修士論文

T2K 実験ニュートリノ検出器 SuperFGD のための 信号読み出し検査システムの開発と運用

京都大学 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

對馬 拓実

2024年2月29日

T2K 実験は、ニュートリノ混合行列の CP 位相の測定を主な目的とした長基線ニュートリノ振動実験である. 茨城県東海村にある J-PARC で生成された大強度のニュートリノビームを、岐阜県旧神岡鉱山にある Super-Kamiokande で測定する.

T2K 実験では、CP 位相測定の系統誤差削減を目的に、前置検出器群のアップデートが行われた.その中 の一つに、SuperFGD というニュートリノ反応標的兼飛跡検出器がある. SuperFGD は、1 cm 角のプラス チックシンチレータ 200 万個とそれらすべてを 3 方向から貫く 5.6 万本の波長変換ファイバー、そして 5.6 万 個の光検出器から構成されている.ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子によるシンチレーション光は、 波長変換ファイバーを通り、その一端に設置された光検出器で測定される.

SuperFGD の 5.6 万チャンネルのうち,信号を正常に読み出すことのできないチャンネルが多数存在して しまうと,荷電粒子の飛跡を再構成することができなくなってしまう.そのため,検出器の建設時と運転時に おいて,問題のあるチャンネルの把握と適切な対処によって,99%以上のチャンネルで正常にデータ取得が 可能である状態にする必要があった.

建設時には,検出器全体の遮光と約 900 本の信号読み出しケーブルの接続作業を行った.この際,最終的に 信号ケーブルが表面を覆うため,後戻りして作業を行うことができない.そのため,接続と遮光を確認する試 験を並行して行う必要があった.この試験を効率的・定量的に行うために,安定的に正確かつ素早い動作をす る検査システムを開発した.そして,開発したシステムを用いて問題を発見・改善し,5.6万個すべてのチャ ンネルで正常にデータ取得を行える状態にした.

運転時には、検出器の整備と監視、さらに増倍率較正のために、チャンネルの信号分布の情報自体から正常 性を検査した.そのために、データ取得やエレクトロニクスの設定、さらには光量設定に問題のあるチャンネ ルについて、5つの分類を考案し、分類に応じて対処を行った.そして、地上での試運転から実際のニュート リノビームデータ取得において、チャンネルの健全性を確認した.その結果、約95%のチャンネルでデータ が正常に読み出すことができ、エレクトロニクスや光量を適切に設定することで 99.85%のチャンネルについ てもデータ取得に問題のない状態とした.

そして, SuperFGD は 2023 年 11 月から行われたニュートリノビームデータ取得においても 99 % 以上の チャンネルを安定的に動作させ,ニュートリノ反応による荷電粒子の飛跡を観測することに成功した.

概要

目次

第1章	ニュートリノ振動	3
1.1	ニュートリノ	3
1.2	ニュートリノ振動	3
1.3	ニュートリノと原子核の反応....................................	6
1.4	振動パラメータのこれまでの測定結果....................................	8
第2章	T2K 実験	10
2.1	ニュートリノビーム	10
2.2	前置検出器群	12
2.3	後置検出器	15
2.4	ND280 アップグレード	18
第3章	SuperFGD	19
3.1	検出器概要	19
3.2	期待される性能....................................	26
3.3	検出器の建設作業・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	27
3.4	建設時,及び運転時における課題	30
第4章	SuperFGD 建設時におけるケーブル接続・遮光	33
4.1	ケーブル接続・遮光試験の目的....................................	33
4.2	ケーブル接続・遮光試験システム....................................	34
4.3	ケーブル接続・遮光試験の概要	36
4.4	モックアップを用いたシステムの動作検証....................................	39
4.5	実作業での結果....................................	42
4.6	SuperFGD 実機を用いた宇宙線の測定	49
4.7	まとめ	54
第5章	SuperFGD 運転時におけるチャンネルの健全性検査	55
5.1	目的	55
5.2	HG キャリブレーション	55
5.3	不良チャンネルの概要と判定基準	56
5.4	不良チャンネルの判定手順....................................	61
5.5	地上での試運転時に発見された不良チャンネル	62

5.6	SuperFGD のインストール	63
5.7	運転時に発見された不良チャンネル	63
5.8	異なる光量設定のデータを用いた全チャンネルキャリブレーション	68
5.9	まとめ	71
第6章	SuperFGD の運用状況と今後の展望	72
第7章	結論	75
謝辞		76
付録 A	SuperFGD におけるキャリブレーション	77
A.1	概要	77
A.2	Pedestal キャリブレーション	77
A.3	LG キャリブレーション	77
A.4	ToT キャリブレーション	79
参考文献		80

第1章

ニュートリノ振動

1.1 ニュートリノ

ニュートリノは標準模型において中性レプトンに分類される素粒子である. 1930 年, β 崩壊のエネルギー スペクトラムが連続的であることを説明するために, Wolfgang Ernst Pauli は電気的に中性で相互作用をほ とんどしない粒子の存在を提唱した [1]. 1934 年, Enrico Fermi がβ崩壊を記述するための4 点相互作用理 論を提唱し, この中性の粒子はニュートリノと命名された [2].

1956 年に C.L. Cowan および F. Reines らが原子炉から放出される反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) と水の反応を 観測し,ニュートリノの存在が確かめられた [3]. また 1962 年にミューニュートリノ (ν_μ) が発見され [4], そ の後 2000 年には DONUT 実験でタウニュートリノ (ν_τ) が直接観測された [5]. 現在までに,ニュートリノに は ν_e, ν_μ, ν_τ の 3 つのフレーバーがあることが確認されている.

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノのフレーバーが飛行中に周期的に変化する現象のことである. ニュー トリノ振動は、1998 年に Super-Kamiokande による大気ニュートリノの天頂角分布の観測で実験的に発見さ れた [6]. ニュートリノのフレーバー固有状態を $|\nu_l\rangle$ ($l = e, \nu, \tau$)、質量固有状態を $|\nu_i\rangle$ (i = 1, 2, 3) とする. こ のとき、ある状態 $|\psi\rangle$ の表示はそれぞれの基底を用いて、

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \nu_e | \psi \rangle \\ \langle \nu_\mu | \psi \rangle \\ \langle \nu_\tau | \psi \rangle \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \langle \nu_1 | \psi \rangle \\ \langle \nu_2 | \psi \rangle \\ \langle \nu_3 | \psi \rangle \end{pmatrix}$$
(1.2.1)

と書ける. この基底間の変換は,

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$
(1.2.2)

と表す. ここで U は 3 × 3 のユニタリ行列であり, Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata(PMNS) 行列と呼ばれる. U は 4 つの独立なパラメータ θ_{12} , θ_{23} , θ_{13} , δ_{CP} を用いて,

$$U = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\nu 1} & U_{\nu 2} & U_{\nu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta_{\rm CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta_{\rm CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & c_{13}s_{12} & s_{13} e^{-i\delta_{\rm CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23} e^{i\delta_{\rm CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23} e^{i\delta_{\rm CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13} e^{eltacp} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}s_{23} e^{i\delta_{\rm CP}} & c_{13}s_{23} \end{pmatrix}$$
(1.2.3)

と表せる.ここで, $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり, θ_{ij} は混合角と呼ばれる.また δ_{CP} は複素位相である が,特に $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ の場合に CP 対称性が破れるため CP 位相とも呼ばれる.

次に、フレーバー固有状態間の遷移 $\nu_l \rightarrow \nu_{l'}$ の遷移確率を導出する.式 1.2.2 より、時刻 0 でフレーバー固 有状態 $|\nu_l\rangle$ であったとき、時刻 t での状態 $|\nu_l(t)\rangle$ は、 $|\nu_i\rangle$ のエネルギー固有値 E_i 、運動量 p を用いて、

$$|\nu_{l}(t)\rangle = e^{-iHt} |\nu_{l}\rangle$$

= $e^{-i\hat{H}t} \sum_{i} U_{li}^{*} |\nu_{i}\rangle$
= $\sum_{i} U_{li}^{*} |\nu_{i}\rangle e^{-i(E_{i}t - \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{x})}$ (1.2.4)

と書ける.ここで、 $|\nu_i\rangle$ がハミルトニアン \hat{H} の固有状態であることを用いた.式 1.2.4 より、時刻 t でフレー バー l' に変化する遷移振幅 $A(\nu_l \rightarrow \nu_{l'})$ は、

$$A(\nu_{l} \rightarrow \nu_{l'}) = \langle \nu_{l'} | \nu_{l}(t) \rangle$$

= $\sum_{i,j} \langle \nu_{j} | U_{l'j} U_{li}^{*} | \nu_{i} \rangle e^{-i(E_{i}t - \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{x})}$
= $\sum_{i} U_{l'i} U_{li}^{*} e^{-i(E_{i}t - \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{x})}$ (1.2.5)

となる. ここで $\langle \nu_j | \nu_i \rangle = \delta_{ji}$ を用いた. ニュートリノの質量が非常に小さいことから, $p \equiv |\mathbf{p}| \simeq E \gg m_i$ と みなせて,

$$E_{i} = \sqrt{m_{i}^{2} + \boldsymbol{p}^{2}}$$

$$\simeq p \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{m_{i}}{p} \right)^{2} \right)$$

$$\simeq E + \frac{m_{i}^{2}}{2E}.$$
(1.2.6)

