

大阪大学大学院

理学研究科修士論文

J-PARC KOTO 実験の上流部円柱型
検出器の両側読み出しに向けた研究

大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

山中卓研究室 博士前期課程2年

花井幸太

2022年2月

概要

J-PARC KOTO 実験では中性 K 中間子の稀崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を通して新物理の探索をしている。この崩壊の分岐比の標準理論の予想は 3.0×10^{-11} と小さい。そのため、多くのデータを効率よくとる必要があり、データ損失を小さくする改良が必要だ。上流部円筒形検出器の信号によるデータ損失は大きい。上流部円筒形検出器は長さ 2.75 m のガンマ線検出器で、片側から信号を読み出している。そのためガンマ線のヒット位置が分からず、50 ns 以内にヒットがあると信号事象とはならない。そこで上流部円筒形検出器を両側から読み出すように改良することによりヒット位置をわかるようにし、時間分解能を改善し、事象の損失を減らそうと考えている。両側読み出しにするために、波長変換ファイバーの読み出していない側の端面に新たなファイバーを継ぎ足す。

本研究では、上流部円筒型検出器を改良する際に継ぎ足すファイバーのズレによる光量の変化や、ファイバー間にグリースを入れ屈折率を調節することでどのように光量が変わるのかを明らかにした。この結果から 1 mm 径のファイバーを継ぎ足して、継ぎ足し部による光の損失を 30% 以下にするためにはファイバー間の屈折率を屈折率 1.42 のグリースで調整した場合許容される隙間の大きさは 0.1 mm、二つのファイバーの中心軸のずれは 0.1 mm であることがわかった。

目次

概要	ii
第1章 序章	1
1.1 KOTO 実験	1
1.1.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	1
1.1.2 KOTO 検出器の概要と測定原理	1
1.1.3 KOTO 検出器の抱えている問題点	3
1.2 上流部円筒型検出器 (FB)	3
1.2.1 FB の現状	4
1.2.2 要求される性能及び制限	4
1.2.3 上流部円筒型検出器の改善方法案	5
1.3 本研究の目的	5
1.4 修士論文発表会で使用したデータからの変更	5
第2章 研究の手法	7
第3章 実験及び解析方法	9
3.1 セットアップ	9
3.2 解析方法	16
3.3 LED に印加する電圧の決定	18
第4章 実験	19
4.1 継ぎ目の有無による光量変化	19
4.2 ファイバーの位置関係による光量変化	20
4.2.1 グリースを入れなかった場合のファイバーの位置関係による 光量変化	21
4.2.2 グリースを入れた場合のファイバーの位置関係による光量変化	22
4.3 波長変換ファイバーから出る光の角度分布	24
第5章 考察、今後の課題	31
5.1 考察	31
5.1.1 継ぎ目の有無による光量変化	31
5.1.2 継ぎ目の間隔に依る光量	34

5.2 上流部円筒型検出器の改良に向けた課題	34
第6章 結論	36
参考文献	39

目 次

1.1	J-PARC の全体図 [2]	2
1.2	KOTO ビームライン	2
1.3	KOTO 検出器の全体図	3
1.4	FB のモジュールの断面図	4
2.1	ファイバーを継ぎ足す際に生じるずれ	7
3.1	セットアップの全体図	9
3.2	株式会社クラレの Y-11(200) のマルチクラッド、S タイプの吸収、発 光のピーク [6]	10
3.3	Bicron の BCF-91A 吸収、発光のピーク [7]	11
3.4	波長変換ファイバーを固定し、LED との位置関係を一定にした図	12
3.5	波長変換ファイバーを固定する道具	12
3.6	LED とモニター用の MPPC を固定するための箱	13
3.7	波長変換ファイバーを固定する部品	13
3.8	LED とモニター用の MPPC を固定するための箱の断面図	14
3.9	ファイバーの位置関係を細かく変えるためのセットアップ	15
3.10	ファイバーが継ぎ足し部分の図	16
3.11	継ぎ足したファイバーの全体図	17
3.12	取得した波形の一例	18
4.1	継ぎ目がない場合のセットアップ	19
4.2	LED にかける電圧の変化に依る $R_{S/M}$ の変化	20
4.3	LED にかける電圧の変化に依る $R_{S/M}$ の変化	22
4.4	ファイバー間にグリースを入れなかった場合の継ぎ目軸のずれによ る光量変化。点は測定した値。線はファイバー同士が重なっている 面積を最大値を基準に正規化したもの。エラーバーは、プロットし た点より小さいため隠れている。	23
4.5	グリースを入れなかった場合のファイバー間の隙間と光量の関係	24

4.6	ファイバー間の隙間にグリースを入れたときの継ぎ目軸のずれによる光量変化。点と線は図 4.4 と同様にそれぞれ、測定した値、ファイバー同士が重なっている面積を最大値を基準に正規化したもの。エラーバーは、プロットした点より小さいため隠れている。	25
4.7	グリースを入れた場合の光量のファイバー間の距離依存	26
4.8	発光点が端面から 1 m で 0° のときのセットアップ	26
4.9	波長変換ファイバー端面と MPPC の位置関係	27
4.10	コリメーター	28
4.11	波長変換ファイバーから出る光の角度分布	29
4.12	図 4.2 の LED に印加する電圧が 1420 mV の測定用の MPPC のピーク電圧の分布	29
4.13	0° のときの測定用の MPPC でそくていされたピーク電圧の分布	30
5.1	角度分布に $\sin \beta$ を掛けたグラフ	33
5.2	ファイバー間にグリースを入れた時に得た $R_{S/M}$ に対するグリースを入れなかった時に得た $R_{S/M}$ の比	35

第1章 序章

1.1 KOTO 実験

1.1.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

J-PARC KOTO 実験で探索している $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊は CP 対称性を破る崩壊である。この崩壊が起きる確率を調べ、標準理論の予想と比較して違いがあれば、標準理論を超える新しい物理が寄与していることになる。

標準理論の予想では $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊分岐比は 3.0×10^{-11} 、理論的誤差は 2% [1] と小さいため、新しい物理が寄与していた場合、違いを捉えやすい。

1.1.2 KOTO 検出器の概要と測定原理

J-PARC KOTO 実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で行われ、中性 K 中間子の稀崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の探索に特化した実験である。図 1.1 に J-PARC の全体図を示す。 K_L の生成には J-PARC の主リングシンクロトロンで 30 GeV に加速した陽子を使用する。図 1.2 に KOTO ビームラインの全体図を示す。主リングシンクロトロンで加速された陽子をハドロン実験施設内にある金の固定標的 (T1 target) 当て、 K_L を生成している。この際 K_L 以外の粒子も生成される。2つのコリメーターを設置し、 K_L のビームを絞る。KOTO 検出器に到達する K_L 以外の粒子を以下の方法で減らす。 γ 線を削減するために Photon absorber (厚さ 70 mm の鉛) を設置している。荷電粒子を取り除くために Sweeping magnet を設置し、磁場をかけて荷電粒子がコリメーターを通り抜けないようにしている。寿命の短い中性粒子が入らないようにするために、KOTO 検出器を標的から約 20 m 離して設置している。

KOTO 検出器の全体図を図 1.3 に示す。KOTO 検出器は二種類に分かれる。一つ目は、図 1.3 で赤く示されている CsI 電磁カロリメータである。この検出器は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊により生成された π^0 から出た二つの γ 線を検出する。二つ目は、CsI 電磁カロリメータ以外の検出器であり、veto 検出器と呼ぶ。 K_L の崩壊により生成された粒子のうち CsI 電磁カロリメータで観測された粒子以外に粒子が存在しないことを保証する。

veto 検出器を設置している目的は背景事象による信号を排除することである。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の背景事象になる例として、 $K_L \rightarrow 2\pi^0$ の崩壊がある。この崩壊の2つの π^0 がそれぞれ2つの γ 線に崩壊し、できた4つの γ 線のうち2つのみ CsI 電磁カロリメータで観測され、他の2つの γ 線を観測できなかった場合、この事象は背景事象になる。

CsI 電磁カロリメータに 2γ が入り、veto 検出器にこの 2γ と同じ崩壊による粒子が入る可能性のある時間帯に信号があった場合、その事象は排除される。排除する時間帯のことを veto window と呼ぶ。



図 1.1: J-PARC の全体図 [2]

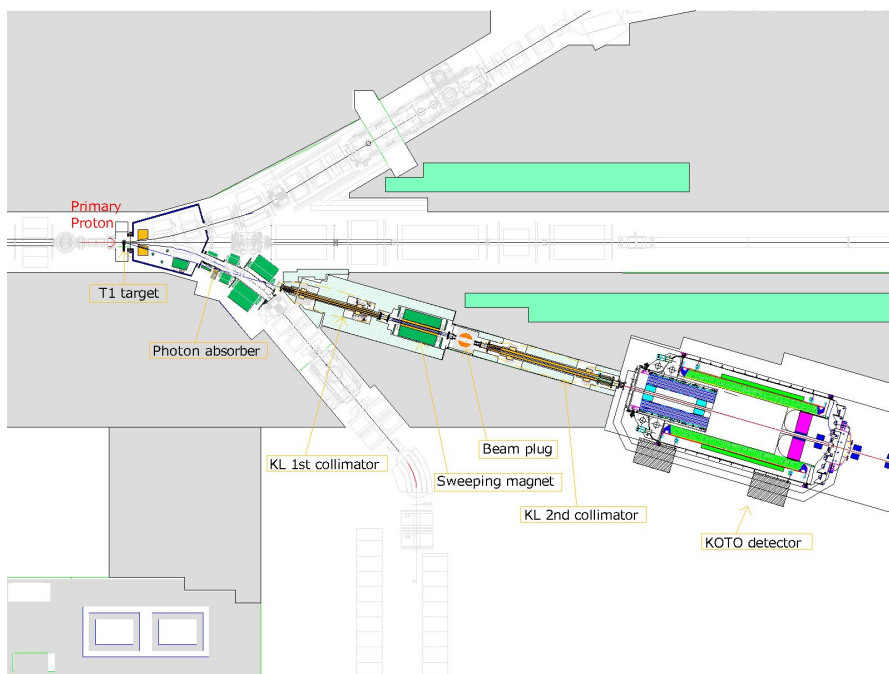


図 1.2: KOTO ビームライン

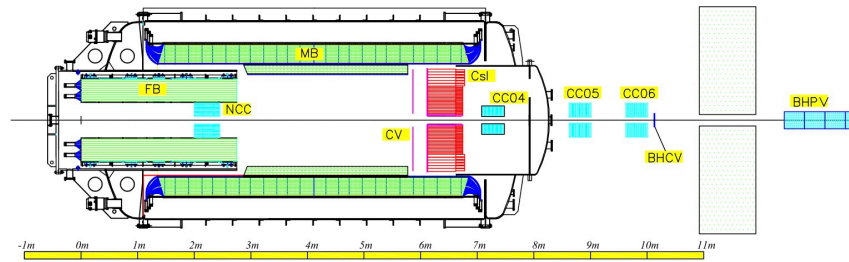


図 1.3: KOTO 検出器の全体図

1.1.3 KOTO 検出器の抱えている問題点

KOTO 実験は稀な崩壊を探索しているため、高いレートの K_L ビームを使用している。そのため、veto 検出器の信号には背景事象以外の粒子による信号もある。例えば K_L ビームライン中のコリメータに粒子が当たりそこで生成された粒子が veto 検出器に当たり、信号として読み出されることがある。このような事象をアクシデンタルヒットと呼ぶ。このアクシデンタルヒットによって、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の信号事象も排除される。こうした信号の損失をアクシデンタルロスと呼ぶ。

南條創准教授の報告 [3] によると、2020 年の Run を解析した結果、veto 検出器に信号があったために約 60% のデータが信号事象の候補から排除された。

効率的に K_L の崩壊データを蓄積するためにはアクシデンタルロスにより排除される事象を減らすことが重要である。アクシデンタルロスを減らす一つの方法として veto window を短くする方法がある。

1.2 上流部円筒型検出器 (FB)

本研究では veto 検出器による信号損失の中で最も信号事象を排除している上流部円筒型検出器に着目した。

上流部円筒型検出器 (以下 FB[4]) は KOTO 検出器の中で最も上流側にある。長さ 2.75 m、内径 0.6 m、外径 1.6 m の円筒型 γ 線 veto 検出器である。FB の断面図を図 1.4 に示す。FB はプラスチックシンチレータと鉛の層構造でできている。また、信号を読み出すためにプラスチックシンチレータに溝があり、そこに波長変換ファイバーが埋め込まれている。波長変換ファイバーは、プラスチックシンチレータから出る光を吸収し、吸収した光より波長の長い光を発光する。発光した光はファイバー内を伝播し、上流側の端面に取り付けられた光電子増倍管 (以下 PMT) で読み出される。光を読み出さない下流側には反射材が貼られていて、下流側に伝播した光を上流側に反射している。

