

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
山本 実加

2016年1月27日

概要

T2K 実験とは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で生成したニュートリノビームを使って、同施設内の前置検出器と岐阜県飛騨市にある水チェレンコフ検出器 (Super Kamiokande) でニュートリノ振動を測定する実験である。これまでに T2K 実験は、CP 位相角 $\delta_{CP}=[0.15,0.83]$ (順階層), 振動パラメータ $\sin^2_{23} = 0.528^{+0.055}_{-0.038}$ と報告している。T2K 実験は引き続き 7.5×10^{21} POT (Proton On Target) までデータを増やし、測定感度を上げていく。その後、さらなる測定感度の向上を目的に J-PARC と Hyper-Kamiokande (HK) を組み合わせた次世代長期線ニュートリノ振動実験が計画されている。

T2K 実験では、現在、ニュートリノエネルギー領域 1GeV 付近においてニュートリノ反応モデルに大きな不定性があり、その結果、ニュートリノと原子核の反応の系統誤差を大きく見積もっている。今後、T2K および次世代実験において、CP 破れの探索を進めていく上で、この系統誤差の削減が必要である。高い位置分解能を持った前置検出器で、ニュートリノ反応で生成される飛跡が短いハドロンを検出できれば、ニュートリノ反応についての理解が深まり、この系統誤差を大きく削減できる。我々は、この目的を達成するために、シンチレーションファイバートラッカーを開発している。

シンチレーションファイバートラッカーに要求される性能は、高い飛跡識別分解能、高い検出効率、十分な光量、ファイバー内での光の減衰長が長いこと (2m 程度)、狭いスペースでの多チャンネル化が可能、などが挙げられる。本研究では、この検出器のプロトタイプとして 2mm 角のシンチレーションファイバー 8 × 8 本を同方向に並べた、シンチレーションファイバートラッカーを制作し、東北大学光物理学研究センターで陽電子ビームを照射するテストを行った。その結果、十分な光量、2m 以上のファイバー減衰長、90% 以上の検出効率を確認できた。シンチレーションファイバーから発光したシンチレーション光は 64ch Array 型 Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) によって検出することで、限られたスペースに多チャンネルを収めることに成功した。

目次

第1章	ニュートリノ振動	3
1.1	ニュートリノ振動と CP 位相	3
1.2	T2K 実験	4
1.2.1	概要	4
1.2.2	J-PARC とニュートリノビーム	6
1.2.3	ニュートリノ反応とニュートリノ測定器	7
1.3	T2K 実験の現状と今後の課題	10
第2章	高分解能飛跡検出器	13
2.1	開発動機	13
2.2	設計	13
2.3	要求性能	16
第3章	シンチレーションファイバートラッカー	19
3.1	概要	19
3.2	シンチレーションファイバー	21
3.3	ファイバー束と MPPC の接続、読み出しボード	21
3.4	EASIROC モジュール	26
3.4.1	基本仕様・動作	26
第4章	MPPC	31
4.1	概要	31
4.2	動作原理	31
4.3	基礎特性	32
4.3.1	1p.e 相当の ADC 値	33
4.3.2	降伏電圧	33
4.3.3	ダークノイズ	33
4.3.4	PDE	34
4.3.5	クロストーク	35

4.3.6	アフターパルス	35
4.4	基礎特性の測定	35
4.4.1	1p.e 相当の ADC 値測定	35
4.4.2	降伏電圧	37
第 5 章	ビームテスト	39
5.1	概要	39
5.2	検出器セットアップ	39
5.2.1	1p.e 相当の ADC 値測定	39
5.2.2	パラメータ設定	42
5.3	測定項目	42
5.4	解析	43
5.4.1	1p.e 相当の ADC 値測定	43
5.4.2	発光量	43
5.4.3	スレショルドの決定	45
5.4.4	Hit Efficiency	45
5.4.5	ファイバーの減衰長の測定	52
5.4.6	ビームテスト結果	53
第 6 章	結論	58

第1章 ニュートリノ振動

1.1 ニュートリノ振動とCP位相

ニュートリノとは、弱い相互作用をする中性のレプトンである。標準模型では、ニュートリノの質量は0と予想されていたが、近年ニュートリノ振動の存在が実験的に確かめられ、有限の質量を持つことが分かっている。

ニュートリノの弱い相互作用における固有状態を $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ 、質量固有状態を (ν_1, ν_2, ν_3) とすると、ニュートリノの弱い相互作用における固有状態は、質量の固有状態の線形結合として、次式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

ここで、 U_{PMNS} はポンテコルボ・牧・中川・坂田行列と呼ばれ、成分は次の通りである。

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C_{23} & S_{23} \\ 0 & -S_{23} & C_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{13} & 0 & S_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_{13}e^{i\delta} & 0 & C_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{12} & S_{12} & 0 \\ -S_{12} & C_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

ただし、 $S_{ij} = \sin\theta_{ij}$ 、 $C_{ij} = \cos\theta_{ij}$ 、 θ_{ij} は ν_i と ν_j の混合角、 δ は CP 位相である。 ν_i が持つエネルギーを E_i とすると、質量固有状態の時間発展は、

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - px)} |\nu_i\rangle \quad (1.3)$$

と表すことができる。すると、フレーバー固有状態は、

$$|\nu_l\rangle = \sum_{m=e,\mu,\tau} \sum_{i=1}^3 U_{li} U_{mi} e^{-iE_i t} |\nu_m\rangle \quad (1.4)$$

となる。したがって、フレーバー固有状態 ν_l の粒子が、時間 t 後に距離 L を移動して ν_m となる確率は、ニュートリノが相対論的に運動しているとき $E_i \simeq p + \frac{m_i^2}{2p}$ であることを用いて、

$$\begin{aligned} P(\nu_l \rightarrow \nu_m) &= |\langle \nu_l | \nu_m(t) \rangle|^2 \\ &= \sum_{ij} U_{li} U_{mi}^* U_{lj}^* U_{mj} e^{-i(E_i - E_j)t} \end{aligned} \quad (1.5)$$

となる。行列成分を具体的に書くと、振動確率の式は次の通りである。

ニュートリノ出現確率

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\simeq \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \\ &- \frac{\sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}}{2\sin\theta_{13}} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E_\nu} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 2\theta_{31} \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \sin \delta_{CP} \end{aligned} \quad (1.6)$$

ニュートリノ消失確率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \simeq 1 - 4\cos^2\theta_{13}\sin^2\theta_{23}[1 - \cos^2\theta_{13}\sin^2\theta_{23}]\sin^2\frac{1.27\Delta m_{32}^2}{E_\nu} \quad (1.7)$$

ニュートリノ振動実験には、大気ニュートリノや太陽ニュートリノを観測する実験、加速器によって生成されたニュートリノを用いる実験、原子炉で生成されたニュートリノを用いる実験など様々なタイプがある。振動測定距離 L の実験を設計し、ニュートリノのエネルギーを再構成することで、それぞれのパラメータを測定することができる。

1.2 T2K 実験

1.2.1 概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験とは、加速器を用いた長期線ニュートリノ振動実験である。図 1.1 に、T2K 実験の概要図を載せる。茨城県東海村の大強度陽子加

速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC) の加速器で生成したニュートリノビームを、同施設内になる前置検出器と岐阜県神岡鉱山にあるのスーパーカミオカンデ (SK) で測定・比較することで、ニュートリノ振動を研究している。

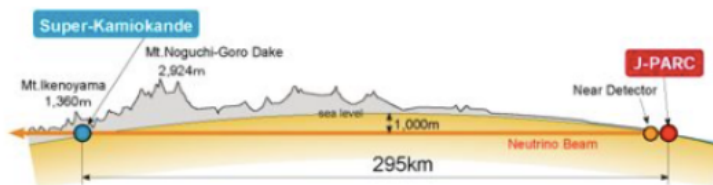


図 1.1: T2K 実験概要

ニュートリノエネルギーの再構成

原子核に束縛された中性子との準弾性散乱を使って、次式のように、ニュートリノエネルギー E_{reco} を再構成している [4]。

$$E_{reco} = \frac{m_p^2 - (m_n - E_b)^2 - m_\mu^2 + 2(m_n - E_b)E_\mu}{2(m_n - E_b - E_\mu + p_\mu \cos\theta_\mu)} \quad (1.8)$$

ここで、 p_μ, E_μ, θ_μ は再構成された μ の運動量、エネルギー、ビーム軸に対する散乱角度、 m_p, m_n, m_μ は陽子、中性子、ミューオンの質量である。 E_b は核子の平均束縛エネルギーであり、 ^{16}O の場合は $E_b = 27 \text{ MeV}$ である。

off axis 法

T2K 実験では、ニュートリノビームの方向を SK から 2.5 度ずらして SK のニュートリノエネルギースペクトルのピークの幅を狭くし、そのピークをニュートリノ振動確率が最大になるエネルギーと一致させる (図 1.2) [2]。

このようにニュートリノを観測する測定器の方向とビーム方向をずらす方法を off-axis 法と呼び、これを世界で初めて採用したのが T2K 実験である。

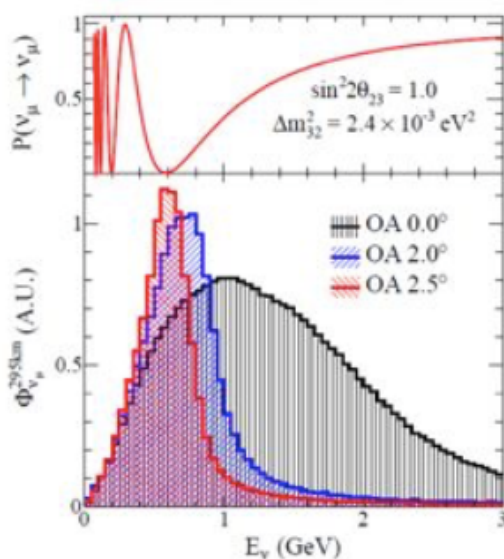


図 1.2: SK での ν_μ の検出確率とビーム軸からの各角度方向のニュートリノエネルギー分布

1.2.2 J-PARC とニュートリノビーム

J-PARC は、陽子加速器と複数の実験施設で構成され、陽子加速器を用いた素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力などの分野の最先端研究が行われている。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究開発機構 (JAEA) が共同で運営している [3]。J-PARC の概要を図 1.3 [3] に載せる。陽子は、線形加速器 (Linear Accelerator, LINIAC)、3 GeV 陽子シンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS)、MR(Main Ring) で順に加速され、最終的に 30 GeV のエネル

ギーに達する。そして超電導電磁石を用いた早い取り出し (Fast Extraction, FX) によってニュートリノビームラインへ送られる。そして陽子ビームは炭素標的に照射され、中間子などの多くのハドロンを生成する。その π^+ を電磁ホーンによって並行に収束し、その後以下の式の通りの崩壊でできたミュオンニュートリノをビームとして利用する。



また、電磁ホーンの電流を逆にすることで、 π^- を収束することができ、同様に反ニュートリノビームを生成できる。

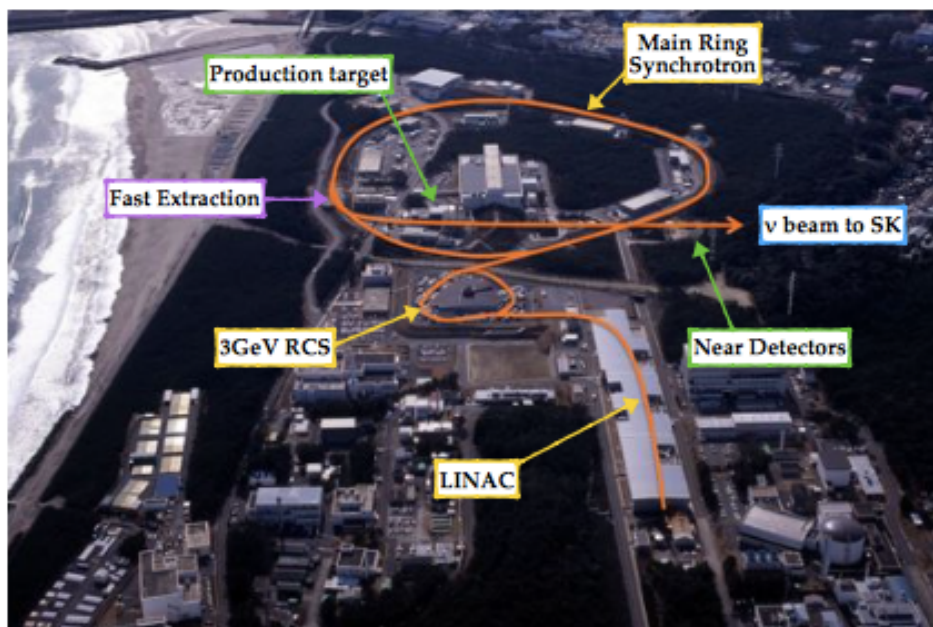


図 1.3: J-PARC

1.2.3 ニュートリノ反応とニュートリノ測定器

T 2 K 実験のエネルギーで主に起こるニュートリノ反応モードを次に挙げる。

- 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$

- 中性カレント弾性散乱 $\nu_\mu + n(p) \rightarrow \nu_\mu + n(p)$
- 荷電カレント 1 生成 $\nu_\mu + n(p) \rightarrow \mu^- + \pi^+ n(p)$, $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + \pi^0 + p$
- 中性カレント 1 生成 $\nu_\mu + n(p) \rightarrow \nu_\mu + \pi^0 + n(p)$, $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + \pi^+ + n$
- 多重 生成反応 (深非弾性散乱含む) $\nu_\mu + n(p) \rightarrow \mu^- + m\pi + X$, $\nu_\mu + n(p) \rightarrow \nu_\mu + m\pi + X$

ここで、中性子（や陽子）といった核子は原子核内に束縛されている。T2Kでのメイン反応モードはCCQEで、CCQE反応を仮定して式(1.8)の通りにエネルギーを再構築している。これを他のバックグラウンドから識別するために、以下の装置を用いる。

