

T2K 実験の新型前置検出器 Super-FGD の キャリブレーションシステムの開発

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻
高エネルギー物理学実験研究室 博士前期 2 年
19844403 在原 拓司
指導教員 角野 秀一先生

2021 年 1 月 8 日

概要

T2K 実験は茨城県東海村に位置する J-PARC の大強度陽子加速器を用いて生成したニュートリノを、生成標的から 280 m 下流に位置する前置検出器と、295 km 遠方に位置する岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ (SK) で観測する長基線加速器ニュートリノ振動実験である。T2K 実験の目的はニュートリノ振動の観測によるニュートリノ混合角 θ_{23} の精密測定や CP 対称性の破れを示す位相 δ_{cp} に対する制限であり、それらの更なる精度向上には統計量の増加と系統誤差の削減が重要な課題となっている。

現在、ニュートリノの CP 対称性の破れを 3σ レベルの有意度で測定することを主な目標とした T2K-II 計画が進行中である。T2K-II では加速器のアップグレードと測定機関の延長で統計量の増強を図り、前置検出器のアップグレードで系統誤差の削減を行うことを計画している。

アップグレードされる前置検出器では Super-FGD という名称のニュートリノの標的兼飛跡検出器が新たに導入され、2022 年に稼働が予定されている。Super-FGD は約 200 万個のシンチレータキューブ、約 6 万本の波長変換ファイバーと、約 6 万の光検出器 MPPC からなる検出器で、高い位置分解能と立体角 4π のアクセプタンスを持つ。

本論文では Super-FGD におけるキャリブレーションシステムの開発について述べる。このキャリブレーションシステムは、Super-FGD の内部に設置され、LED を発光させることにより任意のタイミングで MPPC に光を入射し、検出器の健全性の確認や MPPC の増倍率のモニター、較正を担う装置である。キャリブレーションシステムに主に要求される構造および性能は、1 cm 以内の薄い構造であること、全てのファイバーへの光量分配が最大最小光量比 3 程度の一様性をもって行われることの 2 点である。本研究では導光板という加工したアクリル板を用いたキャリブレーションシステムを開発した。開発にあたり、デザインの考案から、製作、性能評価とデザインの最適化、組み立て方法の確立、最終版の LGP モジュールの性能評価などを行った。

目次

第 1 章	序論	10
1.1	ニュートリノについて	10
1.2	ニュートリノ振動について	11
1.2.1	ニュートリノ振動の理論	11
1.2.2	ニュートリノ振動実験について	15
1.3	ニュートリノと原子核の反応	18
第 2 章	T2K 実験	21
2.1	T2K 実験の概要	21
2.2	ニュートリノ生成部	22
2.2.1	J-PARC	22
2.2.2	ニュートリノビームライン	23
2.2.3	Off-axis 法	24
2.3	前置検出器	26
2.3.1	INGRID	26
2.3.2	ND280	27
2.3.3	WAGASCI-BabyMIND	29
2.4	スーパーカミオカンデ	29
2.5	T2K 実験の現状	31
2.6	T2K-II について	31
2.7	ND280 のアップグレード	33
2.7.1	ND280 の問題点	33
2.7.2	ND280 のアップグレードで導入される検出器	35
第 3 章	Super-FGD	37
3.1	Super-FGD 概要	37
3.2	各構成要素の詳細	39
3.2.1	シンチレーターキューブ	39
3.2.2	波長変換ファイバー	39

3.2.3	MPPC	39
3.2.4	読み出し回路	41
3.2.5	光学インターフェース	42
3.2.6	キャリブレーションシステム	42
3.2.7	キューブ組み立て方法	44
3.3	期待される性能	46
3.4	本研究の目的	47
第 4 章	導光板を用いたキャリブレーションシステムの開発	49
4.1	概要	49
4.1.1	導光板 (Light Guide Plate: LGP)	49
4.1.2	導光板による波長変換ファイバーへの LED 光の分配方法	50
4.1.3	キャリブレーションシステムの全体構成	52
4.1.4	LGP モジュール	52
4.2	キャリブレーションシステムへの要求	53
4.3	光源の開発	56
4.3.1	LED の種類と形状	56
4.3.2	LED と導光板の距離	62
4.3.3	コリメータによる光量の調節	63
4.4	導光板の開発	72
4.4.1	導光板の材質	73
4.4.2	導光板の厚み	73
4.4.3	Notch の深さ	73
4.4.4	Notch の大きさ	75
4.4.5	導光板の端面の処理	75
4.5	拡散板の評価	77
4.5.1	拡散板による光拡散の評価	77
4.5.2	光学クロストークの評価	78
4.5.3	拡散板の側面とねじ穴の処理	82
4.6	波長変換ファイバーの垂直方向のずれによる光量変化量の評価	84
4.6.1	導光板に対して垂直方向のずれによる光量変化	84
4.6.2	垂直方向のずれの要因と対応策	84
4.7	LGP モジュールのデザイン	87
4.7.1	LGP モジュールの固定方法と懸念事項	87
4.7.2	LGP モジュールのモックアップを用いた固定方法と位置の評価	88
4.7.3	有限要素法によるシミュレーションを用いた LGP モジュールの歪みの確認	93
4.7.4	LGP モジュールの製作と組立手法	99

第 5 章	最終版 LGP モジュールの性能評価	104
5.1	最終版の LGP モジュールの設計	104
5.1.1	光源の設計	105
5.1.2	導光板と拡散板の設計	107
5.1.3	黒アクリルケースの設計	108
5.2	光量一様性の評価	111
5.2.1	セットアップと光量の算出方法	111
5.2.2	Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果	111
5.2.3	Wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果	112
5.3	最終版 LGP モジュールのまとめ	116
第 6 章	結論と今後	117
付録 A	光学シミュレーション	121
A.1	光学シミュレーションの目的	121
A.2	立体角計算型光学シミュレーション	121
A.2.1	方法	121
A.2.2	結果	123
付録 B	垂直方向の波長変化ファイバーのずれへの未採用の対応策	125
B.1	微細多穴プレート	125
B.1.1	概念	125
B.1.2	評価	125
B.1.3	問題点	127
B.2	光量調節フィルター	127
B.2.1	概要	127
B.2.2	評価	128
B.2.3	問題点	129
B.3	スリット型導光板	129
B.3.1	概要	129
B.3.2	評価と問題点	131
付録 C	LGP モジュールの設計図面	132
参考文献		140

図目次

1.1	標準模型	10
1.2	ニュートリノの質量階層性	14
1.3	荷電カレント反応のファインマンダイアグラム	18
1.4	中性カレント反応のファインマンダイアグラム	18
1.5	ν と $\bar{\nu}$ における荷電カレント反応の反応断面積	20
2.1	T2K 実験の概略図	21
2.2	J-PARC と加速器の外観図	22
2.3	RCS から MR へのビーム入射の概念図	23
2.4	ニュートリノビームラインと 2 次ビームラインの概略図	24
2.5	異なる Off-axis angle での荷電 π 中間子の運動量と生じるニュートリノのエネルギー	25
2.6	異なる Off-axis angle でのニュートリノフラックスのエネルギー依存性と、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率	25
2.7	INGRID の概略図	26
2.8	ND280 の概略図	27
2.9	FGD の XY モジュールのイメージ図	28
2.10	WAGASCI-BabyMIND の外観図と上面図	30
2.11	WAGASCI モジュール内部の構造	30
2.12	スーパーカミオカンデの外観と ν_e -like, ν_μ -like 事象のイベントディスプレイ	31
2.13	T2K 実験での δ_{CP} の暫定的な測定結果	32
2.14	T2K-II における POT と MR のビーム強度の計画、POT と想定される δ_{CP} の感度	32
2.15	SK の ν モードでの各ニュートリノ測定事象のイベントレートの系統誤差	33
2.16	ND280 と SK で再構成されたイベントの運動量角度分布	34
2.17	FGD 内で生じた荷電粒子の方向と通過したシンチレーター	34
2.18	ND280 における陽子検出効率と放出される陽子の運動量分布	35
2.19	ND280 アップグレードの外観	36
3.1	Super-FGD の概略図	37

3.2	シンチレーターキューブと波長変換ファイバーの写真	38
3.3	Super-FGD の MPPC 設置領域とキャリブレーションシステム設置領域	38
3.4	波長変換ファイバーの吸収、再発光スペクトラム	40
3.5	MPPC(S13360-1325PE) の検出効率の波長依存性	40
3.6	MPPC の構成	41
3.7	MPPC S13360-1325PE の写真	41
3.8	MPPC 基板の写真とデザイン	41
3.9	CITIROC のブロック図	42
3.10	Super-FGD のボックスと光学インターフェース部の断面図	43
3.11	波長変換ファイバーと光学コネクタ	43
3.12	キャリブレーションシステムから MPPC への光の入射	44
3.13	金属棒を用いたシンチレーターキューブのチェック	45
3.14	釣り糸を通した 1 列のシンチレーターキューブ	45
3.15	釣り糸を通したシート状のシンチレーターキューブ	45
3.16	シート状のシンチレーターキューブを 39 層積み重ねた写真	45
3.17	超音波溶着の仕組みと溶着シートを用いた組み立ての流れ	46
3.18	シミュレーションによる ν_μ の CC 反応で生じるミューオンのビーム軸に対する 散乱角と再構成効率	46
3.19	GENIE を用いた陽子の検出効率の運動量依存性	47
4.1	導光板の概略図	50
4.2	導光板の写真 (LED 未点灯時)	50
4.3	導光板の写真 (LED 点灯時)	50
4.4	押し出しとキャストでのレーザー彫刻の違い	51
4.5	導光板を用いた波長変換ファイバーへの LED 光の分配方法	51
4.6	LGP モジュールの設置位置と向き	53
4.7	LGP モジュールの概略図	53
4.8	MPPC の検出光子数スペクトラムの例	54
4.9	on-notch と off-notch の概略図	57
4.10	単一型 LED の写真	57
4.11	配列型 LED の写真	57
4.12	棒状 LED の写真	57
4.13	NSPB500S の発光波長スペクトラムと指向特性	57
4.14	導光板に対する軸の定義と Notch の番号	58
4.15	3 種類の光源での光量一様性測定の実験セットアップ	58
4.16	3 種類の光源での光量一様性測定の回路ブロック図	59
4.17	各測定箇所での光量測定の例	60

4.18	各光源と光量一様性の測定結果	61
4.19	off-notch 配列型 LED で光源から離れた場合の光量増減の要素	61
4.20	配列型 LED を用いた光量一様性の測定結果	63
4.21	LED 基板と NSPB300B の写真	64
4.22	MPPC、波長変換ファイバーと DT5702 の写真	64
4.23	MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量一様性測定の暗箱内のセットアップ	65
4.24	MPPC、波長変換ファイバー、CITIROC モジュールを用いた光量測定結果の例	66
4.25	LED 付近の写真と光量一様性	66
4.26	簡易コリメータの写真	67
4.27	簡易コリメータを設置した LED 付近の写真と光量一様性	67
4.28	コリメータの穴をブラックテープで半分覆った状態の LED 付近の写真と概略図	68
4.29	I 字型コリメータと逆さ T 字コリメータの比較	69
4.30	LED とコリメータと導光板の位置	69
4.31	開発したコリメータの写真	70
4.32	LED とコリメータの写真と CAD 図	70
4.33	コリメータの写真と CAD 図	71
4.34	コリメータを用いた場合の LED 付近の光量一様性	72
4.35	コリメータ固定用のアクリル板	72
4.36	Notch の深さの測定セットアップ	74
4.37	Notch の深さが異なる導光板の光量一様性	74
4.38	波長変換ファイバーの位置と Notch の大きさ	75
4.39	光源と反対側の導光板の端面の処理による光量一様性の違い	76
4.40	導光板の LED と反対側の端面の写真	76
4.41	導光板に対して水平方向に波長変換ファイバーをずらした場合の光量測定のセッ トアップ	78
4.42	波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果	79
4.43	拡散板を介した光学クロストークの概略図	80
4.44	拡散板を介して光学クロストーク測定のセットアップ	80
4.45	光学クロストーク測定用治具	81
4.46	拡散板の側面とねじ穴の処理と光量一様性の測定結果	83
4.47	拡散板の側面とねじ穴の黒塗りの有無の写真と、黒塗り後の拡散板の写真	84
4.48	波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量測定セットアップ	85
4.49	波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量測定結果	85
4.50	波長変換ファイバーの切断のタイミングの違いで生じる垂直方向のずれ	86
4.51	LGP モジュールの固定方法	87
4.52	モックアップ試験の写真と概略図	89
4.53	モックアップを横から見た写真と概略図	89

4.54	モックアップ試験での歪みの測定例	90
4.55	M2 の PEEK 樹脂鍋ねじを使用したモックアップ試験の結果	91
4.56	最終版 Bottom LGP モジュールのサグ測定結果	92
4.57	最終版 Wall LGP モジュールを用いたモックアップ	93
4.58	モックアップ試験と有限要素法による静的構造解析結果の比較	94
4.59	最終版 Bottom LGP モジュールの静的構造解析の結果	95
4.60	Wall LGP モジュールを模したセットアップでの静的構造解析の結果	96
4.61	10°C から 25°C に温度変化した場合の Bottom LGP モジュールの変形量のシ ミュレーション結果	97
4.62	10°C から 25°C に温度変化した場合の Wall LGP モジュールの変形量のシミュ レーション結果	98
4.63	10°C から 25°C に温度変化した場合の Wall LGP モジュールの変形量のケース を非表示にしたシミュレーション結果	99
4.64	黒アクリルケースの仮固定用治具の試作品	100
4.65	各部品を仮固定した後の黒アクリルケース	101
4.66	接着剤によるアクリル板の接着の様子	101
4.67	コリメータの接着用の治具	101
4.68	LGP モジュールの組立手順	103
5.1	最終版の Bottom LGP モジュールの外観	105
5.2	最終版の Wall LGP モジュールの外観	105
5.3	NSPB300B の写真と図面	106
5.4	最終版の LED 基板の写真	106
5.5	LED 基板の回路図	107
5.6	コリメータの写真と CAD モデル	107
5.7	Bottom LGP モジュールの導光板と拡散板の写真	108
5.8	Wall LGP モジュールの導光板と拡散板の写真	109
5.9	Bottom LGP モジュールのケースの写真	109
5.10	Wall LGP モジュールのケースの写真	110
5.11	最終版 LGP モジュールの光量一様性測定のセットアップ	111
5.12	最終版 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果	112
5.13	片側ずつの最終版 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果	113
5.14	対称な列ごとの最終版 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果	113
5.15	最終版 Wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果	114
5.16	片側ずつの最終版 wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果	114
5.17	対称な列ごとの最終版 wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果	115

A.1	導光板の端面から見た導光板内部の写真	122
A.2	立体角計算型光学シミュレーションの光量の重みづけの要素	123
A.3	立体角計算型光学シミュレーションの結果	124
B.1	微細多穴プレートの写真と概念図	126
B.2	微細多穴プレートを用いた波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量変化	126
B.3	微細多穴プレートの問題点	127
B.4	OHP フィルムの写真と設置位置の概念図	128
B.5	測定に使用した OHP フィルムの写真と測定結果	129
B.6	スリット型導光板の概念図	130
B.7	製作したスリット型導光板の写真	130
B.8	スリット型導光板の光量一様性測定のセットアップと結果	131
C.1	LED 基板の図面	132
C.2	Bottom LGP モジュールの図面	133
C.3	Wall LGP モジュールの図面	134
C.4	コリメータの図面	135
C.5	Bottom LGP モジュールの導光板と拡散板の図面	136
C.6	Wall LGP モジュールの導光板と拡散板の図面	137
C.7	Bottom LGP モジュールのケースの図面	138
C.8	Wall LGP モジュールのケースの図面	139

表目次

1.1	代表的なニュートリノ振動実験の種類と一般的な距離とエネルギー、感度を持つ 質量 2 乗差	15
1.2	現在の振動パラメータ決定に寄与している実験と関連する重要なパラメータ	17
1.3	ニュートリノ混合における各種パラメータ値	17
4.1	LGP モジュールの開発項目、採用した仕様と関連する章の一覧	54

第 1 章

序論

1.1 ニュートリノについて

ニュートリノは電荷を持たないレプトンであり、スピン 1/2 のフェルミオンである。標準模型において、ニュートリノは電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の 3 種類のフレーバーをもつ。電荷を持っておらず、レプトンであるために、電磁相互作用と強い相互作用をせず、弱い相互作用と重力相互作用のみ働く。そのためニュートリノは物質とほとんど反応しないという特徴がある。標準模型^{*1}では左巻きのニュートリノと右巻きの反ニュートリノのみが導入されており、右巻きのニュートリノと左巻きの反ニュートリノは導入されておらず、ニュートリノの質量は 0 と仮定している。しかし、後述するニュートリノ振動から、ニュートリノは質量を持つことがわかっている [1]。

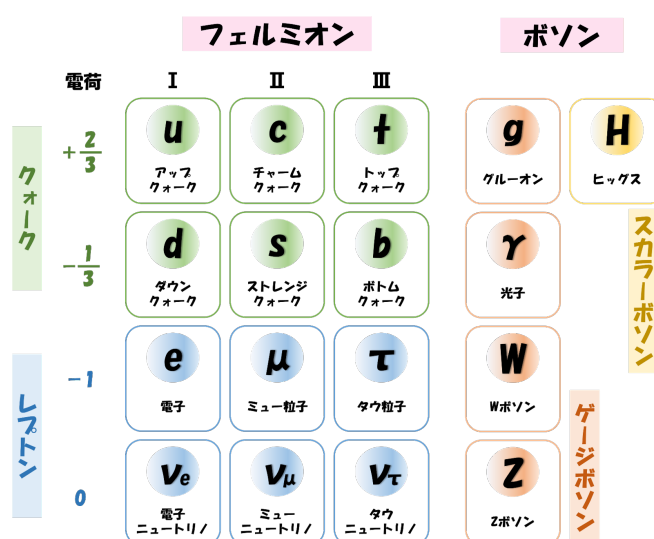


図 1.1 標準模型

^{*1} ここでは最小標準模型 (Minimal Standard Model) のことを指す

ニュートリノは β 崩壊の現象論的矛盾を説明するために、1930 年に Pauli によって初めて存在が予言された粒子である [2]。 β 崩壊は以下のように、原子番号 Z の原子核が原子番号 $Z+1$ の原子核に転換し、電子と反電子ニュートリノを放出する現象である。

$${}^Z N \rightarrow {}^{Z+1} N + e^- + \bar{\nu}_e$$

ニュートリノは電荷を持っておらず検出が難しいため、ニュートリノが検出できない場合は、原子核から電子のみが放出される 2 体崩壊のように見える。仮に 2 体崩壊であるとする、運動量保存則とエネルギー保存則により電子のエネルギーは一定になるはずであるが、 β 崩壊で生じる電子のエネルギーは連続分布であった。また、原子核内の中性子がニュートリノを伴わずに陽子と電子に崩壊すると、スピン角運動量も保存されないことになる。 Pauli はこれを説明するために、スピン $1/2$ の電荷を持たない粒子が β 崩壊で生じるという仮説を立てた。この粒子がニュートリノである。

1.2 ニュートリノ振動について

1.2.1 ニュートリノ振動の理論

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが質量を持つ場合、空間を伝搬する間に別のフレーバーのニュートリノに変化する現象である。1962 年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一らによって理論的に予言され [3]、1998 年のスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの観測結果がニュートリノ振動を仮定した際の予測と無矛盾であることが確認された [1]。ニュートリノが質量を持つ場合、物質との弱い相互作用の際に記述されるフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle (\alpha = e, \mu, \tau)$ と、空間を伝搬する際の質量固有状態 $|\nu_i\rangle (i = 1, 2, 3)$ は (1.1) 式のように関連付けられる [4]。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

ここで U はユニタリー行列であり、Pontecorvo、牧、中川、坂田の頭文字取って PMNS 行列と呼ばれ、(1.2) 式のように表すことができる。

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{21} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{CP}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$= \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

ここで $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$, $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$ であり、パラメータである θ_{ij} は混合角、 δ_{CP} は CP 位相と呼ばれる。

次に、真空中におけるニュートリノ振動の確率について導出を行う [4][5]。真空中でのニュートリノの質量固有状態はディラック方程式より (1.5) を満たす。

$$i \frac{d}{dt} |\nu_i\rangle = E_i |\nu_i\rangle \quad (1.5)$$

ここで、 E_i はニュートリノのエネルギーであり、 $E_i \equiv \sqrt{|\vec{p}|^2 + m_i^2}$ である。 $|\vec{p}|$ はニュートリノの運動量の大きさである。時間 t における質量固有状態 $|\nu_j(t)\rangle$ は (1.5) 式より、

$$|\nu_j(t)\rangle = e^{-iE_j t} |\nu_j(0)\rangle \quad (1.6)$$

となる。ある時間 t において、ニュートリノのフレーバーが α であったとすると、フレーバー固有状態は (1.1) 式より、

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i(t)\rangle = \sum_j U_{\alpha j} e^{-iE_j t} |\nu_j(0)\rangle \quad (1.7)$$

となる。さらに $|\nu_j(0)\rangle = \sum_\gamma U_{\gamma j}^* |\nu_\gamma(0)\rangle$ を代入すると、

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_j U_{\alpha j} e^{-iE_j t} \sum_\gamma U_{\gamma j}^* |\nu_\gamma(0)\rangle = \sum_\gamma \left(\sum_j U_{\gamma j}^* e^{-iE_j t} U_{\alpha j} \right) |\nu_\gamma(0)\rangle \quad (1.8)$$

ここで、フレーバー α のニュートリノが t 秒後にフレーバー β である場合の確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ を計算する。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\alpha(0) | \nu_\beta(t) \rangle|^2 = \left| \sum_\gamma \left(\sum_j U_{\gamma j}^* e^{-iE_j t} U_{\beta j} \right) \langle \nu_\alpha(0) | \nu_\gamma(0) \rangle \right|^2 \quad (1.9)$$

ここで $\gamma = \alpha$ のみが残る、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \left| \sum_j U_{\alpha j}^* e^{-iE_j t} U_{\beta j} \right|^2 \quad (1.10)$$

$$= \sum_j U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} + \sum_{j \neq k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{iE_j t} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} e^{-iE_k t} \quad (1.11)$$

さらに、ニュートリノが超相対論的であるとすると、 $|\vec{p}| \gg m_j$ 、 $|\vec{p}| \approx E$ より、

$$E_j \approx |\vec{p}| + \frac{m_j^2}{2|\vec{p}|}, E_j - E_k \approx \frac{m_j^2 - m_k^2}{2E} \quad (1.12)$$

となるので、 $\Delta m_{jk}^2 = m_j^2 - m_k^2$ とほとんど光速 ($c = 1$ とする) で飛ぶニュートリノの飛行距離が

$L \approx t$ であることを用いると、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sum_j U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} + \sum_{j \neq k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k} e^{i \frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L} \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} &= \sum_j U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} + 2\text{Re} \left(\sum_{j>k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k} \right) \cos \left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L \right) \\ &\quad + 2\text{Im} \left(\sum_{j>k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L \right) \end{aligned} \quad (1.14)$$

となる。ここで $t = 0$ 、つまり $L = 0$ のときにはフレーバーは変化していないことから、(1.14) 式に $L = 0$ を代入し、

$$\delta_{\alpha\beta} = \sum_j U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} + 2\text{Re} \left(\sum_{j>k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k} \right) \quad (1.15)$$

となるため、フレーバー α のニュートリノが t 秒後にフレーバー β である場合の確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ は (1.16) 式となる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4\text{Re} \left(\sum_{j>k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k} \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{4E} L \right) \\ &\quad + 2\text{Im} \left(\sum_{j>k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha k}^* U_{\beta k} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L \right) \end{aligned} \quad (1.16)$$

(1.16) 式において、 Δm_{jk}^2 とエネルギー E が定数であるとき、ニュートリノが飛行する距離 L に応じて、ニュートリノのフレーバーが変化する確率が周期的に変化することから、ニュートリノ振動と呼ばれている。ニュートリノ振動の振動確率を測定することで混合角や質量 2 乗差を求めることができるが、(1.16) 式からもわかるようにニュートリノ振動から求められるのは質量 2 乗差であり、その質量の絶対値を測定することはできない。現在 Δm_{21} の符号はわかっているが、 Δm_{32} の符号はわかっていないため、ニュートリノの質量階層性には図 (1.2) のように $m_1 < m_2 < m_3$ の場合と $m_3 < m_1 < m_2$ の 2 通りが考えられている。前者を正常階層 (Normal Hierarchy: NH)、後者を逆階層 (Inverted Hierarchy: IH) といい、この問題はニュートリノの質量階層性問題と呼ばれている。

次に、例として 3 世代のニュートリノにおいて、 ν_μ から ν_e への振動確率の式を計算する。(1.16) 式において、 $\alpha = \mu, \beta = e$ とすると、

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &= -4\text{Re} \left(\sum_{j>k} U_{\mu j} U_{ej}^* U_{\mu k}^* U_{ek} \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{4E} L \right) \\ &\quad + 2\text{Im} \left(\sum_{j>k} U_{\mu j} U_{ej}^* U_{\mu k}^* U_{ek} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{2E} L \right) \end{aligned} \quad (1.17)$$

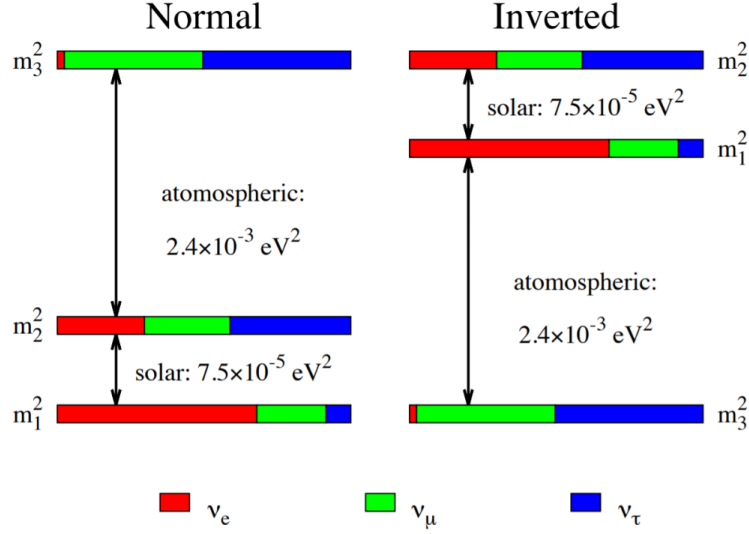


図 1.2 ニュートリノの質量階層性。左が正常階層で右が逆階層 [6]

となる。 Σ を全て展開し、 $\Delta m_{31}^2 = \Delta m_{32}^2 + \Delta m_{21}^2$ を用い、まとめると以下の式になる。

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4s_{13}^2 s_{23}^2 c_{13}^2 \sin^2 \Delta_{31} \\
 & + 8s_{12}s_{13}s_{23}c_{13}^2 (c_{12}c_{23} \cos \delta_{CP} - s_{12}s_{13}s_{23}) \sin \Delta_{21} \sin \Delta_{31} \cos \Delta_{32} \\
 & - 8s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{13}^2 c_{23} \sin \delta_{CP} \sin \Delta_{21} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{32} \\
 & + 4s_{12}^2 c_{13}^2 (c_{12}^2 c_{23}^2 + s_{12}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 - 2s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{23} \cos \delta_{CP}) \sin^2 \Delta_{21} \quad (1.18)
 \end{aligned}$$

ここで、 $\Delta_{jk} = \frac{\Delta m_{jk}^2}{4E} L$ とした。(1.18) 式の第一項は (1.17) 式における $(j, k) = (3, 1)$ の実部の一部、第二項と第四項は $(j, k) = (2, 1), (3, 1), (3, 2)$ の実部、第三項は (1.17) 式の虚部から得ることができる。 Δm_{21}^2 は $\Delta m_{31}^2, \Delta m_{32}^2$ に比べて非常に小さいため、第一項の寄与が最も大きくなる。また、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の場合には、 δ_{CP} が $-\delta_{CP}$ へと置き換わり、(1.18) 式の第三項の符号が反転するため、 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率の差を取ることで、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = -16s_{12}s_{13}s_{23}c_{12}c_{13}^2 c_{23} \sin \delta_{CP} \sin \Delta_{21} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{32} \quad (1.19)$$

となり、CP 位相 δ_{CP} が顕著に表れるようになる。 $\delta_{CP} = 0, \pi$ の場合はニュートリノにおける CP 対称性は破れていないことを示し、 $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ の場合には CP 対称性が破れていることを示す。

ここまではニュートリノが真空中を伝搬する場合の振動確率の導出を行ってきたが、ニュートリノが物質中を伝搬する際には物質との相互作用を考慮する必要があり [7][8]、 ν_e と ν_μ, ν_τ では物質を伝搬する際のポテンシャルが変化するために振動確率が変化する。この効果を MSW(Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein) 効果 [7][8] と呼び、物質中を伝搬する際は (1.18) 式は変更を受ける。

1.2.2 ニュートリノ振動実験について

ニュートリノの存在が予言されて以降、現在に至るまで様々なニュートリノ観測実験が行われている。ニュートリノ振動実験は観測するニュートリノの生成源によって、太陽ニュートリノ振動実験、大気ニュートリノ振動実験、原子炉ニュートリノ振動実験、加速器ニュートリノ振動実験の主に4つに大別される。表 1.1 にニュートリノ振動実験の種類と、その一般的な伝搬距離とエネルギー、感度を持つ質量 2 乗差をまとめた。以降、各ニュートリノ振動実験について簡単に説明する。

振動実験	L(m)	E(MeV)	$ \Delta m^2 (\text{eV}^2)$
太陽ニュートリノ	10^{10}	1	10^{-10}
大気ニュートリノ	$10^4 - 10^7$	$10^2 - 10^5$	$10^{-1} - 10^{-4}$
原子炉ニュートリノ	SBL $10^2 - 10^3$	1	$10^{-2} - 10^{-3}$
	LBL $10^4 - 10^5$		$10^{-4} - 10^{-5}$
加速器ニュートリノ	SBL 10^2	$10^3 - 10^4$	> 0.1
	LBL $10^5 - 10^6$	$10^3 - 10^4$	$10^{-2} - 10^{-3}$

表 1.1 代表的なニュートリノ振動実験の種類と一般的な距離、エネルギーと真空中のニュートリノ振動に対して感度を持つ質量 2 乗差 [9]。SBL は Short Baseline、LBL は Long Baseline の略である。

● 太陽ニュートリノ振動実験

太陽ニュートリノは、太陽内部での核融合反応等によって生じる。太陽内部で発生するニュートリノのほとんどは ν_e であるが、地球表面に到達時にはニュートリノ振動によって他のフレーバーのニュートリノに変化する。太陽ニュートリノを初めて観測したのは 1968 年に Davis らがアメリカのサウスダコタ州のホームステイク鉱山地下で放射化学法を用いて行った Homestake 実験である [10]。この実験で得られたニュートリノのフラックスは、標準太陽モデル [11] から予測されるフラックスよりも少なく、これは太陽ニュートリノ問題と呼ばれた。この問題は後にスーパーカミオカンデによる太陽ニュートリノの測定 [12]、カナダの SNO 実験の結果 [13] や原子炉ニュートリノ実験である KamLAND 実験の結果 [14] から、 ν_e から他のフレーバーへのニュートリノ振動と無矛盾な結果であることが結論づけられた。太陽ニュートリノ振動実験の例としては、スーパーカミオカンデ [15] の他にイタリアの Borexino 実験 [16] などが挙げられる。

● 大気ニュートリノ実験

大気ニュートリノは宇宙から飛来する 1 次宇宙線が大気上空の原子核と衝突して生じたハドロンの崩壊によって生成される [1]。具体的には以下のような荷電 π 中間子の崩壊で生じる

ニュートリノが支配的である。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.20)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1.21)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.22)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.23)$$

従って生成された大気ニュートリノは $\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\nu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \approx 2$ である。しかし、カミオカンデによる測定結果では、この比が約 6 割しか観測されず [17]、大気ニュートリノ異常と呼ばれたが、後にスーパーカミオカンデによって ν_μ と ν_τ のニュートリノ振動による ν_μ の減少と無矛盾であることが確認された [1]。大気ニュートリノ振動実験の代表例はスーパーカミオカンデ [15] であるが、高エネルギー宇宙ニュートリノの測定を主な目的として作られたフランスの ANTARES 実験 [18] や南極の IceCube 実験 [19] などでも測定されている。

● 原子炉ニュートリノ実験

原子炉ニュートリノ振動実験では、原子炉内部での ^{235}U や ^{239}Pu 等の核分裂によって生じた分裂核の β 崩壊で生成される $\bar{\nu}_e$ を使用している。原子炉ニュートリノは、 $\bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ に遷移した場合に 1.3 節で述べる荷電カレント反応ができるエネルギーを持たないため、遷移しない確率 $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ の測定による $\bar{\nu}_e$ の消失を主に測定する。世界で初めて原子炉から生じる反電子ニュートリノの消失事象を測定したのは KamLAND 実験である [14]。原子炉ニュートリノ振動実験では、原子炉からニュートリノの検出器までの距離が実験によって様々であり、数 km 程度までの短基線原子炉ニュートリノ振動実験と、数十 km 以上の長基線原子炉ニュートリノ振動実験に分けられ、それぞれ混合角や質量 2 乗差などのパラメータに対して感度が異なっている。短基線ニュートリノ振動実験の代表例はフランスの Double Chooz 実験 [20]、中国の Daya Bay 実験 [21]、韓国の RENO [22]、長基線ニュートリノ振動実験の代表例としては KamLAND [14] が挙げられる。近年では上記以外に、原子炉と検出器との距離が十数 m 程度と短く、 $\Delta m^2 \sim 1\text{eV}^2$ 程度の振動に感度を持つ原子炉ニュートリノ振動実験も行われており、NEOS [23]、DANSS [24]、STEREO [25]、PROSPECT [26] や NEUTRINO-4 [27] などがある。

● 加速器ニュートリノ実験

加速器ニュートリノ振動実験では、加速器で加速された陽子を標的に衝突させることで荷電 π 中間子や荷電 K 中間子を生成し、それらの崩壊によって生じるニュートリノを用いている。主に生成されるニュートリノは ν_μ や $\bar{\nu}_\mu$ であり、 ν_μ から ν_e への出現事象 [28] や ν_μ の消失事象 [29]、 ν_μ から ν_τ への出現事象 [30] の観測も行われた。実験によってニュートリノ生成箇所からニュートリノの検出器までの距離は様々であり、数百 m 程度であるものを短基線加速器ニュートリノ振動実験、数百 km 程度に及ぶものを長基線加速器ニュートリノ振動実験と呼ぶ。一般的に長基線加速器ニュートリノ振動実験には、遠方に設置され振動後のニュートリノを測定する後置検出器と、ニュートリノのフラックスやニュートリノと原子核の反応に由来する系統誤差を削減するための前置検出器が使用される。短基線加速器

ニュートリノ振動実験の例としては LSND 実験 [31] や KARMEN 実験 [32]、MiniBooNE 実験 [32] が挙げられ、長基線加速器ニュートリノ振動実験では、T2K 実験 [33] や NO ν A 実験 [34] などがある。

これまで様々なニュートリノ振動実験の説明をしてきたが、ニュートリノ振動のパラメータはこれらの様々な実験結果を解析することで求められている。現在の振動パラメータの決定に対して寄与している実験や観測しているニュートリノ振動のモードと、それに際し重要になるパラメータをまとめたものを表 1.2 に示した。

振動実験	支配的なパラメータ	関連するパラメータ
太陽ニュートリノ	θ_{12}	$\Delta m_{21}^2, \theta_{13}$
長基線原子炉ニュートリノ (KamLAND)	Δm_{21}^2	θ_{12}, θ_{13}
短基線原子炉ニュートリノ (Daya-Bay, RENO, Double Chooz)	$\theta_{13}, \Delta m_{31,32}^2 $	
大気ニュートリノ (SK, IceCube Deep Core)		$\theta_{23}, \Delta m_{31,32}^2 , \theta_{13}$
長基線加速器ニュートリノ $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ 消失事象 (K2K, MINOS, T2K, NO ν A)	$ \Delta m_{31,32}^2 , \theta_{23}$	
長基線加速器ニュートリノ $\nu_e, \bar{\nu}_e$ 出現事象 (MINOS, T2K, NO ν A)	δ_{CP}	θ_{13}, θ_{23}

表 1.2 現在の振動パラメータ決定に寄与している実験と関連する重要なパラメータ [9]。

また、2020 年時点で PDG(Particle Data Group)[9] によって公開されている振動パラメータを表 1.3 に示した。 $\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m_{21}^2, |\Delta m_{32}^2|$ は良く測定されているが、 θ_{23} と CP 位相の δ_{CP} 、そして質量階層性に関しては今後の実験でより詳細に調べる必要がある。

パラメータ	値
$\sin^2(\theta_{12})$	0.307 ± 0.013
Δm_{12}^2	$(7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$\sin^2(\theta_{23})$	0.547 ± 0.021 (逆階層)
$\sin^2(\theta_{23})$	0.545 ± 0.021 (正常階層)
Δm_{32}^2	$(-2.546^{+0.034}_{-0.040}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (逆階層)
Δm_{32}^2	$(2.453 \pm 0.034) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (正常階層)
$\sin^2(\theta_{13})$	$(2.18 \pm 0.07) \times 10^{-2}$
CP 位相 δ_{CP}	$1.36 \pm 0.17\pi \text{ rad}$

表 1.3 ニュートリノ混合における各種パラメータ値 [9]

1.3 ニュートリノと原子核の反応

ニュートリノと原子核の反応は大きく分けて荷電カレント (Charged Current: CC) 反応と中性カレント (Neutral Current: NC) 反応に分けられる。荷電カレント反応では (反) ニュートリノが $W^\pm$ ボゾン、中性カレント反応では Z ボゾンを介して反応する。図 1.3, 1.4 はそれぞれの反応におけるファインマンダイアグラムである。さらに両者においても複数の反応に分類されるが、長基線加速器ニュートリノ実験のエネルギー領域で観測される主な反応をいくつか述べる [35]。

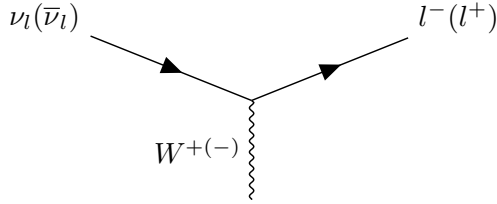


図 1.3 荷電カレント反応

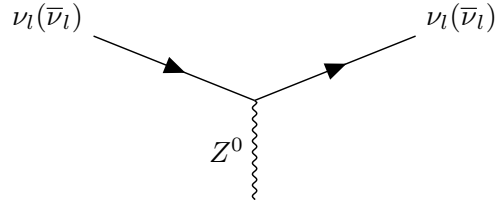


図 1.4 中性カレント反応

● 荷電カレント擬弾性散乱 (Charged Current Quasi Elastic scattering: CCQE)

CCQE は式 (1.24)、(1.25) の反応であり、ニュートリノと核子が W ボゾンを介して反応し、ニュートリノが、そのフレーバーの荷電レプトンに変化する。その際、 ν の場合は中性子が標的となり陽子に変化、 $\bar{\nu}$ の場合は陽子が標的となり、中性子に変化する。CCQE は $\sim 1\text{GeV}$ のエネルギー領域において主な反応であり、多くのニュートリノ振動実験において主に観測されている反応である。

$$\nu_l + p \rightarrow l^- + n \quad (1.24)$$

$$\bar{\nu}_l + n \rightarrow l^+ + p \quad (1.25)$$

E_ν を飛来したニュートリノのエネルギー、 m_i, m_f を反応前後の核子の質量、 m_l を荷電レプトンの質量、 E_b を原子核内の核子の束縛エネルギー、 E_l, p_l, θ_l をそれぞれ再構成された荷電レプトンのエネルギー、運動量、ニュートリノ飛来方向に対する角度とすると、式 (1.26) のようになる [36]。ただし、これはニュートリノの飛来方向がわかっており、かつフェルミ運動量を無視した場合である。このため、CCQE では生じる荷電レプトンのエネルギー、運動量、散乱角度からニュートリノのエネルギーを再構成することが可能である。

$$E_\nu = \frac{m_f^2 - (m_i - E_b)^2 - m_l^2 + 2(m_i - E_b)E_l}{2(m_i - E_b - E_l + p_l \cos \theta_l)} \quad (1.26)$$

● 中性カレント弾性散乱 (Neutral current elastic scattering)

中性カレント弾性散乱は Z ボゾンを介した反応であり、式 (1.27)、(1.28) の反応である。中性カレントのため CCQE とは異なり、飛来したニュートリノは変化せず、核子が反跳する

のみである。

$$\nu + p \rightarrow \nu + p \quad \bar{\nu} + p \rightarrow \bar{\nu} + p \quad (1.27)$$

$$\nu + n \rightarrow \nu + n \quad \bar{\nu} + n \rightarrow \bar{\nu} + n \quad (1.28)$$

● 共鳴単一パイオン生成 (Resonant single pion production: RES)

共鳴単一パイオン生成は名前の通り、1つの π 中間子の生成を伴う反応で、荷電カレント反応と中性カレント反応があり、その中にも複数の反応モードがある。この反応ではニュートリノが核子と反応し、核子が Δ 共鳴状態となり、その崩壊に伴って π 中間子が生じる。式(1.29)~(1.31)に荷電カレントの共鳴単一パイオン生成、式(1.32)~(1.34)は中性カレントである。反応断面積としては $\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + p + \pi^+$ が最も支配的である[35]。

荷電カレント共鳴単一パイオン生成

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu^- + p + \pi^+, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + p + \pi^- \quad (1.29)$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p + \pi^0, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n + \pi^0 \quad (1.30)$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + n + \pi^+, \quad \bar{\nu}_\mu + n \rightarrow \mu^+ + n + \pi^- \quad (1.31)$$

中性カレント共鳴単一パイオン生成

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p + \pi^0, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \bar{\nu}_\mu + p + \pi^0 \quad (1.32)$$

$$\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + n + \pi^+, \quad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \bar{\nu}_\mu + n + \pi^+ \quad (1.33)$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \nu_\mu + n + \pi^0, \quad \bar{\nu}_\mu + n \rightarrow \bar{\nu}_\mu + n + \pi^0 \quad (1.34)$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \nu_\mu + p + \pi^-, \quad \bar{\nu}_\mu + n \rightarrow \bar{\nu}_\mu + p + \pi^- \quad (1.35)$$

● コヒーレントな単一パイオン生成 (Coherent Pion Production)

Coherent pion production は式(1.36)、(1.37)の反応であり、ニュートリノが原子核全体(A)とコヒーレントに反応し、 π 中間子を生成する。運動量移行が小さく、原子核は反跳せず生成された π 中間子は前方方向へ飛来する。

$$\text{荷電カレント: } \nu_\mu + A \rightarrow \mu^- + A + \pi^+, \quad \bar{\nu}_\mu + A \rightarrow \mu^+ + A + \pi^- \quad (1.36)$$

$$\text{中性カレント: } \nu_\mu + A \rightarrow \nu_\mu + A + \pi^0, \quad \bar{\nu}_\mu + A \rightarrow \bar{\nu}_\mu + A + \pi^0 \quad (1.37)$$

$$A \text{ は標的の原子核} \quad (1.38)$$

● 深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering; DIS)

深非弾性散乱は数 GeV 以上のエネルギーにおいて支配的な反応であり、式(1.39)、(1.40)のように荷電カレントと中性カレントの両方がある。ニュートリノがWボゾンやZボゾンを介して核子内部のクォークに大きく運動量移行して核子を破砕し、ハドロンシャワーを生成する。

$$\text{荷電カレント: } \nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X, \quad \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^+ + X \quad (1.39)$$

$$\text{中性カレント: } \nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X, \quad \bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + X \quad (1.40)$$

X は複数のハドロンである。

● two-particles two-holes(2p2h)

2p2h は終状態に2つの核子を持つ反応であり、中間子交換カレント (Meson Exchange

current: MEC) と核子-核子相互作用 (Nucleon-Nucleon correlations: NN) の 2 つによるものであると考えられている。電子と原子核の散乱での 2p2h は確認されており [37][38]、ニュートリノと原子核の散乱においても 2p2h 反応が存在していると考えられている。荷電レプトンや荷電 π 中間子は測定できるが、陽子や中性子などの核子の測定は難しく、それら核子が正しく検出されない場合は、CCQE と誤識別し、ニュートリノのエネルギーを誤って再構成してしまう。また 2p2h には複数のモデルがあり [39][40]、モデルによって反応断面積が異なっており、ニュートリノ振動実験における系統誤差の要因となっている。

図 1.5 はそれぞれニュートリノ、反ニュートリノと核子の荷電カレント反応における反応断面積をまとめたグラフである。低エネルギー側から、荷電カレント擬弾性散乱、荷電カレント共鳴単一パイオン生成、荷電カレント深非弾性散乱の順で支配的になっていくのが確認できる。

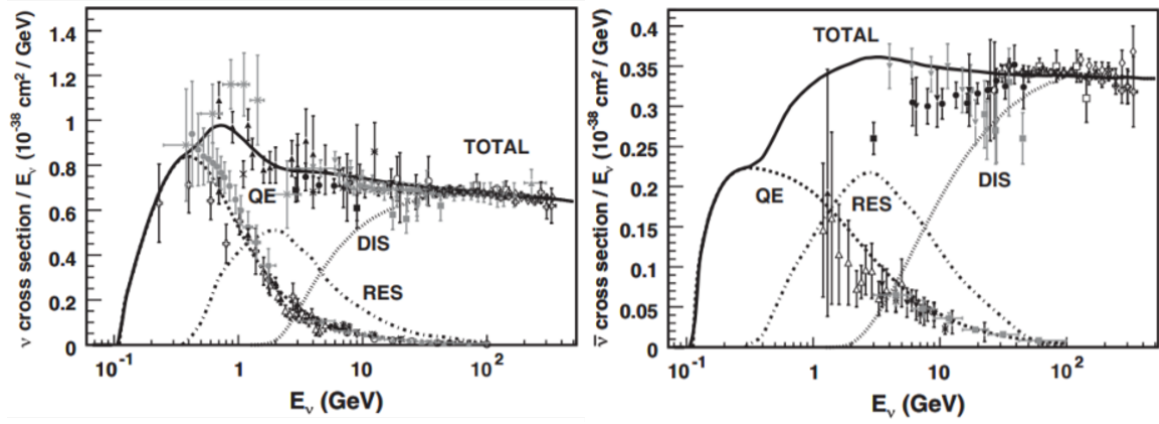


図 1.5 左が ν 、右が $\bar{\nu}$ における荷電カレント反応の反応断面積 [35]。点が実験から得られた反応断面積であり、線がニュートリノシミュレーションソフトである NUANCE[41] による予測である。

第 2 章

T2K 実験

2.1 T2K 実験の概要

T2K(Tokai-to-Kamioka) 実験は長基線加速器ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村の J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex: 大強度陽子加速器施設) でニュートリノビームを生成、射出し、280 m 後方の前置検出器で振動前のニュートリノを、295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山内に設置されたスーパーカミオカンデ (SK) によって振動後のニュートリノを観測している。T2K 実験は K2K(KEK to Kamioka) 実験 [29] の後継実験である。K2K 実験は茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構 (KEK) からスーパーカミオカンデに向けてニュートリノビームを照射する実験で、1999 年から 2004 年まで稼働した。図 2.1 は T2K 実験の概略図である。T2K 実験では J-PRAC で $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ を生成し、SK で振動後の $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ の出現事象や $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$

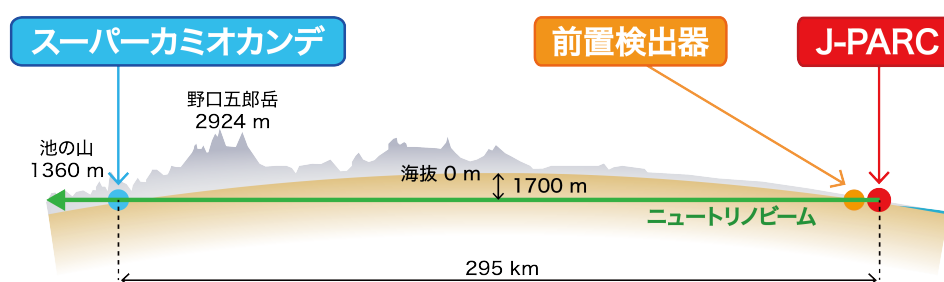


図 2.1 T2K 実験の概略図 [33]

の消失事象を観測することで、ニュートリノ振動の混合角や δ_{CP} の測定を行っている。T2K 実験は 2010 年にニュートリノビームを用いた物理データの収集を開始して現在稼働している実験であり、現在の主な目的は式 (1.2) に表れる δ_{CP} と θ_{23} の測定である。

2.2 ニュートリノ生成部

T2K 実験で使用するニュートリノは、J-PARC の 3 段の陽子加速器で 30 GeV に加速された陽子を炭素標的に衝突させることで生じた荷電 π 中間子や荷電 K 中間子などの崩壊によって生成される。2.2.1 項で J-PARC と陽子加速器について、2.2.2 項でニュートリノビームラインについて、また 2.2.3 項では T2K 実験の大きな特徴の 1 つである Off-axis 法について説明する。

2.2.1 J-PARC

J-PARC は陽子加速器を用いた複合型の実験施設で、ニュートリノ実験施設の他に、ハドロン実験施設や、中性子やミュオンを用いた実験を行う物質・生命科学実験施設などがある。図 2.2 が J-PARC と加速器の外観図である。



図 2.2 J-PARC と加速器の外観図 [42]

J-PARC の陽子加速器は 3 段で構成されており、上流側から、400 MeV まで加速する全長約 400 m の線形加速器の LINAC、3 GeV まで加速する周長 348.33 m のシンクロトロン RCS(Rapid

Cycling Synchrotron)、30 GeV まで加速する周長 1567.5 m のシンクロトロンの MR(Main Ring) により大強度陽子ビームを生成する [42][43]。図 2.3 は RCS から MR へのビーム入射の概略図であり、加速される陽子は陽子の束 (バンチ) としてシンクロトロンの内に存在している。現在の運転では 8 バンチで稼働している。RCS から MR には 0.13 秒の間に、2 バンチずつを 4 回で合計 8 バンチが入射され、その後 MR で 1.4 秒かけて 30 MeV まで加速される [44]。MR からニュートリノビームラインには一周で一度に 8 バンチ全てを取り出す早い取り出しが行われ、ハドロン実験施設には約 2 秒に渡って少しずつビームが照射される遅い取り出しが行われる [45]。現在はニュートリノビームラインで 8 バンチを取り出してから、次の 8 バンチを取り出すまでの周期は 2.48 秒である。

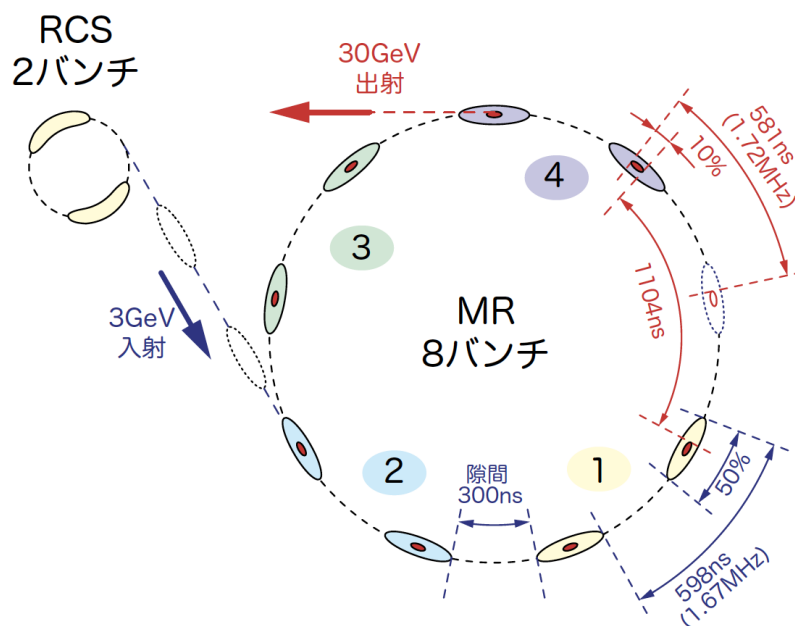


図 2.3 RCS から MR へのビーム入射の概念図 [46]。それぞれの束が陽子のバンチであり、9 つが MR に等間隔に並ぶ位置で 8 つが使用される

2.2.2 ニュートリノビームライン

ニュートリノビームラインは 1 次ビームラインと、2 次ビームラインの 2 つに分けられ、それらを用いて MR で加速された陽子を炭素標的に衝突させ、生じた荷電 π 中間子などの崩壊によりニュートリノを生成している。図 2.4 の左がニュートリノビームラインの概略図である。