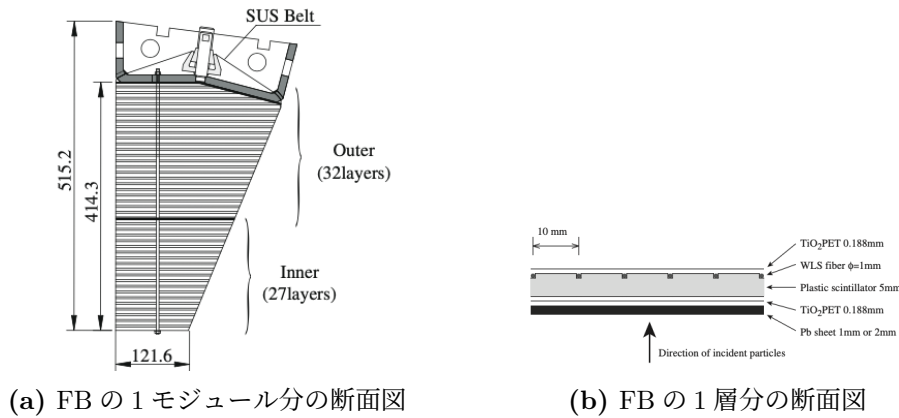


図 1.4: FB のモジュールの断面図

1.2.1 FB の現状

FB により排除される信号事象の割合は信号事象全体の約 12% と veto 検出器の中で最も高い。この 12% にはアクシデンタルヒットによる事象と、背景事象として veto されるべき事象が含まれている。FB でのアクシデンタルロスが大きい理由は、単位時間あたりに検出器に入ってくる K_L の崩壊以外による粒子のヒットレートが高いことに加え、veto window が 50 ns と長いからである。FB の veto window が長いのは、片側から読み出している構造上、長さ 2.75 m のどの位置に粒子が当たったのかがわからないからである。同じ K_L の崩壊位置からの γ 線でも、FB の最も上流部分に当たった場合と最も下流部に当たった場合では、PMT に光が到達する時間が約 24.7 ns 異なる。これは γ が検出器に当たるまでの時間差 $\delta t_1 = 2.75 / (3.0 \times 10^8) \approx 9.2$ ns と、波長変換ファイバーを光が伝播する時間差 $\delta t_2 = 275 / 17.7 \approx 15.5$ ns による。

FB のどの位置に粒子が当たったとしても背景事象を排除できるよう、veto window を広くする必要がある。

1.2.2 要求される性能及び制限

FB に粒子が当たった位置がわかるようにする方法として、上流側からだけでなく下流側からも読み出す方法がある。両側から読み出せば上流側と下流側の信号の時間差を測定し、この時間差から粒子当たった位置を知ることができる。

現在、FB ではエネルギーが低い γ 線も検出できるように閾値を設定している。具体的には FB の最上流部に γ 線が当たった場合 1 MeV に相当する約 20 pe の光量を閾値としている。上流部と下流部の信号の時間差を求めるために、新たに追加する読み出し部でもエネルギーが低い γ 線を検出できるようにする必要がある。そのために、新たな読み出し部に到達する光量をなるべく減らさないことが求められる。

1.2.3 上流部円筒型検出器の改善方法案

FBを両側読み出しにするにあたって3つのデザイン案を考えた。FBの下流側の端面の波長変換ファイバーに直接光電子増倍管(PMT)をつける方法、ファイバーに直接半導体光検出器などの光検出器をつける方法、ファイバーを継ぎ足してKOTO検出器外部で光検出器を用いて読み出す方法の3つである。

FBの下流部の波長変換ファイバーに直接PMTや半導体光検出器などの光検出器をつける方法は、光の損失を少なくできる。しかしこの方法はいくつか問題がある。PMTで直接読み出す場合KOTO検出器内部にPMTを設置すると事になり、崩壊により生成された粒子がPMTに当たって観測できず、背景事象が排除されないことが起こる。半導体光検出器で直接読み出す場合、半導体光検出器で全ての波長変換ファイバーをカバーするためには1万個以上の半導体検出器をとりつけ、そのための回路の作成や配線を行う必要がある。FBの下流側の端面の波長変換ファイバーにファイバーを継ぎ足して光検出器で読み出す方法は、継ぎ足し部分での光子のロスや、ファイバー内での光の減衰などが起きる。これによりFBの下流側の端面の波長変換ファイバーから直接光検出器で読み出す場合に比べて読み出し部に到達する光量は減少する。しかし、ファイバーの継ぎ足しを行った場合、そのファイバーを束ねて光検出器で読み出すことができ、光検出器の数を減らせる。またFBの下流端面から直接PMTで読み出す場合に比べKOTO検出器内の物質量を減らすことができる。

本研究ではファイバーを継ぎ足して光検出器で読み出す方法について研究した。ファイバーを継ぎ足してKOTO検出器外部で光検出器を用いて読み出す方法で改良する場合、継ぎ足す波長変換ファイバー内を光が伝播する際に起きる光の減衰と、継ぎ足し部での光の損失が予想される。本研究では、継ぎ足し部での光の損失の目標を30%以下とする。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、FBにファイバーを継ぎ足した場合に得られる光量を実験により測定し、ファイバーの継ぎ足しでFBの改良で下流側で十分な光量が得られるか検討する。また、継ぎ足しによる光の損失を小さくする方法を探索しFBを改良する際に役立つ。継ぎ足されるファイバーと継ぎ足すファイバーのアライメントのズレによる光の損失について調べ、FBを改良する際に要求されるアライメントの精度を調べる。

1.4 修士論文発表会で使用したデータからの変更

修士論文発表会後に実験結果をさらに深く考察するために追加の実験を行った。その結果修論発表で使用したデータの一部は、MPPCに入射する光が多すぎ、光

量が正しく測れていないことがわかった。

正しい光量が測定できるようにするために、LED に印加する電圧を小さくし、測定用の MPPC とファイバーの端面を少し離して再度実験を行った。本論文では再実験で得たデータを主に使用する。

第2章 研究の手法

本研究では次の4つの事柄について調べた。

1. ファイバーを継ぎ足してFBを改良する方法を検討するには、この方法で得られる光量を予想する必要がある。そのため、ファイバーを継ぎ足すことによる光量の損失を測定した。
2. FBを改良する際に要求される既存のファイバーと継ぎ足すファイバーの位置関係の精度を評価するために、2つのファイバーの位置関係のずれによる光量変化を調べた。図2.1にファイバーを継ぎ足す際に生じるずれを示す。位置関係のずれは、二種類存在する。一つ目は、2つのファイバーの中心軸のずれである。二つ目は、2つのファイバー間の隙間方向のずれである。この二種類のずれによる光量の変化を実験で測定した。

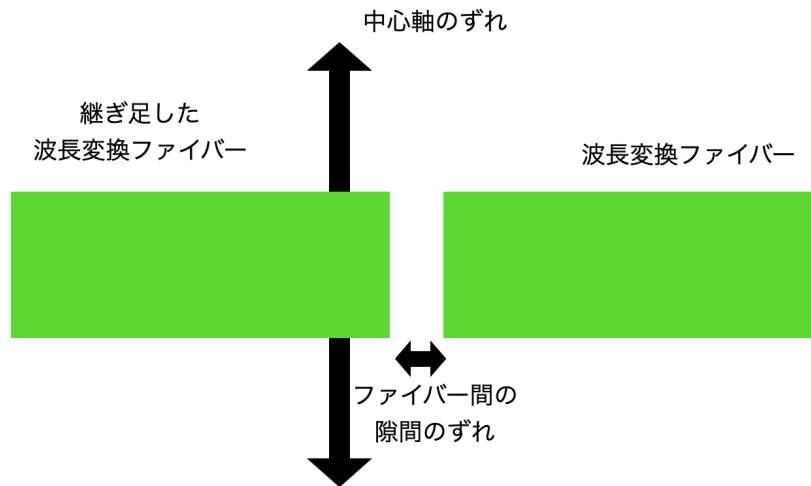


図 2.1: ファイバーを継ぎ足す際に生じるずれ

3. 2つのファイバーを継ぎ足す際、波長変換ファイバーから出た光は一度空気中に出て継ぎ足されるファイバーに入射する。本研究で使用したファイバーの屈折率は1.59であり、空気中の屈折率1に対して大きい。そのため境界面では反射により光の損失が生じる。この反射による損失を減らすためには、

ファイバー間に同程度の屈折率のものを挟めばよい。具体的にはファイバー間の隙間にグリースを入れて光量を調べた。

4. 波長変換ファイバーから出る光の角度分布を知ると、波長変換ファイバーを継ぎ足すことで起きる光損失や、ファイバー間の隙間の大きさによる光量の変化について理解する助けになる。そのため、波長変換ファイバーから出る光の角度分布の測定を行った。

第3章 実験及び解析方法

3.1 セットアップ

この章では、本研究の基本的なセットアップについて述べる。
図 3.1 は本実験におけるセットアップの全体図の一例である。

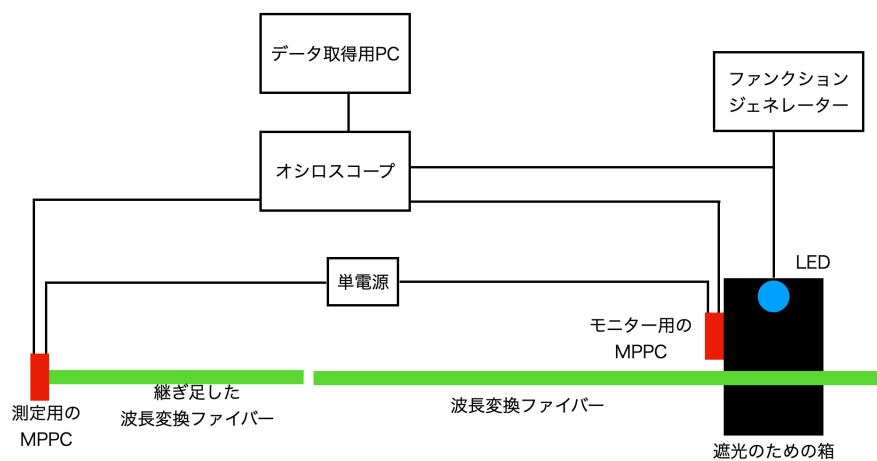


図 3.1: セットアップの全体図

本研究の実験ではLEDからの光を波長変換ファイバーに入射し、吸収、発光させる。発光した波長変換ファイバーに、新たに波長変換ファイバーを継ぎ足し、その先に測定用の半導体光検出器であるMPPC(Multi-Pixel Photon Counter)をつけて光量を測定する。

波長変換ファイバーに光を当てるのに使用したLEDは、日亜化学工業株式会社のNSPB510Sである。このLEDから出る光のピーク波長は470 nmである[5]。本実験ではファンクションジェネレーターを用いてLEDに幅25 ns、周波数40 kHzのパルス電圧をかけて発光させた。印加する電圧の決定方法に関しては3.3章で説明する。

波長変換ファイバーは、波長変換材がコア部に使われている。波長変換材は、特定の波長の光を吸収し、吸収した光より波長が長い光を等方的に発光し、その光の一部はファイバー内を伝播する。波長変換ファイバーは、株式会社クラレのY-11(200)のマルチクラッド、Sタイプ[6]を使用した。ファイバーの直径は $\phi = 1$ mmである。この波長変換ファイバーはFBで使用している波長変換ファイバー(Bicron

の BCF-91A[7])とは異なるが図 3.2、図 3.3 に示すように、吸収、発光のピークが似ている。また、株式会社クラレの Y-11(200) のマルチクラッド、S タイプの屈折率は 1.59、Bicron の BCF-91A の屈折率は 1.60 であり似ている。

本研究では、ファイバー端面の条件を統一するためにファイバーフィンと呼ばれる、ダイヤモンドの刃でプラスチック光ファイバーを高精度で研磨するための機械を使いファイバーの端面を研磨した [8]。

Y-7, Y-8, Y-11

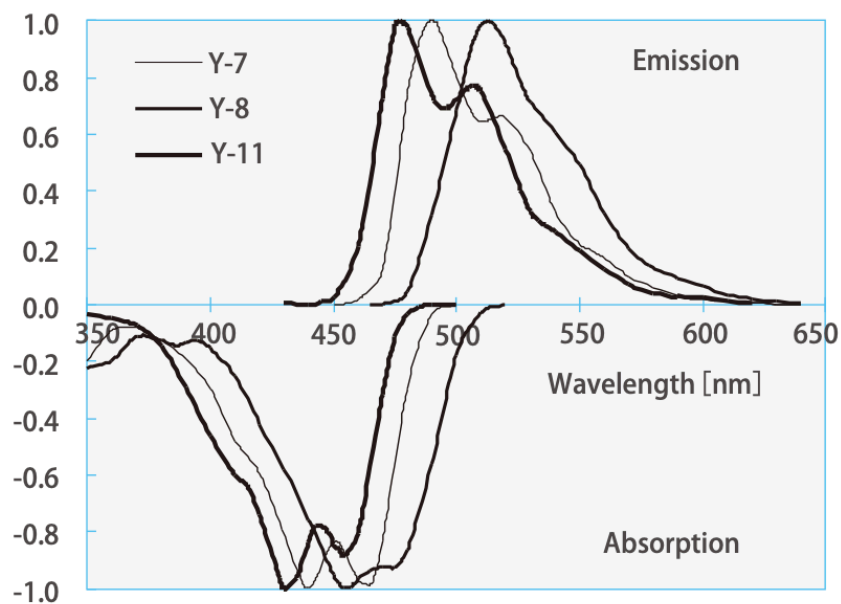


図 3.2: 株式会社クラレの Y-11(200) のマルチクラッド、S タイプの吸収、発光のピーク [6]

使用した MPPC は、浜松ホトニクス の 13360-6050CS である [9]。アノード側に -55V の電圧をかけて使用した。電源ノイズを減らすためにコンデンサーを使いローパスフィルターを作成した。このローパスフィルターには、電気容量が $0.1\mu\text{F}$ のコンデンサーを使用した。電源からコンデンサーを設置する場所までの抵抗値 R は約 1Ω であった。従って、このローパスフィルターによる遮断周波数は $f_c = \frac{1}{2\pi RC} \approx 1600\text{kHz}$ である。このローパスフィルターのコンデンサーは MPPC が信号を出した時に MPPC へ急速に電気を流すための役目も担っている。

また、ファイバーを継ぎ足す際継ぎ足し部にグリースを入れた状態と、グリースを入れていない状態で測定を行った。使用したグリースは信越化学の KE-103 である。波長変換ファイバーで発光する波長領域である 500nm 周辺での屈折率は 1.42 である [10]。

