

HK 実験における前置検出器 ND280++ に向けた
ファイバートラッカーの開発のためのファイバー溶
着試験とシミュレーションによる性能評価

東北大学 理学部物理学科 素粒子実験 (加速器)

B8SB2117 若林大貴

2022 年 4 月 1 日

目次

第1章	ニュートリノ	1
1.1	ニュートリノとは	1
1.2	ニュートリノ振動	1
第2章	HK 実験	4
2.1	HK 実験概要	4
2.2	ニュートリノビームの生成	5
2.2.1	Off axis 法	5
2.3	後置検出器:HK	5
2.4	T2K 実験:前置検出器	6
2.4.1	INGRID	7
2.4.2	ND280OA	8
2.5	ND280OA(SuperFGD) の課題	9
第3章	ファイバートラッカーの開発と評価	10
3.1	プラスチックシンチレーションファイバー	10
3.1.1	光ファイバー	10
3.1.2	シンチレーションファイバー	10
3.2	ファイバートラッカーの概要	11
3.2.1	ファイバートラッカーの構成	11
3.2.2	Detector Volume 中の水の割合	12
3.2.3	ファイバートラッカーに求められる性能	12
3.3	Geant4 シミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価	12
3.3.1	イベントディスプレイ	12
3.3.2	ファイバートラッカーの性能評価	17

3.4	ファイバートラッカー開発のための実験	19
3.4.1	超音波溶着機による溶着	19
3.4.2	温度調節式ハンダごてによる溶着	23
3.5	アクリル板同士の溶着	25
3.5.1	実験装置	25
3.5.2	結果	28
3.5.3	考察	28
第4章	今後の課題	30
4.1	Geant4 シミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価	30
4.2	ファイバートラッカーの開発	30
4.3	ファイバーの溶着による光量変化	30
第5章	結論	32
参考文献		38

概要

T2K 実験は大型水チェレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデを後置検出器として用いた長基線加速器ニュートリノ振動実験である。T2K 実験の前置検出器 ND280 として、プラスチックシンチレータキューブからなる SuperFGD(Super Fine Grained Detector) の運用が予定されているが、前置検出器に炭素標的を用いることで系統誤差が生じてしまう。そこで、ポスト T2K として計画されている HK(ハイパーカミオカンデ) の前置検出器 ND280++ として、その体積の大部分を水が占めるような前置検出器の開発が進められている。

その具体案の 1 つとして、Scintillation Fiber および MPPC(Multi Pixel Photon Counter) を用いたファイバートラッカーの開発を検討中である。水標的のファイバートラッカーを開発する上ではファイバー同士を接着するための接着剤などが系統誤差の要因になり得るため、最小限の接着剤や固定具でかつ水中でも剥がれにくいファイバーの固定方法が求められる。

本研究ではこのようなファイバートラッカーを開発すべく接着剤に頼らないファイバー溶着方法の探索と、放射線シミュレーションツールキットである Geant4 を用いたシミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価を行った。

第 1 章

ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

ニュートリノとは重力相互作用および弱い相互作用のみを行う電荷を持たないレプトンである。荷電レプトンである電子、ミューオン、タウオンとそれぞれ対になる電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 3 種類のフレーバーが存在する。ニュートリノの存在は、 β 崩壊におけるエネルギースペクトルの連続性を説明するためにヴォルフガング・パウリによって 1930 年に初めて示唆された。従来はニュートリノは質量を持たないと考えられていたが、次節で述べるニュートリノ振動の発見によって、現在では僅かながらも質量を持つことが分かっている。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とはニュートリノのフレーバーが時間発展とともに周期的に変化する現象である。1962 年に坂田昌一、牧二郎、中川昌美によってニュートリノ振動の理論が提唱、定式化され、1998 年に大気ニュートリノの観測および太陽ニュートリノの観測からその存在が実証された。

ニュートリノのフレーバー固有状態 $|\nu_l\rangle$ ($l = e, \mu, \tau$) と質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) は一致せず、 3×3 のユニタリ行列 U_{MNS} によって以下のように関係づけられる。

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1,2,3} U_{li} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

U_{MNS} は理論の提唱者の名前をとって牧・中川・坂田行列 (MNS 行列) と呼ばれる^{*1}以

^{*1} ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) とも呼ばれる

下のような行列である。

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

ここで $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ii} は質量の固有状態 ν_i, μ_i の混合角、 δ は複素位相を表す。

以下、簡単のため $|\nu_e\rangle$ と $|\nu_\mu\rangle$ の2つのフレーバー間のニュートリノ振動を考える。フレーバー固有状態は混合角 θ を用いて以下のように表せる。

$$|\nu_e\rangle = \cos \theta |\nu_1\rangle + \sin \theta |\nu_2\rangle \quad (1.3)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin \theta |\nu_1\rangle + \cos \theta |\nu_2\rangle \quad (1.4)$$

質量固有状態の時間発展はシュレディンガー方程式を解くことで

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t)} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.5)$$

と自然単位系で表わせる。ここで E_i は質量固有状態 ν_i のニュートリノのエネルギーであり、ニュートリノの質量 m_i は極めて小さいため

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.6)$$

と近似できる。 p と E はそれぞれ時刻 t で観測されるニュートリノの運動量とエネルギーである。フレーバー固有状態の時間発展は 1.4 式から、

$$\begin{aligned}
|\nu_e(t)\rangle &= \cos \theta |\nu_1(0)\rangle \exp(-iE_1 t) + \sin \theta |\nu_2(0)\rangle \exp(-iE_2 t) \\
|\nu_\mu(t)\rangle &= -\sin \theta |\nu_1(0)\rangle \exp(-iE_1 t) + \cos \theta |\nu_2(0)\rangle \exp(-iE_2 t)
\end{aligned} \quad (1.7)$$

と書ける。従って、時刻 $t = 0$ で生じた電子ニュートリノが時刻 t でミューニュートリノに遷移する確率 $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$ は遷移振幅の絶対値の二乗をとって、

$$\begin{aligned}
P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) &= |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 \\
&= |(-\sin\theta \langle \nu_1 | + \cos\theta \langle \nu_2 |) \cdot \{\cos\theta |\nu_1\rangle \exp(-iE_1t) + \sin\theta |\nu_2\rangle \exp(-iE_2t)\}|^2 \\
&= |-\sin\theta \cos\theta + \sin\theta \cos\theta \exp(-iE_2t)|^2 \\
&= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \{1 - \cos(E_1 - E_2)t\} \\
&= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{|m_1^2 - m_2^2|}{2E}\right)t \right\} \\
&= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\Delta m^2}{2E}\right)t \right\}
\end{aligned} \tag{1.8}$$

と求まる。ここで $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ である。仮にニュートリノが質量を持たないとすると Δm^2 であり、ニュートリノのフレーバーが変化する確率は時間によらず一定となり、ニュートリノ振動は観測されない。逆に、ニュートリノ振動の観測はニュートリノに質量があることを示している。

第2章

HK 実験

2.1 HK 実験概要

HK(Hyper Kamiokande) 実験はポスト T2K(Tokai to Kamioka) 実験として、2027 年に開始が計画されている素粒子実験である。T2K 実験は茨城県東海村にある J-PARC 加速器から 295km 離れた SK(Super Kamiokande) にニュートリノビームを照射し、ニュートリノ振動の研究を目的とした実験である。(図 2.1) HK 実験ではスーパーカミオカンデからハイパーカミオカンデへの検出器の大型化と、J-PARC 加速器によるニュートリノビームパワーの増強などが見込まれている。



図 2.1 T2K 実験の概要 [9]

2.2 ニュートリノビームの生成

J-PARC(Japan Proton Accelerator Complex) の陽子加速器施設は LINear ACcelerator (LINAC), Rapid Cycling Synchrotron (RCS), Main Ring (MR) の 3 台の加速器から構成されている。LINAC で陽子が生成され 400MeV まで加速された後、RCS で 3GeV、MR で 30GeV まで加速される。

この陽子ビームはグラファイト標的に入射され、ハドロン反応によって主に π 中間子を生成する。このようにして生成された π^+ 中間子は電磁ホーンで収束され、式 2.1 のようにミューオンとミューニュートリノに崩壊することでミューニュートリノを生成している。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$

電磁ホーンに流す電流の向きを反転させることで π^- 中間子を収束させると式 2.2 に従って反ニュートリノビームを得ることができる。

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

2.2.1 Off axis 法

T2K 実験では、検出器をあえてビーム軸からずらした位置に配置する Off axis 法を採用している。ニュートリノ振動の確率は 1.8 式で見たように、ニュートリノのエネルギーと飛行距離^{*1}に依存する。J-PARK からスーパーカミオカンデまでの距離 295km に対して振動確率が最大となるニュートリノエネルギーは 0.5 ~ 0.7GeV である。ビーム軸をスーパーカミオカンデから 2.5° ずらすことにより、ニュートリノのエネルギースペクトルに 0.5 ~ 0.7GeV の間に鋭いピークを持たせることができる。

2.3 後置検出器:HK

ハイパーカミオカンデは現在運用中の大型水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデの次世代の検出器である。スーパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡の地下 1000m に位置しており、直径 39.3m 高さ 41.4m の円筒形のステンレス製水槽とその壁面に取り付け