前置検出器

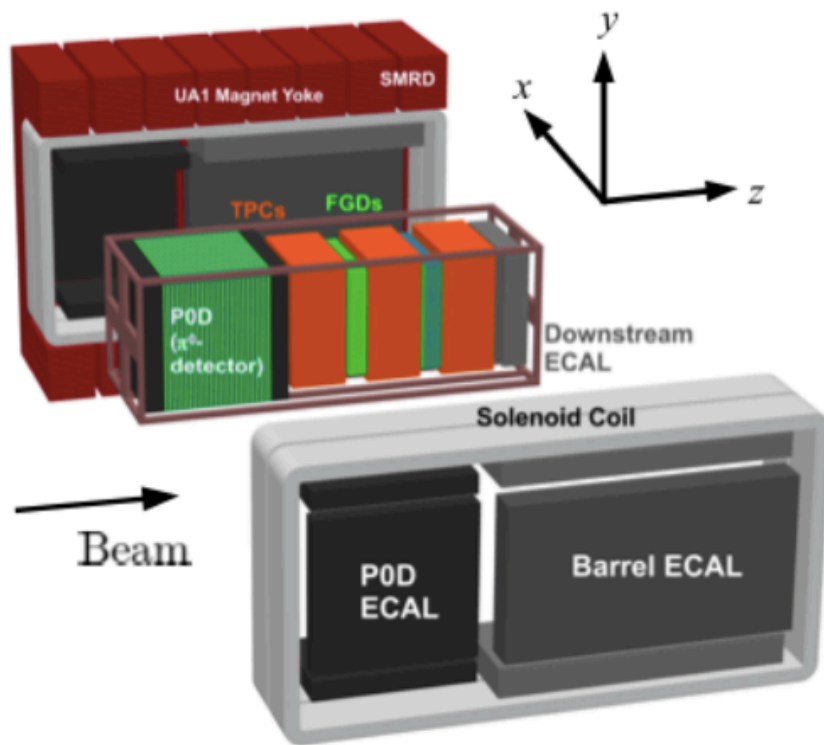
振動前のニュートリノのニュートリノビームフラックスやエネルギースペクトルを測定するために、ビームターゲットから280m離れたところに前置検出器が設置されている。様々な要素からなるが、ここでは主な部分だけ説明する。図1.4 [5]に前置検出器の図を載せる。

FGD (Fine Grained Detector) は、ニュートリノ標的兼、飛跡検出器である。2台に分かれており、ビーム上流側は1cm × 1cmの太さのシンチレータバーからなり、下流側はシンチレータと水の二層構造をしている。ニュートリノ反応点周りのすべての荷電粒子を検出することで、反応モードの識別を行う。

他には、荷電粒子の運動量を測定したり粒子識別を行うTime Projection Chamber (TPC)、 π^0 の検出を行う π^0 Detector (P0D)、 π^0 による γ やニュートリノ反応で生じた電子を検出するための電磁カロリメータ (ECAL, Electromagnetic Calorimeter)、大角度で散乱されTPCで検出できなかったミュオンを捉えるシンチレータ飛跡検出器 (Side Muon Range Dedector, SMRD) がある。そしてこれらを0.2TのMagnetがおおっている。

スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、J-PARCから295km離れた岐阜県の神岡鉱山の地下1000mに位置する、大型水チェレンコフ検出器である。T2K実験では、後置検出器としての役割を果たす。図1.5に、スーパーカミオカンデの概要図を載せる。直



ND280前置検出器の構成要素

図 1.4: T2K 前置検出器 [4]

径 39.3m、高さ 41.4m の円筒形のタンクに 50t の純水が入っており、内壁面に敷き詰められた 11200 本の 20 インチの光電子増倍管でチェレンコ光を検出する。またタンク外壁面にも 1885 本の 8 インチ PMT が設置され、宇宙線由来の信号を veto する。

ニュートリノ反応で生じた荷電粒子はチェレンコフ光を発生させ、リング形の像が PMT によって検出される。電子のチェレンコフ光は、電磁シャワーを引き起こすので、ミューオンのときと比べてリングがぼやける。これを利用して、タンク内で崩壊したニュートリノのフレーバーを識別することができる。他にも、リングの情報から、反応点、エネルギー、運動方向などを再構成可能である。

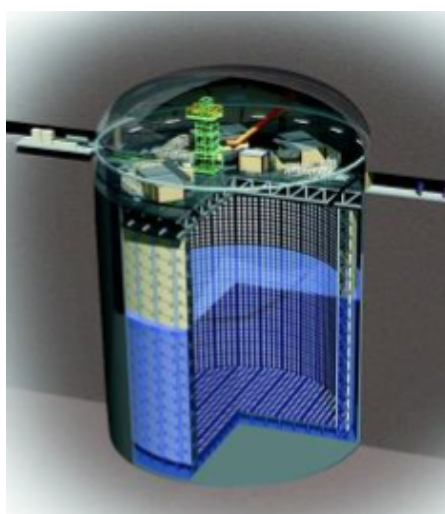


図 1.5: スーパーカミオカンデ

1.3 T2K 実験の現状と今後の課題

これまでに T2K 実験は、CP 位相角 $CP=[0.15,0.83]$ (順階層)、振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23} = 0.528^{+0.055}_{-0.038}$ と報告している [1]。T2K 実験は引き続き 7.5×10^{21} POT (Proton On Target) までデータを増やし、測定感度を上げていく。その後、さらなる測定感度の向上を目的に J-PARC と Hyper-Kamiokande (HK) を組み合わせた次世代長期線ニュートリノ振動実験が計画されている。

T2K 実験では、現在、ニュートリノエネルギー領域 1GeV 付近においてニュートリノ反応モデルに大きな不定性があり、Meson Exchange Current (MEC) と呼ば

れる、原子核内の多核子を含めた反応モードの存在が指摘されている。MECは中間子を生成せず、CCQEと終状態が似ている。図1.6にMECの模式図を示す。この例では、陽子と中性子のペアとニュートリノが反応し、終状態としてレプトンと2個の陽子が存在する。2体反応ではないため、MECをCCQEと混同してしまうと、ニュートリノエネルギーを正しく測定することができず、パラメータ測定に影響を与えてしまう。このことからT2K実験ではニュートリノと原子核の反応の系統誤差を大きく見積もっている。今後T2Kおよび次世代実験において、CP破れの探索を進めていくが、そのためにはこの系統誤差の削減が必要である。そこで、前置検出器のFGDよりも高い位置分解能を持った高分解能飛跡検出器を開発している。この検出器によって終状態の陽子の数を測定することで反応モードを区別できれば、ニュートリノ反応についての理解が深まり、この系統誤差を大きく削減できる。

本研究では、1cm以下の短い荷電粒子の飛跡も再構成可能な飛跡検出器のプロトタイプを製作、評価した。プロトタイプの詳細は次の第2章で述べる。

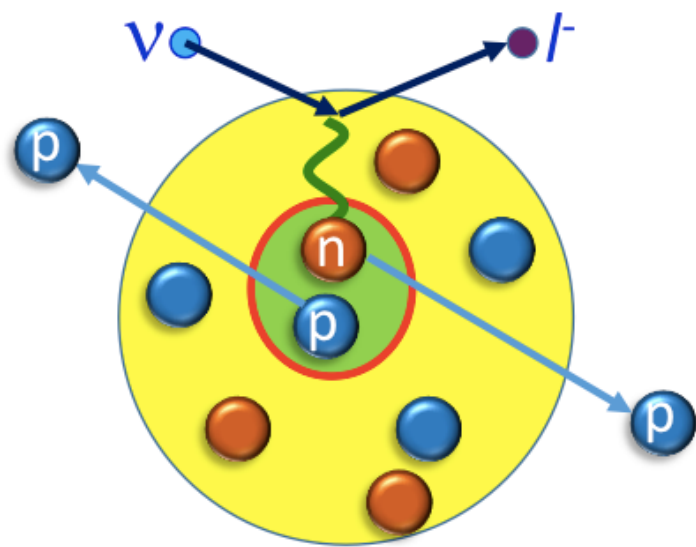


图 1.6: MEC 模式图

第2章 高分解能飛跡検出器

2.1 開発動機

現在のT2K実験では、ニュートリノ反応の飛跡再構成は、前置検出器のFGDで行っている。しかしシンチレータバーの太さが $1 \times 1\text{cm}$ であるため5cm以上の飛跡しか見つけることができない。このシンチレータバーの太さを細くし、再構成可能な飛跡長さの最小値を引き下げることができれば、より高い性能で反応モードを識別でき、ニュートリノエネルギーを正確に測ることができる。

図2.1に、シミュレーションで見積もった 10^{21} POT当たりの、前置検出器(標的物質はプラスチックシンチレータ、標的質量は0.8トンとした)で反応したニュートリノのエネルギー分布を示す。POTとは、Proton On Targetの略であり、陽子ビームターゲットに当たった陽子の数を表している。黒が全モード、赤がCCQE反応、緑がMECである。CCQEは65169イベント、MECは8440イベントあり、MECはCCQEの11%程度存在している。1.3節で説明したように、現時点ではMECの存在は実験ではっきりと確認できていないが、実際にはMECが無視できないほど存在している可能性がある。

図2.2に、CCQE(赤)とMEC(緑)の終状態における陽子の数を示す。CCQEは主に陽子が1つ、MECは主に陽子が2つ生成される。よって、生成した陽子を逃さずにトラッキングできれば、これらの反応モードを識別することができる。

図2.3に、ニュートリノ反応によって生成される陽子の運動量分布を示す。この図から、200MeV以上の陽子をトラッキングする必要がある。

2.2 設計

トラッキング部分には、高い位置分解能を持ち、かつ大きな光量が期待できる、シンチレーションファイバーを用いる。200 MeVの陽子のシンチレータ中での飛程は、[6]より2.6 cm程度である。ただし、シンチレータをpolysterenで近似して求めた。図2.4は、陽子の散乱角度分布を表している。200 MeVの陽子が60度方向に飛んだ場合、z軸方向には平均で1.3 cm飛ぶ。このtrackを2 mmのファイ

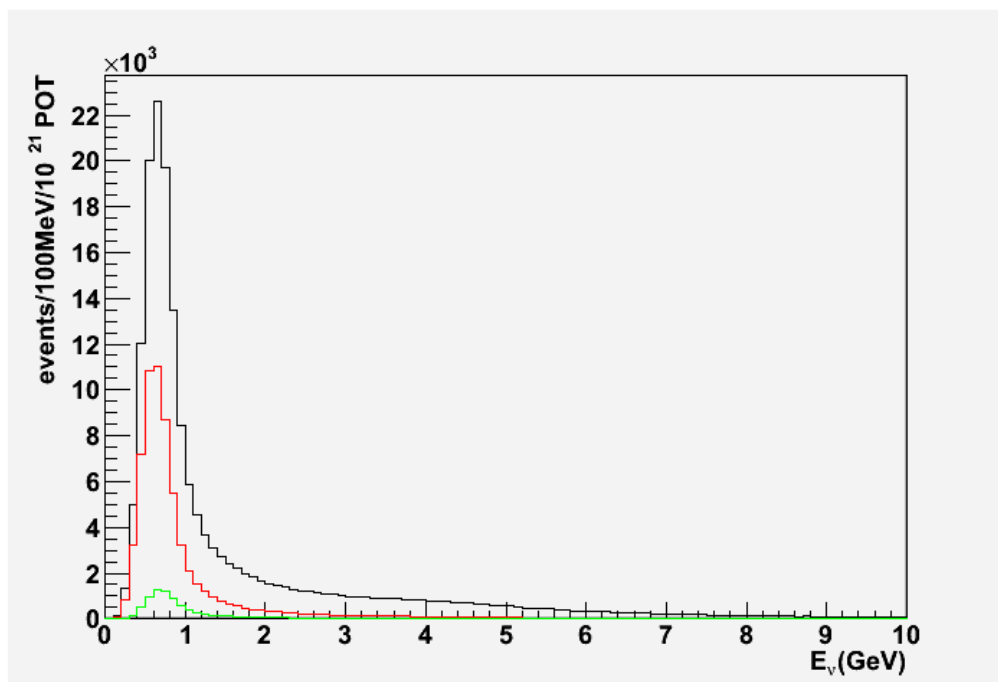


図 2.1: 前置検出器で反応したニュートリノのエネルギー分布。標的物質はシンチレーターで、標的質量は0.8トンを仮定した。黒は全反応、赤はCCQE、緑はMECを表す。

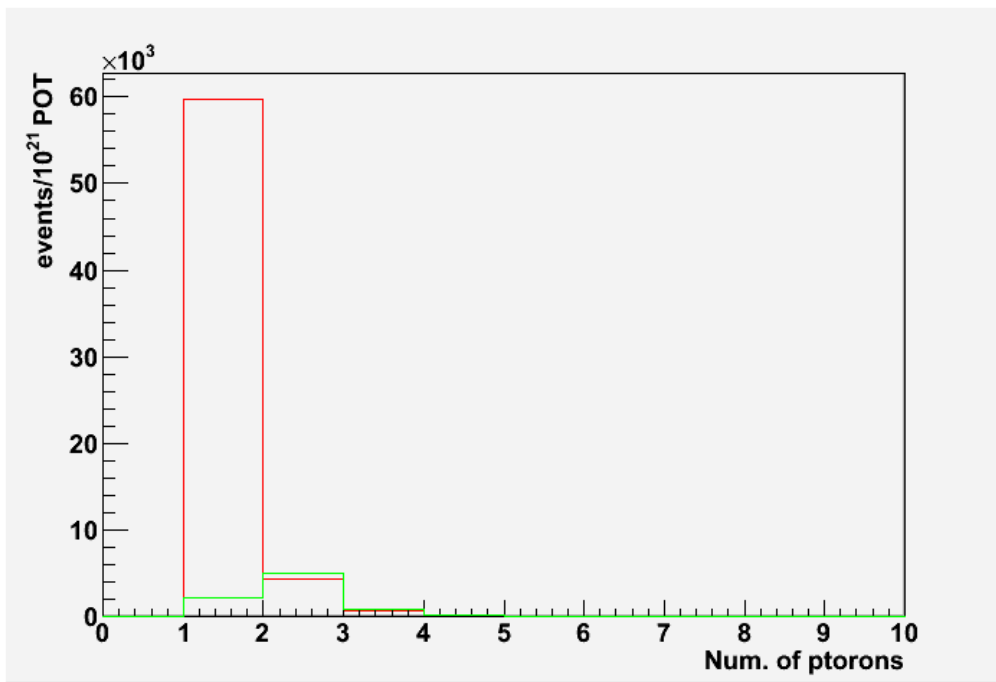


図 2.2: ニュートリノ反応後の終状態の陽子の数。赤は CCQE、緑は MEC を表す。

パートラッカーで観測すると、 x, y 層それぞれで3ヒット残し、トラックとして再構成が可能となる。

ファイバーは2 mm 角の2 m の長さのものを用いる。これを同方向に平面に1000本並べて2000 × 2000 × 2 mm の x 層を作り、1000本のファイバーを同様に並べ90°回転したて並べた y 層を重ね、1セットとする。このセットを5セット重ねる。全体のサイズは2000 × 2000 × 20 mm となり、総チャンネル数は10万チャンネル、重さは約0.8トンである。

