## T2K 実験新型前置検出器 SuperFGD における LED キャリブレーションシステムの運用

東京都立大学 理学研究科 物理学専攻 高エネルギー物理実験研究室 博士課程前期2年 22844424 古井佑典

2024年1月10日

概要

T2K 実験は、茨城県東海村の J-PARC にある大強度陽子加速器を用いて生成されたニュートリノビームを、 ニュートリノ生成点から 280 m 下流に位置する前置検出器 ND280 と、295 km 離れた岐阜県神岡町に位置す る後置検出器スーパーカミオカンデで測定する長基線加速器ニュートリノ振動実験である。現在、レプトンセ クターでの CP 対称性の破れを 3σ の信頼度で発見することを目的とした T2K-II 実験が進行中である。

T2K-II では、加速器のアップグレードによる統計量の増加と前置検出器群 ND280 のアップグレードによる 系統誤差の削減を目指す。ND280 のアップグレードでは、新たに SuperFGD というニュートリノの標的兼飛 跡検出器が新たに導入され、2023 年に稼働が始まった。SuperFGD 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、約 6 万個の光検出器 MPPC で構成されており、従来の検出器の弱点であっ た大角度で散乱する荷電粒子や短飛程粒子に対する感度が改善される。

本論文では SuperFGD における LED キャリブレーションのシステムの開発、導入、運用について述べる。 この LED キャリブレーションシステムは SuperFGD の内部に取り付けられ、波長変換ファイバーの片側の 端面から微弱な LED 光を入射し、波長変換ファイバーを通してもう片側の端面にある MPPC で読み取るこ とで、検出器インストール前後での検出器全体の健全性の確認、MPPC の増倍率の較正を行うことが主な役 割である。

LED キャリブレーションシステムは主に LGP モジュールと LED ドライバーで構成される。本研究では LGP モジュールの品質検査、SuperFGD への LGP モジュールのインストール、LED ドライバーの開発を 行い、また SuperFGD の稼働開始時における LED キャリブレーションシステム全体の運用を行った。

# 目次

第1章	序論	9
1.1	ニュートリノについて	9
1.2	ニュートリノ振動について....................................	10
1.3	T2K 実験	12
	1.3.1 ニュートリノ生成部	13
	1.3.2 Off-axis 法	15
1.4	前置検出器群	16
	1.4.1 INGRID	16
	1.4.2 ND280	17
	1.4.3 WAGASCI-BabyMIND	19
	1.4.4 ND280 実験ホール	20
1.5	スーパーカミオカンデ	20
1.6	T2K-II	22
1.7	ND280 のアップグレード	22
	1.7.1 従来の ND280 の課題	22
	1.7.2 アップグレードで導入される検出器	24
<b>第</b> 2章	SuperFGD	26
2.1	SuperFGD の概要	26
2.2	各構成要素	27
	2.2.1 シンチレータキューブ	27
	2.2.2 波長変換ファイバー	27
	2.2.3 MPPC	28
	2.2.4 信号読み出し回路	28
	2.2.5 LED キャリブレーションシステム	29
2.3	期待される性能....................................	30
<b>第</b> 3章	LED キャリブレーションシステム	32
3.1	LED キャリブレーションシステムの概要	32
3.2	LED キャリブレーションシステムの構成要素	32
	3.2.1 LGP(Light Guide Plate) モジュール	32
	322 LED ドライバー	36

3.3	LGP モジュールと LED ドライバーの接続	36
3.4	LED キャリブレーションシステムを用いた MPPC への LED 光の分配 ........	38
3.5	LED キャリブレーションシステムの運用方法 ...............................	38
3.6	本研究の目的	39
第4章	LGP モジュールの仕様変更と品質検査	41
4.1	拡散板変更のための試験....................................	41
	4.1.1 試験内容	41
4.2	LGP モジュールの品質検査 (2 回目) とその結果	45
第5章	LGP モジュールのインストール	50
5.1	インストール前の準備作業....................................	50
5.2	LGP モジュールの取り付け	50
5.3	LED の健全性の確認	52
5.4	モジュール間の遮光	53
5.5	ケーブルバンドル	53
5.6	ネジ穴の遮光....................................	54
第6章	LGP モジュールの性能について	56
6.1	設置後の初期性能テスト	56
	6.1.1 テストのセットアップ	56
	6.1.2 テストの結果	57
6.2	全モジュールの性能評価の見積もり....................................	60
	6.2.1 評価方法	60
	6.2.2 評価結果	63
第7章	LED ドライバーの開発	65
7.1	オペアンプの負電源の変更....................................	65
7.2	オペアンプの正電源の変更....................................	67
7.3	電圧降下の抑制....................................	71
7.4	増幅回路の増幅率の変更とオペアンプの正電源の変更 (2 回目)	71
7.5	仕様変更の結論....................................	74
第8章	SuperFGD インストールにおける準備	78
8.1	LED ドライバーのインストール	78
8.2	パッチパネルのインストール	81
	8.2.1 パッチパネルのデザイン変更	81
	8.2.2 パッチパネルのインストール	81
第9章	SuperFGD の試験運用での LED キャリブレーションシステムの運用	87
9.1	測定データの分類と LED の設定値の選定方法	87
	9.1.1 測定データの分類	87

	9.1.2 LED の設定値の選定方法	88
9.2	LED の設定値の選定結果	89
第 10 章	結論と今後	92
謝辞		94
参考文献		95

# 図目次

1.1	標準模型	9
1.2	T2K 実験の概略図	13
1.3	J-PARC と陽子加速器群の外観図	13
1.4	RCS から MR への陽子ビーム入射の概略図 ...............................	14
1.5	ビームラインの概略図	15
1.6	$ u_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}, \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 振動確率と異なる Off-axis(OA) 角度でのニュートリノフラックス	16
1.7	INGRID の概略図	17
1.8	ND280 の概略図	18
1.9	FGD の XY モジュールのイメージ図	18
1.10	WAGASCI-BabyMIND の外観図と上面図	19
1.11	WAGASCI 検出器の構造	20
1.12	ND280 実験ホールと各前置検出器の位置	21
1.13	SK の外観	21
1.14	T2K 実験での $\delta_{CP}$ の暫定的な測定結果	22
1.15	T2K-II における累積 POT と MR ビーム強度の目標 ...............	23
1.16	再構成された荷電レプトンの運動量と角度の分布.................	23
1.17	ND280 における陽子の検出効率と運動量の分布	24
1.18	アップグレード後の Nd280 の外観図	25
2.1	SuperFGD の概略図	26
2.2	Y-11(200) 波長変換ファイバーの吸収・再発光スペクトラム	27
2.3	MPPC S13360-1325PE の写真	28
2.4	MPPC(S13360-1325PE) の検出効率の波長依存性	28
2.5	MPPC 基板の写真	29
2.6	CITIROC チップのブロックダイアグラム	29
2.7	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	30
2.8	νμ の荷電カレント反応によって生じるミューオンのビーム軸に対する散乱角と再構成の効率	
	を示したシミュレーション結果....................................	30
2.9	陽子の検出効率の角度依存性のシミュレーション結果	31
3.1	LGP モジュールの概略図	33
3.2	LGP モジュールの設置位置	33

3.3	導光板の概略図....................................	34
3.4	導光板の写真	34
3.5	拡散板の写真	34
3.6	LED 基板の写真	35
3.7	LED 基板の回路図	35
3.8	コリメータの写真	35
3.9	コリメータの溶接前の写真....................................	35
3.10	LED ドライバーの外観	36
3.11	LGP モジュールと LED ドライバーの接続の概念図 .......................	37
3.12	使用する同軸ケーブル	37
3.13	同軸ケーブルと中間基板の接続	37
3.14	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 ..............	38
3.15	MPPC で検出された光子数分布の例	39
4.1	品質検査システムの外観....................................	42
4.2	品質検査の結果の例	42
4.3	MPPC と波長変換ファイバーの写真 (左) と DT5702(右) の写真	44
4.4	MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量測定のセットアップ .........	44
4.5	3 種類の拡散板を使用したときの光量の比較	45
4.6	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...........	46
4.7	1回目の品質検査での Wall LGP モジュールの最大最小光量比の分布 .........	47
4.8	波長変換ファイバーの水平方向のずれと平均光量..............	47
4.9	2 度目の品質検査での Wall LGP モジュールの全モジュールの検査結果........	48
4.10	2 度目の品質検査での Bottom LGP モジュールの全モジュールの検査結果	49
5.1	LGP モジュールの設置位置 ID の書かれたチューブを付けたケーブルの写真	51
5.2	LGP モジュールの設置位置 ID ...................................	51
5.3	LGP モジュールの LED 穴の遮光	51
5.4	LGP モジュールの LED 穴の写真	51
5.5	Wall LGP モジュールの取り付け作業	52
5.6	Bottom LGP モジュールの取り付け作業	52
5.7	LED の健全性の確認	53
5.8	LGP モジュールと SuperFGD 外壁との隙間の遮光作業 ..............	53
5.9	遮光作業後の SuperFGD の壁面の写真	54
5.10	SuperFGD の底面への遮光作業	54
5.11	まとめてバンドルされるケーブルの領域....................................	55
5.12	LGP モジュールに使われるケーブルのバンドル作業	55
5.13	LGP モジュールのネジ穴の遮光作業	55
6.1	初期性能テストのセットアップの概略図....................................	57
6.2	使用した MPPC 基板と LGP モジュール	58

6.3	初期性能テストで得られた光量分布の例....................................	59
6.4	各パルス高での ADC 分布測定結果	59
6.5	各パルス幅での ADC 分布測定結果	60
6.6	品質検査時と取り付け後の比較	61
6.7	品質検査時と取り付け後の結果の光量比の2次元分布	62
6.8	品質検査 (カメラ) と取り付け後のテスト (ファイバー +MPPC) の違いの考察	62
6.9	Bottom LGP モジュールの光子数への補正のための 2 次元分布の作成	63
6.10	光子数補正後の結果の例	64
7.1	LED ドライバーの性能	66
7.2	LED パルスの波高、波幅、各チャンネルの ON/OFF を調節する GUI ........	66
7.3	初期段階での LED ドライバーの動作確認の結果	66
7.4	オペアンプの負電源の想定値と実測値................................	67
7.5	D6 チップ交換後の LED ドライバーの出力パルス	68
7.6	LED ドライバーの増幅回路の回路図	68
7.7	増幅回路の各点での電圧値と出力電圧の計算値.............................	69
7.8	オペアンプの正電源の想定値と実測値................................	70
7.9	正電源変更後の LED パルスの波高値と DAC 値の関係 ............	70
7.10	波高の減衰が生じた回路	71
7.11	R26 抵抗を変更する前後の V <sub>in</sub> 、V <sub>out</sub> の波形	72
7.12	増幅率変更後の出力波形....................................	73
7.13	反転増幅回路を用いたテストの結果...................................	73
7.14	増幅率と電源電圧変更後の出力波形....................................	73
7.15	増幅率を変更していないチャンネルでのの LED パルスの波高値と DAC 値の関係 ......	74
7.16	プロトタイプとプリプロダクション品の出力波形..............	75
7.17	測定に用いた富士フィルム社製の ND フィルター ..............	76
7.18	LED ドライバーを用いた光量測定のセットアップ .................	76
7.19	長さ2m のクラレ社製 Y-11 波長変換ファイバーを用いて読み出される光量の MPPC までの	
	距離の依存性の測定結果....................................	77
7.20	LED ドライバーを使用した光量測定の結果..................................	77
8.1	量産品 LED ドライバーの出力波形の 1 例 .................................	79
8.2	目視での LED ドライバーのチャンネルチェック ...........................	79
8.3	MCB、Multiplexer ボード、LED ドライバー、LGP モジュールの接続の概略図	80
8.4	Multiplexer ボードの代替案とインストール後の LED ドライバーの写真	80
8.5	パッチパネルの概略図と設置位置..................................	82
8.6	中間基板の写真....................................	83
8.7	パッチパネルのケーブル長調節部の写真..............................	83
8.8	パッチパネルの設置領域....................................	84
8.9	パッチパネル取り付けのための構造物とデザイン変更後のパッチパネルの写真	84

8.10	LGP モジュールからパッチパネル設置位置までのケーブルルート	85
8.11	SS 階へケーブルを通すために使用した穴 ...................................	85
8.12	インストール後のパッチパネルの写真....................................	86
9.1	各分類での ADC 分布の例	89
9.2	平均的な光量設定である DAC = 21 での SuperFGD の各チャンネルにおける分類	90
9.3	各 Wall LGP モジュールの最適な LED 設定値......................	91
9.4	各 Bottom LGP モジュールの最適な LED 設定値 .................	91

## 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、スピン 1/2 のフェルミオンである。素粒子物理学の標準模型ではニュート リノには 3 種類のフレーバーがあり、それぞれ電子ニュートリノ (ν<sub>e</sub>)、ミューニュートリノ (ν<sub>µ</sub>)、タウニュー トリノ (ν<sub>τ</sub>) である。前述の通りニュートリノは電荷を持たないレプトンのためニュートリノは電磁相互作用、 強い相互作用はせず、弱い相互作用と重力相互作用のみはたらく。そのためニュートリノは物質とほとんど相 互作用しない。標準模型ではニュートリノは質量を持たないとされていたが、後述のニュートリノ振動の発見 によってニュートリノがわずかに質量を持つことが分かった。

ニュートリノは 1930 年に、β 崩壊の理論的矛盾を解決するために Pauli によって提唱された素粒子である。 当時、原子核は陽子と電子の結合状態とされており、原子核 (*A*, *Z*) の β 崩壊は

$$(A,Z) \to (A,Z+1) + e^{-}$$
 (1.1)

といった電子放出の過程とされていた。しかし後に Ellis と Wooster によって行われた実験によって β 崩壊で



図 1.1: 標準模型 [1]

検出される β 線のエネルギーは放出される全エネルギーより小さいことが示された。すなわちこの崩壊のモデ ルでは、エネルギーと運動量が保存されない。またこの崩壊過程では角運動量も保存されないことも分かって いた。

そこで、中性でスピン 1/2 の粒子を仮定し、この粒子が β 崩壊で放出されているという理論が Fermi に よって提唱された。この粒子は同じ中性粒子の中性子よりも軽いため Fermi によってニュートリノと名づけら れた。

その後、ニュートリノは Renies, Cowan らによる原子炉ニュートリノ実験によって初めて確認された [2]。 この実験は原子炉内で生成される中性子過剰核の β 崩壊によって

$$n \to p + e^- + \bar{\nu} \tag{1.2}$$

$$\bar{\nu} + p \to e^+ + n \tag{1.3}$$

実験の結果、式 (1.3) によって生じた中性子と陽電子が検出され、ニュートリノの存在が実験的に示された。

## 1.2 ニュートリノ振動について

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが質量を持つ場合、空間を伝搬することで別のフレーバーに変換される現象である。ニュートリノは弱い相互作用によって荷電レプトンと共に生成され、この荷電レプトンのフレーバーによってニュートリノも3種類のフレーバーをもつ  $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ 。これらのフレーバー固有状態  $|\nu_{\alpha}\rangle(\alpha = e, \mu, \tau)$ は、それぞれ質量  $m_1, m_2, m_3$ を持つ3つの質量固有状態  $|\nu_i\rangle(i = 1, 2, 3)$ の線形重ね合わせ 状態として以下の式 (1.4) のように記述される。

$$|\nu_{\alpha}\rangle = \sum_{j} U_{\alpha j} |\nu_{j}\rangle \tag{1.4}$$

ここで U はユニタリー行列であり、PMNS(Pontecorvo-牧-中川-坂田) 行列と呼ばれ、式 (1.5) によって定義 される。

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(1.5)

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$

$$(1.6)$$

ここで、
$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, c_{ij} = \cos \theta_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$$
であり、 $\theta_{ij}$ は混合角、 $\delta$ は CP 位相と呼ばれている。

次に、真空中のニュートリノ振動確率について考える。真空中のニュートリノの各質量固有状態 |*v<sub>j</sub>* ) はディ ラック方程式より下の (1.8) 式を満たす。

$$i\frac{d\left|\nu_{j}\right\rangle}{dt} = E_{j}\left|\nu_{j}\right\rangle \tag{1.8}$$

ここで  $E_j \equiv \sqrt{p^2 + m_j^2}$  はニュートリノのエネルギーであり、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  $|\nu_j(t)\rangle$  は上式 (1.8) より

$$|\nu_j(t)\rangle = e^{-iE_j t} |\nu_j(0)\rangle \tag{1.9}$$

と表現できる。ここで、ある時間 t でニュートリノのフレーバーが α であったとすれば

$$|\nu_{\alpha}(t)\rangle = \sum_{j} U_{\alpha j} |\nu_{j}(t)\rangle$$
$$= \sum_{j} U_{\alpha j} \left( e^{-iE_{j} t} |\nu_{j}(0)\rangle \right)$$
(1.10)

さらに、 $|\nu_j(0)
angle = \sum_{\gamma} U^*_{\gamma j} |\nu_{\gamma}(0)
angle$ を代入して、

$$|\nu_{\alpha}(t)\rangle = \sum_{j} U_{\alpha j} e^{-iE_{j}t} \left( \sum_{\gamma} U_{\gamma j}^{*} |\nu_{\gamma}(0)\rangle \right)$$
(1.11)

これより、時間 t でニュートリノのフレーバーが  $\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}$  に変換される確率の振幅は

$$A(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) = \langle \nu_{\alpha}(0) | \nu_{\beta}(t) \rangle$$
  
=  $\sum_{j} U_{\beta j} e^{-iE_{j}t} \sum_{\gamma} U_{\gamma j}^{*} \langle \nu_{\alpha}(0) | \nu_{\gamma}(0) \rangle$   
=  $\sum_{j} U_{\beta j} e^{-iE_{j}t} \sum_{\gamma} U_{\gamma j}^{*} \delta_{\alpha \gamma}$   
=  $\sum_{j} U_{\beta j} e^{-iE_{j}t} U_{\alpha j}^{*}$  (1.12)

よって、 $\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}$ に変換される確率は

$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) = |A(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta})|^{2} = \left| \sum_{j} U_{\beta j} e^{-iE_{j}t} U_{\alpha j}^{*} \right|^{2}$$
$$= \sum_{j} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta j} U_{\alpha j}^{*} + \sum_{j \neq k} \left( U_{\beta j}^{*} e^{iE_{j}t} U_{\alpha j} \right) \left( U_{\beta k} e^{-iE_{k}t} U_{\alpha k}^{*} \right)$$
(1.13)

ここでニュートリノが超相対論的であるとすれば、 $p \gg m_j, p \approx E$ より、ニュートリノのエネルギー $E_j$ は

$$E_j = \sqrt{p^2 + m_j^2} \approx p + \frac{m_j^2}{2p} \approx E + \frac{m_j^2}{2E}$$
 (1.14)