*1 ニュートリノの速さはほぼ光速 c としてよく、自然単位系での表記なので c が省略されているが、振動確率は $t = ct$ に依存している。

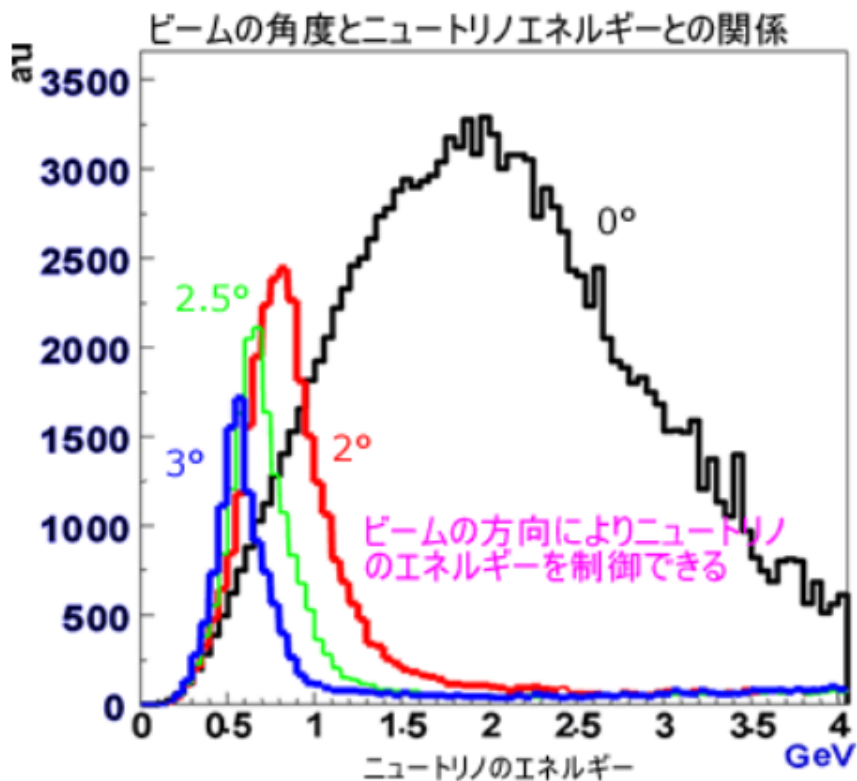


図 2.2 ビーム角度とニュートリノエネルギースペクトルの関係

られた約 11,000 本の光電子増倍管から構成されている。図 2.3 はスーパーカミオカンデの水槽内の写真であり、水槽の壁面や床は一面光電子増倍管で埋め尽くされている。この光電子増倍管により、ニュートリノ反応で生成される荷電粒子のチェレンコフ光を検出し、ニュートリノを観測している。

ハイパーカミオカンデはスーパーカミオカンデの 10 倍の有効体積を持つ検出器になることが予定されており、スーパーカミオカンデと同様、水中で荷電粒子が放出するチェレンコフ光を捉えることで粒子の識別や、エネルギーや運動方向の検出を行う。[3]

2.4 T2K 実験:前置検出器

よりよい精度でニュートリノ振動の測定を行うためにはハイパーカミオカンデでの検出に加えて、前置検出器でニュートリノ振動の確率が極めて小さい生成直後のニュートリノビームをモニターすることが必要である。T2K 実験では INGRID と ND280 という 2 つ

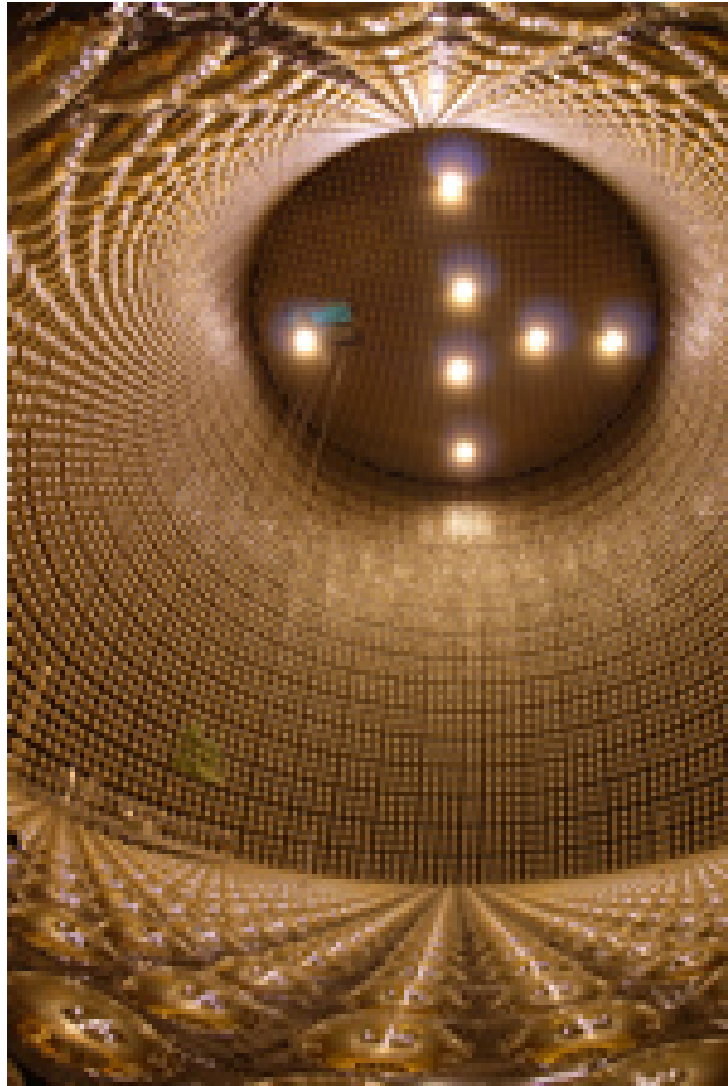


図 2.3 スーパーカミオカンデの水槽内の写真

の前置検出器を使用している。

2.4.1 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) は鉄 9 層、シンチレータ 11 層でできたサンドイッチ構造のモジュール 14 個からなる前置検出器である。モジュールは図 2.4 のように鉛直方向と水平方向に 7 モジュールずつ十字型になるように設置されている。INGRID はビーム軸上に設置されており、ニュートリノビームのプロファイルをモニターするため

に用いられている。

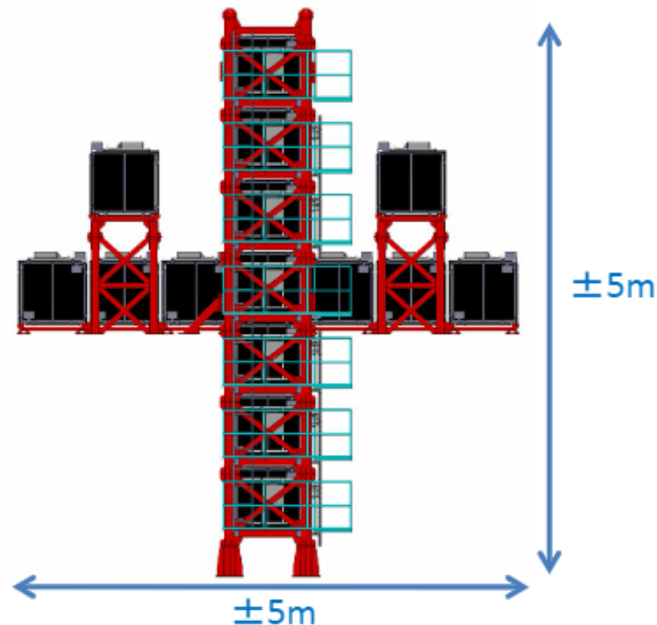


図 2.4 INGRID の構造 [8]

2.4.2 ND280A

ND280 はニュートリノビームのフラックス、エネルギー、原子核との反応断面積を測定し、後置検出器であるスーパーカミオカンデにおけるニュートリノ反応のイベントレートを予測する。

2022 年からは新型シンチレーション検出器 SuperFGD(Super Fine Grained Detector) の運用が予定されている。^{*2} SuperFGD は 1cm^3 のシンチレータキューブ約 200 万個と波長変換ファイバーから成るシンチレーション検出器である。約 200 万個のシンチレータキューブの各面 3 方向の中央に空いた穴には約 6 万本の波長変換ファイバーが通されており、ファイバーの端に設置された MPPC が信号を読み出す。SuperFGD の利点は低エネルギーの粒子に対する感度が高いことと、3 方向の読み出しを行うことにより大角度

^{*2} 前置検出器としてチェレンコフ検出器は使用されない。これは加速器からの距離が近いとビーム強度が大きすぎて多重イベントが発生し上手く機能しないためである。[2]

で散乱される粒子の感度が高いことである。[5]

2.5 ND280OA(SuperFGD) の課題

SuperFGD に使われるシンチレータキューブの組成は主に炭素であるため、SuperFGD で検出されるニュートリノ反応は炭素原子との反応である。しかし、後置検出器である SK は水とニュートリノの反応を検知するため、SuperFGD で計測したイベントレートには炭素原子核とニュートリノの反応に由来する系統誤差が含まれている。従って最低でも炭素原子核との反応による系統誤差の分だけ反応断面積の精度が悪くなってしまう。また、各シンチレータキューブは各辺 1cm の立方体であるため、位置分解能も 1cm ほどであり、陽子などの飛程の短い重粒子の検出精度は良くない。