本研究では二つの MPPC を使用し実験を行った。一つ目の MPPC は、継ぎ足したファイバー端面から出てくる光量を測定するための MPPC である。この MPPC

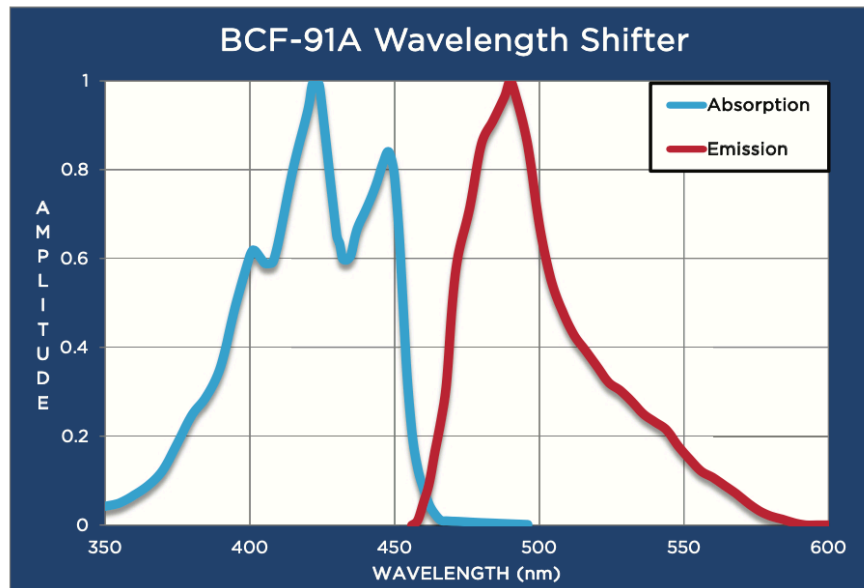


図 3.3: Bicon の BCF-91A 吸収、発光のピーク [7]

のことをこれ以降、測定用の MPPC と呼ぶ。この測定用の MPPC は、継ぎ足したファイバーの端面と 1.5 mm 離し固定した。二つ目の MPPC は、LED が発光した光量を測定するための MPPC である。この MPPC のことをこれ以降、モニター用の MPPC と呼ぶ。

波長変換ファイバーに、LED の光を当てる装置を図 3.4 に示す。この装置は、図 3.5 と、図 3.6 に示す、波長変換ファイバーを固定する道具と LED とモニター用の MPPC を固定するための箱からなる。これらの道具は、3D プリンターで黒色の PLA フィラメントを使い作成した。波長変換ファイバーを固定する道具はファイバーを 2 箇所固定している。波長変換ファイバーを固定するための部品を図 3.7 に示す。深さ約 0.85 mm の V 字にカットされている部分にファイバーを置き、上から平らな部品を押し付けて固定する。また、LED とモニター用の MPPC を固定するための箱の断面図を図 3.8 に示す。箱上部にある回路の下側に LED が設置されている。箱側面の回路基板には MPPC が取り付けられている。モニター用の MPPC に入る光量を調整するために LED と MPPC の間には壁があり、壁に 4 mm 角の正方形の穴を開けている。この道具が箱状になっているのは LED から出た光が波長変換ファイバーからの光を測定するための MPPC や、波長変換ファイバーの狙った場所以外に光が入るのを防ぐためである。

ファイバーの継ぎ目の位置関係を細かく変えるためのセットアップを図 3.9 に示す。高さ方向 1 軸のステージに水平方向 2 軸のステージを取り付け 3 軸のステージとした。LED の光を当てるファイバーの端面は、この 3 軸のステージに固定されたパーツに固定した。これにより継ぎ足されるファイバーを自由に動かすことができる。2 つの波長変換ファイバーの継ぎ足し部分を図 3.10 に示す。継ぎ足すファ

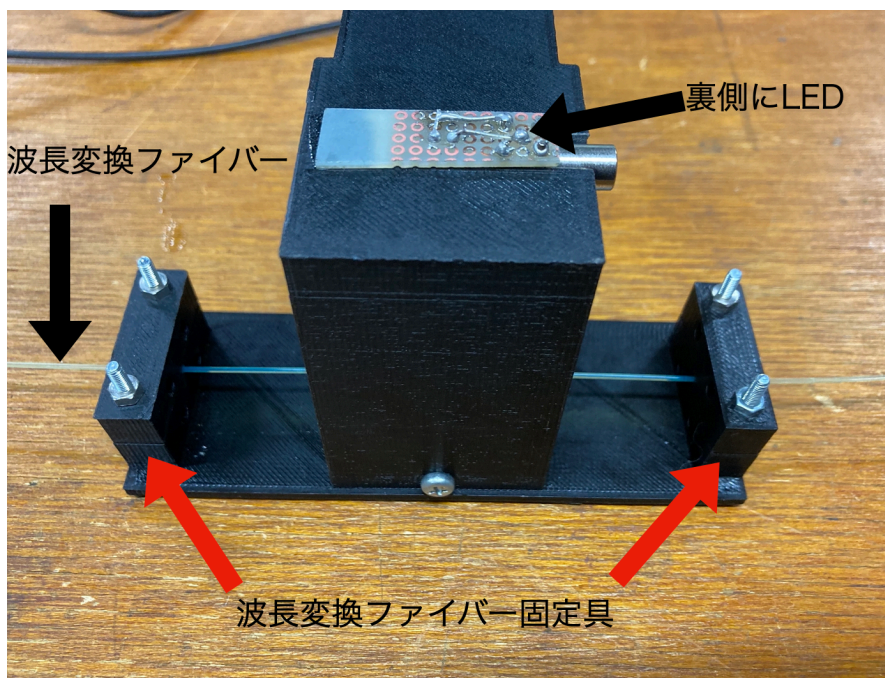


図 3.4: 波長変換ファイバーを固定し、LED との位置関係を一定にした図

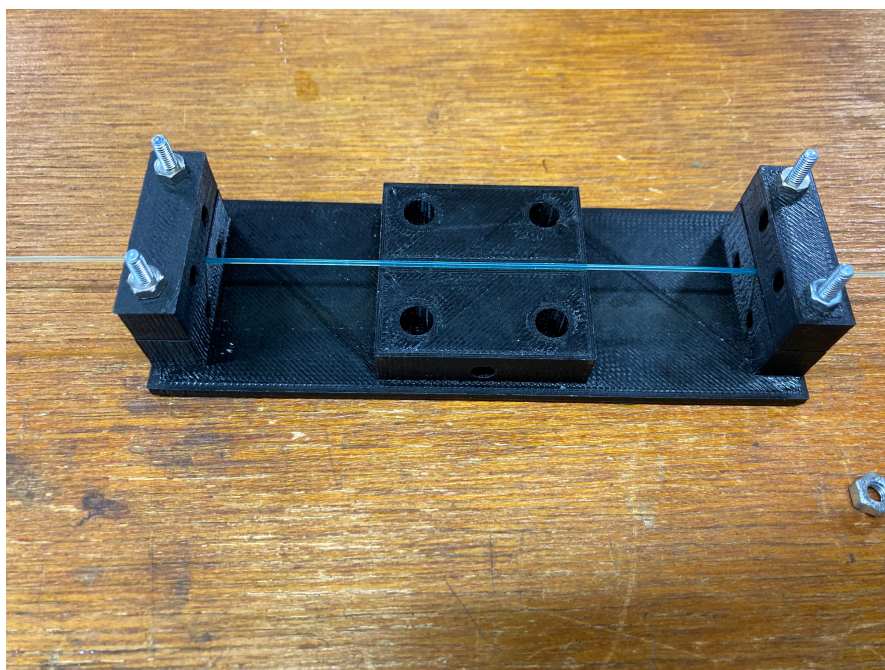


図 3.5: 波長変換ファイバーを固定する道具

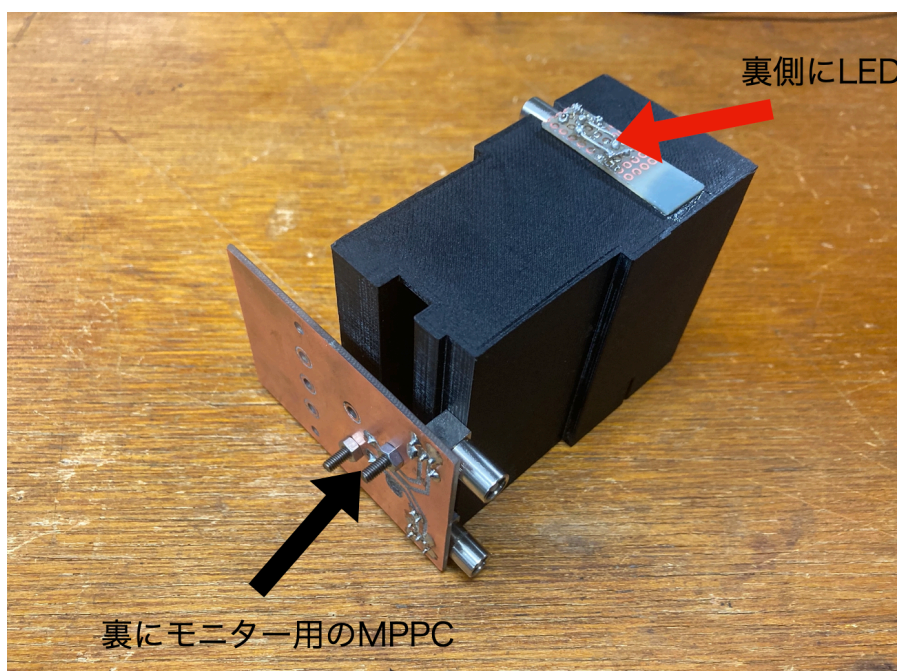


図 3.6: LED とモニター用の MPPC を固定するための箱

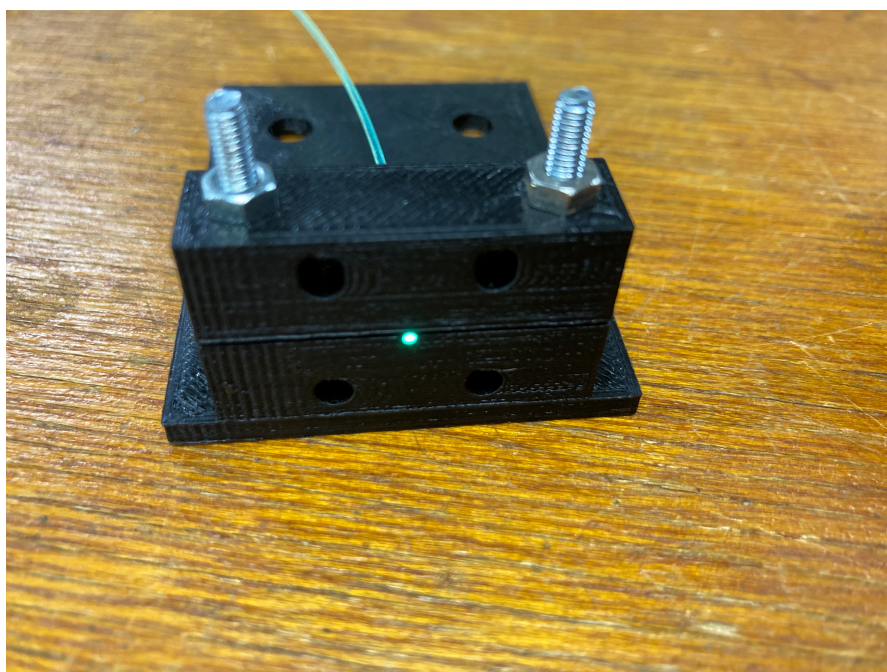


図 3.7: 波長変換ファイバーを固定する部品

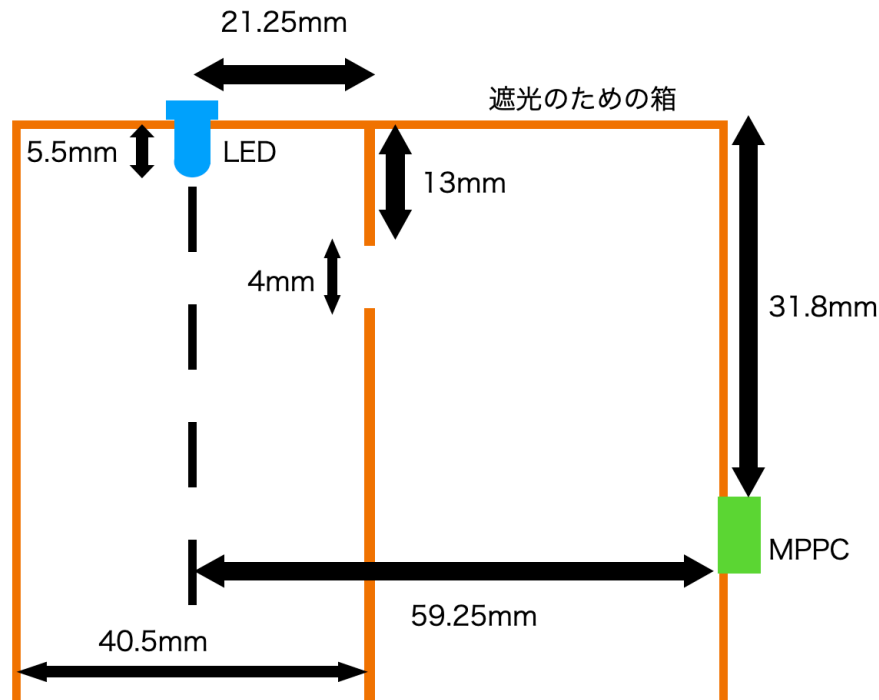


図 3.8: LED とモニター用の MPPC を固定するための箱の断面図

ファイバーの端面は部品で固定し、その部品をラボジャッキに取り付け固定した。

以降、ファイバーに並行な方の軸を z 軸、高さ方向の軸を y 軸、それぞれに垂直な方向の軸を x 軸とする。

ファイバーを継ぎ足して光量を測定する実験では、ファイバーを固定する際、片方のファイバーを固定し、もう片方のファイバーを軽く押し当てて固定した。これによりファイバー同士を接触させファイバー間に隙間がない状態にした。また、 x 軸をずらして測定を行う実験ではファイバー同士が引っ掛かることを防ぐために隙間がない状態から $20\ \mu\text{m}$ だけ離し測定を行った。その後 3 軸の移動ステージで残りの x 軸、 y 軸方向を細かく動かし光量が最も高くなる位置を探した。この光量が最も高くなる位置をファイバーの軸が揃っている状態とした。

