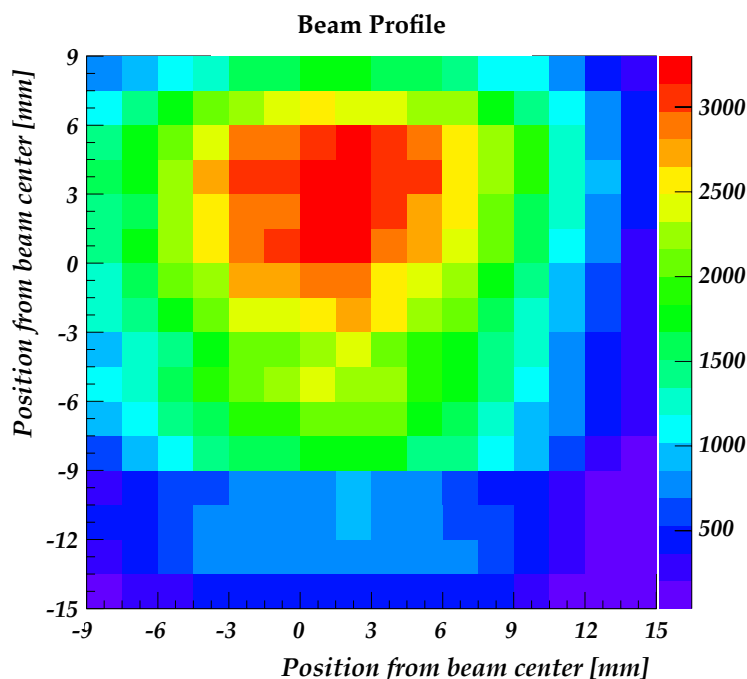


図 7.3.14: 第一回目のビームテストでのビームプロファイル。図はビーム下流側から見たものである。

図 7.3.14 を見ると、少し縦長寄りのビーム形状はほぼ円形で、ビーム中心はホドスコープの中心と少しずれていることが判明した。しかし横方向の移動はセットアップの都合上難しく、またビームは縦方向に少し伸びている形状をしているので、このままの状態で使用することにした。

次に第二回目のビームテストの時のビームプロファイルを図 7.3.15 に示す。

ホドスコープの x 方向のビーム中心からの距離が 11mm 程度のところの白くなっている ch が、いくら電圧をかけても信号が見えなかった dead ch である。また横方向の中心付近のイベント数が少ないところは、あまり電圧をかけすぎると不安定になってしまう ch で、小さい  $\Delta V$  で運用しているために PDE などが下がってしまったからであると考えられる。このように第二回目のビームテストではいくつか調子の悪い ch があるため、ビームの位置を dead ch から避けるように下流側から見て少し左側に設定した。

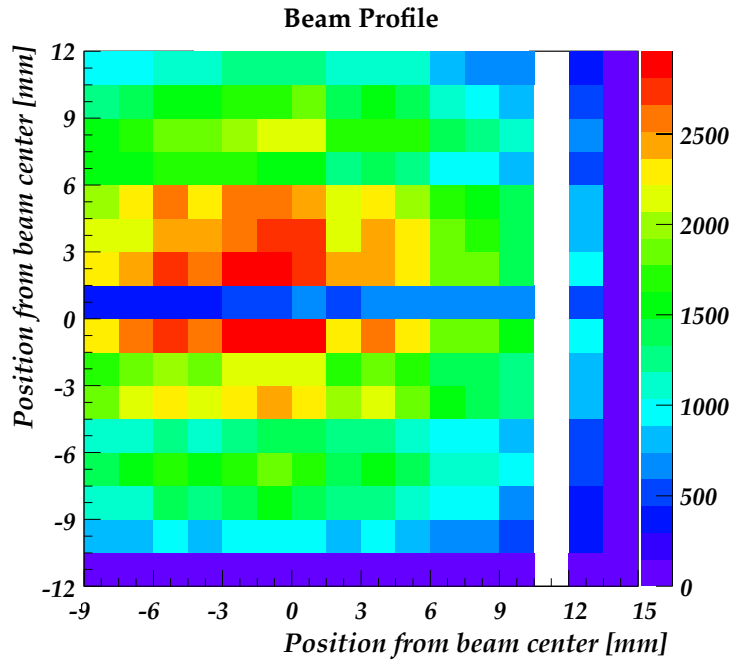


図 7.3.15: 第二回目のビームテストでのビームプロファイル

## 7.4 薄型シンチレータ光量・Detection Efficiency 測定

ここでは薄型シンチレータの光量と、Detection Efficiency の位置依存性の測定について述べる。この結果は、全て第二回目のビームテストでの測定を元としている。今回の実験では、光量は以下のように定義した。

$$Light\ Yield[p.e.] = \frac{ADC\ 分布の平均値}{1p.e.分に対応する\ ADC\ 値 \times (1 + crosstalk \cdot after\ pulse\ rate)} \quad (7.4.1)$$

ここで crosstalk and after pulse rate とは、測定に用いた MPPC のクロストーク・アフターパルス率のことで、クロストークやアフターパルスによって実際よりも光量が大きく見える現象を補正するために用いる。今回の実験では、MPPC は第二世代 MPPC を  $\Delta V=4.0V$  で用いており、その時のクロストーク・アフターパルス率は 0.052 程度であった。また今回は pedestal ピークと 1p.e. のピークを毎回フィッティングし、その値を用いて光量に変換するようにした。これは計算精度の上昇を目的としている。

Detection Efficiency については以下のように定義した。

$$Detection\ Efficiency[\%] = 100 \times \frac{\text{ホドスコープと測定用シンチレータの threshold を超えたイベント数}}{\text{ホドスコープの threshold を超えたイベント数}} \quad (7.4.2)$$

ここでホドスコープの threshold とは先ほど述べたように各 ch で設定した値のことである。縦横それぞれの ch でこの threshold を超えることを条件にしている。また測定用シンチレータの threshold は、測定用シンチレータの光量が 1.5[p.e.] のところとして設定した。今回の目的である、シンチレータ全域で Detection Efficiency が 99% 以上であることを主張するために、統計誤差を 1% 以内に抑える必要がある。よって今回は、統計誤差の評価を  $1/\sqrt{n}$  で行い、対象とする領域で合計 1 万

イベント以上になるように測定を行った。

## 7.4.1 セットアップ

### セットアップ全体図

図 7.4.1 に薄型シンチレータの測定時の写真と、図 7.4.2 に測定用シンチレータ付近の拡大写真を載せる。

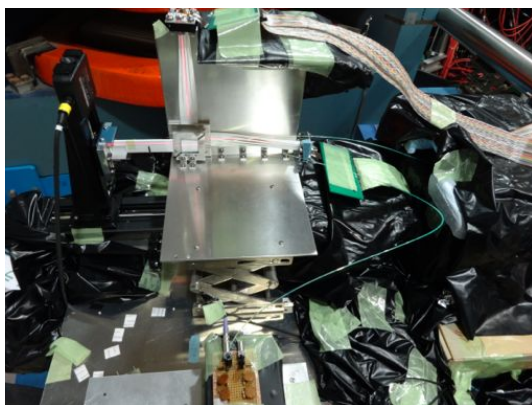


図 7.4.1: 薄型シンチレータの測定時のセットアップ

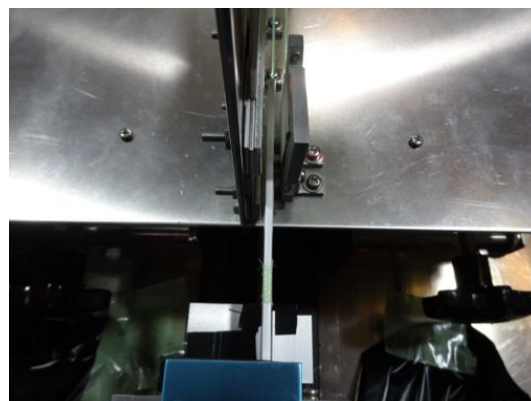


図 7.4.2: 測定用シンチレータ付近の拡大写真

今回の性能測定の設定アップは、基本的にビームプロファイルの測定の設定アップに性能測定用のシンチレータを配置したようになっており、上流側からホドスコープ、性能測定に用いるシンチレータ、トリガースチンチレータの順で設置した。図 7.4.1 を見ればわかるように、横方向の可動ステージに加えて高さ方向の可動ステージを使用しているため、性能測定に用いるシンチレータの位置の上下左右への微調整が地上の実験室から容易に行うことが出来る。またホドスコープ、性能測定用シンチレータ、トリガースチンチレータを非常に近い位置に配置した。その時の様子を図 7.4.2 に載せた。この写真のように、薄型シンチレータの性能測定の設定アップにおいて、ホドスコープと性能測定用シンチレータ、またトリガースチンチレータとの距離はそれぞれ数 mm 程度である。これにより陽電子ビームのホドスコープなどによる散乱の影響を抑えることができ、シンチレータの端における inefficiency の増加を抑制することが出来る。

**使用したシンチレータ** 今回使用したシンチレータは、Fermi 研究所で制作された、WAGASCI 検出器用のシンチレータの試作品である。それにグリッド用の切れ込みを 5cm 間隔で入れたものと入れないものを二種類作成した。図 7.4.3 にその写真を、図 7.4.4 にその図面を載せる。

このシンチレータは試作品であるため、シンチレータの幅が 24mm と、想定していた幅よりも 1mm 小さい値になっている。シンチレータにはオプティカルセメントで波長変換ファイバーを接着し、その上から反射材 EJ-510 を塗布している。切れ込みの部分や端面なども反射材を塗布し、シンチレータ全体が反射材で覆われているようにした。また、今回使用した波長変換ファイバーの長さは 60cm であり、実際の検出器で用いる長さの約半分になっている。

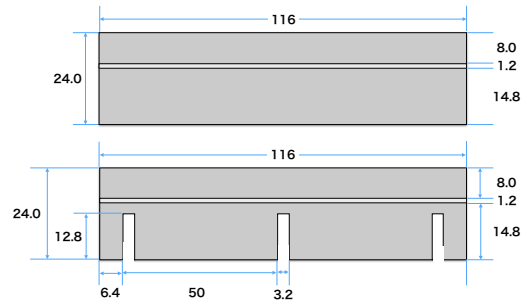


図 7.4.3: Fermi 研究所製薄型シンチレータ 図 7.4.4: 使用した薄型シンチレータの dimension

## 7.4.2 測定結果

### 光量測定結果

切れ込みありと切れ込みなしのシンチレータについて光量を計算した結果を以下に示す。以下の二次元プロット中に黒い四角で囲んだ部分がかかれていますが、これは最も性能が悪いと思われるシンチレータの端の部分の精度よく測定するため、この範囲のデータを足しあわせて統計量を高めて計算したものである。今回は誤差 1%を目安にしているため、黒く囲んだ範囲で約 1 万イベントになっている。

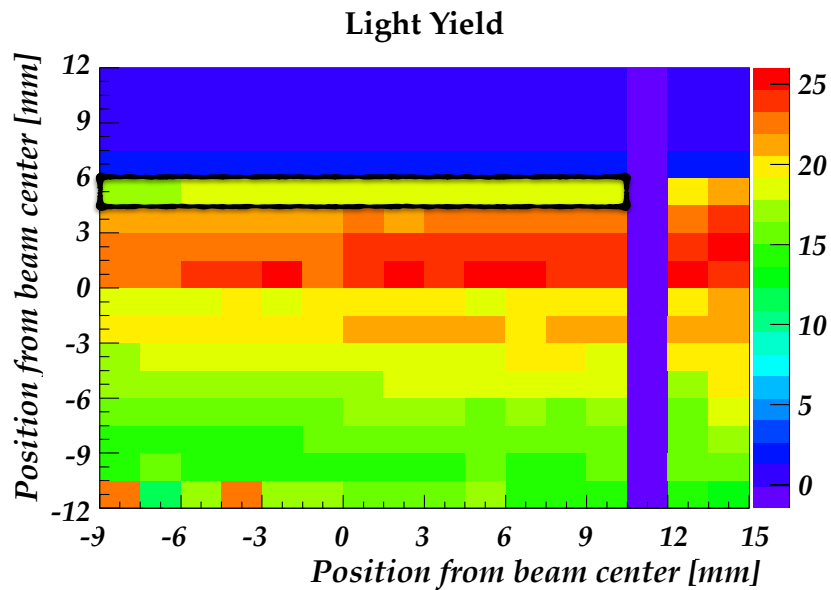


図 7.4.5: 切れ込みなしシンチレータの Light Yield[p.e.]. 上端の光量は  $18.51 \pm 0.16$  [p.e.] である。

図に示したように、薄型シンチレータの光量は、ファイバー付近ではシンチレータ内での減衰が少なく集光率が高くなるため比較的大きく、約 20~25[p.e.] 程度である。またシンチレータ下端 (ファイバーから遠い方) では減衰が大きくなり、約 10~12[p.e.]、シンチレータ上端で約 14~18[p.e.] という結果となった。また、グリッド構造用の切れ込みを入れることによる、光量の低下などは見られなかった。また、光量分布が Poisson 分布に従うと仮定して平