以上より、フレーバー1のニュートリノが距離 L だけ飛行したときにフレーバー1 に変化している確率

 $P(\nu_l \rightarrow \nu_{l'})$ lt,

$$P(\nu_{l} \to \nu_{l'}) = |A(\nu_{l} \to \nu_{l'})|^{2}$$

= $\sum_{i,j} U_{l'j}^{*} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^{*} e^{-i(E_{i} - E_{j})L}$
= $\sum_{i=j} U_{l'j}^{*} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^{*} + \sum_{i \neq j} U_{l'j}^{*} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^{*} e^{-i\frac{\Delta m_{ij}^{2}L}{2E}}.$ (1.2.7)

ここで、 Δm_{ij}^2 は質量二乗差

$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2 \tag{1.2.8}$$

である.式 1.2.7 の第一項は、ユニタリ条件 UU[†] = 1 より、

$$\sum_{i=j} U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* = \sum_{i,j} U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'j} U_{li}^* - \sum_{i \neq j} U_{l'j}^* U_{lj} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^*$$
$$= \delta_{l'l} - 2 \sum_{i>j} \Re (U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'j} U_{lj}^*).$$
(1.2.9)

第二項は, $i \leftrightarrow j$ の入れ替えに対して $U_{l'j}^*U_{lj}U_{lj}U_{l'i}U_{li}^*$ が複素共役になることと, $\Delta m_{ji}^2 = -\Delta m_{ij}^2$ から,

$$\sum_{i \neq j} U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} = \sum_{i>j} \left[\left(U_{l'j}^* U_{lj} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* \right) e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} + \left(U_{l'j}^* U_{lj} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* \right)^* e^{i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \right]$$
$$= 2 \sum_{i>j} \Re \left(U_{l'j}^* U_{lj} U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* \right) \cos \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} + 2 \sum_{i>j} \Im \left(U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* \right) \sin \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}.$$
(1.2.10)

結局,式 1.2.7, 1.2.9, 1.2.10 より, $\nu_l \rightarrow \nu_{l'}$ のニュートリノ振動の確率は,

$$P(\nu_l \to \nu_{l'}) = \delta_{ll'} - 4\sum_{i>j} \Re \left(U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* \right) \sin^2 \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} + 2\sum_{i>j} \Im \left(U_{l'j}^* U_{lj} U_{l'i} U_{li}^* \right) \sin \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \quad (1.2.11)$$

で与えられる.式 1.2.11 より,ニュートリノの質量差が0 でないとき,ニュートリノのフレーバーは *L/E* により周期的に振動することが分かる.

 $\Delta m^2_{21} \ll \Delta m^2_{32} \simeq \Delta m^2_{31}, \theta_{13} \ll 1$ のとき, ν_μ の生存確率は,

$$P(\nu_{\mu} \to \nu_{\mu}) \simeq 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$
 (1.2.12)

であり、 $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 振動モードの振動確率は、

 $P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) - P(\bar{\nu}_{\mu} \to \bar{\nu}_{e})$

$$P(\nu_{\mu} \to \nu_{e}) \simeq \sin^{2} \theta_{23} \sin^{2} \frac{\Delta m_{31}^{2} L}{4E}$$
 (1.2.13)

である.またニュートリノと反ニュートリノの振動確率の差を取ることで,

$$\simeq 2\sin 2\theta_{12}\sin 2\theta_{23}\sin 2\theta_{13}\cos \theta_{13}\sin \delta_{\rm CP}\sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\sin \frac{\Delta m_{32}^2}{4E}\sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \qquad (1.2.14)$$

となり、 δ_{CP} についての項が残る. $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ であれば、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率に違いが 生じ、CP 対称性が破れていることを意味する.



図 1.1: ニュートリノ反応断面積のエネルギー依存性 [7]. 左がニュートリノで、右が反ニュートリノのもの.



図 1.2: CCQE 反応のファインマン・ダイアグラム

1.3 ニュートリノと原子核の反応

ニュートリノ振動は式 1.2.11 のように *E/L* に従うから,ニュートリノエネルギーの正確な測定がニュート リノ振動の精密な解析には不可欠である.そして,ニュートリノと原子核の反応により生成された荷電粒子を 捉えることによってニュートリノエネルギーは測定されるため,ニュートリノと原子核の反応をより良く理 解することが重要である.ニュートリノの反応断面積のエネルギー依存性を図 1.1 に示す.本節では,数十 GeV 程度までのエネルギー領域で支配的な反応について簡潔に説明する.

荷電カレント準弾性散乱 (CCQE)

1 GeV 以下の領域では、荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) 反応が支配的である. CCQE 反応はニュートリ $/ \nu_l$ が核子 $N \ge W$ ボソンを交換し、荷電レプトン l になる反応

$$\nu_l + N \to l + N' \tag{1.3.1}$$

である. CCQE 反応のファインマン・ダイアグラムの例を図 1.2 に示す. 核子の質量を m_N ,終状態の荷電 レプトンのエネルギーを E_l ,運動量を p_l ,質量を m_l ,散乱角を θ と置き,ニュートリノの質量は 0,核子は



図 1.3: 2p2h 反応のファインマン・ダイアグラムの例.



図 1.4: RES のファインマン・ダイアグラムの例.

反応前後で静止しているものとすると、始状態のニュートリノのエネルギー E_ν, は、

$$E_{\nu_l} = \frac{m_N E_l - m_l^2 / 2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta}$$
(1.3.2)

となり,終状態の荷電レプトンの運動学的情報のみから再構成することができる.式 1.2.11 のように,ニュートリノ振動確率はニュートリノのエネルギーの関数となるため,ニュートリノのエネルギーを正確に測定する ことができる CCQE 反応は,ニュートリノ振動解析の信号事象として用いられる.

2 particle 2 hole 反応 (2p2h)

2p2h 反応は,原子核中に束縛された2つの核子とニュートリノが反応して,終状態に核子2つが存在する 反応である.2p2h 反応のファインマン・ダイアグラムの例を図1.3に示した.終状態に現れる陽子の運動量 は数百 MeV 程度の低い運動量となり,飛跡が非常に短くなりやすい.そのため,2つの核子を検出できない と CCQE 反応と誤認してしまう.

荷電カレント共鳴単一 π 粒子生成 (CCRES)

数 GeV 領域では、荷電カレント共鳴単一 π 中間子生成 (CCRES) 反応が支配的である. CCRES 反応は、 ニュートリノが核子と共鳴反応を起こし、荷電レプトンに加えて Δ^{++} などの粒子を生成し、その崩壊から π^+ などの粒子が終状態に現れる反応である. RES のファインマン・ダイアグラムの例を図 1.4 に示す. 終状態 に現れる π^+ などの粒子を検出できないと CCQE 反応と誤認してしまう.

表 1.1: ニュートリノ振動パラメータの値 [8]. $\Delta m_{3l}^2 = \Delta m_{31}^2 (順階層), \Delta m_{3l}^2 = \Delta m_{32}^2 (逆階層)$ である.

パラメータ	۱۱ <u>۱</u>	頁階層	边	色階層
	best fit	3σ range	best fit	3σ range
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304\substack{+0.012\\-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$	$0.304\substack{+0.013\\-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.450\substack{+0.019\\-0.016}$	$0.408 \rightarrow 0.603$	$0.570\substack{+0.016\\-0.022}$	$0.410 \rightarrow 0.613$
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02246\substack{+0.00062\\-0.00062}$	$0.02060 \to 0.02435$	$0.02241^{+0.00074}_{-0.00062}$	$0.02055 \to 0.02457$
$\delta_{ m CP}/\pi$	$1.28^{+0.20}_{-0.14}$	$0.80 \rightarrow 1.94$	$1.54_{-0.17}^{+0.12}$	$1.08 \rightarrow 1.92$
$\Delta m_{21}^2 / 10^{-5} \ {\rm eV}^2$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$
$\Delta m^2_{3l}/10^{-3}~{\rm eV^2}$	$+2.510\substack{+0.027\\-0.027}$	$+2.430 \rightarrow +2.593$	$-2.490\substack{+0.026\\-0.028}$	$-2.574 \rightarrow -2.410$

荷電カレント深非弾性散乱 (CCDIS)

ニュートリノエネルギーが 10 GeV 以上の領域では、荷電カレント深非弾性散乱 (CCDIS) 反応が支配的で ある. CCDIS はニュートリノが核子内のクオークと直接散乱し、複数のハドロンが生成される反応である.

1.4 振動パラメータのこれまでの測定結果

1998年にニュートリノ振動が発見されて以降,大気ニュートリノや太陽ニュートリノ,原子炉ニュートリノ,加速器ニュートリノを用いた実験により,ニュートリノ振動パラメータの測定がなされてきた. 順階 層と逆階層をそれぞれ仮定した場合のパラメータの測定結果を表 1.1 に示す.本節では,振動パラメータ ($\theta_{23}, \Delta m_{32}^2, \theta_{12}, \Delta m_{21}^2, \theta_{13}, \delta_{CP}$)の測定の現状について述べる.

