

修士論文

ハイパーカミオカンデ実験に向けた
水標的シンチレーティングファイバートラッカーの開発

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻

若林 大貴

令和5年

概要

2027年から大型水チェレンコフ検出器であるハイパーカミオカンデ (HK) 実験の開始が予定されている。HK はスーパーカミオカンデ (SK) の約 8 倍の有効体積を持ち、特に加速器を用いたニュートリノ振動実験では大幅な統計量の増加によって 5σ の信頼度でニュートリノの CP 対称性の破れを示すことを目標としている。この目標達成のためにはニュートリノと原子核の反応を深く理解し系統誤差を削減することが重要である。そのためには HK と同じ水標的の検出器を導入し、反応の終状態に現われる粒子を効率よく検出する必要がある。本研究ではシンチレーティングファイバーのシートをビーム軸方向に垂直に一定間隔で並べて水タンクに沈める水標的ファイバートラッカーを考えた。ファイバーシートの不感領域を増やさない制作方法として、ファイバー同士を熱溶着する方法の開発を行った。同時に、別の案として、耐水テープでファイバーを固定することを考え加速劣化試験による粘着剤の耐久性評価を行った。

熱溶着方法の開発ではファイバーを部分的に加熱する機構を設計した。改良を重ねた結果、変形を抑制しつつ熱溶着を行うシステムを確立した。このシステムを用いて温度と時間を変えてクリアファイバーを溶着することで、溶着の強さに対する温度と時間の影響を調べた。

さらに何種類かの溶着の温度と時間で作成したサンプルの光量損失率を測定した。その結果、溶着温度が低いほど損失が小さい傾向が確認され、30cm ファイバーの 118 °C 12 時間の溶着で光量損失率 5% の目標値を達成した。しかし、同じ温度と時間でも溶着ごとのばらつきが大きく、傾向が有意差であるという結論は得られていない。

耐水テープの粘着剤の耐久性を評価するため 70 °C、80 °C、90 °C の 3 つの温度水準で水中での加速劣化試験を行い粘着剤の劣化評価を試みた。粘着力の指標として 90° 剥離強度と剪断強度を採用し、加速劣化による変化を測定した。テープの粘着力は限界強度を下回らなかったが、粘着力は単調に減衰するという当初の予想からは外れており、観測された粘着力の減少は粘着剤の劣化が原因ではない可能性がある。さらに長期、ないし低温で引き続き調査する必要がある。

また、検出器の飛跡再構成効率および検出効率について考察し、ニュートリノ反応で生成されるおよそ 200 MeV/c の低い運動量を持つ陽子の検出が期待されることを確認した。シミュレーションを用いてファイバーレイヤー間隔が 5 mm、10 mm、20 mm のときの飛跡再構成効率や検出効率の変化を調べた。10mm 間隔では 240 MeV/c の陽子の検出効率が約 35% であるが 5mm 間隔では約 80% まで改善すると見積もられた。

目次

第 1 章	序論	4
1.1	ニュートリノ	4
1.2	ニュートリノ振動	5
1.3	ハイパーカミオカンデによる加速器ニュートリノ振動実験	6
1.4	ニュートリノビーム	6
1.5	ニュートリノ原子核反応	8
1.6	前置検出器	10
1.6.1	INGRID	10
1.6.2	WAGASCI-BabyMIND	11
1.6.3	ND280	12
1.7	後置検出器: ハイパーカミオカンデ (Hyper Kamiokande)	13
1.8	ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande) 実験における課題	13
第 2 章	ハイパーカミオカンデに向けた新前置検出器	15
2.1	検出器デザイン案	15
2.2	シミュレーションによるイベントディスプレイの例	17
2.3	課題	18
第 3 章	熱溶着によるファイバーシートの制作	19
3.1	熱溶着のクオリティの目標	19
3.2	溶着システムのコンセプト	20
3.3	熱溶着システムの開発	21
3.3.1	ベースモジュール	21
3.3.2	ヒーター治具	21
3.3.3	加熱	23
3.3.4	SUS シート/ファイバーカバー・竹製スペーサー・おもり	26
3.3.5	温度調節器・冷却ファン	28
3.4	加熱パラメータの最適化	28
3.4.1	パラメータの定義	29

3.4.2	溶着テスト結果	29
第4章	溶着したクリアファイバーの光量測定	32
4.1	ファイバー内の光の伝播	32
4.2	光量測定のセットアップ	33
4.2.1	光源と光検出器	33
4.2.2	ファイバーの固定	34
4.2.3	データロガー	34
4.2.4	ファイバーの端面処理	34
4.3	光量損失率の測定	35
4.3.1	各条件での測定手順	35
4.3.2	ファイバー着脱の再現性の確認	36
4.3.3	光量損失率の定義と誤差	37
4.4	2m ファイバーを用いた光量損失率の測定	37
4.4.1	方法	37
4.5	30cm ファイバーを用いた光量損失率の測定	38
4.5.1	目的	38
4.5.2	方法	38
4.5.3	結果	39
4.6	118 °C 12 時間溶着	39
4.7	溶着再現性の確認	41
4.8	まとめと考察	41
第5章	耐水性テープによるファイバーシート制作	44
5.1	加速劣化試験の原理	45
5.2	加速のセットアップ	45
5.3	粘着力の限界強度	48
5.4	引張試験: セットアップ・実験方法	49
5.4.1	90° 剥離試験	49
5.4.2	剪断試験	50
5.5	予熱による準備	50
5.6	測定の再現性による誤差の付け方	51
5.7	加速劣化試験の結果	52
5.8	考察	54
5.9	加速率の活性化エネルギー依存性	54
5.10	活性化エネルギーの測定:DTA 法	56
5.10.1	原理	56

		3
	5.10.2 セットアップ	57
	5.10.3 考察	58
5.11	まとめ	59
第 6 章	陽子飛跡検出のためのシミュレーション	60
6.1	短い飛程を持つ陽子のトラッキング	60
6.2	合計で 3 層通過する場合	61
6.3	合計 2 層通過する場合	62
6.4	飛跡再構成効率評価	64
	6.4.1 シミュレーション設定	64
	6.4.2 結果	66
6.5	まとめ及び課題	67
第 7 章	結論	69
付録 A	ヒーター治具の設計図	72
付録 B	角ファイバーコネクタの設計図	74
参考文献		76

第 1 章

序論

1.1 ニュートリノ

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

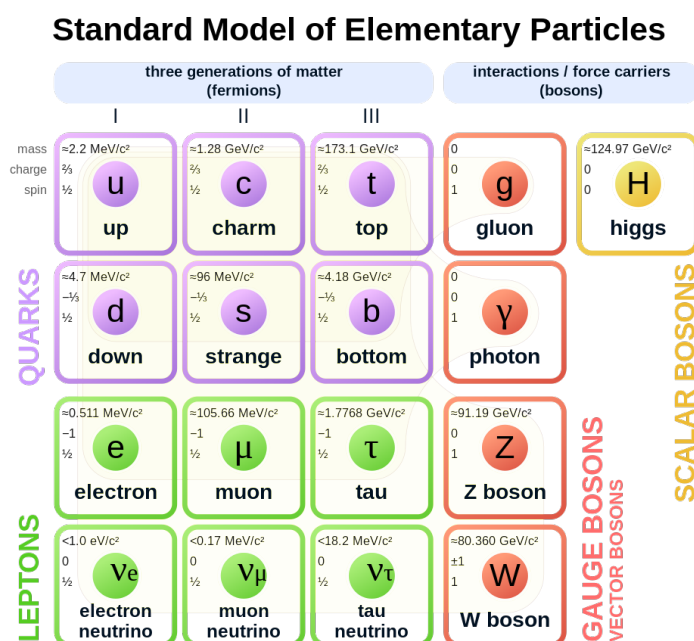


図 1.1: 標準模型における素粒子 [1]

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、定式化された[2]、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[3]。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 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) は必ずしも一致せず、 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、*1ユニタリ条件から以下のように表わすことができる。

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

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 μ_i, μ_i の混合角、 δ_{CP} は複素位相を表す。

以下、ニュートリノ振動を簡単のため $|\nu_e\rangle$ と $|\nu_\mu\rangle$ の2つのフレーバー間について考える。この場合フレーバー固有状態は質量固有状態 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$ と混合角 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 $|\nu_i\rangle$ のエネルギーである。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。ここで $p_i \sim p$ と仮定した。フレーバー固有状態の時間発展は (1.4) 式から、

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

*1 ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) とも呼ばれる。

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、

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle|^2 \quad (1.8)$$

$$= |(-\sin\theta \langle \nu_1 | + \cos\theta \langle \nu_2 |) \cdot \{\cos\theta |\nu_1\rangle \exp(-iE_1 t) + \sin\theta |\nu_2\rangle \exp(-iE_2 t)\}|^2 \quad (1.9)$$

$$= |-\sin\theta \cos\theta + \sin\theta \cos\theta \exp(-i(E_1 - E_2)t)|^2 \quad (1.10)$$

$$= \frac{1}{4} \sin^2 2\theta [1 - \cos\{(E_1 - E_2)t\}] \quad (1.11)$$

$$= \frac{1}{4} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{|m_1^2 - m_2^2|}{2E} t\right) \right\} \quad (1.12)$$

$$= \frac{1}{4} \sin^2 2\theta \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\Delta m^2 t}{2E}\right) \right\} \quad (1.13)$$

$$= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right) \right\} \quad (1.14)$$

$$= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left\{ \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \right\} \quad (1.15)$$

と求まる。ここで $\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$ である。また、最後の変形ではニュートリノの速さがほぼ光速 c であるため、時刻 t におけるニュートリノの変位 L が $L = ct$ と表せることを用いた。仮にニュートリノが質量を持たないとすると $\Delta m^2 = 0$ 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。

1.3 ハイパーカミオカンデによる加速器ニュートリノ振動実験

ハイパーカミオカンデ (HK) 実験では茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) で生成した $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$ ビームを J-PARC 敷地内の前置検出器と、295 km 先、岐阜県飛騨市神岡町に建設中の後置検出器ハイパーカミオカンデの 2 箇所で測定する (図 1.2)。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ モードと $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ モードにおける振動確率の差を測ることで CP 対称性の破れを示すことを目標としている。

1.4 ニュートリノビーム

J-PARC の陽子加速器群は 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。イオン源で生成した H^- が LINAC で 400 MeV/c まで加速された後、フォイルを通過することで RCS に入射され 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。このうち生成された π^+ 中間子は電磁ホーンと呼ばれる装置で前方に収束され、式 (1.16) の



図 1.2: ハイパーカミオカンデによる加速器ニュートリノ振動実験概念図

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ビームを生成している。



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 (1.17) に従って反ニュートリノビームを得ることができる。



現在、J-PARC で走っている加速器ニュートリノ振動実験である T2K では、図 1.3 に示すように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。

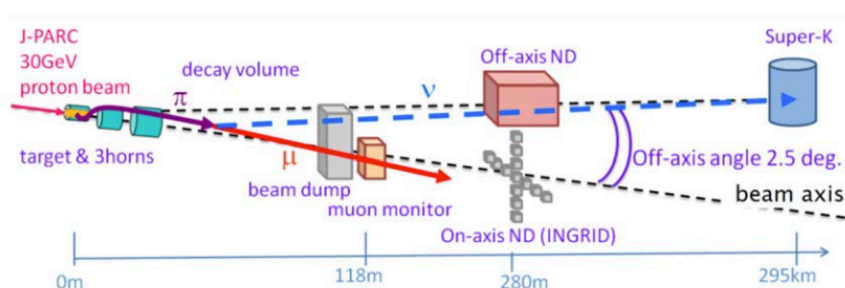


図 1.3: T2K 実験における検出器の配置図: 前置検出器 ND280 とスーパーカミオカンデは Off-Axis 角 2.5° に位置している。

ニュートリノ振動の確率は式 (1.15) で見たように、ニュートリノのエネルギーと飛行距離に依存する。J-PARC から SK までの距離 295km に対しては図 1.4 に示すように、ビーム軸を SK から 2.5° ずらすことで ν_e の出現確率が最大となるようなニュートリノエネルギー 0.5 から 0.7GeV の間に鋭いピークを持たせることができる。

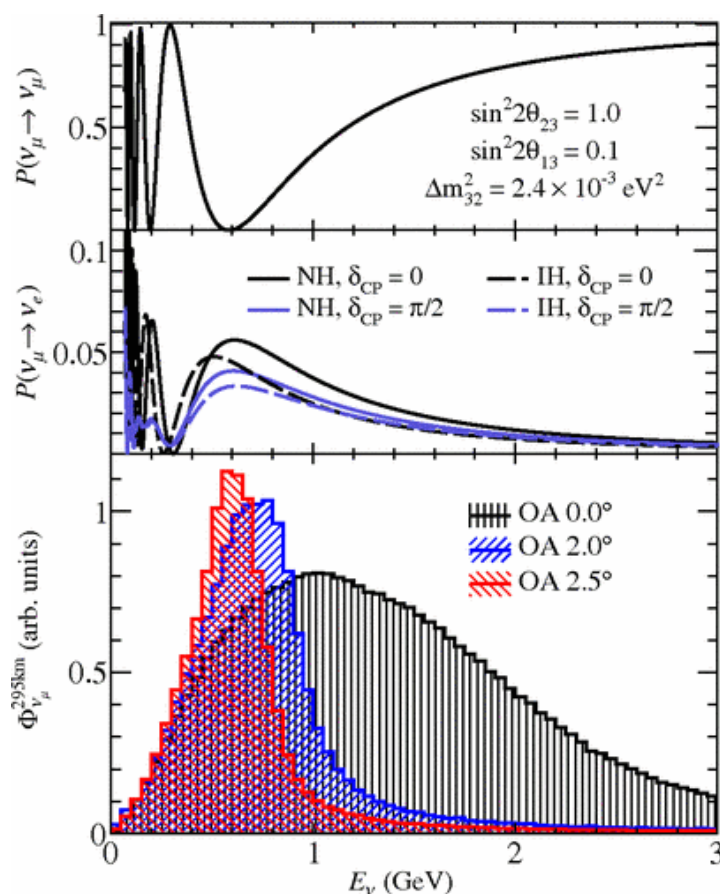


図 1.4: ニュートリノエネルギーと振動確率: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ (上図)、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (中央図)、ニュートリノのエネルギースペクトル (下図) [4]

1.5 ニュートリノ原子核反応

加速器ニュートリノ振動実験では、ニュートリノが物質中の原子核と反応して出てくるレプトンとハドロンを検出する。ニュートリノの反応は W ボソンが媒介する荷電カレント (Charged Current) 反応と Z ボソンが媒介する 中性カレント (Neutral Current) 反応に大別される。前者の場合には検出したレプトンが電子かミューオンかで、反応したニュートリノが電子ニュートリノなのかミューニュートリノなのかを識別することができる。図 1.5 は J-PARC で生成される 0.5 ~ 0.7 GeV のニュートリノと原子核との主な反応の断面積である。

Charged Current Quasi Elastic(CCQE) 反応

CCQE はニュートリノが核子と準弾性散乱を起こす反応である (図 1.6a)。HK 実験では、この CCQE をニュートリノ反応のシグナルとして採用する。1.7 節で述べるように、HK のような水チェレンコフ検出器では反応後のレプトンが作るチェレンコフリングを観測して、反応前のニュー

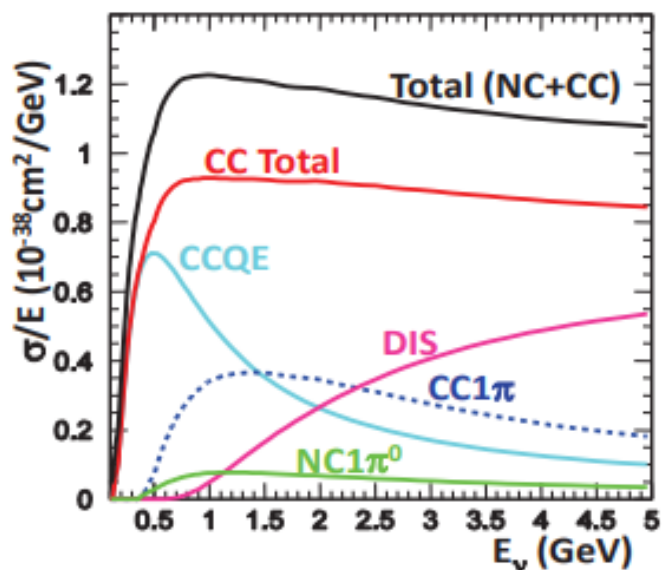


図 1.5: ニュートリノの反応断面積 [5]

トリノのエネルギー再構成および、ニュートリノフレーバーの同定を行う。しかし、以下に述べるような反応がバックグラウンドとなり、エネルギーや反応断面積にまつわる誤差となる。

Charged Current coherent pion production(CCcoh. π) 反応

ニュートリノが原子核とコヒーレントに散乱して、原子核の状態を変えずに π 中間子を生成する反応である (図 1.6b)。 π 中間子を検出し損なうと CCQE と誤認し、ニュートリノのエネルギーを低く見積もってしまう。1GeV 以上のエネルギーで反応断面積が大きくなる。

Charged Current REsonance 1 π production(CC1 π /CCRES) 反応

ニュートリノが核子を励起させて共鳴状態を作り、共鳴核子から単一 π 粒子が生成される (図 1.6c)。CCQE のバックグラウンドであり、CCcoh. π と同様 π 粒子を検出できず誤って CCQE として再構成するとニュートリノエネルギーを低く見積もってしまう。

Neutral Current(NC) 反応

図 1.6d のような弾性散乱では荷電レプトンが発生しない。しかし、 π^0 を生成するようなイベントでは、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ に直ちに崩壊するため、対生成で生じる電子陽電子が 2つのチェレンコフリングを生成する。これは電子ニュートリノイベントのバックグラウンドとなりうる。

2particle2hole(2p2h) 反応

ニュートリノと反応した核子が原子核内核子と相互作用し、核子 2つがはじき出される反応である。終状態で出現する核子の運動量は数百 MeV と低く、プラスチックシンチレーター中における

飛程はせいぜい数 cm であるため検出が難しい。CCQE と誤認すると陽子が持つエネルギー分だけ低い方にエネルギーを再構成してしまう。

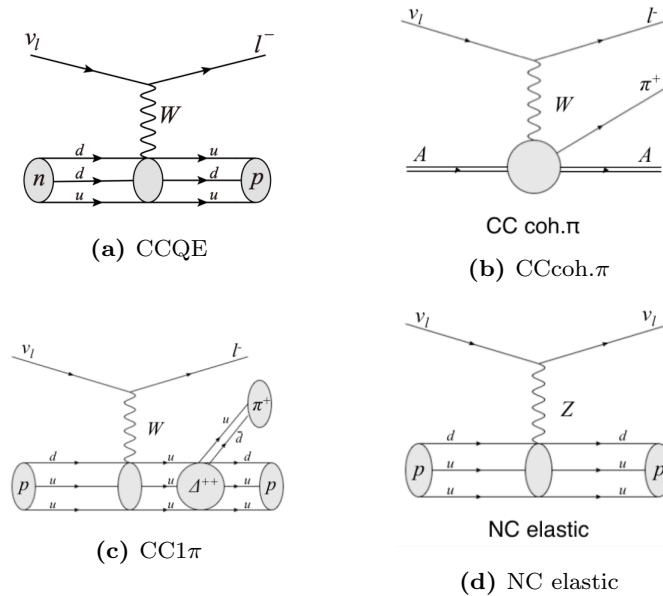


図 1.6: ニュートリノと核子との相互作用のファインマンダイアグラム

1.6 前置検出器

高い信頼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、及びニュートリノと原子核の反応を測定することが必要である。現在走っている T2K 実験ではニュートリノ生成標的から下流 280m で INGRID, ND280 と WAGASCI-BabyMIND の 3 つの前置検出器を使用している。

1.6.1 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 1.7 のように鉛直方向と水平方向に 7 つ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や安定性を確認する。

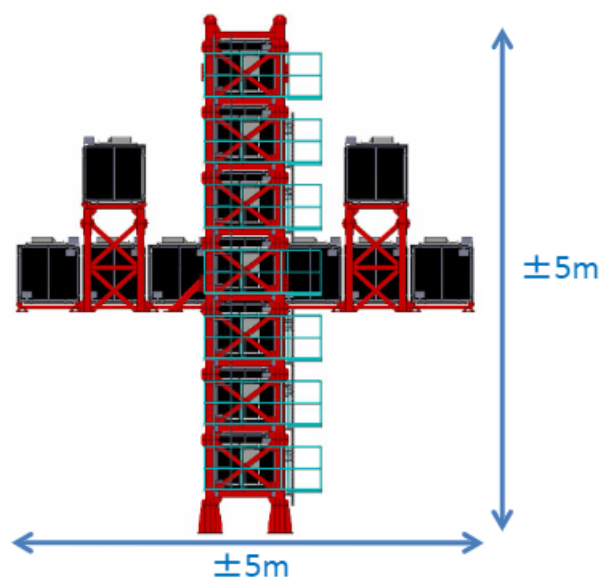


図 1.7: INGRID の構造

1.6.2 WAGASCI-BabyMIND

WAGASCI(Water Grid And SCIntillator detector)-BabyMIND は Off-Axis 角 1.5° に位置する前置検出器である。

WAGASCI モジュール

WAGASCI は 3 次元格子状に組んだシンチレーターを水で満たした 4π 方向のアクセプタンスを持つ検出器である。水とプラスチックの体積比は 水 : プラスチック = 4 : 1 であり、ニュートリノと水の反応断面積の精密測定を行う [6]。WAGASCI モジュールを囲むようにミュオン検出器が設置されている。

BabyMIND

BabyMIND(Magnetized Iron Neutrino Detector) は WAGASCI モジュールに対してニュートリノビームの下流に位置するミュオン飛程検出器である。33 枚の磁化した鉄板と 18 枚のシンチレーター板から構成され、ミュオンの電荷を識別する。

1.6.3 ND280

前置検出器群 ND280(図 1.8) は Off-Axis 角 2.5° に位置し、ニュートリノビームのフラックスやエネルギー、原子核との反応断面積を測定する。ニュートリノの反応標的を兼ねる FGD 及び SuperFGD を TPC、電磁カロリメータ、ミュオンレンジ検出器が取り囲む構造となっている。全体はダイポール磁石の中にあり、磁場がかけられている。

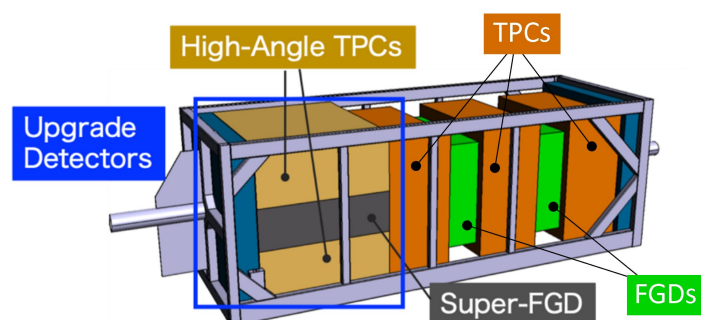


図 1.8: 前置検出器 ND280 の概略図: 青枠は 2023 年 12 月に新しく導入された検出器を囲んでいる。

FGD

Fine Grained Detector(FGD) はシンチレーターのみから成る FGD1 と、水とシンチレーターの層から成る FGD2 の 2つのモジュールから構成される。それぞれシンチレーター層は内部に波長変換ファイバーを通した、 $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 184\text{cm}$ 角のシンチレーター角棒から構成されている (図 1.9)。FGD2 における水とシンチレーターの質量比は シンチレーター : 水 = 56 : 44 である [7]。

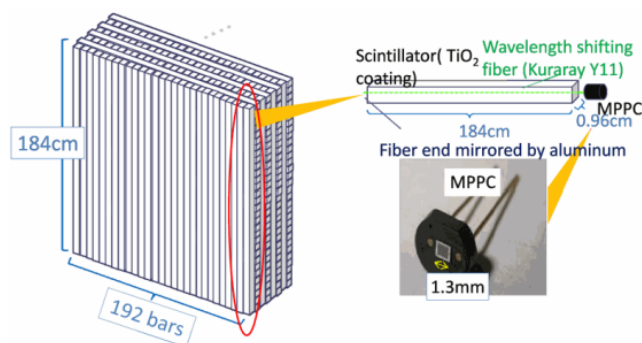


図 1.9: FGD の構造 [8]

SuperFGD

2023年12月よりシンチレータキューブを使用した検出器 SuperFGD(Super Fine Grained Detector) が導入された。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 4π 方向のアクセプタンスを実現したことである。ND280 アップグレードの詳細に関しては Technical Design Report [9] を参照。

1.7 後置検出器: ハイパーカミオカンデ (Hyper Kamiokande)

ハイパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡町に建設中の大型水チェレンコフ検出器である。直径 68m、高さ 71m の円筒形水タンクは 2 層構造をとり、それぞれ内水槽と外水槽と呼ばれる。内水槽の内壁には直径 50cm の光電子増倍管 (PMT) を 2 万本および、multi-PMT と呼ばれる、複数の小型 PMT が集合したモジュール数千本が設置される予定である。また、外向きにも 7200 本の 10cm 径 PMT を設置予定であり、外部から入射するミューオンなどの荷電粒子を VETO する役割を果たす。有効体積は、同じく神岡町鉱山跡地に位置するスーパーカミオカンデ (SK) の約 8 倍となる 18.8 万 t である。

ハイパーカミオカンデが扱う物理としては前述の加速器ニュートリノ振動実験によって CP 対称性の破れを示すこと以外にも、ニュートリノ質量順序の決定、宇宙ニュートリノの観測、陽子崩壊探索がある。実験構成や目標とする物理の詳細については Hyper-Kamiokande Design Report [10] が参考になる。

HK では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光電子増倍管 (PMT) で検出することでニュートリノを観測している。ニュートリノ反応で生成される荷電粒子の速度が水中の光速よりも速いとき、 $\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$ となる方向にリング状のチェレンコフ光を放射する。ここで n は水の屈折率、 β は光速を 1 としたときの速度である。

ミューオンの飛跡は直線的になるので、はっきりしたチェレンコフリングを生成する。一方で電子は水中で電磁シャワーを作るため、複数の少しずれたチェレンコフ光が重なってぼやけたリングを作る。これらを区別することで ν_μ と ν_e の判別を行う。図 1.10 は HK と同じ水チェレンコフ検出器であるスーパーカミオカンデで観測される ν_μ と ν_e のイベントディスプレイである。

1.8 ハイパーカミオカンデ (Hyper-Kamiokande) 実験における課題

HK 実験では CP 対称性の破れを 5σ の信頼度で示すことを目標にしている。現在の ND280 検出器の標的はプラスチックシンチレーターが主であるため、ニュートリノと炭化水素の反応が精密に測定されている。後置検出器におけるニュートリノと水の原子核反応はシミュレーションによ

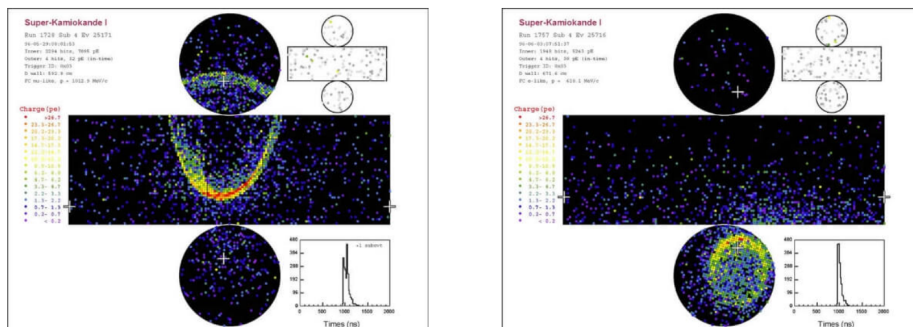


図 1.10: SK で検出される ν_μ と ν_e のイベントディスプレイ [11] 左が ν_μ 、右が ν_e のイベントディスプレイである。

て外挿されているが、複数の核子が反応する多体効果はモデルによる不定性が大きく、系統誤差の原因となる [6]。この系統誤差を削減するためには、後置検出器である SK や HK と同じ水標的の前置検出器を開発し、水とニュートリノの相互作用を直接観測することが有効である。

次章で HK に向けた新前置検出器の概要について述べる。

第2章

ハイパーカミオカンデに向けた新前置検出器

ハイパーカミオカンデを用いた加速器ニュートリノ振動実験において、ニュートリノ振動パラメータを精密に測定するためには、ニュートリノと水の原子核反応を正しく理解することが必要である。

ニュートリノ反応の種類と反応断面積を正しく測定するためには、反応で生成される粒子に対する十分な検出効率が必要であり、特に大角度の散乱や、短い飛程の陽子に対する高い検出効率が必要とされる。また、CP 対称性の破れの測定で目標感度を達成するには、電子ニュートリノの反応断面積の測定が必要である。生成直後のニュートリノフラックスには電子ニュートリノが1%程度しかないため、電子ニュートリノ反応事象を選び出すためにはミューオンと電子を識別する高い能力が要求される。

本研究では、これらの目的を果たすために新型検出器は ND280 内の FGD を新しい検出器で置き換えることを想定している。

2.1 検出器デザイン案

水標的検出器の候補としてシンチレーティングファイバー (SciFi)^{*1} を使用したファイバートラッカーを検討している。シンチレーティングファイバーはポリスチレンベースのコアに蛍光剤を添加してシンチレータとし、アクリルをクラッドに持つファイバーである。荷電粒子がコア部を通過した際に発生するシンチレーション光をファイバーの端で検出することで粒子の位置情報を得ることが可能である。

図 2.1 のように、水タンクの中に角型のシンチレーティングファイバーからなるシートをビーム方向に一定の間隔で並べる。ファイバー端には MPPPC 光検出器を取り付けて光量を測定する。詳細な構造、特にファイバー径やピッチについては今後の検討を要するが、まずは、ファイバー径

*1 Scintillating Fiber

1mm、1シートあたりのファイバー数2000本、レイヤー間ピッチ10mmを仮定する。

前置検出器ND280の一部であるFGDでは1cm角で長さ2mのシンチレーター角棒を使用している。太さが10分の1である1mm角のシンチレーティングファイバーをシート状に並べることで、水の層を挟みながらもより良いトラッキング性能を期待できる。

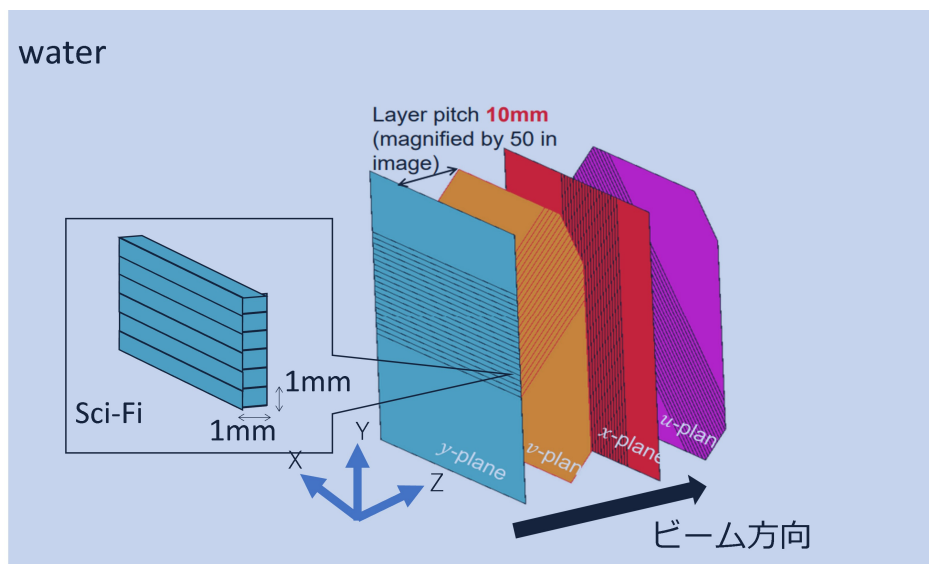


図 2.1: 検出器ジオメトリの例; ファイバー径:1mm レイヤー間ピッチ:10mm

2023年12月にT2K実験に導入されたSuper-FGDとの比較を表2.1に示す。サイズ及びチャンネル数は、1シート $2\text{m} \times 2\text{m}$ (2000本)で1cmごとに50層並べると仮定した場合の値である。チャンネル数はSuper-FGDに合わせて片側読み出しを仮定した。SuperFGDよりもチャンネル数が1桁大きいですが、性能上の問題がなければ、隣同士のファイバーをまとめて読み出してチャンネル数を削減することも可能である。このようなレイヤー間隔を仮定した場合の水と炭化水素の体積比は水:炭化水素=9:1である。

表 2.1: Super-FGD との比較: 光量はMIP粒子が通過したときのキューブあたりまたはファイバーあたりの光量である。

検出器	Super-FGD	SciFi Tracker
体積 m^3	$1.92 \times 1.82 \times 0.56 = 1.96 \text{ m}^3$	$2 \times 2 \times 0.5 = 2 \text{ m}^3$
光量 p.e./MIP	35/cube[12]	18/fiber[13]
チャンネル数	60k	100k

ニュートリノと水の相互作用を深く理解するためには、終状態で現われる粒子を効率よく検出する必要があるため、レイヤー間のピッチは可能な限り短いほうが望ましい。特に、 $2\text{p}2\text{h}$ 反応で出

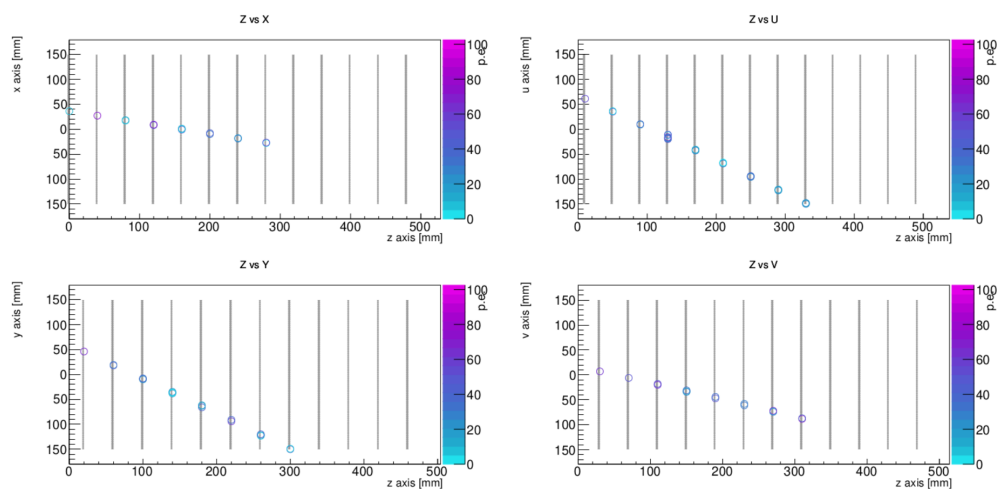


図 2.2: ミューオンのイベントディスプレイの例

てくる陽子の典型的な運動量は $200 \text{ MeV}/c$ から $300 \text{ MeV}/c$ であり、水中での飛程は 1 cm 前後である。これに合わせてファイバーレイヤーのピッチも 1 cm 程度を検討している。

2.2 シミュレーションによるイベントディスプレイの例

Geant4 を用いた検出器シミュレーションによって作成した上記の検出器構成における、ミューオン、電子、 γ の イベントディスプレイの例を図 2.3, 2.4, 2.2 に示す。

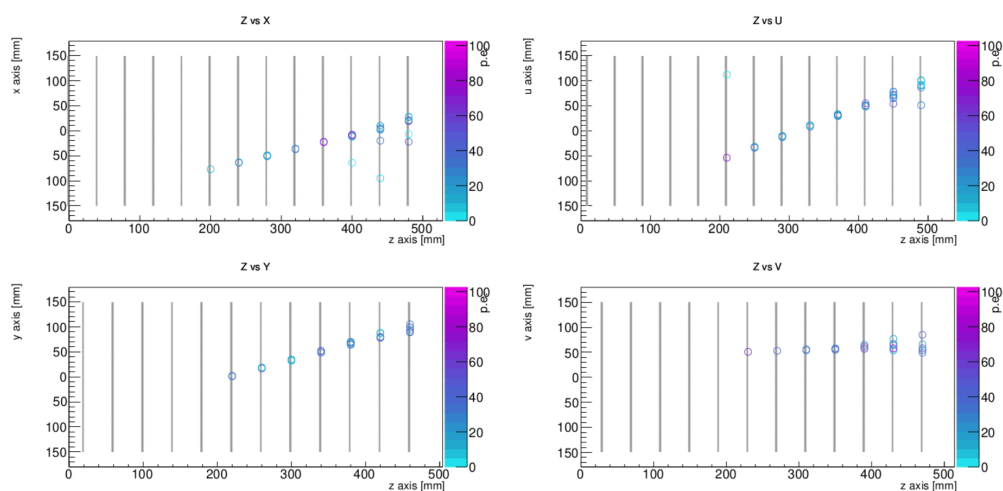


図 2.3: 電子のイベントディスプレイの例

図 2.2 ではミューオンの直線的なトラックが確認でき、電子と γ と区別できる。電子 (図 2.3) と γ (図 2.4) はどちらも電磁シャワーを起こすため同定を誤りやすいが、光子から対生成した電子と陽電子が同じファイバーを通過すると電子 2 つ分の光量を発することから、電子と γ は光量による

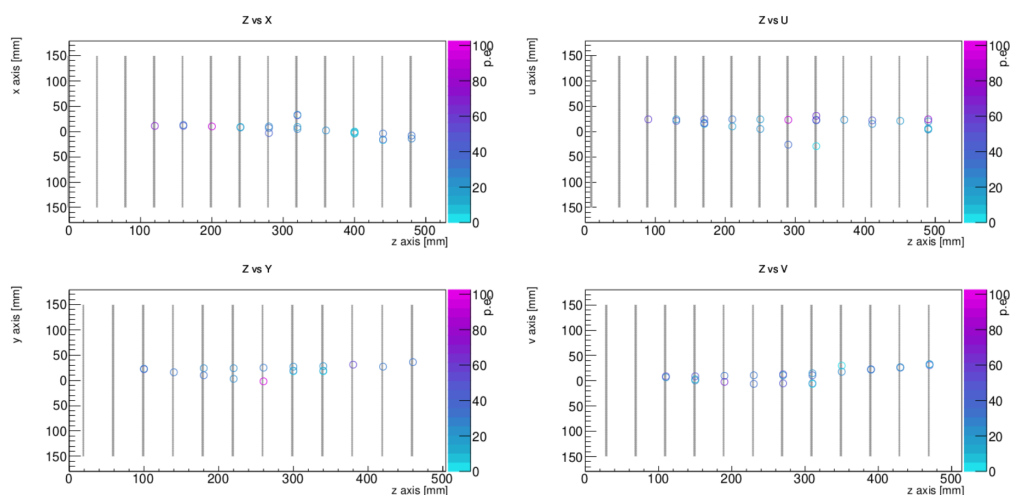


図 2.4: $\gamma \rightarrow e^+e^-$ のイベントディスプレイの例

識別が可能だと考えられる。

飛跡検出の性能については、6章で詳しく議論する。

2.3 課題

ファイバートラッカーにおけるファイバーの固定方法としては、丸ファイバーをシート状に並べて隙間を接着剤で埋めて固めたり、角ファイバーを何層かのシート状に並べて互いに接着したりする方法がある。

しかし、上述の新型検出器デザインでは、水の割合を高めるため角ファイバーシート一層ずつで水タンクに入れる予定である。従って、接着剤で固定するためには隣り合うファイバーで接着剤を挟む必要があるが、ファイバーの間隔がひろがることによりデッドスペースが増えてしまう。新型検出器の運用期間としては10年スケールを想定しており、その間安定した接着力を保持する必要がある。そこで、本研究では、ファイバー固定方法として熱溶着に着目した。ファイバーのクラッド同士を熱で溶かして接着することにより、デッドスペース削減と長期安定性の両方を期待できる。3章では熱溶着によるファイバーシート制作について、4章では熱溶着によるファイバーの伝達光量損失について述べる。別の手法としてテープによるシートの作成も検討している。この場合、テープの粘着力の長期安定性を確認しなければならない。5でこの点を検討する。

第3章

熱溶着によるファイバーシートの制作

本章ではファイバー熱溶着システムの開発について述べる。

3.1 熱溶着のクオリティの目標

熱溶着による光量の損失を1回の溶着で5%以下と設定した。設定した背景を次に述べる。

ミュオンと電子の粒子識別

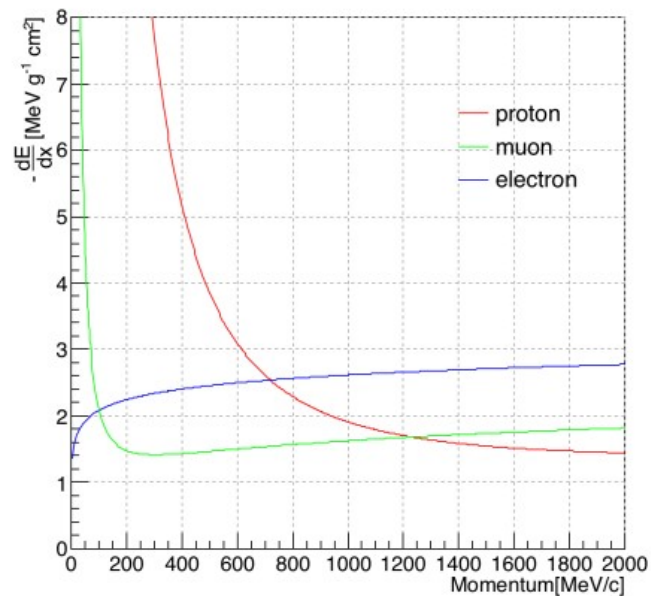


図 3.1: ポリスチレン中でのエネルギー損失の運動量依存性 (出典:[13])

文献 [13] によると、675 MeV/c の陽電子がシンチレーターを通過したときの平均検出光量 N_{electron} は 29.4 p.e./mm である。675 MeV/c 電子の単位距離あたりのエネルギー損失

は 2.53 MeV/g cm^2 であり、 200 MeV/c から 2 GeV/c のミュオン平均エネルギー損失は 1.63 MeV/g cm^2 であるため、この範囲のミュオンが通過したときの光量 N_{muon} は 18.0 pe/mm と予想される。

光量はイベント毎にポアソン分布に従ってふらつく。ふらつきの大きさは、それぞれ

$$\frac{1}{\sqrt{N_{\text{electron}}}} = \frac{1}{5.42} = 18\% \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\sqrt{N_{\text{muon}}}} = \frac{1}{4.25} = 24\% \quad (3.2)$$

となる。互いの平均光量は $\frac{29.4-18.0}{\sqrt{5.42^2+4.25^2}} = 1.7$ 標準偏差だけ離れており、例えば 3～4 層の測定で(陽)電子とミュオンを識別することが可能である。

ここで、ファイバー溶着における光量損失の総量が 15% 程度であれば、光量のばらつきは電子で 19%、ミュオンで 25%、電子とミュオンの光量差は 1.6 標準偏差であり、粒子識別への影響はごく限定的である。ただし、光量損失は宇宙線によるキャリアレーションで予め測定できると仮定している。

検出器に実装する 2m ファイバーにおいて 50cm ごとに合計で 3 箇所の溶着を行うと仮定する。3 回の溶着で 15% の損失に収めるには、1 回の溶着で許される光量損失率の上限 ϵ は

$$(1 - \epsilon)^3 = 0.85 \quad (3.3)$$

を満たさなければならない。これを解くと、 $\epsilon = 0.053$ を得るので、本実験における 2m ファイバーでの溶着 1 回あたりの光量損失率目標値を 5% と設定した。

3.2 溶着システムのコンセプト

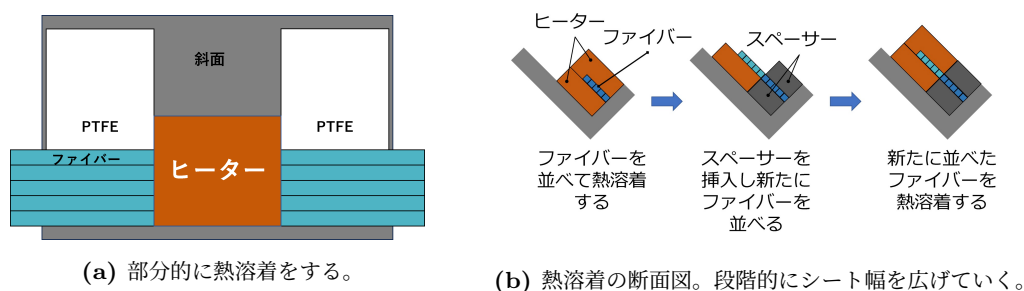


図 3.2: ファイバーシートの熱溶着と拡張の概念図

ファイバーを熱溶着し、シートを開発する手続きを図 3.2b に示し、以下に手順を述べる。

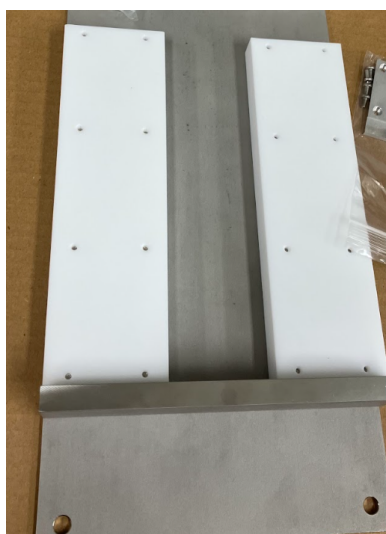
1. ヒーターで紙面垂直方向に並んだファイバー 10 本を挟み、斜面に設置した後、熱溶着する。
2. スペースャーを使って、ヒーターを斜面上方向に設置できるようにし、手続き 1 と同様に溶着を行いファイバーシートを延長する。

熱溶着によるファイバーのダメージを可能な限り減らすため、ファイバー全体を加熱するのではなく、図 3.2a のように一部分だけを溶着することとした。

続いて、溶着システム開発について段階的に述べる。

3.3 熱溶着システムの開発

3.3.1 ベースモジュール



(a) ベースモジュール: 土台となる SUS 板は縦 360mm、横 150mm、厚さ 3mm である。



(b) アルミフレームで組み立てた傾斜 45° のスロープにベースモジュールが設置されている。

図 3.3: ベースモジュール

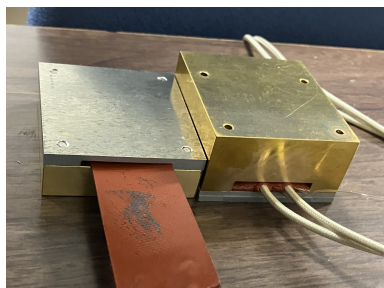
図 3.3a にファイバー溶着に用いたベースモジュールを示す。土台となる SUS 板、2つの PTFE ブロック、ヒーター治具を止めるための SUS ブロックから構成される。

このベースモジュールは図 3.3b のように、アルミフレームで組み立てた斜面状に設置され、ヒーター治具など他のモジュールを載せる土台となる。斜面両脇に位置する PTFE ブロックは下のヒーターを両脇から挟んで位置を固定する役割とおもりを載せる役割を果たす。

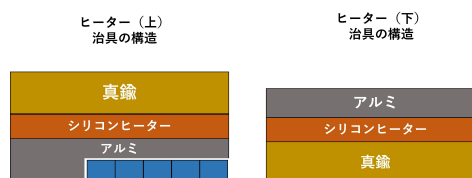
3.3.2 ヒーター治具

ヒーター治具の構造を図 3.4a, 3.4b に示す。上下のヒーターはどちらも、真鍮のブロックとアルミニウムのブロックで作成されており、両者がシリコンヒーターを挟むような構造をしている。熱伝導率の良いアルミニウムの面がファイバーと接する。真鍮ブロックは溶着の間ファイバーを押さえつけるためのおもりの役割を果たす。溶着に最適な質量は分からないが、本研究では 300g から 500g 程度だろうと見当をつけて上ヒーターの質量が 400g 程度になるように設計した。詳細な寸法については付録 A に掲載した。

熱溶着によるファイバーの損傷を抑えるには使用するヒーターの横幅が短い必要があった。そこでシリコンヒーターは八光電機の SBH2012(幅 25mm、長さ 50mm、出力 50W) を使用した。^{*1}



