

T2K 前置検出器のアップグレードに
向けたシンチレーションファイバー
トラッカープロトタイプの開発

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

平成 25 年 3 月 12 日

概要

T2K(Tokai to Kamioka) 長基線ニュートリノ振動実験は2009年4月に開始された実験で、茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC の陽子ビームを用いて生成した世界最大強度のニュートリノビームを生成点直後に設置されている前置検出器と 295km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデで観測し、電子ニュートリノ出現モード、ミューニュートリノ消失モードの振動パラメータの精密測定を行う。T2K 実験は測定精度向上を目的として前置検出器のアップグレードを計画している。

ニュートリノの原子核との相互作用には様々な反応モードがあるが、T2K 実験において上記の精密測定を行うためにはそれぞれのニュートリノ反応について十分な理解が必要となる。しかし現在ニュートリノの反応断面積には大きな不定性があり、T2K 実験の振動解析において大きな系統誤差を生んでいる。このニュートリノ反応の不定性を減らすために、より低エネルギーの荷電粒子の飛跡を再構成できる前置検出器へのアップグレードが計画されている。その候補のひとつとして細かいシンチレーションファイバーを使った飛跡検出器の開発を進めている。現在使用している 1cm 角のシンチレータでは約 5cm 以上の荷電粒子の飛跡しか検出できなかったが、このアップグレードにより約 1cm のより短い飛跡まで再構成することが可能になりニュートリノ反応の理解が飛躍的に進む。

今回シンチレーションファイバー飛跡検出器のプロトタイプとして 1.5mm 角のシンチレーションファイバーを使用した小型の検出器を製作した。この検出器は棒状のシンチレーションファイバーを 8 本で 1 層としたものを x 方向と y 方向に交互に 8 層交差させた 64 チャンネルの飛跡検出器で、各チャンネルの光量から 3 次元的に飛跡を再構成することができる。本研究では上記のプロトタイプに使用するシンチレーションファイバー、光検出器 Monolithic Array Multi-Pixel Photon Counter (MPPC)、データを取得するための DAQ についてそれぞれ検出器を製作する前に性能試験を行いそれらが要求性能を満たすことを確認した。次にシンチレーションファイバーと、光検出器を固定させるための構造体を作成し飛跡検出器を組み立てた。そしてこの飛跡検出器に ^{90}Sr 線源から放射される β 線を照射し、荷電粒子が通過した時に得られる光量が飛跡を再構成するのに十分であることを確認した。また β 線が飛跡検出器内を通過する飛跡を再構成することに成功した。この研究により 1.5mm 角のシンチレーシヨ

ンファイバーを使用することで約 1cm 程度の飛跡を再構成することが可能であることが示された。

目次

第1章	ニュートリノ振動	3
1.1	ニュートリノとニュートリノ振動	3
1.2	ニュートリノ振動実験の現状	4
第2章	T2K 実験	6
2.1	実験の概要と目的	6
2.1.1	off axis 法	6
2.2	実験セットアップ	7
2.2.1	大強度陽子加速器施設 (J-PARC)	7
2.2.2	ニュートリノビームライン	8
2.2.3	前置検出器	8
2.2.4	後置検出器 (スーパーカミオカンデ)	11
第3章	超高分解能シンチレーションファイバートラッカー	15
3.1	目的	15
3.2	要求性能	16
3.3	基本デザイン	17
第4章	プロトタイプ検出器の製作	20
4.1	検出器の主構成物	20
4.1.1	シンチレーションファイバー	20
4.1.2	Monolithic MPPC array	20
4.2	読み出しボードとデータ取得システム	25
4.2.1	読み出しボード (EASIROC ボード)	25
4.2.2	データ取得ソフトウェア	27
4.3	プロトタイプ検出器のデザイン	28
4.3.1	デザインの概要	28
4.3.2	シンチレーションファイバーの表面処理	29
4.3.3	プロトタイプ検出器のための構造体	31

4.3.4	トリガー用シンチレータ	33
4.4	プロトタイプ検出器の製作	34
第5章	プロトタイプ検出器を用いた測定とデータ解析	41
5.1	読み出しボードの較正	41
5.1.1	Input DAC 値	41
5.1.2	Input DAC 値の較正方法	42
5.1.3	測定結果	42
5.2	Monolithic MPPC array の較正	44
5.2.1	キャリブレーション方法	44
5.2.2	測定結果	46
5.3	プロトタイプ検出器の線源を用いた試験	47
5.3.1	試験の概要	47
5.3.2	性能評価	49
5.3.3	光量	50
5.3.4	Hit efficiency	51
5.3.5	1cm 以下の飛跡の再構成	52
第6章	まとめと今後について	59

第1章 ニュートリノ振動

1.1 ニュートリノとニュートリノ振動

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、1930年にPauliによってその存在が予言され、1956年にReinesとCowanによる実験によってその存在が確認された粒子である。ニュートリノには荷電レプトンに対応した電子ニュートリノ、ミューオンニュートリノ、タウニュートリノが存在する。

ニュートリノの質量については素粒子物理学の標準模型において0と扱われてきた。しかし太陽ニュートリノや原子炉ニュートリノの観測からニュートリノの質量は有限で世代間で振動しているということが明らかになった。

以下簡単のためニュートリノが二世代の場合を考える。ニュートリノが質量を持つ場合フレーバーの固有状態は質量固有状態 (ν_1, ν_2) を用いて

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

と表せる。質量固有状態の時間発展は

$$\begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i(E_1 t - p_1 x)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_2 t - p_2 x)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1(t=0) \\ \nu_2(t=0) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

と表される。ここで E_i, p_i は ν_i のエネルギーと運動量を表す。

これよりフレーバー固有状態の時間発展は

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha(t) \\ \nu_\beta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i(E_1 t - p_1 x)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_2 t - p_2 x)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \nu_\alpha(t=0) \\ \nu_\beta(t=0) \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

となる。今、時刻 $t = 0$ 、位置 $x = 0$ で生成された ν_α が距離 L だけ飛行したとする。ニュートリノの質量はエネルギーより十分小さいとしてよいので、 $p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \approx E_i - \frac{m_i^2}{2E_i}$ の近似が成立することから式 1.4 は

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha(t) \\ \nu_\beta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \nu_\alpha(t=0) \\ \nu_\beta(t=0) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

となる。よって ν_α が距離 L だけ飛行した後に ν_β になる確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ と ν_α のままである確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$ は $\Delta m^2 \equiv m_1^2 - m_2^2$ の質量二乗差を用いて

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \times \Delta m^2 [eV^2] \times \frac{L [km]}{E_\nu [GeV]} \right) \quad (1.5)$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \times \Delta m^2 [eV^2] \times \frac{L [km]}{E_\nu [GeV]} \right) \quad (1.6)$$

となる。これらの式から確率 P は質量二乗差 Δm^2 と混合角 θ をパラメータとして、飛行距離 L とニュートリノエネルギー E_ν の関数としてフレーバー間で振動することがわかる。またこの振動が起きるのはフレーバー固有状態が質量固有状態と異なり ($\theta \neq 0$) かつ質量固有状態が縮退していない ($\Delta m^2 \neq 0$) 場合であることもわかる。

1.2 ニュートリノ振動実験の現状

ニュートリノ振動は 1998 年スーパーカミオカンデで共同実験グループの大気ニュートリノ観測により発見され [1]、2004 年 KEK からスーパーカミオカンデに人口ニュートリノを発射する K2K 実験によりその存在が確立された [2]。また 2010 年には OPERA 実験を実施する研究チームによりはじめて振動減少を直接的に確認したと発表された [3]。

ニュートリノ振動が確立されたからは、ニュートリノ振動パラメータを測定することでニュートリノの研究を行うフェーズへと移行した。以下にそのパラメータの測定現状についてまとめる。

- $\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$ スーパーカミオカンデの大气ニュートリノ観測 [1]、K2K 実験 [2]、MINOS 実験 [4]、T2K 実験 [9] により測定されており、振動パラメータは $2.31 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3.43 \times 10^{-3} eV^2, \sin^2 2\theta_{23} > 0.78(90\% C.L)$ である。
- $\Delta m_{12}^2, \theta_{12}$ スーパーカミオカンデ、SNO 実験による太陽ニュートリノ観測 [5][6]、KamLAND 実験 [7] での原子炉ニュートリノ観測により測定されており、振動パラメータは $\Delta m_{12}^2 \sim 8 \times 10^{-5} eV^2, \tan^2 \theta_{12} \sim 0.5$ である。
- $\Delta m_{13}^2, \theta_{13}$ 2011 年に T2K 実験によって世界で初めて $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動モードを示唆する結果が見られ [8]、2012 年 Daya Bay 実験 [10] によってこの値が 0 でないことが確かとなった。その後 Daya Bay 実験 [10][11]、Double Chooz 実験 [12][13]、RENO 実験 [14] などで行われた測定結果が発表され振動パラメータは $\sin^2(2\theta_{13}) = 0.097 \pm 0.048$ である。

第2章 T2K 実験

2.1 実験の概要と目的

T2K 長基線ニュートリノ振動実験は 2009 年 4 月に開始した実験で、茨城県東海村にある J-PARC 大強度陽子加速器施設の 30GeV 陽子シンクロトロンからの大強度陽子ビームより生成したミュオンニュートリノビームをビーム生成点直後に置かれた前置検出器と 295km 離れた岐阜県飛騨市にある後置検出器、スーパーカミオカンデ検出器で観測する。T2K 実験では世界最大強度のニュートリノビームと世界最大の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデを用いて以下の目標を世界最高感度で実現することを目指している。

- 電子ニュートリノ出現モード探索による混合角 θ_{13} の精密測定
- ミュオンニュートリノ消失の振動パラメータの精密測定

2.1.1 off axis 法

T2K 実験では陽子ビームを炭素標的に当てて、二次粒子の π 中間子の崩壊 ($\pi \rightarrow \nu_\mu$) で生まれるミュオンニュートリノを用いる。この時ニュートリノのエネルギー E_ν は π の方向からの角度のズレを θ とすると以下のように表せる。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos\theta)} \quad (2.1)$$

ここで E_π 、 p_π 、 m_π 、はそれぞれ π 中間子のエネルギー、運動量、質量を表し、 m_μ はミュオンの質量である。この式を用いて p_π と E_ν の関係をプロットすると図 2.1 になる。これを見ると $\theta = 0$ ではニュートリノエネルギーは π の運動量に比例するが、 $\theta = 2.0, 2.5, 3.0$ では比例していない。T2K 実験ではこの効果を利用するために世界で初めて Off-axis 法を

採用した。この方法はニュートリノのビーム軸を検出器方向からずらすことでエネルギー分布幅の狭いニュートリノスペクトルを得ることができる方法である。これによりスーパーカミオカンデにおいてニュートリノの振動確率が最大 (0.5-0.7GeV 付近) となるようなエネルギー分布幅の狭いニュートリノスペクトルが得られ、バックグラウンド事象を起こす高いエネルギーのニュートリノの数を抑えることができる。(図 2.2)

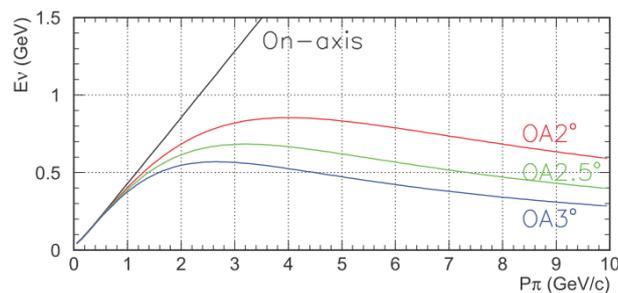


図 2.1: 中間子の運動量とニュートリノエネルギーの関係

2.2 実験セットアップ

2.2.1 大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

J-PARC の陽子加速器は線形加速器 (LINAC)、3GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、陽子シンクロトロン (MR) から構成される。LINAC で生成、加速された陽子は RCS、MR で順に加速され、最終的にビームエネルギー 30GeV、ビーム強度 750kW(デザイン値) まで到達する。その後、超電磁石を用いた速い取り出し (Fast Extraction:FX) でニュートリノビームラインへ輸送される。1 スピルあたり 8 バンチ、1 バンチの幅は 58ns、バンチ間隔 581ns のビーム構造になっている。