$\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$

 θ_{23} , $|\Delta m_{32}^2|$ の値は、IceCube 実験 [9] などによる大気ニュートリノ実験に加えて、T2K 実験 [10] や NOvA 実験 [11] などの加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験で測定されている.一方で、ニュートリノ振動の 主要項に sin² $\frac{\Delta m_{32}^2}{4E}$ の形で現れるため、 Δm_{32}^2 の符号は現在まで測定されていない. $\Delta m_{32}^2 > 0$ の場合を順階 層 (Normal Ordering, NO)、 $\Delta m_{32}^2 < 0$ の場合を逆階層 (Inverted Ordering, IO) と呼ぶ.

 $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$

SK や SNO 実験 [12] などによる大気ニュートリノの ν_e 消失事象や, KamLAND[13] などによる原子炉 ニュートリノの $\bar{\nu}_e$ 消失事象により測定されている.

 θ_{13}

短基線原子炉ニュートリノの $\bar{\nu}_e$ 消失事象などから測定される. θ_{13} は非常に小さい値であり、2011 年、 T2K 実験で初めて 0 でないことが示唆され、2012 年に Daya Bay 実験によって初めて 0 でないことが示された [14][15]. $\delta_{\rm CP}$

式 1.2.14 のように, $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ と $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{e}$ の振動確率を比較することで測定できる.現在, T2K 実験により 90 % 以上の信頼度で $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ であることが示されているが, 測定までには至っていない [10].

次章では,加速器 ν_μ, ν_μ ビームを用いて,ニュートリノ振動パラメータのさらなる精密測定と δ_{CP} の測定 を目指す,長基線ニュートリノ振動実験である T2K 実験について説明する.

第2章

T2K 実験

T2K 実験は、茨城県那珂郡東海村の大強度陽子加速施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex) で作り出したニュートリノビームを、280 m 離れたの前置検出器と 295 km 離れた岐阜県飛騨市神 岡町にある後置検出器 Super-Kamiokande(SK) で観測する、長基線ニュートリノ振動実験である. ν_{μ} 消失事 象を用いた θ_{23} , $|\Delta m_{32}^2|$ の精密測定と、 ν_e 出現事象を用いた δ_{CP} の測定を目的とした実験である. T2K 実験 の概略図を図 2.1 に示す.本章では、T2K 実験の概要と前置検出器のアップグレードについて述べる.

2.1 ニュートリノビーム

2.1.1 J-PARC 加速器による陽子生成

陽子の生成と加速のために J-PARC では, LINAC(Linear Accelerator), RCS(Rapid-Cycling Synchrotron), MR(Main Ring) の三台の加速器が用いられる (図 2.2).

まず LINAC で負水素イオン H⁻ が生成され,400 MeV まで加速される.加速された H⁻ は炭素薄膜に よって電子二個を剥ぎ取られた後,RCS で 3 GeV まで加速される.加速された陽子はバンチと呼ばれる空間 的に局在した構造を持ち,数秒に一回 8 バンチずつが MR に入射される.MR に入射された陽子は 30 GeV まで加速され,ニュートリノビームラインに取り出される.



図 2.1: T2K 実験の概略図 [16].



図 2.2: J-PARC 加速器群 [17].



図 2.3: ニュートリノビームラインの全体図 [18].

2.1.2 ニュートリノビームの生成

ニュートリノビームを生成するニュートリノビームラインの全体図を図 2.3 に示す. MR を周回する陽子 ビームは、キッカー電磁石により周回軌道から一次ビームラインに取り出される. 取り出されたビームは一次 ビームラインにおいて偏向電磁石により、SK 方向に約 90° 曲げられる. 続く二次ビームラインには炭素標的 が設置されており、照射された陽子ビームによって大量の荷電 π 中間子が主に生成される. 生成された π 中 間子は三台の電磁ホーンにより,正負どちらかの電荷を持った粒子のみが収束される.収束された π 中間子は 100 m ほどのディケイボリュームを飛行中に 99 % 以上の確率で

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

と崩壊し、ミューオンニュートリノ ν_{μ} ビームになる.ホーンの電流の向きによって ν_{μ} 、 $\bar{\nu}_{\mu}$ どちらを SK 方向に収束させるかを切り替えることができる.

2.1.3 Off-axis 法

振動後のニュートリノを観測する SK は, ビーム中心から 2.5°の角度に位置する. このニュートリノ生成点 から見た, ビーム中心軸と検出器のなす角度を off-axis 角と呼ぶ. T2K 実験では, off-axis 角を 2.5° にするこ とにより, 0.6 GeV に鋭いピークを持つニュートリノビームを得ている. このピークのエネルギーは SK のあ る 295 km 地点でのニュートリノ振動確率 ($\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 事象) が最大になるエネルギーである. これに加え高エ ネルギーのニュートリノが減ることで,中性カレント反応などの ν_{e} 出現事象におけるバックグラウンドを最 小化することができる. SK 地点におけるニュートリノ振動の確率と off-axis 角によるニュートリノビームの エネルギースペクトルの違いを図 2.4 に示す. このように検出器をビーム中心からずらし,エネルギーが揃っ たニュートリノビームを得る方法は off-axis 法と呼ばれ, T2K 実験で世界で初めて採用されたものである.

2.2 前置検出器群

前置検出器群は,生成直後のニュートリノを直接測定してビームの特性やニュートリノ反応断面積を理解することで,ニュートリノ振動測定の精度を上げることを目的に,ビーム生成点から280m下流に置かれている検出器群である.この節では前置検出器群を構成する各検出器について説明する.

2.2.1 INGRID

INGRID(Interactive Neutrino GRID)は、ニュートリノビームの方向と強度の安定性をモニターするため に on-axis に設置された検出器である.図 2.5a に示すように、INGRID は合計 14 個の箱型のモジュールが 十字形に配置された構造を持ち、各モジュールはニュートリノ反応の標的となる 9 枚の鉄製のプレートと 11 層のシンチレータのサンドイッチ構造をしている.シンチレータ層は、棒状のシンチレータをビーム軸からみ て水平方向と鉛直方向に 2 層並べた構造をしており、通過した荷電粒子のビーム軸に垂直な位置を測定するこ とができる.十字の中心にニュートリノビーム軸が通るように設置されており、ビーム中心を 0.1 mrad の精 度でモニターすることができる.

2.2.2 ND280

ND280 は、ニュートリノビームのフラックスやエネルギー分布や、ニュートリノビーム中の *v_e* の割合の測定、ニュートリノ反応断面積の測定するために、off-axis 角 2.5° に設置された検出器である. ND280 での測定から、SK 時点での信号とバックグラウンドが見積もられ、ニュートリノ振動確率が計算される. 図 2.6 のように複数の検出器を組み合わせた構造を持っている.以下、各検出器について簡単に説明する.



図 2.4: ニュートリノのエネルギーと $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$ 振動確率 (上図), $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 振動確率 (中央図), SK 地点での ニュートリノビームのフラックス (下図)[19].

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

ν_e 測定時にバックグラウンドになりうる水とニュートリノの中性カレント反応で生成される π⁰ を検出する ことを目的とした検出器である.後述する ND280 アップグレードのために現在は取り外されている.

FGD(Fine Grained Detector)

ニュートリノ反応の標的兼飛跡検出器である.長さ1mの1cm角の棒状シンチレータを縦横に敷き詰めて 板状にしたものをビーム軸方向に並べた構造をしており、三次元の飛跡を再構成することができる.SKと同 じ水標的に対するニュートリノ反応を測定するために、下流側のFGDにはシンチレータ層の間に水の層が ある.

TPC(Time Projection Chamber)

三次元の飛跡を再構成可能なガス検出器である.ドリフト速度が高速で,低拡散な混合ガスが用いられており,FGDを貫通した長い飛跡を持つ粒子を精密にトラッキングすることができる.後述する電磁石によってかけられた磁場で荷電粒子が曲がり,曲がる方向から電荷識別,飛跡の曲率から運動量の測定が可能である.



図 2.5: (a)INGRID の全体図と (b) モジュールの拡大図 [18].



図 2.6: ND280 の構造 [18]. 電磁石による磁場は図の x 軸正方向にかかっている.

さらに、エネルギー損失から粒子識別も行うことができる.

ECAL(Electromagnetic Calorimeter)

プラスチックシンチレータと鉛のサンドイッチ構造を持つ電磁カロリメータである.ニュートリノ反応 から生じる電子や γ 線による電磁シャワーのエネルギーを測定することができる.最下流に設置された DownStream ECAL, P0D の横を覆う P0D-ECAL, TPC と FGD の横側を覆う Barrel-ECAL からなる.

電磁石

ソレノイドコイルと C 型リターンヨークが ND280 の検出器群全体を覆っており,0.2 T の磁場を印加する. これは Z ボソンと W ボソンを発見した Underground Area 1 実験で使われていたものであり,CERN から 寄贈された [20].

SMRD(Side Muon Range Detector)

電磁石のリターンヨークは鉄板 16 層を 17 mm の隙間を空けて並べた構造をしており,その間に挿入された ミューオン識別用のシンチレータが SMRD である. SMRD により,大角度方向のミューオンの検出,宇宙線 ミューオンのトリガー発行,周辺の壁との反応により生じるバックグラウンドミューオンの測定がなされる.