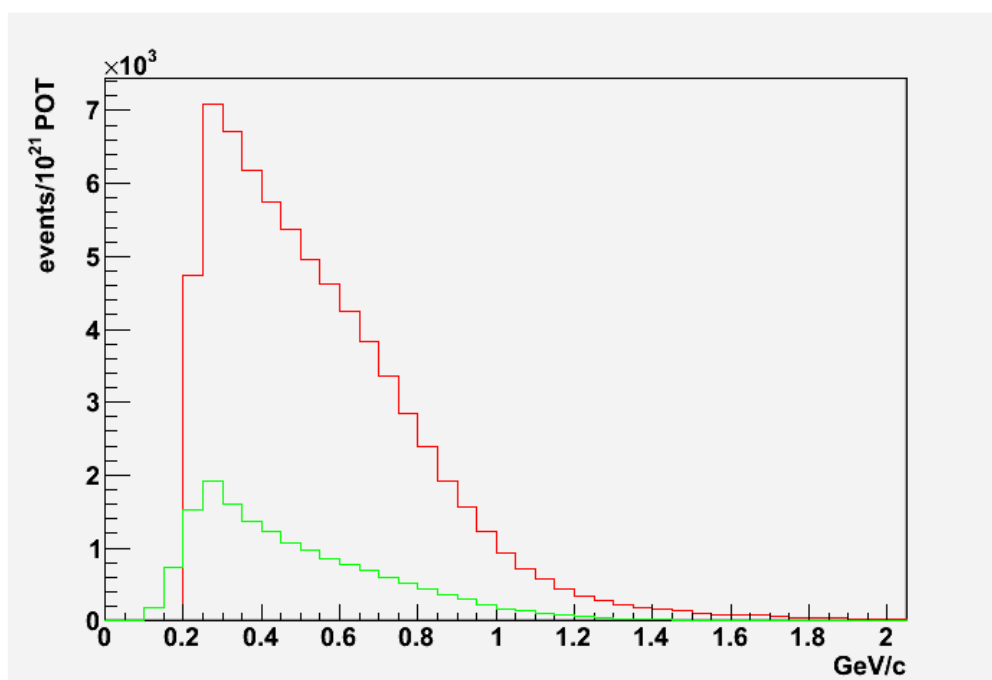


図 2.3: ニュートリノ反応によって生じた陽子の運動量分布。赤が CCQE、緑が MEC を表す。

2.3 要求性能

以上のことを踏まえて、制作する高分解能トラックに必要な性能は、

- Minimum Ionization Particle のトラックを再構成できるほど、十分な光量が得られること。
- 飛跡検出効率が十分に大きいこと。

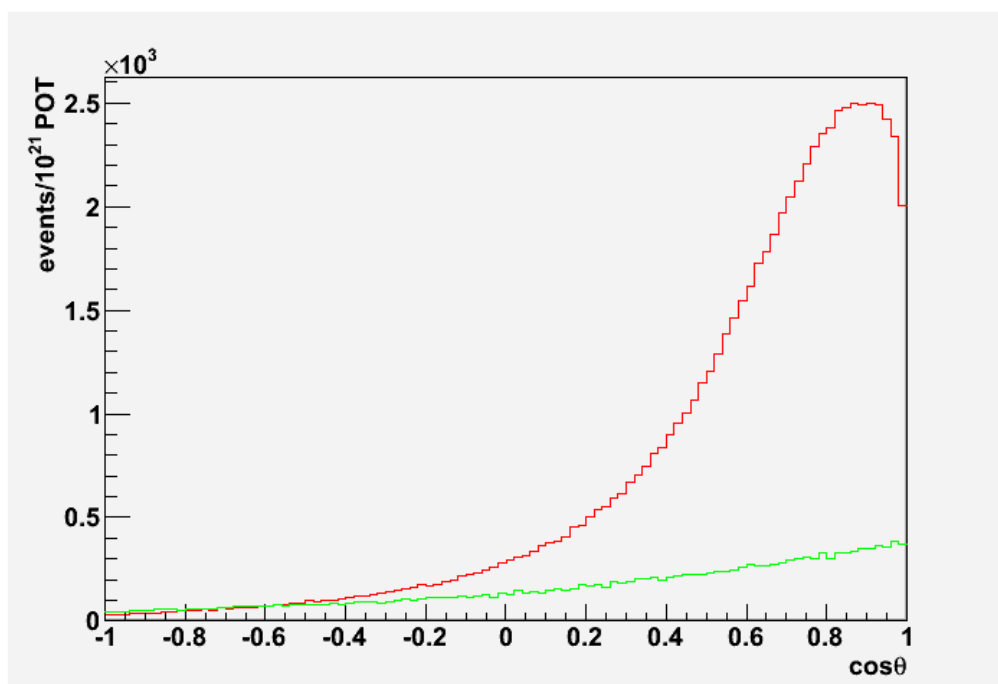


図 2.4: ニュートリノ反応によって生じた陽子の散乱角度分布。赤が CCQE、緑が MEC を表す。

- 2m のファイバーの端でヒットがあっても、十分な光量が得られるほど減衰長が十分に長いこと。
- ND280 のマグネット内部の限られたスペース (2m x 2m x 20cm) に、光検出器などの読み出し部分を含めた 10 万チャンネルを収められるようにコンパクトな設計とすること。

である。本研究では、この高分解能飛跡検出器のプロトタイプを製作し、陽電子ビームによるテストを行って、これらの項目について性能を評価した。

第3章 シンチレーションファイバートラッカー

3.1 概要

1cm 弱程度の短い飛跡の荷電粒子を再構成する高分解能飛跡検出器の必要性を第2章で述べた。そこで本研究では、断面 2mm 角、長さ 125cm のシンチレーションファイバーを用いた高分解能飛跡検出器のプロトタイプ (以後、トラッカーと表記) を製作し (図 3.6)、性能評価を行った。本研究のセットアップにおいて特に重要な要素は次の3つである。

- シンチレーションファイバー
- MPPC(光検出器)
- EASIROC モジュール (多チャンネル MPPC 信号読み出しモジュール)

荷電粒子によりシンチレーションファイバーで発光した光は MPPC で検出される。ファイバーは 64 本あり、図 3.1 のように 8×8 に並べ、その両端面に 8×8 に並んだ 64 チャンネルの MPPC を設置する。MPPC から出た信号は、MPPC の制御・読み出し用モジュールである EASIROC モジュールによってデジタル化され、パソコンへと送られる。このようにして得た荷電粒子の飛跡の情報を元にトラッキングを行う。このトラッカーのについて、本研究では主に次の3点を評価した。

- Hit を識別するのに十分な光量
- Hit を見つける効率 (Hit Efficiency)
- ファイバー内での光の減衰長

この章では、シンチレーションファイバーと EASIROC モジュール、その他について説明する。なお、MPPC については第4章で述べる。

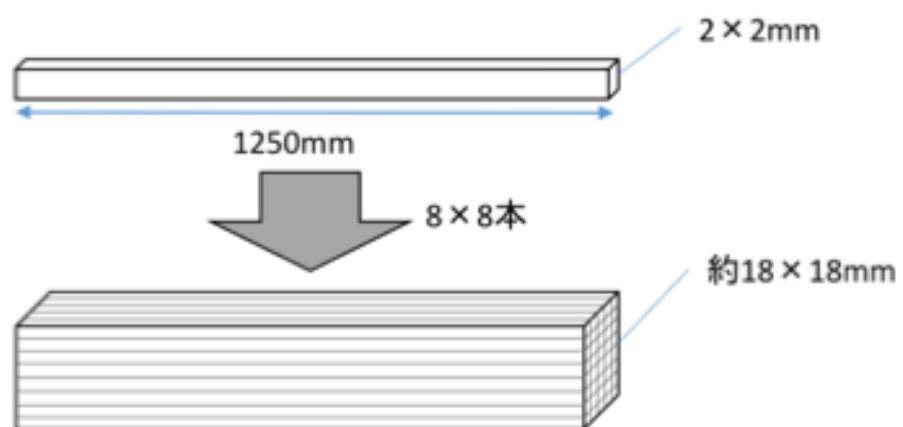


図 3.1: トラッカー概要図

3.2 シンチレーションファイバー

本研究では、2 mm 角、長さ 1250 mm の株式会社クラレのシンチレーションファイバー SCSF-78 を用いた。SCSF-78 は、図 3.2 のようにシングルクラッド構造であり、コアは一辺 1.92 mm の角型であり、その周りに厚さ 0.04 mm のクラッドが被覆されている。クラレのカタログによると、発光スペクトルは約 450 nm にピークをもち (図 3.3)、ファイバー端から 100 ~ 300 cm の減衰長は 4.0 m 以上である。表 3.1 にその他の詳細を含めて示す。また、クロストークを抑え光量を出すために、ファイバー 1 本ずつ反射材を塗布している。反射材は、二酸化チタンを含む EL- JAN Technology 社の EJ-510 を用いた。

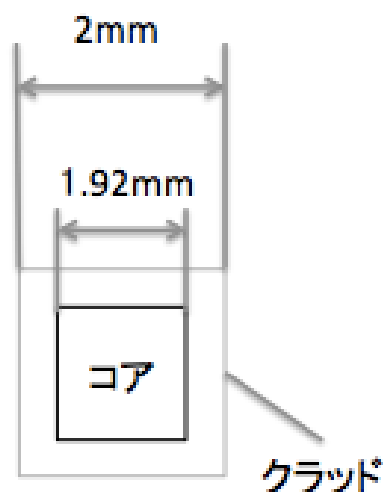


図 3.2: シンチレーションファイバー SCSF-78 の断面

3.3 ファイバー束とMPPCの接続、読み出しボード

ファイバー端面とMPPCの受光面を固定するために、図3.4のクッキーを用いる。ファイバーとクッキーはオプティカルセメント (ELJEN Technology 社 EJ-500) で接着し、ファイバーの端面は研磨してある。そして、MPPCの信号は読み出し

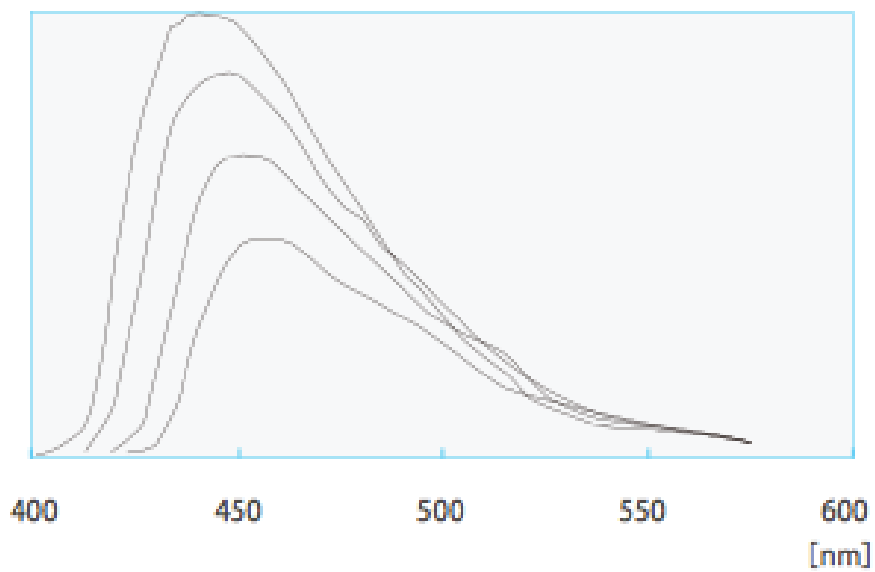
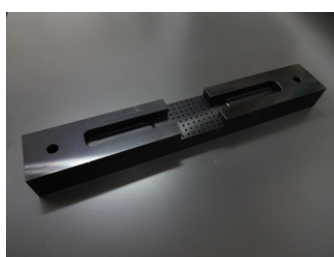


図 3.3: シンチレーションファイバー SCSF-78 の発光スペクトル。縦軸は相対的発光量を表す。実線はそれぞれ、波長スペクトル測定器と UV ライトの距離 $L=10, 30, 100, 300\text{cm}$ の場合を表す。

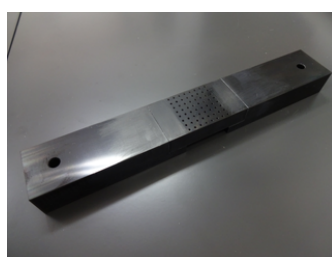
商品番号		SCSF-78
構造		シングルクラッド
コア	素材	ポリスチレン
	屈折率	1.59
	密度	1.05g/cm ³
	太さ	1.92mm 角
クラッド	素材	ポリメタクリル酸メチル樹脂
	屈折率	1.49
	密度	1.19g/cm ³
	厚さ	0.04mm

表 3.1: シンチレーションファイバーの詳細データ

ボードを介してフラットケーブルへと送られ、EASIROC モジュールへ接続される。MPPC とフラットケーブル装着時の様子を図 3.5 に示す。読み出しボードとクッキーは、MPPC の幅に合わせて制作した。これにより、将来この検出器を大型化・多チャンネル化したときに可能な限り隙間なく並べることが可能である。図 3.6 はトラック写真のである。中央部の白い部分がファイバー 64 本である。ファイバーのアライメントを固定するために、上下のグレーの固定具とサイドの黒いクッキーで挟み固定している。