(a) ヒーター治具の写真。右が上のヒーター治具で左が下のヒーター治具である。



(b) ヒーター治具の断面図

図 3.4: ヒーター治具の構造

また、ヒーター治具とファイバーが接する部分の温度を測って制御するため、図 3.5 のようにアルミブロック表面に彫った溝に熱電対を埋め込んだ。

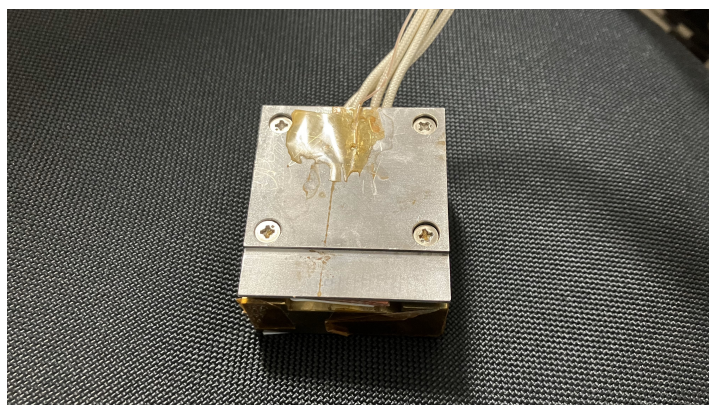


図 3.5: ファイバーとヒーター治具の接触面の温度を測るため、アルミブロック表面に彫った溝に熱電対を埋め込みエポキシで固定した。

温度制御には OMRON 社の温度調節器 E5CC-RX0ASM-000 を使用した。その性能を次の表 3.1 にまとめる。定値/プログラムは、制御温度の設定様式についての項目であり、定値タイプでは 1 つの制御温度しか設定できない一方で、プログラムタイプでは、ユーザーが予め設定した制御温度の時間変化に従って制御温度の変更が可能である。

温度入力には K タイプの熱電対で行い、シリコンヒーターを制御出力 (1) に接続して使用した。溶着システムの配線図を図 3.6 に表わす。

*1 写真左は SBH2012 ではないが、最終的には上下で SBH2012 に統一した。

表 3.1: E5CC-RX0ASM-000 の性能 [14]

項目	E5CC-RX0ASM-000
定値/プログラム	定値タイプ
制御出力総点数	1 点
制御出力 (1)	リレー出力
制御方式	ON/OFF または 2 自由度 PID (オートチューニング付き)
サンプリング周期	50ms

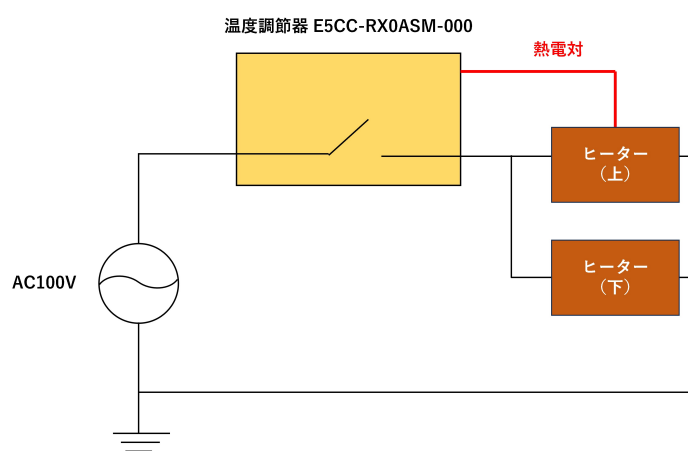


図 3.6: 溶着システムの配線図

3.3.3 加熱

ファイバーのコアの組成であるポリスチレンとクラッドの組成であるアクリル (PMMA) の典型的なガラス転移温度は、ポリスチレンで 100°C 、アクリルで 90°C である [15]。従ってクラッドを溶かしてファイバーを溶着するためには、少なくともアクリルの軟化点より高い温度が必要であると考え、最高温度を 140°C と設定し、作成したヒーター治具で目標値に届くか調べた。

図 3.7a に加熱試験のセットアップを示す。2 つの熱電対で上ヒーター治具に内蔵したシリコンヒーター表面の温度とアルミニウムブロックとファイバーが接する面の温度を測った。横軸に時間、縦軸に温度をプロットしたグラフを図 3.7b に示す。 60°C 付近で熱平衡に達し、目標である 140°C には遠く及ばなかった。

結果を踏まえて効率よくアルミニウムブロックを温めるために、真鍮ブロックへ逃げる熱を減らす工夫を 2 つ施した。1 つ目は、真鍮ブロックとアルミニウムブロックの間にスペーサーとしてワッシャーを挿入し、さらにシリコンヒーターと真鍮の間に 0.3mm の PTFE シートを重ねたものを挿入したことである。これにより、真鍮ブロックがアルミニウムブロックやヒーターと直に接触

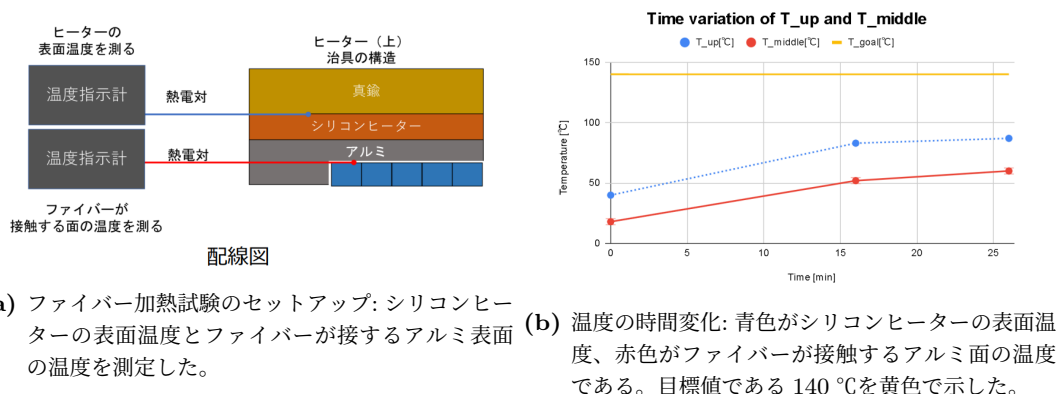


図 3.7: ファイバー加熱試験のセットアップと結果

することを避けた (図 3.8)。2 つ目は溶着システム全体を断熱材で覆って対流が生じる領域を制限し、空気へ逃げる熱を減らしたことである。

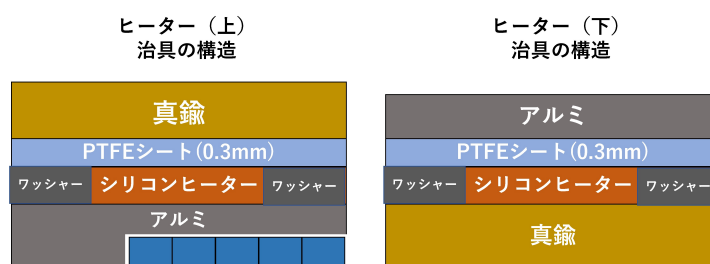


図 3.8: 改良後のヒーター治具の構造

これらの工夫によって目標温度である 140 °C をほぼ達成した。結果を図 3.9 に示す。横軸は加熱開始からの時間、縦軸は温度である。

しかし、目標温度に達するまでの時間が 40 分ほどかかっている。温度の立ち上げ時間を短縮するため、上下のヒーターをそれぞれ 1 枚から 2 枚に増やした。この結果、温度上昇時間が 6 分ほどに短縮され、また、系全体を断熱材で覆わずとも目標温度に達するようになった。

しかしながら、あまりに速い温度上昇はファイバーの状態を悪化させると考え、変圧器によってヒーターにかける電圧を AC100V から下げて制御することにした。しかし、これでファイバーの溶着を試したところ、変圧の度合いによって、同じ温度、時間の溶着でも溶着される場合と溶着されない場合があった。特に、高い電圧で温度の立ち上げ時間が速くなる場合で溶着されないことがあった。温度調節器 E5CC-RX0ASM-000 (表 3.1) は常にある 1 つの制御温度しか設定できなかったが、新たにプログラムタイプの温度調節器 E5CC-TRX3ASM-006 を導入し、温度の立ち上げ時間が常に一定になるよう制御した。E5CC-TRX3ASM-006 の性能を表 3.1 に提示する。

また、追加で以下に示すいくつかの改善を行った。

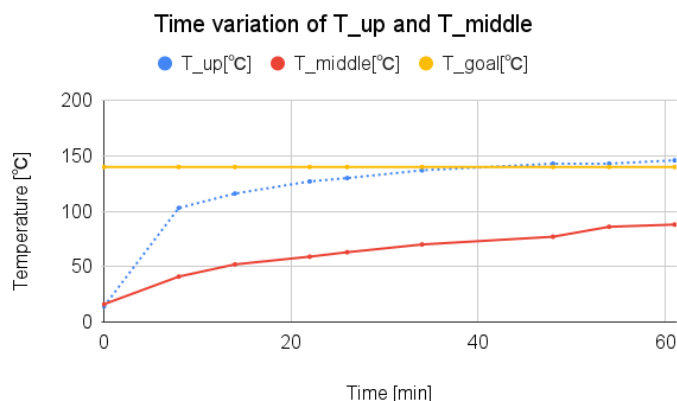


図 3.9: 約 140 °Cまで温度を上げることができた。青色がシリコンヒーターの表面温度、赤色がファイバーが接触するアルミ面の温度である。

表 3.2: E5CC-TRX3ASM-006 の性能 [16]

項目	E5CC-TRX3ASM-006
定値/プログラム	プログラムタイプ
制御出力総点数	1 点
制御出力 (1)	リレー出力
補助出力総点数	3 点
制御方式	ON/OFF または 2 自由度 PID (オートチューニング付き)
サンプリング周期	50ms

上下のヒーターの温度差解消

ここまでは上のヒーターの温度を基準として制御していたため、上下のヒーターで温度差が生じていた。そこで、上下のヒーターそれぞれに E5CC-TRX3ASM-006 を導入し、別々に温度制御を行った。変更後の溶着システムの配線図を図 3.10a, 3.10b に示す。上下のヒーターの配線はそれぞれ独立しているが、配線の方法は冷却ファンの有無を除いて同じである。

冷却ファンの導入

溶着したファイバーが常温に戻るのに、自然冷却では 30 分程度必要だった。この時間を短縮するため上側のヒーターを制御する E5CC-TRX3ASM-006 の補助出力に冷却ファンを接続し、溶着後の冷却にかかる時間を短縮した (図 3.11)。

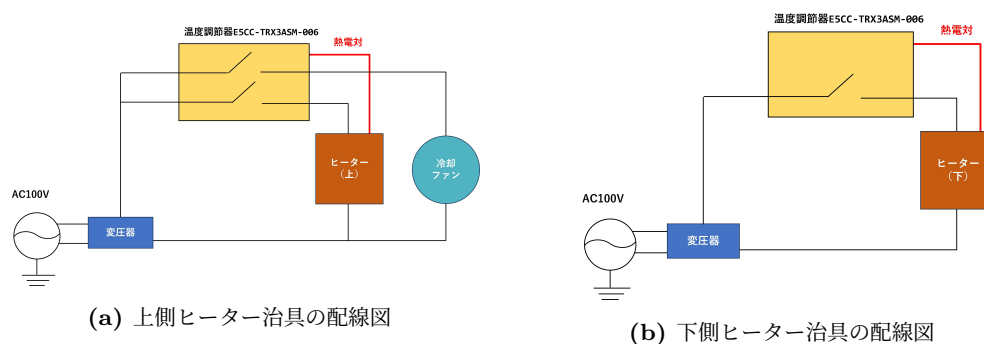


図 3.10: 変更後の溶着システムの配線図: 上下側ヒーター治具の配線図を示す。下側ヒーターの配線図は冷却ファンを取り除いたものに等しい。



図 3.11: 冷却ファンを導入した。

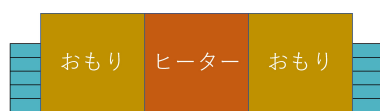
3.3.4 SUS シート/ファイバーカバー・竹製スペーサー・おもり

140 °Cで 30 分間ファイバーを加熱し、実際にファイバーの溶着を行った。しかし、図 3.12 のようにヒーターの脇の部分でファイバーが曲がってしまった。そこで、ファイバーの折れ曲りを抑制すべく、ファイバーの両端におもりを載せることにした (図 3.13a ,3.13b)。おもりには上ヒーターと同じように切り欠きが入っており、ファイバーを押しえつることができる。これらのおもりを上ヒーター治具の両脇に配置しファイバーを固定することで折れ曲りを抑えることができた (図 3.14)。

しかし、図 3.14 ではヒーターが接する境界部分で、まだ治具の食い込み跡が残っていた。そこで、治具とファイバーシートとの間にヒーター治具よりもファイバー方向の幅が大きい SUS シート (厚さ 0.1mm) を挟むことで、ヒーター治具がファイバー平面を垂直に押す力を分散させた (図 3.15a)。また、上の治具が斜面一番上のファイバーを斜面下方向に押し込んで食い込むのを解消するために、竹串を削って 1mm 角の棒を削り出し一番上のファイバーと上のヒーターの間に挟んだ (図

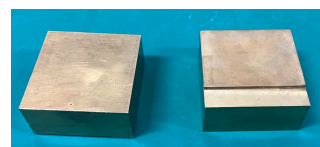


図 3.12: ヒーターの脇でファイバーが曲がった。



ヒーターの両脇におもりを置いて
ファイバーの変形を抑制する

(a) ヒーターの両脇におもりを載せる。



(b) おもり: 裏側には上側ヒーターと同じく切り欠きが入っている。

図 3.13: おもりを載せてファイバーの変形を抑える。

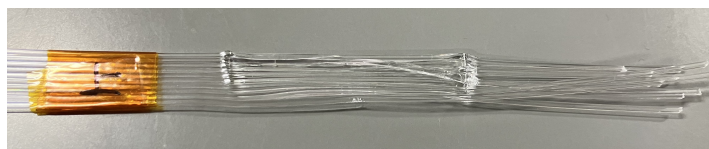
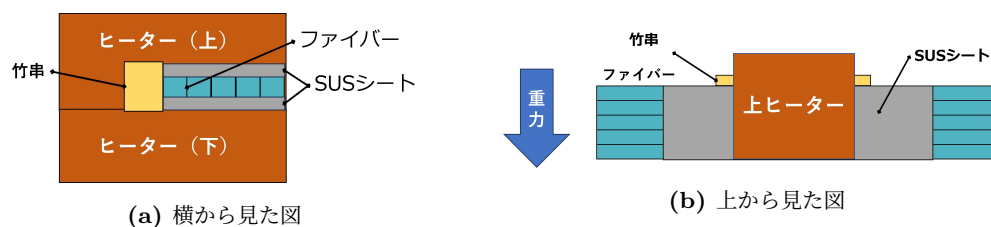


図 3.14: ファイバーの折れ曲がりには軽減されたが、治具の食い込み跡がまだ残っている。

3.15b)。



(a) 横から見た図

(b) 上から見た図

図 3.15: SUS シートでファイバーを挟み、斜面一番上のファイバーとヒーターの間に挟む。

図 3.16 に SUS シートと竹製スペーサーの写真を示す。SUS シートのサイズは 1 枚あたり $150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ である。竹製スペーサーは市販の竹串から 1 mm 角にカッターナイフで削り出して作成した。ノギスで測ったところ、径は 0.85 mm から 1.00 mm でばらついていた。

斜面一番上のファイバーを保護する 1mm 径角スペーサーは、当初 PTFE 板から切り出して加工する予定だった。しかし、加工時に樹脂が変形してしまうなどの理由から精度を出すのが難しかったため、竹串から削り出すことにした。

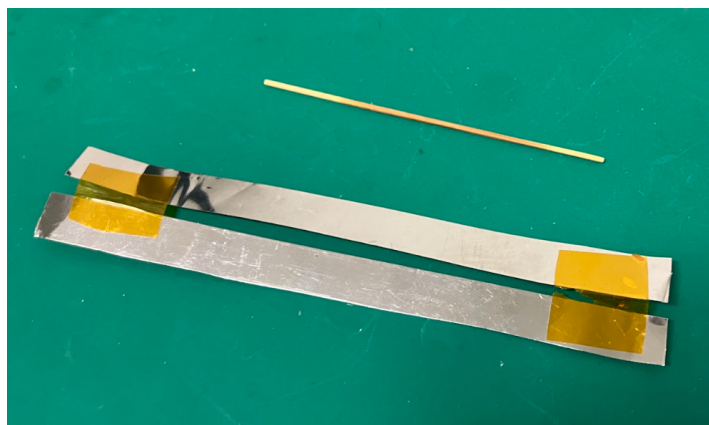


図 3.16: SUS シート (下) と竹製スペーサー (上)

改善後のファイバーの様子を図 3.17 に示す。治具の食い込み跡が軽減されたことがわかる。

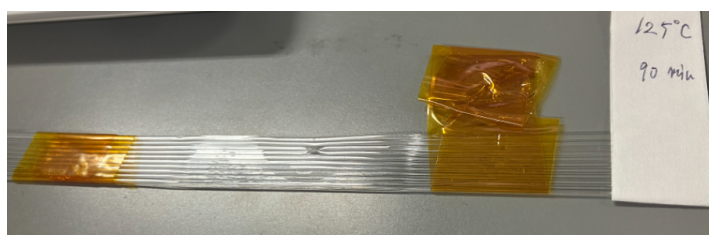


図 3.17: ファイバーにカバーをして溶着した。

3.3.5 温度調節器・冷却ファン

温度の立ち上げ時間を一定にするため、OMRON 社の温度調節器 E5CC-TRX3ASM-006 を 2 台使用し、上下のヒーターをそれぞれ独立に制御した。プログラムされた温度や時間は上下で共通している。また、上側のヒーターを制御する温度調節器には冷却ファンが接続された。

3.4 加熱パラメータの最適化

上記のセットアップで 1mm 角クリアファイバーの溶着試験を行い、ファイバーを溶着するための最適なパラメータを探索した。

3.4.1 パラメータの定義

温度調節器の制御温度 T_{control} と制御時間 t_{control} を図 3.18 のように 3 段階で設定した。

- まず初めの 10 分で制御温度 T_{control} まで上げる
- 次に設定した制御時間だけ制御温度を保つ
- 最後に冷却ファンで室温まで下げる

何種類かの制御時間と制御温度でクリアファイバーを溶着し、ファイバーを接着できる制御温度と制御時間の組み合わせを探索した。

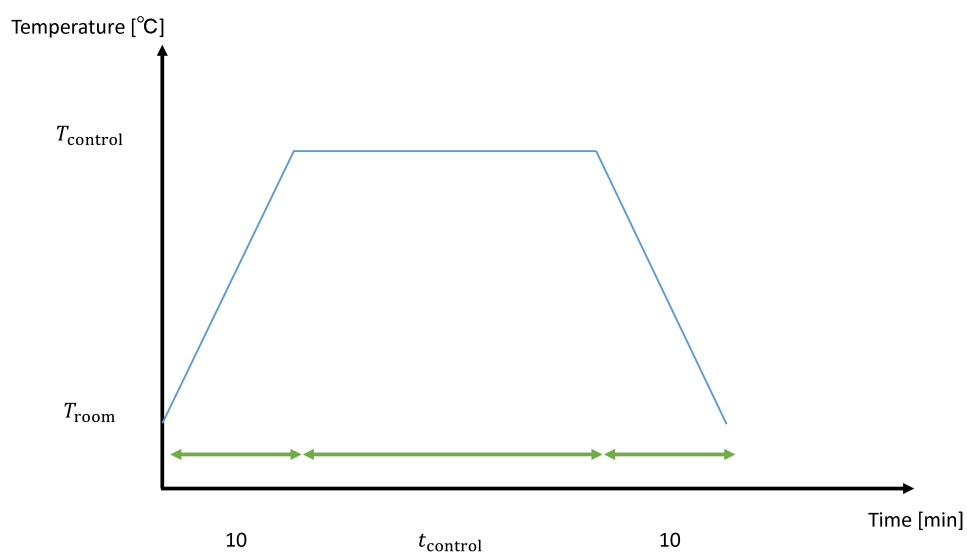


図 3.18: 制御温度と制御時間の設定

3.4.2 溶着テスト結果

溶着の結果を ◎, ○, △, ▲, × の 3 段階で評価して表 3.3 にまとめた。評価基準としては以下のとおりである。

- ◎: 全てのファイバーが接着されており、かつ変形していない。
- ○: 1,2 本溶着されていないファイバーがある。
- △: 溶着されているが剥がれやすい。
- ▲: 大きく変形している。
- ×: 接着されていない。

また、評価基準の例を以下の図 3.19a, 3.19b, 3.19c に示す。

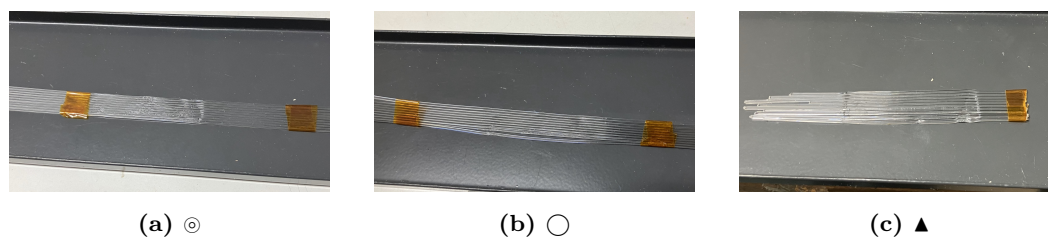


図 3.19: 溶着ファイバーの評価基準の例

表には上側ヒーターのみを ON-OFF 制御して溶着を行い、また、冷却ファンも無かったときのものも載せている。表 3.3 によると溶着温度と溶着時間がトレードオフの関係にあることがわかる。つまり高温で短時間または低温で長時間で、ファイバーが良く接着されている。しかし、低温側では溶着時間を延ばしても、下側のファイバー 1,2 本は溶着されなかった。また、高温側ではカバーやスペーサーでファイバーを保護しても、部分的に変形することがあった。

表 3.3 に記載したのは、ファイバーが熱溶着されたか否かであり、溶着したクリアファイバーの光量損失については次章で述べる。

表 3.3: 制御温度 T_{control} と制御時間 t_{control} を変えて溶着を行った際の結果: 黒字は上ヒーターの温度を基準とした ON/OFF 制御、赤字は上下のヒーターを独立に PID 制御した結果である。

temperature[°C] \ time[min]	2min	3min	5min	10min	20min	30min	60min	90min	100min	110min	115min	120min
125 °C												
130 °C	×	×	×	×	×	△	×	○	○	○	○	○
131 °C					○							
132 °C					○							
133 °C					○							
134 °C					○							
135 °C				○								
137 °C		△		⊙								
140 °C		○	○	▲		×						
145 °C	△											
150 °C		⊙										
160 °C		▲										
180 °C		▲										

第 4 章

溶着したクリアファイバーの光量測定

熱溶着するときにファイバーが損傷し、伝達光量が減少する可能性がある。本章ではクリアファイバーの片端から入射した LED 光をフォトダイオードで測定し、溶着前後の光量の変化を測定し光量損失率を求めた。また、溶着時の制御温度と制御時間を変化させて、損失ができる限り少ないパラメータの特定を目指した。

4.1 ファイバー内の光の伝播

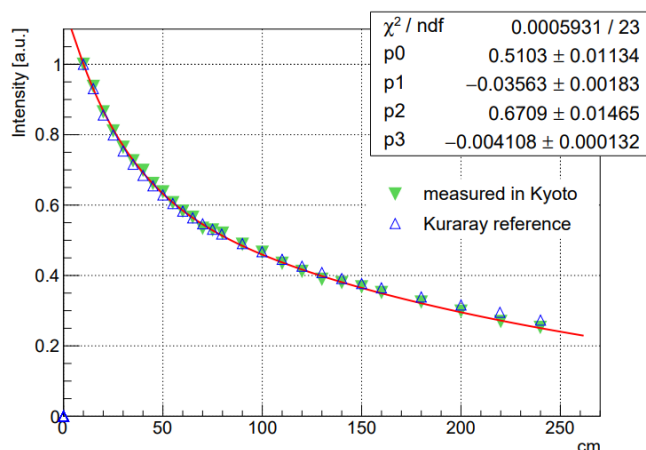


図 4.1: SCSF-78 の減衰長 [13] 全体に占める光量のうち、30cm ではコア光が 77%、2m ではコア光が 99.87% 含まれている。

ファイバーを伝搬する光にはコアを伝わる成分であるコア光と、クラッドを伝わる成分であるクラッド光がある。コア光はファイバーのコアとクラッドの全反射によって伝搬し、長い減衰長を持つ。一方で、クラッド光はクラッドと空気的全反射によって伝搬し、クラッド表面の傷や汚れなどが原因でより早く減衰する。図 4.1 に 2mm 角のシンチレーティングファイバー SCSF-78 の減衰

長を示す。赤線は光強度の測定値を 2 つの指数関数の和

$$F(p_0, p_1, p_2, p_3) = p_0 e^{(p_1 x)} + p_2 e^{(p_3 x)} \quad (4.1)$$

でフィッティングした結果であり、 p_1, p_3 がそれぞれ減衰長の逆数に対応する量である。短い減衰長は $28.1\text{cm} \pm 1.4\text{cm}$ 、長い減衰長は $243.4\text{cm} \pm 7.8\text{cm}$ である [13]。従って例えば、30cm ファイバーの測定においては、2m ファイバーよりも全体の光量に対するクラッド光の寄与が大きいと予想される。溶着ではクラッド部分を接合するためクラッドでの損失の方が大きいと期待される。そのため、短いファイバーで測定した光量損失率が大きかったとしても、それは主にクラッド光の寄与が大きいに由来し、コア光はそれほど損失せず検出器としての性能への影響も小さい可能性がある。