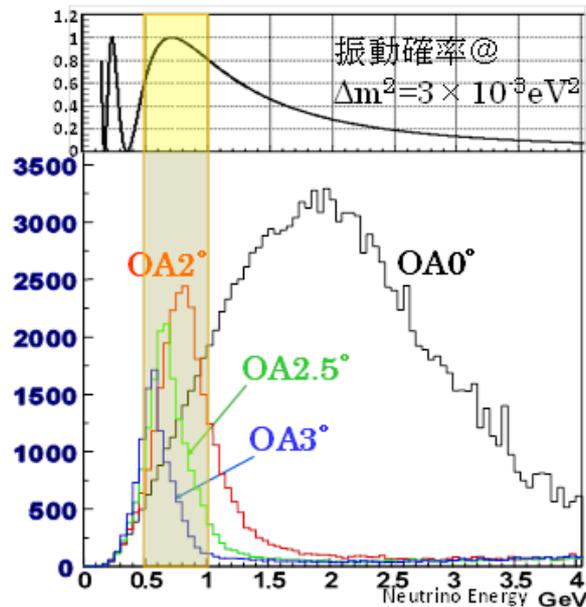


図 2.2: ニュートリノ振動確率 (上) と off-axis 法によるニュートリノエネルギー分布 (下)

2.2.2 ニュートリノビームライン

MR において 30GeV まで加速された陽子ビームは炭素標的に照射され、ハドロン反応により π 中間子、K 中間子が生成される。この π 中間子は電磁ホーンにより並行に収束され下流の崩壊領域において以下のように崩壊する。



この崩壊によりニュートリノビームが生成される。ビームに含まれるその他の粒子は崩壊領域の終端にあるビームダンプに吸収される。

2.2.3 前置検出器

T2K 実験では、炭素標的から 280m 下流の地点に前置検出器 (ND280) が設置されている。ND280 はビーム軸上に設置されている on-axis 検出器 (INGRID) と π 中間子崩壊点とスーパーカミオカンデの間に設置される off-axis 検出器から構成される。

on-axis 検出器 (INGRID)

on-axis 検出器、INGRID¹はニュートリノビーム軸上に設置されており、鉄層とシンチレータ層のサンドイッチ構造になったモジュール16台で構成される。(図 2.3) 鉄層がニュートリノ標的になり、ニュートリノ反応により生成される荷電粒子の飛跡をシンチレータ層で検出する。これにより各モジュールでのニュートリノ反応数からビームの中心を測定することができる。(図 2.4)

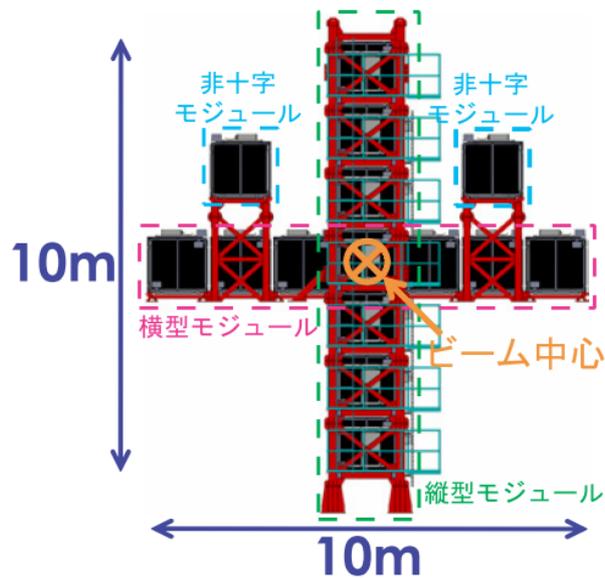


図 2.3: on-axis 検出器 INGRID

off-axis 検出器

off-axis 検出器は生成直後のニュートリノビームのフラックス、エネルギースペクトル、反応断面積を測定するための検出器である。(図 2.5) 検出器はマグネットで覆われており(磁場 0.2T)、以下の五つの検出器で構成される。

- tracker 以下の二種類の飛跡検出器を用いて、ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子の運動量を測定している。

¹Interactive Neutrino GRID

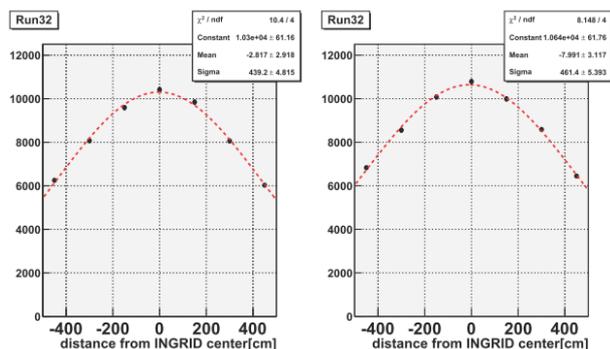


図 2.4: INGRID により求められたビームプロファイル (左: 鉛直方向。右: 水平方向)

- FGD(Fine Grained Detector) 二台のモジュールからなり片方はプラスチックシンチレータバーで構成されており、もう片方は水とシンチレータの二層構造となっている。シンチレータバーの大きさは約 1cm × 1cm である。ニュートリノの標的となり反応点付近の全ての荷電粒子を検出しニュートリノ反応の識別を行う。
- TPC(Time Projection Chamber) Ar を主としたガスが使われているガス電子増幅器 (micromegas detector) で 3 台用いられている。荷電粒子の曲がり具合から運動量を測定しニュートリノのエネルギーを再構成する。また単位長さ当たりのエネルギー損失測定により粒子識別を行う。
- P0D(π_0 detector) 鉛とプラスチックシンチレータのサンドイッチ構造と水ターゲットにより構成される。ニュートリノ反応により生じた π_0 の反応数を測定する。
- ECAL(Electromagnetic CALorimeter) マグネット内側の最外層にあり鉛層とシンチレータ層から成る。内部の検出器で起きた

ニュートリノ反応で生成される電子や γ が引き起こす電磁シャワーを捕らえそのエネルギーを測定する。

- SMRD(Side Muon Range Detector) マグネットヨークの間にプラスチックシンチレータが設置された検出器。大角度で散乱されたミュオンのエネルギーを測定する

図 2.6 はイベントディスプレイの例である。

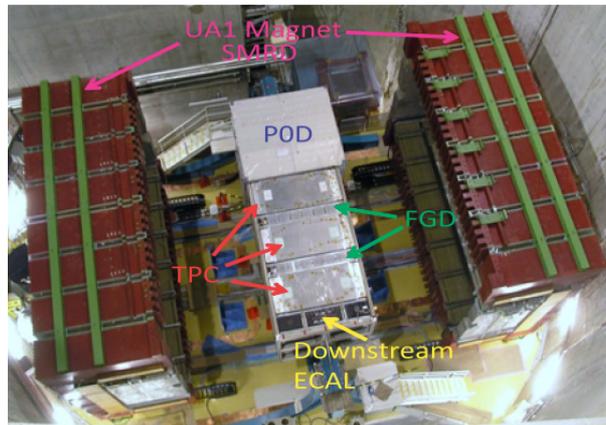


図 2.5: off-axis 検出器

2.2.4 後置検出器 (スーパーカミオカンデ)

後置検出器であるスーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande:SK) は 50kt(有効質量 22.5kt) の純水を用いた大型水チェレンコフ検出器である。(図 2.7) J-PARC から 295km 離れた岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下 1000m に位置している。この深度における宇宙線ミュオン強度は地上での約 10^{-5} となっており、スーパーカミオカンデにおける宇宙線ミュオン事象の頻度は約 $2Hz$ まで抑えられている。タンク内部に 20 インチの光電子増倍管が 11200 本設置されこれによって荷電粒子から発されるチェレン

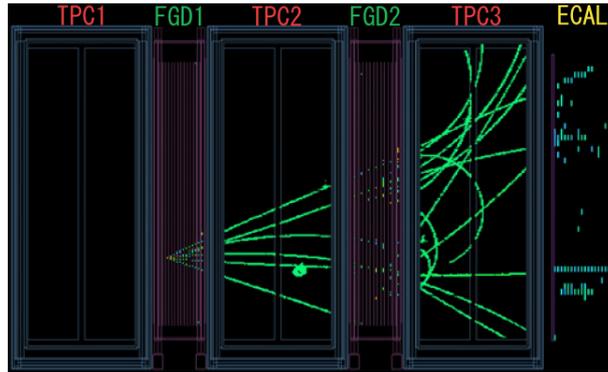


図 2.6: off-axis 検出器のイベントディスプレイ

コフ光を検出し、タンク外部には 1885 本の光電子増倍管が設置されこれによって宇宙線由来のバックグラウンドを除去する。

スーパーカミオカンデは、荷電粒子が水の中で運動する時に発するチェレンコフ光のその光量や到達時間、リングパターンなどから粒子の種類、生成点、エネルギー、運動方向などを再構成する。

ミュオンからのチェレンコフ光は図 2.8 のように明確なリングを形成するのに対して、電子は電磁シャワーを起こすので図 2.9 のようにリングの縁がぼやけたものになる。この効果を利用することでミュオンと電子を 1% 程度の誤認率で見分けることが可能となる。また π^0 が生成された場合 π^0 は即座に二つの γ に崩壊するため、図 2.10 のように γ の電磁シャワーによる不明瞭なリングが二つ観測される。この一方が検出されない場合や、同じ方向に γ が放出された場合は一つの不明瞭なリングしか観測されず、電子によるイベントと区別がつかない。よって π^0 を生成するニュートリノ反応は電子ニュートリノ出現モード探索におけるバックグラウンドとなる。