[1]MPPC 側



[2]Fiber 側



[2] 反射材塗装済みのファイバーとクッキー

図 3.4: クッキー

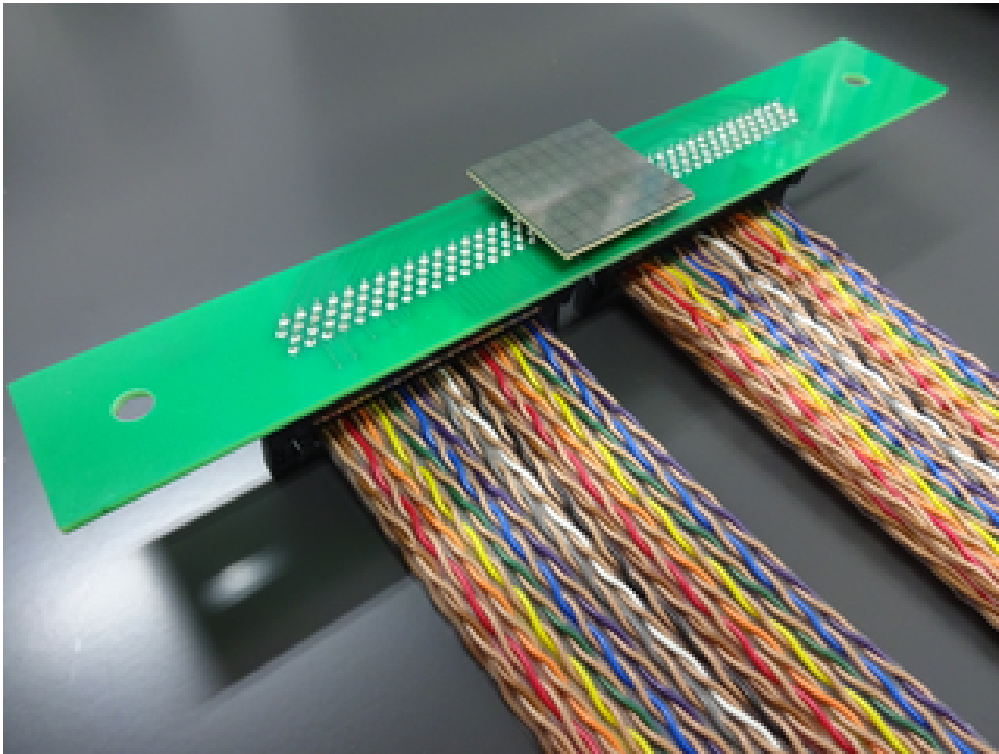


図 3.5: MPPC を変換ボードを介してフラットケーブルに接続したときの様子



図 3.6: トラッカー全体写真。中央部の白い部分がシンチレーションファイバーで、64本ある。ファイバーのアライメントを固定するために、上下のグレーの固定具とサイドの黒いクッキーではさんである。

3.4 EASIROC モジュール

3.4.1 基本仕様・動作

MPPC からの信号を、EASIROC モジュールというモジュールを用いて読み出す。EASIROC とは、フランスのグループが開発した、MPPC 読み出し用の ASIC であり [7]、一つの ASIC で同時に 32Ch の MPPC の信号を読み取る機能をもっている。EASIROC モジュールはこの ASIC を 2 個搭載し、64Ch 分の MPPC の信号を読み取るだけでなく、MPPC への電源供給やパソコンへのデータ転送機能も持っている。東北大学、KEK、大阪大学が共同開発し [9]、G.N.D. が販売している。EASIROC モジュールへの電源は、NIM クレートから供給される。図 3.7 に EASIROC モジュールの写真を載せる。今回は 64 本のファイバーの両端に設置した MPPC 2 個から信号を読み出すため、EASIROC モジュールを 2 台用いる。

以下、EASIROC モジュールの主な機能について説明する。

MPPC への電圧供給

NIM クレートからの 6V の入力電圧により、MPPC のバイアス電圧として 90V まで出力することができる。またグラウンドを調整することによって、個々のチャンネルのバイアス電圧を 4.5V の範囲で個別に調整することができる。

信号読み出し

図 3.8 のように、MPPC からの信号 (input) は、まず High Gain Preamplifier に送られ、反転増幅される。(Low Gain Amplifier は未実装であるため、今回は用いない。) 増幅率は、フィードバックキャパシタンスの容量を変えることにより、10 ~ 150 倍の間で全チャンネル一括で設定できる。

その後、Fast Shaper と Slow Shaper によって波形整形される。Fast Shaper 側は Discriminator に入力される。この Discriminator のスレシールドは、全チャンネル一括で設定することができ、その OR 信号が出力される。なおこの OR 信号は本研究では用いない。Slow Shaper 側の信号は、立ち上がりからピークまでの時間を 50 ~ 150ns の間で調節でき、この波形が ADC 値取得に使用される。図 3.9 の橙色がこの信号である。EASIROC モジュールは波高測定型 ADC であるため、波高を取得するタイミングを入力する必要がある。この入力信号を HOLD とよび、図 3.9

の水色のような NIM 信号である。[1] のタイミングで HOLD すると、図 3.9[2] のようになり、この時の波高が 12bit の ADC で記録される。HOLD するタイミングは外部から調整して入力する必要があり、大きくずれると図 3.9[3] のように正しい波高が記録されないため、HOLD タイミングを調整しなくてはならない。この調整は、信号の立ち上がりからピークまでの時間や、NIM MODULE の Digital Delay を用いて行う。

BUSY 信号

EASIROC モジュールに BUSY 信号機能が実装されており、ready でない間はデジタル信号が出力される。本測定では 2 台の EASIROC を用いているため、この 2 台の間で ready の状態に切り替わるタイミングがずれると、イベントがずれてしまう。そこで、BUSY 信号の終端から次のトリガーを受け付けるまでの時間を十分に確保することにより、この問題を回避する。

データ転送

EASIROC モジュールでデジタル化されたデータは、LAN ケーブルによってパソコンへ収集される。本研究では、Mac Book Pro(OS10.9.5) をこのデータ収集に使用した。

上記の内容を踏まえ、EASIROC モジュールの特徴を以下にまとめた。

- MPPC のバイアス電圧として 90V まで出力可能
- グラウンドを調整することによって、個々のチャンネルのバイアス電圧を 4.5V の範囲で別々に設定可能
- 波高測定型の 12bitADC
- 正電圧の信号を出力
- PreAmplifier が内蔵されており、MPPC の信号を反転増幅させる。増幅率は 10 ~ 150 倍の間で、離散的に全チャンネル一括で設定できる。

また、前述の通り、EASIROC モジュールには様々なパラメータをユーザーが設定することができる。そのパラメータを以下に並べる。設定値は、5.2.2 節で述べる。

- High Gain Preamplifier の Gain を設定する。
- 信号立ち上がりからピークまでの時間を設定する。
- 印加電圧を微調整する。



図 3.7: EASIROC モジュール

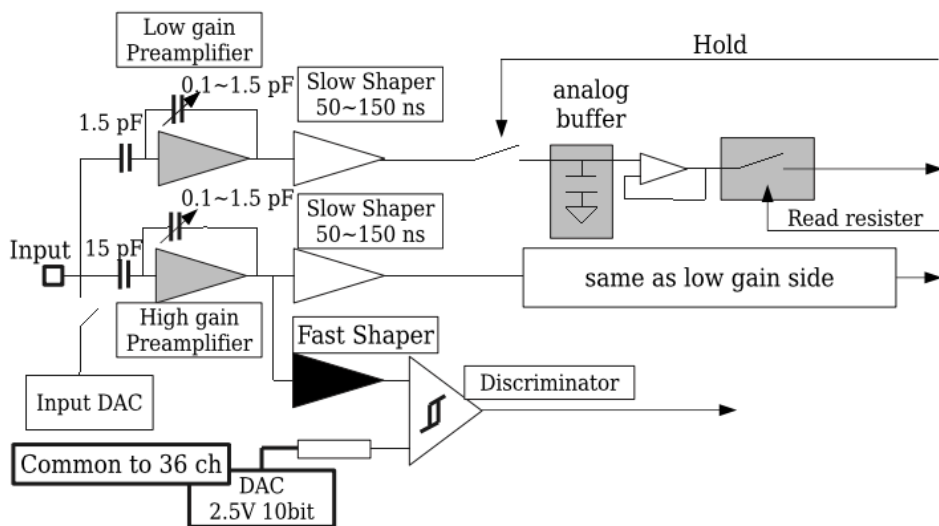
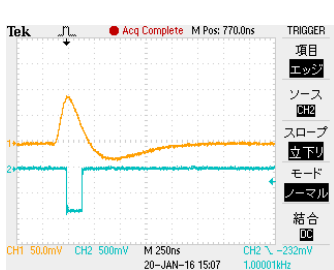
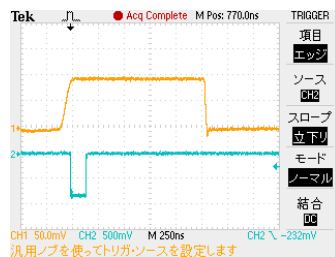


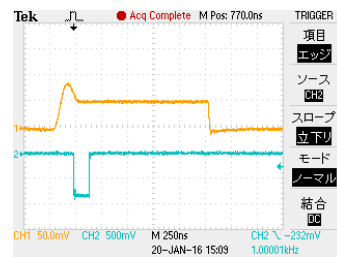
図 3.8: EASIROC のブロック図



[1] HOLD 前



[2] 良いタイミングで
HOLD したとき



[3] 悪いタイミングで
HOLD したとき

図 3.9: Slow Shaper で波形整形された MPPC からの信号 (橙色) と HOLD 信号 (青色)

第4章 MPPC

4.1 概要

シンチレーションファイバーで発光した光を検出するために、半導体光検出器である Multi-Pixel Photon Counter(MPPC)を用いる。光は、光量を極限まで減らしていくと、光の量子性が現れ1個、2個と数えることができるようになる。これをフォトカウンティングといい、MPPCはそれが可能な検出器である。

MPPCの感光面はピクセル状になっている。1ピクセルの内部構造は、ガイガーモードのAPDとクエンチング抵抗を直列につないだものである。このピクセルを平面上に並べ、並列に接続した半導体光検出器を一般に Pixelated Photon Detector(PPD)と呼ぶ。MPPCは、浜松ホトニクス株式会社が製造しているPPDの商品名である。

本研究では64chのChip on boardタイプのものを用いた。ピクセルピッチは $50\mu\text{m}$ 、1チャンネルあたりのピクセル数は3584である。有効受光面は1チャンネルあたり $3 \times 3\text{mm}$ で、隣り合うChとのギャップは 0.2mm であり、64チャンネル全体でも $25.8 \times 25.8\text{mm}$ と非常にコンパクトな設計である。その写真を図4.1に載せる。

4.2 動作原理

MPPCのピクセルであるAPD部分は、pn接合の半導体からなり、ある一定以上の逆電圧を印加すると、入射光子の数にかかわらず出力される信号の大きさが一定となる。並列接続されているAPDの信号の総和を計測することで、入射光子の数を測定することができる。この状態をガイガーモードといい、ガイガーモードへ転ずる電圧を降伏電圧という。MPPCの降伏電圧は、おおよそ60V程度である。通常、降伏電圧より数V高いバイアス電圧をかけて動作させる。ガイガーモードのAPDに光子が入射すると、入射した光子によって半導体中の電子が励起され、電場によって加速される。そしてこれが別の電子を励起させ、繰り返していく。この現象を雪崩増幅と呼ぶ。

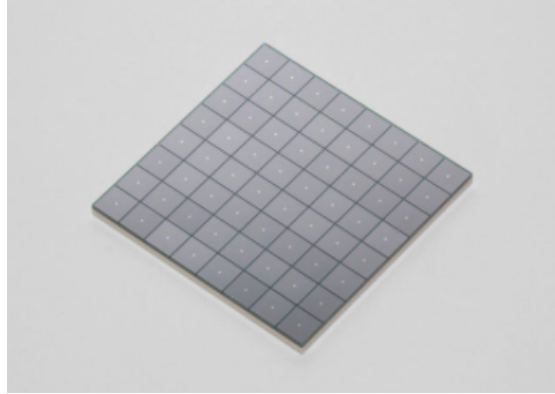


図 4.1: 64Ch Array MPPC。浜松ホトニクス商品カタログより。

4.3 基礎特性

ガイガーモードの APD から出力される電荷量 Q は、

$$Q = C(V_{bs} - V_{bd}) = CV_{ov} \quad (4.1)$$

と表される。ここで、 C は APD の静電容量、 V_{bd} は降伏電圧、 V_{bs} はバイアス電圧、であり、オーバー電圧 (V_{ov}) を

$$V_{ov} \equiv V_{bs} - V_{bd} \quad (4.2)$$

と定義した。

また、MPPC 1 チャンネルはこの APD を並列接続したもののなので、得られる信号は各 APD からの信号の総和となる。すなわち、光子を検出した APD ピクセルの数を N とすると

$$Q_n = Q \times N = C(V_{bs} - V_{bd}) \times N \quad (4.3)$$

となる。ただし、一つの APD の出力電荷 Q は入射光子数によらず一定であるため、入射光子がチャンネルあたりのピクセル数と比べて同程度ほどまで多くなると、実際に入射した光子数よりも N は小さく観測されてしまう。

また、入射した光子によって直接生成された光電子が何倍に増幅された信号になったかを MPPC の *Gain* と呼び、 e を素電荷として

$$Gain = \frac{Q}{e} = \frac{CV_{ov}}{e} \quad (4.4)$$

と表される。すなわち、 $Gain$ は V_{ov} のみに依存する。

4.3.1 1p.e 相当の ADC 値

上述の通り、MPPC の ADC 分布は、ある程度広がりを持ったピークが等間隔に並ぶと考えられる。この隣り合うピークの差が 1Photo Electron (p.e.) に対応しており、これを ADC/1p.e. と呼ぶことにする。

4.3.2 降伏電圧

V_{ov} に対して 1p.e 相当の ADC 値が比例することが式 (4.1) から分かる。よって、数パターンのバイアス電圧で ADC/1p.e. を測定すれば降伏電圧を求めることができる。降伏電圧には個体差があり、また温度にも依存するので、実験の環境下で測定する必要がある。