と表現できる。さらに  $\Delta m_{jk}\equiv\ m_j-m_k$  とすれば、式 (1.13) は式 (1.14) を用いて

$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) = \sum_{j} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta j} U_{\alpha j}^{*} + \sum_{j \neq k} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta k} U_{\alpha k}^{*} e^{i(E_{j} - E_{k})t}$$

$$= \sum_{j} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta j} U_{\alpha j}^{*} + \sum_{j \neq k} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta k} U_{\alpha k}^{*} e^{i\frac{\Delta m_{jk}^{2}}{2E}t}$$

$$= \sum_{j} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta j} U_{\alpha j}^{*} + 2 \operatorname{Re} \sum_{j > k} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta k} U_{\alpha k}^{*} \cos\left(\frac{\Delta m_{jk}^{2}}{2E}t\right)$$

$$+ 2 \operatorname{Im} \sum_{j > k} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta k} U_{\alpha k}^{*} \sin\left(\frac{\Delta m_{jk}^{2}}{2E}t\right)$$

$$(1.15)$$

ここで t = 0 ではニュートリノがフレーバー固有状態であることから、式 (1.15) に t = 0 を代入して

$$\delta_{\alpha\beta} = \sum_{j} U^*_{\beta j} U_{\alpha j} U_{\beta j} U^*_{\alpha j} + 2 \operatorname{Re} \sum_{j>k} U_{\alpha j} U^*_{\beta j} U^*_{\alpha k} U_{\beta k}$$
(1.16)

が成立する。以上より、ほとんど光速で走っているニュートリノが時間 *t* で距離 *L* = *ct* = *t*(*c* = 1) だけ飛 行することと式 (1.16) を用いれば、時間 *t* でニュートリノのフレーバーが  $\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}$  に変換される確率は式 (1.17) となる。

$$P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \operatorname{Re} \sum_{j>k} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta k} U_{\alpha k}^{*} \sin^{2} \left(\frac{\Delta m_{jk}^{2}}{4E}L\right) + 2 \operatorname{Im} \sum_{j>k} U_{\beta j}^{*} U_{\alpha j} U_{\beta k} U_{\alpha k}^{*} \sin \left(\frac{\Delta m_{jk}^{2}}{2E}L\right)$$
(1.17)

式 (1.17) について、ニュートリノの質量二乗差 Δ  $m_{jk}^2$  とエネルギー E が固定の場合、ニュートリノの発生源 から測定点までの距離 L によってニュートリノのフレーバーが変化する確率が振動的な振る舞いをすることか ら、ニュートリノ振動と呼ばれている。

次に、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いについて考える。 $\bar{\nu}_{\alpha} \rightarrow \bar{\nu}_{\beta}$ の振動確率では、式 (1.17) の CP 位相  $\delta$  が  $-\delta$  へ置き換わることから、振動確率の違いは

$$\Delta P_{\alpha \to \beta} = P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) - P(\bar{\nu}_{\alpha} \to \bar{\nu}_{\beta})$$
  
= 4 Im  $\sum_{j>k} U^*_{\beta j} U_{\alpha j} U_{\beta k} U^*_{\alpha k} \sin\left(\frac{\Delta m_{jk}^2}{2E}L\right)$  (1.18)

と表現できる。また、ここでは例として3世代のニュートリノの  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  振動と  $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$  振動について考える。これらの振動確率の差は、式 (1.18) において  $\alpha = \mu, \beta = e$  とすることで

$$\Delta P_{\mu \to e} = P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) - P(\bar{\nu}_{\mu} \to \bar{\nu}_{e})$$
$$= 4 \operatorname{Im} \sum_{j>k} U_{\mu j}^{*} U_{e j} U_{\mu k} U_{e k}^{*} \sin \left(\frac{\Delta m_{j k}^{2}}{2E}L\right)$$
(1.19)

と表現できる。 $\sum を全て展開し、 \Delta m_{31}{}^2 = \Delta m_{21}{}^2 + \Delta m_{32}{}^2$ を用い、まとめると以下の式 (1.20) になる。

 $\Delta P_{\mu \to e} = -16s_{12}c_{12}c_{13}^2 s_{13}s_{23}c_{23}\sin\delta \sin\Delta_{21}\sin\Delta_{32}\sin\Delta_{31}$ (1.20)

ここで、 $\Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L$ とした。すなわち全ての混合角、全ての質量差が0でなく、かつ CP 位相 $\delta$ が0また は $\pi$ でない場合にニュートリノにおける CP 対称性の破れが現れる。

## 1.3 T2K 実験

T2K(Tokai to Kamioka) 実験は日本で行われている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) で生成した  $\nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu})$ ビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデ (SK) へ射出することで振動後のニュート リノを観測している。またニュートリノ生成点から 280 m 下流には前置検出器群があり、振動前のニュートリ ノの観測している。図 1.2 は T2K 実験の概略図である。T2K 実験の主な目的はニュートリノ振動のパラメー タの決定、レプトンセクターでの CP 対称性の破れの高い信頼度での発見である。



図 1.2: T2K 実験の概略図 [3]



図 1.3: J-PARC と陽子加速器群の外観図 [4]

#### 1.3.1 ニュートリノ生成部

T2K 実験では、J-PARC の 3 つの陽子加速器で 30 GeV まで加速した陽子を炭素ターゲットに衝突させ、 生じた荷電 π 中間子の崩壊によって生成されたニュートリノを使用する。本節 1.3.1 では、J-PARC における 3 段の陽子加速器群、ニュートリノビームラインについて述べる。

#### J-PARC 陽子加速器群

茨城県東海村にある J-PARC は、陽子加速器群とニュートリノ実験施設、物質・生命科学実験施設、ハドロ ン実験施設などがある複合型実験施設である。図 1.3 は J-PARC と陽子加速器群の外観図である。陽子加速器 群は LINIAC(LINear ACcelerrator)、RCS(Rapid-Cycling Synchrotron)、MR(Main Ring) の3段で構成さ



図 1.4: RCS から MR への陽子ビーム入射の概略図 [5]。それぞれの束がバンチであり、等間隔に並ぶバンチ を収納できる空間 9 つの内、8 つが使用される。

れている。以下ではこれらの加速器について述べる。

LINIAC は負水素イオンを加速させる線形加速器である。LINIAC は全長 330 m であり、負水素イオン ビームを 400 MeV まで加速させる。

RCS は周長 348.3 m のシンクロトロン加速器であり、LINIAC からの負水素ビームは RCS の入射部で陽 子ビームに変換される。RCS では陽子ビームは 3 GeV まで加速される。シンクロトロン加速器では加速され る陽子はバンチとして存在しており、RCS では 1 サイクルに 2 バンチが存在する。RCS で加速された陽子 ビームは物質・生命科学実験施設のミューオン及び中性子ビームラインへ送られる。また RCS で加速された 陽子の一部はニュートリノ実験、ハドロン実験で用いられるために後段の MR へ送られる。

MR は周長 1567 m のシンクロトロン加速器であり、RCS からの 3 GeV の陽子ビームを 1.4 秒で 30 GeV まで加速させる。図 1.4 は RCS から MR への陽子ビーム入射の概略図であり、MR には 1 サイクルに 8 バン チ存在する。また、MR には加速した陽子ビームを一挙に取り出す速い取り出しモードと 2 秒間毎に徐々に取 り出す遅い取り出しモードがあり、速い取り出しモードではニュートリノビームライン、遅い取り出しモード ではハドロンビームラインへ陽子ビームが送られる。速い取り出しモードの繰り返し時間は 2.48 秒であった が、SuperFGD のインストールと同時期に加速器のアップグレードも行われ、現在は 1.36 秒に向上した。

#### ニュートリノビームライン

MR で加速された陽子ビームは、ニュートリノビームラインを通って炭素ターゲットに衝突され、生じた荷 電 π 中間子などの崩壊によってニュートリノが生成される。このニュートリノビームラインは、1 次ビームラ インと 2 次ビームラインに分かれている。図 1.5 はニュートリノビームラインの概略図である。

1次ビームラインは、MR から取り出した陽子ビームの方向を調節する前段部、陽子ビームを神岡の方向へ 曲げるアーク部、陽子ビームをマグネットへ導く最終収束部の3部で構成されている。

2次ビームラインでは、炭素ターゲットへ陽子ビームを衝突させ、生じた2次π中間子をターゲットステー



図 1.5: 上図はニュートリノビームライン全体の概略図 [6]。下図は 2 次ビームラインの概略図。

ションにて電磁ホーンに集束させる。また、長さ 96 m のディケイボリュームを飛行中に  $\pi$  中間子がニュート リノとミューオンへ崩壊する。また、電磁ホーンに流す電流の向きを変えることで集束させる荷電  $\pi$  中間子の 電荷を選択する事ができる。これにより  $\nu_{\mu}$  生成モードと  $\bar{\nu}_{\mu}$  生成モードを選択する事ができる。ディケイボ リュームの後段では、炭素ターゲットに衝突しなかった陽子ビームやニュートリノへ崩壊しなかった荷電  $\pi$  中 間子を吸収するビームダンプがある。最後にニュートリノと共に生成されたミューオンをモニターするミュー オンモニターがある。図 1.5 の右は 2 次ビームラインの概略図である。

#### 1.3.2 Off-axis 法

T2K 実験では、振動測定でのニュートリノスペクトル最適化のために SK 方向から 2.5° ずれた方向に ニュートリノビームの軸がある。ニュートリノビームの軸上を On-axis、軸上でない場合を Off-axis、その 角度を Off-axis angle(OA) と呼ぶ。T2K 実験のようにビーム軸からずれた位置に検出器を配置する方法を



図 1.6:  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}, \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  振動確率と異なる Off-axis(OA) 角度でのニュートリノフラックス。[7] 上段の 図は 295 km 地点での  $\nu_{\mu}$  の生存確率。中段の図は 295 km 地点での  $\nu_{e}$  の出現確率。下段の図は 295 km 地点 における異なる OA 角度での非振動ニュートリノフラックス。

Off-axis 法と呼ぶ。T2K 実験は世界で初めて Off-axis 法を採用した実験である。図 1.6 では 295 km 地点で の  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu} \geq \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  の振動確率と異なる OA でのニュートリノフラックスのエネルギー依存性を示 す。下段の分布より、ビーム軸から検出器をずらすことでシャープなニュートリノのエネルギー分布を実現 できる事が分かる。また、OA2.5° で 600 MeV 付近でピークを持つ事が分かる。上段、中段の図からはこの 600 MeV 付近でピークをもつニュートリノを使用することで  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$  生存確率が最小、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  出現確率 が最大であることが分かる。このように 2.5° の OA は、295 km 離れた SK によって、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$  消失事象、  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  出現事象を観測するために最適化された角度である。

### 1.4 前置検出器群

前置検出器群は炭素ターゲットから 280 m 下流に設置されており、主に Off-axis 検出器の ND280、 WAGASCI-BabyMind、On-axis 検出器の INGRID に分けられる。前置検出器群では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スペクトル測定やニュートリノと原子核の反応測定から系統誤差を削 減することが主な目的である。本節ではこの3つの前置検出器について述べる。

#### 1.4.1 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID) は On-axis、鉄標的の前置検出器である。主な目的はニュートリノ の強度と方向の測定である。図 1.7 に INGRID 全体と各モジュールの概略図を示した。INGRID は水平方向 と鉛直方向に 7 個ずつ、14 個のモジュールが十字型に配置されており、十字の中心がニュートリノビームの中 心に相当する。また、これらとは別の 2 つモジュールが十字の軸から外れた位置に配置されており、ビームの



図 1.7: INGRID の概略図 [6]。左図は INGRID 全体の概略図であり、右の 2 つの図は各 INGRID モジュー ルの概略図を示す。真ん中の図のようにシンチレータ層と鉄板がサンドイッチ構造を成しており、右図のよう に veto 層で覆われる。

対称性の測定に用いられる。INGRID の各モジュールは、ニュートリノの標的である 9 枚の鉄板と、荷電粒 子の飛跡検出のための 11 枚のシンチレータ層のサンドイッチ構造になっている (ビーム下流側はシンチレータ 層が 2 つ続けて並んでいる。)。またモジュール外での相互作用を除くために、各モジュールは veto 用シンチ レータで覆われている。

#### 1.4.2 ND280

ND280 は炭素ターゲットから 280 m 下流、ビーム中心から 2.5° ずれた位置に設置された Off-axis 検出器 である。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 1.8 に示すように、ND280 は複数の検出器で構成されている。下 で述べる P0D、TPC、FGD の他に ECal、SMRD がソレノイド磁石である UA1 マグネットで囲まれており、 図 1.8 の *x* 方向に 0.2 T の磁場がかけられている。

#### $P0D(\pi^0 \text{ detector})$

P0D は ND280 の最も上流側に位置する検出器であり、主に水、真鍮、鉛からなる。P0D の主な目的は、 SK に到達するビームと同じフラックスのビームを用いて、水標的によるニュートリノの中性カレント反応か ら生じる π<sup>0</sup> を測定することである。また、P0D は後述の ND280 アップグレードによって新しい検出器群に 置き換えられた。

#### FGD(Fine Grained Detector)

FGD は上述のように TPC に挟まれるように配置されるニュートリノの標的兼飛跡検出器である。FGD で は図 1.9 に示したような、棒状のプラスチックシンチレータをビーム軸に垂直な X、Y 方向に 192 本ずつ並べ



図 1.8: ND280 の概略図 [6]。P0D、TPC 、FGD、ECAL、SMRD の検出器がソレノイド磁石で囲まれている。



図 1.9: FGD の XY モジュールのイメージ図 [8]。それぞれのシンチレータのサイズは 9.61  $mm \times 9.61 mm \times 1864.3 mm$  である。



図 1.10: 左が WAGASCI-BabyMIND の外観図で右が上面図 [9]。

た XY モジュールが用いられている。FGD は 2 つ設置されており、上流側の FGD(FGD1) はシンチレータ のみで XY モジュールが 15 個、下流側の FGD(FGD2) は XY モジュール 7 個と水標的の層 6 個が配置され ている。シンチレータバーの表面は反射層で覆われており、中心には穴が空けられ、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一端には半導体光検出器である MPPC が取り付けられており、もう一端 には MPPC 較正用の LED がある。

FGD 内部のシンチレータや水標的とニュートリノが反応することで荷電粒子が生じ、この荷電粒子がシン チレータを通過することでシンチレーション光が発生する。発生したシンチレーション光は波長変換ファイ バーで吸収・再発光され、端面にて MPPC で読み取られる。これによりニュートリノの反応点や反応で生じ た荷電粒子の種類、荷電粒子の飛跡を検出することができる。

#### TPC(Time Projection Chamber)

TPC は P0D の後方に 3 つ設置されており、後述の FGD と共にサンドイッチ構造をなす飛跡検出器であ る。TPC を荷電粒子が通過することによって内部のガスのイオン化され、生じた電子は印可電圧によって読 み出し面へ曲げられる。その検出位置や時間情報から荷電粒子の飛跡の 3 次元イメージングが得られる。また 磁場によって曲げられた荷電粒子の飛跡を検出することで、荷電粒子の電荷や運動量の測定がされる。

#### 1.4.3 WAGASCI-BabyMIND

WAGASCI-BabyMIND 検出器はビーム中心から 1.5° ずれた位置に設置された off-axis 検出器で あり、複数の検出器で構成される。WAGASCI-BabyMIND の主な目的はニュートリノと水、ニュー トリノとシンチレータの反応断面積とこれらの比の測定である。WAGASCI-BabyMIND には、WA-GASCI(WAter Grid And SCIntillator) 検出器、Baby MIND(Baby Magnetised Iron Neutrino Detector)、 Wall-MRD(Muon Range Detector)、proton モジュールが設置されている。

WAGASCI 検出器は図 1.11 のように格子状のシンチレータと棒状のシンチレータが交互に並んだ構造に なっており、格子状のシンチレータの隙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: シンチレー タ = 80%: 20% の体積比であり、ほとんどが水である。このような構造からニュートリノ反応によって生じ た荷電粒子の飛跡を 3 次元的に捉えることができる。



図 1.11: WAGASCI 検出器の構造 [10]。

#### 1.4.4 ND280 実験ホール

上で述べた前置検出器は、J-PARC 構内の NM(Neutrino Monitor) 棟内にある ND280 実験ホールに図 1.12 に示すように設置されている。また ND280 実験ホールは図のように地上階、B1 階、SS 階、B2 階に分けられ ており、本論文に関係する ND280 は B1 階に設置されている。また本研究では B1 階、SS 階で SuperFGD イ ンストールにおける準備作業を行った。作業の詳細は第 8 章で述べる。

## 1.5 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 の円筒型の水チェレンコ フ検出器であり、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡鉱山に設置された、T2K 実験における 後置検出器である。SK は陽子崩壊の探索やニュートリノ検出に用いられており、T2K 実験では振動後の ニュートリノを観測することで  $\nu_{\mu}$  消失事象や  $\nu_{e}$  出現事象の探索を行っている。図 1.13 は SK の外観図で ある。SK の内部は約 50 キロトンの水で満たされており、内側検出器 (Inner Detector: ID) と外側検出器 (Outer Detector: OD) に分かれている。ID はニュートリノ測定に用いられ、内壁に沿って直径 50 cm の 光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: PMT) が 11,129 本設置されている。また OD は宇宙線ミューオンや SK 外部の地中でのニュートリノ反応由来のミューオンなどを測定し、veto として用ることが目的であり、 OD には 1,885 本の PMT が設置されている。SK ではニュートリノと水の荷電カレント反応で生じた荷電粒 子が水中で光速を超えることで発生するリング状のチェレンコフ光を PMT を用いて検出することで荷電粒 子の識別を行っている。すなわち、 $\nu_{\mu}$ であればミューオン、 $\nu_{e}$ であれば電子によるチェレンコフ光を検出す る。図 1.13 に SK での  $\nu_{e}$ -like、 $\nu_{\mu}$ -like のイベントディスプレイを示す。生じた荷電粒子が電子であれば、電 磁シャワーによってリングイメージがぼやけるのに対し、ミューオンであれば電磁シャワーを起こさず、リン グイメージがくっきり見える。



図 1.12: ND280 実験ホールと各前置検出器の位置 [11]。



図 1.13: に SK の外観 [12] と  $\nu_e$ -like、 $\nu_\mu$ -like のイベントディスプレイ [13]。



図 1.14: T2K 実験での  $\delta_{CP}$  の暫定的な測定結果 [14]。

## 1.6 T2K-II

T2K 実験は 2010 年から 2020 年までに、 $\nu$  モードで  $1.97 \times 10^{21}$ POT (Proton On Target: 炭素ターゲットに衝突させた陽子数)、 $\bar{\nu}$  モードで  $1.63 \times 10^{21}$ POT のデータを蓄積した。この 10 年間のデータを用いた  $\delta_{CP}$  の暫定的な結果を図 1.14 に示す [14]。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 未確定であり、より信頼度の高い CP 対称性の破れの検証のためには統計量の増加と系統誤差の削減が課題で ある。