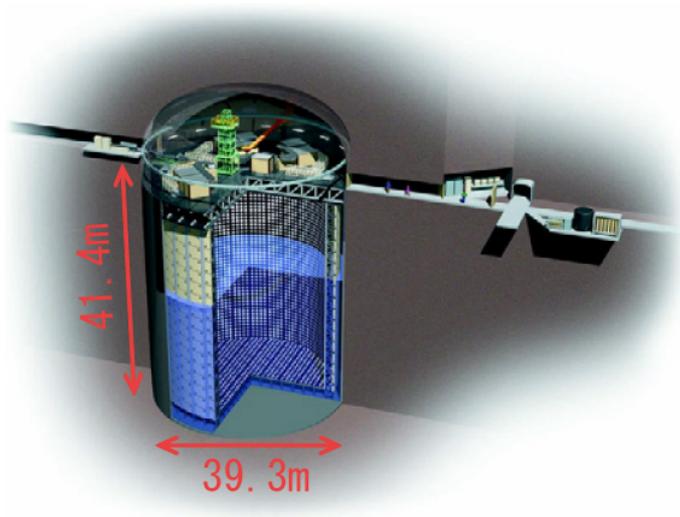


図 2.7: スーパーカミオカンデ概略図

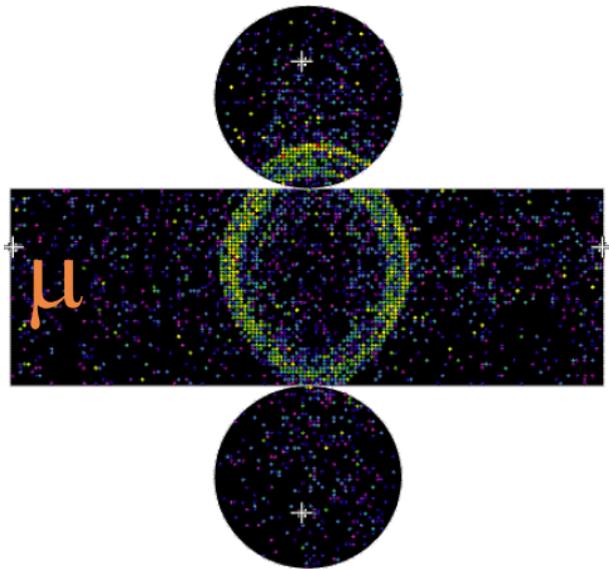


図 2.8: スーパーカミオカンデでの μ によるチェレンコフリングの例

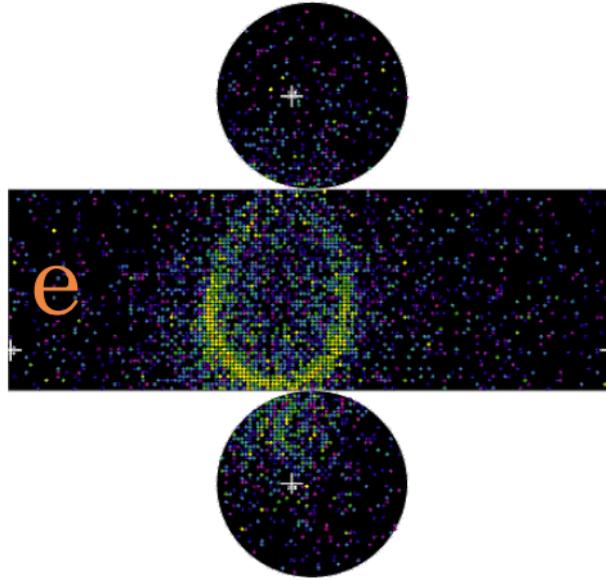


図 2.9: スーパーカミオカンデでの e によるチェレンコフリングの例

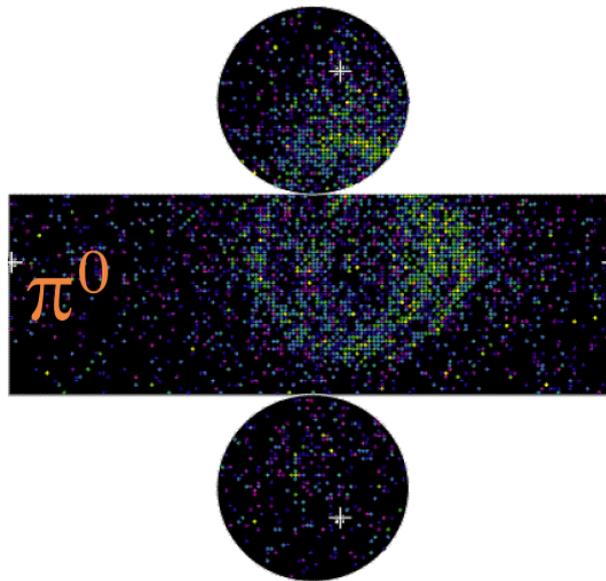


図 2.10: スーパーカミオカンデでの π^0 によるチェレンコフリングの例

第3章 超高分解能シンチレーションファイバートラッカー

3.1 目的

ニュートリノと原子核の反応モードのうち T2K 実験においてシグナルとなるのは荷電カレント準弾性散乱 (CCQE¹) 反応である。CCQE 反応は $\nu + p \rightarrow l + n$ (p が陽子、 l が荷電レプトン、 n が中性子) という反応で、二体反応であるため終状態の荷電レプトンの運動エネルギーと飛行方向から元のニュートリノのエネルギーを再構成することができる。T2K 実験において、ニュートリノ振動が起きる確率はニュートリノのエネルギーに依存するため、この反応を捉えることが重要なのである。しかしバックグラウンドも多い。例えば荷電カレント 1π 生成 (CC 1π Charged Current) 反応は $\nu + p \rightarrow l + n + \pi$ という反応で、もし終状態の π を逃してしまうと CCQE 反応と区別がつかなくなってしまう。よってニュートリノ反応を区別するために、反応点周りの荷電粒子の飛跡を検出することが重要となる。現在前置 off-axis 検出器においてニュートリノ反応点周りの飛跡再構成は FGD で行なっているが、使用しているシンチレータバーの断面が約 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ であるため、再構成可能である飛跡の長さは約 5cm 以上である。この再構成可能な飛跡の長さをより短くし、CCQE 反応を高い純度で選択できるようにすることがアップグレードの主眼である。そこで本研究ではシンチレーションファイバーを採用した検出器を開発することでこれを達成しようとした。

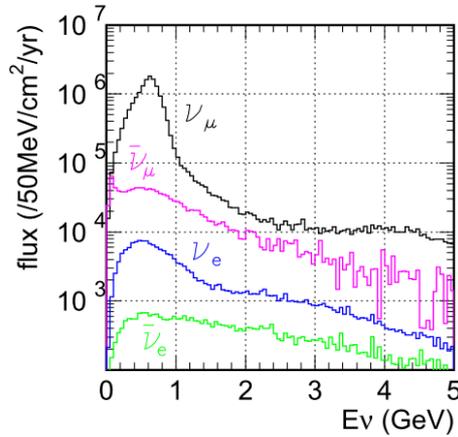


図 3.1: 前置 off-axis 検出器上でのニュートリノフラックス

3.2 要求性能

ニュートリノビームシミュレータ (JNUBEAM) を用い前置 off-axis 検出器上でのニュートリノビームを予測し、その後ニュートリノ反応シミュレータ (NEUT) を用いて二次粒子の生成をシミュレートした。まず前置 off-axis 検出器上でのニュートリノフラックスが図 3.1 である。これより全ニュートリノのうち ν_μ は約 90% を占める。

ニュートリノ反応シミュレータで ν_μ 反応の割合について計算しグラフ化したものが図 3.2 である。図 3.2 の左のグラフが全ニュートリノ反応イベントのもので、T2K のシグナルモードである CCQE 反応の割合は 36.0% である。二次粒子に陽子と μ があるものを要求すると図 3.2 の中央のグラフになり CCQE 反応の割合は 58.2% と増加し efficiency も 99.9% と高い数値を維持している。さらに二次粒子に π^+ 、 π^- がないということを要求すると図 3.2 右のグラフとなり CCQE 反応の割合が 80.8% となり、efficiency が 98.9% と高い割合を維持したままである。このように μ と陽子が存在し荷電 π がないイベントを要求することによって CCQE 反応の純度が高いデータを得ることが可能となる。

そこで off-axis 検出器上での CCQE 反応の結果生成された陽子の振る舞いを GEANT4 でシミュレーションした。このとき陽子はシンチレーションファイバー ($C_{10}H_{10}$) 内部ということ想定した。図 3.3 は CCQE 反応

¹Charged Current Quasi Elastic

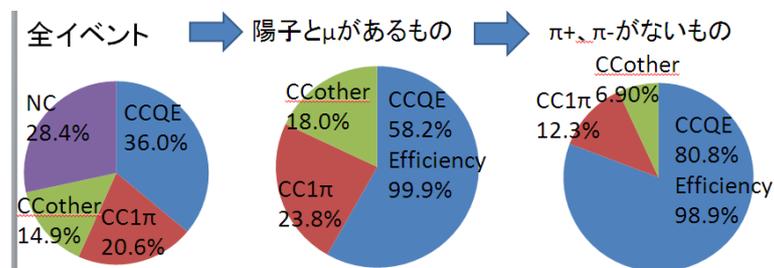


図 3.2: 前置 off-axis 検出器上でのニュートリノ反応の割合 (ν_μ についてのみ)

の結果生成された陽子の運動量分布で、シンチレーションファイバー中での飛距離の分布が図 3.4 である。現在再構成できる飛跡は 5cm 以上であるがそれは全陽子の 56.1% に相当する。もし 1cm 以上の陽子の飛跡を再構成できる場合、その陽子の割合は全陽子の 90.5% に相当し、その結果より多くの $CCQE$ 反応を再構成できることにつながる。

3.3 基本デザイン

現在使用している約 1cm 角のプラスチックシンチレータバーより小さいシンチレータを使用してより飛跡の短い粒子を捉えることを目指す。現在と同じくシンチレータ自身をニュートリノの標的とし、ニュートリノの反応で生成される二次粒子の飛跡をシンチレータのヒット情報から再構成する。シンチレータを層状に並べ、その層を x 方向、 y 方向に交互に

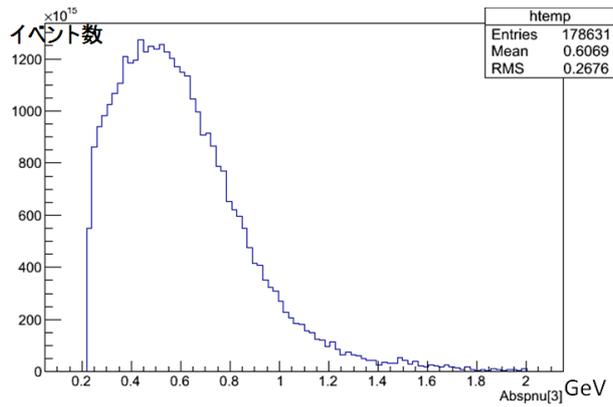


図 3.3: off-axis 検出器上で CCQE 反応の結果生成された陽子の運動量分布 (GeV)

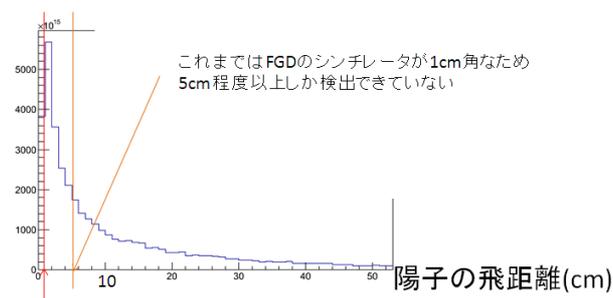


図 3.4: 前置 off-axis 検出器でのニュートリノ反応によって生成された陽子のシンチレーションファイバー中での飛程 (cm)

重ねて設置することで三次元飛跡再構成が可能となる。また光量から単位長さあたりのエネルギー損失を測定し dE/dx を求めることで荷電粒子の種類も判別も行う。

第4章 プロトタイプ検出器の製作

4.1 検出器の主構成物

4.1.1 シンチレーションファイバー

プロトタイプ検出器で使用する 1.5mm 角のシンチレーションファイバーは、クラレ社の SCSF-78SJ である。中央の core の部分はポリスチレン (C_8H_8)、密度 $1.05g/cm^3$ で、外側の cladding の部分はポリメチルメタクリレート ($C_5H_8O_2$)、密度 $1.19g/cm^3$ でできている。また core は S 型と呼ばれるポリスチレン繊維が揃ったもので、そうでない非 S 型に比べて曲げに強い。発光波長のピークは約 450nm 付近である。(図 4.1 は使用する SCSF-78SJ の発光する波長の分布である。)

このシンチレーションファイバーは後述する半導体光検出器、Monolithic MPPC array に接続されシンチレーションファイバーの蛍光が読み出される。

4.1.2 Monolithic MPPC array

プロトタイプ検出器でシンチレーションファイバーの蛍光を読み出すための光検出器として浜松ホトニクス社の Monolithic MPPC array (S11830-3344MF(X1)) を使用した。(図 4.2, 図 4.3) この光検出器には 16 の MPPC が搭載されており印加電圧は全チャンネル共通となっている。この光検出器の基本仕様を表 4.1 に示す。MPPC は半導体光検出器で個別に動作する複数の APD (Avalanche Photo Diode) のピクセルから成る。APD は逆電圧を印加することで光電流が増倍されるフォトダイオードで、逆電圧が一定以上 (ブレイクダウン電圧以上) になると増倍率が非常に大きいガイガーモードとなり電荷を出力する。 Q を APD から出力される電荷量、 C を APD ピクセルの静電容量、 V_{bias} を印加電圧、 V_{bd} をブレイクダウン

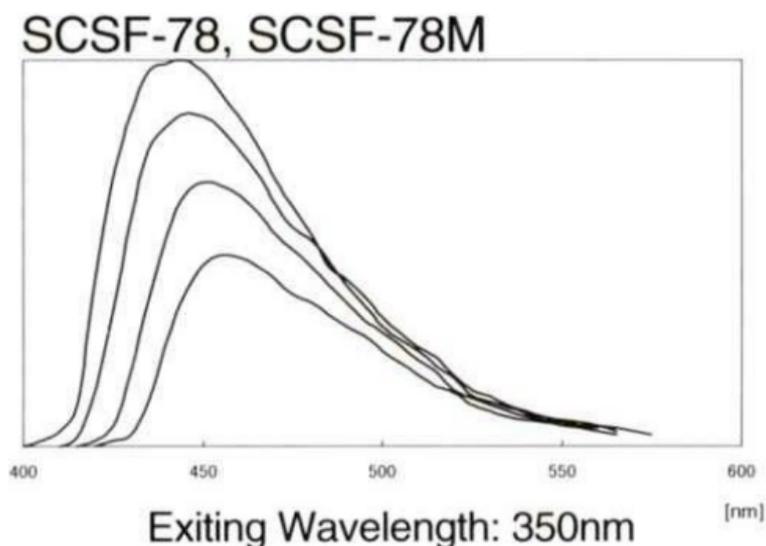


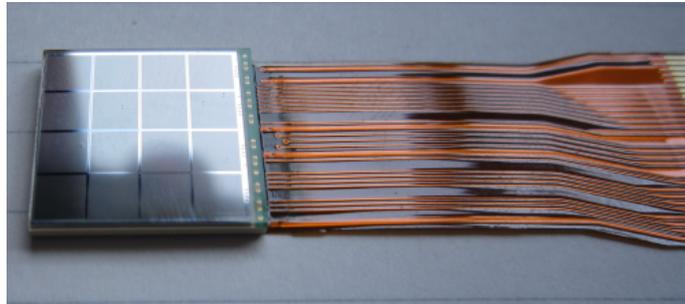
図 4.1: SCSF-78SJ の発光波長分布 (各線の違いはシンチレーション光がファイバー中を伝搬する距離で、上から 10cm,30cm,100cm,300cm)