2.2.3 WAGASCI-BabyMIND

WAGASCI-Baby MIND は, off-axis 角 1.5°に設置された複数のモジュールからなる前置検出器である. 主な目的は, ND280 とは異なるエネルギーのニュートリノと水標的を用いてニュートリノと原子核の反応の精密測定と振動解析における系統誤差の削減である. 図 2.7 に示したように, WAGASCI-BabyMIND は, 2つの WAGASCI(WAter Grid And SCintillator detector) モジュール, Baby MIND(Magnetized Iron Neutrino Detector), 2つの Wall-MRD 及び 1 つの PROTON モジュールからなる. WAGASCI モジュールはプラスチックシンチレータを三次元格子状に並べた枠を水で満たしたニュートリノ標的研飛跡検出器である. Baby MIND は帯磁した鉄板とプラスチックシンチレータを層状に並べた飛跡検出器であり, ミューオンの運動量測定及び電荷識別を行う. Wall-MRD はシンチレータと鉛のサンドイッチ構造を持ち, ミューオンの運動量測定を行う. PROTON モジュールは, プラスチックシンチレータを層状に並べた構造を持ち, 陽子のような短い飛程も捉えられるニュートリノ反応の標的研飛跡検出器である.

2.3 後置検出器

Super-Kamiokande(SK)は、岐阜県神岡町池の山の山頂から約1000m地下にある大型水 Cherenkov 検出 器である.SKの概略図を図2.8に示す.5万トンの純水を満たした直径39.3m,高さ41.4mの円筒形タンク と、内側に取り付けられた多数の光電子増倍管 (PMT)からなる.水槽は二層に分かれており、内水槽には内 向きに50cm 径の PMT が約11000本、外水槽には20cm 径の PMT が約1800本外向きに取り付けられて いる.外水槽の PMT は、主に宇宙線ミューオンなど外部から入ってくる粒子を識別するために用いられる. SK の主な目的は、大気・太陽・加速器ニュートリノを用いたニュートリノ振動の精密測定及び陽子崩壊の探 索である.

SK 内でニュートリノ反応で生じた荷電粒子のうち, 軽いもの (主に e, μ, π^{\pm}) は水中で Cherenkov 光を



図 2.7: WAGASCI-BabyMIND の全体図 [21].



図 2.8: SK 検出器の概略図 [18].



図 2.9: SK での (a) ν_{μ} 事象, (b) ν_{e} 事象のイベントディスプレイ [18].



図 2.10: 大気ニュートリノ事象における粒子識別の likelihood 分布.

発し、リング状の信号を PMT に残す. μ は水中を比較的まっすぐ飛ぶためはっきりとしたリングを残す (図 2.9a) のに対して、e は水中で電磁シャワーを起こすためぼやけたリングを残す (図 2.9b). リングの形状を likelihood によって解析し、図 2.8 に示したように精度良く ν_{μ} 、 ν_{e} の荷電カレント反応を識別することがで きる.



図 2.11: ND280 アップグレードの概略図 [22]. P0D が取り除かれ, ND280 の上流に SuperFGD, HATPC, ToF 検出器が導入される.

2.4 ND280 アップグレード

T2K 実験では、J-PARC の MR の陽子ビームの強度増強と、ニュートリノビームラインの電磁ホーンの電流の増強により、ニュートリノビーム 強度が増強された. これに加えて 2027 年からは、SK の 8 倍の有効体 積をもつ Hyper-Kamiokande が運用され、統計数が飛躍的に増加することが期待されている. これにより、 δ_{CP} の統計誤差が大きく改善される一方で、系統誤差が支配的になることが予想されている.

そのため系統誤差の削減のために ND280 のアップグレードが現在進行中である. POD が取り除かれ,そこ に新たに SuperFGD, 2 つの High Angle TPC(HATPC), 6 枚の Time-of-Flight(ToF) 検出器が導入される. これらの検出器の概略図 2.11 を示す.ニュートリノ反応標的兼飛跡検出器である SuperFGD を上下から挟む ように HATPC が 2 つ設置され,6 枚の ToF 検出器がこれらすべてを囲むように設置される. SuperFGD が 全方向に対して感度があることに加えて,HATPC でもより詳細に飛跡を観測できることで,大角度方向への 感度が飛躍的に向上することが期待されている.また,SuperFGD では低運動量で飛跡の短い,陽子や π を 測定できることも期待されている.ToF 検出器は飛跡の方向の決定や宇宙線などのトリガーをするために使 われる.2024 年 1 月現在,下段の HATPC と SuperFGD,そして 4 枚の ToF 検出器がすでに ND280 にイ ンストールされた.次章では,これらのうち SuperFGD について詳細を説明する.

第3章

SuperFGD

3.1 検出器概要

SuperFGD とは、1 cm 角のプラスチックシンチレータキューブを 192 × 182 × 56 個並べたニュートリノ反応の標的兼飛跡検出器である. SuperFGD のイメージ図を図 3.1 に示す. シンチレータキューブには穴が開けられており、すべてのキューブを 3 方向から波長変換ファイバー (WLS ファイバー) が貫いている. ファイバーを通してシンチレーション光を取り出し、ファイバー端に取り付けられた光検出器で観測することで、三次元の飛跡を捉えることができる. 本節では、図 3.2 に示した SuperFGD の各要素と信号読み出しエレクトロニクスについて概要を述べる.

3.1.1 シンチレータキューブ

SuperFGD では, アクティブターゲットとして 1 cm 角のロシア UNIPLAST 社製プラスチックシンチ レータキューブが用いられる.キューブは, ポリスチレンに 1.5% の p-テルフェニル (PTP) と 0.001% の POPOP がドープされたプラスチックシンチレータである.表面のポリスチレンは発泡・白濁化されており, 反射層を形成している.この反射層は,隣接するキューブにシンチレータ光が漏れ出ることを防ぎ,キューブ



図 3.1: SuperFGD の構造のイメージ図.



図 3.2: SuperFGD の信号読み出し部分の各要素のイメージ図.ファイバーは一方向のみ示した.

内の反射により光の収集効率をあげる効果を持つ.

3.1.2 波長変換ファイバー

シンチレータ光をキューブから取り出すために, KURARAY 社製波長変換ファイバー Y-11(200) がキュー ブを貫いている. 波長変換ファイバーは直径 1 mm であり,ポリスチレンのコアを屈折率の異なる 2 つの物質 で覆った三層のマルチクラッド構造を持つ. 吸収波長のピークは 430 nm であり,シンチレータキューブの発 光波長のピークにおおよそ一致している. またファイバーの発光波長のピークは 470 nm であり,後述する光 検出器 MPPC の検出効率のピークにおよそ一致している.

3.1.3 半導体光検出器 MPPC

ファイバーによって取り出されたシンチレーション光を検出するために,浜松ホトニクス社製の半導体光 検出器 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) が用いられる. MPPC は,図 3.3a に示すように Avalanche



図 3.3: (a)MPPC による光子数計測のイメージ図と (b)MPPC の APD とクエンチング抵抗の構造のイメー ジ図 [23].

PhotoDiode(APD)をマルチピクセル化し並列に接続した構造を持つ. APDとはアバランシェ増幅を利用した半導体光検出器の一種である. APD に逆電圧を加えると PN 接合間に空乏層ができ,入射した光子によって電子・正孔対が生じる.電子・正孔はそれぞれ電場によってドリフトされるが,半導体内の電場が一定の値を超えると,電場によって加速された電子が半導体中の原子の電子を弾き出すようになる. 放出された電子が加速され,さらに他の原子の電子を弾き出すという現象が連鎖的に起き,電子が雪崩的に増幅される現象をアバランシェ増幅と呼ぶ. ここからさらに逆電圧が大きくなると,電子に加えて正孔も原子中の電子を弾き出すようになる. これによりアバランシェ増幅のきっかけになる電子が供給され続け,アバランシェ増幅が止まらなくなるガイガーモードと呼ばれる状態になる [24]. このガイガーモードに切り替わるときの電圧を降伏電圧と呼ぶ. APD の静電容量を C,印加電圧を V,降伏電圧を V_{br}とする. 一つのピクセルに光子が入射してアバランシェ増幅が起こり,生じた電流による電圧降下によって降伏電圧まで印加電圧が低下して,増幅が終了した過程を考える. この過程における APD から放出される電荷量 Q_{APD} は,

$$Q_{\rm APD} = C(V - V_{\rm br}) \tag{3.1.1}$$

で与えられる.つまり,ガイガーモードで出力される信号は入射した光子数に関係なく一定値を示す.よって,一つの APD だけでは,光子が入射したことを検知することはできても,光子数までは測定することができない.

そこで MPPC では、ガイガーモードの APD を多数並列に接続し、それらの信号をまとめて読み出す. そ して、出力信号が1ピクセル分の何倍であるかを測定することで、入射光子数を測定することができる. しか し、ガイガーモードではアバランシェ増幅が続き一定の電流が流れ続けるため、次に入射する光子を検出する ことができない. そこで図 3.3 に示したように、APD と直列にクエンチング抵抗と呼ばれる抵抗が接続され ている. これにより、発生した電流による電圧降下により実行的な印加電圧を下げることでアバランシェ増幅 を終わらせることができる. MPPC の典型的なパルス波形とパルス波高の分布を図 3.4 に示す. 図 3.4a に示 したように、MPPC から出力されるパルスは 1 p.e.(photon equivalent、1 光子に相当する信号) のパルスの 整数倍になっていることが分かる. そして図 3.4b に示したように、MPPC から出力されるパルスの波高値の 分布は複数の明瞭なピークを持つ. 入射光子数に対して MPPC のピクセル数が十分大きいとき、入射光子数 と出力される信号の大きさは線形関係になる. しかし入射光子数が大きくなるにつれ同じピクセルに複数の光



図 3.4: (a) MPPC の典型的なパルス波形と (b) パルス波高の分布 [23].