4.2 光量測定のセットアップ

4.2.1 光源と光検出器

■ 分光感度特性

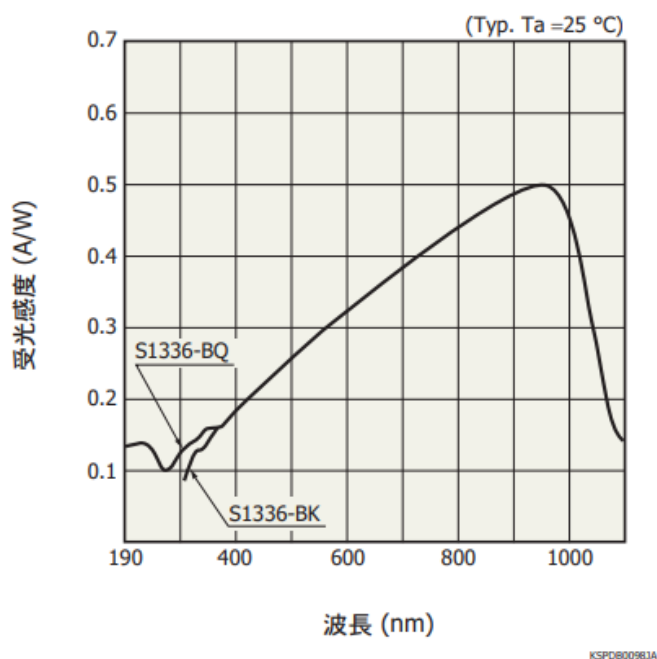


図 4.2: フォトダイオード S1336-5BQ の感度特性

本検出器で実装予定のシンチレーティングファイバーは、クラレ社の SCSF-78 である。これはコア内で発生したシンチレーション光を波長変換剤で 450nm の青色光をピークに持つスペクトラムに変換して伝搬する [17]。光量測定試験では青色光の損失特性を調べるため、光源として波長

$\lambda = 470\text{nm} \pm 5\text{nm}$ の青色 LED 光を DC 電源で駆動した。光検出器としては浜松ホトニクス製のフォトダイオード S1336-5BQ を使用した [18]。このフォトダイオードの感度特性を図 4.2 に示す。 $\lambda = 190\text{nm} \sim 1100\text{nm}$ と紫外から近赤外まで広い波長感度が特徴である。

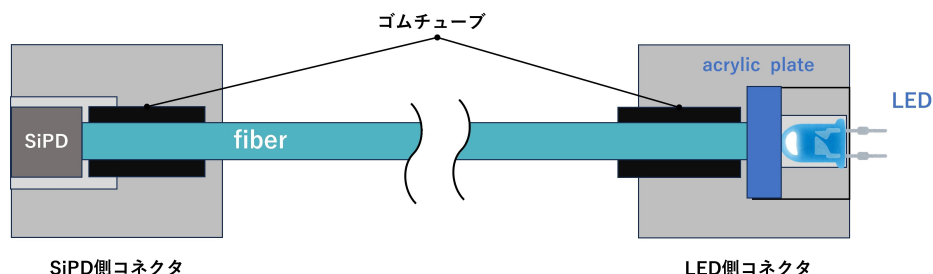


図 4.3: ファイバーの光量測定試験の模式図

図 4.3 に光量測定試験のセットアップを示す。測定の際にはセットアップを遮光シートで覆った。

4.2.2 ファイバーの固定

ファイバー端が LED やフォトダイオードから離れていたり、逸れた方向を向いている場合、検出光量の低下やばらつきによって、測定の精度と正確さが低下する。このため、ファイバーの向きを毎回同じように揃えて光源や光検出器と接触させるコネクタが必要である。そこでフォトダイオード側と LED 側の簡易なコネクタを 3D プリンタで造形した。測定時には、ファイバーが軽く固定されるように両端に切れ目を入れたシリコンゴムチューブをファイバーの両端に取り付けてコネクタに挿入した。コネクタ寸法の詳細については付録 B を参照されたい。

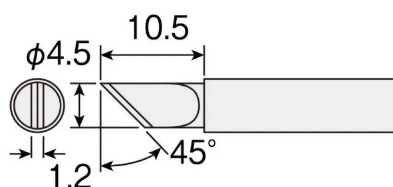
4.2.3 データロガー

フォトダイオードの読み出しには Graphtec 社のデータロガー GL100 と 4ch 電圧/温度端子モジュール GS-4VT を使用した [19]。測定はサンプリングレート 2 Hz で行った。

4.2.4 ファイバーの端面処理

ニッパーなどで切断したファイバー端面は平坦ではないため、ファイバーを伝搬してきた光が散乱してしまい、検出できる光量が減少してしまう。検出効率を高く保つためには研磨などでファイバー端面を平坦化する処理が必要である。

本研究では比較的簡易な端面処理方法としてハンダごてによる加熱処理を採用した。これは熱した鉄板に押し当てることによりファイバー端面を平坦化する方法である [20]。なお、本研究ではホーザン社の温調式ハンダごて HS-51 とハンダごてピット HS-51K02 を使用した。図 4.4a, 4.4b に使用したピットと端面処理の様子を示す。本研究では 150 °C に熱したピットを 5 秒間押し当



(a) ハンダごてピット HS-51K02

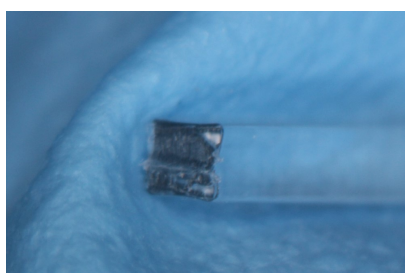


(b) ファイバー端面加熱処理の様子

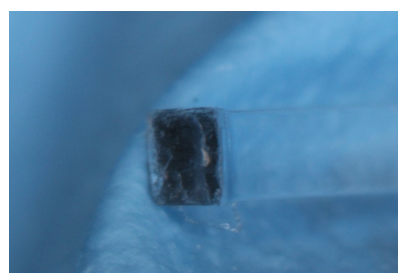
図 4.4: ハンダごてピットとファイバー端面加熱処理の様子

てた。

図 4.5a, 4.5b に端面処理前後の端面の様子を示す。処理前はファイバーから散乱した光が目に入るためファイバー断面が明るく見えるが、処理後は散乱光が減少し暗く見える。フォトダイオードでの検出光量は、ニッパーで切りっぱなしにした時と比べて平均して 2.6 倍程度改善した。



(a) 端面処理前のファイバー端



(b) 端面処理後のファイバー端

図 4.5: ホットプレート法による端面処理の前後変化

4.3 光量損失率の測定

4.3.1 各条件での測定手順

LED とフォトダイオードはそれぞれ 2 つずつ使用した。LED 及びフォトダイオードは定常電源で電圧をかけ、LED はその明るさが時間変化しないように一定の電流が流れるよう制御した。

溶着前後のフォトダイオードの出力電圧を比較することで、溶着によって損失した光量を見積もることができる。LED 照射の前後でペDESTAL を測定し、その平均を LED 照射時の信号から差し引いた値を用いる (図 4.6)。①, ②, ③ の測定時間はそれぞれ 10 秒間から 20 秒間程度である。

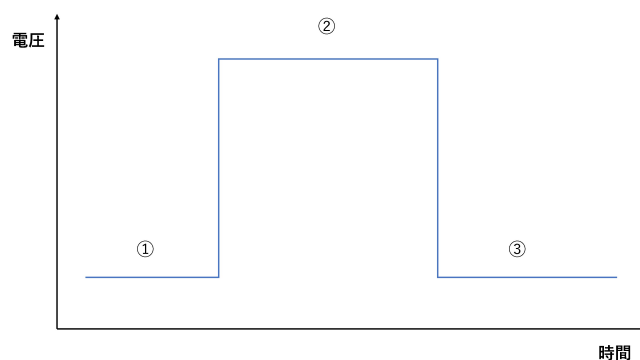


図 4.6: ペDESTALの補正:
①と③の平均をとって②から差し引く

4.3.2 ファイバー着脱の再現性の確認

LED1, 2 とフォトダイオード (PD)1, 2 に対して、それぞれ長さ 30cm のファイバーの着脱と測定を繰り返し、測定値のばらつきからコネクタとファイバーのカップリング再現性を調べた。

LED1 は PD1 と、LED2 は PD2 と組み合わせ、着脱と測定を 10 回行った。

図 4.7 に結果を示す。横軸は 4.3.1 節にしたがって補正したデータロガーの出力電圧である。

誤差率 σ_r (標準偏差と平均値の比) は LED1 と PD1 の組み合わせで 2.34%, LED2 と PD2 の組み合わせで 1.73% であり、十分な精度が得られた。

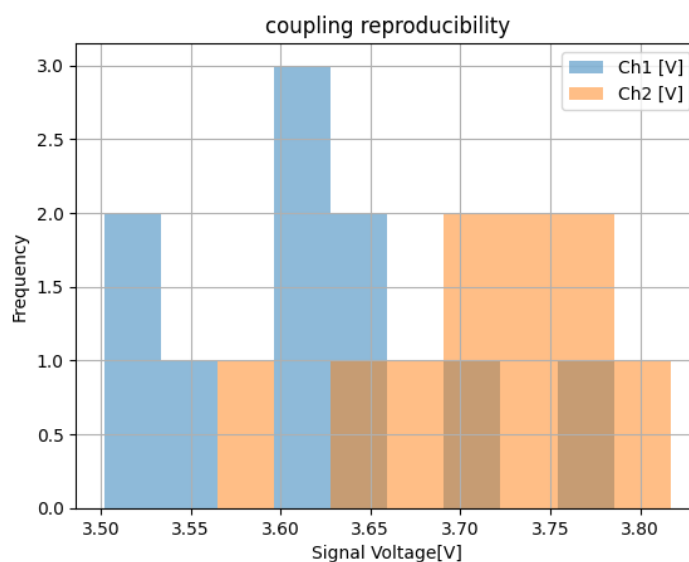


図 4.7: ファイバー着脱の再現性: Ch1 が LED1 と PD1 の組み合わせ、Ch2 が LED2 と PD2 の組み合わせである。

4.3.3 光量損失率の定義と誤差

ファイバー溶着前の測定値を A 、溶着後の測定値を B とする。このとき、溶着前後の光量差 $A - B$ を溶着前の光量 A で規格化した量を光量損失率として定義する。

$$\text{光量損失率} = \frac{A - B}{A} = 1 - \frac{B}{A} \quad (4.2)$$

そして、光量の測定値 A, B の誤差 σ_A, σ_B はそれぞれの測定値に 4.3.2 節で述べた誤差率 σ_r を乗じた値とした。ここで、光量損失率の誤差を求めると、2 つの測定は独立なので誤差の伝搬則より

$$\sigma_{\frac{B}{A}} = \frac{B}{A} \sqrt{\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2} \quad (4.3)$$

となるが、 $\sigma_A = A\sigma_r$ 、 $\sigma_B = B\sigma_r$ であるので、

$$\sigma_{\frac{B}{A}} = \sqrt{2} \frac{B}{A} \sigma_r \quad (4.4)$$

を得る。

4.4 2m ファイバーを用いた光量損失率の測定

4.4.1 方法

想定している検出器の横幅 2m と等しい長さのクリアファイバーを 10 本溶着し、溶着前後における光量損失率の測定を行った。

150 °C 3 分、137 °C 10 分の 2 つのパラメータセットで 2m のクリアファイバーで LED 側の端から 50cm の箇所を溶着し、伝達光量の測定を行った。さらに、150 °C 3 分では、LED 側の端からそれぞれ 100cm と 150cm の箇所も溶着し、溶着を行うごとに伝達光量の変化を調べた。

ここで相対光量を

$$\text{相対光量} = \frac{(\text{溶着後の信号電圧})}{(\text{溶着前の信号電圧})} \quad (4.5)$$

と定義する。すなわち (1-光量損失率) である。

図 4.8a と 4.8b に 10 本のファイバーそれぞれの相対光量を示す。横軸はファイバーの通し番号であり、溶着時にスロープの上側に並んでいたファイバーから順に番号を付けた。

1 回目の溶着後の平均光量損失率は 137 °C 10 分で 13.7% ± 3.2%、150 °C 3 分では 14.6% ± 1.2% だった。これは溶着 1 回あたりの光量損失率の目標値 5% にほど遠かった。また、下側のファイバーで損失率が大きくなる傾向が見られた。150 °C 3 分の 2 回目と 3 回目の溶着でさらに光量が損失していることが確認できる。クラッド光は 1 回目の溶着でほぼ全て損失していると考えられるので、クラッド光だけでなくコア光も損失していることが分かる。

これを踏まえて、よりよい溶着パラメータの組み合わせを探すことにした。

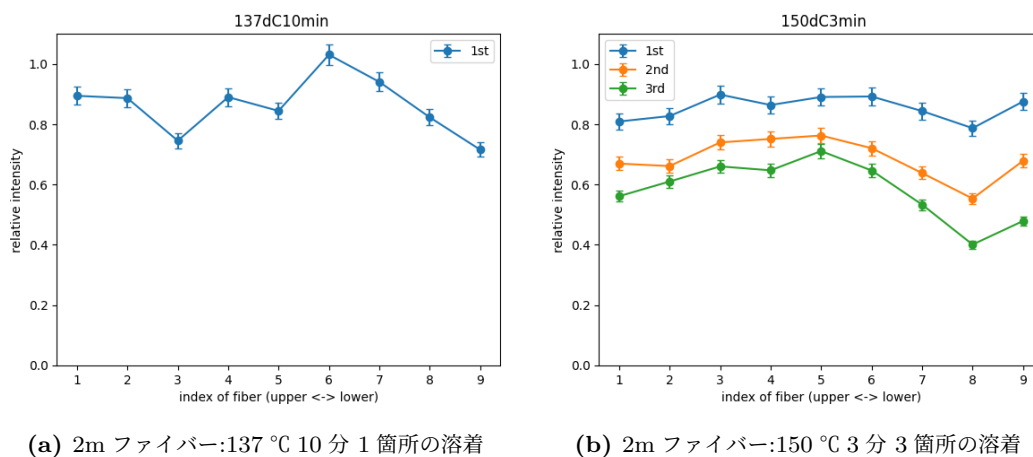


図 4.8: 2m ファイバーの溶着による光量の相対変化

4.5 30cm ファイバーを用いた光量損失率の測定

4.5.1 目的

より多くの溶着パラメータで光量損失率を測定するにあたり、2m 長よりも手軽な 30cm のクリアファイバーで、溶着前後におけるファイバーの光量変化を確認した。30cm ファイバーにおける光量損失率の目標値を 2m ファイバーの溶着時よりも緩めて 5% とした。これは 4.1 節で述べたとおり、30cm ファイバーではクラッドでの光量損失は 2m ファイバーよりも大きいと期待されるため、測定された光量損失率が大きかったとしても問題ない可能性があるからである。まずは 5% を目標に溶着条件を最適化し、その後、2m ファイバーで確認する方針とした。

4.5.2 方法



図 4.9: 30cm ファイバー光量測定試験の様子

30cm ファイバー光量測定の様子を図 4.9 に示す。ただし、この測定では 2 つのファイバーに LED 光を入射して測定を同時に測定を行ってしまったために互いのクロストーク光が混入してしまい、実際よりも光量を大きく見積もってしまった。

溶着は以下の 4 組のパラメータで行った。4.4 節で良い結果が得られなかった 137 °C 10 分と 150 °C 3 分についても、30cm と 2m の長さによる違いを比較するために測定を行った。

- 125 °C 120 分
- 132 °C 20 分
- 137 °C 10 分
- 150 °C 3 分

4.5.3 結果

図 4.10a , 4.10b, 4.10c, 4.10d はそれぞれ、先ほどの 4 組のパラメータにおける実験結果を温度の低い順に並べたものである。また、各パラメータごとに、10 本のファイバーにおける光量損失率の平均値を表 4.1 にまとめる。高温長時間よりも低温短時間の方が光量損失率が小さい傾向にあるが、最も光量損失率が小さい 125 °C 120 分でも目標である 5% を達成することができなかった。

表 4.1: 各溶着パラメータにおける光量損失率の平均値

125 °C 120 分	137 °C 10 分	131 °C 20 分	150 °C 3 分
6.8% ± 0.8%	9.9% ± 0.6%	8.2% ± 0.6%	19.3% ± 0.5%

4.6 118 °C 12 時間溶着

目標である 5% に到達するためにはより低い温度でより長い時間の溶着を行う必要があると考えた。そこで、溶着時間を 12 時間と 24 時間に設定し、溶着できる温度の下限を探した。表 4.2 に探索結果を示した。

溶着度合いの評価基準は 3 章と同じで以下のとおりである。

- ⊙: 全てのファイバーが接着されており、かつ変形していない。
- ○: 1,2 本溶着されていないファイバーがある。
- △: 溶着されているが剥がれやすい。
- ▲: 大きく変形している。
- ×: 接着されていない。

12 時間でも 24 時間でも溶着できる温度の下限は 118 °C であった。

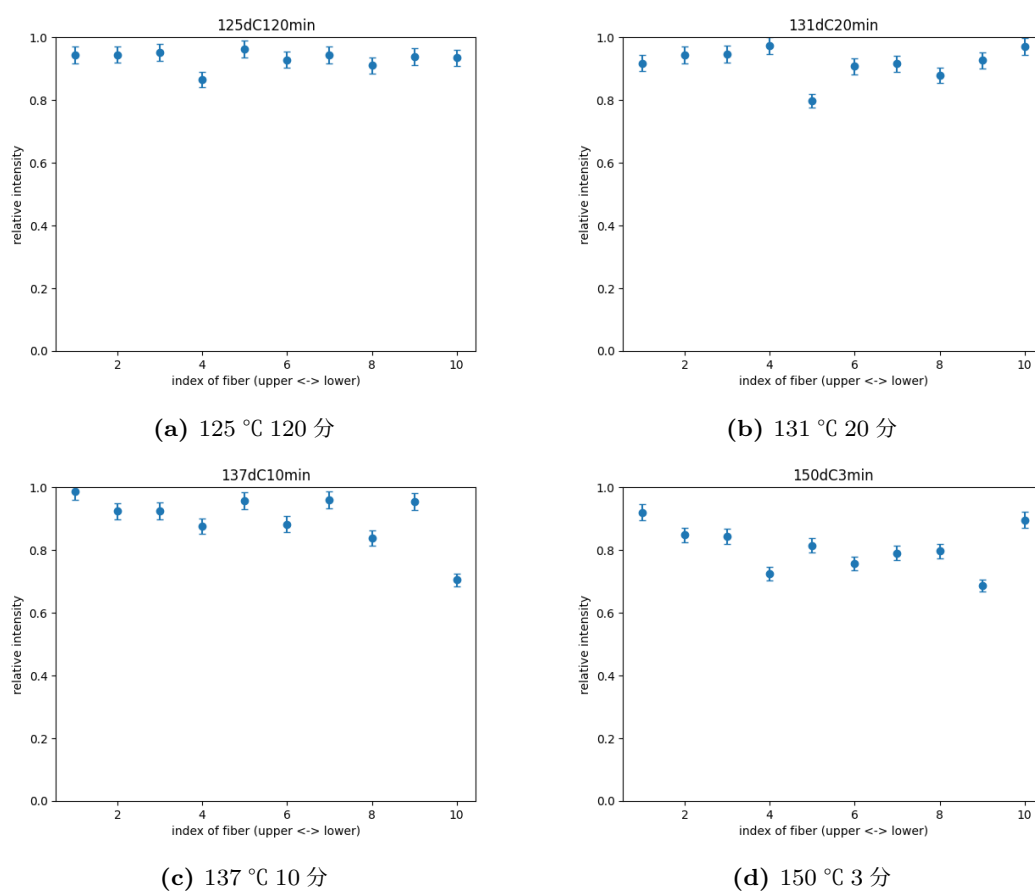


図 4.10: 30cm ファイバーにおける光量損失率の測定結果。温度が高くなるほど損失率が大きくなる傾向がありそうである。

表 4.2: 溶着時間を 12 時間と 24 時間で溶着を行った際の結果

温度 [°C]	時間	
	12	24
115		×
116	△	
117		△
118	○	○
120		○

そこで、118 °C 12 時間であれば溶着後の光量損失率が少ないと考え、このパラメータで溶着を行い光量変化の測定を行った。その結果を図 4.11 に示す。光量損失率の平均値は 5.2% ± 0.7% とほぼ目標を達成した。

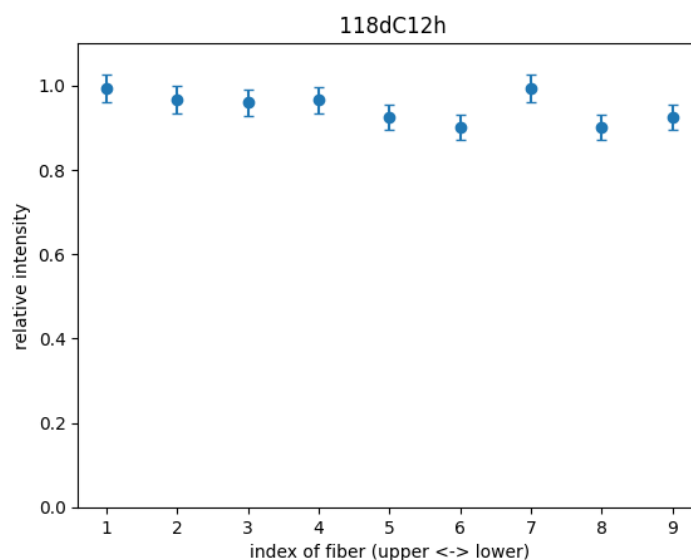


図 4.11: 118 °C 12 時間の光量測定

4.7 溶着再現性の確認

溶着における再現性を確認するため、新しい 30cm のファイバーを 10 本用意し、125 °C 120 分の 2 回目の溶着を行った。1 回目と 2 回目の溶着の結果を図 4.12 に示す。1 回目の溶着は図 4.10a の 125 °C の結果と同じものである。2 回目の溶着の光量損失率は 16% ± 3% と一回目に比べて損失もばらつきも大きくなった。

実は、他の溶着パラメータでは、溶着ごとのばらつきは外見からも確認できた。例として 137 °C 10 分で、光量測定試験に使用したサンプルと 3 章において溶着度合いを調べるために作成したサンプル (溶着テスト用サンプル) の様子を図 4.13a, 4.13b に載せる。光量測定用サンプルにおいて一番下のファイバー赤矢印で示した箇所にファイバーの変形が見られる一方で、溶着テスト用サンプルでは変形が見られなかった。

4.8 まとめと考察

これまでの結果を図 4.14 にまとめた。横軸は温度順に並べた溶着パラメータで、縦軸は光量損失率である。

30cm ファイバー光量測定では低い温度ほど光量損失率が小さくなる傾向があり、118 °C 12 時間

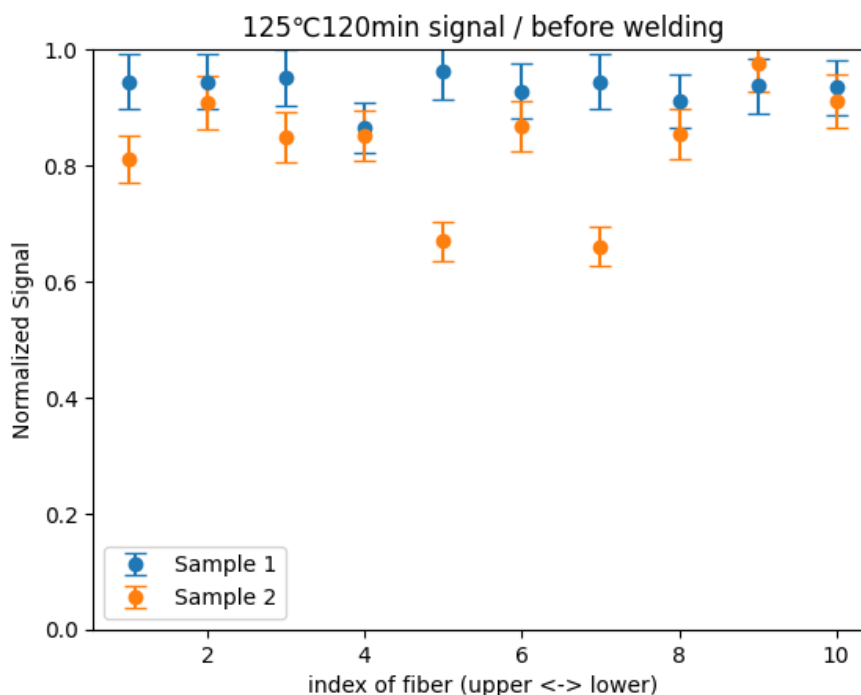
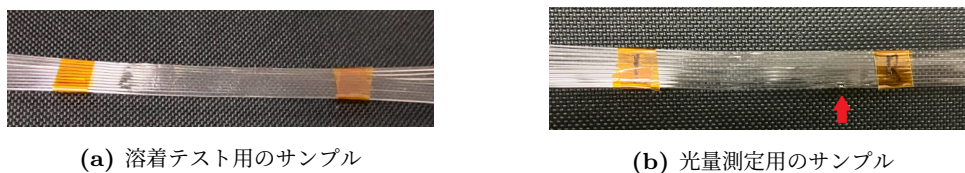