T2K 実験では 3σ の信頼度での CP 対称性の破れの検証を目的とした T2K-II が進行中である。T2K-II で は、加速器のアップグレードを行いビーム強度を向上させることで統計量を増加させ、系統誤差の削減のた めに前置検出器 ND280 のアップグレードを行う。図 1.15 は T2K-II における累積 POT と MR ビーム強度 の目標を示している。2023 年 4 月時点で約 540 kW のビーム強度を実現しており、MR のアップグレードに よって将来的には 1.3 kW で運転する予定である。ND280 のアップグレードについては 1.7 節で述べる。

### 1.7 ND280 のアップグレード

T2K-II では上述の加速器のアップグレードの他に、前置検出器 ND280 のアップグレードを行うことで系 統誤差の削減を図る。このアップグレードでは、ND280 の上流側に新たな検出器が導入される。本節では従 来の ND280 の課題と新たに導入される検出器について述べる。

#### 1.7.1 従来の ND280 の課題

従来の ND280 の主な課題として、ビーム軸に対して大角度で散乱する荷電粒子へのアクセプタンスが低い こと、低運動量の荷電粒子の検出効率が低いことの 2 つが挙げられる。



図 1.16: 再構成された荷電レプトンの運動量と角度の分布 [16]。左図は ND280 で再構成されたミューオン、 右図は SK で再構成された電子の運動量と角度の分布である。

前者の課題を表しているのが図 1.16 である [16]。横軸がレプトンの運動量、縦軸が入射したニュートリノの 運動量方向に対するレプトンの角度である。これらの分布を比較すると、SK は散乱角 0° ~ 180° のアクセプ タンスがあり、大角度散乱のニュートリノ事象があるのに対し、ND280 は 50° 以上のアクセプタンスが低い ことが分かる。これは ND280 の構造によるものである。図 1.8 に示すように、ND280 は下流側に設置された 3 つの TPC とこれらに挟まれるように位置する 2 つの FGD によって、ニュートリノ反応で生じた荷電粒子 の運動量や電荷の測定を行う。これらの TPC、FGD を通過するように前方に散乱される荷電粒子に対しては 高いアクセプタンスを持つが、大角度で散乱される荷電粒子についてはアクセプタンスが低くなってしまう。 このような理由から従来の ND280 は大角度で散乱する荷電粒子に対するアクセプタンスが低い。

後者の課題を表しているのが図 1.17 である。横軸がニュートリノ反応で生じた陽子の運動量、縦軸がその検 出効率である。赤いプロットが実際の ND280 における陽子の検出効率を示しており、灰色のヒストグラムは ニュートリノと原子核反応のシミュレーションソフトでの陽子の検出効率を示している。赤いプロットから、 ND280 でのニュートリノ反応で生じた陽子の運動量が 500 MeV 以下になると検出効率が急激に下がること



図 1.17: ND280 における陽子の検出効率と運動量の分布 [16]。赤いプロットが ND280 における陽子の検出効率を示しており、灰色の領域はニュートリノと原子核反応のシミュレーションソフトでの陽子の検出効率を示している。

が分かる。これはニュートリノ反応で生じる低運動量の陽子がミューオンや他の荷電粒子よりも飛跡が短く、 FGD 内で止まってしまい、飛跡の再構成が困難となるからである。

これらの課題を改善し、系統誤差の削減を図るために ND280 のアップグレードが進行中である。アップグレードで導入される検出器については次の 1.7.2 節で述べる。

### 1.7.2 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検出器である P0D を取り除き、新たに SuperFGD(Super Fiene Grained Detector)、HATPC(High Angle Time Projection Chamber)、TOF(Time Of Flight)の3種類の検出器を導入する。図 1.18 にアップグレード後の ND280 の概略図を示す [16]。SuperFGD は主に約 200 万個の 1 cm 立方のシンチレータキューブで構成され、ND280 の上流かつ中央に設置されるニュートリノの標的兼飛跡検出器である。SuperFGD の詳細については第2章で述べる。HA-TPC は SuperFGD の上下に 2 つ設置される TPC であり、SuperFGD で大角度に散乱される荷電粒子の飛跡検出が主な目的である。TOF は図 1.18 に描かれていないが、SuperFGD と HA-TPC の6 面を囲うように設置される検出器であり、通過した荷電粒子の位置と時間を記録する。



図 1.18: アップグレード後の Nd280 の外観図 [16]。アップグレード後のは ND280 の上流側に新たに SuperFGD、HA-TPC、TOF が導入される。図に TOF は描かれていないが、SuperFGD と HA-TPC の周 りを囲うように 6 面設置される。

## 第2章

## SuperFGD

## 2.1 SuperFGD の概要

SuperFGD(Super Fine Grained Detector) は ND280 アップグレードに伴って新たに導入される検出器 の一つであり、ニュートリノの標的兼飛跡検出器である。主に約 1cm 立方のシンチレータキューブ、波長 変換ファイバー、半導体光検出器 MPPC で構成される。図 2.1 のように x 方向に 192 個、y 方向に 56 個、z 方向に 182 個シンチレータキューブを積層した構造になっており、重さは約 2t である。それぞれの シンチレータキューブには x, y, z の 3 方向に穴があけられており、これらの穴を貫くように直径約 1 mm の波長変換ファイバーが通っている。SuperFGD に用いられている波長変換ファイバーの本数は合計で 192182 + 56 × 182 + 56 × 192 = 55,888 本である。これらの波長変換ファイバーの片側の端面には光検出の ために浜松ホトニクス製の SiPM である MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) が取り付けられている。また 反対側の端面には LED キャリブレーションシステムが設置されている。



図 2.1: SuperFGD の概略図 [16]。



図 2.2: Y-11(200) 波長変換ファイバーの吸収・再発光スペクトラム [18]。

### 2.2 各構成要素

### 2.2.1 シンチレータキューブ

SuperFGD では約 1cm 立方のシンチレータキューブを 192×182×56 = 1,956,864 個使用されている。シ ンチレータキューブはロシアの Vladmir の Uniplast 社にて製作されたものを使用している。シンチレータは 主にポリスチレン製であり、1.5% のパラテルフェニル (PTP) と 0.01% の POPOP(1,4-bis(5-phenyloxazol-2-yl) benzene(scintillator)) が添加されている。PTP と POPOP の発光波長はそれぞれ 310 nm~380 nm、 380 nm~450 nm である [17]。キューブ作成後、ケミカルエッチングされることでキューブ表面は白色の反射 層で覆われる。反射層の厚みは 50 µm~80 µm であり、反射層形成の過程でのキューブサイズの変動は 30 µm 未満となっている。この反射層は、隣接したキューブへの光漏れの効果を削減し、キューブ内でのシンチレー ション光の収集効率を向上させる役割がある。反射層の形成後は、ドリルで直径 1.5mm の穴が 3 方向に空け られている。

#### 2.2.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーとは、ある波長域の光を吸収して異なる波長域の光を再発光するプラスティック製の光 ファイバーである。SuperFGD ではクラレ社の Y-11(200) という波長変換ファイバーが用いられており、こ れは既存の FGD で用いられている波長変換ファイバーと同じものである。図 2.2 は Y-11 波長変換ファイ バーの吸収・再発光の波長分布を表しており、吸収波長のピークは 430 nm、再発光波長のピークは 470 nm で ある [17]。この吸収波長のピークは POPOP の発光波長とよく重なっている。また減衰長は 3.5 m 以上であ り、これは SuperFGD で用いられているファイバーの長さよりも長い。



図 2.3: MPPC S13360-1325PE の写真 [16]。



図 2.4: MPPC(S13360-1325PE) の検出効率の波 長依存性 [19]。

#### 2.2.3 MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) は浜松ホトニクス社が開発した SiPM デバイスの一種である。多数 の APD をガイガーモードで動作させる半導体光検出器であり、数光子レベルの微弱な信号でも光子数測定が 可能である。SuperFGD では波長変換ファイバーの端面に取り付けられ、波長変換ファイバーで再発光され た光を検知する。SuperFGD で用いられている MPPC は浜松ホトニクス社の S13360-1325PE であり、図 2.3 はその写真である。有感領域は 1.3mm×1.3mm であり、直径 1.0 mm の波長変換ファイバーを十分覆う ことができる。ピクセルピッチは 25 µm であり、従来の ND280 で用いられていた MPPC のピクセルピッチ (50 µm) と比較して小さくなっている。また 1 チャンネルあたりのピクセル数は 2668 であり、より広いダイ ナミックレンジを得ることができる。またこの MPPC の検出効率の波長依存性を図 2.4 に示した。この波長 領域は POPOP の発光波長とよく一致している。

SuperFGD の MPPC は、図 2.5 に示すように 8 cm×8 cm の基板に 8 列 × 8 列 (=64 個) の S13360-1325PE が取り付けられたものが用いられている。この MPPC 基板はフラットケーブルでエレクトロニクス と接続され、MPPC への電圧供給と信号の読み出しが行われる。

#### 2.2.4 信号読み出し回路

SuperFGD では MPPC からの信号を読み出すことで、信号の電荷や時間情報を取得する。この読み出し 回路は、開発期間短縮のために 1.4.3 節で述べた Baby-MIND 検出器で用いられている読み出しシステムを ベースに開発された。Baby-MIND 検出器には Weeroc 社製の CITIROC 1A(Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip) という ASIC が用いられており、SuperFGD でもこれを用いる。図 2.6 に示し たブロックダイアグラムのように、1 入力に対して HG(High Gain),LG(Low Gain) の 2 種類のチャージア ンプ、電荷読み出し用の Slow shaper、時間情報取得のための Fast shaper と閾値が調節可能なディスクリ



図 2.5: MPPC 基板の写真 [20]。左の写真は MPPC の受光面がある面であり、右の写真はその裏面。



図 2.6: CITIROC チップのブロックダイアグラム [21]。

ミネータを備えている。CITIROC チップは MPPC からの信号がある閾値を超えるタイミングと、一定時 間内の最大波高値を HG と LG で 2 種類出力する。これらは後段の FPGA や ADC で処理される。1 つの CITIROC チップで 32 チャンネルの信号を読み出すことができる。また、8 つの CITIROC チップが 1 つの FEB(Front End Board) と呼ばれるエレクトロニクス基板に実装されている。

#### 2.2.5 LED キャリブレーションシステム

LED キャリブレーションシステムは図 2.7 に示すように MPPC と反対側に設置される。LED 光を波長変 換ファイバーの端面に入射し、MPPC で検知することで MPPC やファイバーなど検出器全体の健全性の確認 や MPPC の増倍率の較正を行う。LED キャリブレーションシステムの詳細については第3章で述べる。



図 2.7: 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 [8]。



図 2.8: ν<sub>μ</sub> の荷電カレント反応によって生じるミューオンのビーム軸に対する散乱角と再構成の効率を示した シミュレーション結果 [20]。緑色のプロットが TPC に入射したミューオンまたは SuperFGD ないで止まっ たミューオン、青色のプロットは TPC に入射したミューオン、紫色のプロットはアップグレード前の ND280 におけるミューオン再構成の効率を示す。

## 2.3 期待される性能

SuperFGD に期待される性能は主に2つある。

1つ目は、大角度に散乱される荷電粒子への検出効率の向上である。図 2.8 は、ν<sub>μ</sub>の荷電カレント反応に よって生じるミューオンのビーム軸に対する散乱角と再構成の効率を示したグラフである [20]。従来の ND280 での結果と比較して、アップグレードによって広い散乱角の範囲で検出効率が高くなっており、特に課題で あった大角度での散乱角での散乱に対して高い検出効率が得られることが分かる。

2つ目は、低運動量の荷電粒子の検出効率の向上である。図 2.9 は陽子の検出効率の角度依存性のシミュ



図 2.9: 陽子の検出効率の角度依存性のシミュレーション結果 [22]。青色のプロットは 1.9×1.9×0.6 m の SuperFGD と同様の構造をした検出器、赤色のプロットはそれと同じ大きさの FGD と同様の構造をした検出 器におけるシミュレーション結果である。

レーション結果を示す。青色のプロットは 1.9×1.9×0.6 m の SuperFGD と同様の構造をした検出器、赤色 のプロットはそれと同じ大きさの FGD と同様の構造をした検出器における検出効率を表す。これらの結果 を比較すると、FGD では約 450 MeV/c 以下の運動量領域は検出できないが、SuperFGD はこの下限が約 300 MeV/c であり、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分かる。

## 第3章

# LED キャリブレーションシステム

## 3.1 LED キャリブレーションシステムの概要

LED キャリブレーションシステムは、LED 光を波長変換ファイバーの端面から入射させ、約5万6千チャンネルの MPPC へ光を分配させることで、SuperFGD の建設時、運用時における健全性の確認や検出器の長期運用において MPPC の増倍率の較正を行うことを目的とした装置である。

SuperFGD は約 200 万個のシンチレータキューブを積層し、それぞれのキューブの 3 方向から波長変換 ファイバーを通すという今までにない挑戦的な構造をしているため、建設時や建設後においてファイバーの断 裂やファイバーと MPPC の接続不良といった問題が生じうる。LED キャリブレーションシステムによって、 SuperFGD の建設時や試運転時、運用時において LED 光を MPPC の全チャンネルに分配し、信号を読み出 すことで検出器の健全性を速やかに確認することができる。

SuperFGD はシンチレーション光を検出した MPPC の位置や検出光子数から、ニュートリノとシンチレー タ内の原子核との反応で生じた荷電粒子のエネルギー損失を推定することで荷電粒子の識別や運動量の測定を 行う。そのため MPPC の増倍率較正は、精度良く検出光子数を検出する上で不可欠なものであり、LED キャ リブレーションシステムによって長期的に MPPC の増倍率をモニターすることができる。

東京都立大学は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) とロシアの研究機関である JINR(Joint Institute for Nuclear Research) と共同で LED キャリブレーションシステムの開発を行った。LED キャリブレー ションシステムは大きく分けて、LED 光を MPPC へ分配する LGP モジュールと LED を光らせるための LED ドライバーの 2 つで構成される。本 3 章では、これらの構成要素の特性について述べる。

## 3.2 LED キャリブレーションシステムの構成要素

上述のように LED キャリブレーションシステムは LGP モジュールと LED ドライバーで構成される。 3.2.1 節では LGP モジュール、3.2.2 節では LED ドライバーについて構成要素や特性を述べる。

#### 3.2.1 LGP(Light Guide Plate) モジュール

LGP モジュールは、検出器の健全性の確認や MPPC の増倍率の較正のために適切な LED 光を波長変 換ファイバーを通して MPPC へ分配するための装置である。図 3.1 は LGP モジュールの概略図である。 LGP モジュールは導光板、拡散板、LED、LED コリメータとこれらを収めるケースで構成されている。

LGP モジュールは取り付け位置によって長さの異なる 2 種類のモジュールがあり、検出器の側面、底面に



図 3.1: LGP モジュールの概略図 [8]。



図 3.2: LGP モジュールの設置位置 [8]。

取り付けられるモジュールをそれぞれ Wall LGP モジュール、Bottom LGP モジュールと呼ぶ。図 3.2 に LGP モジュールの設置位置を示した。Wall LGP モジュールは 47 個、Bottom LGP モジュールは 46 個使 用されている。以下で各構成要素の詳細を述べる。

#### 導光板 (Light Guide Plate: LGP)

LGP モジュールに使用される導光板は、厚さ3 mm の透明アクリル板の表面に直径3 mm の円形の傷 (Notch)が等間隔で付けられたもののことである。この Notch の間隔は、SuperFGD の波長変換ファイバー の間隔と等しくなるように、レーザー加工によって約1 cm 間隔で付けられている。導光板の端面から LED 光 が入射されると、図 3.3 のように光は導光板内を反射しながら進み、光が Notch で散乱されると Notch と反対 側の面へ光が放出される。図 3.4 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 うな構造によって導光板は薄く、少ない光源でも広い領域へ光を分配することができる。Wall LGP モジュー



図 3.3: 導光板の概略図 [8]。



図 3.4: 導光板の写真 [8]。左が LED 未点灯時で右は LED 点灯時。



図 3.5: 拡散板の写真 [23]。

ルには 8 × 56 個、Bottom LGP モジュールには 8 × 96 個の Notch がそれぞれ付けられており、それぞれ 448 個、768 個の MPPC へ光を分配できるようになっている。

LGP モジュールでは押し出しと呼ばれる作成方法によって作られた導光板が使用されている。押し出しは ローラーで粘土状のアクリルを押し出して生成する方法であり、板厚精度の良いアクリル板を作成できるこ とが特徴である。導光板を量産する際に板厚が変化すると、Notch 生成の際にレーザーが焦点からずれて、 Notch が同じように生成できないという懸念と、LGP モジュールの厚さにばらつきが生じるという懸念があ る。これらは、Notch によって散乱される光量のばらつきを大きくし、LGP モジュールの性能にばらつきが 生じることに繋がる。この問題を防ぐため、導光板に使用するアクリル板は押し出しによって作成されたもの が使用されている。

#### 拡散板

LGP モジュールに使用される拡散板は、導光板と同じサイズ、同じ厚みの乳白色のアクリル板のことであ る。拡散板は導光板の上部に重ねるように設置され、導光板で散乱された LED 光は拡散板によって拡散され、 波長変換ファイバーに入射される。拡散板を設置する目的は、導光板の 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 3 mm の穴の中で導光板に対して水平方向にずれた際の光量の変化を少なくする 事である。本研究では、使用する拡散板の選定を行った。その詳細は 4.1 節で述べる。



図 3.6: LED 基板の写真 [8]。

図 3.7: LED 基板の回路図 [8]。



図 3.8: コリメータの写真 [23]。



図 3.9: コリメータの溶接前の写真 [23]。

LED

LGP モジュールに使用される光源は、日亜化学工業株式会社製の砲弾型 LED(NSPB300B[24])7 個を 1 枚の基板にはんだ付けされたものを使用している。図 3.6 に LED 基板の写真を示す。図 3.7 は LED 基板の回路図である。

図 3.7 に示すように、回路としてはコネクタの心線から 7 つの LED が並列接続され、それぞれの LED が 10 Ω の保護抵抗と直列接続されており、これらがさらにコネクタのグラウンドに接続されている。保護抵抗 を LED に対して直列に接続する理由は、LED に定格以上の電流が流れた場合に LED が損傷することを防ぐ ためである。

LGP モジュールに使用される LED 基板 は、隣接する 2 つの Notch の列の中間の位置 (off-notch) にそれ ぞれの LED が配置されるように LGP モジュール内に設置されている。これは、Notch の列と重なる位置 (on-notch) に LED を配置した場合と比較して、Notch で散乱される LED 光の光量一様性が優れているため である [8]。

LED コリメータ

LGP モジュールに使用されるコリメータは、導光板に入る LED 光量を調節し、Notch で散乱される光量の一様性を高くするために導入されている。コリメータの写真を図 3.8 に示す。コリメータは加工した 4 枚の


図 3.10: LED ドライバーの外観。

黒色アクリル板を重ね合わせて溶着することで作成される。図 3.9 に溶着前の4枚のアクリル板の写真を示 す。使用される4枚のアクリル板のそれぞれの板厚は導光板に接する側(図 3.9 上側)から順に2 mm、1 mm、 3 mm、3 mm である。また、LED 基板に接する3 mm 厚のアクリル板には雌ネジが切ってあり、コリメー タは LED 基板とともに樹脂製ネジによって LGP モジュールのケースに固定される。