4.3.3 ダークノイズ

光が入射していなくても信号が観測される場合がある。これをダークノイズと呼ぶ。原因は、熱励起された電子が雪崩増幅を引き起こすことによると考えられている。このノイズの大きさは、1光子分がほとんどであるが、後述のクロストークやアフターパルスが引き起こされると、光子数個分となることもある。

浜松ホトニクスデータシートによると、

$$\text{ダークカレント} \sim 0.5\mu\text{A}, \quad \text{ゲイン} \sim 1.25 \times 10^6$$

であるので、素電荷が $1.602 \times 10^{-19}\text{C}$ であることを用いると、本研究で用いた MPPC では、ダークノイズは

$$2.5 \times 10^6 / \text{sec}$$

と見積もることができる。

4.3.4 PDE

光が入射したにもかかわらず、信号が観測されない場合がある。これは、量子効率や雪崩増幅確率が100%でないこと、ピクセル間に不感領域があることなどが原因である。入射した光が信号として観測される確率を Photon Detection Efficiency(PDE、光子検出効率)と呼ぶ。ファイバーの発光スペクトルはほぼ450nmにピークを持つが、今回用いるMPPCは400nm台の光に対して30%以上の高いPDEを持つ。PDEのスペクトルを図4.2に示す。

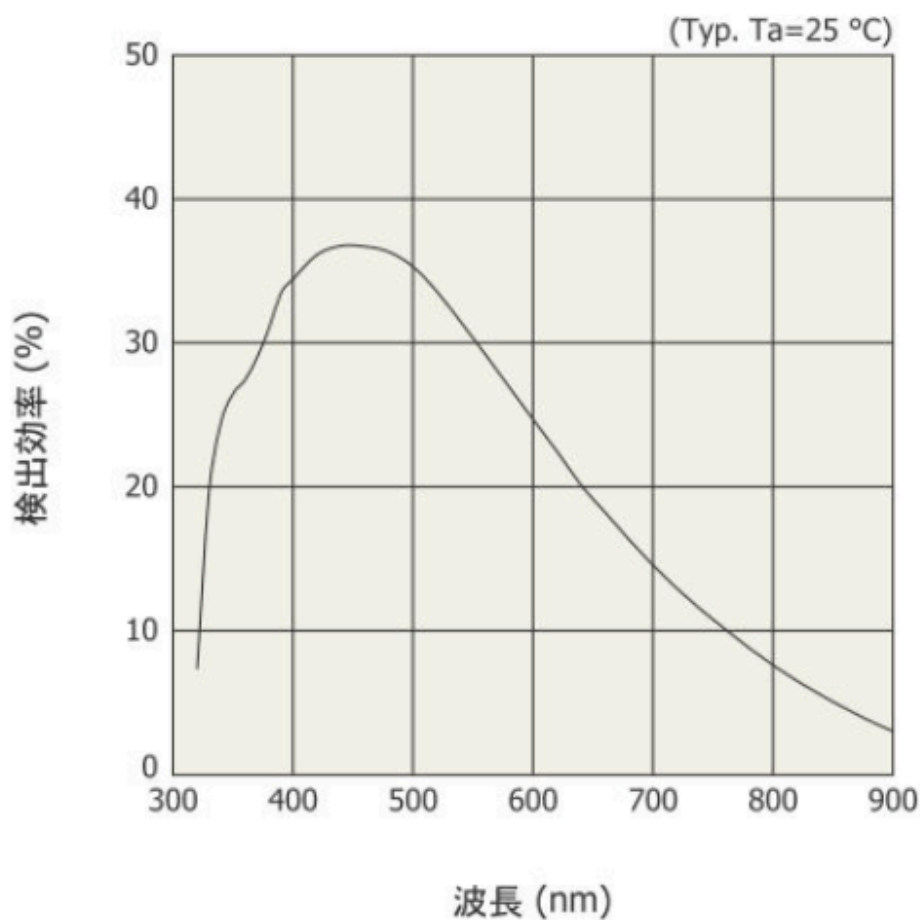


図 4.2: 光子の検出効率の波長依存性 ($V_{op}=V_{bd}+2.4V$)。浜松ホトニクスのカタログより。

4.3.5 クロストーク

MPPC の一つのピクセルに光が入射しても、複数入射したような大きさの信号が測定されることがある。これは、あるピクセルに光子が入射し雪崩増幅する時に発生した赤外光が、隣のピクセルで観測されることが原因である。

4.3.6 アフターパルス

MPPC のピクセルで雪崩増幅する時に、増幅された一部のキャリアが半導体の結晶の中の欠陥などに捕獲されることがある。このキャリアが放出され、雪崩増幅を起こすと、本来の信号と見分けがつかない信号が発生する。この二次的な信号をアフターパルスという。

4.4 基礎特性の測定

本研究では MPPC を 2 つ使い、それぞれ MPPC1、MPPC3 と名付ける。MPPC の特性を確認しチャンネル間の特性のばらつきを較正するために、この 2 つの MPPC について ADC/1p.e. と降伏電圧の測定を行った。

4.4.1 1p.e 相当の ADC 値測定

複数のピクセルに光子が入った場合は、その数に比例して波高が高くなる。よって、波高測定すると理想的には離散的な値が測定される。しかし実際にはある程度広がりを持つピークとなる。1kHz のパルス波状に発光する微弱な LED 光を MPPC に当て、1p.e 相当の ADC 値を測定した。図 4.3 は、バイアス電圧 65.92V のときの MPPC1 のチャンネル 11 の ADC ヒストグラムである。最も低い側のピークはペDESTAL であり、右へ順に 1p.e., 2p.e., と並んでいる。まずペDESTAL、1p.e., 2p.e. をそれぞれガウシアンでフィットし、そのパラメーターを初期値として、3 つのガウシアンの和でフィット (赤線) している。フィットの結果、ペDESTAL ピークは 770、1p.e. のピークは 806 となり、その差は 36 となった。このようにして求められたペDESTAL と 1p.e. の ADC 差を ADC/1p.e. と定め、他のチャンネルも同様に求めた。

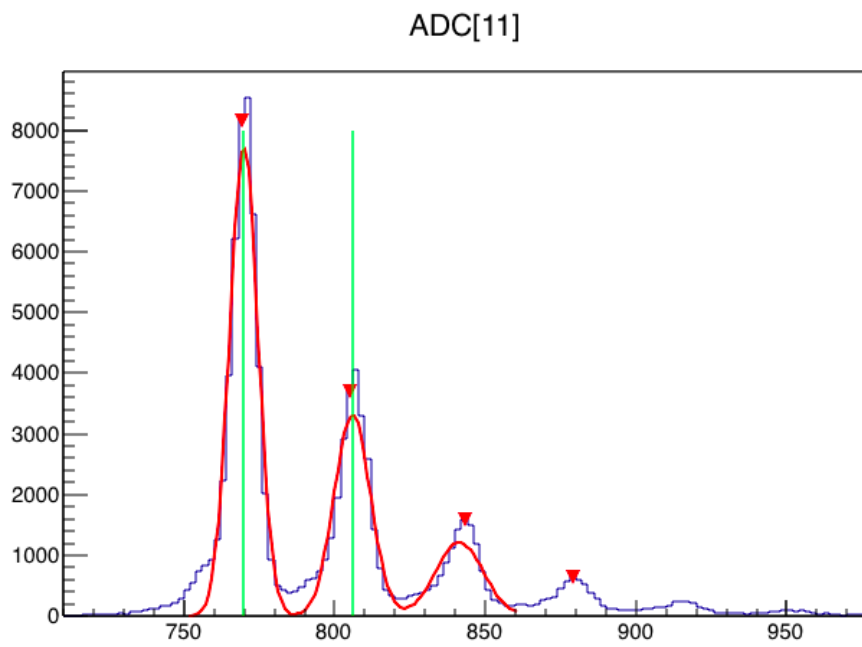


図 4.3: MPPC1 の Ch11 の ADC ヒストグラム

4.4.2 降伏電圧

数点のバイアス電圧について、4.4.1 節と同様の方法で $ADC/1p.e.$ を求める。MPPC1 の Ch11 について求めた結果を図 4.4 に載せる。オーバー電圧と $ADC/1p.e.$ は比例するので、図 4.4 の x 切片が降伏電圧である。このチャンネルのフィット結果は、

$$ADC/1p.e. = 15.1751V_{op} - 964.119$$

となり、これより降伏電圧は 63.53V となった。この降伏電圧をすべてのチャンネルについて調べた。この結果を図 4.5 に示す。チャンネル間に、MPPC1 は 0.6V、MPPC3 は 0.4V 程度のばらつきがあった。このばらつきを元に EASIROC のバイアス電圧を調整することで、ピームテストにおける $ADC/1p.e.$ のばらつきを小さくおさえた。

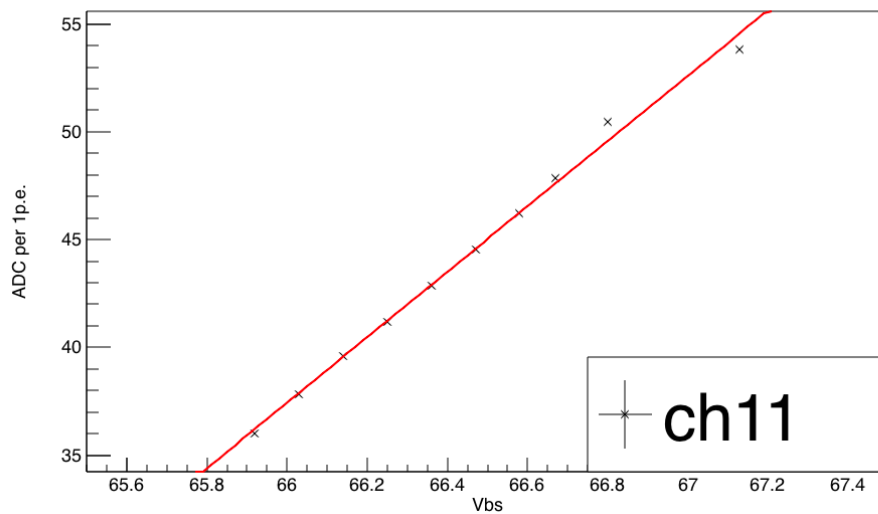


図 4.4: バイアス電圧と 1p.e. 相当の ADC の関係 (例として MPPC1 のチャンネル 11 の場合)

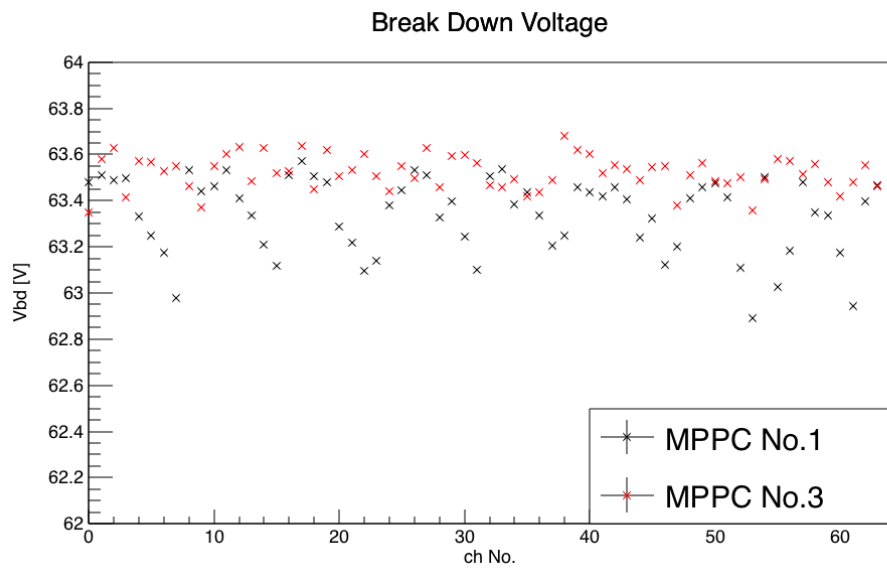


図 4.5: 降伏電圧

第5章 ビームテスト

5.1 概要

我々は、2015年10月28日から同月30日に、東北大学電子光理学研究センターにおいて陽電子ビームを検出器に照射するテストを行った。東北大学電子光理学研究センターとは、90MeV 電子加速器・1.3GeV 電子シンクロトロンにより、電子・陽電子ビームを生成する加速器施設である。本研究では、600MeV の陽電子ビームを用いたテストを行った。これにより、トラックを貫通できる十分なエネルギーをもった荷電粒子を用いて、光量分布、Hit Efficiency、ファイバーの減衰長を高い統計量をもって評価した。検出器へのビーム照射時の様子を図 5.2 に示す。

5.2 検出器セットアップ

図 5.2 のように、ファイバー 64 本をビーム垂直方向に並べ、その前後にトリガー用のシンチレータ (15 × 15 × 2mm) を設置する。トリガー用シンチレータはビーム中心に固定し、トラックを移動させてビーム照射位置を調整する。ビーム照射位置の確認は、図 5.4 のように、レーザー墨出し器を用いて行った。トリガー用シンチレータの光信号は、PMT(浜松ホトニクス製 H7415、管径 28mm) で読み取る。また、このトリガーと検出器の信号は、NIM MODULE で読み出す。このブロック図を図 5.4 に示す。

5.2.1 1p.e 相当の ADC 値測定

ファイバーからの光量を測定するために、1 Photon 分の ADC 値を LED の微小な光を用いて測定した。MPPC と LED を向い合せにし、LED の発光をトリガーとしてデータ取得した。