図 4.12: sample1, 2 はそれぞれ 1 回目と 2 回目に溶着したファイバーの結果



(a) 溶着テスト用のサンプル

(b) 光量測定用のサンプル

図 4.13: 溶着テスト用サンプルと光量測定用サンプルの比較。光量測定用サンプル一番下のファイバーに変形した跡が確認できる。

の溶着では 5% のほぼ目標値を達成した。しかし、制御温度と制御時間を揃えても溶着ごとのばらつきが大きく、この傾向が有意だと結論づけることはできない。使用したクリアファイバーはロール状に巻き付いていたものを切り出して使用しており、緩くカーブしていた。今回の試験では溶着する際にファイバーの曲がり方を統一せずランダムに並べていた。溶着のばらつきの原因特定のためには溶着時のファイバーの向きを統一することや、溶着システムを複数回運転したときの溶着治具温度分布の再現性を調べることなどが必要だと考えられる。

また、今後の開発方針としては 118 °C 12 時間で 2m クリアファイバーの目標値である 5% を達成したか調査し、実際にシンチレーティングファイバーを用いて、溶着がコアの蛍光剤に与える影響を調べる必要がある。

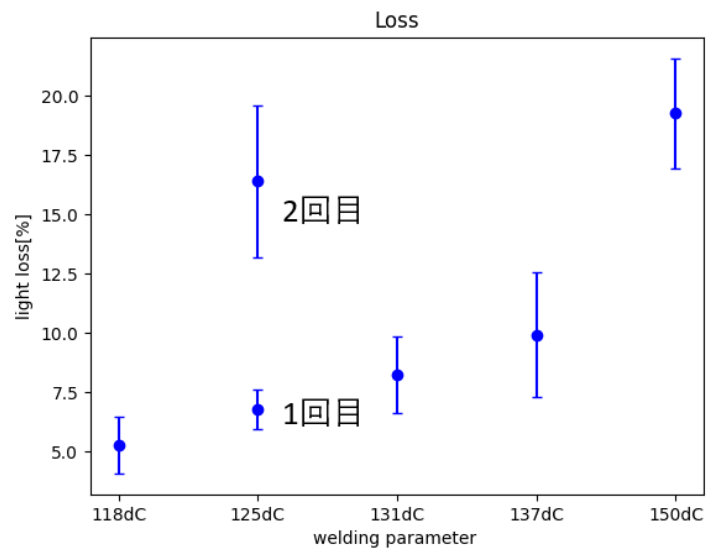


図 4.14: 溶着パラメータごとの光量損失率。誤差棒は標本標準偏差を表わす。

第5章

耐水性テープによるファイバーシート制作

溶着に代わるファイバーシートの製法として薄い耐水テープによるファイバーの固定を検討する。図 5.1 のようにシート状に並べたファイバーを横断するようにテープで固定する方法を考えている。

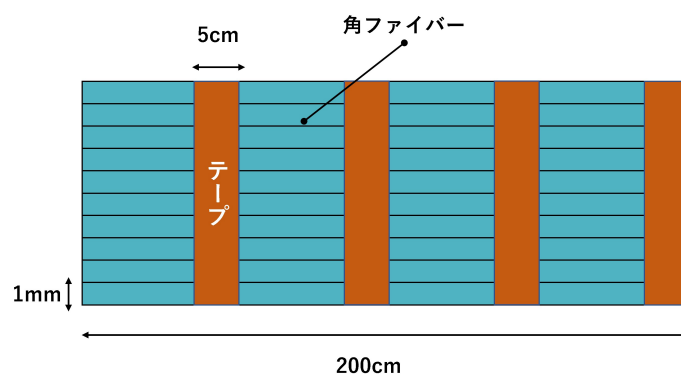


図 5.1: 耐水テープによる固定の例

今回使用したテープはセキスイの OPP テープ E No.882E で、52 μm 厚のポリプロピレン基材にアクリル系粘着剤が塗布された物である。ポリプロピレンは優れた機械強度を持ち [21]、テープの厚みを薄くできることからこのテープを選定した。10 年スケールでの運用を想定しているため、水中におけるテープの粘着力の耐久性の調査が必要である。そこで、加速劣化試験を行い粘着力の耐久性を測定した。

5.1 加速劣化試験の原理

ここで想定される劣化は化学反応によるものであり、その反応速度定数 k は以下のアレニウスの式で記述される。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5.1)$$

ここで A は定数、 R は気体定数、 T は反応時の絶対温度、 E_a は活性化エネルギーである。活性化エネルギーが既知であるならばアレニウスの式より直ちに、ある温度条件下での反応が常温の何倍の速度進むかを知ることができる。しかし、今回の実験ではテープに使用されているアクリル系粘着剤の活性化エネルギーは不明である。このような場合における寿命の推定方法を図 5.2 とともに以下に示す [22]。

まず、いくつかの温度で加速時間 (試験時間) を変えながら粘着剤の粘着力を測る。次に粘着剤の寿命強度に達するまでの時間をそれぞれの温度で内挿または外挿によって求める。こうして得られた温度ごとの寿命から、粘着剤の寿命が温度の関数として求まる。これを式 5.1 にもとづいて低温側に外挿することにより、検出器が実装される温度における耐用年数を求めることができる。

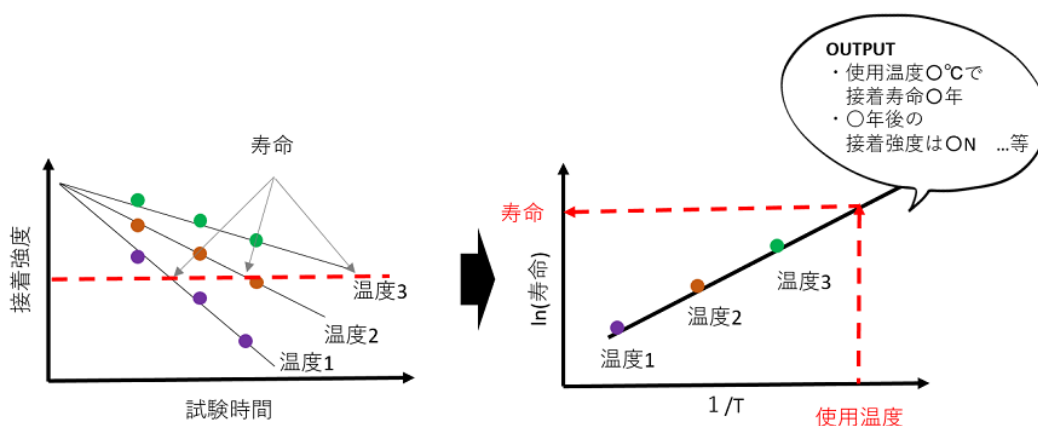


図 5.2: 加速劣化試験でテープの寿命を見積もる方法 [22]

5.2 加速のセットアップ

角ファイバーは表面が完全な平面ではなく、接着の条件を一定に保つのが難しい。また、熱変形してしまうため、加速劣化試験ではファイバーの代わりとしてファイバーのクラッドと同じ素材であるアクリル板で行った。水中での加速劣化試験を行うため、電気ポットを用いて加速劣化試験を行った。

模擬加速試験

加速劣化試験の本番を行う前に模擬加速試験を行った。片面にテープを貼った厚さ 1mm のアクリル片をポットに入れたところ、アクリル片がテープを貼った方に湾曲してしまった (図 5.3)。これはテープとアクリルの熱膨張率の違いによって接着面に張力が働いたことが原因だと考えられる。これを踏まえて本番の加速劣化試験ではこの接着面張力を相殺するために、次で述べるようにアクリル板の両面に裏表で重なるようにテープを貼った。



図 5.3: 模擬加速試験のサンプル: 熱膨張率の違いから湾曲してしまった。

加速劣化試験用サンプル

本研究では粘着力の指標としてファイバーシートの形状を保つのに重要と考えられる 90° 剥離応力と剪断応力を採用した (図 5.4a, 5.4b)。剪断には、被着体を引っ張る引っ張り剪断と、押し合う圧縮剪断があるが、ここでの剪断応力は前者の引っ張り剪断を意味する。

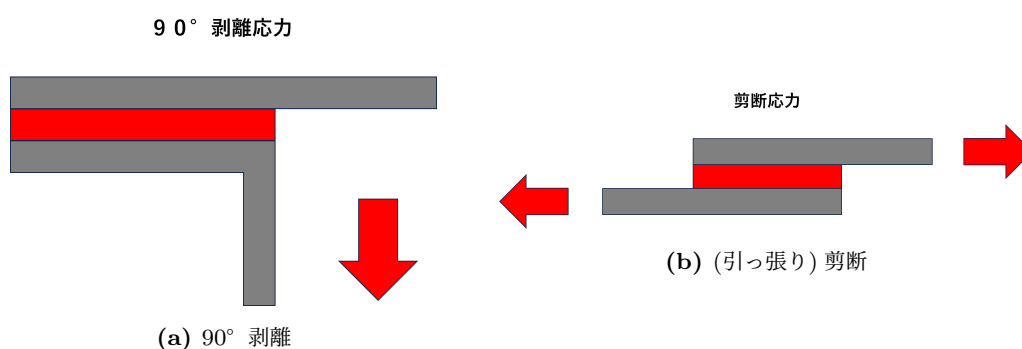


図 5.4: 応力の種類: 赤色は粘着剤、灰色は被着体を表わす。この試験ではテープの基材とアクリル板が被着体である。矢印の向きは基材が引っ張られる向きを表わす。

それぞれの応力を測るためのアクリル板サンプルを図 5.5a, 5.5b に示す。90° 剥離試験用サンプルにはアクリル板と交差するように、剪断試験用サンプルには、アクリル板に沿った方向にテープを貼った。1 枚のテープとアクリルの接触面積は、90° 剥離試験用サンプルで 5 cm × 5 cm, 剪断

試験用サンプルで $2\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ である。また、前述のとおり、アクリル板の両面に裏表で重なるように、 90° 剥離試験用サンプルでは片面 2 枚ずつの計 4 枚、剪断試験用サンプルでは片面 1 枚ずつの計 2 枚のテープを貼った。



(a) 90° 剥離試験用サンプル

アクリル板のサイズは $150\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ であり、テープ 1 枚あたりの接触面積が $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ となるように裏表に計 4 枚のテープを貼った。



(b) 剪断試験用サンプル

アクリル板のサイズは $150\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ であり、テープ 1 枚あたりの接触面積が $2\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ となるように裏表に計 2 枚のテープを貼った。

図 5.5: 加速劣化試験で使用したサンプル

電気ポット温度定常性の確認

70°C 、 80°C 、 90°C の 3 つの温度水準で加速劣化試験を行うこととした。電気ポットは、 70°C と 80°C では ANABAS 社の EP-D500、 90°C では、東芝の PLK-40VFX を使用した。まず始めに設定温度 70°C 、 80°C 、 90°C のポットそれぞれで、30 時間にわたって温度を測定し、水の温度を一定に保つことができるか確認した。それぞれのポット温度の時間変化の様子を図 5.6 に示し、それぞれの設定温度に対する温度の平均値と標準偏差を表 5.1 に示す。それぞれの設定温度で十分な温度定常性を持つことが分かった。

表 5.1: 70°C 、 80°C 、 90°C に設定したポット内温度の平均値と標準偏差

設定温度 [$^\circ\text{C}$]	70	80	90
平均値 [$^\circ\text{C}$]	70.9	81.2	90.5
標準偏差 [$^\circ\text{C}$]	0.2	0.3	0.1

手順

加速劣化試験の方法について述べる。前小節で述べたような剥離試験用サンプルをポットの中に複数枚入れる。 90° 剥離試験用サンプル 1 枚と剥離試験用サンプル 2 枚を 1 セットとする。

ある加速時間での劣化を測定する際に 4 枚のテープで測定を行うので、 90° 剥離試験用サンプルは 1 つ、剥離試験用サンプルは 2 つ必要になるためである。サンプルは加速開始から 1 日後にまず

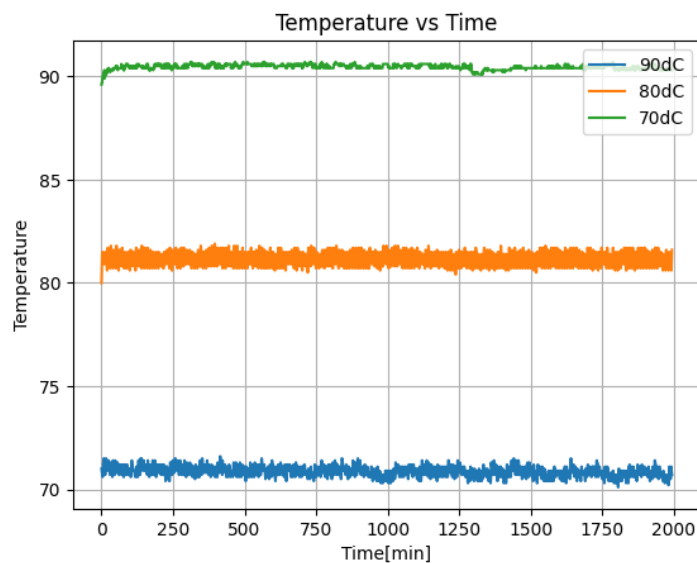


図 5.6: 70 °C、80 °C、90 °C に設定したポット内温度の時間変化

1 セット取り出し、その後は 2 日おきに 1 セットずつ取り出して測定した。

5.3 粘着力の限界強度

検出器内でファイバーシートは鉛直に設置される。テープの接着面も鉛直である。従って剪断強度はファイバーの自重に対して安全率も含めて強い必要がある。剥離強度はファイバーの自重程度あれば地震による横方向の加速度 0.3 G に安全率 3 で耐えることができる。

水中では浮力が働くため自重は大幅に低減するが、メンテナンス時には検出器から水を抜くことが想定されるため、ここでは空気中での自重を考える。図 5.1 のように幅 2m のファイバーシートにテープを 4 箇所貼った場合を考える。

このとき、ファイバーとテープ 4 枚の接触面積は、テープの幅が 48 mm なので

$$1 \text{ mm} \times 48 \text{ mm} \times 4 = 192 \text{ mm}^2$$

である。

一方で、ファイバーコア (ポリスチレン) の密度 1.05 g/cm^3 とクラッド (PMMA) の密度 1.19 g/cm^3 、さらにクラッドがファイバー径 (1 mm 角) の 2% の厚みを持つことを用いてファイバーの線密度 λ を計算すると、 $\lambda = 1.06 \times 10^{-2} \text{ g/cm}$ と求まる。従って長さ 2m のファイバー質量は、

$$2 \text{ m} \times 1.06 \times 10^{-2} \text{ g/cm} = 2.12 \text{ g}$$

なので、ファイバーの自重によりテープにかかる力は

$$\frac{2.12 \text{ g}}{200 \text{ mm}^2} = 1.06 \times 10^{-2} \text{ g/mm}^2$$

となる。そこで、安全率を 3 とし、剪断の限界強度を $3.2 \times 10^{-2} \text{ g/mm}^2$ 、剥離の限界強度を $1.1 \times 10^{-2} \text{ g/mm}^2$ とする。試験用サンプルのテープとアクリルの接触面積を用いて試験の荷重に換算すると、限界強度は剪断試験で 32 g 剥離試験で 25.4 g となる。

5.4 引張試験: セットアップ・実験方法

5.4.1 90° 剥離試験

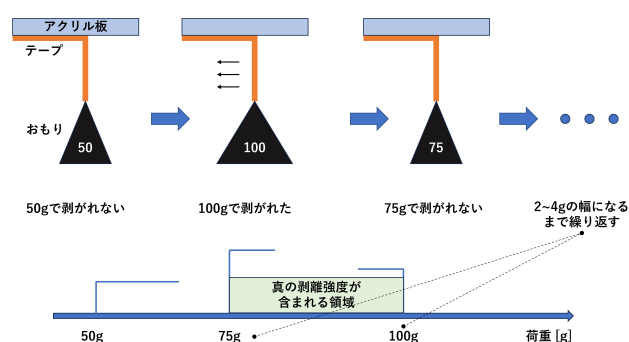
図 5.7 に 90° 剥離試験のセットアップと実験方法の模式図を示した。テープ端に荷重をかけ、1 分間の間に剥離が発生する荷重を二分探索で調べ、剥離が生じるギリギリの荷重を接着力の剥離強度とした。剥離強度の測定は以下の手順で行った。

- 油性マーカーでアクリルとテープの剥離境界をなぞってテープに線を引き。
- おもりをのせた後にそっと手を離し 1 分間待つ。
- もう一度線を引き、1 分前に引いた線と少しでも別れているか否か調べる。
- 線が少しでも別れている場合はより軽い荷重に変更し、線が分離して見えない場合はより重い荷重に変更する。

このように二分探索を行い、真の剥離強度を含む領域の幅が 2 g ~ 4 g になるまで繰り返し、その中央値をテープの剥離強度とした。



(a) 剥離試験のセットアップ: 荷重をかけて剥離の様子を見る



(b) 左図を横から見た断面図である。二分探索による測定手順の例: 50g で剥がれない → 100g で剥がれた → 75g で剥がれない … という操作を繰り返し、真の剥離強度を含む領域の幅が 2 g ~ 4 g になるところで終了する。

図 5.7: 剥離試験の方法

5.4.2 剪断試験

次に剪断試験の方法について述べる。

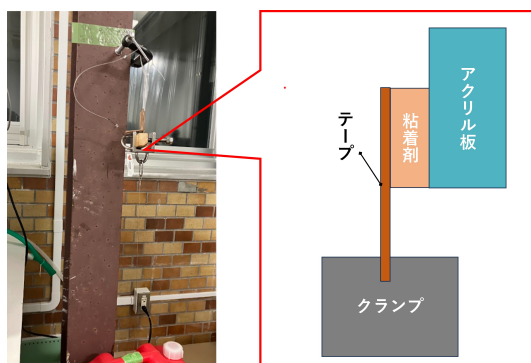


図 5.8: 剪断試験セットアップ: 赤色のタンクに水を注いで荷重をかける

セットアップを図 5.8 に示す。剪断試験用のアクリルには 2 箇所穴が空いており、この穴に結束バンドを通し、鉄柱に固定した万力に吊り下げた。この吊り下げたサンプルのテープ部分をクランプで挟み、空のポリタンクに繋がれたワイヤーで接続した。その後、水の入った別のポリタンクからこの空のポリタンクへと、テープとアクリルが破断するまで給油ポンプを使って少しずつ水を注いだ。破断時のポリタンクの質量とクランプ系の質量の合計をテープの剪断試験とした。

5.5 予熱による準備

一般に、粘着力は接触開始からの時間経過で粘着力は上昇し、最終的には平衡に達する。これは接触面における粘着剤の時間流動が原因とされている [23]。長期的な劣化を加速試験で再現するためには、粘着力が平衡に達してから水中での加速を開始する必要がある。平衡に達するまでの時間は 24 時間程度とされるが、この時間を短縮すべくポットでの加熱の前に恒温槽で予熱し、粘着力の上昇を加速することにした。

60 °C の恒温槽でサンプルを加熱し、15 分ごとに恒温槽から取り出して粘着力を測定した。加熱の際には、アクリル板の上にアルミ板を載せて一様に荷重をかけた。この結果を図 5.9 に示す。縦軸は接着力、横軸は 60 °C の恒温槽に入っていた総時間である。15 分加熱時には粘着力が過熱前の 3~4 倍になったが、30 分加熱時の粘着力は 15 分加熱時のそれと変わらないことから、15 分の加熱で既に平衡に達していたと考えられる。なお、恒温槽で予熱直後の 90° 剥離強度は平均で 203.5g、剪断強度は平均で 8.10kg であった。

この結果を踏まえて、加速劣化試験では、60 °C の恒温槽で 30 分間予熱した後にポットに入れることとした。

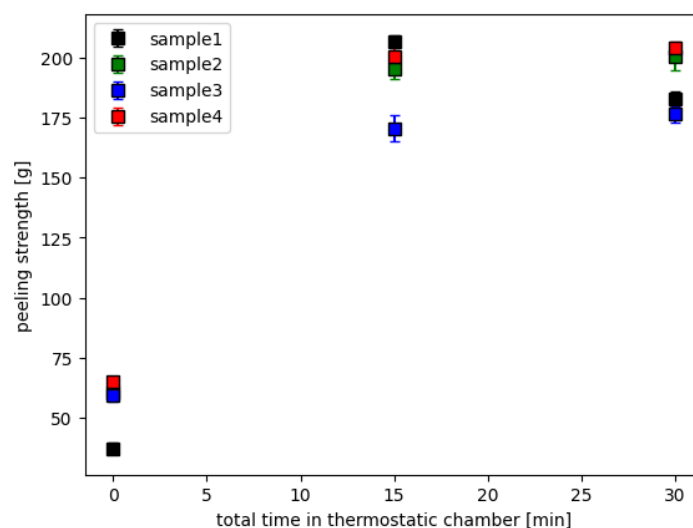


図 5.9: 60 °Cの恒温槽で温めた時の 90° 剥離強度の変化。ここでの誤差棒は、おもりのステップサイズによる。

5.6 測定の再現性による誤差の付け方

本測定では個々の測定に手間がかかるため測定できるサンプル数が限られる。そこで、以下のように誤差をつけた。加速条件などは異なるが、強度の測定の方法は同じであると考えられる測定 A と B について議論する。測定 A と測定 B それぞれにおいて複数のサンプルで得られた平均値を \bar{X}_A 、 \bar{X}_B 、標本分散を S_A^2 、 S_B^2 、平均値に対する標本分散の比を $s_A^2 = \frac{S_A^2}{\bar{X}_A^2}$ 、 $s_B^2 = \frac{S_B^2}{\bar{X}_B^2}$ とする。

再現性誤差率 σ_r は s_A^2 の誤差 $\sigma_{s_A^2}$ と s_B^2 の誤差 $\sigma_{s_B^2}$ での重み付け平均をとって、

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\frac{s_A^2}{\sigma_{s_A^2}^2} + \frac{s_B^2}{\sigma_{s_B^2}^2}}{\frac{1}{\sigma_{s_A^2}^2} + \frac{1}{\sigma_{s_B^2}^2}}} \quad (5.2)$$

とできる。ここで、サンプル数 n を持つ標本集団における分散 S^2 の標準偏差 σ_{S^2} は母分散 σ^2 を用いて

$$\sigma_{S^2} = \sqrt{\text{Var}\{S^2\}} = \sigma^2 \sqrt{\frac{2}{n-1}} \quad (5.3)$$

なので、これを代入し (ただし母分散 σ_A^2 と σ_B^2 の代わりに s_A^2, s_B^2 を用いて)

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\frac{s_A^2}{\{s_A^2 \sqrt{\frac{2}{n_A-1}}\}^2} + \frac{s_B^2}{\{s_B^2 \sqrt{\frac{2}{n_B-1}}\}^2}}{\frac{1}{\{s_A^2 \sqrt{\frac{2}{n_A-1}}\}^2} + \frac{1}{\{s_B^2 \sqrt{\frac{2}{n_B-1}}\}^2}}} \quad (5.4)$$

$$= \sqrt{\frac{\frac{n_A-1}{2s_A^2} + \frac{n_B-1}{2s_B^2}}{\frac{n_A-1}{2(s_A^2)^2} + \frac{n_B-1}{2(s_B^2)^2}}} \quad (5.5)$$

となる。3つ以上の測定 A,B,C,... を組み合わせる場合も同様に、 $\sigma_{s_A^2}, \sigma_{s_B^2}, \sigma_{s_C^2}$ で重み付け平均をとる。

このようにして、条件の異なるサンプルの測定も用いて、測定の再現性の誤差を決めた。ある測定 M の誤差を付けるには、測定で得た平均値を X_M 、測定のサンプル数を n_M として

$$\sigma_{X_M} = \frac{X_M \sigma_r}{\sqrt{n_M}} \quad (5.6)$$

とすればよい。

5.7 加速劣化試験の結果

剥離試験の結果を図 5.10 に示す。横軸が加速した時間で縦軸が剥離強度である。ただし、強度を図 5.9 の恒温槽で 30 分予熱した直後の平均粘着力で規格化した相対強度で表わしている。

$$\text{Normalized strength} = \frac{(\text{ポット加速後の粘着力})}{(\text{恒温槽で 30 分予熱したときの粘着力})} \quad (5.7)$$