#### 3.2.2 LED ドライバー

LED ドライバーは LGP モジュール内の LED を光らせるための矩形波パルスを発生させる装置であり、 JINR と共同で開発を行った。LED ドライバーの外観を図 3.10 に示す。LED ドライバーは NIM モジュール 化されており、NIM ビンに挿入することで電源が供給される。LED ドライバーは主にマイコン、FPGA、オ ペアンプを含むアナログ回路で構成され、FPGA で生成されたデジタル信号を後段のオペアンプで増幅する事 で、最大約 7.0 V のパルスを出力することができる。また、外部の PC とマイコンの通信によって、出力する パルスの高さと幅をチャンネル毎に調節することができる。1 台の LED ドライバーには 12 チャンネルの外 部出力が備わっており、1 台の LED ドライバーによって最大 12 台の LGP モジュールを同時に光らせること ができる。LGP モジュールは 93 個インストールされており、全ての LGP モジュールを光らせるために 8 台 の LED ドライバーがインストールされた。

本研究では LED ドライバーの開発を行った。詳細は7章で述べる。

### 3.3 LGP モジュールと LED ドライバーの接続

LGP モジュールと LED ドライバーの接続には同軸ケーブルが用いられる。用いる同軸ケーブルは FWS5030 というケーブルであり、外径は 1.13 mm、特性インピーダンスは 50 Ω である。図 3.12 にケーブル の写真を示す。LGP モジュールは SuperFGD のある B1 階に設置されるのに対して、LED ドライバーは B1



図 3.11: LGP モジュールと LED ドライバーの接続の概念図。



図 3.12: 使用する同軸ケーブル。下はケーブルを 熱収縮チューブでバンドルしたもの。



図 3.13: 同軸ケーブルと中間基板の接続。

階の1つ下のフロアである SS 階にあるラックに設置される。フロアを跨いで両者を接続するために、長さ約 8 m のケーブルと長さ約 22 mm ケーブルを接続して用いる。またこれらの長さの異なるケーブルは、B1 階 に設置されたパッチパネル上の中間基板に接続される。これはケーブルの取り回しを良くするとともに、作業 性を向上させるためである。図 3.13 に 2 種類のケーブルと中間基板の接続を示した。パッチパネルの概要や ケーブル作業については第 3.5 章で述べる。



図 3.14: 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。

## 3.4 LED キャリブレーションシステムを用いた MPPC への LED 光の分配

3.2.1 でも述べたように、LED 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 へ LED 光を分配する。図 3.14 に導光板によって LED 光が分配される方法を示した。LED キャリブレーショ ンを用いて、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 ドライバーから矩形波を発生させ、LED を発光させる。
- 2. LED 光を発生させ、導光板の端面から LED 光を入射する。
- 3. LED 光は導光板内を反射しながら進み、Notch にあたった光が散乱される。
- 4. 散乱された LED 光は Notch の反対側の面から導光板の外から放出され、拡散板によって拡散される。
- 5. 散乱光の一部は拡散板を通過し、波長変換ファイバーに入射される。
- 6. 波長変換ファイバーに入射した光は吸収・再発光され、再発光された光はファイバー内で反射しながら MPPC へ入射される。

## 3.5 LED キャリブレーションシステムの運用方法

LED キャリブレーションシステムには、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 の増倍率較正のためのデータを取得すること である。MPPC からの電荷量を後段のエレクトロニクスで測定することで、検出された光子数の分布をを見 積もることができる。その際、検出光子数は ADC 値と呼ばれる整数値で出力される。図 3.15 は MPPC の検 出光子数の 1 例であり、横軸は ADC 値から検出光子数に変換されている。図 3.15 のように各検出光子数に 対応したピークがはっきり確認できれば、ADC 値から光子数への変換は容易であるが、検出光子数が極端に 少なければ、確認できるピークの数が少なくなり、ADC 値から光子数への変換が困難になる。また検出光子 数が極端に多くても、各ピークの分離が難しくなり、光子数への変換が困難である。したがって、LED キャ リブレーションシステムによって MPPC の増倍率較正に適した光量の光を全ての MPPC へ入射されること



検出フォトン数

図 3.15: MPPC で検出された光子数分布の例 [25]。

は重要である。

もう1つは検出器のインストール前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照射する ことが想定されるが、場合によっては一部に光を照射することも求められる。特に、SuperFGDの運転前後 で、MPPC や後段の読み出しエレキなどを含めた検出器全体の健全性を確認することは重要である。

#### 3.6 **本研究の目的**

本研究の目的は大きく分けて3つある。

1 つ目は LED キャリブレーションシステムのインストールに向けた研究である。先行研究によって開発さ れた LGP モジュールの品質検査システム [23] によって、その時点で組み込まれていた拡散板が想定していた 物より性能が低いことが分かった。使用予定だった拡散板は絶版により入手困難であったため、新たに使用す る拡散板の選定を行い、改めて LGP モジュールの品質検査を行った。詳細は第4章で述べる。また LGP モ ジュールのインストールについては第5章で述べる。また、SuperFGD のインストール後にパッチパネルの設 置とケーブル作業を行った。これらの作業については第8章で述べる。

2つ目は LED ドライバーの開発である。JINR によって開発された LED ドライバーは東京都立大学によっ て動作確認が行われたが、当初の設計では想定通りの性能を出すことができなかった。3.5 節で述べたように、 LED キャリブレーションシステムでは、MPPC の増倍率較正に適した光量の LED 光が求められる。そのた め、LED を発光させる矩形波の設定値を細かく設定できることが求められる。また LED を用いたデータ取 得において、読み出しのエレクトロニクスはセルフトリガーで運用される。すなわち、読み出しエレクトロニ クス側で閾値を決め、その閾値を超えた信号のみを読み出すのである。そのため、その閾値以上の範囲で各検 出光子数ピークが識別できるほどの光量が求められる。これらの2つの要求性能を当初の LED ドライバーで は満たしていなかった。本研究では LED ドライバーの仕様変更を行うことで要求性能を達成することができ た。この開発については第7章で述べる。

3 つ目は導入された LED キャリブレーションシステムの運用である。具体的には LGP モジュールごとに LED の設定値の最適化を行った。LGP モジュール内の光量一様性のばらつきにより、同一の LED 設定値 で全チャンネルの較正を行うことは困難である。また LGP モジュール間での光量のばらつきによって、各 LGP モジュールに適した LED の設定値を決定する必要がある。SuperFGD インストール後の試験運用時 に、これらの LED の設定値の最適化を行った。LGP モジュール内の光量一様性のふらつきや LGP モジュー ル間での光量のばらつきなどの LGP モジュールの性能評価の見積もりについては第6章で述べる。また、 SuperFGD インストール後に行った LED の設定値の最適化については第9章で述べる。

## 第4章

# LGP モジュールの仕様変更と品質検査

量産された LGP モジュールが SuperFGD に取り付けられる前に、迅速に LGP モジュールの品質を確認 し、極端に光量一様性が悪い、平均光量が低いといった問題のあるモジュールを事前に発見するために、カメ ラを用いた LGP モジュールの品質検査システムが開発された [23]。図 4.1 はこの品質検査システムの外観で ある。LGP モジュールの真上には 12 台のカメラが設置されており、LGP モジュール全体を真上から垂直に 見下ろす形で撮影できるようになっている。また 1 台のカメラで 8×8 の Notch の領域を撮影することができ る。この品質検査システムの基本的な方針は、カメラを用いて LGP モジュールを撮影し、記録した画像を画 像解析を用いて解析して全ての Notch の光量を見積もることである。

このシステムを用いて行われた品質検査によって、得られた平均光量が想定よりも約 20 % 低いことが分か り、原因が使用されていた拡散板が我々の想定していたものと異なることだと分かった。当初使用予定だった 拡散板は廃版となっていたため、新たに使用する拡散板の選定を行い、新たな拡散板と入れ替えた後に改めて LGP モジュールの品質検査を行った。拡散板の選定については 4.1 節、2 度目の品質検査の結果については 4.2 節で詳しく述べる。

#### 4.1 拡散板変更のための試験

上記のシステムを用いた品質検査の結果、プロトタイプの検査結果より量産品の平均光量が全体的に低いこ とが分かった。どの部品がこの問題の原因か探るために、プロトタイプと2台の量産品の各部品 (導光板、拡 散板、ケース)で入れ替えながら平均光量を比較した。表 4.1 はこの試験の結果である。表の (I) と (II)、(VII) と (VIII)の比較により、拡散板の入れ替えによって光量が約 17~25% 異なることから、明らかに拡散板が原 因で量産品の光量がプロトタイプより低くなっていると考えられる。その後、量産品で使用されている拡散板 がプロトタイプよりも透過率が約 17% 低いことが分かった。表 4.2 は使用されていた拡散板の透過率を示す。 プロトタイプに使用されていた拡散板は廃版により入手が困難であったため、新たに使用する拡散板の選定を 行った。

#### 4.1.1 試験内容

#### 測定セットアップ

まず、LGP モジュールの Notch での散乱光測定のためのセットアップについて述べる。実際の SuperFGD と近い環境で測定をするために、波長変換ファイバーと MPPC を用いた。用いた MPPC は浜松ホトニク



図 4.1: 品質検査システムの外観。撮影時はシステム全体が暗幕で覆われる。



図 4.2: 品質検査の結果の例。左図は Wall LGP モジュールの光量分布の例。右図は左図を1次元にしたもの。

ス社製の MPPC, S13360-1325CE である。これは SuperFGD で用いられる MPPC(S13360-1325PE) のセ ラミックマウントタイプである。また、用いた波長変換ファイバーも実際の SuperFGD で用いられるクラレ 社製 Y-11 を長さ約 20 cm にカットしたものである。MPPC への電源供給と信号読み出しには、CAEN 社 製 DT5702(以後 CITIROC モジュールと呼ぶ) を使用した。これは SuperFGD での読み出しエレクトロニ クスで使用される ASIC である CITIROC 1A(図 2.6) を搭載した SiPM(MPPC) 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 の範囲の電圧供給と信号読み出 しが可能で、PC に接続することでデータ読み出しが行われる。図 4.3 は測定に使用した MPPC と波長変 換ファイバー、CITIROC モジュールである。暗箱の中に LGP モジュール、MPPC、波長変換ファイバー、

表 4.1: 各部品を入れ替えながら行った光量測定の結果。平均光量はプロトタイプのものを 100% として比較 した。



表 4.2: プロトタイプと量産品で使われていた拡散板の透過率の違い。

	拡散板のモデル	透過率 (%)
プロトタイプ	アクリライト 432L(三菱ケミカル社)	58
量産品 (拡散板変更前)	コモグラス 432L(クラレ社)	48

CITIROC モジュールを図 4.4 のように配置した。波長変換ファイバーの端面が拡散板表面に接するように 長さが調節されている。また、波長変換ファイバーが Notch 中央にくるように治具を用いた。CITIROC モ ジュールは MPPC と接続され、電源供給、信号読み出しが行われる。また、ファンクションジェネレータは LGP モジュールの LED 基板と CITIROC モジュールに接続されており、LED を発光させると共にとそれに 同期した信号を CITIROC モジュールへ送っている。

#### ADC 値から光子数への変換方法

上記のセットアップを用いて測定した ADC 値を光子数へ変換する方法について述べる。まず、ADC 分布 のペデスタルと1光子ピークをガウシアンでフィットすることでペデスタル、1光子の ADC 値を求める。そ の後、以下の式を用いて変換を行う。最後に式で ADC 値から光子数へ変換して作成した分布の平均値を測定 された光子数とした。

$$(変換後の光子数) = \frac{(変換する ADC 値) - (ペデスタルの ADC 値)}{(1 光子の ADC 値) - (ペデスタルの ADC 値)}$$
(4.1)



図 4.3: MPPC と波長変換ファイバーの写真 (左) と DT5702(右) の写真 [8]。左の中央が MPPC でその両側 はそれぞれ波長変換ファイバーと光学接続のためのコネクター。



図 4.4: MPPC と CITIROC モジュールを用いた光量測定のセットアップ。

#### 試験結果

試験には表 4.3 のような 3 種類の拡散板を用いた。アクリライト 432L (以降プロトタイプと表記) はプロト タイプの LGP モジュールに使用されていた拡散板であり、パラグラス 432L (以降 432L と表記) はプロトタ イプと透過率の近いもの、パラグラス 422L (以降 422L と表記) は他の 2 種類と比較して透過率の高いもので ある。

まず、これらの 3 つの拡散板を変える事で LGP モジュール内の光量一様性にどの程度違いがあるか測定 した。結果を図 4.5 に示す。432L はプロトタイプと大きな違いは見られない。422L については全体的に光 量が上がっているが、(X,Y)=(0,0) での光量が極端に大きくなっていることがわかる。プロトタイプ、432L、 422L の最大光量/最小光量の比はそれぞれ約 2.9, 3.0, 3.6 となり、422L が最も大きい。

次に、波長変換ファイバーの水平方向のずれの効果をそれぞれの拡散板について測定した。SuperFGD の キューブを収めるボックスの LGP モジュールを取り付ける面には、波長変換ファイバーを通すための直径 3 mm が開けられている。波長変換ファイバーは直径 1 mm のため、波長変換ファイバーは LGP モジュール の Notch の中心から最大 1 mm ずれ得る。波長変換ファイバーが Notch の中心から 1 mm ずれた際の光量 の変化をそれぞれの拡散板で測定した。結果を図 4.6 に示す。波長変換ファイバーの 1 mm のずれによって、 プロトタイプ、432L、422L を用いた場合で光量がそれぞれ最大 88.6%、83.6%、78.4% に減少することが分 かる。

#### 結論

これらの試験の結果から、422Lの拡散板の使用を決定した。以下がそれぞれの試験に対する結論である。



図 4.5: 3 種類の拡散板を使用したときの光量の比較。左の図では縦軸は測定光量、右の図では縦軸は相対光 量である。横軸は LGP モジュールの Y 軸方法 (長手方向) の Notch 番号であり、Y=0 が最も LED に近い Notch である。丸いマーカーのプロットはプロトタイプ、四角いマーカーのプロットは 432L、三角のマーカー のプロットは 422L を用いた際の結果である。X の値は LGP モジュールの短手方向の Notch 番号である。

表 4.3: 試験に使用した拡散板。

拡散板のモデル	作成方法	透過率 (%)
アクリライト 432L(プロトタイプ)(三菱ケミカル社)	押し出し	58
パラグラス 432L(クラレ社)	キャスト	57
パラグラス 422L(クラレ社)	キャスト	73

1 つ目の試験結果について、どの拡散板を使用しても光量一様性については概ね同じ傾向であるが、422L に 関しては (0, 0) 点での光量一様性が極端に大きく、最大光量/最小光量比は 3.6 と他の拡散板と比較して大き な値をとることが分かった。しかし、この値はカメラを用いた LGP モジュールの品質検査の結果では平均的 な値であり、許容できる値だと考えた。図 4.7 は拡散板変更前に行った品質検査でのそれぞれの Wall LGP モ ジュールの最大最小光量比の分布である。

2 つ目の試験結果から、Notch の中心からの波長変換ファイバーのずれの効果が最も大きいのは 422L で あった。しかし波長変換ファイバーのずれによって最も光量が減少した点を比較すると、422L が大きな光量 を得られることが分かる。図 4.8 は波長変換ファイバーの水平方向のずれによって最も光量が落ちた点での光 量の比較である。すなわち、422L を用いた方が波長変換ファイバーの水平方向のずれを考慮しても高い光量 が得られることが分かる。

## 4.2 LGP モジュールの品質検査 (2回目) とその結果

拡散板を 422L に変更後、改めてカメラを用いた品質検査システムによる LGP モジュールの健全性の確 認と品質の確認を行った。Wall LGP モジュールと Bottom LGP モジュールはそれぞれ 55 モジュール量 産され、そのうち実際に SuperFGD にインストールされるのは Wall LGP モジュールは 47 モジュール、 Bottom LGP モジュールは 46 モジュールである。検査によって健全性や品質に問題のないモジュールを SuperFGD にインストールし、残りのモジュールは予備モジュールとして保管される。品質の良し悪しを判断



図 4.6: 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。上からプロトタイプ、432L、422L を用 いた際の結果である。左図の 2 次元分布の黒丸が測定箇所であり、青丸は Notch の位置を示す。右図は横軸 が Notch の中心からの水平距離で縦軸は相対光量である。



図 4.8: 波長変換ファイバーの水平方向のずれによって最も光量が落ちた点での光量。左は 432L を用いた結果 であり、右は 422L を用いた結果。

して優先的に除外すべきモジュールは、最小光量が極端に低いモジュール、平均光量が相対的に低いモジュー ルである。これは MPPC の増倍率の較正時に重要な指標である。SuperFGD における読み出しエレクトロニ クスはセルフトリガーで運用されるため、MPPC の増倍率較正にためにある閾値を超える光子数を MPPC に 入射する必要がある。光量が極端に低い Notch をもつ LGP モジュールや平均光量の低い LGP モジュールで は、閾値を超える光子数が分配されず、増倍率の較正ができない懸念があるためである。

図 4.9 に全 Wall LGP モジュールの検査結果を、図 4.10 に全 Bottom LGP モジュールの検査結果を示 す。これらのプロットの横軸のモジュール ID は、組み立て後のモジュールと検査結果を結びづけるために Wall LGP モジュール、Bottom LGP モジュールそれぞれに割り振った番号である。Wall LGP モジュール は 1~57、Bottom LGP モジュールは 1~59 まで ID が割り振られている。ただし Wall LGP モジュールの ID23, 39、Bottom LGP モジュールの ID 25, 29, 35, 56 は組み立てなかったモジュールであり、空き番号と なっている。また Wall LGP モジュールの ID 4 は 1 度目の品質検査後、別の試験に使用するために別グルー プへ提供していたことから 2 度目の品質検査は行っておらず、空き番号となっている。

検査の結果、問題のあった Wall LGP モジュールは ID 6、12、43 の 3 モジュールであった。まず ID 6 のモ ジュールは最小光量が他のモジュールと比較して低く、またプリントが薄い Notch があることを目視で確認し た。ID 12 のモジュールは拡散板の寸法がモジュールのケースよりも大きく、拡散板がケースに上手く収まら ないことを確認した。ID 43 のモジュールに関しては Notch のプリントされている位置が全体的に約 0.5 mm ずれており、LED 基板が若干歪んでいることを目視で確認した。

問題のあった Bottom LGP モジュールは ID 17、26、27、30、54 の 5 モジュールであった。まず ID 17 の モジュールは溶着されたケースの一部が外れていることを確認し、再溶着を行った後も不安定な状態だった. ID 26、30 のモジュールはケースの寸法が導光板と拡散板よりも小さく、導光板と拡散板がケースに上手く収



図 4.9: 2 度目の品質検査での Wall LGP モジュールの全モジュールの検査結果。上からモジュールの平均光 量、最大光量と最小光量をモジュールごとにプロットしたものである。モジュール ID 4、23、39 は組み立て ていないモジュールであり、空き番号である。