継ぎ足したファイバーの全体図を図 3.11 に示す。継ぎ足した方と逆側の端面に測定用の MPPC をつけて測定した。

これらのセットアップは暗幕で遮光し外部から光が入らないようにしている。

データ取得にはオシロスコープとデータ取得用の PC を使用している。オシロスコープの設定は DC カップリングでインピーダンス $50\ \Omega$ に設定している。トリガーは LED にかけているパルスの立ち上がりにかき MPPC からの信号波形のデータを取得をした。解析の際 MPPC からの信号がないときの平均的な電圧の値を求めるため、LED が光る前の $200\ \text{ns}$ 以上のデータも入るようにしている。

以上が全ての実験に共通するセットアップである。実験により異なる部分に関

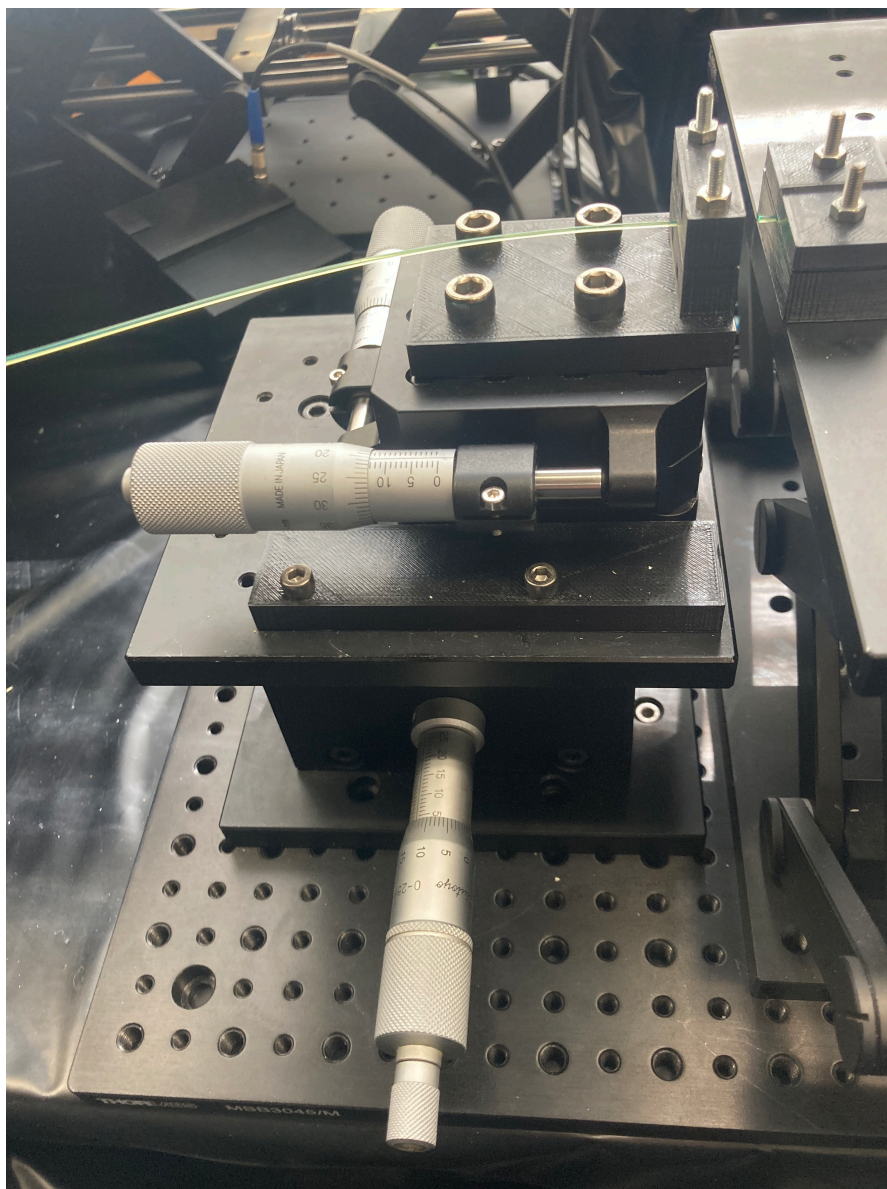


図 3.9: ファイバーの位置関係を細かく変えるためのセットアップ

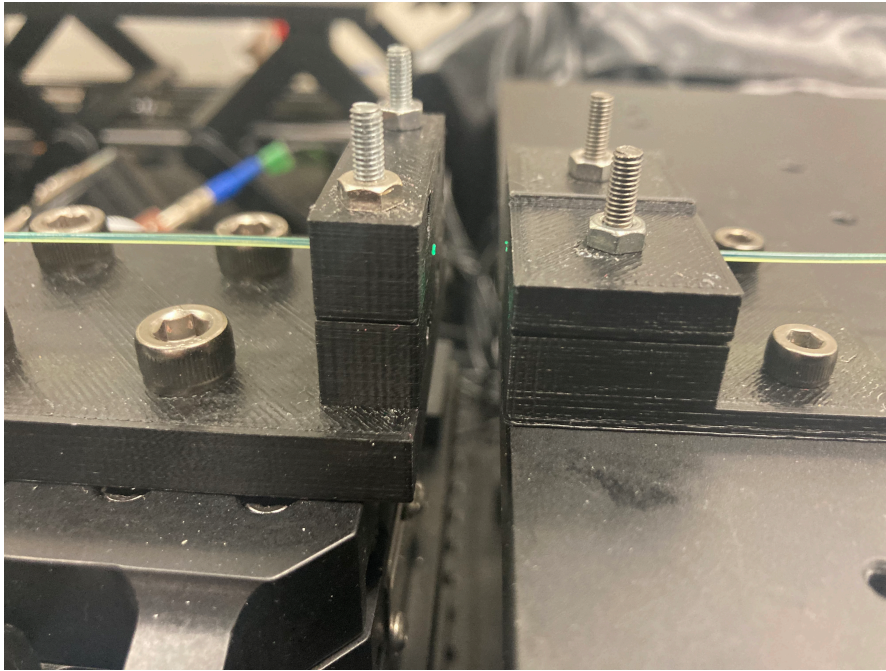


図 3.10: ファイバーが継ぎ足し部分の図

しては適宜説明する。

3.2 解析方法

前節で説明したように波長変換ファイバー内を伝搬する光量を評価するために、LED から出た光量をモニターした。このモニターした値を基準にし、測定した信号の光量を評価する。

図 3.12 に、取得した波形の一例を示す。MPPC で受光した光量はオシロスコープの波形のピークの高さに比例する。ピークの高さは取得したデータで最も高い点の値からペDESTAL を引いたものとしている。ペDESTAL は MPPC からの信号がないときの値である。データを記録し始めてから 200 ns の電位の値を平均し、ペDESTAL とした。

継ぎ足しの条件が変わることによる光量の変化を評価するために、継ぎ足したファイバー端面から出た光を測定するための MPPC の波形のピークの高さの平均をモニター用の MPPC の波形のピークの高さの平均で割った値を用いた。本論文ではこの値を $R_{S/M}$ と呼ぶ。



図 3.11: 継ぎ足したファイバーの全体図

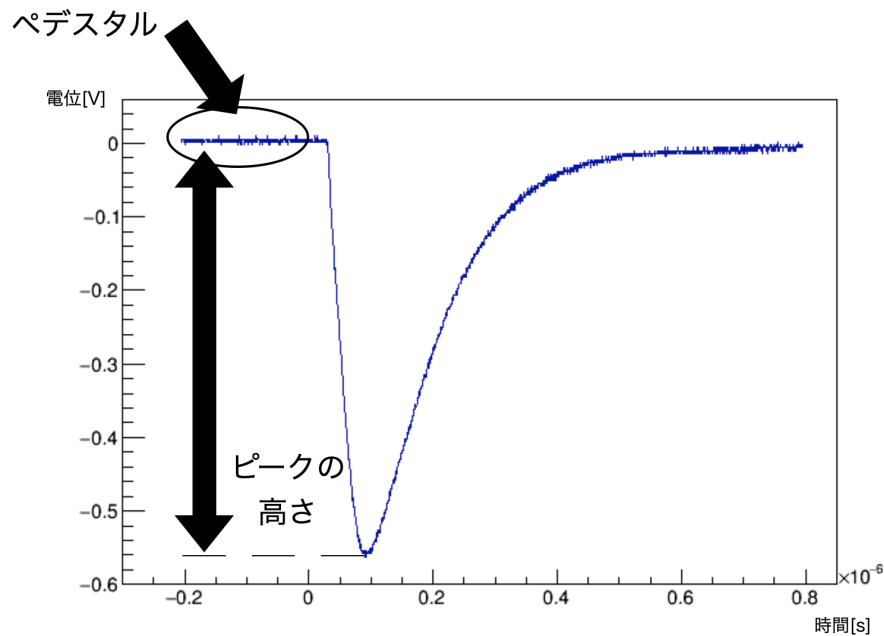


図 3.12: 取得した波形の一例

3.3 LED に印加する電圧の決定

修士論文発表会で説明した内容をさらに深く理解するために再度実験を行ったところ、測定用の MPPC とファイバーの間に隙間があるときに $R_{S/M}$ が大きくなることがわかった。そのため修士論文発表会で使用したデータは測定用の MPPC に入る光量が多すぎたため、MPPC に入った光量と MPPC で測定した電圧の線形性が保たれていない (サチュレーションが起きている) と予想した。

サチュレーションが起きているか、確認するために、端面から 1.0 m の点に LED の光を当てた波長変換ファイバーに、新たな 0.5 m の波長変換ファイバーを継ぎ足し、LED に印加する電圧を変えながら測定を行った。ファイバーの中心軸が揃っている状態から中心軸が 0.9 mm ずらし、LED に印加する電圧を変えながら測定を行った結果 $R_{S/M}$ は安定していた。ファイバーの中心軸が揃っている状態では LED に電圧を下げるにつれて $R_{S/M}$ が大きくなり、十分下げたところで $R_{S/M}$ が安定する。以上より修士論文発表会で使用したデータはサチュレーションが起きているデータが含まれていることがわかった。

本研究では光量が最も多くなる状態で電圧を変えながら測定を行い、 $R_{S/M}$ が安定する電圧で測定をした。印加する電圧の値は実験により異なるため適宜説明する。

第4章 実験

4.1 継ぎ目の有無による光量変化

FBの下流部にファイバーを継ぎ足して改良する際に新たに読み出す位置では、どのくらいの光量が得られるか予想するために、継ぎ目がある場合と無い場合に観測できる光量を比較する二つの実験を行った。

まず、継ぎ目がない場合の光量を調べた。継ぎ目がない場合のセットアップを図4.1に示す。光量を測定するファイバーの端面から1mの地点にLEDの光を当て、端面から出る光量を測定した。

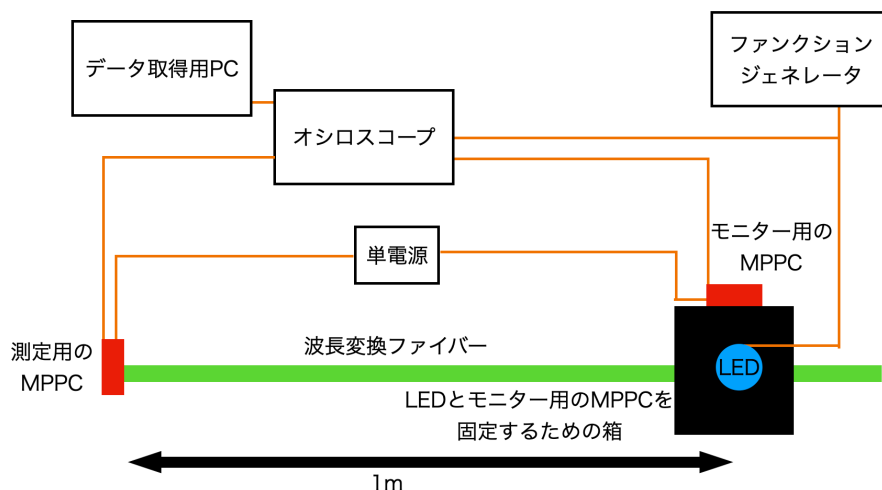


図 4.1: 継ぎ目がない場合のセットアップ

また、LEDに印加する電圧の決定するために、継ぎ目がない状態でLEDに印加する電圧を変えながら $R_{S/M}$ の変化を調べた。その結果を図4.2に示す。この図からLEDにかける電圧が1440 mVより大きくなると $R_{S/M}$ が減少し、LEDにかける電圧が1440 mVより小さいところでは、誤差が大きいがほとんど一定である。これは測定用のMPPCでサチュレーションが起き、モニター用のMPPCではサチュレーションが起きていないため $R_{S/M}$ が減少したと考えた。そのため、サチュレーションが起きていない電圧である1420 mVに決め、継ぎ目のある場合でも1420 mVの電圧をLEDに印加した。