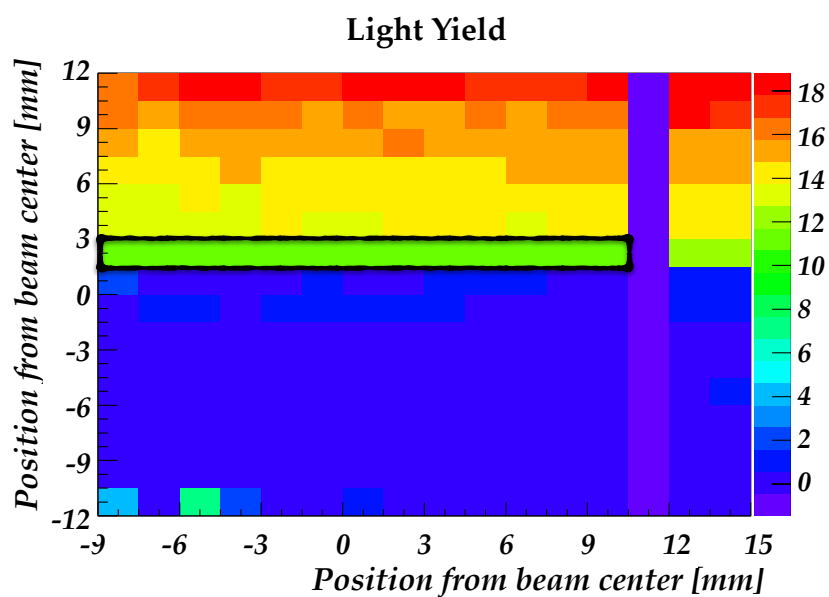


図 7.4.6: 切れ込みなしシンチレータの Light Yield[p.e.]. 下端の光量は  $11.26 \pm 0.11$  [p.e.] である。

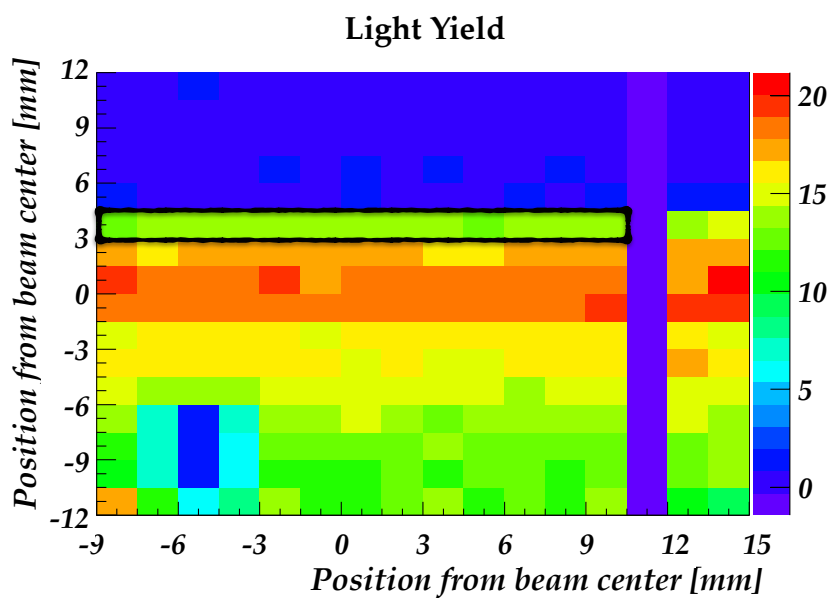


図 7.4.7: 切れ込みありシンチレータの Light Yield[p.e.]. 上端の光量は  $13.60 \pm 0.14$  [p.e.] である。

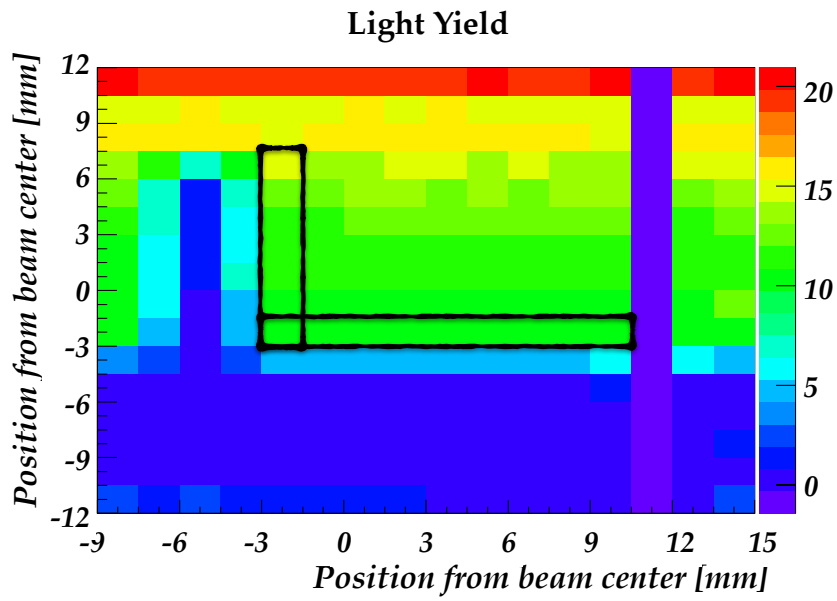


図 7.4.8: 切れ込みありシンチレータの Light Yield[p.e.]。下端の光量は  $10.41 \pm 0.09$ [p.e.] であり、切れ込み付近の光量は  $11.34 \pm 0.11$ [p.e.] である。

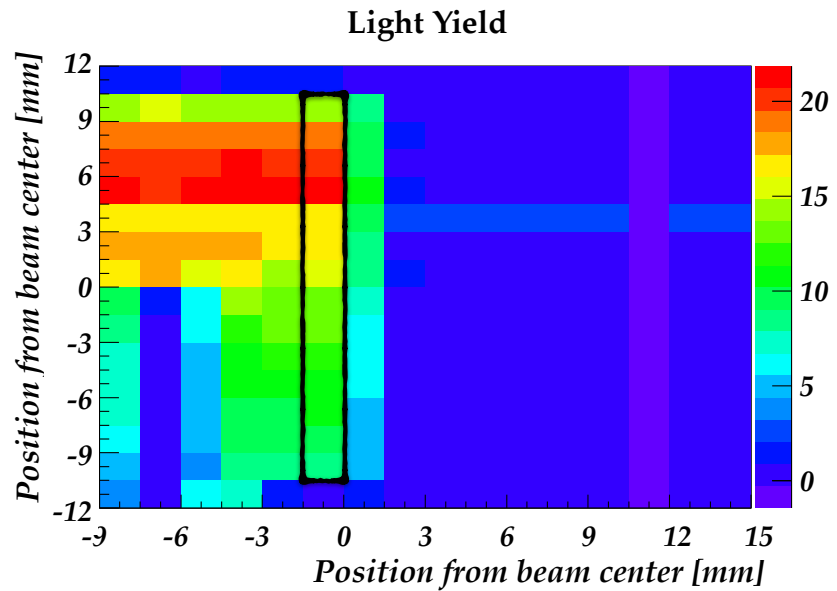


図 7.4.9: 切れ込みありシンチレータの Light Yield[p.e.]。横端の光量は  $14.79 \pm 0.17$ [p.e.] である。

均光量から Efficiency を求めることができるが、今回の結果では十分に大きい Efficiency が得られることが期待される。最後に、シンチレータの各位置での光量を以下にまとめる。

表 7.4.1: シンチレータの各位置での光量

シンチレータ	測定位置	光量 [p.e.]
切れ込みなし	上端	$18.51 \pm 0.16$
	下端	$11.26 \pm 0.11$
切れ込みあり	上端	$13.60 \pm 0.14$
	下端	$10.41 \pm 0.09$
	切れ込み付近	$11.34 \pm 0.11$
	横端	$14.79 \pm 0.17$

### Detection Efficiency 測定結果

以下に Detection Efficiency の計算結果を示す。Efficiency の図で、ビーム中心からの距離が $-3 \sim 0$ [mm] のところの水平方向のホドスコープに対応する領域の Efficiency が周りに比べて少し悪くなっているが、これは array 型 MPPC の、図 7.3.13 で示した挙動が変な ch と対応するので、シンチレータの問題ではなく、array 型 MPPC の問題であると考えられる。

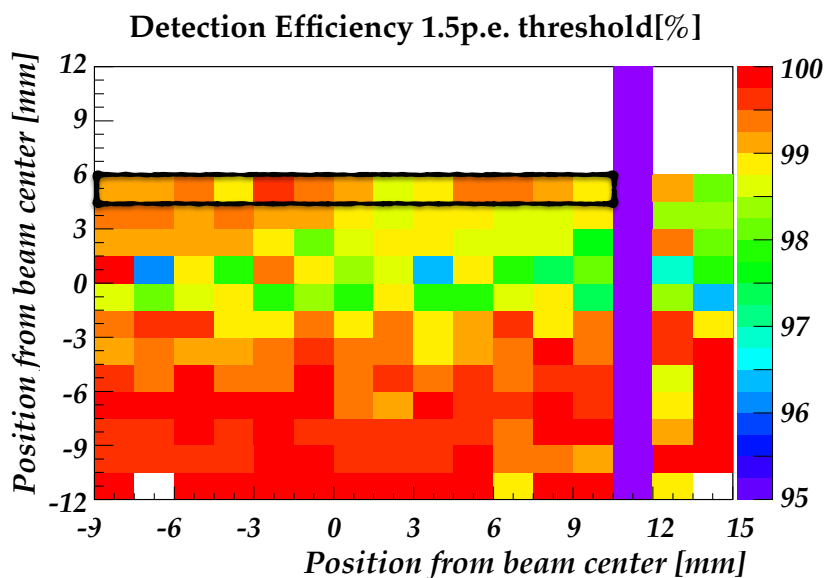


図 7.4.10: 切れ込みなしシンチレータの Detection Efficiency[%]。上端の Efficiency は  $99.63 \pm 0.89$ [%] である。

以下にシンチレータの各位置での Efficiency をまとめる。

Detection Efficiency の測定結果は、最も Efficiency が悪いと期待されるシンチレータの端の部分でも 99% で以上であることが示された。(切れ込みなしシンチレータの下端では Efficiency が 99% に達していないが、二次元プロットの傾向を見ると右側に行くほど光量が下がっていつていることがわかるので、これはシンチレータが斜めになってしまいホドスコープの ch とず

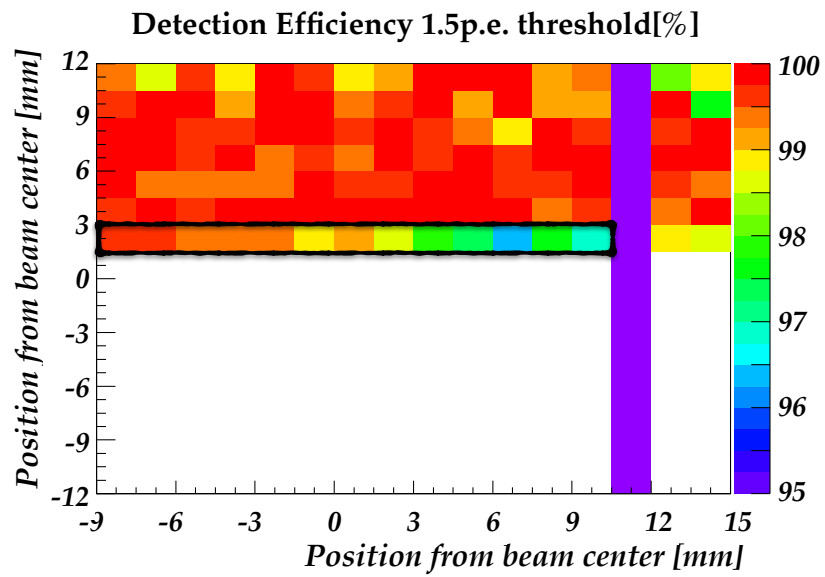


図 7.4.11: 切れ込みなしシンチレータの Detection Efficiency[%]。下端の Efficiency は  $98.53 \pm 0.94$ [%] である。

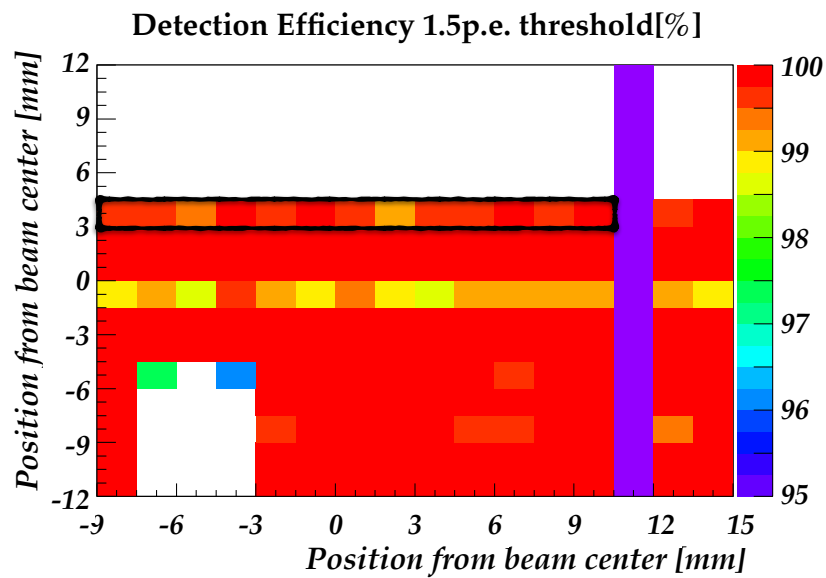


図 7.4.12: 切れ込みありシンチレータの Detection Efficiency[%]。上端の Efficiency は  $99.65 \pm 1.02$ [%] である。



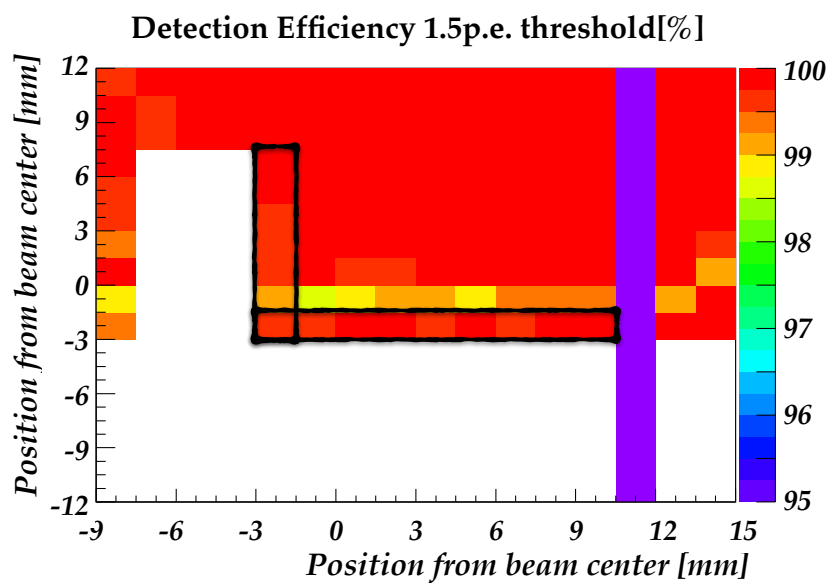


図 7.4.13: 切れ込みありシンチレータの Detection Efficiency[%]。下端の Efficiency は  $99.78 \pm 0.91$  [%] であり、切れ込み付近の Efficiency は  $99.60 \pm 0.94$  [%] である。