まらないことを確認した。ID 27、54 のモジュールは最小光量と平均光量が共に低いモジュールであり、ID 54 のモジュールは平均光量 32.74、最小光量 11.99 と共に最小値をとる。

上記のモジュール以外のモジュールについては、健全性や品質に大きな問題は確認できなかった。検査を 通過したこれらのモジュールの内、47 基の Wall LGP モジュールと 46 基の Bottom LGP モジュールを SuperFGD ヘインストールした。LGP モジュールのインストールについては 5 章で述べる。残りの LGP モ ジュールは、インストール時のトラブルに備えて予備モジュールとして保管した。



図 4.10: 2 度目の品質検査での Wall LGP モジュールの全モジュールの検査結果。上からモジュールの平均光 量、最大光量と最小光量をモジュールごとにプロットしたものである。モジュール ID 25、29、35、56 は組み 立てていないモジュールであり、空き番号である。

## 第5章

# LGP モジュールのインストール

2023 年 3 月 7 日から 14 日にかけて、品質検査を通過した LGP モジュールの SuperFGD への設置作業を J-PARC で行った。本章では、インストール前の作業やインストール作業の手順、各作業の詳細を述べる。

品質検査を終え、実際に使用する LGP モジュールについて、ケーブル穴の遮光などの準備を行った後に設置、遮光作業等を行った。品質検査後からインストール完了までの流れは以下の通りである。

- 1. インストール前の準備作業として、モジュールの設置位置に対応した ID を決定し、LED ケーブルに ID の書かれたタグをつける。LED ケーブルの穴を RTV ゴムで遮光する。
- 2. LGP モジュールを SuperFGD の壁面、底面にネジで固定する。
- 3. LGP モジュール内の LED の健全性を確認する。
- 4. LGP モジュール間や LGP モジュールと SuperFGD の外壁の間を RTV ゴムを用いて遮光する。
- 5. 熱収縮チューブを用いて LED ケーブルのバンドル作業を行う。
- 6. RTV ゴム、ブラックテープを用いて、LGP モジュールのネジの位置の遮光を行う。

以下、各工程について詳しく述べる。

#### 5.1 インストール前の準備作業

この工程では、まず LGP モジュールの ID と設置位置に対応した ID を決定し、設置位置の ID の書かれた 熱収縮チューブを LED ケーブルの先に付けた。この工程を行うのは、モジュールを想定と間違った位置に設 置することを防ぐためである。図 5.1 はチューブ取付後のケーブル、図 5.2 はモジュールの ID と設置位置の ID を示す。

また LGP モジュールのケースには、LED 基板にケーブルを接続するための穴が空いている。この穴からの LED 光の光漏れを防ぐために図 5.3、図 5.4 のように RTV ゴムで穴を塞いだ。

#### 5.2 LGP モジュールの取り付け

この工程では、LGP モジュールを SuperFGD の壁面、底面にそれぞれ 47 基、46 基固定をした。固定には 樹脂製ネジとトルクドライバーを用い、Wall LGP モジュールは 6 箇所、Bottom LGP モジュールは 10 箇所 ねじ止めをした。また、底面への取り付けは寝板を用いて、検出器の下に潜り込むようにして行った。図 5.5、 図 5.6 はそれぞれ Wall LGP モジュール、Bottom LGP モジュールの取り付け作業について示す。この作業



図 5.1: LGP モジュールの設置位置 ID の書かれたチューブを付けたケーブルの写真。



図 5.2: LGP モジュールの設置位置 ID。左図は SuperFGD の各面とモジュールの設置位置 ID の対応を示 す。また、モジュールが誤った位置に設置されるのを防ぐために、右の写真のようにケース表面に ID が書か れている。



図 5.3: LGP モジュールの LED 穴の遮光の流れ。穴の上から RTV ゴムを付けた後、ヘラを用いてゴムをの ばす。



図 5.4: LGP モジュールの LED 穴の写真。穴からの光漏れを防ぐために、RTV ゴムを用いて穴が塞がれている。



図 5.5: Wall LGP モジュール取り付け作業の写真。左の写真のように取り付け作業は2人で行い、1人が LGP モジュールを押さえながら1人がネジ締めを行った。ネジ締めは1モジュールに対して6箇所行われる。 右の写真はLGP モジュール取り付け後の SuperFGD のビーム下流側の壁面の写真である。



図 5.6: Bottom LGP モジュール取り付け作業の写真。左の写真のように取り付け作業は 3 人で行い、1 人が 検出器の横からモジュールを押さえ、2 人が検出器の下からモジュールを押さえながらネジ締めを行う。ネジ 締めは 1 モジュールに対して 10 箇所行われる。右の写真は LGP モジュール取り付け後の SuperFGD の底面 の写真である。

を Wall LGP モジュール 47 個、Bottom LGP モジュール 46 個について行った。

### 5.3 LED の健全性の確認

この工程では、LGP モジュール取り付け後にモジュール内の LED が正しく発光していることを確認した。 LED の健全性の確認については、LGP モジュールの品質検査がその役割を兼ねているが、品質検査の実施場 所から取り付け場所への運搬の際に LED が故障する可能性もあったため、取り付け後改めて LED が発光す ることを確認した。図は LED の健全性の確認の際の写真である。図 5.7 のように LED を DC 電源で光らせ、 ネジ穴からの光漏れを用いて LED の発光を確認した。この作業を全ての LGP モジュールに対して行い、全 ての LED が発光することを確認した。



電源





図 5.8: LGP モジュールと SuperFGD 外壁との隙間の遮光作業の流れ。隙間の上から RTV ゴムを付け、ヘ ラでゴムをのばす。

## 5.4 モジュール間の遮光

取り付け後の LGP モジュール同士の間には隙間があり、また LGP モジュールと SuperFGD の外壁との間 にも隙間が生じている可能性があり、これらの隙間から光漏れが生じる懸念がある。この工程では、LGP モ ジュールの間の隙間や LGP モジュールと SuperFGD の外壁との隙間の遮光作業を行った。図 5.8 に LGP モ ジュールと SuperFGD 外壁との隙間の遮光作業の流れを示す。LGP モジュールの間の隙間の遮光作業につい ても同様の手順である。図 5.9 は SuperFGD の壁面への遮光作業、図 5.10 は底面への遮光作業の写真である。

## 5.5 ケーブルバンドル

LGP モジュールに接続される同軸ケーブルは 3.3 節で述べたように直径約 1.0 cm と細く、長さも約 8.0 m と長い。検出器のインストール前後でケーブルに強い力が加わることによるケーブル断裂の防止やケーブルの 取り回しを良くする目的で、この工程では複数のケーブルをまとめて熱収縮チューブでバンドルした。図 5.11 のように 11 本または 12 本のケーブルがまとめてバンドルされ、それぞれのバンドルケーブルが検出器の角か ら出た後、パッチパネルに接続される。またケーブルバンドル作業の工程を図 5.12 に示す。11 本または 12 本 のケーブルをまとめてのばした後にヒートガンを用いてバンドルした。



図 5.9: 遮光作業後の SuperFGD の壁面の写真。遮光作業は LGP モジュール間、LGP モジュールと SuperFGD の外壁 (写真のオレンジの部分) の隙間に対して行い、RTV ゴムを隙間に付けた後にヘラでゴムを のばした。



図 5.10: SuperFGD の底面への遮光作業。左図のように SuperFGD の底面への作業は寝板を用いて、LGP モジュール間、LGP モジュールと SuperFGD の外壁 (写真のオレンジの部分) の隙間に対して行った。RTV ゴムを隙間につけた後にヘラでゴムをのばした。右図は遮光作業後の SuperFGD の底面の写真である。

### 5.6 ネジ穴の遮光

5.3 節では、ネジ穴からの光漏れを確認する事で LED の健全性の確認を行った。このように LGP モジュー ルのネジ穴には隙間があり光漏れが生じる懸念がある。この工程では、LGP モジュールのネジ穴の遮光作業 を行った。図 5.13 にネジ穴の遮光作業を示す。図のように、隣り合う 2 つの LGP モジュールのネジ穴を覆う ようにブラックテープを貼り、ブラックテープの端を RTV ゴムで埋めることでネジ穴の遮光をした。この作 業を Wall LGP モジュール 47 個、Bottom LGP モジュール 46 個に対して行った。



図 5.11: まとめてバンドルされるケーブルの領域。それぞれの色の 11 本または 12 本のケーブルがまとめてバ ンドルされる。その後、それぞれの検出器の角から合計 8 本のバンドルケーブルが出る。



図 5.12: ケーブルバンドル作業の写真。8m のケーブル 11 本または 12 本をまとめて熱収縮チューブに通し、 ヒートガンを用いてバンドルする。右図はバンドル後のケーブルの写真である。



図 5.13: LGP モジュールのネジ穴の遮光作業後の SuperFGD の壁面の写真。RTV ゴム、ブラックテープを 用いて隣り合う 2 つの LGP モジュールのネジ穴を覆うように遮光をした。

## 第6章

# LGP モジュールの性能について

第5章で記述した LGP モジュール設置後、SuperFGD に取り付けられた Wall LGP モジュール 1 基と 4.1.1 節で述べた CITIROC モジュールを用いて、LED キャリブレーションシステムの初期性能テストを行う ことができた。またこのテストの結果と第4章で解説したカメラを使用した LGP モジュールの品質検査の結 果に大きな違いが見られなかったことから、これらの試験結果を比較することで、全 LGP モジュールの性能 評価の見積もりを行った。6.1 節では LGP モジュール設置後の初期性能テストについて、6.2 節では LGP モ ジュールの性能評価の見積もりについて詳細に述べる。

#### 6.1 設置後の初期性能テスト

LGP モジュールの設置が完了した後、約 2m の波長変換ファイバーと SuperFGD に取り付けられた LGP モジュールを用いることでどの程度の光量を得ることができるのか、LED を光らせる矩形波の設定値を 変更することでどのような光量分布が得られるのかを確認する目的で、LED キャリブレーションシステムの 初期性能テストを行った。またこのテスト時は、実際の実験で使用される SuperFGD のエレクトロニクスは 開発段階であったため使用せず、代わりに使用されるアンプ回路が同一である CITIROC モジュールを用い た。3.6 節で述べたように実験時には読み出しエレクトロニクスはセルフトリガーで運用されるのに対して、 この性能テストでは、LED を発光させるタイミングの外部トリガーを使ってデータ収集を行った。 6.1.1 節ではこのテストのセットアップについて、6.1.2 節ではテストの結果について述べる。

#### 6.1.1 テストのセットアップ

前述の通り、このテストでは SuperFGD のエレクトロニクスの代わりに商用の CITIROC モジュールを用 いた。またテスト時は LED ドライバーが開発途中であったため、代わりに商用のファンクションジェネレー タとオペアンプを用いた (LED ドライバーは 6.5 V のパルスを生成可能だが、商用のファンクションジェネ レータでは 5.0 V までしか生成できないため、アンプを用いて信号を増幅することで 6.5 V のパルスを生成し た)。また、ファンクションジェネレータから LED 信号に同期したトリガー信号を CITIROC モジュールへ送 ることで、LED 発光のタイミングでのデータ取得を行った。図 6.1 はテストのセットアップの概略図である。

このテストでは1基の Wall LGP モジュールを用いた。また1基の Wall LGP モジュールからの LED 光 は7枚の MPPC 基板によって読み出される。図 6.2 は使用した LGP モジュールと MPPC 基板の領域を 示す。



図 6.1:初期性能テストのセットアップの概略図。SuperFGD のエレクトロニクスの代わりに商用の CITIROC モジュールを用い、LED ドライバーの代わりに商用のファンクションジェネレータとオペア ンプを用いた。

このテストでは LED へ送るパルス信号のパルス高、パルス幅を変えながらテストをした。使用したパルスの設定値は以下の通りである。

- パルス高 = 6.5 V, 6.0 V, 5.5 V, 5.0 V
- パルス幅 = 22 ns, 24 ns, 28 ns, 30 ns, 33 ns, 35 ns

#### 6.1.2 テストの結果

上記のセットアップを用いて測定することで図 6.3 のような ADC 分布が得られ、各光子数ごとのピーク、 0 p.e. に対応するペデスタルのピークが見られる。また、4.1.1 節で述べたように、ADC 分布のペデスタルと 1 光子ピークをガウシアンでフィットし、4.1 式を用いることで ADC 値から光子数への変換を行った。この 測定を LED パルス信号のパルス高、パルス幅を変えながら行い、各設定値での ADC 分布の形状や典型的な 光量、最小光量を見積もることで、テスト時においてどの LED パルスの設定値がゲインキャリブレーション に適しているか評価を行った。

まずパルス幅を 30 ns に固定し、パルス高を変えながら行ったテスト結果について述べる。測定結果を図 6.4 に示す。図 6.4 より、どのパルスでも ADC 分布の各光子数ピークを識別することができる。すなわち、パル ス高を下げることで各光子数ピークの分解能を高く保ったまま光量を容易に下げることが可能であることが分 かった。

3.6 節で述べたように、SuperFGD のエレクトロニクスがセルフトリガーで運用されることから、高い光 量でかつ ADC 分布の各光子数ピークの識別ができることが求められる。そのためパルス高 6.5 V を用いて、 パルス幅を変えながらテストを行った。測定結果を図 6.5 に示す。図 6.5 より、パルス幅が 22 ns より小さい



図 6.2: 上図は使用した MPPC 基板の領域を示す。また、下図の赤枠の領域である D0 モジュールを使用した。

と検出光子数が少なく、検出光子数への変換が困難であることが分かる。逆にパルス幅が 35 ns より大きい ADC 分布は、各ピークが幅をもつことで分布が連続的になり、各光子数ピークの識別が困難である。

22 ns から 33 ns の範囲で結果を比較すると、パルス幅 30 ns の結果がゲインキャリブレーションに適した設 定値だと考えられる。典型的な光量に関してはパルス幅 33 ns の結果が最も大きいが、ADC 分布の各光子数 ピークが不明瞭であり、4.0 p.e. 以上の光子数ピークの識別は困難である。一方、パルス幅 30 ns での ADC 分 布は各ピークの識別が容易であり、ゲインキャリブレーションに十分な数 p.e. の光量が得られている。

この初期性能テストの結果、パルス高 6.5 V、パルス幅 30 ns がゲインキャリブレーションに適していると分 かった。しかし、ADC 分布の各光子ピークの分解能はエレクトロニクスによるものであり、このテストでは SuperFGD のエレクトロニクスを使用していない。実際のエレクトロニクスを用いた LED パルス設定値の最 適化については第9章で述べる。



図 6.3: 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。図はパルス 高 = 6.5 V、パルス幅 = 30 ns での結果である。

6.5V	
Typical LY	2.0 p.e.
Min LY	1.5 p.e.
6.0V	
Typical LY	1.6 p.e.
Min LY	1.2 p.e.
5.5V	
Typical LY	0.7 p.e.
Min LY	0.55 p.e.



図 6.4: 各パルス高での ADC 分布測定結果。それぞれの測定での典型的な光量と最小光量も見積もった。パルス幅は 30 ns を用いた。



図 6.5: 各パルス幅での ADC 分布測定結果。それぞれの測定での典型的な光量と最小光量も見積もった。パルス高は 6.5 V を用いた。

### 6.2 全モジュールの性能評価の見積もり

6.1 節で述べたように、取り付け後の1 基の Wall LGP モジュールと波状変換ファイバー、MPPC を用い て光量測定を行った。この光量測定の結果を 4.2 節で述べた LGP モジュールの品質検査の結果と比較したと ころ、LGP モジュール内の光量分布に大きな違いが見られなかった。そこで取り付け後の光量測定の結果 (光 子数) と品質検査の結果 (任意単位) の比を算出し、この比を全ての LGP モジュールの品質検査の結果へ適用 することで光量 (任意単位の光量) から光量 (光子数) への補正を行い、全ての LGP モジュールに対して性能 評価の見積もりを行った。6.2.1 節では性能評価の方法について、6.2.2 では性能評価の結果について詳しく述 べる。

#### 6.2.1 評価方法

まず Wall LGP モジュールの評価方法について述べる。品質検査の結果 (任意単位の光量) から取り付け後 の光量測定の結果 (光子数) への補正を行うために、図 6.6 のようにこれらの結果の比を LGP モジュールの各 Notch に対して算出することで光量比の 2 次元分布を作成した。ただし光量比分布の作成について、取り付け 後のテストで用いた D0 モジュールと同じモジュールの品質検査の結果 (4.2 での Wall LGP モジュール ID 1 に対応)を用いた。また作成した光量比の 2 次元分布より、取り付け後の結果と品質検査の結果に大きな差が ないと考えた。以下にこの光量比の 2 次元分布に対する定性的な解釈を述べる。



図 6.6: 品質検査時と取り付け後の比較。光量比のマップの作成には取り付け後の光量測定に使用した LGP モジュールと同じ LGP モジュールの品質検査の結果を用いた。

図 6.7 に示すように、LGP モジュールのネジの位置とネジの後ろ側の領域で比が大きな値となっている。す なわちこれらの領域では品質検査の結果と比較して、取り付け後の結果の方が相対的に光量が高くなっている。 この違いについて、カメラを用いた品質検査では Nocth から真上に散乱された光は測定できるが、斜め方向に 散乱された光を測定することはできない。一方で取り付け後のテストでは、波長変換ファイバーと MPPC を 用いている。波長変換ファイバーは LGP モジュールに接しており、またファイバーによって吸収、再発光さ れた光を MPPC で検出していることから Notch から真上に散乱された光と斜め方向に散乱された光の両方を 測定できる (図 6.8)。LGP モジュールのネジ前の領域で導光板内を直進していた LED 光はネジによって散乱 され、ネジの後ろ側の領域では散乱され角度のついた光が増加する。この角度のついた光をカメラでは測定で きないが、ファイバー +MPPC では測定することができる。このような解釈からネジの位置、ネジの後ろ側 の領域で取り付け後の結果の方が相対的に光量が高くなっていると考えた。

上記の考察を考慮すると取り付け後の結果と品質検査の結果の比が均一であり、これらの結果に大きな違い がないと考えられる。これより図 6.7 の光量比の分布を全ての Wall LGP モジュールの品質検査の結果に適用 させることで相対的な光量 (任意単位) から絶対的な光量 (光子数) への補正を行った。

次に Bottom LGP モジュールの評価方法について述べる。上述の光量比分布に関する解釈から光量比分布 を図 6.9 の上図にような 4 つの領域に分割し、それぞれの領域で光量比の平均値を算出した。この各領域にお ける光量比の平均値を Bottom LGP モジュールの対応する領域に使うことで図 6.9 の下図のような光子数へ の補正のための 2 次元分布を作成した。この 2 次元分布を全ての Bottom LGP モジュールの品質検査の結 果に適用させることで、Bottom LGP モジュールに対しても光量 (任意単位) から光量 (光子数) への補正を 行った。