1 次ビームラインには MR から引き出された陽子の方向の変更、標的に焦点を絞る役割を担うマグネットや、陽子ビームの強度や位置、ビームロスなどをモニターする検出器が設置されている。2 次ビームラインには、陽子を炭素標的に照射し、生じた荷電 π 中間子や荷電 K 中間子を電磁ホーンで収束させてる Target station、荷電 π 中間子や荷電 K 中間子が飛行中に崩壊してニュートリノ

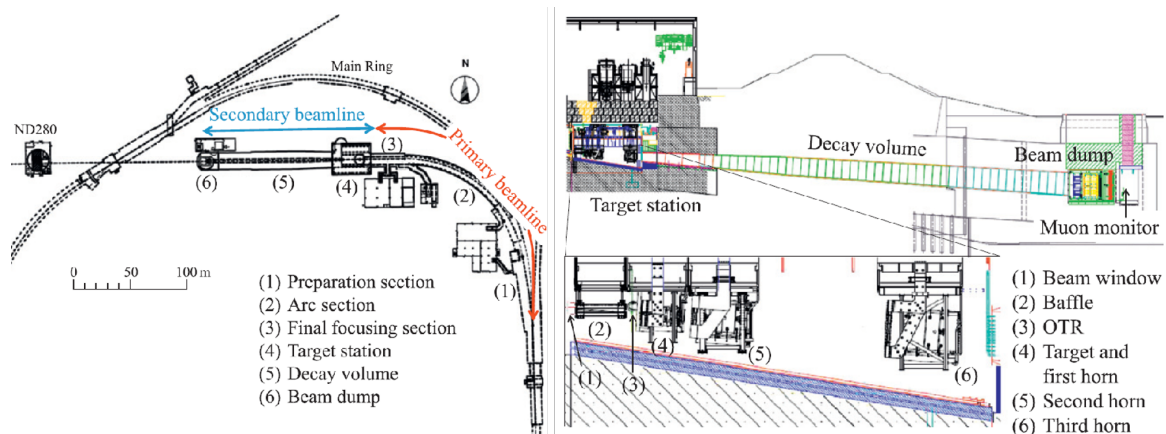


図 2.4 左はニュートリノビームラインの概略図で右が 2 次ビームラインの概略図 [33]

ノを生成する場所である Decay volume、炭素と鉄で構成されており、Decay volume 後方に設置されハドロンを止める Beam dump、Beam dump の後方においてニュートリノとともに生成されたミュオンのモニターを行う Muon monitor がある。図 2.4 の右に 2 次ビームラインの図を示した。T2K 実験では電磁ホーンに流す電流の向きを変更することで π^- , K^- または π^+ , K^+ のいずれかをビーム軸方向に収束させることができ、主に ν_μ を生成するモードと、 $\bar{\nu}_\mu$ を生成するモードを選択することができる。

2.2.3 Off-axis 法

T2K 実験において、SK はニュートリノビーム軸上から 2.5° ずれたところに設置されている。軸上のことを On-axis、軸上でない場合を Off-axis、その角度を Off-axis angle(OA) と呼ぶ。軸からずれた場所に設置することで、軸上に設置するよりも飛来するニュートリノのエネルギー分布の幅を狭くすることができる。図 2.5 は異なる Off-axis angle での荷電 π 中間子の運動量と生じるニュートリノのエネルギーを表したグラフであり、角度が大きい場合は、運動量の高い荷電 π 中間子であっても、生じるニュートリノのエネルギーが低く抑えられていることがわかる。また図 2.6 は異なる Off-axis angle でのニュートリノのフラックスのエネルギー依存性と、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率を示した図であり、 2.5° で 600MeV 付近にピークを持つことがわかる。図 2.6 の上部 2 つの振動確率を表したグラフからもわかるように、600MeV 付近に細いピークを持つニュートリノを使用することで、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 消失事象と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現事象を観測しやすいようになっている。また、ニュートリノのエネルギーを低く抑えることで、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 出現事象のバックグラウンドとなる中性カレントの単一パイオン ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) 生成反応を充分抑制することができる。 2.5° はこれらの理由から最適化された角度であり、T2K 実験は世界で初めて Off-axis 法を採用した長基線加速器ニュートリノ振動実験である。

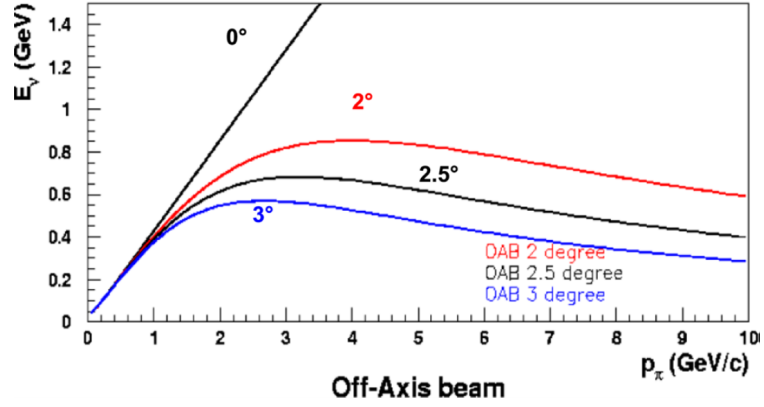


図 2.5 異なる Off-axis angle での荷電 π 中間子の運動量 p_π と生じるニュートリノのエネルギー E_ν [47]。0° は on-axis であり、それ以外が off-axis である。

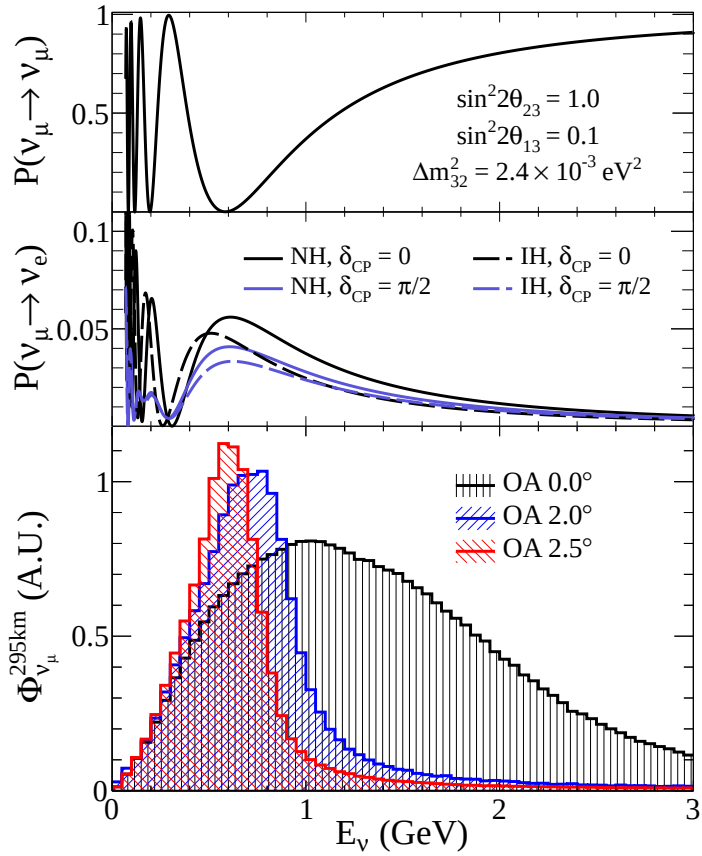


図 2.6 異なる Off-axis angle でのニュートリノフラックスのエネルギー依存性と、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ と $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率 [28]。横軸はニュートリノのエネルギーで上中下段で共通している。上段は $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の振動確率のエネルギー依存性、中段は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率のエネルギー依存性、下段は異なる off-axis angle でニュートリノ振動を仮定しない場合の 295km 後方での相対的なフラックスである。

2.3 前置検出器

前置検出器は炭素標的から 280 m 後方に設置され、振動前のニュートリノを観測しており、ニュートリノビームのフラックスや、ニュートリノと原子核の反応由来の系統誤差を抑制することを主な目的としている。前置検出器は複数設置されており、on-axis 検出器の INGRID、 2.5° の off-axis angle を持つ ND280、 1.5° の off-axis angle を持つ WAGASCI-BabyMIND の 3 種類に大別される。本節ではそれぞれの前置検出器について簡単に紹介する。

2.3.1 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) は T2K 実験における前置検出器の 1 つで、約 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ の on-axis 検出器である。図 2.7 が INGRID の全体図と INGRID のモジュールの概略図である。INGRID の主な目的は、生成されたニュートリノビームの方向と強度を測定することである。

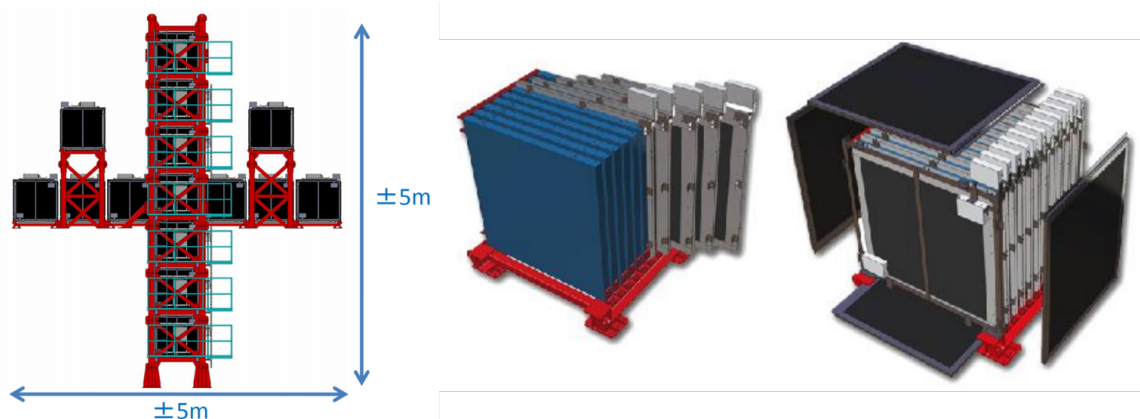


図 2.7 INGRID の概略図 [48]。左が全体図で、真ん中と右が INGRID のモジュールである。

2.2.3 項で述べたように、off-axis angle が変化すると SK でのニュートリノのエネルギー Spektrum が変化する。ニュートリノビームの方向が 1 mrad のずれるとニュートリノのエネルギーのピークが 2% ずれるため [36]、ニュートリノビームの方向を正しく確認し、修正することは重要になる。

INGRID は 16 の独立したモジュールから構成されている。図 2.7 のように、水平方向と鉛直方向にそれぞれ 7 つのモジュールが並べられており、設計上のビーム軸で水平方向と鉛直方向が交差するように設置されている。それらとは別に 2 つのモジュールが off-axis 上に設置され、ニュートリノビームの対称度の測定に用いられる。それぞれのモジュールはニュートリノの標的となる 9 枚の鉄のプレートと、荷電粒子の飛跡検出のための 11 枚のシンチレーター層のサンドイッチ構造をしている。そして、それらはモジュールの外部から入射する荷電粒子 (主に地中でのニュートリノ反応で生じたミューオンや宇宙線ミューオン) を排除するための VETO 用のシンチレーター層で

覆われている。

2.3.2 ND280

ND280 は off-axis の前置検出器の 1 つで、複数の検出器から構成されており、off-axis angle は SK と同じ 2.5° である。ND280 の主な目的は、振動前のニュートリノのフラックスや、ニュートリノと原子核の反応を測定することで、SK での系統誤差を抑制することである。図 2.8 が ND280 の概略図である [49]。

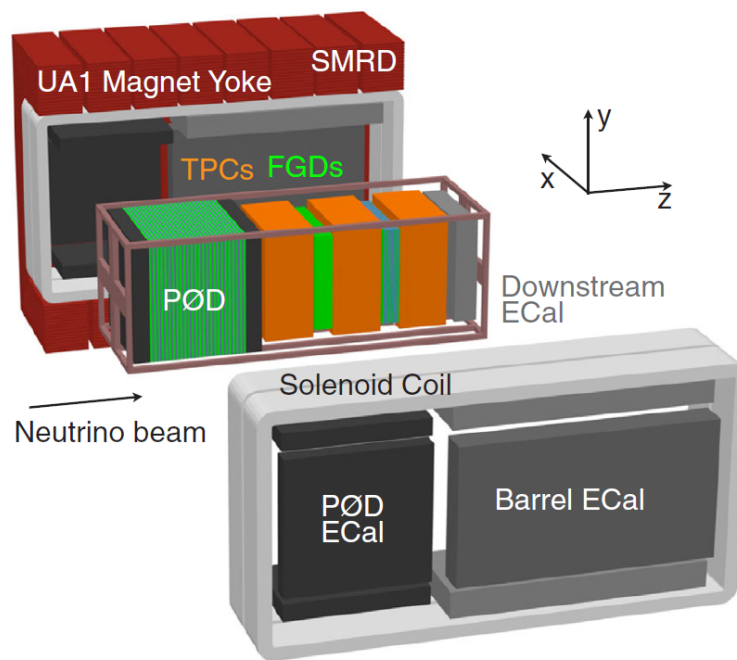


図 2.8 ND280 の概略図 [49]

ND280 を構成する検出器としては、P0D(π^0 detecotor)、TPC(Time Projection Chamber)、FGD(Fine Grained Detector)、ECal(Electromagnetic calorimeter)、SMRD(Side Muon Range Detector) があり、それらが UA1 マグネットと呼ばれる電磁石で囲われており、図 2.8 の X 軸方向に 0.2 T の磁場がかけられている。各検出器について簡単に説明する。

●P0D(π^0 detecotor)

P0D は主に鉛、真鍮、水とシンチレーターからなる検出器で、ND280 で最も上流側にある [50]。P0D の主な目的は、水標的において NC で生じた π^0 を測定することである。SK では CCQE による陽子を検出できないため、荷電レプトンのみの検出となると、SK で π^0 が生成された場合に π^0 崩壊した 2 つの γ 線による電子の生成は、 ν_e 出現事象のバックグラウンドになってしまう。そのため、前置検出器で SK と同じ水標的を使い、NC による π^0 生

成率を測定する必要があり、P0D はその役割を担っている。後述の ND280 のアップグレードでは、POD は新しい検出器群に置き換えられる。

- TPC(Time Projection Chamber)

TPC は P0D の後方に 3 つ設置され、FGD とサンドイッチ構造をなす飛跡検出器である。荷電粒子の通過によって TPC 内部のガスがイオン化され、生じた電子は印加電圧によりドリフトし、Micromegas[51] というパット状の検出器で電気信号として検出され、その検出位置と時間から荷電粒子の飛跡を 3 次元で捉えることができる。磁場によって曲げられながら通過する荷電粒子の飛跡から、その粒子の電荷や運動量、またガスをイオン化させることに伴うエネルギー損失も合わせて粒子の識別が可能となっている [52]。

- FGD(Fine Grained Detector)

FGD は 3 つの TPC の間に設置されているニュートリノの標的兼飛跡検出器である。上流側の FGD(FGD1) はシンチレーター層のみ、下流側の FGD(FGD2) はシンチレーター層とその間の水標的層によって構成されている。図 2.9 に示すように、水平方向に伸びた棒状のシンチレータを鉛直方向に 192 本並べた層と、それを 90 度回転した構造の層を合わせて XY モジュールとすると、FGD1 は XY モジュールが 15 個、FGD2 は 6 つの水標的層を挟み込むように 7 個設置されている。それぞれの棒状のシンチレーターは反射層に覆わ

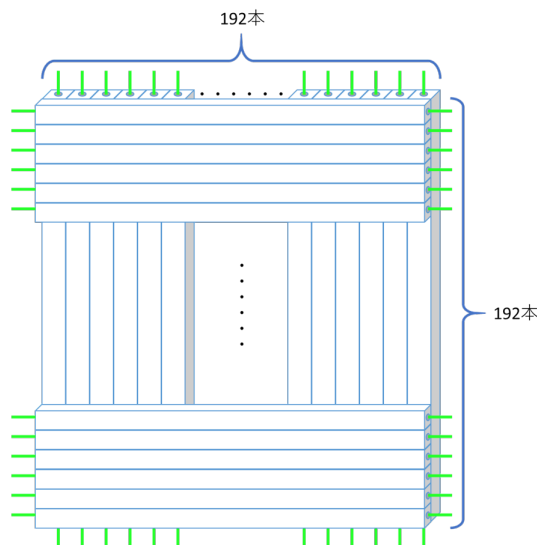


図 2.9 FGD の XY モジュールのイメージ図

れており、中には 1.8 mm の穴が空けられ、波長変換ファイバーが通されている。波長変換ファイバーの片側の端面には MPPC が設置されており、反対側の端面は MPPC 較正用の LED 光を入射するのに用いられる。FGD 内部のシンチレーターや水標的とニュートリノが反応して荷電粒子が生じ、それらがシンチレーターを通過すると、シンチレーション光が発生する。それらは波長変換ファイバーで吸収、再発光され、ファイバーを伝って端面の MPPC で検出される。これによって、ニュートリノの反応点や反応点付近の荷電粒子、そ

の他 FGD を通過する荷電粒子の飛跡を捉えることができる。

- ECal(Electromagnetic Calorimeter)

ECal はシンチレーターと鉛のシートで構成されており、P0D、TPC、FGD を囲うように独立して 13 個設置されている [33]。ECal には主に 3 種類あり、TPC と FGD のバレル部の tracker-ECal、P0D のバレル部の P0D-ECal と最下流の Ds-Ecal(Downstream ECal) がある [53]。ECal はニュートリノと原子核の反応によって生じる γ や荷電粒子のエネルギーや位置を測定する。

- SMRD(Side Muon Range Detector)

SMRD は UA1 マグネットの隙間に設置されるシンチレーターである [54]。SMRD の主な目的は、ビーム軸に対して高い角度で散乱したミューオンの測定、ND280 を貫通するような宇宙線ミューオンのトリガー、そしてニュートリノビームが壁やマグネットなどで反応する事象の判断である。

- UA1 マグネット

ND280 で使用されている UA1 マグネットは CERN の UA1 実験と NOMAD 実験で使用されたものを再利用したものであり、0.2 T の磁場の印加が可能である。

2.3.3 WAGASCI-BabyMIND

WAGASCI-BabyMIND 検出器は off-axis angle が 1.5° の前置検出器であり、複数の検出器から構成されている。主な目的は、ND280 とは異なるエネルギー Spektrum でニュートリノと原子核の反応を精密に測定することである。WAGASCI-BabyMIND には、2 つの WAGASCI(Water Grid And SCIntillator) モジュール、Baby MIND(Baby Magnetised Iron Neutrino Detector)、2 つの Wall-MRD と 1 つの PROTON モジュールが設置されている [55]。図 2.10 が外観図と上面図である。

WAGASCI モジュールは図 2.11 格子状に組み込まれたシンチレーターと、棒状のシンチレーターが並ぶシンチレーターの層が交互に設置されており、格子状のシンチレーターの間は水で満たされている。ニュートリノの標的としては水が 80%、シンチレーターの炭化水素が 20% となる。このような構造のために、ニュートリノ反応で生じる荷電粒子の飛跡を 3 次元で再構成することが可能となる。また、BabyMIND、PROTON モジュール、Wall-MRD はニュートリノ反応によって生じたミューオンを検出する。

2.4 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデ (Super-Kamiokande: SK) は高さ約 40 m、直径約 40 m の円柱型の水チェレンコフ光検出器で、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山内に設置されており、陽子崩壊探索 [58] やニュートリノ検出に用いられる。T2K 実験の後置検出器でもあり、振動後のニュートリノの検出により、 ν_e 出現事象や ν_μ 消失事象の測定を行っている。T2K 実験で生成



図 2.10 左が WAGSCI-BabyMIND の外観図 [56] で右が上面図 [55]。WG が WAGSCI モジュール、BM が BabyMIND、PM が PROTON モジュール、NJ は NINJA(Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator) 実験 [57] の検出器を意味している。

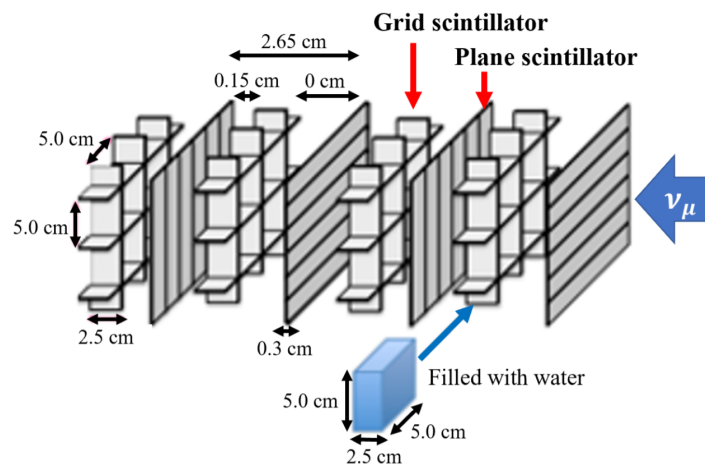


図 2.11 WAGSCI モジュール内部の構造 [55]。

した加速器ニュートリノ以外にも、大気ニュートリノや太陽ニュートリノも観測している。図 2.12 の左は SK の外観である。SK の内部は約 50 キロトンもの水で満たされており、ニュートリノの測定に使用される内側 (inner detector: ID) と、宇宙線ミュオンや SK 外部の地中でのニュートリノ反応由来のミュオン等を測定し VETO として用いられる外側 (outer detector: OD) に分けられている。ID には直径約 50cm の光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: PMT) が約 1.1 万本、OD には直径約 20cm の PMT が約 2000 本設置されている。SK ではこれらの PMT を使って、荷電粒子が物質中の光速を超えるとリング状に発生するチェレンコフ光を検出することで、ニュートリノと水の反応によって生じた荷電粒子の識別を行っている。基本的に、ニュートリノと水の CC 反応によって生じた荷電レプトン、つまり ν_μ であればミュオン、 ν_e であれば電子によるチェレ

ンコフ光を検出する。図 2.12 の右は SK での ν_e -like と ν_μ -like のイベントディスプレイである。生じた荷電粒子が電子である場合は電磁シャワーを起こしリングがぼやけるのに対して、ミューオンの場合は電磁シャワーを起こさないためクリアなリングになる。

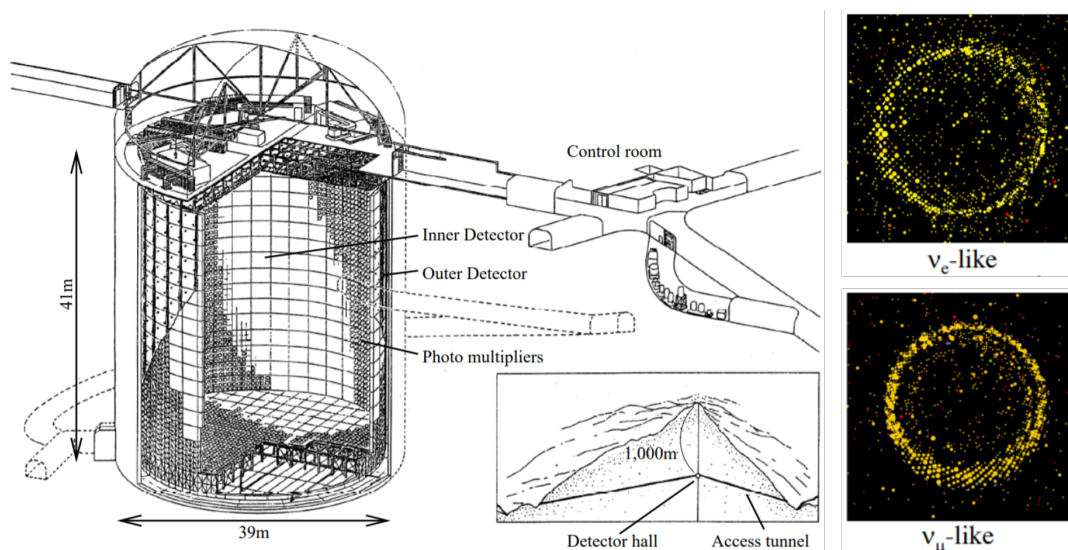


図 2.12 スーパーカミオカンデの外観 [59] と ν_e -like, ν_μ -like 事象のイベントディスプレイ [60]。

2.5 T2K 実験の現状

T2K 実験は 2010 年から 2020 年 2 月までに、 ν モードで 1.97×10^{21} POT、 $\bar{\nu}$ モードで 1.63×10^{21} POT (Proton On Target: 炭素標的に衝突させた陽子数) のデータを蓄積し、2020 年 2 月には安定的なビーム強度としては 515 kW に到達した。

また、2020 年 2 月までのデータを用いた、T2K 実験の主な目的である δ_{CP} の暫定的な結果を図 2.13 に示した [61]。現状としてレプトンセクターにおける CP 対称性の破れの有無は未確定である。現在は統計誤差が支配的であり、さらなる確度での CP 対称性の破れの検証には統計量を増やすことが必要不可欠であるが、系統誤差の削減もより一層重要となる。

さらなる確度で CP 対称性の破れの検証するために、ニュートリノビームの増強による統計量の増加と ND280 のアップグレードによる系統誤差の削減を目的とした T2K-II が進行中である。T2K-II については 2.6 節、現在の T2K 実験における系統誤差については 2.7.1 項で述べる。

2.6 T2K-II について

2.5 節で述べたように、ニュートリノにおける CP 対称性の破れの有無は未確定である。さらなる確度での検証には、まず統計量を増やすことによる統計誤差の削減が必要不可欠である。また、現在は統計誤差が支配的であるが、統計量が増えると次第に系統誤差の寄与が大きくなってくるた

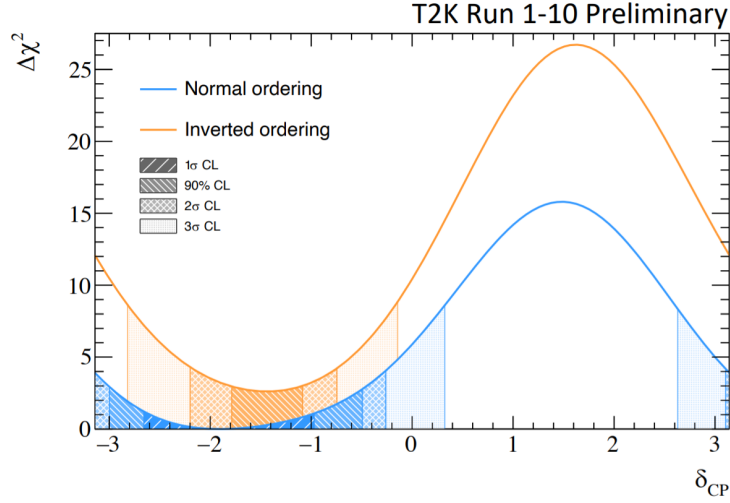


図 2.13 T2K 実験での δ_{CP} の暫定的な測定結果 [61]。

め、統計誤差の改善に加えて、系統誤差の削減を行うことも非常に重要になってくる。

T2K 実験は 3σ レベルの有意度で CP 対称性の破れの検証を目的とした T2K-II を進めている [62]。T2K-II では、実験運転期間の延長、加速器のアップグレードによるニュートリノビームの増強により 2.0×10^{22} POT までの統計量の増加、前置検出器 ND280 のアップグレードにより系統誤差を約 4% まで削減することを計画している。ND280 のアップグレードについては 2.7 節で述べる。図 2.14 の左は T2K-II における MR のビーム強度向上の計画と POT の目標値である [63]。現在のビーム強度である約 500 kW から、MR をアップグレードし徐々にビーム強度を上げ、最

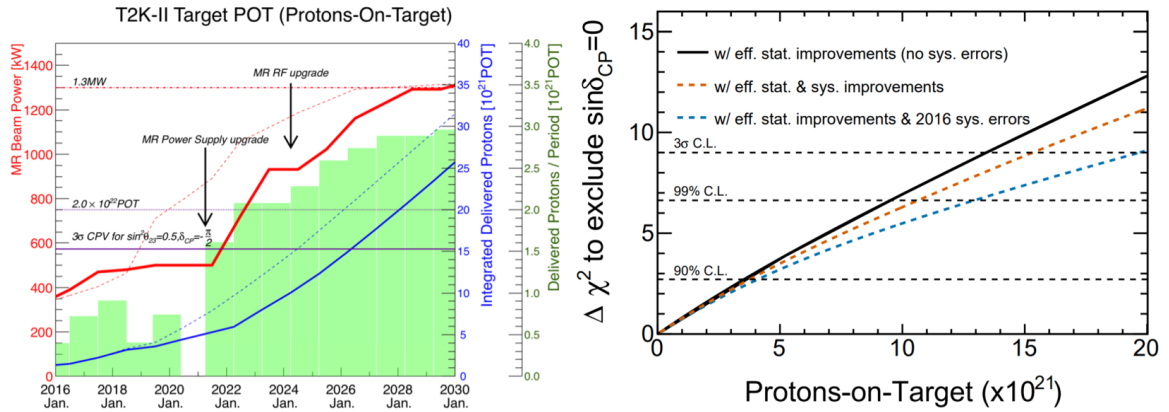


図 2.14 左が T2K-II における POT と MR のビーム強度の計画 [63]、右が POT と想定される δ_{CP} の感度 [62]。順階層で $\delta_{CP} = \pi/2$, $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ としている。青い点線は系統誤差が 2016 年のものから改善されない場合、赤い点線は系統誤差を改善した場合、実線は統計誤差のみを考慮した場合である。

最終的には 1.3 MW で運転をする計画である。図 2.14 の右は T2K-II における POT と想定される

δ_{CP} の感度である。これは、順階層、 $\delta_{CP} = \pi/2$ 、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ と仮定した場合である。青い点線は系統誤差が 2016 年のものから改善されない場合、赤い点線は ND280 のアップグレードにより系統誤差を約 4% まで改善した場合、実線は統計誤差のみを考慮し、系統誤差が 0 だとした場合である。図 2.14 の右の信頼区間 3σ レベルにおける POT を見ると、系統誤差の改善により少ない POT で 3σ の感度を持つことがわかる。このため、統計量の増加はもちろんであるが、系統誤差の削減も同時に重要になってくる。

2.7 ND280 のアップグレード

2.7.1 ND280 の問題点

図 2.15 は ND280 アップグレードの Technical Design Report[64] に記されているもので、現在の T2K 実験の ν モードにおいて SK で予測されるイベントレートの系統誤差 (1σ) である。下の 2.15 からわかるように、現在の ND280 はニュートリノと原子核の反応やニュートリノのフラックスを精密に測定することで、SK での系統誤差を抑制することができている。さらなる系統誤差

Source of uncertainty	ν_e CCQE-like $\delta N/N$	ν_μ $\delta N/N$	ν_e CC1 π^+ $\delta N/N$
Flux (w/ ND280 constraint)	3.7%	3.6%	3.6%
Cross section (w/ ND280 constraint)	5.1%	4.0%	4.9%
Flux+cross-section (w/o ND280 constraint)	11.3%	10.8%	16.4%
(w/ ND280 constraint)	4.2%	2.9%	5.0%
FSI+SI+PN at SK	2.5%	1.5%	10.5%
SK detector	2.4%	3.9%	9.3%
All (w/o ND280 constraint)	12.7%	12.0%	21.9%
(w/ ND280 constraint)	5.5%	5.1%	14.8%

図 2.15 SK の ν モードでの各ニュートリノ測定事象のイベントレートの系統誤差 [64]。各列は、系統誤差の項目、 ν_e の CCQE 反応らしき事象、 ν_μ 事象、 ν_e の CC1 π^+ 事象であり、各行はそれぞれの 1σ の系統誤差である。

の抑制に向けて、ND280 の課題として主に挙げられるのが、ビーム軸に対する大角度散乱のアクセプタンスが低いことと、低運動量の荷電粒子の検出効率が低いことである。

前者の課題を表しているのが図 2.16 である [64]。図 2.16 の左図は ND280 で再構成されたミューオンの運動量角度分布、右図は SK で再構成された電子の運動量角度分布である。横軸はミューオン、電子の運動量であり、縦軸は入射したニュートリノの運動量方向に対するミューオン、電子の角度である。両者を比較すると、SK では全散乱角 $0 \leq \theta_{\mu,e} \leq 180^\circ$ のアクセプタンス

があるのに対して ND280 では約 50° 以上で検出効率が低いことがわかる。
 これは FGD の構造と位置分解能によるものである。図 2.17 は FGD で生じた荷電粒子が前方方

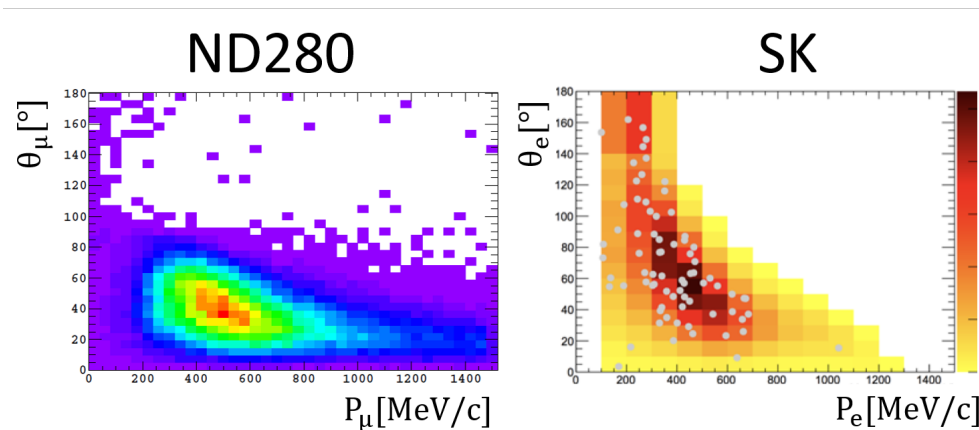


図 2.16 ND280 と SK で再構成されたイベントの運動量角度分布 [64]。左図：ND280 で再構成されたミューオンの運動量角度分布。右図：SK での再構成された電子の運動量角度分布

向に散乱した場合、FGD のシンチレーターに沿って散乱した場合、飛跡が短い場合を示した図であり、前方方向に飛来した場合は多数のシンチレーター層を通過しているが、それ以外は通過するシンチレーター層が少なく、飛跡を特定することが難しい。これらの理由から ND280 では大角度散乱する粒子へのアクセプタンスが低い。

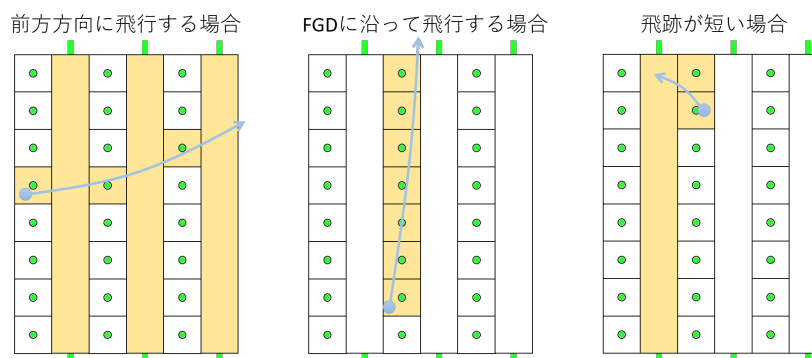


図 2.17 FGD 内で生じた荷電粒子の方向と通過したシンチレーターを表した図である。左は前方方向に散乱、中央はシンチレーターバーに沿った飛跡の場合、右は飛跡が短い場合である。前方方向に散乱した粒子は多数のシンチレーター層を通過するのに対して、残りの 2 つは通過するシンチレーター層が少ない

後者の課題を表しているのが図 2.18 である [64]。赤い点で示されているのが ND280 における陽子の検出効率であり、灰色のヒストグラムはニュートリノと原子核の反応のシミュレーションソフト NEUT[65] によるニュートリノ反応で生じた陽子の運動量分布を示している。生じる陽子の

運動量は約 200 MeV から約 1200 MeV にかけて分布しているが、ND280 における陽子の検出効率は 500 MeV 以下において著しく低下していることがわかる。ニュートリノ反応で生じる低運動量の陽子は、ミューオンや他の粒子に比べて飛跡が短く、ND280 の FGD 内で止まり、再構成することが難しいためである。CCQE の場合は陽子を検出せずとも、荷電レプトンを検出することでニュートリノのエネルギーを再構成することが可能である。しかし、CCQE と誤識別してしまう 2p2h や、原子核の陽子の束縛エネルギーなどのニュートリノと原子核の反応に由来する系統誤差を減らすためには、陽子の検出が有効な手段となりうる。

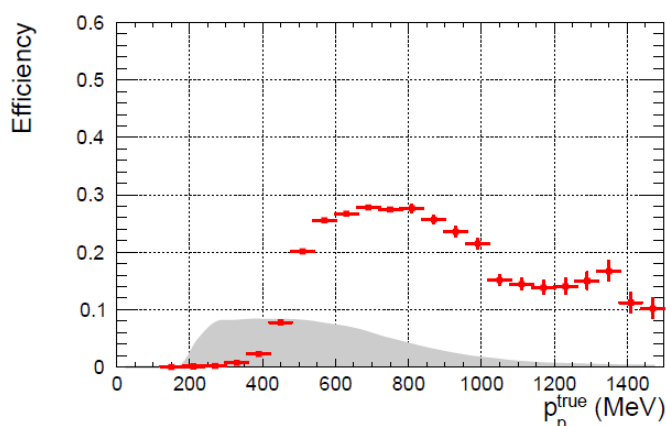


図 2.18 ND280 における陽子検出効率と放出される陽子の運動量分布 [64]。赤い点で示されているのが ND280 における陽子の検出効率であり、灰色のヒストグラムはニュートリノと原子核の反応のシミュレーションソフト NEUT[65] によるニュートリノ反応で生じた陽子の運動量分布 (縦軸は任意単位) を示している。

これらの課題の改善を測り、SK での系統誤差をさらに抑制するため、ND280 のアップグレードが計画されている。具体的な ND280 のアップグレードの内容については次の 2.7.2 項で述べる。

2.7.2 ND280 のアップグレードで導入される検出器

ND280 のアップグレードでは上流の P0D を取り除き^{*1}、新たに Super-FGD(Super Fine Grained Detector)、HA-TPC(High Angle Time Projection Chamber)、TOF(Time Of Flight) の 3 種類の検出器を導入する。図 2.19 がアップグレード後の ND280 の外観である [64]。Super-FGD は約 200 万個の 1cm 立方のシンチレーターキューブからなり、立体角 4π のアクセプタンスを持つ検出器で、ND280 上流側かつ中央に位置し、ニュートリノの標的と反応点付近における荷電粒子の飛跡検出を担う。Super-FGD の細かい設計については第 3 章で述べる。HA-TPC は Super-FGD の上下に 2 つ設置される TPC であり、Super-FGD で大角度に散乱した荷電粒子の飛跡検出が主な目的である。TOF は図 2.19 には描かれていないが、Super-FGD と HA-TPC の

^{*1} P0D の上流に設置されている ECal(Upstream ECal) は残す

6面を囲うように設置されるシンチレータからなる検出器であり、通過した荷電粒子の位置とその時間を記録する。

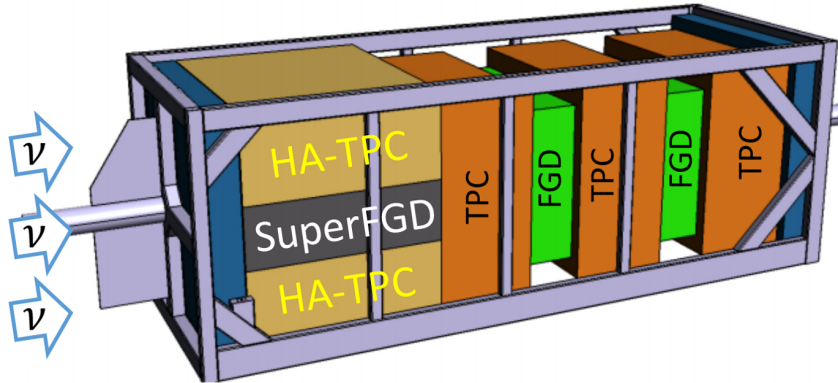


図 2.19 ND280 アップグレードの外観 [64]

これらの新たに導入された検出器によって、ニュートリノ反応によって生じる荷電レプトンを立体角 4π のアクセプタンスで検出することができる。3.3 節で詳しく説明するが、FGD と比べて位置分解能が向上することにより、低運動量の陽子や荷電 π 中間子の検出効率の改善も見込まれている。

アップグレード後の ND280 は 2022 年から稼働予定であり、現在開発が進められている。

第 3 章

Super-FGD

3.1 Super-FGD 概要

Super-FGD(Super Fine Grained Detector) は ND280 のアップグレードで導入される新型のニュートリノの標的と飛跡検出を兼ね備えた検出器であり、主な構成要素としては、約 1 cm 立方のシンチレータキューブ、波長変換ファイバー、光検出器 SiPM(Silicon PhotoMultiplier) である。各構成要素の詳細については 3.2 節で述べる。図 3.1 が Super-FGD の概略図である。Super-FGD は約 1 cm 立方のシンチレータキューブが、x 軸方向に 192 個、y 軸方向に 56 個、

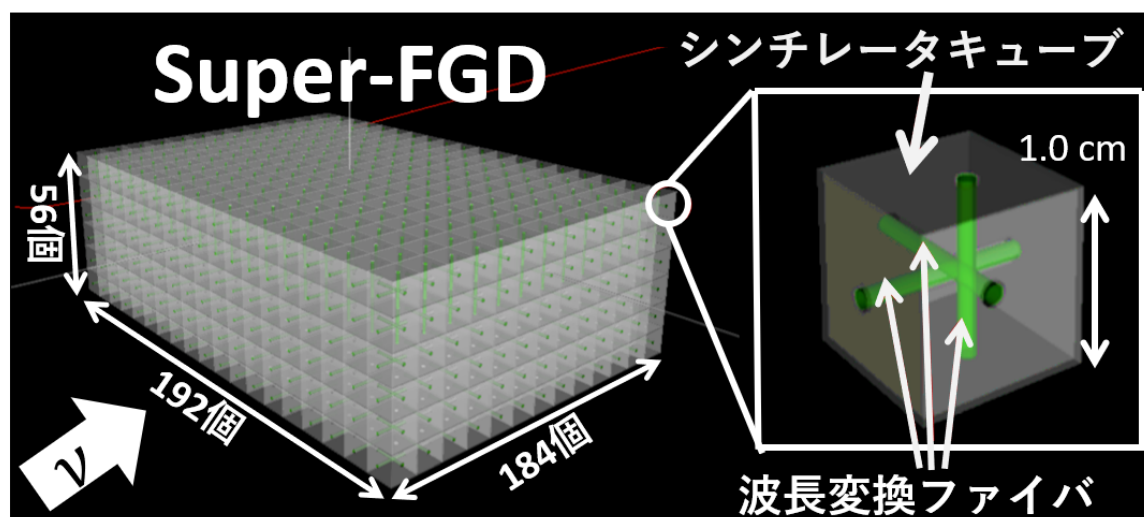


図1：Super-FGDの概略図

図 3.1 Super-FGD の概略図 [64]

ビーム軸である z 軸方向に 184 個、積載した構造をしている。シンチレータキューブには図 3.1 にあるように x,y,z の 3 方向に穴が空けられており、積載されたキューブを貫くように波長変

換ファイバーが合計で 56,384 本設置されている。図 3.2 はシンチレーターキューブに波長変換ファイバーを通した写真である。それぞれの波長変換ファイバーの片側には浜松ホトニクス製の

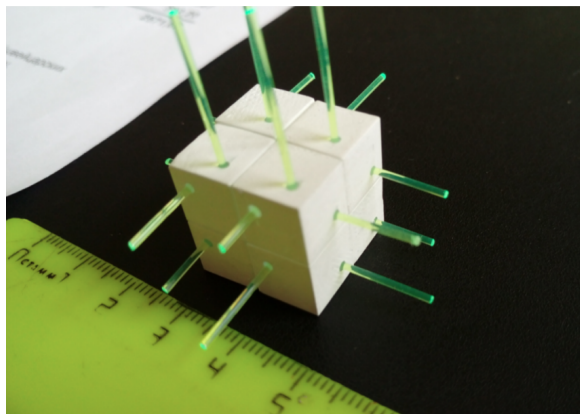


図 3.2 シンチレーターキューブと波長変換ファイバーの写真

SiPM(Silicon PhotoMultiplier) である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) が 1 つ設置され、合計で 56,384 個の MPPC が使用される。荷電粒子がシンチレーターキューブを通過するとシンチレーション光が発光し、その光が 3 方向に通された波長変換ファイバーに吸収される。吸収後、波長が変換され再発光された光はファイバーを伝い、端面に設置された MPPC で検出される。この構造により、Super-FGD は荷電粒子の飛跡を 2 次元で 3 方向から検出することができる。波長変換ファイバーの MPPC と反対側の端面には、キャリブレーションシステムが設置される。キャリブレーションシステムでは波長変換ファイバーの端面から光を入射することで MPPC に光を入射し、MPPC の増倍率の校正や検出器全体の動作確認に用いる装置である。

図 3.3 は Super-FGD において MPPC が設置される位置と、キャリブレーションシステムが設置される位置を示した図である。上流側と上面は MPPC、下流側と下面はキャリブレーションシ

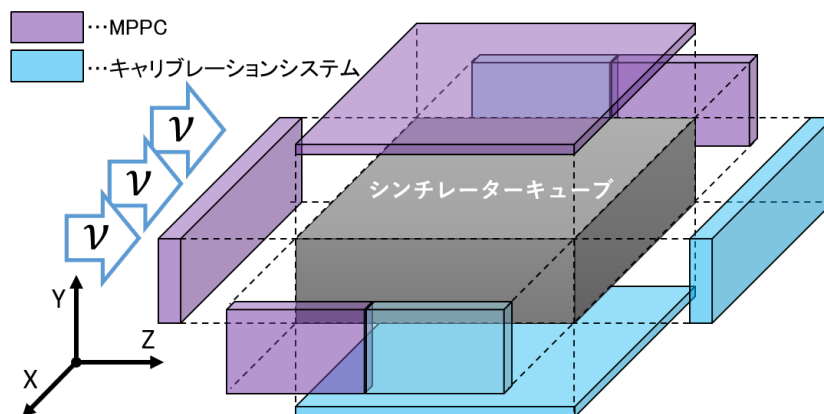


図 3.3 Super-FGD の MPPC 設置領域とキャリブレーションシステム設置領域

システム、両サイドは MPPC とキャリブレーションシステムに分かれて設置される。波長変換ファイバーの片側は MPPC、もう片側はキャリブレーションシステムとなるため、MPPC の反対側にはキャリブレーションシステムが位置している。MPPC 信号読み出し回路等のエレクトロニクスが両サイドに設置されるため、両サイドのエレクトロニクスでカバーするチャンネル数が均等になるように、また MPPC 用のケーブル配置の観点から、両サイドは MPPC とキャリブレーションシステムに分けられている。

3.2 各構成要素の詳細

3.2.1 シンチレーターキューブ

Super-FGD では約 1 cm 立方のプラスチックシンチレーターキューブを $192 \times 184 \times 56 = 1,978,368$ 個使用する。シンチレーターキューブはロシアの Vladimir にある UNIPLAST 社 [66] で製造したものを使用する。シンチレーターの主な材料はポリスチレンで、1.5% のパラテルフェニル (paraterphenyl: PTP) と 0.01% の POPOP(1,4-Bis(5-phenyl-2-oxazolyl)benzene) が添加されている^{*1}[64]。シンチレーターキューブはケミカルエッチングで形成されたポリスチレンの反射層 [68] によって覆われており、その厚みは $50 \sim 80 \mu\text{m}$ である。反射層を形成することによって、隣接キューブへの光漏れを削減し、さらにキューブ内での光量吸収率を向上することができる。反射層形成後、ドリルによって 3 方向に 1.5 mm の穴が空けられる。

3.2.2 波長変換ファイバー

Super-FGD では直径 1 mm ϕ の波長変換ファイバーを合計で 56,384 本使用する。波長変換ファイバーとは名前の通り、ある波長帯域の光を吸収し、異なる波長の光が再発光されるファイバーである。波長変換ファイバーにはクラレ社が製作した Y-11(200)[69] を用いる。図 3.4 は波長変換ファイバーで吸収される波長スペクトラムと再発光される波長スペクトラムを示した図である。POPOP の発光波長が 380~450 nm 程度であり、波長変換ファイバーの吸収波長とよく一致しており、かつ波長変換ファイバーの発光波長は図 3.5 に示すように MPPC が感度を持つ波長領域とよく一致している。

3.2.3 MPPC

MPPC は浜松ホトニクス社が製作した SiPM デバイスの 1 種で、多数の APD をガイガーモードで動作させる。まず、MPPC の動作原理について簡単に紹介する [71]。MPPC は多数の APD(Avalanche PhotoDiode) からなる半導体光検出器である。LED のような通常のダイオードには順方向 (アノードからカソードに電流が流れる向き) に電圧を印加するのに対して、APD はそ

^{*1} PTP と POPOP の吸収、発光波長は文献 [67] を参照

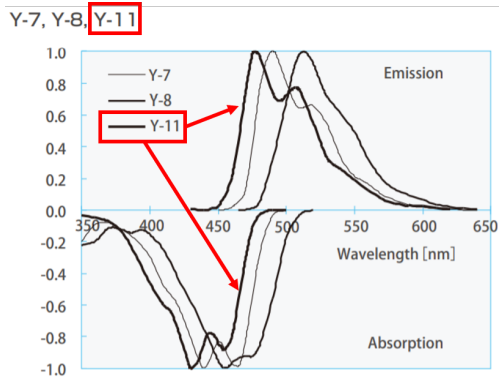


図 3.4 波長変換ファイバーの吸収、再発光スペクトラム [69]

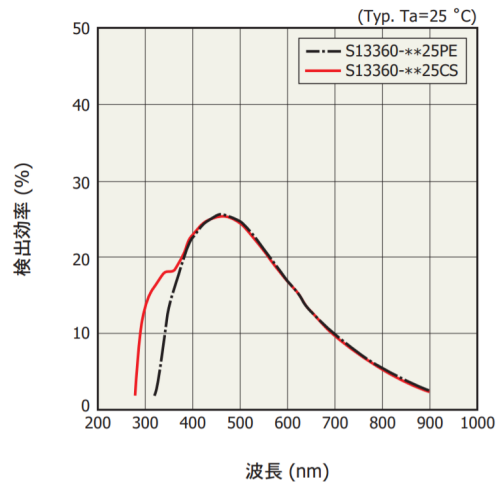


図 3.5 MPPC(S13360-1325PE) の検出効率の波長依存性 [70]

の逆方向の電圧 (逆バイアス電圧) を印加して使用する。ダイオードの PN 接合部分には空乏層と言われるキャリアがほとんどない領域が存在し、そこに光子が入射すると、電子-正孔対が生成される。逆バイアス電圧が印加されていると、それぞれのキャリアは両極にドリフトしていくが、印加している電圧が高い場合はそれぞれのキャリアが結晶格子と衝突し、新たな電子-正孔対を生成するようになり、鼠算式にキャリアが増加していく。これをアバランシェ増幅といい、APD はこの増幅過程を用いることで微弱な光でも観測可能な量の電気信号として検出することができる。また、アバランシェ増幅を起こし始めた電圧をブレイクダウン電圧 (V_{BR})*²といい、この電圧以上の逆バイアス電圧を印加すると入射光量に関わらず一定の出力 (ガイガー放電) となり、これをガイガーモードという。MPPC は多数の APD をガイガーモードで動作させることで、印加電圧が一定の場合には光子が入射した APD の数に比例する出力を得ることができる*³。図 3.6 は MPPC の構成を示したもので、ガイガーモードの APD とクエンチング抵抗が 1 つのセットとなり、複数のセットが並列で接続されている。ガイガーモードで APD を動作させる場合、常にブレイクダウン電圧以上の電圧が印加されるとガイガー放電が止まらなくなってしまうため、直列にクエンチング抵抗を接続し、その電圧降下によって APD にかかる電圧を減らすことでガイガー放電を止める。

MPPC は現在の T2K 実験の前置検出器にも多く使用されている光検出器であり、優れたフォトンカウント能力、 $10^5 \sim 10^6$ の高い増倍率、50 V 程度の低電圧で動作、優れた時間分解能、磁場中で使用可能、小型などの特徴を持つ。Super-FGD で使用する MPPC の型番は S13360-1325PE であり、検出効率の波長依存性を図 3.5 に示した [70]。図 3.7 は S13360-1325PE の写真である [64]。

*² 浜松ホトニクス社の定義としては増倍率が 1 となる最大の電圧のことを指している [71]

*³ ただし、ガイガーモードであるために 1 つの APD に複数の光子が入射されても一定の出力となるため、光量が多い場合は光量と出力が比例関係ではなくなる。

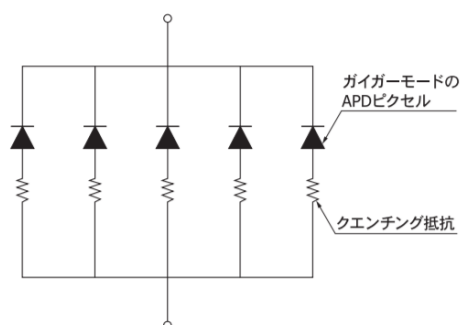


図 3.6 MPPC の構成 [71]