子が入る可能性が高くなるため、入射光子数と出力信号の線形性が悪くなる. MPPCの基礎特性としては、次のようなものがある.

- 検出効率:MPPC表面に到達した光子が検出される確率.MPPCの開口率,光子によって電子・正孔 対が生じる確率である量子効率,アバランシェ増幅が起きる確率の積で表される.
- ダークカウント:熱的に発生したキャリアによる信号の数.信号自体はダークカレントと呼び、光子が 入射した場合と同様の波形となる.
- クロストーク:アバランシェ増幅の過程で発生した2次フォトンが、他のピクセルで検出されることで、1光子の信号が2倍以上の波高になる現象.
- アフターパルス:入射光子の信号よりも遅れて観測される信号.これは、結晶中の格子欠陥に一時的に 捕らわれたキャリアが、一定時間後に放出されアバランシェ増幅を起こすことがあるためである.
- 温度特性:温度が高くなるほど増倍率は小さくなる.これは、温度が高くなると結晶の格子振動が激しくなり、加速されたキャリアのエネルギーが十分に大きくなる前に結晶に衝突する確率が高くなり、アバランシェ増幅が起こりにくくなるためである.

SuperFGD で用いられている MPPC の特性を表 3.1 に示す. 最大感度波長は 450 nm であり, 波長変換 ファイバーの発光波長におよそ一致している.

図 3.5 に示したように SuperFGD では、8×8 個の MPPC が一枚のプリント回路基板 (PCB) に 1 cm 間隔 でマウントされている. この 64 個の MPPC が実装された PCB は MPPC-PCB と呼ばれ. これに信号ケー ブルをつなぐことで MPPC の信号を読み出す. MPPC-PCB 上には MPPC の他に温度センサーが取り付け られており、測定された温度は MPPC のゲインキャリブレーションなどの際の重要な情報となる.

3.1.4 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,波長変換ファイバーを通して,全 5.6 万チャンネルの MPPC へ LED の光を与えることができる.これによって,SuperFGD 建設時,及び運用時において検出器の健全性を確認



表 3.1: SuperFGD で用いられる MPPC(S13360-1325PE) の電気的・光学的特性 [25]. 温度 25°C, 印加電圧 *V*_{br} + 5 V での典型的な値.

図 3.5: MPPC-PCB の写真 [26].

することや, MPPC のゲインを較正することができる. LED キャリブレーションシステムは大きく分けて, MPPC に LED 光を分配する LGP モジュールと, LED を光らせる LED ドライバーの二つの要素から構成 される.

LGP モジュールの概略図を図 3.6a に示した. 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 モジュールの端面にある LED から放出された光は, 導 光板内を進む途中で, 図 3.6b のようにレーザー加工で作られた傷 (Notch) によって散乱され波長変換ファイ バーに入射する. LED コリメータは, Notch で散乱される光量の一様性を高める役割を持つ. また拡散板は, ファイバーと垂直な方向に Notch の位置がずれていても光量が大きく変化することを防ぐ役割を持つ. LGP モジュールには, SuperFGD の側面に設置する Wall LGP モジュールと, 底面に設置する Bottom LGP モ



図 3.6: (a)LGP モジュールの概略図と (b) 導光板の Notch で光が散乱される様子.

ジュールがあり, それぞれ 1 つのモジュールで 8 × 56 個, 8 × 96 個の MPPC に光を分配することができる. LED ドライバーは,マイコン, FPGA,オペアンプを含むアナログ回路で構成されている.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ことで,最大で 7.0 V のパルスを出力することができ,パ ルスの高さと幅はマイコンを通じて制御することができる.1 台の LED ドライバーによって最大で 12 個の LGP モジュールを光らせる事が可能である.SuperFGD のすべてのチャンネルに光を分配するために,93 個 の LGP モジュールと,8 台の LED ドライバーがインストールされている.

3.1.5 エレクトロニクス

SuperFGD のフロントエンドエレクトロニクスには,MPPC の信号を読み出すことに特化した Weeroc 社製 ASIC の CITIROC(Cherenkov Imaging Telescope Integrated Read Out Chip) チップ [27] が用いら れている.CITIROC チップのブロック図を図 3.7 に示す.CITROC チップには,High Gain(HG) と Low Gain(LG) の増倍率の異なるプリアンプが存在し,同じ MPPC の信号を 2 つに分割し並列に読み出す.HG と LG の信号はピークホールドされたのちに,ADC によりデジタル化される.数光子程度の小さな信号につ いては HG の情報を,数 100 光子程度の大きな信号については LG の情報を用いることで,高い分解能と広 いダイナミックレンジで MPPC の信号を取得することができる.Cれに加えて,threshold を超えたときと 下回ったときのタイミングをそれぞれ記録し,その差から Time-over-Threshold(ToT) と呼ばれる量を計算 する.ToT は波高に依存し,HG,LG と同様に MPPC に到達した光量を測定することができる.HG と LG はピークホールドで信号を読み出すため,数+ µs 程度のデータ取得時間に到達した信号の中で,波高が最大 の信号の情報だけを読み出す.これに対して,ToT はデータ取得時間の間に到達した信号すべてを読み出す ことができ,HG と LG の不感時間を補うことができる.1 枚の CITIROC チップで 32 チャンネルの MPPC の信号を読み出すことができる.また,MPPC の逆バイアス電圧は CITIROC チップで与えることができ, 4 V の範囲で各チャンネルの電圧を調整することが可能である.

CITIROC チップ 8 枚と FPGA や ADC などが実装されたエレクトロニクスを, Front-End-Board(FEB) と呼ぶ. 図 3.8 に示したように, MPPC-PCB4 枚分の信号ケーブルを, MIB と呼ばれる中間基板を介して FEB に接続する. そして FEB14 台を電源の供給や DAQ システムとの通信のためにクレートと呼ばれるエ







図 3.8: エレクトロニクスの接続の概念図 [28]. MPPC-PCB4 枚分の信号ケーブルを中間基盤 MIB を通して FEB に接続する. 14 台の FEB が電源の供給や通信のためにクレートに接続される.



図 3.9: SuperFGD の各クレートに繋がれた MPPC-PCB の配置. 左がビーム上流側で,下が側面,中央が上面の読み出し面にそれぞれ対応する.

レクトロニクスに接続する. 合計で 16 台のクレートが図 3.9 のように MPPC-PCB に接続され, SuperFGD の全チャンネルの信号を読み出す.

3.2 期待される性能

大角度散乱に対する感度の向上

ND280 の既存の飛跡検出器である FGD では,棒状のシンチレータがニュートリノビームに対して垂直方向に伸びた構造をしている.この構造のためにビーム軸から大角度方向の飛跡に対する感度が低かった.これに対して,SuperFGD では立方体のシンチレータキューブを三次元的に並べた構造をしているため,大角度方向にも高い感度を持つ (図 3.10).

低運動量の粒子の測定

FGD で三次元位置を測定するためには2層のシンチレータのヒット情報が必要であり,飛跡の再構成に3 点の位置情報を要求すると,測定できる最も短い飛跡は6cm である.一方,SuperFGD は1つのキューブの



図 3.10: ミューオンの検出効率の角度依存性 [29].

ヒットで三次元位置を測定することができるため,測定できる最短の飛跡が 3 cm となる. これにより,低運 動量で飛跡の短い,陽子や π を検出することができると期待されている (図 3.11).

電子ニュートリノ反応の測定

さらに *e*/γ 識別の効率が向上することも期待されている. 既存の FGD に比べて高い位置分解能を持つこと により,短い飛跡の陽電子を検出でき,電磁シャワーの始点付近が電子一つからなるのか電子-陽電子対から なるのかを識別できる. さらに電磁シャワーの始点のエネルギー損失を計算することで,電子の場合の2倍の エネルギー損失が電子-陽電子対の場合に得られることからも,*e*/γ 識別が可能となる. 現在の電子ニュート リノ測定の主なバックグランドは,ND280 外からのγ線であるが,*e*/γ の識別によって,電子ニュートリノ の誤識別が低減されることが期待されている.

3.3 検出器の建設作業

検出器の建設作業は,2022年10月から J-PARC のニュートリノアセンブリー棟で行われた.建設作業から運転開始までのタイムスケジュールを図3.12に示す.本節では検出器の建設作業のうち,LGP モジュールの取り付け作業までについて簡潔に述べる.



図 3.11: 陽子の検出効率の運動量依存性 [30].

3.3.1 シンチレータキューブの積層作業

シンチレータキューブの積層作業の様子を図 3.13 に示した. 釣り糸で固定されたキューブの層を順番に積 み重ねていった. 6 層ごとに上部から 20 cm の金属製の留め具をキューブの穴に挿入し,水平方向の位置合わ せを行った. 位置合わせが終わったら,底部から挿入している金属棒を押し込み,水平方向の位置を固定した (図 3.13b).

3.3.2 ファイバーの挿入作業

ファイバー挿入作業の様子を図 3.14 に示した.キューブを固定している釣り糸を抜き,そこにファイバー を挿入した.この際,釣り糸の直径が 1.3 mm に対してファイバーの直径が 1 mm であるため,一部分のみで 釣り糸とファイバーの交換が行われると,キューブの配置が歪んでしまうことが懸念された.