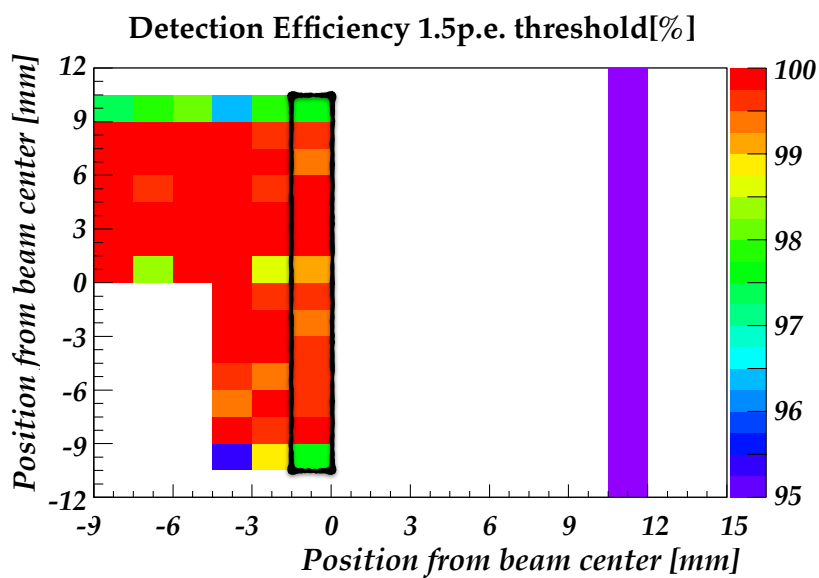


図 7.4.14: 切れ込みありシンチレータの Detection Efficiency[%]。横端の Efficiency は  $99.53 \pm 1.14$  [%] である。

表 7.4.2: シンチレータの各位置での Detection Efficiency

シンチレータ	測定位置	Efficiency[%]
切れ込みなし	上端	99.63 ± 0.89
	下端	98.53 ± 0.94
切れ込みあり	上端	99.65 ± 1.02
	下端	99.78 ± 0.91
	切れ込み付近	99.60 ± 0.94
	横端	99.53 ± 1.14

れてしまったためであると考えられる。) よって、シンチレータ全域で Detection Efficiency は 99%以上である。

## 7.5 光学的クロストーク測定

WAGASCI 検出器ではシンチレータを格子状に組むため、シンチレータの接触面でのクロストークが起こる可能性がある。今回はシンチレータを格子状に組み、一方のシンチレータにビームを当て、もう一方のシンチレータの光量を測定した。測定はシンチレータ間にブラックシートを挟む場合と挟まない場合の二種類を行い、それぞれの比較を行った。なお、この光学的クロストークの測定は、第一回目のビームテストで行われたものである。

### 7.5.1 セットアップ

図 7.5.1 にセットアップの外観図を示す。上流側からトリガーシンチレータ、ホドスコープ、水槽、トリガーシンチレータの順で配置し、水槽の中にビーム軸に垂直なシンチレータ (ターゲットシンチレータ) とビーム軸に平行なシンチレータ (クロストークシンチレータ) を設置している。水槽内には水を入れ、シンチレータの間には、ブラックシートを挟む場合と挟まない場合の二種類の状態で測定を行う。水槽はシンチレータの存在する L 字状の領域しか水が入らないようになっている。これは陽電子が水と多重散乱し、本来クロストークシンチレータに当たらない位置のビームが直接クロストークシンチレータにあたってしまうことを防ぐためである。水のビーム方向に対する長さは 2cm 程度である。そのためシンチレータをグリッド状に組む際は、シンチレータの一番端の切れ込みを用い、水槽自体を動かしビームを当てる位置を調整した。

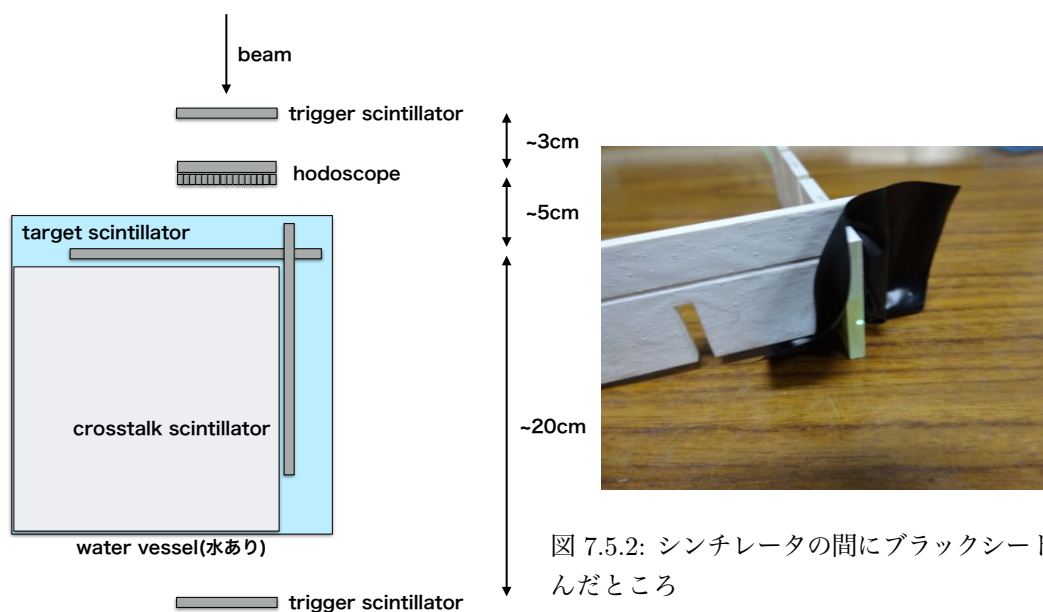


図 7.5.2: シンチレータの間にブラックシートを挟んだところ

図 7.5.1: クロストーク測定時のセットアップの外観図

### 使用したシンチレータ

今回のクロストークの測定で用いたシンチレータは Fermi 研究所製の薄型シンチレータのサンプルで、厚さが 2.3mm である。このサンプルは先述の光量や Detection Efficiency の場所依存性

の測定で用いたシンチレータとは異なるサンプルである。このシンチレータを 2.5cm 幅に加工し、グリッド構造用の切れ込みを入れたものと入れないものの二種類を作成した。図 7.5.3 にシンチレータの dimension を書いた図面を載せる。なお第一回目のビームテスト時は WAGASCI 検出器に用いるシンチレータは一辺 2.5cm の格子を想定していたため、切れ込みの間隔は 2.5cm になっている。

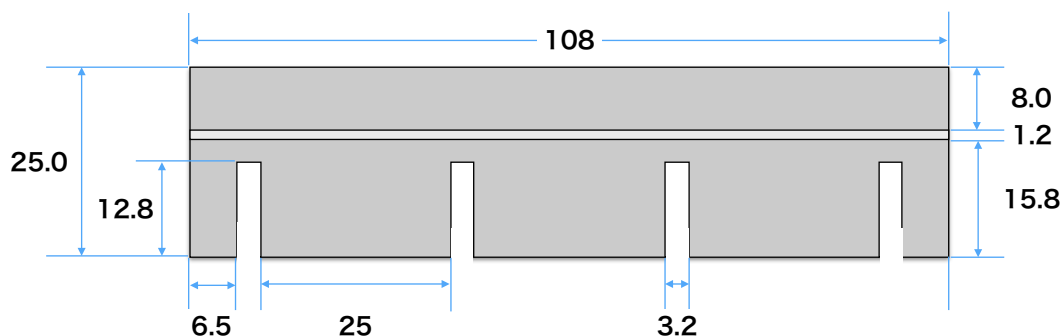


図 7.5.3: クロストークの測定に用いたシンチレータの dimension。単位は全て mm である。

シンチレータには 1.2mm の深さの角型の溝を掘り、そこにオプティカルセメントで波長変換ファイバーを固定した。波長変換ファイバーの長さは約 60cm である。今回のシンチレータのサンプルは、反射材を含んだ層は成型されていなかったため、Eljen Technology 社の EJ-510 をシンチレータに塗布した。シンチレータの側面部分や、波長変換ファイバーを接着したオプティカルセメントの上、切れ込み部分などを含め、全体に反射材を塗っている。また、今回用いたシンチレータは保存状態が悪く、直射日光に当たりうる環境で保存されていたため、性能が悪化していることが予想される。表 7.5.1 に、今回使用したシンチレータと、実際の検出器で用いるシンチレータとの違いをまとめる。

表 7.5.1: クロストークの測定で用いたシンチレータと実際の検出器で用いるシンチレータの違い

	使用したシンチレータ	実際の検出器で用いるシンチレータ
厚さ	2.3mm	3.0mm
反射材	Eljen Technology EJ-510	シンチレータ表面に $\text{TiO}_2$ が約 15% 入ったポリスチレンの層を押出時に成形。切れ込み部、端面、ファイバー固定後の上塗りは別の反射材
コンディション	直射日光により悪化	新たに製作するため良い状態

## 7.5.2 クロストークシンチレータの光量比較

### イベントセレクション

まずブラックシートありとなしの時の二種類の場合のクロストークシンチレータの光量分布を見る。その際ビームが直接クロストークシンチレータにあたっているイベントを含んでいるため、

$$(\text{ターゲットシンチレータの光量}) > (\text{クロストークシンチレータの光量}) \quad (7.5.1)$$

というセレクションを行った。ビームが直接クロストークシンチレータに当たった場合、ビームがシンチレータ内を通る距離が長いので、光量が大きくなると考えられるため、また同時に

$$2[p.e.] < (\text{ターゲットシンチレータの光量}) < 20[p.e.] \quad (7.5.2)$$

という条件を課した。これはターゲットシンチレータがある程度の光量で光っていることを確認するためである。

## 測定結果

図 7.5.4 に光量分布の比較結果を載せる。ブラックシートをシンチレータ間に挟む場合と挟

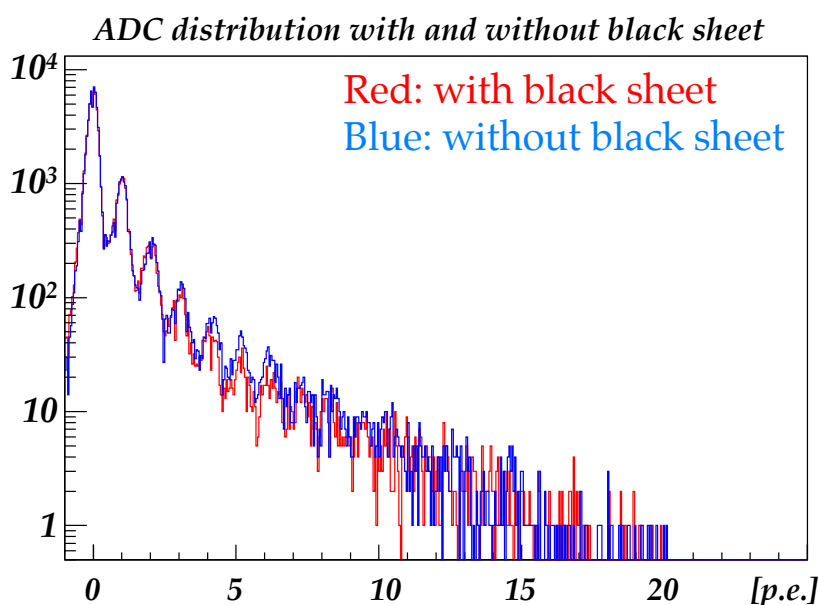


図 7.5.4: クロストークシンチレータの光量分布。赤がブラックシートを挟んでいる状態で、青が何も挟んでいない状態

まない場合で光量分布にはほとんど差はないことがわかる。この結果からはシンチレータ間のクロストークはほとんど存在しないように見えるが、より詳しく考察するために、ビーム位置ごとに解析を行う。

### 7.5.3 ビーム位置ごとのクロストークシンチレータの光量

ビーム位置をホドスコープで測定し、そのそれぞれの場所に当たった時の、クロストークシンチレータの光量を調べた。イベントセレクションは 7.5.2 節の時と同様である。シンチレータ間にブラックシートを挟んでいる場合と挟まない場合の平均光量の差を二次元的にプロットしたものを図 7.5.5 に示す。光量の差はブラックシートを挟んでいない時の平均光量から挟んでいる時の平均光量を引いて求めている。グラフ中の白色になっている部分のうち、下方の横長の部分はターゲットシンチレータにビームが当たっていないのでシンチレータ間のクロストークが存在しないところで、縦長の部分はクロストークシンチレータに直接ビームが当たっているため解析から除外したと

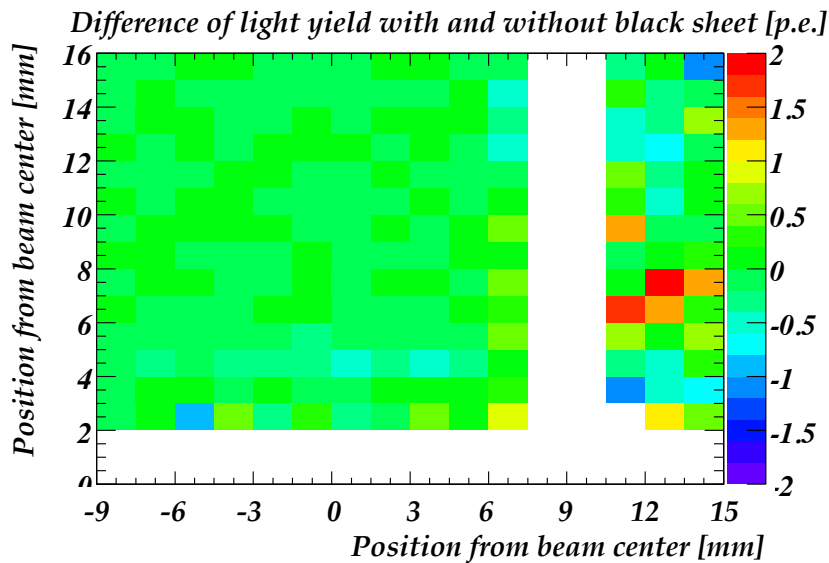


図 7.5.5: クロストークシンチレータのビーム位置毎の光量の差

ころである。図 7.5.5 を見ると、ビームの位置に関係なく光量の差はほとんどないことがわかる。ビームがクロストークシンチレータのすぐ近くを通った場合でも、光量の差に変化は見られない。

今回の測定では統計量が少ないことや、シンチレータ自体の光量がそれほど大きくないためクロストークの光量も小さくなってしまふことなどから、精密な解析はできていないが、シンチレータ間の光学的クロストークは非常に小さく、無視できるレベルであるということが考えられる。