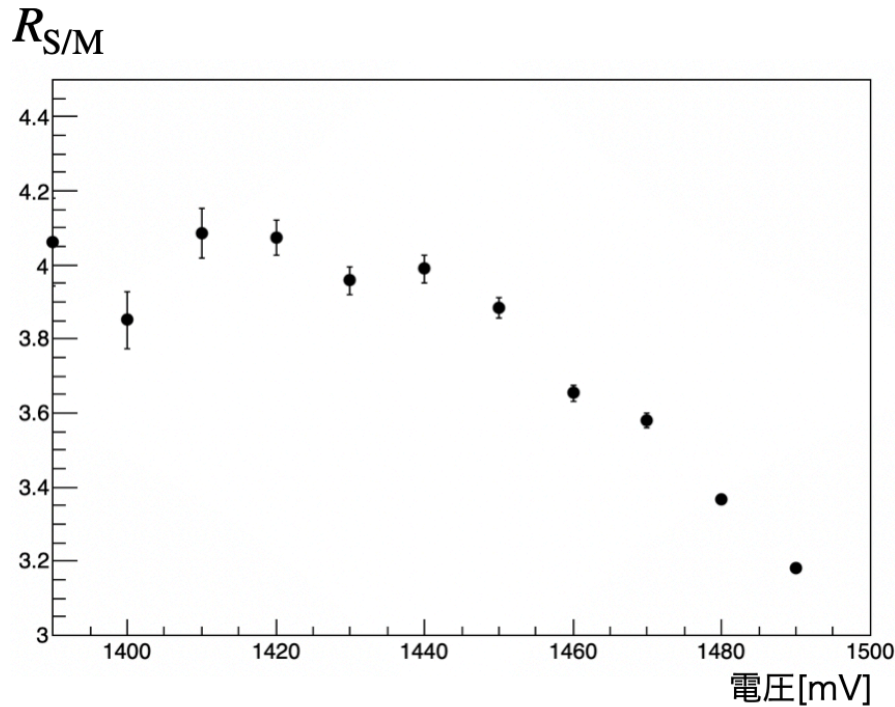


図 4.2: LED にかける電圧の変化に依る $R_{S/M}$ の変化

次に継ぎ目が有る場合の光量を調べた。一つ目の実験で使用したファイバーを光量の測定をした端面から 0.2m の地点で切断しその端面をファイバーフィンを用いて研磨した。また、測定用の MPPC はファイバーにつけたままファイバーの切断、研磨を行った。切断により新たにできた端面を突き合わせてファイバーを継ぎ足した。継ぎ足したファイバーの逆側の端面に測定用の MPPC を設置して光量を測定した。ファイバーを継ぎ足す際にファイバーの軸を揃え、継ぎ目にグリスを入れなかった場合と、グリスを入れた場合の二つの実験を行なった。

継ぎ目がない場合は $R_{S/M} = 4.00 \pm 0.02$ であった。また、継ぎ目にグリスを入れなかった場合は $R_{S/M} = 3.39 \pm 0.02$ であった。継ぎ目にグリスを入れた場合は $R_{S/M} = 3.79 \pm 0.02$ であった。以上より、ファイバーを切断すると光量は継ぎ目にグリスを入れなかった場合 ($15.3 \pm 0.7\%$) 減少した。また、継ぎ目にグリスを入れることにより光量は ($11.8 \pm 0.8\%$) 上がる。

4.2 ファイバーの位置関係による光量変化

第2章で説明したファイバーの位置関係のずれには2つのファイバーの中心軸のずれとファイバー間の隙間によるずれの二種類が存在する。3軸のステージを使ってファイバーをずらし、光量の変化を調べた。LED から MPPC の距離は、LED

の光を当てる波長変換ファイバー 0.8 m と、継ぎ足すファイバー 0.2 m である (ファイバー間にグリースを入れなかった実験のファイバー軸のずれによる光量の変化を測定した実験は、LED の光を当てる波長変換ファイバー 1.0 m と、継ぎ足すファイバー 0.5 m)。また、二種類のずれについてファイバー間にグリースを入れた場合と入れてない場合で測定をした。

4.2.1 グリースを入れなかった場合のファイバーの位置関係による光量変化

まず、2つのファイバーの間にグリースを入れなかった場合の $R_{S/M}$ がファイバーの中心軸のずれにどう依存するかを調べた。3軸ステージに固定している波長変換ファイバーを軸が揃っている位置に移動させ、x軸方向に中心軸をずらして測定を行った。ファイバー間にグリースを入れなかった実験のファイバー軸のずれによる光量の変化を測定した実験は、LED の光を当てる波長変換ファイバー 1.0 m と、継ぎ足すファイバー 0.5 m を使用した。

LED にかける電圧を決めるために、ファイバーの中心軸が揃っていて、ファイバー間の隙間がない状態で、LED に印加する電圧を変えながら $R_{S/M}$ の変化を調べた。その結果を図 4.3 に示す。この図から LED にかける電圧が 1600 mV より大きくなると $R_{S/M}$ が減少し、LED にかける電圧が 1600 mV より小さいときは、1560 mV での $R_{S/M}$ が他の点に比べ小さいものの、ほぼ一定である。そのため、サチュレーションが起きていない 1580 mV の電圧を LED に印加する電圧に決めた。

ファイバーの間にグリースを入れなかった場合の2つのファイバーの中心軸のずれによる光量変化を図 4.4 に示す。このグラフで赤い線は2つのファイバーが重なっている面積を $R_{S/M}$ と最大値が一致するように正規化して表している。多少のずれはあるが、 $R_{S/M}$ の変化は重なっている面積の変化と似た変化をしている。光量は、ファイバーの中心軸が揃った状態から 0.10 mm ずれると $(11.2 \pm 0.7)\%$ 減少し、0.25 mm ずれると $(33.2 \pm 0.5)\%$ 減少する。

次に、2つの fiber の間にグリースを入れなかった場合、 $R_{S/M}$ がファイバー間の隙間にどう依存するかを調べた。この測定では、LED にかける電圧は 1420 mV であった。ファイバー間の隙間がなくファイバーの軸方向が揃っている位置にし、3軸のステージを z 軸方向に動かして隙間を作り測定をした。

ファイバー間にグリースを入れなかった場合の、ファイバー間の隙間と光量の関係を図 4.5 に示す。隙間の大きさが 0 mm から 0.05 mm に変化する間は直線的に光量が減少している。また、隙間の大きさが 0.10 mm から 0.30 mm に変化する際も直線的に光量が減少していて、隙間の大きさが 0 mm から 0.05 mm に変化する際に比べ急激に光量が減っている。

ファイバー間の隙間の大きさによる光量の変化は、ファイバー間に隙間がない場合に比べ、0.05 mm 隙間がある場合 $(2.9 \pm 0.9)\%$ 減少し、0.1 mm 隙間がある場合 $(6.5 \pm 0.9)\%$ 減少する。

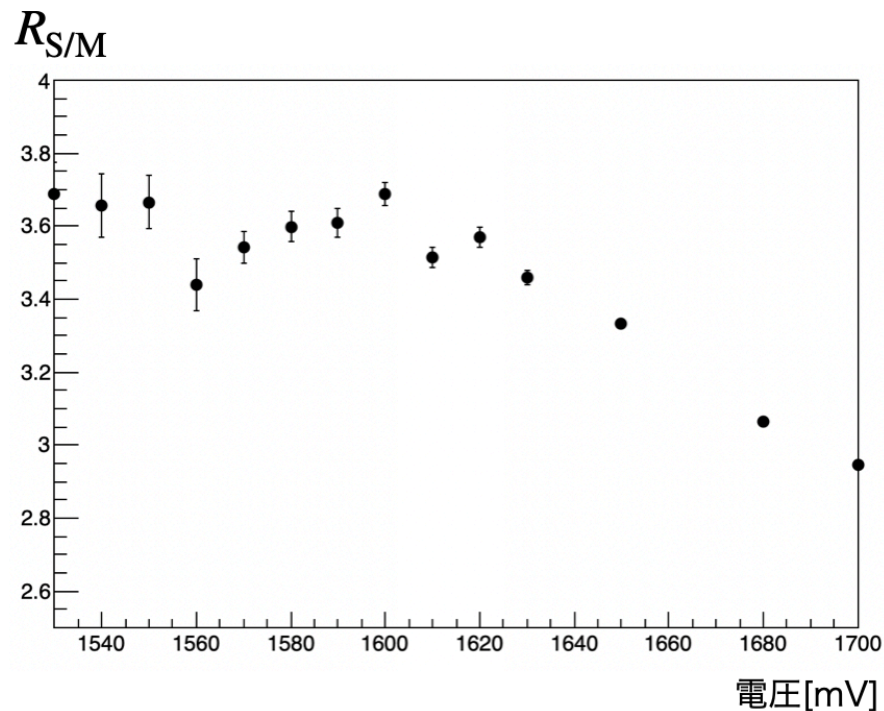


図 4.3: LED にかける電圧の変化に依る $R_{S/M}$ の変化

4.2.2 グリースを入れた場合のファイバーの位置関係による光量変化

次にファイバー間にグリースを入れ、ファイバー間にグリースを入れなかった場合と同じ手順で2つのずれによる光量の変化を測定した。グリースを入れた実験では、LEDにかける電圧は1420 mVであった。

まず、2つのファイバーの中心軸のずれによる光量変化を図4.6に示す。少しずれはあるが、測定した $R_{S/M}$ と面積の依存性は似ている。また、光量は中心から約0.10 mm ずれると $(14.5 \pm 0.8)\%$ 減少し、約0.20 mm ずれると $(30.2 \pm 0.6)\%$ 減少する。

次に、ファイバー間の隙間と光量の関係を図4.7に示す。ファイバー間の隙間が0 mm から0.05 mm までは誤差棒の範囲内でほとんど一定であるが、直線的に光量が減少している。また、ファイバー間の隙間が0.15 mm から大きくなるにつれて光量の減少率も大きくなっていて、0.25 mm から0.30 mm に変化すると光量が著しく減少している。

ファイバー間の隙間による光量の変化は、ファイバー間に隙間がない場合に比べ、0.05 mm 隙間がある場合 $(2.7 \pm 0.9)\%$ 減少し、0.10 mm 隙間がある場合 $(4.4 \pm 0.9)\%$ 減少する。

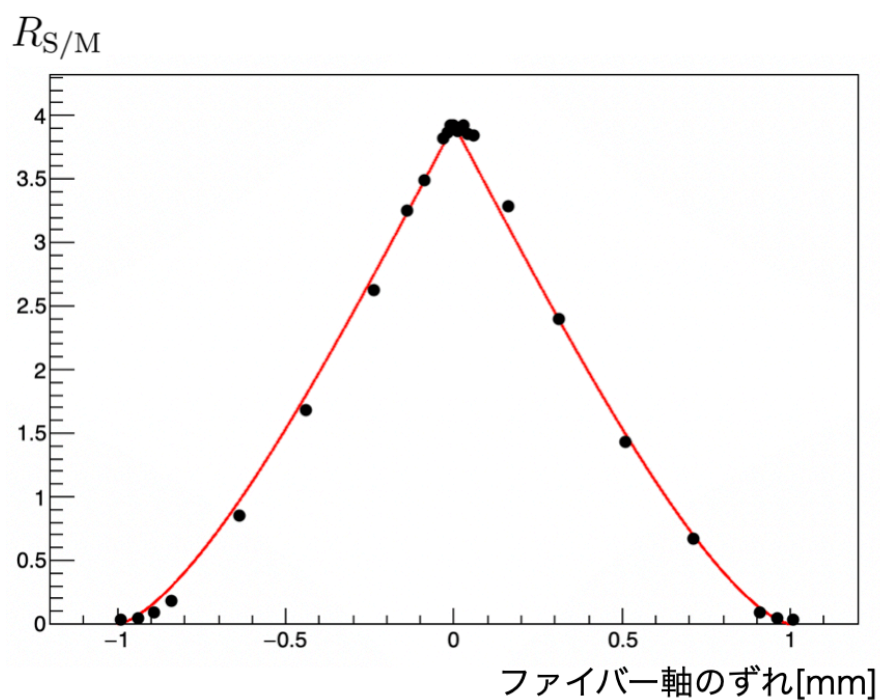


図 4.4: ファイバー間にグリースを入れなかった場合の継ぎ目軸のずれによる光量変化。点は測定した値。線はファイバー同士が重なっている面積を最大値を基準に正規化したもの。エラーバーは、プロットした点より小さいため隠れている。

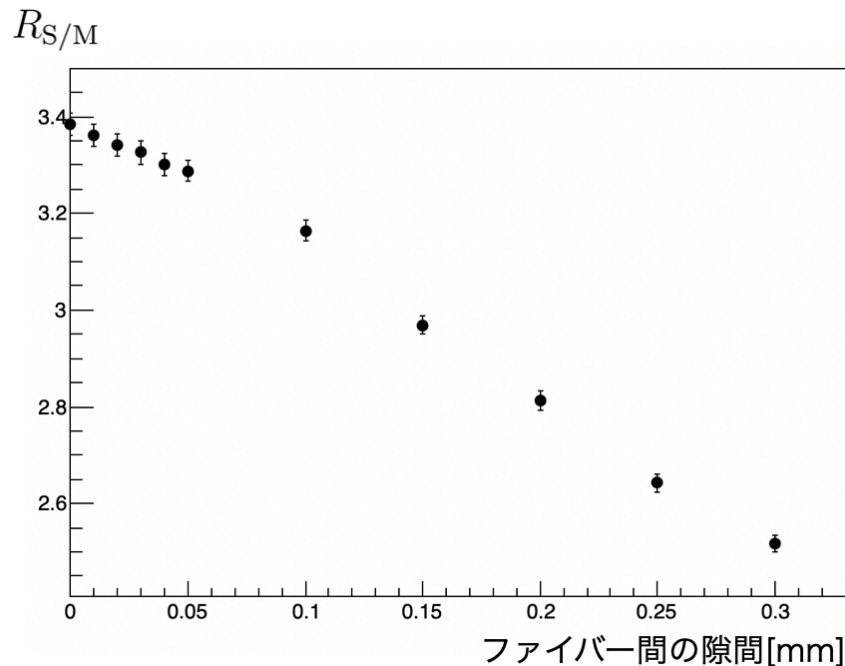


図 4.5: グリースを入れなかった場合のファイバー間の隙間と光量の関係

4.3 波長変換ファイバーから出る光の角度分布

波長変換ファイバーの端面から放出される光の角分布を知るために、ファイバーから 10 cm 離れた位置で波長変換ファイバーから出る光の角度分布を 10° 毎に測定した。使用した MPPC の受光面が $6 \times 6 \text{ mm}^2$ であるため、ファイバー端面から見た MPPC の立体角は 3.6 msr である。この測定では LED 光を当てる位置が、ファイバー端面から 1.0 m、1.5 m、2.0 m の 3 つの条件で、ファイバー端面から出てくる光の角度分布を測定した。発光点が端面から 1.0 m で 0° の方向に放出された光を測定するときのセットアップを図 4.8 に示す。