そのため,図 3.14 右のように,MPPC-PCB 単位で上下左右に互い違いになるようにファイバー挿入がま ず行われた.さらに,図 3.14 左のように,MPPC-PCB 内の 8 × 8 個の中でも互い違いになるように行わ れた.



図 3.12: SuperFGD の建設作業から運転開始までのタイムスケジュール.

3.3.3 MPPC-PCB の取り付け

MPPC-PCB の取り付け作業の様子を図 3.15a に示した. 図 3.15b のように金属ピンを用いて MPPC-PCB の位置決めを行い,ネジを用いて固定した.

3.3.4 LGP モジュールの取り付け

LGP モジュールの取り付け作業の様子を図 3.16 に示した. MPPC-PCB が取り付けられている面とは反対側に,ネジを用いて固定した. 固定後に,壁面パネルと LGP モジュールの隙間やネジ穴などを RTV ゴムを用いて遮光した.



(a)



(b)

図 3.13: (a) キューブが積層された様子.キューブに上部から挿入されているのは水平方向の位置合わせのための留め具. (b) 水平方向の位置を固定するために底部から挿入される金属棒.



図 3.14: ファイバー挿入作業の様子 [31]. キューブの配置が歪むことを防ぐために、上下左右で互い違いにな るようにファイバーの挿入作業が行われた (左図). さらに MPPC-PCB 単位でも、互い違いになるように作 業が進めれらた (右図).

3.4 建設時,及び運転時における課題

SuperFGD は全部で 5.6 万個のチャンネルから構成されている. 信号が正しく読み出せないチャンネルが 多数存在すると,荷電粒子の飛跡を再構成することができなくなってしまう. 本節では検出器建設時と運転時 における課題についてそれぞれ述べる.



図 3.15: (a)MPPC-PCB 取り付け作業の様子. (b)MPPC-PCB の位置決めのための金属ピンと, 固定のため のネジ.



図 3.16: LGP モジュールの取り付け作業の様子.

3.4.1 建設時におけるケーブル接続・遮光

LGP モジュールの取り付けが無事完了したものの,検出器の完成までには検出器全体の遮光と約 900 本の 信号ケーブルの MPPC-PCB への接続作業が必要であった.この際に,不完全な接続により MPPC の信号を 正しく読み出すことができないチャンネルの存在や,遮光シートや検出器との接着部分などからの光漏れが懸 念された.ケーブルの接続が不完全で信号を読み出せないチャンネルがあると,そのチャンネルに接続された ファイバーが通るキューブ全てで飛跡の三次元位置を正確に再構成できなくなる.ケーブルが正しく接続され ていたとしても光漏れが起きていれば,その周辺のチャンネルが光漏れ由来のノイズを検出し,荷電粒子由来 の信号がそれに埋もれてしまう.よって,ケーブルの接続と検出器の遮光が正常にできていることを保障する ことで初めて SuperFGD は荷電粒子の飛跡を捉える事ができる.しかしながら,ケーブル接続作業完了後に は検出器表面が信号ケーブルに覆われるため,接続や遮光をやり直すことが難しくなることが課題であった.

3.4.2 運転時におけるチャンネルの健全性検査

SuperFGD のエレクトロニクスは、検出器ととも ND280 内に設置され、電磁石が閉じている運転期間中に アクセスすることができない.したがって、運転期間前に、エレクトロニクスと信号ケーブルの接続や、エ レクトロニクス自体に問題ないかを確認し、必要があればケーブルの再接続などといった対処をする必要が あった.さらに.運転中には検出器の状態を監視する必要があるが、これには能動的に光を与えられる LED キャリブレーションが有用である.最後に、運転期間中週1回ある整備日に、全チャンネルに対するキャリブ レーションが行われるものの、LGP モジュールの光量の非一様性により、すべてのチャンネルを1回の測定 でキャリブレーションをすることができないと分かっている.これは大きな光量が与えられたチャンネルの キャリブレーション結果が大きくばらついてしまうことが原因であった.

このように,検出器の整備と監視,さらにはキャリブレーションのために,LED キャリブレーションのためのデータからチャンネルの健全性を確認する必要がある.

以上で述べたような検出器の建設時と運転時に懸念される課題を解決し,全 5.6 万チャンネルのうち, MPPC の信号取得に問題のあるチャンネルを1%未満の割合に抑え,SuperFGD の飛跡検出器としての性 能を保障することが本研究の目的である.ここで1%未満という割合は,64 個の MPPC が実装されている MPPC-PCB1 枚あたり1チャンネル未満に相当する.

第4章では建設時におけるケーブル接続・遮光とその検査について述べ,第5章ではインストール前の地上 での試運転も含めた,運転時におけるチャンネルの健全性検査について述べる.そして,第6章で本研究によ りチャンネルの健全性が保障された SuperFGD の実際の運用状況について述べる.

第4章

SuperFGD 建設時におけるケーブル接続・ 遮光

本章では,SuperFGD 建設時における信号ケーブル接続・遮光作業とそれらの検査について述べる.さらに,遮光・接続試験のセットアップを転用して行った,SuperFGD 実機を用いた初の宇宙線観測について述べる.

4.1 ケーブル接続・遮光試験の目的

SuperFGD の建設作業のうち、LGP モジュールの取り付けが無事完了したものの、検出器の完成までには 検出器全体の遮光と約 900 本の信号ケーブルの MPPC-PCB への接続作業が必要であった. この際に、不完 全な接続により MPPC の信号を正しく読み出すことができないチャンネルの存在や、遮光シートや検出器と の接着部分などからの光漏れが懸念された.よって、SuperFGD 建設の最終段階として、問題のあるチャンネ ルを全体の 1% 未満に抑えることを目的に、5.6 万個の MPPC を含む検出器全体の遮光と 900 本の信号ケー ブルの接続を検査する試験を行った.しかしながら、ケーブルの接続作業の完了後には、図 4.1 のように検出 器全体を信号ケーブルが覆うことになり、後戻りして接続や遮光を補修することは困難となってしまう.した



図 4.1: すべてのケーブルが接続されたときの検出器のイメージ図.検出器表面を信号ケーブルが覆い, MPPC-PCB などへのアクセスが困難になる.
がって、ケーブル接続・遮光試験はケーブル接続作業と並行して行う必要があり、そのためにこれらを効率 的・定量的に評価する、ケーブル接続・遮光試験システムを開発した.

4.2 ケーブル接続・遮光試験システム

4.2.1 ケーブル接続・遮光試験システムへの要請

ケーブル接続・遮光試験システムに求められる要件は以下の通りである.

- 1. MPPC からの信号を正しく取得できていることを確認できる.
- 2. MPPC のダークノイズと同程度の光漏れを検知できる.
- 3. 操作が簡単かつ素早い.
- 4. できる限り自動で行える.
- 5. 各 MPPC の個体差や読み出し回路由来のノイズに依らない安定した評価方法である.

1,2 については,接続・遮光試験の前提となる要請である.詳細については後述する.3,4 については,作業 を約 900 回繰り返す必要があるという,作業にかかる時間と作業者の負担を抑えるための要請である.5 につ いては,各 MPPC に対して印加電圧の調整等といった細かなチューニングを行うことが現実的でないため, すべての MPPC に対して同一の条件で試験を行う必要があることからの要請である.

4.2.2 ケーブル接続・遮光試験システムの構成

システムのセットアップの概略図を図 4.2 に示した. 接続試験の際には, LGP モジュールの LED と信号読 み出しエレクトロニクスの外部トリガーに,ファンクションジェネレータを用いてパルス状の電圧を与える. LGP モジュールの LED から放出された光子は,導光板と拡散板を伝達した後,波長変換ファイバーを通って MPPC に到達する. 読み出しエレクトロニクスの外部トリガーへの信号には適切なディレイをかけることで, 光子の信号が到着するのと同じタイミングでトリガーをかける. 遮光試験の際には,セルフトリガーでデータ 取得を行い,外側から懐中電灯で光を当てた場合と当てなかった場合での各チャンネルの信号の変化を見る.

データ取得

MPPC の信号の読み出しには、CAEN 社製 SiPM 読み出しエレクトロニクス DT5702[32] を用いた. DT5702 には、基板を保護するケースが付属しないモデルである A1702 が存在し、本研究では両者を用いた. しかし、両者の基板は同じものであるため、以下では DT5702 と統一して呼称する. DT5702 には、MPPC を読み出すことに特化した Weeroc 社製 ASIC の CITIROC チップ [27] が用いられている. この CITIROC チップは SuperFGD のエレクトロニクスにも用いられている. MPPC からの信号は、CITIROC チップに よって増幅・波形整形されたのちに、12bit ADC に渡されることで読み出される. また MPPC への印加電 圧も DT5702 を用いて与えることができ、4V の範囲で各 MPPC に与える電圧を調整する機能も実装され ている. しかし毎回の試験のたびに印加電圧を調整すると作業効率を著しく下げてしまうため、各チャンネ ルの印加電圧を調整することはせずに、すべてのチャンネルに対して 57V の電圧を一律で印加した. 1 台の DT5702 で 32 チャンネルを読み出す事ができるため、2 台を用いて一枚の MPPC-PCB を読み出した. また 信号ケーブルを DT5702 に接続するために変換ボードを使用した.