電圧、それ以上はガイガーモードとなる電圧、とすると Q は以下の式で表される。

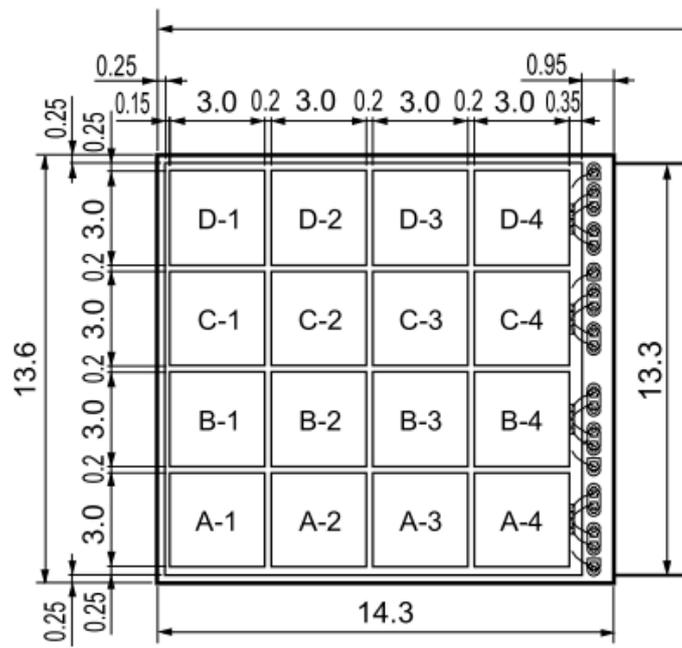
$$Q = C(V_{bias} - V_{bd}) \quad (4.1)$$

これに光子を検出したピクセル数をかけたものが一つの MPPC から出力される電荷である。入射光量が十分小さいとき光子を検出するピクセル数は入射光量と比例する。

MPPC は半導体検出器ゆえに磁場の影響を受けないとので、マグネットに覆われている前置 off-axis 検出器内部で使用する際に有効である。短所としては温度依存性があり、使用する際には機器周囲の温度を制御する必要がある。シンチレーションファイバーを使った検出器は多くの読み出しチャンネルが必要となるが、Monolithic MPPC array は小スペースに複数の光検出器があるので、多チャンネルの検出器を作る際に有利である。



☒ 4.2: Monolithic MPPC array(S11830-3344MF(X1))



☒ 4.3: Monolithic MPPC array(S11830-3344MF(X1))

表 4.1: S11830-3344MF(X1) の基本仕様

チャンネル数	16(4×4)
受光面のサイズ	3.0×3.0mm ²
ピクセル数	3600
ピクセル間の距離	50μm
開口率	61.5%

この Monolithic MPPC array を後述の EASIROC ボードに接続するために、コネクタ変換回路 (図 4.4) を作成した。EASIROC ボードは1台で32チャンネルを読み出すことができるので、この回路を使用して EASIROC1 台に二つの Monolithic MPPC array を接続する。



図 4.4: Monolithic MPPC array と EASIROC ボード間のコネクタ変換回路

4.2 読み出しボードとデータ取得システム

4.2.1 読み出しボード (EASIROC ボード)

Monolithic MPPC array は、高い集積度で検出器を作ることができるが、大面積をカバーする場合多くのチャンネル数が必要となる。またブレイクダウン電圧や印加電圧とゲインの関係が同じ Monolithic MPPC array 上の MPPC 間でも異なるため、各 MPPC への印加電圧を調整する必要がある。この二つの要請を満たすために MPPC 読み出しシステムとして東北大学と KEK が開発した EASIROC ボード (GN-1101-1, GN-1101-2R) を使用することにした。(図 4.5)[15] どちらのボードもファームウェアは EASIROC_pro_v4.4 を使用している。これは ASIC に OMEGA 社の

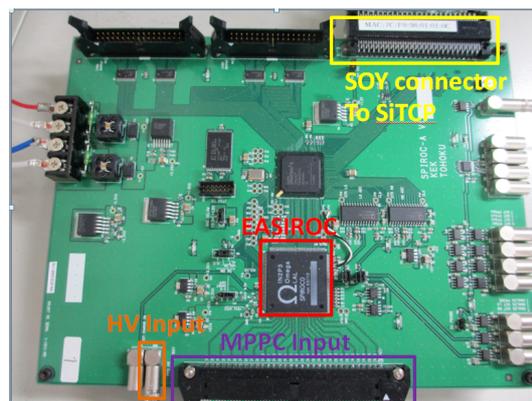


図 4.5: EASIROC ボード (GN-1101-1)

EASIROC¹ チップを用いた読み出しボードである。このチップの特性として今回の試験に主に関係するものを以下に挙げる。

- 32 チャンネル同時読み出し
- 正電圧入力、Amp、shaping 後、正電圧出力
- 0-4.5V 8bit 精度のバイアス電圧調整機能

¹http://omega.in2p3.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=104&Itemid=247

- discriminator を内蔵
- slow control でパラメータの変更が可能
- MPPC の gain を 10^6 とした場合 160fC から 320pC までのダイナミックレンジをカバー

EASIROC のアナログパートとして図 4.6 を示す。EASIROC チップから

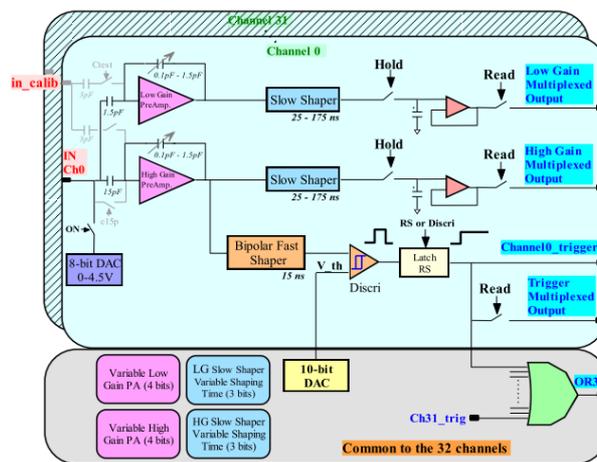


図 4.6: SPIROC0(SPIROC-A) のアナログパート：入力電荷は容量の違うコンデンサを用い電荷分割方式で high gain と low gain 二種類の成形増幅パートを作る。増幅後の信号は slow shaper で成形される。平行に入力された 32ch の信号が成形された後シリアルに EASIROC チップから出力される

出力された信号は EASIROC ボード上に別にある ADC(Ext ADC) に送られ A/D 変換され、FPGA(Field Programmable Gate Arrays) に送られる。(図 4.7) その後データは SiTCP²と呼ばれるプロトコル制御を採用する Bee Beans Technologies 社の SOY と呼ばれる SiTCP ボードの LAN を通してデータは PC へと転送される。また SOY を通して PC から EASIROC チップの register を設定する。register のうち今回の試験に関するもの

²<http://e-sys.kek.jp/tech/sitcp/>

として、slow shaper は 50ns、preamp gain は 150 という設定で後の全ての実験を行なった。また EASIROC ボードでは波高検出型の変換方式を

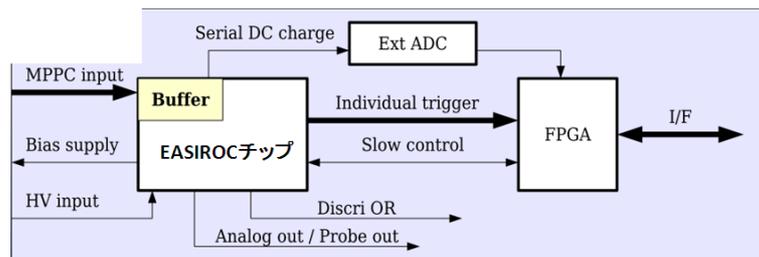


図 4.7: EASIROC ボード上のエレクトロニクス

採用している。これは slow shaper 後の信号のピークを端子から入力した HOLD 信号 (トリガー) でホールドし、その高さを出力する方式である。図 4.8 はオシロスコープで slow shaper 後の信号 (紫)、HOLD 信号 (緑)、HOLD 後の信号 (青) を可視化したものである。slow shaper 後の信号が正しく HOLD されているのがわかる。実験では slow shaper 後の信号のピークが正しく HOLD されているかについてはオシロスコープで確認を行った。

4.2.2 データ取得ソフトウェア

データの取得、register の設定には東北大学の本多氏が作成されたプログラムを使用した。[15] Linux 上で動き C++ で作成されている。このプ



図 4.8: EASIROC ボードの slow shaper 後の信号 (紫)、HOLD 信号 (緑)、HOLD 後の信号 (青) : 波高検出型

プログラムにより register の設定、データの取得が行える。実際の運用の際には後述にあるように 2 台の EASIROC ボードを同時作動させ同時測定を行う必要があるため筆者がプログラムの改変を行いそれを実現した。

4.3 プロトタイプ検出器のデザイン

4.3.1 デザインの概要

飛跡検出器であるために、シンチレーションファイバー層を x 方向、y 方向に交互に重ねた構造を採用した。これによって三次元飛跡を再構成することができる。(図 4.9)

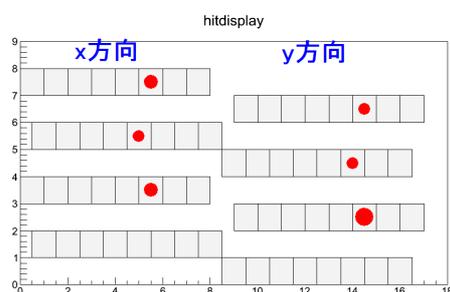


図 4.9: シンチレーションファイバーの層構造。左 x 層、右 y 層

また隣り合うファイバー間には不感領域があるので、上下に並んだ層をずらして配置することで連続した層で同時に荷電粒子のヒット情報を失うことがないような構造にした。

チャンネル数については使用する EASIROC ボードのチャンネル数、Monolithic MPPC array のチャンネル数、使用可能なシンチレーションファイバーの量などから 64ch とした。これは EASIROC ボード 2 台、Monolithic MPPC array 4 台分に対応する。

4.3.2 シンチレーションファイバーの表面処理

シンチレーションファイバーは構造上他のファイバーと直接接触する。そのためそれらを光学的に分離するために二酸化チタンを含む反射材 (EL-JAN Technology 社の EJ-510) を 64 本のうち 56 本の表面に塗布した。8 本の反射材を塗布しないシンチレーションファイバーを作成したのは反射材の集光率と隣のチャンネルへの光漏れへの影響を調べるためである。反射材の塗布によって増加する厚さをマイクロメータで測定したところ表 4.2 のようになった。これによると厚さが平均 0.039mm 増加することになる。

表 4.2: ファイバーに反射材を塗布したとき増加した厚み (mm)。ファイバー A と B は同じ種類のもの。3 回塗布を行った。端から測定する距離を決めてその地点の縦横を測定

	ファイバー A	ファイバー B
端から 5cm 横	0.036	0.052
端から 5cm 縦	0.032	0.066
端から 10cm 横	0.034	0.051
端から 10cm 縦	0.029	0.045
端から 15cm 横	0.025	0.033
端から 15cm 縦	0.024	0.036

また用意したシンチレーションファイバー 64 本のうち 40 本が MPPC と接触しない逆の端面にアルミコーティングがされている。これにより集光率が上がると期待される。上記の反射材を塗布しないファイバー 8 本はこのアルミコーティングがされていない。ファイバーの種類をまとめると以下のようなになる。

ファイバー A 端面にアルミコーティング、側面に反射材コーティング 40 本

ファイバー B 側面に反射材コーティング 16 本

ファイバー C 端面、側面ともにコーティングなし 8 本

このように三種類のファイバーがあるので層を作る際にどのファイバーをどの層に配置するかが重要となる。よって図 4.10 のように上から 3 層目 (x 層) にファイバー C、4 層目 (y 層) と 7 層目 (x 層) にファイバー B、その他の層にファイバー A を配置した。