セットアップのうち波長変換ファイバー端面と MPPC の位置関係を図 4.9 に示す。図 4.10 に示す長さ 4.2 cm、開口 7 mm の筒状のコリメーターを使用し、遮光に使用した暗幕や、暗幕内部にある部品による反射の影響を減らした。このコリメーターも他の作成した道具と同様に 3D プリンターで黒色の PLA フィラメントを使い作成した。

角度による波長変換ファイバーから出る角度による光量を図 4.11 に示す。全ての発光点と端面の距離に関わらず 40° から 50° の間で著しく光量が下がっている。

この実験のデータは修士論文発表会で使用したデータと同じである。図 4.2 の LED に印加する電圧が 1420 mV の測定用の MPPC のピーク電圧の分布を図 4.12 に示す。また、ファイバーから出る光の角度分布の測定データの中で測定用の MPPC に入る光量が最も大きい 0° のときのピーク電圧の分布を図 4.13 に示す。二つの

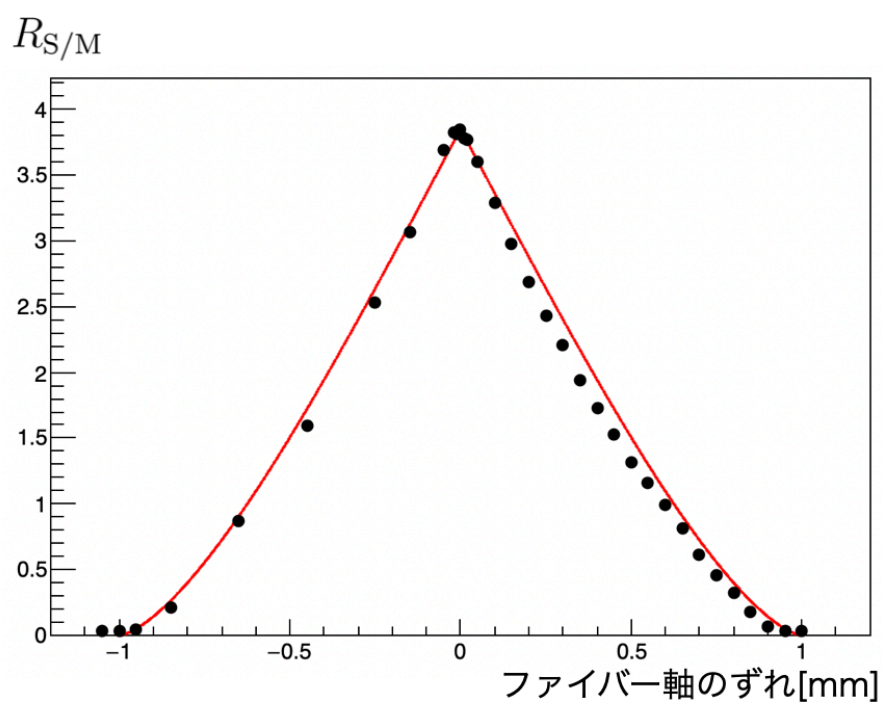


図 4.6: ファイバー間の隙間にグリースを入れたときの継ぎ目軸のずれによる光量変化。点と線は図 4.4 と同様にそれぞれ、測定した値、ファイバー同士が重なっている面積を最大値を基準に正規化したもの。エラーバーは、プロットした点より小さいため隠れている。