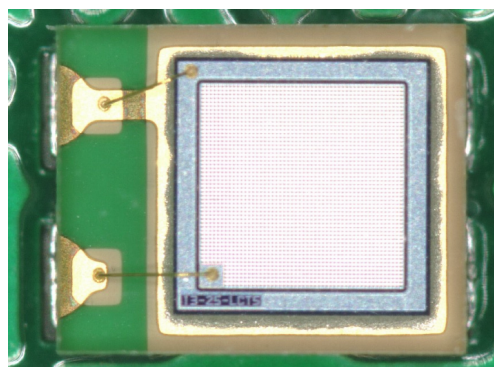


図 3.7 MPPC S13360-1325PE の写真 [64]

1.3 mm×1.3 mm の有感領域は直径 1 mm ϕ の波長変換ファイバーの端面を覆うのに十分であり、かつピクセルピッチが小さく、ピクセル数が多いため、ダイナミックレンジを広く取ることができる。

また、Super-FGD では図 3.8 に示すように、10.30 mm 間隔で 8×8 個の MPPC が基板に表面実装され、Super-FGD に取り付けられる。MPPC が取り付けられている基板がフラットケーブルで両サイドのエレクトロニクスと接続され、MPPC への電圧供給や信号読み出しが行われる。

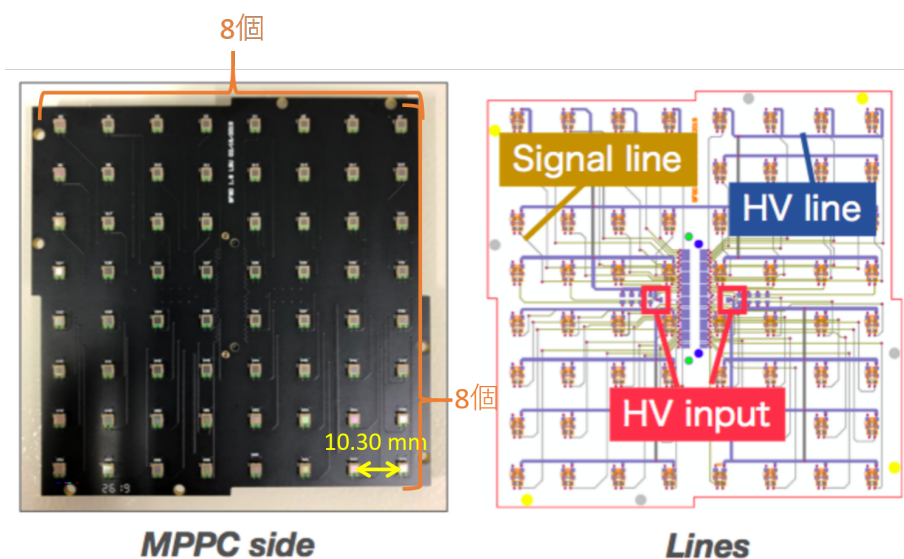


図 3.8 MPPC 基板の写真とデザイン [72]

3.2.4 読み出し回路

Super-FGD では MPPC からの信号を読み出し、信号の電荷や時間情報を取得する。Super-FGD の読み出しシステムは 2.3.3 項で紹介した Baby-MIND 検出器で使用されている読み出しシステム

をベースに開発されている。Baby-MIND の信号読み出しには Weeroc 社製の CITIROC^{*4}[73] という ASIC^{*5}が用いられており、Super-FGD でもこれを用いる。CITIROC は 1 つのチップで 32 チャンネルをカバーし、MPPC からの信号が一定の閾値を超えているタイミングと、一定時間内の最大波高値を HG(High Gain) と LG(Low Gain) の 2 種類出力する。それらを後段の ADC^{*6}や FPGA^{*7}で処理している。図 3.9 に示したのが CITIROC のブロック図である。

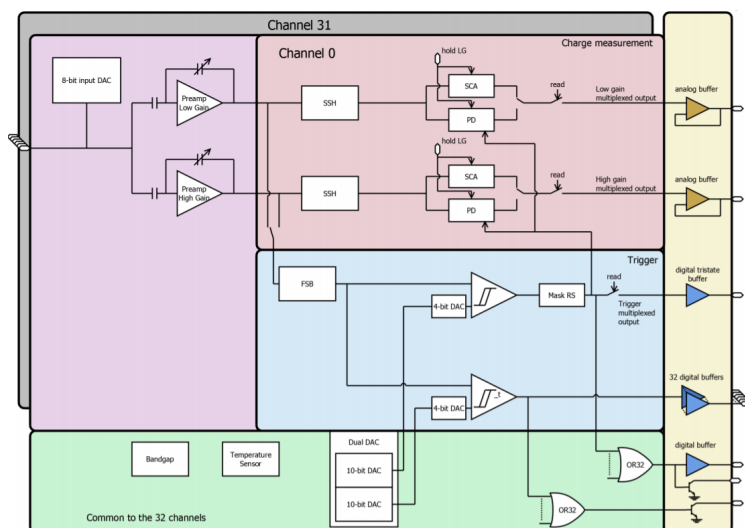


図 3.9 CITIROC のブロック図 [64]

3.2.5 光学インターフェース

光学インターフェースは MPPC と波長変換ファイバーの接続部を指し、図 3.10 のようになっている。MPPC が表面実装された基板はガラスエポキシの層に固定され、波長変換ファイバーは Super-FGD の支持構造物に空けられた 3mm の穴を通過し、MPPC と接触している。波長変換ファイバーの端面 (MPPC 側のみ) には光学コネクタがオプティカルセメントで接着され、コネクタとガラスエポキシ層の形状により、MPPC と波長変換ファイバーの端面の接続をより強固にしている。図 3.11 がコネクタの写真である。

3.2.6 キャリブレーションシステム

図 3.3 に示したように、キャリブレーションシステムは MPPC と反対側に設置され、波長変換ファイバーの端面から LED の光を入射し、MPPC の動作やファイバーの健全性の確認、MPPC

^{*4} Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip の略称

^{*5} Application Specific Integrated Circuit の略称

^{*6} Analog to Digital Converter の略称

^{*7} Field Programmable Gate Array の略称

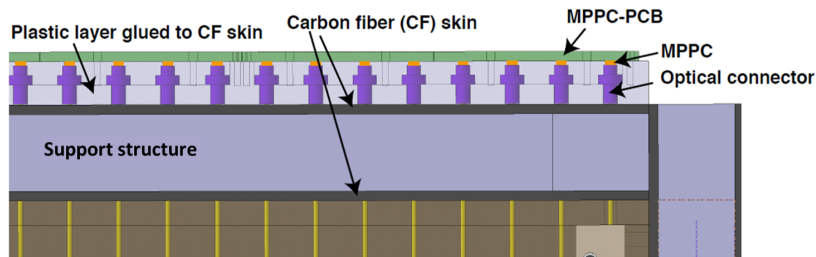


図 3.10 Super-FGD のボックスと光学インターフェース部の断面図 [64]。上部から、緑の層が MPPC が実装されている基板、小さいオレンジ領域が各 MPPC、紫が光学コネクタ、淡い紫の層が MPPC 基板の接続やコネクタ固定のためのガラスエポキシ層、その下の黒と灰色のサンドイッチ構造が 3 mmφ の穴が空けられた支持構造物であり、その下の黄色い線が波長変換ファイバーである。

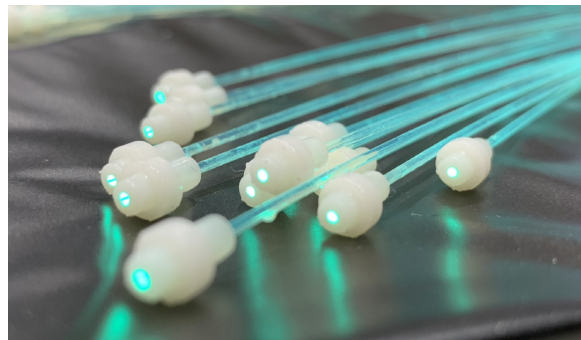


図 3.11 波長変換ファイバーと光学コネクタ [74]

の増倍率の較正を行う装置である。

キャリブレーションシステムでは 2 種類の運用方法が想定されている。1 つはニュートリノビームのスピル間^{*8}に LED を発光させ、物理データ取得時に、常時 MPPC の増倍率較正用のデータを取得する。もう 1 つは検出器のインストール後やニュートリノビーム非照射時などの物理データを取得していない時に、任意のタイミングで検出器の動作確認を行うことである。基本的には 1 度に全てのファイバーに光を入射させることを想定しているが、場合によっては一部に光を入射することも求められている。特に、Super-FGD の組立時や運転初期においては、MPPC や波長変換ファイバーを含めた検出器全体の健全性を確認することが重要であり、任意のタイミングで MPPC に光を入射することができるキャリブレーションシステムは必要不可欠なものである。

キャリブレーションシステムは省スペースかつ全ての MPPC、つまり全てのファイバーに光を入射することが求められるために、少数の LED の光を分配するという方法で全てのファイバーへ光を入射する。図 3.12 がキャリブレーションシステムから MPPC への光の入射を表した図であ

^{*8} 2.2.1 項で述べた MR での早い取り出しの際の、8 つのパンチを炭素標的に衝突させてから、次の 8 つのパンチを衝突させるまでの間。MR のアップグレード前は 2.48 秒、MR のアップグレード後は 1.16 秒となる [63]。

る。光の分配には導光板という加工したアクリル板や、拡散板等が使用される。より詳細なデザインや設計については章 4 で述べる。

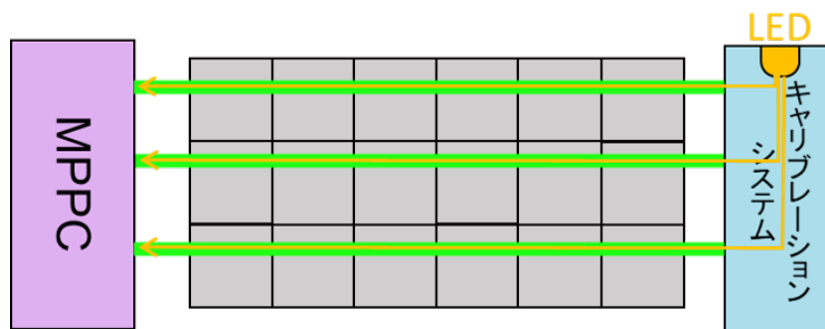


図 3.12 キャリブレーションシステムから MPPC への光の入射

3.2.7 キューブ組み立て方法

Super-FGD で使用されるシンチレータークューブはそれぞれ独立したものであるため、それらを組み上げ、かつ波長変換ファイバーを 3 方向に通す必要がある。また、このような構造の検出器は前例がなく、組み立て方法も確立されていなかった。そのため、作業等を進めていく中で予期せぬトラブルが発生する可能性を考慮し、キューブの組み立て方法は 2 つ考案されている。1 つは釣り糸を用いる方法、もう 1 つは超音波溶着を用いる方法である。基本方針として、釣り糸を用いる方法で組み上げ、超音波溶着を用いる案はバックアップとして準備をする。それぞれの方法について簡単に紹介する。

● 釣り糸を用いる方法

現段階ではこの釣り糸を用いる方法で Super-FGD のキューブを組み立てる計画である。この組み立て方法は大きく 3 段階に分かれる。まず不良キューブを取り除き、次に 1 mmφ の波長変換ファイバーの代わりに 1.3 mmφ の釣り糸を用いて全てのキューブを組み立てて、最後に釣り糸を波長変換ファイバーに入れ替える方法である。

第一の不良キューブの取り除きは、図 3.13 のように正しい位置にキューブを並べた後、直径 1.4 mmφ の金属棒を通して行う。バリや汚れが原因で金属棒が通らない場合は、穴を掃除した後再度金属棒を通し、問題なく通過したものは使用し、通らないキューブを取り除く。この行程でキューブをチェックし、金属棒を抜き一度キューブをバラバラにして、次の行程に移る。

釣り糸を用いてキューブを組み立てる手順として、まず図 3.14 のように、釣り糸に必要な数のキューブを通し 1 列にしたものを作成する。1 列になったものを並べ平面上にし、そこに釣り糸を通し、図 3.15 のように 1 層のシート状にする。そしてそれらを図 3.16 のように重ね、鉛直方向に釣り糸を通す。

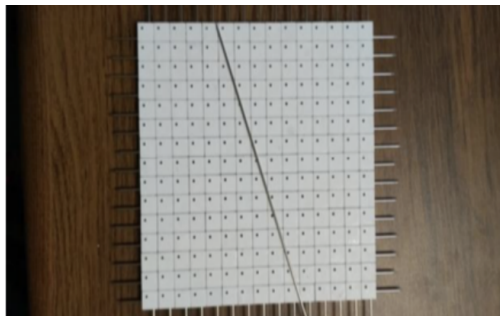


図 3.13 金属棒を用いたシンチレーターキューブのチェック [72]



図 3.14 釣り糸を通した 1 列のシンチレーターキューブ [64]



図 3.15 釣り糸を通したシート状のシンチレーターキューブ [72]

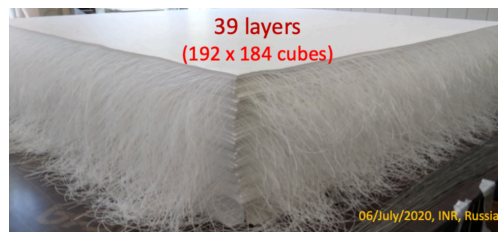


図 3.16 シート状のシンチレーターキューブを 39 層積み重ねた写真 [75]

そして、釣り糸が全て通し終わり、全てのキューブが組みあがってから、最後に 1 本ずつ波長変換ファイバーを入れ替えるという計画である。

● 超音波溶着を用いる方法

超音波溶着を用いる方法は Super-FGD のキューブ組み立て方法のバックアップである。図 3.17 は超音波溶着の仕組みと溶着シートを用いた組み立ての流れを示した図である。この方法は主に 4 段階に分かれる。第一にカメラでの撮影システムのような検査システムによるキューブのサイズや穴の位置と大きさの確認と選別、第二に平面に並べられてたキューブとポリスチレンシートを超音波溶着しモジュール化、第三にそれらのモジュールを固定、釣り糸を通し問題がないことを確認してから、最後に波長変換ファイバーと釣り糸を入れ替える流れである。超音波溶着とは、ポリスチレンのような熱可塑性の物体と、固定する対象物を接触させた状態で超音波振動を与え、接合部分で熱を発生させ、熱可塑性の物体を溶かし対象物と溶着させる技術である [76]。溶着案の場合、釣り糸を用いる案に比べてキューブの位置が固定され、構造的に強固なものが作れるというメリットがあるが、一方で溶着したキューブの穴の位置や大きさ、キューブそのものの大きさがずれていると、釣り糸や波長変換ファイバーが通らなくなってしまうため、事前のキューブのチェックが非常に重要になる。

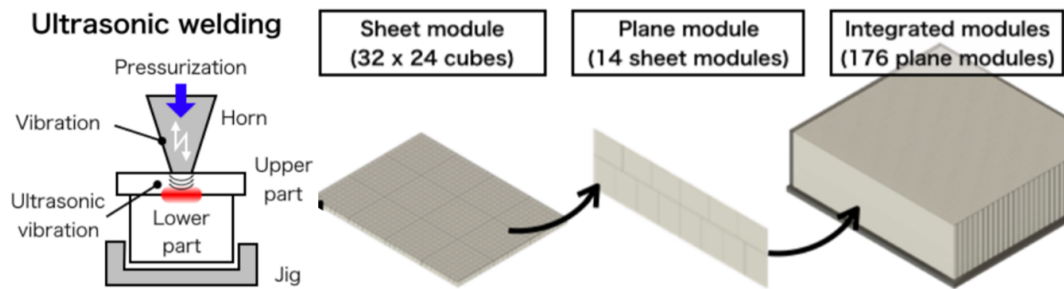


図 3.17 超音波溶着の仕組みと溶着シートを用いた組み立ての流れ

3.3 期待される性能

Super-FGD の期待される性能として主に挙げられるのは2つである。

1つ目は大角度散乱した粒子に対する検出効率の改善である。図 3.18 はシミュレーションによる ν_μ の CC 反応で生じるミュオンのビーム軸に対する散乱角と再構成効率を示したグラフである [72]。ND280 のアップグレードによりミュオンの散乱角の広い領域で検出効率が高く、現在の ND280 と比較して特に大角度での散乱の検出効率が上昇していることが確認できる。

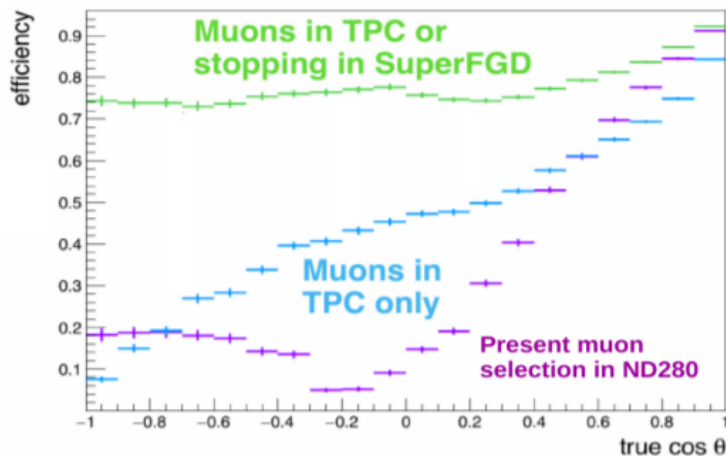


図 3.18 シミュレーションによる ν_μ の CC 反応で生じるミュオンのビーム軸に対する散乱角と再構成効率 [72]。緑が TPC に入射したミュオンと Super-FGD 内で止まったミュオン、青が TPC に入射したミュオン、紫が現在の ND280 でのミュオン選別の再構成の効率である。

2つ目は低運動量の荷電粒子の検出効率の改善である。Super-FGD は約 1 cm 立方のシンチレータキューブが並べられるため、現在の ND280 の FGD に比べて構造的に位置分解能が向上する。図 3.19 は GENIE[77] というニュートリノと原子核の反応シミュレーターを用いた陽子の

運動量と検出効率を示したグラフである [78]。ここでは $1.9 \times 1.9 \times 0.6$ m の Super-FGD と同様の構造の検出器 (図中の青線の Super-FGD) と、それと同じ大きさで FGD と同様の構造の検出器 (図中の赤線の FGDXZ) を想定している。両者を比較すると、全体的に Super-FGD の方が検出効率が高いことに加えて、FGDXZ は 400 MeV/c 以下の運動量の陽子をほとんど検出できないのに対し、Super-FGD では一定の検出効率を持っており、より運動量の低い陽子に対しても感度を持っていることがわかる。

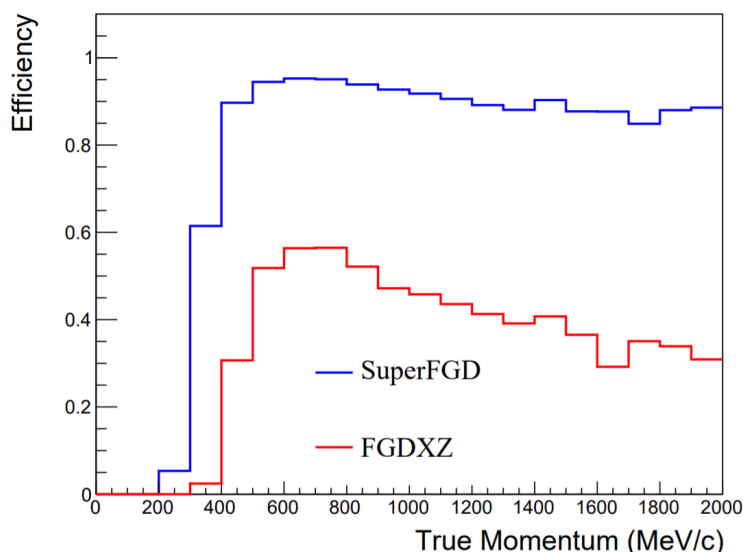


図 3.19 GENIE[77] を用いた陽子の検出効率の運動量依存性 [78]。青線は $1.9 \times 1.9 \times 0.6$ m の Super-FGD と同様の構造の検出器、赤線はそれと同じ大きさの FGD と同様の構造の検出器でのシミュレーション結果である。

主な改善点は上記の 2 つであるが、Super-FGD の導入により、ND280 全体としてのニュートリノの標的が増加する [64] という利点もある。

その他にも、電子と γ の選別能力の改善を図ることで、振動前のニュートリノに含まれる ν_e 由来の系統誤差の削減を目的とする研究や、中性子の弾性散乱による荷電粒子の放出を測定することにより、飛行時間測定による中性子検出の研究も行われており [79]、これらについても現在の ND280 に比べて性能が向上することが期待されている。

3.4 本研究の目的

本研究の目的は、3.2.6 節で述べた Super-FGD で用いるキャリブレーションシステムを開発することである。

キャリブレーションシステムは MPPC の動作や波長変換ファイバーの健全性の確認および MPPC の増倍率の較正を行うが、これらは Super-FGD の組立時や実験初期および長期運用の際に必要な不可欠なものである。

Super-FGD は 3.1 節で述べたように、約 200 万個ものシンチレータキューブを積み重ね、波長変換ファイバーを 3 方向に通すという、これまでにない新しい構造の挑戦的な検出器である。したがって、Super-FGD の組立時や、ND280 の内部にインストールされる際、波長変換ファイバーの断裂や、MPPC と波長変換ファイバーの接触不良など、予期せぬ問題が生じる懸念がある。

キャリブレーションシステムが設置されなかった場合は、迅速に検出器全体の健全性を確認することができない。宇宙線ミュオンを用いることも可能であるが、十分な統計量を確保するために時間がかかり、1 回の健全性確認のために、数日から数週間を要することが想定される。運用開始までは各段階において、逐一検出器全体の健全性を確認する必要があるが、これらの確認を宇宙線ミュオンを用いて行うのは多大な時間がかかり現実的ではない。一方で、キャリブレーションシステムは任意のタイミングで波長変換ファイバーを介して全ての MPPC に光を入射することができ、数分程度で十分な統計量を確保することが可能である。

Super-FGD は光を検出した MPPC の位置や、その検出光子数から荷電粒子のエネルギー損失量を推定し、それらから荷電粒子の識別や運動量の測定を行う。このため、MPPC の増倍率の較正は、Super-FGD における検出光子数の算出に欠かせないものであり、キャリブレーションシステムを用いることで長期に渡って常時モニターすることができる。キャリブレーションシステムが設置されなかった場合、長期に渡って十分に MPPC の増倍率の較正を行うことができず、検出光子数の不定性が大きくなる可能性があり、Super-FGD の飛跡検出器としての性能を低下させる恐れがある。

このように、Super-FGD においてキャリブレーションシステムは、組立時から運用初期、さらに長期運転期間において、MPPC や波長変換ファイバーなどの検出器全体の健全性の確認と MPPC の増倍率の較正を担う重要な装置である。

Super-FGD の当初の計画では、ファイバーを用いて光の分配を行うキャリブレーションシステム [80] が提案されていたが、本研究で新たに導光板を用いるシステムを考案し、開発した結果、実現可能性を十分に示すことができたため、Super-FGD のキャリブレーションシステムとして正式に採用されることとなった。

本研究では、導光板を用いるシステムの初期の概念設計から Super-FGD にインストールする実機の開発まで行った。第 4 章では、その開発の概要について述べ、第 5 章では、実機として開発したシステムの性能評価について述べる。

第 4 章

導光板を用いたキャリブレーションシステムの開発

4.1 概要

Super-FGD におけるキャリブレーションシステムの目的は、LED 光を MPPC に入射することで、MPPC の動作やファイバーの健全性の確認および MPPC の増倍率の較正を行うことである。図 3.12 でも示したように、キャリブレーションシステムは検出器内部のキューブを挟んで MPPC の反対側に設置され、波長変換ファイバーを介して MPPC に LED 光を入射する。全てのファイバーに LED 光を入射し、かつキャリブレーションシステムの厚みを抑える観点から、少数の LED からの光を分配し、全ての MPPC に光を入射する。本研究で開発したキャリブレーションシステムでは、LED 光の分配に導光板 (Light Guide Plate: LGP) を用いた。

本章ではキャリブレーションシステムの各構成要素の開発に伴う性能評価や評価結果の解釈、設計値の最適化や設計の理由などについて述べる。最終的に開発したキャリブレーションシステムの設計と性能評価は第 5 章で述べる。

4.1.1 導光板 (Light Guide Plate: LGP)

本項では導光板の一般的な説明をする。開発をした導光板については 4.4 節で説明する。

本研究で使用する導光板とは透明なアクリル板に傷 (Notch) などがつけられたものである。導光板の端面から LED の光を入射すると、光は導光板内を反射しながら進み、光が Notch にあたると散乱され、図 4.1 のように主に Notch とは反対側に光が放出される。図 4.2 と図 4.3 は導光板の端面に設置した LED が未点灯時と点灯時の写真である。このような構造のため、導光板は、薄く、少ない光源で広い領域に光を分配することができ、また Notch の位置や形状を変更することで任意の箇所から光を放出することができるという特徴を持つ。導光板は看板のバックライトや照明など、日常においても多く使用されている。

Notch の生成方法には、レーザーによるアクリル板の表面加工、プロッター等での溝を彫る方

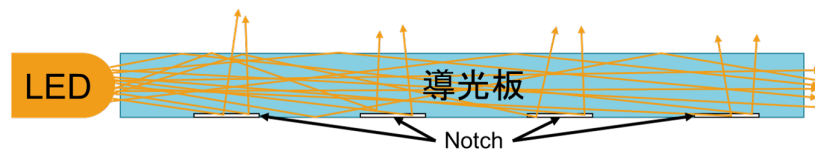


図 4.1 導光板の概略図

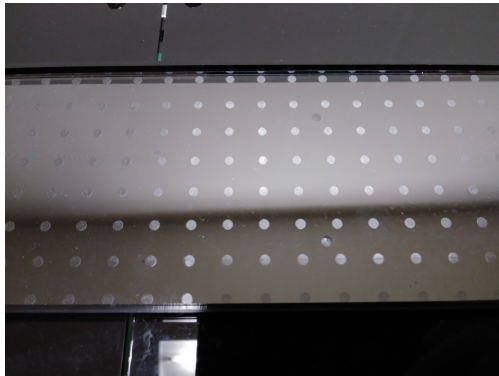


図 4.2 導光板の写真 (LED 未点灯時)

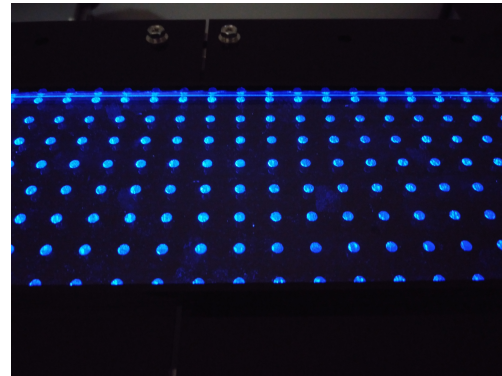


図 4.3 導光板の写真 (LED 点灯時)

法、アクリル成形時に Notch 付きの金型を使用する方法などがある [81]。アクリル板に傷を付ける以外にも、シルクスクリーンやインクジェットをアクリル表面に印刷することで光を散乱させる導光板もある [81][82]。本研究ではレーザー加工で Notch を作成する導光板を用いる。

導光板の材料となるアクリル板の生成方法には主に押し出しとキャストの 2 種類の生成方法がある [83]。押し出しはローラーで粘土状のアクリル樹脂を押し出して生成する方法であり、キャストは 2 枚のガラスの間にアクリル樹脂を流し込み生成する方法である。それぞれ様々な特徴があるが、導光板として使用する場合には板厚精度と、熱耐性が大きな違いとなる。一般的に押し出しの板厚公差は約 $\pm 5\%$ であり、キャストは約 $\pm 15\%$ と押し出しの方が優れている。一方で熱耐性はキャストの方が優れており、レーザー加工で彫刻を行う場合に図 4.4 のように違いが生じる。押し出しの場合は周囲が溶け、きれいに彫刻できないが、キャストではきれいに彫刻することができる。このため一般的に導光板はキャストで製作する。4.4.1 項で詳細を述べるが、本研究においては板厚精度が優れている押し出しを用いた。

4.1.2 導光板による波長変換ファイバーへの LED 光の分配方法

3.2.6 項でも述べたように、キャリブレーションシステムは波長変換ファイバーを介して全ての MPPC に LED 光を分配する。図 4.5 に導光板を用いて各波長変換ファイバーに LED 光を分配する方法を示した。導光板には波長変換ファイバーの間隔に合わせて Notch を付け、ファイバーの真下に Notch がくるように導光板を配置する。導光板とファイバーの間には導光板と同じサイズの拡散板を設置し、それらの片側の端面に LED を配置する。

LED から波長変換ファイバーを介して MPPC に光が入射される流れは以下の通りである。

1. LED を発光させ、端面から導光板に光を入射する
2. LED 光は反射を繰り返しながら導光板内を進み、Notch にあたる光は散乱される
3. 散乱され導光板の外に放出された光は、その上に設置されている拡散板で拡散される。
4. 一部の光は拡散板を通過し、波長変換ファイバーに入射する。
5. 波長変換ファイバーに入射した光はファイバーを介して MPPC に入射される。

4.1.3 キャリブレーションシステムの全体構成

Super-FGD のキャリブレーションシステムの全体構成は、LGP モジュールと LED ドライバーの 2 つの部分からなり、両者は同軸ケーブルで接続される。

LGP モジュールは ND280 の内部に設置され、LED の光を導光板を用いて、各波長変換ファイバーと MPPC に分配する。LGP モジュールの詳細は次項で述べる。LED ドライバーは ND280 の外に設置され、LED を発光させるための矩形波を出力する装置である。LED ドライバーは主に FPGA^{*1} と増幅回路から構成され、出力する矩形波の電圧と信号幅の調整が可能である。外部のデータ収集システムとの通信が可能であり、矩形波の電圧や信号幅、出力タイミングを制御することができる。LED ドライバーの開発はロシアの共同研究者が主導して行っている。

4.1.4 LGP モジュール

Super-FGD のキャリブレーションシステムはモジュール化され設置される。モジュールは底面に設置される Bottom LGP モジュールと壁面に設置される Wall LGP モジュールの 2 つに分けられる。1 つの Bottom LGP モジュールで 8×96 個の Notch、1 つの Wall LGP モジュールで 8×56 個の Notch を有しているため、それぞれ 768 個と 448 個の MPPC に光を入射することができる。Bottom LGP モジュールは合計で 46 セット、Wall LGP モジュールは合計で 47 セット使用する。図 4.6 はそれぞれのモジュールの設置位置と向きを示したものである。Super-FGD の Y 軸方向の辺 (図 3.1 を参照) には Super-FGD を支える構造物が設置されるため、キャリブレーションシステムのケーブル取り回しが干渉しないように、Wall LGP モジュールの LED が底面側になるように設置される。

キャリブレーションシステムの主な構成要素は導光板、拡散板、LED、ケース、コリメータであり、図 4.7 は LGP モジュールの概略図である。導光板と拡散板は積み重ねられ、その片側の端面に LED と光量調節用のコリメーターが設置される。ケースは拡散板の上側の面以外の 5 面を覆う構造をしている。

表 4.1 に LGP モジュールの各構成要素における開発項目、最終的に採用した仕様、本論文でそれらに関連する項をまとめた。

^{*1} Field Programmable Gate Array の略称

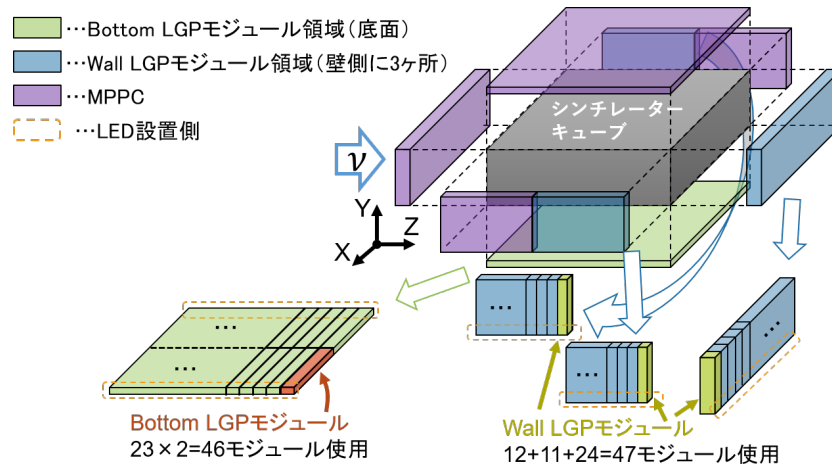


図 4.6 LGP モジュールの設置位置と向き

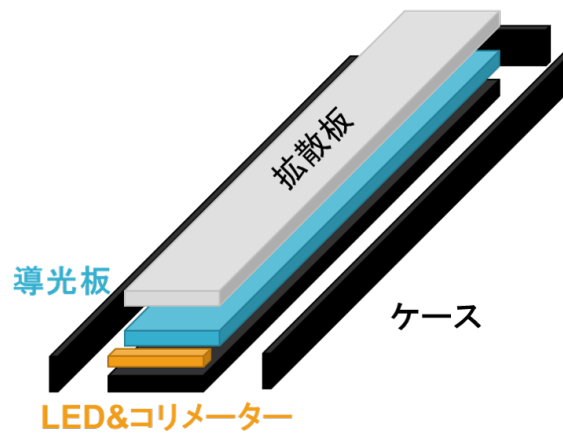


図 4.7 LGP モジュールの概略図

4.2 キャリブレーションシステムへの要求

Super-FGD のキャリブレーションシステムに主に要求される性能と構造は光量一様性と薄い構造を持つことの 2 つである。

1 つ目の光量一様性に関しては、全ての MPPC への入射光量が、最大最小光量比 3 程度となることが目標となる。この要求は MPPC の増倍率の較正に由来する。MPPC で光を検出し、出力された電圧は ADC でデジタル化され、ADC 値として保存される。したがって、MPPC に入射した光量を推定するためには、ADC 値から検出光子数への変換が必要となる。図 4.8 は MPPC での検出光子数のスペクトラムの例 [71] であり、横軸は ADC 値から光子数に換算されているものであ

開発項目	採用した仕様	関連する項
光源の種類と形状	砲弾型 LED を 7 つ配列	4.3.1, 5.1.1
光源の配置位置	LED を Notch の中間に配置	4.3.1
光源と導光板の距離	3 mm	4.3.2, 5.1.1
コリメータの有無	あり	4.3.3
コリメータの形状	逆さの T 字型	4.3.3.3
導光板の材質	押出生成の透明なアクリル	4.4.1
導光板の厚み	3 mm	4.4.2
Notch の深さ	0.01 mm 程度	4.4.3
Notch の大きさ	3 mm ϕ	4.4.4, 4.5.1
導光板の端面の処理	LED と反対側の端面を黒く塗る	4.4.5
拡散板の有無	あり	4.5.1, 4.5.2
拡散板の側面の処理	側面とねじ穴を黒く塗る	4.5.3
LGP モジュールの固定方法	ねじ	4.7.1, 4.7.2
固定用ねじの設置位置	Bottom LGP モジュールで 10 ヶ所	4.7.2, 4.7.3

表 4.1 LGP モジュールの開発項目、採用した仕様と関連する項の一覧

る。図 4.8 のように各検出光子数のピークを ADC 値のスペクトラムではっきりと確認することが

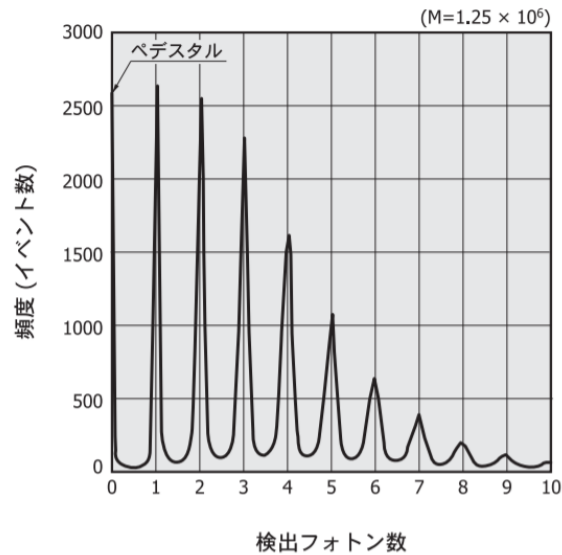


図 4.8 MPPC の検出光子数スペクトラムの例 [71]

できれば、それぞれの光子数のピークと ADC 値を関連付けることができ、MPPC での検出光子数を算出することができる。その一方で、MPPC からの出力電圧が小さくノイズに埋もれ、各光

光子数に対応するピークが見えなくなる場合や、ピークが分離できないほど検出光子数が多い時、または検出光子数が極端に少なくペDESTAL以外のピークがほとんど検出できない場合は、光子数と電圧を関連付けることができなくなってしまう。したがって、電氣的なノイズが MPPC の出力電圧に比べて大きい場合や、MPPC に入射する光量が適切でない場合などは、ADC 値と検出光子数の関連付けが難しくなる。キャリブレーションシステムの要求性能である光量一様性は、適切な光子数が全ての MPPC に入射されることを要請するものである。具体的に説明すると、1 枚の導光板内で光量が極端に大きい箇所、もしくは極端に少ない箇所がある場合は、MPPC に入射する光量に大きなばらつきが生じるため、各光子数に対応するピークを確認することができない MPPC が生じることが考えられる。そのため、全ての MPPC に適切な量の光を一様に入射できるように、キャリブレーションシステムは LED 光を一様に分配する必要がある^{*2}。また、光量一様性の定量的な目標である最大最小光量比 3 程度は比較的厳しい状況を仮定して見積もった値である。どの程度の光量一様性であれば、各光子数のピークを検出することができるかは、電氣的なノイズや ADC の性能、MPPC の増倍率のばらつき、データ取得時の閾値電圧などによって左右される。特に電氣的なノイズに関してはケーブルの配線や周囲の環境によって変化するために検出器を実際に動かす前の段階から実機環境でのノイズを詳細に見積もることは難しいため、最大最小光量比 3 程度という厳しく見積もった値を目標としている。実験環境や装置、データ取得の条件などは異なっているため単純に比較できるものではないが、参考として、第 5 章で説明する実験環境化での測定では最大最小光量比 10 の場合でもペDESTALと 1 光子のピークを確認でき、ADC 値から検出光子数への変換が可能であることが確認できた。

2 つ目の要求は 1 cm 以内の薄い構造であるということである。これは検出器内部のスペースが限られていることに由来する。Super-FGD の周囲には HA-TPC や TOF、Upstream Ecal、最上流の TPC などの検出器が配置され、それらはマグネットの内部に収まる必要があり、スペースが非常に限られている。また、それらの検出器の間に物質があると、そこで荷電粒子がエネルギーを損失してしまうために、検出器間の物質量は少ないことが望ましい。これらの制約からキャリブレーションシステムは 1cm 以内の薄い構造であることが求められている。

3.4 節にも記したように、本研究の目的はこれらの要求を満たすキャリブレーションシステムを開発することである。導光板はこれまでに上記のようなキャリブレーションシステムに用いられた事例がなく、特に 1 つ目の要求性能に挙げた光量一様性は未知である。とりわけ Bottom LGP は約 1 m と長い^{*3}ため、LED 付近とそこから約 1 m 離れた箇所の光量を同程度にすることが大きな課題となる。

^{*2} LED の発光量の絶対値は LED への電流を調節することで対処できるが、1 つの LGP モジュール内での一様性には対処することができない。

^{*3} 詳細な寸法は付録 C を参照

4.3 光源の開発

LGP モジュール内で光源は図 4.7 にあるように片端に設置される。キャリブレーションシステムの性能である光量一様性は光源の種類や形状によって大きく変化する。開発にあたり、導光板の試作品を用いて約 1 m 程度光源から離れても光量の変化が少なくなるよう、光源の開発を行った。

光源の開発の段階は大きく 3 つに分けられる。第 1 段階に、LED の数や種類を変更するなどの方法でいくつかの光源を考案、試作し、それを用いて光量一様性の評価を行った。また光学シミュレーションの結果と実験結果を比較し、概ね傾向が一致していることを確認した^{*4}。第 2 段階に、第 1 段階で選定した光源の設置位置を変更し、光量一様性を測定することで、光源の設置位置を検討した。第 3 段階に、LED 付近に設置するコリメータを用いて、LED に近い箇所の光量の調節を行った。4.3.1 項から 4.3.3 項ではそれぞれの開発に伴う性能評価や設計の最適化、結果の解釈について述べる。最終的に開発した光源は 5.1.1 項で述べ、その詳細な寸法は付録 C に示した。

4.3.1 LED の種類と形状

導光板はこのようなキャリブレーションシステムに用いられた事例がなく、要求する光量一様性の実現可能性は示されていない。そのため初期段階としていくつかの種類の光源を作成し、それらと導光板の試作品を用いて光量一様性を測定することで、導光板を用いたキャリブレーションシステムの実現可能性を確認した。使用した光源の種類や実験のセットアップ、光量一様性の解析方法について述べた後、測定結果について論じる。

4.3.1.1 使用した光源、セットアップ

まずは使用した光源とセットアップについて述べる。使用した光源は単一型 LED(図 4.10)、配列型 LED(図 4.11)、棒状 LED(図 4.12) の 3 つである。図 4.9 に示したように、Notch に重なる位置を on-notch、Notch と Notch の中間の位置を off-notch と呼称する。

単一型 LED は 1 枚の導光板に対して 1 つの砲弾型 LED を使用した光源であり、日亜化学工業株式会社の青色 LED(NSPB500S)[84] を用いた。図 4.13 は NSPB500S の発光波長スペクトラムと指向性を示した図である。この図を見ると、図 3.4 に示した波長変換ファイバーの吸収波長領域と重なることが確認できる。また、この LED は約 15° の指向性^{*5}を持っており、LED の向いている方向により多くの光を放出することが特徴である。図 4.10 が単一型 LED の写真である。

図 4.11 が配列型 LED の写真である。配列型 LED は単一型 LED と同じ LED を約 1 cm 間隔に 10 個配列した形をしている。導光板の Notch のピッチが約 1 cm であるので、Notch とほぼ同等の間隔で LED を配置した光源である。

棒状 LED は 1.5 mm 間隔で表面実装 LED が 30 個羅列された LED であり、発光部分の長さは

^{*4} 光学シミュレーションについては付録 A で述べる。

^{*5} ここで述べる指向性は、横軸を LED からの角度、縦軸を光量としたときの半値全幅のことを指す

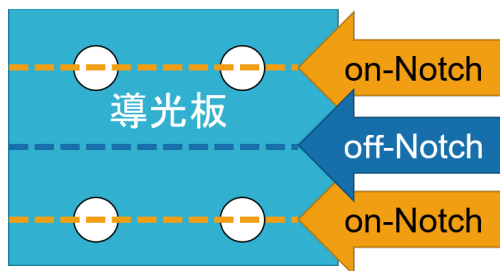


図 4.9 on-notch と off-notch の概略図



図 4.10 単一型 LED の写真



図 4.11 配列型 LED の写真



図 4.12 棒状 LED の写真

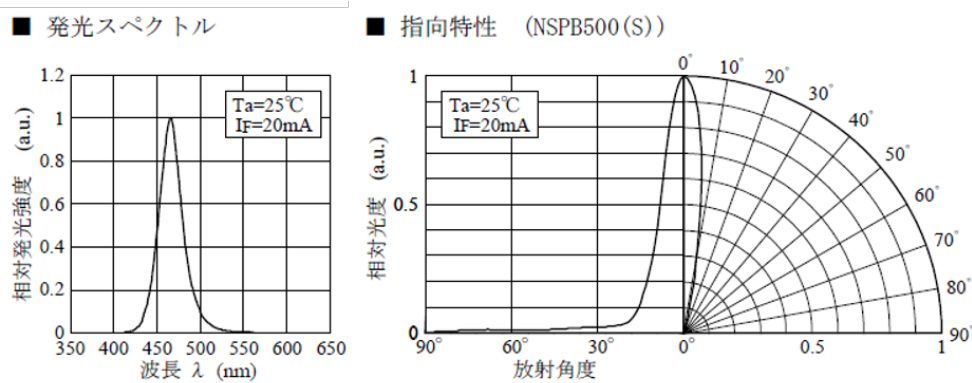


図 4.13 NSPB500S の発光波長スペクトラム (左) と指向特性 (右)[84]

4.35cm である。砲弾型とは異なり約 120° の指向性を持つため、広い領域に光を放つことができことが特徴である。図 4.12 が棒状 LED の写真である。

これら 3 種類の光源を用いて光量一様性を測定した。使用した導光板^{*6}の寸法は $97\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 5\text{ mm}$ であり、Notch は 1 cm 間隔で導光板の短辺方向に 9 個、長辺方向に 96 個設置されている。Notch の大きさは約 1 mm であり、この導光板は明拓工業株式会社 [85] から購入したものである。図 4.14 は導光板を上から見た概略図であり、以降導光板を用いた実験セットアップにおいて、この図のように X,Y,Z 軸、導光板の端を原点とする。また Notch の番号はそれぞれ X,Y に対して 0 から始める。

図 4.15 は 3 種類の光源を用いた光量測定時のセットアップである。この測定では導光板単体の

^{*6} この導光板は実際にモジュールに組み込む導光板とは異なる寸法や Notch の大きさである。開発の初期段階に使用した導光板で、キャリブレーションシステムの実現可能性を示す段階で用いた。実現可能性の確認後、モジュール化に向けて導光板の開発を進めた。

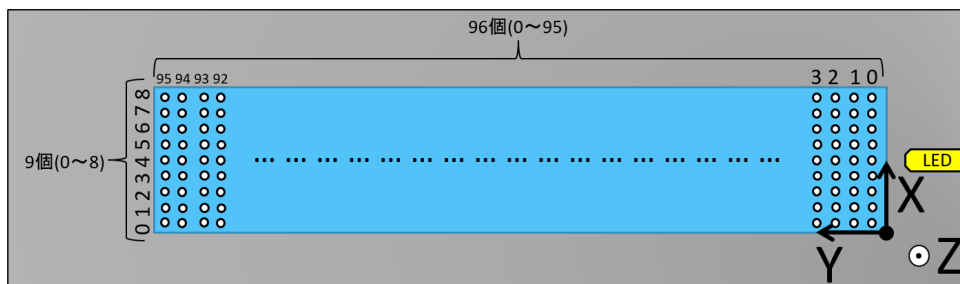


図 4.14 導光板に対する軸の定義と Notch の番号

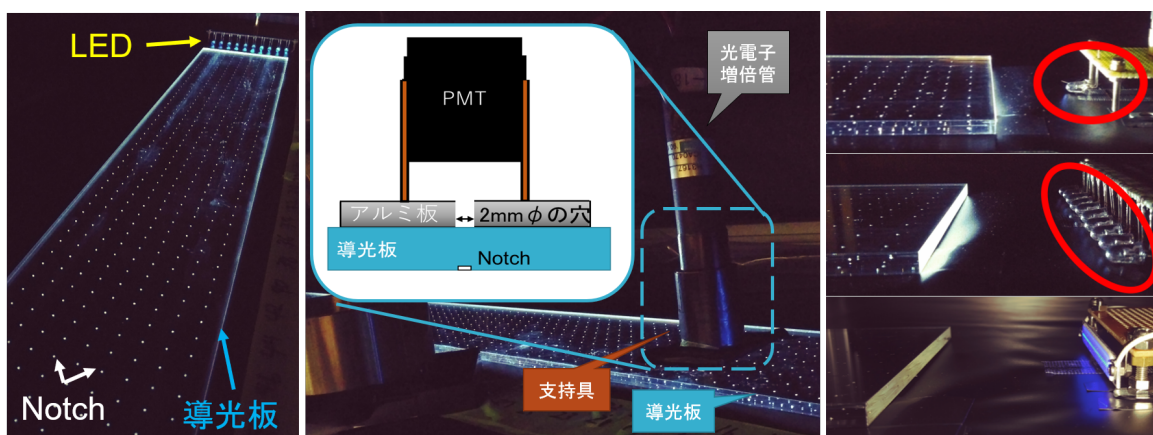


図 4.15 3種類の光源での光量一様性測定の実験セットアップ

光量一様性を見るために拡散板 (4.5.1 項を参照) は設置せず、導光板のみを設置して測定を行った。光検出器には光電子増倍管 (Photon PhotoMultiplier Tube: PMT)*⁷を使用し、測定する Notch 上部に設置した。この際、Notch からの光のみを取得できる支持具とともに設置し、LED を発光させ Notch で散乱される光を測定した。光源はそれぞれ導光板の端から 35 mm の距離になるように配置した。

図 4.16 が光量一様性測定時の回路ブロック図である。クロックジェネレーターで LED の発光タイミングを決め、その信号をファンクションジェネレーター、ゲートジェネレーターへと送る。ファンクションジェネレーターでは LED を発光用のパルス信号を LED へと伝送し発光させた。LED 光が Notch で散乱され、PMT に入射すると、電気信号として出力され、後段のアンプで増幅後、積分型の ADC (Analog to Digital Converter) に入力される。一方、ゲートジェネレーターでは ADC のゲート信号を生成し、ADC に入力される。この際にオシロスコープでアンプ後の信号とゲートジェネレーターの信号のタイミングを確認し、それらが合うようにゲート信号出力タイミングをゲートジェネレーターに搭載されている遅延機構で調節した。ADC で取得されたデータ

*⁷ 浜松ホトニクス社製の H3167 CA0470 を使用した。

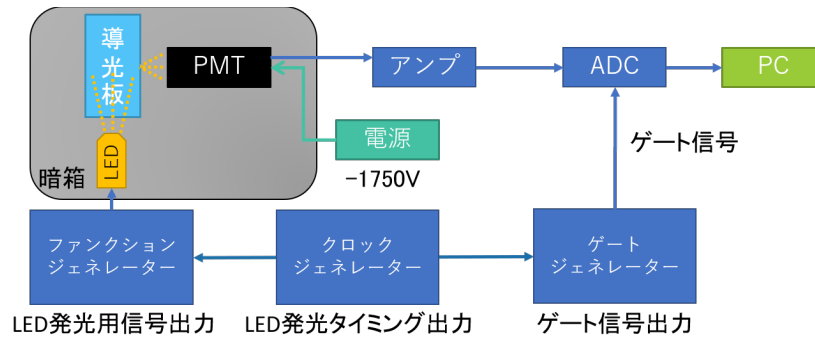


図 4.16 3種類の光源での光量一様性測定回路ブロック図

をPCで収集し、光量一様性の測定データの解析を行った。

4.3.1.2 検出光子数の算出方法

測定ではPMTからの信号の電荷をADCでデジタル化された値のみ得ることができるため、検出光子数を得るためには、ADC値から検出光子数への変換が必要となる。測定時には各測定箇所の光量測定に加えて、ADC値から検出光子数に変換するためのLEDの発光量を数光子程度に抑えたキャリブレーション用の測定を行った。図4.17の左はキャリブレーション用の測定結果の一例であり、ペDESTALと1光子のピークが確認できる。それぞれのピークをガウス関数でフィットすることでペDESTAL 1光子のADC値を求め、以下の式(4.1)でADC値から光子数への変換を行う。

$$(\text{変換後の光子数}) = \frac{(\text{変換するADC値}) - (\text{ペDESTALのADC値})}{(1\text{光子のADC値}) - (\text{ペDESTALのADC値})} \quad (4.1)$$

式(4.1)で、ADC値から検出光子数に変換をして作成したヒストグラムの平均値を検出光子数とした。

4.3.1.3 測定結果

図4.18が各光源を用いて、中央の列のNotch(X=4)の光量一様性の結果である。この結果からもわかるように、配列型LEDを用いてoff-notchに設置した場合に非常に優れた一様性を持つことが確認できる。これは要求性能である最大最小光量比3程度の光量一様性であり、導光板は配列型LEDをoff-notchに設置することで優れた一様性を示すことが確認できた。これにより、導光板を用いたキャリブレーションシステムの実現可能性を示すことができた。

4.3.1.4 測定結果の考察

off-notchに設置した配列型LEDが優れた一様性を持つことの定性的な解釈を説明する。配列型LEDにはLEDからの距離が離れるにしたがって、光量が減る要素と増える要素が考えられる。図4.19はoff-notchに設置した配列型LEDにおいて、LEDから離れるほど光量が増える要素と

