

修士論文

ニュートリノ反応測定実験に用いる
高位置分解能Scintillating Fiber Tracker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

物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室

平本 綾美

2017年1月26日



概要

T2K 実験は、ニュートリノ振動を精密測定する長基線ニュートリノ振動実験である。現在 T2K における系統誤差の大きな要因となっているのがニュートリノと原子核の反応の不定性であり、近年とくに、始状態で核子が 2 個関係し終状態で陽子が 2 本でてくる $2p-2h$ 反応による不定性が注目を集めている。陽子の飛跡は非常に短く、 $2p-2h$ 反応は現在の前置検出器では観測することができない。不定性削減のためには $2p-2h$ 反応を直接観測することが必要で、そのための手段として原子核乾板が有効であると考えた。

現在、原子核乾板を用いてニュートリノ反応点周りを精密に観測する実験が進行しており、T2K 前置検出器ホールにおける観測が試験的に行われている。今後、大質量の水標的および大面積の原子核乾板を用意し観測をすすめるにあたり、原子核乾板と T2K 前置検出器のトラックマッチングのための新しい検出器が必要となる。そこで我々は、Scintillating fiber および MPPC (Multi Pixel Photon Counter) を用いたトラックの開発を行っている。

モンテカルロシミュレーションによるニュートリノ反応の見積もりを行った結果、トラックは約 $200 \mu\text{m}$ の位置分解能が要求されることがわかった。この要求を実現するため本研究では、隣り合うファイバーの光量比を用いることでより高い位置分解能に達する手法を考案し、プロトタイプ検出器による原理検証を行ってきた。

Scintillating fiber の光量は荷電粒子が通過した際に通る距離に比例するため、粒子の通過位置によって異なる光量比を得ることができる。この比を用いて位置を再構成することで、ファイバーを細くせずに位置分解能を向上させることが可能となる。本研究における位置再構成の手法は、安価で高い性能の光検出器を簡単に入手できるようになった現在であるからこそ可能となる手法であり、これからのファイバートラッカーのベンチマークとなりうるものであるといえる。

本論文では、 2 mm 角のファイバーと MPPC を用いたプロトタイプ検出器を作成し、2 度にわたり陽電子ビームを用いた性能評価を行った結果について報告する。2 枚のレイヤーにおいて再構成された位置の差をとることで位置分解能を評価し、MIP 換算で垂直入射の際 $200 \mu\text{m}$ の位置分解能を達成した。さらに反射材などによりファイバーの条件を変更した場合の光学的なクロストークの変化や、粒子の入射角度による位置分解能の変化などについても考察を行い、実機に向けた最適化を行った。

目次

概要	i
第1章 ニュートリノ振動	1
1.1 ニュートリノの発見	1
1.2 ニュートリノ振動とは	1
1.3 これまでのニュートリノ振動実験	3
1.4 ニュートリノの未解決問題	5
第2章 T2K 実験	7
2.1 概要	7
2.2 ニュートリノビームの生成	7
2.2.1 J-PARC ニュートリノビームライン	7
2.2.2 off-axis 法	9
2.3 前置検出器	10
2.3.1 on-axis: INGRID	11
2.3.2 off-axis: ND280	12
2.4 後置検出器: Super-Kamiokande	14
2.5 T2K 実験の現状と課題	15
第3章 ニュートリノ反応	19
3.1 ニュートリノと原子核の反応	19
3.2 2p-2h 反応	20
3.3 原子核乾板を用いたニュートリノ反応の観測	22
3.3.1 原子核乾板	22
3.3.2 J-PARC T60/T66 実験	22
3.3.3 INGRID とのトラックマッチング	24
第4章 ファイバートラッカーの開発	28
4.1 Scintillating Fiber Tracker	28
4.2 位置検出の原理	29
4.3 プロトタイプ検出器の制作	30
4.4 Scintillating Fiber	31
4.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)	35
4.6 ファイバークッキー	39
4.7 MPPC 読み出しボード	40

4.8	EASIROC Module	40
第5章	陽電子ビームを用いたファイバートラッカーの性能評価	44
5.1	ビームテスト概要	44
5.1.1	第1回ビームテスト	44
5.1.2	第2回ビームテスト	46
5.2	セットアップ	48
5.2.1	ビームライン	48
5.2.2	データ収集システム・セットアップ	49
5.3	第1回ビームテストの結果	54
5.3.1	ファイバーの光量測定	54
5.3.2	検出器の Hit efficiency	57
5.3.3	位置分解能の測定	60
5.4	第2回ビームテストの結果	65
5.4.1	位置分解能の測定	65
5.4.2	読み出しまでの距離と位置分解能の関係	67
5.4.3	ファイバーの条件を変えた測定	70
5.4.4	位置分解能の入射角依存性	78
5.5	位置分解能の向上にむけて	81
5.6	MIP 粒子における位置分解能の見積もり	83
5.7	性能評価のまとめ	83
第6章	今後の展望	85
6.1	チャンネル数の削減	85
6.2	実機におけるチャンネル数の見積もり	86
6.3	実機に向けた課題	87
6.3.1	入射角度依存性の改善	87
6.3.2	光量による粒子識別	87
第7章	結論	88
	謝辞	89
	付録A 原子核乾板	91
	付録B Scintillating Fiber	93
B.1	ファイバーの太さ一様性	93
B.2	ファイバーの形状と位置の再構成に関する考察	95
	付録C Staggered 検出器の開発	97
C.1	検出器の概要	97
C.2	宇宙線による性能評価	97
C.3	陽電子ビームによる性能評価	99

C.4	位置分解能に関する考察	101
C.5	Staggered タイプ検出器のまとめ	102
付録D	ビームテスト補足	103
D.1	光量測定の補足	103
D.2	丸ファイバー検出器	104
D.2.1	丸ファイバー検出器の概要	104
D.2.2	位置分解能の測定結果	104
D.2.3	入射角度依存性	105
	表目次	108
	図目次	109
	参考文献	112

第1章 ニュートリノ振動

ニュートリノはかつて、素粒子物理学の標準模型において質量を持たないものと考えられていた。ところがニュートリノ振動の発見により、この考えが変わることになる。本章では、ニュートリノ振動の歴史およびこれまでの実験的な経緯について述べる。

1.1 ニュートリノの発見

ニュートリノは、重力相互作用を除き弱い相互作用のみを行う中性レプトンである。電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の3世代およびそれぞれの反粒子が存在している。ニュートリノの存在がはじめて示唆されたのは1930年であり、20世紀初頭から問題となっていたベータ崩壊におけるエネルギースペクトルを説明するため、ヴォルフガング・パウリによって提唱された¹。その後、1956年にフレデリック・ライネスとクライド・コーワンにより反電子ニュートリノが初検出され、1962年にはレーダーマン、シュワルツ、シュタインバーガーによってミューニュートリノが発見された²。

1.2 ニュートリノ振動とは

1962年、牧二郎、中川昌美、坂田昌一により、ニュートリノが質量を持ち時間発展とともにその種類を変化させる、ニュートリノ振動という現象が理論的に提唱された³。

ニュートリノは質量を持ち、その弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) と質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) は異なっている。弱い相互作用の固有状態は以下のように質量の固有状態の混合状態として表されると仮定する。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{MNS}^{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

U_{MNS} は牧・中川・坂田行列 (MNS 行列)⁴ と呼ばれ、以下のように3行3列のユニタリー行列で表される。

¹ これは1932年にニュートロンが発見される前で、パウリはニュートリノをニュートロンと呼んでいた

² タウニュートリノが観測されたのは2000年のことで、原子核乾板を用いたDONUT実験^[1]による直接観測であった

³ これとは独立に、ポンテコルボは1957年にニュートリノと反ニュートリノ間での振動を提唱し、さらに1967年には ν_μ と ν_e の間での振動を提唱している

⁴ ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) とも呼ばれる

$$\begin{aligned}
U_{\text{MNS}} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2) \\
&= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

ここで $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量の固有状態 ν_i 、 ν_j の混合角、 δ は複素位相を表す。 $\delta \neq 0$ の場合、MNS 行列は CP 対称性の破れを生むため、 δ は CP 位相 (δ_{CP}) とも呼ばれる。

以下では、簡単のため 2 世代の場合での混合を考える。弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ 、 $|\nu_\beta\rangle$ は質量の固有状態 $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ を用いて以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

質量固有状態の時間発展は

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1(0)\rangle \quad (1.4)$$

と書くことができる。ニュートリノは相対論的 ($m_i \ll E_i$) であるので、距離 L だけ進んだとき $t \approx L/c$ 、 $p_i/c = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \approx E_i - \frac{m_i^2}{2E_i}$ と近似することができ、

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} |\nu_1(0)\rangle \\ e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} |\nu_2(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

となる。このとき、 ν_α が距離 L だけ飛行したあとに ν_β ($\alpha \neq \beta$) へと変化する確率は、質量二乗差 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ とニュートリノのエネルギー E_ν を用いて

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\
&= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \right) \\
&= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \quad (1.6)
\end{aligned}$$

と表される。また、飛行後に ν_α のままである確率も同様に表すことができ、

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) &= 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \\
&= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \quad (1.7)
\end{aligned}$$

となる。

実際には 3 世代のニュートリノが存在するため上記の式では不十分であり、3 世代での振動確率は

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = & \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \\
 & + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E_\nu}\right)
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

と表される。

1.3 これまでのニュートリノ振動実験

ニュートリノ振動を実験的にはじめて発見したのは、1998 年のスーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの天頂角分布の測定である (図 1.1)⁵。ニュートリノ振動を仮定しない場合と比べ、観測される ν_μ の数が減っていることがわかった。2004 年には KEK で人工的に生成したニュートリノを 250 km 離れたスーパーカミオカンデにむけて飛ばす K2K 実験^[2]により、加速器実験による ν_μ の消失事象が観測された。さらにその後、2013 年にはスーパーカミオカンデにおいても $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ への振動であることが統計的に確認され^[3]、また、原子核乾板を用いた測定を行った OPERA 実験では $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の直接観測が行われた (図 1.2)。

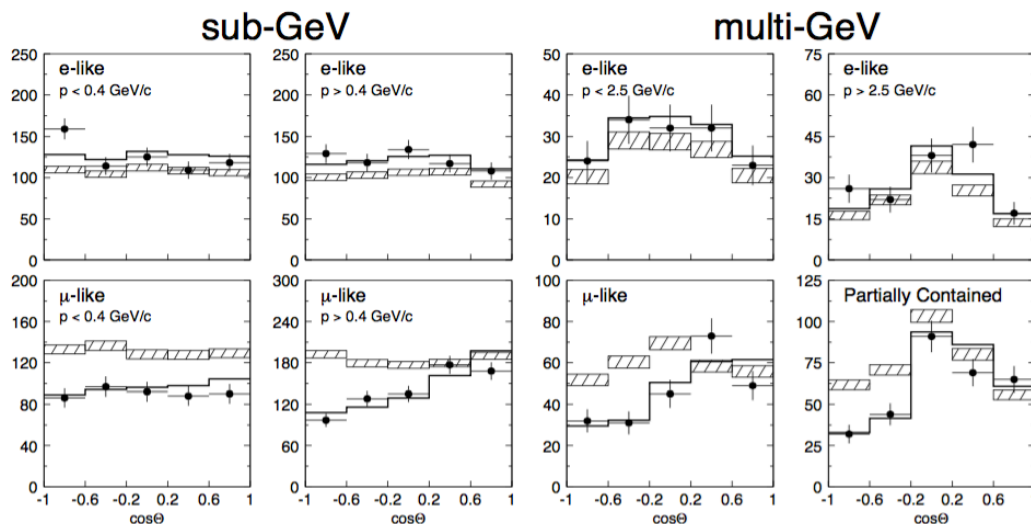


図 1.1: スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測結果^[4]。斜線の領域がニュートリノ振動を仮定しない場合のシミュレーション結果で、実線が $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動を仮定した場合のベストフィットである

⁵ 2015 年にノーベル物理学賞を受賞

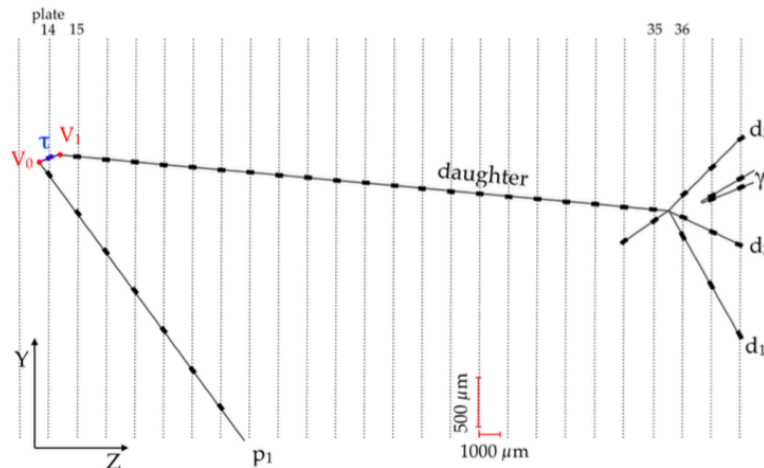


図 1.2: OPERA 実験による 5 つ目の ν_τ 出現イベントの候補 [5]

これらの結果よりニュートリノが質量を持つことが明らかとなり、以降、ニュートリノの混合パラメータの精密測定が行われてきた。現在の各パラメータの測定結果は以下のとおりである。

- θ_{12} , Δm_{21}^2
 スーパーカミオカンデ [6] や SNO [7] による太陽ニュートリノの観測および、KamLAND [8] における原子炉ニュートリノの観測によって測定が行われており、 $\sin^2\theta_{12} = 0.304^{+0.014}_{-0.013}$ 、 $\Delta m_{21}^2 = 7.53 \pm 0.18 [10^{-5}\text{eV}^2]$ (68% C.L.) [9] となっている。
- θ_{23} , Δm_{32}^2
 T2K 実験や MINOS 実験 [10]、NO ν A 実験 [11] など加速器ニュートリノ実験および、スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測 [12] によって測定が行われている。後述する質量階層性より、 ν_3 が最も重い順階層 (Normal hierarchy) と軽い逆階層 (Inverted hierarchy) の場合に分けられる。測定の結果は順階層の場合、 $\sin^2\theta_{23} = 0.51 \pm 0.05$ 、 $\Delta m_{32}^2 = 2.44 \pm 0.06 [10^{-3}\text{eV}^2]$ (68% C.L.)、逆階層の場合 $\sin^2\theta_{23} = 0.50 \pm 0.05$ 、 $\Delta m_{32}^2 = 2.51 \pm 0.06 [10^{-3}\text{eV}^2]$ (68% C.L.) [9] となっている⁶。現在もっとも測定精度のわるい混合角であり、精密な測定が急がれる。
- θ_{13}
 Chooz 実験 [13] によって上限が与えられたのち、2011 年にはじめて $\theta_{13} \neq 0$ が T2K 実験によって報告された。その後、DayaBay [14]、RENO [15]、Double Chooz [16] 実験などの原子炉実験によって θ_{13} が測定され、T2K によっても値が求められた。 $\sin^2\theta_{13} = 0.0219 \pm 0.0012$ (68% C.L.) [9] である。
- δ_{CP}
 加速器ニュートリノ実験における電子ニュートリノ出現事象により測定が行われている。T2K 実験は 90% C.L. で δ_{CP} に制限を与えたが (後述)、現在もなお未知のパラメータである。

⁶ 2016 年夏に NO ν A 実験が $\theta_{23} = \pi/4$ (最大混合) を 2.5σ で棄却し、T2K における結果との差に注目が集まった

1.4 ニュートリノの未解決問題

ニュートリノ振動の発見によりニュートリノに質量があることがわかった一方で、その質量の起源は未だに解明されていない。MNS 行列の精密な測定は、ニュートリノ質量の起源を理解するために非常に重要である。これまでの測定により、MNS 行列は以下のように求められている。

$$|U_{\text{MNS}}| \sim \begin{pmatrix} 0.82 & 0.54 & 0.15 \\ 0.48 & 0.53 & 0.71 \\ 0.31 & 0.65 & 0.69 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

一方で、クォークの混合行列である CKM 行列は

$$|V_{\text{CKM}}| \sim \begin{pmatrix} 0.97434^{+0.00011}_{-0.00012} & 0.22506 \pm 0.00050 & 0.00357 \pm 0.00015 \\ 0.22492 \pm 0.00050 & 0.97351 \pm 0.00013 & 0.0411 \pm 0.0013 \\ 0.00875^{+0.00032}_{-0.00033} & 0.040 \pm 0.0013 & 0.99915 \pm 0.00005 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

となっており [9]、これと比較すると MNS 行列の非対角成分は大きいことがわかる。これはニュートリノの混合が大きいことを表している。クォークとレプトンでの混合の違いを説明するため、これまで様々な理論モデルが提案されてきた。なかでも Tri-bimaximal モデル [17] は有名なモデルであり $\theta_{13} = 0^\circ$ 、 $\theta_{23} = 45^\circ$ と考えることで

$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

であると提唱するモデルである。しかしこれまでの θ_{13} の測定結果は Tri-bimaximal モデルを棄却する結果となっている。一方で θ_{23} は 45° の最大混合を示すことが示唆されており、 θ_{23} の精密な測定を行うことが興味深い課題となっている。また、レプトンにおける CP 対称性の破れの測定は、現在の宇宙に反物質がほとんど存在しないという物質優勢宇宙の謎を解く手がかりとなる可能性がある [18][19]。そのため δ_{CP} の測定も注目される課題のひとつである。 δ_{CP} は ν_e 出現事象により観測されるが、 ν_e 出現の式には θ_{23} の項が含まれる。そのため、 θ_{23} の精密測定は δ_{CP} の測定のためにも重要な課題となっている。

さらに、ニュートリノ振動では質量二乗差の絶対値を測定することができるが、図 1.3 に示すようにニュートリノ質量固有値 (m_1, m_2, m_3) がどのような順になっているかはわかっていない。

他にも、ニュートリノは粒子と反粒子が同じマヨラナ粒子 [21] であるかや、弱い相互作用をしないステライルニュートリノ [22] が 4 つ目のニュートリノとして存在するかといった問題なども存在しており、ニュートリノは謎の多い粒子となっている。これらの謎を解決し、なぜニュートリノだけがこれほど軽い質量をもっているのかというその質量の起源に迫るため、数々のニュートリノ実験が行われている。本研究では、T2K 実験において θ_{23} の精密測定および δ_{CP} の探索を通してニュートリノの未解決問題にアプローチするため、ニュートリノ反応の精密測定に用いる検出器開発を行う。

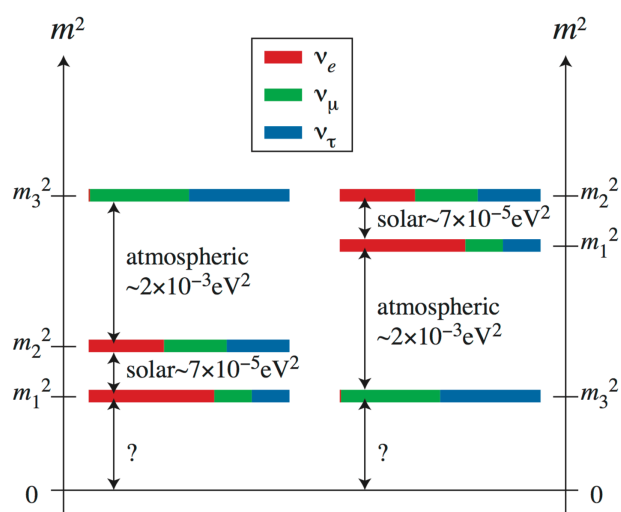


図 1.3: ニュートリノの質量階層性^[20]。左が ν_3 の最も重い順階層 (Normal hierarchy) の場合で、右が ν_3 の最も軽い逆階層 (Inverted hierarchy) の場合である

第2章 T2K 実験

本章では、T2K 実験の概要やビームライン、検出器の解説および現状と課題について説明する。

2.1 概要

T2K 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC からのニュートリノビームによるニュートリノ反応を、J-PARC 構内にある前置検出器および 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に位置するスーパーカミオカンデの両方で観測することによりニュートリノ振動のパラメータを精密測定している、長基線ニュートリノ振動実験である (図 2.1)。

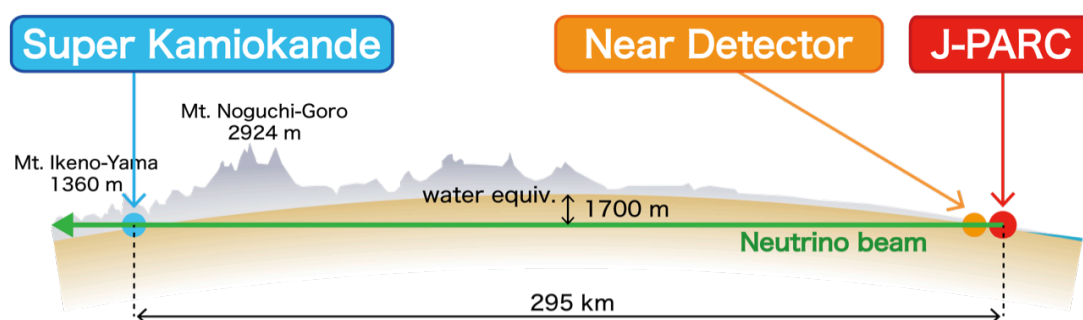


図 2.1: T2K 実験の概要。J-PARC から 295 km 離れたスーパーカミオカンデに向けて ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) ビームを飛ばしている長基線ニュートリノ振動実験である

T2K 実験は混合角 θ_{23} の精密測定およびレプトンにおける CP 破れ (δ_{CP}) の観測を目的としており、具体的な現状と課題は後の 2.5 節にて述べる。

2.2 ニュートリノビームの生成

2.2.1 J-PARC ニュートリノビームライン

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は LINAC (LINear ACcelerator)、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring) の 3 つの加速器からなる大強度陽子加速器施設である。図 2.2 に J-PARC の加速器とニュートリノ実験施設の位置関係を示す。



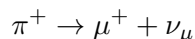
図 2.2: J-PARC の概要 [23]。LINAC、RCS、MR の 3 つの加速器からなり、大強度の陽子ビームを供給している

LINAC で生成された陽子ビームは RCS および MR で加速され、8 バンチの内部構造をもつスピルとなり 2.48 秒ごとにグラファイト標的に送られる。2017 年 1 月現在の陽子ビームパラメータを表 2.1 に示す。

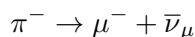
表 2.1: 陽子ビームのパラメータ

パラメータ	デザイン値	2017 年 1 月現在の値
ビームエネルギー	50 GeV	30 GeV
ビーム強度	750 kW	450 kW
スピルあたりの陽子数	3.3×10^{14}	2.3×10^{14}
スピル間隔	~3 sec	2.48 sec
バンチ数	8 bunch/spill	8 bunch/spill
バンチ幅	58 nsec	58 nsec

陽子ビームはグラファイト標的に照射され、ハドロン反応により π 中間子を中心とする多くのハドロンが生成される。生成された π 中間子は、3 台の電磁ホーンによって平行に収束され、標的下流にある 94 m の崩壊領域で次のように崩壊することによって、ニュートリノビームが生成される。



反ニュートリノビームは、



の崩壊によって生成される。これは電磁ホーンの極性を変えることで収束させる π 中間子の電荷を選択することにより、変更することが可能である。図 2.3 にニュートリノビームラインと検出器の位置関係を示す。

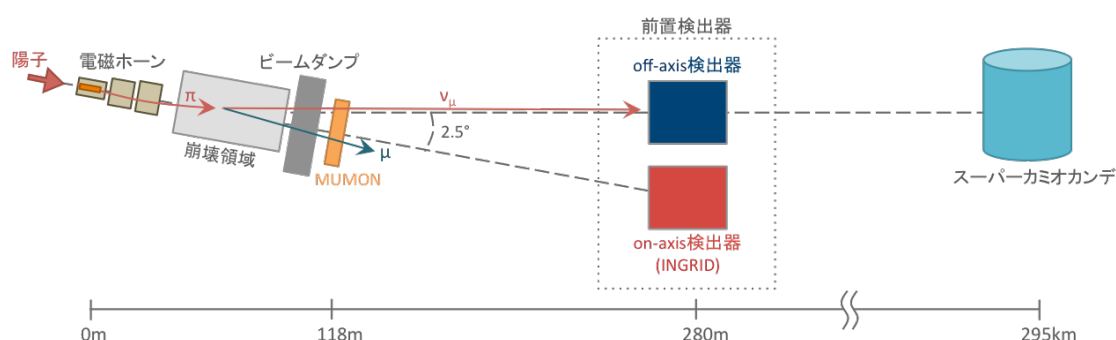


図 2.3: ニュートリノビームラインの概要。グラファイト標的で生成された π 中間子を電磁ホーンで収束し、後述する 2.5° の off-axis 角でスーパーカミオカンデに届けている

2.2.2 off-axis 法

T2K では off-axis 法を世界初で採用している。off-axis 法とは、検出器をニュートリノビーム軸の中心からずれたところに配置することで、幅の狭いニュートリノのエネルギー分布を得る方法である。T2K では 2.5° の off-axis 角を採用することによってニュートリノエネルギー E_ν を $0.5 \sim 0.7$ GeV に合わせており、ニュートリノ振動の効果がもっともよく見える角度をえらんでいる (図 2.4)。また、図 2.5 にニュートリノエネルギーと反応断面積の関係を示す。第 3 章に述べるように、T2K では主に CCQE (Charged Current Quasi Elastic) 反応をシグナルとして用いている。1 GeV 以下では CCQE が主な反応であるが、on-axis のエネルギー領域である 2 GeV 付近では、 ν_e 出現事象のバックグラウンドとなる π^0 を生じる $\text{NC}1\pi^0$ 反応や ν_μ 消失事象のバックグラウンドとなる π 中間子を生じる $\text{CC}1\pi$ 反応が増えてしまう。これらの反応モードによるバックグラウンドを減らすためにも、off-axis 法をとることは重要である。したがってビーム方向は重要なパラメータであり、前置検出器 INGRID などにおいてビーム方向が常にモニターされている。

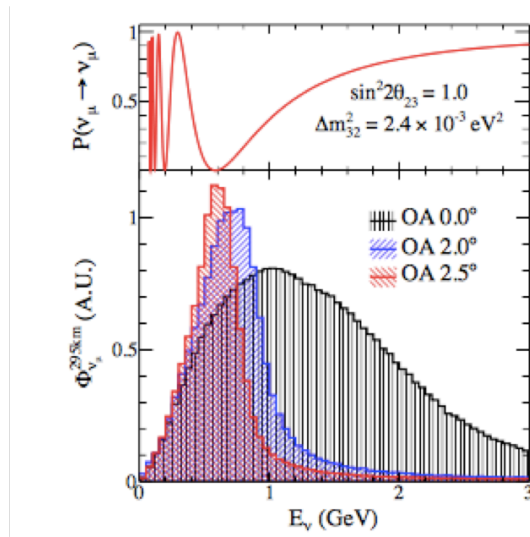


図 2.4: off-axis 角とニュートリノエネルギーの関係および振動確率

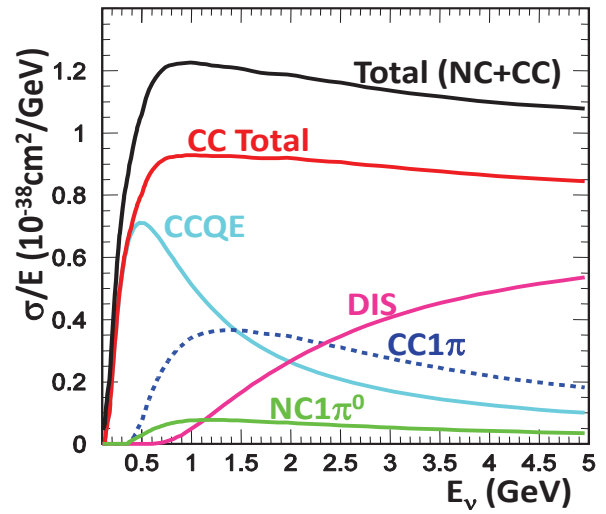


図 2.5: ニュートリノエネルギーと反応断面積の関係 [24]

2.3 前置検出器

前置検出器はグラフィット標的から 280 m 下流にある検出器群を指し、ビーム軸上に設置された INGRID (on-axis 検出器) および、 π 中間子の平均崩壊地点とスーパーカミオカンデを結ぶ直線上に位置する ND280 (off-axis 検出器) から構成される。図 2.6 に前置検出器の設置されているニュートリノモニター棟の様子を示す。

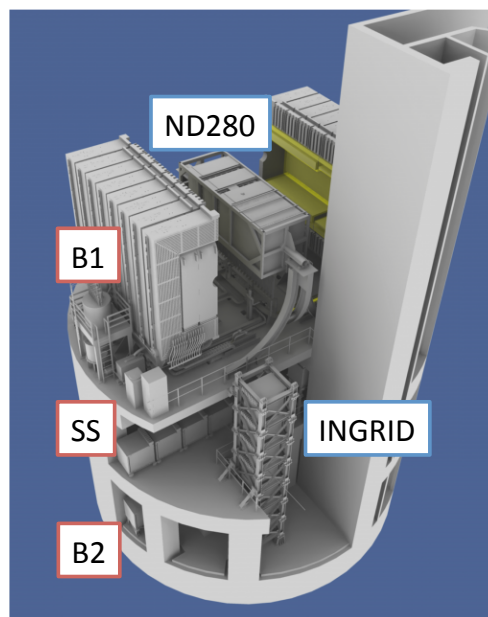


図 2.6: 前置検出器の設置されているニュートリノモニター棟の様子。B1 フロアに ND280 が、SS フロアおよび B2 フロアに INGRID が設置されている

2.3.1 on-axis: INGRID

on-axis 検出器 INGRID (図 2.7) は、ニュートリノビームの方向を高精度でモニターするための検出器である [25]。水平・鉛直にそれぞれ 7 台ずつ設置された十字のモジュールおよび、2 台のショルダーモジュールからなる¹。各モジュールにおけるニュートリノ反応のイベントレートを導出し、その値が各モジュールにおけるニュートリノの空間分布に対応すると考える。水平・鉛直方向それぞれにおいてこの分布をガウシアンでフィットした中心をビーム方向中心と考えることでニュートリノビームの方向をモニターしている。前述のとおりビーム方向のずれはスーパーカミオカンデにおけるニュートリノフラックスのエネルギー分布が変化することを意味するため、INGRID では 1 mrad よりも十分に良い精度² でニュートリノ方向をモニターしている [26]。図 2.8 にフィッティングの様子を示す。

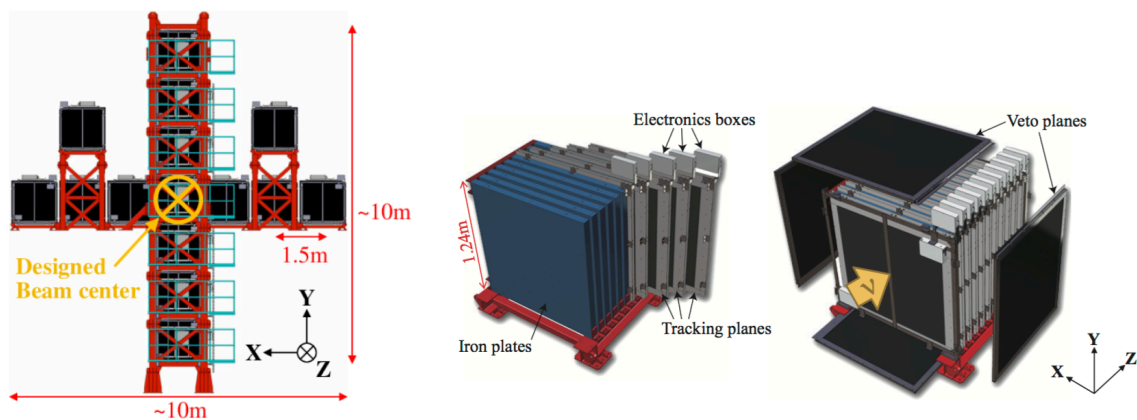


図 2.7: INGRID 検出器:モジュール全体 (左) と各モジュール (右)。14 台のモジュールが十字型に並んでおり、ニュートリノビーム方向をモニターしている

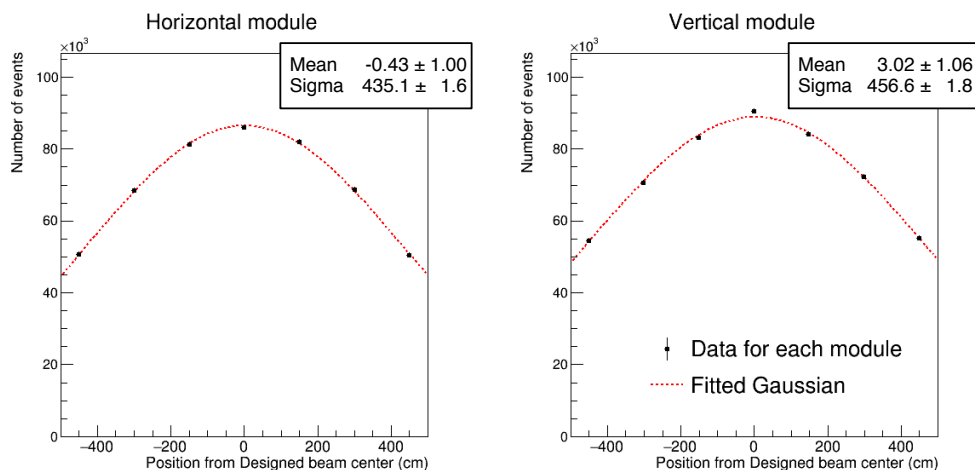


図 2.8: INGRID で測定したニュートリノビームプロファイル。各モジュールにおけるイベントレートがニュートリノの空間分布に対応しており、ガウシアンでフィッティングした中心をビーム中心と考えることでニュートリノビームの方向を測定している

¹ 2017 年 1 月現在、ショルダーモジュールは方向測定には使用されていない

² INGRID はターゲットから 280 m 下流にあるので約 28 cm に相当する

INGRID の各モジュールは、鉄ターゲット 9 層とシンチレータのトラッキングプレーン 11 層によるサンドイッチ構造をもっており、さらに外側にはモジュール外から入射してきた粒子を識別するため、シンチレータの VETO プレーンが設置されている。トラッキングプレーンは、細長いシンチレータを縦にして並べた X レイヤーと横にして並べた Y レイヤーの 2 層からなる。INGRID のシンチレータは厚みが 1.0 cm、幅 5.0 cm の長方形の断面をもつ形状をしており、3 cm 程度の位置分解能を持つ [25]。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子がシンチレータを通過する際に発生するシンチレーション光を、波長変換ファイバーにより収集し光検出器 MPCC で読み出すことで、荷電粒子の飛跡を 3 次元で再構成する。図 2.9 に INGRID のイベントディスプレイを示す。赤い点がヒットのあったシンチレータを示し、点の大きさが光量をあらわしている。

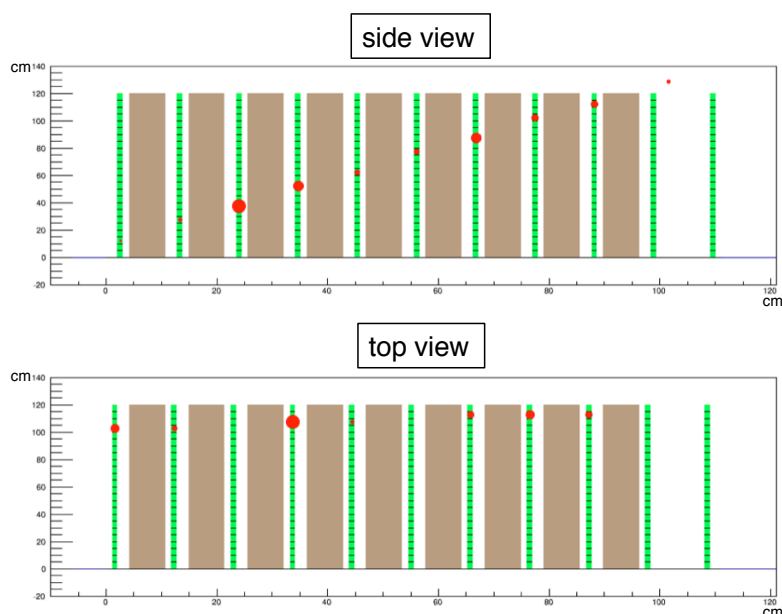


図 2.9: INGRID のイベントディスプレイ:緑のラインがシンチレータ層で、その間に鉄ターゲットがはさまれている。赤い点がヒットのあったシンチレータを示し、点の大きさが光量をあらわす

2.3.2 off-axis: ND280

図 2.10 に ND280 検出器群を示す。ND280 は複数の検出器がマグネットにおおわれるように配置されている。以下に ND280 を構成する各検出器を説明する。

UA1 magnet

検出器全体に 0.2 T の磁場を印加している大型常伝導電磁石。かつては UA1 実験で使用されていたもので、CERN より寄贈された。

P0D (π^0 Detector)^[27]

終状態に π^0 を含むニュートリノ反応の検出に特化した検出器。鉛薄膜とシンチレータおよび水ターゲットのサンドイッチ構造になっている。

FGD (Fine Grained Detector)^[28]

断面が約 1 cm 四方の細かくセグメント化されたシンチレータからなるトラッカー。検出器自身がニュートリノ標的となり、反応点付近の粒子を観測することができる。2 台のモジュールからなり、FGD1 はシンチレータのみ、FGD2 は水標的とシンチレータのサンドイッチ構造となっている。

TPC (Time Projection Chamber)^[29]

ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子の磁場で曲げられたトラックとエネルギー損失から、粒子識別および運動量の測定を行っている。2 台の FGD を挟むように、3 台の TPC が設置されている。

ECAL (Electromagnetic CALorimeter)^[30]

ニュートリノ反応によって生成された電子や γ の起こす電磁シャワーを観測することでエネルギーを測定している。鉛とシンチレータのサンドイッチ構造となっており、UA1 magnet 内の最外層に位置する。

SMRD (Side Muon Range Detector)^[31]

UA1 magnet の鉄レイヤー同士の間隙に設置された、シンチレータからなる検出器。大角度で散乱が起こり、TPC に入射しなかった荷電粒子のトラッキングおよびエネルギーの再構成を行う。

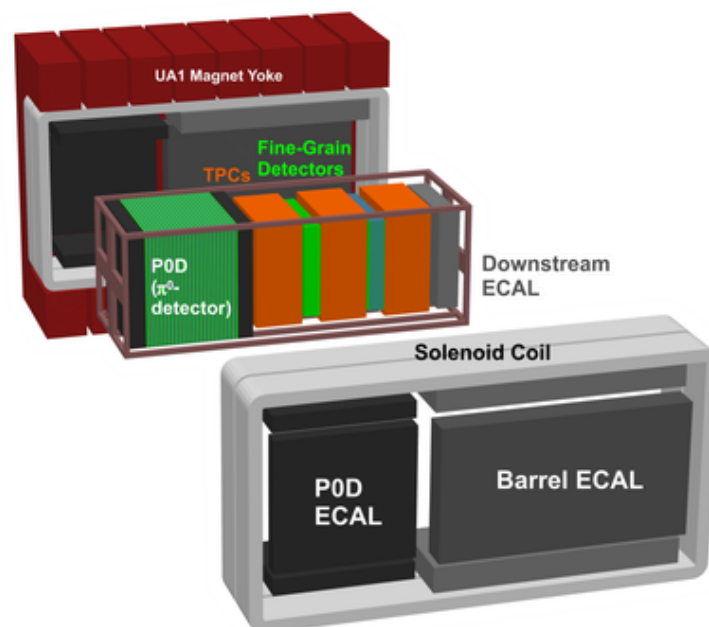


図 2.10: ND280 検出器。複数の検出器からなり、マグネットに覆われるように配置されている

2.4 後置検出器: Super-Kamiokande

T2K では後置検出器として、大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデを用いている。50 kt の超純水をたくわえたタンクの内部には 11,129 本の光電子増倍管が取り付けられており、さらにその外側には 1,185 本の VETO 用光電子増倍管が設置されている。水がニュートリノ標的となっており、22.5 kt の有効体積を持つ。

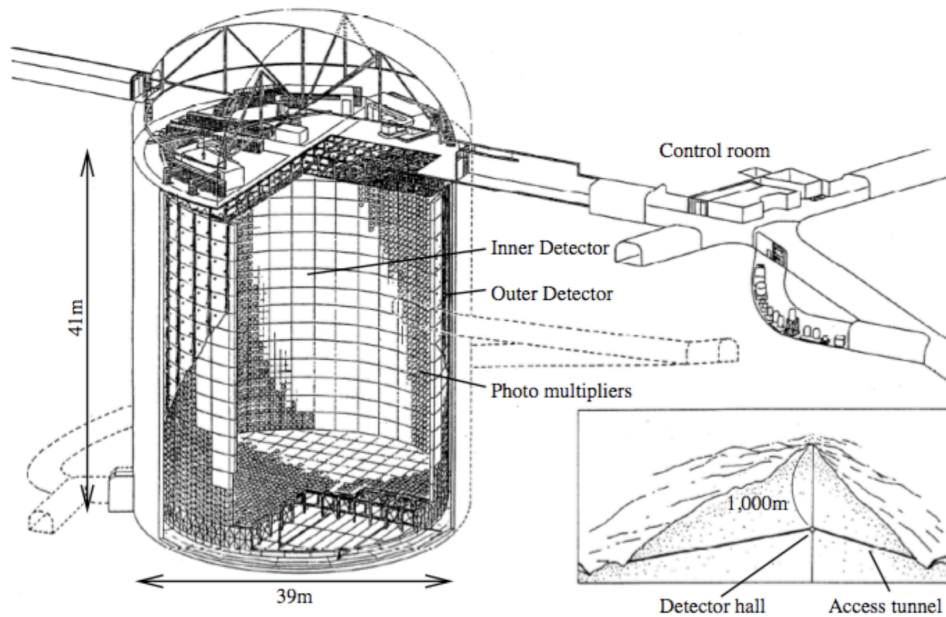


図 2.11: スーパーカミオカンデの検出器概要 [32]。50 kt の水を蓄える大型水チェレンコフ検出器である

水標的とニュートリノの反応によって生じた荷電粒子は、

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (n: \text{水の屈折率}) \quad (2.1)$$

となるとき、

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2.2)$$

となる方向に円錐状のチェレンコフ光を放射する。この光を光電子増倍管で観測すると、図 2.12 のようにリング状の信号が見える。ミュオンのチェレンコフ光ははっきりとしたリングをつくるのに対し、電子によるチェレンコフ光はぼんやりとしたリングをつくるのが特徴である³。このリングから粒子の種類、生成点、エネルギー、運動方向を再構成している。

³ π^0 を生成するような過程では、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ へとすぐに崩壊するため、電子によるチェレンコフリングと似たリングをふたつ生成する。これは電子ニュートリノ出現事象のバックグラウンドとなる

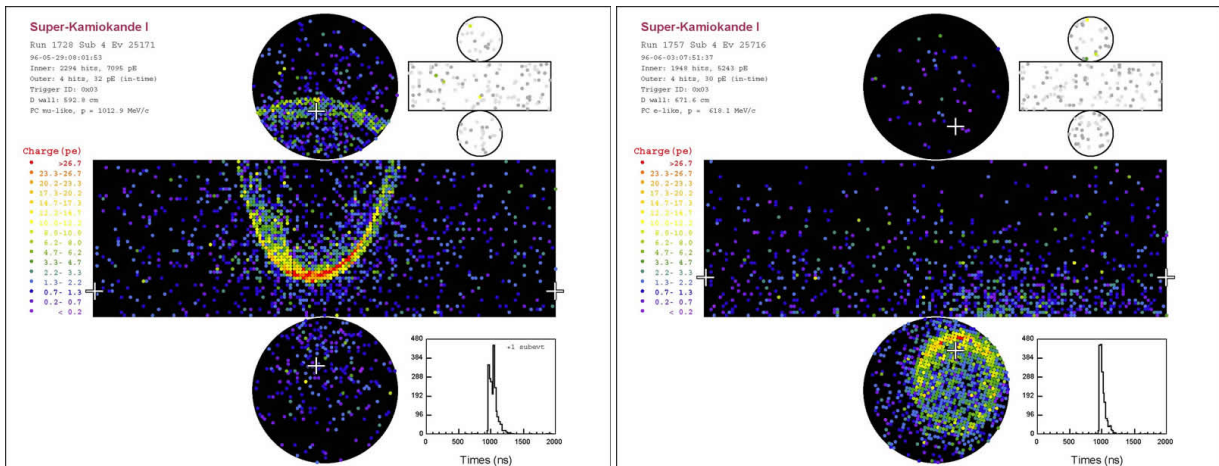


図 2.12: スーパーカミオカンデにおけるイベントディスプレイ [33]。 ν_μ イベント候補 (左) と ν_e イベント候補 (右)。 ν_μ イベント候補の方がはっきりしたリングであることがわかる

図 2.13 に likelihood パラメータによって分離された ν_μ イベント候補 (muon-like) と ν_e イベント候補 (e-like) を示す。両者がよく分離されていることが確認できる。

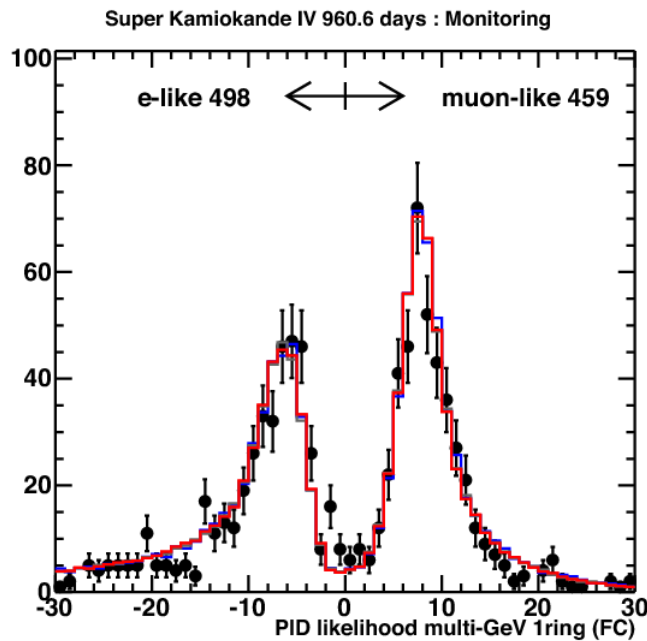


図 2.13: スーパーカミオカンデの粒子識別能力 [34]。likelihood パラメータを用いて muon-like か e-like かを分離している

2.5 T2K 実験の現状と課題

T2K 実験は 2009 年からデータ取得を開始し、2016 年 12 月末までに 1.7×10^{21} POT (protons on target) 以上のデータを取得している。これは最終目標である 7.8×10^{21} POT の約 22% に相当