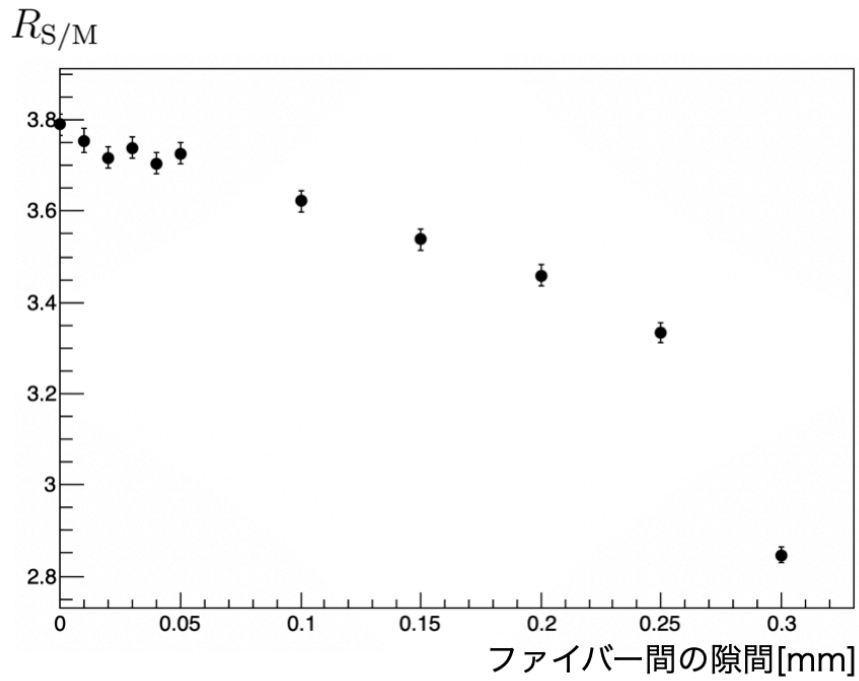


図 4.7: グリースを入れた場合の光量のファイバー間の距離依存

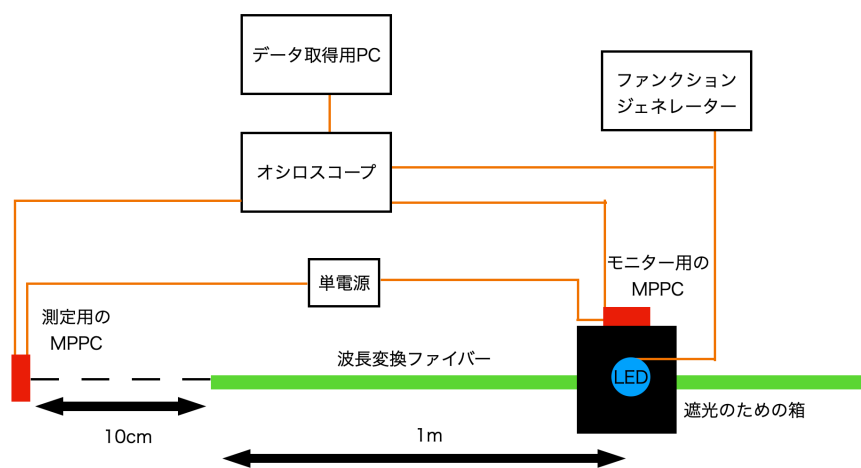


図 4.8: 発光点が端面から 1m で 0° のときのセットアップ

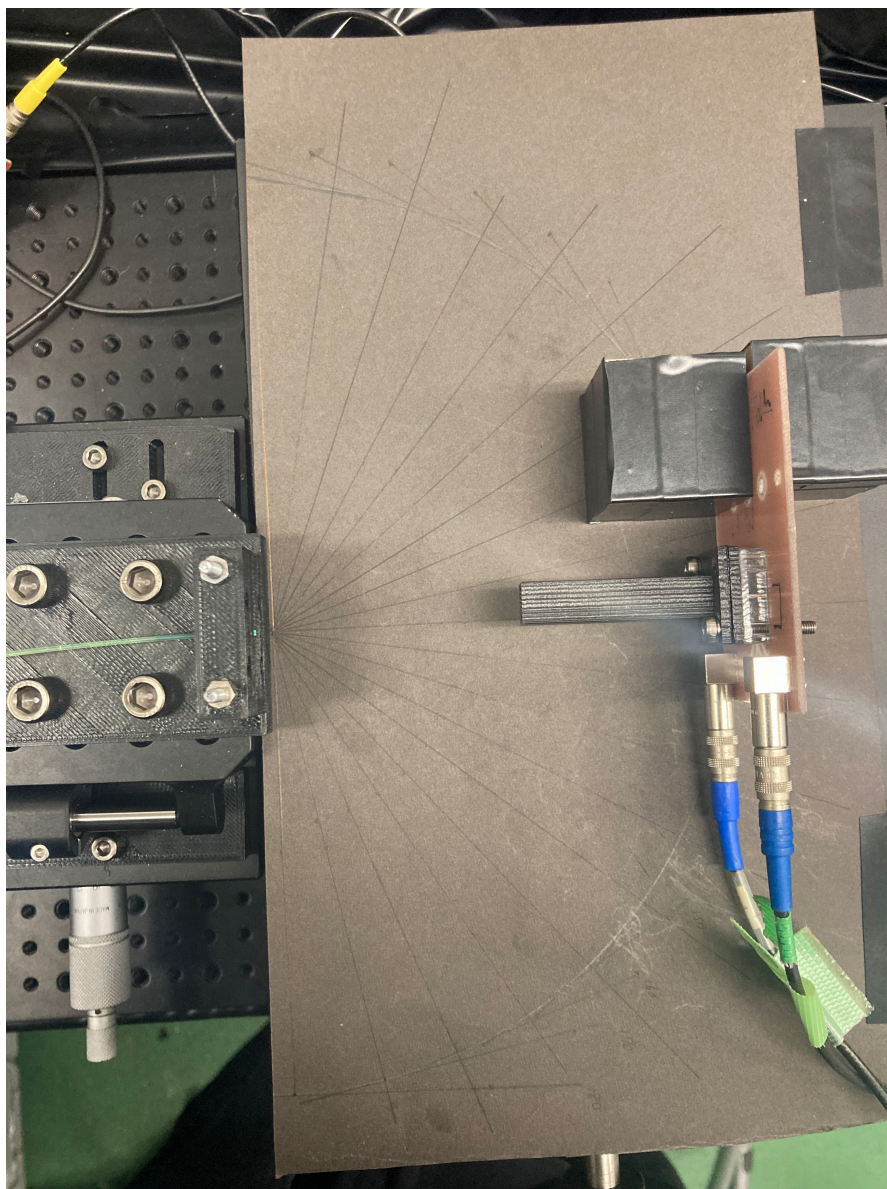


図 4.9: 波長変換ファイバー端面と MPPC の位置関係

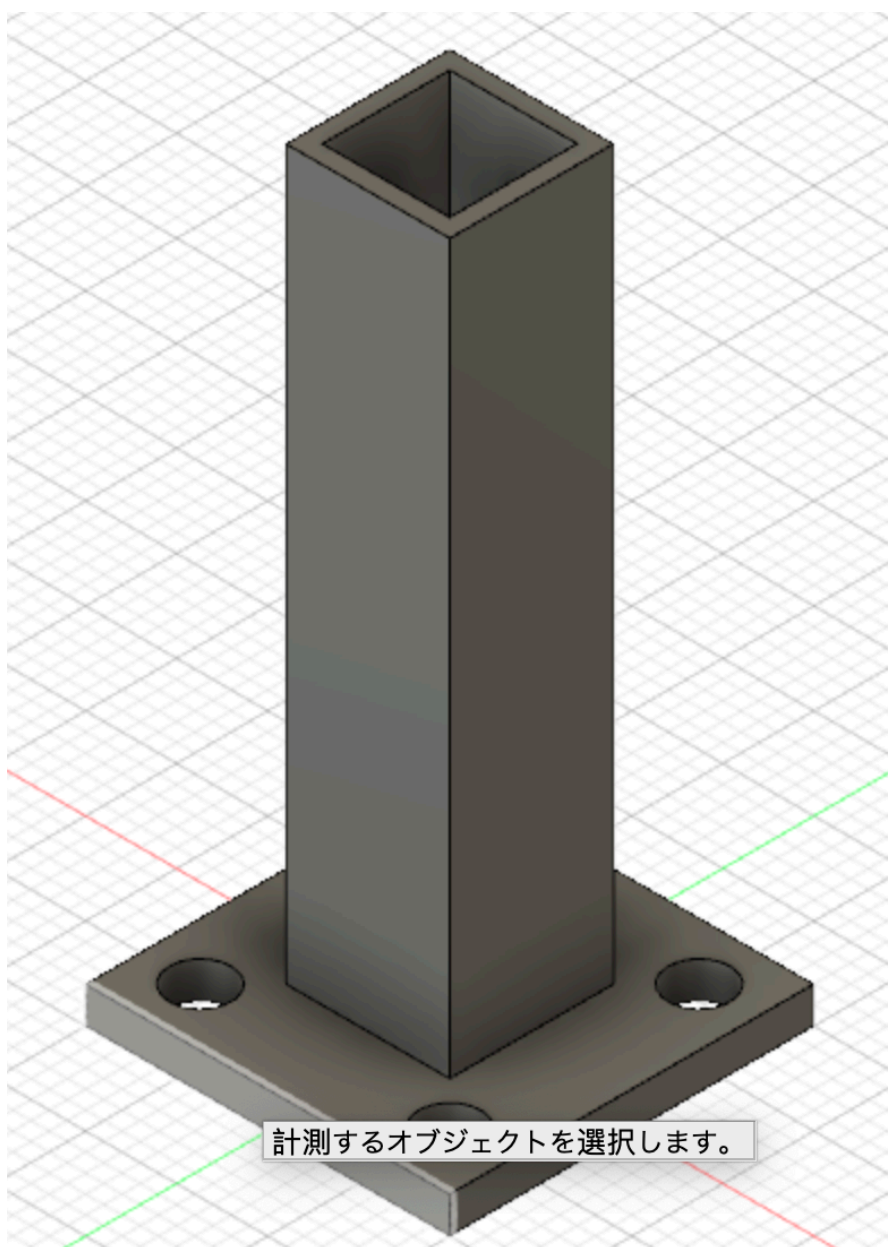


図 4.10: コリメーター

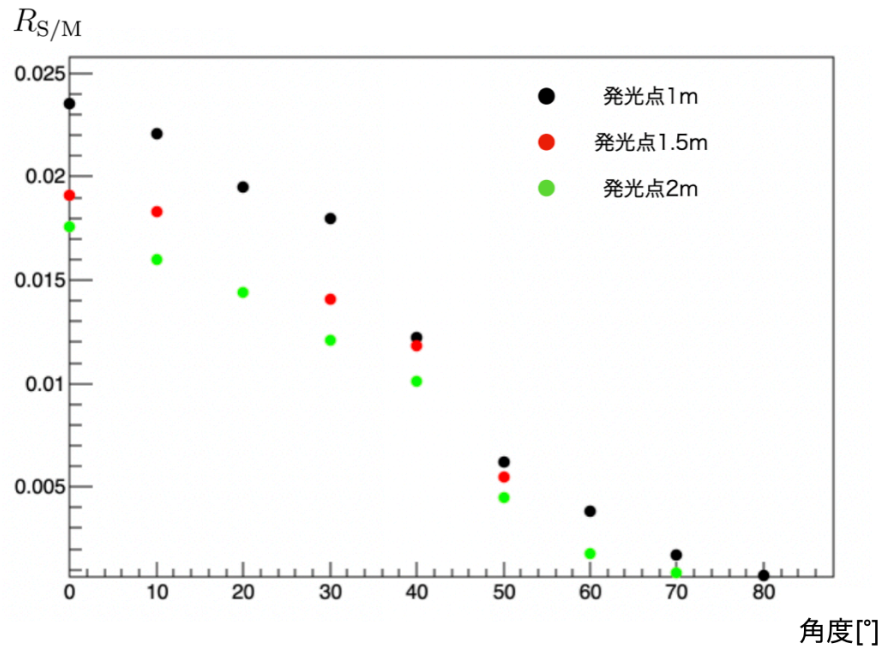


図 4.11: 波長変換ファイバーから出る光の角度分布

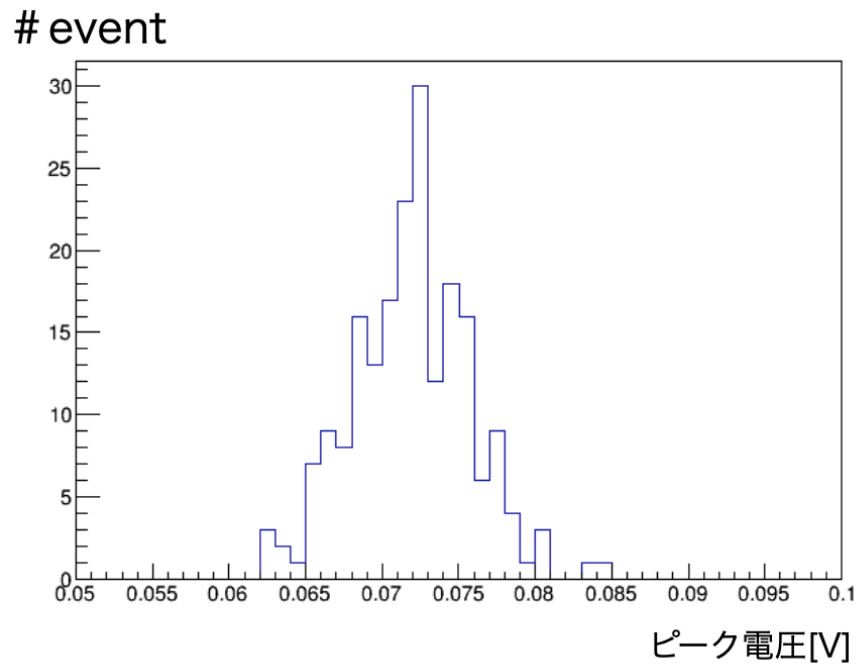


図 4.12: 図 4.2 の LED に印加する電圧が 1420 mV の測定用の MPPC のピーク電圧の分布

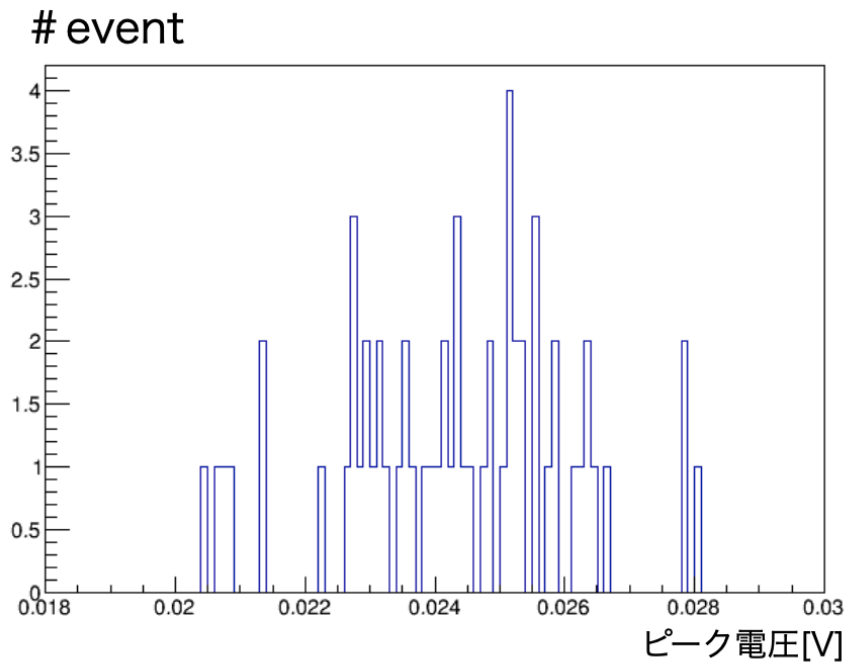


図 4.13: 0° のときの測定用の MPPC でそくていされたピーク電圧の分布

図からわかるように、測定用の MPPC で測定している光量がサチュレイションする光量に比べ少ない。また、測定用の MPPC とファイバーの端面が十分離れているため、この測定ではサチュレイションが起きていないと考えた。

第5章 考察、今後の課題

5.1 考察

5.1.1 継ぎ目の有無による光量変化

光が境界面に入射すると、そこで反射する光と透過する光が存在する。ファイバーの継ぎ目を透過する光の割合は、ファイバーから出る光の角度分布とフレネルの式を用いて予想できる。

フレネルの式を使った透過率の予想方法

ある入射角 α で光が入射したときの屈折角を β とすると、s 偏光 (電場が入射する境界面に対して垂直な面内にある偏光) と p 偏光 (電場が入射する境界面に対して水平な面内にある偏光) の電磁波の透過率 t_s 、 t_p に関するフレネルの式は以下の通りである。

$$t_s = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (5.1)$$

$$t_p = \frac{2 \sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha - \beta)} \quad (5.2)$$

s 偏光、p 偏光のエネルギー透過率 T_s 、 T_p は以下の通りである。

$$T_{s,p} = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} t_{s,p}^2 \quad (5.3)$$

$$= \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin \beta \cos \alpha} t_{s,p}^2 \quad (5.4)$$

この右辺に式 5.1 と式 5.2 を代入すると、

$$T_s = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin \beta \cos \alpha} \times \frac{4 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (5.5)$$

$$= \frac{4 \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \cos \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (5.6)$$

$$T_p = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin \beta \cos \alpha} \times \frac{4 \sin^2 \beta \cos^2 \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta) \sin^2(\alpha - \beta)} \quad (5.7)$$

$$= \frac{4 \sin \alpha \cos \beta \sin \beta \cos \alpha}{\sin^2(\alpha + \beta) \sin^2(\alpha - \beta)} \quad (5.8)$$

また、波長変換ファイバーで吸収、発光した光子は s 偏光である確率と p 偏光である確率は等しい。そのためファイバー端面に入射する光子も s 偏光と p 偏光が同じ割合で入射すると仮定すると、透過する確率 T は以下のようになる。

$$T = \frac{T_s + T_p}{2} \quad (5.9)$$

継ぎ目がない場合の境界面は MPPC と接している端面のみである。継ぎ目がある場合は 3 つの境界面がある。1 つ目は継ぎ足したファイバーと MPPC が接している端面、2 つ目は、LED の光を当てたファイバーの継ぎ足し部の端面、3 つ目は、継ぎ足したファイバーの端面である。このうち MPPC と接している端面は全てに共通しているため継ぎ足しの有無による効果を比較する際にその効果は帳消しになる。そのため、継ぎ足し部の 2 つの境界による透過率のみを考えれば良い。

ファイバーの端面同士が平行のときファイバーから角度 α で入射した光は屈折角 β でファイバーから出て空気もしくはグリースを通り、入射角 β でファイバーに入射し角度 α に屈折する。またフレネルの式の導出の際は境界条件のみを使い、入射方向の条件は課していない。また、透過率 $T_{s,p}$ は α と β の入れ替えに対して同じ式になっている。よって透過率 T は α 、 β の交換に対して対象でありファイバーから境界面に対してある角度 α で入射する光の透過率は T^2 である。

透過率の予想と結果の比較

角度 β でファイバーから出てくる光の総量は波長変換ファイバーから出てくる角度分布に $\sin \beta$ を掛けたものに比例する。角度分布の測定では測定値に $\sin \beta$ をかけたものを図 5.1 に示す。赤い線は、波長変換ファイバーから出てくる角度分布のデータ点の間を直線で結び、その値に $\sin \beta$ を掛けたものである。

今回の測定では測定用の MPPC とファイバーの端面の間に 1.5 mm の隙間があり、MPPC の受光面がであり、波長変換ファイバーの中心と MPPC の受光面の中心が揃っている。ファイバーから出る光がファイバーの中心の点から出ているとすると仮定し、MPPC の受光面を半径 3 mm の円形部分だけにちゅうくすると、z 軸方向 1.5 mm 進む間に半径 3 mm に広がる光は、MPPC に入るので、 0° から $\arctan(3/1.5) \approx 1.1 \text{ rad}$ ($\approx 63^\circ$) までの光を測定したことになる。そのため、継ぎ目がないときに測定される光量に対する継ぎ目があるときの光量の割合 τ は、

$$\tau = \frac{\int_0^{1.1} T^2(\theta) \times R_{S/M}(\theta) \times \sin \theta d\theta}{\int_0^{1.1} R_{S/M}(\theta) \times \sin \theta d\theta} \quad (5.10)$$

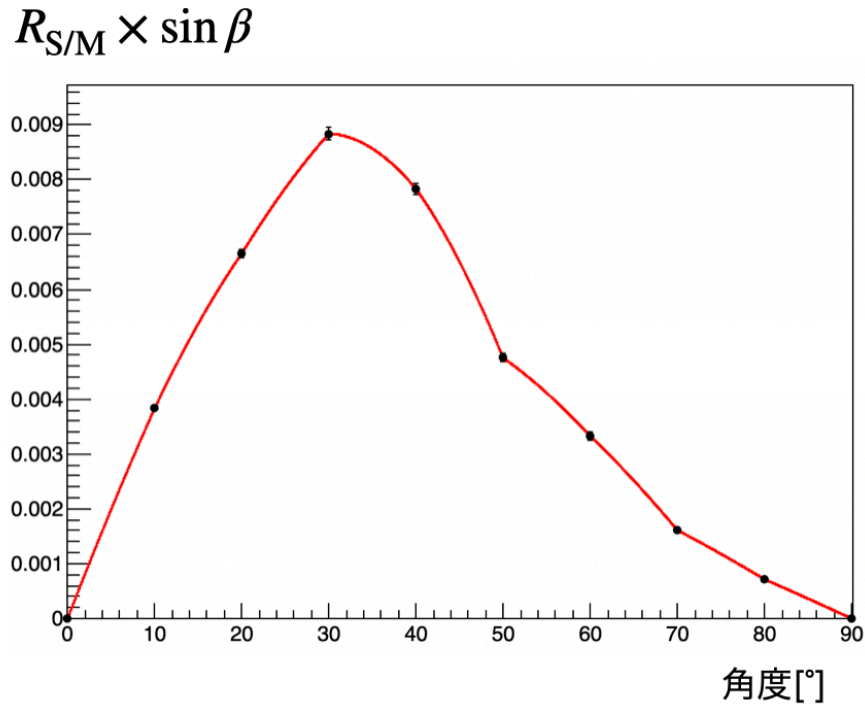


図 5.1: 角度分布に $\sin \beta$ を掛けたグラフ

となる。

ファイバーの屈折率を 1.59、グリースの屈折率を 1.42、空気の屈折率を 1.00 とし て計算した結果、継ぎ足しが無い場合に比べて、グリースを入れた場合は $(99.1 \pm 0.3)\%$ 、グリースを入れなかった場合は $(88.7 \pm 0.3)\%$ の光が透過する。これらの予想に対応する測定値は、グリースを入れた場合継ぎ足しが無い場合に比べて $(94.7 \pm 0.7)\%$ 、グリースを入れなかった場合は $(84.7 \pm 0.7)\%$ であり、予想に比 べて透過率は約 5% 程度小さい。