図 6.7: 品質検査時と取り付け後の結果の光量比の 2 次元分布。LGP モジュールのネジの位置とネジの後ろ側の領域で比が大きい値になっている。



図 6.8: 品質検査 (カメラ) と取り付け後のテスト (ファイバー +MPPC) の違いの考察。カメラを用いた品質 検査での光量測定では Notch から真上に散乱された光は測定できるが、斜めに散乱された光は測定すること ができない。一方、ファイバー +MPPC を用いた光量測定ではファイバーが LGP モジュールに接している ため、Notch から真上に散乱された光と斜めに散乱された光の両方を測定できると考えた。



図 6.9: Bottom LGP モジュールの光子数への補正のための 2 次元分布の作成。上図のように Wall LGP モ ジュールの光量比分布を 4 つの領域に分割し、それぞれの領域で平均値を算出した。この各領域での平均値を Bottom LGP モジュールの対応する領域に使うことで下図を作成した。下図を Bottom LGP モジュールの 品質検査の結果に適用することで、品質検査時での任意単位から光子数への補正を行った。この補正を全ての Bottom LGP モジュールに対して行うことで全モジュールの性能評価を行った。

#### 6.2.2 評価結果

それぞれの LGP モジュールについて図 6.10 のように、品質検査の結果である図 4.2 を光子数に補正したも のを作成し、これらの結果から、Wall LGP モジュールと Bottom LGP モジュールそれぞれについて、全モ ジュールの平均光量を算出した。また Wall LGP モジュールと Bottom LGP モジュールそれぞれについて平 均光量と光量分布の標準偏差から、1 基の LGP モジュール内、また各モジュール間でどの程度光量にばらつ きがあるか見積もった。下式がこれらの結果の算出方法、表 6.1 はこれらの結果である。ただし Mean LY は それぞれのモジュールの平均光量、StdDev LY は光量分布の標準偏差であり、例えば Mean(Mean LY) であ ればそれぞれのモジュールの平均光量の全モジュールでの平均値を意味する。

まず平均光量について Wall LGP モジュールは 2.23 p.e.、Bottom LGP モジュールは 1.98 p.e. である。 また 6.1.2 節で述べた 6.5 V, 30 ns での測定結果の典型的な光量が約 2.0 p.e. であったことからも平均光量 2 p.e. 程度がゲインキャリブレーションに適した光量だと言える。

次に1基の LGP モジュール内での光量のばらつきについて Wall LGP モジュールは約 22%、Bot-



図 6.10: 光子数補正後の結果の例。左図は Wall LGP モジュールの光量分布の例。右図は左図を 1 次元にしたもの。

	Wall LGP モジュール	Bottom LGP モジュール
全モジュールの平均光量 [p.e.]	2.23	1.98
1 基の LGP モジュール内での光量のばらつき	0.222	0.133
LGP モジュール間での光量のばらつき	0.243	0.254

表 6.1: 全 LGP モジュールの性能評価の結果

tom LGP モジュールは約 13 % のばらつきがある。これは LGP モジュールのネジ付近での LED 光の散乱に よってネジ付近の Notch での光量が大きく測定されることに起因する。これより、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の LED キャリブレーションシステムの運用について、1 つの LED の 設定値で 1 基の LGP モジュール全てのチャンネルを較正するのではなく、平均的な光量のチャンネルとネジ 付近等の光量が大きく検出されるチャンネルを分けて較正する運用方法が想定されている。この運用方法とそ れぞれの運用での LED の設定値については 9.2 節で述べる。

最後に LGP モジュール間での光量のばらつきについて Wall LGP モジュールは約 24%、Bottom LGP モ ジュールは約 25% のばらつきがあり、これは先行研究と矛盾の無い結果である。また LED の設定値は LGP モジュール毎に設定できることからも、25% 程度の個体差であれば十分ゲインキャリブレーションを行 えると言える。

全モジュールの平均光量 = Mean(Mean LY) 1 基の LGP モジュール内での光量のばらつき = Mean(StdDev LY/Mean LY) LGP モジュール間での光量のばらつき = Mean(StdDev LY)/Mean(Mean LY)

## 第7章

# LED ドライバーの開発

3.2.2 節、図 3.10 で説明した LED ドライバーは、LED キャリブレーションシステムの構成要素の1つであ り、約 30 m の同軸ケーブルを通して LGP モジュール内の LED を光らせる矩形波パルスを発生させるための 装置である。LED ドライバーはマイコンボード、FPGA、オペアンプ等で構成されており、外部の PC から イーサーネットケーブルを介してコントロールされる。また、1 台の LED ドライバーで最大 12 基の LGP モ ジュールに対応することができ、8 台の LED ドライバーが導入される。LED ドライバーの仕様を図 7.1 に 示す。

LED パルスについては外部の PC から図 7.2 のような GUI を用いて各チャンネルの ON/OFF とパルス 高、パルス幅の調節が可能である。図中の DAC 値は LED パルスの波高値をコントロールする 12-bit のパラ メータであり、DAC 値を下げることで波高を上げることができる。また、図中の Time 値は LED パルスの波 幅値をコントロールする 6-bit のパラメータであり、Time 値を上げることでパルス幅を広げることができる。

しかしながら当初製作したプロトタイプの LED ドライバーでは 6.5V パルスの生成、波高値のコントロー ルを行うことができなかった。初期段階での動作確認として、波高値を変更しながら LED パルスの波形を確 認した。結果を図 7.3 に示す。図中の黄色の波形が LED パルスである。波高が最も高いはずである DAC = 0 でも 3.0V ほどの波形しか得ることができず、DAC 値とパルス高の関係も想定と異なる。また、DAC 値を 上げていくと、グラウンドレベルに対して、波形のベースラインが下がっていくような想定外の挙動も確認さ れた。

3.6 節で述べたように LED ドライバーには LED の設定値を細かくコントロールできることが求められ、ま た読み出しエレクトロニクスのセルフトリガーで設定される閾値以上の範囲で、各検出光子数ピークが識別で きるほどの光量が求められる。本研究では LED ドライバーの量産前にプロトタイプの1 チャンネルを用いて これらの問題の原因究明をし、一部仕様を変更することで要求性能を満たした。これらの問題の原因と行った 対処についてそれぞれ本章の各節で述べる。

#### 7.1 オペアンプの負電源の変更

LED ドライバーにはオペアンプが内蔵されており、FPGA で生成された信号を増幅することで LED に入 力するパルスを生成している。このオペアンプの負電源の電圧値が想定値と異なっていた。図 7.4 にオペアン プの負電源電圧の想定値と実測値を示す。D6 チップはオペアンプの負電源電圧を生成するレギュレータであ り、この D6 チップの出力電圧を測定した。想定値 -1.2V に対して測定値は-4.96 V であった。

この問題の原因は、使われていたレギュレータが想定と異なっていた事である (想定していたチップの型番

項目	数值
チャンネル数	12
パルス幅 (Time)	5ns ~ 600ns (0 ~ 63)
パルス高 (DAC)	<b>0V ~ 6.5V</b> (0 ~ 4095)
電源電圧	+6V,-6V,+12V

図 7.1: LED ドライバーの仕様。LED ドライバーの 1 チャンネルが 1 基の LGP モジュールに対応する。

V Chann	el O	1.0	✓ Channe	11		✓ Channe	12	
DAC	0	¢	DAC	0	÷	DAC	0	0
Time	0	\$	Time	0	\$	Time	0	٢
✓ Chann	el 3		✓ Channe	44		✓ Channe	H 5	
DAC	0	\$	DAC	0	\$	DAC	0	\$
Time	0	\$	Time	0	\$	Time	0	٢
✓ Chann	el 6		V Channe	17		✓ Channe	N 8	
DAC	0	\$	DAC	0	\$	DAC	0	\$
Time	0	*	Time	0	*	Time	0	\$
✓ Chann	el 9		✓ Channe	10		✓ Channe	11	
DAC	0	\$	DAC	0	\$	DAC	0	\$
Time	0	\$	Time	0	\$	Time	0	٥
Board	IP: 192.1	68.0.1	1	Host IP:	192.168.0	.16	Recon	nect

図 7.2: LED パルスの波高、波幅、各チャンネルの ON/OFF を調節する GUI。



図 7.3: 初期段階での LED ドライバーの動作確認の結果。黄色の波形が LED パルスを表し、黄色の点線はグ ラウンドレベルを表す。DAC 値は LED パルスの波高をコントロールするパラメータである。



図 7.4: オペアンプの負電源の想定値と実測値。図の回路はオペアンプの負電源を生成する回路であり、 D6 チップが負電源を生成するレギュレータである。このチップの出力電圧を測定した。左図が想定値、右図 が実測値である。

は LT3015 E/I DD だが、実装されていたチップの型番は LT3015 E/I DD-5)。想定していたチップと実装されていたチップは共に同じシリーズの負電圧レギュレータ [26] であった。このレギュレータには特定の値の電圧を出力する固定出力バージョンと -1.22 V をリファレンス電圧とする可変出力バージョンの 2 種類があり、測定結果から使用されていたのは -5 V の固定出力バージョンだと考えた。可変出力バージョンを用いた場合の出力電圧  $-V_A$  は以下の式 (7.1) にように、-1.22 V のリファレンス電圧と外付けの抵抗の抵抗値の比で表現される。(ここでは R104 = 0 $\Omega$  である。)

$$-V_A = -1.22V \left(1 + \frac{R104}{R103}\right) \\ = -1.22V \tag{7.1}$$

実装されていた D6 チップを可変出力バージョンのチップに入れ換えた後に、オペアンプの負電源電圧を測定 すると-1.213 V であり、想定値と近い値が得られた。D6 チップ変更後に、DAC 値を変更しながら LED パル スの波形を確認した。図 7.5 に結果を示す。D6 チップを入れかえることで、DAC 値を上げることで見られた グラウンドレベルに対して波形のベースラインが下がっていく挙動は見られなくなった。また、DAC>1000 で は DAC 値とパルス高の関係も改善されている。しかしながら、0<DAC<1000 の領域では波高値がほぼ一定 である。また最大の波高値は 3.0 V であり、想定値の 6.5 V のパルスを出力することはできていない。

#### 7.2 オペアンプの正電源の変更

前節でも述べたが、オペアンプの負電源電圧の変更後も 6.5 V のパルスを出力することはできなかった。こ の原因を探るためにまず増幅回路の入力信号、増幅率に着目した。LED ドライバーの増幅回路は図 7.6 の ような差動増幅回路であり (図の DA8A が増幅に用いるオペアンプ)、増幅回路の入力である点 1, 2 での信 号、出力である点 3 での信号、LED ドライバーの出力である点 4 での信号を確認した。点 1, 2 での信号を  $V_1, V_2$ とするとオペアンプ DA8A の 1 番ピン、2 番ピンへの入力  $V_{IN-}, V_{IN+}$ は以下の式 (7.2)、(7.3) の ように表現できる (増幅回路に接続されている 4 つの抵抗は R54, R65, R77, R46 であり、抵抗値はそれぞれ 430 $\Omega$ , 430 $\Omega$ , 1.1 $k\Omega$ , 1.1 $k\Omega$  である)。

$$V_{IN-} = V_1 \tag{7.2}$$



図 7.5: D6 チップ交換後の LED ドライバーの出力パルス。黄色の波形が LED パルスを表す。図 7.3 で見ら れた、波形のベースラインが下がっていくような挙動は見られなくなっている。



図 7.6: LED ドライバーの増幅回路の回路図。FPGA からの信号がオペアンプ (DA8A) の 2 入力 (In1-, In1+) に入り、増幅される。点 3 と点 4 の間にあるオペアンプ DA2B で構成された回路はボルテージフォロワー回 路であり、入力電圧と出力電圧は等しい。

	点1	点2	点3	点4	点4 (計算値)
DAC = 0	0 V	1.80 V	3.00 V	3.00 V	6.55 V
DAC = 500	0.375 V	1.80 V	3.00 V	3.00 V	5.58 V
DAC = 1000	0.750 V	1.80 V	2.90 V	3.00 V	4.60 V
DAC = 1500	1.13 V	1.80 V	2.50 V	2.50 V	3.63 V
DAC = 2000	1.50 V	1.80 V	1.75 V	1.75 V	2.65 V
DAC = 2500	2.00 V	1.80 V	1.13 V	1.25 V	1.35 V

図 7.7: 増幅回路の各点の実測値と点 4 出力電圧の計算値。オペアンプの負入力は一定であり、DAC 値を上げ ると正入力が大きくなることで、差分増幅回路の出力電圧は小さくなる。

$$V_{IN+} = \frac{430\Omega + 1100\Omega}{1100\Omega} V_2 \tag{7.3}$$

これより増幅回路の出力信号である点3 での信号は以下の式 (7.4) で表現される。

$$V_{out} = \frac{1100}{430} \left( \frac{430 + 1100}{1100} V_2 - V_1 \right)$$
  
~ 2.6(1.4 × V\_2 - V\_1) (7.4)

図 7.6 の点 1~4 の各点での波形の振幅を DAC 値を変えながら測定し、点 1, 2 での測定結果と式 (7.4) から増 幅回路の出力の計算値を算出した。図 7.7 に結果を示す。図 7.7 の計算値より、DAC = 0 で 6.5 V のパルス を出力するうえで増幅回路の入力信号、増幅率は十分だと考えられる。

しかし、点4での電圧実測値は最大 3.0 V であり、出力電圧が 3.0 V で飽和しているように見える。これよ り、6.5 V のパルスを実現する上で電源電圧が足りていないと考え、オペアンプの正電源電圧に着目した。図 7.8 に正電源電圧の想定値と実測値を示す。DA13 チップはオペアンプの正電源電圧を生成するレギュレータ であり、この DA13 チップの出力電圧を測定した。その結果、想定値 7.12 V に対して測定値 5.19 V であり、 6.5 V の出力を得るうえでオペアンプの電源電圧が足りていないと考えた。

DA13 チップの出力電圧の計算値を式 (7.5) に示す。出力電圧は式 (7.5) のように 1.25 V のリファレンス電 圧と外付けの抵抗値の比で表現され、計算値は実測値と近い値である。すなわち図 7.8 の設計での電源電圧で は、6.5 V のパルスを出力できない。そこで外付けの抵抗の抵抗値を変更することを考えた。



図 7.8: オペアンプの正電源の想定値と実測値。図の回路はオペアンプの正電源を生成する回路であり、 DA13 チップがオペアンプの正電源電圧を生成するレギュレータである。このチップの出力電圧を測定した。 左図が理想値、右図が実測値である。



図 7.9: 正電源変更後の LED パルスの波高値と DAC 値の関係。概ね線形であるが、6.5 V のパルスを出力す ることはできていない。

$$+V_A = 1.25V \left(1 + \frac{R111}{R112}\right) \\ = 1.25V \left(1 + \frac{750\Omega}{240\Omega}\right) \\ \sim 5.16V$$
(7.5)

R111 抵抗を 750Ω から 1100Ω に変更した。R111 抵抗を 1100Ω に変更すれば DA13 チップの出力電圧は式 (7.5) より 7.10 V となり、想定値に近い値が得られるはずである。実際に R111 を 1100Ω に入れかえた後のオ ペアンプの正電源電圧の測定値は 7.11 V であり計算値と近い値が得られた。R111 抵抗変更後の、DAC 値と LED パルスの波高値の関係を図 7.9 に示す。概ね線形であり、図 7.4 で見られた DAC<1000 の領域で波高 値が 3.0 V でほぼ一定であるような挙動は見られなくなったが、最大波高値は約 4.5 V であり、電源電圧変更 後でも 6.5 V の波形は未だ確認できなかった。



図 7.10: 波高の減衰が生じた回路。増幅回路の赤枠の部分で電圧降下が生じ、出力される矩形波の波高が低く なっていた。

#### 7.3 電圧降下の抑制

6.5 V の波形が得られない原因の 1 つとして、増幅回路の一部で電圧降下が起こり、波高が減衰していること が分かった。図 7.10 の赤枠に電圧降下が生じている該当の回路を示す。赤枠の回路を通ることで、LED パル スは下式 (7.7) のように約 0.77 倍に減衰してしまう。図 7.10 の  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  の実測値はそれぞれ 5.20 V、4.13 V であり、 $V_{in}$  の実測値から  $V_{out}$  の計算値は式 (7.7) より、5.20 V×0.77 = 4.00 V となり、実測値と近い値が得 られる。

$$V_{out} = \frac{R36}{R26 + R36} V_{in}$$
  
=  $\frac{100\Omega}{30\Omega + 100\Omega} V_{in}$   
~  $0.77V_{in}$  (7.6)

増幅後の信号が減衰される問題について、R26 の抵抗値を小さくし、電圧降下を大きく抑制することで解決した。具体的には R26 の抵抗値を 30Ω から 3.3Ω に変更した。これにより下式のように図 7.10 の赤枠部分による信号の減衰は抑えられる。

$$V_{out} = \frac{R36}{R26 + R36} V_{in} = \frac{100\Omega}{3.3\Omega + 100\Omega} V_{in} \sim 0.97 V_{in}$$
(7.7)

R26 抵抗の変更前と変更後の  $V_{in}$ 、 $V_{out}$ の波形を図 7.11 に示す。R26 抵抗変更後の出力の計算値は 5.10V×0.97 = 4.95V であり、計算値と近い値が得られている。

## 7.4 増幅回路の増幅率の変更とオペアンプの正電源の変更(2回目)

前節 7.3 より、電圧降下の抑制のよって出力を約 5.0 V にすることができた。出力を更に大きくするために まず、増幅回路の増幅率の変更を行った。具体的には、図 7.6 の R54、R65 の抵抗値を 430Ω から 300Ω に変 更した。式 (7.4)、図 7.7 より増幅回路の負入力は式 (7.8) のように 2.5 V と計算できることから、出力は式


図 7.11: R26 抵抗を変更する前後の  $V_{in}$ 、 $V_{out}$ の波形。変更前は水色の波形、変更後はピンク色の波形が  $V_{in}$ 、 $V_{out}$ の波形を示す。

(7.9) のように約 7.3 V と見込める。しかし増幅率変更後の実測値は図のように約 5.2 V と増幅率の変更前と大きく変わらなかった。

$$V_{IN-} = 1.8 \times \frac{1100\Omega + 430\Omega}{1100\Omega} \sim 2.5V$$
 (7.8)

$$V_{out} = \frac{1100\Omega}{300\Omega} (2.5 - 0.5) \sim 7.3V \tag{7.9}$$

増幅率を変えても出力に変化がなかったことから、電源電圧が足りず出力が飽和していると考えた。これを LED ドライバーに用いられているオペアンプと同じものを使った反転増幅回路によって検証した。オペアン プの電源電圧は LED ドライバーと同様に +7.2 V、-1.2 V とし、増幅率は 2.2 倍とした。すなわち入力の信 号を -3.0 V とすれば 6.6 V の出力が得られるはずである。しかしながら結果は図 7.13 のように、LED ドラ イバーの結果と同様に、計算値よりも小さい 5.2 V の出力しか得られなかった。この結果から、使用している オペアンプの特性により、電源電圧が約 7.2 V では 6.5 V の出力が得られないと考え、オペアンプの電源電圧 を再び大きくすることを考えた。