する。2014 年には電子ニュートリノ出現を 7.3σ で発見し、さらにこれまで ν_μ 消失事象を用いて世界最高精度で θ_{23} の測定を行ってきた。

T2K では CP 破れの項である δ_{CP} にも制限をつけてきた。 ν_e 出現確率の式には δ_{CP} の項が含まれているため、T2K は δ_{CP} を測定することが可能である。太陽ニュートリノおよび原子炉実験で測定された θ_{13} と組み合わせることによって求められた δ_{CP} に対する制限は、図 2.14 のようになっている。90% C.L. に相当する $\Delta\chi^2$ の値が示されており、CP 対称性の破れを 90% C.L. で示唆する結果となっている。

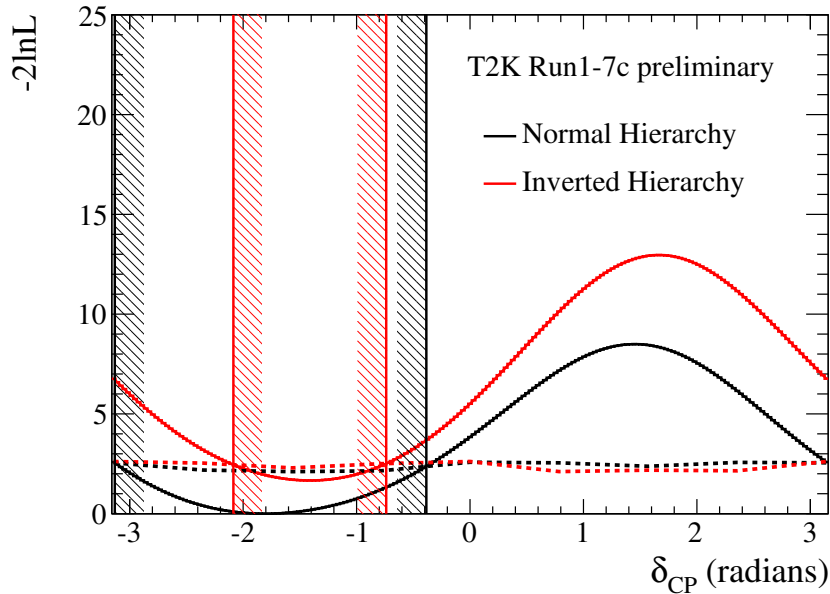


図 2.14: T2K による δ_{CP} の制限^[36]。順階層 (黒) と逆階層 (赤) の場合の $\Delta\chi^2$ 分布をそれぞれ示す

また、第 1 章で述べたように ν_e 出現確率には θ_{23} の項も含まれており、 θ_{23} を精密に測定することは δ_{CP} の測定にも欠かせない。 θ_{23} の測定は、 ν_μ 消失事象の観測により行われる。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の振動確率は式 2.3 のように表される。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - (\cos^4\theta_{13}\sin^2 2\theta_{23} + \sin^2 2\theta_{13}\sin^2\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E}\right) \quad (2.3)$$

したがって、観測される ν_μ 候補イベントの数を振動を仮定しない場合と比較することで θ_{23} を測定することができる。

図 2.15 にスーパーカミオカンデにおいて観測された ν_μ 候補イベントのエネルギースペクトルを示す。ニュートリノ振動を仮定しない場合と比べ、観測される ν_μ 候補イベントは大幅に減少することがわかる。さらにこのとき、もとのニュートリノエネルギーが正しく再構成されていることが θ_{23} の精密な測定のためには重要である。また、図 2.16 に観測された ν_μ のエネルギースペクトルから許容される $\sin^2\theta_{23}$ および Δm_{23}^2 を示す。現在 T2K で測定されている値は最大混合 ($\theta_{23} = 45^\circ$) を示唆しており、順階層で $\sin^2\theta_{23} = 0.514_{-0.056}^{+0.055}$ および $\Delta m_{23}^2 = 2.51 \pm 0.10 [10^{-3}\text{eV}^2]$ 、逆階層で $\sin^2\theta_{23} = 0.511 \pm 0.055$ および $\Delta m_{23}^2 = 2.48 \pm 0.10 [10^{-3}\text{eV}^2]$ となっている。

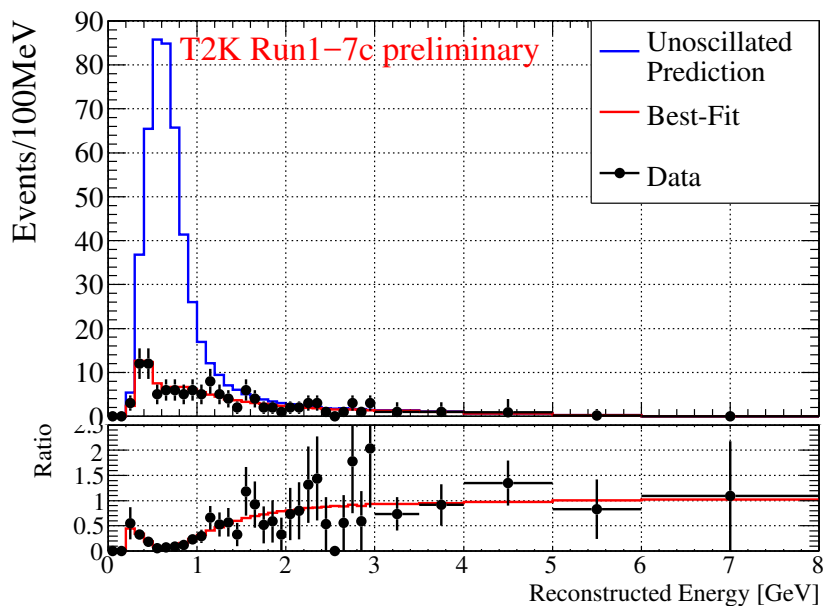


図 2.15: スーパーカミオカンデで再構成されたニュートリノのエネルギー [36]。青線がニュートリノ振動を仮定しない場合である。ピークエネルギー付近でデータが大きく減少しており、ニュートリノ振動があることを示している

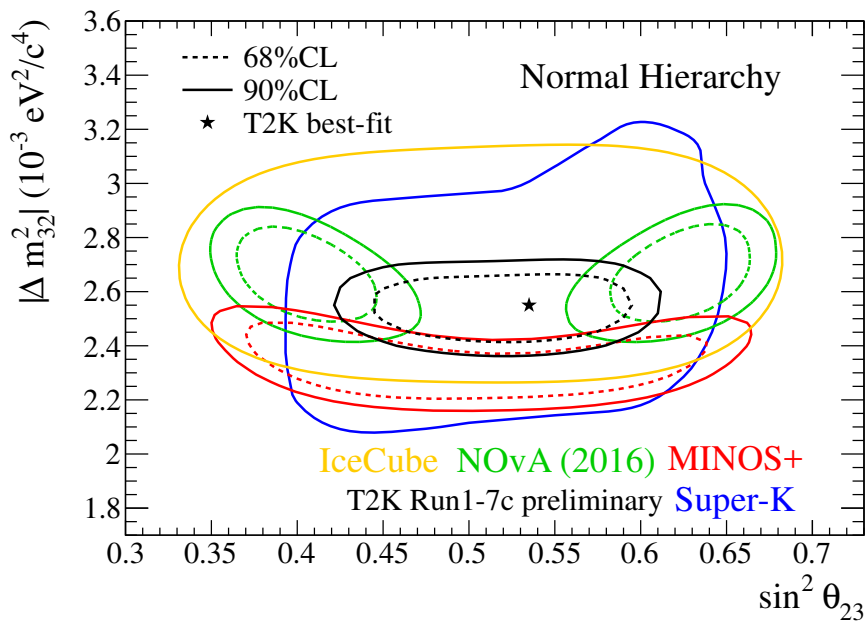


図 2.16: $\sin^2 \theta_{23}$ および Δm_{23}^2 の測定結果 [36]。点線が 68% C.L.、実線が 90% C.L. を示している

精密測定のためには統計を貯めるだけでなく、系統誤差を削減することも重要である。系統誤差は大きく分けて、ニュートリノのフラックス、ニュートリノ反応断面積、スーパーカミオカンデの検出器応答、そして終状態反応の不定性などがあげられる。表 2.2 に、現在の系統誤差の一覧を示す。表中の 3 つめの項目であるフラックスと反応断面積の誤差のなかでも、実際はとくに反応断面積の誤差が非常に大きくなっている。 θ_{23} の精密測定や δ_{CP} の観測のためには現在 5% 程度ある全体の系統誤差を 3% まで減らす必要があり、本研究では反応断面積の不定性を削減することで系統誤差削減を目指す。そのための手段と具体的な計画を次章に述べる。

表 2.2: T2K の系統誤差一覧^[37]

Error type	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	ν_e	$\bar{\nu}_e$
SK Detector	3.9	3.3	2.5	3.1
SK Final State & Secondary Interaction	1.5	2.1	2.5	2.5
ND280 Constrained Flux & Cross-section	2.8	3.3	3.0	3.3
$\sigma\nu_e/\sigma\nu_\mu, \sigma\bar{\nu}_e/\sigma\bar{\nu}_\mu$	0.0	0.0	2.6	1.5
NC 1γ Cross-section	0.0	0.0	1.5	3.0
NC Other Cross-section	0.8	0.8	0.2	0.3
Total Systematics Error	5.1	5.2	5.5	6.8

第3章 ニュートリノ反応

本章では、T2K 実験における系統誤差の最大の要因である反応断面積の不定性について考えるため、ニュートリノ反応およびその詳細な測定を目指した実験について述べる。

3.1 ニュートリノと原子核の反応

ニュートリノと原子核の反応は大きく分けて荷電カレント (Charged Current) 反応と中性カレント (Neutral Current) 反応が存在する。主なニュートリノ反応のダイアグラムを図 3.1 に示す。

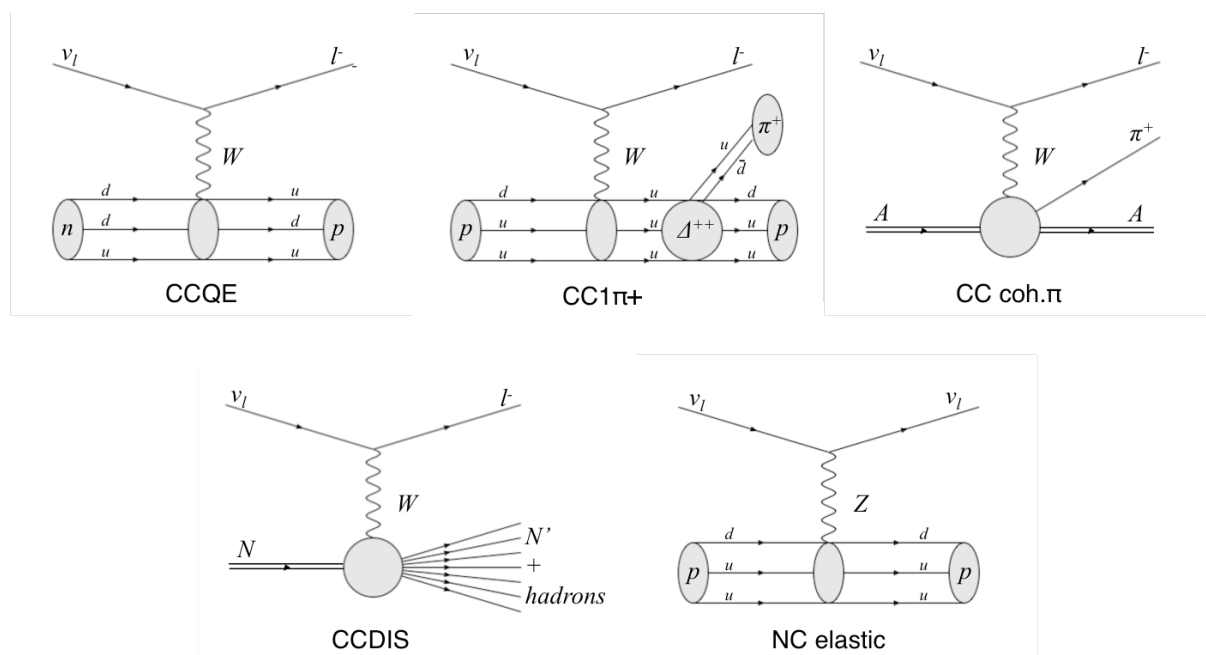


図 3.1: ニュートリノ反応のダイアグラム。n は原子核内の核子であり、結合エネルギーやフェルミ運動量の影響を受けている。T2K では主に CCQE 反応をシグナルとして用いている

T2K 実験では、もとのニュートリノのエネルギーを再構成することのできる CCQE (Charged Current Quasi Elastic) 反応を主にシグナルとして用いている。CCQE 反応は、生成された荷電レプトンの散乱角 θ_l およびエネルギー E_l を測定することにより、式 3.1 のように 2 体問題としてニュートリノのエネルギーを再構成することができる。

$$E_\nu = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (3.1)$$

ここで m_N は核子の質量であり m_l, p_l はそれぞれレプトンの質量と運動量である。

CC1 π 反応は π 中間子を生成するモードであり、CCQE 反応のメインバックグラウンドとなる。CCcoh. π (CC coherent pion production) 反応は原子核の状態を変えずに π 中間子を生成する過程であり、1 GeV を超えるようなエネルギーの高いニュートリノ反応において反応断面積が大きくなる。CCDIS (CC Deep Inelastic Scattering) 反応も、ニュートリノエネルギーが 1 GeV 以上で反応断面積が大きくなるモードである。NC 反応は荷電レプトンを生成しない過程であるが、 π^0 を生成するような反応はスーパーカミオカンデにおける電子ニュートリノ出現イベントのバックグラウンドとなりうる¹。これらの反応によるバックグラウンドは、系統誤差削減のため現在も理解が進められている。

3.2 2p-2h 反応

本研究では、 π 中間子を生じるモードのバックグラウンドではなく、別のモードの系統誤差に注目する。CCQE 反応とよく似た反応として、図 3.2 のように始状態で核子 2 つが関係し、終状態で陽子が 2 本でてくる 2p-2h 反応があげられる。2p-2h 反応は Meson Exchange Current とも呼ばれ、原子核内の核子同士が π 中間子を交換することで 2 本目の陽子が出てくるモードである。

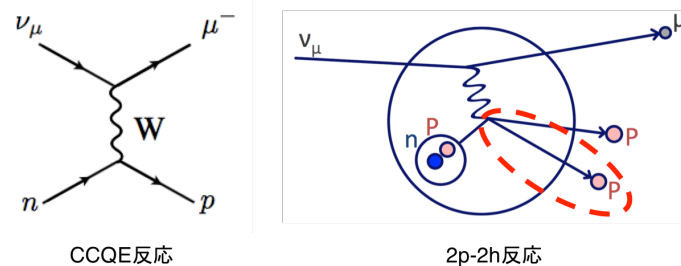


図 3.2: CCQE 反応と 2p-2h 反応。2p-2h 反応は核子 2 個が関わっており、終状態で 2 本の陽子が出てくることが特徴である

2p-2h 反応は近年注目を集める反応モードであり、CCQE の約 10% 程度存在しているといわれている。スーパーカミオカンデでは陽子を観測できないため、2p-2h と CCQE を分離することはできない。さらにそれだけでなく、後述の通り 2p-2h は陽子の飛跡が短いためニュートリノ散乱実験においては過去に直接観測されておらず、また後述の通り現在の T2K 前置検出器でも観測することが難しい。そのため 2p-2h 反応には複数の理論モデルがあり、スーパーカミオカンデにおける 2p-2h 反応の見積もりには大きな不定性が存在する。ところが θ_{23} を精密に測定するためにはエネルギーを正確に再構成する必要があるため、2p-2h 反応を正確に見積もることが重要となってくる。シミュレーションによって CCQE 反応を仮定してエネルギーを再構成した場合の、CCQE および 2p-2h 反応のニュートリノエネルギー E_{recon} と真のエネルギー E_{true} の差を図 3.3 に示す。ここでは Nieves モデル^[38] を標準モデルとして採用している²。2p-2h 反応に対して CCQE 反応を仮定したエネルギーの再構成を行うと、再構成されたニュートリノのエネルギーは正確でなくなってしまうことがわかる。

¹ π^0 はすぐに 2γ へと崩壊するため、電子のつくるチェレンコフリングとよく似たリングを生成する

² 将来的には Martini モデル^[39] などと比較していく予定である

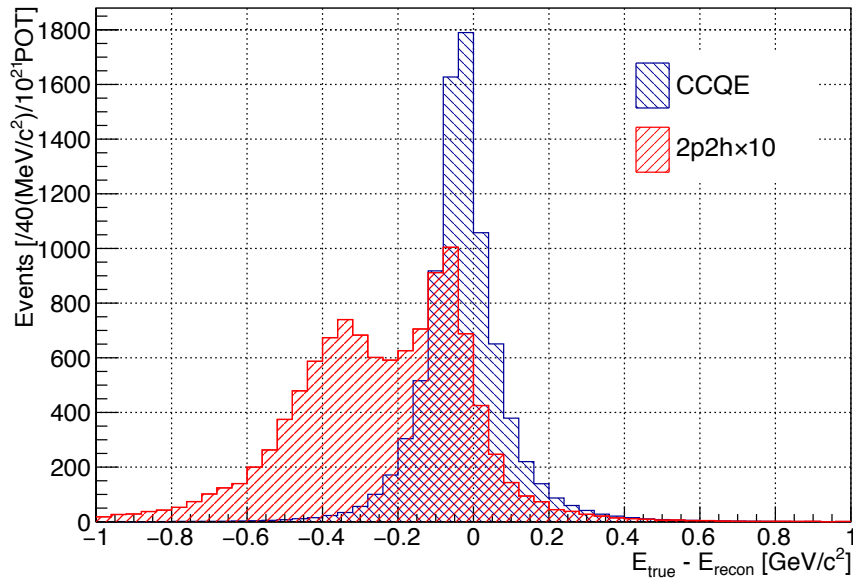


図 3.3: CCQE を仮定して再構成されたニュートリノのエネルギー (シミュレーション)。2p-2h 反応は核子 2 つと反応するため、エネルギーが低いほうに再構成さる。2p-2h は CCQE の 10% 程度しか存在しないため、図中では 10 倍している

図 3.4 に示すように、CCQE あるいは 2p-2h で出てくる終状態の陽子の運動量は数百 MeV 程度である。これをプラスチックシンチレータ (ポリスチレン) 中における飛跡の長さに換算すると、陽子は $300 \text{ MeV}/c$ で 2.3 cm 程度しか飛ばない^[40] ため、飛跡を検出することが難しい。

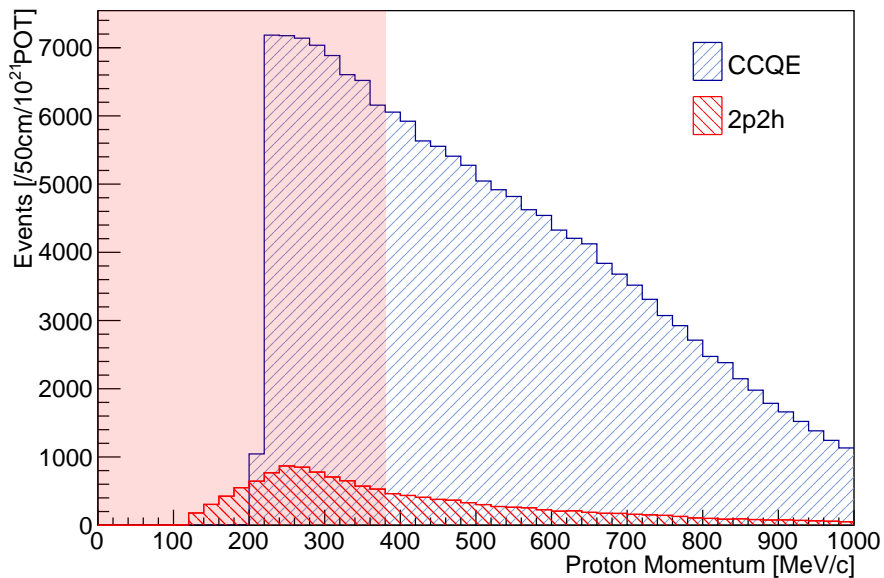


図 3.4: CCQE および 2p-2h 反応における陽子の運動量分布 (off-axis)。赤い範囲は飛跡が 5 cm 以下で現在の前置検出器で観測することがむずかしい

ND280 の FGD は約 1 cm 角の棒状のシンチレータを並べたレイヤーで構成されており、X レイヤーおよび Y レイヤーが交互に並ぶ構造をしている。このため FGD においても 5 cm 程度の飛跡がないとトラッキングを行うことができない。図 3.4 より、飛跡が 5 cm 以上の陽子は全体の 6 割程度の陽子しかないことがわかる。そのため現在の前置検出器では $2p-2h$ 反応を観測することができず、直接観測するためにはより高い位置分解能を持つ検出器が必要となる。そこで本研究で注目したのが、原子核乾板を用いたニュートリノ反応の精密な観測である。

3.3 原子核乾板を用いたニュートリノ反応の観測

3.3.1 原子核乾板

原子核乾板は、写真フィルムと同様の仕組みを持つ検出器である。通過した荷電粒子の飛跡をすべて蓄積し、サブミクロンの非常に高い位置分解能をもつため、古くから多くの実験で用いられてきた。図 3.5 は原子核乾板によって記録された飛跡の例である。

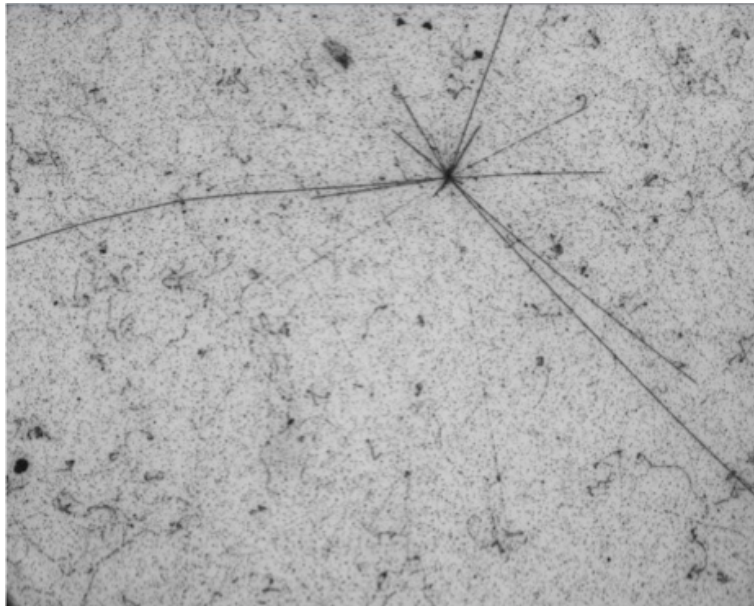


図 3.5: 原子核乾板の顕微鏡写真。写真は $352 \times 282 \mu\text{m}^2$ の範囲

原子核乾板は時間分解能を持たない検出器であり、製造後から現像まですべての荷電粒子の飛跡を蓄積する。原子核乾板についての詳しい説明は付録 A に述べる。

3.3.2 J-PARC T60/T66 実験

原子核乾板のもつ究極の位置分解能を利用し、ニュートリノ反応の詳細な観測を行っているのが、J-PARC T60/T66 実験である。図 3.6 は原子核乾板を用いた検出器 ECC (Emulsion Cloud Chamber) と、T60 実験において観測されたニュートリノ反応イベントである。

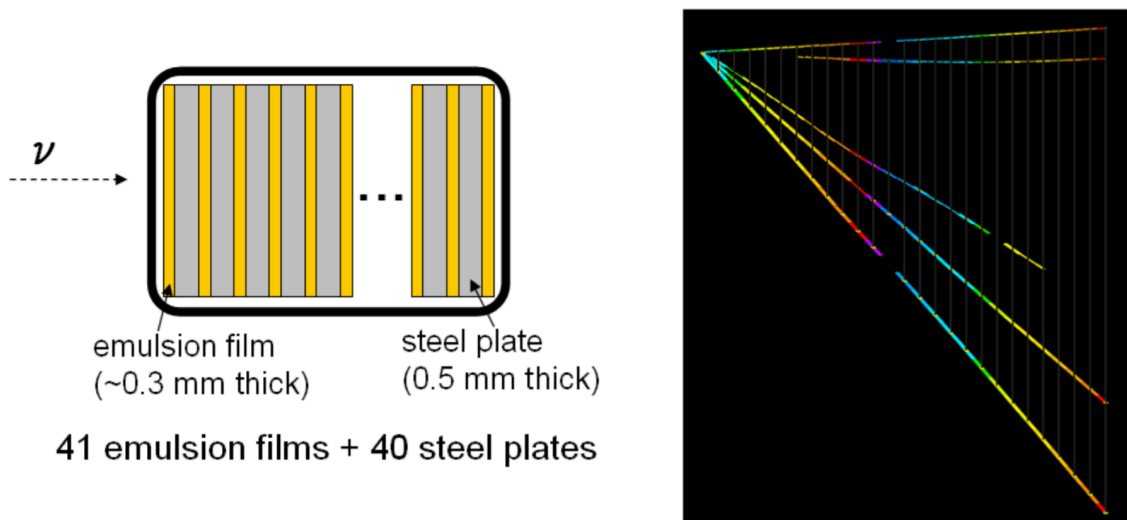


図 3.6: 鉄標的 ECC と再構成された飛跡^[41]。フィルムごとに再構成された飛跡をつないでいくことで、反応全体を再構成することができる

原子核乾板検出器 ECC は、原子核乾板とターゲットをサンドイッチ構造に並べた検出器であり、ニュートリノ標的に用いる物質をある程度自由に変更することが可能である。T60/T66 ではこれまで鉄および水標的を用いた測定を試験的に行ってきた。図 3.7 に 2017 年 1 月に設置した水標的 ECC を示す。水標的 ECC はフィルムのたわみを抑えるため、500 μm の鉄板を支持体として両面を原子核乾板のフィルムではさんだものと、2 mm のアクリルを支持体としてフィルムではさんだものを用いている。そして支持体と一緒に真空パックされたフィルムを 2 mm 厚のアクリルのスペーサーによって隙間をあけてならべ、その隙間に水を流し込むことで水標的の検出器を構成している。

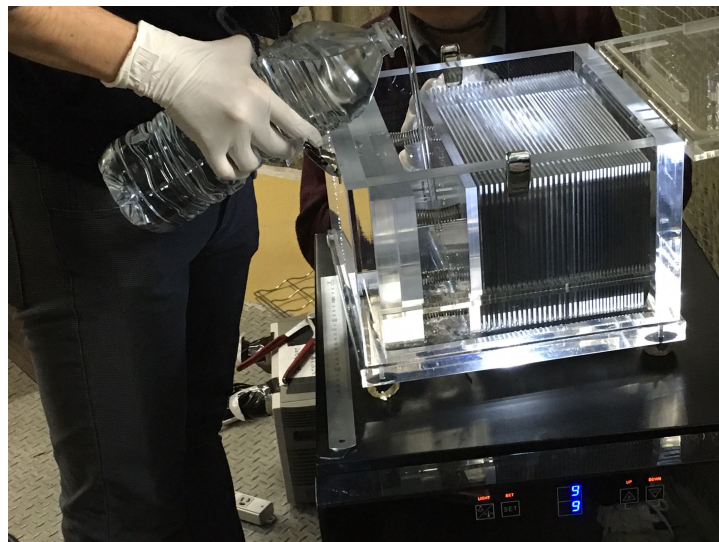


図 3.7: 水標的 ECC の写真。500 μm の鉄板を支持体として両面を原子核乾板のフィルムではさんだものと、2 mm のアクリルを支持体としてフィルムではさんだものを 2 mm の隙間をあけて並べている。今回のフィルムのサイズは 12.5 \times 20.0 cm^2 である

今後はさらに大質量のターゲットを用意し観測を行う予定であり、2018年にT2K前置検出器ホールのB2フロアに約200kgの水標的検出器を設置する予定である。2018年にはJ-PARCのビーム強度の増強が予定されており、半年で約 1.0×10^{21} POTのデータを取得できると考えられる。B2フロアはon-axisから 2.0° ほどはずれたところに位置し、そのフラックスは図2.4に示されるように、 2.5° の場合と近いエネルギー領域のニュートリノ反応を観測することができる分布となっている。このエネルギー領域において期待されるニュートリノ反応の数を見積もるため、200kgの水標的を用意し 2.5° のoff-axisに設置した場合のニュートリノ反応シミュレーションを行った。シミュレーションはNEUT v5.3.6を用いており、ニュートリノフラックスはT2Kのオフィシャルフラックス v.11aを用いた。 1.0×10^{21} POTのデータを取得したときに期待されるニュートリノ反応のイベント数を図3.8に示す。全体の ν_μ イベントは21,000以上にのぼり、8,000イベント以上のCCQE反応および1,000イベント以上の2p-2h反応を観測できる見通しである。

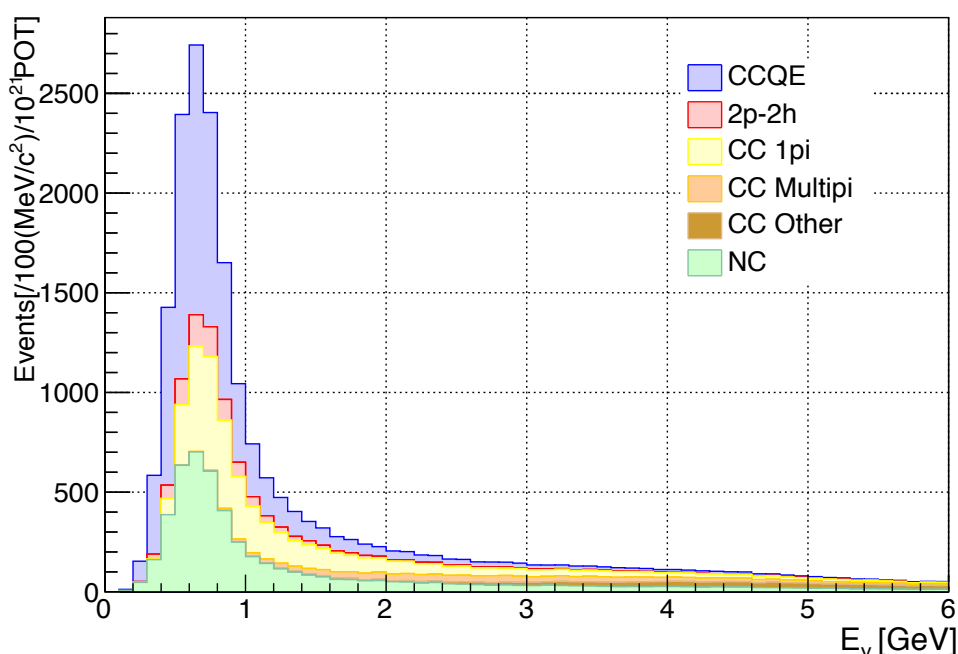


図 3.8: 期待されるニュートリノイベント数 (stack)。200 kg の水標的を 2.5° の off-axis に配置し、 1×10^{21} POT のデータを取得した場合

3.3.3 INGRID とのトラックマッチング

ECCを用いた観測において、ミューオンのようにトラックの長い粒子はECCをつきぬけていってしまう。そこで、ECCの後ろにINGRIDモジュールを設置することによりミューオンの識別を行う。INGRIDの情報を用いて各イベントの全体像を知るためには、ECCとINGRIDのトラックマッチングを行う必要がある。ところが、原子核乾板は時間情報を持たない検出器であり、あらゆるトラック情報が蓄積されていく。そのため3 cmというINGRIDの位置精度では、INGRIDのトラックに対しECCのトラックを1本に絞ることができない。そこで現在は、原子核乾板を用いた気球実験で利用されていた3段のエマルジョンシフター^[42]を用いてECCに時間情報を付与して

いる。しかし、現在はシフターの大きさで ECC の面積が制限されている³ 状態であり、今後さらに大質量の ECC を用意するにあたりより大面積をおおう、時間情報を持つトラッカーが必要となる。そこで改めてシフターを制作する代わりに、我々は新しく十分な大きさの Scintillating Fiber Tracker を制作することを提案する。一般に Scintillating Fiber Tracker は数 mm のファイバーを用いるため高い位置分解能をもっているだけでなく、INGRID と同等 (~ 数 ns) の時間分解能をもつため、十分な位置分解能を持つファイバートラッカーであれば ECC のトラックとファイバートラッカーのトラックを 1 本ずつ対応づけることができ、そのトラックに対応する INGRID のイベントを簡単に取り出すことが可能となる。Scintillating Fiber Tracker を用いる利点としては、将来的に ND280 のマグネットの中でも駆動可能であること、大型化が容易でかつ奥行き方向の厚さを 1 cm 程度と薄くすることができるため INGRID とのトラックマッチングのアクセプタンスを増やすことができることなどが挙げられる。

図 3.9 に検出器の位置関係を示す。ECC と INGRID の間に Scintillating Fiber Tracker を設置することで、両者のトラックマッチングを行う。

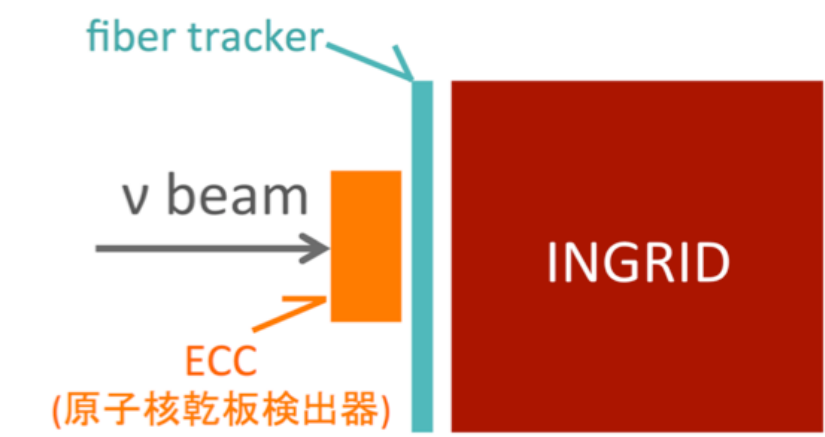


図 3.9: 検出器の位置関係。ECC と INGRID のあいだにトラッカーを配置することでトラックマッチングを行う

Scintillating Fiber Tracker を制作するにあたり、要求される位置分解能は ECC をぬけてくる粒子の数に依存する。これは ECC 内でのニュートリノ反応だけでなく、ニュートリノが壁や床などの検出器以外のまわりの物質で反応を起こしバックグラウンドとなるサンドミュオン⁴ のイベントレートにも依存する。図 3.10 は INGRID における 10^{14} POT あたりに実測されたサンドミュオンのイベントレートである。これは on-axis での INGRID 全モジュールにおいてのサンドミュオンのイベントレートであるので、B2 フロアは off-axis であることと INGRID モジュール 1 台ぶんでの測定を考えていることから、B2 フロアにおけるサンドミュオンのイベントレートはこれよりもずっと低くなると考えられる。

³ さらに、ビーム強度が上がりより多くのデータを集めるにあたり現在のシフターの段数では時間分解能 (~ 10 sec) が不十分となる可能性がある

⁴ ロックミュオンとも呼ばれる

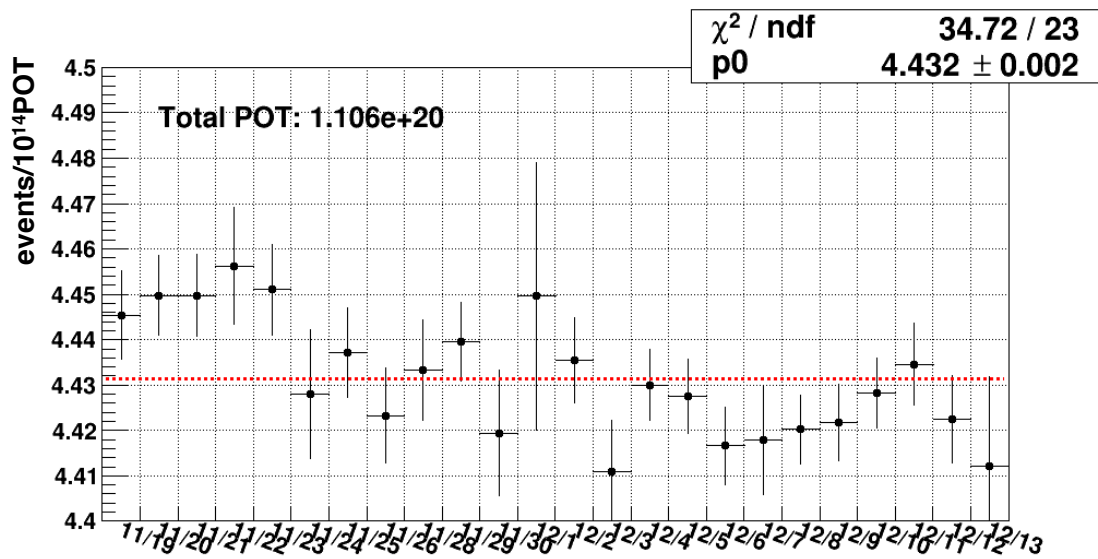


図 3.10: INGRID で観測されるサンドミュオンイベントレート。これは INGRID モジュール 14 台ぶんのレートであり、off-axis に位置する B2 フロアでのレートはこれよりもはるかに低いことが予想される

実際、過去に B2 フロアにおいて INGRID ショルダーモジュールを用いたサンドミュオンの測定が行われたことがあり^[43]、このときの測定によると、B2 フロアにおけるバックグラウンドは 10^{21} POT 換算で 1.1×10^6 イベント程度であると考えられる。水標的でのニュートリノ反応が 21,000 イベント程度であることから、観測される粒子のほとんどがバックグラウンドであることがわかる。これらのバックグラウンドは、ビーム下流からくることはほとんどなく、側面やビーム上流から入射する。ここではすべてビーム上流から飛来すると考えると、 1 m^2 に 1.1×10^6 本のトラックが存在することになり、それらを高い位置分解能によって分離する必要があることがわかる。たとえば $200 \mu\text{m}$ の位置分解能をもつトラックでこの位置を検出する場合を考える。XY の 2 レイヤーで位置を検出するので、 $\pm 1\sigma$ の範囲をとって $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ の範囲を 1 つのセルとすると、この 1 つのセルには 1.8×10^{-1} 本のトラックが存在することになる。このとき、 1.0×10^{21} POT のデータを取得する間に同時に 2 本以上のトラックがひとつのセル内にはいり ECC からトラックと対応付けできなくなる確率は、Poisson 分布から 1% 程度となる。これだけの位置分解能をもつトラックであれば、取得するデータが増えた場合にも対応できるだけでなく、たとえば on-axis での測定を行う場合も Chance coincidence の確率を 5% 以下におさえることができる⁵。したがって精度よくトラックを分離し、ECC から INGRID に飛んでくるすべてのトラックにタイムスタンプを押すためには、 $200 \mu\text{m}$ 程度の分解能をもつ Scintillating Fiber Tracker を用いて位置の検出を行えばよい。

また、このように高い位置分解能を目指す理由として角度分解能が挙げられる。トラックマッチングのための要素として、位置情報の他に角度情報を用いることができる。一般に原子核乾板は、 $3 \sim 5 \text{ mrad}$ の高い角度分解能を持つため、角度分解能をもつトラックを用いることができれば、より正確にトラックマッチングを行うことが可能である。ところが、Scintillating Fiber Tracker

⁵ on-axis でのニュートリノ反応は off-axis での 4 倍程度である

は1レイヤーでは角度分解能を持たないため、角度を測定するためには2レイヤー以上を並べて配置する必要がある。もし角度情報を利用するのであれば200 μm もの位置分解能で位置を検出する必要はなくなるが、たとえば500 μm の位置分解能で原子核乾板と同様に3~5 mradの角度分解能をもつトラッカーをつくるには、10 cm以上離して2枚のレイヤーを設置する必要がある。これはINGRIDとマッチングできる粒子のアクセプタンスを減らしてしまうことになるため現実的ではない。200 μm の位置分解能があればこの距離を~5 cmに縮めることができるだけでなく、前述の通りそもそも角度情報を用いることなく十分にトラックを分離することが可能である。したがって我々は、1レイヤーでも高い位置分解能によってECCからのトラックに時間情報を付与することのできるScintillating Fiber Trackerを開発することを目指す。

さらに、粒子の入射角度分布についても考えておく。図3.11は、off-axis角におけるニュートリノ反応によって観測されるミュオンの角度分布のシミュレーション結果である。ニュートリノビームの方向を $\theta = 0$ とした。ほとんどのミュオンは前方に散乱されることがわかる。B2フロアの検出器に入射するサンドミュオンの角度分布も同様に前方散乱が多いことが期待される^{[44][45]}。つまり、小さな角度で高い位置分解能を達成できるトラッカーであればよいと考えられる。

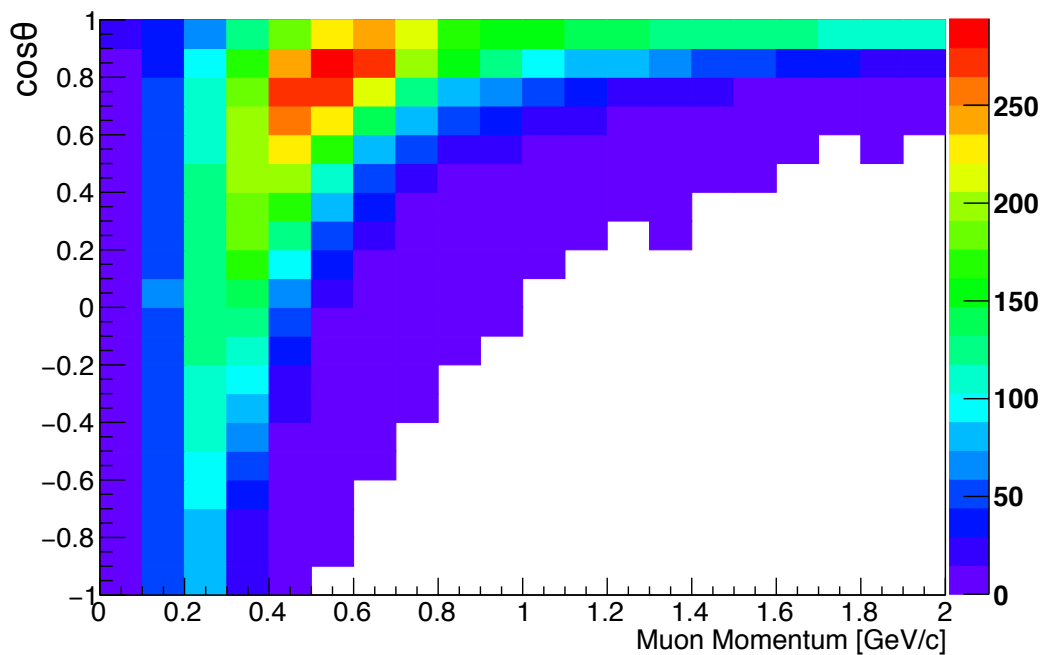


図 3.11: ミュオンの運動量-角度分布。2.5° の off-axis におけるニュートリノ反応によって生じたミュオンを示す。ニュートリノビームの方向を $\theta = 0$ とした。とくに運動量の大きいミュオンは前方への散乱が多いことがわかる

第4章 ファイバートラッカーの開発

本章では、Scintillating Fiber Tracker の基本的な構成要素および位置検出の原理を述べる。トラッカーに要求される性能は

- B2フロアに半年置いたとき約 200 μm の分解能があること
- INGRID をおおう 1 m \times 1 m 以上の大きさが実現可能であること
- 少ないチャンネル数でトラッキング可能であること

である。これらの項目を達成するため、断面が正方形をした角ファイバーを利用して、光量比を用いた解析方法をとる新しいアイデアの Scintillating Fiber Tracker の開発を行った。

4.1 Scintillating Fiber Tracker

Scintillating fiber はポリスチレンをベースとしたコアとその外側をおおうクラッドからなり、荷電粒子がエネルギーを落とすことでシンチレーション光を発光するファイバーである。このファイバーを並べて配置し、荷電粒子が通過したときのシンチレーション光を読み出すことで、一次元方向の位置を検出することができる¹。細いファイバーを用いることでより高い位置分解能を達成することが可能であるため、古くから様々な実験で用いられてきた。

かつては IIT (Image Intensifier Tube) や MAPMT (Multi-Anode Photon-Multiplier) などでシンチレーション光を読み出すのが主流であったが、近年 MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が登場したことにより、新たな性能向上の可能性が浮上してきた。本研究では MPPC の高いフォトンカウンティング能力に注目し、MPPC によって読み出したファイバーの光量比を用いた解析を行うことで位置分解能を向上させる手法を確立する²。本研究の手法では、ファイバーを細くせずとも高い位置分解能を得ることができるという新しいアイデアを用いるため、これまで細いファイバーを用いることの代償であった莫大な数の読み出しチャンネルを減らすことができる。太いファイバーを用いる場合コライダー実験などではパイルアップの心配が生じてしまうが、ニュートリノ実験においてはその心配は少なく、非常に有効な手段であるといえる。また、原子核乾板と併せてニュートリノ実験に利用することに適しているだけでなく、安価で高い性能の光検出器 MPPC を簡単に入手できる現在であるからこそ可能となった手法であり、新たなファイバートラッカーのベンチマークとなる重要な役割を担った検出器である。

¹ これを X レイヤーおよび Y レイヤーとして並べることで、2次元の位置を再構成することができる

² LHCb で 250 μm の丸ファイバーを用いたファイバートラッカーがインストールされる予定^[46]である。本研究はそこから着想を得て、角ファイバーを用いニュートリノに適したものの開発に挑戦した