## 7.6 INGRID 型シンチレータを用いた時間分解能測定

INGRID 型シンチレータは WAGASCI 検出器の veto plane などに用いることになっており、INGRID 型シンチレータの時間分解能を測定することは、veto plane のシンチレータの枚数や、WAGASCI 検出器と MRD の間の距離をどれくらい確保すればいいかを決定する重要な要素になる。今回は 1.2m の INGRID 型シンチレータと 2m の波長変換ファイバーを用い、ビームを当てる位置を変えながら時間分解能を測定した。

### 7.6.1 セットアップ

図 7.6.1 にセットアップの概念図を示す。図 7.6.1 中の上方がビーム上流側で、下流側の INGRID 型シンチレータを動かす。上流側の INGRID 型シンチレータは固定し、図中 C の位置にビームを当てるようにした。またトリガーシンチレータは薄型シンチレータの性能測定時と同様に 2.5cm×2.5cm の BICRON 製シンチレータを用い、ホドスコープとトリガーシンチレータのコインシデンスでデータを取得した。また今回は二枚の INGRID 型シンチレータを重ねて測定に用いたので、シンチレータ間のクロストークを防ぐためにそれぞれの INGRID 型シンチレータをブラックシートでくるんで測定した。INGRID 型シンチレータ二枚の読み出しには実際に検出器で使う長さの波長変換ファイバー 2.0m を使用し、第二世代 MPPC を  $\Delta V=4.0V$  を使用した。図 7.6.2 に測定時の写真を示す。

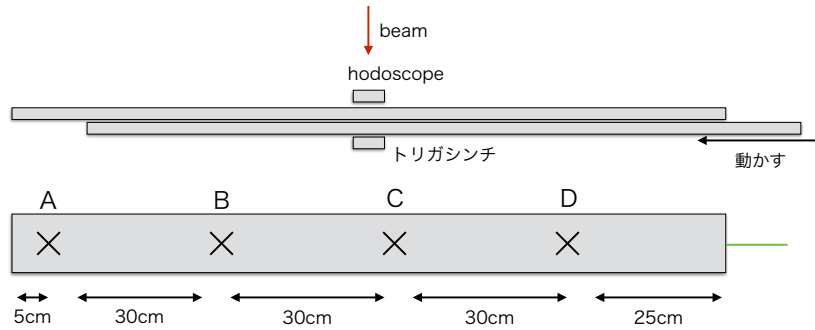


図 7.6.1: INGRID 型シンチレータの時間分解能測定概念図。シンチレータの各位置はビーム下流側から見たものである。

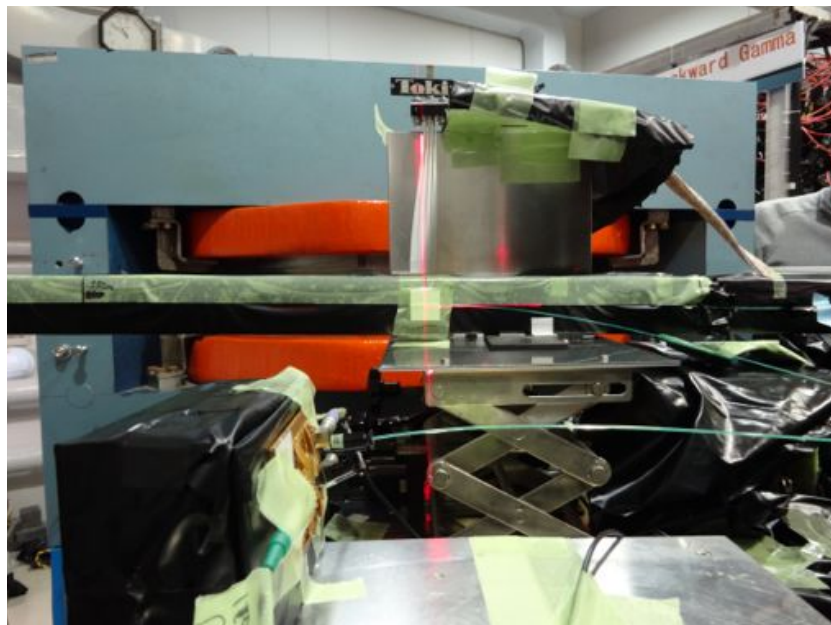


図 7.6.2: INGRID 型シンチレータの時間分解能測定の様子

## 7.6.2 INGRID 型シンチレータ光量

各位置での下流側 INGRID 型シンチレータの平均光量を図に示す。

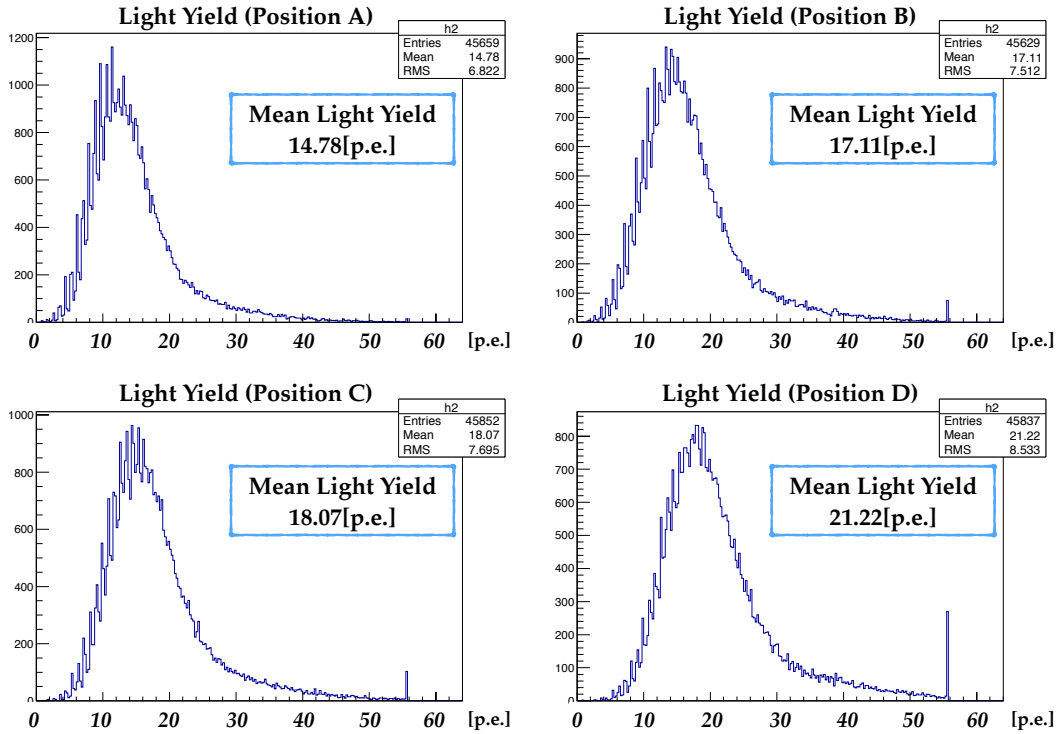


図 7.6.3: 各位置での INGRID 型シンチレータの平均光量

INGRID 型シンチレータの光量は 15[p.e.] 程度 ~21[p.e.] 程度であり、波長変換ファイバー内の伝搬距離が短くなるにつれて光量が大きくなっていく。この光量と波長変換ファイバーの長さの関係から、ファイバー内での光の減衰長が計算できる。

### 波長変換ファイバー中での光の減衰

INGRID シンチレータの平均光量と波長変換ファイバーの MPPC からの距離の関係をプロットし、指数関数でフィッティングした。この時光量の関数として以下を設定した。

$$(\text{Mean light yield}) = A \times \exp(Bx) \quad (7.6.1)$$

図 7.6.4 にフィッティングの様子を示す。

フィッティングの結果より、光量は以下のように表されることがわかった。

$$(\text{Mean light yield}) = 31.35 \times \exp(-0.383x) \quad (7.6.2)$$

よって、MPPC までの距離が 0m の時減衰はないとして減衰長を計算すると、2.61[m] となる。

## 7.6.3 INGRID 型シンチレータ時間分解能

INGRID 型シンチレータの時間分解能の測定の結果として、各位置での TDC 分布を図 7.6.5 に示す。各ピークのガウスフィッティングの範囲は、ピーク  $\pm 5$ [ns] で設定しフィッティングを行った。



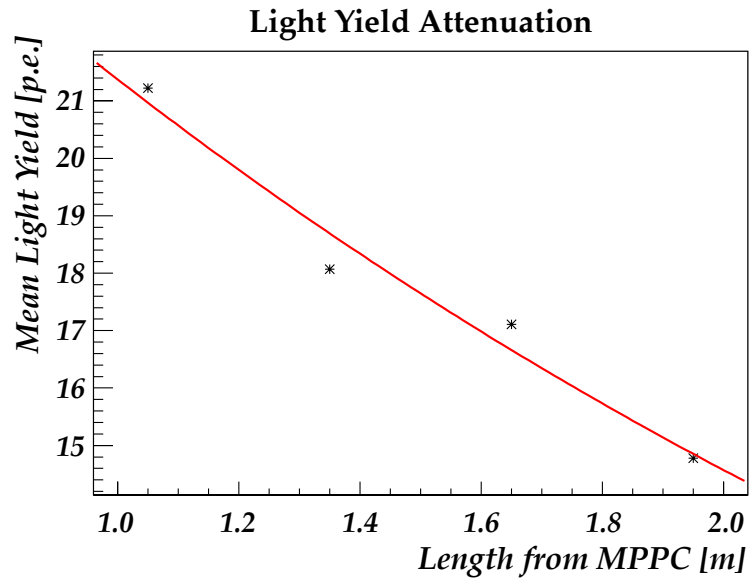


図 7.6.4: INGRID 型シンチレータの光量の減衰

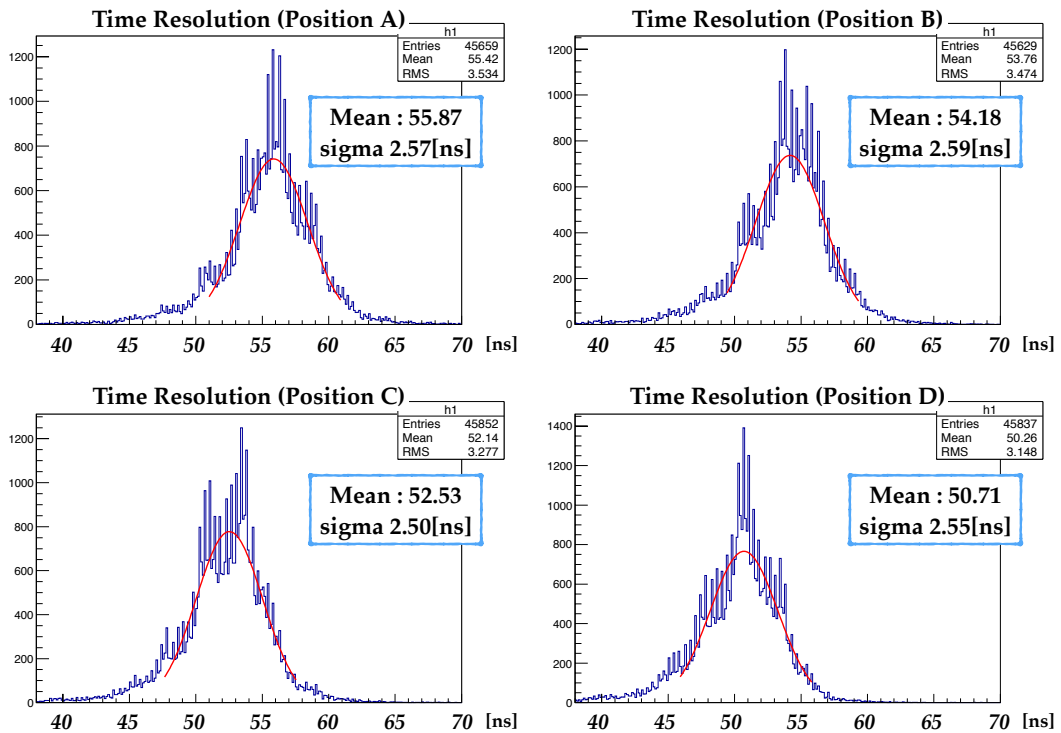


図 7.6.5: 各位置での INGRID 型シンチレータの時間分解能

まずヒストグラムを見ればわかるように、ピークの形がきれいなガウシアンではなく、いくつかのピークが合わさったような形をしている。実験時にはその原因がわからなかったのであるが、後に delay に用いた NIM モジュールと TDC を用いて測定を行っていたところ、今回と同じようにピークが幾つかにわかれる現象が見られたため、delay に用いた NIM モジュールが原因である可能性が高い。よって INGRID 型シンチレータの時間分解能は今後も確認が必要であるが、今回の解析では全体をフィッティングすることにする。

図 7.6.5 にも示したように、フィッティング結果は sigma が約 2.5[ns] であった。またビームを当てる位置を変えることでファイバー中の光の伝搬距離が変わり、伝搬にかかる時間も変わるため、この情報からファイバー内での光の伝搬速度を求めることが出来る。

### ファイバー中の光の速度

波長変換ファイバー中の光の伝搬速度を求めるため、A 点からの距離と TDC 分布の Mean 値の差をプロットし、1 次関数でフィッティングを行った。図 7.6.6 にそのフィッティングの様子を示す。このフィッティング結果より、ファイバー内での光の伝搬速度は、 $1.75 \times 10^8$ [m/s]

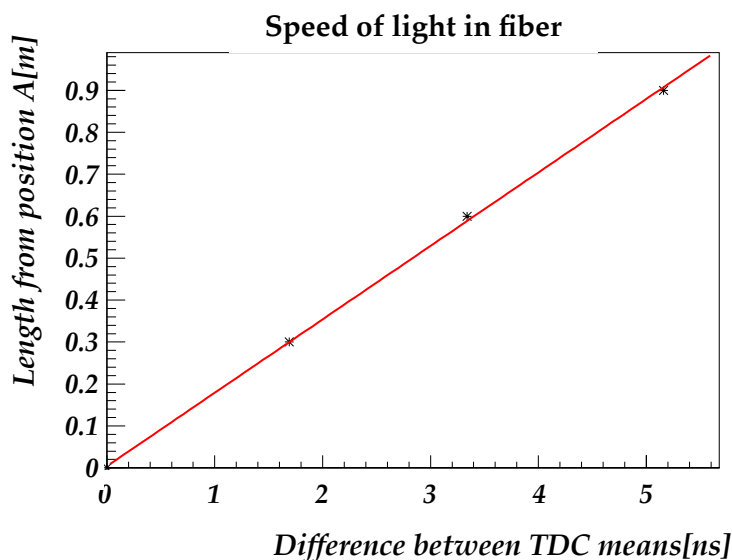


図 7.6.6: 波長変換ファイバー内の光速度

であることがわかった。波長変換ファイバーの core は屈折率が 1.59 であり、Inner cladding は屈折率が 1.49 である。またファイバー内では光は全反射しながら伝搬し、少し長めの距離を移動することになるため、ファイバー内での光の伝搬速度は光速/屈折率より少し遅くなる。よって今回の測定結果はおおよそ予想と一致する結果となった。