である。

70 °C と 80 °C については減少傾向が確認できた。90 °C については減少した後上昇する傾向が確認された。90 °C のポットでは、加速から 195 時間後にテープの一部が水面上に出ている剥離試験用サンプルが確認された。湯気が蒸気穴から出ており、ポット内の水が蒸発して水位が低下したことが原因であると考えられる。接着部に水分が侵入して接着強度が低下しても、乾燥して水分を追い出すとある程度接着強度が回復することが知られている [24]。90 °C における粘着力のばらつきは、水面から出たテープの粘着力復活による可能性がある。

剪断試験の結果を図 5.11 に示す。剥離の場合と同様に、横軸は加速した時間で、縦軸は恒温槽で予熱した直後の粘着力で規格化した剪断強度である。剪断試験でも剥離試験と同様 70 °C の方が 80 °C と 90 °C よりも接着力の減衰が速かった。

なお 90 °C の剪断試験ではサンプルが曲がってしまった (図 5.12)。そのためそれぞれの測定で剪断強度を正確に測れているわけではないが、アクリル板の両面に貼ったテープで測定しているので、偏りはある程度はキャンセルできていると推測している。

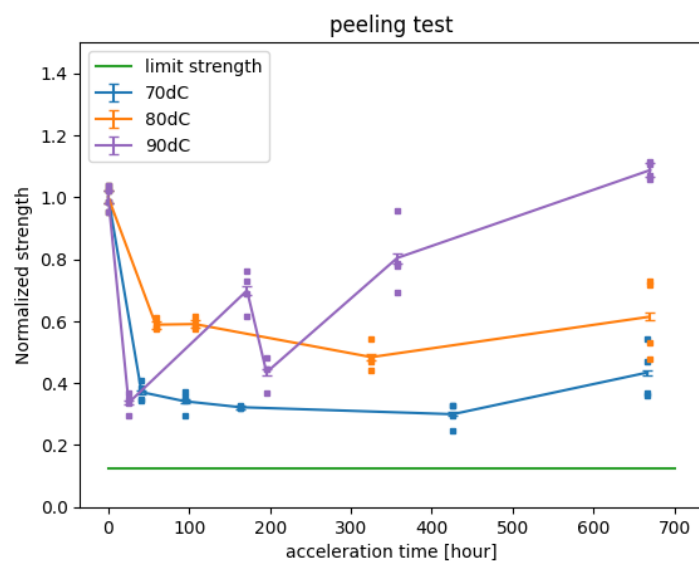


図 5.10: 90° 剥離試験の結果: 実線は各条件での測定結果の平均値を結んでいる。個々の点はサンプルの測定値。

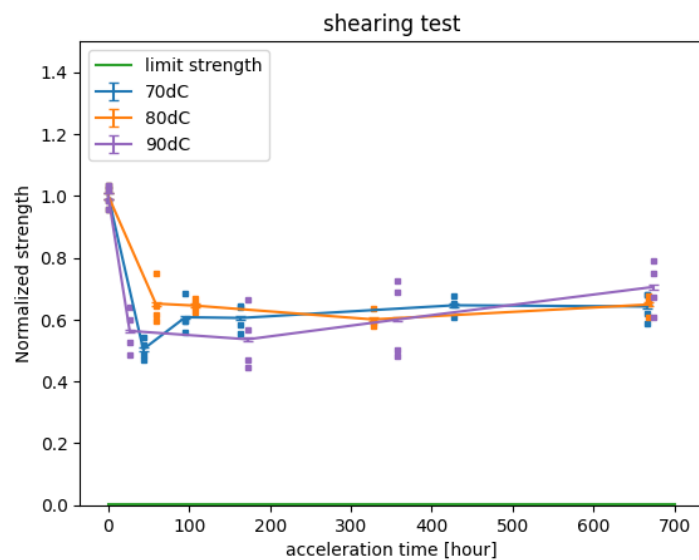


図 5.11: 剪断応力の測定結果: 実線は各条件での測定結果の平均値を結んでいる。個々の点はサンプルの測定値。

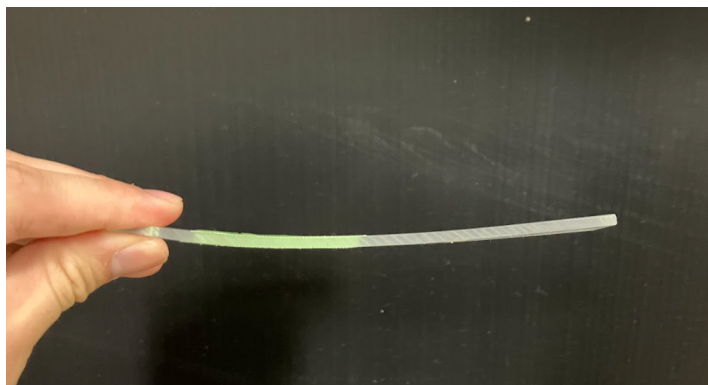


図 5.12: 90 °Cで加速した剪断試験のサンプル

5.8 考察

上記の結果に対してテープの耐久性を評価する。5.3節で決めたテープの限界強度のうち、剥離の限界強度 25.6 g を Normalized peeling strength に換算すると、限界強度は 0.123 である。加速劣化試験を行ったサンプルで確認された最低値は 0.4 程度であり、90° 剥離の限界強度を下回るにはまだ十分な余裕がある。剪断応力は剥離応力に比べて 40 倍大きいためテープの限界強度を下回るにはさらに余裕がある。剥離試験では加速劣化試験における粘着力の減衰が確認できたが、70 °C の条件では 80 °C よりも接着力は早く減衰しており、アレニウスの反応式による接着剤の劣化では説明できない。また、剪断試験では温度による顕著な違いは確認できなかった。

また、文献 [25] や [26] によると、ガラス転移温度を超える温度での加速劣化試験は推奨されていない。アクリル板の素材である PMMA のガラス転移温度はばらつきが大きく、おおよそ 50 °C から 120 °C である [27]。この温度範囲は今回の加速劣化試験における温度水準点 70 °C・80 °C・90 °C を含んでおり、PMMA のガラス転移によって影響を受けた可能性が否定できない。なおアクリル系粘着剤のガラス転移温度は、文献 [28] で -40 °C と測定されているように十分低いので考慮する必要はないと考えられる。

今後は、70 °C・80 °C・90 °C 以外にも温度水準を増やして温度ごとの劣化速度の傾向を見ることや、より長期的に加速試験を行うことで劣化の傾向が確認できるか調べる必要がある。

5.9 加速率の活性化エネルギー依存性

本節では実時間で何年に相当する劣化を再現したかを見積もり、耐用年数の下限を導くことが可能であるかを議論する。劣化の実時間相当を見積もるためには、活性化エネルギーを精度良く知ることが重要であることが次の議論からわかる。

アレニウスの式 (5.1) から、ある温度で行った加速劣化試験の加速率、則ち、常温 (ここでは $T_0 = 293 \text{ K}$) の何倍の速度で反応が進行したかを見積もる。反応速度 k を温度 T の関数とみなす

と、常温 T_0 に対する温度 T_{accel} における加速率 \mathcal{R} は次のようになる。

$$\mathcal{R} \equiv \frac{k(T_{\text{accel}})}{k(T_0)} \quad (5.8)$$

$$= \frac{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{\text{accel}}}\right)}{A \exp\left(-\frac{E_a}{RT_0}\right)} \quad (5.9)$$

$$= \exp\left\{\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{accel}}}\right)\right\} \quad (5.10)$$

$$(5.11)$$

アクリル系粘着剤の活性化エネルギーとしては 21 kcal/mol という値を用いている古い文献がいくつか見つかった [29] [30]。換算すると 0.91 eV である。この場合、例えば 70°C における加速率は $\mathcal{R} = 1.85 \times 10^2$ であり、700 時間の加速が 14 年の劣化に相当し、十分な寿命を持っていると言える。

しかし、式 (5.11) のとおり加速率は活性化エネルギーの指数関数となっており、したがって実時間相当も活性化エネルギーに大きく依存する。分子 1 つあたりの活性化エネルギーに対する加速率のグラフを図 5.13 に示す。

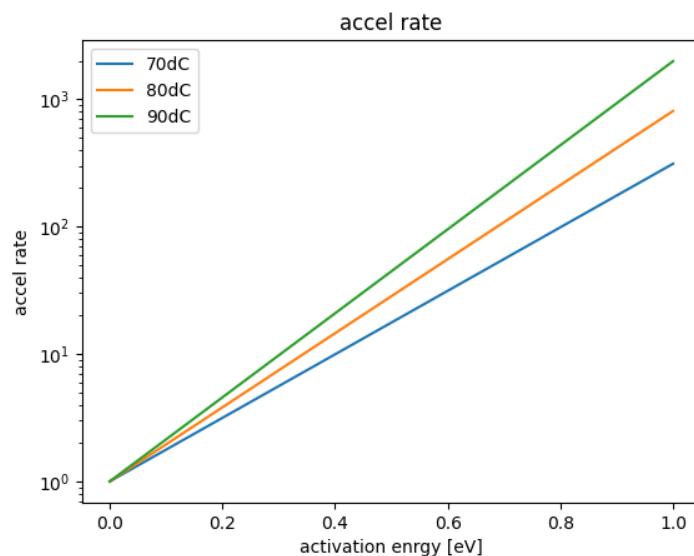


図 5.13: 加速率の活性化エネルギー依存性

例えば実際の活性化エネルギーが文献値よりも 10% 小さく、0.8 eV だった場合、加速率は $\mathcal{R} = 99$ であり、700 時間の加速が 7 年にしかならない。

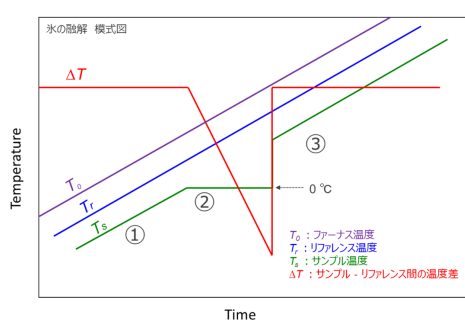
このように活性化エネルギーは、加速劣化試験における実時間相当に大きく影響するため、劣化によって限界強度に達しない場合に実時間相当を見積もるためには、活性化エネルギーの精密な値を知ることが重要である。以上を踏まえて活性化エネルギーの測定を試みた。

5.10 活性化エネルギーの測定:DTA 法

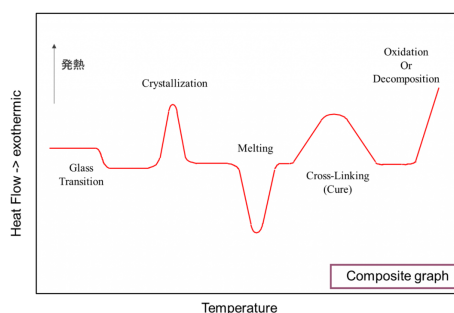
5.10.1 原理

示差熱分析 (DTA) または、熱流束示差走査熱量計 (熱流束 DSC) と呼ばれる方法では、炉に熱的性質を測りたいサンプルと、リファレンスとなる基準物質を入れて温度を一定に上昇させる。このとき、サンプルが化学反応によって発熱・または吸熱すると、その間、サンプルの温度上昇の仕方がリファレンスの温度上昇曲線と異なり、サンプルとリファレンス間の温度差をとることでピークとなって確認できる [31]。

例として、図 5.14a では氷の融解に伴う吸熱反応時の温度変化を示した。サンプルである氷が融解している間は 0°C で一定の温度となる一方で、リファレンスとファーナス (炉) は一定温度で上昇するため、サンプルとリファレンス間の温度差をとると、図 5.14b 中央にあるような下向きの吸熱ピークを描く。



(a) 氷の融解に伴う吸熱の例



(b) DTA 法におけるサンプル-リファレンス間の温度差の例

図 5.14: DTA 法における主な熱イベント [31]

ここで Ozawa 法によると、それぞれの昇温速度 ϕ ごとに反応したサンプルの割合 (反応率) がある値に至ったときの温度を求め、 $1/T$ を横軸に、 $\log \phi$ を縦軸にとったグラフ上にプロットすると次の直線上に並ぶことが期待される [32][33]。

$$\log \phi - 0.4567 \frac{\Delta E}{RT} = \text{const} \quad (5.12)$$

この直線の傾きから活性化エネルギーを求めることができる。

例えば、文献 [33] では $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の 4 つの昇温速度で DSC を行い、サンプルの反応率が 30%、40%、50%、60%、70% に対応する温度を図 5.15a のピーク面積から求め、図 5.15b のように昇温速度 ϕ ごとにプロットすることでエポキシ樹脂の架橋反応による活性化エネルギーを 68.9 kJ/mol と算出している。次に実験方法について述べる。

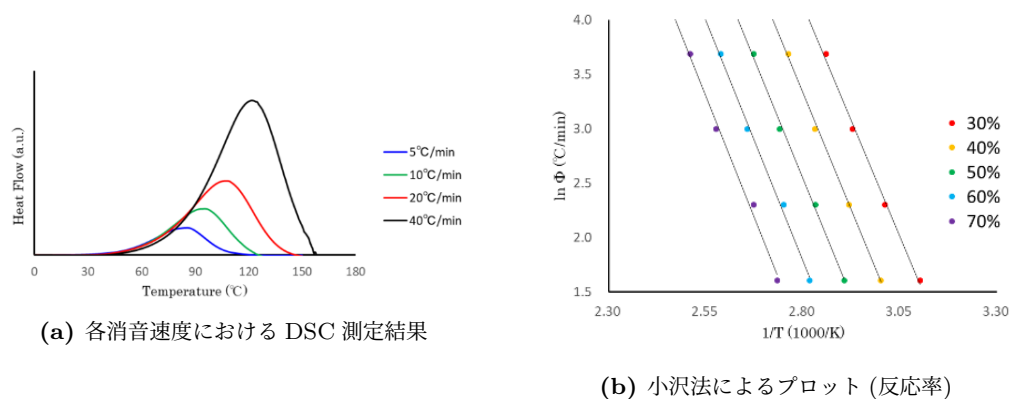


図 5.15: DSC を用いた小沢法によるエポキシ樹脂の活性化エネルギー評価の例 [33]。

5.10.2 セットアップ

以下にセットアップの様子を示す (図 5.16)。

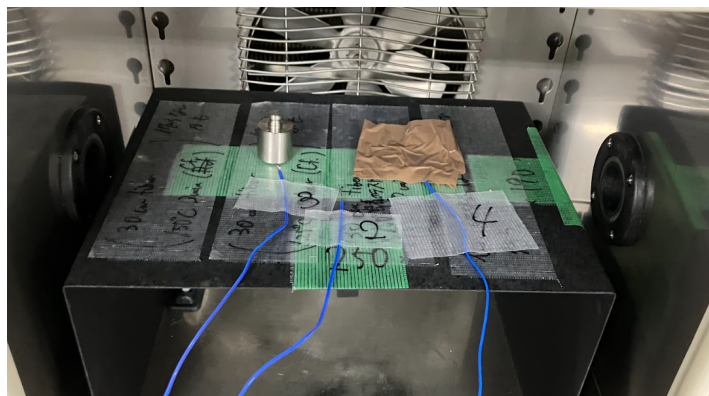


図 5.16: DTA 法模擬試験のためのセットアップ

小節 4.2.3 で述べたデータロガーの Channel 2,3,4 にそれぞれ熱電対をつなぎ、恒温槽の内部温度、リファレンスとなるステンレス (50 g) の温度、サンプルとなる OPP テープ (約 30 cm) の温度をサンプリングレート 1 Hz で測定した。OPP テープの温度はテープを折り畳んだ中に熱電対を差し込んで計測した。

初期温度 30 °C から昇温速度 4 °C/min と 1 °C/min で昇温し、発熱を示唆する上向きのピークが見えるか確かめた。使用した恒温槽はヤマト科学の小型恒温恒湿器 IW242 である。この恒温槽における最大の昇温速度が 4 °C/min だった。測定温度の時間変化を図 5.17a から図 5.17d に示す。横軸を昇温開始からの時間、縦軸を温度とし、恒温槽内の空気、リファレンス (SUS)、サンプル (OPP テープ)、及びリファレンス-サンプルの温度差をプロットした。いずれの測定でも、昇温

中のリファレンス-サンプル間の温度差の微妙な凹凸は確認できるが、顕著な上向きのピークは確認できなかった。

なお、図 5.17d における温度降下曲線が途中で急落しているのは、冷却途中で恒温槽の扉を開けてしまったためである。

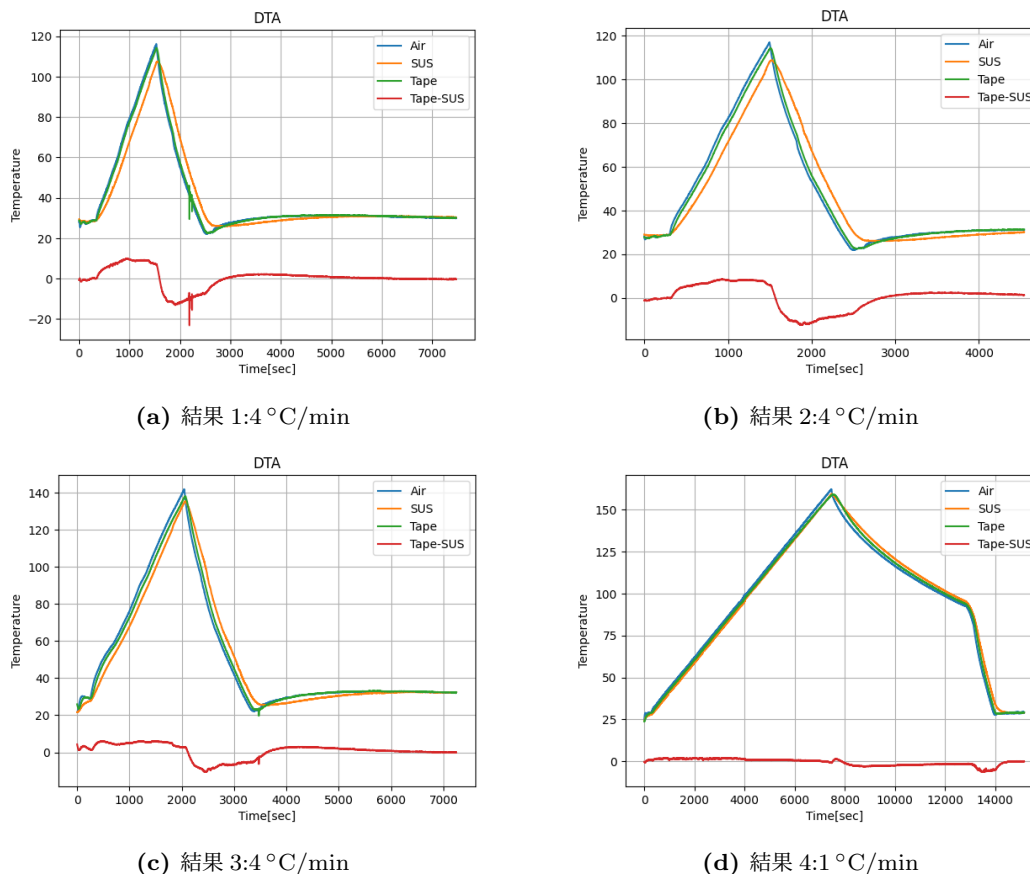
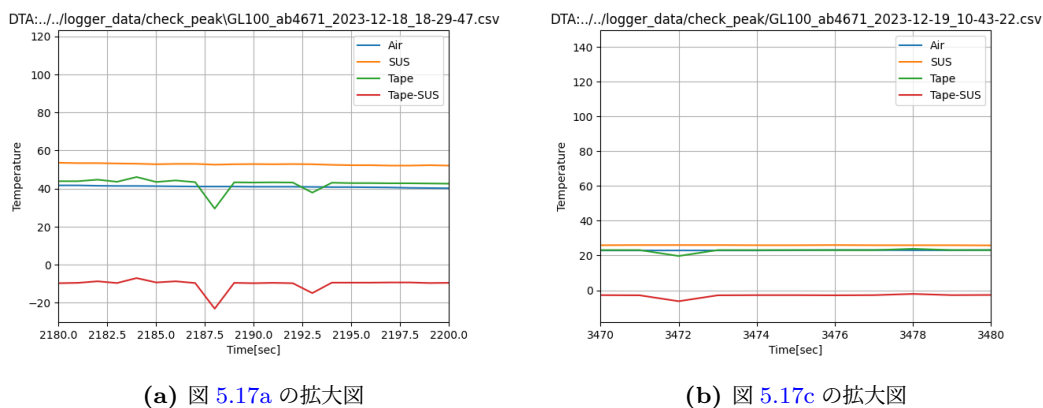


図 5.17: DTA の結果

今回の測定では顕著な上向きのピークは確認できなかった一方で、図 5.17a と 5.17c では下向きのピークが確認された。拡大図を図 5.18a と 5.18b に示す。この下向きピークは 1 秒間しか発現しておらず、物理的変化であるとは断言できない。

5.10.3 考察

いずれの結果においても、昇温中にサンプルとリファレンス間の温度差にわずかな凹凸があるが、該当箇所では空気の温度とテープの温度変化が同期していることが確認できるので、テープの熱容量が小さく、恒温槽内空気の温度の一時的な乱れがテープの測定温度に反映されてしまったことが原因だと推察される。このように、サンプルの熱容量が SUS の熱容量に比べて小さい場合にはサンプルとリファレンス間の温度差をとっても空気の温度の乱れによってピークが埋もれてしま



(a) 図 5.17a の拡大図

(b) 図 5.17c の拡大図

図 5.18: 下向きピークの拡大図

う可能性があるため、リファレンスと同程度の熱容量を持たせる必要があるとわかった。

セキスイの OPP テープ E No.882E がの組成が全てポリプロピレンであると仮定して、その熱容量がステンレス 50 g と等しくなる OPP テープの長さは $L = 680.4$ cm である。従って、サンプルとリファレンスにおける熱容量を揃えるにはおよそ 7m の OPP テープが必要である。それでも顕著な発熱ピークが見えない場合は、粘着剤が酸化劣化するためにはより高温まで加熱する必要があると考えられる。

また、今回のようにテープごと粘着剤を加熱している場合は発熱ピークが見えたとしても、それが粘着剤由来の発熱とは限らない。発熱の原因を確かめるには、等しい比熱を持ったポリプロピレンを別に用意し対照実験を行うことなどが必要である。

5.11 まとめ

水中における耐水テープの劣化について調べ、電気ポット加速劣化試験における、短期的な劣化を確認することができた。しかし、その後の粘着力変化は予想に反して、アレニウスの式に従わなかった。また 700 時間の加速劣化試験でも粘着力は限界強度を下回らず、また長期的な劣化の傾向を見いだすこともできなかった。劣化速度の温度依存性の傾向を見いだすためには温度水準を増やしてさらに長期的な観察を行うことが必要である。

一方で、アクリル系粘着剤の活性化エネルギーの文献値 21 kcal/mol から加速劣化の実時間相当を見積もると 70 °C 700 時間の加速劣化試験では約 14 年の劣化を再現したことになる。しかし、劣化試験の加速率は活性化エネルギーに強く依存するため実際に使用している粘着剤の活性化エネルギーの精密な値を得ることが重要である。そこで、DTA 法による活性化エネルギーの測定を試みたが、テープの熱容量が小さく恒温槽内空気の乱れの影響を受けやすかったこともあり、粘着剤の酸化劣化による発熱は確認できず活性化エネルギーは測定できなかった。サンプルとリファレンスで熱容量を揃えるにはサンプルに用いる OPP テープの長さが約 7m 必要であることがわかった。

第 6 章

陽子飛跡検出のためのシミュレーション

本研究で想定する検出器は全体に磁場がかけられており、飛程の長い粒子は飛跡の曲率から運動量を決定することができる。一方でファイバーの高い位置分解能により、飛跡のヒット数が少ない場合でも再構成できると期待される。本章では具体的な陽子飛跡の再構成や運動量への制限について述べる。

6.1 短い飛程を持つ陽子のトラッキング

簡単のため、U レイヤーと V レイヤーは考えず X 読み出しと Y 読み出しを行う 2 種類のファイバーレイヤーが交互に並んだ場合を考える。基本的には U レイヤー、V レイヤーがある場合も同様である。X 座標の読み出し、および Y 座標の読み出しを行うレイヤーをそれぞれ X レイヤー、Y レイヤーと呼ぶことにする。