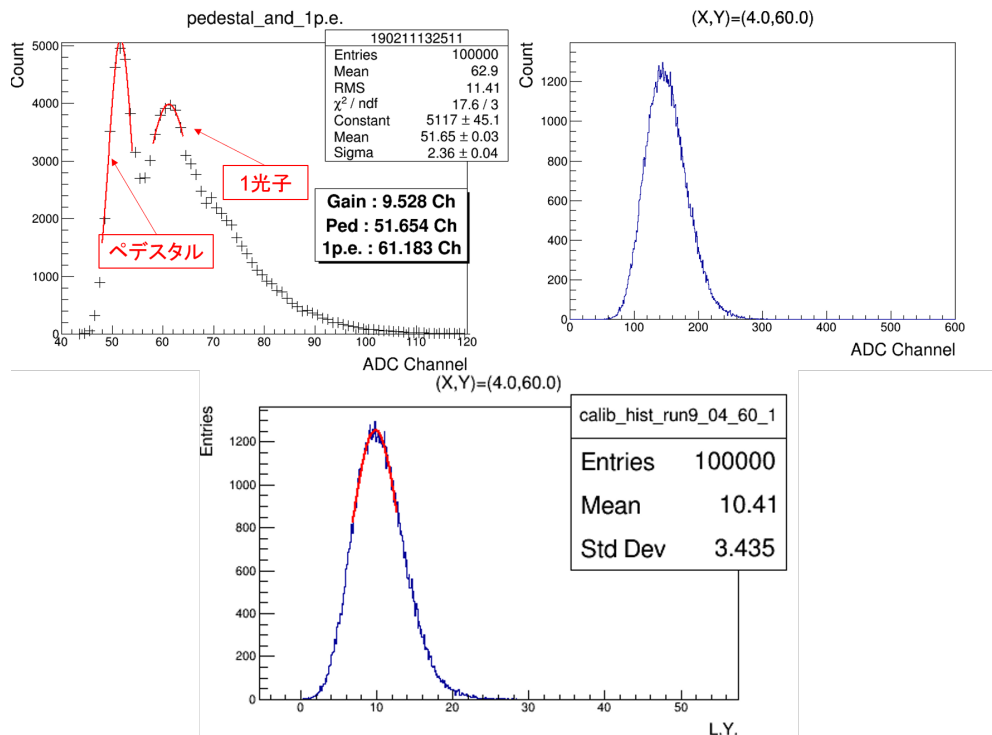


図 4.17 各測定箇所での光量測定の実例。左上がキャリブレーションシステム用の測定結果のヒストグラムである。右上は測定で得られた ADC 値のヒストグラムである。下は ADC 値から検出光子数に変換後のヒストグラムである。

減る要素を図示したものである。LED から離れるほど光量が減る要素には、LED からの立体角が小さくなること、手前側の Notch での散乱、導光板内を反射せずに外に光が放出されること、アクリルでの光の吸収などが挙げられる。LED から離れるほど光量が増える要素としては 2 つ考えられることがある。1 つは光源から離れるほど、より多くの LED からの光を受け取ることである。もう 1 つは off-notch によるものである。off-notch に設置される場合、LED に近い Notch は LED との角度が大きいため、指向性の観点からあたる光が少なくなるが、LED から離れた Notch ほど、LED との角度は小さくなるので、指向性の観点では光量は多くなる。これらのバランスにより off-notch に設置した配列型 LED は非常に優れた一様性をもつことができると考える。

また、LED から離れるほど光量が減る要素として、Notch での散乱を挙げたが、今回は Notch の直径を約 1 mm であるため、Notch での散乱による光量の減衰が比較的少なかった。4.4.3 項で後述するが、Notch が大きく、またその深さが深い場合は、Notch での散乱による光量減衰が顕著に現れるようになり、一様性が悪化してしまう。より良い一様性を得るためには、Notch での散乱量を極力少なくし、より多くの光を遠くまで届けるようにすることが重要になってくる。

これらの要素を踏まえて、図 4.18 の off-notch の配列型 LED 以外の結果について考察する。まず、単一型 LED の on-notch の場合は、複数の LED の光の重なりもなく、かつ on-notch である

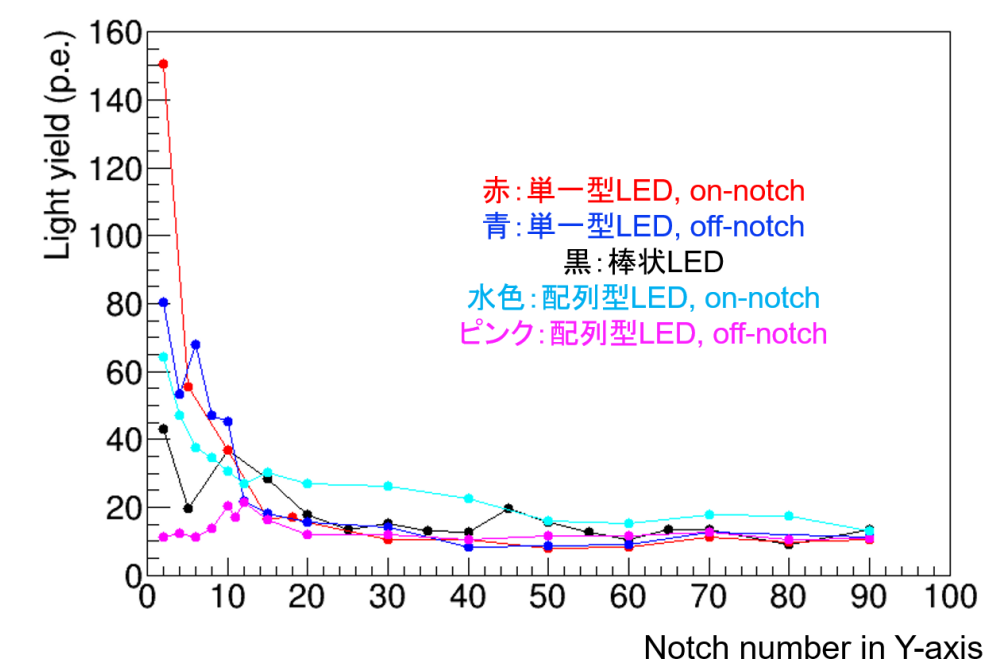


図 4.18 各光源と光量一様性の測定結果。横軸は Y 方向の Notch の番号であり、縦軸は測定された光子数である。導光板の端から光源までの距離は 3.5 cm であり、各光源での測定時の LED の発光量は同一ではない。off-notch の配列型 LED が優れた一様性を持つことが確認できる。この導光板にはねじ穴は空けられていない。

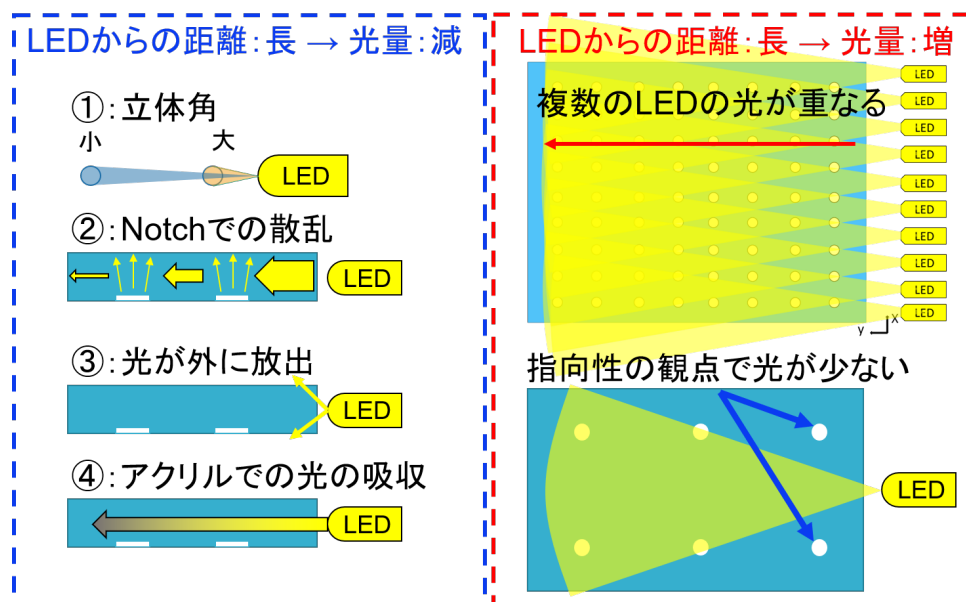


図 4.19 off-notch 配列型 LED で光源から離れた場合の光量増減の要素。左が LED からの距離が大きくなるに従い光量が減少する要素、右が LED からの距離が大きくなるに従い光量が増加する要素を示したものである。

ため LED 付近の Notch にも光があたることになる*⁸。つまり、on-notch の単一型 LED は LED からの距離が大きくなるほど光量が増える要素がない状態の結果である。一方、off-notch の単一型 LED では、複数の LED による光の重なりはないが、off-notch のため、LED 付近の光量上昇を on-notch よりも抑えることができています。それに対して on-notch の配列型 LED の場合は、複数の LED の光の重なりはあるが、off-notch 特有の LED 付近の光量減少の要素はない。また、棒状 LED は 1.5 mm 間隔で LED が設置されているため、on-notch と off-notch の光源が混ざった状態の光量一様性であると解釈できる。on-notch の配列型 LED の方が off-notch の単一型 LED に比べて光量一様性が優れていることから、複数の LED の光の重なりの方が、off-notch 特有の手前の光量上昇を抑える要素よりも大きいことが確認できる。以上が測定結果の考察である。また、自作した光学シミュレーションを用いて、これらの測定の追確認を行い、測定結果とシミュレーション結果が概ね一致する結果を得た。光学シミュレーションの詳細な結果は付録 A に記した。

この結果より、光源は配列型 LED を用いることとした。

4.3.2 LED と導光板の距離

4.2 節でキャリブレーションシステムが 1 cm 以内の薄い構造である必要があることを述べたが、キャリブレーションシステムの設置スペースが限られているのは厚み方向のみではなく、光源部分も可能な限り省スペースである必要がある。4.3.1 項では LED と導光板の距離を 35 mm として測定したが、この距離はさらに短いことが望ましい。本項では LED と導光板の距離を短くした測定結果について述べる。

まず初めに実験のセットアップについて述べる。配列型 LED を導光板の端から 1 mm、35 mm の位置に設置し光量一様性を測定した。導光板の厚みは 2 mm、3 mm、5 mm のものを用いた*⁹。光検出器や信号処理などの測定環境、測定結果の解析手法は 4.3.1 項と同様である。

図 4.20 の左が光量一様性の測定結果である。測定結果より、どの厚みの導光板に対しても 35 mm よりも 1 mm の方が良い、もしくは同等の一様性を持っていることが確認できる。この実験結果から、配列型 LED は導光板に近づけて設置しても問題がないことが確認された。

定性的な解釈として、LED と導光板の距離を狭めたことにより、LED 付近の立体角は大きくなり光量は上昇する要素と、LED に近い箇所の Notch と LED との角度が大きくなることで指向性の観点から光量が減少する要素が考えられる。設置する光源の距離によって、2 つの要素に違いが生じ、光量一様性が変化したと考えられる。

*⁸ 単一型 LED を on-notch に設置した場合、LED と測定箇所の Notch の角度は全て 0° であるため、指向性による差は無い。

*⁹ 導光板の厚みの検討については 4.4.2 項で言及する。

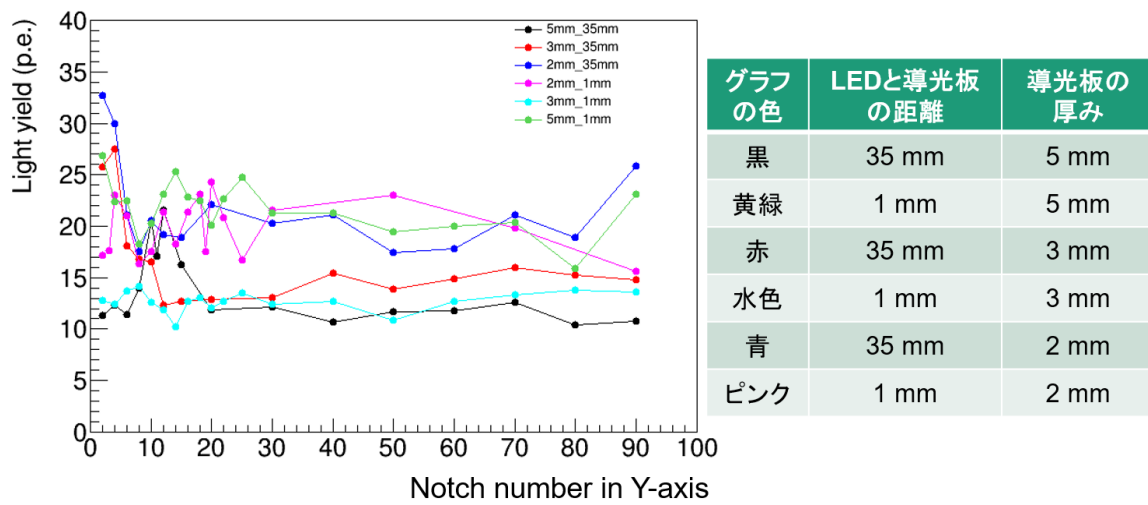


図 4.20 配列型 LED を用いた光量一様性の測定結果。横軸は Y 方向の Notch の番号であり、縦軸は測定された光子数である。右はグラフの凡例である。それぞれの測定において LED の発光量は異なっている。LED を導光板に近づけても光量一様性が悪化していないことが確認できる。なお、この導光板にはねじ穴は空けられていない。

4.3.3 コリメータによる光量の調節

4.3.1 項と 4.3.2 項で述べた測定環境では拡散板は設置せず、かつ LED に近い Y=0,1 の Notch の光量は測定されていなかった。本項では、拡散板を設置し、LED に近い Notch も含めた光量一様性測定の結果と、後述する問題点、それを解消するためのコリメータの開発について順に述べる。

4.3.3.1 セットアップと解析方法

まずは実験のセットアップについて述べる。実験には 3 mm 厚で X 軸方向に 8 個、Y 軸方向に 96 個の直径 3 mmφ の Notch を持つ導光板を用いた。導光板の Notch のピッチは 1 cm であり、導光板の X 軸方向の長さは 74 mm で Y 軸方向の長さは 954 mm である。導光板の端から Notch の中心までは 2 mm、Notch の直径が 3 mm であるために、Notch の外周と導光板の側面の距離は 0.5 mm となっている。拡散板は導光板と同じ外寸であり、乳半色のアクリル板を用いている。また光源は同じ配列型 LED であるが、7 個の LED が取り付けられる LED 基板を新たに作成し、日亜化学工業社製の NSPB300B[86] を基板に取り付け用いた^{*10}。この LED は直径が 3.8 mmφ^{*11}であり、かつ指向性が約 15° と高いのが特徴である。より実機環境に近い状態で光量の測定をするため、波長変換ファイバーと MPPC を用いて測定を行った。MPPC に

^{*10} 最終版の LGP モジュールで使用する LED 基板と基本的には同じ設計であるが、LED のピッチや基板に設置されている保護抵抗、コネクタの形状が異なる。5.1.1 項にて最終版の LED 基板を説明する。

^{*11} 4.3.1 で使用した NSPB500S は直径が 5.3 mmφ であり、NSPB300B に比べて大きい。



図 4.21 LED 基板と NSPB300B の写真。LED は 1cm 間隔で取り付けられており、基板の長さは $74 \times 5 \times 1.6$ mm である。

は浜松ホトニクス社製の MPPC、S13360-1325CE を用いた。これは Super-FGD で使用する表面実装型 MPPC(S13360-1325PE) のセラミックタイプの製品である。MPPC への電圧供給と信号読み出しシステムには CAEN 社製の DT5702(CITIROC モジュールと呼称する) を用いた[87]。DT5702 は Super-FGD における信号読み出しでも使用する Weeroc 社製の ASIC である CITIROC 1A[88] を基本とした SiPM 用の読み出しシステムである。CITIROC モジュールは 32 チャンネルの SiPM に対して 20~90 V の電圧供給と信号読み出しが可能であり、PC を介してコントロール、データ読み出しを行う^{*12}。図 4.22 の右が測定に使用した CITIROC モジュールである。図 4.23 は MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量一様性測定のセットアップの概略図である^{*13}。黒アクリルケースの中に、導光板、拡散板、配列型 LED を設置し、測定する



図 4.22 MPPC と波長変換ファイバーの写真 (左) と DT5702 の写真 (右)[87]。左の中央が MPPC(S13360-1325CE)、その両側は波長変換ファイバーと GOMI コネクター (General Optical MPPC Injection Connector)[89] である。

Notch 上部に波長変換ファイバーの端面を設置した。LGP モジュール上部には波長変換ファイバーと Notch の位置合わせに用いる黒アクリル板^{*14}を設置した。この黒アクリル板には導光板に設置されている Notch と同じ間隔で直径 1 mm ϕ の穴が空けられており、波長変換ファイバーの端面を設置できる構造となっている。波長変換ファイバーのもう片側は MPPC に接触している。

^{*12} CITIROC モジュールはピークホールド型の信号読み出し装置であり、CITIROC 1A チップで一定時間内の信号の最大波高値を読み取り、後段の内蔵された ADC でデジタル化する。ピークホールドのタイミングは MPPC からの信号が設定した閾値を超えた場合 (セルフトリガー)、もしくは外部からの信号 (外部トリガー) によって決定される。

^{*13} ファンクションジェネレータジェネレーター以外は暗箱内部に設置しており、外部からの光が入らない環境で測定を行っている。

^{*14} Trotec 社製のレーザー加工機である Speedy 100[90] を用いて自ら作成した。

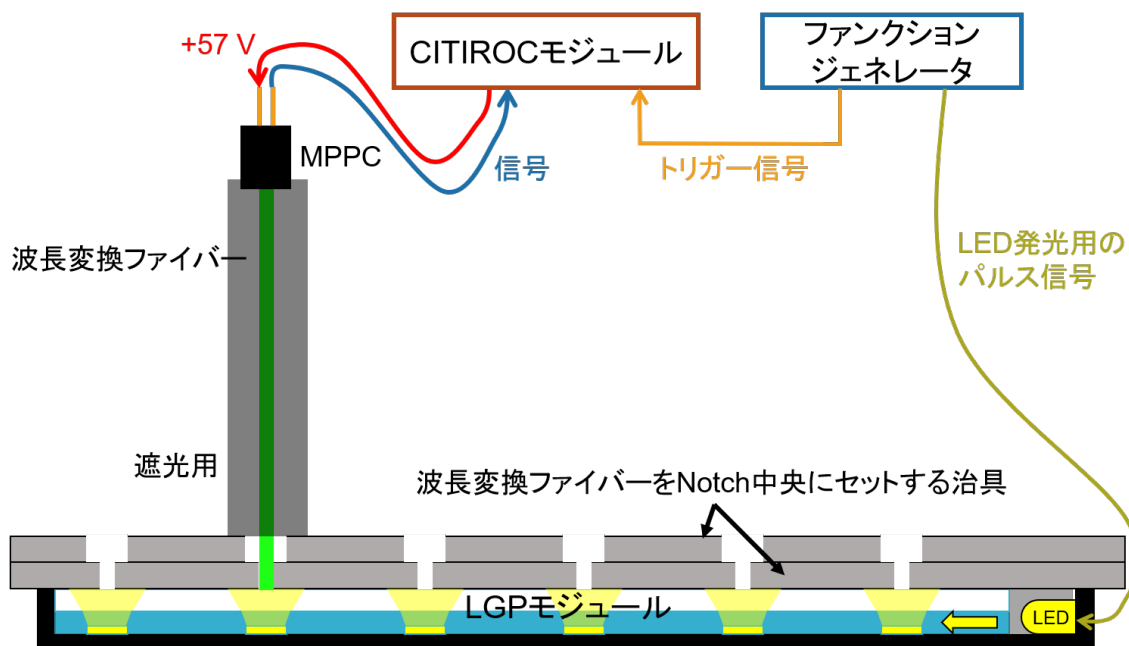


図 4.23 MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量一様性測定の暗箱内のセットアップ

MPPC は CITIROC モジュールと接続されており、電圧供給と信号読み出しが行われる。ファンクションジェネレータは配列型 LED と CITIROC モジュールに接続され、LED 発光用の信号と CITIROC のトリガー用信号を生成している。

各測定箇所の光量の算出方法は、4.3.1 項で説明した手法と基本的には同じであるが、キャリブレーション用の測定は行わず、各測定箇所の ADC 値のヒストグラムからペデスタルと 1 光子の ADC 値を求め、ADC 値から光子数への変換を行い、変換後のヒストグラムの平均値を測定光量とした。図 4.24 は MPPC、波長変換ファイバーと CITIROC モジュールを用いて光量を測定した結果の一例であり、左は横軸が ADC 値、右が ADC 値から光子数への変換後のヒストグラムである。変換式は式 (4.1) と同様である。以上が MPPC、波長変換ファイバー、CITIROC モジュールを用いた測定環境と光量の算出方法である。

4.3.3.2 LED 付近の光量測定結果とコリメータの検討と要求

次に、LED 付近の光量の測定結果と後述するコリメータの要求について述べる。図 4.25 は最も LED に近い Notch も含めた光量一様性の測定結果であり、左が拡散板を除いた場合、右が拡散板を設置した場合である。最も LED に近い箇所の光量が他の測定箇所に比べて大きく、一様性が悪いことが確認できる。また、拡散板の有無を比較すると、拡散板を設置した方が一様性が悪いことがわかる。これらのことは図 4.25 に示した写真からも確認することができる。さらに右の写真の LED 付近を見ると、Notch が設置されていない場所でも多くの光が拡散板から放出されていることがわかる。

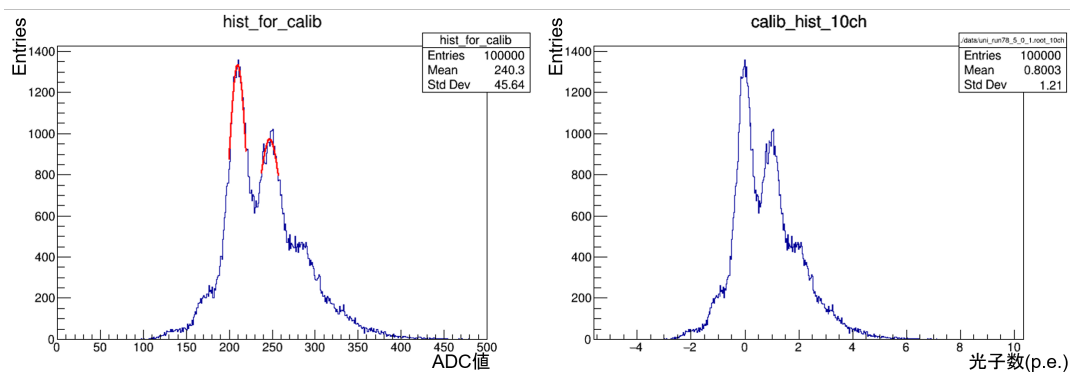


図 4.24 MPPC、波長変換ファイバー、CITIROC モジュールを用いた光量測定結果の例。左は横軸が ADC 値、縦軸がエントリー数の変換前のヒストグラムであり、右は横軸が光子数、縦軸がエントリー数の変換後のヒストグラムである。

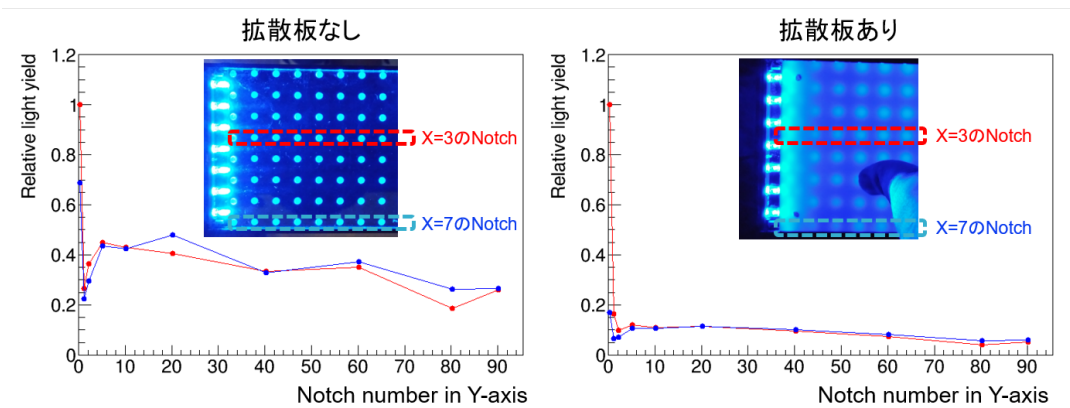


図 4.25 LED 付近の写真と光量一様性。左は拡散板を外した場合の結果であり、右は拡散板を設置した場合の結果である。横軸は導光板の端から Notch までの距離であり、縦軸は相対光量である。LED 付近で光量が上昇し、光量一様性が悪いことが確認できる。なお、この導光板にはねじ穴は空けられていない。

4.2 節で述べた要求性能に対して図 4.25 のような LED 付近の光量上昇は問題となるため、対策を講じ、光量上昇を削減する必要がある。

LED 付近の光量上昇の原因を理解し解決するために、図 4.26 の簡易的な仮のコリメータを LED と導光板の間に設置し光量の測定を行った。この簡易的なコリメータはレーザー加工機を用いて自ら作成した。簡易コリメータを LED と導光板の間に設置して光量一様性を測定した結果を図 4.27 に示した。この時、拡散板の LED 側の側面は黒く塗りつぶされている。図 4.27 の左では、コリメータによって光が遮られ、最も LED に近い Notch の光量が減少していることが写真と測定結果から確認することができる。その一方で図 4.27 の右では LED 付近で多くの光が拡散板から放出されていることが写真から確認することができる。



図 4.26 簡易コリメータの写真。2mm 厚の黒アクリル板をレーザー加工機を用いて加工したものであり、各 LED の位置に 3 mm ϕ の穴を開けている。

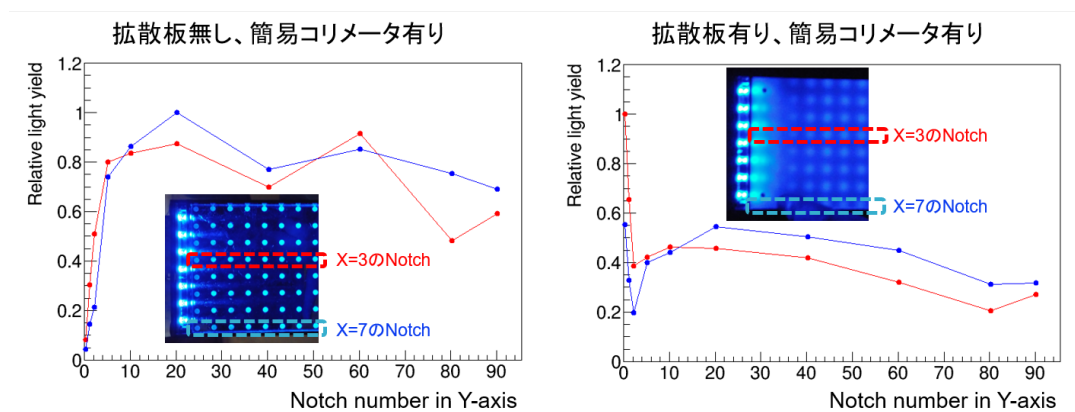


図 4.27 簡易コリメータを設置した LED 付近の写真と光量一様性。左は拡散板を外し簡易コリメータを LED と導光板の間に設置した場合、右は拡散板と簡易コリメータを設置した場合の写真と結果である。なお、この導光板にはねじ穴は空けられていない。

図 4.27 で示した結果の解釈について述べる。まず、波長変換ファイバーで吸収される光には、Notch で散乱されたものと、Notch を経由しないものがあると考えられることを初めに述べる。図 4.27 の左の結果から、この簡易コリメータを設置した場合、最も LED に近い Notch にあたる光は少ないと考えられる。したがって、簡易コリメータでは、LED 付近の Notch で散乱される光を絞り過ぎているということがわかる。その一方で、拡散板を設置した図 4.27 の右の結果では LED に最も近い箇所でも多くの光を検出している。このことから、Notch を経由せず拡散板に入射される光が多く存在していると考えられる。また、これは図 4.27 の右の写真からも確認することができる。

つまり、図 4.27 の測定結果から、簡易コリメータでは LED 付近の Notch で散乱される光を絞り過ぎていること、Notch を経由せずに拡散板に入射している光によって LED 付近の光量上昇が引き起こされるという 2 点がわかる。

次に、Notch を経由せずに拡散板に入射される光を防ぐために、簡易コリメータにブラックテープを張り、目視での確認を行った。図 4.28 の右は穴にブラックテープを張り、拡散板側が覆われるようなコリメータを LED と導光板の間に設置した場合の写真であり、左はそれらの概略図である。比較のために、図 4.28 の右の写真のように、下の 2 つの穴はブラックテープで覆っていない。図 4.28 の右の写真を見ると、ブラックテープを張っている箇所は LED 付近の光量が少ないのに対

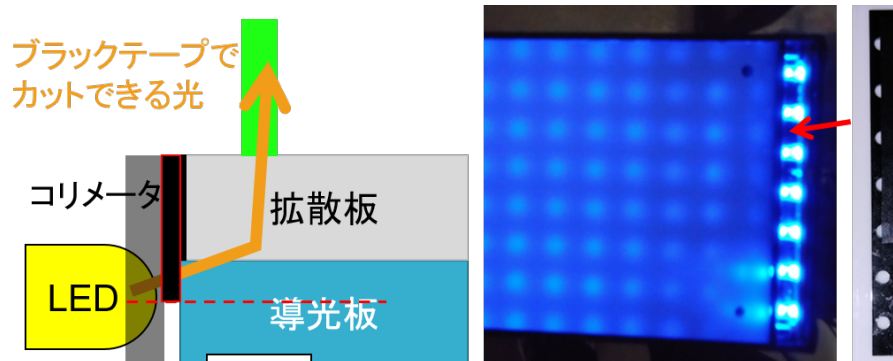


図 4.28 コリメータの穴をブラックテープで半分覆った状態の LED 付近の写真と概略図。ブラックテープは穴の拡散板側が覆われるように張った。また下 2 つの穴は比較のためにブラックテープは張っていない。概略図のオレンジの矢印がブラックテープで遮ることのできる光である。

して、ブラックテープがない場所では、LED の光が多く存在していることが確認できる。図 4.28 の左の概念図に示したように、ブラックテープによって、LED から上向きに放出される光を防ぐことができるため、図 4.27 の LED 付近の光量上昇は LED から上向きに放出される光が原因であることが確認できた。この結果より、LED から拡散板側に放出される光を遮ることができれば、LED 付近の光量上昇を抑えることが可能であることがわかった。

ここでコリメータの開発にあたり、LED 付近の光量を調節するため要求を以下にまとめる。

1. LED から上向きに放出される光をカットすること
2. LED に最も近い Notch にあたる光量を適度に制限すること
3. コリメータが省スペースであること
4. LGP モジュールに固定することが可能

上記の 1,2 は LED 付近の光量を調節するために必要な事柄であり、3,4 は LGP モジュールの寸法を大きく変えずコリメータを実装するために必要な事柄である。

4.3.3.3 コリメータの形状の検討

図 4.27 の左の結果から、簡易コリメータでは LED 付近の光量を絞り過ぎていることが確認できた。コリメータの 2 つ目の要求である、LED に最も近い Notch にあたる光量を適度に制限することを可能にするため、コリメータの形状の検討を行った。

図 4.29 に使用したコリメータ、その測定結果を示した。左が I 字型のコリメータ、右が逆さの T 字型のコリメータを使用した場合の結果である。

I 字型コリメータでは、最も LED に近い Notch の光量が十分に抑えられていないことが確認できる。ここで、最も LED に近い Notch の光量を抑えるために I 字の幅を広げると、 $Y > 2$ の Notch の光量も減少し、全体の一様性が悪化してしまうため、I 字型コリメータでは LED 付近の

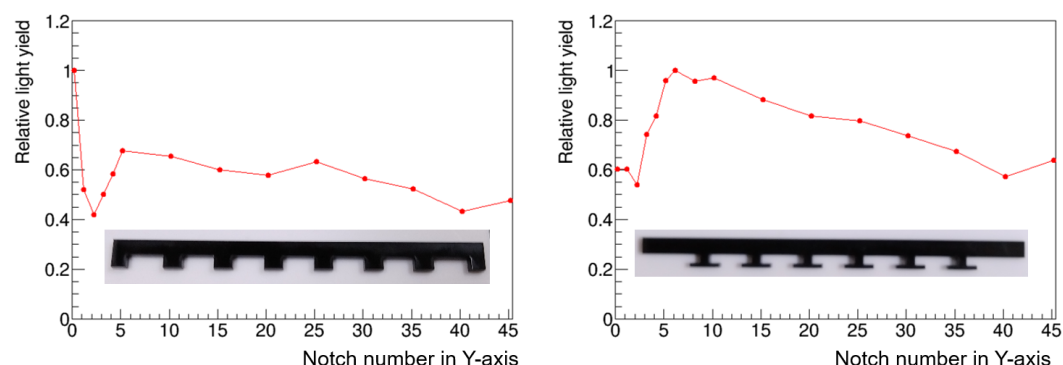


図 4.29 I 字型コリメータと逆さ T 字コリメータの比較。左が I 字型のコリメータであり、右が逆さの T 字型のコリメータである。横軸は導光板の端から測定箇所の Notch までの距離であり、縦軸は各測定における最大光量を 1 とした相対光量である。測定箇所は $X=3$ の Notch である。使用した導光板はレーザー加工機で自作したものである。なお、この導光板にはねじ穴は空けられていない。

光量を一律にするのは難しい。 $Y > 2$ の光量はできる限り減らさずに、LED に最も近い Notch の光量を抑える構造として図 4.29 の右のような逆さの T 字型のコリメータを考案した。

LED に最も近い Notch は $Y > 2$ の Notch に比べて、LED から斜め下向きに放出される光が多くあたる位置にある。逆さの T 字型コリメータの目的は、この LED から斜め下に放出される光をカットすることである。図 4.30 は LED、コリメータ、導光板の Notch と拡散板の位置関係を示した CAD 図である。逆さの T 字が LED と最も LED に近い Notch の間に位置していることが確認

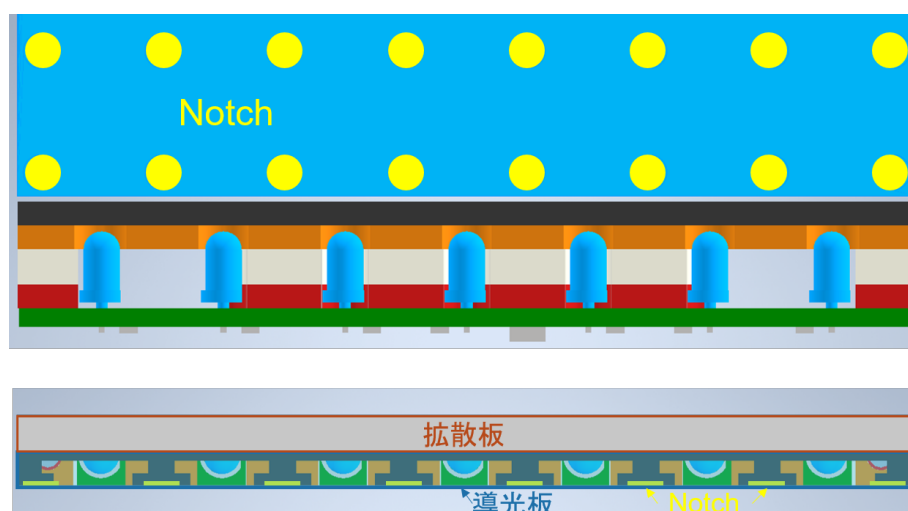


図 4.30 LED とコリメータと導光板の位置。上が LGP モジュールを導光板側から見た場合の図。下が LGP モジュールの長さ方向 (Y 軸の正の向き) から見た場合の図。

できる。

結果として図 4.29 の右に示したように、 $Y > 2$ の Notch の光量を下げることなく、最も LED に近い Notch の光量を抑えることができています。これらの結果から、逆さの T 字型コリメータを使用することとなった。

4.3.3.4 開発したコリメータの設計

4.3.3.2 目で示した要求を満たすコリメータを開発するために、逆さの T 字型コリメータのコリメータの最適化と、固定方法の検討を行った。図 4.31 に開発したコリメータの写真を示した。開発したコリメータの詳細な寸法については付録 C に記した。コリメータは 4 枚の加工した黒アク



図 4.31 開発したコリメータの写真。左が接着後で、右がプレートごとの写真である。

リル板を重ね合わせ溶着し作成する^{*15}。最も導光板側に設置されるアクリル板がコリメータであり、残りの 3 枚はコリメータの固定のために用いる。図 4.32 は LED を取り付けた LED-PCB とコリメータを接続したときの写真と CAD 図である。

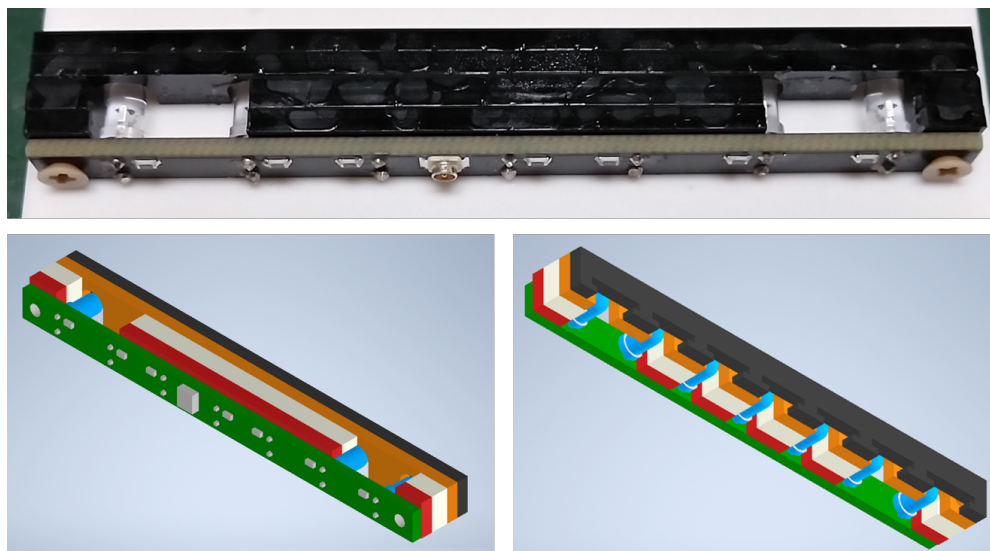


図 4.32 上が LED とコリメータの写真で、下が CAD モデルの図である。

コリメータの形状とその理由について説明をする。図 4.33 はコリメータのみの写真と CAD 図である。4.3.3.2 目で述べたコリメータの要求の 1 つ目を担っているのが図 4.33 の (1)、2 つ目を

^{*15} レーザー加工機で黒いアクリル板を加工し、主成分が二塩化メチレンのアクリル用接着剤で溶着する。詳細は 4.7.4 項で述べる。

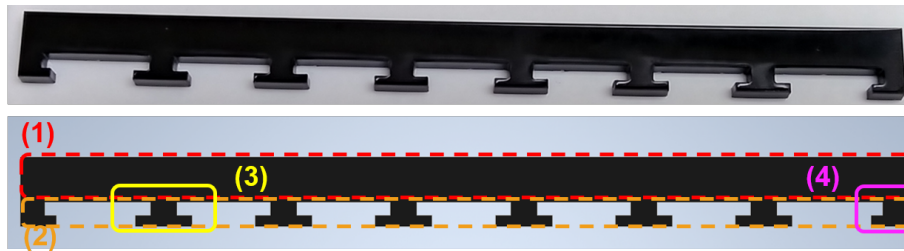


図 4.33 コリメータの写真と CAD 図

担っているのが (2) の領域であり、(2) は (3) と (4) の領域に分けられる。

まず、(1) は LED からの上向きの光をカットする役割を担っている。LED は高さ 5 mm の LED 基板の中心に設置されているため、LED の中心軸は下から 2.5 mm の箇所にある。LED からの上向きの光をカットするためには下から 2.5 mm 以上の箇所を覆う必要があり、(1) は下から 2.1 mm 以上の箇所を覆っている^{*16}。

LED に近い箇所の光量調節を行う図 4.33 の (2) の構造の理由については 4.3.3.3 目で述べた通りである。1 つの LGP モジュールには 8 列の Notch に対して 7 個の LED が設置されているため、図 4.30 のように、端以外の Notch は両側に LED があるが、端の Notch は片側にしか LED が設置されていない。そのため、(2) の領域は (3) と (4) に分け、それぞれ形状を最適化した。

図 4.34 は LED 付近の $X=5,7$ の Notch の光量一様性を測定したものである^{*17}。この測定のセットアップと使用した光源や導光板、拡散板は 5.2 節で述べるものと同様である。開発したコリメータを用いることで、図 4.25 と比較してもわかるように、LED 付近の光量を一様性にすることができている。

次にコリメータ固定用のアクリルの設計について簡単に述べる。まず、コリメータの固定方法としては、固定用のアクリルをコリメータに取り付け、LED 基板とともに、LGP モジュールのケースにねじ止めするという方法を選択した。LED とのずれや、コリメータが外れてしまうなどの心配が少なく、また導光板や拡散板に直接溶着してしまうと、導光板の端面を汚すことになり光量一様性が悪化することが懸念されるが、そのような懸念がないことが理由である。図 4.35 は Bottom LGP モジュール用のコリメータ固定用の 3 枚のアクリル板である。LED 基板から LED の先までの長さが 6.5 mm であるために、コリメータと LED が干渉しないように固定用プレートの厚みは合計 7 mm となっている。LED 基板側のプレートは厚さ 2 mm で、ねじで固定するために雌ねじを作成する。方法は 4.7.4 項で述べる。真ん中のプレートの厚さは 3 mm、コリメータ側のプレートは 2 mm で、コリメータの固定用のねじと干渉しないように穴が空けられている。

^{*16} 2.1 mm は設計値である。レーザー加工機でアクリルをカットする際に設計値よりも小さくなることを考慮した値である。詳細な寸法は付録 C を参照

^{*17} $Y=23,24$ の Notch はねじの前後であるため光量が大きくなっている。

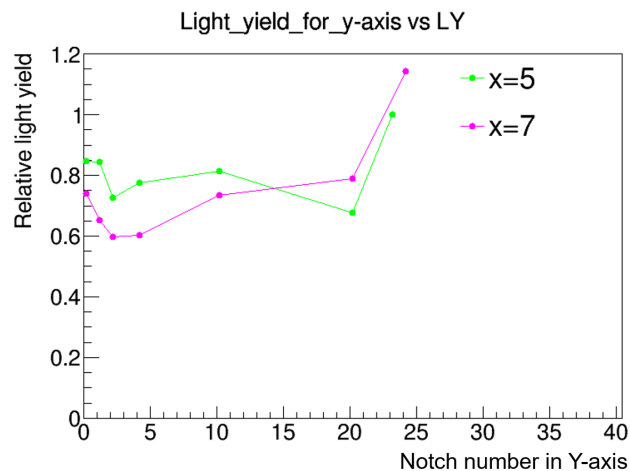


図 4.34 コリメータを用いた場合の LED 付近の光量一様性。横軸は導光板から測定箇所までの距離、縦軸は相対光量。コリメータ未設置の図 4.25 と比べて一様性が大幅に向上していることがわかる。Y=23,24 の Notch はねじの前後であるため光量が大きくなっている。

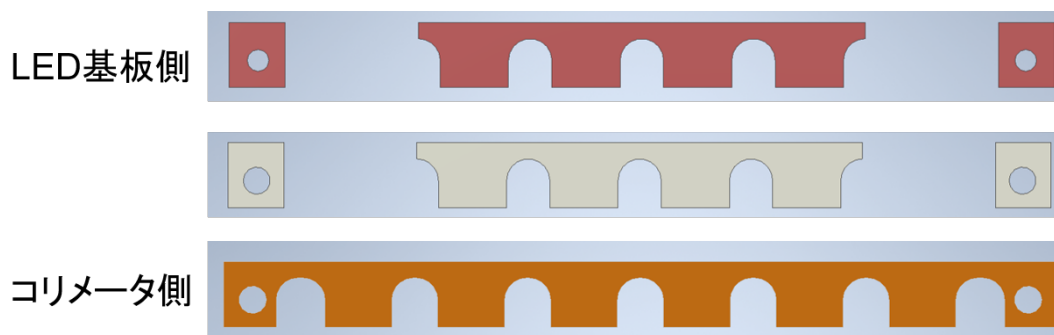


図 4.35 コリメータ固定用のアクリル板。上が LED 基板側の 2mm 厚のプレート、下がコリメータ側の 2mm 厚のプレート、真ん中がその間の 3mm 厚のプレートである。

4.4 導光板の開発

導光板は Super-FGD のキャリブレーションシステムにおいて最も主軸となる要素である。本節では、導光板の材質、厚み、Notch の深さと大きさなどについて述べる。一般的な導光板についての概要は 4.1.1 項で述べた。最終的に LGP モジュールの導光板は 5.1.2 項に、詳細な寸法については付録 C に記した。

4.4.1 導光板の材質

本研究において導光板には押し出しによって生成されたアクリル板を用いた。押し出しによって生成されたアクリル板は、キャストで生成したアクリル板よりも板厚精度が優れているためである。導光板を量産する際、板厚が変化すると、レーザーの焦点からずれ、Notch を同じように生成することができないという懸念と、LGP モジュールの厚みがばらつくという 2 つの懸念事項がある。一方で押し出しの場合、キャストに比べてきれいにレーザー彫刻ができないという懸念点があるが、一連の光量一様性測定において問題は確認されなかった。そのため、量産する LGP モジュールの性能にばらつきが生じないようにするため、押し出しのアクリルを用いることとした。

4.4.2 導光板の厚み

4.3.2 項の図 4.20 は配列型 LED と、厚みが 2, 3, 5 mm の導光板を用いて、光量一様性を測定した結果である。導光板と光源の距離を 1 mm とした黄緑 (厚み 5 mm)、水色 (厚み 3 mm)、ピンク (厚み 2 mm) を比較すると、どれも光量一様性に大きな違いはないが、わずかに厚み 3 mm の場合がより一様である。そのため、光量一様性の観点からは厚みに対して制約はないという結果となった。その一方で、キャリブレーションシステムの厚みは極力抑えたいが、使用する LED の厚みが 3.8 mm、LED 基板も考慮すると 5 mm であるため、導光板と拡散板の合計の厚みが 5 mm より小さくても、全体の厚みを削減することはできない。これらの理由から導光板の厚みは 3 mm とすることとした。

4.4.3 Notch の深さ

導光板の片面にはレーザー加工によって生成された Notch が付けられており、導光板を反射しながら進んできた光は Notch によって散乱され、導光板の外に放出される。しかし、4.3.1 項の図 4.19 でも述べたように、Notch での散乱量が多いと、LED から離れるにしたがって光量が減衰してしまうため、約 1 m に渡って良い一様性を得るためには、Notch の散乱量を少なくすることが重要である。

導光板の Notch の深さはダイヤルゲージ^{*18}を用いて測定した。図 4.36 が Notch の深さを測定する際のセットアップの概略図と写真である。ダイヤルゲージを用いて Notch がある箇所とない箇所の押し込み量を比較し、その差を Notch の深さとした。

図 4.37 は Notch の深さが 0.04 ± 0.003 mm の導光板と、Notch の深さが 0.01 ± 0.003 mm の導光板の光量一様性を比較したものである。図 4.37 の左の結果のセットアップと光量算出方法は 4.3.1 項と同様である。右の結果のセットアップは 4.3.3 項と同じだが、光量の算出方法は 4.3.1 項

^{*18} ダイヤルゲージとは先に付いた測定子に対象物を押し当て、その押し込み量を測る測定器であり、スタンド等に固定して使用する。測定範囲が 0~10 mm のものを使用した。使用したダイヤルゲージの系統誤差は 0.003 mm である。

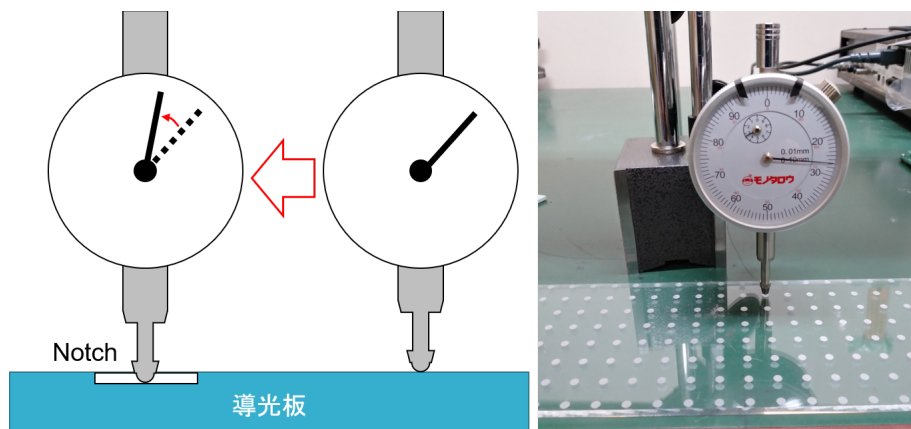


図 4.36 Notch の深さの測定セットアップ。左がセットアップの概略図で、右が測定時の写真である。Notch がある箇所とない箇所の値を比較し Notch の深さを算出した。

と同じである。これらの導光板の Notch の大きさは直径 3 mmφ、厚みは 3 mm であり、株式会社プラスチック [91] に製作を依頼したものである。

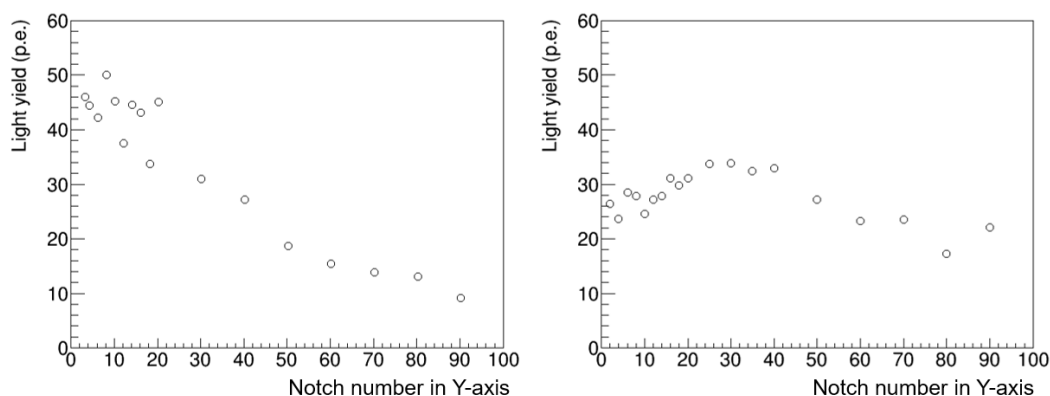


図 4.37 Notch の深さが異なる導光板の光量一様性。左は Notch の深さが 0.04 ± 0.003 mm の導光板、右は Notch の深さが 0.01 ± 0.003 mm の導光板の光量一様性である。Notch の大きさは直径 3 mmφ である。横軸は導光板の端から測定箇所までの距離であり、縦軸は検出光子数である。なお、この導光板にはねじ穴は空けられていない。

図 4.37 からわかるように、Notch が深い場合は、LED からの距離が離れるにしたがって光量が顕著に減少しているのに対して、右の場合は光量が比較的一定であることが確認できる。このことから、約 1 m に渡って光量を一定に保つためには Notch の深さが 0.01 mm 程度である必要があることがわかった。

4.4.4 Notch の大きさ

LED 光は導光板内を反射しながら進み、Notch で散乱された後、拡散板を通過して波長変換ファイバーへと入射する。図 4.38 は導光板と拡散板、波長変換ファイバーの位置を示した図であり、左が Notch の直径が 1 mm ϕ 、右が直径 3 mm ϕ の場合のイメージ図である。波長変換ファイ

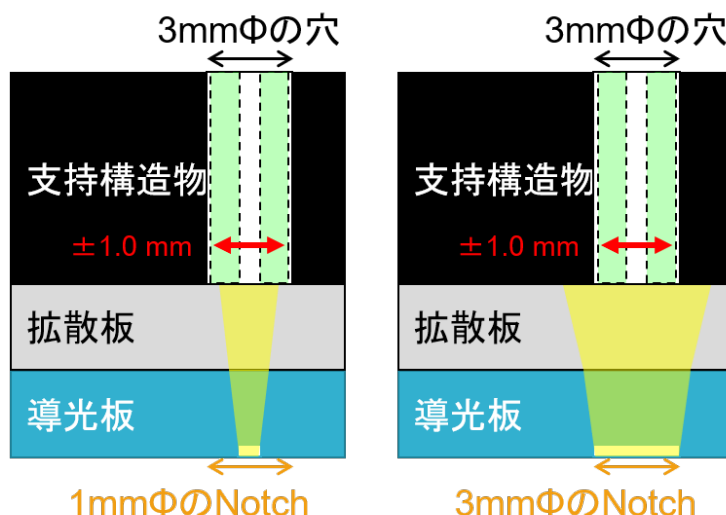


図 4.38 波長変換ファイバーの位置と Notch の大きさ。左は Notch が 1 mm ϕ 、右は Notch が 3 mm ϕ の場合の概略図である。波長変換ファイバーは 3 mm ϕ の穴の中に位置しており、 $\pm 1.0 \text{ mm}$ はずれることが想定される。