## 7.7 fiber 長が 120cm の時の光量と Detection Efficiency

実際の WAGASCI 検出器では、1m の薄型シンチレータを予定であるので、波長変換ファイバーの長さは約 1.2m 程度になると予想される。今回のビームテストで用いた波長変換ファイバーは 60cm であるので、ファイバー内の光の減衰は今回の測定よりも大きくなる。よって、今回の測定

で計算した波長変換ファイバーの減衰長を用いてファイバーの長さが1.2mになった時の薄型シンチレータの光量と Detection Efficiency を計算した。

ファイバーの長さが1.2mの時の光量は減衰長2.61mを用いて次のように表される。ここでxとはファイバーの長さ[m]である。

$$(Light\ Yield)|_{x=1.2} = (Light\ Yield)|_{x=0.6} \times \exp\left(-\frac{0.6}{2.61}\right) \quad (7.7.1)$$

また、光量が増えた時の Detection Efficiency は、光量分布が Poisson 分布に従うと仮定して、threshold 以上の光量になる確率を計算することで求められる。計算には以前と同様に 1.5p.e. threshold を用いる。

ここでは特に表7.4.1で求めた光量を用いてファイバーの長さが1.2mの時の光量を議論する。以下に、上記の方法で計算した光量と Detection Efficiency の結果をまとめる。

表 7.7.1: 波長変換ファイバーの長さが1.2mの時のシンチレータの各位置での光量と Efficiency

シンチレータ	測定位置	光量 [p.e.] (0.6m)	光量 [p.e.] (1.2m)	Efficiency[%] (1.2m)
切れ込みなし	上端	18.51 ± 0.16	14.71 ± 0.13	99.999
	下端	11.26 ± 0.11	8.95 ± 0.09	99.871
切れ込みあり	上端	13.60 ± 0.14	10.81 ± 0.11	99.976
	下端	10.41 ± 0.09	8.27 ± 0.07	99.763
	切れ込み付近	11.34 ± 0.11	9.01 ± 0.09	99.878
	横端	14.79 ± 0.17	11.75 ± 0.14	99.990

表7.7.1に示したように、光量はファイバーの長さが1.2mになると約2割減少する。それに伴って Efficiency も同様に減少するが、すべての領域で99%以上と高い値になっている。なお、ここで計算した Efficiency と表7.4.2の Efficiency を比べると、今回の Efficiency の方が高くなっているが、表7.4.2での Efficiency はビームが散乱などにより直進せず、シンチレータに当たっていないイベントを含んでいるためであると思われる。いずれにせよ今回の結果では、ファイバーの長さが1.2mになっても、Efficiency は十分に高いということが示された。

## 7.8 ビームテストまとめ

以下に測定を行った項目について簡単にまとめる。

### 薄型シンチレータ光量

薄型シンチレータの光量はファイバー近辺で20数[p.e.]、シンチレータ下端付近で10[p.e.]程度という結果となった。また、グリッド構造用の切れ込みを入れることによる、光量の減少などは見られなかった。

### 薄型シンチレータ Detection Efficiency

Detection Efficiency については、シンチレータの端面付近の Efficiency が悪くなるであろう場所でも、シンチレータの全域で99%を十分に超えていることが確認された。また切れ込みを入れることによる Efficiency の低下なども確認されなかった。よって、薄型シンチレータの Detection Efficiency は、検出器の要請を十分に満たしているといえる。

### シンチレータ間の光学的クロストーク

切れ込みありのシンチレータ同士を組み、水の中に入れ、それらのシンチレータ間の光学的クロストークの測定を行った。測定はふたつのシンチレータの間にブラックシートを挟む場合と挟まない場合の二種類を行い、それらの平均光量の差を取ることで評価を行った。ビームが通った位置によってクロストークシンチレータの光量を場合分けし、その時の光量差を求めた。結果はビームが通った位置に依らずブラックシートがある場合とない場合でほとんど光量差がないことがわかった。統計量が少ないためそれほど正確な議論はできないが、シンチレータの発光光量の範囲では、シンチレータ間の光学的クロストークは無視できるレベルであると言える。

### INGRID 型シンチレータ時間分解能

INGRID シンチレータの時間分解能は、sigma が 2.5[ns] 程度という結果になった。しかし今回の測定では、delay に用いたモジュールの機能が安定しておらず、delay の時間が一定になっていないという現象が確認されたため、実際の時間分解能は今回の結果よりも良いという可能性がある。この項目は、今後ももう少し検証が必要である。

この測定で得られた光量分布を用いて、波長変換ファイバーの減衰長を計算すると、2.61[m]であった。また、波長変換ファイバー中の光の速度を計算すると、 $1.75 \times 10^8$  [m/s] となった。

### 波長変換ファイバーの長さが 1.2m の時の光量と Detection Efficiency

最後に、薄型シンチレータの光量と Detection Efficiency について、波長変換ファイバーの長さが、今回測定に用いた 60cm から、実際に検出器で用いられると思われる 120cm に変化した時の値を計算した。その結果、光量に関しては 2 割り程度減少するが、Efficiency は 99%以上と検出器の要請を満たす結果となった。

# 第8章 WAGASCI検出器のプロトタイプの製作

この章では WAGASCI 検出器のプロトタイプとして、三次元格子構造を持つ 62ch の小型検出器を製作したので、それについて述べる。

## 8.1 製作の目的

WAGASCI 検出器はシンチレータをグリッド状に組んだり、水の中に入れて測定をしたりなど、今までにないコンセプトの検出器であるため、実際にプロトタイプを作ることで確認できることが多い。以下に今回のプロトタイプ製作の目的をまとめる。

- 実際にシンチレータを多 ch でグリッド状に組むことによる組み立て可能性とシンチレータの dimension の確認
- 検出器製作における注意点などの発見と確認
- ファイバー読み出しのクッキーの可用性の確認
- 宇宙線によるシンチレータの光量と、そのばらつきの確認
- シンチレータをグリッド状に組むことによる tracking efficiency の向上の確認

## 8.2 プロトタイプの構成

### 8.2.1 overview

まず図 8.2.1 にプロトタイプ検出器の全体図を載せる。水を入れて測定するために一番外側に容器(水槽)が有り、その容器の左下部分にシンチレータを配置している。シンチレータからは波長変換ファイバーが伸び、クッキー (fiber bundling connector) に接着されている。容器の大きさは一辺が 35cm の正方形をしており、深さは 15cm である。またシンチレータの長さは 13cm となっており、ビームテストで用いたものと同じ試作品を用いている。

以上が検出器の大まかな構成であるが、読み出しとして用いる予定であった、新型 32ch array 型 MPPC サンプルを入手出来る時期が遅れてしまったため、今回は 64ch の array 型 MPPC を用いることにした。この際、クッキーは新型 32ch array 型 MPPC サンプル用に設計されたものであるため、今回はクッキーをファイバーの取り出しにのみ用いることとなった。

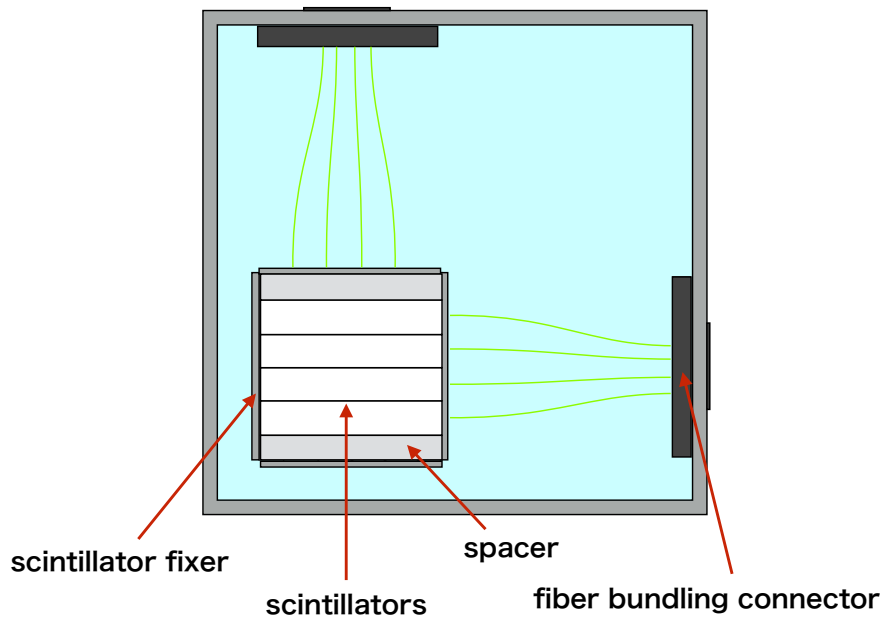


図 8.2.1: プロトタイプ検出器の概観図。実際はファイバーを伸ばし 64ch の array 型 MPPC に接続する。

## 8.2.2 シンチレータの形状と配置

### プロトタイプ本体のシンチレータの形状と配置

プロトタイプ検出器に用いるシンチレータは、WAGASCI 検出器用に Fermi 研究所で制作された試作品を用いるが、今回はグリッド構造用の切れ込みの間隔を 2.5cm に設定した。図 8.2.2 にシンチレータの図面を載せる。なぜなら、もし実際の検出器と同じように  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$  とすると、グリッド構造の数に対して平面用のシンチレータの数が多くなってしまい、今回のプロトタイプ製作の目的である、シンチレータをグリッド状に組むことによる tracking efficiency の向上の確認や、多 ch のシンチレータをグリッド状に組む際の組み立てにおける注意点の確認などを果たしにくくなるためである。

シンチレータは上記のものを用い、それらを用いて、図 8.2.3 の様にシンチレータを組み上げることにした。まず平面用の切れ込みなしのシンチレータを xy に 4 枚ずつ並べ xy 層を作る。その上に切れ込みありのシンチレータ 10 枚で作った、grid 層を重ねる。またその上に xy 層を重ね、という風にしていき、シンチレータを組み上げていく。最終的に、xy 層が 4 層、grid 層が 3 層になり、これにより  $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$  のセルが  $4 \times 4 \times 3 = 48$  個のセルができることになる。ただし今回はシンチレータの幅が 24mm のため、実際に作成したプロトタイプ検出器ではセルの高さが 24mm になり、また xy 層の平面用シンチレータが中心に寄ることになるので少しグリッド用のシンチレータの位置と xy 平面用シンチレータの境界がずれてしまっている。

図 8.2.3 は 2.5cm 幅の時の図で、図中の暗い灰色の部分は xy 平面用のシンチレータを固定するためのスペーサーである。また grid 層についてはシンチレータを組むときに上になるシンチレータと下になるシンチレータが出来る。同様に xy 層で、どちらの方向を上にするかと

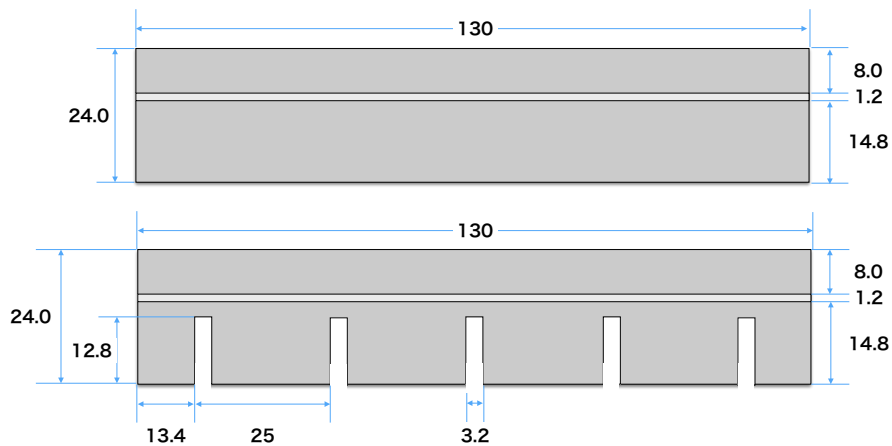


図 8.2.2: プロトタイプ検出器で用いるシンチレータの dimension

という問題が生じる。今回は全て、図 8.2.1 における右側の読み出し口から出るシンチレータを、上になるように設定した。よって、図 8.2.3 は、図 8.2.1 中の下側から見た図ということになる。

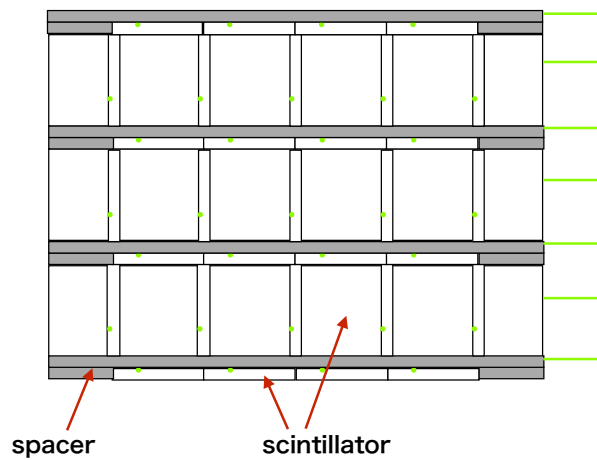


図 8.2.3: プロトタイプ検出器のシンチレータの配置

### トリガーシンチレータの形状と配置

今回の測定ではデータ取得のトリガーのために、4枚のトリガーシンチレータを用いた。それぞれのシンチレータは長さが10cmのINGRID型シンチレータで、上下に二枚ずつ設置している。設置位置は、容器には水が入っており容器内部での設置が難しかったため、容器の外側の底の部分と蓋の部分に貼り付けて使用した。またINGRID型シンチレータの幅は5cmであるので、トリガーシンチレータで10cm×10cmの領域をカバーすることになる。これは2.5cm角のセル4×4個分にちょうど対応し、これにより上下のトリガーシンチレータを通った宇宙線は必ずこのセルの内部を通ることになる。この際のトリガー信号は、上下それぞれ

でどちらか一方のシンチレータにヒットがあった時にデータ取得を行っている。

最後に、トリガーシンチレータの配置は上下それぞれでどちらの方向を向けるか、という自由度が残るが、今回の測定では、上下のシンチレータの向きを揃えて測定する場合と、上下のシンチレータの向きを90度交差するようにさせた場合の2パターン行った。