粒子の飛跡は、XZ-view と YZ-view において二次元平面上の直線になるので、*1 以下のように一次関数で表せる。

$$x = az + b \tag{6.1}$$

$$y = cz + d \tag{6.2}$$

この飛跡を決定するためには 4 つの変数 a, b, c, d が決まる必要があり、粒子がレイヤーを合計 4 層以上通過すると 3 次元の飛跡を決定できる (図 6.1)。

粒子の飛程が短く、通過するレイヤーが 4 層未満の場合はその粒子自身の情報だけでは飛跡を再構成できない。しかし、例えばニュートリノの荷電カレント反応で生じた陽子が通過するレイヤーが合計で 2 層や 3 層の場合でも、ミュオンノの長いトラックを利用すれば飛跡や飛程に制限をかけられると考えられる。以下の小節でその考察をする。

*1 飛程が短い場合を考えており、磁場による曲げは無視できるとする。飛程が長く飛跡が磁場で曲がる場合でも、部分的には直線で近似できる。

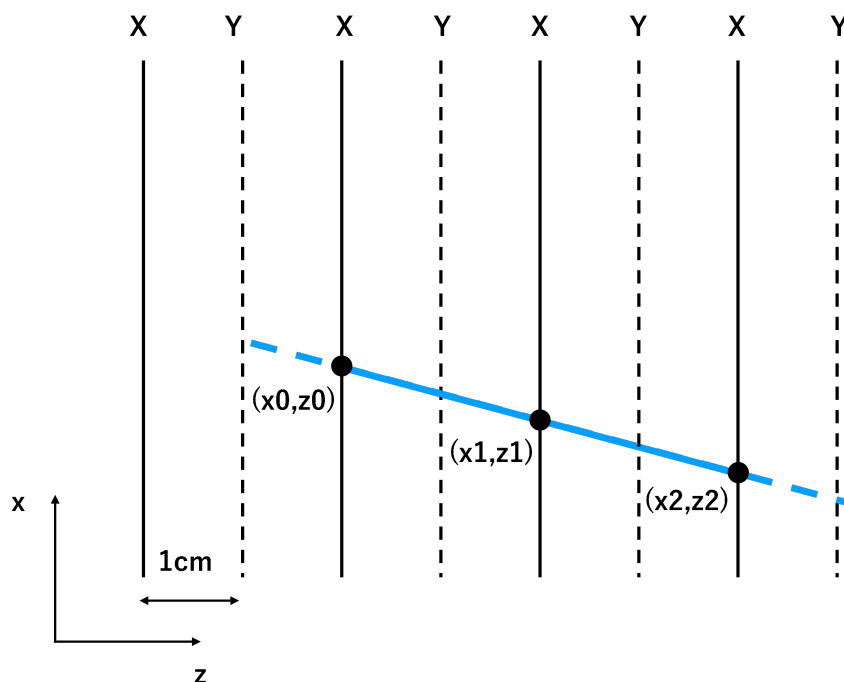


図 6.1: X-view におけるトラック決定の概念図: 1 つの view で 2 層以上通過すると、粒子飛跡の一次関数 $x=az+b$ を決定できる。点線は飛跡があるかどうかファイバーのヒットからは分からない部分である。

6.2 合計で 3 層通過する場合

図 6.2a, 6.2b にミューオンニュートリノの荷電カレント反応で、陽子が X レイヤーを 2 層、Y レイヤーを 1 層通ったときのイベントディスプレイの例を表わす。それぞれのレイヤー間隔を 1cm とし、ミューオンの飛程はトラッキングできる程度に十分に長いものとする。

このとき、XZ-view では、X1 レイヤーと X2 レイヤーから陽子の飛跡を引くことができる (図 6.2a 赤線) ため、ミューオンの飛跡と陽子の飛跡の交点 (図 6.2a 緑点) の (x, z) 座標が決まる。この交点の座標はニュートリノの反応点の座標である。一方、YZ-view では XZ-view で決定された反応点 (緑点) の z 座標とミューオンの飛跡から、反応点の y 座標を求めることができる。これと Y1 のファイバーを陽子が通過することをを用いて YZ-view でも陽子の飛跡を引くことができる。なお、X2 レイヤーと Y2 レイヤーの間が破線になっているのは、陽子飛跡の終点はその 2 層の間で不定性をもつことを表わしている。

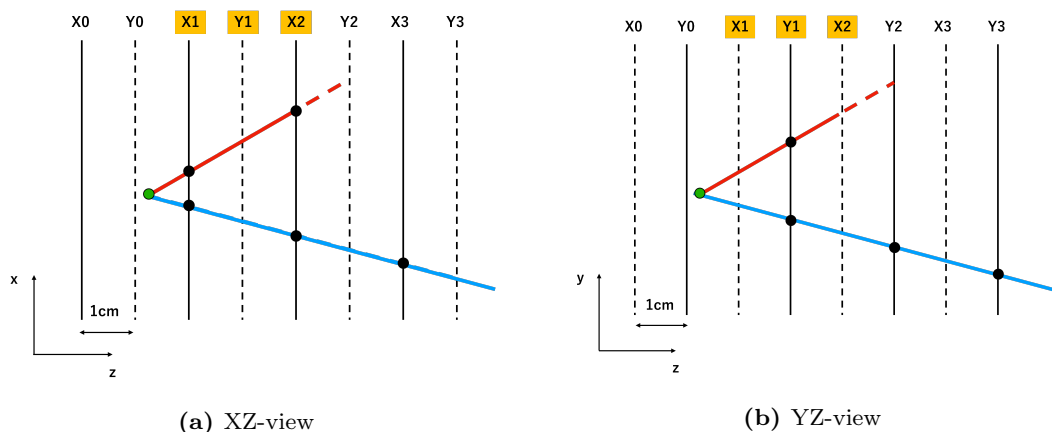


図 6.2: 3 レイヤー通過した陽子の飛跡決定: X0, X1, ... は X レイヤー、Y0, Y1, ... は Y レイヤーを表わす。黒色の実線と破線はファイバーシートの向きを表わしており、ファイバーが紙面垂直に並んでいるレイヤーを実線で、紙面平行に並んでいるレイヤーを破線で表わしている。青い実線はミュオン
の飛跡、赤は同じく陽子の飛跡を表わす。点線は飛跡があるかどうかファイバーのヒットからは分からない部分である。黄色で塗りつぶされている番号は陽子のヒットがあったレイヤーを意味する。

6.3 合計 2 層通過する場合

各レイヤーで 1 層ずつ合計 2 層しか通過しない場合は、ミュオンの飛跡を利用しても反応点を決定できないが、粒子が通過したファイバーの情報からある程度は角度と運動量に制限をかけられる。

簡単のため、図 6.3 のようにミュオンが z 軸方向に直進した場合を考える。

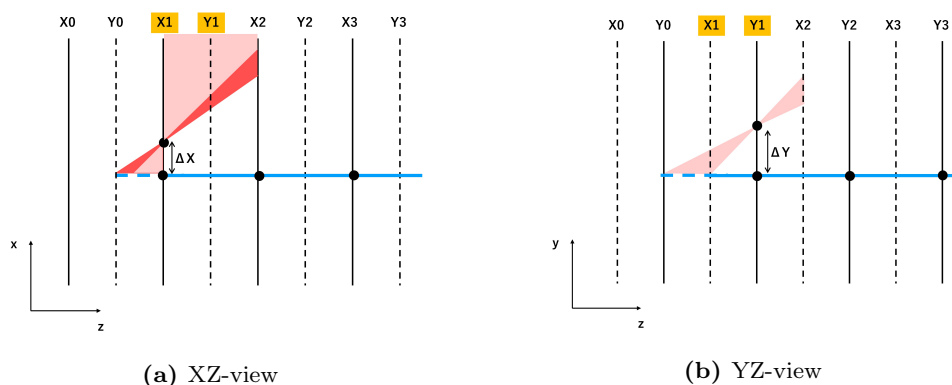


図 6.3: 陽子が X レイヤーと Y レイヤーを 1 層ずつ通過するイベントディスプレイの例: (薄) 赤色の領域は陽子が通過し得る領域であり、濃い赤色領域はその中でも陽子と z 軸の成す角度が $\pi/4$ 以下の領域を表わす。また、縦縞の領域は飛跡の終点が存在しうる領域を表わす。黄色で塗りつぶされている番号は陽子のヒットがあったレイヤーを意味する。

各 view で陽子が 1 レイヤーしか通らない場合でも、同一レイヤー内で連続して何本のヒットが

あったかで角度を制限することができる。例えば、1本のファイバーしか通過しないならば陽子の飛跡とz軸が成す角 θ_{proton} は図6.4に示すように、 $\theta_{\text{proton}} < \pi/4$ である。

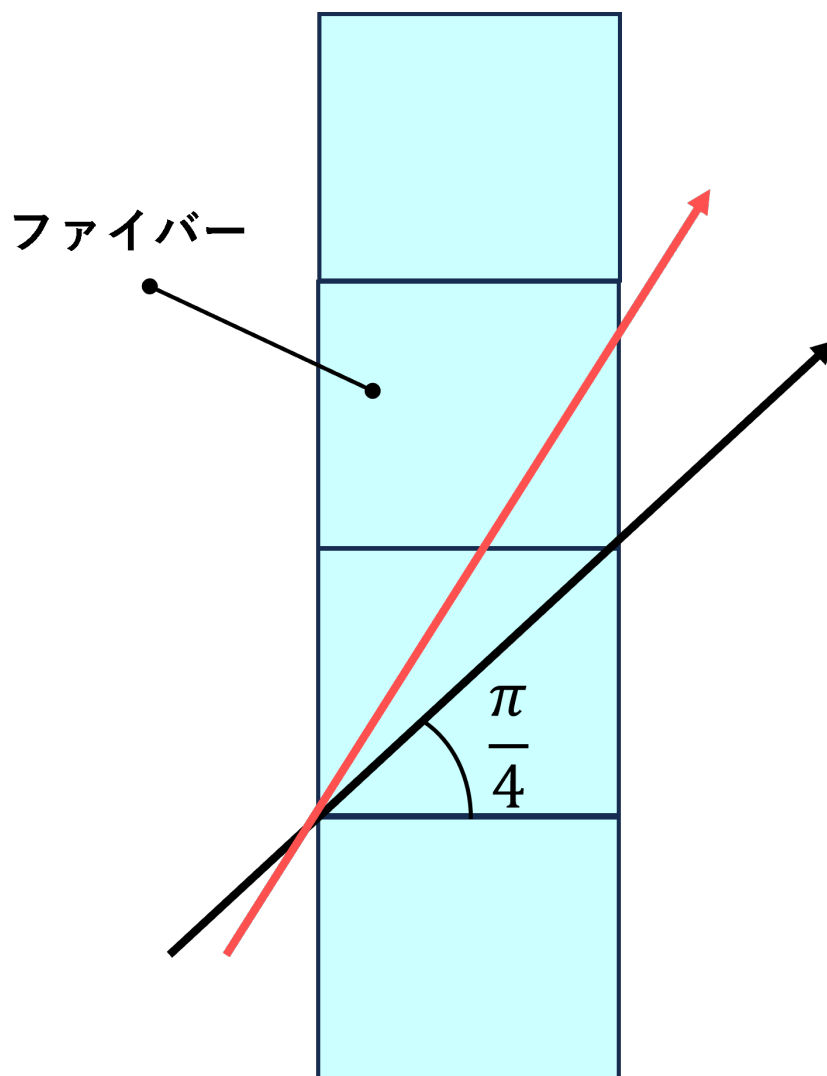


図 6.4: 紙面垂直方向に並んだファイバーを通過する粒子の概略図: 矢印はファイバーを通過する粒子の飛跡を表わす。同一レイヤー内で1本のファイバーを通過するならば、陽子の角度は必ず $\pi/4$ より小さい。 $\pi/4$ よりも角度が大きければ、赤矢印のように必ず2本以上のファイバーを通過する。

Y0 レイヤーではヒットがなく X1 レイヤーではヒットがあったことから、陽子飛跡の始点すなわち反応点の位置の z 座標は、

$$(Y0 \text{ レイヤーの } z \text{ 座標}) < \text{反応点の真の } z \leq (X1 \text{ レイヤーの } z \text{ 座標}) \quad (6.3)$$

に制限される。同様に Y0 レイヤーではヒットがなく X1 レイヤーではヒットがあったことから、陽子飛跡の終点の z 座標は、

$$(Y1 \text{ レイヤーの } z \text{ 座標}) < \text{終点の真の } z \leq (X2 \text{ レイヤーの } z \text{ 座標}) \quad (6.4)$$

に制限される。これに加えて、X レイヤーで 1 本のファイバーしか通過しないので、XZ-view で陽子の飛跡が存在しうる領域は図 6.3a 中の濃い赤色の領域に制限される。

この場合に、陽子の平均的な飛程長が取り得る値は、おおよそ 1 cm から $3\sqrt{3}\text{cm}$ ($\approx 5.2\text{cm}$) である。表 6.1 によると、この飛跡の範囲に対応する運動量の範囲はおおよそ 240 MeV/c から 400 MeV/c であり、図 6.5 にあるように CCQE 反応及び 2p2h 反応における低い運動量の陽子の検出が期待できる。

表 6.1: 水中での運動量・運動エネルギーと飛程の対応 [34]

Kinetic Energy [MeV]	Momentum [MeV/c]	CSDA Range [g/cm ²]
3.000E+01	2.392E+02	8.853E-01
3.500E+01	2.587E+02	1.170E+00
4.000E+01	2.769E+02	1.489E+00
4.500E+01	2.941E+02	1.841E+00
5.000E+01	3.104E+02	2.227E+00
5.500E+01	3.259E+02	2.644E+00
6.000E+01	3.409E+02	3.093E+00
6.500E+01	3.552E+02	3.572E+00
7.000E+01	3.691E+02	4.080E+00
7.500E+01	3.826E+02	4.618E+00
8.000E+01	3.956E+02	5.184E+00

6.4 飛跡再構成効率評価

本検出器の飛跡再構成効率を調べるため、Geant4 によるシミュレーションで、陽子の飛跡再構成性能の簡単な見積もりを行った。

6.4.1 シミュレーション設定

1mm 角のシンチレーティングファイバーからなる縦 300 mm × 横 300 mm のシートが、ビーム方向の長さ 500mm に一定間隔で並ぶような検出器ジオメトリを考える。シートは水中にあるものとする。検出器内で、一様な運動量 0 MeV/c から 1000 MeV/c を持つ陽子を一様等方に発生させた。イベント数は 10000 イベントである。

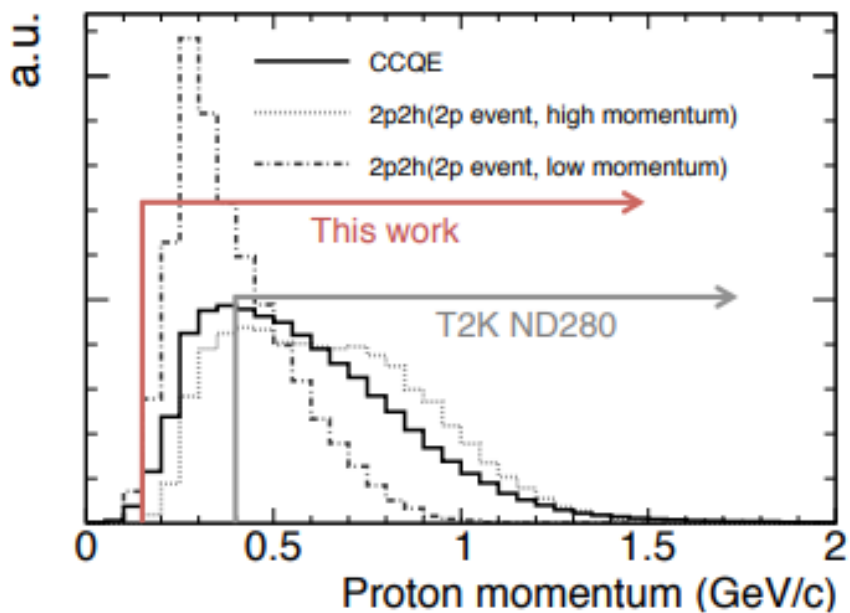


図 6.5: CCQE 及び 2p2h における陽子の運動量分布 [35]。赤線 This work は NINJA 実験 [35] において達成された陽子の運動量スレッシュホールド 200 MeV/c を表わす。

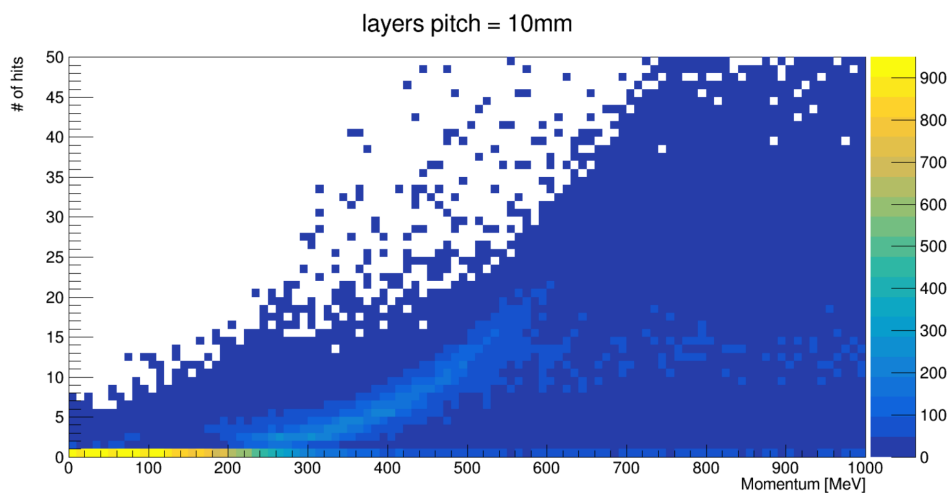


図 6.6: 一様等方に発生させた陽子の運動量とヒット数の分布

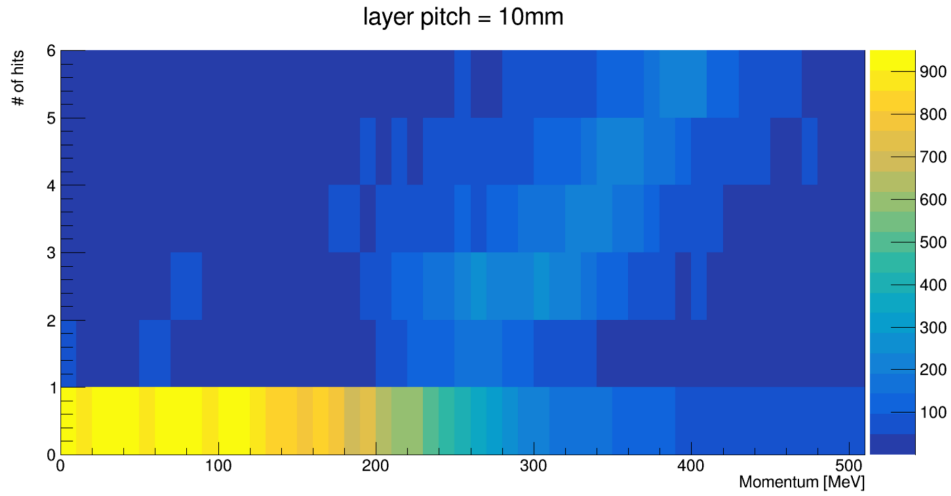


図 6.7: 左図で運動量 [0 MeV/c, 500 MeV/c] ヒット数 [0, 5] の範囲を拡大した。

6.4.2 結果

図 6.6 は真の運動量 P_{true} を横軸に、陽子のヒット数を縦軸にとった 2 次元ヒストグラムである。なお、ここでのヒット数は初めに生成した一次陽子のヒット数であり、例えば、一次陽子と散乱した二次陽子のヒット数は含まない。図 6.7 は運動量 [0 MeV/c, 500 MeV/c] ヒット数 [0, 5] の範囲の拡大図である。

図 6.8 は「2 ヒットかつ z 軸との角度が $\pi/4$ 未満」のセレクションをかけたイベントの一次元ヒストグラムである。赤線はガウシアンでフィットしたグラフを表わす。このガウシアンは平均は 267 MeV/c、標準偏差は 51 MeV/c だから、異なるレイヤーで 2 ヒットある場合には、陽子の運動量を $267 \text{ MeV/c} \pm 51 \text{ MeV/c}$ と推定することができる。

3 ヒットあれば一本のトラックが引けるため、図 6.6 のような 2 次元分布において運動量ごとに 3 ヒット以上となるイベント数の割合をその運動量における飛跡再構成効率 $\epsilon_{\text{track}}(n \geq 3)$ と定義する。また、2 ヒットあれば、終状態に飛跡の短い粒子が存在していることを検出できるため、2 ヒット以上となるイベント数の割合を粒子の検出効率 $\epsilon_{\text{det}}(n \geq 2)$ と定義する。ただし、ここでは角度に関するセレクション $\theta_{\text{proton}} < \pi/4$ をかけていないため検出効率を過大評価している。

$$\epsilon_{\text{track}}(n \geq 3) = \frac{\text{ある } P_{\text{true}} \text{ における 3 ヒット以上のイベント数}}{\text{ある } P_{\text{true}} \text{ における全イベント}} \quad (6.5)$$

$$\epsilon_{\text{det}}(n \geq 2) = \frac{\text{ある } P_{\text{true}} \text{ における 2 ヒット以上のイベント数}}{\text{ある } P_{\text{true}} \text{ における全イベント}} \quad (6.6)$$

である。レイヤー間隔 5 mm, 10 mm, 20 mm, のそれぞれの場合について飛跡再構成効率と検出効率を求めた。

飛跡再構成効率の運動量依存性についての結果を図 6.9 に示す。横軸は真の運動量で、縦軸は飛

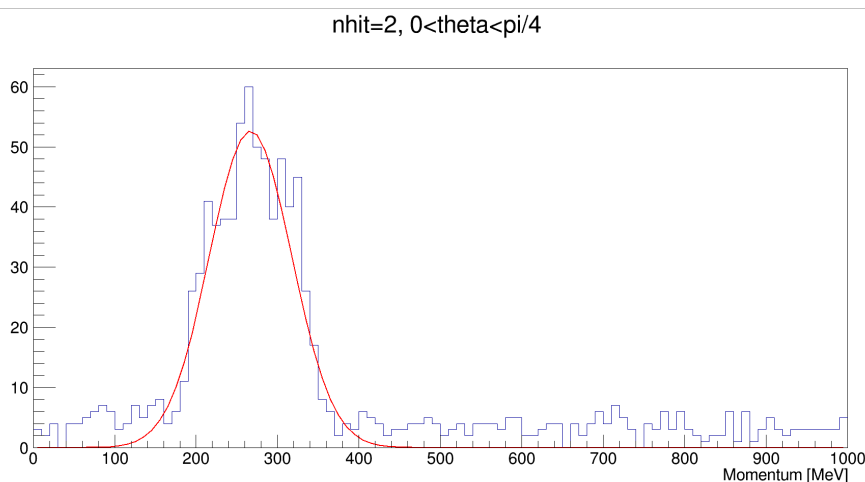


図 6.8: 散乱角が 45° 以下で 2 ヒットとなるイベントの運動量分布

跡再構成効率 $\epsilon_{\text{track}}(n \geq 3)$ を表わす。レイヤー間隔が狭まるほど全体的に飛跡再構成効率が上昇することが読み取れる。特に、2p2h 反応における典型的な陽子の運動量である 200 MeV/c から 400 MeV/c においては間隔が小さくなるほど急激に飛跡再構成効率が上昇している。200 MeV/c から 300 MeV/c 付近での飛跡再構成効率は、5 mm 間隔は 10 mm 間隔の約 2 倍、10 mm 間隔は 20 mm 間隔の約 3 倍である。次に、検出効率の運動量依存性を図 6.10 に示す。検出効率についても、飛跡再構成効率と同様 400 MeV/c 以下の運動量ではレイヤー間隔が狭まるほど飛跡再構成効率が急激に上昇することが読み取れる。特に、2 レイヤー通過に相当する運動量 267 MeV/c における検出効率はおおよそ 45% である。

レイヤー間隔が狭まるほど検出効率は改善するが、一方で、バックグラウンドとなる CH との反応の増加や読み出し数増加などの問題があるため、実装の際には慎重な検討を要する。