バーはシンチレータキューブの 1.5 mm ϕ の穴を通過し、直径 3 mm ϕ の穴内部に配置される。また、図 4.38 のように波長変換ファイバーを固定する構造はこの穴の内部にないため、水平方向に $\pm 1.0 \text{ mm}$ ずれることが想定され、このファイバーのずれによって、ファイバーに入射する光量に変化することが懸念される。このようなファイバーのずれへの対処として Notch のサイズを大きくする、また拡散板を設置するという手法を取った。

Notch のサイズを大きくすると散乱量が増加し一様性の悪化が懸念されるが、図 4.37 の右の結果から、直径が 3 mm ϕ であれば、Notch の深さを 0.01 mm 程度とすることで一様性を大きく損なうことがないことが確認できた。Notch の大きさを 3 mm ϕ とすることが、水平方向のファイバーのずれに対して十分な対策であるか、また拡散板の必要性の評価は 4.5.1 項で述べる。

4.4.5 導光板の端面の処理

導光板の側面や端面はレーザー加工で切り出され、平坦かつ透明になっている。より良い一様性を得るためには、より遠くまで LED の光を伝搬させることが必要であり、表面に傷や溝があると乱反射するため、平坦であることが重要である。

図 4.39 のグラフ (青色) は Bottom LGP モジュールの光量一様性を末端の Notch まで測定した結果であり、末端の Notch の光量が他の箇所比べて非常に大きいことがわかる。この光量上昇

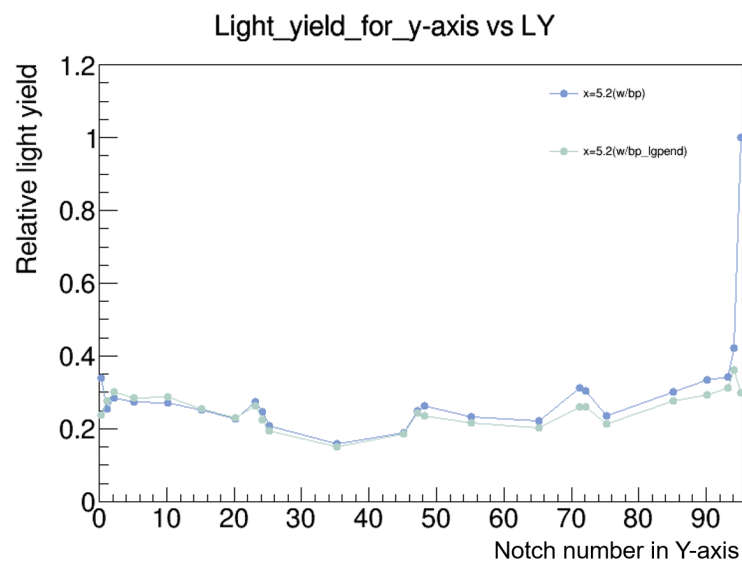


図 4.39 光源と反対側の導光板の端面の処理による光量一様性の違い。グラフ (青) は導光板の側面に何も施していない場合、グラフ (緑) は光源と反対側の導光板の端面を黒く塗った場合の光量一様性であり、緑の結果では導光板の端での光量上昇を抑えることができています。4.5.3 項で述べるが、拡散板の側面とねじ穴は黒く塗った状態である。

を防ぐため、LED と反対側の端面を油性マーカーで黒く塗った結果が図 4.39 のグラフ (淡い緑色) であり、末端の光量状上昇が抑えられていることが確認できる。これらの測定の際、4.5.3 項で詳細を述べるが、拡散板の側面とねじ穴は黒く塗った状態であり、M2 のねじとねじ穴の空いた導光板、拡散板を使用している。図 4.40 は導光板の端面が未処理の場合と、黒く塗った場合の写真である。

これらの結果から、導光板の LED と反対側の端面は黒く塗ることとした。

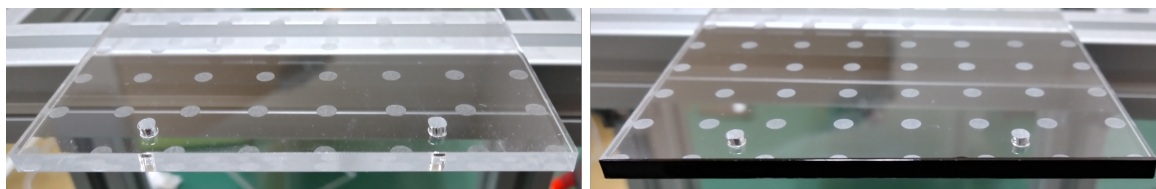


図 4.40 導光板の LED と反対側の端面の写真。左は導光板の LED と反対側の端面が未処理のもので、右が黒く塗ったものである。

4.5 拡散板の評価

拡散板は導光板の上部に設置され、LGP モジュールに組み込まれる。Notch で散乱された光を拡散し、波長変換ファイバーが 3 mmφ の穴の中でずれた際の光量の変化を少なくすることが目的である。拡散板には乳半色のアクリル板を使用する。拡散板の厚みは 3 mm と導光板と同じであり、長手方向と短手方向の長さも導光板と同じである。詳細な寸法は 5.1 節で述べる。本節では拡散板による光の拡散の評価 (4.5.1 項)、拡散板を介した光学的クロストークの評価 (4.5.2 項)、拡散板の側面とねじ穴の処理 (4.5.3 項) について述べる。

4.5.1 拡散板による光拡散の評価

拡散板を設置する目的は Notch で散乱された光を拡散することで、波長変換ファイバーが導光板に対して水平な方向にずれた場合の光量の変化を少なくすることである。拡散板を設置した場合、波長変換ファイバーのずれによってどの程度光量に変化するかについて評価した。本項にて、まず初めに測定セットアップについて述べた後、測定結果について述べる。

実験のセットアップは 4.3.3 項と基本的に同じであり、異なる点は LGP モジュール上部の治具と、比較のために拡散板を設置せず導光板のみの場合でも測定を行ったことである。図 4.41 が導光板に対して水平方向に波長変換ファイバーをずらして光量を測定したセットアップの概略図である。中央の写真が波長変換ファイバーを水平方向にずらすための治具であり、1 mmφ の穴を千鳥状に配置している。それぞれの穴に波長変換ファイバーを挿入し、各箇所での光量測定を行った。中心の 1 mmφ の穴を Notch の中心に合わせることで、Notch の中心から水平、鉛直方向にそれぞれ ±3 mm までずらした場合の光量を測定することができる。

X=3, Y=53 の Notch での測定結果を示したのが図 4.42 であり、左が拡散板を設置した場合、右は拡散板を設置せず導光板のみの測定結果である。図 4.42 の上の 2 次元分布の ○ が波長変換ファイバーを設置した箇所である。未測定の箇所の光量は各測定箇所の光量をもとに補完することで 2 次元分布を作成した^{*19}。淡い紫色の円が Notch の円周であり、LED 光は Y 軸の負の方向から正の方向に向かって放出されている。図 4.42 の下のグラフは横軸が Notch の中心からの水平距離で縦軸が相対光量であり、ガウス分布の平均値を 0、最大値を 1 に固定し、フィットした結果である。導光板がない場合と比べて、拡散板を設置した場合の方向が光が拡散されていることが確認できる^{*20}。また、図 4.42 の上の 2 次元分布から、Notch によって散乱された光は鉛直方向から少し Y 方向側に放出されることが確認できる。

波長変換ファイバーが位置する穴の直径が 3 mmφ、ファイバーの直径が 1 mmφ であるため、ファイバーの水平方向のずれは、±1.0 mm であることが想定される。図 4.42 のフィッティングの

^{*19} 各測定箇所での光量をもとに測定箇所以外の領域を補完して 2 次元分布を作成したものであり、○ のないピンでは測定は行っていない。補完には ROOT(CERN が開発がしたデータ解析ソフトウェアライブラリ群)[92] を用いた

^{*20} 拡散板を設置した場合と、導光板のみの場合で Notch から波長変換ファイバーへの鉛直方向の距離がそれぞれ 6 mm, 3 mm と異なっている

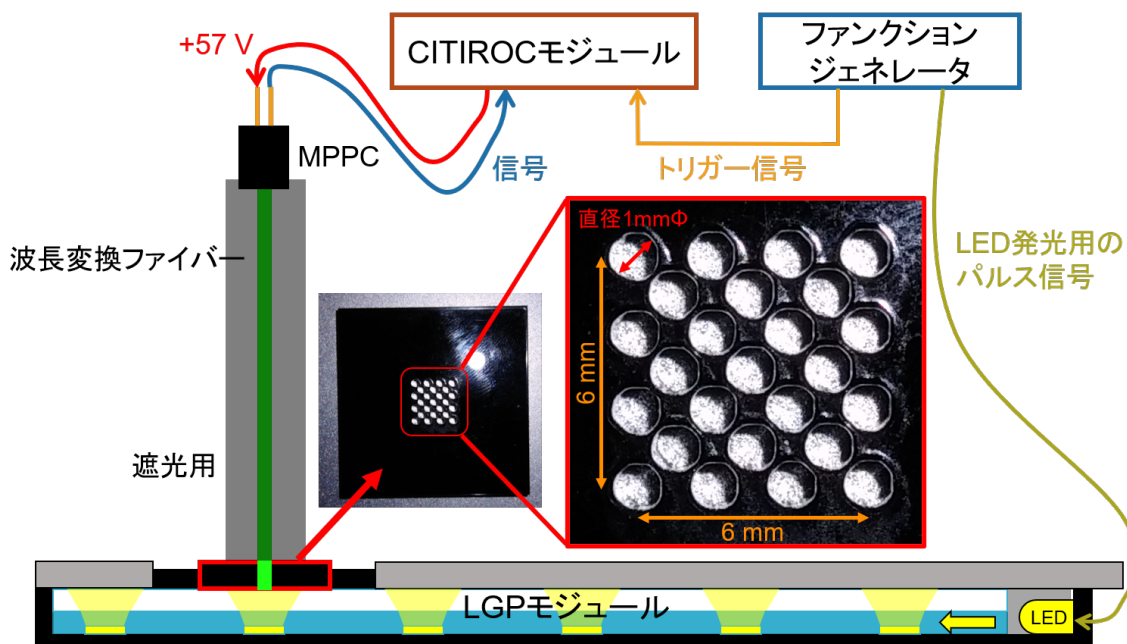


図 4.41 導光板に対して水平方向に波長変換ファイバーをずらした場合の光量測定の設定アップ。中央の写真が波長変換ファイバーを水平方向にずらすための治具であり、1 mm ϕ の穴を千鳥状に配置している。鉛直、水平方向には 2 mm 間隔、斜め方向には水平方向、鉛直方向ともに 1 mm ずれた位置に配置されている。

結果から、拡散板を設置時にファイバーが 1.0 mm ずれると、光量は中心の光量の 96.3% となる。一方で、拡散板が未設置の場合は、ファイバーが 1.0 mm ずれると、光量は中心の光量の 83.2% となる。この結果から、拡散板は十分に光を拡散し、波長変換ファイバーの水平方向のずれに対して有効な手段であることを確認した。

4.5.2 光学クロストークの評価

本項では、拡散板を設置した際に起こり得る光学クロストークの評価について述べる。まず、図 4.43 に想定される光学クロストーク^{*21}を示した。図のように、あるキューブがシンチレーション光を放出し、波長変換ファイバーで吸収、再発光され、その光が拡散板に入射した場合、拡散板内を伝搬して隣接する波長変換ファイバーに光が伝搬することが想定される。この光学クロストークが多い場合、荷電粒子が通過していない箇所でも光を検出してしまうために、Super-FGD の飛跡検出性能や粒子識別性能を悪化させてしまう可能性がある。そのため、拡散板を介したクロストークの定量的評価が必要となるため、測定を行った^{*22}。

^{*21} ここで述べる光学クロストークとは、シンチレーション光を吸収した波長変換ファイバーから、隣接する波長変換ファイバーへ光が伝搬、漏洩してしまうことを指す

^{*22} 拡散板を介したクロストークが大きい場合は検出器シミュレーションに組み込むため、その数値が必要となる。

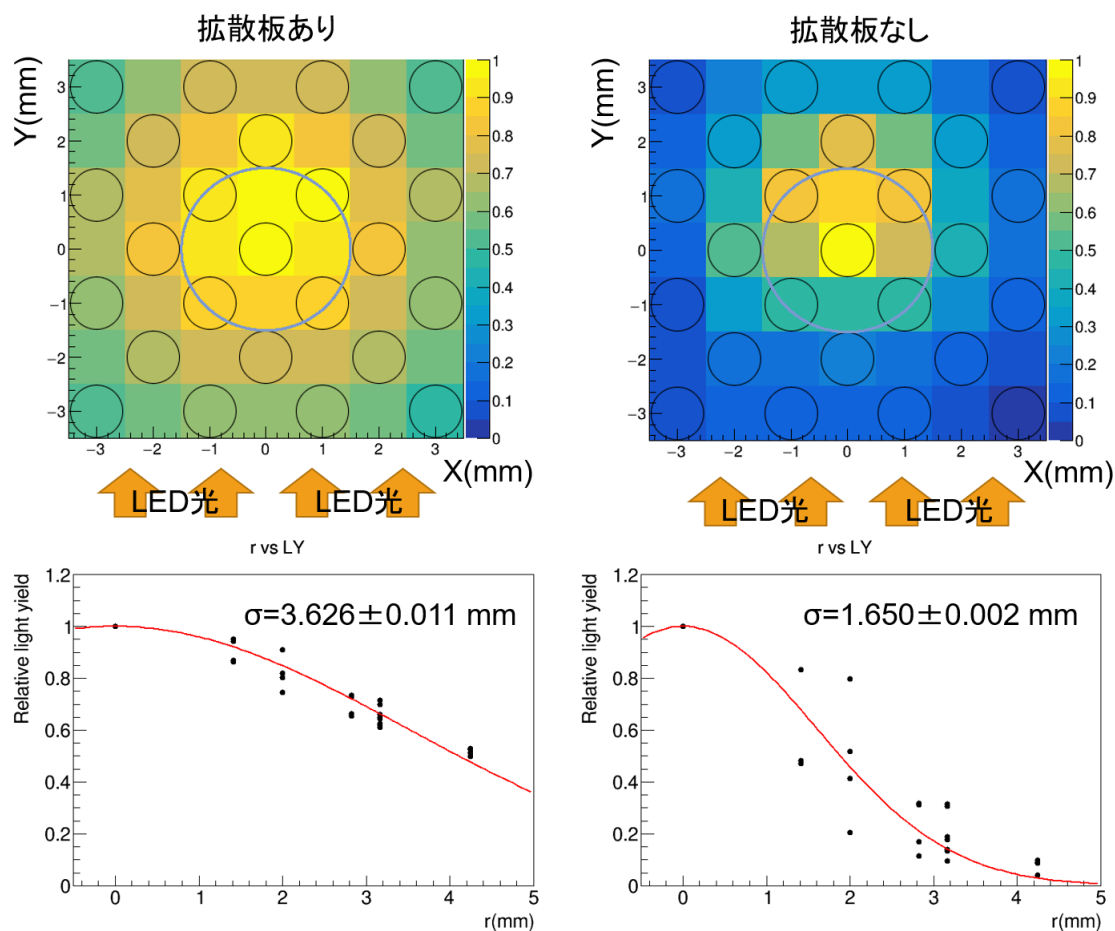


図 4.42 波長変換ファイバーの水平方向のずれと相対光量の測定結果 (Notch: X=3, Y=53)。左が拡散板を設置した場合であり、右が拡散板無しの導光板のみで測定した結果である。測定には自作の導光板を用いた。上の 2 次元分布の ○ が各測定箇所であり、各測定箇所の光量をもとに他の領域を補完して 2 次元分布を作成した。淡い紫色の円が Notch の円周である。下のグラフは横軸が Notch の中心からの水平距離で縦軸が相対光量であり、ガウス分布の平均値を 0、最大値を 1 に固定し、フィットした結果である。

図 4.44 が拡散板を介したクロストーク測定時のセットアップである。LGP モジュール上部の治具内部に LED^{*23}を設置し、LED の先に 1 つの波長変換ファイバーが位置するように設置した。図 4.45 に示した治具は複数の黒いアクリル板を重ねた構造をしており、内部に LED を設置することができ、かつ LED の先に波長変換ファイバーが設置できるように穴が通してある。この治具はブラックテープで覆われ、ファイバーを通すための穴以外からの光漏れを防いでいる。治具に通された波長変換ファイバーの片側は拡散板に接しており、もう片側には 3 枚の光量調節フィルター^{*24}

*23 NSPB300B を 1 つ使用

*24 光量調節フィルターには富士フィルム社製の光量調節フィルター (ND フィルター) のフィルター号数 1.0[93] を用いた。

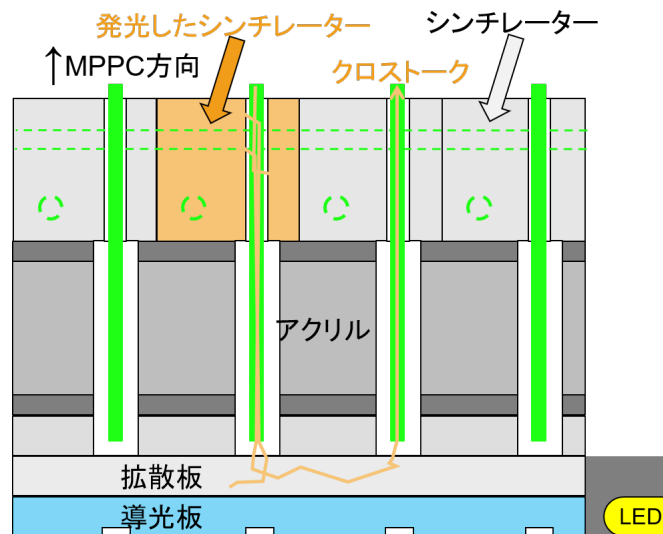


図 4.43 拡散板を介した光学クロストークの概略図。荷電粒子が通過し発したシンチレーション光が波長変換ファイバーに吸収、再発光され、拡散板に入射された場合、拡散板を介して隣接するファイバーに光が入射される。

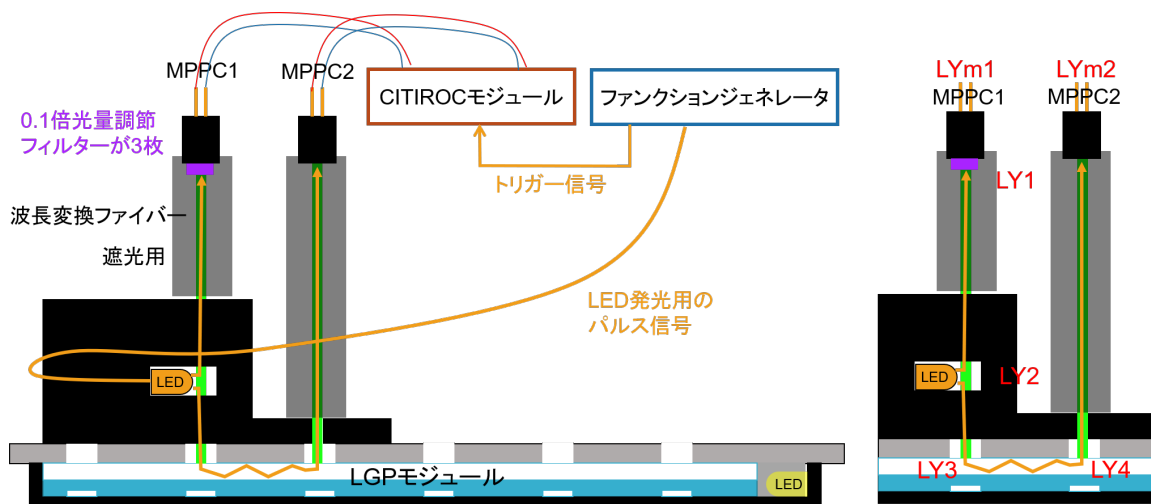
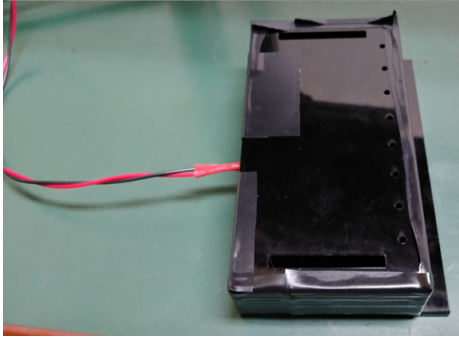


図 4.44 拡散板を介して光学クロストーク測定の設定アップ (左) と光学クロストーク算出時の変数名 (右)。MPPC や波長変換ファイバーを 2 つ使用し、1 つのファイバーには LED 光を入射し、それからもう 1 つのファイバーへ伝搬した光量を測定した。右の赤字が変数名である。

治具の全体写真



治具の各パーツの写真

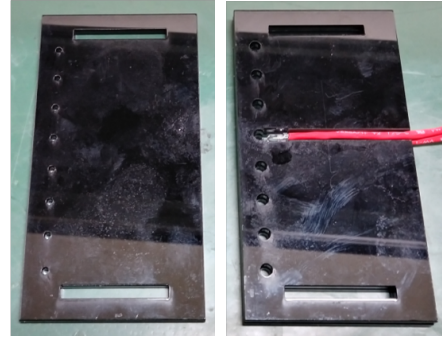


図 4.45 光学クロストーク測定用治具。3 mm 厚の黒色アクリル板を重ねた構造をしており、LED の先に波長変換ファイバーが位置するような構造となっている。

を挟んで MPPC が設置されている。この光量調節フィルターは 1 枚で光量が 0.1 倍となるため、3 枚設置することで 1/1000 倍となる。波長変換ファイバーの隣にはもう 1 つの波長変換ファイバーが設置されており、片側は拡散板に、もう片側は MPPC に接している。この波長変換ファイバーは、もう 1 つの波長変換ファイバーから拡散板に入射、伝搬してきた光を検出するために用いる。

2 つの MPPC で検出された光量から光学クロストーク率を算出する。算出にあたり、計算時の変数の定義を述べる。まず、2 つの MPPC のうち、LED と接している波長変換ファイバーが接続している方を MPPC1 とし、もう 1 つを MPPC2 とする。MPPC1 の検出光子数を LY_{m1} 、MPPC2 の検出光子数を LY_{m2} とする^{*25}。以下、計算により得られる量は、MPPC1 側の光量調節フィルター入射前の光量を LY_1 、LED からファイバーが吸収した光量を LY_2 、拡散板に入射された光量を LY_3 、MPPC2 に接している波長変換ファイバーの拡散板側で吸収された光量を LY_4 、MPPC1 と MPPC2 の相対的な検出効率を eff_1 、 eff_2 とした^{*26}。また、1 枚の光量調節フィルターの光量減衰率を $f = 0.1 \pm 0.01$ とした。ここで算出する光学クロストーク率 R は LY_4/LY_3 と定義する。つまり、1 つの波長変換ファイバーの端面から放出される光量に対して、隣接する波長変換ファイバーの拡散板側で吸収、入射した光量の割合を光学クロストーク率とした。 LY_1 は MPPC1 で検出された光量 LY_{m1} と光学フィルターでの光量調節率と MPPC1 の相対的な検出効率から算出、 LY_2 は波長変換ファイバーでの光量減衰を考慮して LY_1 から算出、 LY_3 は LY_2 からの波長変換ファイバーの光量減衰から算出される。 LY_4 は MPPC2 の相対的な検出効率と波長変換ファイバーの光量減衰を考慮し LY_{m2} から算出できる。相対光量の eff_1 と eff_2 は、LGP モジュールの LED を発光させ、同じ Notch の上で測定した光量であり、 eff_1 の測定時には MPPC1 の光量調節フィルターは除いている。波長変換ファイバーの光量減衰率 $Att(L)$ は、参考文献 [94] を参照し、波長変換ファイバーの長さ L を変数にもつ関数である。これらから光学クロストーク率

^{*25} 検出光子数の算出方法は 4.3.3 項と同様である。

^{*26} LY_{m1} 、 LY_{m2} 、 eff_1 と eff_2 以外は計算によって求められるものであり、その過程で MPPC の相対的な検出効率の係数 eff_1, eff_2 を用いているため、 $LY_1, 2, 3, 4$ は相対的な光量となり、絶対的な値ではない

R を以下の関係式を用いて算出することができる。

$$LY_{m1} = LY1 \times f^3 \times \text{eff1} \quad (4.2)$$

$$LY1 = LY2 \times \text{Att}(L_{\text{LED_to_MPPC1}}) \quad (4.3)$$

$$LY3 = LY2 \times \text{Att}(L_{\text{LED_to_Diffuser}}) \quad (4.4)$$

$$LY_{m2} = LY4 \times \text{Att}(L_{\text{Diffuser_to_MPPC2}}) \times \text{eff2} \quad (4.5)$$

$$R = \frac{LY4}{LY3} \quad (4.6)$$

算出に際し、測定値は以下のものを用いた。この時 $L_{\text{LED_to_MPPC1}}$ は LY2 を想定している箇所から MPPC1 までの波長変換ファイバーの長さ (cm)、 $L_{\text{LED_to_Diffuser}}$ は LY2 を想定している箇所から MPPC1 までの波長変換ファイバーの長さ (cm)、 $L_{\text{Diffuser_to_MPPC2}}$ は拡散板から MPPC2 までの波長変換ファイバーの長さ (cm) を示している。

$$LY_{m1} = 2.78661 \pm 0.00603267$$

$$LY_{m2} = 0.423172 \pm 0.00314448$$

$$\text{eff1} = 0.819085 \pm 0.00370482$$

$$\text{eff2} = 0.623101 \pm 0.00349724$$

$$L_{\text{LED_to_MPPC1}} = 16.2 \pm 0.5$$

$$L_{\text{LED_to_Diffuser}} = 1.8 \pm 0.1$$

$$L_{\text{Diffuser_to_MPPC2}} = 18.0 \pm 0.5$$

これらより拡散板を介した光学クロストーク率は以下の値となった。

$$R = (2.1 \pm 0.6) \times 10^{-4} \quad (4.7)$$

これは約 10000 個の光子が波長変換ファイバーの端面から拡散板に向かって放出された場合に、約 2 光子が隣接するファイバーの端面に吸収、入射するという値である。これは非常に小さい値であり、荷電粒子が通過し発せられるシンチレーション光を想定した場合、拡散板を介して生じる光学クロストークは無視できることが確認できた。また、導光板を介した光学クロストーク率は 10^{-7} 程度であることが以前の測定からわかっているため、今回の測定結果のほとんどが拡散板に由来するものである。

4.5.3 拡散板の側面とねじ穴の処理

導光板と拡散板には、ねじで LGP モジュールを固定するために穴を開ける必要があり、ねじ付近では光量一様性が悪くなることが懸念される。4.7.2 項で後述するが、Bottom LGP モジュールには 10 か所、Wall LGP モジュールには 6 か所に穴が空けられる。そのうち 2 か所は光源付近に設置されるため、導光板と拡散板には Bottom LGP モジュールでは 8 つ、Wall LGP モジュールでは 4 つの穴がある。

図 4.46 の水色とピンクのグラフは最終版の Bottom LGP モジュールとねじ穴のサイズ*²⁷とコ

*²⁷ この時のねじ穴の大きさは 2.2 mmφ である。

リメータの形状が異なっているが、それ以外は同じ設計の試作品を用いた光量一様性の測定結果である。この時、4.4.5 項で述べた導光板の端面の黒塗りも施していない。なお、ねじの位置は $X=5$ と $X=6$ の中間、 $X=1$ と $X=2$ の中間に位置している*28。図 4.46 の水色は $X=5$ の Notch、ピン

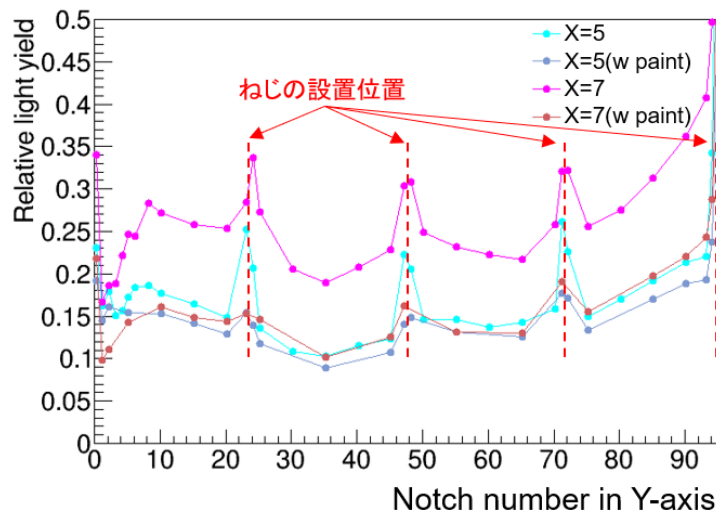


図 4.46 拡散板の側面とねじ穴の処理と光量一様性の測定結果。水色とピンクは LED 側の拡散板の側面のみを黒く塗った場合であり、茶色と紺は、拡散板の側面とねじ穴を黒く塗った場合の光量一様性である。水色と紺は $X=5$ の Notch の測定結果であり、ピンクと茶色は端の $X=7$ の Notch の測定結果である。ねじ穴は $2.2 \text{ mm}\phi$ 。

クは端の $X=7$ の Notch の測定結果を示しており、側面の Notch で光量が上昇していること、ねじが設置されている箇所の前後での光量増加が確認できる。

この光量上昇を抑えるために、拡散板の側面とねじ穴を黒く塗った場合の光量一様性が、図 4.46 の茶色と紺のグラフであり、側面での光量上昇とねじの前後での光量上昇を抑えることができてい

る。図 4.47 の左は拡散板の側面とねじ穴を黒く塗った場合の写真、真ん中は LED 側のみを塗ってそれ以外の側面やねじ穴を塗って無い場合の写真、右は側面とねじ穴を黒く塗った拡散板の写真である。図 4.47 の左の写真では、Notch からの光よりも、側面やねじ付近の光の方が大きく見えるが、拡散板の側面とねじ穴を黒く塗った真ん中の写真では、側面とねじ付近の光が少なくなり、各 Notch 上部の光が一樣になって見えるのが確認できる。したがって、拡散板の側面とねじ穴を黒く塗ることによって光量測定でも写真でも光量増加を抑えることができることを確認した。なお、図 4.46 の右端の最も LED から離れた箇所の測定点は光量が大きく枠外であるが、4.4.5 項で述べたように、導光板の端面を黒く塗ることで光量を抑えることに成功した。

これらの結果から、拡散板の側面とねじ穴は黒く塗ることとした。

*28 詳細なねじの位置は C を参照



図 4.47 左は拡散板の側面とねじ穴を黒く塗った場合の写真、真ん中は LED 側のみを塗ってそれ以外の側面やねじ穴を塗って無い場合の写真、右は側面とねじ穴を黒く塗った拡散板の写真である。左と真ん中は向かって右側に LED が設置されている。

4.6 波長変換ファイバーの垂直方向のずれによる光量変化量の評価

導光板に対して水平方向の波長変換ファイバーのずれに対する光量の変化の評価は 4.5.1 項で述べた通りであり、Notch の大きさを 3 mm ϕ とし、拡散板を設置することで光量の変化を十分に少なくすることができた。本節では、導光板に対して垂直方向、つまり導光板の面から遠ざかる方向への波長変換ファイバーのずれに対する光量変化の評価と対策について述べる。

4.6.1 導光板に対して垂直方向のずれによる光量変化

図 4.48 は波長変換ファイバーを導光板に対して垂直方向にずらした場合の光量変化の測定セットアップである。LGP モジュールの上にガラスエポキシ層の構造を模した 3 mm ϕ の穴を空けた黒いアクリル板を重ねた治具、その上にスペーサーとファイバーを固定している治具を配置し、スペーサーの厚みを変更することで、垂直方向の波長変換ファイバーのずれを調節している。使用した導光板は厚さ 3 mm、Notch の大きさが直径 3 mm ϕ のものを用いた。光量の算出方法は 4.3.3 項で述べた方法と同様である。

測定結果を図 4.49 に示した。横軸が波長変換ファイバーの垂直方向のずれであり、縦軸が相対光量である。測定結果としては約 2 mm 程度ずれると光量が約 60% 程度減少した。ずれが 0 mm と 2 mm の間の光量比が線形に変化したとすると、ファイバーのずれが 0.5 mm の場合は光量が約 15% 減少するという結果となった。

4.6.2 垂直方向のずれの要因と対応策

図 4.49 の測定結果から、垂直方向のずれは 1 mm 程度に抑える必要がある。波長変換ファイバーの垂直方向のずれを生じさせる要因は 3 つあり、1 つ目は波長変換ファイバーの切断精度、2 つ目は Super-FGD 全体の歪みによるもの、3 つ目は LGP モジュールの自重による歪みである。3 つ目の LGP モジュールの自重による歪みについては 4.7.2 項と 4.7.3 項で述べる。

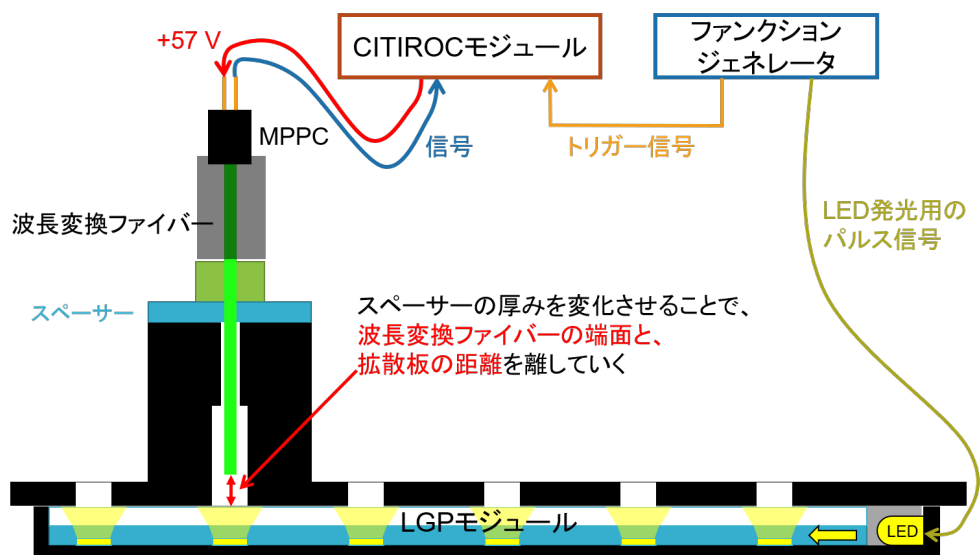


図 4.48 波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量測定セットアップ。測定対象の Notch の上に、実際の構造を模した治具を配置し、その上にスペーサーとファイバーと固定されている治具をセットし、スペーサーの厚みを変更することで垂直方向の波長変換ファイバーのずれを調節している。

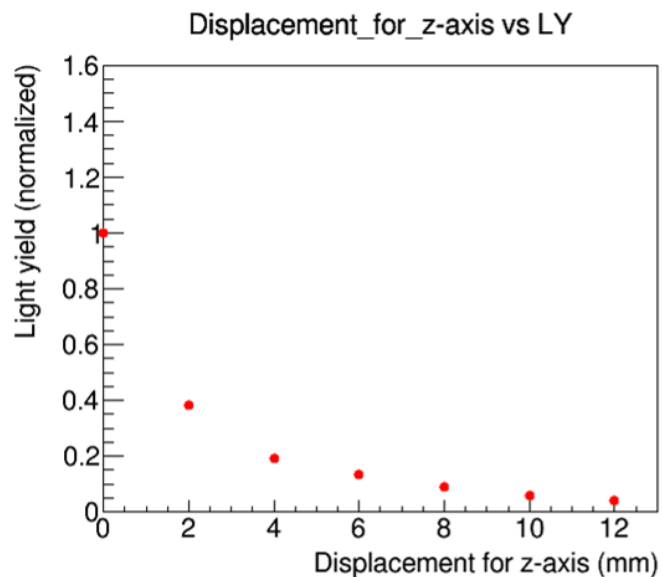


図 4.49 波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量測定結果。横軸が波長変換ファイバーの垂直方向のずれであり、縦軸が相対光量である。

2つ目の Super-FGD 全体の歪みについて簡単に説明する。Super-FGD の積み重ねられたシンチレーターキューブの周りにはサンドイッチ構造状のプレートが6面に配置され、それらによって支えられる。高さ方向の辺にあたる箇所には構造物が取り付けられ、それらがND280のフレームに取り付けられることで Super-FGD 全体を支えている。サンドイッチ構造状のプレートのうち、積み重ねられたキューブの底面に位置するプレートはシンチレーターキューブ等の自重で歪むことが想定されている。すなわち、Super-FGD 全体が自重によって歪むことで、上面のMPPCと底面のキャリブレーションシステムの距離は、歪みが生じない場合に比べて大きくなることが想定される。これが波長変換ファイバーの垂直方向のずれを引き起こす要因の1つとなりうる。

波長変換ファイバーの切断精度は0.5 mm程度と見積もっており、Super-FGD 全体の歪みは有限要素法を用いたシミュレーション結果から最大で約3 mm程度と予測されている。Super-FGD の壁側に設置される Wall LGP モジュールはファイバーの切断精度のみであるが、底面側に設置される Bottom LGP モジュールはファイバーの切断精度に加えて Super-FGD 全体の歪みによって、波長変換ファイバーとの距離が離れてしまう。したがって、Bottom LGP モジュールの場合は4 mm程度ずれる可能性があり、4.6.1 項の図4.49に示した測定結果からすると非常に大きい値であるため、対策を講じる必要がある。

波長変換ファイバーの垂直方向のずれを少なくするために、Super-FGD の自重による歪みが生じた後で波長変換ファイバーを切断するという方法を取る。図4.50は、波長変換ファイバーを最終的に使用する長さに切断してからシンチレーターキューブに挿入した場合と、波長変換ファイバーを少し長く切断した後、シンチレーターキューブに挿入し、Super-FGD 全体が歪んだ状態で波長変換ファイバーを切断した場合の概略図である。図4.50の上の場合は、Super-FGD の歪み

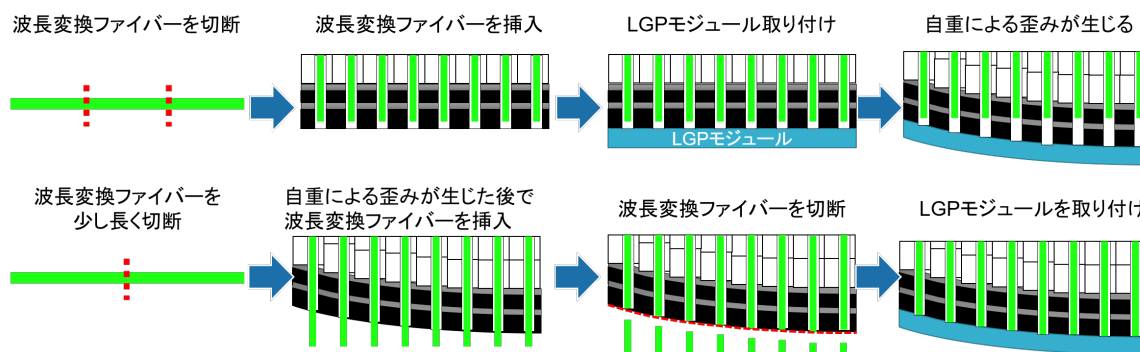


図 4.50 波長変換ファイバーの切断のタイミングの違いで生じる垂直方向のずれ。上が波長変換ファイバーを最終的に使用する長さに切断してからシンチレーターキューブに挿入した場合。下が少し長くファイバーを切断し、Super-FGD 全体が歪んだ状態で挿入した後、切断した場合。

がどの程度か実際にはわからない状態で切断することとなるため、全て同じ長さに切断してからシンチレーターキューブに挿入する。その結果として図4.50の右上のように Super-FGD 全体が歪んだ場合に、その歪みがそのまま波長変換ファイバーの垂直方向のずれにつながる。一方で、図4.50の下の場合は、Super-FGD 全体が歪んだ状態で、波長変換ファイバーを切断することになる

ため、Super-FGD 全体の歪みが波長変換ファイバーの垂直方向のずれにつながることがない。そのため、波長変換ファイバーの垂直方向のずれはファイバーの切断精度のみに抑えることが可能となる。

上記以外に、垂直方向の波長変換ファイバーのずれへの対応策を 3 つほど考案し、評価を行ったが、いくつかの理由で使用しないことになった。それぞれについて付録 B に記載した。

4.7 LGP モジュールのデザイン

キャリブレーションシステムで使用する導光板、拡散板、LED などはモジュール化され取り付けられる。本節では LGP モジュールの固定方法や位置、LGP モジュールの歪みや製作方法などについて述べる。最終的な LGP モジュールについては 5.1 節で述べ、その詳細な寸法は付録 C に記載した。

4.7.1 LGP モジュールの固定方法と懸念事項

LGP モジュールは図 4.51 に示すように、ねじを用いてガラスエポキシ層に固定される。波長

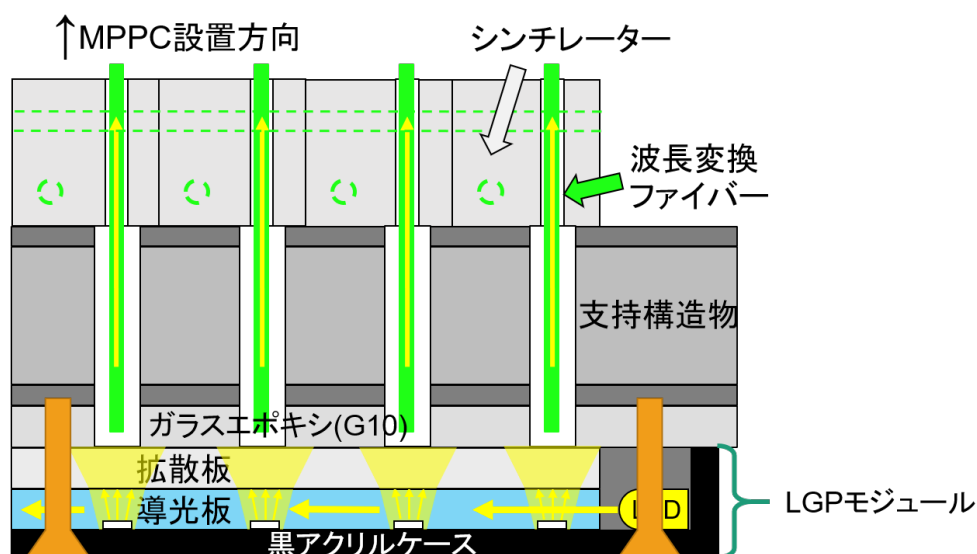


図 4.51 LGP モジュールの固定方法。LGP モジュールはねじを用いてガラスエポキシ層に固定される

変換ファイバーは約 10.3 mm 間隔で並んでおり、Notch の半径が 1.5 mm、Notch の端から導光板の端まで 0.5 mm、導光板、拡散板と黒アクリルケースのクリアランスが 0.5 mm、黒アクリルケースの厚みは 2 mm であり、隣り合う LGP モジュールの隙間はわずか 1.3 mm となる。このように LGP モジュールの間隔が非常に狭く、固定のためだけに割くことのできるスペースがほとんど無いため、導光板と拡散板にもねじ穴を作り、それらを突き抜けてケースとガラスエポキシ層を

ねじで固定する。ねじは接着材などの固定方法に比べて、接着層による厚みの増加が無く、固定位置の精度も優れており、かつ取り付けが容易であるなどの利点が多くある。また必要に応じて取り外しができるため、初期の取り付け段階などで LGP モジュールが故障や破損してしまった場合でも交換ができることなど、保守性においても優れている。これらの理由からねじで固定する設計とした。

LGP モジュールの固定は、ねじのみによって行われるため、ねじで確実に固定される必要があるが、その一方で導光板にねじ穴を多く作ると光量一様性を悪化させることが懸念される。また、別の問題点として、LGP モジュールが自重で歪むことによって、4.6.1 項で述べた波長変換ファイバーの垂直方向のずれが生じ、光量一様性を悪化させることが懸念される。そのため、LGP モジュールが確実に固定できることの確認と、LGP モジュールの自重による歪みの測定を目的に、モジュールのモックアップを用いて、ねじの固定位置や数を検討した。また、モックアップでのモジュールの歪みの測定に加えて、有限要素法を用いた歪みのシミュレーションと、自重のみではなく、LGP モジュールの熱膨張による歪みについてもシミュレーションを行った。モックアップ試験は次の 4.7.2 項、有限要素法によるシミュレーションは 4.7.3 項にて述べる。

4.7.2 LGP モジュールのモックアップを用いた固定方法と位置の評価

LGP モジュールはねじによってのみ固定される。多くのねじで固定すれば強固に固定することができるが、ねじの数を多くすると、導光板に多くの穴が空くことになるため、光量一様性を損なうことが懸念される。また、LGP モジュールの自重で歪むことで、波長変換ファイバーの垂直方向のずれを増加させることとなる。LGP モジュールを用いてモックアップを作成し、問題なく固定することができているか、また自重による歪みの評価を行った。まずはモックアップ試験のセットアップについて述べ、歪みの算出方法について述べた後、試験結果について述べる。

4.7.2.1 モックアップ試験のセットアップ

図 4.52 がモックアップ試験の写真と概略図である。左上の写真がモックアップ試験のセットアップの全体写真である。アルミフレームにガラスエポキシ層を模した 3 mm 厚の亚克力板(上部亚克力)を固定し、その下に LGP モジュールを取り付けた。上部亚克力はレーザー加工機で切断し、タップ加工で雌ねじ作成した。LGP モジュールの歪みはダイヤルゲージを移動させることで測定した。図 4.53 はモックアップを横から見た写真と概略図である。上部亚克力に LGP モジュールがねじで固定されていることが確認できる。PEEK(Poly Ether Ether Ketone)樹脂^{*29}でできた M3 のねじを使用した。金属ねじは物質量の観点から可能な限り使用を控える必要があるため、使用していない。図 4.53 の矢印がダイヤルゲージを用いて測定した箇所であり、水色の矢印 a は LGP モジュールの中心、橙色の矢印 b, c はモジュールの両端の上部亚克力を指している。上部亚克力を測定した理由は、上部亚克力やアルミフレーム、机そのものが歪んで

^{*29} 機械的強度や耐熱性、耐薬品性が優れている樹脂である。

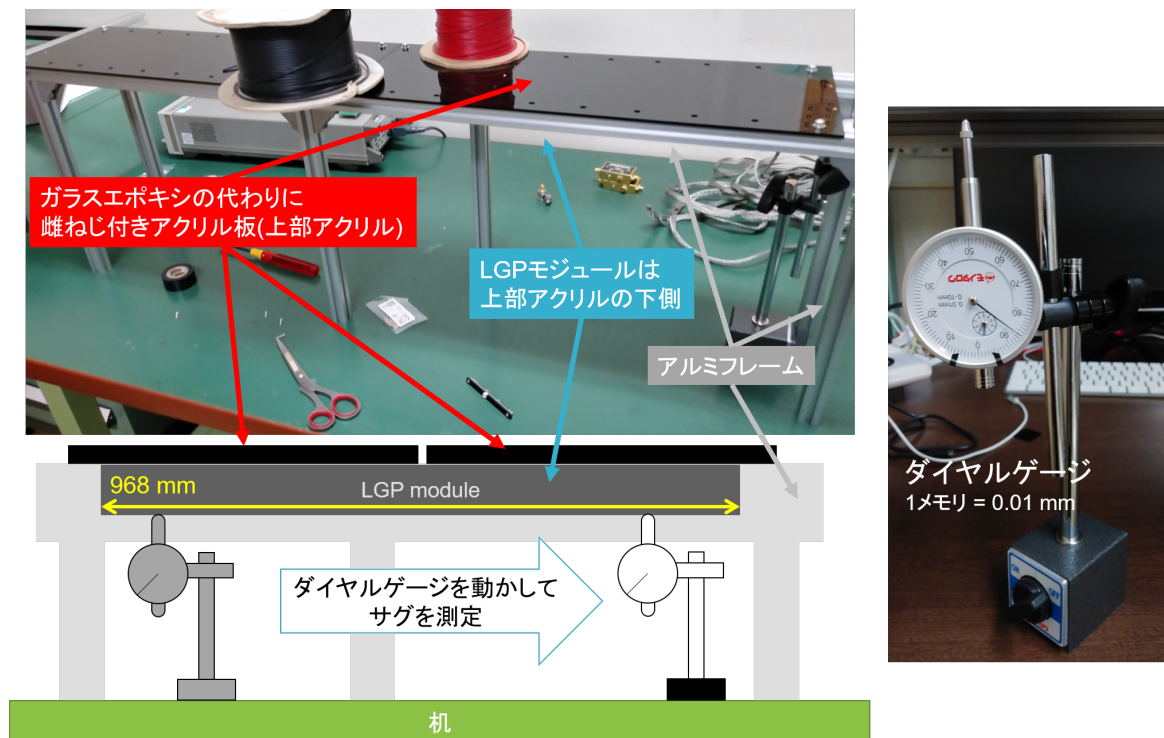


図 4.52 モックアップ試験の写真と概略図。Bottom LGP モジュールを模した構造であり、LGP モジュールの歪みの測定にはダイヤルゲージを使用した。



図 4.53 モックアップを横から見た写真と概略図。それぞれの矢印が測定箇所であり、a はモジュール中央、b,c はそれぞれモジュール両脇の上部アクリルを指す

いることが想定され、それらを LGP モジュールの測定値から差し引くことで、LGP モジュールの自重による歪みを算出するためである。水色と橙色では高さが 8 mm 程度異なるため、スタンドを調整しダイヤルゲージの高さを変更している。一方で橙色の両端の b,c の測定の際にはダイヤルゲージの高さを変更していない。

4.7.2.2 歪みの算出方法と測定例

次に歪みの算出方法を測定例^{*30}を用いて説明する。図 4.54 はねじの位置、測定箇所、測定結果、サグの算出方法と結果を示している。測定箇所はねじが設置されている箇所と、ねじとねじの間である。左上は LGP モジュールのねじの位置と測定位置であり、ねじを設置している箇所と、そ

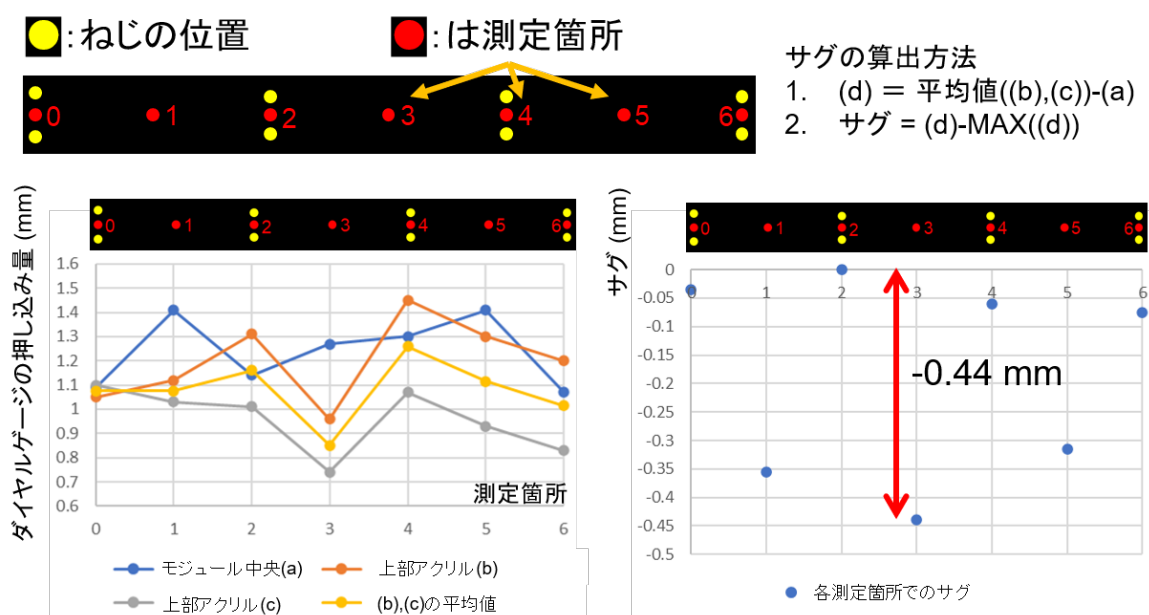


図 4.54 モックアップ試験での歪みの測定例。左上は LGP モジュールのねじの位置と測定箇所。左下は測定結果であり、縦軸がダイヤルゲージの押し込み量、横軸が測定箇所。右上はサグの算出方法。右下は各測定箇所でのサグ。