図 4.2: ケーブル接続・遮光評価システムのセットアップの概略図.

LED キャリブレーションシステム

ケーブル接続試験のための光源として, SuperFGD 運用時に用いられる LED キャリブレーションシステ ムを使用した. LED キャリブレーションシステムは, LED, 導光板, 拡散板からなる LGP モジュールと, LGP モジュールに電圧を与える LED ドライバーからなる. 今回の試験時点では, LED ドライバーを使用す ることができなかったため, LGP モジュールのみを使用した. そして LED ドライバーの代用としてファンク ションジェネレータを用いて, 1 チャンネルあたりの平均光子数が 1 光子程度になるように, LGP モジュー ルの LED に幅 27 ns, 高さ 4.3 V のパルス状の電圧を与えた.

ファンクションジェネレータ

LGP モジュールの LED と DT5702 の外部トリガーに入力する信号を生成するために, KeySight 社製ファ ンクションジェネレータ 33600a[33] と, 岩崎通信機社製ファンクションジェネレータ SG-4262[34] を用いた. これらは,出力が2つあることと,パルス信号の幅が 30 ns 程度に調整できること,パルス幅が最大で 5 V ま で設定できること, PC と通信ができることから選定した.1システムにつき1台のファンクションジェネ レータが必要であり,2システムが並行して稼働した.



図 4.3: 正しく動作している場合の MPPC の信号の ADC 分布の例.

4.3 ケーブル接続・遮光試験の概要

4.3.1 ケーブル接続試験

LGP モジュールと DT5702 の外部トリガーに 3kHz でパルス状の電圧を与え,10 秒間データ取得を行う. MPPC が正しく動作し,かつ信号ケーブルが正しく接続されていれば,図 4.3 のような複数のピークを持つ ADC 分布が得られる.

得られた ADC 分布の ADC 値の小さいピークから順に、ペデスタルと 1 p.e. に対応するものだとして、そ れぞれシングルガウシアンでフィッティングする. ガウシアンの裾の影響を考えると、2つ以上のガウシアン を足し合わせた関数でフィッティングするべきだが、本試験の目的はあくまで MPPC の信号が正しく読み出 せているのかを素早く確認することであるため、より安定してフィッティングが行えるシングルガウシアンを 用いた. フィッティングには、ROOT[35] のピークサーチで得られた ADC 値をガウシアンの mean の初期値 として用いた. 得られた mean の値をそれぞれ mpedeatal, m1p.e. とし、MPPC のゲイン [ADC/p.e.] を

$$Gain = m_{1p.e.} - m_{pedestal} \tag{4.3.1}$$

で求める. 64 チャンネル全てのゲインの計算結果を図 4.4 のように画面に出力する. 接続試験のセットアッ プでは,典型的なゲインが 45 ADC/p.e. であった. この値から 10 ADC/p.e. 以上離れた値が測定されたチャ ンネルが発見された場合の ADC 分布を確認した. このような場合の実際の ADC 分布の例を図 4.5 に示す.



図 4.4: ケーブル接続試験の出力結果の例. 最初の 32 チャンネルの結果のみを示したが,実際には残りの 32 チャンネルについても同様のグラフが出力される.



図 4.5: 異常なゲインが出力されたチャンネルの ADC 分布の例. (a) では光量が大きすぎたことでピークをう まくフィッティングできていないものの, MPPC の信号は読み出せている. (b) ではペデスタルに相当する位 置に一つのピークしか得られておらず, MPPC の信号を正しく読み出せていない.

異常なゲインが測定されたチャンネルは,多くの場合 4.5a のように,正しくピークを見つけられなった,も しくはフィッティングがうまくできなかった場合のものである.これは LGP モジュールの光量の非一様性に よって,一部のチャンネルで光量が大きくなりすぎたことが原因と考えられる.このようなチャンネルについ ては,LED 由来の光子の信号を正しく読み出せていると判断した.一方で 4.5b に示したように,ペデスタル に相当する位置に一つのピークしか見えない,もしくは明瞭なピークが確認できないチャンネルが存在する



図 4.6: 遮光試験の出力結果の例. (左図) 黒丸が懐中電灯をつけていないときの各チャンネルのノイズデータ のイベント数で,赤丸が懐中電灯をつけたときのもの. 右図がそれらの比. 4.4 と同様に 32 チャンネルの結 果のみを示した.

場合があった. このようなチャンネルについては LED 由来の信号を取得することができていないと判断し, 対応する MPPC-PCB を"Bad"と判定し再試験を行った. このような Bad MPPC-PCB の対処については, 4.5 節で説明する.

4.3.2 遮光試験

遮光シートの外側から,懐中電灯を用いて光を当てた場合と当てなかった場合のそれぞれで,セルフトリ ガーを用いて 10 秒間データ取得を行い、ノイズデータのイベント数をそれぞれ測定する.ここでノイズデー タとは、ペデスタルから 60 ADC 以上の信号である.今回のセットアップでの典型的な MPPC のゲインか ら概算すると 1.5 p.e. 以上の信号に対応する.ノイズデータには、読み出し回路などのノイズや、MPPC の ダークカレント、光漏れ由来の信号が含まれていると考えられる.そして、懐中電灯をつけた場合とつけな かった場合のそれぞれでのノイズデータのイベント数と、それらの比を図 4.6 のように画面に出力する.正し く遮光ができていれば、ノイズデータのイベント数と、それらの比を図 4.6 のように画面に出力する.正し く遮光ができていれば、ノイズデータのイベント数の比は誤差の範囲で1 に一致する.しかし、光漏れが起き ている場合には 1 を有意に超えた値を示す.本試験でノイズデータ数の絶対値ではなくこのような比を用いて 光漏れを判定した理由は、調べた MPPC-PCB や用いた DT5702、さらには各ケーブルの配置などの違いに よって、最大で 2 倍程度のノイズデータのイベント数のばらつきがあり、環境光による光漏れによる影響がこ のようなばらつきに埋もれてしまう場合があったためである.そこで環境光よりも 100 倍以上強い懐中電灯 の光を外側から当てることで光漏れ由来の信号のみを増幅し、光漏れがあった場合には 3 倍以上のノイズデー タの比を示すチャンネルが局所的に現れる.これによって、環境光では MPPC のダークノイズ程度の影響し か与えない微弱な光漏れを、各 MPPC の個体差に依らず確実に検知することができる.

4.3.3 試験手順

試験のフローチャートを図 4.7 に示した. 試験には 1 システムにつき 2 人または 3 人の作業者が必要であ



図 4.7: ケーブル接続・遮光試験のフローチャート.赤枠の作業が手動で行う必要があるもので,青枠がシステムが自動で実行するもの.

る. 1人がシステムの操作を行い,残りの作業者が懐中電灯を照らす.作業者が計2人の場合には、システム の操作をする作業者も懐中電灯を照らす作業を行う.まず信号ケーブルをシステムに接続し、LGP モジュー ルを光らせて接続試験のデータ取得を行う.それに続いて LGP モジュールを消灯させ、遮光試験用の懐中電 灯を消灯した場合のデータ取得を行う.ここでシステムが一時停止するため、作業者はそれを確認したのち に、懐中電灯を点灯する.そしてシステムを再稼働させ、遮光試験の懐中電灯を点灯した場合のデータ取得を 行う.その後システムがデータを解析し、図 4.4 と 4.6 をあわせた試験結果の一覧を画面に表示させる.作業 者は試験結果から、ゲインが 45 ADC/p.e.から 10 ADC/p.e.以上異なるチャンネルが局所的にないかと、ノ イズデータの比が 1.5 倍よりも大きなチャンネルが局所的にないかどうかを確認する.すべてのチャンネルに ついてノイズデータの比が 1.5 倍以上の値を示した場合には、信号ケーブルに触れてしまったことなどによる 光漏れ以外のノイズが原因だと考え、再度遮光試験を行った.

一つの MPPC-PCB を試験するには、システムへのケーブルの取り付けに 1, 2 分、データ取得及び解析に 1 分の合計で 3 分程度の時間を要した.

4.4 モックアップを用いたシステムの動作検証

本システムによって実際に不完全な接続や光漏れを検知することができるかを確かめるために, SuperFGD の信号の読み出し部分を模した図 4.8 のようなモックアップを用いて,システムの動作検証を行った.ファン クションジェネレータを用いて, LED と DT5702 の外部トリガーに幅 30 ns, 高さ 3.6 V のパルス状の電圧





(b)

図 4.8: (a) モックアップの概略図と (b) 実際の写真.



(a)

(b)

図 4.9: (a) 正しく接続されたコネクタと (b) 不完全に接続されたコネクタのイメージ図.

を 3 kHz で与えた. 図 4.2 に比べて電圧値が小さい理由は,このモックアップで使用した LGP のケーブルが 30 cm 程度であり,実機にインストールされる 8 m のものよりも短く,電圧の減衰が小さかったためである. 外部トリガーへの信号には,トリガーのタイミング調整のために 60 ns のディレイをかけた.

4.4.1 モックアップを用いたケーブル接続試験の結果

図 4.9 に示したイメージ図のように,正しい接続と不完全な接続でケーブル接続試験の動作検証を行った. それぞれの状態での試験結果を図 4.10 に示す.