4.2 位置検出の原理

Scintillating fiber による位置検出は、ファイバーの並べ方によっていくつかの方法を挙げることができる。図 4.1 はファイバーを断面から見た様子である。typeA のようにそのままファイバーを並べる³と、一般に位置分解能は標準偏差でファイバーの幅の $\frac{1}{\sqrt{12}}$ とされる。これはファイバーにヒットがあったとき、そのファイバーのどの位置を粒子が通過したかまではわからないので、一様分布の標準偏差をとるためである。typeA をすこし工夫し、2 レイヤー目をずらすと typeB のようになる。このときどの 2 本にヒットがあったかで粒子の通過位置をしばりこむことができるため、位置分解能は typeA の半分になる。例えば、2 mm 角のファイバーを用いる場合、typeA の位置分解能は $\sim 580 \mu\text{m}$ 程度であり、typeB ではその半分の $\sim 290 \mu\text{m}$ 程度となる。typeB を用いてもある程度よい位置分解能に達することが可能であるが、同じ 2 mm 角のファイバーを用いてこれ以上の位置分解能を達成するため今回我々が採用したのが、typeC の並べ方である。この方法をとるとファイバーの幅以上に高い位置分解能に達することができるため、ファイバーを細くする必要がない。つまり少ないチャンネル数で高い位置分解能に達することが可能となる。

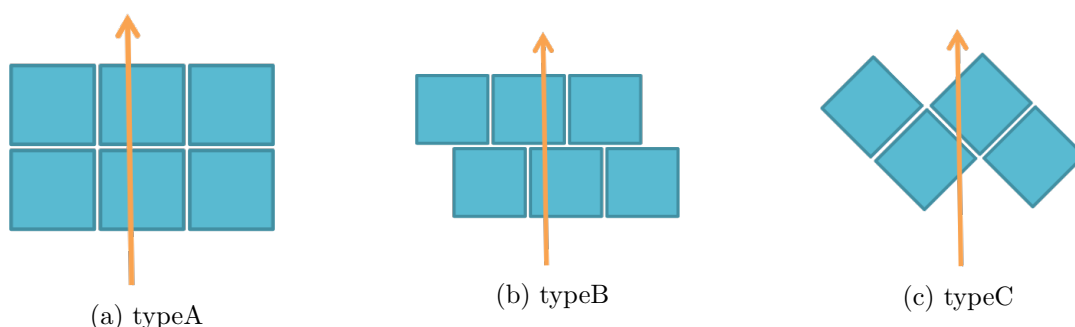


図 4.1: ファイバートラッカーの種類。今回我々が用いるのは typeC であり、光量比を用いて位置を検出する

図 4.2 に typeC における位置検出の原理を示す。Scintillating fiber の発光量は荷電粒子が通過した path length に比例する。そのため、荷電粒子の通過した位置によって隣り合うファイバーごとにエネルギー損失、つまり光量に変化する。この光量同士の比をとることで、位置を検出することが可能となるという原理である。位置の再構成は、隣り合うファイバー同士の光量比をとることで行う。図 4.2 において左のファイバーの中心から距離 d の位置を粒子が通過した際の左のファイバーの光量を N_1 、右のファイバーの光量を N_2 、ファイバー間隔を R とすると、粒子の通過した位置 d は

$$d(N_1, N_2) = \frac{N_2}{N_1 + N_2} R \quad (4.1)$$

で表すことができる。位置分解能はこのときの光量 N_1 , N_2 のゆらぎ $\Delta N_1 = \sqrt{N_1}$, $\Delta N_2 = \sqrt{N_2}$ によって決まるので、

$$(\Delta d)^2 = \left(\frac{N_2}{(N_1 + N_2)^2} R \right)^2 \cdot (\Delta N_1)^2 + \left(\frac{N_1}{(N_1 + N_2)^2} R \right)^2 \cdot (\Delta N_2)^2 \quad (4.2)$$

³ ファイバーの間隙による inefficiency を考え、2 レイヤー以上並べることが多い

となる。たとえば $N_1 = N_2 = \frac{N}{2}$ の場合は Δd が最大であり、 $\Delta N_1 = \Delta N_2 = \sqrt{\frac{N}{2}}$ となるため、

$$\Delta d = \frac{1}{2\sqrt{N}}R \quad (4.3)$$

である。ここから、ファイバーの大きさと光量を与えるとおよその位置分解能を計算することができる。いま、2 mm 角のファイバーを用いると仮定すると、200 μm の位置分解能を達成するためには $N > 12.5$ p.e. の光子があればよく、さらに多くの光量を得ることができればより高い位置分解能を達成できることがわかる。これは、次章にのべる陽電子ビームによる性能評価においては、ミュオンとのエネルギー損失の違いから約 20 p.e. 以上の光量が必要である。MIP ミュオンと陽電子の光量の換算の詳細については、5章の最後に述べる。

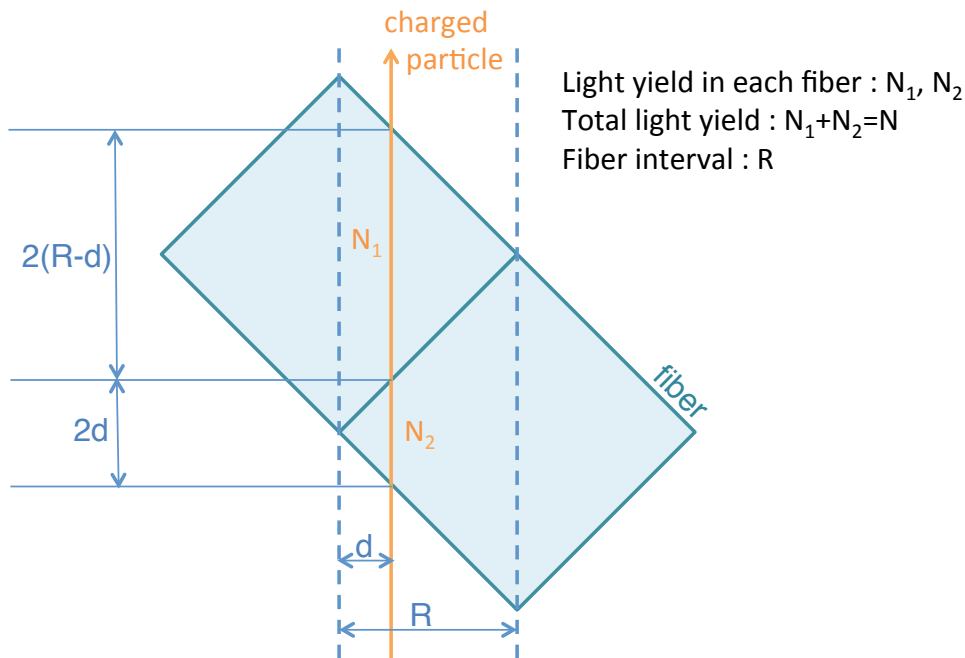


図 4.2: 位置検出の原理:この場合、左上のファイバーのほうが荷電粒子の path length が長いため、光量が大きくなることが期待される

4.3 プロトタイプ検出器の制作

以上に述べた方法による位置検出の原理検証を行うため、プロトタイプ検出器を制作し位置分解能の測定を行った。図 4.3 にプロトタイプ検出器の概要を示す。断面が 2 mm×2 mm の正方形をした Scintillating fiber と光検出器 MPPC を用いた検出器であり、長さやファイバーの条件の異なるプロトタイプ数種を制作し試験を行った。検出器は片側からのみ光量を読み出すことも可能であるが、図 4.3 のように両側から読み出すことでさらに多くの光量を得ることができる。第 5 章の陽電子ビームを用いた位置分解能の評価では、実際に両読みによる位置分解能の変化も測定する。

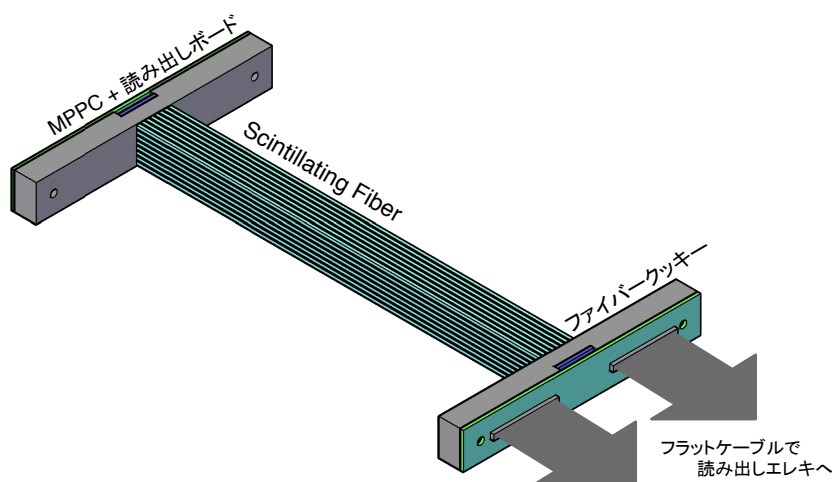


図 4.3: プロトタイプ検出器の概要。Scintillating Fiber と MPPC アレイからなる。MPPC アレイは基板に固定され、ひとつの MPPC アレイにつき 2 本のフラットケーブルで読み出し回路 EASIROC につながる。図は両読み用のデザインとなっており、両側に MPPC アレイをつけることができるようになっている

以下の節で、検出器の構成要素である Scintillating fiber、MPPC、ファイバークッキー、MPPC 読み出しボードおよび EASIROC モジュールについてそれぞれ説明する。

4.4 Scintillating Fiber

Scintillating fiber は荷電粒子のエネルギー損失によりポリスチレンのコアが励起され、シンチレーション光を発光するファイバーである。シンチレーション光は可視光に波長変換されたのち全反射の角度内にはいったものだけがファイバーの端へと伝搬される。図 4.4 に Scintillating fiber の概要を示す。図は single clad の場合である⁴。

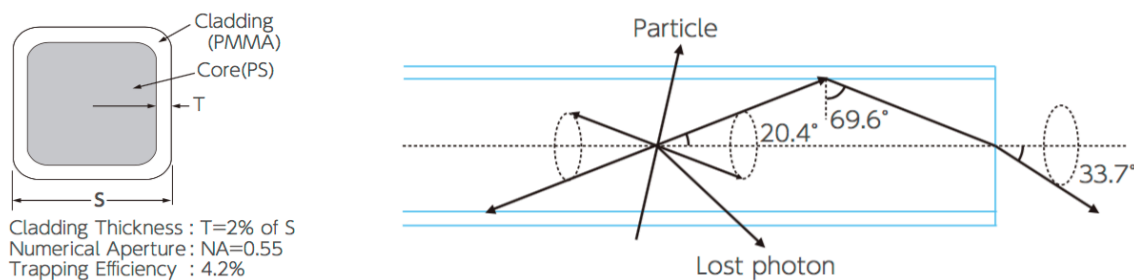


図 4.4: Scintillating fiber の概要^[47]。発生したフォトンの中の一部が全反射によって伝搬する

今回我々が用いるのは、Kuraray SCSF-78 (図 4.5) である。SCSF-78 は高い光量と長い減衰長、そして後述の MPPC に合った発光波長を持つファイバーである。SCSF-78 の構成を表 4.1 に示す。

⁴ 角ファイバーの double clad は製造されていない。丸ファイバーにおける double clad の場合は、屈折率の異なるクラッドでさらに囲むことにより、全反射角を大きくしてトラップされる光をふやしている

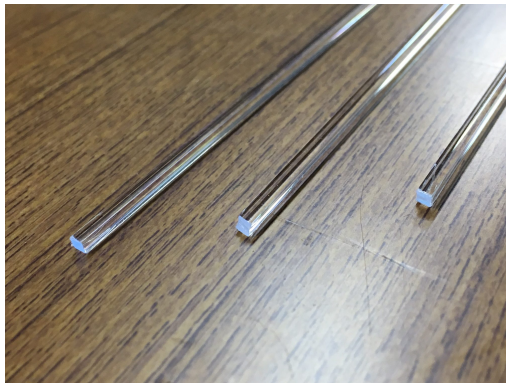


図 4.5: SCSF-78

表 4.1: SCSF-78 の構成

	core	clad
材質	Polystyrene	PMMA ⁵
屈折率	1.59	1.49
密度	1.05	1.19

SCSF-78 においてシンチレーション光は、それぞれ質量比で ~ 1% と ~ 0.05% 程度ふくまれる 2 種類の波長変換材による Stokes' Shift で波長変換されたのち、450 nm の波長の光として伝搬される。これは後述する MPPC アレイの最高感度波長と一致している。SCSF-78 の emission spectrum を図 4.6 に示す。

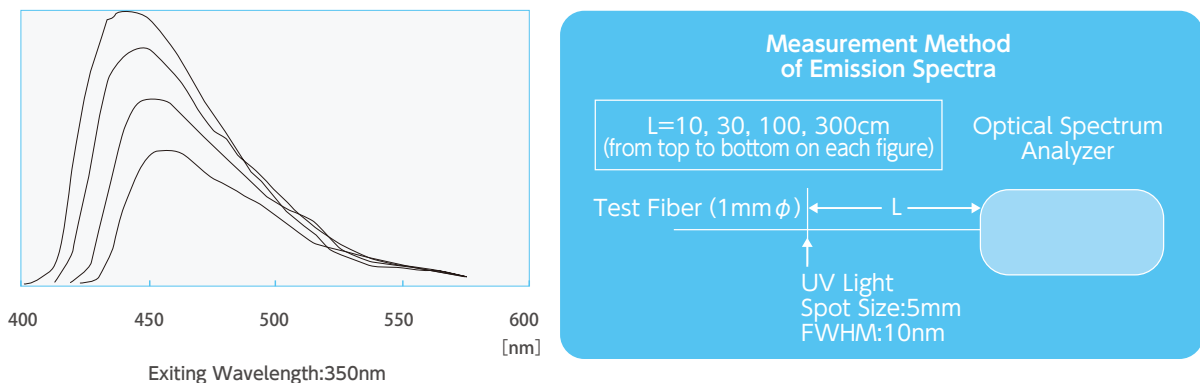


図 4.6: SCSF-78 の emission spectrum^[47]。シンチレーション光は波長変換され、450 nm の光として取り出される。LED を照射する位置を遠くすることで光が減衰している様子が見られる

[減衰長の測定]

SCSF-78 は長い減衰長をもつという特徴がある。大きな検出器を制作するにあたり、減衰長は重要なパラメータである。実際に 2 mm 角のファイバーを用い、減衰長の測定を行った。図 4.7 に測定のセットアップを示す。ジグを用いて暗箱内に 2.6 m の 2 mm 角ファイバーを張り、端面に MPPC アレイを設置した。ファイバーの側面から 300 nm の波長の UV-LED を照射することで光量の減衰を測定した。L が 10~80 cm までは 5 cm 間隔、80~160 cm までは 10 cm 間隔、160~240 cm までは 20 cm 間隔で LED を照射する位置を変えた。

⁵ Polymethylmethacrylate

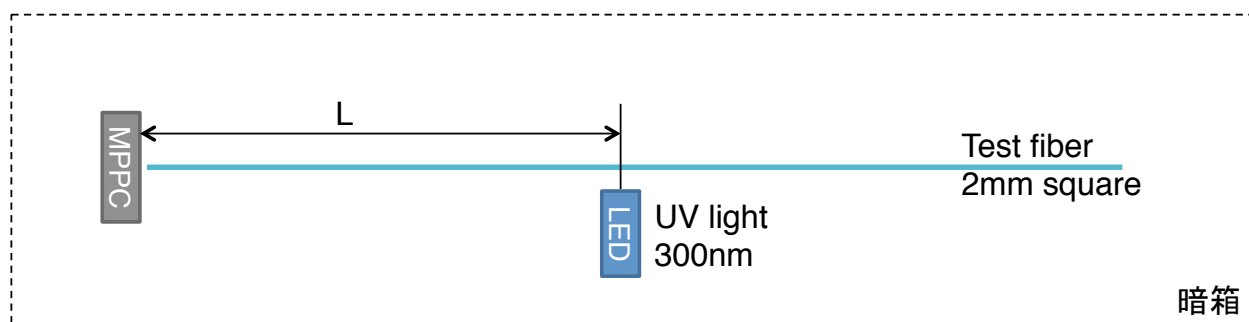


図 4.7: 減衰長測定のためのセットアップ。暗箱内に 2.6 m の 2 mm 角ファイバーを張り、300 nm の波長の UV-LED を照射した。読み出し MPPC までの距離 L を変化させることで、光強度の減衰を評価した

測定した減衰長を図 4.8 に示す。ファイバーの端から 10 cm の位置の光強度を 1 として減衰を評価しており、測定は Kuraray による測定をよく再現している。

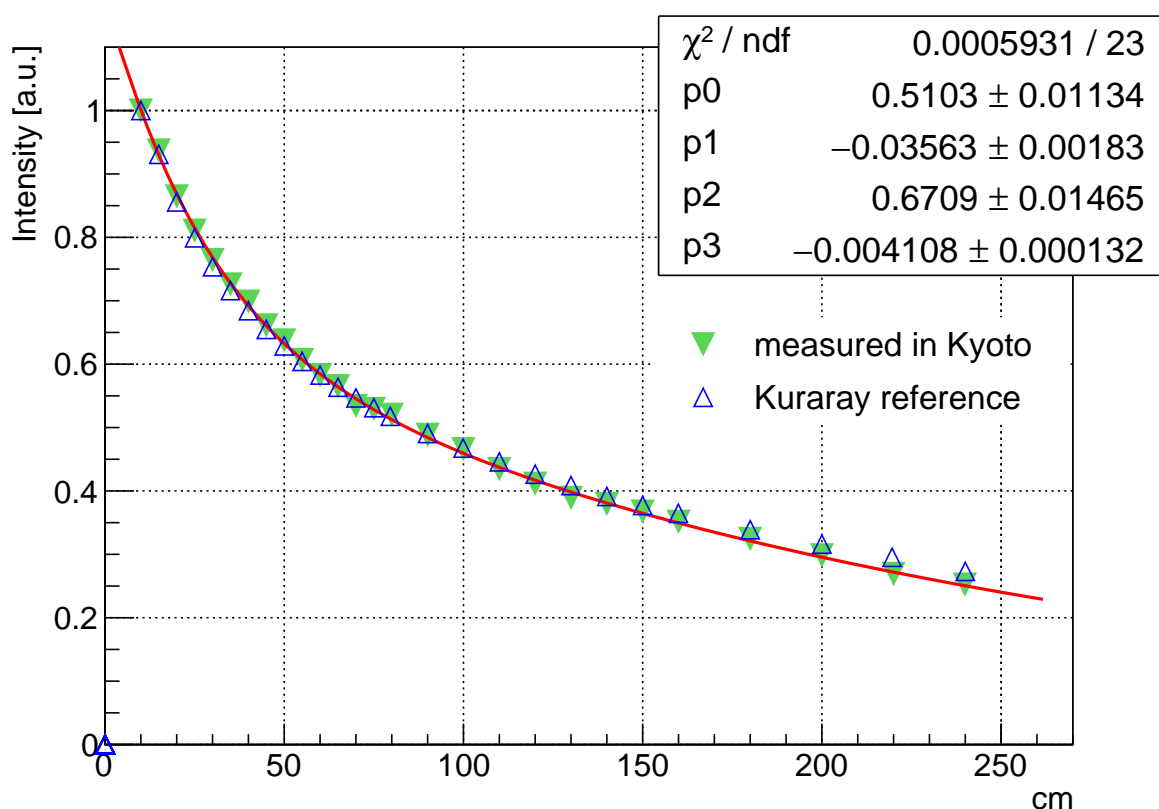


図 4.8: SCSF-78 の減衰長。ファイバーの端から 10 cm の位置の光強度を 1 として減衰を評価した。LED を照射する距離を変化させながらファイバー断面での光量を測定しており、Kuraray の測定をよく再現している

また、光強度の減衰をフィッティングすることで減衰長を求めた。Scintillating fiber の減衰は 2 つの成分をもっている。これは、コアを通る光 (core light) とクラッドを通る光 (clad light) で光

路長が異なることと、ファイバー内を回転するように伝搬する spiral mode の光が存在することが原因として挙げられる。core light はコアとクラッドの境界で全反射されることで伝搬される。一方、clad light はクラッドと空気のあいだで全反射されるため、ファイバー表面の粗さや汚れによってより早く減衰する。また、spiral mode のように光が回転すると光路長が非常に長くなるだけでなく全反射の回数も多くなるため、減衰が早いと考えられる。さらに、波長による減衰の違いも考えられる。これは短い波長の光が波長変換材に再吸収される影響や、特定の長波長の光がポリスチレンに吸収される影響、レイリー散乱の影響などが考えられる。図 4.9 に波長と減衰長の関係を示す。

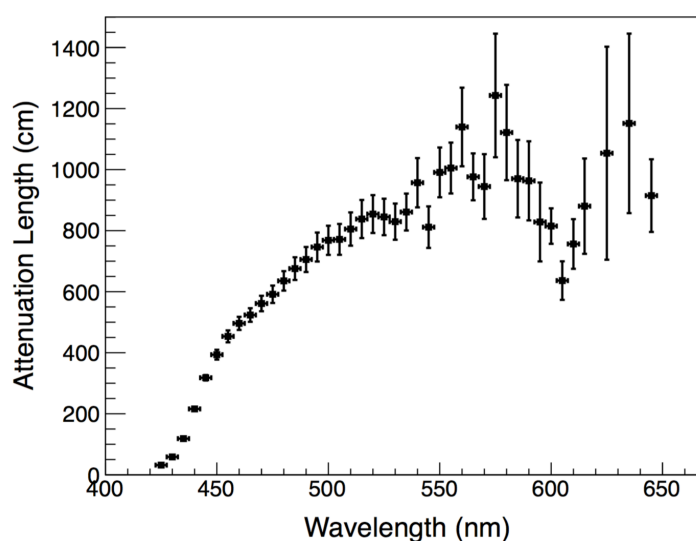


図 4.9: 波長と減衰長の関係^[46]。波長変換材による再吸収のため短い波長のほうが早く減衰する。また、長波長の一部はポリスチレンによって吸収されるため、減衰が早くなっている

以上の原因が影響し合うことにより、ファイバーの減衰長は 2 成分の減衰で近似的に表すことができると考えられている。実際に測定した減衰長に対し、式 4.4 を用いてフィッティングを行った。

$$F(p_0, p_1, p_2, p_3) = p_0 e^{(p_1 x)} + p_2 e^{(p_3 x)} \quad (4.4)$$

フィッティング結果は図 4.8 中に示したとおりである。フィッティングの結果 2 mm 角の scsf-78 は短い減衰が 28.1 ± 1.4 cm、長い減衰が 243.4 ± 7.8 cm の減衰長をもつことがわかった。今回想定する検出器の大きさは 1 m 程度であるため、これらは十分な減衰長をもっているといえる。

今回の測定の系統誤差として考えられる最大の要因は、ファイバーのたわみによって LED までの距離が変化することである。ファイバーは両端で固定されているため、これによりとくに 100~150 cm あたりで測定の際のばらつきが見られる。また、LED から入射する光の角度や LED の位置の誤差なども測定結果に影響すると考えられるが、今回の測定では十分に小さいと考えられる。

4.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

MPPC⁶は、浜松ホトニクス社の提供するガイガーモード APD をマルチピクセル状にした半導体光検出器である。MPPC にブレークダウン電圧より 1~4 V 高い逆バイアスをかけると、APD がガイガーモードで動作し、入射光子によって弾かれる光電子が雪崩増幅をおこす⁷。このとき、ひとつのピクセルから出力される電圧 Q_i は、ピクセルの静電容量を C 、印加電圧を V 、ブレークダウン電圧を V_{bd} とおくと

$$Q_i = C(V - V_{bd}) \quad (4.5)$$

と表される。これが複数のピクセルで起こるため、MPPC 全体の出力電圧 Q は

$$Q = \sum Q_i = NQ_i \quad (4.6)$$

となる。このようにして雪崩増幅を起こしたピクセル数に比例した信号を得ることによって、入射した光子の数を測定することができるという原理である⁸。入射光子が飽和してひとつのピクセルにふたつ以上の光子が入ってしまうような場合は正しい光子数を知ることができなくなってしまうが、本実験においては 3 mm 四方に 50 μm ピッチの APD ピクセルが 3600 個並んでいるものを用いているため、現在のファイバーの光量では心配する必要がない。

本研究では、浜松ホトニクス製の MPPC アレイ S12642-0808PB-50 (3 × 3 mm², 8 × 8ch, 64ch, p50 μm ⁹) を用いる。450 nm に最高感度波長をもち、これは先ほど述べたとおり Scintillation fiber から得られる波長と一致している。MPPC アレイおよびその感度波長を図 4.10 に示す。

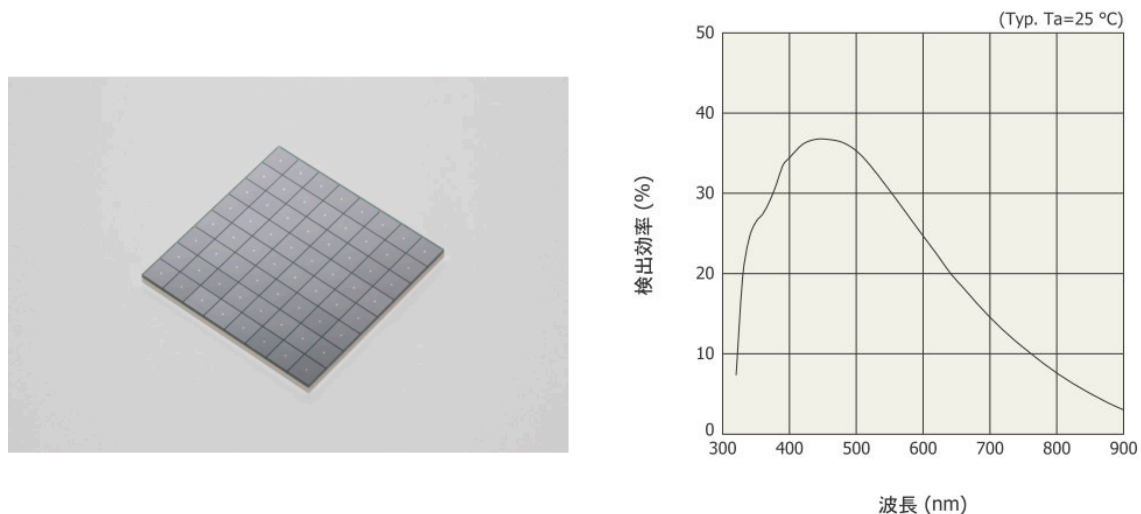


図 4.10: MPPC アレイ (左) および感度波長 (右)^[48]

⁶ SiPM (Silicon Photomultipliers) の一種である

⁷ このときのゲインは $10^5 \sim 10^6$

⁸ これが MPPC が高いフォトンカウンティング能力をもつ理由である

⁹ ADC のピクセルピッチが 50 μm であるという意味

後述の EASIROC で測定した MPPC の信号の ADC 分布を図 4.11 に示す。優れたフォトンカウンティング能力をもち、ファイバーからの光量を正確に測定することが期待される。

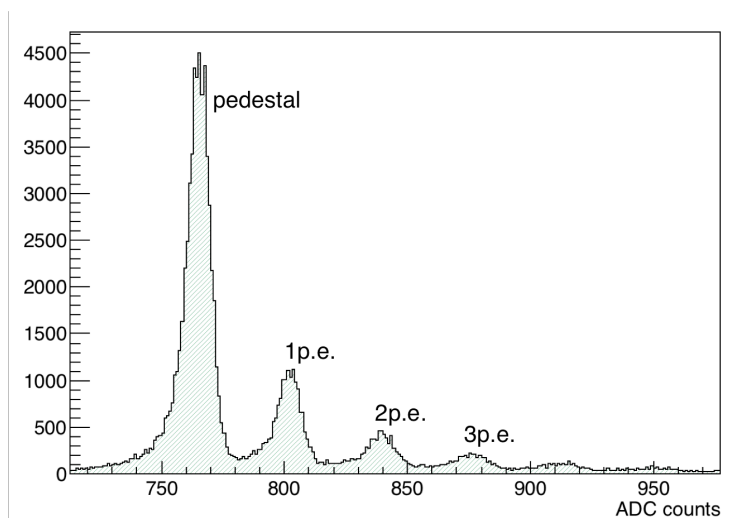


図 4.11: MPPC アレイの信号の ADC 分布。MPPC アレイのうちのあるチャンネルの信号の様子である。後述の EASIROC で測定している

MPPC は個体ごとに異なるブレイクダウン電圧 (V_{bd}) を持つ。ここでは、 V_{bd} の測定方法および使用した 2 個の MPPC アレイの V_{bd} を示す。

ペDESTアルと 1 p.e. のピークの差で定義される MPPC のゲインは、式 4.5 のように印加電圧とブレイクダウン電圧の差に比例する。したがって、異なる印加電圧でのゲインを数点測定し、その結果をゲインが 0 になるところまで外挿することで V_{bd} を測定することができる (図 4.12)。この測定を、本実験で用いた MPPC アレイについて行った結果を図 4.13 に示す。0.1 V 程度のばらつきがあることがわかる。

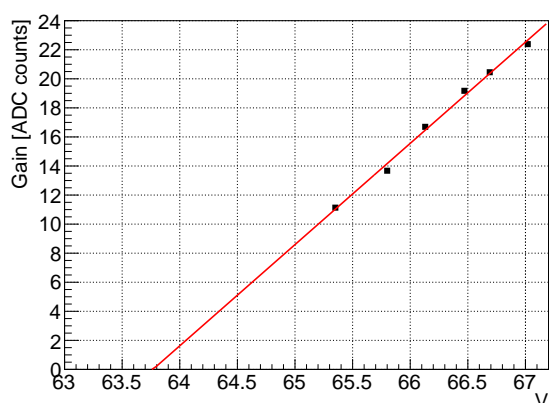


図 4.12: 印加電圧とゲインの関係

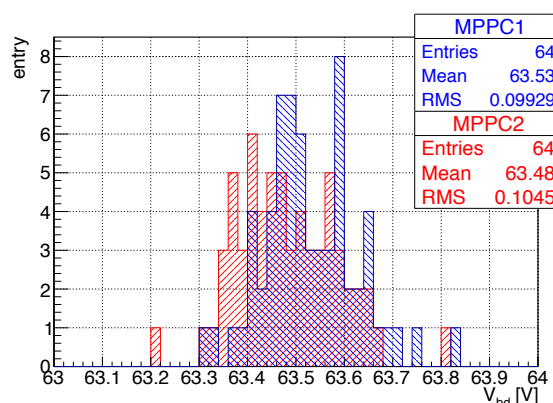


図 4.13: MPPC アレイの V_{bd}

以降の実験では、MPPC アレイのチャンネルが一定のゲインになるように調整を行い、 $\Delta V \sim 3.3$ V のオーバー電圧で測定を行った。図 4.14 に MPPC アレイのオーバー電圧のばらつきを示す。MPPC1 のほうが広がりをもっているが、測定に大きな影響はない程度であると考えている。

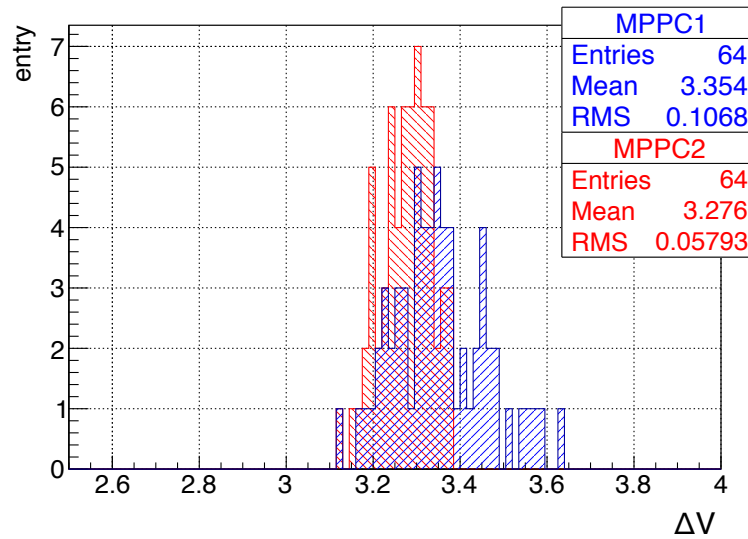


図 4.14: MPPC アレイのオーバー電圧。ゲインが一定になるように調整を行い、 $\Delta V \sim 3.3$ V で測定を行った。MPPC1 のほうがばらついているが、測定に影響がない程度であると考えている

MPPC は光電子増倍管 (PMT) と異なり磁場中でも用いることが可能である。しかし、ゲインが温度変化の影響を受けやすいという特徴がある。これは温度の上昇にともないブレークダウン電圧が上がることで、印加電圧とブレークダウン電圧の差であるオーバー電圧 ΔV が下がるためである。図 4.15 に恒温槽を用いて測定した MPPC アレイの温度依存性を示す。オーバー電圧にもよるが、温度が $\pm 1^\circ\text{C}$ 変化するとゲインは 5% 程度かわることがわかる。本研究の実験においては、測定中は室温の変化を $\pm 1^\circ\text{C}$ に保つことでゲインの変動が 5% 以内になるようにしている。

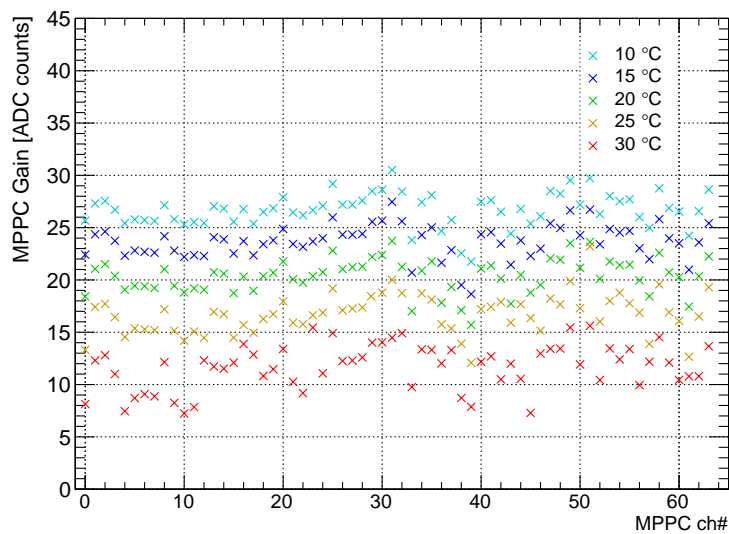


図 4.15: MPPC アレイの温度依存性。 $\Delta V \sim 3.3$ V の場合を示す。室温が 5°C 下がると $\sim 20\%$ 程度のゲイン変動が見られるだけでなく、チャンネル間でのゲインのばらつきも大きくなる

また、MPPC は個体ごとに異なる Photon Detection Efficiency (PDE) をもつ。PDE は光検出器の性能を決めるパラメータのひとつである。PDE は APD の量子効率 (Quantum Efficiency) や受光面の有感領域の面積で決まる。とくに MPPC の場合、PDE は ΔV によっても変化するが、APD ピクセル間の不感領域によって PDE が大きく変わる。さらに、使用していくうちに表面の細かい傷などによってピクセルが損傷してしまうことも考えられるため、MPPC アレイの各チャンネルにおいて PDE はばらついていると考えられる。このチャンネルごとの PDE のばらつきを補正するため、相対的な PDE の測定を行った。図 4.16 に測定方法を示す。暗箱のなかで十分に離れたところから青色 LED を照射し、MPPC アレイの各チャンネルの信号を測定した。それぞれのチャンネルで p.e. に換算し、すべてのチャンネルの平均の光量に対する光量の割合を相対 PDE とした。このとき ΔV は図 4.14 に示すように MPPC1、2 でほとんど一致するように設定した。

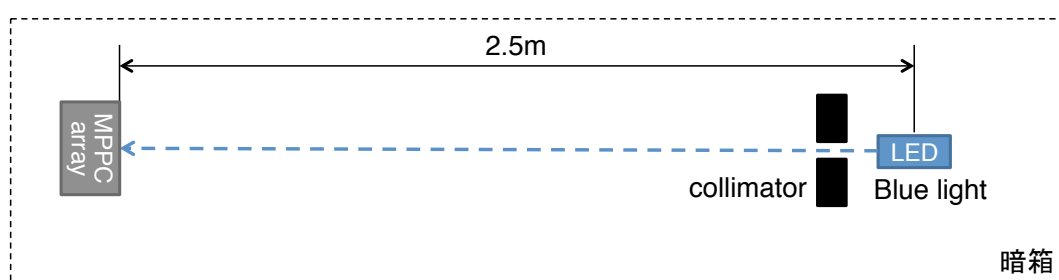


図 4.16: PDE 測定方法。LED を MPPC アレイから 2.5 m 離すことでほぼ平行な光を当て、各チャンネルで観測される光量を測定した

図 4.17 に測定結果を示す。それぞれ 10% 程度のばらつきがあることがわかる。MPPC2 に比べ MPPC1 のほうが全体的に PDE が低いのは、使用頻度が高く表面に傷などがついてしまっていることが原因と考えられる。

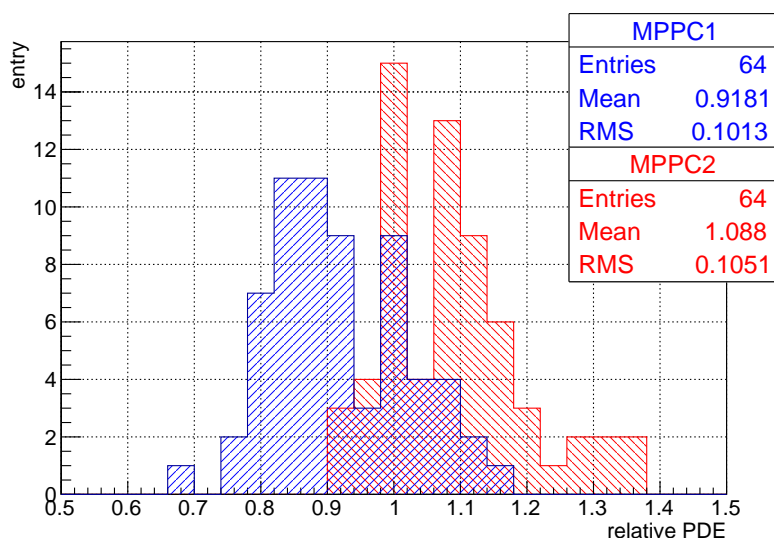


図 4.17: MPPC アレイの PDE のばらつき。MPPC1 のほうが PDE が低いのは使用頻度の違いによって表面に傷がついてしまっているためであると考えられる

4.6 ファイバークッキー

MPPCとファイバーのアラインメント調整は、ファイバークッキーを用いて行った。図4.18にクッキーのデザインを示す。クッキーはM5のボルトとナットにより後述のMPPC読み出しボードと取り外し・固定ができる構造になっている。ファイバーの断面とMPPCアレイの表面は接触しないよう、0.3 mm程度の隙間をあけている。ファイバー断面における光の角度は図4.4のように約 33.7° の広がりをもっているが、クッキー上でのファイバー同士の隙間は約1 mm空いており、0.3 mm程度のMPPC-クッキー間の隙間ではクロストークは起きないと考えられる。

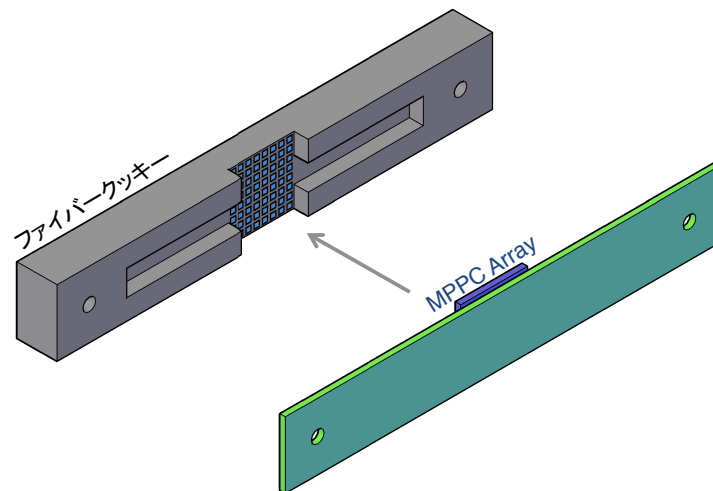


図 4.18: ファイバークッキーのデザイン。MPPC 読み出しボードを取り外しすることができる

図4.19に実際にファイバークッキーに固定されたファイバーの断面を示す。ファイバー断面はクッキーに接着後、研磨される。図4.20はクッキーに読み出しボードを固定した様子である。

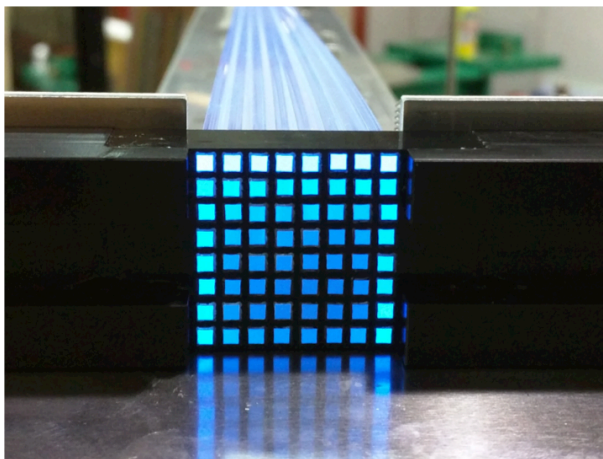


図 4.19: 64本のファイバー断面の様子



図 4.20: 読み出しボードとクッキー

4.7 MPPC 読み出しボード

MPPC アレイと EASIROC をつなぐ読み出しボード^[51]の写真を図 4.21 に示す。MPPC アレイは取り外し可能な構造になっており、コネクタによって読み出しボードにつながる。読み出しボードおよびフラットケーブルも同様にコネクタによって接続され、EASIROC へとつながる。表 4.2 に用いたケーブルおよびコネクタ一覧を示す。

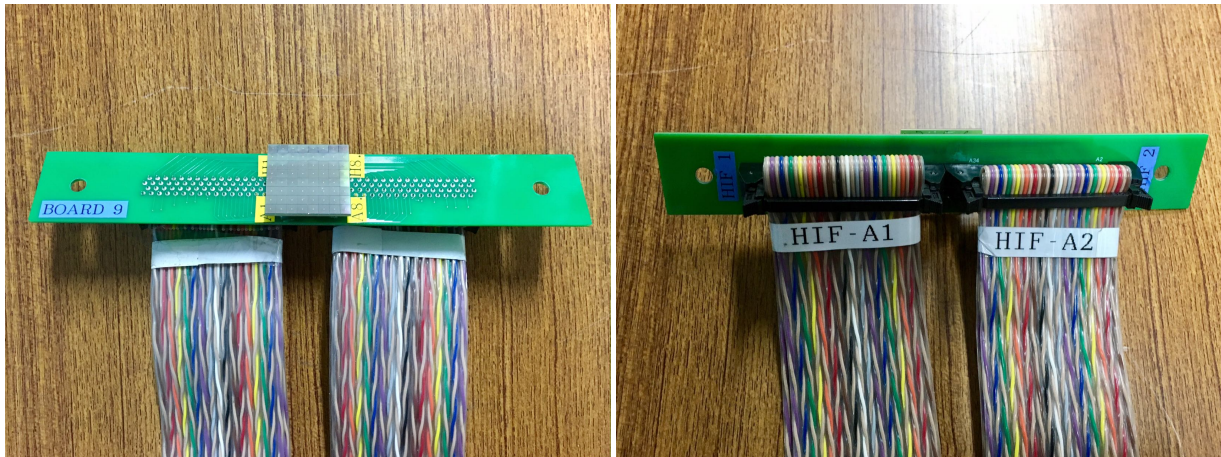


図 4.21: MPPC 読み出しボード。左が MPPC 側で、右がフラットケーブル側である。MPPC はとりはずし可能になっている

表 4.2: ケーブル・コネクタ一覧

概要・役割	型番
フラットケーブル	Amphenol: 132-2801-034
読み出しボード-フラットケーブル間:フラットケーブル側	HIROSE: HIF6-68D-1.27R
読み出しボード-フラットケーブル間:読み出しボード側	HIROSE: HIF6-68PA-1.27DSA(71)
MPPC アレイ-読み出しボード間	SAMTEC: SS4-40-3.00-L-D-K-TR

4.8 EASIROC Module

EASIROC は 64ch の MPPC を同時駆動できる汎用 MPPC 読み出しモジュールである。図 4.22 に EASIROC モジュールおよび内部回路を示す。EASIROC モジュールは、フランスの Ω グループが開発した、MPPC 読み出し用 ASIC である EASIROC チップを 2 枚搭載しており、入力信号は正の信号として波形整形後、ピークホールドされ読み出される。low gain と high gain があり、160 fC–320 pC までのダイナミックレンジをもつ。

EASIROC を用いることで、印加電圧をチャンネルごとに微調整する InputDAC を利用することができる。これを用いることで、MPPC アレイはペDESTアルと 1 p.e. の ADC ピーク間隔で定義するゲインがほぼ一定になるように、あらかじめ調整を行った。

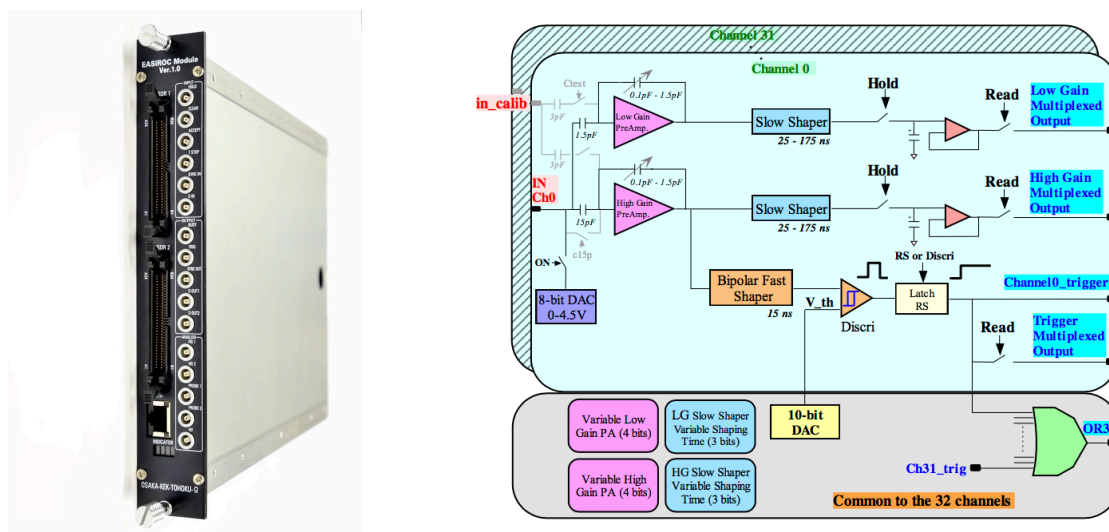


図 4.22: EASIROC モジュールの外観 [49] および内部の回路図 [50]。64ch の MPPC に電力を供給し、同時駆動することができる。入力信号は波形整形後、正の信号としてピークホールドで読み出される