この課題を解決するためには Detector Volume の大部分が水で占められた前置検出器が必要であり、その候補の 1 つとしてシンチレーションファイバーを用いたファイバートラッカーの開発が進められている。

本研究では計算機シミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価と最小限の材料でファイバーを固定するためのファイバーの溶着試験を行った。

第3章

ファイバートラッカーの開発と評価

3.1 プラスチックシンチレーションファイバー

3.1.1 光ファイバー

図 3.1 は光ファイバーの多重構造を表わしたイラストである。光ファイバーはコアと呼ばれる芯とそれを覆う外側のクラッドからなる。コアの屈折率はクラッドの屈折率よりも大きいため、コアに入った光がコアとクラッド境界における全反射を繰り返すことによって光信号の伝達が可能となる。

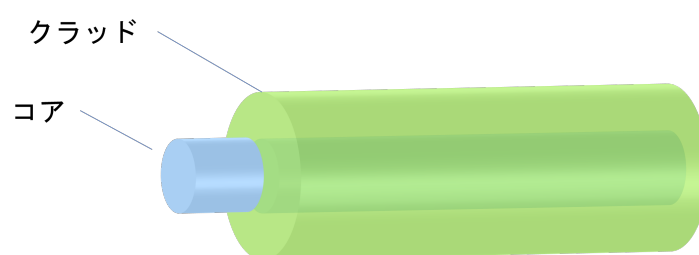


図 3.1 光ファイバーの構造

3.1.2 シンチレーションファイバー

本研究で使用するプラスチックシンチレーションファイバーはコアに蛍光剤入りのポリスチレン樹脂を使用しており、荷電粒子がファイバーを通過するとファイバーのコア自身がシンチレーション光を発し、ファイバー構造によってその信号が伝播される。クラッド

にはアクリルが用いられている。[6]

3.2 ファイバートラッカーの概要

3.2.1 ファイバートラッカーの構成

ファイバートラッカーは次の図 3.2 を 1 単位とした周期構造を持つようなものを考える。

Y 方向を向いたファイバーからなる平面 (緑色) と X 方向を向いたファイバーからなる平面 (青色) を重ね、Z 方向に 30mm の等間隔に並べる。その平面間には水平方向にファイバーが 30mm の間隔で並ぶ (黄色)。

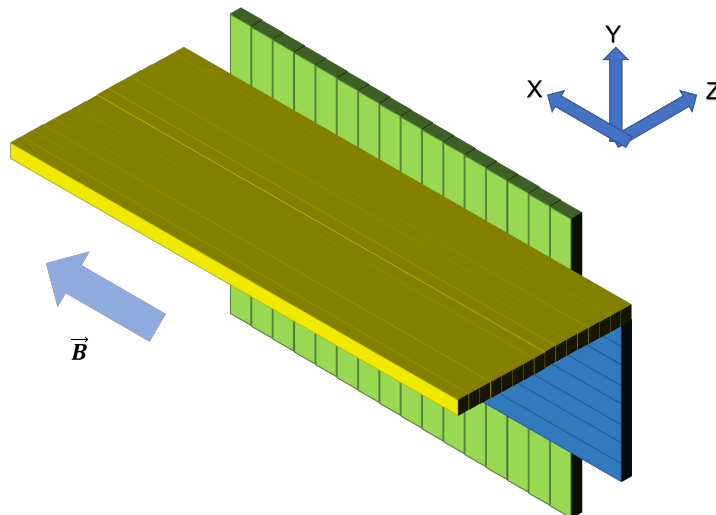


図 3.2 ファイバートラッカーの構成

Y 方向に並んだファイバーで粒子の X 座標を、X 軸鉛直方向に並んだファイバーで y 座標を検知することができる。X 方向に印加された磁場と垂直な方向に飛ぶ荷電粒子の軌跡はローレンツ力によって曲がり、X 軸水平方向のファイバーでさらに軌跡を検知する。磁場 B に垂直に飛ぶ質量 m , 電荷 q の荷電粒子が従う古典的な運動方程式は

$$mv^2/r = qvB \quad (3.1)$$

であり、半径 r の円運動を行う。電荷の正負によってローレンツ力の向きが変わるので、粒子の曲がる向きから荷電粒子の電荷の正負が決定できる。さらに曲率半径が粒子の質量に依存するので、軌跡の曲率から粒子の質量も決定できる。ファイバーの各辺は 1mm で

あり、SuperFGD に比べて 10 倍ほどの位置分解能が期待できる。

3.2.2 Detector Volume 中の水の割合

簡単のためファイバーの組成を CH, 水とファイバーの密度をどちらも $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ と仮定する。200cm × 200cm × 50cm の Detector Volume に存在する組成全体に対する H_2O の割合は 90.6% であり、その有効体積のほとんどを水が占めている検出器となる。これにより、炭素原子核とニュートリノとの反応に由来する系統誤差を減らすことができる。

3.2.3 ファイバートラッカーに求められる性能

HK 実験における前置検出器の役割はニュートリノ反応の単位体積当たりのイベントレートの計測および、反応点の決定である。また、このときにバックグラウンドとなるのは γ の電子陽電子対生成反応であり、検出器は ν_e の CCQE と γ の対生成を判別できる必要がある。

3.3 Geant4 シミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価

放射線のシミュレーションツールキットである Geant4 を用いたシミュレーションによって、各種粒子をファイバートラッカーで検出した際に期待されるイベントの、XZ 平面と YZ 平面のイベントディスプレイを得た。例えば図 3.3 は Z 方向に入射したミューオンのイベントディスプレイである。左半分が YZ 平面のディスプレイ、右半分が XZ 平面のディスプレイである。上半分はイベントディスプレイ (信号の見え方を描いた物) であり、下半分はそれに加えて粒子の種類も参考として描画されている。

実際の稼働ではイベントディスプレイ (図の上部分のみ) から粒子の識別を行わなければならない。以下では基本的な素粒子について、そのイベントの特徴を見る。

3.3.1 イベントディスプレイ

図 3.3 はミューオンを Z 方向に入射したイベントディスプレイである。ミューオンは直線的なトラックが特徴的である。これはミューオンの質量が大きく大角度で散乱されにくいからである。

図 3.4 は電子を Z 方向に入射したイベントディスプレイである。電子はその軽い質量の

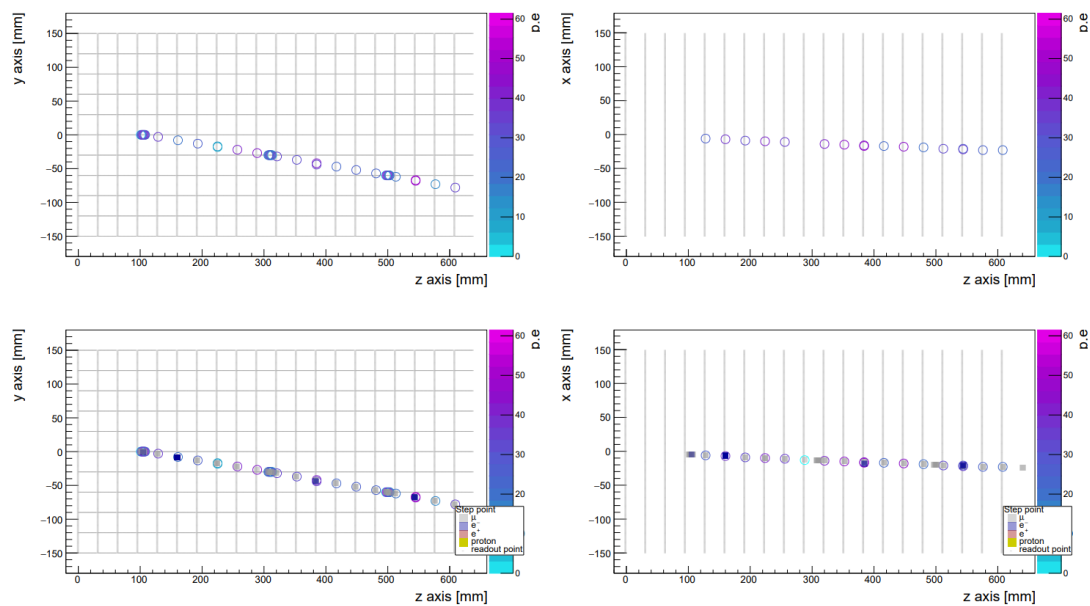


図 3.3 μ のイベントディスプレイ

ため散乱されやすく、ミューオンよりも折れ線的なトラックが特徴的である。

図 3.5 は光子を Z 方向に入射したイベントディスプレイである。 γ のイベントは電子陽電子対生成による 2 本に枝分かれしたトラックが特徴的である。また反応点がファイバー付近の場合には、生成された電子陽電子の両方が同じファイバーにヒットするため、上流の信号が下流よりも大きくなる特徴がある。

図 3.6 および図 3.7 は ν_e や ν_μ を Z 方向に入射したイベントディスプレイである。 ν_e や ν_μ のニュートリノ反応 (CCQE) では γ と同様に 2 本に枝分かれしたトラックが特徴的である。 γ との違いは、CCQE の方が一般的に大角度の散乱であること、陽子の質量が大きいため検出器に落とすエネルギーが電子やミューオンに比べて大きくなり枝分かれしたトラックの片方の信号がより大きくなること、などが挙げられる。 ν_e と ν_μ の違いは CCQE で生じるレプトンが e^- か μ かの違いであり、その特徴は上記の e^- と μ の見え方の違いに帰着される。