Monolithic MPPC array は 4×4 の 16 チャンネルあるので、x 層、y 層それぞれ、2 台を横に並べて配置した。

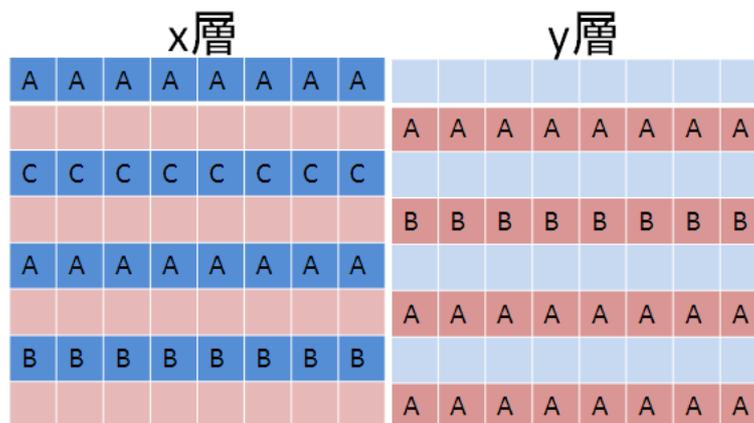


図 4.10: シンチレーションファイバーの配置 : A がアルミ+反射材。B が反射材のみ。C がコーティングなし

4.3.3 プロトタイプ検出器のための構造体

シンチレーションファイバーを固定するために図 4.11 のような部品を製作した。台 A(アルミ製) と台 B(アルミ製) は 4 本の柱を支える部品で

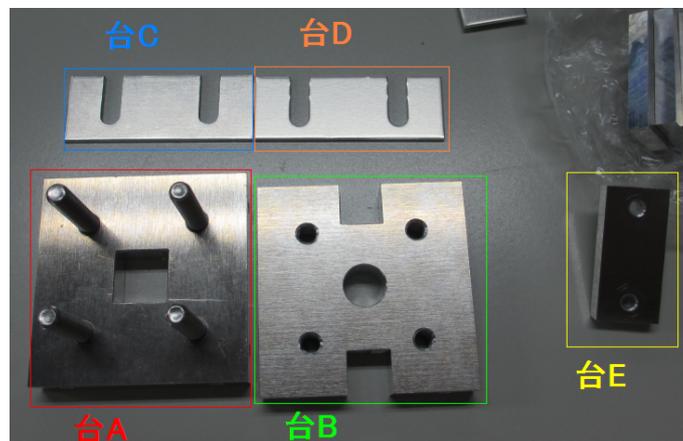


図 4.11: ファイバー固定台の部品

ある。上下に線源から放出された荷電粒子をファイバーに当てるために穴が空いている。台 C(アルミ製) と台 D(アルミ製) はファイバーと層になり支える部分で、台 A と台 B で支えられた柱にひっかけて使用する。隣り合う層の位置をずらすために台 C と台 D で図の縦方向の辺の長さが違う (図 4.13)。台 C と台 D とともに二つの溝を柱に引っ掛けて間にファイバーを固定する (図 4.14)。台 E(アルミ製) は左右から台 A と台 B を留めることで上下にファイバーがずれるのを抑え、また台 B と台 C を横から押すことでファイバー間に隙間をなくすような構造になっている。図 4.12 はそれらの部品をファイバーをとりつけず一部組み立てたところである。

シンチレーションファイバーと Monolithic MPPC array を接続する部品については図 4.15 と図 4.16 に示した。図 4.15 はシンチレーションファイバー固定用クッキーを MPPC 側から見たものである。ファイバーが一つ

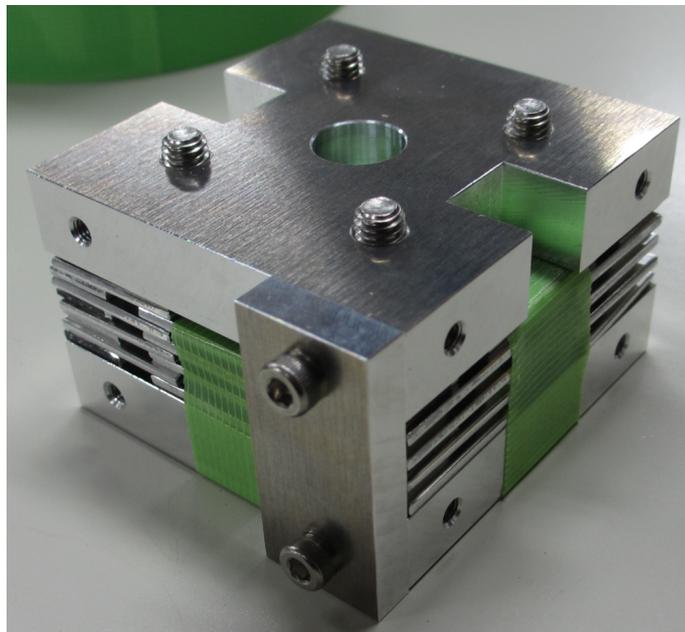


図 4.12: ファイバーなしで一部部品を組んだところ。テープは仮止めの
ためファイバーを組んだときはない。写真でテープがある隙間の部分
にファイバーを配置する

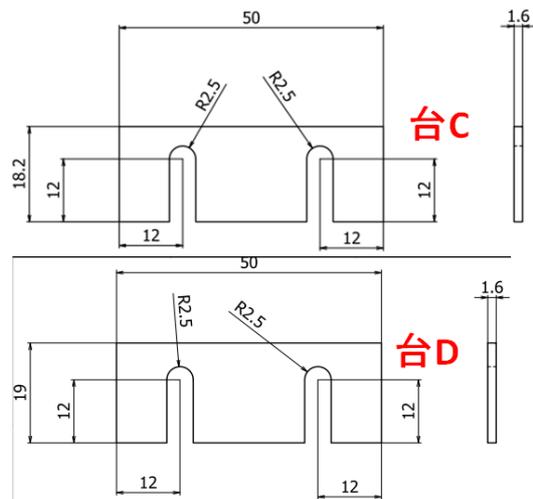


図 4.13: 台 C と台 D。縦の長さを若干変えることで層のずらしを行う

につき 16 本接着され、Monolithic MPPC array を接続する部分は研磨されている。図 4.16 はファイバー固定用クッキーと Monolithic MPPC array を接続するための部品で部品 A は枠で横から Monolithic MPPC array を支え、部品 B は MPPC を光読み出し面の反対から支える構造になっている。図 4.17 はファイバー固定用クッキーに部品 A、B を取り付けた写真である。部品 B にはカプトンテープが巻かれ、Monolithic MPPC array との電氣的な接触を断っている。

4.3.4 トリガー用シンチレータ

データ取得の際には EASIROC ボードへホールド信号 (トリガー) を入力する必要がある。今回の測定ではホールド信号をプラスチックシンチレータと光電子増倍管を用いて作った。図 4.18 の中央がプラスチックシンチレータ部分で周りはライトガイドである。プラスチックシンチレータ部分の大きさは縦横約 10mm×10mm で厚さ 0.214mm である。光電子増倍管は浜松ホトニクス社の型番 R1878 を使用した。

試験の際にはプラスチックシンチレータの部分がファイバー固定台の台 B に空けた穴の真上に来るように配置した。

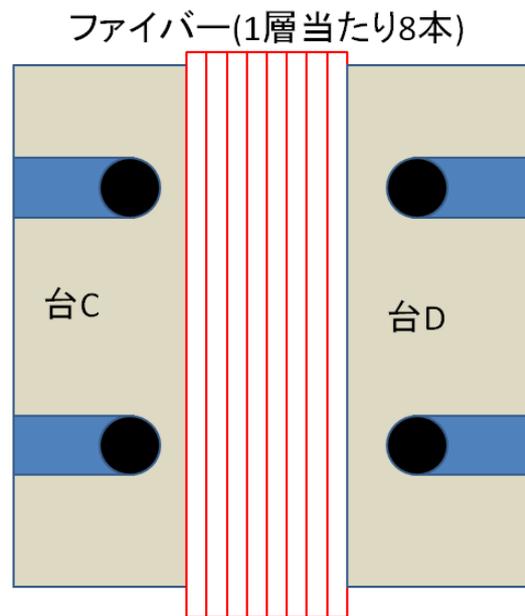


図 4.14: 台 B からの柱 (黒丸) に台 C,D をひっかけ、間にファイバー 8 本をはさむ構造。

4.4 プロトタイプ検出器の製作

シンチレーションファイバーと固定台を組み合わせる作業は二人がかりで行った (図 4.19)。

プロトタイプ検出器のトラッカー部分の大きさは 1.5mm 角のシンチレーションファイバーを使用しているので反射材によってファイバーの厚さが 0.1mm 増加すると仮定すると 12.8mm×12.8mm×12.8mm である。図 4.20 はトラッカー部分、ファイバーが層になっている部分である。図 4.21 はファイバーの配置を上から見たもの、図 4.22 はトリガー用のシンチと PMT をプロトタイプ検出器の上部に載せたものである。

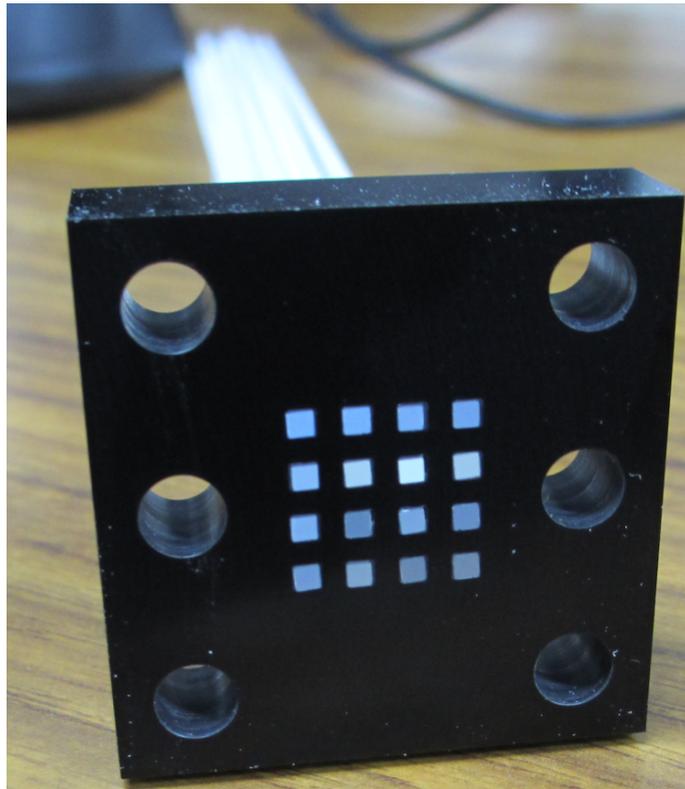


図 4.15: シンチレーションファイバー固定用クッキー



図 4.16: ファイバー固定用クッキーに Monolithic MPPC array を固定する部品



図 4.17: ファイバー固定用クッキーと Monolithic MPPC array を接続したところ

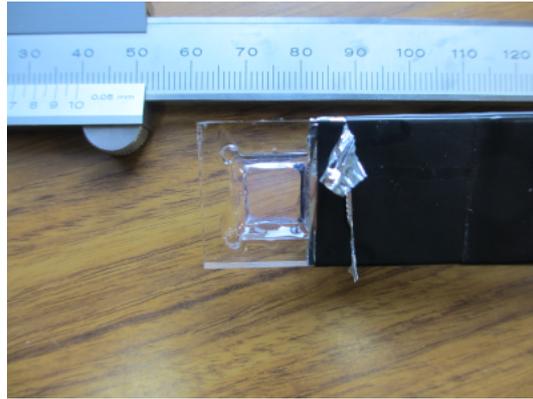


図 4.18: トリガー用プラスチックシンチレータ



図 4.19: プロトタイプ検出器の組み立て作業中の様子

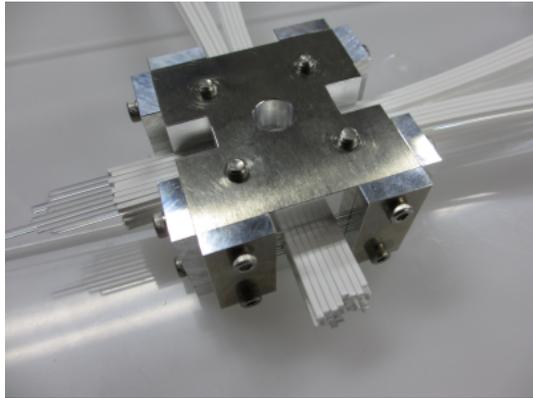


図 4.20: プロトタイプ検出器のファイバーと固定台を組み合わせた部分を拡大

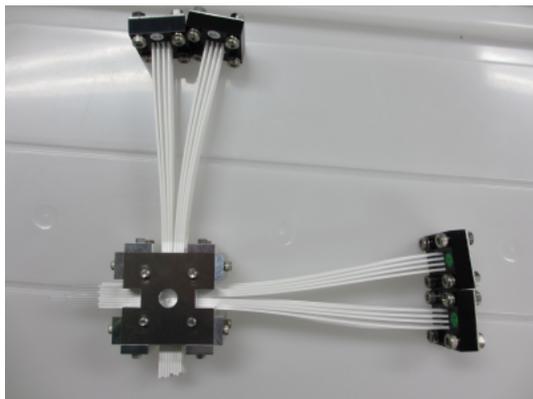


図 4.21: プロトタイプ検出器を上から見たところ

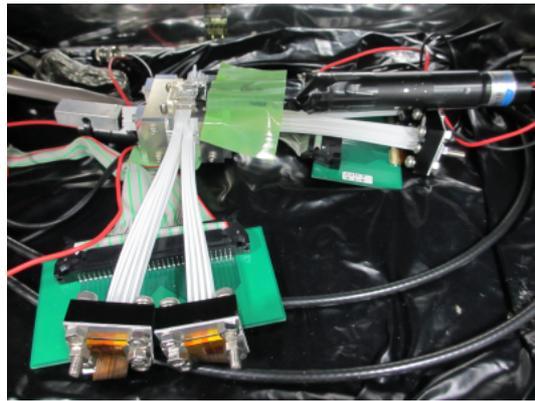


図 4.22: プロトタイプ検出器 (Monolithic MPPC array と接続した状態、トリガー用シンチレータを上部に置いた状態)