EASIROC の信号は外部トリガーによるピークホールドで読み出される。したがってピークホールドのタイミングが重要になる。図 4.23 のように、トリガーを MPPC の信号のピークにちょうど合わせるように、Slow shaper の時定数や外部トリガーの delay の調整を行う。なお、Slow shaper とは PreAmp によって増幅された信号を波形整形する際の ShapingAmp のことであり、波形整形の時定数を 25 ns から 175 ns まで 25 ns 刻みでの変更が可能である。

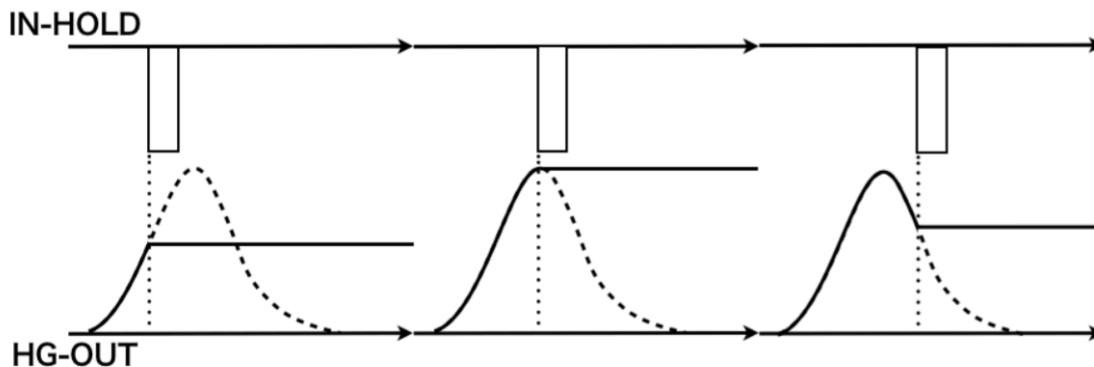


図 4.23: EASIROC の Hold タイミング [50]。左の場合は HOLD タイミングが早く、右は遅い。このタイミングは EASIROC で整形される波形の時定数を変更するか HOLD 信号のタイミングをずらすことで調整する

EASIROC モジュールは PreAmp によってゲインの調整を行うことが可能である。ここではこの PreAmp の応答について考える。

EASIROC の PreAmp はチップ内 (32ch) 共通で変化させることができ、

$$Gain = \frac{15}{C [\text{pC}]} \quad (4.7)$$

のようにコンデンサの静電容量 C によりゲインが決まる。表 4.3 に設定可能なゲインを示す。 C を 0.1 ~ 1.5 pC まで変化させることで 15 段階の設定が可能である¹⁰。

表 4.3: EASIROC PreAmp 設定値一覧

C (pC)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Gain	150	75	50	37.5	30	25	21.4	18.8	16.6	15	13.6	12.5	11.5	10.7	10

これらすべての設定値に対し、テストパルスを用いてゲインを測定した。テストパルスは外部から入力する必要はなく、モジュール内の FPGA から 30 mV の信号が出力される。この信号の増幅率を測定し、応答を確かめた。

それぞれ異なるチップのふたつのチャンネルに対する結果を図 4.24 に示す。PreAmp を $\times 50$ 以上にすると期待される応答からずれることがわかる。ビームテストの際は LED によるペDESTAL と 1 p.e. ピーク間隔を $\times 75$ あるいは $\times 150$ アンブで測定し、ビームでの測定では $\times 21.4$ アンブを用いていた。そのため、実際の光量を求める際は PreAmp の設定による応答の違いを補正し光量を求めた。また今回は、応答のずれに対しチャンネルごとのゲインのずれは十分に小さいと考え、全チャンネルで共通の定数によって補正を行った。

¹⁰ このようなパラメータの設定は全て Slow Control を用いて行う

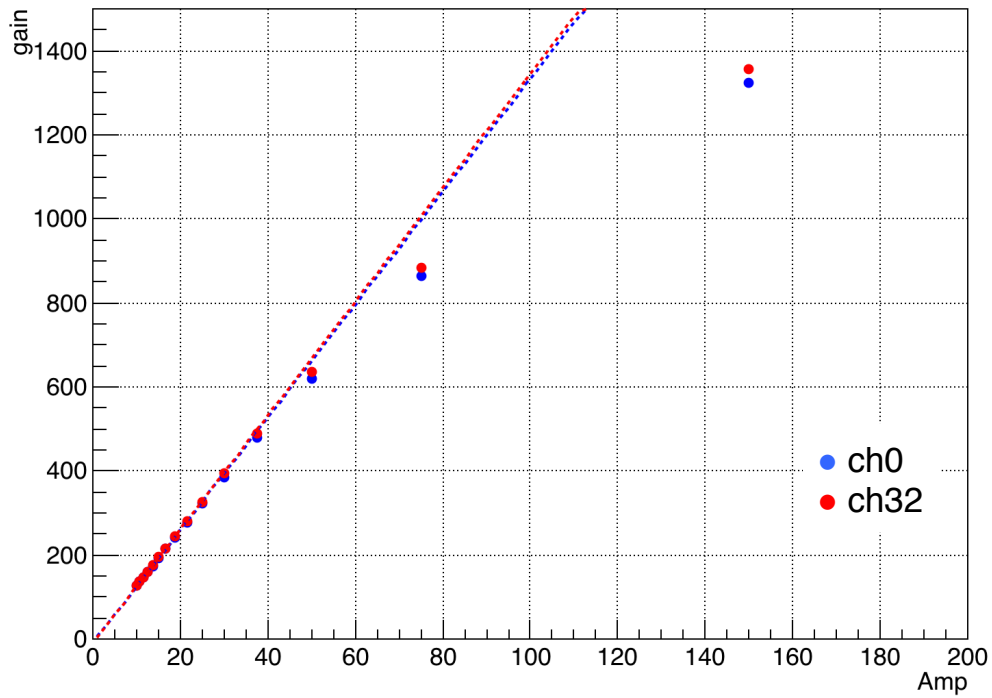


図 4.24: PreAmp の応答。横軸に PreAmp の設定値、縦軸にテストパルスを入力した際のペダスタルと信号の ADC 値の差を示す。EASIROC モジュールは 2 枚のチップを搭載しているため、Chip1 の ch0 と Chip2 の ch32 についての結果をそれぞれ示す。いずれも 50 倍以上のアンプで応答が異なってくる ことがわかる

第5章 陽電子ビームを用いたファイバートラッカーの性能評価

ここまでの章で、200 μm という高い位置分解をもつ Scintillating Fiber Tracker を実現するためには、ファイバーからの光量が重要なパラメータとなることがわかった。本章では陽電子ビームを用いてファイバーの光量を評価し、そのうえでプロトタイプ検出器の位置分解能を測定することによって、光量比を用いた位置測定の原理を検証する。

5.1 ビームテスト概要

トラッカーの性能評価のため、東北大学電子光理学研究センターにて陽電子ビームを用いた2度のビームテストを行った。それぞれ異なるプロトタイプ検出器を用意し、実機に向けた最適化を図った。

5.1.1 第1回ビームテスト

第1回の測定は、2016年6月28～30日の3日間行われた。測定した項目は以下の通りである。

1. ファイバーの光量測定

ファイバーの光量は、位置分解能に関わる重要なパラメータである。太さの異なるファイバーをそれぞれ丸ファイバーと角ファイバーで用意し、光量の測定を行った。これにより後の位置分解能測定において200 μm の位置分解能に達するために十分な光量が得られるかどうかを確認できる。さらに、異なる太さのファイバーについても測定しておくことで、光量から期待される位置分解能を見積もることが可能となる。

2. 検出器の Hit efficiency

粒子が入射した際の Hit efficiency (検出効率) は、検出器として重要な性能のひとつである。ここでは図 5.1 に示す位置分解能測定に用いた検出器で Hit efficiency の測定を行った。

3. 位置分解能の測定 (垂直入射の場合)

Hit efficiency を測定したのと同じ図 5.1 に示す検出器を用いて、図 5.2 に示すようにレイヤーに対しビームを垂直入射した際の位置分解能を測定した。読み出し MPPC から 15 cm の位置にビームを照射し、2枚のレイヤーで再構成された位置の差から位置分解能を評価した。

検出器は全長が 50 cm であり、8 × 8 本の 2 mm 角ファイバーを並べ、1ch が 3 mm 角の 64ch MPPC アレイで読み出す。2 mm 角のファイバーを 3 × 3 mm² の MPPC で読み出すため、読み出し部分ではファイバー同士のあいだに隙間ができてしまう。そのため、ビーム照射部のファイ

バーアラインメントは L 字型のアクリルのジグを用い 64 本のファイバーを束ねることで行った。また、検出器をビームに対し 45 度傾けることにより、第 4 章にのべるようにビームに対し 45 度傾いたファイバーの配置を実現し光量比を用いた測定を行った。

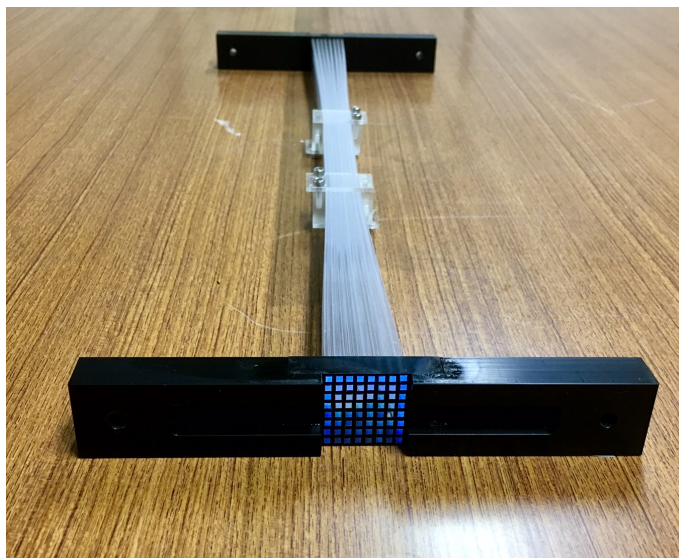


図 5.1: 第 1 回ビームテストに用いた検出器の写真。両読みも可能であるが、今回の測定では片読みで測定を行った。64 本の 2 mm 角ファイバーを 8×8 に並べている。ビーム照射部はアクリルでできた L 字型のジグで固定されている

この検出器におけるレイヤーの定義を図 5.2 に示す。MPPC 5ch を 1 レイヤーとし、位置を再構成した。

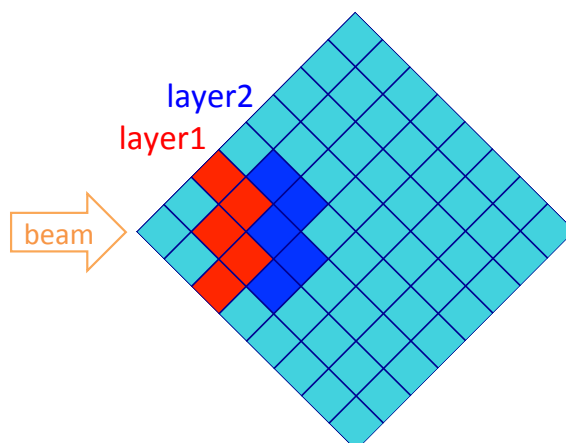


図 5.2: 第 1 回ビームテストに用いた検出器のファイバー構成。8×8 のファイバーのうちレイヤー 1、2 を図のように定義する

また、このように 64 本のファイバーを 1 本ずつ読み出すタイプとは別に、チャンネル数削減のためひとつの MPPC で複数のファイバーを読み出す Staggered タイプ検出器の開発も行ったが、ここではより性能の良い 1 対 1 の読み出しタイプについて報告を行う。Staggered 検出器に関しては付録 C に述べる。

5.1.2 第 2 回ビームテスト

第 2 回の測定は、2016 年 10 月 19 ~ 21 日の 3 日間行われた。図 5.3 に示す 30 cm の長さのファイバーを用いた縦置き検出器 A と、1 m のファイバーの両側から読み出すことのできる横置き検出器 B を用意し、以下の項目の測定を行った。

1. 位置分解能の測定 (垂直入射の場合)

読み出し MPPC から 15 cm の位置にビームを照射した場合の位置分解能の測定。第 1 回との違いはファイバーの固定方法であり、検出器 A を用いて測定を行った。

2. 読み出しまでの距離と位置分解能の関係

ビーム照射位置から読み出しまでの距離が変化すると、減衰によって光量が少なくなり位置分解能は悪化すると予想できる。検出器 B を用い、読み出しまでの距離が 15、30、50、70、85 cm の場合の位置分解能を測定した。また、検出器 B はファイバーの両側から読み出しを行い、両端での合計光量を用いた場合の位置分解能も求めた。

3. ファイバーの条件を変えた測定

反射材や黒ペイントなどはファイバー間のクロストークを抑制するだけでなく、オプティカルセメントのようにファイバー同士の接着剤としても利用できる。ここでは検出器 B に反射材、黒ペイント、オプティカルセメントなどを塗布した検出器によって、ファイバーの光量やクロストークがどのように変化し位置分解能に影響を与えるかを測定する。

4. 位置分解能の入射角度依存性

図 5.5 に示すレイヤーに対して垂直入射の場合を 0° とし、陽電子ビームの角度を 5、10、15、30、 45° と変化させた場合に、位置分解能にどのような影響がでるか測定を行う。検出器 A を用いた。

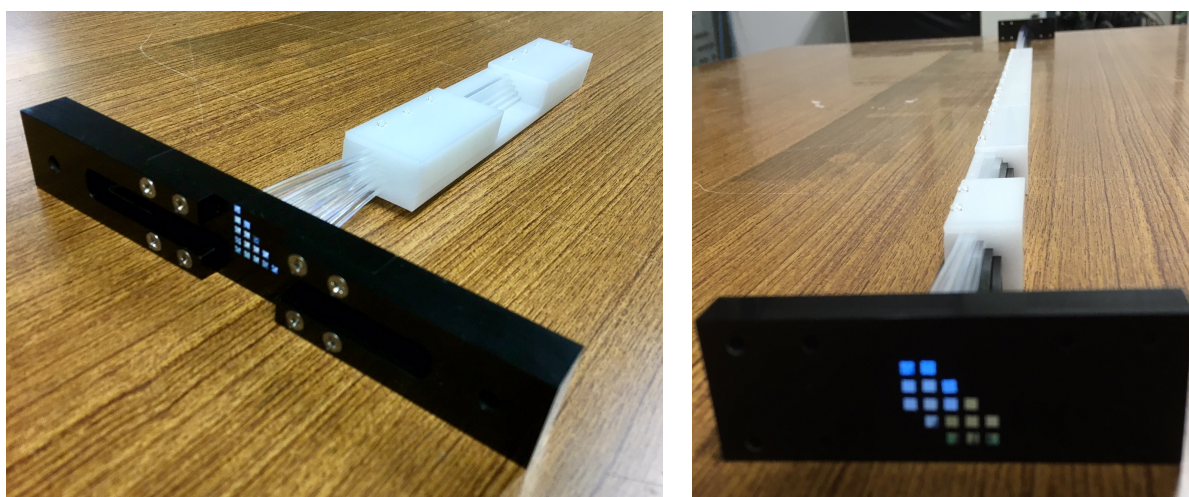


図 5.3: 検出器 A(左) と検出器 B(右) の写真。検出器 A は 30 cm のファイバー 15 本からなり、ファイバーが縦になるように設置して測定を行う。一方、検出器 B は 1 m のファイバー 16 本からなり、水平に設置して測定を行う

今回の測定に用いた検出器の、前回との主な違いはファイバーの固定方法であり、ファイバー 1 本ずつをより精密に固定するため、階段状のジグを制作した。ジグを図 5.4 に示す。ジグは階段で挟み上下からネジどめをすることでファイバーをおさえる構造になっている。POM (Polyacetal) でできており、50 μm 以下の機械加工精度でつくられている。ビームの当たる部分は上面が取り外し可能となっており、ビーム照射時のみカバーをはずすようにしている。図 5.3 においても読み出しから 15 cm の位置でカバーが外れている様子が確認できる。

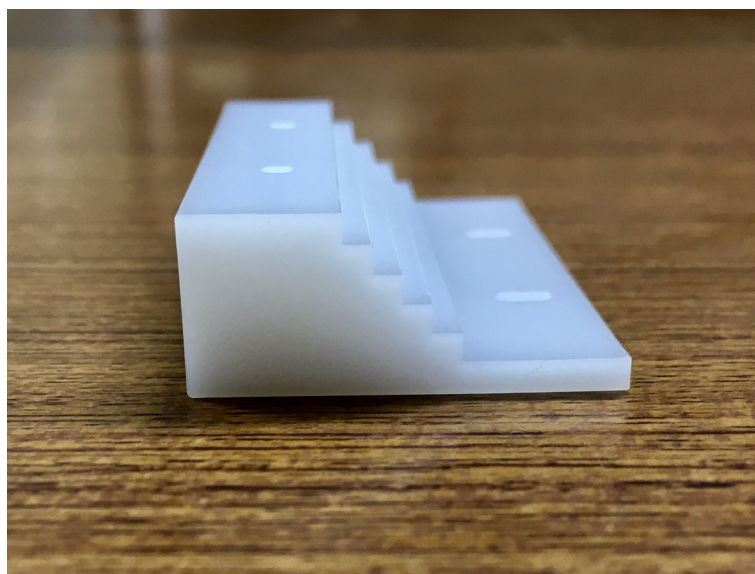


図 5.4: ファイバー固定のためのジグ。POM でできており、50 μm の精度をもつ階段状の形をしている

検出器 A、B におけるレイヤーの定義を図 5.5 に示す。ファイバーの条件を変えた測定の際は、検出器 B の一部のファイバーの表面に黒ペイントを塗布した。

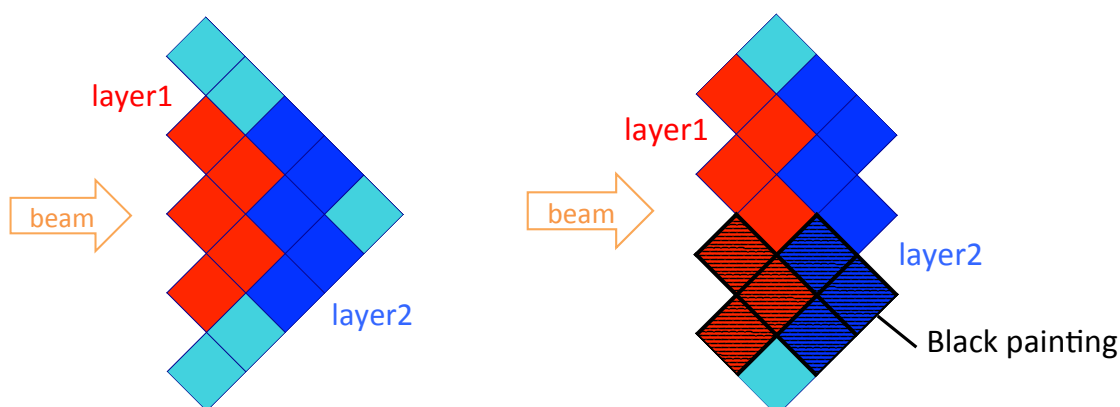


図 5.5: 第 2 回ビームテストに用いた検出器のファイバー構成。左が 30 cm の長さの縦置き検出器 A、右が 1 m の長さのファイバーをもつ横置き検出器 B であり、レイヤー 1、2 をそれぞれ図のように定義する。検出器 B のうち一部のファイバーは黒ペイントがされている

5.2 セットアップ

5.2.1 ビームライン

東北大学電子光理学研究センターのビームラインを図 5.6 に示す。70 MeV の電子線形加速器で加速された電子が、シンクロトロン入射用電子線形加速器、1.3 GeV ブースター・ストレージリング (BST リング) で加速される。本実験では BST リングの先にある GeV ガンマ照射室にて、陽電子ビームの照射を行った。

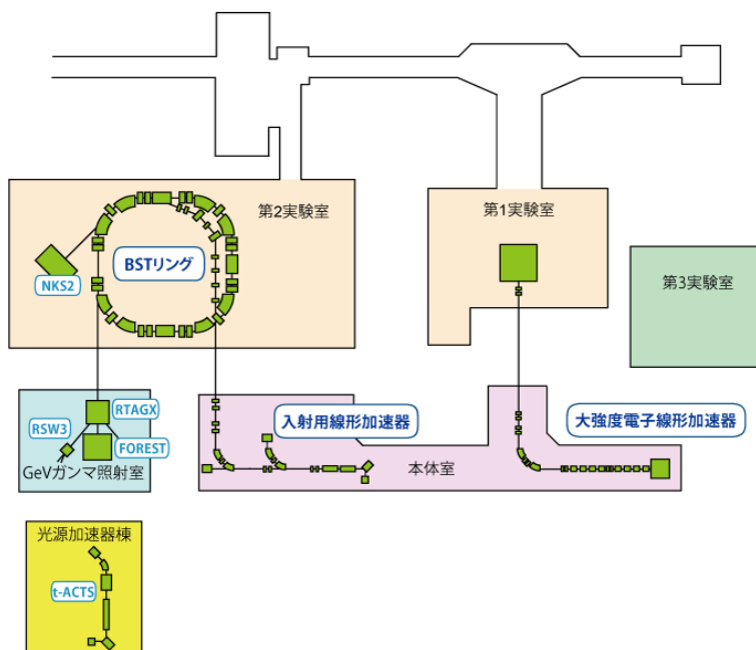


図 5.6: 東北大学電子光理学研究センターのビームライン [52]。GeV ガンマ照射室にて陽電子ビームの照射を行った

表 5.1 に照射した陽電子ビームの性能を示す。ビームのサイズは GeV ガンマ照射室にある三連四極電磁石で集束させることができる。今回は検出器やトリガーシンチのサイズに合わせ、 1σ が 7.5 mm 程度の広がりをもつビームを用いた。典型的には約 17 秒の繰り返しで 10 秒程度のスプリル長をもつ数 kHz のビームを得ることができるため、短い時間で十分なデータを取得することが可能である。

表 5.1: ビーム性能

種類	陽電子連続ビーム
momentum	675 MeV/c
rate	~ 数 kHz
σ_x	~ 7.5 mm
σ_y	~ 7.5 mm

5.2.2 データ収集システム・セットアップ

測定のセットアップのイメージを図 5.7 に示す。また、実際の写真を図 5.8 および図 5.9 に示す。それぞれの測定項目にあわせて準備したアルミまたは POM の固定具により検出器本体を固定しており、データ取得の際は固定具もふくめ全体をブラックシートでおおうことで遮光した。

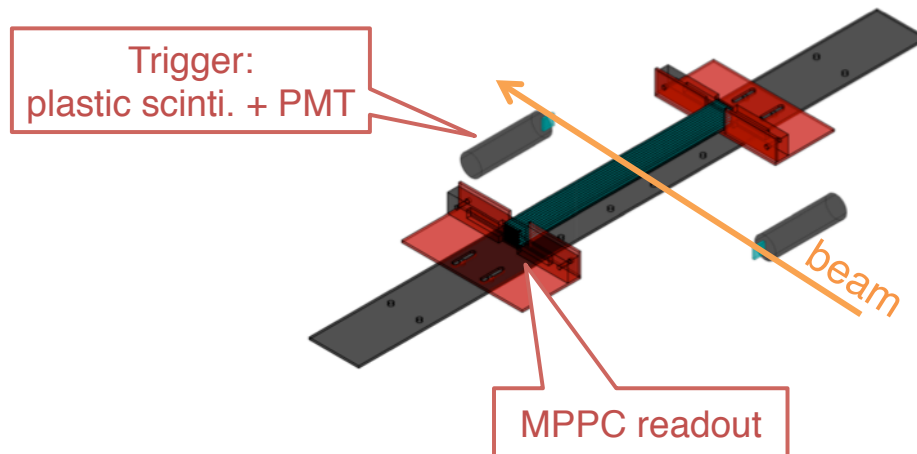
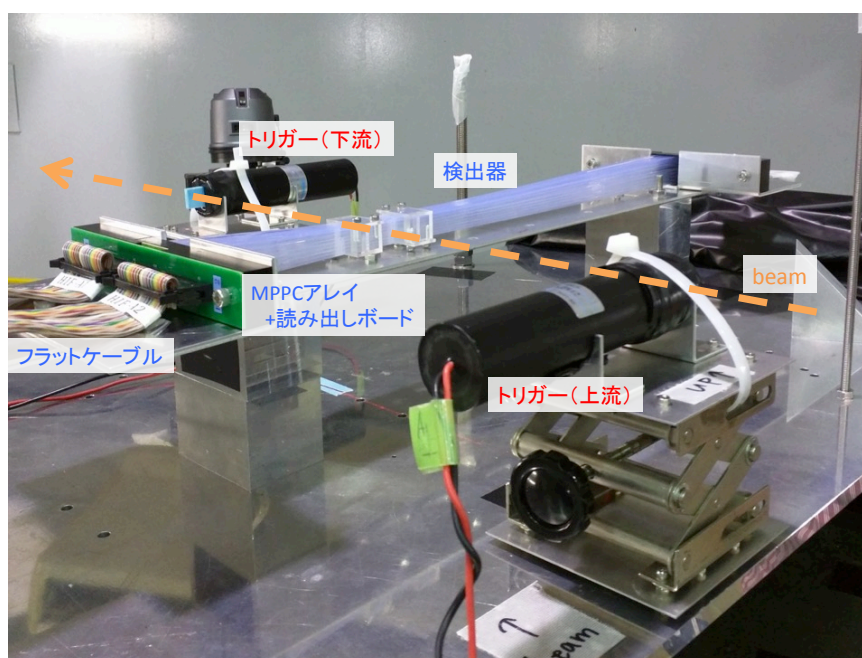


図 5.7: セットアップのイメージ: 横置き。アルミ板のうえに赤で示された L 字型のジグによって検出器を固定し、ビームを照射している



図 5.8: セットアップ写真: 縦置き。POM でできた固定具を用いて検出器全体を支えている。ビーム上流側で固定具にビームが当たらないような設計を行った

図 5.9: セットアップ写真: 横置き¹

ビームラインの写真を図 5.10 に示す。赤い点線で示された部分がビーム中心であり、床からおよそ 160 cm の高さに中心がくるようになっている。ビームに対する検出器およびトリガーとのアライメントは墨出しレーザーを用いて行った。

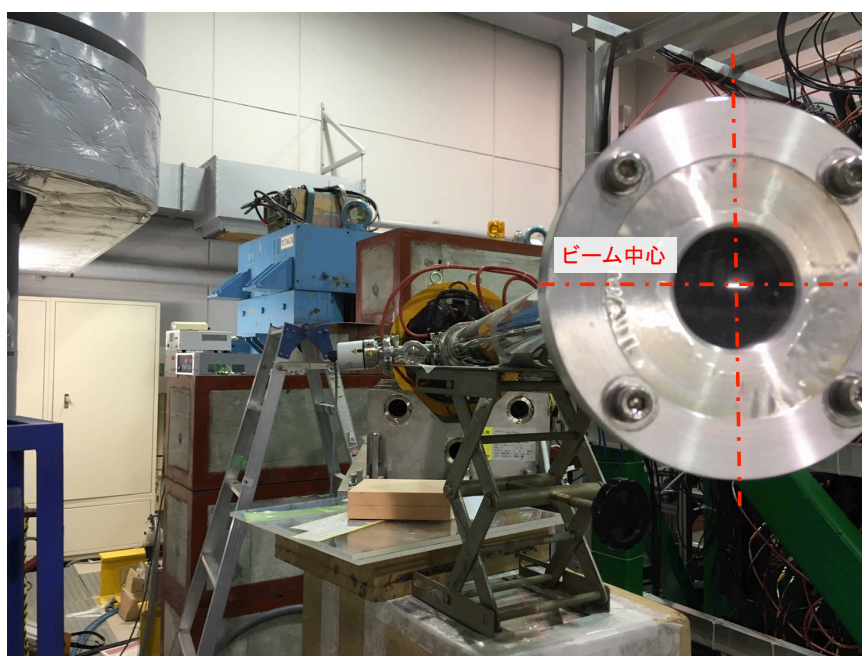


図 5.10: 実際のビームラインの写真。図中の赤い点線がビーム中心を表しており、床から約 160 cm に位置している

¹ 写真は 45° 傾ける前の様子であり、位置分解能などを測定する際はファイバーを軸に回転させた

測定に用いたデータ収集システムを図 5.11, 5.12 に示す。検出器の上流と下流にトリガー取得用の PMT を設置し、それらの coincidence によってトリガーをかけている。MPPC アレイの信号は全長 3 m の flat cable によって EASIROC へ送られ、読み出される。EASIROC はあらかじめ、用いる MPPC アレイに合わせて InputDAC の調整が行われており、MPPC の各チャンネルに $\Delta V \sim 3.3 \text{ V}$ のオーバー電圧をかけた。両読みの場合、EASIROC 2 台を並列で動かしており、トリガーレートが高すぎることによる両端でのイベントずれを防ぐため Preset Scaler によってトリガーレートを $1/3$ に下げている²。用いたモジュールの詳細を表 5.2 に示す。

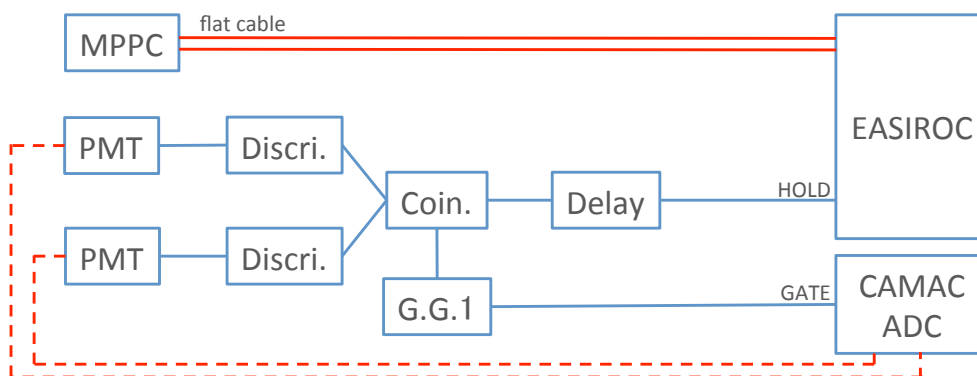


図 5.11: 片読みの場合のデータ収集システム

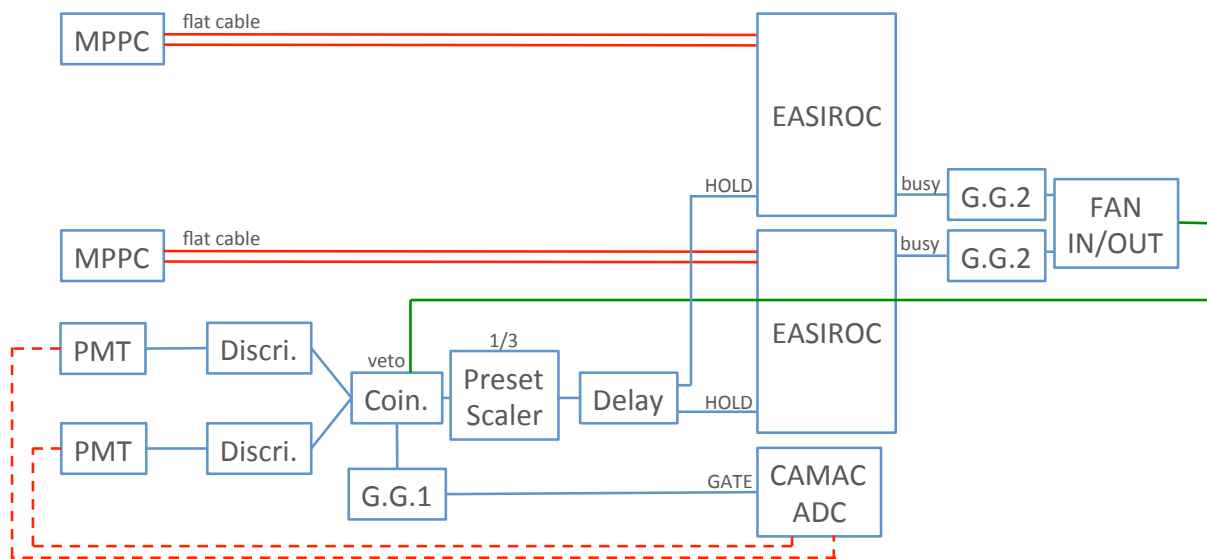


図 5.12: 両読みの場合のデータ収集システム

² 実際、第 2 回の測定の際にはレートが高く、まぶく前はうまくデータを取得できなかった

表 5.2: DAQ に用いたモジュール等一覧

図中の名称	名称・モデル	役割
MPPC	Hamamatsu, S12642-0808PB-50	ファイバーからの光を読み出す光検出器 MPPC アレイ。1ch は 3 mm 角で、 8×8 の 64ch のタイプ。信号は 2 本のフラットケーブルで EASIROC に送られる
PMT	Hamamatsu, H7415	トリガー用プラスチックシンチレータを読み出す光検出器。検出器上流と下流に設置
Discri.	Technoland, 8ch DISCRIMINATOR N-TM405	PMT からの信号をデジタル信号に変換
Coin.	Kaizu, TRIPLE 4-FOLD 1-VETO COINCIDENCE	ふたつのトリガーのコインシデンスを取る
G.G.1	Hoshin, 2ch GATE GENERATOR N014	トリガー信号のコインシデンスから CAMAC ADC のトリガーを作成
G.G.2	Kaizu, DUAL GATE GENERATOR KN1500	EASIROC からの busy 信号のゲートを作成
Preset Scaler	Kaizu, PRESET SCALER 140	EASIROC へはいるトリガーを $1/3$ にまびく
Delay	Technoland, 100MHz CLOCK GENERATOR N-TM203	EASIROC にはいる HOLD 信号のタイミング調整を行う
FAN IN/OUT	LeCroy, LOGIC FAN-IN/FAN-OUT 429A	ふたつの EASIROC の busy 信号の OR をとりコインシデンスの veto 信号を作成
EASIROC	NIM EASIROC	MPPC への電圧共有および信号の読みだし。1 台で 64ch ぶんの MPPC をあつかう
CAMAC ADC	Hoshin, 16ch ADC c009	トリガーの ADC 分布を記録。EASIROC とは同期していない

トリガー取得には PMT (Hamamatsu,H7415) 読み出しのプラスチックシンチレータを用いた。厚さが 3 mm、大きさは $15 \times 15 \text{ mm}^2$ のサイズで、図 5.13 のようにアクリルのライトガイドによって固定されている。CAMAC の ADC で測定したトリガーの典型的な光量分布の例を図 5.14 に示す。Threshold を 150 p.e. に設定したが、実際のビームではそれ以上の十分な光量がでていることがわかる。



図 5.13: トリガーに用いたシンチレータ。厚さは 3 mm で 15×15 mm² の大きさとなっており、アクリルのライトガイドに接着されている

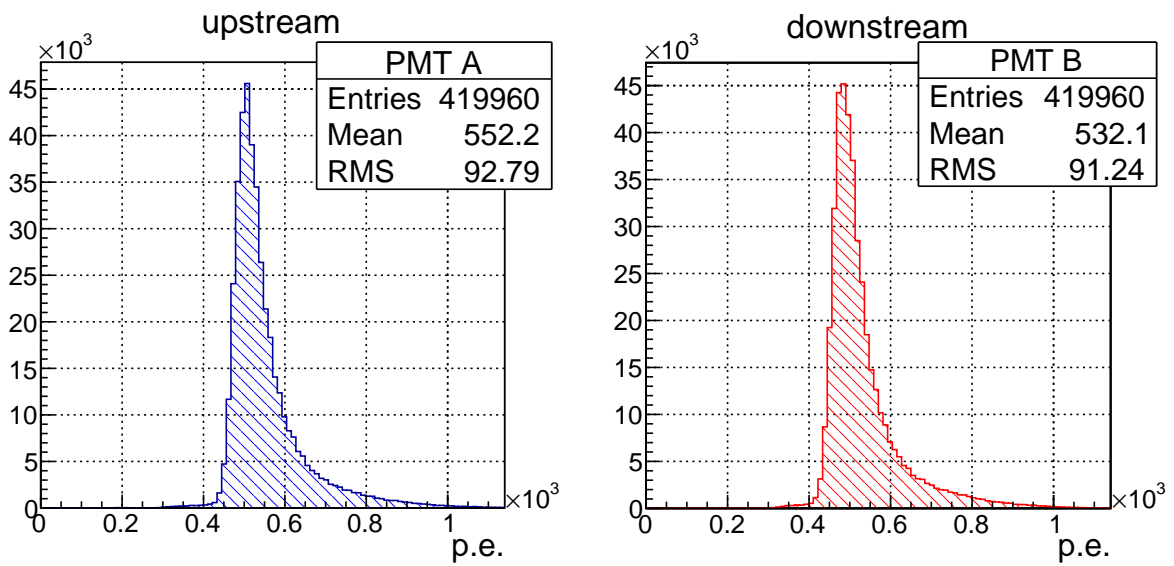


図 5.14: トリガー PMT の典型的な光量分布。A がビーム上流で B が下流の PMT である。トリガーの p.e. への換算も LED を用いキャリブレーションを行った

EASIROC の信号を p.e. への換算するため、LED によるキャリブレーションを行った。毎日の測定開始・終了時に LED を用いて ADC 分布を測定し、図 5.15 のようにガウシアンでフィッティングを行い、ペDESTAL-1p.e. ピーク間の差をゲインとして p.e. を算出した。

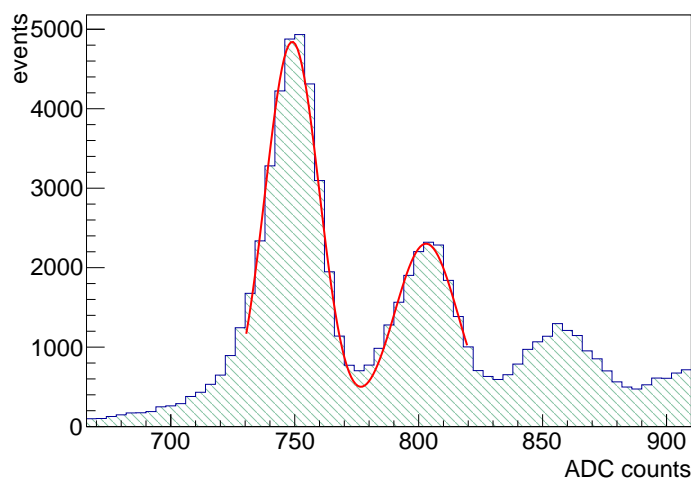


図 5.15: LED で測定したゲインのフィッティング。ペダスタルと 1 p.e. のピーク間隔をゲインとしている

5.3 第 1 回ビームテストの結果

以下では、第 1 回ビームテストの各測定項目に対する具体的な測定方法、結果および考察について述べる。

5.3.1 ファイバーの光量測定

[測定方法]

第 4 章で述べた通り、高い位置分解能に達するためには光量が重要である。まずは、Scintillating fiber の光量について測定を行った。測定を行ったファイバーの種類を以下に示す。single clad は clad が 1 層であるのに対し、double clad は 2 層になっている。

- 1.0 mm 角ファイバー, single clad
- 1.5 mm 角ファイバー, single clad
- 2.0 mm 角ファイバー, single clad
- 1.0 mm 丸ファイバー, single clad
- 1.0 mm 丸ファイバー, double clad
- 2.0 mm 丸ファイバー, double clad

光量の測定方法を図 5.16 に示す。それぞれのファイバーの読み出しから 15 cm のところにビームを照射した際の光量を測定した。測定する光量はファイバーの中心を荷電粒子が通過した際の光量で、これはレイヤーでの合計光量に等しくなると考えられる。次のようにファイバーのクラッドを利用して測定を行った。ファイバーのクラッドはコアの約 2% の厚さであり、たとえば 2 mm

角のファイバーであれば約 40 μm のクラッドをもつ。したがって図 5.16 のファイバー 1、2 とファイバー 6、7 それぞれの間にはクラッドによる不感領域が存在している。この不感領域を利用して、ファイバー 4 以外のファイバーすべてにヒットがなかった場合の光量分布を求める。このような条件でカットすると、ファイバー 4 の中央をビームが通過したイベントをみることができる。ただし今回はトリガーシンチレータのサイズがファイバーに対し十分に大きいため、得られる分布はペDESTALが含まれることが予想される。

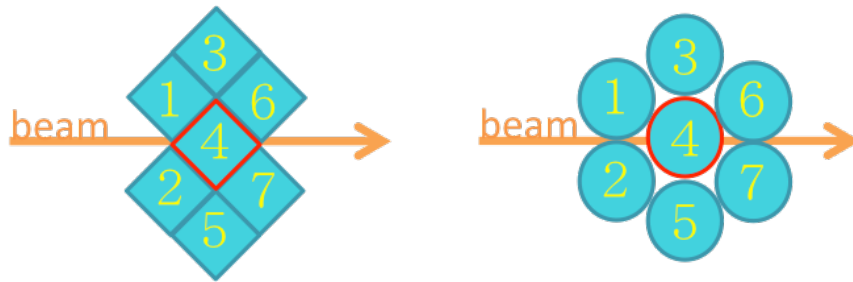


図 5.16: 光量の測定方法。クラッドによる不感領域を利用して、ファイバーの中央をビームが通過したときの光量を測定する

[結果]

角ファイバーと丸ファイバーそれぞれの光量分布は図 5.17 のようになった。ペDESTALに加え、それぞれファイバーの中心を粒子が通過したときのピークが見える。

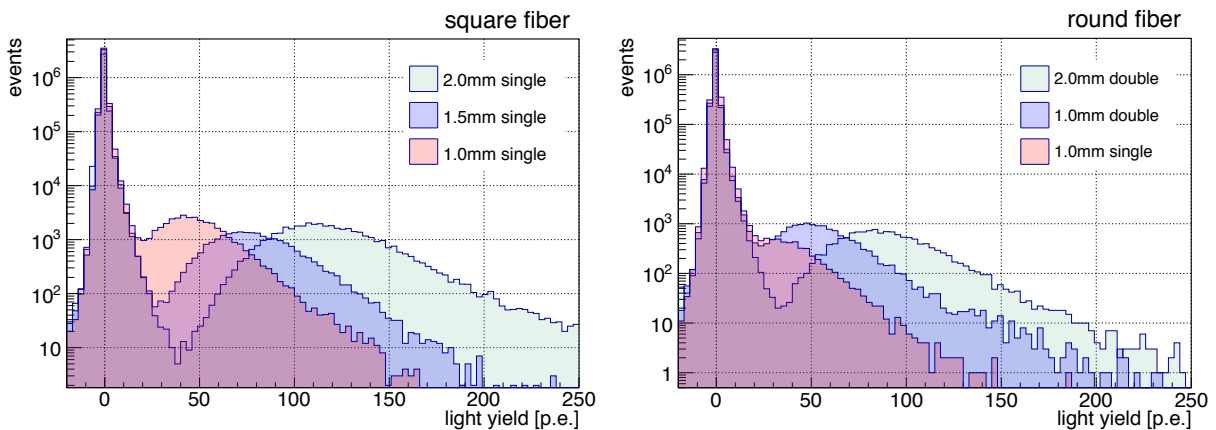


図 5.17: 光量測定の結果。左が角ファイバー、右が丸ファイバーの結果であり、それぞれファイバーの中心を粒子が通過した際の光量を示している

図 5.17 をランダウ分布をガウシアンで畳み込んだ関数 (langaus) でフィットしたときのランダウ分布のピークを光量とした。フィッティングの様子を図 5.18 に示す。それぞれのファイバーにおける光量は表 5.3 のようになった。光量は前述のとおりファイバーの中心を通過した際の光量をさしており、換算光量はクラッドの幅も考慮したうえでの 1 mm あたりの光量を意味する。

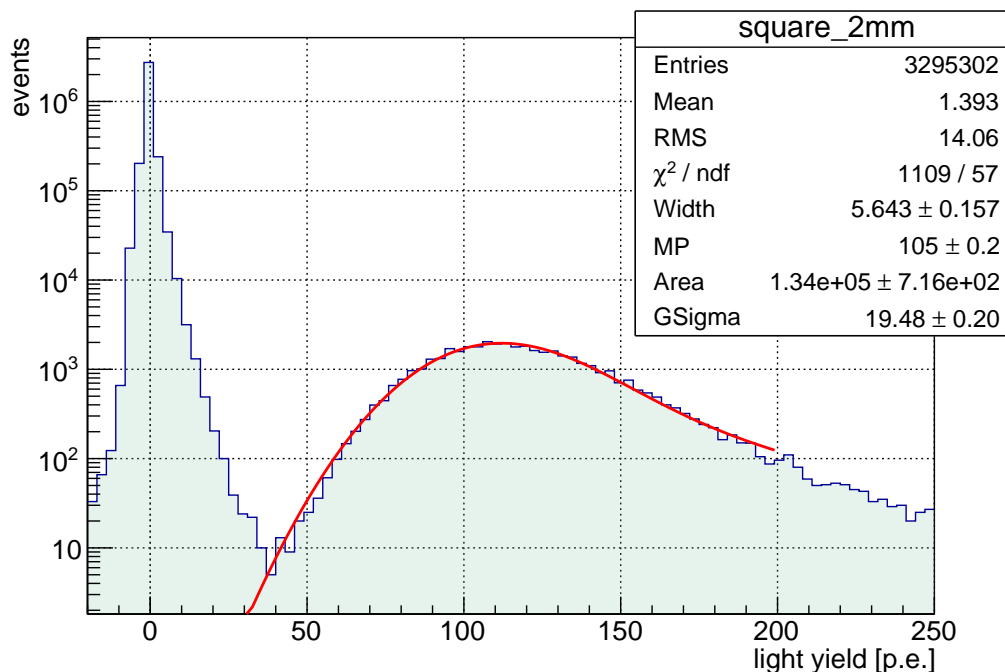


図 5.18: 光量のフィット。図は 2 mm 角ファイバーの光量分布をフィットした様子である。それぞれのファイバーの光量分布をランダウ分布をガウシアンで積み込んだ langaus 関数でフィッティングし、ランダウ分布のピーク (MP) を光量として考えた

表 5.3: 光量測定の結果一覧。換算光量はそれぞれファイバーの太さの 2%の厚さを持つクラッドの幅も考慮したうえでの 1 mm あたりの光量である。角ファイバーは細くなるほど 1 mm あたりの光量が減少している