図 5.1: 検出器へのビーム照射時の様子

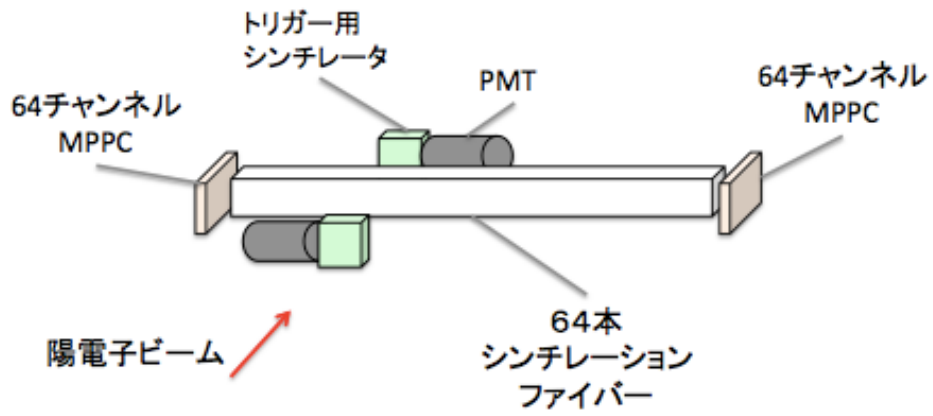
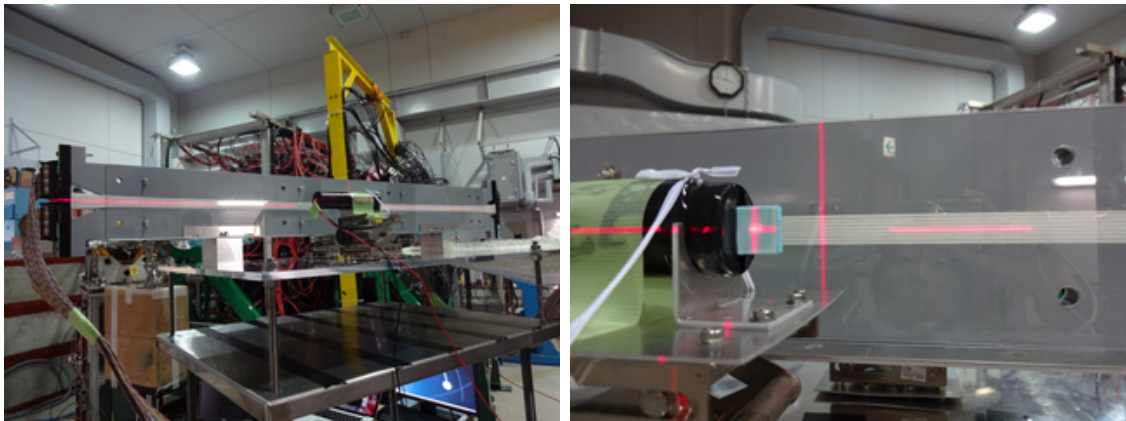


図 5.2: 測定系の模式図



[1] 全体の写真

[2] ビーム入射位置部分拡大

図 5.3: トラッカーとビームの位置調整時の様子

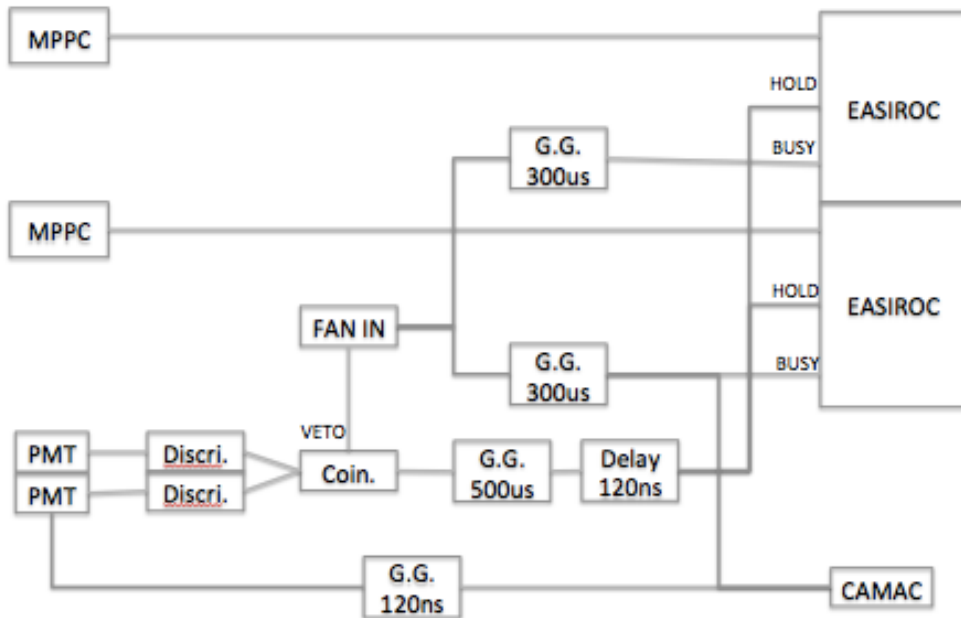


図 5.4: 読み出し回路のブロック図

5.2.2 パラメータ設定

High Gain Preamplicifier の Gain の設定

1p.e 相当の ADC 値測定においては、LED 微弱な光によりフォトカウンティングしたため、設定値は最も大きい 150 倍とした。ビーム測定の際は、十分に光量が出るため、12bitADC で測定可能な大きさに抑えるために、設定値を 21.4 倍とした。ただし、この倍率は EASIROC の仕様の値である。ビーム測定での信号の大きさを p.e. 数に置き換えるときは、この倍率を用いた。

MPPC のバイアス電圧の微調整の設定

4.4.2 節で求めた降伏電圧をもとに、すべてのチャンネルのオーバー電圧が同じになるように MPPC のバイアス電圧を調整した。

5.3 測定項目

図 5.5 のように、ビームからみて右側を Right 側、左側を Left 側と呼ぶ。以下のように条件を変えて照射する。

- 図 5.5 上図のように、ビーム入射位置を 20cm 間隔で 4 点、ファイバー方向に垂直に入射させる。このように入射位置をずらすことで、光量分布の変化

やファイバーの減衰長を測定する。それぞれの照射パターンを右 (Right) 側から R20,L00,L20,L40 と呼ぶ。R と L はそれぞれ Right と L を表しており、数字は中心からのずれを cm で表している。

- 図 5.5 下図のように、ビーム入射方向とファイバー方向を垂直ではなく角度をつける。全て中心に入射させる。斜め入射によってファイバー内の陽電子の飛程距離が伸び、その分光量が大きくなるかを確認する。それぞれの照射パターンを A30,A45,A60 と呼ぶ。A は Angle を表しており、数字はずらした角度を示している。

Hit Efficiency については、全照射パターンについて求める。

5.4 解析

5.4.1 1p.e 相当の ADC 値測定

1p.e. 分の信号に対応する ADC 値を、各 MPPC のチャンネルに対して求める。ただし、基盤の接触不良により、MPPC1 には動作しないチャンネルがあった。これを図 5.6 に示す。なお、MPPC3 は全チャンネル正常に動作した。

MPPC 全 Ch の 1photon 相当の ADC カウントを図 5.7 に示す。ビームテスト当日、MPPC3 にノイズが多く ADC 分布のピークがつぶれてしまったため、比較的高いバイアス電圧でビームテストを行った。そのために全体的に MPPC1 よりも ADC/1p.e. が大きくなっている。

5.4.2 発光量

照射パターン L40 の時のチャンネル 3 の両端の光量分布の比較を図 5.8 に示す。黒が左 (Left) 側の光量分布を表しており、ビーム入射位置と MPPC の距離は 15cm で、MIP ピークは約 90p.e. である。一方、赤は右 (Right) 側の光量分布で、ビーム入射位置と MPPC の距離は 75cm であり、MIP ピークは約 40p.e. である。ここで、[11] によると、1.5mm のシンチレーションファイバーを MIP が通過した時の光子を Multi-Anode Photo Multiplier Tubes で検出すると、 $\sim 11\text{p.e./hit}$ の光量が見られる。ファイバー 1mm あたりに直すと、本研究では少なくとも 20p.e./hit 、[11] では 7p.e./hit であり、本研究のほうが約 3 倍近く多い光量を確認できた。光子検出効率の高い MPPC を用いることで、高い光量でトラッキングすることが可能になった。

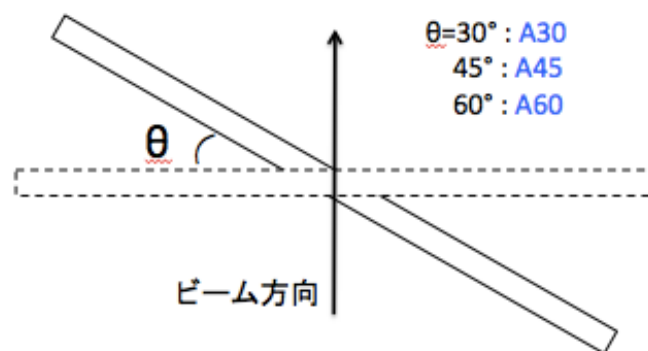
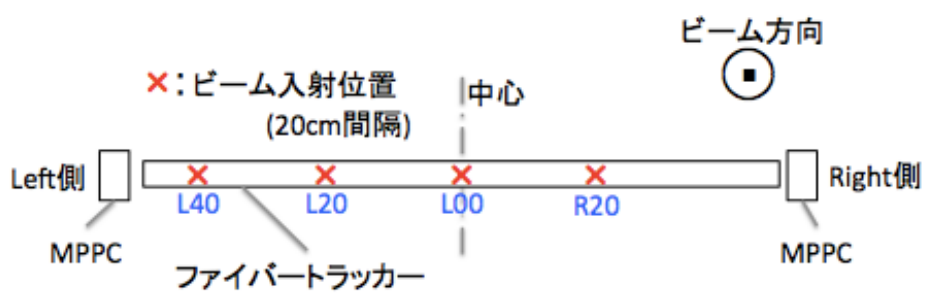


図 5.5: ビーム照射条件

7	15	23	31	39	47	55	63
6	14	22	30	38	46	54	62
5	13	21	29	37	45	53	61
4	12	20	28	36	44	52	60
3	11	19	27	35	43	51	59
2	10	18	26	34	42	50	58
1	9	17	25	33	41	49	57
0	8	16	24	32	40	48	56

図 5.6: MPPC No.1 の動作しないチャンネル

5.4.3 スレシヨルドの決定

以下、光量にスレシヨルドを設けて Hit したかどうかを判断し、Hit Efficiency を求める。このスレシヨルドを各チャンネルに対して次のような手順で決定した。

1. すべてのチャンネルについて、仮のスレシヨルドを 15p.e. と設定する。
2. 図 5.9 のように、あるチャンネル (橙色の "?") について、一つ上流・下流のチャンネルはスレシヨルド以上 (青い) 、両隣のチャンネルはスレシヨルド未満 (青い×) という条件を課す。
3. ステップ 2 の条件を満たしたイベントについて、図 5.10 のように、そのチャンネルのペDESTAL 付近のヒストグラム (0 ~ 50p.e.) で最もエントリーが少ない 10 個のビンの平均をとり、これを正式なスレシヨルドと設定する。

この手順を全チャンネルに対して行い、その結果、スレシヨルドを図 5.11 のように決定した。各チャンネルのスレシヨルドは概ね 10p.e. 程となった。

5.4.4 Hit Efficiency

粒子が通過したにもかかわらず、光量がスレシヨルド以下の場合がある。この確率を Inefficiency と呼ぶ。この Inefficiency の求め方を、図 5.12 を用いて説明する。Inefficiency を求めたいチャンネル (橙色の "?" のチャンネル) に隣接する 4 つ

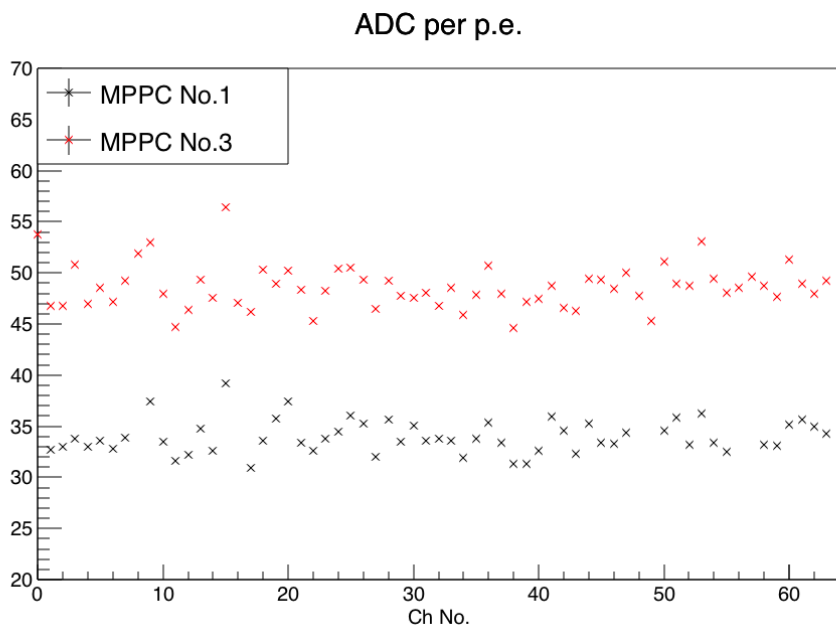


図 5.7: MPPC 各チャンネルにおける 1photon 相当の ADC カウント

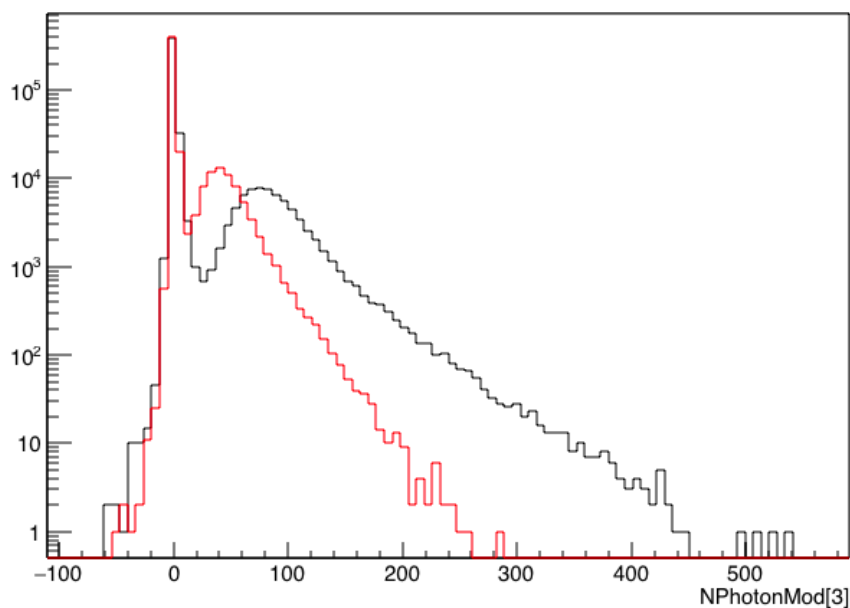


図 5.8: L40 光量分布。黒はビーム入射点に近い方の MPPC(Left 側)、赤は入射点
に遠い方の MPPC(Right 側) の信号を表す。

のチャンネルについて、図 5.12 のように、ビーム上流・下流隣のチャンネルはス
レシヨルド以上、ビーム軸垂直方向隣のチャンネルはスレシヨルド未満という条
件を課し、イベントを選択する。そして橙色の”?”の部分について、スレシヨルド
以下であるイベント数と、選択後の全イベント数の比率を、Inefficiency[%] とする。
そして Efficiency を

$$\text{Efficiency}[\%] = (100 - \text{Inefficiency})[\%]$$

と定義する。

Hit Efficiency を求めるチャンネルは図 5.13 の通りである。

Hit Efficiency を図 5.15 と図 5.16、図 5.17 に示す。

ほとんどのファイバーについて、Hit Efficiency は 95%程度もしくはそれ以上と
なった。しかし、L20 の Ch73 については、89.7%と低い値となった。光量の統計
的ふらつきの値よりも有意にばらついている。このため Inefficiency の原因は光量
の不足ではなく、測定器のもつ不感部分に起因すると考えられる。ビームが完全に
垂直入射であり、Inefficiency の原因が図 5.14 のようなファイバーの並びのずれで
あると仮定すると、Efficiency=95%と測定された Ch に対しては、ファイバーのず
れは 0.10 mm 相当と考えられる。ここで、Hit Efficiency が 89.7%と著しく低かっ
た、L20 の Ch73 の光量分布を図 5.18 に載せる。スレシヨルドは 9.5 p.e. と求め
たが、図を見ても不自然ではなく、他の Ch と光量分布が大きく異なるわけではな
い。また、原因がファイバーの並びのずれであると仮定すると、そのずれは 0.19