これらの特徴を踏まえてファイバートラッカーの性能を評価した。

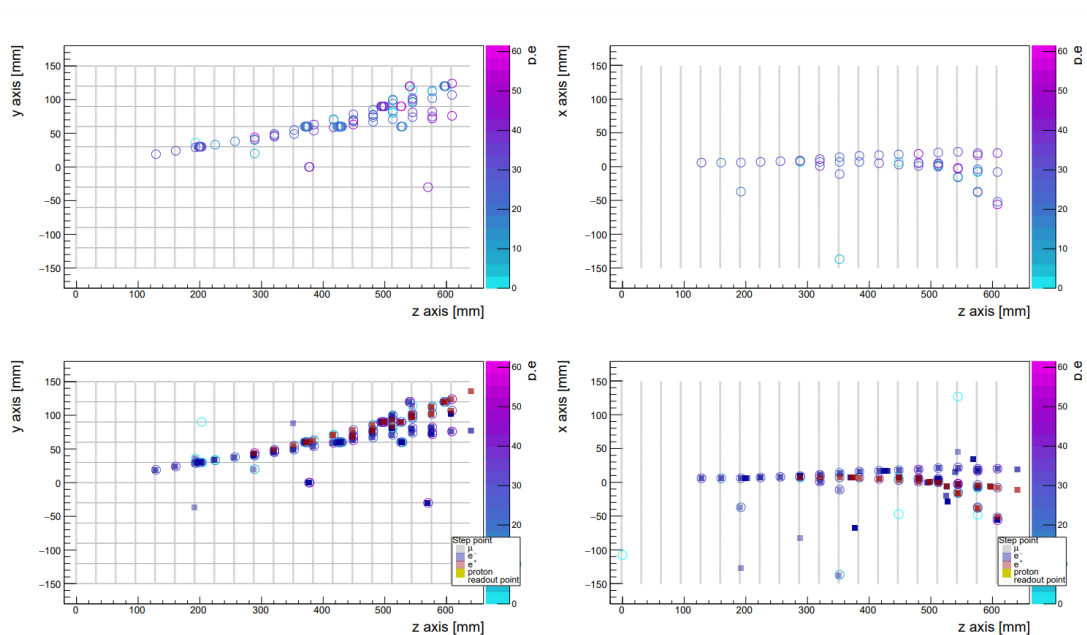


図 3.4 e^- のイベントディスプレイ

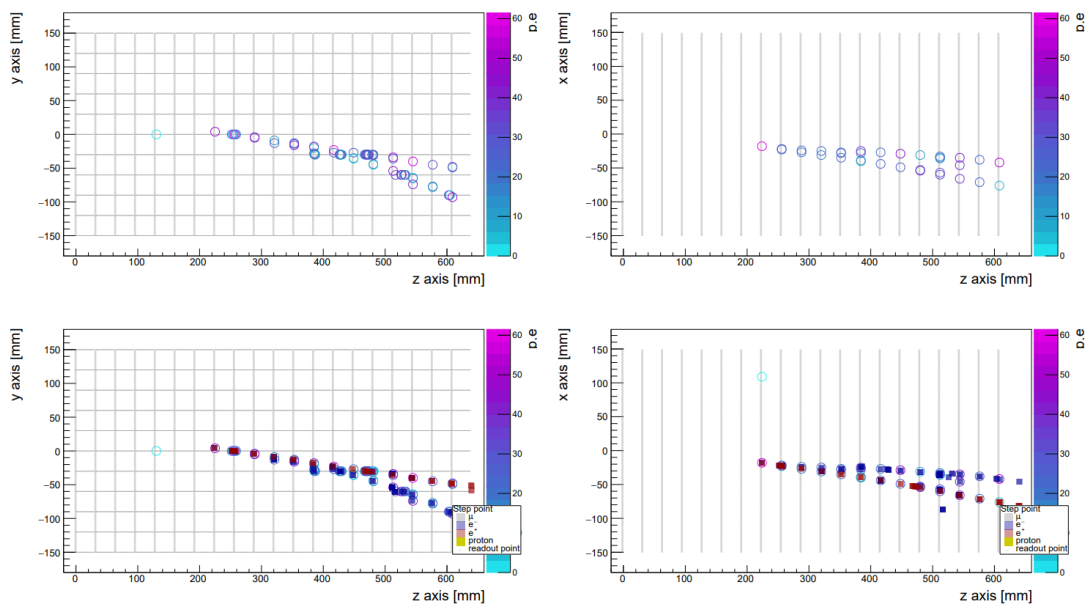


図 3.5 γ のイベントディスプレイ

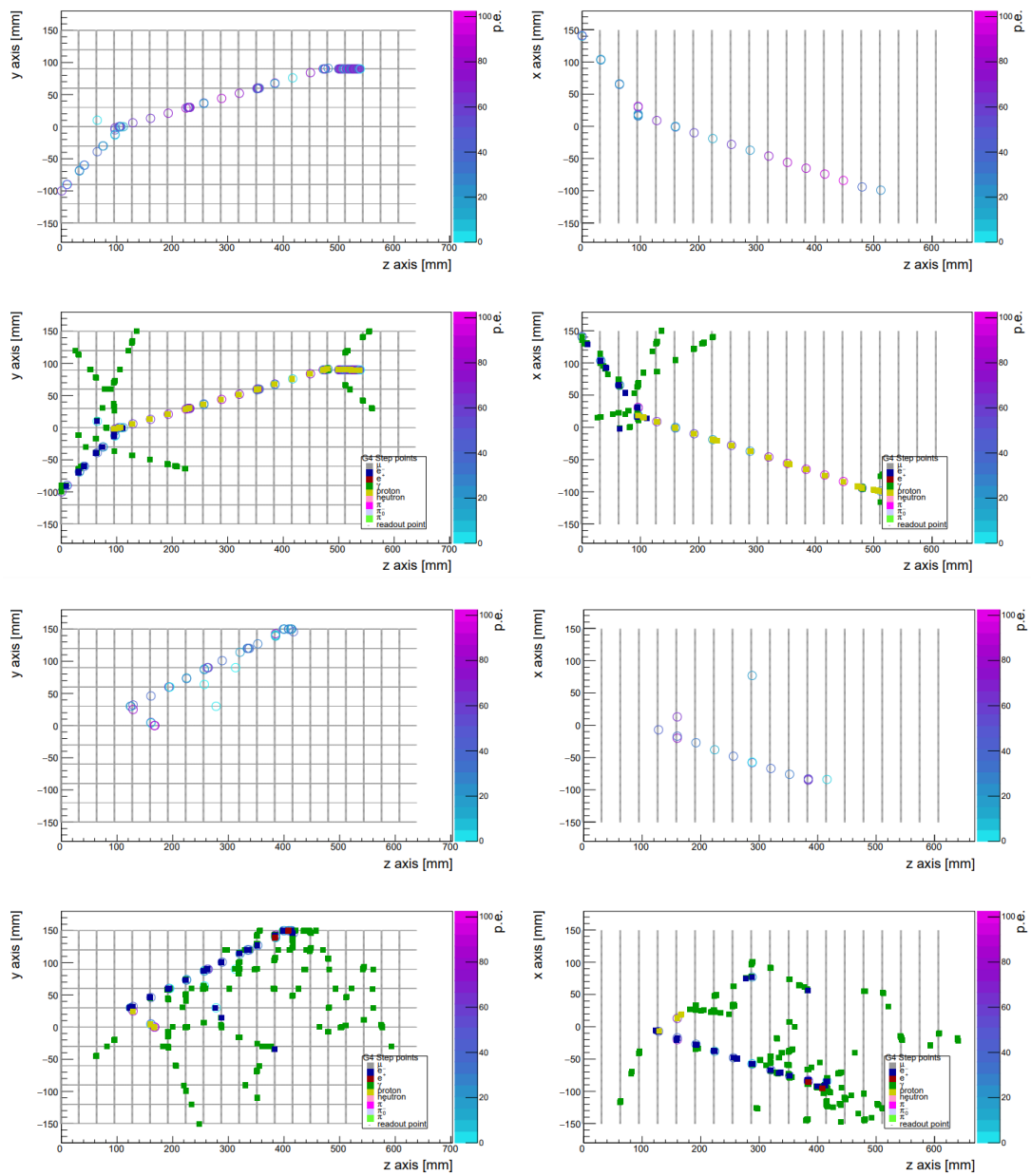


図 3.6 ν_e のイベントディスプレイ

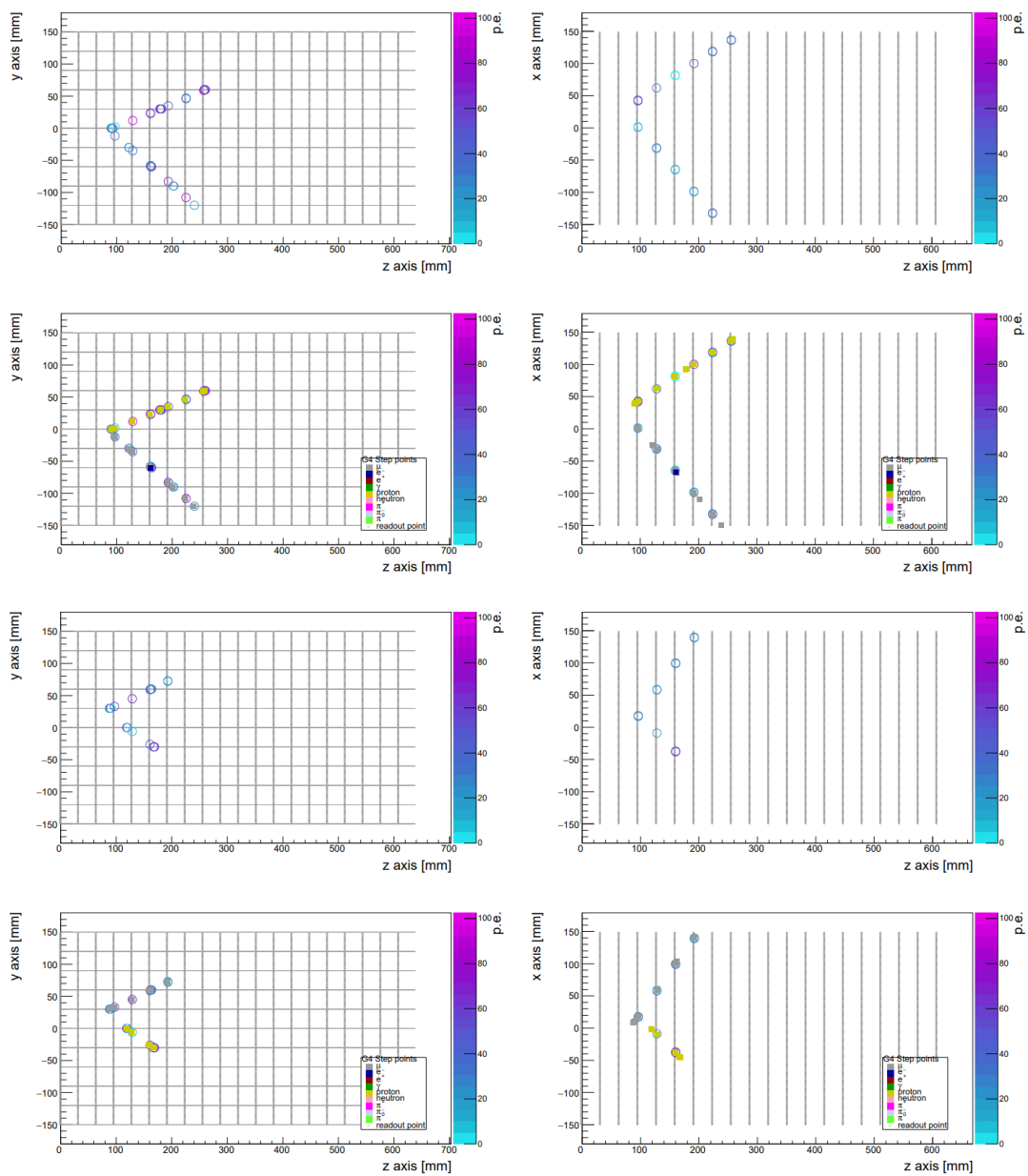


図 3.7 ν_μ のイベントディスプレイ

3.3.2 ファイバートラッカーの性能評価

このファイバートラッカーに求められる性能は、主にニュートリノ反応の反応点 (vertex) を決定できること、および反応に携わった素粒子の種類を識別できることである。

本研究ではニュートリノ反応点を決定できそうか、BG たり得る γ と電子ニュートリノを判別できそうか、また電子ニュートリノとミューニュートリノを判別できそうかを 100 枚のイベントディスプレイについて主観的に評価した。

反応点の決定

例えば図 3.6 のイベントでは YZ 平面と XZ 平面の両方で枝分かれした 2 本のトラックがはっきり見えている。このようなイベントではそれぞれのトラックを直線的に延長した交点の座標を求めることによってニュートリノイベントの反応点を決定することができる。

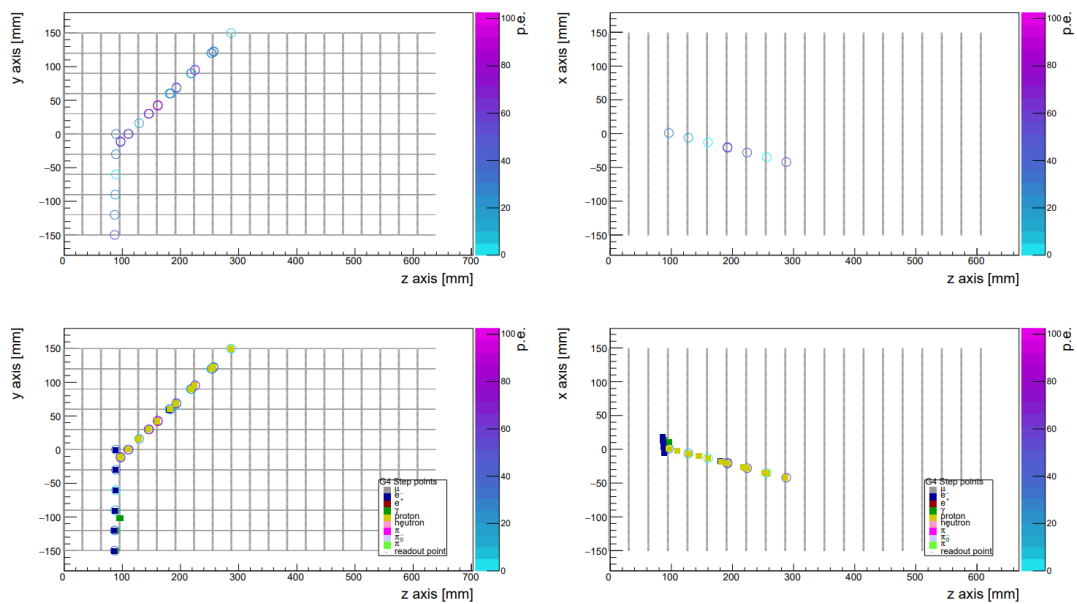


図 3.8 ν_e のイベントディスプレイ

一方、図 3.8 のイベントでは YZ 平面では延長した直線同士の交点を結べそうだが、XZ 平面では直線が 1 本しか引けそうにないため、交点の X 座標を決定することができない。

このように、反応点が決定できそうか否かの主観的評価を 100 枚の電子ニュートリノの CCQE イベントディスプレイに対して行った。

その結果、XZ 平と YZ 平面の両方で枝分かれした 2 本のトラックの交点が決定できそうなイベントディスプレイは 100 枚中 24 枚、XZ 平面ではトラックの交点を決定できそうだが YZ 平面では決定できなさそうなイベントディスプレイ 37 枚 XZ 平面でも YZ 平面でも交点を決定できなさそうなイベントディスプレイは 39 枚だった。

粒子識別

同じ ν_e のイベントディスプレイを 100 枚に対して 3.3.1 節に述べたトラックの特徴を元に、ニュートリノ反応と判別できそうなもの、さらにニュートリノの種類が ν_e であると判別できそうなものの割合を調べた。