断面の形	太さ (clad)	光量 [p.e.]	換算光量 [p.e./1 mm]
角ファイバー	1.0 mm (single)	40.0 ± 0.2	29.4 ± 0.1
	1.5 mm (single)	68.4 ± 0.3	33.6 ± 0.2
	2.0 mm (single)	105.0 ± 0.2	38.7 ± 0.1
丸ファイバー	1.0 mm (single)	22.5 ± 0.4	23.4 ± 0.4
	1.0 mm (double)	43.3 ± 0.3	47.0 ± 0.3
	2.0 mm (double)	79.5 ± 0.3	43.2 ± 0.2

角ファイバーおよび丸ファイバーの光量のプロットを図 5.19 に示す。角ファイバーの光量はファイバーの太さに比例しているだけでなく、single clad でも丸ファイバーと比べ十分な光量が得られることが確認できた。2 mm 角ファイバーの光量は、200 μm の位置分解能を得るために必要な光量よりはるかに多いといえる。しかしファイバーが細くなるほど 1 mm あたりの光量がちいさくなっている様子が見られる。また、丸ファイバーにおいては double clad のファイバーは single clad のファイバーに比べ光量が 2 倍近くまで増えることが確認できた。

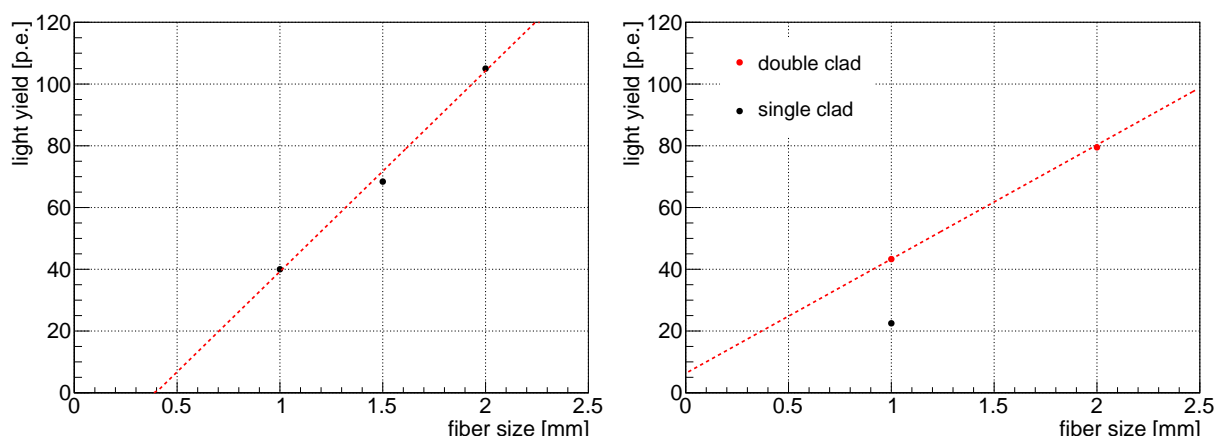


図 5.19: ファイバーの太さと光量の関係。左が角ファイバー、右が丸ファイバーの場合である

[考察]

角ファイバーにおいてファイバーが細くなるほど 1 mm あたりの光量がちいさくなっている理由は、ファイバー表面付近ではシンチレーション光が波長変換材に変換される前にファイバーの外に逃げてしまうことが考えられ、ファイバーが細いほどその影響が大きくなる可能性があるためである。また、丸ファイバーの光量に関しては不明な点が残っている。Kuraray 社のカタログによると Trapping efficiency は角ファイバーの single clad で 4.2% であるのに対し丸ファイバーの double clad は 5.4% であるとされている。これと比べると 2.0 mm の角ファイバーの換算光量に対し、2.0 mm の丸ファイバーの換算光量は小さいと言える。したがって 2.0 mm の丸ファイバーは、アラインメントなどの理由によって正しく中心を通過したときの光量を求めることができず、光量が低くなっている可能性がある。このことに関しては付録 D にて補足する。

この光量測定の系統誤差として考えられる要因は、EASIROC のホールドタイミングと PreAmp の一様性による系統誤差である。LED でのキャリブレーションとビームによる測定ではそれぞれ別の HOLD 信号を用いているため、タイミングのずれによって信号の大きさが変わると光量に換算するときに誤差が生じる。しかし今回は、時定数が 100 ns となる Slow Shaper を用いたため、ホールドタイミングのずれによる ADC カウントの変化はそれほど大きくはないと考えている^[53]。また、PreAmp に関しては第 4 章に述べたとおり光量に換算する際に補正を行っており、これによる誤差が ~2% 程度あると考えられる。

5.3.2 検出器の Hit efficiency

[測定方法]

検出器の性能のひとつとして、1 layer での Hit efficiency を評価する。Hit efficiency の定義は以下の通りである。

$$\text{Hit efficiency}(\%) = \frac{\text{各 layer でヒットのあったイベント数}}{\text{layer0 と layer6 両方にヒットがあったイベント数}} \quad (5.1)$$

レイヤーの定義を図 5.20 に示す。このようにレイヤーをとると、原理的には Hit efficiency は 100% になるが、実際にはファイバーの光量のゆらぎや減衰、MPPC の PDE などの影響で Inefficiency があらわれると予想される。

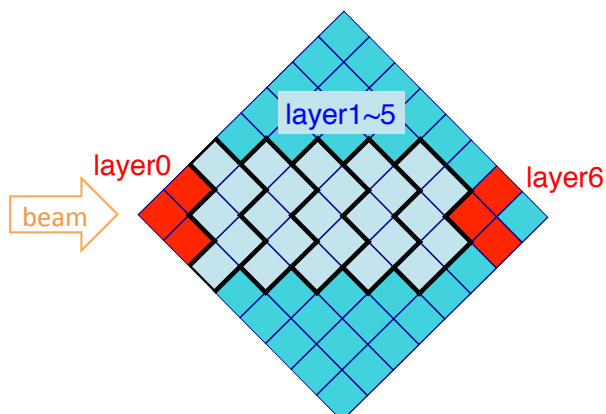


図 5.20: Hit efficiency 測定時のレイヤーの定義。layer0 と layer6 をトリガーとし、layer1~5 の Hit efficiency を測定した

Hit efficiency の測定方法は、以下の通りである。layer0 および layer6 をトリガーとし、それぞれレイヤーの合計光量が 10 p.e. のときを Threshold とした。このとき両方のトリガーにヒットがあった場合の layer1 ~ 5 の光量を測定し、layer1~5 の Hit threshold をレイヤーの合計光量が 4~20 p.e. と変化させたときの Hit efficiency を求めた。

[結果]

layer1~5 の各レイヤーの合計光量は粒子の通過した位置によらず一定であることが期待される。これはレイヤーの厚さ、すなわち粒子が通過した path length が 1 本のファイバーの中心を通過した際の path length と一致する構造になっているからである。layer1 の光量分布の例を図 5.21 に示す。レイヤーの合計光量は 100 p.e. 付近にピークを持ち、光量測定の結果と一致していることがわかる。

また、各レイヤーの Hit threshold をレイヤーの合計光量が 4 ~ 20 p.e. となるように変化させたときの、layer1~5 の Hit efficiency を図 5.22 に示す。Threshold が 10 p.e. 以下のとき、すべてのレイヤーで Hit efficiency は 99.97% 以上であり、Threshold を変化させても大きく変わらず、非常に高い値を保つことがわかった。

[考察]

Hit efficiency は Threshold を変化させても 99.9% 以上であったため、十分な値であると考えられる。図 5.21 の光量は 100 p.e. 程度の期待値を持つため Threshold 以下の光量になる確率は十分に小さく、光量のゆらぎによって Inefficiency を説明することはむずかしい。したがってファイバーの形状や MPPC アレイの PDE などの問題が原因で Inefficiency となっていると考えている。

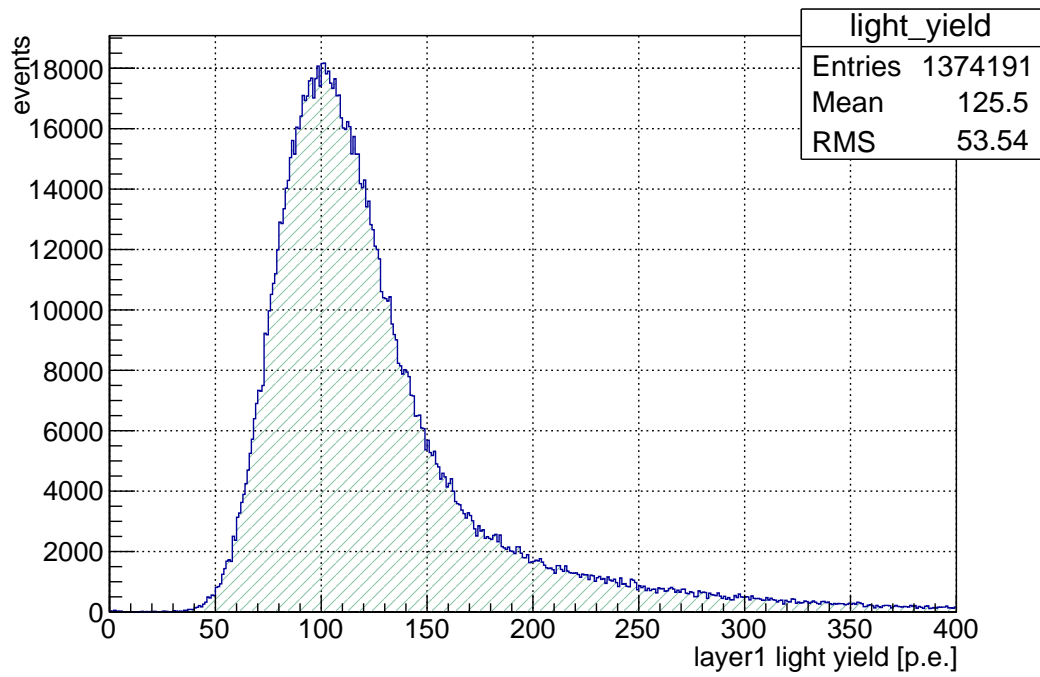


図 5.21: layer1 の光量分布。layer0、6 に 10 p.e. 以上のヒットがあった場合の光量である。100 p.e. 付近にピークを持ち、これは光量測定の結果と一致する

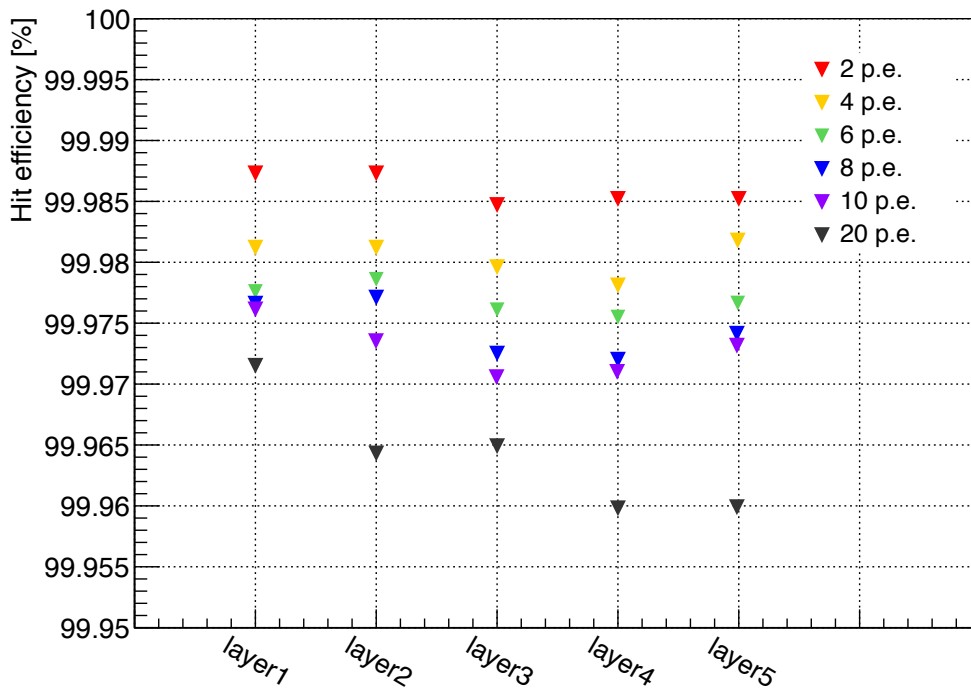


図 5.22: 検出器の Hit efficiency。Threshold を変化させても 99.9%以上の高い efficiency を保っている

5.3.3 位置分解能の測定

[測定方法]

ここではまず、位置の具体的な再構成方法について述べる。検出器の構造より基本的には各レイヤーに2つのMPPCのヒットがあることになる。しかし、図5.23のように検出器にはファイバーのクラッドによる不感領域が存在している。この領域を粒子が通過すると、MPPCがひとつしか光らない場合(以降1Hitと呼ぶ)がある。1Hitの場合は光量比を用いることができないが、このような場合はファイバーの不感領域の幅を通ったと考え、120 μm 程度のところを通過したことになる。今回要求される位置分解能に対し十分に小さいことがわかっているため、以下では各レイヤーにおいて2Hitsをのこしたイベントに対し再構成された位置の差をガウシアンでフィットして得られる σ を $1/\sqrt{2}$ で割った値を位置分解能として採用する。図5.24に、1Hitおよび2Hitsでそれぞれ再構成された位置の例を示す。1Hitと2Hitsの具体的なイベント数に関しては後述する。

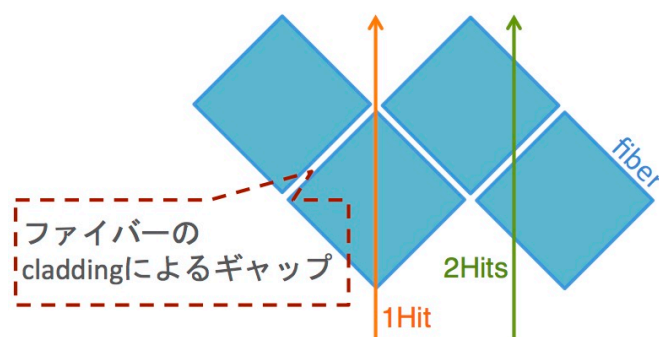


図 5.23: ファイバーのクラッドによる不感領域。この隙間を粒子が通ると、1本のファイバーしか光らないため光量比をとることができなくなり1Hitイベントとなる

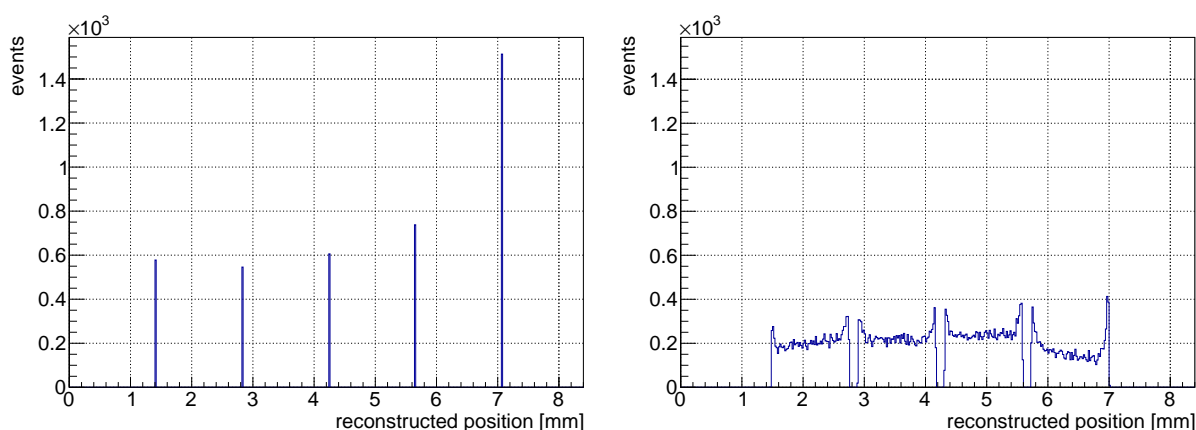


図 5.24: 1Hit (左) と 2Hits (右) の場合の再構成された位置。1Hit のとき右側の方がイベント数が多いのは、ファイバー同士のアライメント精度が悪くなっていることによってファイバー間の隙間が一樣でないことが原因であると考えられる。また、このとき 2Hits のイベント数から予想されるビームプロファイルは一樣であることから、ビームと検出器の相対アライメントは大きくずれてはいないと考えられる

位置を再構成するにあたり、以下の補正を行った。

PDE 補正

MPPC アレイにおける各チャンネルの PDE がばらつくことによって生じる光量のばらつきを補正する。第 4 章に述べたように今回用いた 2 つの MPPC アレイにおける相対的な PDE を求め、補正を行った³。

Hit Cluster 補正

MPPC のノイズにより、位置が誤ったところに再構成されるのを防ぐため、各レイヤーで最大光量を観測したチャンネルの両隣のみを位置の再構成に用いるようにした。

Pile up イベントのカット

EASIROC のペDESTAL はトリガーのレートに依存する場合がある。Function Generator によって Hold 信号をいれ、レートを変化させた場合の EASIROC のペDESTAL の例を図 5.25 に示す。ペDESTAL は ADC 分布をガウシアンでフィットしたピークの位置で求めることとする。ペDESTAL の値自身はそれぞれチャンネルによって異なるが、いずれも 5 kHz を超えたあたりから下がるのがわかる。このような問題は宇宙線でのテストや LED ので測定でクロックによるトリガーを用いるテストの場合には考慮する必要はないが、ランダムにレートの高いトリガーがやってくるビームテストの際には問題となる。この場合、チップ内すべてのチャンネル共通で降下が起こるので、ペDESTAL がピークより 2σ 以上低いところにくるチャンネルが含まれているイベントをカットすることで Pile up を起こしている可能性のあるものを排除した。

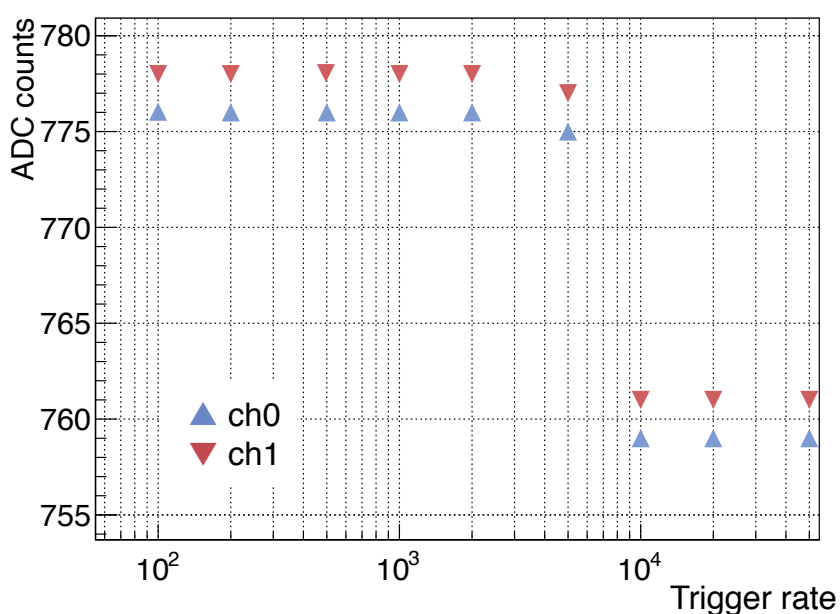


図 5.25: ペDESTAL のレート依存性。5 kHz から下がり始め、10 kHz を超えると急に低下することが確認された

³ 第 1 回の測定においてはすべて MPPC1 を用いている

MPPC の Hit threshold は、ダークノイズを実測することにより決定した。MPPC のダークノイズの ADC 分布を図 5.26 に示す。このとき信号が 1.5 p.e. をこえる確率は 5% 程度であることから、1.5 p.e. を Hit threshold とした。

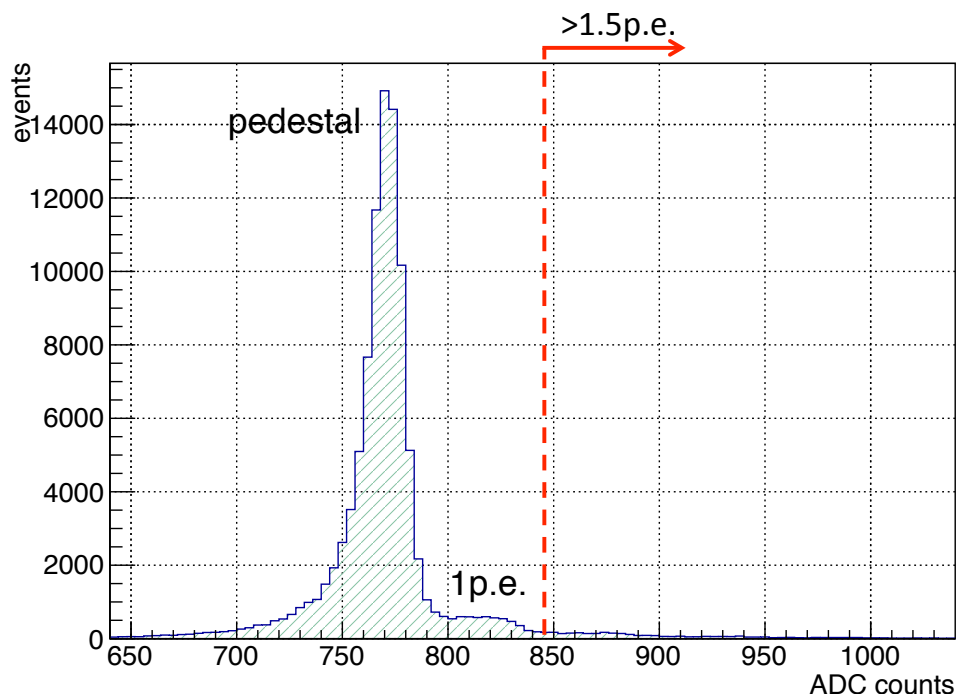


図 5.26: MPPC のダークノイズ。Threshold を 1.5 p.e. とするとそれ以上になる確率は約 5% である

[結果]

MPPC 読み出しから 15 cm のところに 0° でビームを照射させた場合の結果を以下に示す。まずはじめに、ひとつのレイヤーに 8 p.e. 以上の光量があったときをヒットとしたとき、各レイヤーで最大光量をもつチャンネルの光量分布を図 5.27 に示す。langaus 関数でフィットしたランダウ分布のピークを光量と考えた。78 p.e. にピークを持つ分布であることがわかる。

また、再構成された位置および 2 レイヤーで再構成された位置の差を図 5.28 に示す。2 レイヤーでの位置の差をガウシアンでフィッティングした結果は σ が $216.1 \pm 1.0 \mu\text{m}$ であり、1 レイヤーでの位置分解能は 2 レイヤーの位置の差の $1/\sqrt{2}$ と考えることができるため、位置分解能に換算すると $152.8 \pm 0.7 \mu\text{m}$ となる。

さらに、layer1 および layer2 の相関を図 5.29 に示す。おおきなバイアスなく位置の再構成ができていていることがわかる。

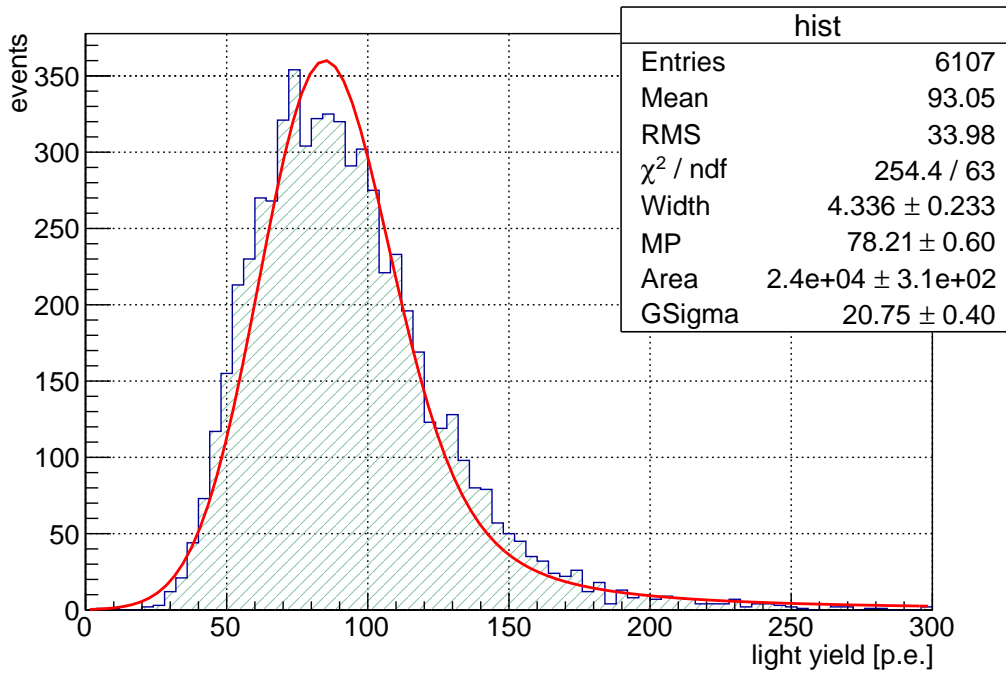


図 5.27: ヒットがあったレイヤーのなかで最大光量をもつチャンネルの光量分布。langaus 関数でフィットしたときのランダウ分布のピーク (MP) を光量とし、78 p.e. の光量を得た。レイヤー中のひとつのチャンネルの光量であるため、レイヤーの合計光量より小さくなっている

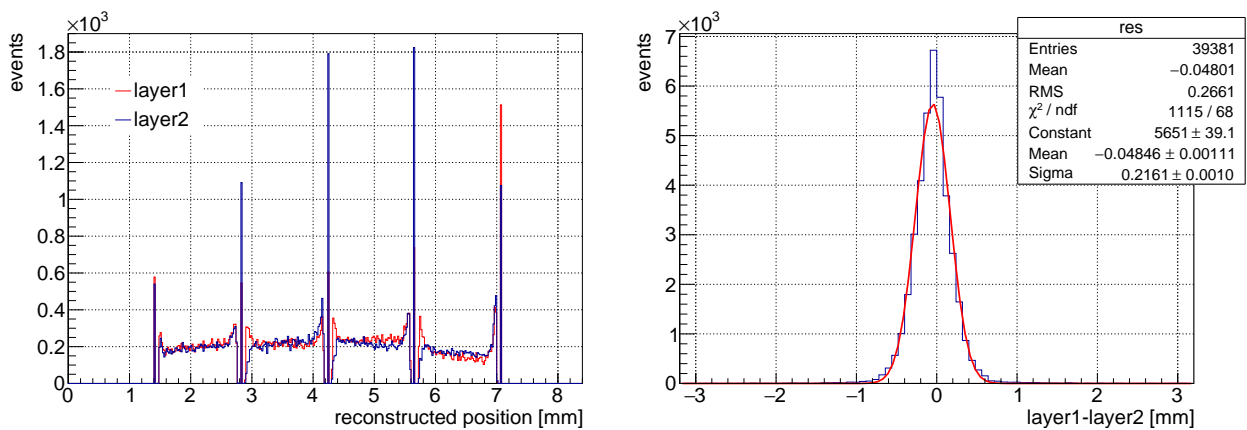


図 5.28: 垂直入射の場合の再構成された位置 (左) と 2 レイヤーの差 (右): 第 1 回の結果。再構成された位置の 2Hits はフラットな分布となっている。2 レイヤーの位置の差が $216.1 \pm 1.0 \mu\text{m}$ の σ をもつので、位置分解能はこの差を $1/\sqrt{2}$ 倍した $152.8 \pm 0.7 \mu\text{m}$ となる

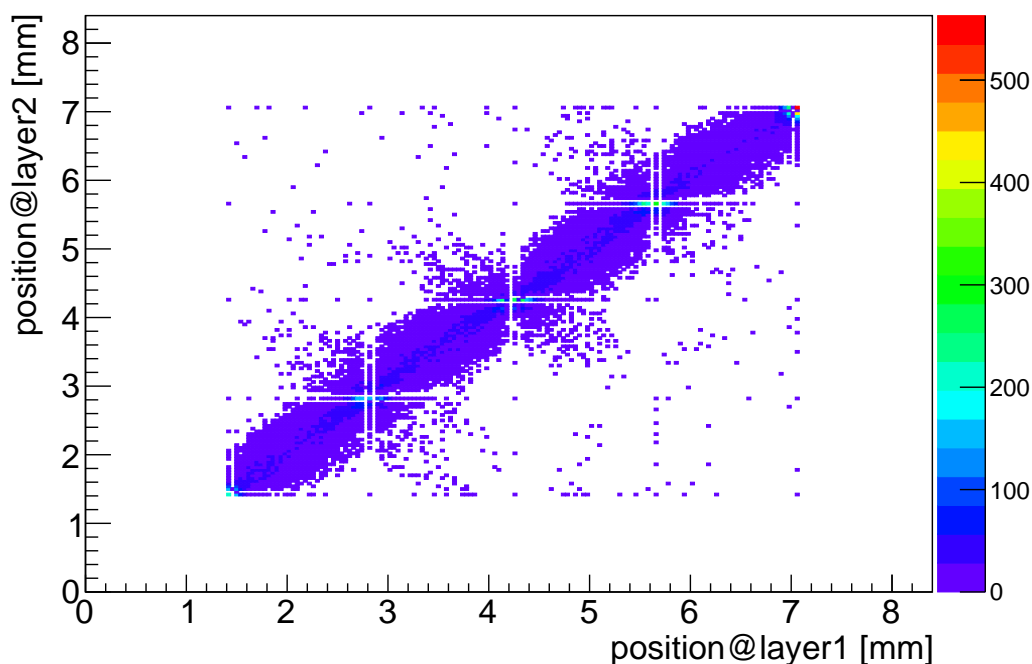


図 5.29: layer1 と layer2 の相関: 第 1 回の結果。正の相関をもっていることがわかる

[考察]

図 5.28 の再構成された位置において 1Hit のまわりでエントリーが増加しているのは、ファイバー同士のオプティカルクロストークなどによって 1Hit のイベントが 2Hits に見える影響および、角ファイバーは完全な正方形ではなく角の部分が張った形状になっているというファイバーの形状に起因するものであると考えている。また、図 5.29 で相関のない図中の左上や右下の位置に再構成されたものは、散乱によって途中で角度が変わってしまったものや、デルタ線を生じたイベントなどであると考えられる。

測定した位置分解能を評価するため、垂直入射における再構成された位置および 2 レイヤーでの位置の差のモンテカルロシミュレーションを行った。シミュレーションは Geant4 によって行い、ファイバーの形状は実際の形状をなるべく再現するよう側面のへこんだかたちを採用した。ファイバーの形状に関しては付録 B に補足する。

読み出しから 15 cm の位置の場合を図 5.30 に示す。光量測定の結果から、15 cm の位置でのレイヤーの合計光量は ~ 100 p.e. 程度であるので、第 4 章の式 4.2 や式 4.3 から、光量のゆらぎの影響のみを考えると原理上は $70 \mu\text{m}$ 程度の位置分解能がでることが見込まれる。この光量をもとにシミュレーションを行ったところ、15 cm の位置の読み出しでは 2 レイヤーの差は $131.7 \pm 1.7 \mu\text{m}$ 、位置分解能は $93.1 \pm 1.2 \mu\text{m}$ 程度であるという結果となった。計算値との差は主にファイバーの形状からくるものであると考えている。

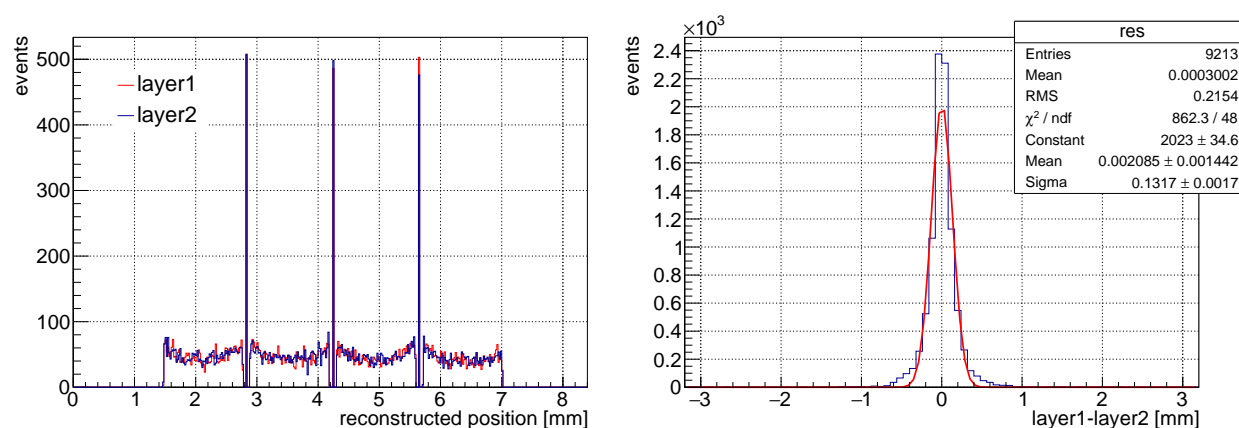


図 5.30: モンテカルロシミュレーションにより再構成された位置 (左) と 2 レイヤーの差 (右): 15 cm の場合。シミュレーションでも測定と同様に 1Hit のまわりのイベント数が増えていることから、これはファイバーの形状による影響であると考えている

このシミュレーション結果は実際に測定された位置分解能と大きく離れていることがわかる。シミュレーションに含まれていないものとしては、MPPC のクロストークやファイバーのオプティカルクロストーク、フラットケーブルのノイズなどが挙げられる。MPPC のクロストークはピクセル間で起こるクロストークであり、これが頻繁に起こることで正しい光量を測定することができなくなってしまうため、位置分解能が悪化すると考えられる。ファイバーのオプティカルクロストークに関しては後述する。また、ビーム照射部分のファイバーのアラインメントがずれることによる影響や MPPC およびファイバーの一様性が保たれていないことでチャンネルごとに得られる光量が変化してしまうことなども原因で位置分解能が悪化していると考えられる。またフラットケーブルはノイズがのりやすく、さらに今回は 3 m の長さのケーブルを用いているため、この影響は大きいと考えられる。他にもデルタ線は入射粒子に対して 90° に現れることが多く位置分解能を悪化させる原因となりうるが、この効果に関してはシミュレーションにすでにふくまれている。

5.4 第 2 回ビームテストの結果

以下では、第 2 回ビームテストの各測定項目に対する具体的な測定方法、結果および考察について述べる。

5.4.1 位置分解能の測定

[測定方法]

まずは第 1 回同様に MPPC 読み出しから 15 cm のところに 0° でビームを照射させた場合の位置分解能を測定する。位置再構成の方法は第 1 回ビームテストの結果で述べたとおりである。

[結果]

再構成された位置および 2 レイヤーでの位置の差を図 5.31 に、layer1 および layer2 の相関を図 5.32 に示す。第 1 回よりも統計が少ないが、同様の分布を得ることができた。ガウシアンでフィットした結果、2 レイヤーでの位置の差の σ は $211.6 \pm 2.3 \mu\text{m}$ であり、位置分解能は $149.6 \pm 1.6 \mu\text{m}$ となる。この結果は第 1 回の結果と一致している。

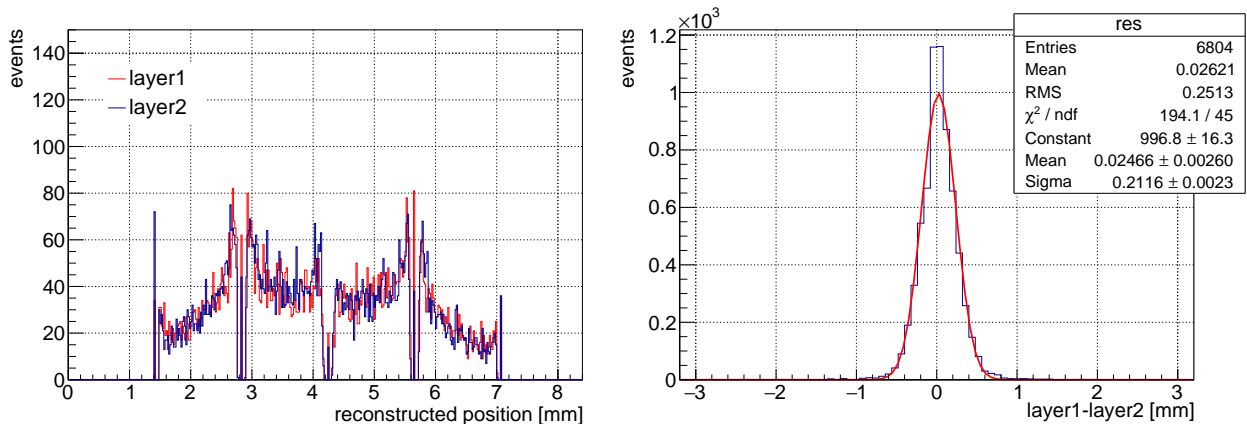


図 5.31: 垂直入射の場合の再構成された位置 (左) と 2 レイヤーの差 (右): 第 2 回の結果。位置分解能は $149.6 \pm 1.6 \mu\text{m}$ となった

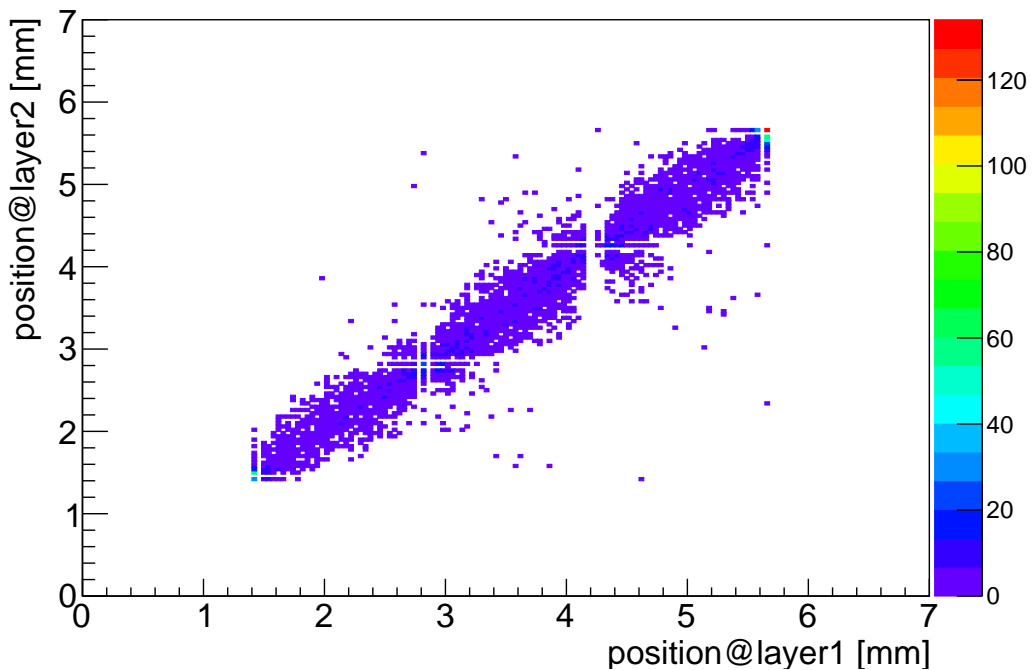


図 5.32: layer1 と layer2 の相関: 第 2 回の結果。第 1 回と同様の分布となっている

[考察]

第 2 回では第 1 回とファイバーのアラインメント方法を変えて測定を行ったが、位置分解能の大きな改善はみられなかった。いずれの方法でもファイバーのアラインメント精度に大きな差がなかった可能性がある。しかしここでひとつ注目しておきたいのが、1Hit の数である。ファイバーのジオメトリから期待される 1Hit のイベント数は全体の 8% 程度であるという予想に対し、測定の結果 1Hit の数は第 1 回が全体の約 6%、第 2 回が約 2% という結果になり、いずれも予想より少ない結果となった。1Hit の数が変化する原因はふたつ考えられる。ひとつはビーム照射部分のファイバーアラインメントの正確さによるものであり、もうひとつはファイバーのオプティカルクロストークによるものである。前者はファイバーの太さのばらつきなどによって部分的に隙間があく場合が考えられる。しかしこの場合 1Hit の数は予想される 8% よりも多くなると考えられる。したがって 1Hit が少なくなる主な原因は後者であり、オプティカルクロストークがあることで本来 Hit のなかったファイバーに光がもれてしまったため、1Hit が 2Hits として再構成されたと予想している。第 2 回の測定は固定用のジグに用いた白い POM での反射などが理由でクロストークが増加し 1Hit が極端に減少したと考えられるが、明確な原因は不明である。後の測定で、クロストークを削減した場合の 1Hit についてもう一度考察する。

5.4.2 読み出しまでの距離と位置分解能の関係

[測定方法]

横置き検出器 B を用いて読み出しまでの距離を変えたときの位置分解能を測定した。図 5.33 に検出器に対するビームの照射位置を示す。3 箇所ビームを照射し両側から読み出すことで 15、30、50、70、85 cm の位置の分解能を測定した。また、両読みで測定を行うことで、合計光量を用いた位置分解能を評価した。

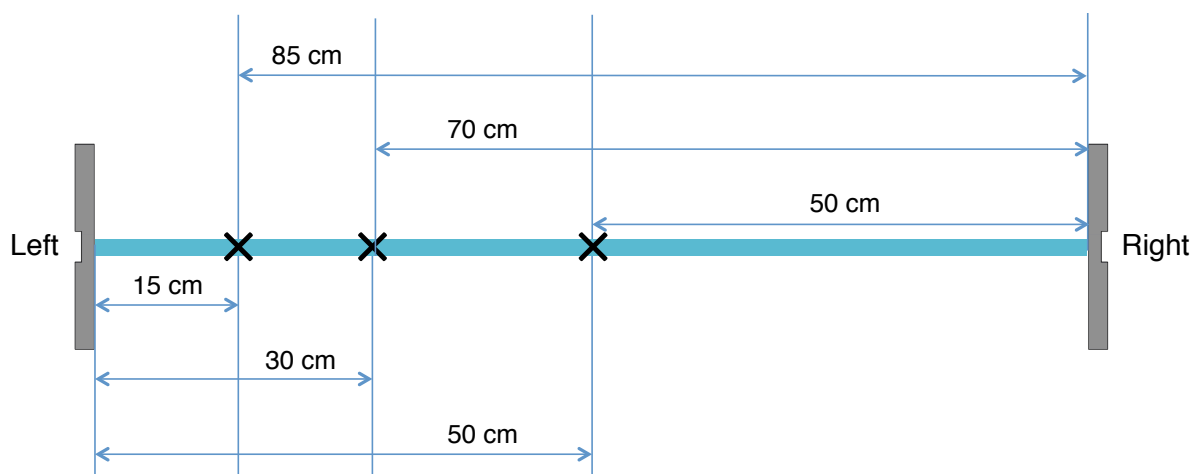


図 5.33: 検出器 B のビーム照射位置。3 箇所に照射し両側から読み出すことで 15、30、50、70、85 cm の位置の分解能を測定した。用いた MPPC アレイは左が MPPC1、右が MPPC2 である

[結果]

片読みのおきに MPPC による読み出しまでの距離を変えた場合の位置分解能の変化を図 5.34 に、両読みのおきの結果を図 5.35 に、位置分解能の一覧を表 5.4 に示す。図 5.34 より、位置分解能は読み出しまでの距離が遠くなるほど悪化することが確認できる。これは、距離が遠くなるほど光量の減衰が大きくなるためであると考えられる。また、50 cm の位置での分解能は左から読んだ場合も右から読んだ場合も、それぞれ誤差の範囲で一致する結果を得た。さらに、図 5.35 に示すように両読みにした場合は片読みの場合と比べ分解能が非常に良くなる。これは両端での光量を合計すると、全体の光量は片読みの場合の 2 倍ちかくに増えるためであると考えられる。50 cm の位置で両読みをした場合の位置分解能が最も良くなっているが、他の位置でも誤差の範囲で同様の位置分解能を得ている。

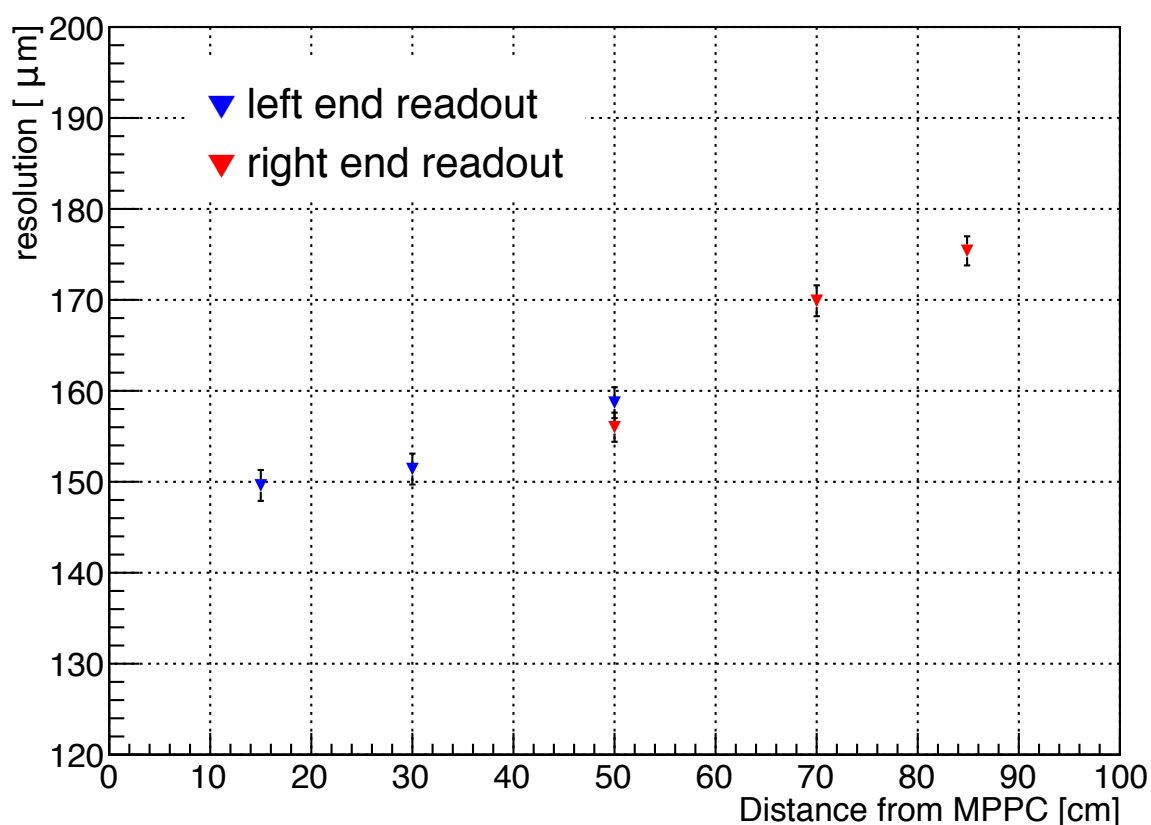


図 5.34: 読み出しまでの距離を変化させたときの位置分解能。青が左の MPPC から読み出した場合、赤が右の MPPC から読み出した場合であり、50 cm の位置での位置分解能は左右とも誤差の範囲で一致している。読み出しまでの距離が遠くなるほど光量の減衰が大きくなるため、位置分解能が悪化する様子が見られる