の中間にあたる位置を測定した。左下は測定結果であり、縦軸がダイヤルゲージの押し込み量、横軸が測定箇所である。縦軸は押し込み量なので、値が大きいほどモジュール全体が歪んでいることを示している。測定結果の b,c が右側でずれていることから、机やアルミフレームなどにより、上部アクリルが水平でないことが確認できる。また、上部アクリルの雌ねじの作成をタップハンドルで行っているため、厳密にはねじが垂直に入っているとは言えず、そのためモジュールが少し斜めに入っている可能性などもある。左下の測定結果から、LGP モジュールの歪みを示すために、右上のようにサグを定義して計算した。サグの計算は、それぞれの測定箇所において、上部アクリルでの測定値 (b),(c) の平均値から LGP モジュール中央での測定値 (a) を差し引き、それを (d) とし、

^{*30} この測定例では M2 の PEEK ねじを使用している

それから (d) の最大値を引き算し、その値をサグとした。右下は各測定箇所でのサグを示した結果であり、ねじの付いていない箇所にてサグが 0.4 mm 程度に大きくなっていることが確認できる。

4.7.2.3 ねじの位置の検討と LGP モジュールの歪みの測定結果

モックアップを用いて、Bottom LGP モジュールの歪みの観点からねじの位置と数の検討を行った。M2 の PEEK 樹脂の鍋ねじを使用して、様々な位置と数で測定した結果についてまとめたのが図 4.55 である。また、この際は導光板と拡散板の代わりに同じ厚みの黒アクリル板を設置している。

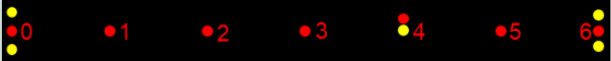
番号	ねじの位置と測定箇所	サグの絶対値の最大値
1		1.6 mm
2		0.36 mm
3		0.44 mm
4		0.45 mm
5		0.27 mm
6		0.26 mm

図 4.55 M2 の PEEK 樹脂鍋ねじを使用したモックアップ試験の結果。6 つのパターンでねじの位置や数を変更し、それぞれのサグの絶対値の最大値をまとめたものである。長手方向の 5 か所をねじで固定した番号 5,6 で歪みが小さいことが確認できる。

この結果から、LGP モジュールの歪みは長手方向のねじの配置間隔に大きく依存することが確認でき、図 4.55 の番号 5,6 のように、長手方向に 5 か所ねじを測定することが望ましいことが確認できた。

その一方で、モックアップ試験のセットアップで使用した机やアルミフレームが歪んでいる可能性があることに加えて、上部アクリルの雌ねじを自ら作成しており完全には垂直でないことを踏まえ、有限要素法を用いたシミュレーションでモックアップ試験結果の検証を行った。有限要素法によるシミュレーション結果については 4.7.3 項で述べる。

4.7.2.4 最終版 Bottom LGP モジュールのモックアップ試験の評価

5.1 節で述べる最終的な Bottom LGP モジュールでは長手方向に 5 か所、短手方向には 2 か所の合計 10 か所をねじで固定することとした。モックアップ試験では M3 の PEEK 樹脂の皿ねじで、長さが 15 mm のものを使用した。最終的な Bottom LGP モジュールでのサグの測定結果を図 4.56 に示した。サグの絶対値が最も大きかったのは測定箇所 1 であり、値は-0.435 mm であっ

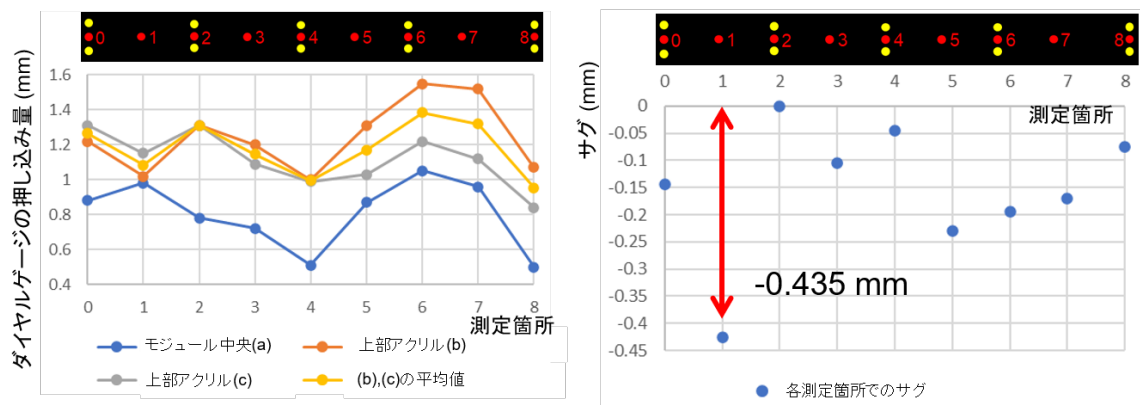


図 4.56 最終版 Bottom LGP モジュールのサグ測定結果。測定箇所 0 が光源側である。サグは最大で-0.435 mm である。

た。測定した値は黒アクリルケースの歪みであるため、その中に設置されている導光板の歪みは、今回の測定値と同程度、もしくは以下であることが予想される。この値は 4.6.1 の図 4.49 の結果を見ると光量一様性の観点では問題のない値であることがわかる。しかし、モックアップでは机やアルミフレームが水平でない可能性や、上部アクリルの雌ねじが斜めになっている可能性が考えられ、セットアップの不定性があるため、4.7.3 項で後述する有限要素法を用いた静的構造解析でも合わせて確認を行った。

また Bottom LGP モジュールはねじによって強固に固定されていることが確認できた。

これらの結果から、最終版の Bottom LGP モジュールでは自重による歪みを十分に小さいこと、ねじで強固に固定されることを確認した。

4.7.2.5 最終版 Wall LGP モジュールの固定確認

ここまでは Bottom LGP モジュールについて述べてきたが、最終版 Wall LGP モジュールを用いてモックアップを作成し、ねじで問題なく固定できるか、その他の異常がないことを確認した。図 4.57 に、Wall LGP モジュールを用いたモックアップを示した。Bottom LGP モジュールでは自重による歪みが懸念されたが、Wall LGP モジュールはモジュールの長手方向に重力がかかるので、Bottom LGP モジュールのような歪みによる問題は生じない。その一方で、導光板や拡散板が自重でずれることや、コリメータと接触するようなケースが考えられるため、上部アクリルを透明にし、目視にて異常が無いかを確認した。その結果、ねじで問題なく固定することができ、力を加えても問題は無く、コリメータと導光板、拡散板が接触することも無かった。Wall LGP モジュールについても Bottom LGP モジュールと同様に、有限要素法によるシミュレーションを行った。その結果については次の 4.7.3 項で述べる。

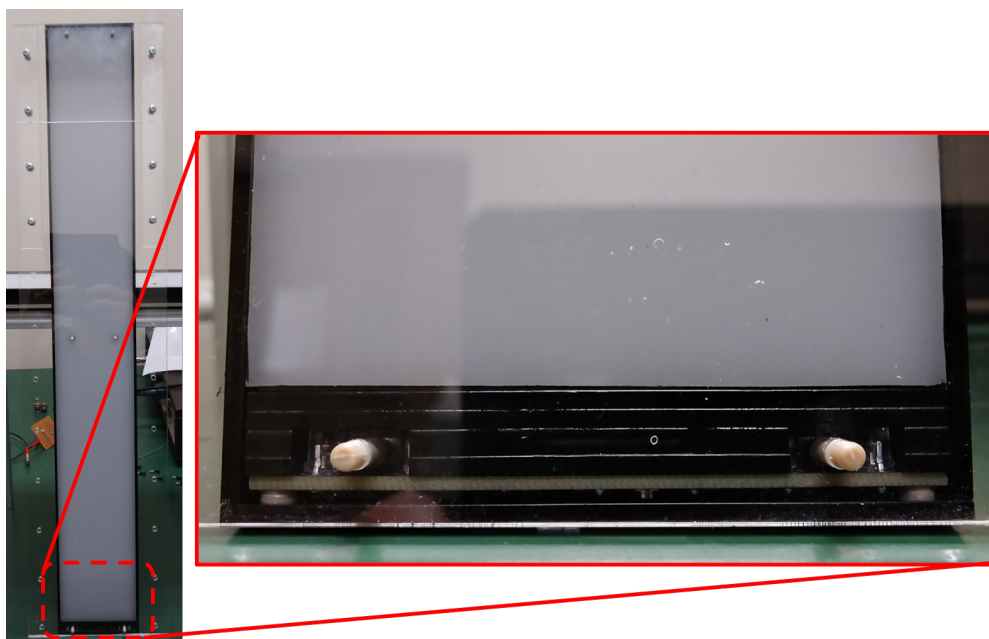


図 4.57 最終版 Wall LGP モジュールを用いたモックアップ。Wall LGP モジュールがねじで強固に固定され、コリメータと導光板、拡散板が接触しないことを確認した。

4.7.3 有限要素法によるシミュレーションを用いた LGP モジュールの歪みの確認

4.7.2 項ではモックアップを用いて LGP モジュールの歪みの測定や、LGP モジュールがねじで問題なく固定できるかを確認した。モックアップ試験ではセットアップが理想的な環境ではないため、有限要素法によるシミュレーションで確認を行った。さらに、自重のみではなく、熱膨張も考慮して LGP モジュールの歪みがどの程度になるかを確認した。この節では、まず簡単に有限要素法について説明した後、重力のみによるシミュレーションのセットアップとその結果について述べ、最後に最終版の LGP モジュールでの熱膨張を考慮したシミュレーション結果について述べる。

まず、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) とは数値計算やシミュレーションで用いられる手法の 1 種であり、ある構造物や連続体などの解析対象物を、細かく有限の要素に分割し、それぞれの要素に対して応力や変形を計算する手法である。構造や流体、伝熱や電磁場などの解析に多く用いられ、様々な商用のソフトウェアが存在している。本研究においては、ANSYS のアカデミック版^{*31}の静的構造解析 [95] を用いた。

4.7.3.1 シミュレーションのセットアップ

4.7.2 項の図 4.55 と図 4.56 の測定について、モックアップ試験を再現するセットアップ (モックアップ環境) と、実際の Super-FGD に組み込んだ際の環境を再現したセットアップ (実機環境) の

^{*31} アカデミック版は機能に制限があり、構造解析では節点が 32000 個までに制限されている。

2 つでシミュレーションを行った。モックアップ環境と実機環境の違いは固定箇所である。モックアップ環境は上部アクリルの長手方向の両辺を固定しており、実機環境では上部アクリルの上面を固定している。モックアップ試験の場合は上部アクリルの両端をアルミフレームに取り付けることで固定を行ったため、近い環境として上部アクリルの長手方向の両辺を固定した。一方で、実機においてはガラスエポキシ層にねじを固定するが、そのガラスエポキシ層は Box に全体的に接着されるため、実機環境においてはそれと近い上部アクリルの上面を固定することとした。上部アクリルの上面が全て固定されるために、上部アクリルはほとんど変形しない。

基本的にはモックアップ試験のセットアップを再現するようなセットアップとなっているが、異なる点は主に 2 点ある。1 つ目は机やアルミフレームが未実装であること。2 つ目はねじと雌ねじの形状を簡素化していることである。ここでは、ねじのねじ山は実装しておらず、それぞれの境界において相対位置がずれないことを仮定し、ねじとして固定されていることを想定している。ただし、図 4.55 の際は導光板と拡散板は実装しておらず、それらの重力に相当する荷重を黒アクリルケースの導光板と接する面にかけている。

4.7.3.2 モックアップ試験でのねじの位置の検討結果との比較

図 4.58 にモックアップ試験と ANSYS での静的構造解析の結果を比較した結果を示した。番号

番号	ねじの位置と測定箇所	サグの絶対値の最大値 (実測値)	モックアップ環境の 変位の最大値 (シミュレーション)	実機環境の 変位の最大値 (シミュレーション)
1		1.6 mm	4.5 mm	3.9 mm
2		0.36 mm	0.49 mm	0.37 mm
3		0.44 mm	0.45 mm	0.36 mm
4		0.45 mm	0.44 mm	0.34 mm
5		0.27 mm	0.25 mm	0.14 mm
6		0.26 mm	0.19 mm	0.12 mm

図 4.58 モックアップ試験と有限要素法による静的構造解析結果の比較

1 以外はモックアップ試験の結果と静的構造解析の結果が概ね一致した。番号 1 の結果が大きく異なったのは、導光板や拡散板が実装される代わりに、黒アクリルケースに一律な圧力をかけたことによるものだと考えられる^{*32}。これらの結果からモックアップ試験での LGP モジュールの歪みの測定と静的構造解析の結果が無矛盾であることが確認できた。

^{*32} 導光板や拡散板があった場合は、それらが重力で歪み、ねじ付近に力が集中するが、その一方でねじの無い場所では歪みを元に戻す力のためねじ付近に比べるとケースにかかる力は少なくなる。その一方で、このシミュレーションでは導光板と拡散板は実装しておらず、それらの重力に相当する荷重を黒アクリルケースの導光板が接する面に均等にかけているため、モックアップ試験に比べてねじがない箇所に力が大きくかかっていることになる。そのため、番号 1 の結果は静的構造解析の結果の方が歪みが大きかったと考えられる。

4.7.3.3 最終版 Bottom LGP モジュールのシミュレーション結果

図 4.56 で示した最終版の Bottom LGP モジュールの静的構造解析の結果を述べる。詳細なデザインや設計については 5.1 節で述べるが、M3 の PEEK の皿ねじを長手方向に 5 箇所、短手方向に 2 箇所の合計 10 箇所に設置したものである。

最終版の Bottom LGP モジュールの静的構造解析の結果を図 4.59 に示した。

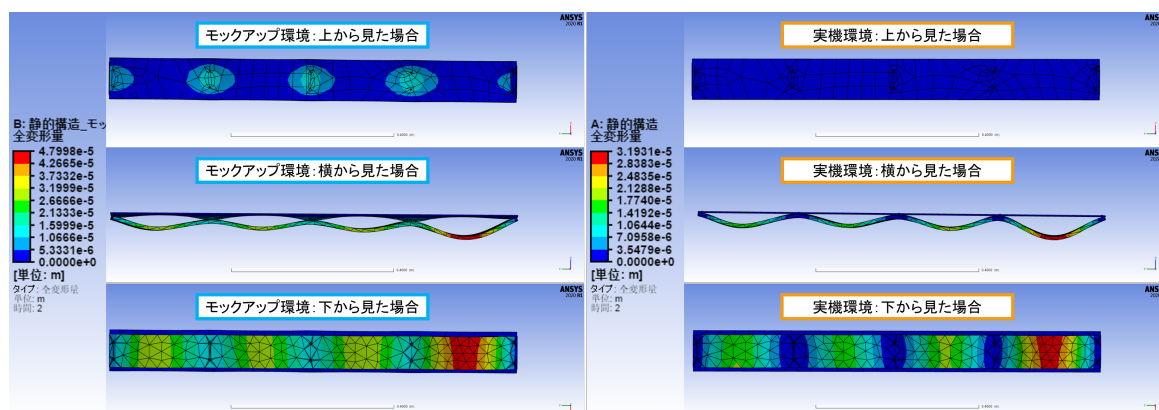


図 4.59 最終版 Bottom LGP モジュールの静的構造解析の結果。左がモックアップ環境で最大変形量は 0.048 mm、右が実機環境で最大変形量は 0.032 mm となった。

静的構造解析によるモックアップ環境での変形の最大値は 0.048 mm である。4.7.2.4 目で述べた測定結果では 0.435 mm であるため、モックアップ試験の結果の方が大きい値となった。モックアップ試験では、机やアルミフレームが水平でない可能性や、上部アクリルの雌ねじが斜めである可能性があるため、理想的な環境である静的構造解析の歪みの方が小さくなったと考えられる。4.7.2.4 目で述べたが、モックアップ試験の結果は 4.6.1 項の図 4.49 の結果と比較しても許容範囲内であることがわかる。

一方、実機環境での変形の最大値は 0.032 mm であり、モックアップ環境の静的構造解析の結果よりも小さい値となっていることが確認できる。

4.7.3.4 最終版 Wall LGP モジュールのシミュレーション結果

4.7.2.5 目では、最終版の Wall LGP モジュールを用いたモックアップで、ねじで問題なく固定することができるか、またコリメータに導光板や拡散板が接触しないかを確認した。

最終版の Wall LGP モジュールの静的構造解析を行い、コリメータと導光板、拡散板が接触するかを確認した。図 4.60 はその結果であり、各箇所の変形を実スケールで表示しており、内部の導光板や拡散板が見えるように黒アクリルケースを非表示にしている。また、コリメータや光源は簡素化して直方体として実装した。図 4.60 より、コリメータと導光板、拡散板は接触しないことが確認できた。

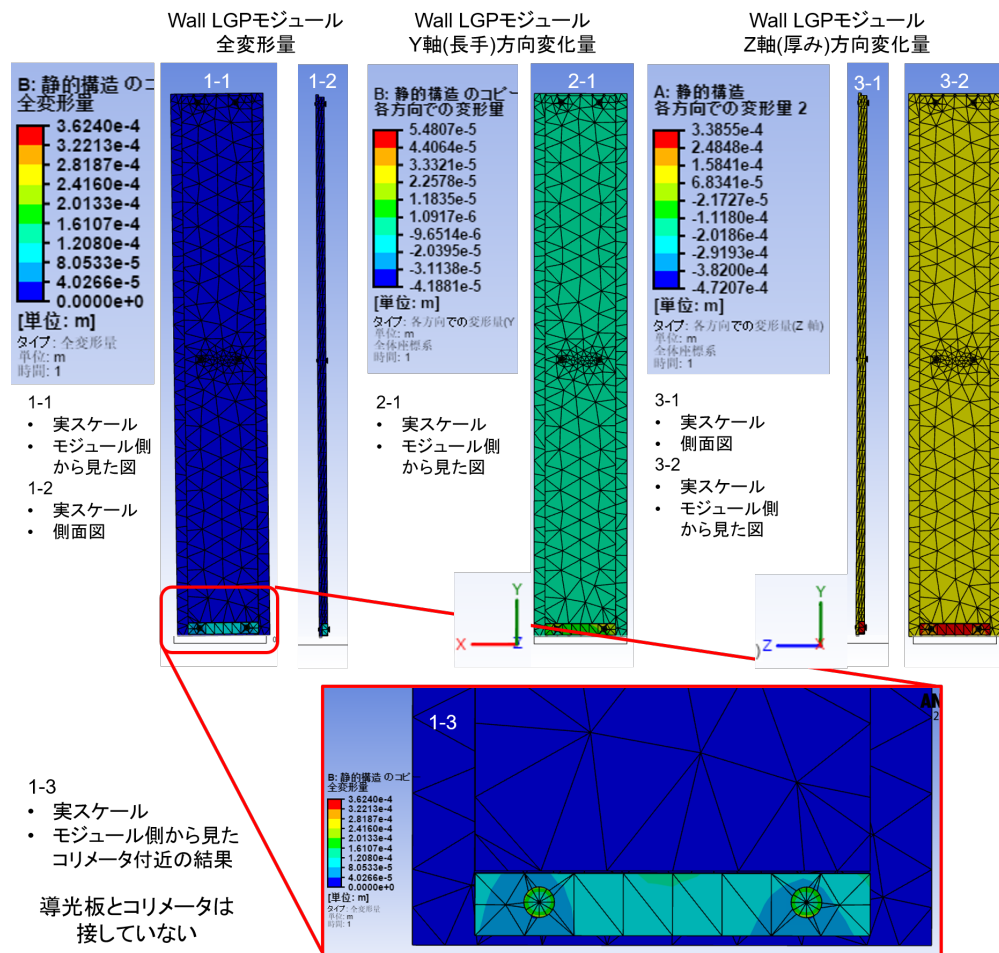


図 4.60 Wall LGP モジュールを模したセットアップでの静的構造解析の結果。各箇所の変形を実スケールで表示しており、ケースの底面と片側の側面を非表示としている。簡素化したコリメータと導光板や拡散板が接触していないことが確認できる。

4.7.3.5 重力と熱膨張を考慮した LGP モジュールのシミュレーション

LGP モジュールの自重に加えて熱膨張を考慮した場合の歪みについて述べる。ND280 は地表から円筒状に空けられたホール内部に設置されており、気温の変化が少ない環境において運転される。ND280 内部には冷却パイプが通されており、検出器内部の熱を逃がす構造が取られている。検出器内部の温度の温度変化は $10^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ と見積もられている。したがって初期状態を 10°C とし、そこから LGP モジュール全体を 25°C に変化させた場合のシミュレーションを行った。この時、LGP モジュール全体にかかる重力を考慮している。

このシミュレーションでは上部アクリルの上面を固定した実機環境で行った^{*33}。本来であれば上部アクリルで模しているガラスエポキシ層も熱膨張するが、このシミュレーションでは上部アクリル

^{*33} 光源やコリメータは実装されていない

リルを固定しているため、ほとんど熱膨張はしていない。したがって、このシミュレーションでは上部アクリルと LGP モジュールの熱膨張の差が実際よりも大きくなっている。使用するアクリルの線膨張係数が $7 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ であり、ガラスエポキシは約 $1 \sim 2 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ であるため、単純にアクリルとガラスエポキシの線膨張係数の差分を取ると、約 17% ～ 40% 程度、大きく見積もられていると考えられる。

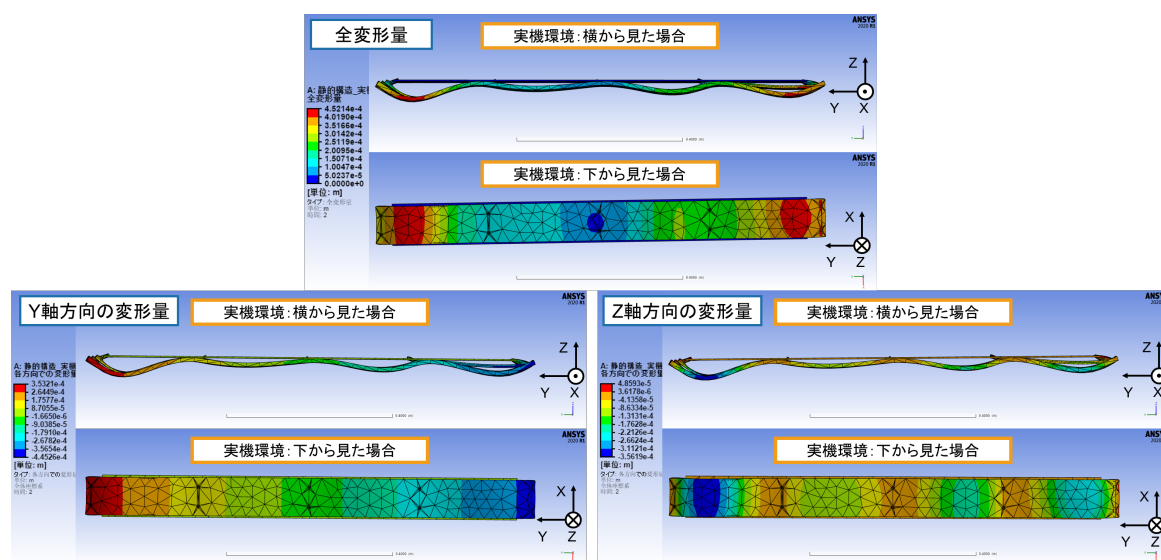


図 4.61 10°C から 25°C に温度変化した場合の Bottom LGP モジュールの変形量のシミュレーション結果。上が全変形量 (0 ～ 0.45 mm) で、左下が Y 軸方向の変形量 ($-0.45 \sim +0.35$ mm)、右下が Z 軸方向の変形量 ($-0.36 \sim +0.05$ mm)。

図 4.61 は最終版の Bottom LGP モジュールの実機環境の結果である。図 4.61 の上が全変形量で、左下が Y 軸方向 (長手方向) の変形量、右下が Z 軸方向 (厚み方向) の変形量を表している。重力に加えて熱膨張を考慮した場合、全変形量の最大値は 0.45 mm 程度となり、重力のみを考慮していたときの 0.032 mm に比べて増加した。Y 軸方向では場所により -0.45 mm から $+0.35$ mm の変形があり、Z 軸方向では -0.36 mm から $+0.05$ mm の変形であるため、Y 軸方向の熱膨張の方が大きいことが確認できた。Y 軸方向の変位については 4.5.1 項の図 4.42 の結果から 4 mm 程度のずれは許容できる値であるため、図 4.61 の結果は許容範囲内であることが確認できる。Z 軸方向については 4.6.1 項の図 4.49 の結果から 2 mm 程度の歪みは許容できる値であるため、許容範囲内であることが確認できる。また、これは考えられる温度変化の最小値から最大値へと変化したことを想定したものであり、これより温度変化は小さいと予想されるため、今回のシミュレーションの 15°C の温度変化は大きく見積もった結果である。これらの結果から、熱膨張により歪みは増えるが問題ない値であることが確認できた。

図 4.62 は最終版の Wall LGP モジュールでの温度変化と重力を考慮した静的構造解析の結果を示したものである。シミュレーションにおける固定箇所は実機環境と同じ上部アクリル^{*34}の上面

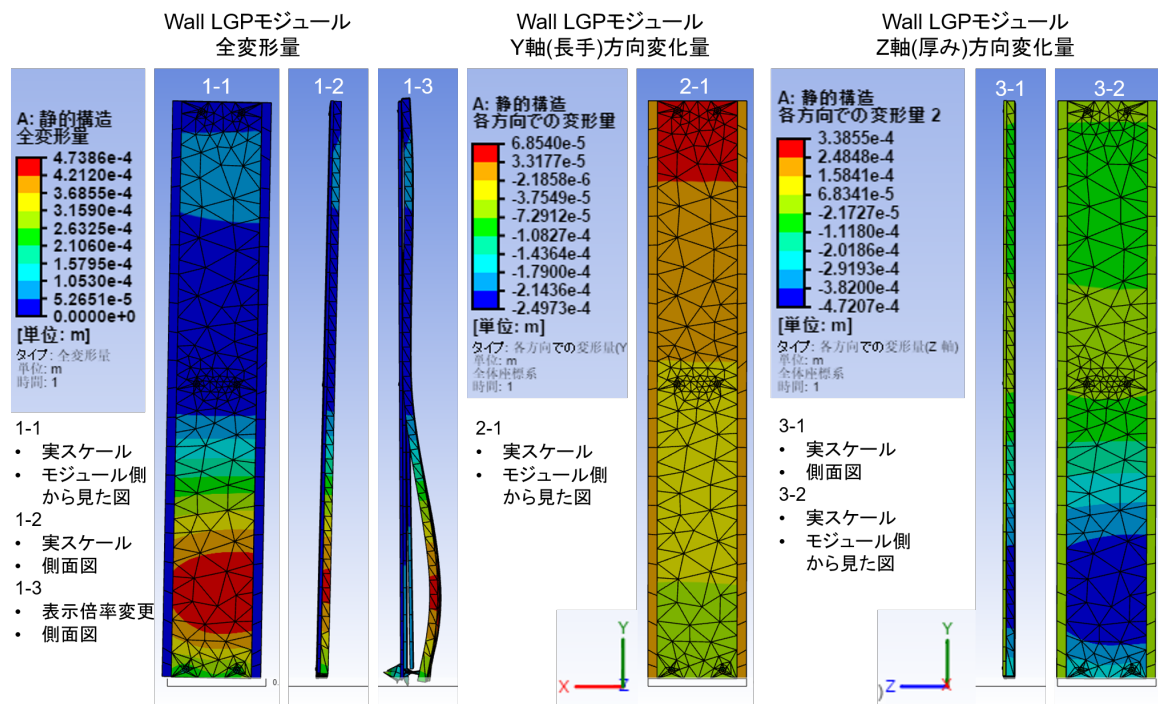


図 4.62 10°C から 25°C に温度変化した場合の Wall LGP モジュールの変形量のシミュレーション結果。左は全変形量 (0 ～ 0.47 mm) で、真ん中が Y 軸方向の変形量 (−0.25 ～ +0.07 mm)、右が Z 軸方向の変形量 (−0.47 ～ +0.34 mm)。シミュレーションには重力も加えている。

としている。左は全変形量で、真ん中が Y 軸方向の変形量、右が Z 軸方向の変形量をそれぞれ示している。図 4.62 で見えているのは、一番外側にある黒アクリルケースであり、導光板やコリメータが見えるようにケースを非表示にしたものを図 4.63 に示している。図 4.62 の 1-3 を見ると大きく歪んでいるのは黒アクリルケースの下半分であり、その中の導光板や拡散板にはほとんど歪みが無いことがわかる。これは図 4.63 でも確認することができる。図 4.63 の結果より、導光板は全変形量、Y 軸方向、Z 軸方向ともに小さく、問題にはならないことが確認できた。また、導光板とコリメータも接触していないことが確認できた。Wall LGP モジュールに対しても、Bottom LGP モジュールのシミュレーションと同様に、熱膨張が大きく見積もられた値であり、その上で、各方向への変形は問題が無く、コリメータと導光板の接触も無いことが確認できた。

したがって、有限要素法を用いた LGP モジュールの歪みのシミュレーションの結果、モックアップ試験の結果は概ねシミュレーション結果と一致したこと、最終版の Bottom LGP モジュールや Wall LGP モジュールは、重力に加えて 10°C から 25°C の変化による熱膨張でも問題にはならないことが確認できた。

*34 ここで述べる上部アクリルとは、ねじを取り付けるガラスエポキシ層に対応する板を指す

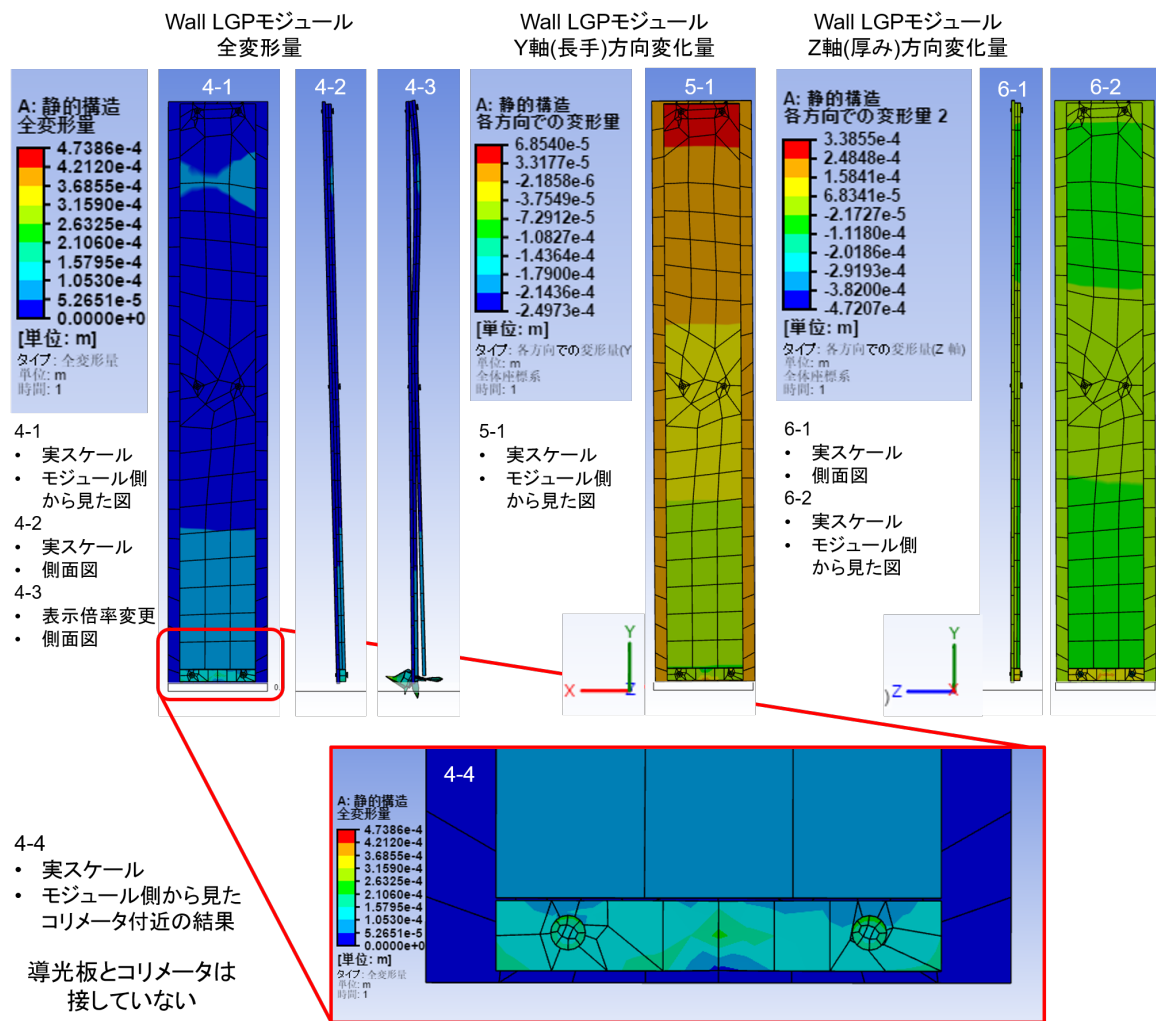


図 4.63 ケースを非表示にした、10°C から 25°C に温度変化した場合の Wall LGP モジュールの変形量のシミュレーション結果。左は全変形量で、真ん中が Y 軸方向の変形量、右が Z 軸方向の変形量、下はコリメータ付近の拡大図。シミュレーションには重力も加えている。拡大図からコリメータと導光板、拡散板が接していないことが確認できる。

4.7.4 LGP モジュールの製作と組立手法

LGP モジュールは、導光板、拡散板、黒アクリルケース、コリメータを作成し、接着や組立を行う必要があるため、その接着方法や組立方法を確立した。本項では、黒アクリルケースの作成、コリメータの作成、LGP モジュールの組立の順で述べる。

4.7.4.1 黒アクリルケースの製作

黒アクリルケースは、各側面の寸法に切り出されたアクリル板を接着して製作する。LED 側の短手方向の側面はケーブルを通す構造があり、複雑になるためこの部品は自作するが、それ以外の底面、長手方向の側面、LED と反対側の短手方向の側面は製作を業者に依頼する。

黒アクリルケースの作成方法は主に、治具に設置、仮固定、接着の 3 段階である。図 4.64 に示したのが、黒アクリルケース用の仮固定用治具の試作品であり、高精度に切断されたアルミ板である。この治具は黒アクリルケースの内側の寸法に合わせて作られており、図 4.64 のように黒アク



図 4.64 黒アクリルケースの仮固定用治具の試作品。上が仮固定用治具のアルミ板の全体写真で、下が右端の拡大写真。

リルケースの各部品で治具を隙間なく覆った場合に、正しい位置にくる設計となっている。仮固定用治具を用いて各部品を正しい位置に設置した後、次の段階の仮固定を行う。

仮固定は後述するアクリルの接着剤に強いセロハンテープによって行う。各部品を簡単に強固に仮固定することができ、かつ接着後に剥がすことができるという利点から使用することとなった。図 4.65 はセロハンテープで仮固定した後の写真である。全ての側面を仮固定した後に、最後の手順である接着を行う。

接着はケースの内側から行うため、仮固定が外れないよう黒アクリルケースを持ち上げ、仮固定用治具から外す。その後、黒アクリルケースの内側から注射針を用いて接着剤を各部品の境界に適量を流し込むことで接着する。図 4.66 は注射針を用いて接着剤をアクリルの境界へ流し込む様子の写真である。接着剤には主成分が二塩化メチレンのアクリル用の接着剤を用いる。速乾性が高い溶剤であり、アクリルを溶かして接着することができ、接着に伴う厚みがほとんど生じないという利点がある。全ての部品を接着した後、完全に固まるまで 24 時間乾燥させ、その後仮固定用のセロハンテープを外して、黒アクリルケースの接着が終了する。



図 4.65 各部品を仮固定した後の黒アクリルケース



図 4.66 接着剤によるアクリル板の接着の様子

4.7.4.2 コリメータの製作

コリメータの製作方法について述べる。コリメータは各部品をレーザー加工機で作成し、それらを治具を用いて接着する。コリメータの詳細な寸法については付録 C に記した。

図 4.67 がコリメータ接着用の治具である。この治具は厚さ 5 mm のアクリル板をレーザー加工

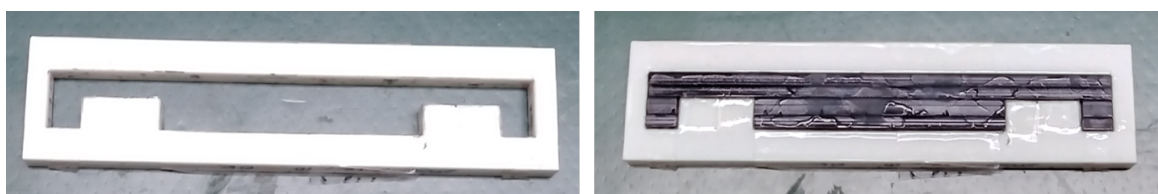


図 4.67 コリメータの接着用の治具。左は治具のみで、右はコリメータが入った状態のもの。

機を用いて作成したものである。接着に用いるのは黒アクリルケースの接着時に用いたものと同じアクリル用接着剤と同様である。コリメータと治具が接着しないよう、治具にはセロハンテープを巻いてある。この治具にコリメータの各部品を押し込み、両側から接着剤を流し込み固定する。この際、ある程度固まるまで放置し、その後、治具から取り外した後、完全に固まるまで 24 時間放置する。LED 基板側のプレートの両端には固定するための雌ねじを作成する。雌ねじの作成後に接着を行うと、接着剤が雌ねじに流れ込み、ねじ山を溶かしてしまう恐れがあるため、コリメータの接着後に雌ねじの作成を行う。雌ねじの作成はタップハンドルを用いて行う。雌ねじを作成するのはコリメータ固定用のアクリル板のうち LED 基板側の 2 mm 厚のアクリル板のみである。ただし、それ以外のアクリル板にもねじ穴を空けることで、タップ加工の際に十分にタップを食い込ませることができ、問題なく雌ねじを作成することができた。以上がコリメータの製作手順である。

4.7.4.3 LGP モジュールの組立方法

LGP モジュールの組立方法について述べる。LGP モジュールは以下の手順で組み立てる。

1. 黒アクリルケースの LED 側の側面に外側からねじを通し、スペーサーとして内側からワッシャーを入れる。
2. LED が付いた基板とコリメータをセットする。
3. ねじを締め、LED 基板とコリメータを黒アクリルケースに固定する。
4. ケースの中に導光板と拡散板を設置する。
5. モジュールの底面側からねじを入れ込む。
6. LED 基板にケーブルを取り付ける。

スペースの観点で先にコリメータや光源を設置する必要があるため上記のような手順となっている。この流れを図 4.68 に示した。

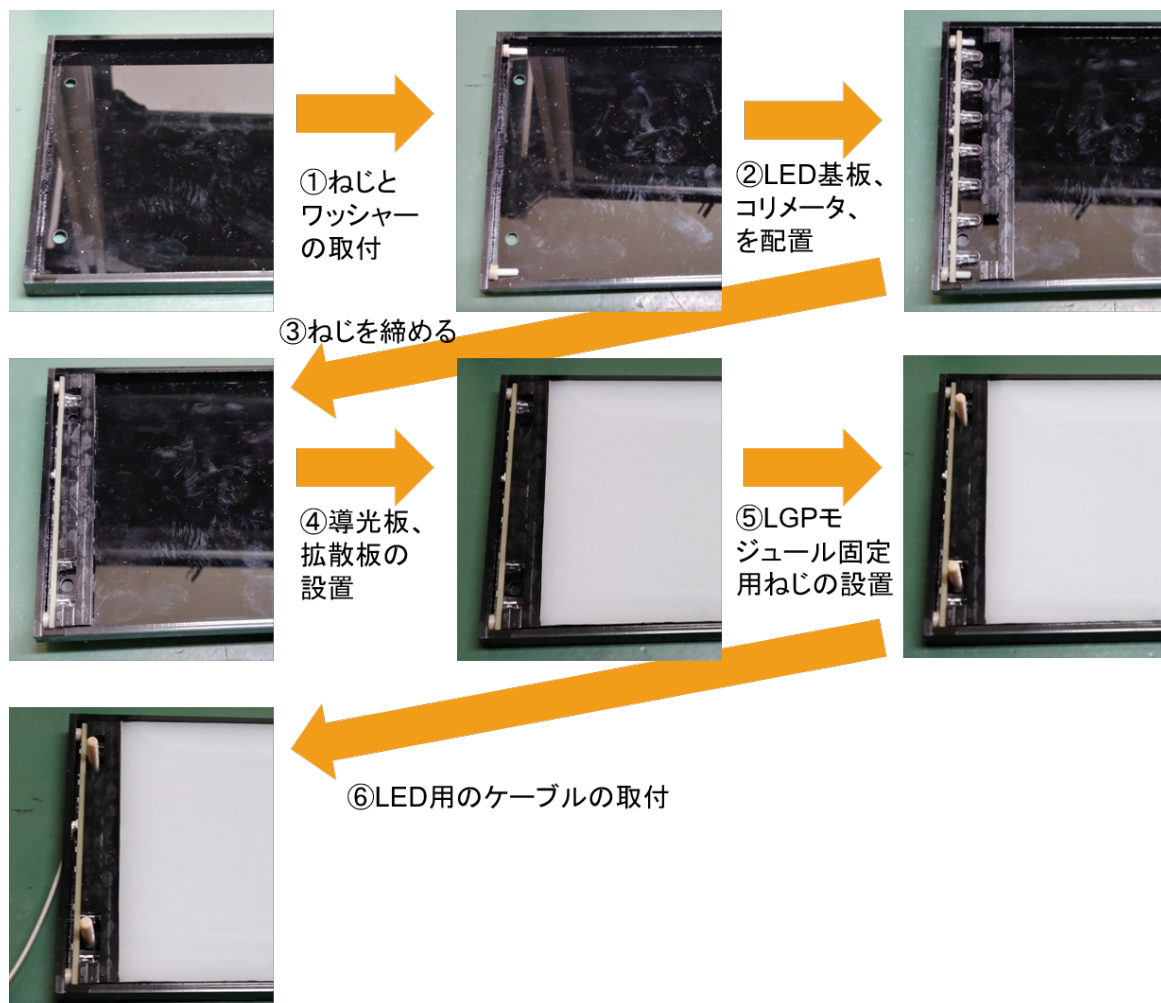


図 4.68 LGP モジュールの組立手順。

第 5 章

最終版 LGP モジュールの性能評価

第 4 章では LGP モジュールの各構成要素の開発や設計、評価について述べた。本章では、それらの開発を踏まえて、最終版の LGP モジュールの設計や光量一様性の評価について述べる。開発したキャリブレーションシステムの厚みは 8 mm(5.1 節で後述)、光量一様性は最大最小光量比が 2.41(5.2 節で後述) と 4.2 節で述べた要求を満たした。開発したキャリブレーションシステムとしての性能が十分であることが確認できたため、この最終版の LGP モジュールの設計で、量産を進める予定である。まず、それぞれの構成要素の設計について述べた後、光量一様性の結果について述べる。

5.1 最終版の LGP モジュールの設計

本節では、まず最終版の LGP モジュールの外観や寸法について説明した後、各構成要素の設計について述べる。詳細な設計図については付録 C に示した。

図 5.1 に組立後の Bottom LGP モジュール、図 5.2 に Wall LGP モジュールの外観を示した。

Bottom LGP モジュールの外寸は $999.5 \times 81.1 \times 8.0$ mm であり、Wall LGP モジュールは $586.4 \times 81.1 \times 8.0$ mm である。Bottom LGP モジュールは Super-FGD の底面側に 46 個設置され、1 モジュールで $8 \times 96 = 768$ 個の Notch を持ち同数の波長変換ファイバーに光を分配することが可能である。Wall LGP モジュールは Super-FGD の側面に 47 個設置され、1 モジュールで $8 \times 56 = 448$ 個の Notch を持ち同数の波長変換ファイバーに光を分配することが可能である。それぞれのモジュールの主な構成要素は LED、コリメータ、導光板、拡散板である。

LGP モジュールの厚みは 8 mm であり、4.2 節で述べた要求を満たしている。また、最も端の波長変換ファイバーから 16.5 mm の領域内に光源が収まっており、省スペースな設計となっている^{*1}。

^{*1} 詳細な寸法は付録 C の図 C.2、図 C.3 を参照。

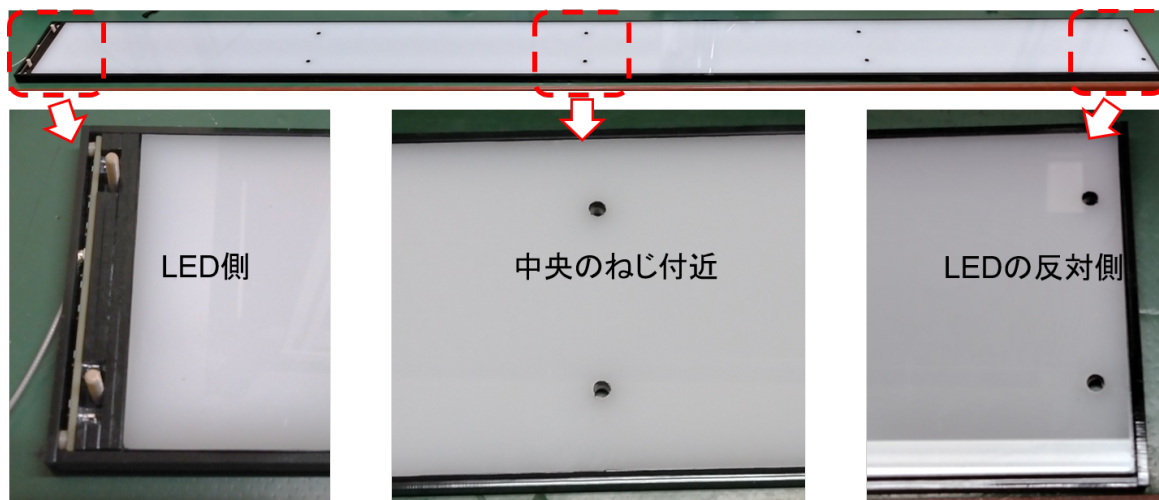


図 5.1 最終版の Bottom LGP モジュールの外観

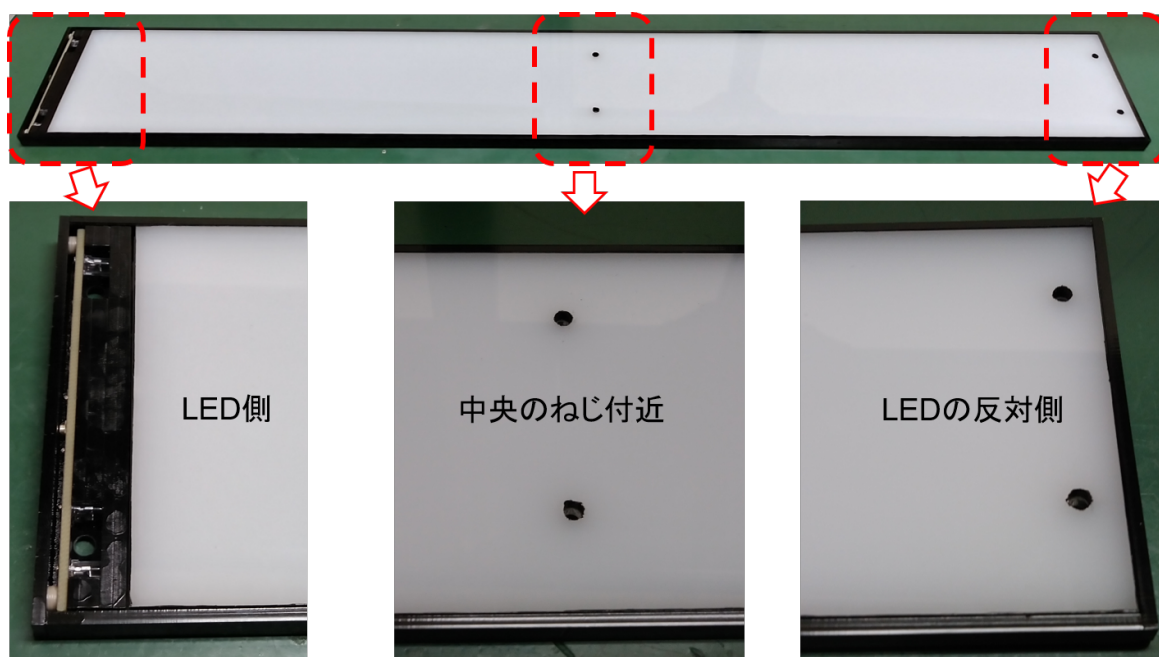


図 5.2 最終版の Wall LGP モジュールの外観

5.1.1 光源の設計

まず初めに LED と LED 基板の設計について述べ、その後コリメータの設計について述べる。

LGP モジュールに使用する LED は日亜化学工業株式会社の NSPB300B[86] を用いる。図 5.3 が NSPB300B の写真と図面である。

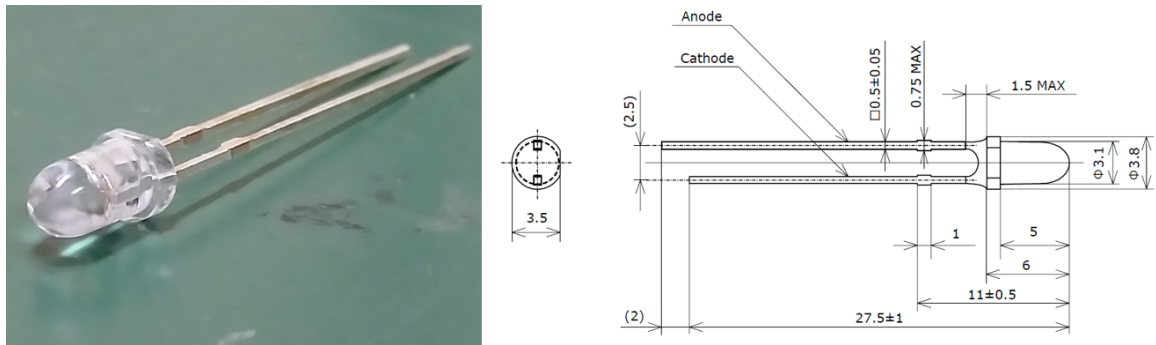


図 5.3 左が NSPB300B の写真、右が NSPB300B の図面である [86]。



図 5.4 最終版の LED 基板の写真。上は LED 側、真ん中はケーブル側から見た写真であり、下は LED を取り付けた後の LED 基板である。

図 5.4 に最終版の LED 基板の写真を示した。図 5.4 の上は LED 側から見た LED 基板、真ん中はコネクタ側から見た LED 基板であり、下は LED を取り付けた後の写真である。寸法は $75.8 \times 5.0 \times 1.6$ mm、LED のピッチが 10.30 mm^{*2} となる設計である。LED 基板のコネクタにはヒロセ電機株式会社の U.FL シリーズのコネクタ [96] を使用した。図 5.5 に LED 基板の回路図を示した。回路としては、コネクタの心線から 7 つの LED に並列接続され、各 LED には 300Ω の保護抵抗を直列に接続し、それらはコネクタの GND に接続されている。LED 基板には最大 6 V 程度が印加される。LED 基板には両端に $2 \text{ mm}\phi$ のねじ穴が空けられており、ねじでケースに固定される。

次にコリメータの設計について述べる。図 5.6 はコリメータの写真と CAD モデルである。これらのコリメータの設計については 4.3.3 項で既に述べているが、ここで改めて説明する。コリメー