その結果、電子ニュートリノの CCQE であると識別できそうなイベントディスプレイは 100 枚中 15 枚、何らかのニュートリノの CCQE であると識別できそうなイベントディスプレイは 49 枚、ニュートリノの反応であると識別できなさそうなイベントディスプレイは 36 枚だった。

考察

ニュートリノの CCQE は γ に比べて大角度の散乱であるため、ニュートリノ反応の観測には Z 軸に平行な平面上のファイバーが重要な役割を果たす。しかし、現在のジオメトリでは Y 軸に垂直な面にファイバーがあるものの、X 軸に垂直なファイバー面が存在しない。従って、現在のジオメトリでは X 方向に散乱した粒子を捕捉できない。実際、先述の結果では反応点を決定できなかったイベント 76 枚の内の約半分が YZ 平面で交点を決定できなかったことに起因している。YZ 平面にファイバーを持つような新たなジオメトリの考案が今後の課題となる。

また、電子ニュートリノを識別する上では生成された電子による電磁シャワーがニュートリノのフレーバーを識別する上で重要な役割を果たす。しかし、本研究では電子ニュートリノ反応で生成された電子による電磁シャワーがあまり見られなかった。これはシミュレーションで仮定した検出器のサイズが 30cm×30cm×64cm であり実際に想定される検出器のサイズ 2m×2m×50cm よりも小さいため、大角度に散乱した電子の飛距離が足りなかったからであると考えられる。

また、X 方向にかかった磁場から受けるローレンツ力による軌跡の曲がり具合も粒子を識別するための手がかりとなるはずだったが、磁場が弱いためか、ニュートリノ反応においてトラックの湾曲はほぼ直線的であった。今後の課題として印加磁場の強化も検討する

必要がある。

3.4 ファイバートラッカー開発のための実験

上で述べたようなファイバートラッカーを開発するにあたって最初の課題は、検出器内の水の比率をできるだけ下げないように、可能な限り少ない材料でファイバーを平面内に固定・接着することである。

本研究ではファイバーを固定する手法として、ファイバーのクラッド表面だけを溶かし、シートに溶着させるための接着剤として利用できないか検証した。

溶着方法として、超音波振動で溶着させる方法とハンダごてで溶着させる方法を検証した。

3.4.1 超音波溶着機による溶着

実験装置とセットアップ

使用したのは「小型超音波溶着機 AUH30CW (スズキ)」(図 3.9) である。本体のつまみで設定した発振時間に応じて取り付けられたホーンの先端が発振し、その振動によってホーン先端部のターゲットを加熱することができる。