第5章 プロトタイプ検出器を用いた測定とデータ解析

5.1 読み出しボードの較正

5.1.1 Input DAC 値

Input DAC 値は前述した EASIROC ボードの register の設定値の一つで、その設定に対応した正電圧を MPPC の signal 側へ出力する。これによって MPPC の gain の調節を行う。

Input DAC 値による出力電圧 (以下トリム値) の参照電位は EASIROC ボードでは ASIC 内部のレギュレータが生成する 2.5V、ボード上に載っている素子による 4.5V の二種類あるがこれ以後の試験全てで 2.5V を参照電位を使用している。

Input DAC 値に設定できる値は 0 から 511 までで、そのうち 0 から 255 ではこの DAC が off になり動作が不安定になるということが報告されている。256 で参照電位分、つまり最大のトリム値が MPPC にかかり、Input DAC 値が増加していくとその値が下がっていく仕様になっている。参照電位が 2.5V の場合 Input DAC 値が 350 付近でトリム値が 0 となり、これ以上の値を設定した場合正しく測定できない状態になってしまうことが事前に確認された。よって Input DAC 値を 256 から 350 の間の値を設定する。

Input DAC 値を設定し、各 MPPC の bias 電圧を変化させ gain の調節を行うが、EASIROC ボードのチャンネルによって同じ Input DAC 値を与えた場合でもトリム値が違ってしまうことが試験の前に確認された。また Input DAC 値が 1 変化するとトリム値が 20mV 変わる仕様なのだが、実際に 1 変化させてみると 16mV 変わる場合や 30mV 変わる場合もあった。よってある Input DAC 値を与えたときにトリム値がいくらになるかをチャンネル毎に測定した。

5.1.2 Input DAC 値の較正方法

Monolithic MPPC array, EASIROC ボード間のコネクタ変換回路 (図 4.4) の裏側 (図 5.1) の 64 端子 (図の赤で囲った部分) のうち左の列の 32 端子はそれぞれ EASIROC ボードの各チャンネルの signal 側と接触している。よって Input DAC 値を設定しこの部分の電位をテスターで測定することで設定した Input DAC 値でのトリム値を得ることができる。テストでは Input DAC 値 300、320、330、340 の 4 点を取りそれぞれの時のトリム値を 64ch 全てで測定した。この際 Monolithic MPPC array は不慮の故障が起きるのを防ぐために接続していない。



図 5.1: Monolithic MPPC array, EASIROC ボード間の回路の裏

5.1.3 測定結果

Input DAC 値 4 点、64 チャンネル分のトリム値を測定した結果を横軸 Input DAC 値、縦軸トリム値 (mV) でプロットし直線 $y = Ax + B$ でフィットした図の一部を以下に示す。図 5.2 はチャンネル 10 のもので最も測定点の直線からのズレが小さく、図 5.3 はチャンネル 60 のもので最もズレが大きいものである。このフィットして求められた直線式から、Input DAC

値が1変化したときトリム値がいくら変化するかを計算し64チャンネルの平均で22mV変化することがわかった。これは仕様である20mVと概ね一致している。

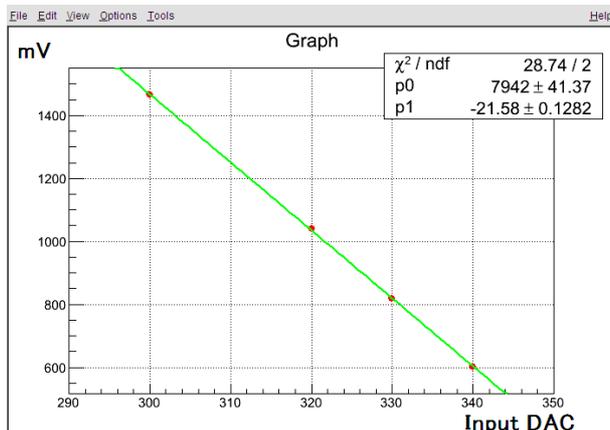


図 5.2: Input DAC 値とトリム値の関係 (チャンネル 10)

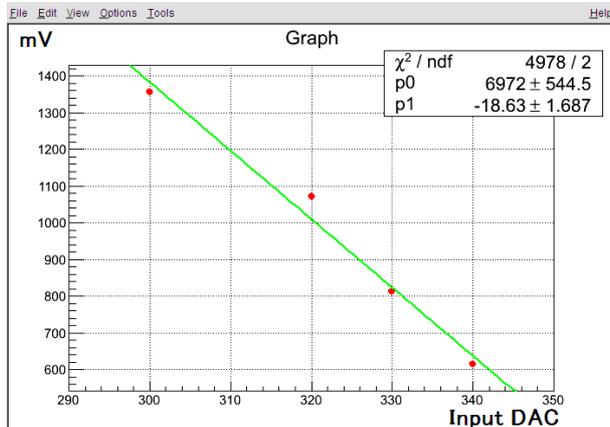


図 5.3: Input DAC 値とトリム値の関係 (チャンネル 60)

このInput DAC 値とトリム値の関係式を用いトリム値が1000mVになるようにInput DAC 値を調整した。そしてテスターで実際にトリム値測定したときの値を以下の図 5.4 に示す。横軸チャンネル番号 (0 から 63 まで)、縦軸トリム値 (mV) である。チャンネル 58 以外は平均から 5% 以内

に収まっている。以下のテストではこの関係式を用いてトリム値を調整する。

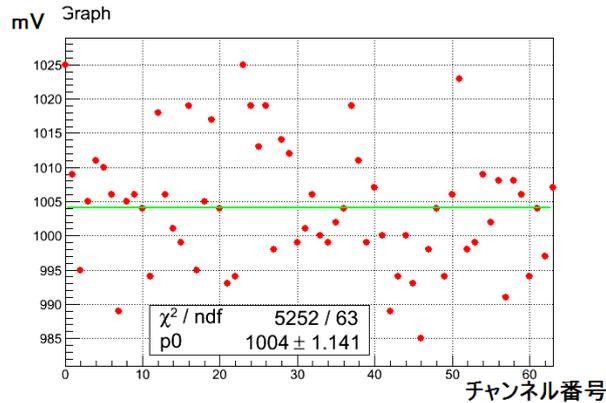


図 5.4: 1000mV に設定したときの実際のトリム値。横軸チャンネル番号 (0-63)、縦軸トリム値 (mV)

5.2 Monolithic MPPC array の較正

5.2.1 キャリブレーション方法

プロトタイプ検出器には四つの Monolithic MPPC array、つまり 64 チャンネルの MPPC を使用する。この時同一の Monolithic MPPC array 上であっても MPPC のブレイクダウン電圧や印加電圧に対する gain のふるまいが微妙に違う。この違いを見るために LED を用いたテストを行った。

実験の概略図を図 5.5 に示す。MPPC は温度依存性があるので図のように恒温槽内に入れてテストを行う。Monolithic MPPC array は LED からある程度距離を離して置いた。clock generator で作った周波数 500Hz、幅 4ns の NIM 信号は LED を光らせるのと、EASIROC ボードへの HOLD 信号を作るのに使われる。LED にはディフューザーを付け光が等方的に放出されるようにした。図 5.6 は実際のテストの様子である。

測定された MPPC の peak 電圧の分布を図 5.7 に示す。図の山は左からペDESTAL、1photo electron(p.e.)、2p.e.、に対応する。よって一番左のペDESTALの山とその右の 1p.e. の山をフィットしたときの mean 差が

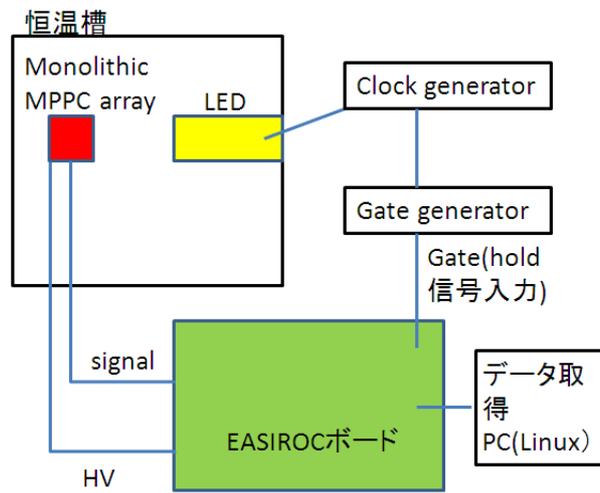


図 5.5: LED を用いた Monolithic MPPC array 較正作業の概略図

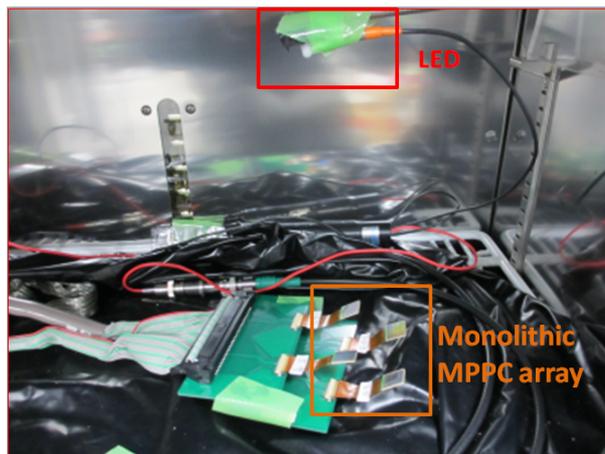


図 5.6: Monolithic MPPC array 較正作業の様子

1p.e. あたりの ADC カウントとなる。以下印加電圧を変えてこの 1p.e. あたりの ADC カウントを求めた。

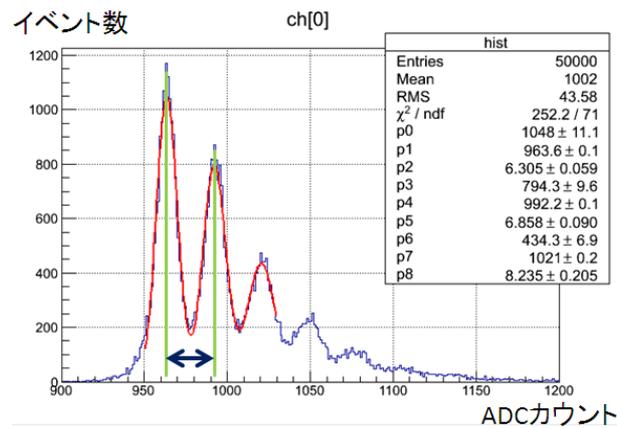


図 5.7: あるチャンネルの ADC カウントの分布。横軸 ADC カウント、縦軸イベント数。赤線は山をガウシアンでフィットしたものの

5.2.2 測定結果

三つの印加電圧 (V) で測定を行い図 5.8 を得た。横軸が印加電圧 (V) で縦軸が 1p.e. あたりの ADC カウントである。図のように直線でフィットを行い、得た直線の x 切片がブレイクダウン電圧である。そのブレイクダウン電圧をチャンネル全てについて求めたのが図 5.9 である。チャンネル 63 のみうまくフィットすることができず、何度か印加電圧を変えてみたもののあまり結果はかわらず、また MPPC4 を正しく動作してると考えられるチャンネルに差し替えて同様のことを行うと先ほどの 63 チャンネルに対応するチャンネルから正しく山がいくつか見えた。よって 63 チャンネルが正しく ADC カウントを得られないのは EASIROC ボードの不具合によるものだと考えこれ以降は使用しないことにした。後述するとおり試験では 63 チャンネルに対応するシンチレーションファイバーはトラッカー中では端に位置するのでそれほど影響はないと考えられる。

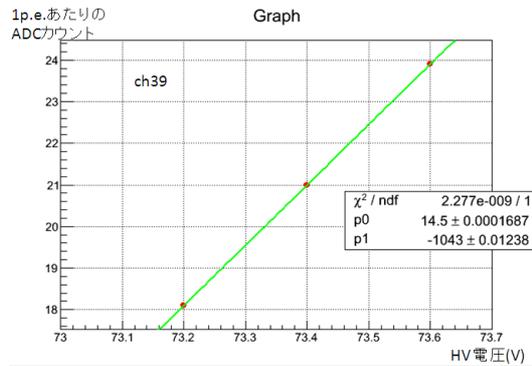


図 5.8: 印加電圧と 1p.e. あたりの ADC カウントの関係

図 5.9 に各 Monolithic MPPC array 中での平均を表示しているがこれとの差を全 63 チャンネルで合わせた RMS は 0.071V となる。(図 5.11) 以上から印加電圧と 1p.e. あたりの ADC カウントの関係式、Input DAC 値とトリム値の関係式が得られた。これらを元に 1p.e. あたりの ADC カウントが 18 になるように印加電圧と Input DAC 値を調整し測定を行った。結果が図 5.10 である。チャンネル 32 以外が平均から 10% 以内に収めることができた。この設定を以下の試験で用いる。