### 8.2.3 MPPC とクッキー

このプロトタイプ検出器の読み出しの MPPC は、新型 32ch array 型 MPPC を用いる予定であったが、今回は入手に時間がかかるため 64ch の array 型 MPPC を用いた。以下に 64ch array 型 MPPC と、その MPPC と波長変換ファイバーの接続に用いるクッキーについて述べる。

#### 64ch array 型 MPPC

今回用いた 64ch array 型 MPPC 浜松ホトニクス製 S12642-0808PB-50 である。これは 1ch が  $3\text{mm} \times 3\text{mm}$  の有効受光面を持つ MPPC アレイで、ピクセルピッチは  $50\mu\text{m}$  であり、各 ch が縦横 8ch ずつ並んだ形状をしている。その写真を、図 8.2.4 に示す。図 8.2.4 にあるよ

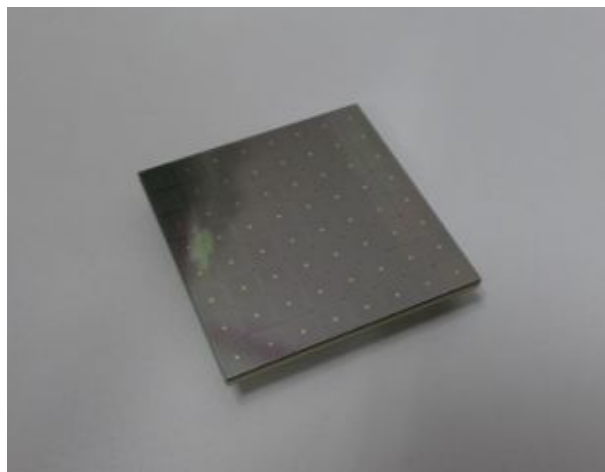


図 8.2.4: プロトタイプ検出器で用いた 64ch array 型 MPPC

うに、この MPPC は表面実装型 MPPC であり、裏面にコネクタが実装されている。受光面のサイズが大きいため、MPPC のダークノイズレートが大きいことが予想されるが、この MPPC はビームテストで用いた array 型 MPPC からダークノイズレートが大幅に減少しているモデルであるため、今回の測定にも問題なく使用できるはずである。以下の表 8.2.1 に MPPC の各項目をまとめる。

#### 32ch array 型 MPPC 用クッキー

32ch array 型 MPPC 用クッキーはフランスの LLR で WAGASCI 実験用に設計された。その写真を図 8.2.5 と図 8.2.6 に示す。図 8.2.5 は表面で、実際の検出器ではここに直接 32ch の array 型 MPPC が接続されることになる。クッキーの斜め対角線上に位置する穴が MPPC を接続し固定させるための穴で、クッキーの中心線上にある穴は、MPPC のアライメント用の穴である。また、水漏れが起こらないように O-リングを装着できるようになっている。先述の通り今回はファイバーを取り出すフィードスルーとして用いる。



型番	S12642-0808PB-50
ch 数	64(8×8)
有効受光面 (1ch)	3mm×3mm
ピクセルピッチ	50 $\mu$ m
ピクセル数 (1ch)	3584
開口率	62%
最大感度波長	450nm



図 8.2.5: 32ch MPPC 用クッキー表面



図 8.2.6: 32ch MPPC 用クッキー裏面

### 64ch array 型 MPPC 用クッキー

図 8.2.7 に全体図と、図 8.2.8 にファイバーを接着する部分付近の写真を示す。図 8.2.7 において、接続部分には 1mmφ の穴が 64 個開いており、図中下側から波長変換ファイバーを通し接着する。波長変換ファイバーと MPPC 表面は 0. 数ミリ程度まで近づけることが可能となっている。



図 8.2.7: 64ch MPPC 用クッキー全体図

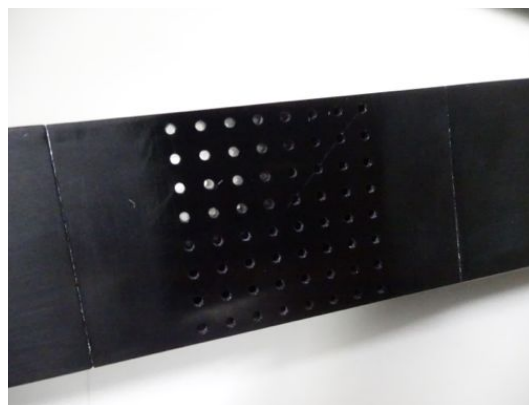


図 8.2.8: 64ch MPPC 用クッキーとファイバー接着部拡大図

## 8.2.4 その他の構成要素

### 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーは実際に検出器で使うものと同じ Kuraray 社の Y-11(200)MS を用いた。プロトタイプ検出器で用いるファイバーの長さは約 80cm に統一している。また、トリガーシンチレータに使用したファイバーの長さは約 75cm である。

### オプティカルセメント

ファイバーを接着する際のオプティカルセメントは、こちらも検出器で用いるものと同様の Eljen Technology 社の EJ-500 (Optical cement resin と Optical cement hardener) を用いた。

### 反射材

反射材は Eljen Technology 社の EJ-510 を用いた。反射材を塗布した箇所は、ビームテストの時などと同様に、グリッド構造用の切れ込みの部分と、ファイバー接着後の接着部分、シンチレータの端面である。

### EASIROC module

プロトタイプ検出器の MPPC の信号の読み出しには EASIROC module を用いた。先述のようにトリガー信号にはトリガーシンチレータの上下のコインシデンス信号を適当な時間 delay させて用いた。

### トリガーシンチレータ用 MPPC

トリガーシンチレータの読み出しに使用した MPPC は、第二回ビームテストでも使用した、

次世代型 MPPC not crosstalk suppression type である。今回の測定では、 $\Delta V=1.4V$  で使用し、宇宙線による信号かどうかの判別の threshold は  $4.5[p.e.]$  を用いた。

## 8.3 プロトタイプの製作

ここではプロトタイプ検出器の製作過程を、作業風景を交えながら説明する。

### 1. 波長変換ファイバーの接着

まずシンチレータに波長変換ファイバーを接着した。シンチレータのファイバー接着用の溝は、深さが  $1.2\text{mm}$  となっており、普通に接着するだけだとファイバーがシンチレータから少し浮いてしまうことがある。このようなことが起こってしまうと光量の低下につながるだけでなく、グリッド構造にする際にそこが干渉してしまい、グリッド状に組めないということになりかねない。よって今回は、ファイバー接着の際に両側から少し押しえつける力がかかるようにして固定するようにした (図 8.3.1)。また接着の際は同様の理由から、ファイバーの上からオプティカルセメントを足すということはしなかった。

### 2. シンチレータ端面の研磨

波長変換ファイバーを接着したシンチレータは余ったファイバーの部分を切り取るが、接着の際にオプティカルセメントなどがはみ出していると、根本のところまで切り取れず、はみ出ている分だけシンチレータが長くなってしまふ。当初はこの現象を想定してシンチレータの固定具を作成していたのであるが、シンチレータの幅が  $25\text{mm}$  から  $24\text{mm}$  に変更になったため、ズレが生じてしまい対策が意味を成さなくなった。よって今回は、シンチレータの端面の部分を、電動卓上丸のこを用いて  $0. \text{数 mm}$  だけ削り取るという処置を施した。図 8.3.3 と図 8.3.4 にこの処置の前後の様子の写真を示す。

### 3. 反射材塗布

反射材は先述の通り切れ込み部分と、ファイバー接着部分、端面部分に塗布した。この時の塗布は筆を用いて行い、一度塗り乾いた後にもう一度上塗りを行った。二回塗布したあとのシンチレータの写真を図 8.3.5 に示す。

### 4. 組み立て

組み立ては、下段から順に行っていく。今回の構成ではファイバーをクッキーから大きく飛び出させるため、組んでいくと同時にファイバーをクッキーに通していった。その時の様子を図 8.3.6 に示す。なお、ファイバーを飛び出させる側も反対側と同様に、シンチレータの幅の変更に伴うズレが生じたため、ファイバーを通すための穴の部分を、ボール盤を用いて広げるといった作業を行った。

### 5. ファイバーとクッキーの接着

まず水槽に取り付ける、32ch array 型 MPPC 用のクッキーと波長変換ファイバーの接着を行った。今回はクッキーをファイバーが突っ切っているため、通常の方法である、ファイバーにオプティカルセメントをつけてから穴に通す、という方法が取れない。よって、今回は水槽自体を横向きに倒し、クッキーの穴の付近にオプティカルセメントを流し込むという方法を取った。その時の様子を図 8.3.7 に示す。もちろんこの方法でオプティカルセメントが垂れてこないことは入念に確認した。

波長変換ファイバーと 32ch array 型 MPPC 用のクッキーの接着が終わったあとは、波長変換ファイバーと 64ch array 型 MPPC 用クッキーとの接着を行った。こちらはファイバーに光学セメントをつけて穴に通すという通常の方法がとれる。その時の様子を図 8.3.8 に示す。

#### 6. クッキーの端面の研磨

クッキーと MPPC 表面の接続面の研磨は、紙やすりで行った。具体的には 5 種類ほどの紙やすりを用意して順に磨くという作業を行った。研磨後のクッキーの表面の様子を図 8.3.9 に示す。

#### 7. 水漏れ確認

プロトタイプ検出器は水中に入れて測定を行うため、測定を始める前に水漏れのチェックを行った。その時の様子を図 8.3.10 に示す。結果は、水を入れても水漏れが起こるようなことはなかった。

#### 8. トリガーシンチレータの設置

先述の様に、シンチレータでできたセル構造の上方と下方に、INGRID 型シンチレータをトリガーシンチレータとして取り付けた。図 8.3.11 にその時の様子を示す。

#### 9. 64ch array 型 MPPC とクッキーとの固定

最後に、端面を研磨したクッキーと、64ch array 型 MPPC を接続した。その時の様子を図 8.3.12 に示す。MPPC 表面と、クッキーの端面が 0. 数 mm の距離で固定されていることがわかる。

以上のような手順でプロトタイプ検出器を製作した。最後に、図 8.3.13 と図 8.3.14 に完成したプロトタイプ検出器の写真を載せる。

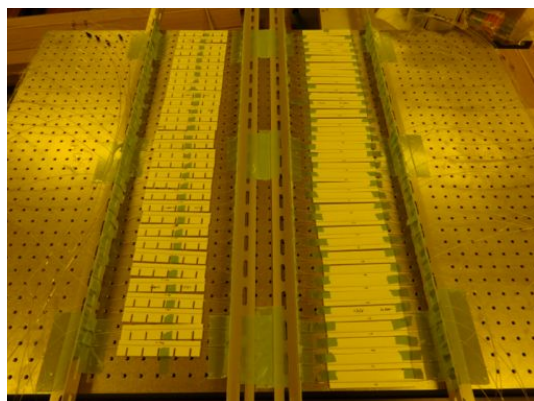


図 8.3.1: シンチレータとファイバーの接着の様子。予備も含めて 66 枚の接着を行った。

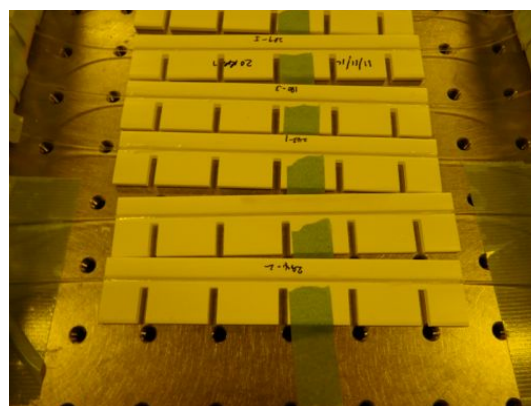


図 8.3.2: シンチレータとファイバーの接着の拡大図。接着時にファイバーが浮いていないかその都度確認を行った。

## 8.4 64ch array 型 MPPC のキャリブレーション

ビームテストの際の array 型 MPPC のキャリブレーションと同様に、array 型 MPPC の各 ch で同じ  $\Delta V$  になるように電圧を印加するために 64ch array 型 MPPC のキャリブレーションを行った。

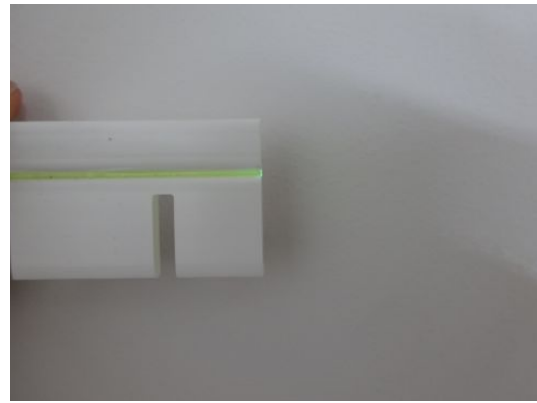
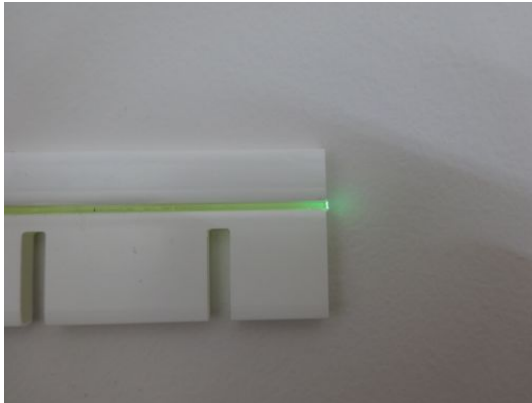


図 8.3.3: シンチレータ端面のファイバーの様子。図 8.3.4: シンチレータ端面の研磨後の様子。ファイバーが少しだけ飛び出ていることがわかる。研磨後の様子。ファイバーの出っ張りがなくなっていることがわかる。