図 3.9 小型超音波溶着機 AUH30CW(本体)

図 3.10 は本体に取り付けたホーンの写真である。先端が 7.5cm 四方の正方形になって

いる物を使用した。



図 3.10 小型超音波溶着機 AUH30CW(ホーン)

溶着試験では用意した PET シート、PE(ポリエチレン) シート、発泡 PS(ポリスチレン) シート、およびアルミ蒸着 PET シートの上にファイバーを置き、その上からホーンでファイバーごとシートを抑えて発振させた。図 3.11 は実験装置の構成を表わしたイラストである。発振時間は 1 目盛りの半分ほどに設定した。シートの素材ごとに溶着試験の

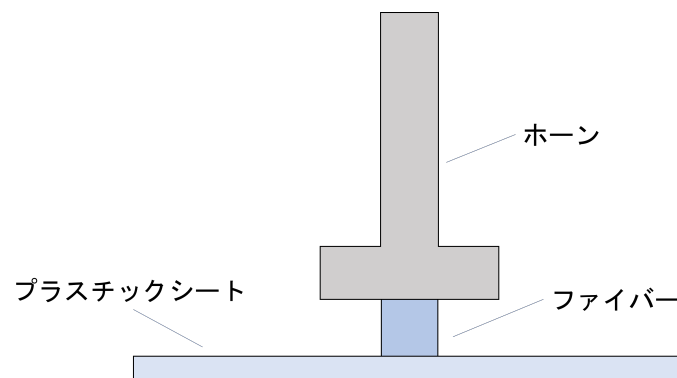


図 3.11 超音波溶着機を用いた実験装置の構成

結果を ○, △, × の 3 段階で評価した。

結果

超音波溶着機による溶着試験の結果を以下の表 3.1 にまとめる。

表 3.1 超音波溶着機による溶着試験の結果

プラスチック素材	PET	PET(アルミ蒸着)	発泡 PS	PE
評価	×	△	×	×

PET シートでは、ファイバーとシートが溶着される前にファイバーが変形してしまった。アルミ蒸着 PET シートでは、ファイバーとシートは溶着されたもののファイバーが変形してしまった。発泡 PS シートでは、ファイバーよりもシートの方が先に溶けて溶着されたが、すぐに剥がれてしまった。PE シートも溶着されたもののすぐに剥がれてしまった。図 3.12 から図 3.15 は溶着試験前後のファイバーの様子を比較したものである。溶着前はファイバー側面から赤色レーザー光がほとんど漏れ出していないのに対して、溶着後は溶着した箇所の側面からレーザー光が漏れ出しているのが分かる。

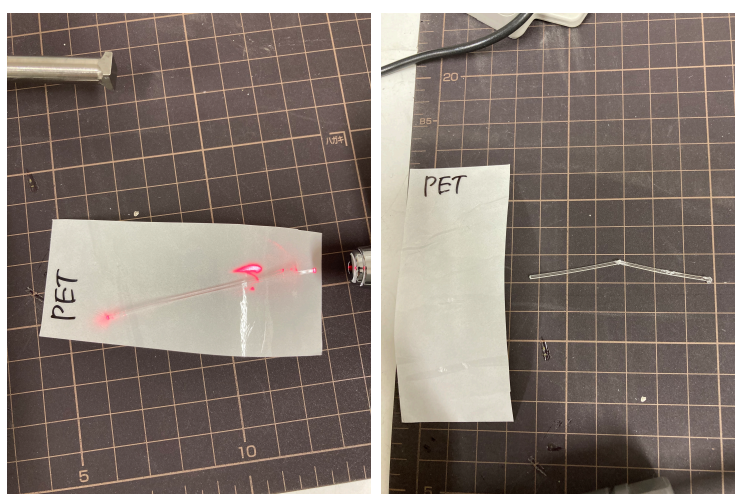


図 3.12 PET シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後

考察

スズキマリンの真木さんからは「超音波よりも熱の方がダメージは少ないと思う。」「溶着させるプラスチックの融点が離れていると一方は溶けても他方は溶けていないため、表面的にしかくっついておらず剥がれやすい。融点の近いプラスチック素材ならば両方が溶

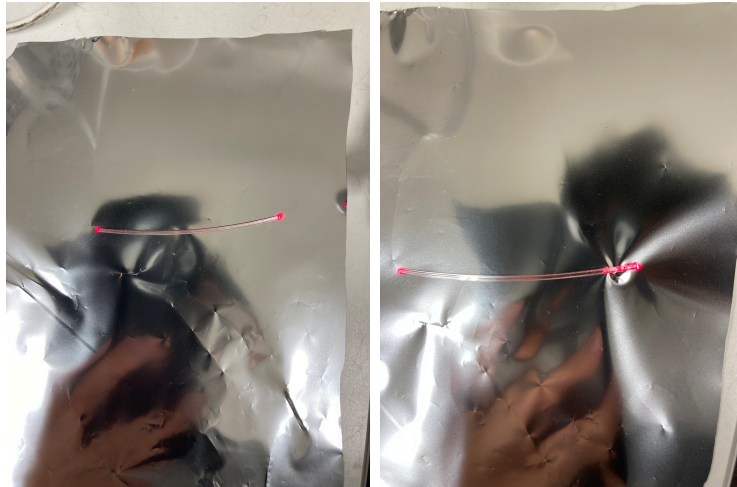


図 3.13 AIPET シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後

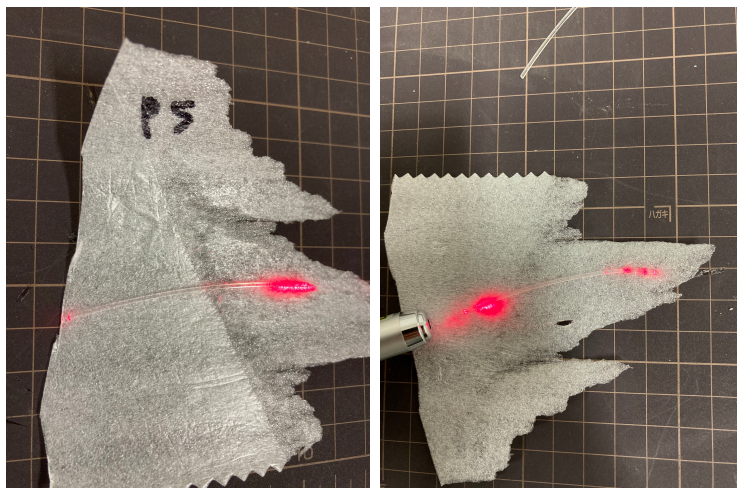


図 3.14 PS シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後

けて再結晶するため、接着は強固になる」とアドバイスをいただいた。

これをふまえて、次にハンダごてでファイバー同士を溶着させる方法を試験した。ハンダごてによる熱溶着でかつファイバーのクラッド同士であれば融点と同じであるため、よりよい溶着ができるのではないかと考えた。

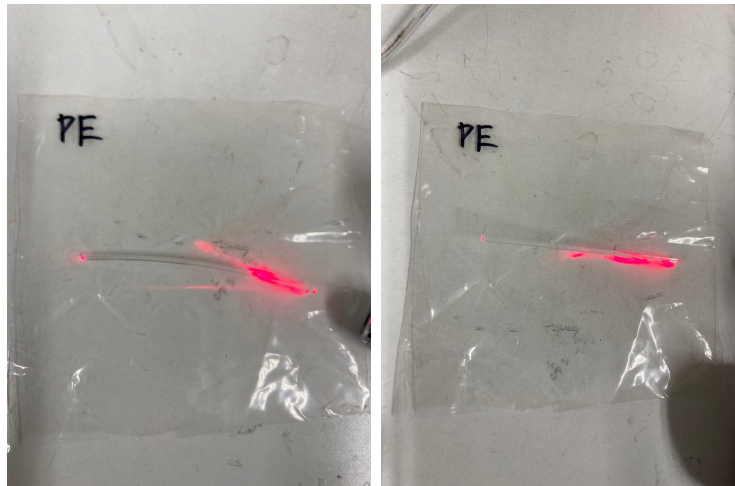


図 3.15 PE シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後

3.4.2 温度調節式ハンダごてによる溶着

実験装置とセットアップ

使用したハンダごては「HS-51 温調式ハンダごて (ホーザン)」である。図 3.16 は HS-51 温調式ハンダごての実物の写真である。このハンダごての設定温度範囲は 50~450°C と、一般的なハンダごてと比べてより低温にも広がっている。

ビットと呼ばれるハンダごて先端部分は付け替え可能であり、HS-51B01、HS-51C01、HS-51K02 (以下では B01、C01、K02 と略記) の 3 種類を用意した。図 3.17 にこれらのビットの寸法を示す。

これら 3 種のビットそれぞれで溶着試験を行った。2 本のファイバーではんだごてのビットを挟み、設定温度を 100° から 120° まで 5° 刻みで変化させてファイバー同士の溶着試験を行った。^{*1}

結果

それぞれのビットによる溶着試験の結果を次の表 3.2 に示す。

いずれも 115°C~120°C でクラッドが溶けていたが、ファイバー同士が溶着するには至らなかった。

図 3.18 はそれぞれのビットでの溶着後のファイバーの様子である。ハンダごてを当て

^{*1} アクリルの融点は 90~105° である。[7]