5.3 プロトタイプ検出器の線源を用いた試験

5.3.1 試験の概要

プロトタイプ検出器のトラッカー部分の大きさは $12.8\text{mm} \times 12.8\text{mm} \times 12.8\text{mm}$ と小さいため宇宙線を用いて試験を行うのは長い時間が必要となる。よって線源 ^{90}Sr からの β 線を用いて試験を行った。

^{90}Sr は二段階に崩壊する原子でどちらの段階とも β 線を放出する。一段階目では ^{90}Sr が ^{90}Y になる。このときの半減期は 28.74 年で、放出される β 線のエネルギーは 0.546MeV である。二段階目では ^{90}Y が ^{90}Zr になる。このときの半減期は 64 時間で、放出される β 線のエネルギーは 2.28MeV

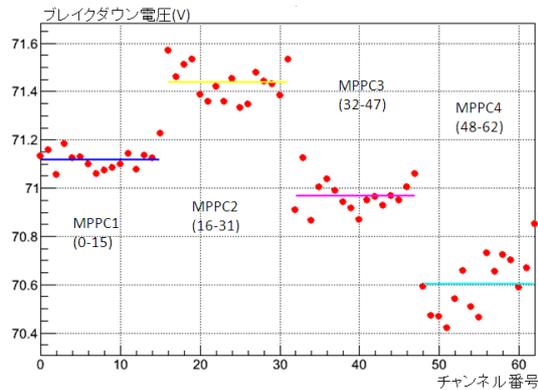


図 5.9: 各チャンネルのブレイクダウン電圧を測定した結果。横線はその Monolithic MPPC array でのブレイクダウン電圧の平均

である。2.28MeV の β 線がポリスチレン (密度 $1.05\text{g}/\text{cm}^3$) を通過しうる距離は最大約 10mm である。(図 5.12 参照) プロトタイプ検出器のトラッカー部分は $12.8\text{mm} \times 12.8\text{mm} \times 12.8\text{mm}$ なので垂直に β 線が入射した場合一番下まで通過することは稀ということになる。よって今回は主に線源に近いファイバー層について解析を行うこととした。

試験の概念図は図 5.13 である。線源から出た β 線はまずトリガー用 (HOLD 用) のシンチレータを通過後プロトタイプ検出器のトラッカー部分へ入射する。トリガー信号を追うとまずシンチレータを通過した際の蛍光によって PMT から信号が生まれる。その信号のオフセットを 0 にするためにまず FAN IN/OUT を通し Discriminator で HOLD 信号を作成し EASIROC ボードへと入力される。途中 DELAY を通過するのは HOLD 信号を遅らせる必要があるためである。

実際の試験の様子は 5.14 である。プロトタイプ検出器の上にトリガー用のシンチレータを設置して、その上に厚さ 10mm、直径 10mm の穴があいたアクリル板をはさんで線源を設置している。このアクリル板を設置した理由はトリガー (HOLD) 用シンチレータと距離をある程度離すことでトラッカー部分へほぼ垂直に入射する β 線を増やすためと、ファイバーのトラッカー以外を β 線が通過するのを防ぐためである。EASIROC ボードのトラッカー中のファイバーの位置との関係を図 5.15 に示す。左

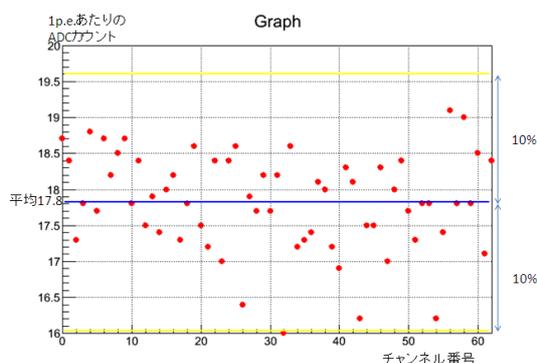


図 5.10: 1p.e. あたりの ADC カウント。関係式から ADC カウントを 18 へ調整した結果

が x 層、右が y 層になっている。この図の上部に線源を置いておりチャンネル 63 は 2 層目 (y 層) の端に位置する。

試験において取得した 2100 万イベントを以後の解析に用いる。

5.3.2 性能評価

得られた EASROC ボードの ADC カウントでありこれをまず光量に変換する。1photo electron(p.e.) あたりの ADC カウントは図 5.10 のように得られた。あとは 0p.e. となる ADC カウントを得られればよい。得られた ADC カウントの分布を見ると図 5.16 のようにペDESTAL の山が大きくなるので、これをフィットし得られたピークを 0p.e. に対応する ADC カウントとする。よって ADC カウントを x 、0p.e. に対応する ADC カウントを p 、1p.e. あたりの ADC カウントを a 、ADC カウント x に対応する光量を y とすると

$$y = (x - p)/a$$

となる。この変換式を用いて光量に変換する。

図 5.17 にチャンネル 15 の 100 万イベントの光量分布を示す。図 5.17 では 0p.e. に山が立つものしか見えないが図 5.18 のように 0p.e. 付近を拡大

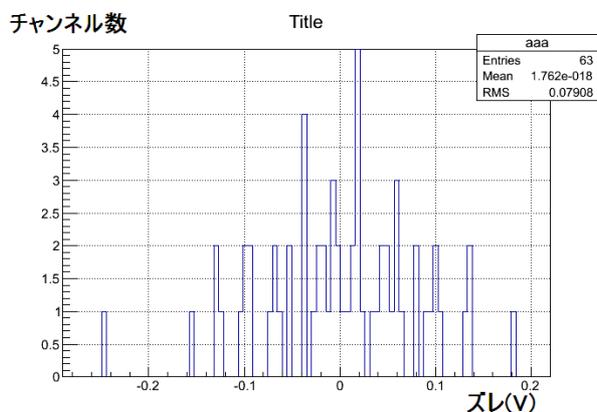


図 5.11: 各 Monolithic MPPC array での平均と各 MPPC のブレイクダウン電圧との差 (V)

すると若干 1p.e. に山が見える。また図 5.19 のようにイベント数が 200 以下の領域を拡大すると線源による分布がある。

図 5.18 を見るとペDESTAL である 0p.e. の分布は 1p.e. 程度まで広がっていると考えられこれは他のチャンネルでも同様であった。よって線源からの β 線によるヒットだと選択する際には、3p.e. 以上の信号をヒット信号とみなした。実際には図のように幅をもった分布となるため 3p.e. 以上をヒットとみなす際には 2.5p.e. を閾値として設定した。

5.3.3 光量

β 線はトラック一部分へ上層から入射してくるが、ある層を通過しエネルギーを落とす際にどの程度の光量が得られるかを求めた。

まず一層目 (最上層) についてヒットしたときの光量、つまり 2.5p.e. 以上を示したチャンネルについて光量を合算した。 β 線が上部のトリガーシンチレータと一層目を通過したとき、この一層目のみヒットするというのは稀なので、一層目と以下の層でヒットがある場合 β 線がトラック一部分を通過したといえる。よって上の分布について一層目と二層目でヒットがあるという条件でカットをかけると図 5.20 になる。フィットすると 22.27 ± 0.15 p.e. にピークがたつ。この分布が β 線による一層目で落とされる光量だと考えられる。

二層目についても同様に光量を合算した分布をみると一層目、二

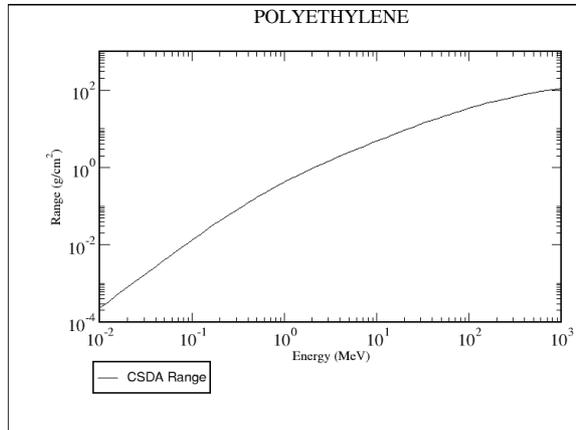


図 5.12: 電子のポリスチレン中での $\text{range}(g/cm^2)$

層目、三層目にヒットがあるという条件をかけると図 5.21 になる。フィットした結果二層目では $24.07 \pm 0.36 p.e.$ にピークがたつ。

以上から β 線によって得られる光量は約 $20 p.e.$ でありこれは十分な光量といえる。この測定は β 線によるものであるが測定結果から MIP においても十分な光量が期待できる。

5.3.4 Hit efficiency

ある層の上下の層でヒットがあった場合その層でもヒットがあることが期待されるが、それを 2 層目の場合について調べてみた。まず一層目、三層目、四層目において前述のヒットの光量を合算した値が $10 p.e.$ 以上を要求した。上下の層だけでなく四層目も条件に入れた理由はトラック部分を β 線が通過したイベントを選択するためである。(x 層、y 層のどちらにもヒットがあるという条件) 次に三層目に、一層目のヒットと同じかとなりヒットがあるイベントを抜き出し(図 5.22 参照)、その中で二層目にヒットがある確率を求めた。結果が表 5.1 になり、 $98.90 \pm 2.28\%$ で二層目にもヒットがあることが確認された。この結果十分に高い十分 Hit efficiency が得られている。

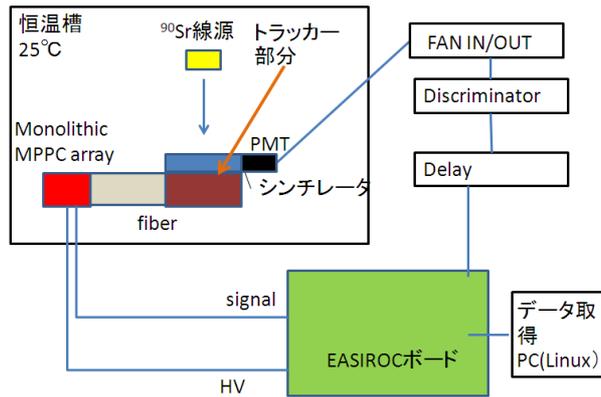


図 5.13: ^{90}Sr 線源を用いたプロトタイプ検出器の試験の概念図

5.3.5 1cm 以下の飛跡の再構成

^{90}Sr からの β 線の飛跡を図 5.23 と図 5.24 に示す。各セルがファイバーに対応しており左の 4 層が x 層、右の 4 層が y 層である。セル中の赤の丸がそのファイバーでヒットがあったことを示しており面積が光量の大きさを表す。図 5.23 は 5 ヒットしたもので 6 層目以降にはヒットしていない。図 5.24 は 9 ヒットしたもので 7 層目まで軌跡が見えるのがわかる。

この結果 1cm 以下の短い荷電粒子の飛跡を再構成することができた。

表 5.1: 二層目の hit efficiency(一、三、四層目にヒットがある。三層目に一層目と同じかとなりヒットがある)

	イベント数
候補	1908
二層目にヒット	1887
Hit efficiency	$98.90 \pm 2.28\%$



図 5.14: ^{90}Sr 線源を用いたプロトタイプ検出器の試験の様子。検出器の上にトリガー用のシンチレータ、その上にアクリル板、その上に Sr 線源を設置した

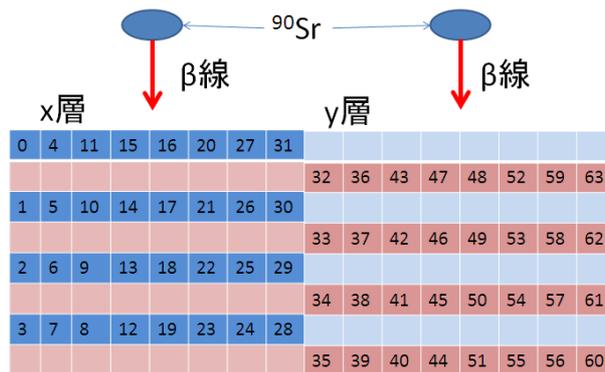


図 5.15: EASIROC ボードチャンネル(ボード1が0-31、ボード2が32-63)の、ファイバーの位置との関係。左が x 層、右が y 層

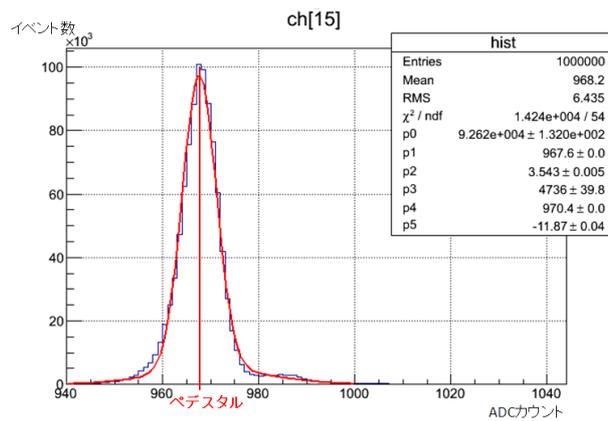


図 5.16: あるチャンネルのペDESTALピーク (チャンネル15、100万イベント)