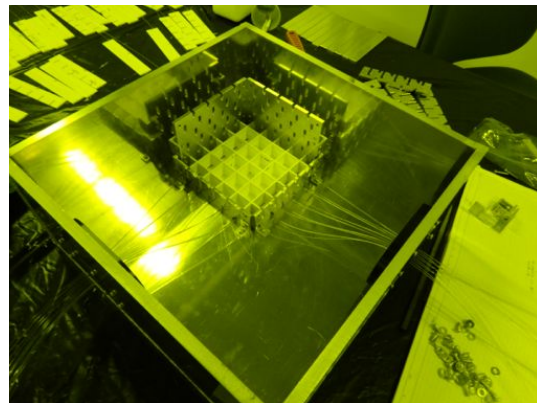
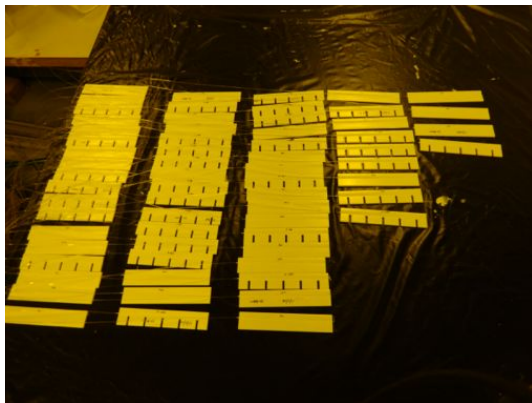


図 8.3.5: 反射材塗布後の様子。二回塗布を行った。図 8.3.6: シンチレータの組み立ての様子。一段目後である。一段目が組み終わったところ

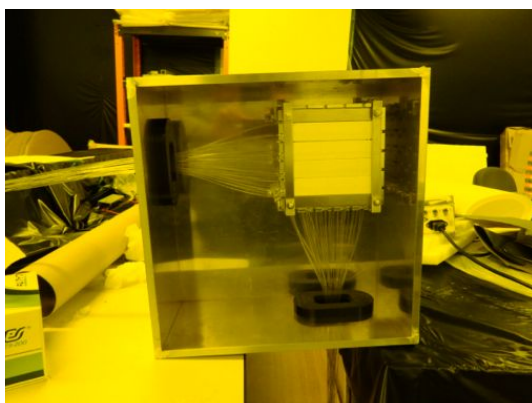


図 8.3.7: 32ch MPPC 用クッキーと波長変換ファイバーの接着の様子。図 8.3.8: 64ch MPPC 用クッキーと波長変換ファイバーの接着の様子。

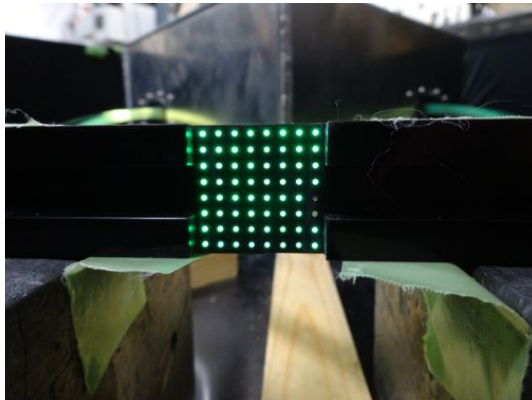


図 8.3.9: 端面研磨後のクッキーの様子。

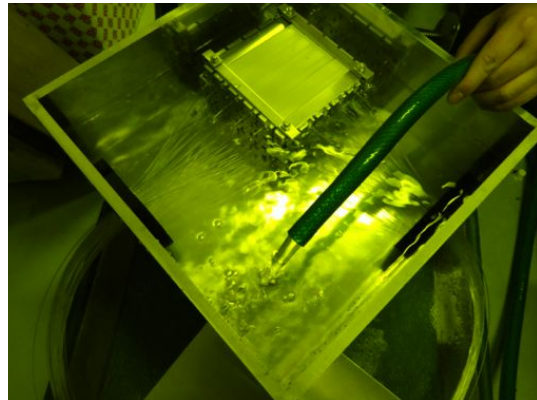


図 8.3.10: 水漏れ確認作業の様子。

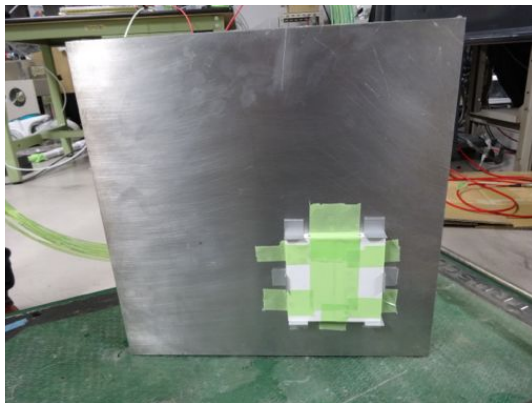


図 8.3.11: トリガーシンチレータ設置の様子。



写図 8.3.12: 64ch array 型 MPPC とクッキーの接続の様子。写真は水槽下側のトリガーシンチレータ。

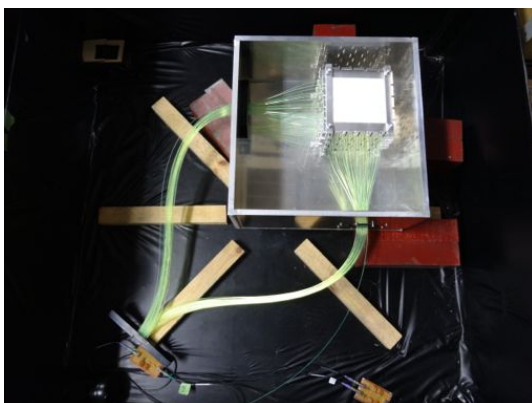


図 8.3.13: 完成したプロトタイプ検出器の様子。まだ水を入れる前である。

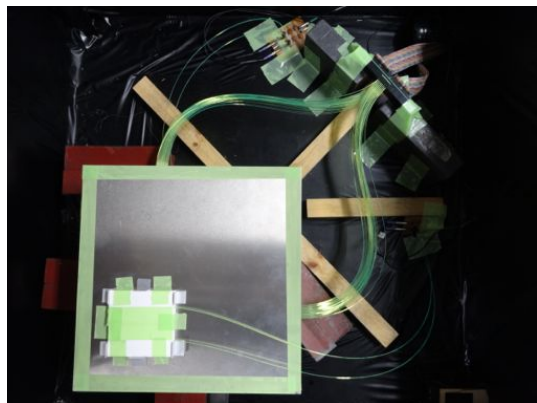


図 8.3.14: 完成したプロトタイプ検出器の様子。図のようにトリガーシンチレータを設置する。

キャリブレーションはLEDの光をMPPCにあて、1p.e.と0p.e.のピーク間のADC chを、それぞれのピークをガウシアンでフィットすることにより求め、それが一定になるようにEASIROC moduleのパラメータを変更した。図8.4.1にその時のキャリブレーションの様子を示す。

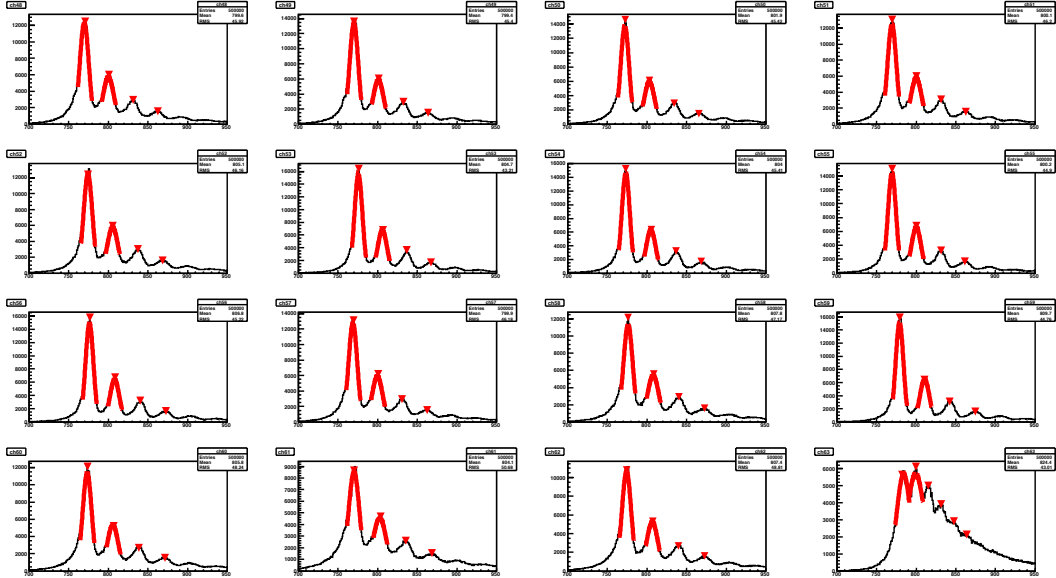


図 8.4.1: 64ch array 型 MPPC のキャリブレーションの様子

キャリブレーションは上で示した16chだけでなく全64chで行ったが、その中で電圧をかけ過ぎると不安定になってしまうためにあまり電圧をかけられないchが4ch存在した。そのため、その4chについてはあまり電圧をかけずに比較的小さいゲインで運用することにした。以下の図8.4.2に、正常なchとゲインが小さいchのLED照射時のADC分布を載せる。

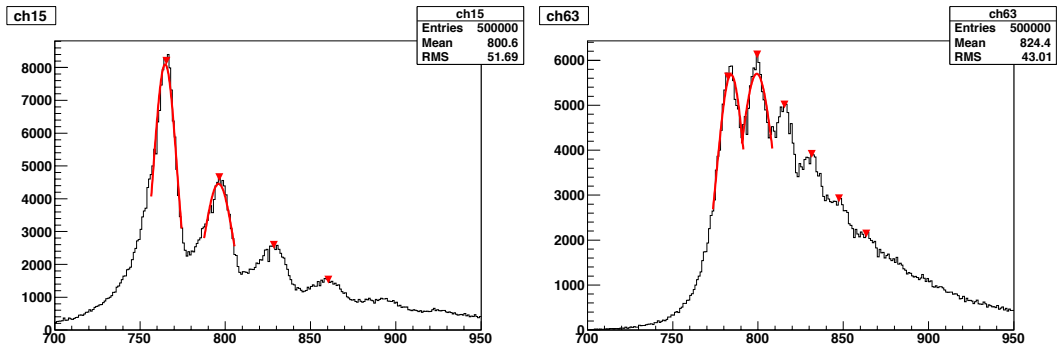


図 8.4.2: キャリブレーション時の、正常なch(左図)とゲインが小さいch(右図)

今回のキャリブレーションでは正常な振る舞いをする60個のchでは、1p.e.ピークと0p.e.ピーク間のADC chを30[ADC ch]に設定し、ゲインが小さい4個のchでは、14[ADC ch]に設定した。なおこのゲインの低い4個のchは、プロトタイプ62ch中の3個のchに対応し、その場所は、以下の図8.4.3のピンクで示したところに対応する。なお、図8.4.3内の左側の図は、図8.2.1の右方向から見た場合に対応し、図8.4.3内の右側の図は、図8.2.1の上方向から見た場合に対応する。

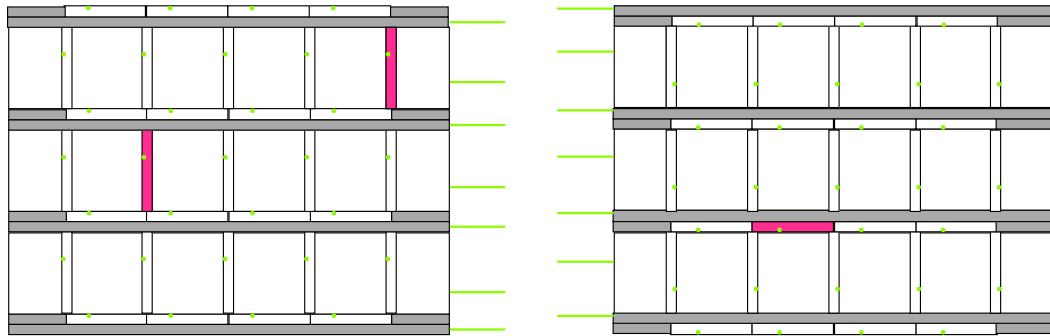


図 8.4.3: ゲインの小さい ch の位置

以下の測定ではプロトタイプ検出器を恒温槽内などには置かず、室温の環境で測定を行うため、MPPC のゲインやその他の特性が変わってしまうが、以下の解析ではこの測定で得られた pedestal の値と 1p.e.-0p.e. の ADC ch の値を用いて解析を行うことにした。

## 8.5 threshold の設定

ここでは、プロトタイプ検出器では宇宙線を用いて測定を行うため、宇宙線が通ったかの判定のための threshold を設定する。今回のプロトタイプの測定での threshold は、4.5[p.e.] に対応するところとして設定する。実際の WAGASCI 検出器は 1.5p.e. threshold で測定を行う予定であるが、プロトタイプ検出器で 4.5[p.e.] を threshold として設定する理由は、プロトタイプ検出器で用いる MPPC が実際の検出器で用いるものではないためである。プロトタイプ検出器で用いる 64ch array 型 MPPC は、第二世代の MPPC ではあるがクロストークは第一世代の MPPC とほとんど変わっていないため、1.5p.e. threshold ではノイズイベントの割合が大きくなってしまう。また、1ch あたりの受光面のサイズが WAGASCI 検出器で用いる MPPC の約 5 倍であるため、ノイズレートも同様に同じ  $\Delta V$  では 5 倍になることが予想される。そのため、プロトタイプ検出器を 1.5p.e. threshold で運用することは不可能と判断し、4.5p.e. threshold を用いることにした。以下の図 8.5.1 にプロトタイプ検出器の平面に並んだシンチレータの、宇宙線による典型的な ADC 分布とその時の threshold の位置を載せる。

プロトタイプ検出器による測定では、ゲインの小さい ch を含め全ての ch で、threshold は 4.5[p.e.] で解析を行った。なお、ゲインの小さい 3 個の ch と、残りの 59 個の ch の 4.5[p.e.] に対応する ADC ch は別のものを用いている。

## 8.6 宇宙線によるシンチレータの光量試験

プロトタイプ検出器に用いたシンチレータの光量や、光量のばらつきを見るために、宇宙線を用いた光量試験を行った。宇宙線データはプロトタイプ検出器の上下に配置したトリガースンチレータのヒット情報を用い、上下のコインシデンスのタイミングでデータ取得を行った。この際のトリガースンチレータの向きは、先述のようにプロトタイプ検出器の上側と下側で向きを揃える場合と、向きを揃えない場合の二種類の測定を行ったが、光量の解析に関してはこの二種類の場合の測定の合わせて解析した。