6.5 まとめ及び課題

J-PARC からのニュートリノ反応で生成される陽子の運動量は低い側は 200 MeV/c 程度まで分布している。本章では、それらの低運動量陽子の飛跡再構成について述べた。荷電カレント反応で生成された陽子が 3 レイヤー以上通過する場合は、ミュオンの飛跡情報を利用して反応点を決定できる。一方で、陽子が 2 レイヤーしか通過しない場合でも 200 MeV/c から 400 MeV/c の低い運動量の陽子の情報が得られると期待される。Geant4 による検出器シミュレーションによって、飛跡再構成効率や検出効率を見積もり、10 mm のレイヤー間隔で 240 MeV/c の陽子が約 35% の効率で検出できることが分かった。レイヤー間隔が狭まるとニュートリノ反応のうち検出したい水との反応の割合が減ってしまうが、それを補って余る飛跡再構成効率や検出効率の改善が見こまれるため、低運動量陽子の測定という観点からはレイヤー間隔を 10 mm よりもある程度狭める方が良いと考えられる。

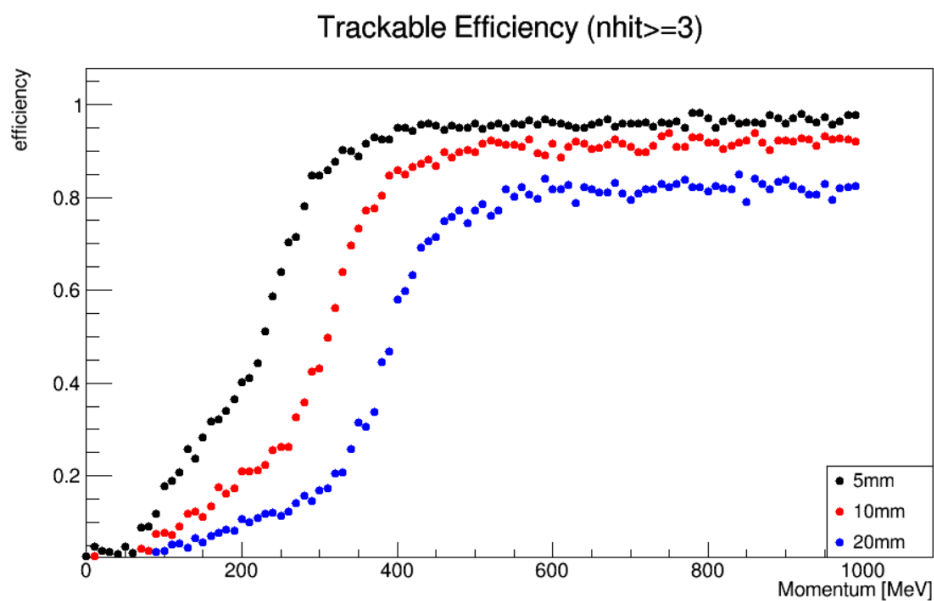


図 6.9: レイヤー間隔ごとの飛跡再構成効率: 運動量ごとに 3 ヒット以上となるイベント数の割合を求めプロットした

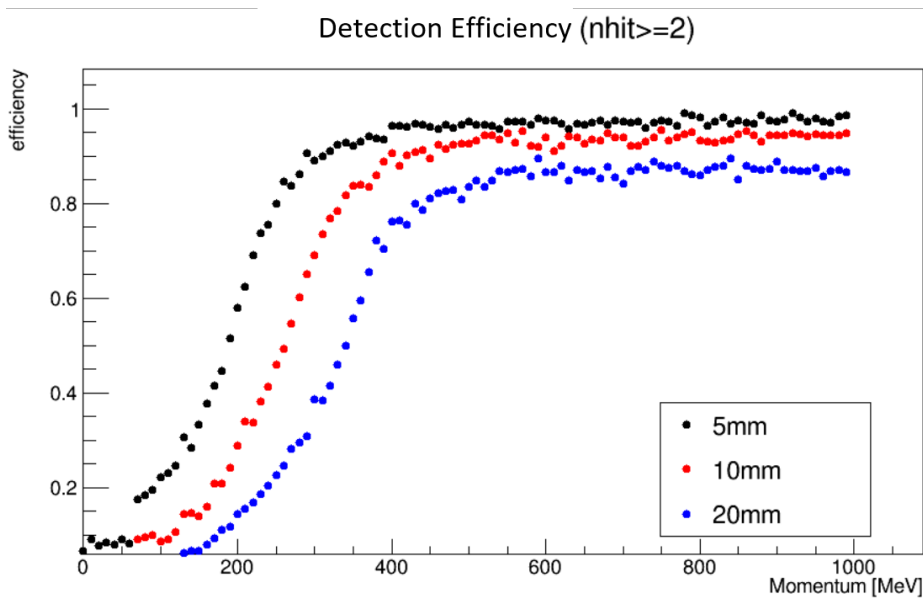


図 6.10: レイヤー間隔ごとの陽子検出効率: 運動量ごとに 2 ヒット以上となるイベント数の割合を求めプロットした。

第7章

結論

本研究ではハイパーカミオカンデを用いた加速器ニュートリノ振動実験に向けた新たな検出器として、水タンクにシンチレーティングファイバーで作ったシートをビーム軸方向に垂直に一定間隔で並べたものを考えた。

ファイバーシートを制作する方法として不感領域を増やさないファイバーのクラッド同士を熱溶着する方法の開発を行った。同時に、別のアプローチとして、耐水テープでファイバーを固定することを考え加速劣化試験による粘着剤の耐久性評価を行った。

熱溶着方法の開発では金属製のヒーター治具でファイバーを挟み部分的に加熱する機構を設計した。当初はヒーター治具端でファイバーが折れ曲がったり、温度の立ち上がり時間がばらついたりするなど、様々な問題があった。しかし改良を重ねた結果、変形を抑制しつつ一定の立ち上がり時間で溶着を行う機構を確立できた。この溶着システムを使用し、温度と時間を変えてクリアファイバーを溶着して溶着の強さへの影響を調べた。120℃以上では、温度が高いほど短い時間で溶着できた一方で、それ以下の低い温度では溶着時間をどれだけ延ばしても接着されないファイバーが生じることがわかった。溶着が伝達光量に与える影響について調べるため、クリアファイバーに入射したLEDの光量を溶着前後で測定し、光量の損失率を求めた。溶着における光量損失の目標値を2mクリアファイバーで3%以下、30cmクリアファイバーで5%以下と設定し、いくつかの溶着パラメータで光量損失率を測定した。その結果、温度が低いほど損失が小さくなる傾向が確認され、30cmファイバーの118℃12時間の溶着で5.2%まで光量損失を抑制し、目標値を達成した。一方で、125℃120分の溶着を2回行ったところ、1回目の光量損失率が6.8%だったのに対し、2回目の溶着では1回目よりもばらつきが大きく、光量損失率も16.4%と悪化してしまった。従って、上記の傾向が有意であると結論するには時期尚早である。今後の開発方針として、溶着に再現性を持たせることに加えて、2mクリアファイバーの目標値である3%を達成しているか調べることや、実際にシンチレーティングファイバーを溶着し、シンチレーターの損傷による光量減少を見積もることが重要である。

熱溶着に代わるシート作成方法として、耐水性テープによる固定を考えた。耐水テープの粘着剤の耐久性を評価するため、70℃、80℃、90℃の3つの温度水準で水中加速劣化試験を行い粘着剤の劣化による粘着力の減少測定を試みた。加速劣化試験の結果、4週間程度の加速劣化試験では

テープの粘着力はファイバーシートに要求される限界強度を下回らなかったが、剥離試験では 70 °Cの方が 80 °Cよりも粘着力がより減少するなど当初予想したアレニウスの式に従うものではなく、劣化速度の温度依存性の傾向を見いだすことはできなかった。そこで劣化曲線から寿命を求める代わりに、粘着剤の活性化エネルギーの文献値から 70 °Cで 4 週間の加速劣化試験が実時間で 14 年の劣化に相当することを求めた。しかし、実時間相当は活性化エネルギーに強く依存するため、DTA による小沢法によって OPP テープの活性化エネルギーの実測を試みた。サンプルとリファレンス間の熱容量の違いに発熱ピークが埋もれてしまった可能性があり、2 つの間で熱容量を揃えるにはサンプルとして 7m の OPP テープが必要であることがわかった。

検出器の性能として、低運動量陽子に着目して考察した。ファイバーの高い位置分解能を利用して、短い飛程の粒子でも飛跡を再構成し運動量に制限を与えられることがわかった。特に、ニュートリノ反応で生成される陽子の低運動量側の下端である 240 MeV/c 付近の低い運動量の陽子検出が期待できることを確認した。シミュレーションを用いて、ファイバーレイヤー間隔が 5 mm、10 mm、20 mm と変化したときの粒子の飛跡再構成効率と検出効率のレイヤー間隔依存性を調べた。10mm 間隔で 240 MeV/c の陽子が約 35% の効率で検出できると見積もられた。レイヤー間隔が狭いほど飛跡再構成効率および検出効率が向上し、特に 2p2h 反応における陽子のもつ典型的な運動量である 200 MeV/c から 400 MeV/c の領域ではレイヤー間隔が半分になるごとに、トラッキング効率は 2 倍から 3 倍程度改善する。

謝辞

本研究を遂行し修士論文をまとめるにあたり、ご指導やご協力をいただいた皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。

指導教員の市川温子教授には、研究活動全般にわたって大変お世話になりました。また、研究会や春の学校など紹介をしてくださり、他大学の研究者や学生の方々と交流する機会を与えていただきました。またご多忙の中でも、自分の研究が行き詰まる度に気にかけていただき、明るく励まして頂きました。深く感謝申し上げます。

Berns Lukas 助教には、特にソフトウェアの面で非常に大きなご助力をいただきました。解析方法やデータの解釈の仕方、プログラムの書き方の作法に至るまで、親身になって教えていただきました。また、修士論文執筆や学会発表の際にも快く添削を引き受けてくださり、心より感謝致します。

中村輝石助教からは、特に、粘着テープの加速劣化試験から開発環境の構築に至る様々な面で面倒を見て頂きました。加えて箱詰めのミカンの差し入れもいただきました。おかげさまで、大きく体調を崩すことなく研究の追い込みと修士論文執筆に取り組むことができました。ご厚意に感謝致します。

本研究室の博士課程の先輩方は研究の様子を気にかけてくださり、開発環境の整備や作業ログの残し方、神岡出張の手続き、論文執筆の調子など、些細なことまで相談に乗っていただきました。加えて、東京大学の江口さんには、ND280Software のことで何度も相談し、自分の稚拙な質問にも丁寧に付き合ってくださいました。誠にありがとうございました。

後輩の皆様におかれましても、溶着セットアップの配線を整理してもらったり、ファイバーをカットしてもらったり、テープをアクリル板に貼ったりと、実験作業をたくさん手伝っていただきました。特に李君には数えきれないほど剪断試験を手伝ってもらいました。本研究の実験データはあなた方の助け無しには得られませんでした。本当にありがとうございました。

同期の内山君と笠間君は、彼らと互いに切磋琢磨したおかげで研究や論文の執筆を乗り越えることができたと言っても過言ではありません。この2年間を共に過ごすことができ嬉しく思います。

最後に、私を常に励まし支えてくれた友人達と家族に感謝の意を示したいと思います。

付録 A

ヒーター治具の設計図

開発した上ヒーター治具と下ヒーター治具それぞれの部品の設計図、並びに組み立て図を示す。
実際には、それぞれの部品間にワッシャーやナットなどのスペーサーが挟まる。

①組み立て図

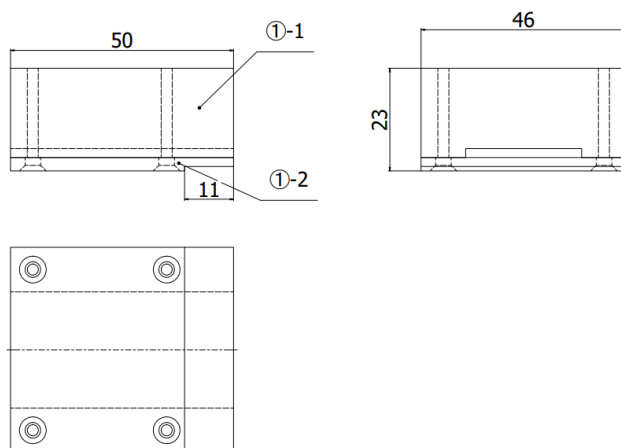


図 A.1: 上ヒーター治具の組み立て図

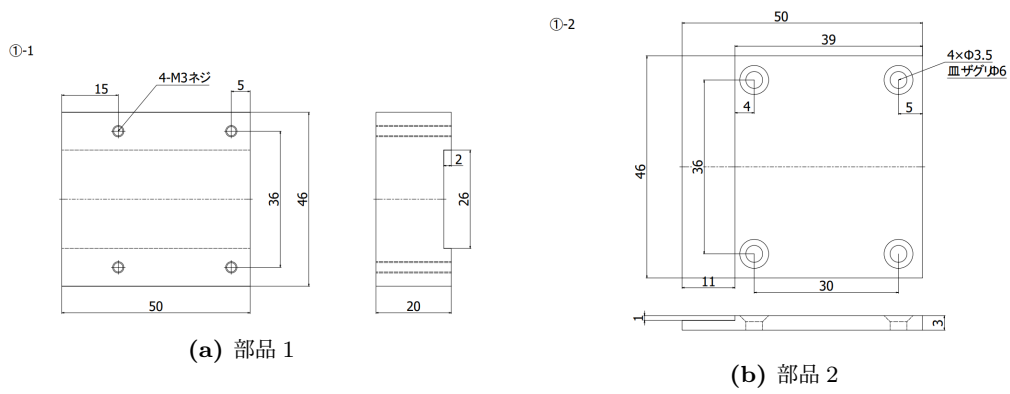


図 A.2: 上ヒーター治具の部品

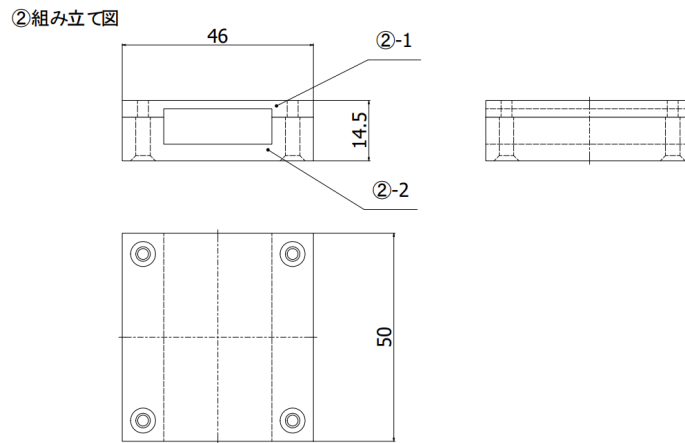


図 A.3: 下ヒータ治具の組み立て図

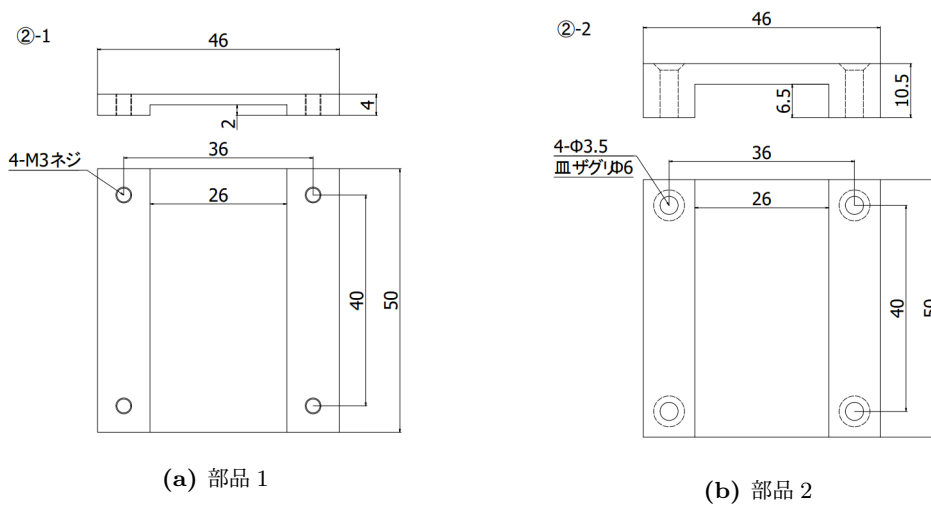
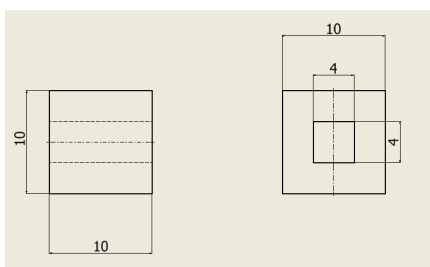


図 A.4: 下ヒーター治具の部品

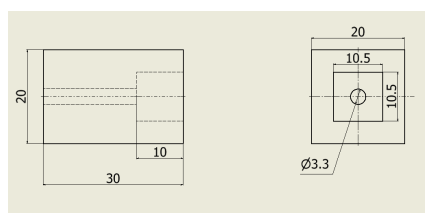
付録 B

角ファイバーコネクタの設計図

光量測定試験のために作成した角ファイバーコネクタの設計図を掲載する。3D プリンタで作成し、フィラメントは白の PLA を使用した。



(a) LED 側コネクタ①の設計図



(b) LED 側コネクタ②の設計図

図 B.1: LED 側コネクタ設計図

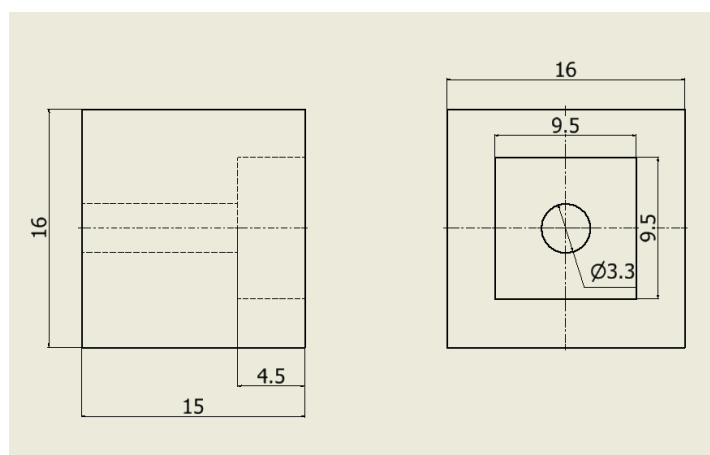


図 B.2: フォトダイオード側コネクタの設計図

図 B.1a, B.1a に LED 側コネクタの設計図を図 B.2 にフォトダイオード側コネクタの設計図を

示す。

参考文献

- [1] File:standard model of elementary particles.svg. https://en.wikipedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg. Accessed on 01/04/2024.
- [2] Ziro Maki, Masami Nakagawa, and Shoichi Sakata. Remarks on the Unified Model of Elementary Particles. *Progress of Theoretical Physics*, Vol. 28, No. 5, pp. 870–880, 11 1962.
- [3] Y. Fukuda, et al. Measurement of the flux and zenith-angle distribution of upward throughgoing muons by super-kamiokande. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 82, pp. 2644–2648, Mar 1999.
- [4] K. Abe, et al. Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. *Phys. Rev. D*, Vol. 88, p. 032002, Aug 2013.
- [5] 木河達也. T2k 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究. Master's thesis, 京都大学, 2010.
- [6] 安留健嗣. 新検出器 baby mind を導入した t2k-wagasaki 実験の最適化と解析アルゴリズムの構築. Master's thesis, 京都大学, 2019.
- [7] Kei Ieki. Construction and performance of fine grained detector for t2k experiment. Master's thesis, Kyoto University, 2010.
- [8] Kei Ieki. *Observation of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscillation in the T2K experiment*. PhD thesis, Kyoto University, 2014.
- [9] K. Abe, et al. T2k nd280 upgrade ”–” technical design report, 2020.
- [10] Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration. Hyper-kamiokande design report, 2018.
- [11] Super-Kamiokande. Super-kamiokande refurbishment. =<https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/detector/>. Accessed on 01/07/2024.
- [12] Blondel, et al. A fully-active fine-grained detector with three readout views. *Journal of Instrumentation*, Vol. 13, No. 02, pp. P02006–P02006, February 2018.
- [13] 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. Master's thesis, 京都大学, 2017.
- [14] OMRON. 温度調節器 (デジタル調節計) e5cc-rx0asm-000. <https://www.fa.omron.co.jp/product/item/3210/>. Accessed on 01/07/2024.

- [15] ミスミ. 樹脂のガラス転移温度 tg. https://jp.misumi-ec.com/tech-info/categories/plastic_mold_design/pl09/c0840.html. Accessed on 02/01/2024.
- [16] OMRON. 温度調節器 (デジタル調節計) e5cc-trx3asm-006. <https://www.fa.omron.co.jp/product/item/3300/>. Accessed on 01/07/2024.
- [17] 株式会社クラレ. プラスチックシンチレーションファイバー. <https://www.kuraray.co.jp/products/psf>. Accessed on 12/25/2023.
- [18] 浜松ホトニクス株式会社. Si フォトダイオード s1336-5bq. <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/photodiodes/si-photodiodes/S1336-5BQ.html>. Accessed on 12/25/2023.
- [19] グラフテック株式会社. コンパクトデータロガー petitlogger gl100 series. <https://graphtec.co.jp/product/instrument/gl100/>. Accessed on 12/25/2023.
- [20] 三菱ケミカル株式会社. プラスチック光ファイバーの加工方法について. <https://www.pofeska.com/support/imgs/data01b.pdf>. Accessed on 12/21/2023.
- [21] British Plastic Federation. Polypropylene (pp). <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PP.aspx>. Accessed on 01/08/2024.
- [22] パナソニックグループプロダクト解析センター. 接着剤の劣化評価 - 材料耐久性評価. <https://holdings.panasonic.jp/corporate/pac/reliability/durability/adhesive.html>. Accessed on 12/21/2023.
- [23] 福澤敬司. 粘着の理論. 高分子, Vol. 19, No. 6, pp. 453–460, 1970.
- [24] 日本接着協会, 日本接着学会 (編). 接着の技術, 第 9 巻. 日本接着協会, 1990.
- [25] 田口技術士事務所. アレニウスの式 (アレニウスの法則 (2)). <https://seihin-sekkei.com/method/arrhenius-2/>. Accessed on 01/15/2024.
- [26] Packaging Compliance Labs. Accelerated aging: Is hotter better? <https://pkgcompliance.com/accelerated-aging-temperature/>. Accessed on 01/15/2024.
- [27] Koichi Ute, Nobuo Miyatake, and Koichi Hatada. Glass transition temperature and melting temperature of uniform isotactic and syndiotactic poly(methyl methacrylate)s from 13mer to 50mer. *Polymer*, Vol. 36, No. 7, pp. 1415–1419, 1995.
- [28] Jung-Hun Lee, Gyu-Seong Shim, Hyun-Joong Kim, and Youngdo Kim. Adhesion performance and recovery of acrylic psa with acrylic elastomer (ae) blends via thermal crosslinking for application in flexible displays. *Polymers*, Vol. 11, No. 12, p. 1959, 2019.
- [29] Hiroshi Wada Kazuhiko Shibata. 両面接着テープ及びその製造方法. <https://patents.google.com/patent/JP2006143856A/ja>. Accessed on 01/15/2024 日東技報 Vol.27,No.2(Nov. 1989) では 21kcal/mol と報告されているとしている。
- [30] 畑敏雄. 接着のレオロジー. 日本ゴム協会誌, Vol. 45, No. 10, pp. 883–896, 1972.
- [31] ティー・エイ・インスツルメント・ジャパン株式会社 TA Instruments JapanInc. 示差走査熱量測定 (dsc) とは? 測定原理と測定から分かること. <https://www.tainstruments.com/%E7%A4%BA%E5%B7%AE%E8%B5%B0%E6%9F%BB%E7%86%B1%E9%87%8F%E6%B8%AC%E5%>

- [AE%9A%EF%BC%88dsc%EF%BC%89%E3%81%A8%E3%81%AF%EF%BC%9F%E6%B8%AC%E5%AE%9A%E5%8E%9F%E7%90%86%E3%81%A8%E6%B8%AC%E5%AE%9A%E3%81%8B/?lang=ja](#). Accessed on 12/29/2023.
- [32] T. Ozawa and T. Koto. A simple method for estimating activation energy from derivative thermoanalytical curves and its application to thermal shrinkage of polycarbonate. *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, No. 6, pp. 1299–1307, 1991.
- [33] 株式会社東ソー分析センター. Dscを用いたエポキシ樹脂の活性化エネルギーの評価 (小沢法). <https://www.tosoh-arc.co.jp/technique/detail/t2032/>. Accessed on 12/29/2023.
- [34] National Institute of Standards and Technology. Pstar : Stopping power and range tables for protons. <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>. Accessed on 01/17/2024.
- [35] Ayami Hiramoto. *Measurement of Neutrino Interactions on Water using Nuclear Emulsion Detectors*. PhD thesis, Kyoto University, 2021.