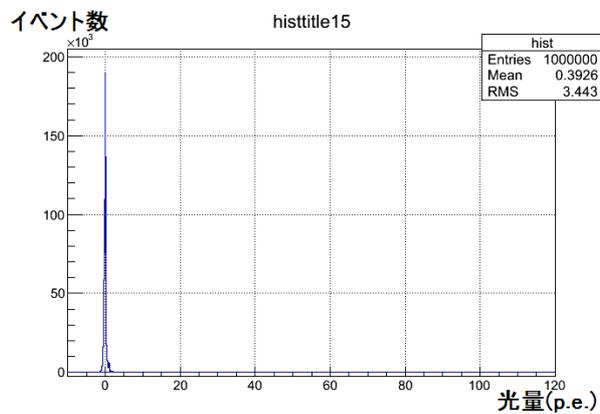


図 5.17: チャンネル 15 の光量分布 (100 万イベント)、横軸光量、縦軸イベント数

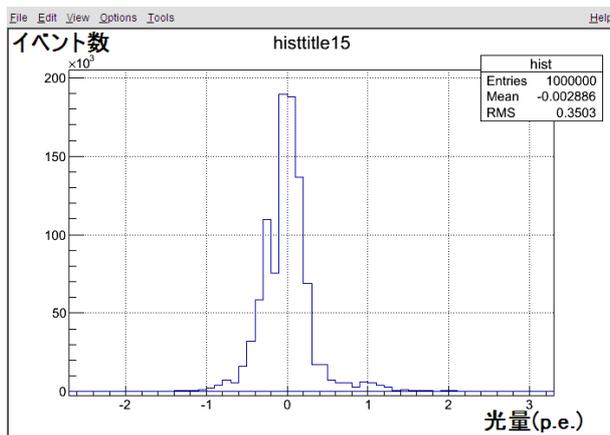


図 5.18: 図 5.17 の 0p.e. 付近を拡大

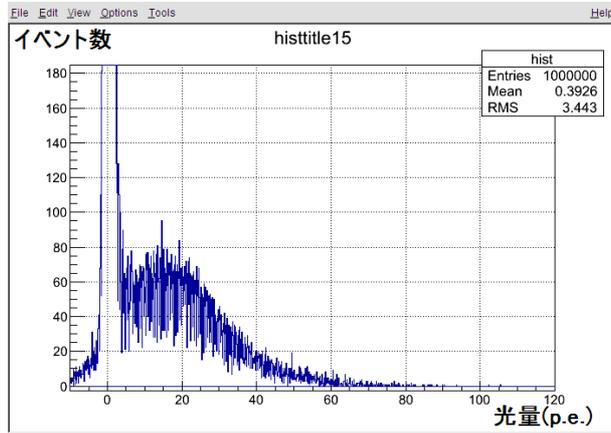


図 5.19: 図 5.17 のイベント数が 200 イベント数付近を拡大

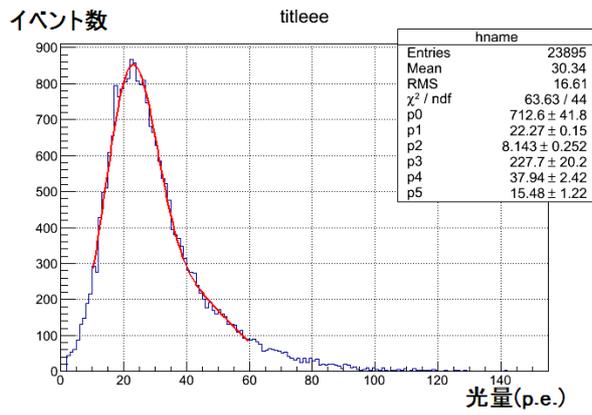


図 5.20: 一層目と二層目にヒットがある場合の一層目の光量

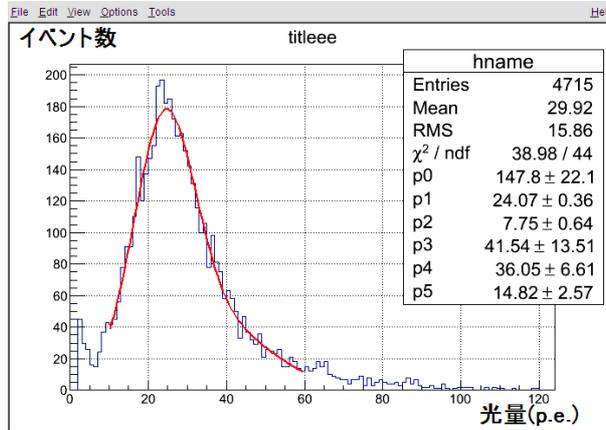


図 5.21: 一層目と二層目と三層目にヒットがある場合の二層目の光量

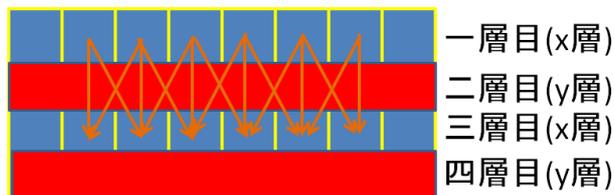


図 5.22: まず一、三、四層にヒットがあることをを要求する。その後三層目に一層目のヒットと同じもしくは隣にヒットがあるイベントを抜き出す。

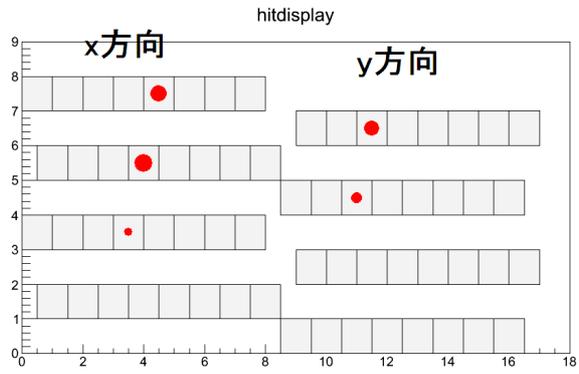


図 5.23: ^{90}Sr 線源からの β 線の飛跡 : 5 ヒット

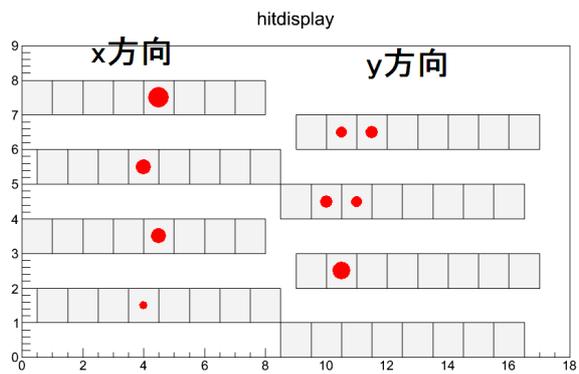


図 5.24: ^{90}Sr 線源からの β 線の飛跡 : 9 ヒット

第6章 まとめと今後について

T2K 実験において電子ニュートリノ出現モード、ミューニュートリノ消失モードの振動パラメータの精密測定を行うためには、様々な種類のニュートリノ反応について十分な理解が必要となる。しかし現在それぞれの反応モードの反応断面積には大きな不定性があり、T2K 実験の振動解析において大きな系統誤差を生んでいる。これらのニュートリノ反応の不定性を減らすために、より低エネルギーの荷電粒子を捉えるためのアップグレードが計画されている。その候補のひとつにシンチレーションファイバーを使った飛跡検出器がある。現在の T2K 実験前置検出器のニュートリノターゲット兼反応点周りの飛跡検出器は 1cm 角のシンチレータを用いているため約 5cm 以上の飛跡しか検出できない。このシンチレーションファイバー検出器が実現されれば、約 1cm のより短い飛跡を再構成することが可能になりニュートリノ反応の理解が飛躍的に進む。

今回そのプロトタイプとして 1.5mm 角のシンチレーションファイバーを使用した小型の飛跡検出器を製作し、それについて試験を行った。この検出器は 1.5mm 角の棒状のシンチレーションファイバーを 8 本からなる層を x 方向、y 方向に交互に 8 層積み上げた 64 チャンネルの飛跡検出器で、この構造により三次元飛跡を再構成することができる。

本研究ではまず上記のプロトタイプに使用するシンチレーションファイバー、光検出器 Monolithic MPPC array、データを取得するための DAQ について性能試験を行い、それらが要求性能を満たすことを確認した。次にシンチレーションファイバー、光検出器の構造体を設計、作成し、飛跡検出器を組み立てた。そしてこの飛跡検出器に ^{90}Sr 線源から放射される β 線を当てる試験を行い、得られる平均光量が約 20photo electron と飛跡を再構成するのに十分であることを確認した。またヒット検出効率が 98.90% であることが確認した。そして β 線が飛跡検出器内を通過する飛跡を再構成することに成功した。以上の結果から 1.5mm 角のシンチレーションファイバーを使用することで約 1cm 程度の飛跡が再構成可能であることが示された。

次のステップとして、より大型のプロトタイプ検出器を製作し J-PARC のハドロンホールでビームテストを行い μ や荷電 π に対する検出器の応答をテストする。その結果をもとに、T2K 前置検出器にインストールするシンチレーションファイバー検出器のデザインと製作を進める。

謝辞

修士課程二年間において、研究や修士論文作成に多くの方に支えて頂きました。ここに感謝の意を表したいと思います。ありがとうございます。

南野彰宏助教には研究について多くの指導や助言をして頂き大変充実した研究生生活を送ることができました。また本論文作成の際には最後まで作成に付き合っていたいただいたことに大変感謝しております。

中家剛教授には研究についてだけでなく将来についてなど様々なことで助言を頂きとても感謝しております。

木河達也さんには実験のことやプログラミングに不慣れな私に丁寧に教えていただきました。本当にありがとうございます。

そして研究室の皆様のおかげで大変素敵な二年間を送ることができました。ここに感謝したいと思います。

最後に私のわがママを許してくれた家族に感謝したいと思います。

参考文献

- [1] Y.Ashie et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Evidence for an oscillatory signature in atmospheric neutrino oscillation ", Phys. Rev. Lett. 93, 101801 (2004)
- [2] E.Aliu et al. [K2K Collaboration], "Evidence for muon neutrino oscillation in an accelerator-based experiment ", arXiv:hep-ex/0411038 (2005)
- [3] N.Agafonova et al. [OPERA Collaboration], "Observation of a first ν_τ candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam ", Phys. Lett. B691 (2010)
- [4] D.G.Michael et al. [MINOS Collaboration], "Observation of Muon Neutrino Disappearance with the MINOS Detectors in the NuMI Neutrino Beam "Phys. Rev. Lett.97, 191801 (2006)
- [5] S.Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], "Determination of solar neutrino oscillation parameters using 1496 days of Super-Kamiokande-I data ", Phys. Lett. B539 (2002)
- [6] S.N.Ahmed et al. [The SNO collaboration], "Measurement of the Total Active 8B Solar Neutrino Flux at the Sudbury Neutrino Observatory with Enhanced Neutral Current Sensitivity ", Phys.Rev.Lett.92,181301 (2004)
- [7] T.Araki et al. [The KamLAND collaboration], "Measurement of Neutrino Oscillation with KamLAND: Evidence of Spectral Distortion ", Phys.Rev.Lett.94,081801 (2005)
- [8] K. Abe et al. [T2K Collaboration] " Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam " Phys. Rev. Lett.107, 041801 (2011)

- [9] K. Abe et al. [The T2K Collaboration] "First muon-neutrino disappearance study with an off-axis beam ",10.1103/Phys-RevD.85.031103
- [10] F. P. An et al. [Daya Bay Collaboration], "Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay ", Phys.Rev.Lett.108,171803
- [11] F. P. An et al. [Daya Bay Collaboration], "Improved Measurement of Electron Antineutrino Disappearance at Daya Bay ",
- [12] Y. Abe et al. [Double Chooz Collaboration], "Reactor electron antineutrino disappearance in the Double Chooz experiment ", Phys. Rev. D 86, 052008 (2012)
- [13] Y. Abe et al. [Double Chooz Collaboration], "First Measurement of θ_{13} from Delayed Neutron Capture on Hydrogen in the Double Chooz Experiment ",
- [14] J. K. Ahn et al. [RENO Collaboration], "Observation of Reactor Electron Antineutrino Disappearance in the RENO Experiment ", 10.1103/PhysRevLett.108.191802
- [15] 本多 良太郎, マルチファイバー飛跡検出器による陽子測定システムを用いた p 散乱実験 (2010)