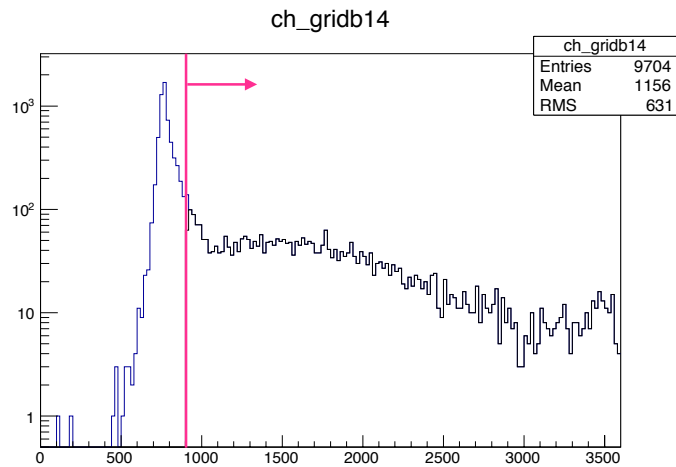


図 8.5.1: 平面に並んだシンチレータの宇宙線による典型的な ADC 分布

### 8.6.1 イベントディスプレイ

宇宙線によるデータが正常に取得出来ているかを確認するために、取得されたイベントをイベントディスプレイを作成することにより確認した。以下の図 8.6.1 にイベントディスプレイのサンプルを載せる。なおこれらのイベントは、上下のトリガーシンチレータの向きを同じにした時のイベントを用いている。

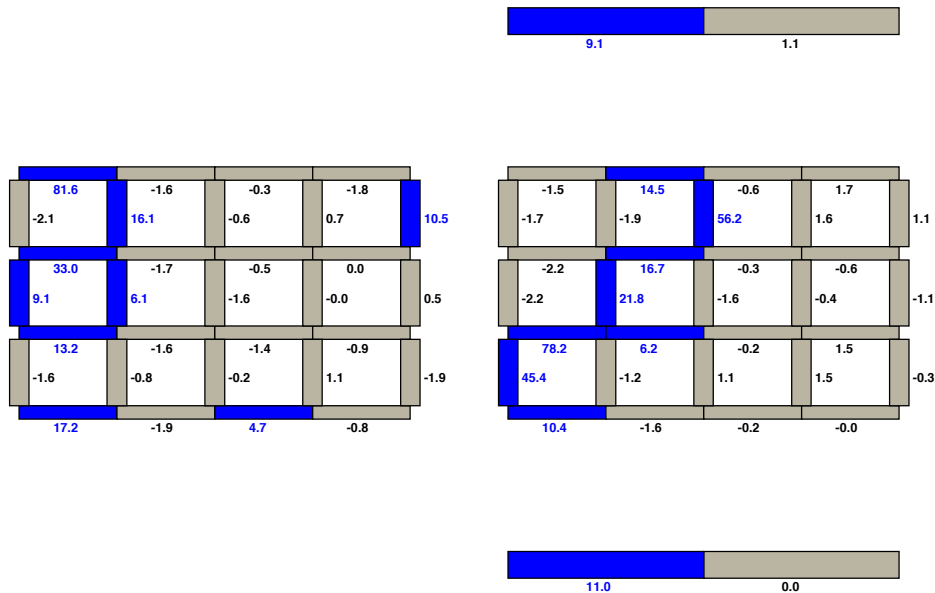


図 8.6.1: 宇宙線イベントサンプル

このイベントディスプレイはプロトタイプ検出器を横から見た図になっており、右側上下にある4枚のシンチレータがトリガーシンチレータを表す。その間に挟まれているのがプロトタイプ検出器で、図 8.4.3 での見方と同様に、左側がプロトタイプ検出器を図 8.2.1 の右方向から見た場合に

対応し、右側が図 8.2.1 の上方向から見た場合に対応する。また各シンチレータの近くにならば書かれている数字はそのシンチレータでの光量 [p.e.] を表し、獲得光量が 4.5p.e. 以上の場合、シンチレータを青くさせるようにした。

## 8.7 測定結果

図 8.7.1 に各シンチレータでの平均光量を示す。各シンチレータの近くにならば書かれている数字が、それぞれのシンチレータでの平均光量を表す。ここでの平均光量とは、8.5 節で述べた threshold 以上のイベントの平均光量である。この平均光量は 0[p.e.]~4[p.e.] のイベントを含んでいないため、実際のシンチレータの宇宙線での平均発光光量よりも大きくなる傾向がある。このようなことを避けるためには宇宙線イベントによるピークの発光光量を比べてやればよいのだが、今回の測定ではイベント数がピークが見えるほどには十分ではなかったため、宇宙線イベントによるピークによる比較は行わないことにした。

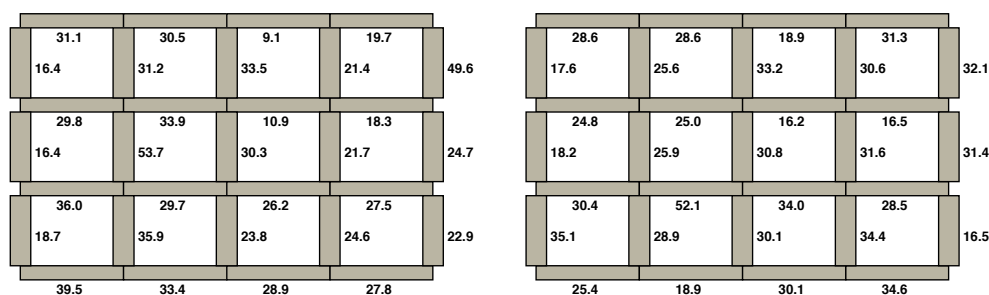


図 8.7.1: 各シンチレータの平均光量 [p.e.]

まずグリッド構造用のシンチレータは平面用シンチレータに比べて宇宙線がシンチレータ内を通る距離が長いと考えられたので、グリッド構造用シンチレータと平面用シンチレータの光量を別々にして、それぞれに対して平均と標準偏差を求めた。その結果を表 8.7.1 にまとめる。計算の結果、グリッド構造用シンチレータと平面用シンチレータの光量にあまり差がなかったため、全てのシンチレータについても計算を行った。

表 8.7.1: シンチレータの光量の平均と標準偏差		
	平均 [p.e.]	標準偏差 [p.e.]
グリッド構造用シンチレータ	28.24	8.69
平面用シンチレータ	27.38	8.35
全てのシンチレータ	27.80	8.53

表 8.7.1 にあるように、光量の平均は約 28[p.e.] で、標準偏差が 8.5[p.e.] となった。しかし図 8.4.3 と図 8.7.1 を見比べるとわかるように、ゲインの小さい ch において平均光量が約 50[p.e.] と非常に高い値になっている。他の ch ではそのように高い光量になっているところは存在しない。よって、ゲインが小さいことにより、平均光量を多く見積もってしまっているのではないかと考え、このゲインが小さい 3 個の ch を除外して、光量の平均と標準偏差を再計算した。その結果を表 8.7.2 に示す。

表 8.7.2: ゲインの少ない ch を除いたシンチレータの光量の平均と標準偏差

	平均 [p.e.]	標準偏差 [p.e.]
グリッド構造用シンチレータ	26.56	6.21
平面用シンチレータ	26.59	7.19
全てのシンチレータ	26.58	6.75

表 8.7.2 にあるように、ゲインの小さい 3 個の ch を除いて再計算した光量の平均は約 26.5[p.e.] で、標準偏差は約 6.7[p.e.] となった。光量の平均値は先述したように、平均を取る光量の範囲が 4.5[p.e.] からであるため、実際よりも大きめに見積もられているはずである。また今回の測定では、MPPC のクロストークが光量に含まれているため、この効果も光量を大きくしていると考えられる。よって、実際の平均光量は多少減少すると思われるが、光量の低下は数 [p.e.] 程度であると考えられるので、十分な光量が得られているといえる。

光量のばらつきに関しては、標準偏差が光量の平均に対して約 25% と大きめの値になっている。そこで図 8.7.1 をよく見ると、いくつか光量が低いものが存在する。例えば左図最上部の左から 3 枚目などや、その一枚下のシンチレータなどである。これらの光量が低い原因はおそらく、シンチレータに波長変換ファイバーを接着する際の問題で、波長変換ファイバーを接着する際にファイバーがシンチレータから浮いてしまったためであると考えられる。実際に確認した様子を図 8.7.2 に示す。少々わかりにくいですが、よく見るとファイバーが浮いてしまっていることがわかる。よって、

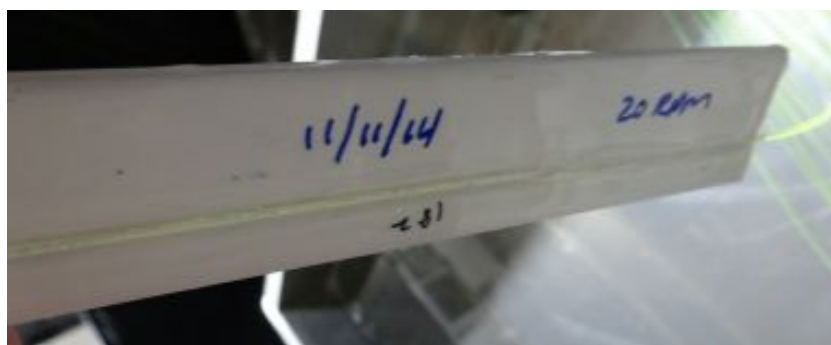


図 8.7.2: 光量が低いシンチレータのファイバーの接着の様子

光量が低い原因はこのファイバーの接着の仕方であったと考えられる。プロトタイプ検出器の構造上、すでに組み立ててしまったものを解体するのは難しいため、一番上の層のものしか確認できていないが、他の光量が低いシンチレータも、同じ原因である可能性が高い。したがって、シンチレータに対する波長変換ファイバーの接着を改善すれば、シンチレータの光量のばらつきはある程度抑えられると考えられる。

## 8.8 プロトタイプ検出器まとめ

ここではプロトタイプ検出器の製作の目的に対する結果を確認していく。

- 多 ch での検出器の組み立て可能性に関して

今回のプロトタイプ検出器ではグリッド用の切れ込みの幅を 3.2mm に設定した。結果的に

3.2mm でも問題なく組み立てることができた。しかし組み立て可能性に関しては切れ込みの幅よりも、波長変換ファイバー接着の際のファイバーが浮いてしまう問題や、オプティカルセメントがはみ出してしまう問題の方が影響度が高いと思われる。

- 検出器製作における注意点など  
最も注意すべきは波長変換ファイバーの接着だと思われる。これは組み立て可能性や、シンチレータの光量に大きく影響するからである。
- ファイバー読み出しのクッキーに関して  
ファイバー読み出しのクッキーは、水漏れなども起こらず問題なく使用できることが分かった。32ch array 型 MPPC が入手できれば、クッキーと MPPC のアライメントの精度も評価する。
- 宇宙線によるシンチレータの光量  
シンチレータの光量に関しては、26[p.e.] 程度と十分であることがわかった。(これは多少大きく見積もられている。) 光量のばらつきに関しては、まだ詳細な調査が必要であるが、平均光量に対して標準偏差が 25% 程度とあまり良くない結果となった。しかしこれは、波長変換ファイバーの接着を改善すれば、ある程度ばらつきが抑えられると考えられる。
- グリッド構造による tracking efficiency の確認  
今回 tracking efficiency の測定に関しては残念ながら時間が足りず評価できなかった。これは今後の課題である。

## 第9章 結論

T2K 実験の主要な系統誤差である、前置検出器と後置検出器のニュートリノターゲット原子核の違いによる系統誤差を削減するため、新型ニュートリノ検出器 WAGASCI の開発に取り組んできた。WAGASCI 検出器は水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を誤差 3% で測定することを目的とした検出器で、シンチレータを三次元格子状に組み、それによりできた空間にターゲットとなる水またはプラスチックを入れることで、 $4\pi$  のアクセプタンスを実現する事ができるという特徴を持つ。また水標的部分とプラスチック標的部分の構造をほとんど同じにし、それぞれに対するニュートリノ反応断面積の比を取ることで、ニュートリノフラックスと検出器由来の誤差を大幅に削減する。

本論文では、まず光検出器 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) の性能評価を行った。今回の性能評価では T2K 実験で用いられている第一世代 MPPC から各性能が大幅に向上した第二世代 MPPC を用いた。第二世代 MPPC を用いることによって、T2K 実験で使用されている状態の MPPC とくらべて、ゲインが約 3.5 倍、ノイズレートの割合が 1 割以下、クロストーク・アフターパルス率が 4 割以下、PDE が約 1.8 倍など、各性能の向上を確認した。またシンチレータや波長変換ファイバーなどを水の中に入れて測定することで問題が生じないかどうかを確認し、水中での光量の安定性などを評価した。その結果、水中でも問題なく使用できることを確認した。また WAGASCI 検出器では厚さが 3mm の薄型シンチレータを用いるため、東北大学電子光物理学研究センターの陽電子ビームを用いたシンチレータの性能評価を行った。このビームテストでは、薄型シンチレータの全領域で、十分な光量が得られること、検出効率が 99% 以上であることを確認した。最後に WAGASCI 検出器のプロトタイプとして 62ch の小型検出器を製作し、検出器製作上の注意点や宇宙線によるシンチレータの光量などを確認し、十分な光量が得られることを確認した。

## 謝辞

修士課程の二年間は、今となってはとても短く感じられ、非常に充実した日々であったと改めて思います。ここにお世話になった皆様への感謝の意を表したいと思います。本当にありがとうございます。

中家剛教授にはいつもミーティングなどでの確かなアドバイスを頂き、研究の方向性を指し示していただいたことに非常に感謝しております。市川温子准教授には、私では思いつかないようなアイデアをいくつもいただきました。本当にありがとうございます。

また南野彰宏助教には、未熟な私に何から何まで教えて頂いて、本当に感謝しております。私が二年間やってこれたのは、南野助教のお力があってこそであったと確信しております。

また同じ WAGASCI グループとして一緒に実験をやってきた、林野くん、古賀くん、若松くん、竹馬くん、細見くん、金くんにも、深く感謝の意を表したいと思います。とくにビームテストでのハードスケジュールを乗り越えられたのは皆様の協力があったからこそだったと思います。

最後に、研究室の皆さんのおかげで素晴らしい研究生活をおくれたと思います。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] K.Abe et al. [T2K Collaboration], “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, arXiv:13114750v2 [hep-ex]
- [2] Kuraray 社 Scintillation Materials カタログ
- [3] 音野瑛俊, “ガイガーモードで駆動するピクセル化された新型半導体光検出器の基礎特性に関する研究” 東京大学修士論文 (2008)
- [4] 浜松ホトニクス社 MPPC カタログ