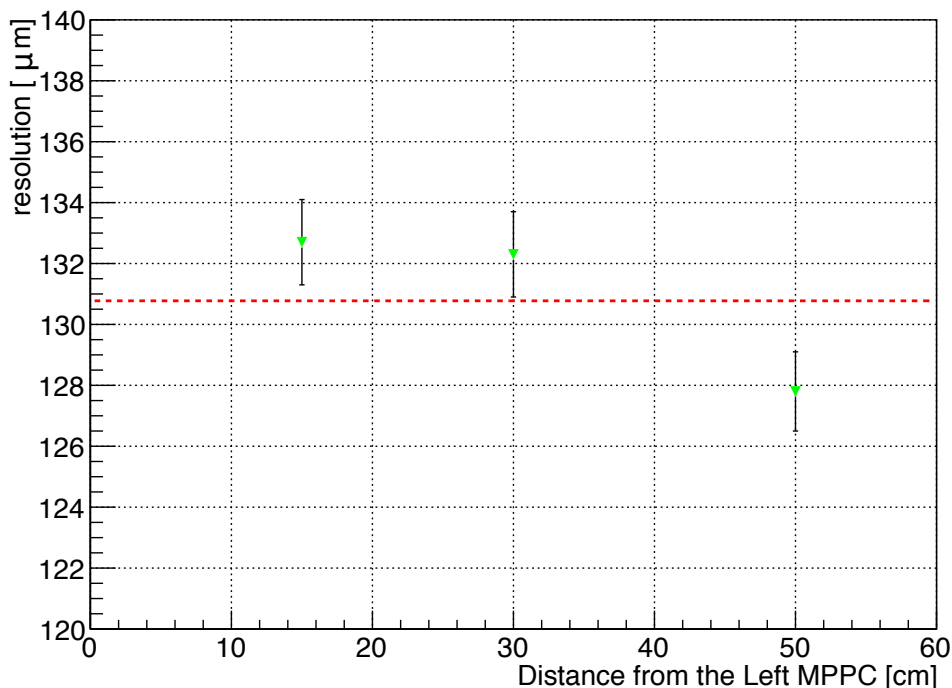


図 5.35: 両読みの際の位置分解能。横軸は左の MPPC からの距離である。50 cm の場合が最も良いが、誤差の範囲内であるといえる

表 5.4: 位置分解能の一覧 (単位は μm)

	読み出しまでの距離 [cm]				
	15	30	50	70	85
left end readout	149.6±1.7	151.4±1.7	158.7±1.7	-	-
right end readout	-	-	156.0±1.6	169.9±1.7	175.3±1.6
both ends readout	132.7±1.4	132.4±1.4	127.8±1.3	-	-

[考察]

読み出しまでの距離を変化させたときの位置分解能は、理想的な環境であればファイバーの光量、すなわち減衰長に基づき変化する。図 5.36 に、減衰長から期待される位置分解能の変化と図 5.34 に示した測定結果を比較する。減衰長の $-\frac{1}{2}$ 乗をもとにした以下の関数でフィットした。 N_0 は読み出しまでの距離が 0 のときに減衰長から期待される光量で、 $\Lambda(x)$ は図 4.8 で求めた減衰の関数、 R はファイバー間隔であり、今の場合 $\sqrt{2}$ となる。

$$F = \{p_0(N_0 \cdot \Lambda(x))\}^{-\frac{1}{2}} R + p_1 \tag{5.2}$$

いま、 p_0 は式 4.3 に表される位置分解能の、光量のゆらぎ \sqrt{N} に対する係数を、 p_1 は光量から予想される理想的な位置分解能からの差を表していると考えられる。関数の詳細な最適化は行って

いないが、おおよそ光量の減衰から理解できる位置分解能となっていることがわかる。

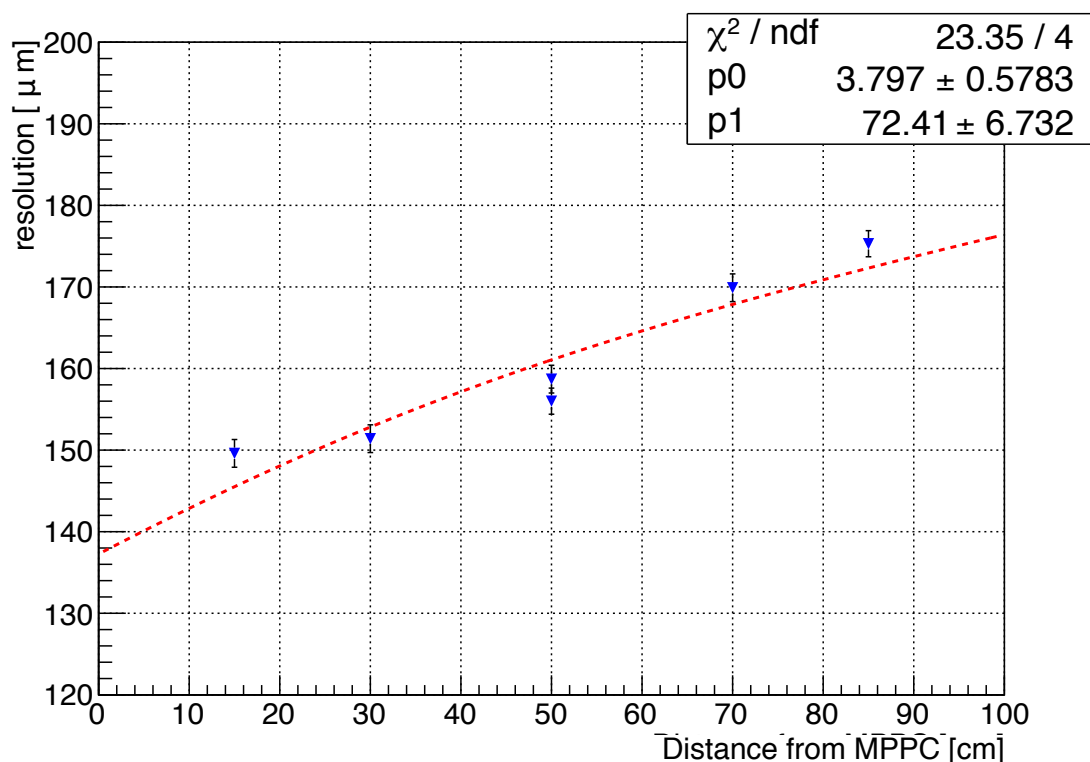


図 5.36: 期待される位置分解能の変化と結果の比較。図中の点線はファイバーの減衰長にもとづく光量の変化から期待される位置分解能の変化である。読み出しまでの距離が遠くなった場合の位置分解能の悪化は、光量の減少によるものであると考えられる

5.4.3 ファイバーの条件を変えた測定

[測定方法]

ここでは、ファイバーの表面に反射材、黒ペイント、オプティカルセメントを塗ることによって条件を変えたときに、光量分布、クロストークおよび位置分解能の3つの項目がどのように変化するかについて述べる。

ファイバー同士でのオプティカルクロストークは、位置分解能を悪化させる原因のひとつであると考えられる。図 5.37 に示すように、ファイバーのシンチレーション光が隣のファイバーで波長変換され MPPC まで届いた場合、オプティカルクロストークとなる。クロストークが起こった場合、ヒットのあったファイバーの光量に比例するかたちで隣のファイバーの光量が増加すると考えられる。

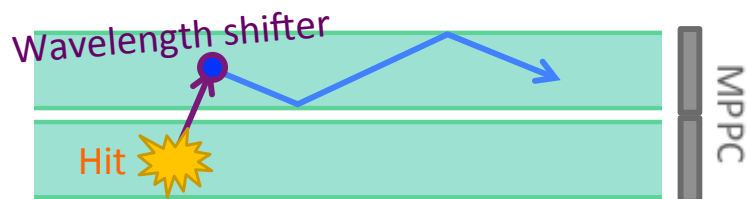


図 5.37: クロストークの概念図。ファイバーのシンチレーション光が隣のファイバーで波長変換され MPPC まで届くとオプティカルクロストークが起こる

このようなクロストークをおさえる手段として、反射材や黒ペイントを塗布することが考えられる。ここでは 5 種のファイバーを用意し、光量およびクロストークの変化を測定した。ファイバーの断面のイメージを図 5.38 に示す。そのままの状態のファイバーに黒スプレーでペイントをしたもの、白い反射材を塗ったもの、反射材の上からさらに黒ペイントをしたものおよび、オプティカルセメントを塗ったものを用意した。

1. normal fiber
2. normal fiber + black painting
3. reflector
4. reflector + black painting
5. optical cement

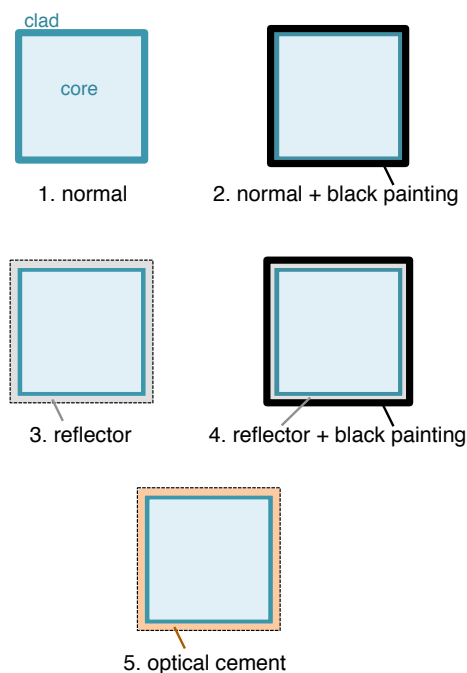


図 5.38: 測定に用いたファイバーの断面イメージ。4 は反射材の上からさらに黒ペイントを行っている

[結果]

まず、それぞれのファイバーにおける光量分布を確認する。layer1、2 の両方でヒットがあった場合にレイヤー内で最大光量を持つチャンネルの光量分布を図 5.39 に示す。レイヤーの合計光量が 8 p.e. 以上となることをヒットと考えた。normal ファイバーに対し、反射材を塗った場合とオプティカルセメントを塗った場合は光量が減っていることがわかる。

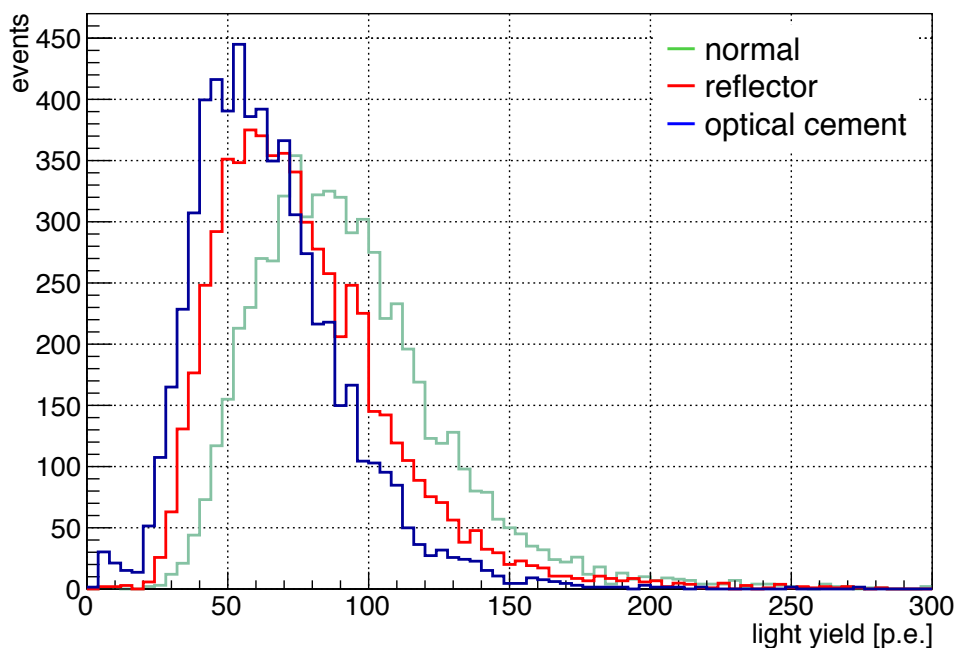


図 5.39: ヒットのあったレイヤー内で最大の光量を持つチャンネルの光量分布。ヒストグラムはイベント数で規格化している。反射材やオプティカルセメントによって光量が減少している

図 5.40 に、黒ペイントを施した場合の光量分布を、黒ペイントがない場合と比較する。normal fiber の場合も反射材を塗った場合も、黒ペイントがあるほうが光量が少なくなることがわかる。

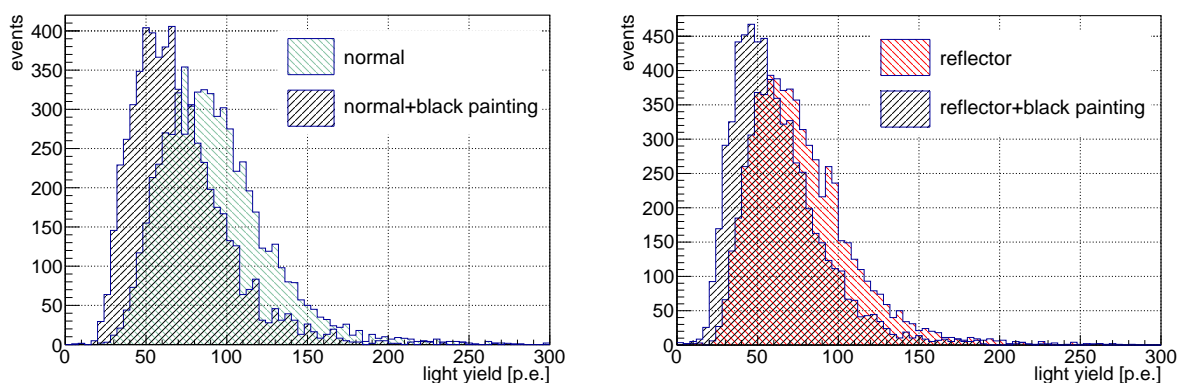


図 5.40: 黒ペイントがある場合の光量分布: 左が normal fiber に黒ペイントを塗った場合で、右が反射材をぬった上から黒ペイントを塗った場合の光量分布である

以上それぞれの光量分布を landau+gaussian 関数でフィットし、ランダウ分布のピーク MP を光量と定義した。フィッティングの結果を表 5.5 に示す。

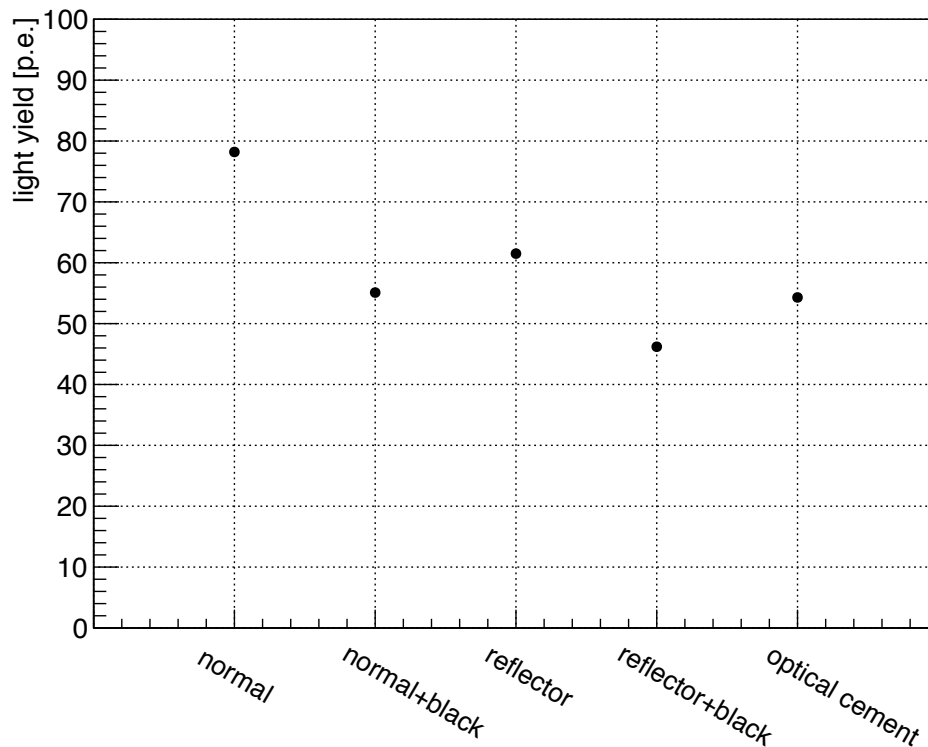


図 5.41: 光量の変化プロット。normal fiber の光量が最もよく、他の場合は光量が 30%程度減少している

表 5.5: 光量の変化

ファイバー	光量 [p.e.]
normal	78.2 ± 0.6
normal+black	55.1 ± 0.7
reflector	61.5 ± 0.6
reflector+black	46.2 ± 0.6
optical cement	54.3 ± 0.6

次に、クロストークの影響を確認する。図 5.42 にレイヤーにヒットがあった際の位置再構成に利用したチャンネル以外のチャンネルの光量分布を示す。ヒストグラムは $-10 \sim 20$ p.e. のイベント数で規格化している。クロストークがあるとヒットのあったファイバーの光子がまわりのチャンネルにもはいてしまうため、数 p.e. のところに信号が増える。normal fiber での分布に対し、反射材によってクロストークが削減されていることがわかる。また、オプティカルセメントを塗った場合は逆にクロストークが増えている様子が見られる。

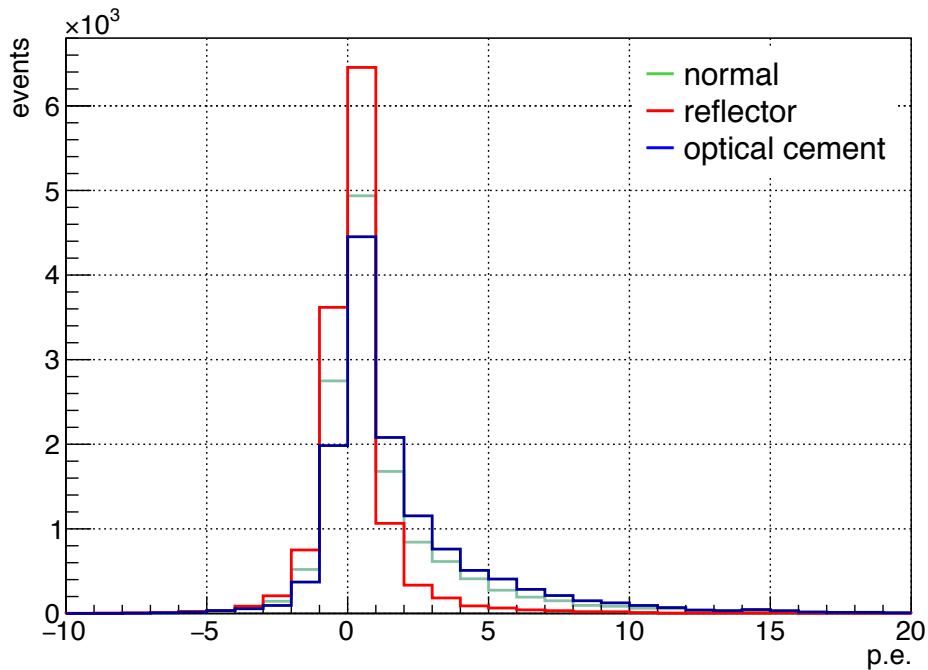


図 5.42: ペDESTAL付近の光量分布。ヒストグラムは $-10 \sim 20$ p.e. のイベント数で規格化されている。レイヤーにヒットがあったときに位置再構成に使われていないチャンネルの光量である

黒ペイントの有無によるクロストークを比較すると図 5.43 のようになった。normal fiber に対し黒ペイントを塗布するとクロストークが削減されるが、反射材の上から黒ペイントを塗布した場合はペDESTAL付近の分布に大きな変化は見られなかった。

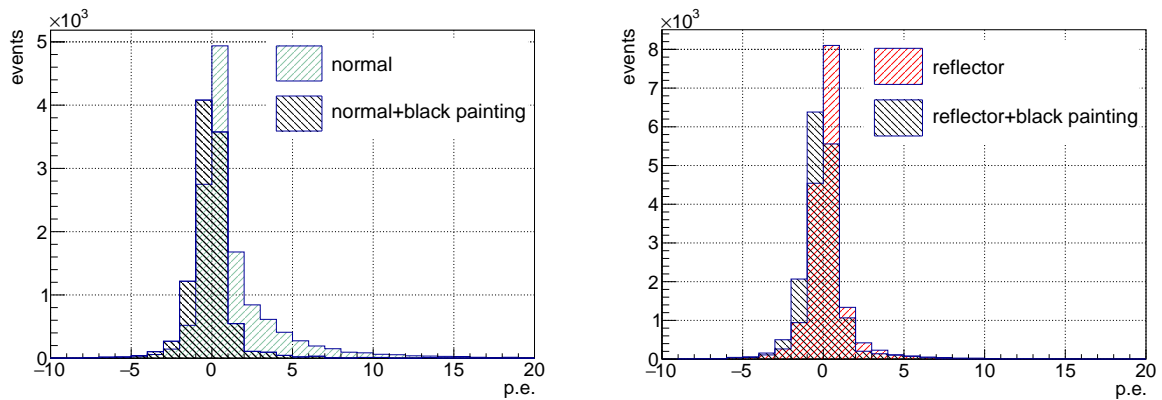


図 5.43: 黒ペイントがある場合のペDESTAL付近の光量: 左が normal fiber に黒ペイントを塗った場合で、右が反射材をぬった上から黒ペイントを塗った場合の光量分布である

これらのペDESTAL分布の平均値を図 5.44 および表 5.6 に示す。クロストークがあれば平均値が増えると考えられる。結果は normal fiber で ~ 1.3 p.e. のところが、黒ペイントを塗布した 2 種類に関してはほとんど 0 p.e. となり、反射材のみを塗布した場合も ~ 0.4 p.e. まで低下した。しかし、オプティカルセメントを塗布した場合は ~ 2.0 p.e. まで増加した。

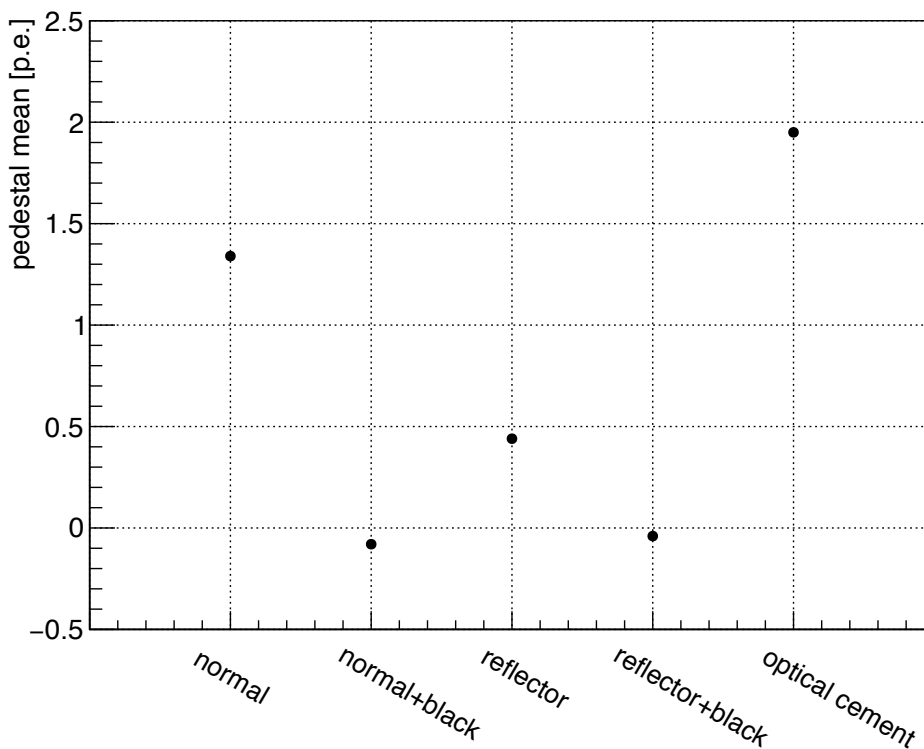


図 5.44: ペDESTALの変化プロット。反射材や黒ペイントを塗った場合はほとんど0だが、オプティカルセメントを塗ると normal fiber より光量が大きくなっていることがわかる

表 5.6: ペDESTALの変化

ファイバー	平均値 [p.e.]
normal	1.34
normal+black	-0.08
reflector	0.44
reflector+black	-0.04
optical cement	1.95

最後に、位置分解能の変化を確認する。全種類での位置分解能は図 5.45 および表 5.7 のようになった。何も塗っていない normal のファイバーを用いた場合の位置分解能がもっとも良いことがわかる。また、いずれの場合も normal fiber のときと同様に、読み出しまでの距離が遠くなるにつれて位置分解能が悪化する傾向が見られた。

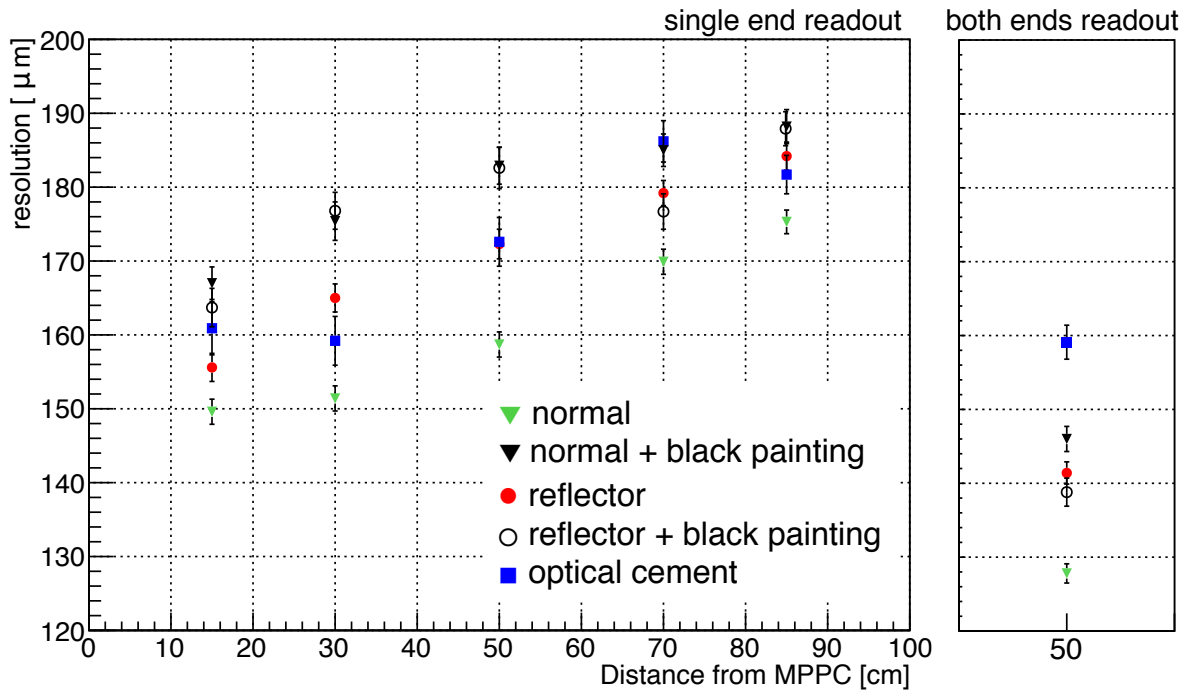


図 5.45: 全種類のファイバーにおける位置分解能。normal fiber の位置分解能が最も良いことがわかる

表 5.7: 全種類のファイバーにおける位置分解能の一覧 (単位は μm)

	読み出しまでの距離 [cm]					
	15	30	50	70	85	both ends
normal	149.6±1.7	151.4±1.7	158.7±1.7	169.9±1.7	175.3±1.6	127.8±1.3
normal+black painting	167.0±2.2	175.4±2.6	182.9±2.5	185.0±2.2	188.2±2.3	146.0±1.7
reflector	155.6±1.9	165.0±1.9	172.3±2.0	179.2±1.7	184.2±1.9	141.4±1.5
reflector+black painting	163.7±2.6	176.8±2.5	182.6±2.8	176.7±2.4	187.8±2.3	138.8±1.9
optical cement	160.9±3.6	159.2±3.3	172.6±3.3	186.2±2.8	181.7±2.6	159.1±2.3

[考察]

図 5.39 の光量分布において反射材で光量が減少するのは、屈折率が $n=1.53$ のエポキシでできている反射材をクラッドの外側に塗ることによって、クラッドと空気の間で全反射していた光が反射材と空気の間で反射するようになるが、反射材の表面が滑らかでないことにより反射の際のロスがおおきくなるためである。オプティカルセメントも同様の理由で光量が減少していると考えられ、反射材とオプティカルセメントの違いは密度の違いからくると予想される。また、黒ペイントも反射材同様に反射のロスが増え、図 5.40 のように光量が減少したと考えられる。

図 5.42 のペダスタル付近の分布によるクロストークの変化について考察すると、反射材によってファイバーの中で吸収しきれなかった UV 光が吸収されるため、クロストークが抑制されたと考えられる。オプティカルセメントによってはクロストークが増加していることがわかる。黒ペ

イントも反射材と同様の効果があり、UV 光を吸収していると考えられる。ただし、反射材の上から黒ペイントを塗った場合は反射材ですでに UV 光が吸収されているため、図 5.43 において黒ペイントの効果がほとんど見られない。

以上の結果から、光量は黒ペイント、反射材およびオプティカルセメントすべてで減少し、クロストークは反射材と黒ペイントによって減少するがオプティカルセメントでは増加することがわかった。そしてこのとき、位置分解能は normal fiber でもっとも良い結果となった。これは、クロストークが減る効果よりも光量が減少することによる位置分解能の悪化の方が効果が大きいためであると考えられる。したがって位置分解能がクロストークの影響をほとんど受けず光量のみ依存する変化を見せるのであれば、位置分解能がシミュレーションよりも悪化している原因はフラットケーブルによるノイズなどであると考えられる。後の 5.5 節にてこのことを定量的に考察する。

ここで、normal fiber の位置分解能の項で考察した 1Hit のイベント数についてももう一度考える。図 5.46 は各種類のファイバーの再構成された位置である。

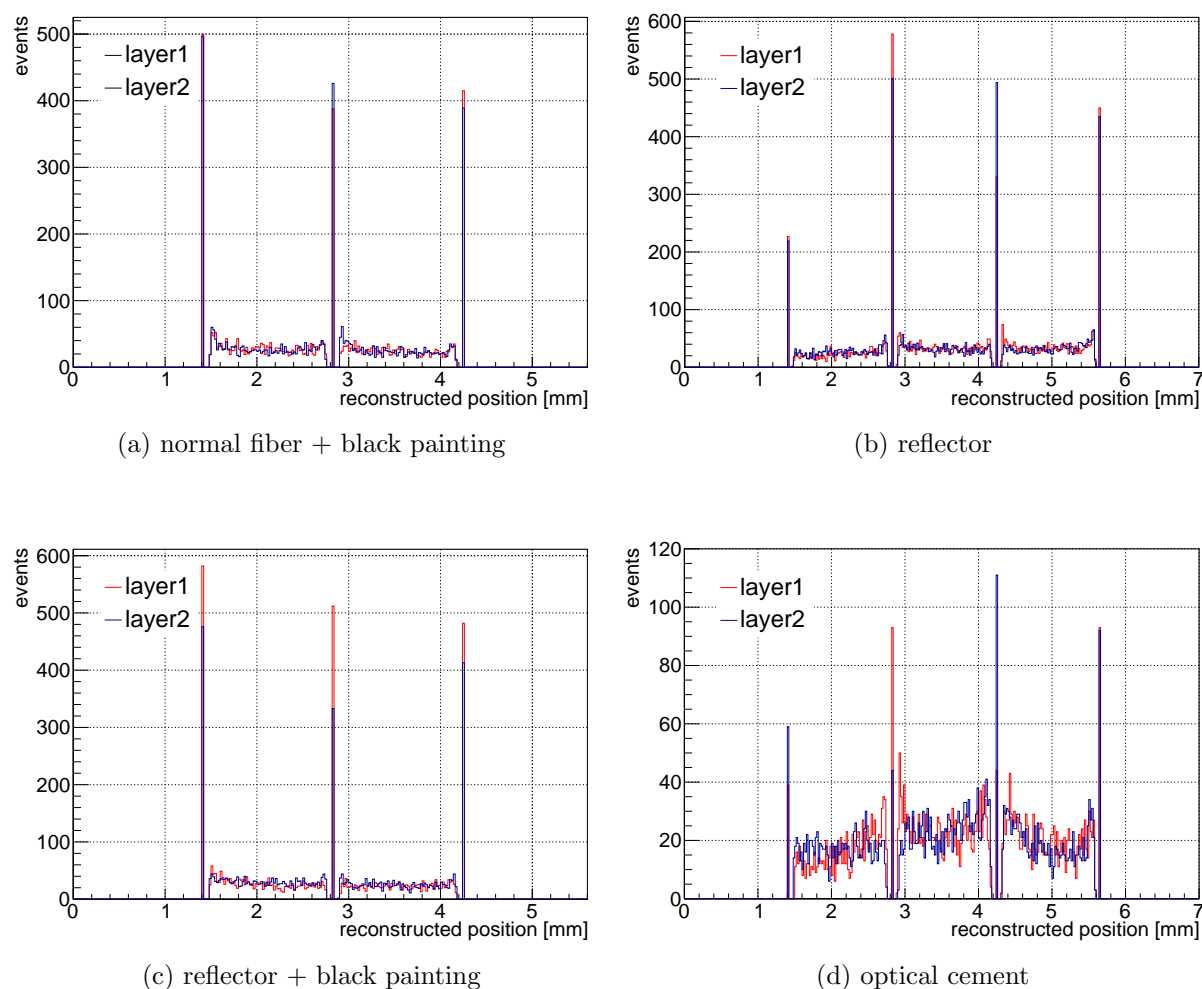


図 5.46: 反射材、黒ペイント、オプティカルセメント塗布時にそれぞれ再構成された位置。オプティカルセメントの場合は 1Hit が極端に減る様子が見られる

ファイバーに何を塗布するかによって、1Hit のイベント数が変化することがわかる。前述のとおり、クロストークがあると本来 1Hit の位置を通過した場合も、隣のファイバーに光がもれることで 2Hits になってしまうため、クロストークの抑制と 1Hit の数には相関があると考えられる。反射材や黒ペイントを塗布した場合はファイバーの太さが 0.1 mm 程度変化するため、期待される 1Hit は全体の約 16% にのぼる。反射材を塗布した場合に観測された 1Hit は 17%、normal fiber および反射材のうえから黒ペイントを塗ったものは 20% 前後となり、期待される 1Hit の数とほぼ一致した。期待されるよりも 1Hit が多くなっているのは、反射材等を塗布したことによるファイバーの太さの変化が原因であると考えられる。また、オプティカルセメントを塗布した場合は 1Hit が 5% 程度しかなかった。反射材や黒ペイントを塗ることで 1Hit の数が増え、またなにも塗らない場合やオプティカルセメントを塗った場合に 1Hit が減少するため、この結果から、先述のとおり 1Hit の割合は主にオプティカルクロストークに依存して決まると考えることができる。

5.4.4 位置分解能の入射角依存性

[測定方法]

ビームの入射角度による分解能の変化を測定を行った。図 5.47 のようにビームの入射角度を変化させた。測定した角度は、 $\theta = 0, 5, 10, 15, 30, 45^\circ$ の 6 通りである。

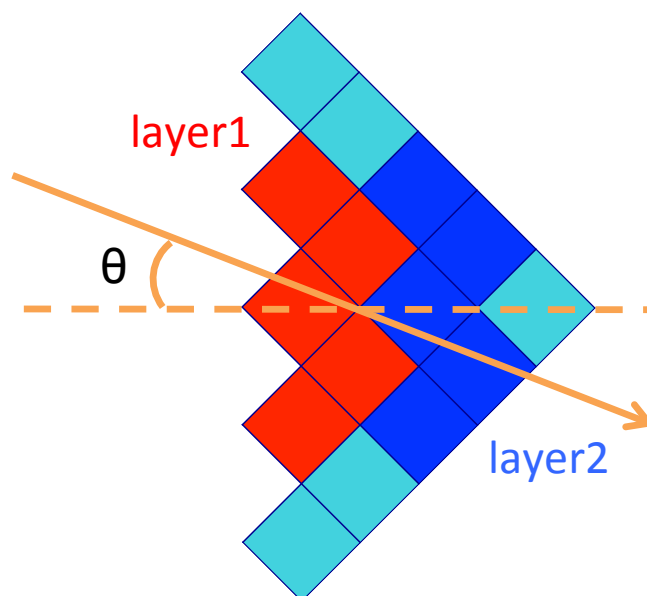


図 5.47: 入射角度依存性の測定方法。レイヤーに対するビームの入射角度を $\theta = 0, 5, 10, 15, 30, 45^\circ$ の 6 通りに変化させた

[結果]

それぞれの角度における 2 レイヤー間の位置の差を図 5.48 に示す。ピーク的位置や数はおおまかに一致しているものの、全体的にシミュレーションと比べ実測の場合の分布が広がっていることがわかる。また、とくに 30° の場合はピーク的位置にずれが見られる。

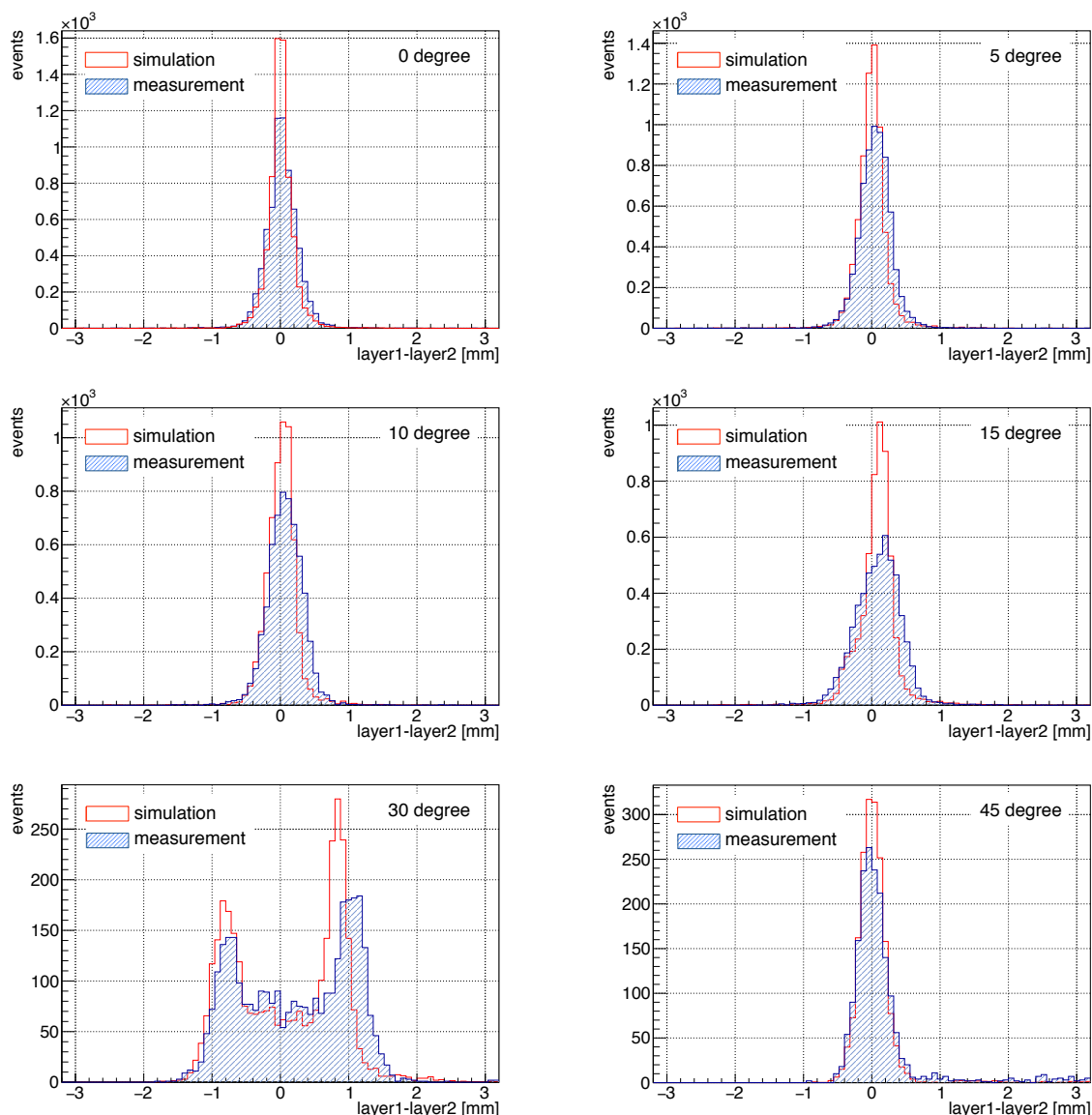


図 5.48: 回転させたときの 2 レイヤーでの再構成された位置の差。大まかな分布は一致しているが、測定結果はシミュレーションよりも広がりをもっている。さらに、とくに 30° ではピークの位置がすこしずれている様子も見られる

[考察]

図 5.48 において測定結果がシミュレーションよりも広がっている理由は、これまでの測定同様に検出器のアラインメントやノイズによるものと考えられる。分布の中心がシミュレーションからずれている理由は、検出器とビームの相対的なアラインメントや、検出器のレイヤー同士のアラインメントが原因であると考えている。検出器のアラインメントは設置角度の誤差が $\sim 1^\circ$ 程度あると考えられ、このずれによってシミュレーションと実測値がずれていると考えられる。これに対し、シミュレーションの中心が 0 からずれている、あるいは分布が左右対称でない理由は別にあると考えている。

角度つき入射の場合は通過粒子の path length が正しく位置に比例しないため、光量比によって位置を再構成するとバイアスがかかってしまう領域が存在する。たとえば図 5.49 において 0° 付近の場合と 30° の場合いずれも左上の斜線領域 A に粒子が通過した際は、図の上方向へバイアス

のかかった再構成が行われる。同様に右下の斜線領域 A を通った場合は下方向にバイアスされる。この領域の割合は入射角度 θ によって決まり、 $1 - \tan(45^\circ - \theta)$ となる。さらにこの中には、角度が 20° を越えるあたりからどこを通過しても一定の光量となるため光量比を用いることができない領域も現れるようになり、これは $1 - 2\tan(45^\circ - \theta)$ と表される。表 5.8 に今回測定を行った角度ごとの、バイアスされる領域 A および光量比を用いることのできない領域 B の割合を示す。

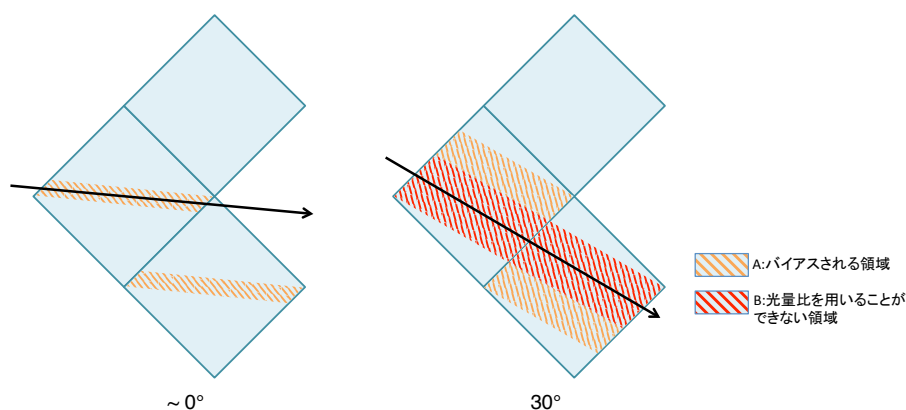


図 5.49: 入射角度のちがいによる位置再構成への影響。角度が大きくなるにつれ再構成される位置にバイアスがかかる部分が増え、一定の角度を超えると光量比を用いることができない領域が現れる

表 5.8: 入射角度ごとの再構成に影響を受ける領域の割合。30° A の () は B を含んだときの値

角度 [°]	A: バイアスされる領域 [%]	B: 光量比を使えない領域 [%]
0	0	0
5	16.1	0
10	30.0	0
15	42.2	0
30	26.6(73.0)	46.4
45	0	100

このバイアスされる領域によって、シミュレーションに 0 からずれたピークがあらわれると考えられる。layer1 でバイアスされる領域を通った粒子が layer2 でそうでない領域をとおり、あるいはその逆が起こることによって、2 レイヤーで再構成された位置の差をみたときに 0 でない位置にピークがきてしまう。これは 30° の場合とくに顕著にみられるが、他の小さい角度の場合も存在していると考えられる。また、分布が左右対称でない原因に関しては、アクセプタンスの違いであると考えている。

角度がある場合はこのように 2 レイヤー間の位置の差では分解能を測定することができない。そのため、モンテカルロシミュレーションによって 2 レイヤー間の位置の差および真の位置と再構成された位置の差を求めた。図 5.50 にシミュレーションによって求められた真の位置と再構成された位置の差を示す。15° までは 0° の場合とほとんど変わらないが、30° の場合は後述のようにピークがふたつにわかれている。また、45° になると光量比を用いない測定と同じであるためにファイ