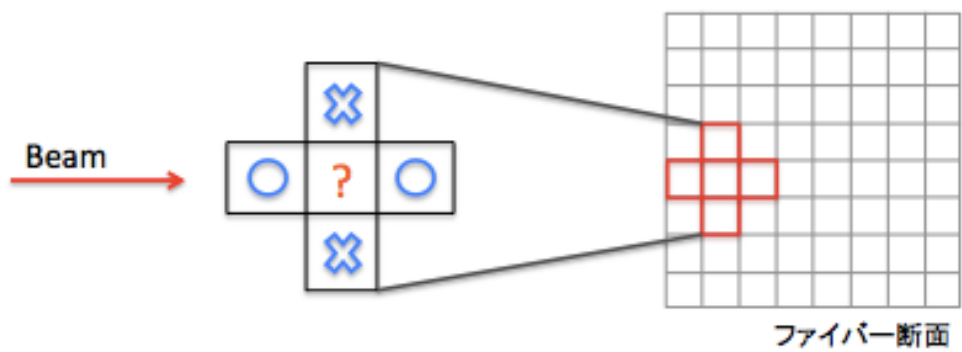
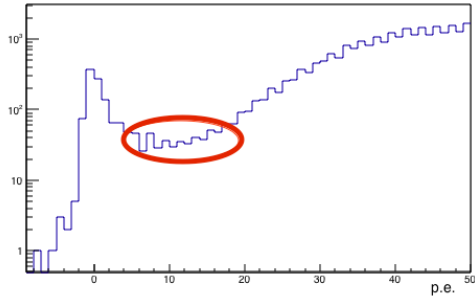
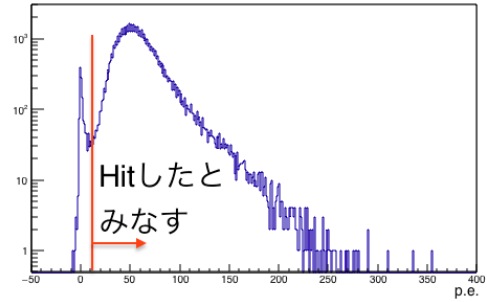


図 5.9: スレシヨルドを調べる条件。中心の橙色の”?”のチャンネルのスレシヨルドを決定している。 はスレシヨルド以上、xはスレシヨルド未満を表す。



[1] ペDESTAL付近拡大図



[2] 全体図

図 5.10: スレシヨルド決定時のヒストグラム

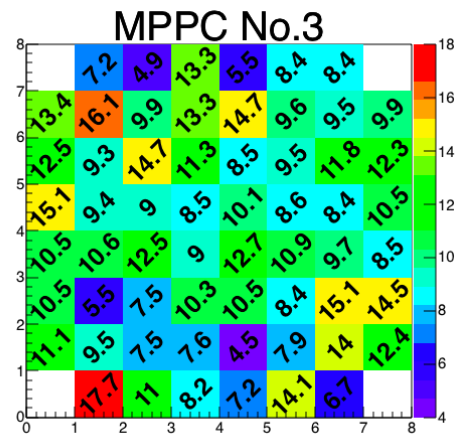
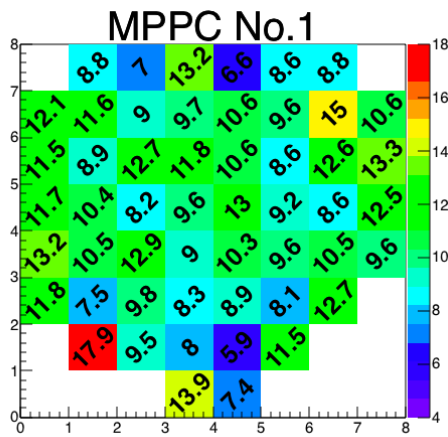


図 5.11: 各 Ch のスレシヨルド [p.e.]

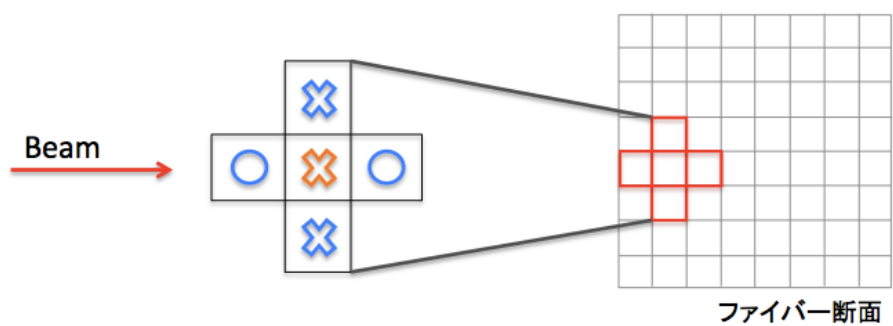


図 5.12: Inefficiency を調べる条件。 \circ はスレシヨルド以上、 \times はスレシヨルド未満を表す。

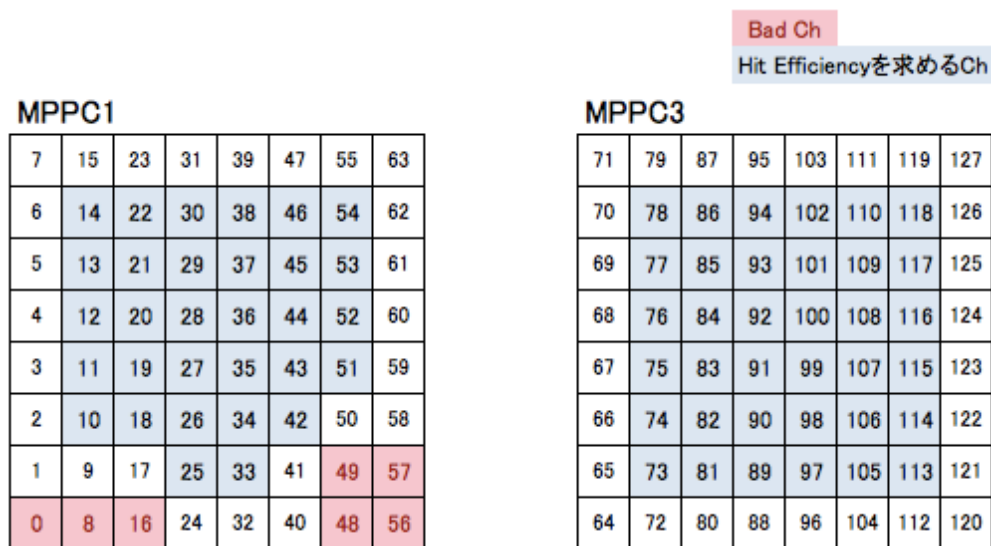


図 5.13: Hit Efficiency を求めるチャンネル

mm 相当であると考えられる。そこで、ファイバー数本をピックアップし、それぞれ数カ所の太さをノギスで計測したところ、 ± 0.1 mm 程度のばらつきがあった。よって、Infficiency の原因は、なんらかの理由で 0.2 mm 程度ファイバーのアライメントが崩れてしまったか、ファイバーの太さが 0.2 mm 程度細くなっていたことによると考えられる。Hit Efficiency は、ほとんどのファイバーについて、95%以上となった。実際にファイバーの太さに 0.1 mm 程度のばらつきがあり、ファイバーのコアが 0.1 mm ずれていたと仮定すると無矛盾な結果となった。

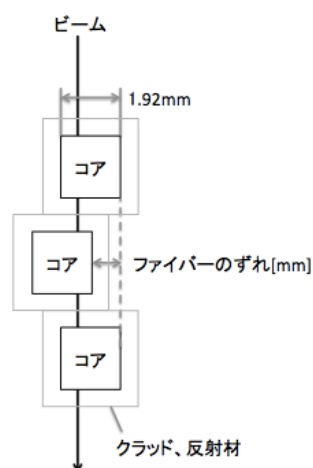


図 5.14: ファイバーのずれの模式図

5.4.5 ファイバーの減衰長の測定

スレシヨルド以上のイベントにおける光量平均を $N_{p.e.}$ 、MPPC とビーム入射位置の間の距離を d として、 L を、

$$N_{p.e.} = Ae^{-d/L} \quad (5.1)$$

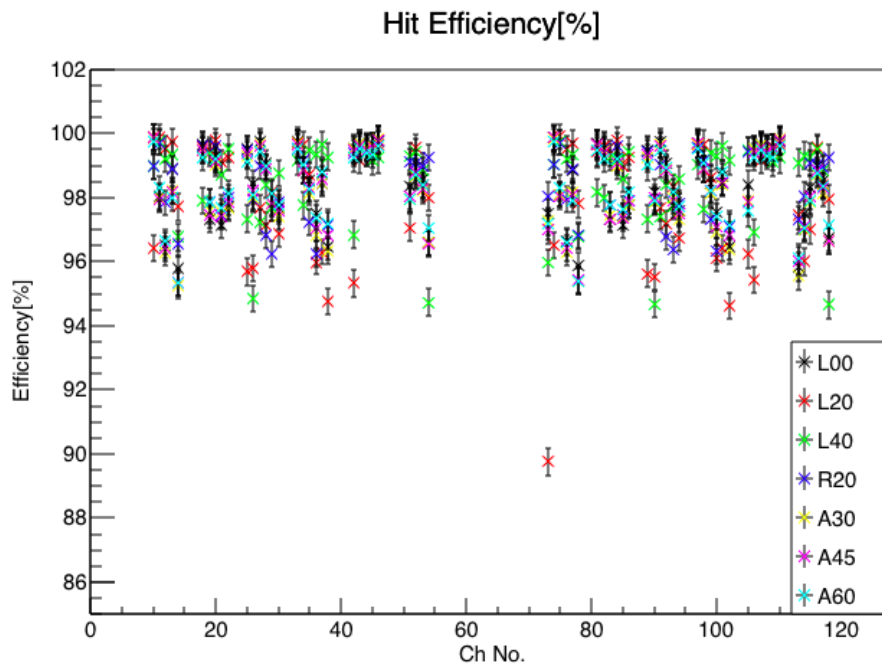


図 5.15: 全照射パターンの Hit Efficiency[%]

と仮定して求めた。一例として、照射パターン L00 のチャンネル 11 の場合を図 5.19 に示す。この結果、

$$A = 4.34 \pm 0.02$$

$$d = 238 \pm 28$$

となり、

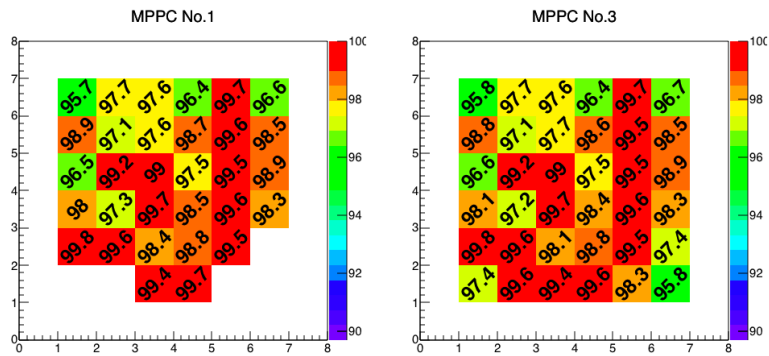
$$\text{ファイバーの減衰長} = 238 \pm 28 \text{ cm}$$

と求まった。データシートによると、 d が 15 ~ 75 cm の減衰長は 106 cm 程度である。今回は反射材ありで測定したため、減衰長が長くなったと考えられる。