この原因としては、ファイバー内部を光が反射する際に偏光が変わり、s 偏光と p 偏光の割合が変化した可能性が考えられる。ファイバーから出る光が p 偏光のみだった場合透過率の予想は、ファイバー間の隙間が空気の場合 $(94.3 \pm 0.3)\%$ 、ファイバー間の隙間がグリースの場合 $(99.7 \pm 0.3)\%$ となる。ファイバーから出る光が s 偏光のみだった場合透過率の予想は、ファイバー間の隙間が空気の場合 $(83.3 \pm 0.3)\%$ 、ファイバー間の隙間がグリースの場合 $(98.5 \pm 0.3)\%$ となる。ファイバー間の隙間がグリースの場合は s 偏光、p 偏光の割合による透過率の変化では説明がつかない。

また、波長変換ファイバーの軸中心軸を揃える際に最も光量が大きくなる点で測定を行っていたが、実際の中心は少しずれていた可能性が考えられる。ファイバーの中心を揃える際に、ファイバー間の隙間が空気の状態で中心軸が揃っている状態を探した。しかし、その後ファイバー間の隙間にグリースを入れてファイバー

軸のずれによる光量の変化を測定したところ $R_{S/M}$ が最も大きくなる点は 0.02 mm のずれがあった。0.02 mm のずれがあった場合、重なる面積は約 2.5% 減少する。もう一軸側にも 0.02 mm のズレがあった場合中心軸のずれは約 0.02 mm のずれになる。0.03 mm のずれがあった場合、重なる面積は約 4% 減少する。

その他の原因としては、角度分布を測定する際に光を絞らず測定を行ったことや、測定点が少なく間の角度の光量を直線で結んで予想したこと、ファイバーの径が MPPC との隙間に比べて十分小さくないため、積分する範囲が異なるなどの影響が考えられる。

中心軸のずれによる影響を排除する方法としては、継ぎ足すファイバーの径を継ぎ足される波長変換ファイバーの径より大きいものを使うことで排除できる。また、角度分布の測定では角度を細かく測定することに加え、スリットを使い、光を絞ればより正確に測定ができる。

5.1.2 継ぎ目の間隔に依る光量

継ぎ目の間隔に依る光量の変化は、ファイバー間の隙間が空気の場合 (図 4.5) と、グリースの場合 (図 4.7) で異なった。

ファイバー間がグリースの場合の $R_{S/M}$ を、ファイバー間が空気の場合の $R_{S/M}$ で割った値を $R_{G/A}$ とし、図 5.2 に示す。ファイバー間に間隔が 0.05 mm 以下の点ではほとんど一定であるが、0.05 mm より間隔が大きい場合、間隔が大きくなると $R_{G/A}$ は増加する傾向にある。これはグリースと空気の境界面で反射が起き、グリースを入れなかった場合に比べて継ぎ足したファイバーに入る光が増加したと考える。また、ファイバー間の隙間が 0.30 mm では 0.25 mm に比べ小さくなった。すきまが、SI0.30mm のときはファイバー間に入れたグリースは、表面張力によりくびれた状態でファイバー間に入っていた。このくびれにより一部の光が空気中に放出されたためだと考えた。

5.2 上流部円筒型検出器の改良に向けた課題

上流部円筒型検出器の改良をファイバーを継ぎ足して行う上での課題は三つある。一つ目は、継ぎ足したファイバーをどのような経路で検出器の外側に出して PMT で読み出すか。二つ目は、継ぎ足すファイバーと既存のファイバーをどのように接着するのか。三つ目は、ファイバーの継ぎ足しを 1 万本以上行う必要があり、どのようにして精度良く継ぎ足しを行えるかである。

一つ目のファイバーを検出器の外側に出すためにはいくつかの経路が考えられるが、どの経路を選んでも継ぎ足すファイバーの長さは、3 m 以上になる。そのためファイバーの減衰長がなるべく長いファイバーを使う必要がある。波長変換ファイバーはコア部に波長変換材を使っているため、減衰長はクリアファイバーに

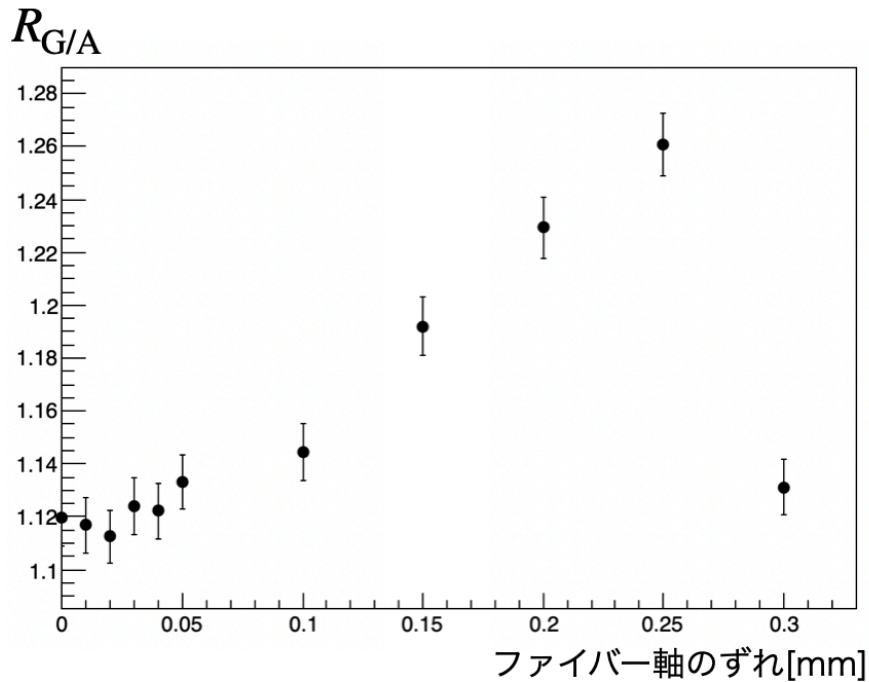


図 5.2: ファイバー間にグリースを入れた時に得た $R_{S/M}$ に対するグリースを入れなかった時に得た $R_{S/M}$ の比

比べ短い。そのため継ぎ足すファイバーをクリアファイバーにするという方法を検討するとよい。

二つ目のファイバーの接着方法は、ファイバー間の屈折率を調整し、ファイバー同士を接着できる光学セメントを使う方法が考えられるが、光学セメントを使っても問題ないか実験する必要がある。

三つ目のファイバーの継ぎ足しに関しては、継ぎ足すファイバーの径を 1 mm より大きいものにする事で軸方向のズレが多少あっても得られる光量があまり変わらなくなる可能性がある。そのためファイバーの継ぎ足すファイバーの径が大きいもので 2 つのファイバーの中心軸のずれによる光量について実験するとよい。

第6章 結論

本研究では、KOTO 実験で使用している FB の改良に向け、ファイバーの継ぎ足しによる光量の変化に関する実験を行った。その結果以下のことがわかった。

- ファイバー間の隙間の屈折率を調節しない場合、継ぎ目の影響で読みだせる光量は $(15.3 \pm 0.7)\%$ 減少する。
- ファイバー間の隙間の屈折率をグリースで調節した場合読み出せる光量は、継ぎ足しを行わなかった場合に比べると $(5.3 \pm 0.7)\%$ 減少する。
- ファイバー間の隙間の屈折率をグリースで調節した場合ファイバーの中心軸が 0.1 mm ずれると $(14.5 \pm 0.8)\%$ 減少し、 0.2 mm ずれると約 $(30.2 \pm 0.6)\%$ 減少する。
- ファイバー間の隙間の屈折率をグリースで調節した場合グリースの塗る量にもよるが十分な量塗った場合隙間の大きさが 0.05 mm の場合 $(2.7 \pm 0.9)\%$ 減少し、 0.1 mm の場合 $(4.4 \pm 0.9)\%$ 減少する。

以上からファイバーの継ぎ足しをする際にファイバーの間の屈折率を調整することで継ぎ足しによる光の損失は小さくできることが明らかになった。また、今回使ったグリースを使用し、ファイバー間に隙間が無い状態で継ぎ足した場合軸方向のズレは 0.10 mm 以下にし、継ぎ足す隙間は、 0.10 mm 以下でファイバーを継ぎ足すことで継ぎ目による光の損失は $0.947 \times 0.855 \times 0.956 = 77.4\%$ に抑えることができる。

謝辞

本論文を作成するにあたり非常に多くの方々にお世話になりました。

山中卓教授には、実験の方法や解析方法、論文の書き方や構成、誤字脱字や、説明がわかりづらい等の指摘、実験結果からどのような物理が起きているのかを考える際相談に乗ってもらい勉強足らずな私に様々なアドバイスを最後まであきらめずくださりました。また、私が病気になった時はすぐに連絡をくださり研究以外の面でもたくさん助けてもらい、ことあるごとに声をかけていただき、研究のことはもちろんのこと体調に関することも気にかけてくださり、ありがとうございました。

南條創准教授には実験をするための道具を購入する際、私が困らないよういつも必要なら買おうと言ってくださり研究のための環境を整えていただきました。また、研究の内容の面でも勉強足らずな私に基礎的な内容に関してもどのように考えればわかるか教えてくださりありがとうございました。

廣瀬稔助教には、修士論文発表会の練習の際の指摘や、修士論文発表会前に色々なアドバイスをいただきました。特に修士論文発表会前日に話した内容をお忙しい中寝るまでの間考えとくねと言っていたいただき、実際に次の日にどのようなことが起こっていきそうかアドバイスをいただき、とても嬉しかったのに加えびっくりしました。

小寺克茂さんと白石諒太さんには修士論文発表会の前や修士論文提出直前に私のことを心配して何度も、何かわからないことがあったら気にしないで相談してね。修士論文発表会の練習付き合おうか。と声をかけていただきとても嬉しかったです。小寺さんには昨年千葉大に移られた清水信宏さんが花井くんは大丈夫？と心配してたよと声をかけていただいたり、KOTO 実験の解析に関して勉強不足な私と一緒に考えたり、プログラミングのことを教えていただき、ありがとうございました。白石さんには発表の練習やわからないことをたくさん質問しとても迷惑をかけました。私が修士論文発表会で大きな失敗をしなかったのは白石さんのおかげです。

加藤大志くんは、M1 の頃素粒子実験のことを何も分かっていない私に優しく教えてもらいました。また、論文を書くときはLaTeX のことや、物理のことで相談に乗ってもらいました。加藤くんも頑張っているし、みんなで卒業したいという思いで頑張れました。

KOTO グループの M1 の小野啓太くんと北川歩くんはいつも一緒の実験室で実験をし小野くんと北川くんがまだやっているから私もまだ頑張らなきゃという気

にさせてもらったり、私の研究が進むよう道具を使用するのを我慢して、私が優先して使えるようにしてもらいました。また、山中教授や、南條准教授には聞けないような基礎的な内容で困った時は呆れずに教えていただきありがとうございました。小野くんには修士論文発表会の前日などに発表の練習に付き合ってもらいスライドのアドバイスや指摘がありそうな点についてコメントをいただきました。

Mario Gonzalezさんは、休みの日や夜遅くまで作業しているのを見て私も頑張ろうと思いました。

Lakmin Wickremasingheさんには私の研究に関連する論文のわからないところを教えていただきました。

岩田和志くんは修士論文を書く際斜め前で頑張っている姿を見て一緒に頑張ろうという気になりました。最後まで論文を書き切れたのは岩田くんは私より頑張っているから私ももっと頑張ろうという気持ちになりました。

ATLASグループのM1の荒久田周作さんと藤田侑葵子さんは出張で会えないことも多かったですが、二人も出張先で頑張っているから私も頑張ろうと思えました。また、私のくだらない話をいつも聞いてくれてありがとうございました。

B4の村井凜久さんと久郷莉奈さんは卒業論文を書くために勉強や実験をしている姿を見て私も頑張ろうと思いました。

秘書の前田さん、藤阪さんには大部屋にいただいたお菓子で元気ができました。藤阪さんには私が病気になった後会うたびに体調はどうかと心配していただきました。

最後に私のわがままで大学院まで行かせてくださった両親にはとても感謝しています。

参考文献

- [1] Andrzej J. Buras, Dario Buttazzo, Jennifer Girrbach-Noe and Robert Knegjens, “ $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ and $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ in the Standard Model: Status and Perspectives” J. High Energy Phys. 11, 33 (2015).
- [2] J-PARC の全体図,
<https://j-parc.jp/c/index.html>
- [3] 2020 年 12 月に行われた KOTO 実験全体のミーティング
- [4] Y.Tajima, “Barrel photon detector of the KEK $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ experiment”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 592, 261-272 (2008).
- [5] A.V.Khomchenko, “Waveguide Spectroscopy of Thin Films”, Academic Press,(2005).
- [6] クラレ、波長変換ファイバーのカタログ
https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf
- [7] Bicron,
<https://www.crystals.saint-gobain.com/radiation-detection-scintillators/fibers>
- [8] ファイバーフィン,
<https://fiberfin.com/product/fiberfin4-finishing-machine/>
- [9] 浜松ホトニクス、MPPC のカタログ,
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html

- [10] Junfeng Zhu, Keisuke Nakakubo, Yuya Mikami, Hiroaki Yoshioka, Kinichi Morita, and Yuji Oki, "Investigation and modeling of UV band-pass-filtering white compound materials for potting or embedding in micro-optical applications", *Optical Materials Express* (2019).