電源電圧について、具体的には 7.2 節で変更した、図 7.8 中のレギュレータ回路で使用されている R111 抵抗を 1100 $\Omega$  から 1400 $\Omega$  に変更した。これにより電源電圧の計算値は式 (7.5) より 8.54 V に増加する。変更後の測定値は 8.58 V と計算値に近い値が得られた。電源電圧変更後の DAC = 0 での出力波形を図 7.14 に示す。図のように、電源電圧の変更によって 6.5 V の出力が得られた。





図 7.12: 増幅率変更後の波形。最大の波高値が 5.2 V の波形が入力信号であり、ピンク色の波形が出力信 であり、変更前後で大きな変化はない。 号である。LED ドライバーを用いた結果と同様に、 最大波高値は 5.2 V である。



図 7.14: 増幅率と電源電圧変更後の出力波形。DAC = 0, Time = 63 での波形である。



図 7.15: 増幅率を変更していないチャンネルでの LED パルスの波高値と DAC 値の関係。Time = 63 での結 果である。DAC = 0 で約 6.0 V の波形が見られたが、6.5 V の波形は出力できていない。

7.2 節で述べたように、計算値では 6.5 V を出力するうえで増幅率の変更を行う必要はないはずである。そ こで、テストで使用していない他チャンネルに対して上記の項目 2 の変更を行った後に出力を波形を確認する ことで、増幅率の変更なしに 6.5 V のパルスの出力が可能かを確認した。結果を図 7.15 に示す。増幅率の変更 前では、最大で約 6.0 V の出力が可能であり、要求性能を満たすうえで、増幅率の変更が必要だと考えた。

### 7.5 **仕様変更の**結論

本研究で以下の4種類の仕様変更を行うことで LED パルスの波高値の変更、6.5 V のパルスの出力が可能 となった。

- 1. 増幅回路のオペアンプの負電源電圧の変更 変更前:-4.96 V → 変更後:-1.22 V
- 2. 電圧降下の抑制 変更前: $V_{out} = 0.77 \times V_{in} \rightarrow$ 変更後: $V_{out} = 0.97 \times V_{in}$
- 3. 増幅回路のオペアンプの正電源電圧の変更 変更前:+5.19V → +8.58V
- 増幅回路の増幅率の変更
  変更前: <sup>1100</sup>/<sub>430</sub> ~ 2.6 → <sup>1100</sup>/<sub>300</sub> ~ 3.7

これらの変更を全てのチャンネルに加えるためには約 40 個の部品を変更する必要がある。そこで量産へ移行 する前に上記の変更を加えたプリプロダクション品を生産し、改めて性能に問題がないことを確認した。

まず 12 チャンネル全ての出力波形を確認した。図 7.16 に示すのは DAC = 0, Time = 7 での出力波形の 1 例であり、プリプロダクション品でもプロトタイプと同様の約 6.5 V の波形が得られた。



図 7.16: プロトタイプとプリプロダクション品の出力波形。左図が 7.4 節で示した改良後のプロトタイプ、右 図がプリプロダクション品の出力波形を表す。DAC = 0, Time = 7 での結果であり、黄色の波形が出力波形 である。

次に、実際に LED ドライバーによって LGP モジュール内の LED を発光させ、LGP モジュールの Notch で の散乱光測定を行った。測定セットアップは 4.1.1 節で述べたものと同様に波長変換ファイバーと MPPC を 使用し、MPPC への電源供給と信号読み出しには CITIROC モジュールを使用した。また、ファンクション ジェネレータは LED ドライバーと CITIROC モジュールに接続されており、LED ドライバーへのトリガー 信号と共にとそれに同期した信号を CITIROC モジュールへ送っている。また LED ドライバーの設定値はパ ルス高 6.5 V、パルス幅 35 ns に対応する DAC = 0, Time = 7 のパルスを用いた。

このテストでは光量分布の各光子数ピークを識別できるように、図 7.18 に示すように ND(Neutral Density) フィルターを波長変換ファイバーと LGP モジュール内の拡散板の間に挟むことで MPPC で読み出される光 量を調節した。測定に用いた ND フィルターは、図 7.17 に示す一般には写真撮影等に用いられる富士フィルム 社製のものである。このテストに用いた波長変換ファイバーの長さは 0.2m であるが、実際の SuperFGD に は最長約 2m の波長変換ファイバーが使用されている。図 7.19 に示すようにキューブから MPPC までの ファイバー長が 0.2m での光量と比較して、ファイバー長が 2m での光量は 0.5 倍となることから、×0.5 の ND フィルター (ND 0.5 7.5X 1) を用いた。

LED ドライバーを用いて図 7.20 の光量分布が得られた。プロトタイプとプリプロダクション品を用いた場合の平均光量はそれぞれ 1.376 pe, 1.49 pe であり、差は約 8 % と大きな差はない。

以上よりプリプロダクション品についてプロトタイプと大きな差がなく要求性能を満たすことが確認できた ため、量産へ移行した。量産品のインストールについては 8.1 節で述べる。



図 7.17: 測定に用いた富士フィルム社製の ND フィルター。



図 7.18: LED ドライバーを用いた光量測定のセットアップ。ND フィルターを波長変換ファイバーと拡散板 の間に挟むことで波長変換ファイバーに入る光量を調節している。



図 7.19: 長さ 2 m のクラレ社製 Y-11 波長変換ファイバーを用いて読み出される光量の MPPC までの距離の 依存性の測定結果 [27]。この測定では、シンチレータキューブに通した 2 m の波長変換ファイバーの片方の 端面に MPPC を取り付け、キューブに UV ダイオードを当て、シンチレーション光を波長変換ファイバー と MPPC で読み出している。この測定をキューブと MPPC 間の距離を行っている。図の 3 つのプロットは ファイバーの MPPC 側の端面の処理が異なり、赤いプロットは端面を磨いた後に反射材が塗られており、青 いプロットは端面を磨いたのみ、黒いプロットは端面を磨いた後に黒く塗られている。SuperFGD に導入され た波長変換ファイバーの端面は磨かれず、特別な処理もされない。SuperFGD の環境に近い青いプロットを 参照すると、キューブから MPPC までの距離が 0.2 m での光量と比較して、距離が 2 m での光量は 0.5 倍と なっている。



図 7.20: LED ドライバーを使用した光量測定の結果。左図がプロトタイプを用いた結果であり、右図はプリ プロダクション品を用いた結果である。

## 第8章

# SuperFGD インストールにおける準備

地上で建設、健全性の確認を終えた SuperFGD は ND280 ヘインストールされた。この SuperFGD のイ ンストール前後で、LED キャリブレーションシステムの運用に向けた準備作業を行った。8.1 節では量産品 LED ドライバーの動作チェック、インストールについて述べる。また LED キャリブレーションシステムに用 いられるケーブルの取り回しを良くし、作業性を向上させる目的でパッチパネルをインストールした。パッチ パネルの詳細やデザイン変更について 8.2 節で述べる。またパッチパネルのインストールについては 8.2 節で 述べる。

## 8.1 LED ドライバーのインストール

7 章で述べたように LED ドライバーの開発、プリプロダクション品の機能をテストを終えた後に 8 台の量 産品の動作確認を行った。またこのテストは 1~2 日で迅速に行うことが求められたことから、以下の簡潔な 3 項目のテストを行い、動作に問題がないことを確認した。

- 1. 全チャンネル (12 チャンネル) で約 6.5 V の波形の確認
- 2. パルス高、パルス幅の調節の確認
- 3. 全チャンネル同時に発光させられるか確認

まず上記の 1, 2 の項目については、7 章で述べた仕様変更が量産品へ適用されているか確認する目的で行った。また、LED ドライバーの設定値である DAC 値、Time 値を変えながら出力波形を確認することで、これらの項目を満たすことを確認した。図 8.1 は動作確認時の出力波形の 1 例である。

項目 1, 2 は各チャンネル個別で想定通りの挙動を確認することが目的であり、加えて全チャンネル同時 に挙動するか確認する目的で項目 3 のテストを行った。図 8.2 のように LED ドライバーの全チャンネルに LED を接続し、実際に LED を発光させることで、12 個の LED を同時に発光させることが可能か目視で確 認した。

これらの動作確認を 8 台の LED ドライバー全てについて行い、想定通りの挙動をすることが確認できたた め、SS 階へインストールを行った。実際の LED ドライバーの運用では、MCB(Master Clock Board) と呼ば れるモジュールからのトリガー信号を用いて駆動する。MCB はニュートリノビームや他の ND280 システム と同期した信号の伝送が可能であり、LED キャリブレーションシステムの他にも様々なシステムに用いられ る。また MCB からのトリガー信号を 8 つの LED ドライバーへ分割するために Multiplexer ボードと呼ばれ るモジュールが導入される。図 8.3 が MCB、Multiplexer ボード、LED ドライバー、LGP モジュールの接続



図 8.1: 量産品 LED ドライバーの出力波形の 1 例。左の波形は DAC = 0, Time = 7、右上の波形は DAC = 40, Time = 7、右下の波形は DAC = 0, Time = 6 での結果である。約 6.5 V の波形は出力可能であ り、DAC 値、Time 値を変えることでパルス高、パルス幅の調節が可能であることが確認できる。



図 8.2: 目視での LED ドライバーのチャンネルチェック。12 チャンネル全てに LED を接続し、LED が発光 していることを目視で確認。



図 8.3: MCB、Multiplexer ボード、LED ドライバー、LGP モジュールの接続の概略図。



図 8.4: 上図が Multiplexer ボードの代替案の概略図、下図がインストール後の LED ドライバーの写真。 Multiplexer ボードの代わりに Level adapter モジュール、Fan IN/OUT モジュールを用いることで MCB からの信号を分割している。またパルスの設定値を調節するために、PC とイーサーネットケーブルで接続されている。

の概略図である。しかし LED ドライバーのインストール時に Multiplexer ボードは未だ開発段階であった。 そこで一時的な代替案として Level adapter モジュール、Fan IN/OUT モジュールを用いて MCB からの信 号を分割した。図 8.4 の上図にこれらのモジュールを用いたトリガー信号の分割の流れを示す。トリガー信号 として LED ドライバーには TTL 信号を入力する必要があり、MCB からも TTL 信号が出力される。信号 の分割に用いた Fan IN/OUT モジュールは NIM 信号を入力、出力信号とするため、TTL レベル、NIM レ ベル間の変換に Level adapter モジュールを用いた。図 8.4 の下図はインストール後の LED ドライバーの写 真である。

## 8.2 パッチパネルのインストール

3.3 節で述べたように、LED キャリブレーションシステムに用いられる同軸ケーブルの取り回しと共に作業 性を向上させるためにパッチパネルを B1 階 (ND280 のマグネット下) に設置した。パッチパネルは 3 mm 厚 のアクリル板を切り出し、アクリル製の部品や金属製のネジ等組み立てて作成した。またパッチパネルは主に 図 8.5 の左上の図のように中間基板とケーブル長調節部で構成される。まず中間基板について述べる。中間基 板は図 8.6 のように LGP モジュールに接続された約 8 m のケーブルと LED ドライバーに接続された約 23 m ケーブルの両者を接続する基板であり、図 8.5 の左図の緑色の領域に設置される。また 1 つの中間基板には 12 チャンネルのコネクターがあり、1 台の LED ドライバーが最大 12 基の LGP モジュールに対応できること から LED ドライバーと同数である 8 台のパッチパネルが導入された。次にケーブル調節部について述べる。 LGP モジュールに接続された同軸ケーブルは検出器の角で束ねられた後に中間基板へ接続される。そのため LGP モジュールの設置位置によって、中間基板に接続する前でケーブルの長さがバラバラになってしまう。 左図の赤色の領域でケーブルを八の字に這わせることで中間基板に接続する前にケーブル長を揃うようになっ ている。図 8.7 にモックアップのパッチパネルを用いたケーブル長の調節を示す。またパッチパネルの設置可 能な場所が限られていたことから、図 8.5 の左下の図のように 4 台の上に 4 台を重ねるように全部で 8 台設置 した。

#### 8.2.1 パッチパネルのデザイン変更

パッチパネルは ND280 の直下にある図 8.8 の赤枠の領域に取り付けられるが、当初のパッチパネルのデザ インには取り付けのための構造がなかった。そのためパッチパネルを取り付けられるような構造を新たに追加 し、これに伴ってパッチパネルのデザインを一部変更した。

まず図 8.9 の左図に示すように、アルミフレームを用いてパッチパネルを取り付けるための構造物を作成し、 この構造物を図 8.8 の赤枠の領域にネジで固定できるようにした。また、パッチパネルを構造物にねじ止めす るためにパッチパネルに用いるアクリル板のサイズを変更し (変更前:80×365 mm, 変更後:80×405 mm)、新た にネジ穴を開けた。図 8.9 の右図がデザイン変更後のパッチパネルの写真である。

#### 8.2.2 パッチパネルのインストール

SuperFGD のインストール後に LGP モジュール (B1 階) からパッチパネル設置位置 (B1 階) まで、パッチ パネル設置位置から LED ドライバー設置位置 (SS 階) までのケーブル作業を行い、ケーブル作業後にパッチ パネルのインストールを行った。

まずケーブル作業について述べる。LGP モジュールからは図 8.10 の左図のようにケーブルトレイを通して パッチパネル設置位置までケーブルを繋いだ。またできるだけ短い距離でケーブルを接続できるようにケーブ ルトレイはパッチパネル設置位置の真上のものを使用した。図 8.10 に LGP モジュールからパッチパネル設置 位置までのケーブルルートを示す。パッチパネル設置位置から LED ドライバーのある SS 階へケーブルを通 すために、図 8.11 に示すようにパッチパネルの直下にある穴を使用することで、できるだけ短い距離でケーブ ルを接続できるようにした。

これらのケーブル作業の後にパッチパネルのインストールを行った。まず図 8.9 に示したパッチパネル取り 付けのための構造物を、L 字アングルを用いてアルミフレームに設置した。その後、構造物にパッチパネルの



図 8.5: パッチパネルの概略図 (左図) とパッチパネル設置位置 (右図)。パッチパネルは左上の図のようにケー ブル長調節部 (赤色の領域) と中間基板 (緑色の領域) で構成される。パッチパネルは右図のように ND280 の マグネット下にインストールされる。またパッチパネルは左下の図のように 4 台の上に 4 台を重ねるように全 部で 8 台設置される。

取り付け作業を行った。パッチパネルを構造物にネジ止めした後、LGP モジュールからのケーブルをパッチ パネルのケーブル長調節部を通した後に中間基板に接続した。この際、電磁波由来のノイズを減らすために ケーブルの巻く方向を半々にしている。また、LED ドライバーからのケーブルも中間基板に接続した。この 作業を 8 台のパッチパネルについて行った。インストール後のパッチパネルを図 8.12 に示す。またパッチパ ネルを重ねるように設置するために図 8.9 の右図にある白色のスペーサーを用いた。このスペーサーは中心に ネジ穴が開いており、上からネジでパッチパネルを固定できるようになっている。



図 8.6: 中間基板の写真。LGP モジュールからの 8 m ケーブルと LED ドライバーからの 23 m ケーブルを接 続するために中間基板がパッチパネル上に設置される。1 つの中間基板に 12 チャンネルのコネクターがあり、 12 基の LGP モジュールと接続可能である。



図 8.7: パッチパネルのケーブル長調節部の写真。赤枠の領域でケーブルを八の字に這わせることで中間基板 の前でケーブル長が揃うように調節した。



図 8.8: パッチパネルの設置領域。写真の領域は ND280 のマグネット下にあり、アルミフレームの赤枠の領域 にパッチパネルが設置される。





図 8.9: パッチパネル取り付けのための構造物 (左図) とデザイン変更後のパッチパネルの写真 (右図)。アルミ フレームでパッチパネルを取り付けるための構造物を作成し、この構造物を ND280 の直下の領域に設置した。 左図の赤枠は1台のパッチパネルを表す。構造物にパッチパネルを取り付けるために、アクリル板を切り出す サイズを変更し、右図の赤丸のように新たにネジ穴を追加した。



図 8.10: LGP モジュールからパッチパネル設置位置までのケーブルルート (左図) と SuperFGD の 4 つ角か らケーブルトレイまでのケーブルルート (右図)。左図のようにパッチパネルの真上に位置するケーブルトレイ を使用した。



図 8.11: SS 階へケーブルを通すために使用した穴の写真。写真の青色の領域がパッチパネルの設置位置であり、この領域の真下にある穴を使用した。



図 8.12: インストール後のパッチパネルの写真。4 台の上に 4 台を重ねるように 8 台のパッチパネルを設置した。

## 第9章

# SuperFGD の試験運用での LED キャリブ レーションシステムの運用

LED キャリブレーションシステムには、ニュートリノビームのスピル間での運用とニュートリノビーム非 照射時での運用の2種類の運用方法が想定されている。特にニュートリノビーム非照射時での運用について、 SuperFGD には週1回のメンテナンス日があり、このメンテナンス日に LED キャリブレーションシステム を用いたゲインキャリブレーションのためのデータ取得が行われる。6.2.2 節で述べたように、LGP モジュー ルの典型的なチャンネルと比較してネジ付近のチャンネルでは光量が大きく測定されることに起因して、1 基 の LGP モジュール内での光量のばらつきが 20% 程度見込まれる。これにより全てのチャンネルを単一の設 定でのデータ取得によって較正することは困難である。そのため平均的な光量のチャンネルの較正に適した LED 設定値でのデータ取得と光量が大きく検出されるチャンネルに適した LED 設定値でのデータ取得を分 けて行い、それぞれのデータからゲインキャリブレーションに適したデータを選定することが想定されている。 また 6.2.2 節で述べたように LGP モジュール間での光量のばらつきは 25% 程度見込まれる。そのため全ての LGP モジュールで同じ LED の設定値を設定するのではなく、それぞれの LGP モジュールでゲインキャリブ レーションに適した LED の設定値を設定する必要がある。すなわち、それぞれの LGP モジュールについて 2 種類のデータ取得に適した LED の設定値を探る必要がある。

本研究ではこの最適な LED の設定値の選定を行った。ゲインキャリブレーションや不良チャンネル発見の 観点から各 MPPC チャンネルごとの取得データは、較正する上で問題がなければ Good と分類され、取得 したデータに問題があれば DeadSuspicious, LowLight, TooBright, HighBaseline, LowBaseline の 5 つの分 類に分けられる。この中で Good と TooBright の分類を用いることでそれぞれの LGP モジュールに最適な LED の設定値を選定した。9.1 節ではこれらの分類の詳細と LED の設定値の選定方法、9.2 節では選定した LED の設定値について述べる。

## 9.1 測定データの分類と LED の設定値の選定方法

### 9.1.1 測定データの分類

ゲインキャリブレーションの観点、不良チャンネル発見の観点から、測定データに問題のあるチャンネルは 以下の 5 つの分類に分けられる。本節ではそれぞれの分類について述べる。また Good を含めたそれぞれの分 類での分布の例を図 9.1 に示す。ただし SuperFGD の読み出しエレクトロニクスはセルフトリガーで運用さ れるため、一定の閾値 (図 9.1 の測定時の閾値は約 1.25 p.e.) をこえる光子数に対応したピークが確認できる。