図 3.16 HS-51 温調式ハンダごて

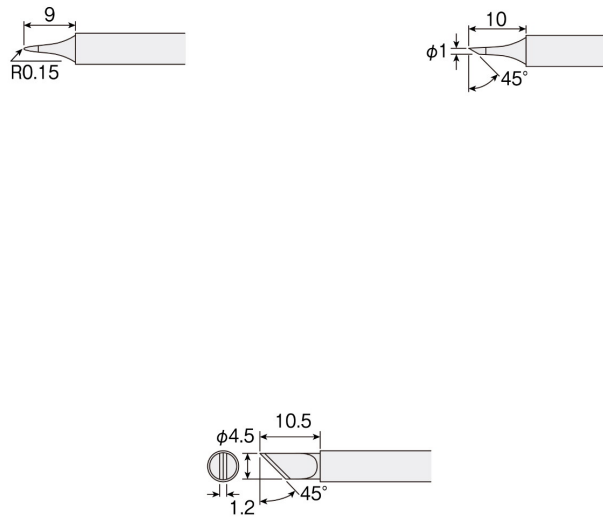


図 3.17 温調式ハンダごてビット:左上が B01, 右上が C01, 下が K02

表 3.2 ハンダごてによる溶着試験の結果

温度 [°C]	B01	C01	K02
100	×	×	×
105	×	×	×
110	×	×	×
115	×	×	×
120	×	×	×

て溶けた箇所から赤色レーザー光が漏れ出しているのがわかる。

考察

ハンダごてによる溶着が上手くいかなかった原因として、アクリルの固まる速さが速く、ハンダごての熱で溶けたファイバー表面のクラッドが同士が接する前に瞬時に固まってしまった可能性が考えられる。また、溶けたアクリルがハンダごてのビットに押しつけられたため、ファイバーのクラッド同士が十分に密着できなかった可能性も考えられる。

3.5 アクリル板同士の溶着

先述の問題点を踏まえると、ファイバー同士が接したまま接着面全体を温められるような方法が理想的である。具体的な方法の1つとして、恒温槽でファイバー全体を温めて溶着させる方法を検証中である。本研究ではその事前実験として、まずはアクリルプレートで恒温槽で加熱しアクリル同士が溶着するために必要な温度を調査した。

本来であれば、最低でも恒温槽の温度と加熱時間の2つのパラメータ空間を探索する必要があるが、今回は加熱時間を2時間とした場合の溶着可能な温度についてのみ調査した。

3.5.1 実験装置

210mm × 297mm × 1mm のアクリル板からプラスチックカッターで1cm × 5cm の長方形に切り出したものをアクリルプレートとして使用した。恒温槽内にアクリルプレートを2枚重ねて置き、そのアクリルプレートの上にブロックを置いて恒温槽で加熱した。(図 3.20) 使用した恒温槽は「恒温恒湿器 IW242(ヤマト科学)」であり、備え付けのモニターで恒温槽内部の温度を確認できる。(図 3.21) 実験に用いたブロックは図 3.21 の右の

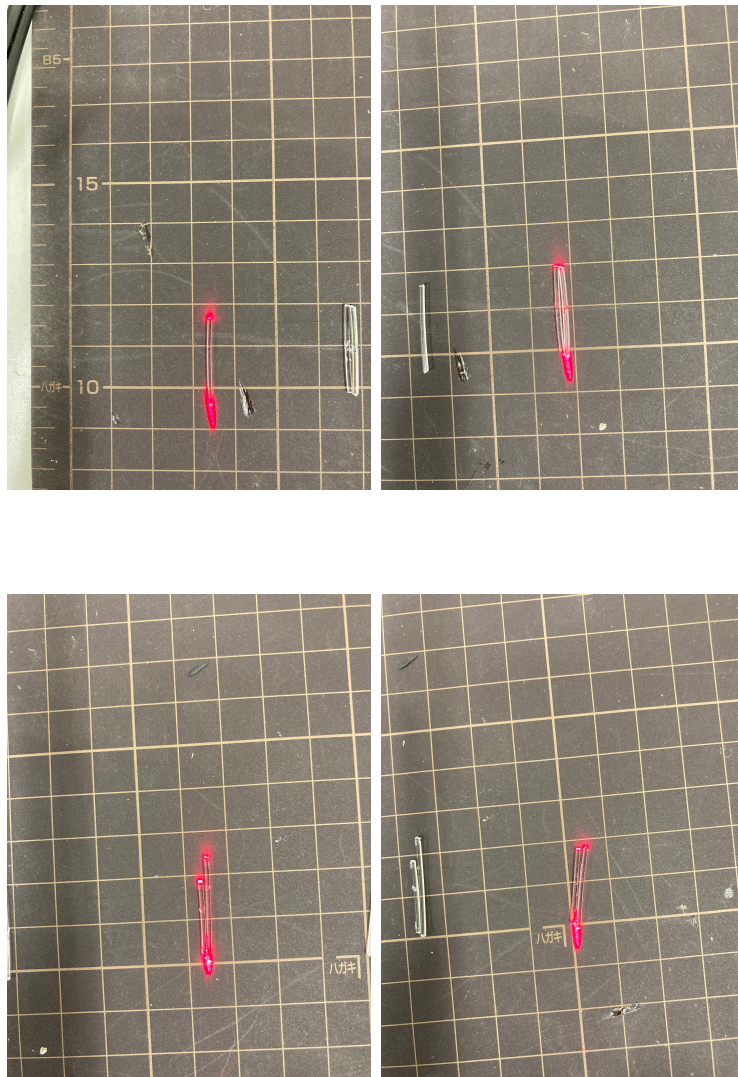


図 3.18 溶着後のファイバーの様子:左上は溶着前のファイバーサンプル、右上は B01 での溶着後、左下は C01 での溶着後、右下は K02 での溶着後



図 3.19 1cm×5cm のアクリルプレート

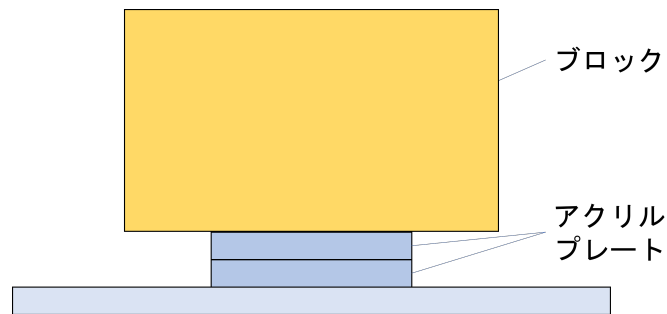


図 3.20 アクリルプレート同士の溶着

写真恒温槽内においてあるブロックである。



図 3.21 恒温恒湿器 IW242

この恒温槽は時間ごとに槽内温度を変えられるプログラム機能を備えており、以下のようプログラムで運転した。

1. 10 分かけて室温 T_R から最高温度 T_M まで上昇させる
2. 最高温 T_M で 2 時間温める
3. 30 分かけて T_M から 20°C まで冷却する
4. 20°C で 1 時間冷却する

$T_M = 100^\circ\text{C}, 110^\circ\text{C}, 120^\circ\text{C}$ の 3 通りで実験を行った。このプログラムの温度-時間グ

ラフを次の図 3.22 に示す。

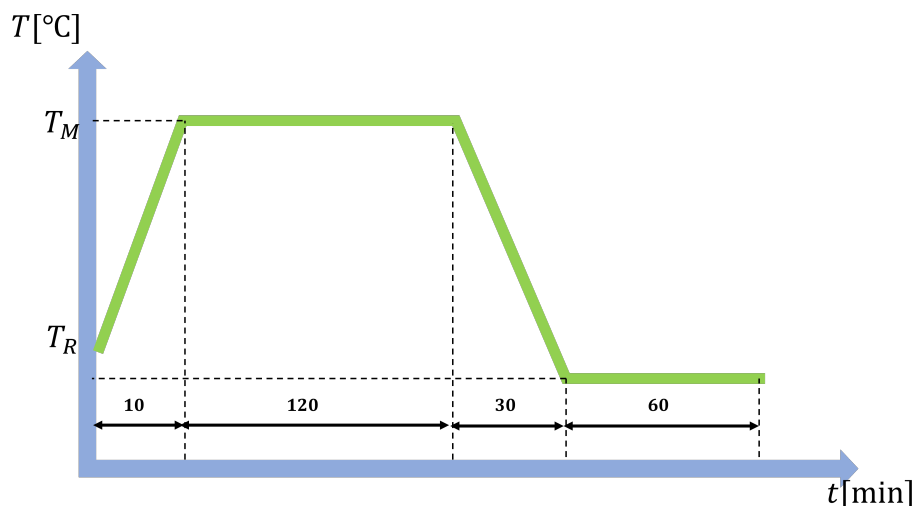


図 3.22 恒温槽のプログラム機能で設定した温度変化のグラフ

これらについても、溶着試験の結果を ○, △, × の 3 段階で評価した。

3.5.2 結果

結果を次の表 3.3 に示す いずれのサンプルについても溶着後に剥がしてみた。100°C

表 3.3 恒温槽による溶着試験の結果

温度 T_M [°C]	評価
100	×
110	○
120	○

のサンプルについてはそもそも溶着されていなかったが、110°C と 120°C のサンプルについてはしっかりと溶着されていた。110°C のサンプルに手でずり応力をかけると剥がれてしまったが、120°C のサンプルでは同程度の力をかけても剥がれなかった。