バーの幅の一様分布になっている。

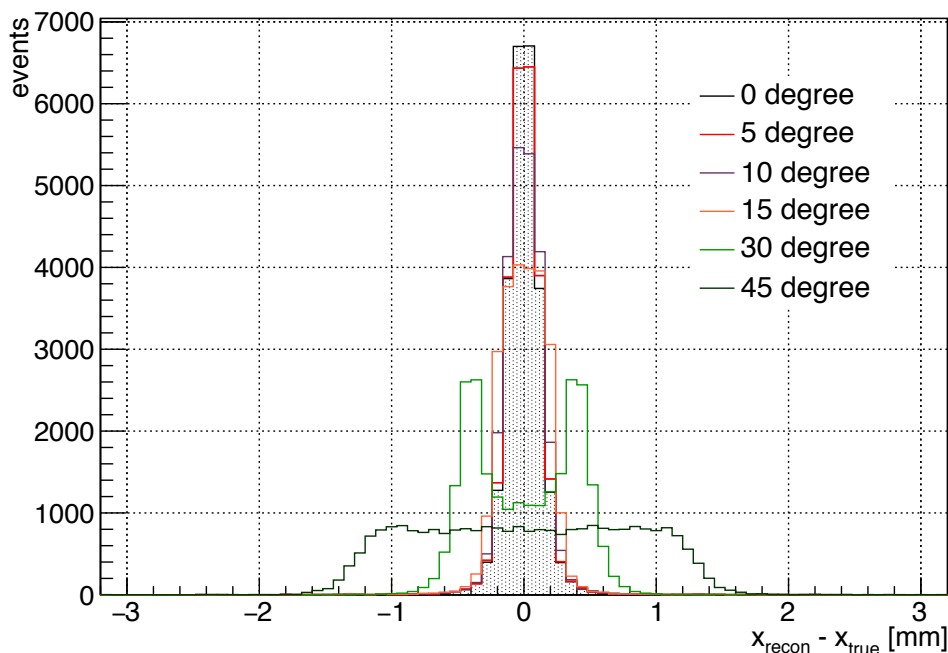


図 5.50: シミュレーションによる $x_{\text{recon}} - x_{\text{true}}$ 。30° でピークが顕著にふたつ現れるのはファイバー中のバイアスされる領域の影響である。また、45° になると光量比を用いて位置を再構成することができず、ファイバーの幅の一様分布となる

$x_{\text{recon}} - x_{\text{true}}$ において 0 でないところにピークがたつ理由も、バイアスされる領域に原因がある。これは 2 レイヤーの差をとった場合と同様に 30° で顕著に現れているが、浅い角度で分布が広がって見える理由も同じようにバイアスされた位置に再構成されるためであるといえる。

角度のついた入射に対する位置分解能は再構成の方法に改善の余地があると言える。後述のように、INGRID の飛跡の角度を用いることによって、より正確なトラックマッチングを行うことができると考えている。

5.5 位置分解能の向上にむけて

まず、入射角度が 0° の場合もそうでない場合も、位置分解能の測定結果がシミュレーションより悪くなる原因についてもう一度考える。いちばんはじめに考えられるのは、ビーム照射部分におけるファイバーのアライメントである。この部分のアライメントがずれると位置を正しい場所に再構成することができない。第 1 回と第 2 回のビームテストではファイバーの固定方法を変えることで位置分解能の変化を見たが、結果に大きな違いはみられなかった。したがって、ファイバーのアライメントをこれより大きく改善するのは困難であると考えている。

さらにファイバー同士のオプティカルクロストークに関してはすでに述べたように、クロストークを削減することによる位置分解能のおおきな改善は見られなかった。クロストークが位置分解能に与える影響は、光量の揺らぎ $\Delta N_1, \Delta N_2$ を $\sqrt{N_1 + \alpha N_2}, \sqrt{N_2 + \alpha N_1}$ ($0 \leq \alpha \leq 1$) と書き表す

ことで考えられる。ここで α はクロストークの起こる割合を意味する。これを式 4.2 に代入すると、 $N_1 = N_2 = \frac{N}{2}$ のときの Δd は

$$\Delta d = \frac{1}{2\sqrt{N}} R \cdot \left(1 + \frac{N}{2}\alpha\right) \quad (5.3)$$

と表すことができる。いま $R = \sqrt{2}$ 、 $N \sim 100$ p.e. であるときの位置分解能 Δd が ~ 150 μm であったので、 α だけでこの位置分解能を説明するのはむずかしいことがわかる。

一方、フラットケーブルや読み出しエレキのノイズによる位置分解能の悪化を考える。ノイズの大きさを n であらわすと、光量のゆらぎは $\Delta N_1 = \sqrt{N_1} + n$ 、 $\Delta N_2 = \sqrt{N_2} + n$ と書くことができる。すると、 $N_1 = N_2 = \frac{N}{2}$ のときの Δd は

$$\Delta d = \frac{1}{\sqrt{2N}} R \cdot \left(\sqrt{\frac{N}{2}} + n\right) \quad (5.4)$$

と表すことができる。 $\Delta d \sim 150$ μm となる n は 8 p.e. 程度であり、数 p.e. のノイズで位置分解能が大きく悪化することがわかる。したがってノイズは位置分解能を悪化させている大きな要因である可能性があると考えられる。実際、フラットケーブルは長くなることでノイズが非常にのりやすくなるため、いかにノイズを減らすかが今後の課題であると言える。

他にも、それぞれのファイバーでの発光量の一様性や、断面の研磨の状態などによる位置分解能の低下も考えることができる。これらの影響を独立に測定するのは困難であるが、ファイバー断面の様子を顕微鏡で確認した。すると図 5.51 のようにファイバー断面に研磨によるダメージのようなものを確認した。これは光量の低下やばらつきを生じる直接的な原因になりうる。この部分は改善の余地があると考えている。

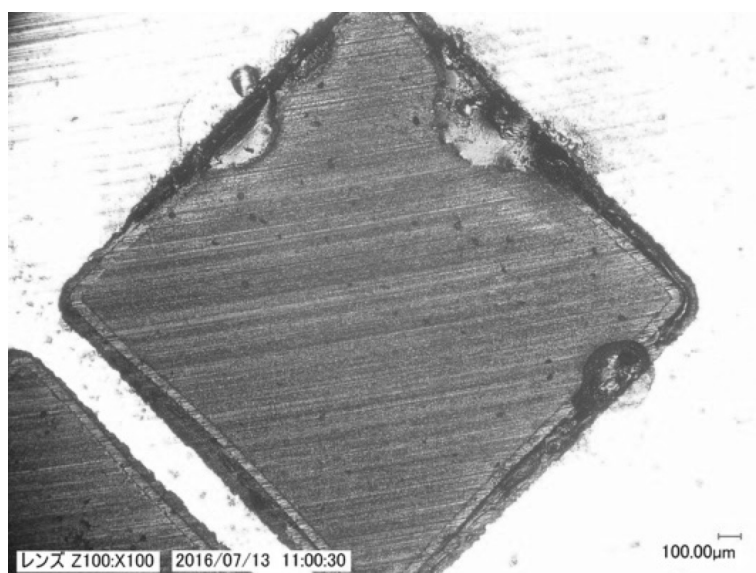


図 5.51: 顕微鏡で見たファイバー断面のダメージ。ファイバーを研磨する際にダメージが与えられると考えられる。ダメージのあるファイバーが混ざることによってその部分のみ光量が低下することは、位置分解能を悪化させる原因となる

5.6 MIP 粒子における位置分解能の見積もり

さいごに、陽電子によって測定した位置分解能を最小電離損失 (MIP) 粒子に換算する。性能評価に用いた陽電子ビームと MIP 粒子では、エネルギー損失が異なる。図 5.52 は Bethe-Bloch の式から求まるエネルギー損失である。675 MeV/c の陽電子における単位距離あたりのエネルギー損失 $\frac{dE}{dx}$ は $2.53 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ であり、200 MeV から 2 GeV までのミュオンの $\frac{dE}{dx}$ の平均は $1.63 \text{ MeVg}^{-1}\text{cm}^2$ であるため、675 MeV/c の陽電子と MIP では 1.63 倍程度の差があることがわかる。位置分解能は光量すなわち $\frac{dE}{dx}$ の $-1/2$ 乗に比例するので、MIP で 200 μm の位置分解能に達するためには、陽電子ビームで 160 μm 程度を達成していれば良いことがわかる。

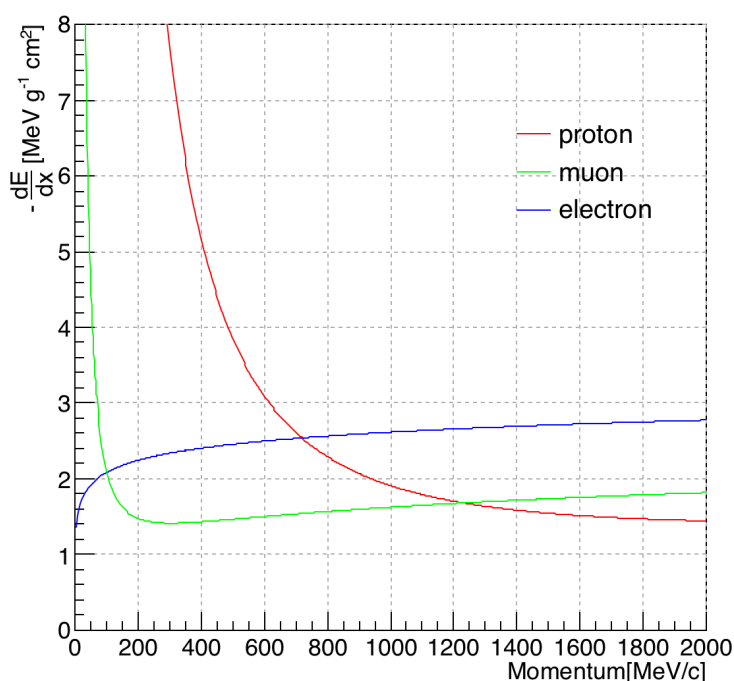


図 5.52: ポリスチレン中での $\frac{dE}{dx}$ 。MIP のミュオンとビームテストではエネルギー損失が異なる

これまでの測定の結果、読み出しから 50 cm の位置にビームを照射したとき、もっとも良い位置分解能は片読みで normal fiber の場合 158.7 μm であり、両読みでは 127.8 μm となっている。これは垂直入射の場合であるが、片読みでも目標の位置分解能を達成している。さらに、実際のニュートリノ反応において入射粒子はトラッカーに対して平行な方向にも角度がつくため、光量はさらに増加すると考えられる⁴。

5.7 性能評価のまとめ

本章では、ファイバーの光量および検出器の Hit efficiency、位置分解能の測定を行った。ファイバーは single clad の角ファイバーを用いても丸ファイバーと比較し十分な光量をもつことがわ

⁴ 付録 C に関連する測定結果を述べる

かった。また、Hit efficiency も光量が十分であるため 99.9% 以上という非常に高い値となった。

normal fiber の場合、片読みで 158.7 μm 、両読みで 127.8 μm でありもっともよい位置分解能となっている。この陽電子ビームによる結果を MIP 粒子に換算すると、200 μm を達成している。normal の場合にもっとも良くなったのは、反射材や黒ペイントを塗布することによりクロストークを抑制する効果よりも光量が減少する効果の方が大きかったためであると考えられる。また、分解能をシミュレーション結果よりも悪化させている主な原因は、フラットケーブルなどによるノイズであると考えている。

さらに角度がついた場合に関しては垂直入射より位置分解能が悪化することがわかっているが、検出器のふるまいはシミュレーション通りであることがわかった。

第6章 今後の展望

第5章で述べた陽電子ビームによる性能評価の結果より、Scintillating fiber が $200\ \mu\text{m}$ の位置分解能を達成するために十分な光量を持つことがわかった。さらに、プロトタイプ検出器による位置分解能もほぼ垂直な入射では、MIP ミューオンで $200\ \mu\text{m}$ を達成することができる見通しとなった。本章では、実用可能な検出器の制作を目指すにあたっての展望や問題点などを述べる。

6.1 チャンネル数の削減

チャンネル数を削減する手段として、ファイバーをまとめ読みにしてかつ両端での読み出しの組み合わせを変える方法を利用することができる。図 6.1 に読み出しのイメージを示す。ファイバーの両端に 4ch の MPPC を用意する。これを 1~4 と A~D とすると計 16 通りの組み合わせを考えることができる。つまり、16 本のファイバーを 8 個の MPPC で読み出すことができる。ひとつの MPPC に入れるファイバーの本数を増やせば、ファイバーの本数に対して MPPC のチャンネル数を大きく削減することが可能である。この方法は MINER ν A の検出器においても用いられている [54]。

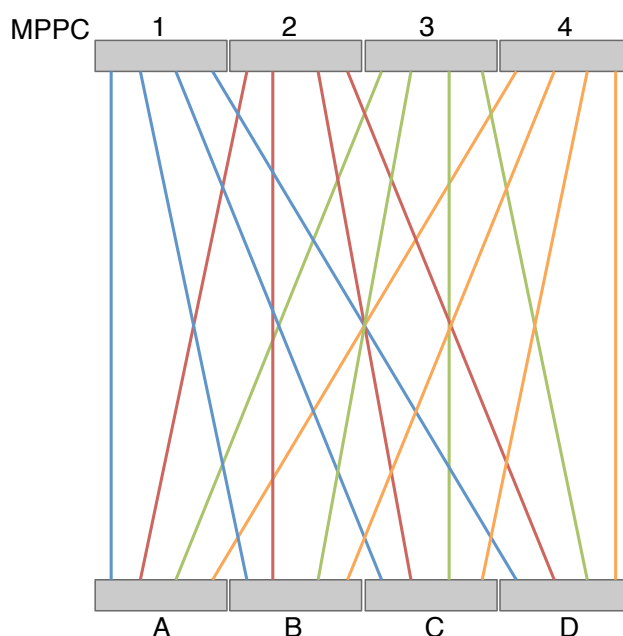


図 6.1: 組み合わせ読み出しのイメージ。MPPC 1~4 と A~D の組み合わせにより 8 個の MPPC で 16 本のファイバーを読み出すことができる。ひとつの MPPC に入れるファイバーの本数を増やすことで、ファイバーの本数に対して MPPC のチャンネル数を大きく削減することが可能となる

ここでは最も単純な例を示したが、実際は隣り合うファイバー同士が光るため、それらが同じ MPPC にはいるとそれぞれの光量がわからなくなってしまう。したがってもっと複雑な組み合わせが必要となる。これを実現することができれば、チャンネル数を減らせるうえに両読みになるので位置分解能も向上する。そのためには、角ファイバーをどの程度曲げることができるかなどを今後試験する必要がある。

6.2 実機におけるチャンネル数の見積もり

ここではまず、1 m 四方の実機を想定した場合のチャンネル数について概算を行う。表 6.1 に想定されるファイバーの本数やチャンネル数を示す。このとき前述のまとめ読み出しを想定し、MPPC1ch で 4 本のファイバーを読み出すとする。1 mm の角ファイバーを用いる場合の位置分解能は、測定した光量から概算することができる。1 mm 角ファイバーの光量は 2 mm の約 40% であることと、さらにファイバーが細くなることによってファイバー間隔が狭くなることをふまえると、2 mm 角ファイバーの位置分解能が両読みで 127.8 μm であったことから、

$$127.8 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{0.4}} \sim 101.0 \text{ } [\mu\text{m}] \quad (6.1)$$

となると考えられる。いずれの太さのファイバーを用いても十分な位置分解能を期待することが可能であるため、どちらを選ぶべきかはその他の条件で決まってくる。ファイバーを太くすると MPPC の受光面も大きくする必要がある。MPPC の受光面が大きくなるとチャンネルごとの単価が上がるだけでなく、ノイズなどの問題も多く、扱いが難しくなるという問題がある。また、ファイバーの単価は長さだけでなく断面積にも依存するため、全体でかかる費用はチャンネル数だけで決めることはできない。表 6.1 に 2 mm ファイバーを用いた場合と 1 mm ファイバーを用いた場合のチャンネル数の概算を示す。

表 6.1: チャンネル数の概算

ファイバーの種類	2 mm 角	1 mm 角
位置分解能	~130 μm	~100 μm
ファイバーの本数 (本)	710	1420
MPPC の種類	6 \times 6 mm ²	3 \times 3 mm ²
チャンネル数/layer	305	710

これだけの数のファイバーやエレキを実用化するためには、大きなレイヤーをつくるためのジグの開発も必要となる。ジグはある程度アラインメント精度も必要であるため、精密な設計が必要である。さらに、J-PARC のビームバンチに合わせたデータ取得システムの最適化なども課題となる。その他の課題として考えられるものについて以降の節で述べる。

6.3 実機に向けた課題

6.3.1 入射角度依存性の改善

ビームテストの結果からわかるように、大角度で粒子が入射してきた場合の位置分解能は光量比を用いない場合の分解能、つまりファイバーの太さの $1/\sqrt{12}$ と大差がない。ニュートリノ反応によって生じる二次粒子は前方に散乱するものが多いが、そうでないものも存在する。このような大角度の粒子に対しどのように位置分解能をあげるかが今後の課題となる。

解決の可能性として、INGRID のトラック情報を用いる可能性があげられる。万が一、Scintillating Fiber Tracker のみで原子核乾板のトラックを 1 本にしぼりきれなかった場合も、図 6.2 のように原子核乾板と INGRID の角度マッチングをとることによって、より正確にトラックマッチングを行うことができると考えている。

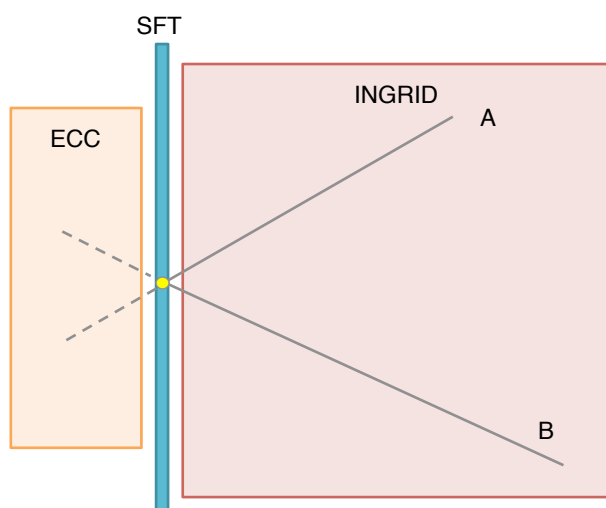


図 6.2: 角度によるトラックマッチング。大角度の 2 本の粒子に関しては、INGRID の角度情報を用いることによって ECC とのマッチングを行うことができると考えている

6.3.2 光量による粒子識別

原子核乾板は Multiple Scattering によって運動量を測定することで、粒子識別をすることが可能である。Scintillating Fiber Tracker も図 5.21 のように、レイヤーの合計光量を測定すると単一の運動量に対し幅のせまい光量分布をとるため、光量から粒子識別をすることができる可能性がある。光量による粒子識別の可能性については今後、モンテカルロによるシミュレーションや実測が必要である。

第7章 結論

ニュートリノ振動の発見から 20 年近くたった今も、ニュートリノは未だ多くの謎をもつ素粒子である。我々が T2K 実験において目指している、レプトンにおける CP 破れの測定や、 θ_{23} は最大混合であるかといった問題にアプローチするためには、 θ_{23} をより精密に測定することが欠かせない。そのためには、T2K 実験における系統誤差を 3% 以下まで削減する必要があり、ニュートリノ反応点まわりの精密な観測が重要となってくる。

とくに近年、始状態で核子ふたつが関係し終状態で陽子が 2 本でてくる 2p-2h 反応に注目が集まっており、J-PARC において原子核乾板を用いた測定が進行中である。本論文では、原子核乾板と T2K 前置検出器 INGRID のトラックマッチングを行うための Scintillating Fiber Tracker の開発と性能評価について述べてきた。まずニュートリノ反応のシミュレーションを行い、期待されるニュートリノ反応数の見積もりを行った。そこからトラックに要求される性能を求めた結果、200 μm 程度の位置分解能が必要であることがわかった。さらに INGRID を覆うだけの大面積が実現可能であり、少ないチャンネル数で駆動することが条件となる。これらの要求を達成するため、光量比を用いた位置検出の方法を採用した。このトラックは少ないチャンネル数でより高い位置分解能に達することができるため、原子核乾板と併せて利用するだけでなく、新たなファイバートラッカーのベンチマークとしての役割をもつ。

この方法の原理を検証するため、プロトタイプ検出器を制作し陽電子ビームによる性能評価を行った。2 mm 角のファイバーにおいて十分な光量が得られ、99.9% 以上の Hit efficiency および垂直入射で両読みの場合 127 μm の位置分解能を達成した。これは MIP 粒子に変換した場合 200 μm の位置分解能を達成している。また、ファイバーの条件を変更した場合の位置分解能は、反射材や黒ペイントによってクロストークは削減されるものの、光量が減少するため位置分解能の向上はみられず、位置分解能向上のためにはフラットケーブルなどによるノイズを削減することが重要であることがわかった。さらに、ビームの入射角度を変化させた場合の結果は、Geant4 によるモンテカルロシミュレーションとおおまかに一致していた。今後は INGRID の角度情報と組み合わせた場合にどのように改善されるか検討する必要がある。今後はさらに、角度依存性の改善だけでなく、よりチャンネル数をへらすための読み出し方法の工夫や、データ取得システムの最適化などを行っていく。

謝辞

この2年間、研究を通してたくさんの方々と出会い、多くの成長の機会をいただけてきました。本研究を遂行し修士論文にまとめるにあたり、ご指導やご協力をいただいたみなさまにこの場を借りてお礼を申し上げます。

本研究室の中家剛教授にはこのような検出器開発を行う機会をいただいただけでなく、研究の進め方や考え方など、研究者として成長するために大切なことをたくさん教えていただきました。また、お忙しいなかビームテストまで足を運び一緒に実験をしていただき、ありがとうございました。

横浜国立大学に栄転された南野彰宏准教授には、研究を進めるにあたり様々な議論をしていただき、また実験の準備や解析に対する多くの具体的なアドバイスをいただきました。わたしがふと思いついたようなアイデアの可能性と一緒に探索していただくこともよくありました。本研究をこのような形で修士論文にまとめることができたのは、南野さんの支えがあったからこそであると思います。

市川温子准教授は普段から研究の進捗や東海村での生活を気にかけてくださり、本研究においても数々の的確な質問やおもしろいアイデアをいただきました。市川さんの研究に対する姿勢をそばで見て学びながら過ごせたことを嬉しく思います。

一緒に仙台まで来てビームテストをお手伝いしてくださった林野竜也さん、中村輝石さん、森正光くんには、朝早くから夜遅くまでなんども階段を上り下りしながら最後まで手伝っていただき、感謝しております。みなさんのおかげで、たくさんのデータをとることができました。セットアップの準備や解析のアドバイスなどもいただき、ありがとうございました。

東北大学電子光研究センターのみなさまには、3日間のビームテストを2度も行う時間をいただきました。みなさまのご協力がなければ、この結果を達成することはできませんでした。課題説明会に参加した際に、みなさんがわたしのやりたい実験をあたたく後押ししてくださったことは忘れません。

名古屋大学の福田努さんをはじめとする T60 コラボレーションのみなさまには、原子核乾板に関する知識をたくさん教えていただいただけでなく、実際に現像やスキャンにも参加させていただきました。とくに現像は個人的にも非常に楽しい思い出となっており、貴重な経験をさせていただいたと思います。

CERN 滞在中に Scintillating Fiber についていちから教えてくださった Christian Joram さんと Ana Barbara Cavalcante さんには、Scintillating Fiber の魅力をたくさん伝えていただきました。また、わたしの未熟な質問にも丁寧に答えてくださった Kuraray の方々にも感謝申し上げます。

山本実加さんには、ファイバートラッカーの先輩として EASIROC の使いかたや基本的な測定の方法などを教えていただきました。はじめから好きなように実験ができたのも、山本さんがこれまで積み上げてこられた経験があったからだと思います。

東海村での生活をサポートしてくださった仲村さん、古賀さん、竹馬さん、細見さん、金さん、

原田くんをはじめとする T2K のみなさまのおかげで、新しい生活も楽しく過ごすことができました。

そして、高エネルギー研究室のみなさま。みなさまのおかげで楽しく研究生生活をおくることができました。とくに同期の赤塚くん、芦田くん、田中くん、中西さん、野口くんと一緒にいるととても楽しく、この 2 年間ともに学ぶことができほんとうによかったなと思います。

最後に、いつもわたしの選択を応援し支え続けてくれた家族と大切な友人たちに、心より感謝の気持ちを伝えたいと思います。

付録 A 原子核乾板

原子核乾板は、図 A.1 のように乳剤をプラスチックのうすい板に塗布したものである。乳剤には約 200 nm の大きさの AgBr が含まれており、荷電粒子が通過することで銀の結晶が生成され、現像することによりそれらを約 0.6 μm の黒い点として確認することができる。すべての荷電粒子のエネルギー損失を記録するため、低エネルギーの電子飛跡がバックグラウンドとなる。そこで両面の乳剤で記録された飛跡をスキャンしてつなげることで、フィルムを通過した飛跡を再構成している。何層もかさねたフィルムをさかのぼることで長い飛跡を再構成することができる。

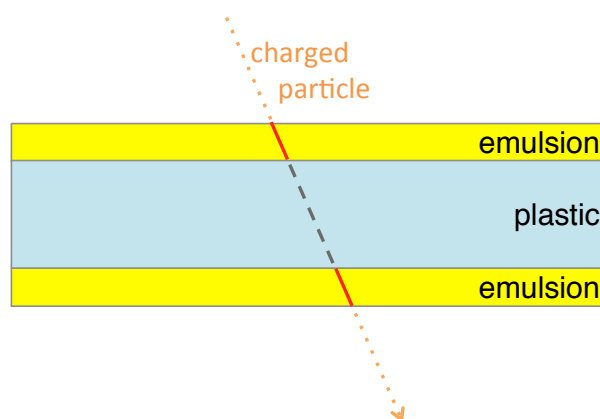


図 A.1: 原子核乾板のイメージ。うすいプラスチック板の両面に乳剤を塗布し、通過した荷電粒子の飛跡を記録する。両面の乳剤で観測されたトラックをつなぐことで、飛跡を再構成している

位置分解能はサブミクロンにおよび、また、3~5 mrad という高い角度分解能をもつため^[55]、様々な実験において利用されてきた。ニュートリノ実験も例外でなく、CHORUS 実験^[56]、OPERA 実験^[5] や DONUT 実験^[1] などとくに ν_τ の物理に貢献してきた。また、原子核乾板に時間情報を与える検出器として Scintillating Fiber Tracker が併用されることも多い^[57]。

原子核乾板は製造からスキャンまでいくつかの工程がある。まずは乳剤を製造し、フィルムに塗布を行う。この時点から原子核乾板は荷電粒子に対し感度を持ち、飛跡を蓄積し続ける¹。ここから検出器の設置、ビームの照射が行われ、一定期間ののち回収、現像される。現像はすべて暗室で細心の注意のもと行われる。図 A.2 に現像後、乾燥中のフィルムの様子を示す。

¹ 宇宙線による飛跡をなるべく減らすため、保管、移動中などはフィルムを縦に置くのが通常である



図 A.2: 現像直後のフィルム。現像後は乾燥棚で1日ほど乾燥させる

その後、フィルム表面に現れる表面銀の拭き取り作業を行い、スキャン前に厚みを調整する膨潤が行われる。近年、大面積の高速読み取りが可能となり、図 A.3 に示す超高速自動飛跡読取装置を用いると約 $25 \times 25 \text{ cm}^2$ のフィルムを1時間程度で読み取ることができるようになった。

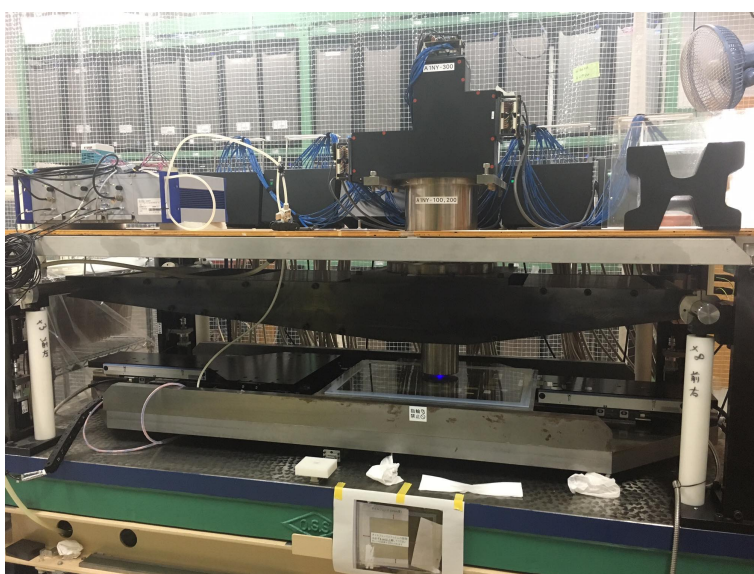


図 A.3: 超高速自動飛跡読取装置 (HTS)。名古屋大学にて開発された世界最速の飛跡読み取り機。短時間で大面積の読み取りが可能となった

付録B Scintillating Fiber

B.1 ファイバーの太さ一様性

ファイバーの太さ一様性の測定を行った。測定には図 B.3 のデジタル測定器を用い、図 B.2 のように 1.2 m のファイバーの 3 点を縦方向と横方向両方の厚さを測定した。



図 B.1: デジタル測定器

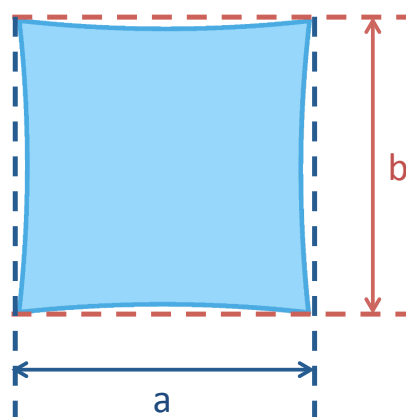


図 B.2: ファイバーの太さ測定

ここで注意しておきたいのが、ファイバー断面の形状である。ファイバーの形状は図 B.2 に示すように完全な正方形とはなっていない。本文中のモンテカルロシミュレーションにおいては、このような形状を近似的に再現したジオメトリを形成した。これはファイバーを製造過程において、ひっぱって成形する際にできてしまうへこみであり避けることができない。今回の太さ測定では、ファイバーのへこんでいる部分ではなく、もっとも厚くなっている a , b の長さを測定した。

図 B.3 および表 B.1 に厚みの測定結果を示す。なにも塗っていないそのままの状態では、ほとんどのファイバーが $20 \mu\text{m}$ 程度のばらつきにおさまっていることがわかる。また、反射材や黒ペイントを塗布した場合は厚みが $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ほどふえ、ばらつきも大きくなっていることがわかる。これはファイバーのアラインメントを行ううえで悪影響を及ぼすと考えられる。また、反射材の上から黒ペイントをほどこした場合は、反射材あるいは黒ペイントのみの場合と比べ厚みがほとんど変化していない。これは、反射材や黒ペイントは実際には密度が低く空洞がたくさんできるため、反射材のうえから黒ペイントを塗っても多くが隙間にはいりこんでしまい、厚さがほとんど変化していないと考えられる。

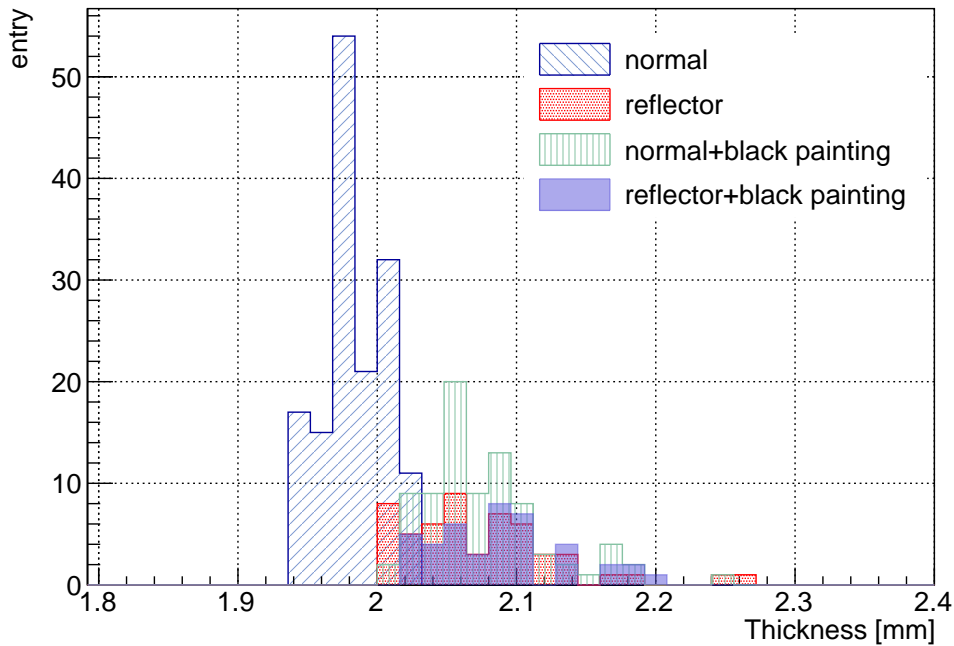


図 B.3: 2.0 mm 角ファイバーの厚み。normal fiber の場合は非常に小さなばらつきであるが、反射材や黒ペイントを上から塗ることによって厚みが増えるだけでなく、ばらつきも大きくなることがわかる

表 B.1: 2.0 mm 角ファイバーの厚み一覧

ファイバー	Mean [mm]	RMS [mm]
normal	1.982	0.022
reflector	2.075	0.056
normal+black	2.076	0.043
reflector+black	2.086	0.047

図 B.4 および図 B.2 に縦横の厚みから求まる断面積を示す。厚みの結果から期待されるように、normal の場合はばらつきが小さく、反射材や黒ペイントを塗布するとばらつきが大きくなること

がわかる。
また、厚みの一様性と同様に問題となりうるのがファイバーのねじれであるが、これに関しては 1 m 程度の長さであれば目立ったねじれは確認されなかった。

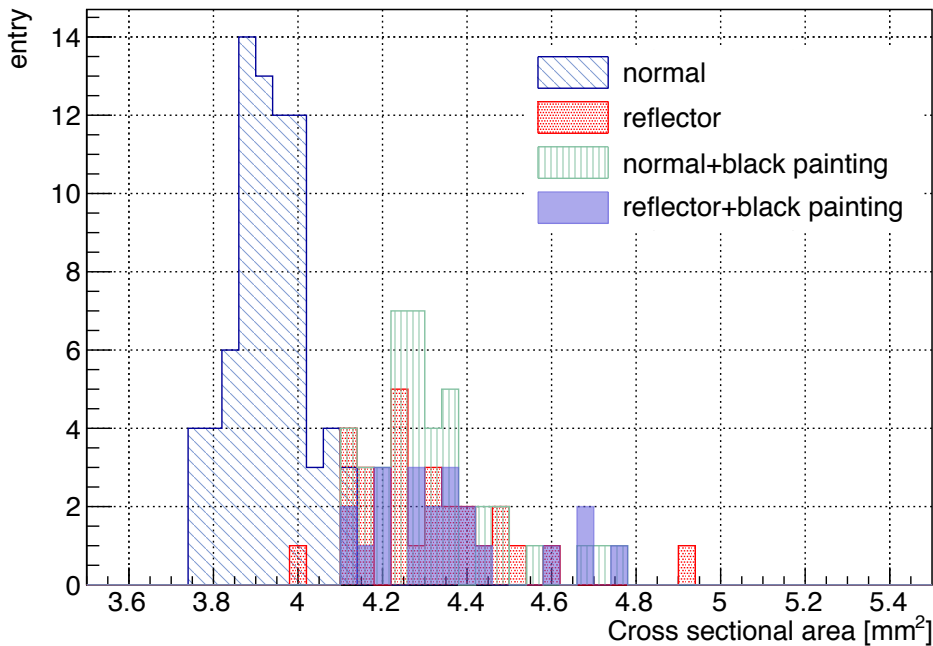


図 B.4: 2.0 mm 角ファイバーの断面積。厚み同様、反射材や黒ペイントによって断面積のばらつきが大きくなっている

表 B.2: 2.0 mm 角ファイバーの断面積一覧

ファイバー	Mean [mm ²]	RMS [mm ²]
normal	3.929	0.086
reflector	4.305	0.184
normal+black	4.311	0.155
reflector+black	4.355	0.183

B.2 ファイバーの形状と位置の再構成に関する考察

ここでは、丸ファイバーと角ファイバーの形状が Trapping efficiency や位置の再構成にどのように影響するかについて考える。

まず、丸ファイバーと角ファイバーの大きな違いとしてあげられるのが、ファイバーを敷き詰めた際の密度である。角ファイバーを並べると隙間なくファイバーを並べることが可能である。ところが丸ファイバーの場合、俵積みにしても隙間が空いてしまうため密度が低くなってしまふ。さらに粒子の path length に関しても、角ファイバーであれば垂直入射の際に左右のファイバーの path length の比が通過した位置に正しく比例するのに対し、丸ファイバーだと完全には比例しない。このことより、光量比を用いる方法に関しては丸ファイバーよりも角ファイバーのほうが向いていると考えられる¹。

¹ 入射角度依存性は付録 D を参照

さらに、丸ファイバーは図 B.5 のように、発光した位置によって Trapping efficiency が異なることが知られている。これはファイバー中心から離れた位置で発生した光のほうが、浅い角度でファイバーの側面に入射するためであると考えられる。角ファイバーの場合はこのように発光位置により Trapping efficiency が変化することはないと考えられるため、丸ファイバーのこの特徴は光量比を用いる際に位置分解能を悪化させる方向に影響すると考えられる²。

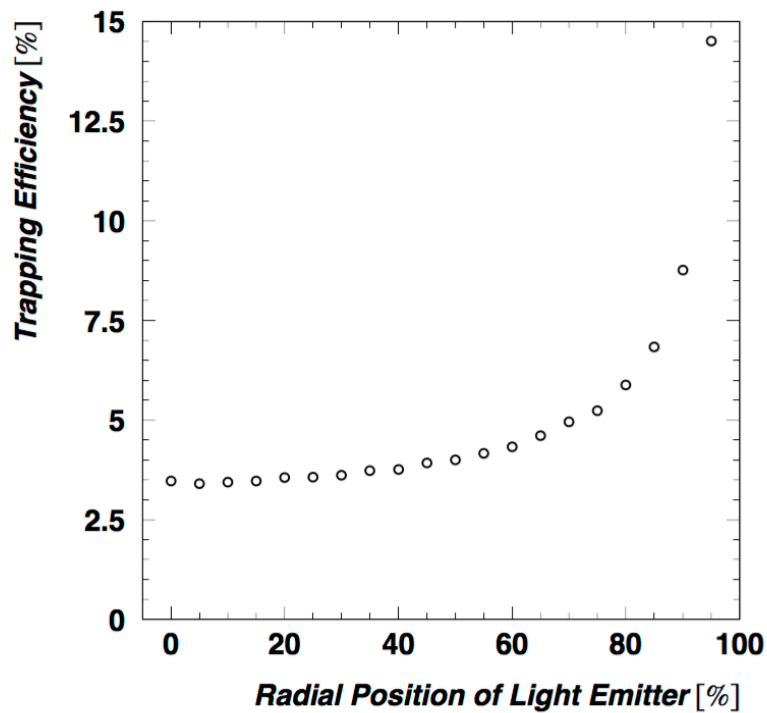


図 B.5: 丸ファイバーの trapping efficiency^[58]。ファイバーの中心から離れた位置で発生した光のほうがトラップされやすい

² ただしこのようにファイバーの中心から離れた位置で発生しトラップされる光は、spiral mode で伝搬されると考えられるため、減衰するのも早いと予想できる

付録C Staggered検出器の開発

C.1 検出器の概要

チャンネル数を削減することに重点を置き、Staggeredタイプ検出器とよばれるプロトタイプ検出器の開発を行っていた。検出器は第1回ビームテストに向けて制作され、宇宙線および陽電子ビームによる評価が行われた。図C.1に検出器の概要を示す。

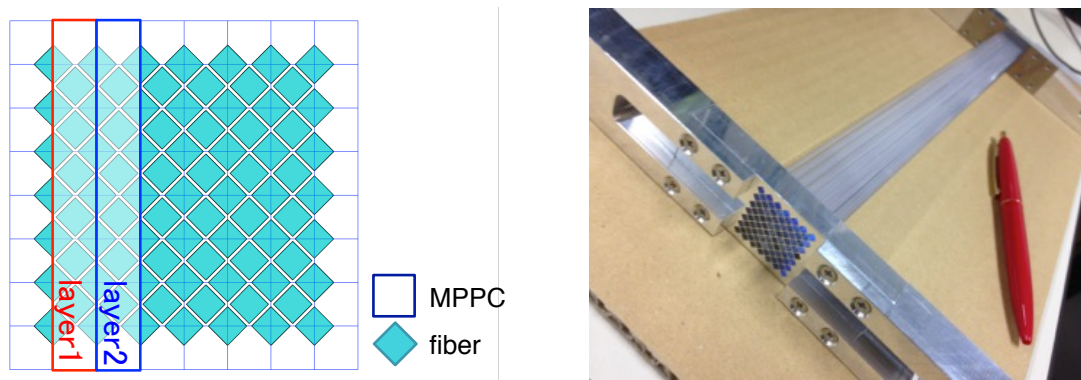


図 C.1: Staggered 検出器。ひとつの MPPC の中心と四隅にファイバーが配置されており、これによって読み出しチャンネルを半分になっている

MPPC 各チャンネルの中央および四隅にファイバーを配置することで、1本のファイバーに対しひとつのMPPCで読み出す場合と比べ半分の読み出しですむデザインとなっている。30 cmの長さの2 mm角ファイバーを用いてプロトタイプ検出器を制作した。MPPCのチャンネルが3 mmの大きさでピッチが3.2 mmであるのに対し2 mm角のファイバーを45度傾けて配置するので、クッキーには隙間ができる。この隙間をあける必要があったためファイバーを通す穴同士のあいだは約0.2 mm程度はなれている構造になっている。このような構造をアクリルクッキーで制作することが困難であったため、Staggeredタイプの検出器はアルミフレームクッキーを用いている¹。また、ビーム照射部はジグによってファイバーを隙間のないように固定した。

C.2 宇宙線による性能評価

まず、宇宙線による評価を行った。図C.2に測定のセットアップを示す。検出器の上下にビームテストで用いたものと同じトリガーシンチレータを設置し、コインシデンスを取ることでトリガーとした。

¹ 電圧をかけたMPPCが直接クッキーに触れることのないよう、MPPC表面とクッキーには十分な隙間をあけた

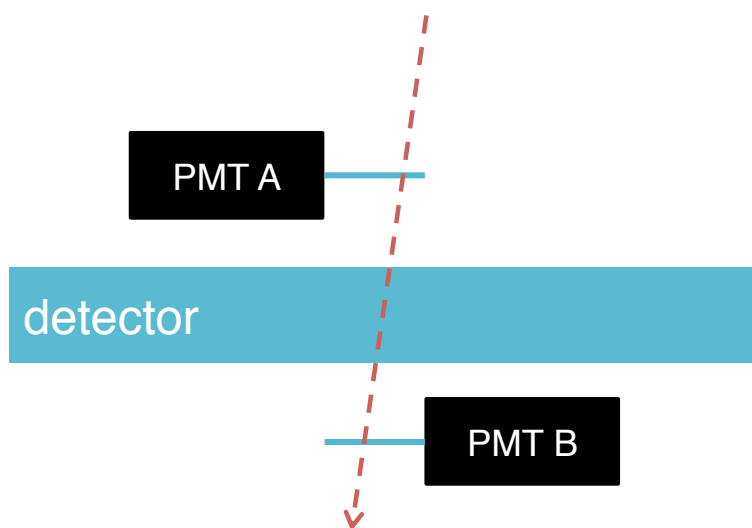


図 C.2: 宇宙線測定のセットアップ。検出器の上下に、本文中に示したビームテストと同様のトリガーを配置した

図 C.3 に宇宙線によるイベントディスプレイを示す。光量比を考えず 1 本ずつ読み出す場合と比べ、Staggered タイプではレイヤーごとに 2 つの MPPC が光るため、より多くの MPPC にヒットがあることが特徴となる。このふたつの MPPC の光量の比をとることで、位置を再構成することが可能である。

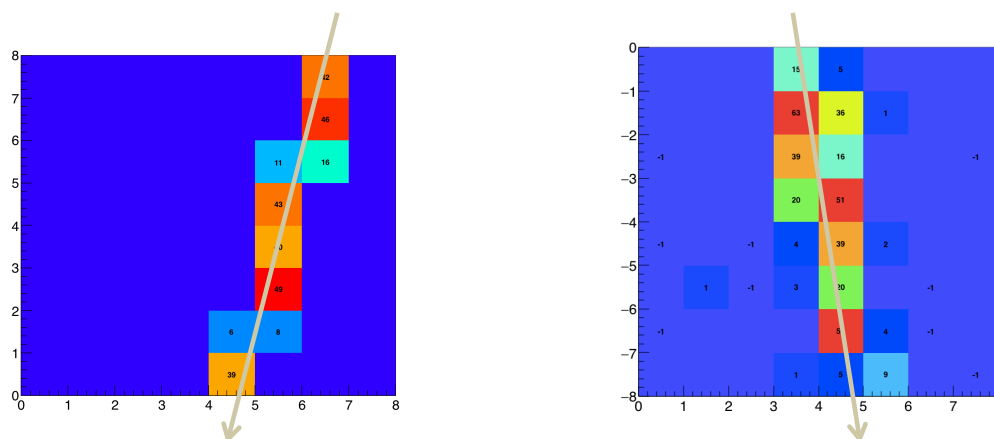


図 C.3: 宇宙線によるイベントディスプレイ。1 本ずつファイバーよ読み出すタイプ (左) と Staggered タイプ (右)。Staggered タイプの場合は各レイヤーで 2 つの MPPC にヒットがある

staggered タイプ検出器を用いたときの宇宙線の光量分布を、図 C.4 に示す。図はレイヤーの合計光量である。後述の陽電子ビームで測定した光量に対し、宇宙線に対しても MIP 程度の十分な光量がみられることがわかる。