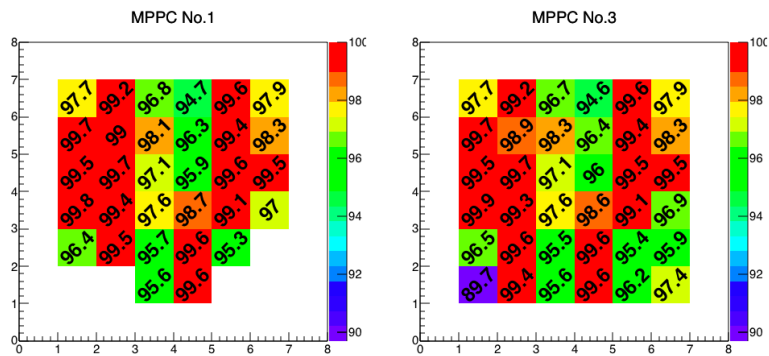
5.4.6 ビームテスト結果

トラッカーに陽電子ビームの照射テストを行い、以下の結論を得た。

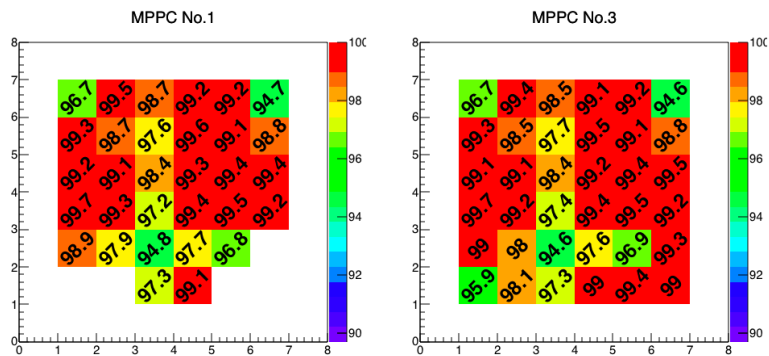
- 光量は、 $\sim 40 \text{ p.e./hit}$ となり、十分にトラッキングができる光量を得た。
- Hit Efficiency は、ほとんどのファイバーについて、95%以上となった。この結果は、ファイバーの太さに 0.1mm 程度のばらつきがあるために、ファイバーのコアが 0.1mm ずれていたと考えられる。
- ファイバーの減衰長は 2m 以上得られることができた。2m のファイバーを用いても、十分トラッキングが可能である。



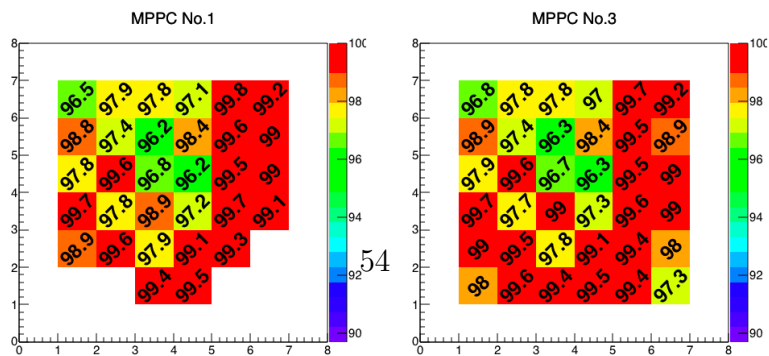
[1]L00



[2]L20

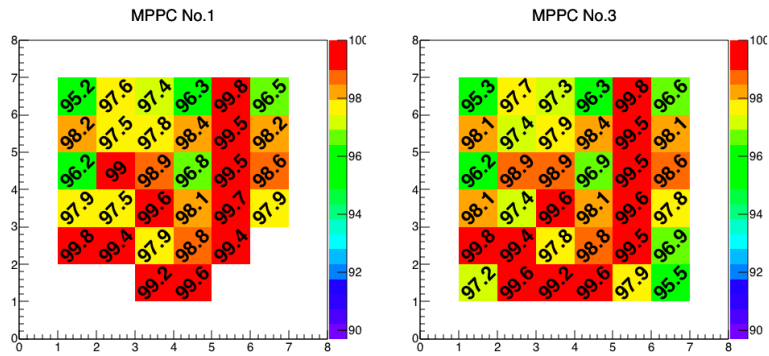


[3]L40

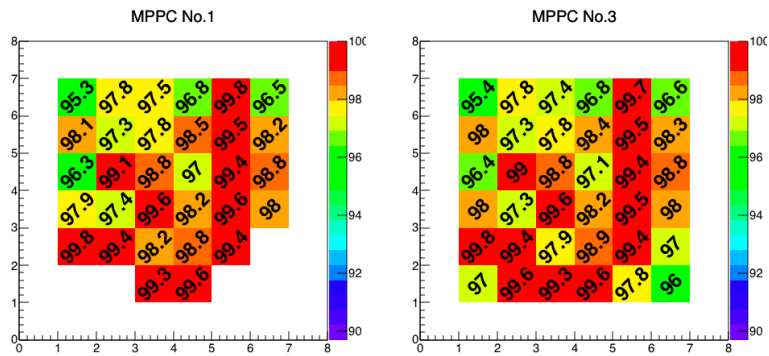


[4]R20

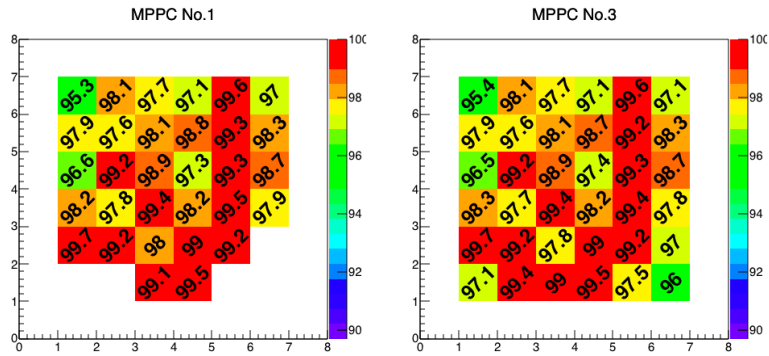
図 5.16: 照射位置変更測定 of Hit Efficiency



[5]A30



[6]A45



[7]A60

図 5.17: 角度変化測定 of Hit Efficiency

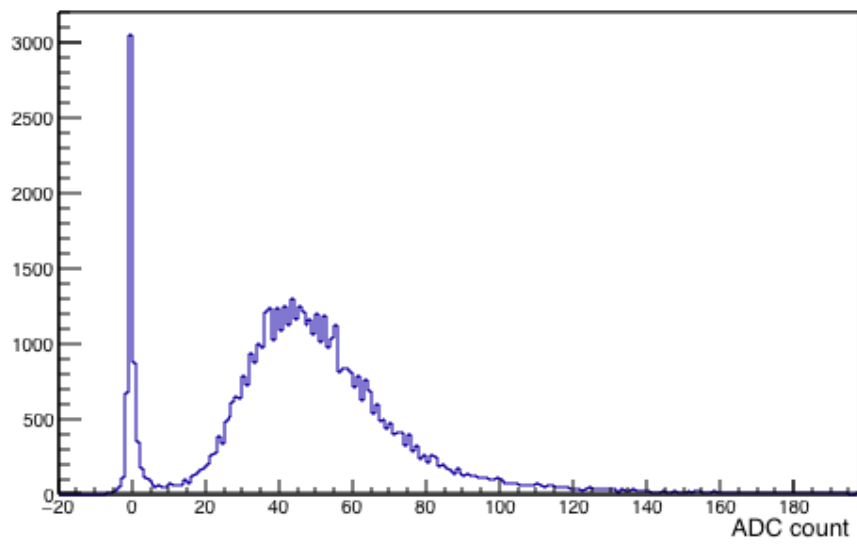


図 5.18: 照射パターン L20 のチャンネル 73 の光量分布

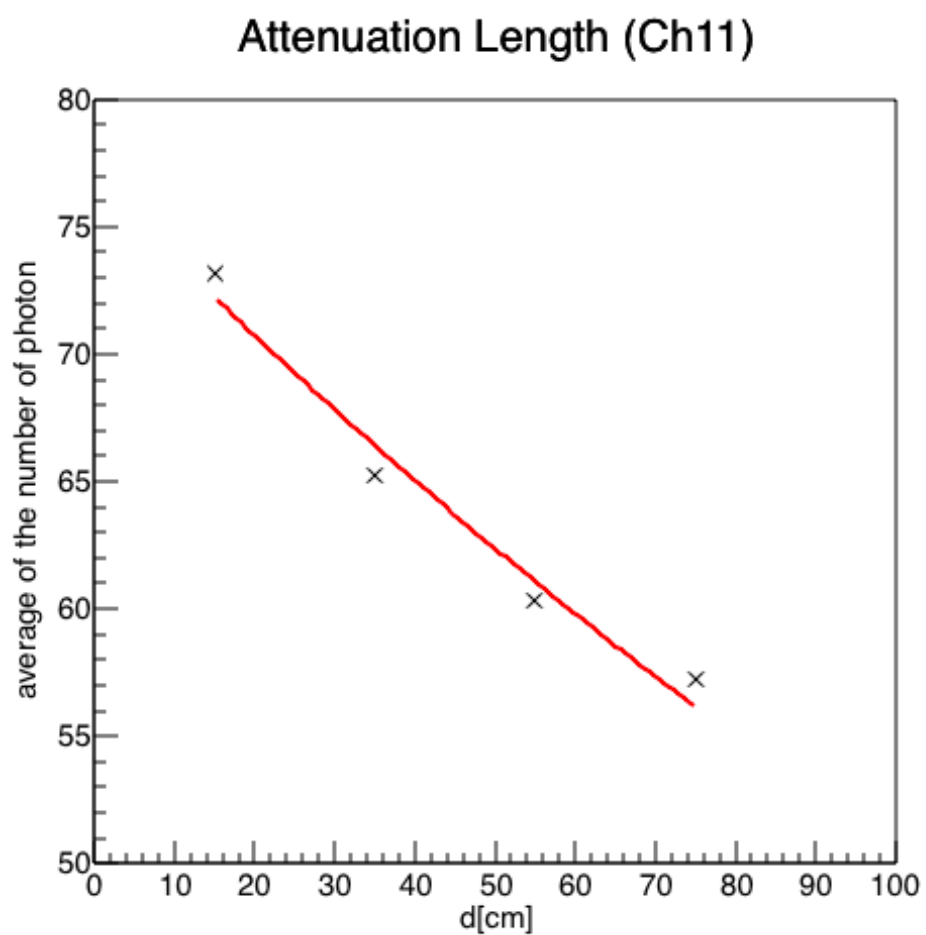


図 5.19: 照射パターン L00 のチャンネル 11 のファイバーの減衰長 [cm]

第6章 結論

T2K 実験では、現在、ニュートリノエネルギー領域 1GeV 付近においてニュートリノ反応モデルに大きな不定性があり、その結果、ニュートリノと原子核の反応の系統誤差を大きく見積もっている。今後、T2K および次世代実験において、CP 破れの探索を進めていく上で、この系統誤差の削減が必要である。高い位置分解能を持った前置検出器で、ニュートリノ反応で生成される飛跡が短いハドロンを検出できれば、ニュートリノ反応についての理解が深まり、この系統誤差を大きく削減できる。この目的を達成するために、シンチレーションファイバートラッカーを開発しており、本研究では、このプロトタイプ(トラッカー)の制作、性能について評価した。

2mm 角、長さ 1250mm のシンチレーションファイバー 64 本でトラッカーを製作し、光検出器 MPPC で光を捉え、EASIROC モジュールで MPPC の信号読み出しを行った。トラッカーに要求される性能は、高い飛跡識別分解能、高い検出効率、十分な光量、ファイバー内での光の減衰長が長いこと (2m 程度)、狭いスペースでの多チャンネル化が可能、などが挙げられる。

シンチレーションファイバーから発光したシンチレーション光は 64ch Array 型 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) によって検出することで、限られたスペースに多チャンネルを収めることに成功した。二つの MPPC について、基礎特性である降伏電圧を測定した。測定結果は 63V 台となり、それぞれチャンネルごとのばらつきは 0.4V、0.6V 程度となった。また、東北大学光理学研究センターでトラッカーに陽電子ビームを照射するテストを行った。MPPC の各チャンネルごとの降伏電圧のデータを利用して測定をした。その結果、光量は $\sim 40\text{p.e./hit}$ となり、十分にトラッキングができる光量を得た。Hit Efficiency は、ほとんどのファイバーについて、95%以上となった。実際にファイバーの太さに 0.1mm 程度のばらつきがあり、ファイバーのコアが 0.1mm ずれていたと仮定すると無矛盾な結果となった。ファイバーの減衰長は 2m 以上得られることができ、2m のファイバーを用いても、十分トラッキングが可能であることを確認した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、非常に多くの方々に支えていただきました。

中家剛教授には、まずこのような研究を行う機会を与えていただきました。そして本論文執筆にあたり何度も助言をいただきました。

南野彰宏助教には、トラッカー製作にあたって全面的に助言していただき、本論文執筆にあたって細かいところまで議論していただきました。また、ビームテストでも実際に東北大学でサポートしていただきました。

市川温子准教授には、ビームテストではライトガイドについての助言をいただき、安定した実験を行うことができました。また東海村での生活でもお世話になりました。

南條創助教には、テスト用シンチレータの提供など、物品の提供をしていただき、滞りなく実験を進めることができました。

平本綾美さんには、主にビームテストのトリガー用シンチレータの準備を手伝っていただきました。またビームテストも一緒に作業していただき、大変助かりました。

林野さん、吉田さん、東京大学の古賀さん、竹馬さん、細見さんには、EASIROCモジュールについての使い方や初期設定の仕方など、手取り足とり教えていただきました。また彼らに加えて、仲村さん、近藤さん、大阪市立大学の金さんには東海村での生活でお世話になりました。

潘さん、柳田さんには、謝辞の書き方を教えていただきました。おかげでこの文を書くことができいております。

研究室の皆様、家族、友人のおかげで充実した大学院生活を送ることができました。ありがとうございました。

関連図書

- [1] Phys. Rev. D 91, 072010 (2015)
- [2] K.Abe et al.[T2K Collaboration](2013),”T2K neutrino flux prediction”, Phys.Rev. D87 (2013) 012001
- [3] <http://j-parc.jp/ja/jparc.html>
- [4] K.Abe et al.[T2K Collaboration], ”Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with a Off-Axis Beam”, PRL 111 211803(2013)
- [5] <http://t2k-experiment.org/ja/t2k/>
- [6] <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>
- [7] 本多良太郎 (2013)EASIROC, テストボード仕様書
- [8] http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd0004j.pdf
- [9] 石島 直樹 (2014), ”ATLAS アップグレード用シリコン検出器試験用 システムの開発”
- [10] <http://www.jahep.org/hepnews/2007/Vol26No3-2007.10.11.12yokoyamaouzumi.pdf>
- [11] Kei Ieki(2014), ”Observation of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation in the T2K experiment”