3.5.3 考察

本溶着試験の結果から、加熱時間 2 時間でアクリル同士を溶着させるには 110°C 以上必要であることがわかった。しかし、このアクリルプレートを用いた溶着試験によってパ

ラメータ空間に課される制限は、アクリル同士が溶着するのに必要な時間と温度による制限である。しかし、ファイバートラッカーを開発する上では溶着したファイバーが変形せずにファイバーとしての機能を果たすための制限、つまり、ファイバーの耐久性による制限も考慮に入れる必要がある。

また、今回は最高温に達するまでの昇温にかかる時間と、最高温から 20°C に達するまでの降温にかかる時間をそれぞれ 10 分と 30 分で固定して実験したが、これら昇温と降温に必要な時間もパラメータとして考慮に入れる必要がある。

また、今回の溶着実験ではおもりとして用いたブロックの熱容量を無視していた。仮にブロックの熱容量が大きければ、昇温時や最高温で加熱している時にブロックが熱を吸収しアクリルプレートが温まりきらなかった可能性や、降温時にブロックが熱を放出し、アクリルプレートが冷めきらなかった可能性がある。つまりモニターに表示される温度とアクリルの温度に差があった可能性がある。この温度差については昇温時間と降温時間を長くすることで小さくなることが予想される。おもりの熱容量も考慮に入れた昇温時間と降温時間の検討や、仮に熱容量が大きい場合熱容量の小さなおもりと交換することが今後必要である。

第 4 章

今後の課題

4.1 Geant4 シミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価

3.3.2 節で述べたように、現在のジオメトリでは YZ 平面に平行なファイバー面が存在せず、X 方向に散乱した荷電粒子を検出できない。大角度の散乱を検出するためには YZ 平面にファイバーを持つような新たなジオメトリを模索する必要がある。また、3.3.2 節で述べたように、ニュートリノ反応においては荷電粒子のトラックは磁場によってほとんど曲がらなかった。粒子の識別をさらに精度良く行うためには磁場の大きさを検討し直す必要があると考える。

4.2 ファイバートラッカーの開発

3.5.3 節で述べたように、おもりとして使用しているブロックの熱吸収により、恒温槽のモニターに表示される温度とアクリルプレートの実際の温度が異なっていた可能性がある。おもりを熱容量を調査すると同時に、昇温時間と降温時間の長さも再検討する必要がある。

4.3 ファイバーの溶着による光量変化

最後に、ファイバー同士の溶着が上手くいった後の実験について述べておく。本研究ではそもそもファイバーの溶着が上手くいかなかったことが肉眼で見ても明らかであったが、これはあくまで主観的な評価である。今後上手く溶着できたと思われる場合には、ファイ

バーが伝達する光量の変化を評価する客観的な方法が必要となる。

第 5 章

結論

本研究では T2K 実験を受け継ぐハイパーカミオカンデ実験の水標的前置検出器 ND280++ の候補であるファイバートラッカーの開発に向けて、Geant4 シミュレーションによるファイバートラッカーの性能評価および、ファイバーの溶着試験とアクリルの溶着試験を行った。

Geant4 シミュレーションでは電子ニュートリノの CCQE のイベントディスプレイ 100 枚に対して粒子種類の識別と反応点の決定を行った。ニュートリノのイベントだと判別できるのは全体の 64% であり、電子ニュートリノのイベントだと判別できるのは全体の 15% であった。また反応点が決定できそうなイベントは全体の 24% にとどまった。粒子識別の精度を改善するためには、印加磁場の増強とジオメトリの再検討が必要である。

反応点の決定精度を改善するためには、今回全体の 37% を占めた、反応点が決定できなかった XZ 平面のイベントディスプレイから得られる情報を増やす必要がある。そのためには YZ 平面にファイバーを持つようなジオメトリの考案が今後必要である。

ファイバーを用いた溶着試験では超音波溶着機による方法とハンダごてによる方法を検証した。超音波溶着機ではファイバーと数種類のプラスチックシートの溶着を行い、ハンダごてではファイバー同士の溶着を行ったが、どちらも上手く溶着することはできなかった。次にファイバーのクラッドの素材であるアクリル同士を溶着するに必要な温度を調査した。恒温槽でアクリルプレート同士をくっつけて加熱したところ、2 時間の加熱時間であれば 110°C 以上でアクリルプレートが溶着した。今後は加熱時間と温度のパラメータ空間に制限をかけるとともに、昇温時間と降温時間についてもおもりの熱容量を考慮しながらの調整が必要である。

謝辞

指導教員の市川温子教授には、研究活動全般に関してお世話になりました。さまざまな研究のアイデアを頂いたこと、イベントディスプレイの改良にご助力いただいたことや、発表についてご指導頂いたことはもちろんですが、何よりも研究を楽しむ姿勢を近くで学べたことが、初めての研究生活を送る上でのモチベーションに繋がりました。また、KEKの小川さんには、Geant4やNEUTのインストール方法や使い方をご指導頂くだけでなく、シミュレーションツールを用意していただきました。また、ご自身の研究活動でご多忙の中貴重なお時間を割いて私の拙い質問にも丁寧に回答し指導してくださいました。京都大学の木河達也助教にはNEUTのインストールを補助していただいたりND280++ミーティングでサポートしていただきました。松原綱之助教にはクリアファイバー、シンチレーションファイバーやプラスチックシートなどのサンプルを多数提供していただきました。おかげさまでファイバーを用いた溶着試験を十分に行うことができました。株式会社スズキマリン産業機器グループの真木実様には超音波溶着機貸出でご対応いただいただけでなく、サンプルテストを行っていただき、また、プラスチック素材の溶着に関して貴重な助言をいただきました。佐貫智行准教授には毎週のセミナー開催をとりもっていただき、質問にご対応いただいたり興味深いお話を聞かせていただいたりしました。中村輝石助教にはコンピュータの不調が起こった時の対処やOSインストール、ROOTの使い方など、シミュレーションをする上で欠かせない環境整備を助けていただきました。研究室秘書の大堂さんには研究用備品購入時などの事務手続きを行っていただいたほか、その他研究室生活においても細やかなお心遣いをいただきました。ご助力いただいた皆様に深く感謝と御礼を申し上げます。

また、研究室の諸先輩方におかれましては、スタッフさんにしづらい質問などにも丁寧にご対応いただいたり、研究や発表の進捗のこと、日常生活のことについて気にかけていただきました。ありがとうございました。研究室同期の内山君と笠間君には初めての研究活動である卒業研究を遂行する上で、互いに励ましあう心の支えになってくれました。

ありがとうございました。これからもよろしくお願いします。

最後にいつも自分を気にかけて支援してくれた家族と友人たちに心より感謝致します。

目次

2.1	T2K 実験の概要 [9]	4
2.2	ビーム角度とニュートリノエネルギースペクトルの関係	6
2.3	スーパーカミオカンデの水槽内の写真	7
2.4	INGRID の構造 [8]	8
3.1	光ファイバーの構造	10
3.2	ファイバートラッカーの構成	11
3.3	μ のイベントディスプレイ	13
3.4	e^- のイベントディスプレイ	14
3.5	γ のイベントディスプレイ	14
3.6	ν_e のイベントディスプレイ	15
3.7	ν_μ のイベントディスプレイ	16
3.8	ν_τ のイベントディスプレイ	17
3.9	小型超音波溶着機 AUH30CW(本体)	19
3.10	小型超音波溶着機 AUH30CW(ホーン)	20
3.11	超音波溶着機を用いた実験装置の構成	20
3.12	PET シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後	21
3.13	AIPET シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後	22
3.14	PS シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後	22
3.15	PE シートに溶着試験した前後のファイバーの比較:左が溶着前、右が溶着後	23
3.16	HS-51 温調式ハンダごて	24
3.17	温調式ハンダごてビット:左上が B01, 右上が C01, 下が K02	24

3.18	溶着後のファイバーの様子:左上は溶着前のファイバーサンプル、右上は B01 での溶着後、左下は C01 での溶着後、右下は K02 での溶着後 . . .	26
3.19	1cm×5cm のアクリルプレート	26
3.20	アクリルプレート同士の溶着	27
3.21	恒温恒湿器 IW242	27
3.22	恒温槽のプログラム機能で設定した温度変化のグラフ	28

表目次

3.1	超音波溶着機による溶着試験の結果	21
3.2	ハンダごてによる溶着試験の結果	25
3.3	恒温槽による溶着試験の結果	28

参考文献

- [1] 平本綾美, “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” 京都大学修士論文 (2017).
- [2] 青木茂樹, 中家剛, 塚本敏文 “T2K 実験前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis” (2019)
- [3] ハイパーカミオカンデ HP, <http://www.hyper-k.org/index.html>
- [4] T2K 実験 HP, <https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>
- [5] 永井恒輝, “T2K 実験の新型前置ニュートリノ検出器 SuperFGD に使用する半導体型光検出器 MPPC の性能評価” 横浜国立大学卒業論文 (2021).
- [6] 株式会社クラレ HP, <https://www.kuraray.co.jp/products/psf>
- [7] 「砥石」と「研削・研磨」の総合情報サイト
<https://www.toishi.info/sozai/plastic/hr.html>
- [8] K. Abe, et al. “Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector” ,arXiv:1111.3119v1
- [9] スーパーカミオカンデ HP, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/t2k.html>