*2 導光板の Notch のピッチが 10.30 mm (5.1.2 項で後述) であり、それと等しいピッチである。

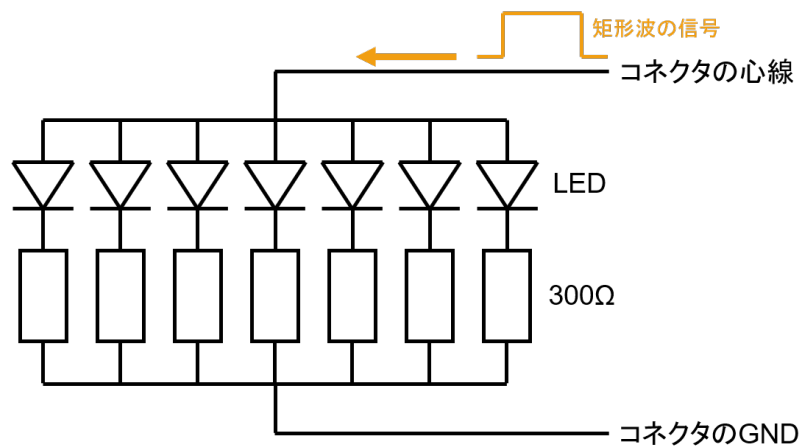


図 5.5 LED 基板の回路図

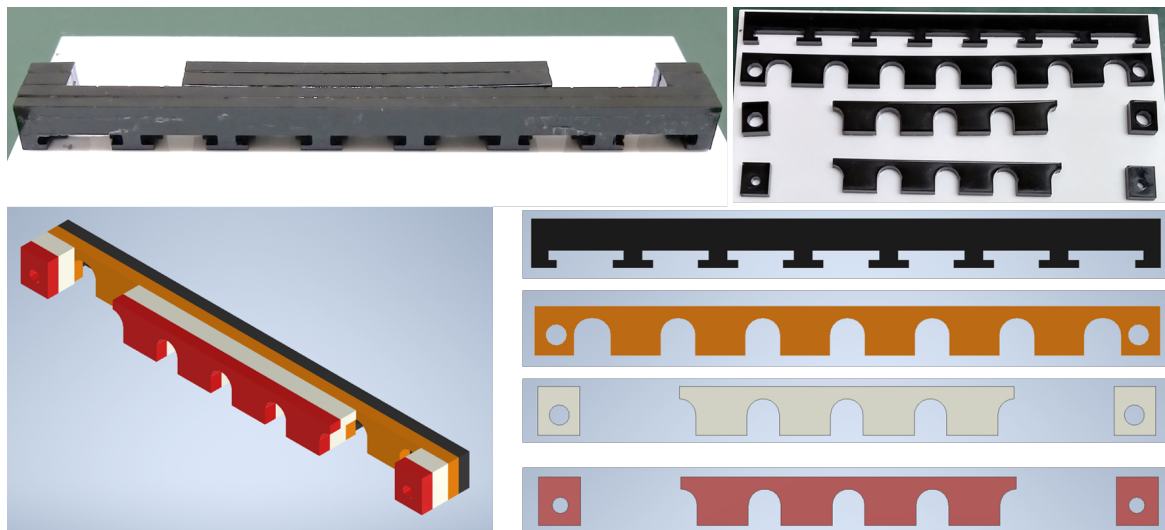


図 5.6 上がコリメータの写真で、下が CAD モデルである。

タは 2 mm または 3 mm 厚の黒いアクリル板を加工して作成する。両者ともに固定用のアクリル板も含めると、寸法は 76.1 × 6.0 × 9.0 mm である。

5.1.2 導光板と拡散板の設計

導光板と拡散板は、外寸やねじ穴の位置が同じである。Bottom LGP モジュールの導光板、拡散板の外寸は 982.5 × 76.1 × 3.0 mm であり、Wall LGP モジュール場合は 569.4 × 76.1 × 3.0 mm である。Notch のピッチは波長変換ファイバーのピッチ、つまりキューブのピッチと同じに設定しており、水平方向と鉛直方向で異なっている。水平方向のピッチは 10.30 mm であるが、重力が加わる鉛直方向のピッチは 10.28 mm である。したがって、Bottom LGP モジュールでは、X 方向、

Y 方向ともに Notch のピッチは 10.30 mm と同じであるが、Wall LGP モジュールでは、X 方向の Notch のピッチは 10.30 mm で Y 方向の Notch のピッチは 10.28 mm となる。LGP モジュールの固定のために、Bottom LGP モジュールの導光板と拡散板には 8 箇所、Wall LGP モジュールの導光板と拡散板には 4 箇所 3.2 mmφ のねじ穴を設置した。導光板の素材には株式会社クラレのコモグラスの品番 P[97] を用いた。アクリルの切り出しや Notch の加工は株式会社プラスチックに依頼し、製作した [91]。図 5.7 は Bottom LGP モジュール、図 5.8 は Wall LGP モジュールの導光板と拡散板の写真である。

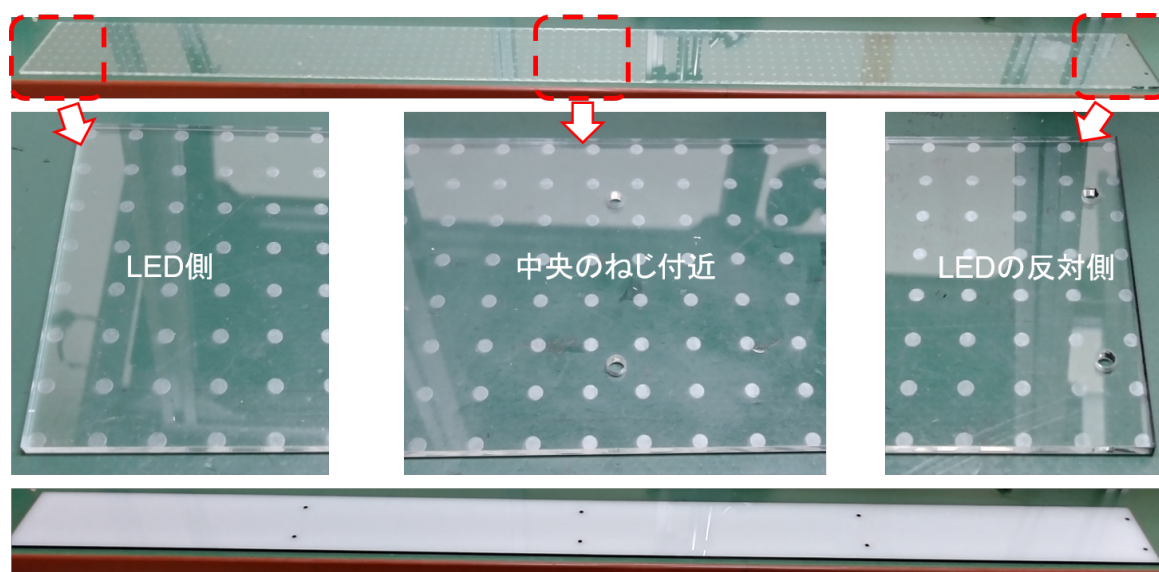


図 5.7 上が Bottom LGP モジュールの導光板で、下が拡散板の写真である。LED が設置されるの左側である。

5.1.3 黒アクリルケースの設計

黒アクリルケースは 2 mm 厚のアクリル板で拡散板側の上面を除いた 5 面のそれぞれの部品を接着して製作する。Bottom LGP モジュールのケースの外寸は $999.5 \times 81.1 \times 8$ mm であり、Wall LGP モジュールの場合は $586.4 \times 81.1 \times 8$ mm である。ケースと導光板、拡散板が接する側面にはそれぞれ 0.5 mm のクリアランスを設けている。LGP モジュールの固定のために、Bottom LGP モジュールのケースには 10 か所、Wall LGP モジュールのケースには 6 箇所ねじ穴を配置している。ねじの頭が飛び出さないよう皿ねじを使用するため、ねじ穴には外側からテーパ加工を施す。また、LED 側の側面には LED 基板に接続するケーブルが通るように穴が空けられる。図 5.9 と図 5.10 はそれぞれ Bottom LGP モジュール、Wall LGP モジュールのケースの写真である。

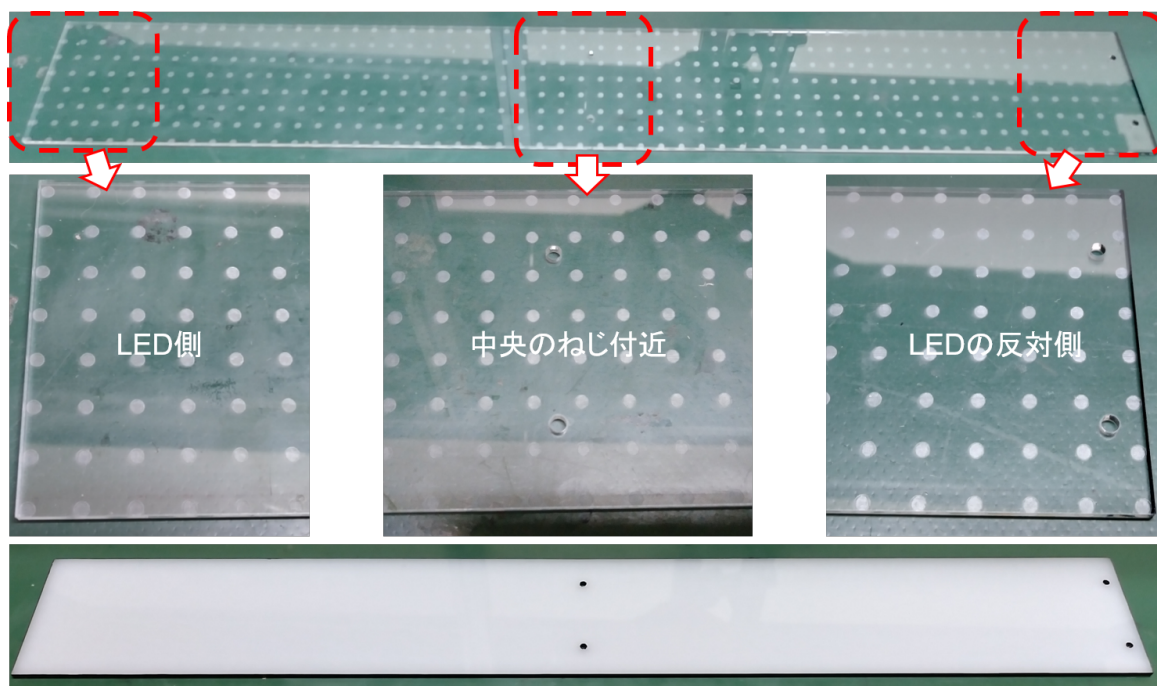


図 5.8 上が Wall LGP モジュールの導光板で、下が拡散板の写真である。LED が設置されるの左側である。



図 5.9 Bottom LGP モジュールのケースの写真

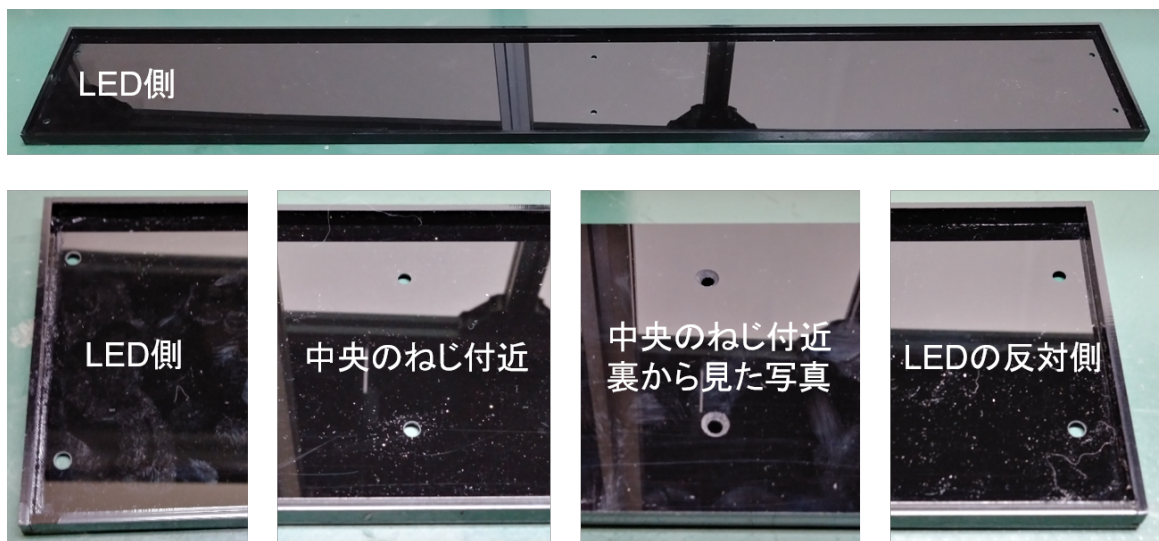


図 5.10 Wall LGP モジュールのケースの写真

5.2 光量一様性の評価

5.1 節で述べた最終版の Bottom LGP モジュールと Wall LGP モジュールを用いて光量一様性の評価を行った。光量一様性の目標性能は 4.2 節で述べたように最大最小光量比が 3 程度である。まず測定時のセットアップと光量算出方法について述べた後、光量一様性の測定結果について述べる。

5.2.1 セットアップと光量の算出方法

図 5.11 に光量一様性のセットアップを示した。基本的には 4.3.3 項で述べたセットアップと同様である。4.3.3 項で述べたセットアップと異なっているのは LGP モジュールの上に設置した波長変換ファイバーの治具である。実機では波長変換ファイバーの端面からだけでなく、側面からも光が入射されるため、LGP モジュールの上に 3 mm ϕ の穴が空いた厚み 3 mm の黒いアクリル板を設置し、その上に波長変換ファイバーと同じ直径 1 mm ϕ の穴が空いた厚み 3 mm の黒いアクリル板を設置した。

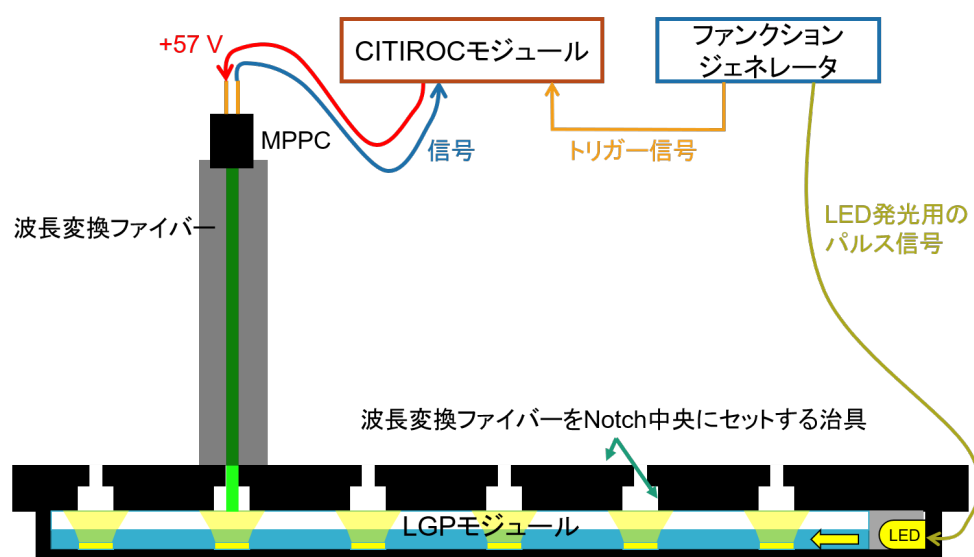


図 5.11 最終版 LGP モジュールの光量一様性測定のセットアップ

光量の算出方法は 4.3.3 項で述べた方法と同様である。

5.2.2 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果

図 5.12 が最終版の Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果である。X 軸方向 (導光板の短手方向) の 8 列全てを測定しており、それらの最大光量で規格化している。光量一様性として

は最大最小光量比が 2.41 ± 0.01 となり、Bottom LGP モジュールは目標性能である最大最小光量比 3 程度を満たす結果となった。

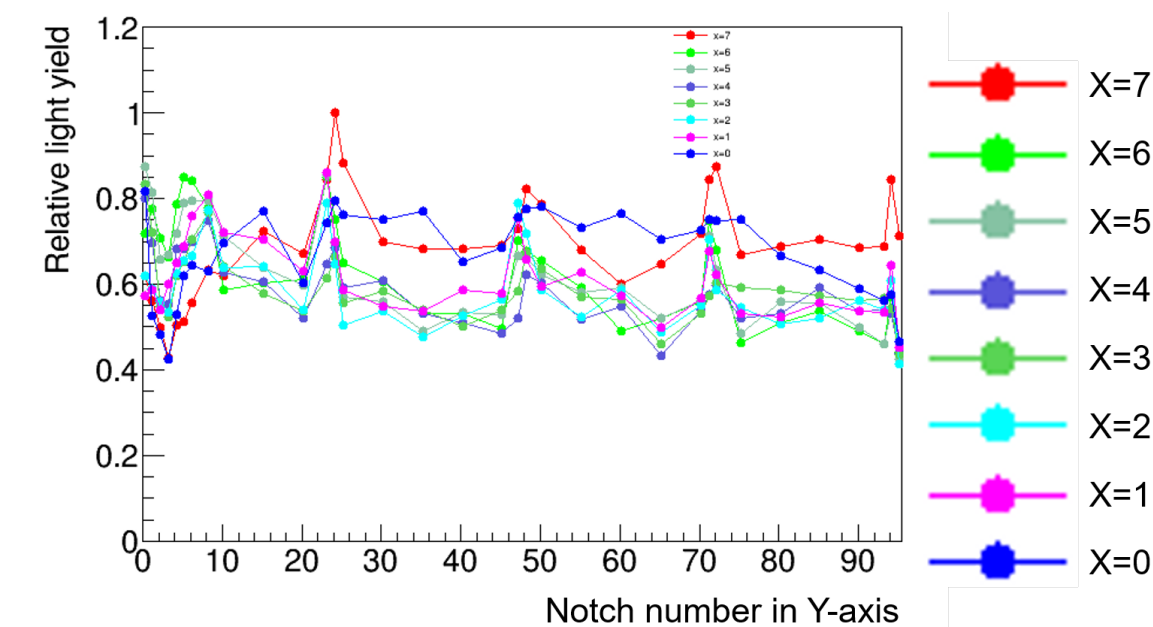


図 5.12 最終版 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果。縦軸は光量の最大値で規格化した相対光量であり、横軸は Y 軸方向 (導光板の長手方向) の Notch の番号である。最大最小光量比は 2.41 である。

図 5.13 に短手方向の中心から片側ずつの $X=0\sim3$ と $X=4\sim7$ ごとにまとめた図を示した。さらに、図 5.14 に、線対称の関係にある $X=0,7$ 、 $X=1,6$ 、 $X=2,5$ と $X=3,4$ ごとにまとめた結果を示した。

図 5.14 を見ると、対称な列ごとの光量一様性は概ね同じ傾向であることが確認できる。また、図 5.13 では光量がばらついていることがわかる。

5.2.3 Wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果

図 5.15 が最終版の Wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果である。光量一様性としては最大最小光量比が 2.38 ± 0.01 となり、Wall LGP モジュールも Bottom LGP モジュールと同様に目標性能である最大最小光量比 3 程度を満たす結果となった。X 軸方向 (導光板の短手方向) の 8 列全てを測定しており、それらの最大光量で規格化している。

図 5.16 に短手方向の中心から片側ずつの $X=0\sim3$ と $X=4\sim7$ ごとにまとめた図を示した。さらに、図 5.17 に、線対称の関係にある $X=0,7$ 、 $X=1,6$ 、 $X=2,5$ と $X=3,4$ ごとにまとめた結果を示した。

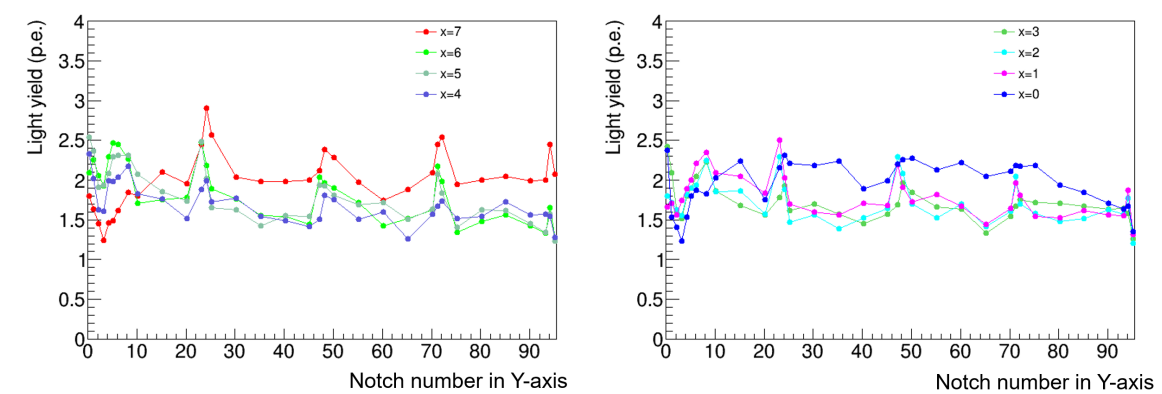


図 5.13 左が X=0~3、右が X=4~7 の最終版 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果。縦軸は検出光子数であり、横軸は Y 軸方向 (導光板の長手方向) の Notch の番号である。

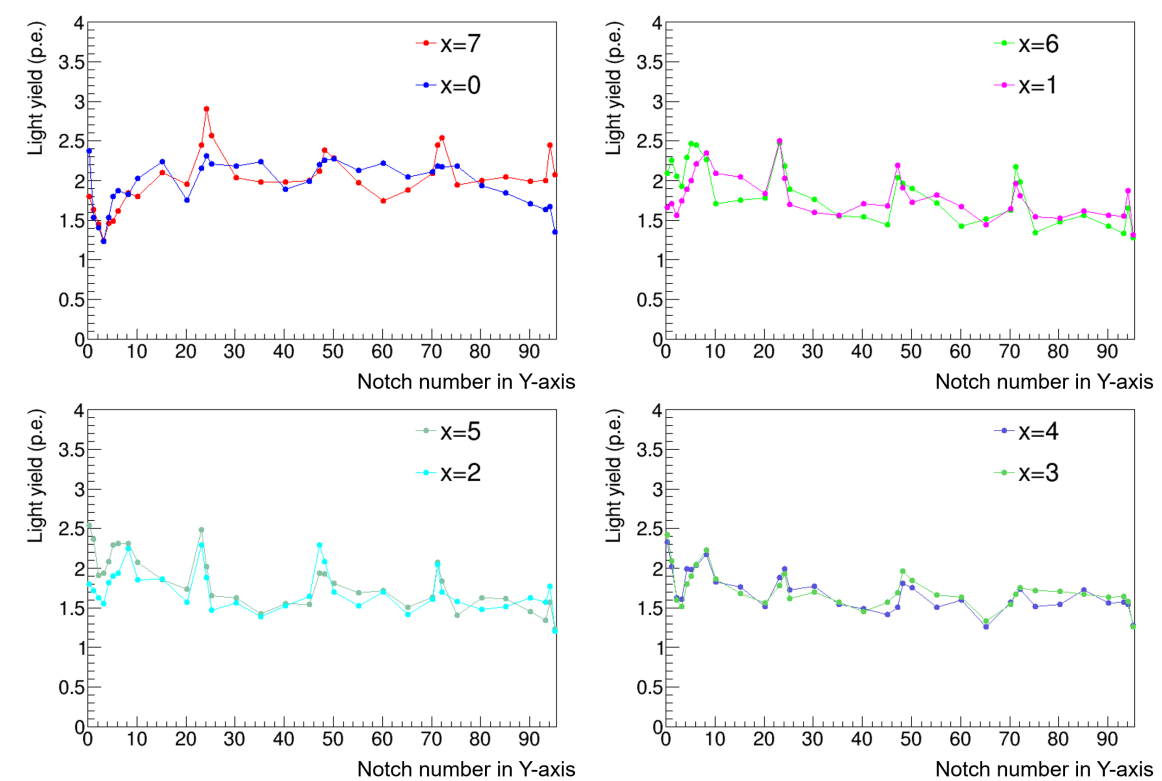


図 5.14 対称な列ごとの最終版 Bottom LGP モジュールの光量一様性の測定結果。縦軸は検出光子数であり、横軸は Y 軸方向 (導光板の長手方向) の Notch の番号である。左上は X=0,7、右上は X=1,6、左下は X=2,5、右下は X=3,4 である。

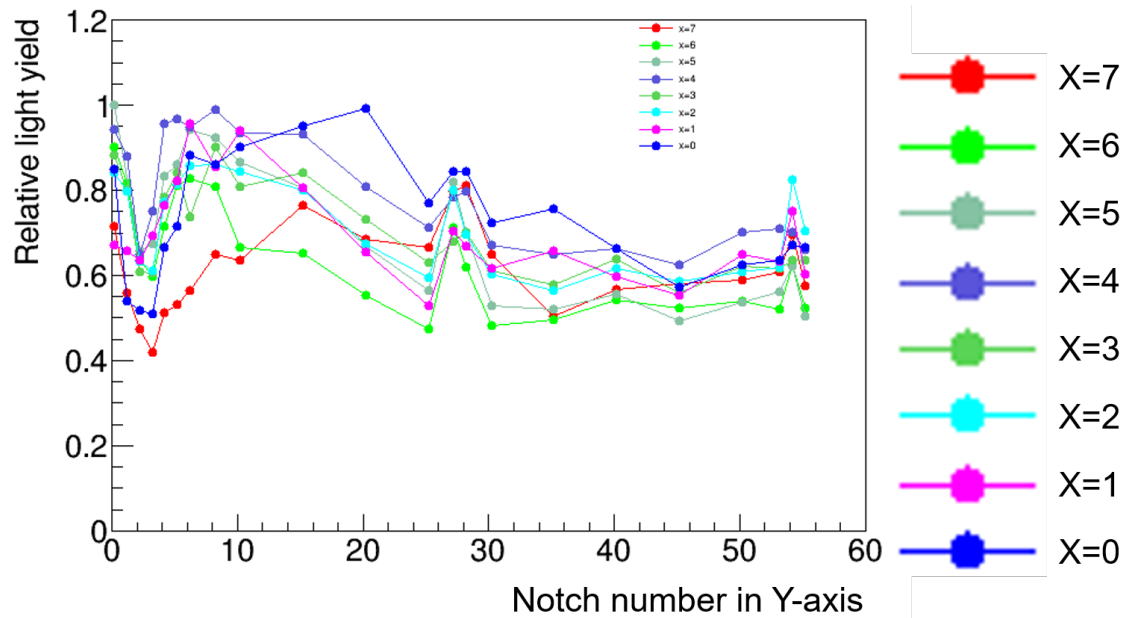


図 5.15 最終版 Wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果。縦軸は光量の最大値で規格化した相対光量であり、横軸は Y 軸方向 (導光板の長手方向) の Notch の番号である。最大最小光量比は 2.38 である。

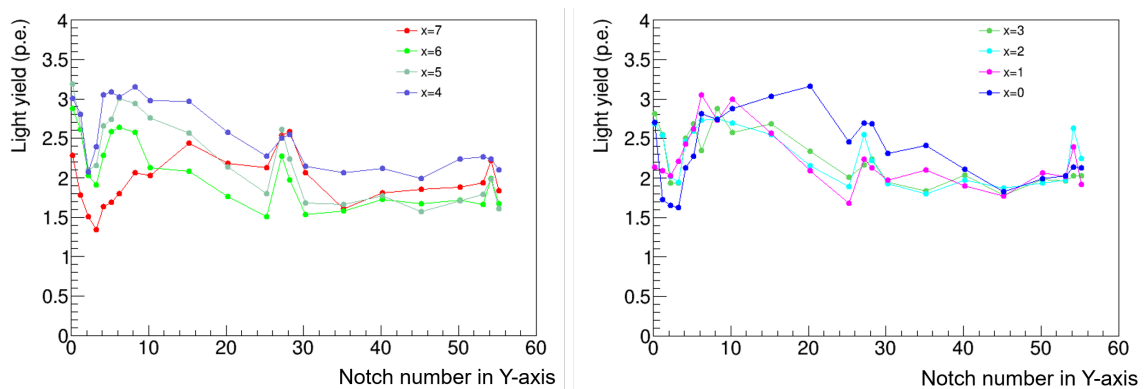


図 5.16 左が X=0~3、右が X=4~7 の最終版 wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果。縦軸は検出光子数であり、横軸は Y 軸方向 (導光板の長手方向) の Notch の番号である。

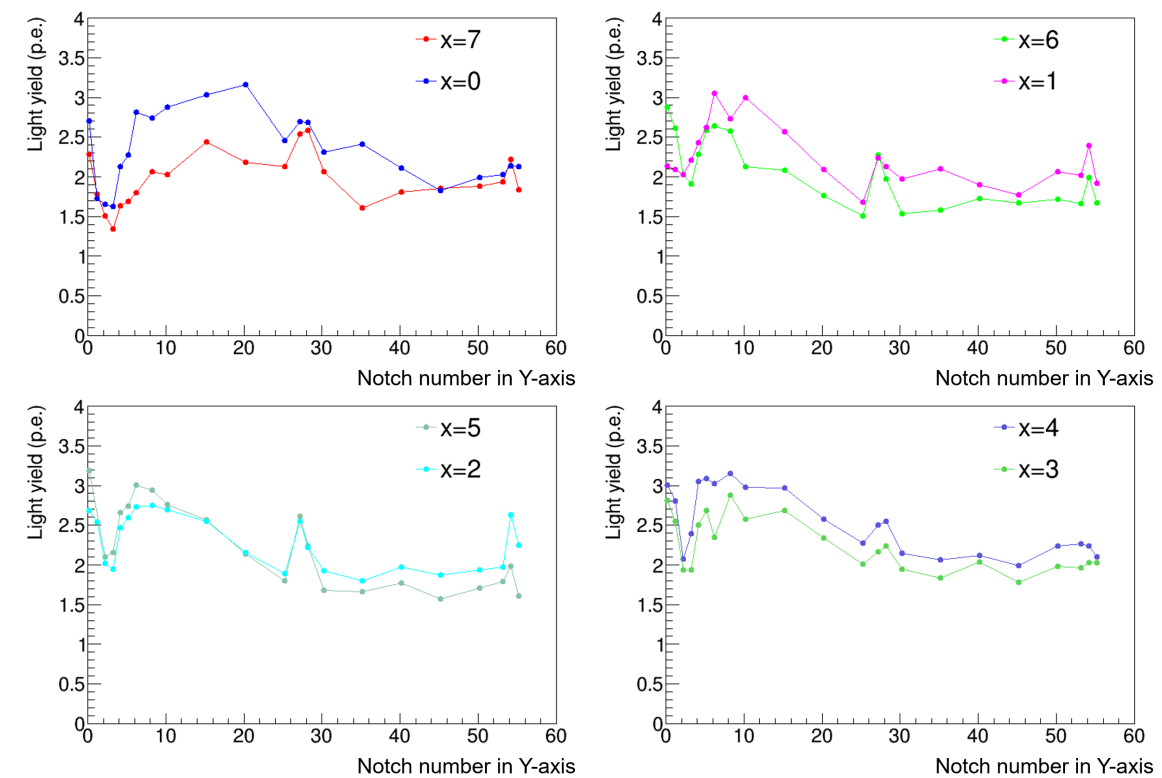


図 5.17 対称な列ごとの最終版 wall LGP モジュールの光量一様性の測定結果。縦軸は検出光子数であり、横軸は Y 軸方向 (導光板の長手方向) の Notch の番号である。左上は X=0,7、右上は X=1,6、左下は X=2,5、右下は X=3,4 である。

5.3 最終版 LGP モジュールのまとめ

4.2 節で述べたように、キャリブレーションシステムの要求は 1 cm 以内の薄い構造であることと、最大最小光量比が 3 程度の光量一様性で全ての MPPC に光を入射することである。

キャリブレーションシステムとして、導光板、拡散板、LED、コリメータ、ケース等から構成され、底面側に設置される Bottom LGP モジュールと、壁側に設置される Wall LGP モジュールを開発した。開発した LGP モジュールの厚みは 8 mm であり、要求を満たしている。光量一様性は Bottom LGP モジュールで最大最小光量比が 2.41、Wall LGP モジュールで最大最小光量比が 2.38 と要求性能を満たした。波長変換ファイバーの位置のずれを考慮した場合、光量一様性への影響が最も大きい場合でも最大最小光量比は 2.94^{*3}となる見込みであり、要求を満たす。

実機として開発した LGP モジュールがキャリブレーションシステムとしての要求を満たすことが確認できたため、この LGP モジュールの設計で、量産を進める計画である。

^{*3} 最大光量はそのまま、最小光量は水平方向のファイバーのずれ (1.0 mm) により 3.7% 減少し、かつ垂直方向のファイバーのずれ (0.5 mm) によりさらに 15% 減少すると仮定

第 6 章

結論と今後

T2K 実験は茨城県の J-PARC の加速器で大強度のニュートリノを生成、射出し、岐阜県のスーパーカミオカンデでニュートリノ振動後のニュートリノを観測する長基線加速器ニュートリノ振動実験である。現在は、主にニュートリノの CP 対称性の破れの検証に向けて、加速器のアップグレードによる統計量の増強と、前置検出器 ND280 のアップグレードによる系統誤差のさらなる削減を行う T2K-II 計画を進めている。

ND280 のアップグレードで新たに導入される Super-FGD はニュートリノの標的および飛跡検出器であり、約 1 cm 立方のシンチレータキューブを約 200 万個積み重ねた構造をしている。シンチレータキューブには 3 方向に波長変換ファイバーが通され、その片側の端面には光検出器 MPPC、もう片側にはキャリブレーションシステムが設置される。

Super-FGD はこれまでにない構造の挑戦的な検出器であるため、波長変換ファイバーの断裂や波長変換ファイバーと MPPC の接触不良などの予期せぬ問題が生じる懸念があり、運用開始までの各段階において検出器全体の健全性を確認する必要がある。また、Super-FGD では荷電粒子の運動量の測定や粒子識別に MPPC での検出光子数を用いるが、検出光子数の算出には長期間に渡って MPPC の増倍率の常時モニターし、較正することが必要となる。

キャリブレーションシステムは任意のタイミングで、波長変換ファイバーを介して全ての MPPC に LED からの光を入射する装置である。キャリブレーションシステムを検出器内部に設置することで、組立から運用開始までの各段階において迅速に検出器全体の健全性を確認することができ、MPPC の増倍率を長期間に渡ってモニターすることができる。キャリブレーションシステムの要求は厚みが 1 cm 以内の薄い構造であることと、最大最小光量比 3 程度の一様な光量を全ての MPPC に入射することである。

本研究では、導光板という表面に傷を付けたアクリル板を用いたキャリブレーションシステムを開発し、Super-FGD のキャリブレーションシステムとして正式に採用された。要求を満たすために、導光板、拡散板、LED、コリメータ、ケースなどの各構成要素を考案、設計、製作、評価と最適化などを行った。最終的に実機として開発したキャリブレーションシステムは厚みは 8 mm、最大最小光量比が 2.41 の光量一様性を持ち、要求を満たすことを確認した。

今後はキャリブレーションシステムの大量生産、品質確認、Super-FGD への取付を行う。大量

生産は 2021 年 4 月に開始し、約 2 か月を要する見込みである。その後、量産された LGP モジュールの品質確認システムの開発と、それを用いた品質検査を行う。最終的に Super-FGD へのインストールは 2022 年の 5 月ごろを予定している。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からご指導とご協力を頂きましたこと感謝申し上げます。東京都立大学の高エネルギー物理実験研究室でお世話になりました先生方には、研究室配属当初から研究に関して多くのことをご教授頂きました。指導教員である角野秀一先生には日頃から研究に関して多大なるご指導、本論文の添削やご助言に加え、研究発表や学びの機会など多大なるご支援を頂きました。日頃から研究に打ち込むことができ、充実した研究生生活を送ることができたのは角野先生のおかげです。深く感謝申し上げます。また、汲田哲郎先生と住吉孝行先生には本論文を含め、日頃の研究活動のなかで多くのご指導とご助言を頂きました。研究についてご相談したときは、いつも懇切丁寧に教えてくださり、ありがとうございました。千葉雅美先生、浜津良輔先生にも研究室での活動において大変お世話になりました。研究室が心地よく、日頃から何不自由なく研究を遂行することができたのも、先生方がいつも優しく接してくださったのおかげです。深く感謝申し上げます。

T2K 実験グループの方々からも研究に関して多くのご指導を頂きました。特に Super-FGD のグループでは KEK の松原綱之先生、小川智久先生、京都大学の市川温子先生、木河達也先生、東京大学の横山将志先生、岩本康之介先生には大変お世話になりました。とりわけ、松原先生には本研究の開始当初から数えきれない程ご相談をさせていただき、その都度多くのご指導を頂きました。日頃の研究を進め、多くのことを学び、研究を楽しみとすることができたのも松原先生のおかげです。深く感謝申し上げます。

研究室の先輩方である柿本さん、小西さん、為近さん、吉川さんには配属当初から1年間、様々なことを教えていただき、楽しい日々を送ることができました。栗田口さん、久世さん、小林さん、堀さんには2年間に渡る研究室活動の中で多くのことを学び、とても楽しく充実した日々を送らせていただきました。感謝申し上げます。後輩の安藤君、大島さん、朴君、渡辺君、岩城さん、片桐さん、本橋君とは研究室でともに過ごした時間は短いですが、楽しい日々を送らせていただきました。そして同期の鶴藤君と三宅君とは3年間、ともに研究に励み、多くの時間をともに過ごしてきました。二人でなければ、この3年間、こんなにも楽しい日々を送ることはできなかったと思います。改めて感謝申し上げます。

J-PARC では多くの方々にお世話になり、多くを学ばせていただきました。先輩方である芦田さん、平本さん、GioGio さん、安留さん、鈴木さん、藤田さん、栗林さん、小田川さん、松下さん、同期の江口君、小川さん、鞠谷君、谷君、和泉さん、片山さん、小幡君、本條君にはいつも温かく

接してくださり、楽しい日々を送ることができました。感謝申し上げます。

最後に、日頃から支え応援してくれる、かけがえのない大切な家族全員に深く感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。

付録 A

光学シミュレーション

導光板を用いたキャリブレーションシステムでは光を一様に分配することが求められ、より良い一様性を得るために光源や導光板の開発を行ってきた。光学シミュレーションを用いて 4.3.1 項で述べた様々な光源での光量一様性測定を再現するか確認を行った。まず初めに目的について述べた後、光学シミュレーションの方法とその結果について述べる。

A.1 光学シミュレーションの目的

光学シミュレーションの主な目的は導光板の試作機を用いた光量一様性測定をシミュレーションにおいても確認することである。特に、4.3.1 項では、光源によって光量一様性が大きく変化するという結果になり、その測定結果の傾向の確認を行った。

A.2 立体角計算型光学シミュレーション

導光板の特徴として、より良い一様性を示すために Notch を浅くするなどして多くの光を遠くまで届けることが重要である。したがって 1 つ 1 つの光子を追跡するシミュレーションの場合、ほとんどが Notch で散乱されず端面に放出されてしまうことになるため、多くの時間を要することが想定される。そのため、本研究では追跡型のシミュレーションではなく、後述する立体角を計算することで各 Notch にあたるの光量を算出するシミュレーションを作成した。簡易的なシミュレーションであるために、考慮できていない点なども多く存在しているが、目的にある測定結果の傾向を確認するには十分である。以降、シミュレーションの方法や考慮している点、できていない点について述べた後、その結果について言及する。

A.2.1 方法

図 A.1 は導光板の端面、つまり LED の視点から見た導光板内部の写真である。LED の視点から見た場合、導光板に設置されている Notch は導光板の表面で反射することで、各方向に Notch が映っていることが確認できる。この立体角計算型光学シミュレーションでは、図 A.1 のように、

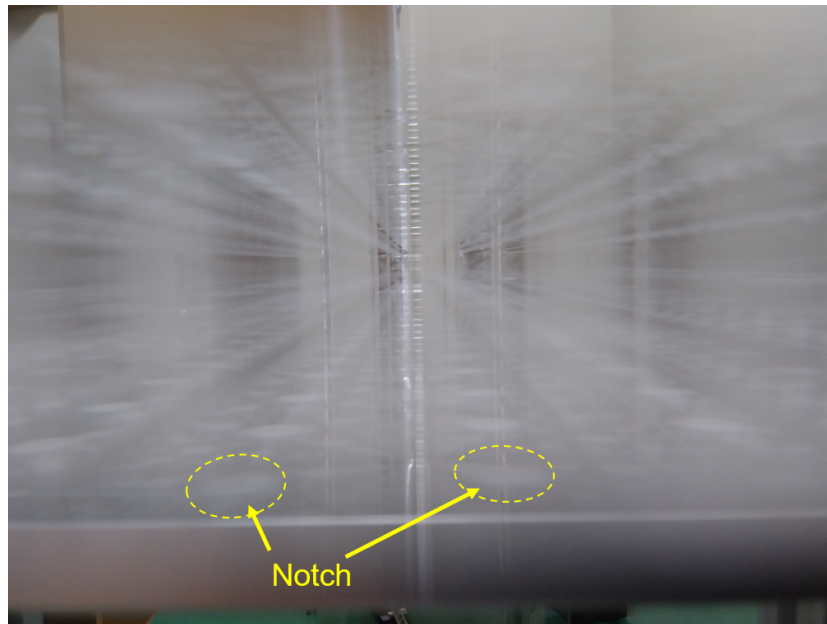


図 A.1 導光板の端面から見た導光板内部の写真である。Notch で散乱された光が導光板の表面で反射することで、各方向に Notch が見えることが確認できる。

LED の視点で見た場合の Notch(仮 Notch と呼称) の位置を計算し、各 LED から仮 Notch に対して重みづけした光量を計算することで、導光板に設置されている Notch の 1 つ 1 つにあたる光量を計算する。

図 A.2 にこのシミュレーションで仮 Notch の光量の重みづけとして考慮した要素を示した。これらの要素を仮 Notch に対して全て計算を行い、それぞれの仮 Notch の光量を導光板に設置されている元の Notch に足し合わせることで、Notch の光量を計算している。

(1) の LED の指向性は LED の仕様書から読み取った [84]。なお、LED の大きさは考慮しておらず、設置箇所の 1 点から光が放出されている。(2) の導光板の端面から入射する光の屈折では、屈折による光の進行方向の計算と導光板内部に入射する光量の計算^{*1}を行った。(3) の導光板の表面での反射は、仮 Notch の反射回数とその位置から反射角を計算し、(2) と同様にフレネルの式を用いて反射率を計算した。(4) の仮 Notch の立体角の計算は厳密な値ではなく、LED から見た Notch が円形であると仮定して計算した立体角である。

このシミュレーションで考慮できていない点は、アクリル板による光の吸収による光量の減衰、Notch での散乱による光の減衰と進行方向の変化、実際の LED の形状と放出される箇所である。

^{*1} 反射、屈折に伴う反射率、透過率の計算にはフレネルの式を用いたが、偏光は考慮しておらず、P 波と S 波の二乗平均から反射率と透過率を計算した。

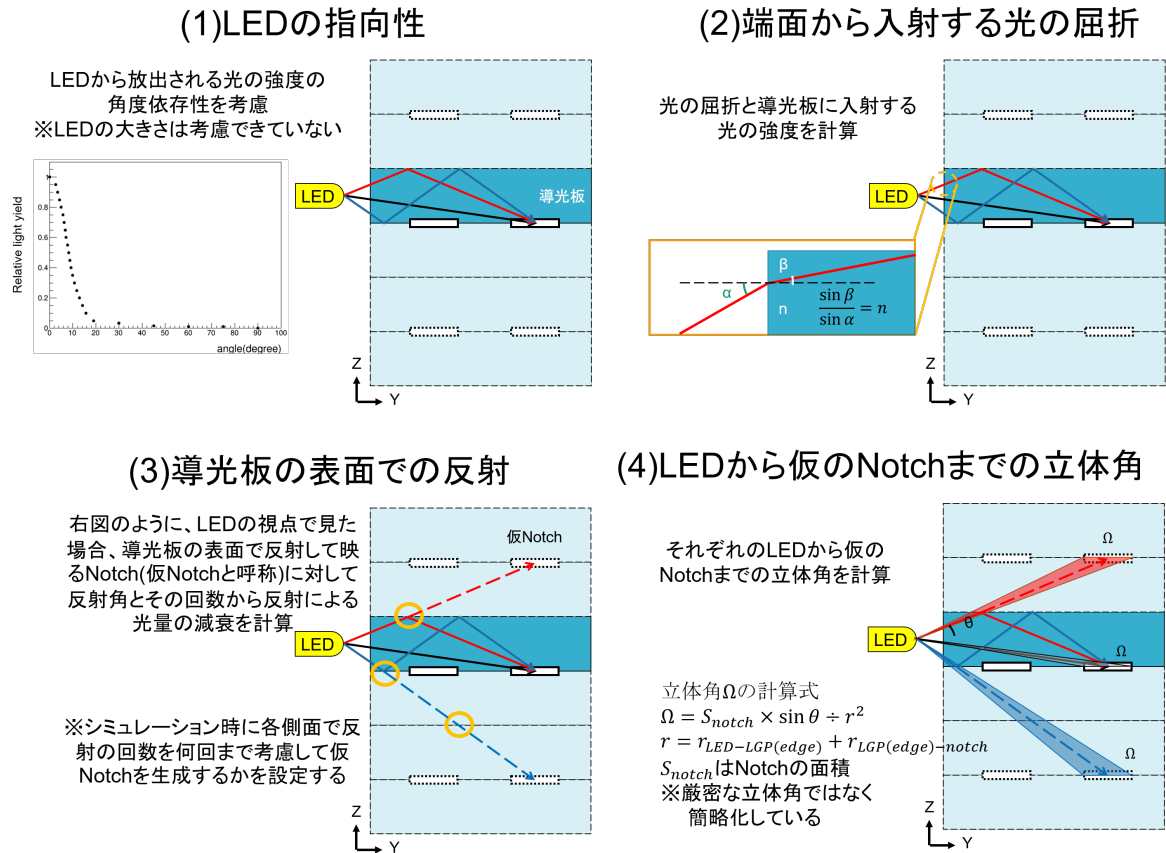


図 A.2 立体角計算型光学シミュレーションの光量の重みづけの要素。

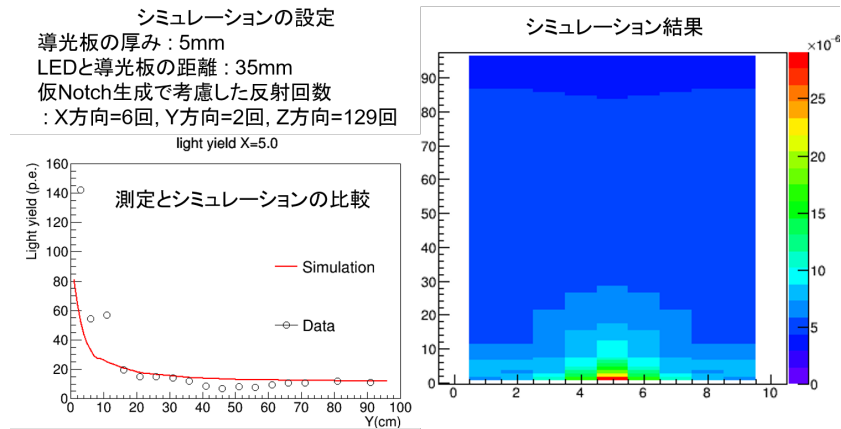
A.2.2 結果

図 A.3 は 4.3.1 項で述べた単一型 LED の on-notch の結果と、4.3.2 項で述べた 3 mm 厚の導光板と配列型 LED を用いた結果である。

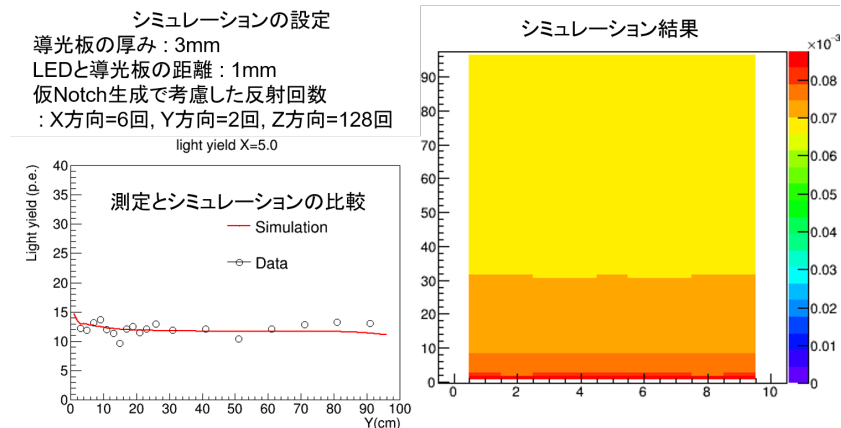
上段は on-notch の単一型 LED、中段は off-notch の配列型 LED を導光板との距離を 1 mm に設置した場合、下段は off-notch の配列型 LED を導光板との距離を 35 mm に設置した場合の結果である。それぞれの右の 2 次元ヒストグラムはシミュレーション結果であり、それぞれのビンが 1 つの Notch に対応しており、縦軸は相対光量である。左下のグラフは測定によって得られた結果とシミュレーション結果の比較である。実測での測定結果とシミュレーション結果を比較する際は、シミュレーション結果を χ^2 が最小になるように定数倍した結果を比較している。実測とシミュレーションの結果は概ね一致しているという結果となった。

4.3.1 項と 4.3.2 項でも確認したが、このシミュレーション結果により、配列型 LED を off-notch を導光板に近づけることで光量一様性を改善することができることを確認した。

on-notchの単一型LED



off-notchの配列型LED(導光板とLEDの距離が1 mm)



off-notchの配列型LED(導光板とLEDの距離が35 mm)

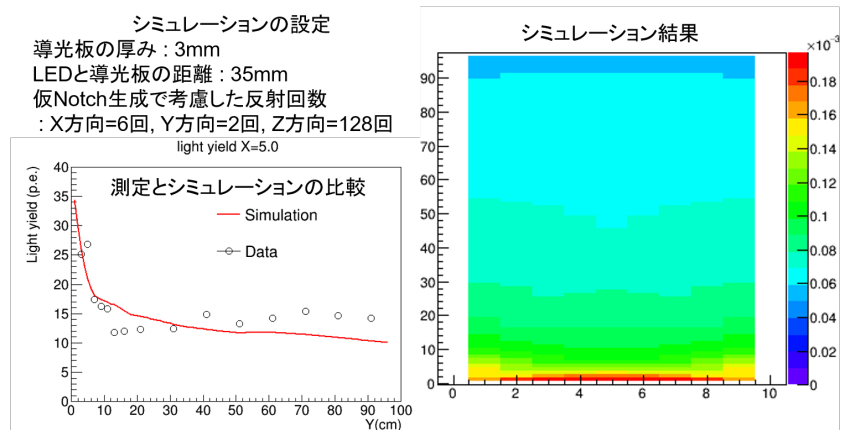


図 A.3 上段は on-notch の単一型 LED、中段は off-notch の配列型 LED を導光板との距離を 1 mm に設置した場合、下段は off-notch の配列型 LED を導光板との距離を 35 mm に設置した場合の結果である。それぞれの右の 2 次元ヒストグラムはシミュレーション結果であり、それぞれのビンが 1 つの Notch に対応しており、縦軸は相対光量である。左下のグラフは測定によって得られた結果とシミュレーション結果の比較である。

付録 B

垂直方向の波長変化ファイバーのずれへの未採用の対応策

B.1 微細多穴プレート

B.1.1 概念

4.6.1 項で述べたように、波長変換ファイバーは垂直方向に 2 mm 程度ずれることで、光量が約 60% 低下するという結果となった。これを解消するため、導光板からの光を垂直方向のみにすることで、波長変換ファイバーが垂直にずれても光量の減衰を抑制することを試みた。垂直方向のみの光にするために、微細多穴プレートを作成し、導光板の上に設置することで評価を行った。図 B.1 に微細多穴プレートの写真とその概念図を示した。

微細多穴プレートは文字通り多くの微細な穴が空けられた黒いアクリル板であり、レーザー加工機で作成した。Notch で散乱された光のうち、斜めの光は黒いアクリル板によって吸収され微細多穴プレートを通過することができないのに対して、垂直方向の光は穴の側面にあたることなく微細多穴プレートを通過することができる。これを用いることで垂直方向の光のみを通過させることが目的である。

測定のセットアップと解析方法は 4.6.1 項と同様である。

B.1.2 評価

図 B.2 に微細多穴プレートを用いた波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量変化の測定セットアップとその結果である。右の結果を見てもわかるように、約 10 mm 程度ファイバーが垂直方向にずれても光量減少が半分程度に抑えられていることが確認できる。

この結果から、微細多穴プレートを用いることで波長変換ファイバーの垂直方向のずれによる光量の減少を緩和することができることがわかった。

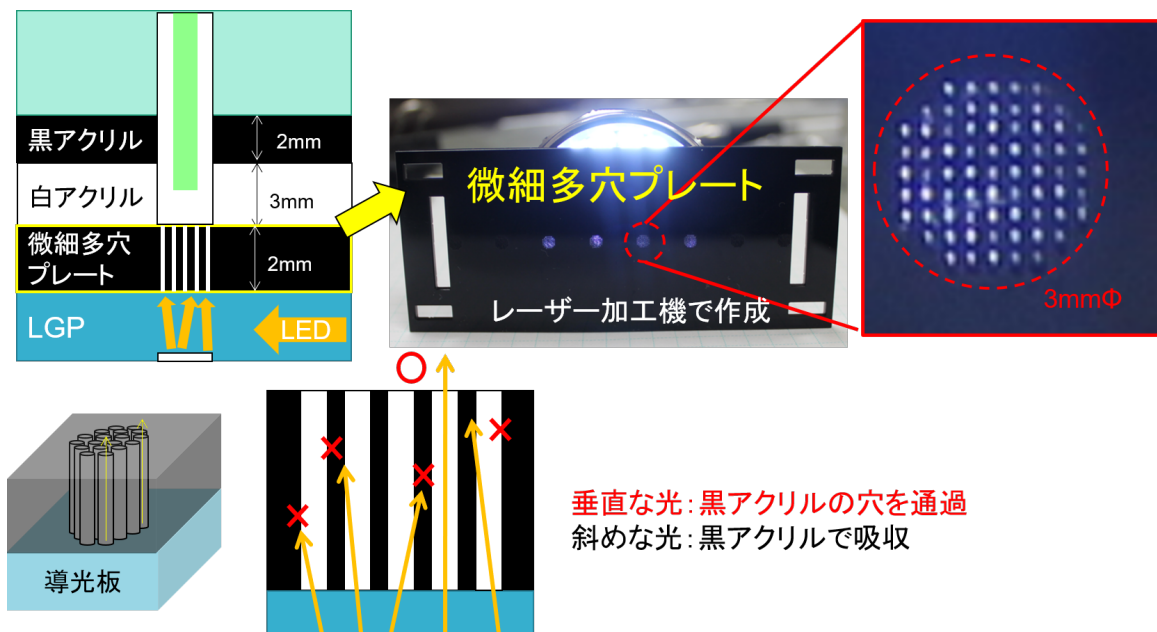


図 B.1 微細多穴プレートの写真と概念図。左上が微細多穴プレートや導光板と Notch の位置関係を示した図であり、右上が微細多穴プレートの写真である。下に示した図は微細多穴プレートによって垂直方向の光のみが通過する概念図を示した。