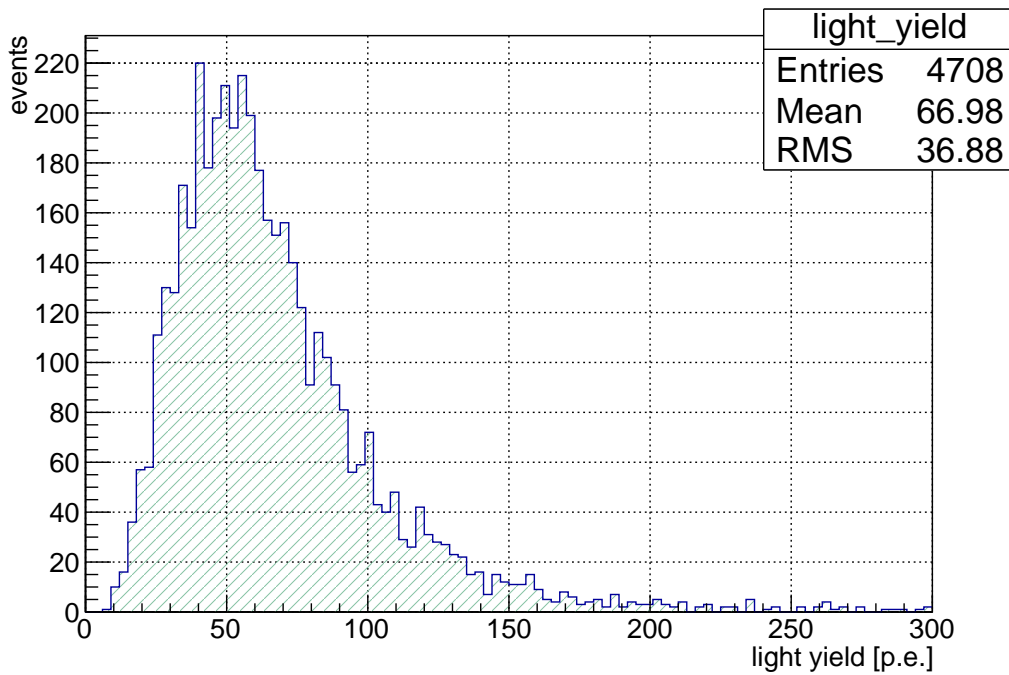


図 C.4: 宇宙線の光量分布。50 p.e. 付近にピークを持つ

C.3 陽電子ビームによる性能評価

第1回ビームテストにおいて Staggered タイプ検出器の位置分解能を測定した。図 C.5 に再構成された位置および2レイヤーの差を、図 C.6 に再構成された位置の二次元分布を示す。1本ずつ読み出すタイプと比べ、位置分解能が悪いことがわかる。フィッティングの結果は σ が425.8 μm であり位置分解能は301 μm となった。

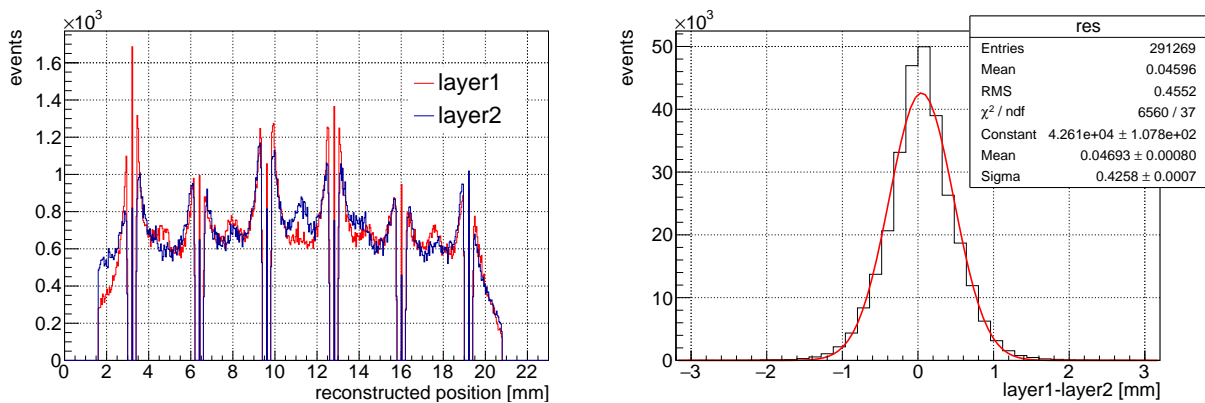


図 C.5: Staggered タイプの再構成された位置および2レイヤーの差。1本ずつ読み出すよりも位置分解能が悪化している

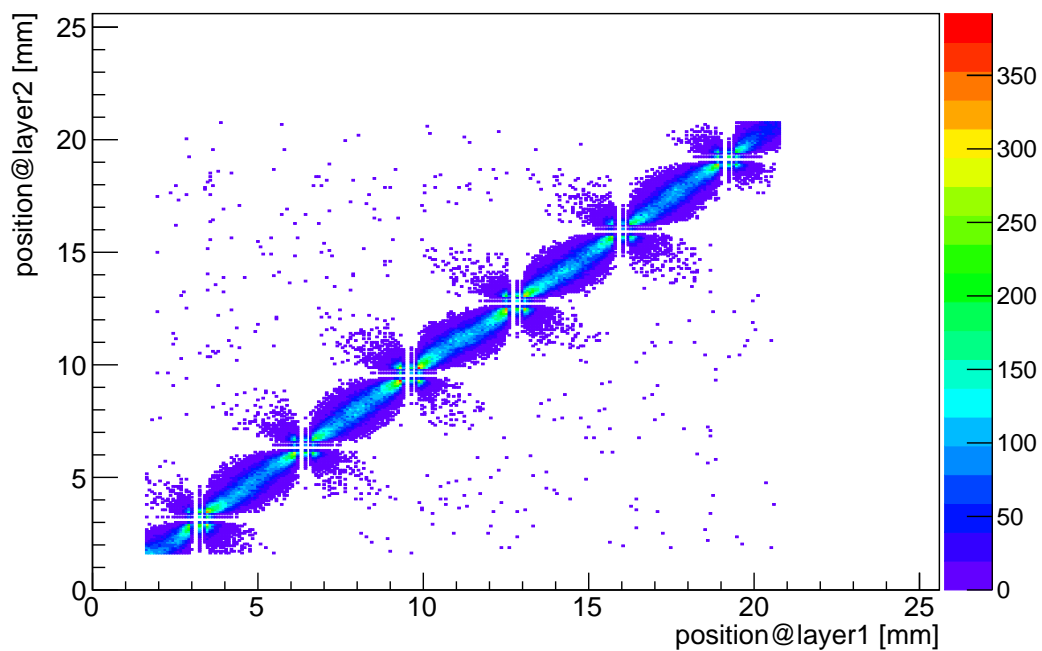


図 C.6: 再構成された位置の二次元分布

また、図 C.7 のように検出器を傾けた場合の光量を測定した。これは入射角度依存性の測定とは異なり、実質の粒子の path length が長くなるという条件での測定になる。

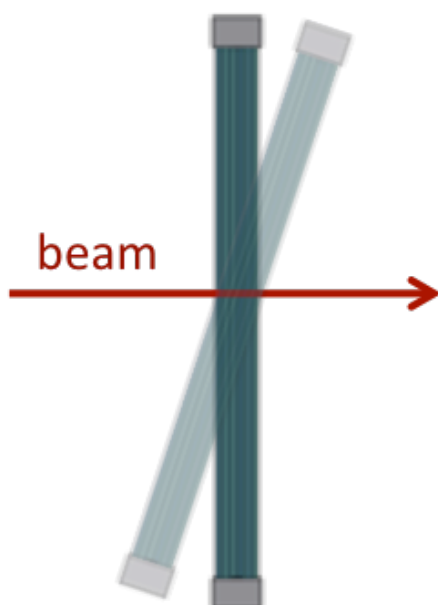


図 C.7: ビームに対する検出器の回転方向。実質の粒子の path length が伸びる方向に傾けている

測定の結果を図 C.8 に示す。45 度に傾けた場合は期待どおり 1.4 倍程度の光量になっていることがわかる。

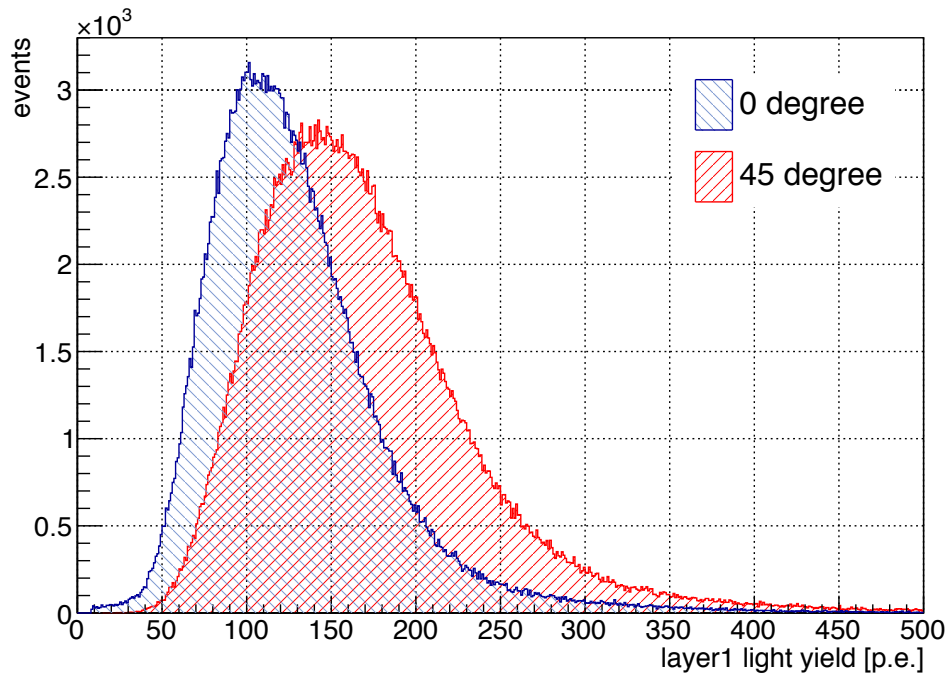


図 C.8: 45 度で入射した時の光量の変化。45 度傾けた場合は、期待されるように 1.4 倍近い光量が得られた

C.4 位置分解能に関する考察

Staggered タイプの位置分解能が 1 本ずつ読み出す場合と比べ悪化した主な原因として、クッキーにおけるファイバー断面のアラインメントがあげられる。図 C.9 に顕微鏡で見たファイバー断面を示す。ファイバーをクッキーに接着する際は、あらかじめファイバー断面の大きさよりも 5% 程度おおくあけた穴にファイバーを通し、オプティカルセメントを流し込む。このときこの穴の中でのファイバーの位置を調整することはむずかしく、最大で 100 μm 程度の位置のずれが生じてしまう。クッキーでのアラインメントがずれることで、とくに MPCC の角に位置するファイバーの光量が期待通り均等にわかれなくなってしまうため位置分解能に大きく影響が出ると考えられる。したがって、Staggered タイプのように MPCC をまたがるようなファイバーの配置を行うことは高い位置分解能を目指すにあたって避けるべきであるということがわかった。

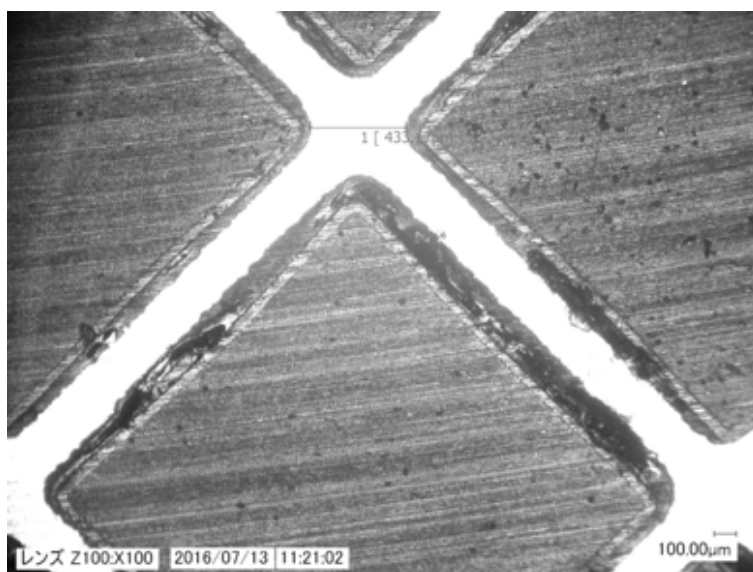


図 C.9: 顕微鏡で見たファイバーの断面。ファイバーの断面積よりも大きな穴を開け、そこにファイバーを通して様子が見える

C.5 Staggered タイプ検出器のまとめ

Staggered タイプ検出器は、ファイバーとMPPCのチャンネルを1対1にしないことによってチャンネル数を半減することを目的とした検出器である。ビームテストによって測定した位置分解能は $301\ \mu\text{m}$ であり、1本ずつ読み出した場合と比べ位置分解能が悪化した。これはファイバークッキーのアライメントが原因であると考えられ、ファイバーとMPPCは1本ずつ対応させ、クッキーに余裕を持たせることが重要であるとわかった。

付録D ビームテスト補足

D.1 光量測定の方法

ここでは本文中で述べたようにファイバーの中心を通った際の光量ではなく、ファイバー全体を粒子が通過したときの光量分布を紹介する。図 D.1 においてファイバー 1、2 のいずれかにヒットがあった場合とファイバー 6、7 のいずれかにヒットのあった場合のコインシデンスをとり、さらにファイバー 3 または 4 にはヒットがなかったという条件を課すことで、ファイバー 4 を通過した粒子の光量を測定する。

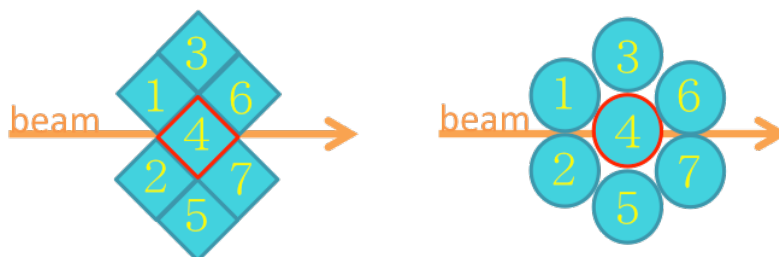


図 D.1: 光量の測定方法(再掲)。ファイバー 1、2 とファイバー 6、7 をそれぞれ前後のトリガーとして用い、ファイバー 3、4 を VETO 用のファイバーとする

図 D.2 に結果を示す。角ファイバーでは光量が 0 p.e. から中央を通る際の最大光量まである程度一様に分布している様子が見られる。一方で、丸ファイバーはピークがよく見えている。これはファイバーの端を通ったときもある程度の光量をもつことを意味する。これは付録 B に述べるように、丸ファイバーの Trapping efficiency が中心からの位置に依存するためであると考えられる。したがってこの場合は粒子の path length が光量に比例しないため、丸ファイバーは正確に位置を再構成するのに向いていない。

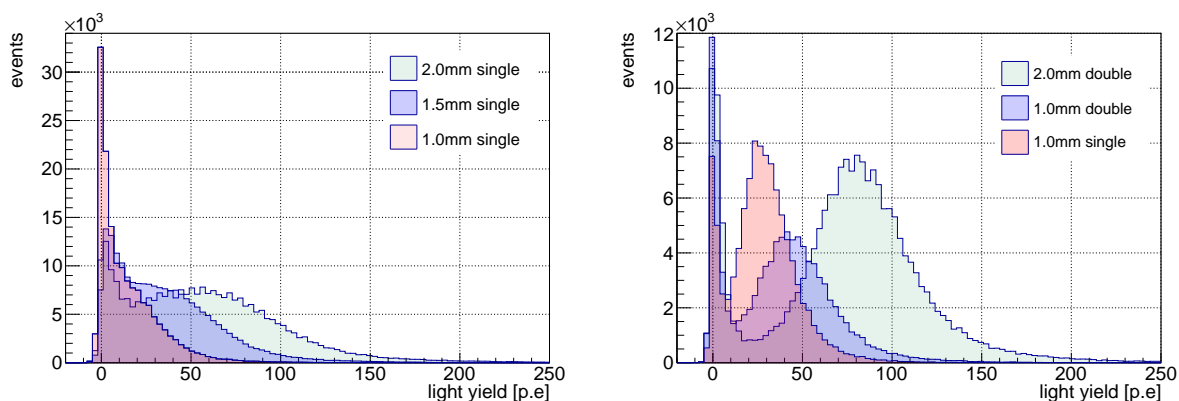


図 D.2: ファイバー全体の光量。ファイバー 4 を粒子が通過したときの光量分布

D.2 丸ファイバー検出器

D.2.1 丸ファイバー検出器の概要

第2回ビームテストにおいて、丸ファイバーを用いた検出器を用意し、角ファイバーとの位置分解能の比較を行った。図 D.3 に丸ファイバー検出器の概要を示す。俵積みによくなかたちで最密になるようにレイヤーを組んでいる。用いたファイバーは 2 mm の double clad で、30 cm の長さのファイバーを用いて読み出しから 15 cm のところにビームを照射した。ファイバーの固定は図 D.4 のように半円の並んだジグで両端から押さえるようにして行った。このため、後述するように layer1 の下流側の段や layer2 の上流側の段はアラインメントがうまくできていなかった可能性がある。

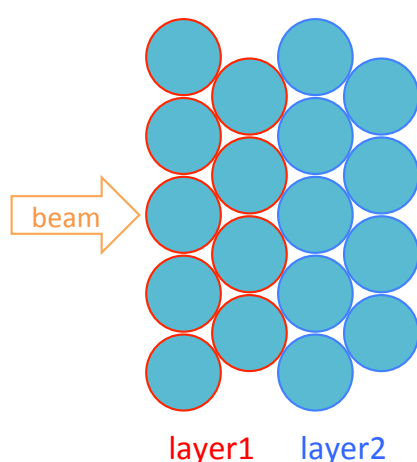


図 D.3: 丸ファイバー検出器

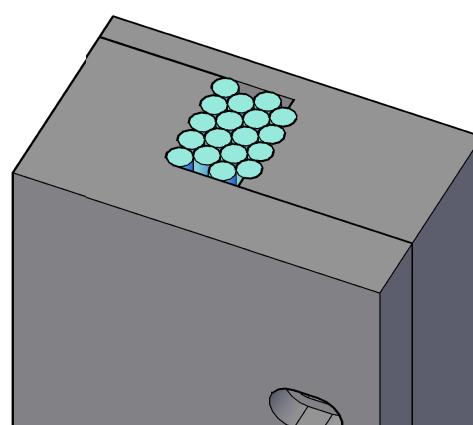


図 D.4: 丸ファイバーのジグ

D.2.2 位置分解能の測定結果

図 D.5 に丸ファイバーの光量を示す。レイヤーにヒットがあったときに最大の光量を持つチャンネルの光量分布であり、100 p.e. 付近にピークをもつ分布となっている。第5章で評価した様々なファイバーの光量測定の結果では、2 mm の丸ファイバーで光量が低下している可能性と予想したが、今回の測定は予想を裏付ける結果となった。

また、図 D.6 に再構成された位置および再構成された位置の2レイヤーの差を示す。layer1 の 4 mm 付近での分布が他の部分と違うことがわかる。これはレイヤー内でのファイバーのアラインメントがうまくいっていなかったために起こったと考えている。そのため位置分解能においても左右対称なかたちになっていないことがわかる。

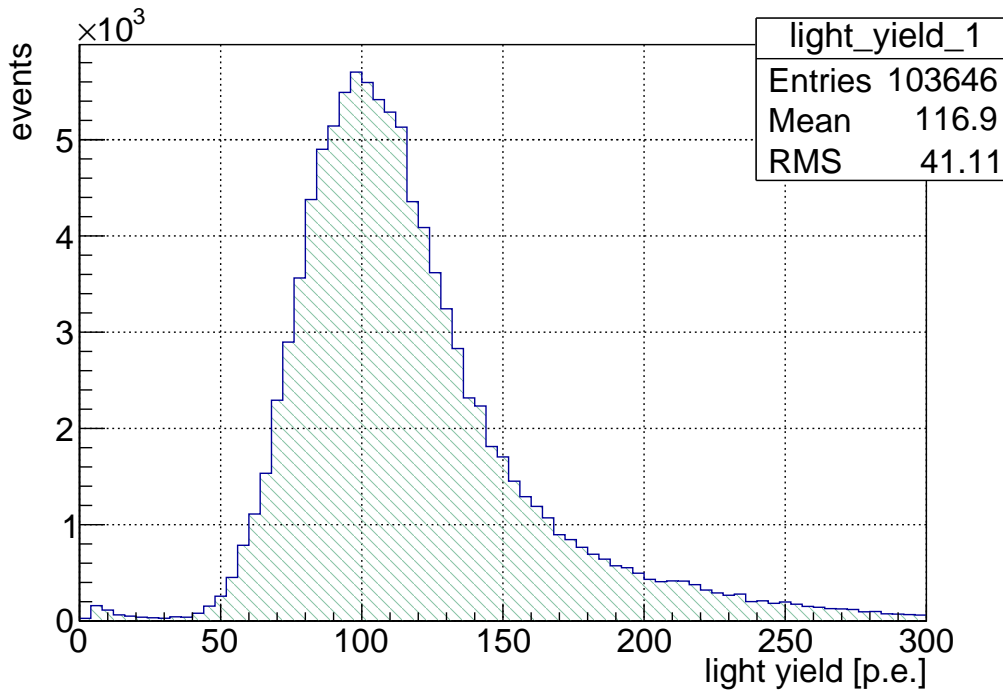


図 D.5: 丸ファイバー検出器の光量。本文中の光量分布測定よりも大きい光量となっている。これは光量測定の際に 2.0 mm 丸ファイバーのアラインメントがずれていたという予想を裏付ける結果となった

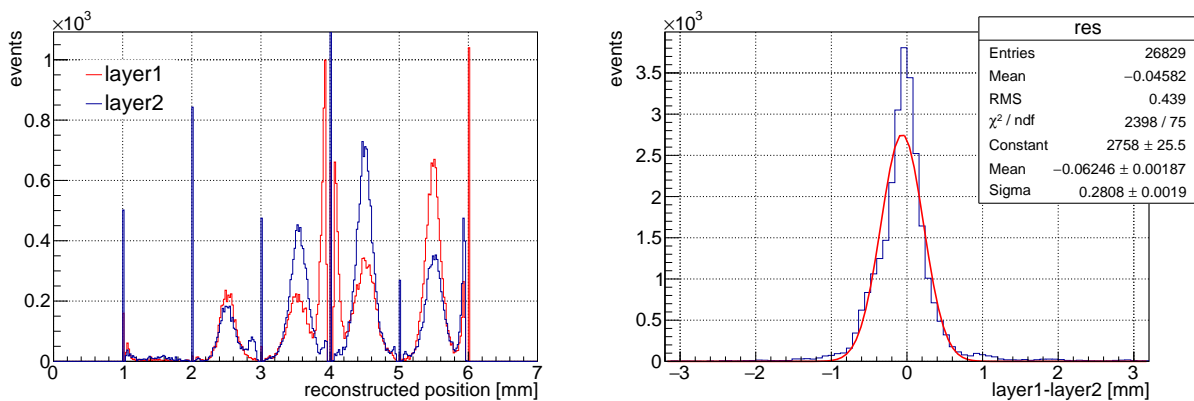


図 D.6: 丸ファイバー検出器での再構成された位置および 2 レイヤーの差。layer1 の再構成された位置において、4 mm 付近での分布が他と異なっている様子が見られる。これはレイヤーのアラインメントが正しく行われていなかったためであると考えられる

D.2.3 入射角度依存性

角ファイバー同様に、まずはモンテカルロシミュレーションを行った。図 D.7 にシミュレーションによって求められた真の位置と再構成された位置の差を示す。0° 入射の場合においても真の位置と再構成された位置の差にはふたつのピークが見える。また、丸ファイバーでは 30° で入射し

た場合が角ファイバーの 45° の場合にあたるが、 2 mm の幅よりかなり広がった分布となっている。この原因についてはさらに詳しい調査が必要である。

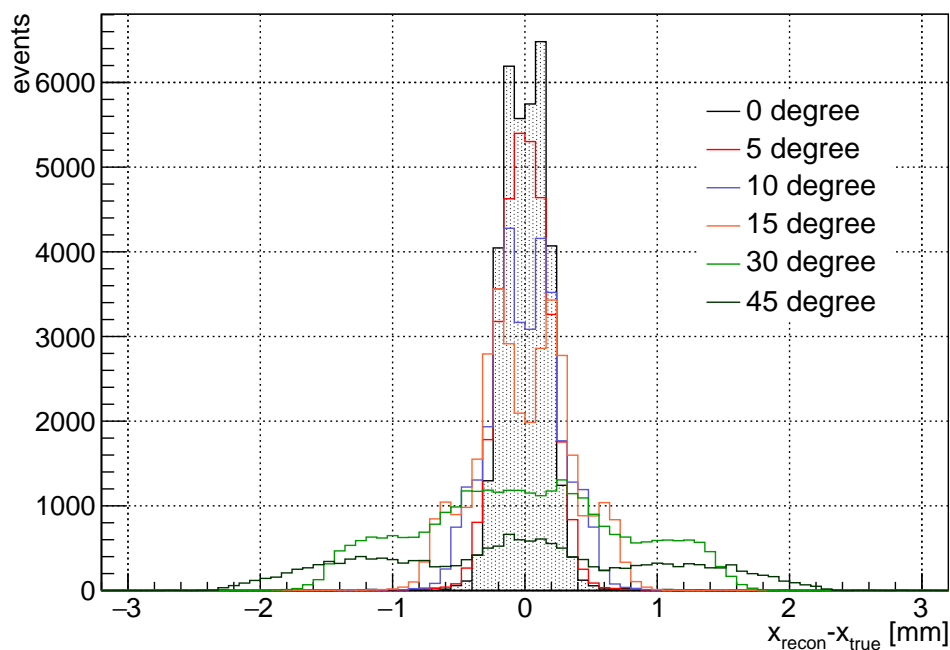


図 D.7: 丸ファイバー検出器のシミュレーション結果

図 D.8 にそれぞれの入射角度における 2 レイヤー間の位置の差を示す。ピークの数や位置などはシミュレーションとおおまかに一致しているが、先に述べたファイバーのアラインメントの正確さにより、期待と異なっている部分も見られる。

以上の結果より、丸ファイバーは正確なアラインメントを行うことがむずかしく、期待通りに位置を再構成することが困難であるということがわかった。

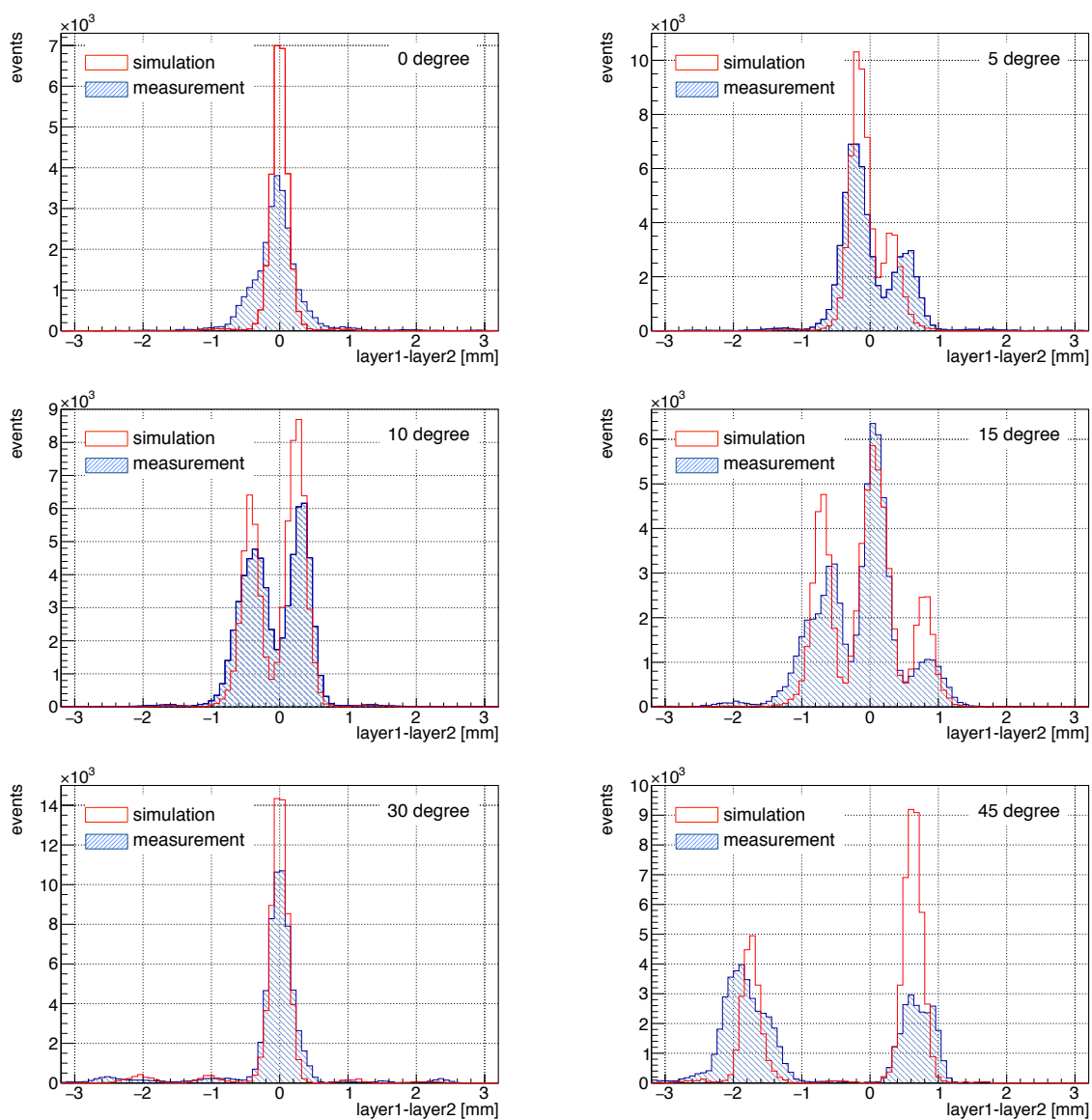


図 D.8: 丸ファイバー検出器で回転させたときの 2 レイヤーでの再構成された位置の差

表 目 次

2.1	陽子ビームのパラメータ	8
2.2	T2K の系統誤差一覧	18
4.1	SCSF-78 の構成	32
4.2	ケーブル・コネクタ一覧	40
4.3	EASIROC PreAmp 設定値一覧	42
5.1	ビーム性能	48
5.2	DAQ に用いたモジュール等一覧	52
5.3	光量測定の結果	56
5.4	位置分解能の一覧	69
5.5	光量の変化	73
5.6	ペDESTAL の変化	75
5.7	全種類のファイバーにおける位置分解能の一覧	76
5.8	入射角度ごとの再構成に影響を受ける領域の割合	80
6.1	チャンネル数の概算	86
B.1	2.0 mm 角ファイバーの厚み一覧	94
B.2	2.0 mm 角ファイバーの断面積一覧	95

目 次

1.1	スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノの観測結果	3
1.2	OPERA 実験による 5 つ目の ν_τ 出現イベントの候補	4
1.3	ニュートリノの質量階層性	6
2.1	T2K 実験の概要	7
2.2	J-PARC の概要	8
2.3	ニュートリノビームラインの概要	9
2.4	off-axis 角とニュートリノエネルギーの関係および振動確率	10
2.5	ニュートリノエネルギーと反応断面積の関係	10
2.6	前置検出器の設置されているニュートリノモニター棟の様子	10
2.7	INGRID 検出器	11
2.8	INGRID で測定したニュートリノビームプロファイル	11
2.9	INGRID のイベントディスプレイ	12
2.10	ND280 検出器	13
2.11	スーパーカミオカンデの検出器概要	14
2.12	スーパーカミオカンデにおけるイベントディスプレイ	15
2.13	スーパーカミオカンデの粒子識別能力	15
2.14	T2K による δ_{CP} の制限	16
2.15	スーパーカミオカンデで再構成されたニュートリノのエネルギー	17
2.16	$\sin^2\theta_{23}$ および Δm_{23}^2 の測定結果	17
3.1	ニュートリノ反応のダイアグラム	19
3.2	CCQE 反応と 2p-2h 反応	20
3.3	CCQE を仮定して再構成されたニュートリノのエネルギー	21
3.4	CCQE および 2p-2h 反応における陽子の運動量分布	21
3.5	原子核乾板の顕微鏡写真	22
3.6	鉄標的 ECC と再構成された飛跡	23
3.7	水標的 ECC の写真	23
3.8	期待されるニュートリノイベント数	24
3.9	検出器の位置関係	25
3.10	INDRID で観測されるサンドミュオンイベントレート	26
3.11	ミュオンの運動量-角度分布	27
4.1	ファイバートラッカーの種類	29
4.2	位置検出の原理	30

4.3	プロトタイプ検出器の概要	31
4.4	Scintillating fiber の概要	31
4.5	SCSF-78	32
4.6	SCSF-78 の emission spectrum	32
4.7	減衰長測定のセットアップ	33
4.8	SCSF-78 の減衰長	33
4.9	波長と減衰長の関係	34
4.10	MPPC アレイおよび感度波長	35
4.11	MPPC アレイの信号の ADC 分布	36
4.12	印加電圧とゲインの関係	36
4.13	MPPC アレイの V_{bd}	36
4.14	MPPC アレイのオーバー電圧	37
4.15	MPPC アレイの温度依存性	37
4.16	PDE 測定方法	38
4.17	MPPC アレイの PDE のばらつき	38
4.18	ファイバークッキーのデザイン	39
4.19	64 本のファイバー断面の様子	39
4.20	読み出しボードとクッキー	39
4.21	MPPC 読み出しボード	40
4.22	EASIROC モジュールの外観および内部の回路図	41
4.23	EASIROC の Hold タイミング	41
4.24	PreAmp の応答	43
5.1	第 1 回ビームテストに用いた検出器の写真	45
5.2	第 1 回ビームテストに用いた検出器のファイバー構成	45
5.3	検出器 A と検出器 B の写真	46
5.4	ファイバー固定のためのジグ	47
5.5	第 2 回ビームテストに用いた検出器のファイバー構成	47
5.6	東北大学電子光物理学研究センターのビームライン	48
5.7	セットアップのイメージ: 横置き	49
5.8	セットアップ写真: 縦置き	49
5.9	セットアップ写真: 横置き	50
5.10	実際のビームラインの写真	50
5.11	片読みの場合のデータ収集システム	51
5.12	両読みの場合のデータ収集システム	51
5.13	トリガーに用いたシンチレータ	53
5.14	トリガー PMT の典型的な光量分布	53
5.15	LED で測定したゲインのフィッティング	54
5.16	光量の測定方法	55
5.17	光量測定の結果	55

5.18	光量のフィット	56
5.19	ファイバーの太さと光量の関係	57
5.20	Hit efficiency 測定時のレイヤーの定義	58
5.21	layer1 の光量分布	59
5.22	検出器の Hit efficiency	59
5.23	ファイバーのクラッドによる不感領域	60
5.24	1Hit と 2Hits の場合の再構成された位置	60
5.25	ペDESTALのレート依存性	61
5.26	MPPC のダークノイズ	62
5.27	ヒットがあったレイヤーのなかで最大光量をもつチャンネルの光量分布	63
5.28	垂直入射の場合の再構成された位置と 2 レイヤーの差: 第 1 回の結果	63
5.29	layer1 と layer2 の相関: 第 1 回の結果	64
5.30	モンテカルロシミュレーションにより再構成された位置と 2 レイヤーの差	65
5.31	垂直入射の場合の再構成された位置と 2 レイヤーの差: 第 2 回の結果	66
5.32	layer1 と layer2 の相関: 第 2 回の結果	66
5.33	検出器 B のビーム照射位置	67
5.34	読み出しまでの距離を変化させたときの位置分解能	68
5.35	両読み込みのときの位置分解能	69
5.36	期待される位置分解能の変化と結果の比較	70
5.37	クロストークの概念図	71
5.38	測定に用いたファイバーの断面イメージ	71
5.39	ヒットのあったレイヤー内で最大の光量を持つチャンネルの光量分布	72
5.40	黒ペイントがある場合の光量分布	72
5.41	光量の変化プロット	73
5.42	ペDESTAL付近の光量分布	74
5.43	黒ペイントがある場合のペDESTAL付近の光量	74
5.44	ペDESTALの変化プロット	75
5.45	全種類のファイバーにおける位置分解能	76
5.46	反射材、黒ペイント、オプティカルセメント塗布時にそれぞれ再構成された位置	77
5.47	入射角度依存性の測定方法	78
5.48	回転させたときの 2 レイヤーでの再構成された位置の差	79
5.49	入射角度のちがいによる位置再構成への影響	80
5.50	シミュレーションによる $x_{\text{recon}}-x_{\text{true}}$	81
5.51	顕微鏡で見たファイバー断面のダメージ	82
5.52	ポリスチレン中での $\frac{dE}{dx}$	83
6.1	組み合わせ読み出しのイメージ	85
6.2	角度によるトラックマッチング	87
A.1	原子核乾板のイメージ	91
A.2	現像直後のフィルム	92

A.3	超高速自動飛跡読取装置 (HTS)	92
B.1	デジタル測定器	93
B.2	ファイバーの太さ測定	93
B.3	2.0 mm 角ファイバーの厚み	94
B.4	2.0 mm 角ファイバーの断面積	95
B.5	丸ファイバーの trapping efficiency	96
C.1	Staggered 検出器	97
C.2	宇宙線測定のセットアップ	98
C.3	宇宙線によるイベントディスプレイ	98
C.4	宇宙線の光量分布	99
C.5	Staggered タイプの再構成された位置および 2 レイヤーの差	99
C.6	再構成された位置の二次元分布	100
C.7	ビームに対する検出器の回転方向	100
C.8	45 度で入射した時の光量の変化	101
C.9	顕微鏡で見たファイバーの断面	102
D.1	光量の測定方法 (再掲)	103
D.2	ファイバー全体の光量	103
D.3	丸ファイバー検出器	104
D.4	丸ファイバーのジグ	104
D.5	丸ファイバー検出器の光量	105
D.6	丸ファイバー検出器での再構成された位置および 2 レイヤーの差	105
D.7	丸ファイバー検出器のシミュレーション結果	106
D.8	丸ファイバー検出器で回転させたときの 2 レイヤーでの再構成された位置の差	107

参考文献

- [1] K. Kodama *et al.*, "Observation of tau neutrino interactions." *Phys. Lett. B* 504.3 (2001): 218-224.
- [2] M. H. Ahn *et al.*(K2K Collaboration), "Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment " *Phys. Rev. D* 74 (2006): 072003.
- [3] K. Abe *et. al.*(Super-Kamiokande Collaboration), "Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande " *Phys. Rev. Lett.* 110(2013): 181802.
- [4] Y. Fukuda *et al.*(Super-Kamiokande Collaboration), "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos." *Phys. Rev. Lett.* 81.8 (1998): 1562.
- [5] N. Agafonova *et al.*(OPERA Collaboration), "Discovery of τ Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment." *Phys. Rev. Lett.* 115.12 (2015): 121802.
- [6] K. Abe *et.al.*(Super-Kamiokande Collaboration), "Solar neutrino results in Super-Kamiokande-III. " *Phys. Rev. D* 83.5, 052010(2011): 052010.
- [7] B. Aharmim *et. al.*(SNO Collaboration), "Measurement of the ν_e and Total 8B Solar Neutrino Fluxes with the Sudbury Neutrino Observatory Phase-III Data Set. " *Phys. Rev. C* 87.1 (2013): 015502.
- [8] S. Abe *et al.*(KamLAND Collaboration), "Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND. " *Phys. Rev. Lett.* 100.22 (2008): 221803.
- [9] C. Patrignani *et al.*(Particle Data Group), *Chin.Phys.C*, 40, 100001(2016).
- [10] P. Adamson *et al.*(MINOS Collaboration), "Measurement of the Neutrino Mass Splitting and Flavor Mixing by MINOS. " *Phys. Rev. Lett.* 106.18 (2011): 181801.
- [11] P. Adamson *et al.*(NOvA Collaboration), "First measurement of muon-neutrino disappearance in NOvA." *Phys. Rev. D* 93.5 (2016): 051104.
- [12] Y. Ashie *et al.*(Super-Kamiokande Collaboration), "Measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by Super-Kamiokande I." *Phys. Rev. D* 71.11 (2005): 112005.
- [13] M. Apollonio *et al.*(Chooz Collaboration), "Search for neutrino oscillations on a long baseline at the CHOOZ nuclear power station." *Eur. Phys. J C* 27.3 (2003): 331-374.

-
- [14] F. P. An *et al.*(DayaBay Collaboration), "Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay." *Phys. Rev. Lett.* 108.17 (2012): 171803.
- [15] J. K. Ahn *et al.*(RENO Collaboration), "Observation of reactor electron antineutrinos disappearance in the RENO experiment." *Phys. Rev. Lett.* 108.19 (2012): 191802.
- [16] Y. Abe *et al.*(Double Chooz Collaboration), "Reactor $\bar{\nu}_e$ disappearance in the Double Chooz experiment." *Phys. Rev. D* 86.5 (2012): 052008.
- [17] P. F. Harrison, D. H. Perkins and W. G. Scott, "Tri-bimaximal mixing and the neutrino oscillation data" *Phys. Lett. B* 530.1 (2002): 167-173.
- [18] S. Pascoli, S. T. Petcov and A. Riotto *et al.*, "Connecting low energy leptonic C P violation to leptogenesis." *Phys. Rev. D* 75.8 (2007): 083511.
- [19] S. Pascoli, S. T. Petcov and A. Riotto, "Leptogenesis and low energy CP-violation in neutrino physics." *Nucl. Phys. B* 774.1 (2007): 1-52.
- [20] S. F. King, and C. Luhn, "Neutrino mass and mixing with discrete symmetry." *Rep. Prog. Phys.* 76.5 (2013): 056201.
- [21] E. Majorana. "Theory of the Symmetry of Electrons and Positrons." *Nuovo Cim* 14.171 (1937): 50.
- [22] E. Ma and P. Roy, "Model of four light neutrinos in the light of all present data." *Phys. Rev. D* 52.9 (1995): R4780.
- [23] J-PARC HP, <http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>
- [24] 木河達也, "T2K 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究" 京都大学修士論文 (2011).
- [25] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector." *Nucl. Instrum. Meth. A* 694 (2012): 211-223.
- [26] T2K-ND280, Technical Design Report (2006).
- [27] S. Assylbekov *et al.*, "The T2K ND280 off-axis pizero detector." *Nucl. Instrum. Meth. A* 686 (2012): 48-63.
- [28] P. A. Amaudruz *et al.*, "The T2K fine-grained detectors." *Nucl. Instrum. Meth. A* 696 (2012): 1-31.
- [29] N. Abgrall *et al.*, "Time projection chambers for the T2K near detectors." *Nucl. Instrum. Meth. A* 637.1 (2011): 25-46.
- [30] D. Allan *et al.*, "The electromagnetic calorimeter for the T2K near detector ND280." *J. Instrum.* 8.10 (2013): P10019.

-
- [31] S. Aoki *et al.*, "The T2K side muon range detector (SMRD)." Nucl. Instrum. Meth. A 698 (2013): 135-146.
- [32] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "The T2K experiment." Nucl. Instrum. Meth. A 659.1 (2011): 106-135.
- [33] スーパーカミオカンデ HP, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/eventdisplay.html>
- [34] A. Himmel (Super-Kamiokande Collaboration), "recent results from Super-Kamiokande." AIP Conf.Proc. 1604 (2014): 345-352.
- [35] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with 6.6×10^{20} protons on target." Phys. Rev. D 91.7 (2015):072010.
- [36] 市川温子, 岩本康之介, 坂下健, 高エネルギーニュース, 35.3 (2016) :129.
- [37] K. Abe *et al.*(T2K Collaboration), "Proposal for an Extended Run of T2K to 20×10^{21} POT " arXiv:1609.04111 (2016).
- [38] J. Nieves, I. R. Simo and M. J. V. Vacas, "Inclusive charged-current neutrino-nucleus reactions." Phys. Rev. C 83.4 (2011): 045501.
- [39] M. Martini *et al.*, "Neutrino and antineutrino quasielastic interactions with nuclei." Phys. Rev. C 81.4 (2010): 045502.
- [40] NIST PSTAR, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>
- [41] Tsutomu Fukuda, Private communication.
- [42] H. Rokujo *et al.*, "Multi-stage shifter for subsecond time resolution of emulsion gamma-ray telescopes." Nucl. Instrum. Meth. A 701 (2013): 127-132.
- [43] Taichiro Koga, "Research and development of a new neutrino detector for precise measurement of neutrino-nucleus cross sections " 東京大学修士論文 (2015).
- [44] Kenichi Kin, "Measurement of neutrino interactions at an off-axis angle 1.6 degrees using the near-detector INGRID and development of a new neutrino near-detector for the T2K neutrino oscillation experiment " 大阪市立大学修士論文 (2016).
- [45] 若松慶樹, "T2K 長基線ニュートリノ振動実験における ニュートリノビームモニター INGRID を用いた Off-axis 角 1.65 度でのニュートリノ反応の測定 " 大阪市立大学修士論文 (2015).
- [46] LHCb Collaboration, "LHCb Tracker Upgrade Technical Design Report " No. CERN-LHCC-2014-001. (2014).
- [47] Kuraray Co., Scintillator Fiber Products (1994).
- [48] 浜松ホトニクス社, MPPC カタログ.

-
- [49] OpenIt 汎用 MPPC 読み出しモジュール, <http://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public/MPPC-Readout-Module>
- [50] EASIROC MODULE User Guide.
- [51] 山本実加, "次世代長期線ニュートリノ実験に向けた高分解能飛跡検出器の開発" 京都大学修士論文 (2016).
- [52] 東北大学電子光理学研究センター HP, <http://hayabusa1.lns.tohoku.ac.jp>
- [53] KEK EASIROC モジュール講習会 資料 (2015).
- [54] L. Aliaga *et al.*, "Design, calibration, and performance of the MINERvA detector." Nucl. Instrum. Meth. A 743 (2014), 130-159.
- [55] T. Fukuda *et al.*, "Automatic track recognition for large-angle minimum ionizing particles in nuclear emulsions." J. Instrum. 9.12 (2014): P12017.
- [56] E. Eskut *et al.*, "The CHORUS experiment to search for μ oscillation." Nucl. Instrum. Meth. A 401.1 (1997): 7-44.
- [57] S. Aoki *et al.*, "Scintillating fiber trackers with optoelectronic readout for the CHORUS neutrino experiment." Nucl. Instrum. Meth. A 344.1 (1994): 143-148.
- [58] C. P. Achenbach, "Active optical fibres in modern particle physics experiments." arXiv preprint nucl-ex/0404008 (2004).