#### DeadSuspicious

ADC 分布が全く得られていない、もしくは ADC 分布のエントリー数が極端に少なかったり複数のピーク が見られないチャンネルが DeadSuspisious に分類される。DeadSuspisious のチャンネルは MPPC の故障や 読み出しエレクトロニクスの接触不良などが原因である。

#### LowLight

得られる光量分布について、ピーク数が2つのみ、もしくは3つ目以降のピークがフィッティングできない ほど小さいチャンネルが LowLight に分類される。LowLight のチャンネルは MPPC やエレクトロニクスは 正常に動作しているが、LED の光量が小さいことが原因であり、該当する LGP モジュールの LED の光量を 大きくすることで光子数ピークを増やす必要がある。

#### TooBright

正しくイベントは得られているが、ADC 分布の各光子数ピークが埋もれてしまい、ソフトウェアが正しく ピークを見つけられず、正しくゲインを計算できないチャンネルが TooBright に分類される。TooBright の チャンネルは LED の光量が大きいことが原因であり、該当する LGP モジュールの LED の光量を小さくす ることで各光子数ピークを識別できるようにする必要がある。

#### HighBaseline

SuperFGD の読み出しエレクトロニクスはセルフトリガーで運用され、すなわち一定の閾値を超えた信号 のみを読み出す。一方で、閾値を超える信号を受け取らなかったチャンネルは一定の電圧値を返すようになっ ている。この電圧値に対応する ADC 値にピークができる場合があり、これを Baseline ピークと呼ぶ。この ピークはエレクトロニクスの設定によって ADC 値 0 以下の電圧値にすることで除外することが可能だが、こ の事前の設定が正しく行えていない場合は Baseline ピークが残ってしまう。このような Baseline ピークが存 在するチャンネルが HighBaseline と分類される。特に LED の光量が小さいと、LED 光由来の分布よりも Baseline ピークが支配的になり、ソフトウェアが光量分布のピークを見つけられない場合がある。そのため HighBaseline に分類されたチャンネルについては、エレクトロニクスの設定を正しくやり直す必要がある。

#### LowBaseline

HighBaseline とは逆に、エレクトロニクスの Baseline の設定値が低すぎると、LED 由来の分布が ADC 値 0 以下に見切れてしまう場合がある。このようなチャンネルが LowBaseline に分類される。LowBaseline に 分類されるチャンネルは、少ない光子数のイベントを取得することができないため、エレクトロニクスの設定 を正しくやり直す必要がある。

#### 9.1.2 LED の設定値の選定方法

前述のように SuperFGD のメンテナンス日には、平均的な光量のチャンネルの較正に適した LED 設定 値でのデータ取得と光量が大きく検出されるチャンネルの較正に適した LED 設定値でのデータ取得を分け て行うことが想定されている。図 9.2 に例として平均的な光量設定である DAC = 21 での SuperFGD の全



図 9.1: 各分類での ADC 分布の例。左上から Good、DeadSuspisious、LowLight、TooBright、HighBaseline、 LowBaseline に分類された ADC 分布の例である。

MPPC チャンネルにおける分類の判定結果を示す。ほとんどのチャンネルが Good に分類されるが、LGP モ ジュールのネジの位置など一部のチャンネルが TooBright に分類されており、これらのチャンネルについて 別途光量を落としたデータ測定を行う必要がある。また図 9.2 では、一部の領域にデータが入っていない。こ れはソフトウェアの問題やケーブルの故障などによって、一部の読み出しエレクトロニクスが使用できない状 況であったためであり、今後修理される。そのため、LED の設定値の最適化はこれらを除いた領域で行った。 また、光量最適化のために以下のように LED ドライバーの DAC 値を変更しながらデータ取得を行った。

LED DAC = 21, 25, 29, 33, 37, 40, 43, 45

LED の設定値の選定方法について、平均的な光量のチャンネルについては各 LGP モジュール内で Good に 分類されるチャンネルが最も多くなる DAC 値をゲインキャリブレーションに適した LED の設定値とした。 光量が大きく検出されるチャンネルについては各 LGP モジュール内で TooBright に分類されるチャンネル数 が最も少なくなる DAC 値をゲインキャリブレーションに適した LED の設定値とした。また、ある DAC 値 以降で TooBright に分類されるチャンネル数が 0 になる場合は、その中で最も小さい DAC 値を光量が大き く設定されるチャンネルのゲインキャリブレーションに適した LED の設定値とした。

### 9.2 LED の設定値の選定結果

9.1.2 節のように、各 LGP モジュールについて平均的な光量のチャンネルと光量が大きく検出されるチャン ネルでの最適な LED の設定値を選定した。図 9.3 に各 Wall LGP モジュールの 2 種類の LED 設定値、図 9.4 に各 Bottom LGP モジュールの 2 種類の LED 設定値を示す。

図中の Module ID とは、図 5.2 に示した LGP モジュールの設置位置に対応した ID のことである。また 図中の灰色の領域は、一部のチャンネルにデータが入っていない LGP モジュールを示す。また図 9.4 中の LED の設定値の無い LGP モジュールは、モジュール内の全てのチャンネルにデータが入っておらず、LED の 設定値の選定を行っていないものを示す。



図 9.2: 平均的な光量設定である DAC = 21 での SuperFGD の各チャンネルにおける分類。黒の点線が LGP モジュールの境界線を意味する。白い領域はエレクトロニクスが使用できず、データ取得が行えなかっ た領域。多くのチャンネルは Good に分類されているが、LGP モジュールのネジの位置などで TooBright の チャンネルが見られる。

この測定時に使用できたチャンネルが 42,254 チャンネルであったのに対し、これらの 2 種類の設定値を用 いても Good に分類されないチャンネルが 2988 チャンネルあった。すなわちこれらの設定値を用いた 2 回の データ取得を行うことで、約 93.0 % のチャンネルを較正できる。

また Good に分類されなかった 2988 チャンネルの内、未だ光量の調節が必要なチャンネル (TooBright ま たは LowLight に分類されるチャンネル) が 383 チャンネル (全体の約 0.9%)、エレクトロニクスの設定が十 分に行えていないチャンネル (HighBaseline または LowBaseline に分類されるチャンネル) が 2344 チャンネ ル (全体の約 5.5%)、フィットの精度が悪く、正しく分類されていないチャンネル、または信号が見えないチャ ンネル (DeadSuspicious に分類されるチャンネル) が 261 チャンネル (全体の約 0.6%) であった。すなわち、 エレクトロニクスの設定を再度行うことで Good に分類されなかったチャンネルの大半を削減することができ る。また LED の設定値の最適化を行っても尚、TooBright や LowLight に分類されたチャンネルやフィット の精度由来のチャンネルについては、更なる LED 設定値の最適化、フィッティングの精度向上によって削減 可能である。

Module ID	平均的な	光量の大きい		M
	チャンネル	チャンネル		
D0	29	21		D
D1	25	21		Dź
D2	25	25		D2
D3	35	25		Dź
D4	21	21		LC
D5	21	21	1	L1
D6	21	21		L2
D7	21	21		L3
D8	21	21		L4
D9	21	21		L5
D10	21	21		Le
D11	21	21		L7
D12	25	25		L8
D13	21	21		LS
D14	21	25		L1
D15	21	21		L1
D16	29	37		R1
D17	25	21		R1
D18	25	21		R1
D19	21	21		R1

Module ID	平均的な チャンネル	光量の大きい チャンネル
D20	21	21
D21	21	25
D22	21	21
D23	21	20
LO	21	21
L1	21	21
L2	21	21
L3	21	21
L4	25	29
L5	25	21
L6	25	21
L7	21	21
L8	21	21
L9	21	21
L10	21	21
L11	21	21
R12	21	21
R13	21	21
R14	21	25
R15	21	21

Module ID	平均的な チャンネル	光量の大きい チャンネル
R16	25	21
R17	25	25
R18	21	21
R19	21	21
R20	21	21
R21	21	21
R22	21	21

図 9.3: 各 Wall LGP モジュールの最適な LED 設定値。平均的な光量のチャンネルと光量が大きく検出され るチャンネルについて、最適な LED の設定値を見積もった。

Module ID	平均的な	光量の大きい	Module ID	平均的な	光量の大きい
	チャンネル	チャンネル		チャンネル	チャンネル
BR0			BR20	25	37
BR1			BR21	25	29
BR2			BR22	21	29
BR3			BL0		
BR4			BL1		
BR5			BL2		
BR6	21	29	BL3		
BR7	37	37	BL4		
BR8	21	33	BL5		
BR9	25	37	BL6	21	33
BR10			BL7	21	33
BR11			BL8	25	40
BR12			BL9	21	33
BR13			BL10	21	29
BR14	21	21	BL11	21	29
BR15	21	21	BL12	37	33
BR16	21	21	BL13	21	25
BR17	21	21	BL14	21	33
BR18	21	29	BL15	21	29
BR19	25	37	BL16	21	33

Module ID	平均的な チャンネル	光量の大きい チャンネル
BL17	21	29
BL18	37	40
BL19	25	43
BL20	21	33
BL21	21	33
BL22	21	29

図 9.4: 各 Bottom LGP モジュールの最適な LED 設定値。平均的な光量のチャンネルと光量が大きく検出 されるチャンネルについて、最適な LED の設定値を見積もった。図中の灰色の領域は一部にデータが入っ ていない LGP モジュールを示す。また図中の値が入ってない LGP モジュールは、データが入っておらず、 LED の設定値の選定を行っていない。

## 第10章

## 結論と今後

T2K 実験は茨城県東海村の J-PARC の加速器で生成したニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨 市にあるスーパーカミオカンデへ射出し、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。T2K 実験の主な目的はニュートリノ振動のパラメータの決定、レプトンセクターでの CP 対称 性の破れの高い信頼度での発見であり、これらの更なる精度の向上には、統計量の向上と系統誤差の削減が 課題である。現在は、より信頼度の高い CP 対称性の発見に向けて T2K 実験では T2K-II が進行中である。 T2K-II では、加速器のアップグレードを行いビーム強度を向上させることで統計量を増加させ、系統誤差の 削減のために前置検出器 ND280 のアップグレードを行う。

この ND280 のアップグレードによって新たに、ニュートリノの標的兼飛跡検出器である SuperFGD が導入された。SuperFGD は主に約 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、約 6 万 チャンネルの光検出器 MPPC で構成される検出器であり、SuperFGD の導入によって従来の ND280 の課題 であった、ニュートリノビームの軸から大角度で散乱する荷電粒子の検出効率、低運動量の荷電粒子の検出効 率の改善が期待されている。

東京都立大学では KEK と JINR と共同で、SuperFGD の LED キャリブレーションシステムの開発を 行ってきた。LED キャリブレーションシステムは、任意のタイミングで LED を光らせ、波長変換ファイ バーを通して全ての MPPC へ LED 光を分配することで、SuperFGD 建設時における波長変換ファイバーと MPPC を含めた検出器全体の健全性の確認と長期運用における MPPC の増倍率の較正を行うことを目的と している。LED キャリブレーションシステムは LGP モジュールと LED ドライバーの 2 つの要素からなる。 LGP モジュールは LED 光を発光させてその光を MPPC へ分配し、LED ドライバーは LGP モジュール内 の LED を発光させるための矩形波パルスを生成する。

本研究では、LGP モジュールと LED ドライバーそれぞれに対して最終的な仕様変更、その後量産および品 質検査をした後に実際にインストールし、SuperFGD の試験運用時において LED キャリブレーションシステ ムを運用した。

LGP モジュール については、LGP モジュールの品質検査によって、使用予定だった拡散板と異なるものが 量産品に使用されていることが分かった。また、当初使用予定だった拡散板は廃版であったことから新たに使 用する拡散板の選定を行った。その結果、当初使用予定だった拡散板と比較して、光量一様性を概ね維持しな がら透過率の高い拡散板の使用を決定した。また拡散板変更後に改めて LGP モジュールの品質検査を行い、 健全性や品質に問題の無いことを確認した。その後 Wall LGP モジュール 47 基、Bottom LGP モジュール 46 基の SuperFGD へのインストールを行った。

LED ドライバーについては、要求性能として波高約 6.5 V のパルスが生成可能であること、パルス高とパ

ルス幅の調節が可能であることが挙げられるが、当初製作されたプロトタイプはどちらの要求性能も満たして いなかった。そこでレギュレータや抵抗の変更を行うことで要求性能を満たすことができた。また、その後製 作した量産品についても想定通りの挙動が確認できたことから、量産品のインストールを行った。

LED キャリブレーションシステムのインストールが完了した後に、SuperFGD の各チャンネルの増倍率 較正に適した LED の設定値の最適化を LGP モジュール単位で行った。また光量の異なる 2 通りのデータ 取得を行うことで、現在使用可能なチャンネル領域の約 93.0 % について正確に増倍率較正を行えることが分 かった。

今後は、SuperFGD の全チャンネルが使用可能になった後に改めて LED の設定値の最適化を行い、これらの設定値を用いた MPPC の増倍率較正を行う予定である。

# 謝辞

本研究を進めるにあたって、多くの方々からご指導ご協力をいただきました。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、研究に関しま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、汲田哲郎先生には日頃から研究に関して多大なるご指導、本論文の添削に加え、研究 室での生活面でのサポートなど多大なるご支援を頂きました。不自由なく研究に打ち込むことができ、充実し た研究生活を送ることができたのは角野先生、汲田先生のおかげです。深く感謝申し上げます。

研究室の先輩である在原さん、昨年ご卒業された古藤さん、本橋さん、岩城さんにも大変お世話になりまし た。特に在原さん、古藤さんは LED キャリブレーションシステムの開発者であり、研究を始めた当初から数 えきれないほどのご指導とご助言を頂きました。前向きに楽しく研究できたのも在原さん、古藤さんのおかげ です。深く感謝申し上げます。特任研究員の Thomas さんにも大変お世話になりました。Thomas さんのこ れからの益々のご活躍とご家族の皆様のご健康をお祈り申し上げます。後輩の関矢君、初芝君、望月君、黒川 君、荒井君、鎌田君、宮崎君、村田君にも大変お世話になりました。ともに過ごした時間は短いですが、楽しい 日々を送らせて頂きました。そして同期の北村君と鮫島君にも感謝申し上げます。2人とは異なる実験グルー プでしたが、楽しく研究室での生活を送れたのは2人のおかげです。

T2K 実験グループの方々からは研究に関して、多くのご指導ご協力を頂き、多くのことを学ばせて頂きま した。KEK の松原綱之先生、谷川輝氏、京都大学の木河達也先生、東京大学の横山将志先生、中桐洸太先生、 東北大学の市川温子先生、Berns Lukas 先生、ICRR の安部清尚氏には大変お世話になりました。特に松原先 生、谷川氏には研究に関して親身に相談に乗ってくださり、J-PARC での研究活動に際しても数えきれない ほどのサポートを頂きました。深く感謝申し上げます。先輩である東京大学の児玉さん、ICL の Jake さん、 Chien さん、同期の京都大学の對馬君、東京大学の小林君、冲永君、後輩の東京大学の荒井君は J-PARC での 研究生活においていつも温かく接して下さり、また LGP モジュールのインストールなどの作業にも参加して 下さりました。深く感謝申し上げます。特に児玉さん、Jake さん、Chien さん、對馬君は SuperFGD のキャ リブレーショングループのメンバーとして日々研究に関する議論を交わしてくださりました。改めて感謝申し 上げます。

最後に、これまで支えてくれた大切な家族に心から感謝を申し上げ、謝辞とさせていただきます。



- [1] https://higgstan.com/standerd-model/.
- [2] SM Bilenky. Neutrino. history of a unique particle. The European Physical Journal H, Vol. 38, pp. 345–404, 2013.
- [3] https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/.
- [4] https://j-parc.jp/c/for-researchers/accelerators.html.
- [5] https://j-parc.jp/c/facilities/accelerators/mr.html.
- [6] K Abe, N Abgrall, H Aihara, Y Ajima, JB Albert, D Allan, P-A Amaudruz, C Andreopoulos, B Andrieu, MD Anerella, et al. 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.
- [7] Kou Abe, N Abgrall, H Aihara, T Akiri, JB Albert, C Andreopoulos, S Aoki, A Ariga, T Ariga, S Assylbekov, et al. Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. *Physical Review D*, Vol. 88, No. 3, p. 032002, 2013.
- [8] 在原拓司. T2k 実験の新型前置検出器 superfgd のキャリブレーションシステムの開発.
- [9] 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). Technical report.
- [10] Giorgio Pintaudi. T2k-wagasci: First physics run of the wagasci-babymind detector with full setup. PoS, Vol. 2019, p. 142, 2019.
- [11] Kenji Yasutome. Search for leptonic cp violation using measurements of neutrino oscillations and neutrino-nucleus interactions.
- [12] Y Itow, T Kajita, K Kaneyuki, M Shiozawa, Y Totsuka, Y Hayato, T Ishida, T Ishii, T Kobayashi, T Maruyama, et al. The jhf-kamioka neutrino project. arXiv preprint hep-ex/0106019, 2001.
- [13] Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations. *Nature*, Vol. 580, No. 7803, pp. 339–344, 2020.
- [14] Yashwanth S. Prabhu. The latest t2k neutrino oscillation results. 2023.
- [15] Yuichi Oyama. J-parc neutrino beamline and 1.3 mw upgrade. arXiv preprint arXiv:2004.06877, 2020.
- [16] K Abe, H Aihara, A Ajmi, C Andreopoulos, M Antonova, S Aoki, Y Asada, Y Ashida, A Atherton, E Atkin, et al. T2k nd280 upgrade-technical design report. arXiv preprint arXiv:1901.03750, 2019.
- [17] Thomas Adam, E Baussan, Kurt Borer, Jean-Eric Campagne, Nathalie Chon-Sen, Christophe

de La Taille, N Dick, M Dracos, G Gaudiot, T Goeltzenlichter, 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.

- [18] https://www.kuraray.com/products/psf.
- [19] https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\_ SALES\_LIBRARY/ssd/s13360\_series\_kapd1052j.pdf.
- [20] Claudio LPNHE Paris Giganti and Thorsten IFAE Lux. Np07: Nd280 upgrade project-spsc report. Technical report, 2022.
- [21] https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/citiroc-1a.
- [22] A Blondel, M Zito, and M Yokoyama. The t2k-nd280 upgrade proposal. Technical report, 2018.
- [23] 古藤達朗. T2k 実験の新型前置検出器 superfgd のキャリブレーションシステムのインストールに向けた 研究.
- [24] https://led-ld.nichia.co.jp/api/data/spec/led/NSPB300B(2381).pdf.
- [25] https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\_ SALES\_LIBRARY/ssd/mppc\_kapd9008j.pdf.
- [26] https://www.analog.com/media/jp/technical-documentation/data-sheets/j3015fb.pdf.
- [27] S Fedotov. New 3d fine-grained scintillation detector for the t2k experiment. Journal of Instrumentation, Vol. 15, No. 07, p. C07042, 2020.