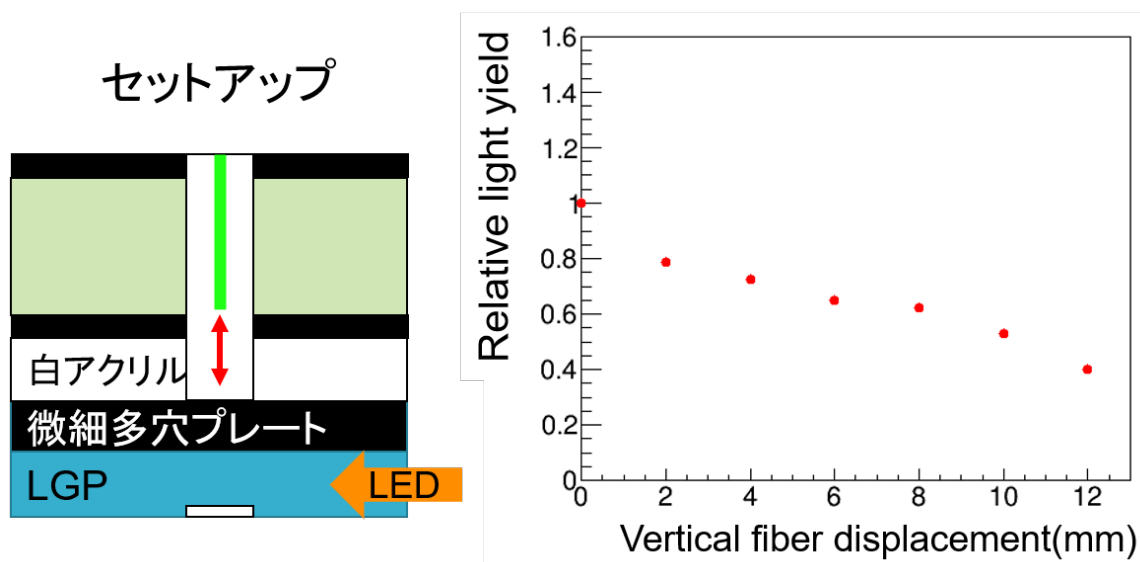


図 B.2 微細多穴プレートを用いた波長変換ファイバーの垂直方向のずれの光量変化の測定セットアップと結果である。約 10 mm 程度ずれても光量減少が半分程度に抑えられていることがわかる。

B.1.3 問題点

微細多穴プレートの問題点を図 B.3 に示した。

微細多穴プレートは垂直方向の光のみを通過させることができるが、その一方で図 B.3 の右側に

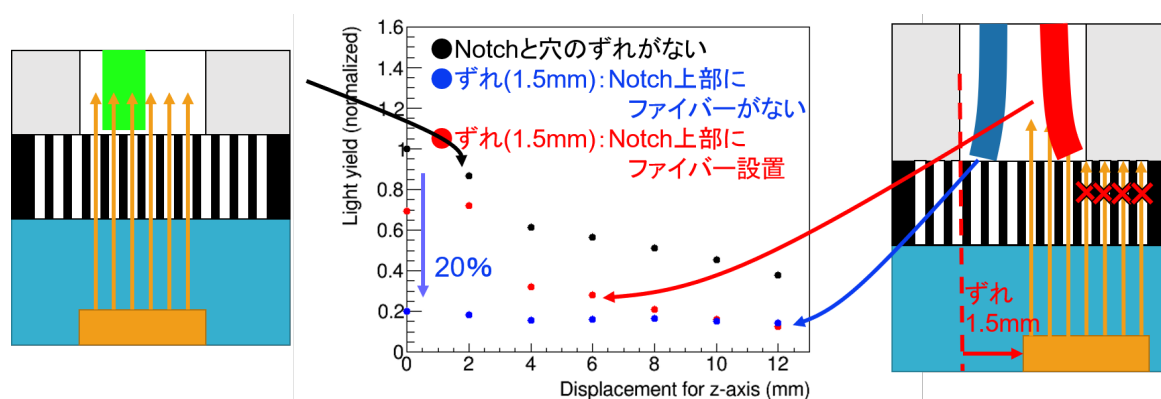


図 B.3 微細多穴プレートの問題点と測定結果。黒は Notch の上部に波長変換ファイバーの位置する 3 mm ϕ の穴が設置された場合。赤と青は Notch とファイバーの位置する 3 mm ϕ の穴が 1.5 mm ずれた場合の測定結果である。赤は Notch の上部にファイバーが来るようにし、青はその反対側の Notch がない箇所の上部に端面を設置した測定結果である。Notch とファイバーの位置する穴がずれた場合、光量が約 20% まで減少することが確認された。

示したように、Notch とファイバーの位置する穴がずれてしまった場合には、ファイバーの位置する 3 mm ϕ の穴に入る光が減少してしまうことが懸念される。図 B.3 の黒は Notch の上部に波長変換ファイバーの位置する 3 mm ϕ の穴が設置された場合であり、赤と青は Notch とファイバーの位置する 3 mm ϕ の穴が 1.5 mm ずれた場合の測定結果である。また、赤は Notch の上部にファイバーが来るようにし、青はその反対側の Notch がない箇所の上部に端面を設置した測定結果である。黒と青の結果を比較すると、Notch とファイバーの位置する穴がずれた場合で、光量が約 20% まで減少することが確認された。つまり、図 B.3 の結果から、微細多穴プレートは垂直方向の波長変換ファイバーのずれを緩和することはできるが、Notch とファイバーが位置する穴がずれた場合には光量を大きく減少させることがわかった。

この問題点により、微細多穴プレートは使用しない方向となった。

B.2 光量調節フィルター

B.2.1 概要

波長変換ファイバーのずれは波長変換ファイバーの切断精度と、Super-FGD の自重による歪みの 2 種類の原因が考えられる。Super-FGD の自重による歪みは、ND280 内部に導入される前に、測定やシミュレーションが行われているため、事前に把握することができる。

光量調節フィルターはこのような事前に波長変換ファイバーのずれがわかる場合に、拡散板の上に設置すること対処することが可能である。光量調節フィルターとしては自由に調節量を変化することができること、さらにはキャリブレーションシステムの厚みを増やさない薄い構造である必要がある。

光量調節フィルターとして OHP フィルムを検討した。OHP フィルムは厚みが 0.1 mm 程度のポリエステルでできた透明のフィルムであり、インクジェットプリンター等で自在に模様を印刷することができる。この OHP フィルムに印刷する模様の濃さを変更することにより、光量の調節を行う。

図 B.4 に OHP フィルムの写真と設置位置の概念図を示した。いくつかの濃さの模様を印刷した

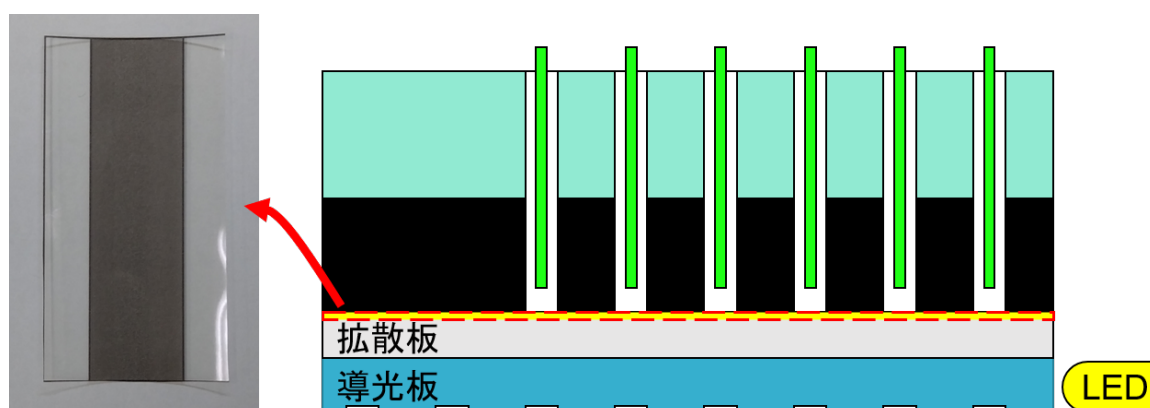


図 B.4 OHP フィルムの写真と設置位置の概念図

OHP フィルムを作成し、拡散板上部に設置し、光量の調節量を確認した。セットアップと解析方法は 4.4.3 項と同様である。

B.2.2 評価

図 B.5 に測定に使用した OHP フィルムの写真とその測定結果を示した。OHP フィルムに印刷する模様をグレースケールで作成し、その RGB の値を変更することで濃さを変更した。

測定結果としては、OHP フィルムに印刷する模様の濃さ変更することで、相対光量として約 0.1~1.0 の光量調節が可能であることを確認した。

Super-FGD の自重による歪みの予測値である約 3 mm の波長変換ファイバーの垂直方向のずれにより、光量は 20% 程度にまで減少するが、測定結果から OHP フィルム調節可能領域の方が大きく、3 mm 程度の波長変換ファイバーのずれに対しては対処可能であることを確認した。

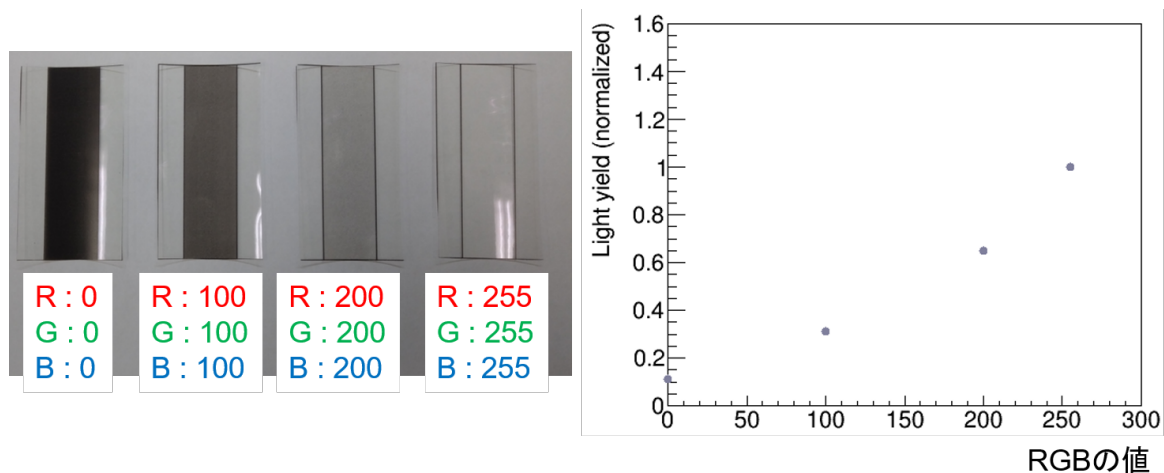


図 B.5 左が測定に使用した OHP フィルムの写真であり、右が測定結果である。右のグラフの横軸は OHP フィルム印刷した模様の RGB の値である。縦軸は最大光量で規格化した相対光量である。

B.2.3 問題点

OHP フィルムは光によって経年劣化することが確認されており、長期間の使用した場合には、光の透過率を悪化させることが懸念される。キャリブレーションシステムは長期間に渡って使用され、かつ ND280 の内部に導入後は基本的に取り出さないため、交換することができない。この問題点のため、OHP フィルムを用いた光量調節フィルムは使用しないこととなった。

B.3 スリット型導光板

B.3.1 概要

波長変換ファイバーの側面から LED の光を入射させることで、ファイバーの垂直方向のずれで光量が変わらない構造を持つスリット型導光板を考案し、その光量一様性を評価した。スリット型導光板は透明なアクリル板に穴を空け、波長変換ファイバーが導光板を貫通する形状をしており、4.1.1 項で述べた導光板とは異なる形状とは異なる。

図 B.6 に製作したスリット型導光板の概念図を示した。スリット型導光板には台形と長方形を結合した形の穴を空け、そこに波長変換ファイバーを通す。台形部分では反射や屈折により光の進行方向が変更され一部はファイバーに入射する。一方で、長方形部分では光が反射し、遠くまで LED に光を伝達する役割を担う。

図 B.7 は製作したスリット型導光板の写真である。

光量一様性の測定セットアップと解析方法は 4.4.3 項と基本的に同様であるが、スリット型導光

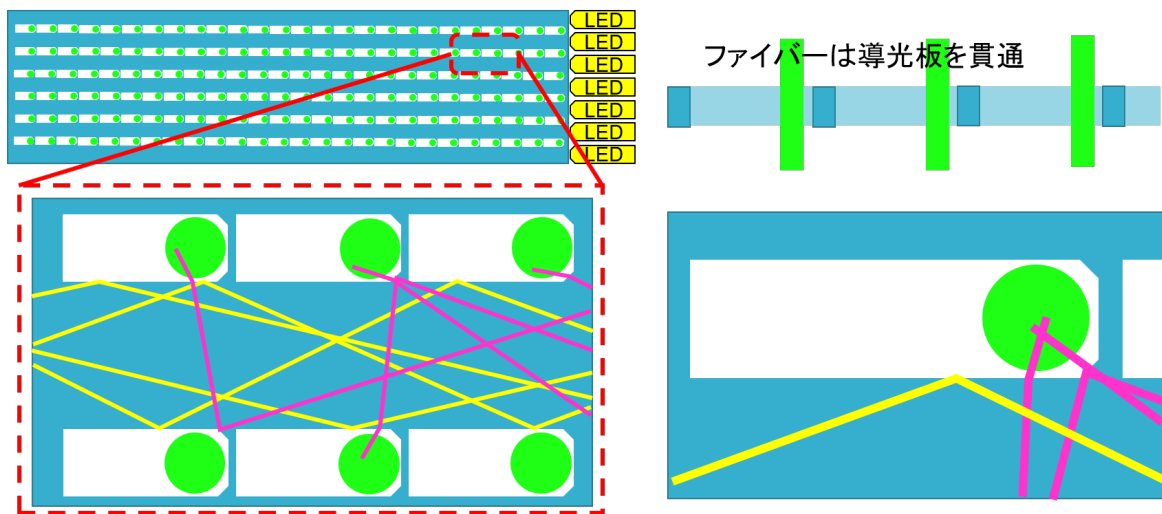


図 B.6 スリット型導光板の概念図。台形と長方形を結合した形の穴を開ける。台形部分では反射や屈折により光の進行方向が変更され一部はファイバーに入射する。長方形部分では光を遠くまで反射させる役割を担う。

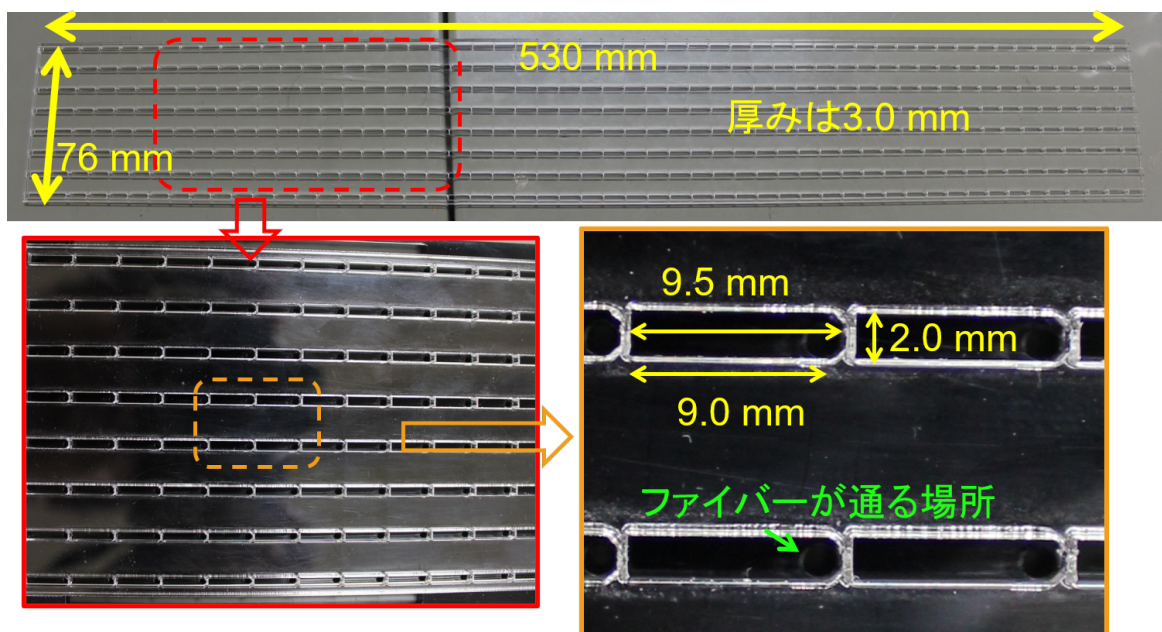


図 B.7 製作したスリット型導光板の写真

板の上下を 1 mmφ の穴が空いた黒いアクリル板を設置し測定した。。

B.3.2 評価と問題点

図 B.8 にスリット型導光板の光量一様性測定のセットアップと結果を示した。右のグラフからもわかるように、LED 設置箇所から約 10 cm 程度は光量減衰が大きく、光量一様性は悪いという結果となった。

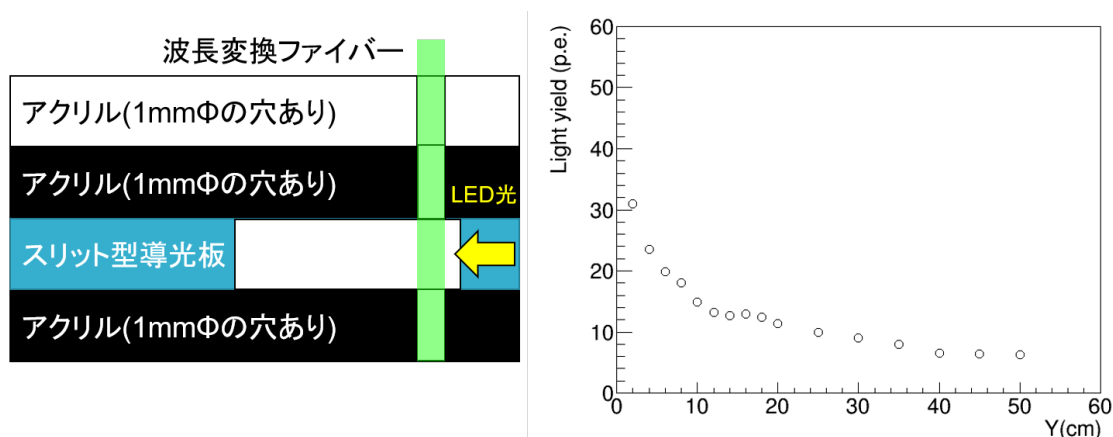


図 B.8 左がスリット型導光板の光量一様性測定のセットアップであり、右のグラフが結果である。LED 設置箇所から約 10 cm 程度は光量減衰が大きく、光量一様性は悪いという結果となった。

問題点としては光量一様性が悪いことに加えて、導光板に多く穴を空けており、Super-FGD の自重による歪みなどで力が加わると破損してしまう可能性もある。したがって、スリット型導光板は使用しないこととなった。

LGP モジュールの設計図面



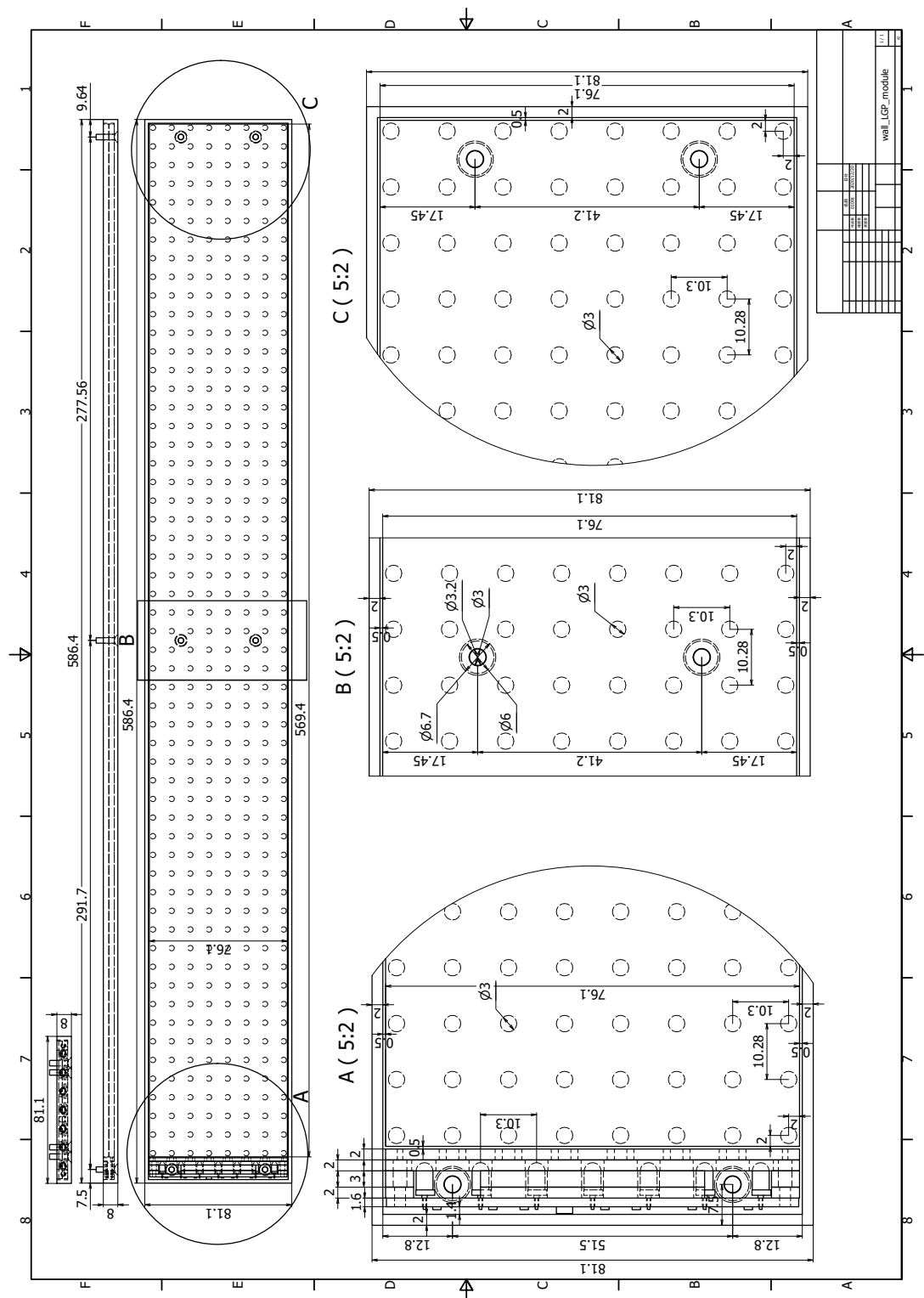


図 C.3 Wall LCP モジュールの図面

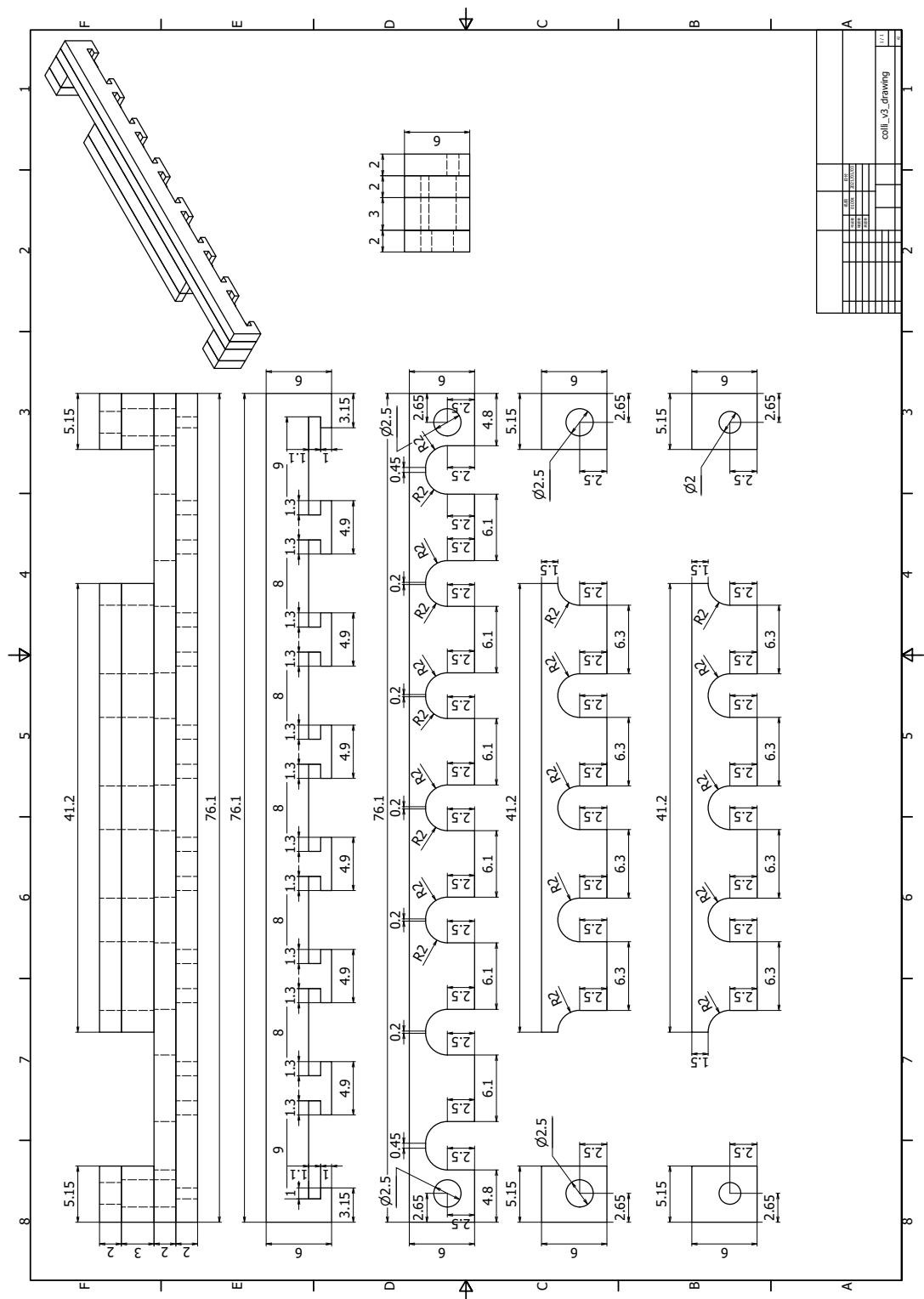


図 C.4 コリメータの図面

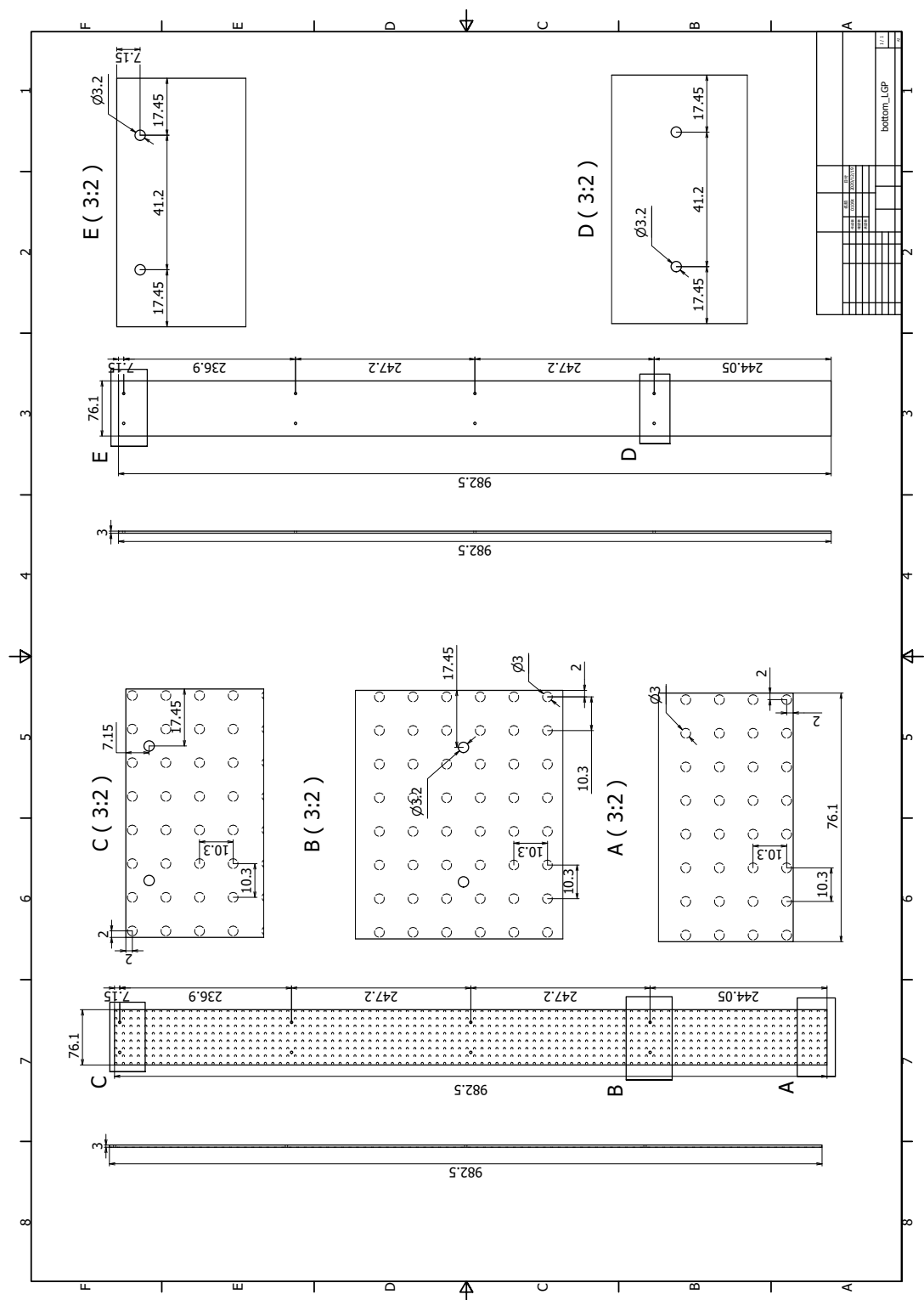


図 C.5 Bottom LGP モジュールの導光板と拡散板の図面

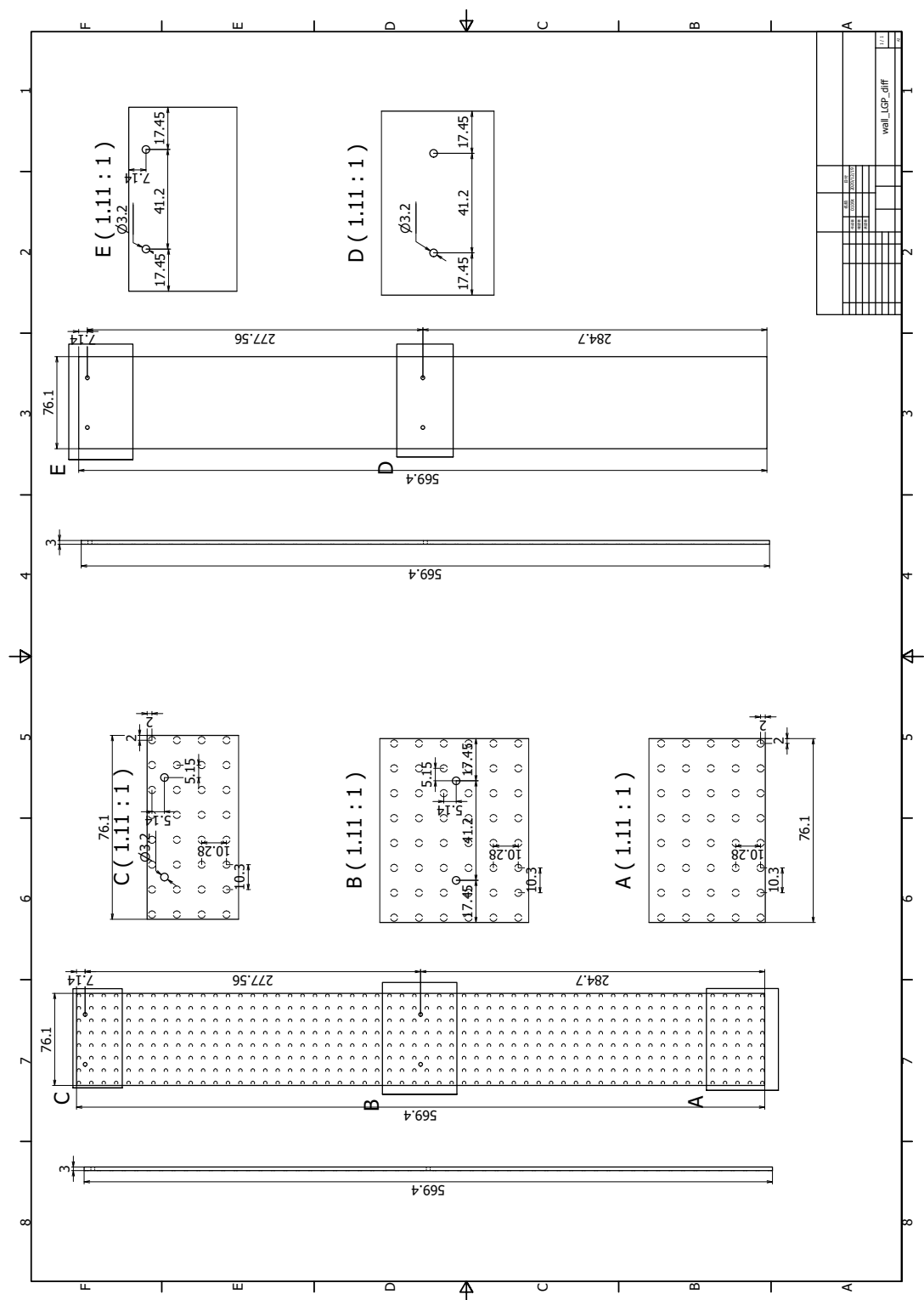


図 C.6 Wall LGP モジュールの導光板と拡散板の図面

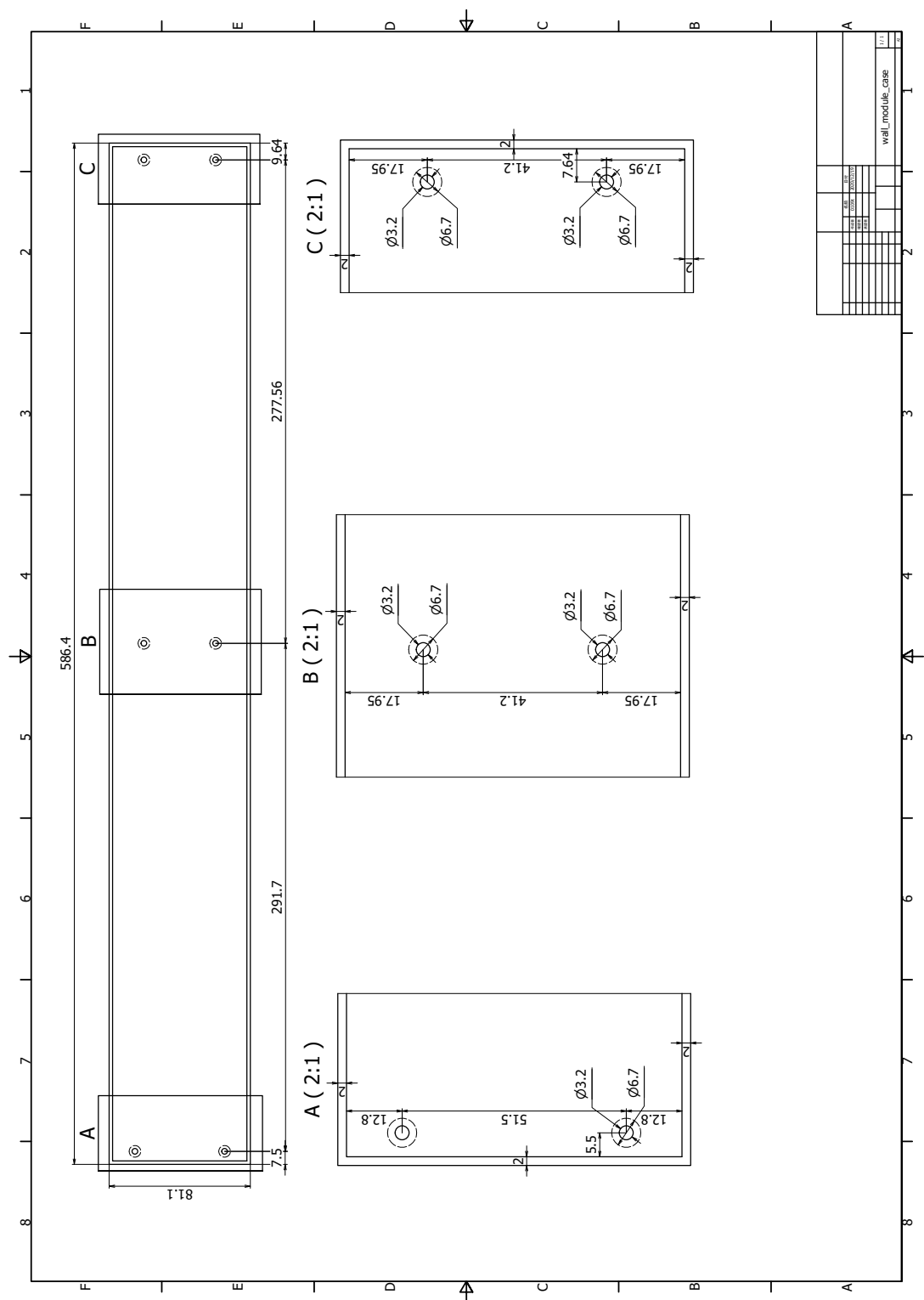


図 C.8 Wall LGP モジュールのケースの図面

参考文献

- [1] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 81, pp. 1562–1567, Aug 1998.
- [2] W. Pauli. Dear radioactive ladies and gentlemen. *Phys. Today*, Vol. 31N9, p. 27, 1978.
- [3] 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.
- [4] 山田作衛, 相原博昭, 岡安弘, 坂井典佑, 西川公一郎. 素粒子物理学ハンドブック. 朝倉書店, 2010.
- [5] Guido Fantini, Andrea Gallo Rosso, Francesco Vissani, and Vanessa Zema. *Introduction to the Formalism of Neutrino Oscillations*, Vol. 28, pp. 37–119. 2018.
- [6] Lino Miramonti. Neutrino Physics and Astrophysics with the JUNO Detector. *Universe*, Vol. 4, No. 11, p. 126, 2018.
- [7] L. Wolfenstein. Neutrino oscillations in matter. *Phys. Rev. D*, Vol. 17, pp. 2369–2374, May 1978.
- [8] S.P. Mikheyev and A.Yu. Smirnov. Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos. *Sov. J. Nucl. Phys.*, Vol. 42, pp. 913–917, 1985.
- [9] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Vol. 2020, No. 8, 08 2020. 083C01.
- [10] Raymond Davis, Don S. Harmer, and Kenneth C. Hoffman. Search for neutrinos from the sun. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 20, pp. 1205–1209, May 1968.
- [11] John N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, and Sarbani Basu. Solar models: Current epoch and time dependences, neutrinos, and helioseismological properties. *The Astrophysical Journal*, Vol. 555, No. 2, pp. 990–1012, jul 2001.
- [12] S. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Solar ^8B and hep neutrino measurements from 1258 days of super-kamiokande data. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 86, pp. 5651–5655, Jun 2001.
- [13] Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration). Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the sudbury neutrino observatory. *Phys.*

- Rev. Lett.*, Vol. 87, p. 071301, Jul 2001.
- [14] K. Eguchi et al. (KamLAND Collaboration). First results from kamland: Evidence for reactor antineutrino disappearance. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 90, p. 021802, Jan 2003.
 - [15] S. Fukuda et al. The super-kamiokande detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 501, No. 2, pp. 418 – 462, 2003.
 - [16] G. Bellini et al. Final results of borexino phase-i on low-energy solar neutrino spectroscopy. *Phys. Rev. D*, Vol. 89, p. 112007, Jun 2014.
 - [17] K.S. Hirata et al. Observation of a small atmospheric ν_μ/ν_e ratio in kamiokande. *Physics Letters B*, Vol. 280, No. 1, pp. 146 – 152, 1992.
 - [18] M. Ageron et al. Antares: The first undersea neutrino telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 656, No. 1, pp. 11 – 38, 2011.
 - [19] M. G. Aartsen et al. ev-scale sterile neutrino search using eight years of atmospheric muon neutrino data from the icecube neutrino observatory. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 125, p. 141801, Sep 2020.
 - [20] Y. Abe et al. (The Double Chooz collaboration). Improved measurements of the neutrino mixing angle θ_{13} with the double chooz detector. *Journal of High Energy Physics*, Vol. 2014, No. 10, p. 86, Oct 2014.
 - [21] F. P. An et al. (Daya Bay Collaboration). Measurement of the reactor antineutrino flux and spectrum at daya bay. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 116, p. 061801, Feb 2016.
 - [22] S. H. Seo et al. (RENO Collaboration). Spectral measurement of the electron antineutrino oscillation amplitude and frequency using 500 live days of reno data. *Phys. Rev. D*, Vol. 98, p. 012002, Jul 2018.
 - [23] Youngju Ko et al. NEOS experiment. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1216, p. 012004, apr 2019.
 - [24] I. Alekseev et al. Search for sterile neutrinos at the danss experiment. *Physics Letters B*, Vol. 787, pp. 56 – 63, 2018.
 - [25] N. Allemandou et al. The STEREO experiment. *Journal of Instrumentation*, Vol. 13, No. 07, pp. P07009–P07009, jul 2018.
 - [26] J. Ashenfelter et al. The prospect reactor antineutrino experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 922, pp. 287 – 309, 2019.
 - [27] A. P. Serebrov et al. First observation of the oscillation effect in the neutrino-4 experiment on the search for the sterile neutrino. *JETP Letters*, Vol. 109, No. 4, pp. 213–221, Feb 2019.
 - [28] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Evidence of electron neutrino appearance in a muon

- neutrino beam. *Phys. Rev. D*, Vol. 88, p. 032002, Aug 2013.
- [29] M.H. Ahn, et al. Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment. *Phys. Rev. D*, Vol. 74, p. 072003, 2006.
 - [30] N. Agafonova, et al. Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS Neutrino Beam. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 120, No. 21, p. 211801, 2018. [Erratum: *Phys.Rev.Lett.* 121, 139901 (2018)].
 - [31] Geoffrey B. Mills. Neutrino oscillation results from lsnd. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 66, No. 1, pp. 382 – 386, 1998. Proceedings of the XVI Workshop on Weak Interactions and Neutrinos.
 - [32] B. Armbruster et al. Upper limits for neutrino oscillations $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ from muon decay at rest. *Phys. Rev. D*, Vol. 65, p. 112001, Jun 2002.
 - [33] K. Abe et al. (T2K Collaboration). The t2k experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 659, No. 1, pp. 106 – 135, 2011.
 - [34] M. A. Acero et al. First measurement of neutrino oscillation parameters using neutrinos and antineutrinos by nova. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 123, p. 151803, Oct 2019.
 - [35] J. A. Formaggio and G. P. Zeller. From ev to eev: Neutrino cross sections across energy scales. *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 84, pp. 1307–1341, Sep 2012.
 - [36] K. Abe et al. (The T2K Collaboration). Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the t2k experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector. *Phys. Rev. D*, Vol. 96, p. 092006, Nov 2017.
 - [37] A. Gil, J. Nieves, and E. Oset. Many-body approach to the inclusive (e, e') reaction from the quasielastic to the Δ excitation region. *Nuclear Physics A*, Vol. 627, No. 4, pp. 543 – 598, 1997.
 - [38] R. Shneor et al. (Jefferson Lab Hall A Collaboration). Investigation of proton-proton short-range correlations via the $^{12}\text{C}(e, e' pp)$ reaction. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 99, p. 072501, Aug 2007.
 - [39] J. Nieves, I. Ruiz Simo, and M. J. Vicente Vacas. Inclusive charged-current neutrino-nucleus reactions. *Phys. Rev. C*, Vol. 83, p. 045501, Apr 2011.
 - [40] M. Martini, M. Ericson, and G. Chanfray. Neutrino quasielastic interaction and nuclear dynamics. *Phys. Rev. C*, Vol. 84, p. 055502, Nov 2011.
 - [41] D. Casper. The nuance neutrino physics simulation, and the future. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, Vol. 112, No. 1, pp. 161 – 170, 2002.
 - [42] <https://j-parc.jp/c/for-researchers/accelerators.html>.
 - [43] High intensity Proton Accelerator Project Team. Accelerator technical design report for high-intensity proton accelerator facility project, j-parc. Mar 2003.
 - [44] Susumu Igarashi. Accelerator based neutrino experiments t2k j-parc. In *Proceedings of*

- the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug 2016.
- [45] 内藤 富士雄. J-PARC 加速器の概要. http://accwww2.kek.jp/oho/OH0txt/OH0-2018/01_Naito%20Fujio_181004.pdf.
 - [46] <https://j-parc.jp/c/facilities/accelerators/mr.html>.
 - [47] T. Nakaya and K. Nishikawa. Long baseline neutrino oscillation experiments with accelerators in japan. *Eur. Phys. J. C*, Vol. 80, No. 344, Apr 2020.
 - [48] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Measurements of the t2k neutrino beam properties using the ingrid on-axis near detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 694, pp. 211 – 223, 2012.
 - [49] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the t2k experiment with 6.6×10^{20} protons on target. *Phys. Rev. D*, Vol. 91, p. 072010, Apr 2015.
 - [50] S. Assylbekov et al. The t2k nd280 off-axis pi – zero detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 686, pp. 48 – 63, 2012.
 - [51] I. Giomataris et al. Micromegas in a bulk. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 560, No. 2, pp. 405 – 408, 2006.
 - [52] N. Abgrall et al. Time projection chambers for the t2k near detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 637, No. 1, pp. 25 – 46, 2011.
 - [53] D Allan et al. The electromagnetic calorimeter for the t2k near detector ND280. *Journal of Instrumentation*, Vol. 8, No. 10, pp. P10019–P10019, oct 2013.
 - [54] S. Aoki et al. The t2k side muon range detector (smrd). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 698, pp. 135 – 146, 2013.
 - [55] Pintaudi Giorgio. T2K-WAGASCI: First physics run of the WAGASCI-BabyMIND detector with full setup. *PoS, Vol. LeptonPhoton2019*, p. 142, 2019.
 - [56] N. Truong et al. Technical Design Report (TDR):Study of neutrino-nucleus interaction at around 1 GeV using cuboid lattice neutrino detector, WAGASCI, muon range detectors and magnetized spectrometer, Baby-MIND, at J-PARC neutrino monitor hall (E69, WAGASCI/Baby-MIND).
 - [57] A. Hiramoto and Y. Suzuki et al. First measurement of $\bar{\nu}_\mu$ and ν_μ charged-current inclusive interactions on water using a nuclear emulsion detector. *Phys. Rev. D*, Vol. 102, p. 072006, Oct 2020.
 - [58] M. Tanaka et al. (The Super-Kamiokande Collaboration). Search for proton decay into

- three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the super-kamiokande. *Phys. Rev. D*, Vol. 101, p. 052011, Mar 2020.
- [59] Y. Itow et al. The jhf-kamioka neutrino project, 2001.
 - [60] K. Abe et al. (T2K Collaboration). Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations, 2019.
 - [61] Patrick Dunne. Latest neutrino oscillation results from t2k, Jul 2020.
 - [62] Ko Abe, et al. Proposal for an Extended Run of T2K to 20×10^{21} POT. 9 2016.
 - [63] K. Abe, et al. J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report. 8 2019.
 - [64] K. Abe et al. T2K ND280 Upgrade – Technical Design Report, 2019.
 - [65] Yoshinari Hayato. A neutrino interaction simulation program library NEUT. *Acta Phys. Polon. B*, Vol. 40, pp. 2477–2489, 2009.
 - [66] <http://uniplast-vladimir.com/>.
 - [67] T. Adam et al. The opera experiment target tracker. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 577, No. 3, pp. 523 – 539, 2007.
 - [68] Yu.G. Kudenko, L.S. Littenberg, V.A. Mayatski, O.V. Mineev, and N.V. Yershov. Extruded plastic counters with wls fiber readout. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 469, No. 3, pp. 340 – 346, 2001.
 - [69] <http://kuraraypsf.jp/pdf/all.pdf>.
 - [70] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052j.pdf.
 - [71] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/03_handbook.pdf.
 - [72] Claudio (LPNHE Paris) Giganti, Thorsten (IFAE Barcelona) Lux, and Masashi (University of Tokyo) Yokoyama. NP07: ND280 Upgrade project. Technical Report CERN-SPSC-2020-008. SPSC-SR-267, CERN, Geneva, Mar 2020.
 - [73] https://indico.cern.ch/event/192695/contributions/353181/attachments/277133/387721/Citiroc_ASIC.pdf.
 - [74] 栗田口唯人. T2K 実験次世代前置検出器 SuperFGD のビーム試験及びシミュレーションによる性能評価. 修士論文, 首都大学東京大学院 理学研究科 物理学専攻, 2020.
 - [75] Davide Sgalaberna. The t2k nd280 upgrade, Jul 2020.
 - [76] Chapter 2 - ultrasonic welding. In Michael J. Troughton, editor, *Handbook of Plastics Joining (Second Edition)*, pp. 15 – 35. William Andrew Publishing, Boston, second edition edition, 2009.
 - [77] C. Andreopoulos et al. The genie neutrino monte carlo generator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 614, No. 1, pp. 87 – 104, 2010.
 - [78] A Blondel, M Yokoyama, and M Zito. The T2K-ND280 upgrade proposal. Technical

- Report CERN-SPSC-2018-001. SPSC-P-357, CERN, Geneva, Jan 2018. This proposal is the follow-up of the Expression of Interest EOI-15 submitted to SPSC in January 2017.
- [79] L. Munteanu, S. Suvorov, S. Dolan, D. Sgalaberna, S. Bolognesi, S. Manly, G. Yang, C. Giganti, K. Iwamoto, and C. Jesús-Valls. New method for an improved antineutrino energy reconstruction with charged-current interactions in next-generation detectors. *Phys. Rev. D*, Vol. 101, p. 092003, May 2020.
 - [80] Jiri Kvasnicka and Ivo Polak. Led calibration systems for calice hadron calorimeter. *Physics Procedia*, Vol. 37, pp. 402 – 409, 2012. Proceedings of the 2nd International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP 2011).
 - [81] <https://www.long-life.jp/ledlightpanel/>.
 - [82] <https://turnontheart.tumblr.com/lightguidepanel>.
 - [83] <https://www.troteclaser.com/ja/blog/cast-vs-extruded-acrylic/>.
 - [84] 日亜化学工業株式会社. LED 標準仕様書 品名：青色 LED 型番：NSPB500S.
 - [85] <https://www.long-life.jp/>.
 - [86] http://www.nichia.co.jp/jp/product/led_product_data.html?type=%27NSPB300B%27.
 - [87] <https://www.caen.it/products/dt5702/>.
 - [88] <https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/citiroc-1a>.
 - [89] 五味慎一. 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築. 修士論文, 京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室高エネルギー物理学研究室, 2008.
 - [90] <https://www.troteclaser.com/ja/laser-machines/laser-engraving-machines-speedy/>.
 - [91] <http://www.plastics-jp.com/>.
 - [92] <https://root.cern.ch/>.
 - [93] <https://www.fujifilm.com/jp/ja/consumer/films/sheetfilter/nd>.
 - [94] S. Fedotov. New 3d fine-grained scintillation detector for the t2k experiment. 2020.
 - [95] <https://www.ansys.com/ja-jp/products/structures>.
 - [96] <https://www.hirose.com/product/series/U.FL?lang=ja>.
 - [97] <http://www.paraglas.jp/art/pdf/kogaku.pdf>.