正しい接続では、64 チャンネルすべての ADC 分布で複数のピークが確認でき、図 4.10a にあるように MPPC のゲインが計算できた.一方、不完全な接続では合計で 10 個のチャンネルで、図 4.5b に示したよう なペデスタルのピークだけが見える ADC 分布が得られ、図 4.10b にあるようにゲインが 0 と計算されてい る. このように計算されたゲインを一覧に表示すれば、接続が正しくされているのかを一目で確認することが できる. これらの結果から、本研究の手法により接続が正しくできているか確認できることを実証した.



図 4.10: モックアップでの (a) 完全な接続と (b) 不完全な接続での各チャンネルのゲイン



(a)

(b)

図 4.11: モックアップでの (a) 遮光が完全な場合と (b) 遮光が不完全な場合のイメージ図. (b) では赤丸で囲 んだ部分から光漏れが起きるようにしている.

4.4.2 モックアップを用いた遮光試験の結果

図 4.11 に示したイメージ図のように,厳重に遮光をした場合とあえて遮光を甘くした場合で,遮光試験の 動作検証を行った.それぞれの場合での遮光試験の結果を図 4.12 に示した.

図 4.12a にあるように遮光シートを厳重に塞いで遮光した場合,ノイズデータの比は 64 チャンネル全てで 1 と無矛盾な結果が得られた.一方で,図 4.12b にあるように遮光が不完全な場合,チャンネル 32,39,43, 44 でノイズデータの比が 1.5 を超えた結果が得られた.これらのチャンネルは PCB 外縁部に当たるものであ り,MPPC-PCB 周囲からの光漏れによるものだと解釈できる.その他のチャンネルについてもノイズデータ の比が 1 よりも高くなっている.今回使用したセルフトリガーは,1台の DT5702 のうち 1 チャンネルでも



図 4.12: モックアップでの (a) 遮光が完全な場合の試験結果と (b) 遮光が不完全な場合の試験結果.

threshold を以上の波高を持つ信号が到達すると、32 チャンネルすべての信号を読み出すトリガーであった. そのため、光漏れのあるチャンネルがトリガーレートを増加させ、それによって光漏れの無いチャンネルにつ いても取得される総イベント数が増加する.よって、光漏れの無いチャンネルでも信号の分布自体は変わらな いものの、全体のイベント数が増加したことで計測されたノイズデータ数が増加する.これによって、光漏れ のあるチャンネル以外についても、全体的にノイズデータの比が1よりも高くなっているものと考えられる. これらの結果から本研究の手法により、光漏れが正しく検知できることを実証した.

4.5 実作業での結果

本節では,遮光シートの貼り付けと信号ケーブル接続作業について述べた後に,接続・遮光試験により発見 された接続・遮光の問題点とそれへの対処を述べる.

4.5.1 遮光シートの貼り付け作業

遮光シートの貼り付け作業の様子を図 4.13 に示す. 遮光には MPPC-PCB のコネクタ部分に穴が開けられ たブラックシートが用いられた. まずシートの接着のために, RTV ゴムを SuperFGD のパネルとアルミ部分 に塗布した. 続いて, シートの穴が PCB のコネクタ部分に合うように慎重にシートを貼り付けた. さらに, RTV ゴムが完全に固化するまでにシートがずり落ちないように, 一時的にテープで補強した. そして 24 時間 放置した後, 遮光シートの接着部分に隙間がないかを確認した. 隙間が空いていた場合には. その上から更に RTV ゴムを塗布し遮光を補強した.

4.5.2 信号ケーブルの接続作業

遮光作業の完了後,信号ケーブルを MPPC-PCB に接続する作業を行った.実際の作業の様子を図 4.14 に 示す.最終的に下に来るケーブルから順番に MPPC-PCB に接続していき,その列のケーブルの接続が完了 すると,マジックテープで仮止めを行った.これはケーブルの重さでコネクタ部分に負担がかからないように



図 4.13: 遮光シートの貼り付け作業の様子. 遮光シートの穴を MPPC-PCB のコネクタ部分にあわせ, 検出 器壁面に RTV ゴムを用いて貼り付けた.



図 4.14: ケーブル接続作業の様子. 図の信号ケーブルが接続されている MPPC-PCB は 2 列分に相当し,これらを用いて試験の作業手順の試行も行った.



図 4.15: ケーブル接続・遮光試験で作業を行った区画. 点線は LGP モジュールの境界. 壁面の L(Left) は実際には検出器左側に位置する.

すると同時に、ケーブルが散乱しないようにするためである.

このケーブル接続作業と並行してケーブル接続・遮光試験を行った.まず,検出器上流から見て右側の壁 面 (R) の下 2 列を用いて試験の作業手順の試行を行った.当初は,信号ケーブルが伸びている方向に試験を 行うことを予定していたものの,壁面では LGP モジュールが伸びる方向と信号ケーブルが伸びる方向が直交 しているため,LGP モジュールの LED につながるケーブルを毎回付け替える必要があった.しかしながら, LGP モジュールの LED に電圧を印加するためのケーブルのコネクタが頑丈ではなく,LGP モジュールの ケーブルを付け替える際にケーブルを破損させてしまう危険性があったため,LGP モジュールが伸びている 方向に沿って試験を行った.なお,検出器上面のチャンネルについては,信号ケーブルの伸びる方向と LGP モジュールが伸びる方向は一致している.これにより,各LGP モジュールにつきケーブルの付替えが一度だ けで済み,LGP モジュールへのダメージを最小にできると考えた.また,ケーブルの接続作業と試験の兼ね 合いにより,ある程度の数のケーブルを接続してから試験をまとめて行うことにした.図 4.15 のように R, L,UR,UL,TR,TL に分割し,ケーブル接続と試験を順に行った.まずそれぞれの区画において半日程度 の時間をかけてケーブルを接続し、すぐにケーブルを外せるように軽くマジックテープでケーブルを仮止めし た.その後,1.5 日程度の時間をかけてその区画の MPPC-PCB の接続と遮光を検査した.

結局,ケーブル接続と接続・遮光試験には,約4週間の時間を要した.



図 4.16: Bad と判定された (a)U-19-1 と (b)U-8-2 の接続試験の結果. U-19-1 では ch36, 46, 47 の 3 チャン ネルで、U-8-2 では、h4 の 1 チャンネルで、ゲインが測定できていない.

4.5.3 ケーブル接続試験の結果

ケーブル接続試験では、一部のチャンネルでペデスタルのデータだけが得られる Bad MPPC-PCB を、全 881 個の MPPC-PCB の中から 34 個発見した. このような Bad MPPC-PCB については、すべてのチャン ネルでゲインが正しく測定されるまで、以下の 1, 2, 3 の作業を段階的に繰り返した.

- 1. 変換ボード側のコネクタを押す、もしくは再接続し、再試験を行う.
- 2. MPPC-PCB 側のコネクタを押す、もしくは再接続し、再試験を行う.
- 3. 後日再試験を行う.

このように,信号の下流から接続が正しく行えているかを確認することで,原因の切り分けを試みた.表4.1 に各段階で Good と判定されるようになった MPPC-PCB の数を示した.多くの場合,信号ケーブルを再接 続することで正常にデータを読み出すことができた.しかしながら,上記の手順をすべて経てもなお Bad と 判定された MPPC-PCB として,U-19-1 と U-8-2 を発見した.それぞれの接続試験の結果を図 4.16 に示す. 信号が正常に読み出せない原因を特定するためにこれらを詳しく調べた結果,コネクタもしくは MPPC 自体 が故障していることを発見した.それぞれの MPPC-PCB で発見した故障について述べる.



図 4.17: U-19-1 の変形したコネクタのピンの写真. 左が PCB で右がケーブルのコネクタ. それぞれ矢印で 示した部分のピンが変形している.

U-19-1

U-19-1 では,目視による確認によってケーブル・PCB 両者のコネクタの一部のピンが図 4.17 のように変 形していることを発見した.これにより接触不良が起こり,ch36,46,47 の 3 つのチャンネルで MPPC の信 号が正しく読み出せなかったと考えられる.このピンの変形は接続作業時のもので,ピンに斜めに力が加わっ たまま無理やり接続してしまった,もしくはピンにゴミなどが付着したまま接続してしまったことが原因と考 えられる.

U-8-2

U-8-2 については,目視での確認で不良を発見できなかった.そこで,MPPC-PCB 取り付け前に行われた 大量試験と同じセットアップを用いての再試験を依頼した.取り付け前に行われた大量試験の結果と,それと 同じセットアップで行った再試験の結果を図 4.18 に示す.

図 4.18a では,全てのチャンネルで複数のピーク (エントリー数の大きい黄色や緑のビン) が確認できるの に対して,図 4.18b では, ch48 で一つのピークしか得られていない. この ch48 は接続・遮光試験での ch4 に 対応するものであり,本試験の結果と無矛盾であった.よって,このチャンネルの MPPC もしくは PCB 上 の信号線が破損したものと考えられる.

不良 MPPC-PCB の交換作業

U-19-1 と U-8-2 については, MPPC-PCB 自体の交換作業を行った. 交換作業の手順を図 4.19 に示す. ま ず周囲の MPPC-PCB の信号ケーブルを外し, 交換する PCB の周囲の遮光シートを切断した. そして不良 MPPC-PCB をスペアと交換した. 信号ケーブルが破損した U-19-1 については, 信号ケーブルの交換も行っ た. その後, 信号ケーブルの繋がっていない PCB のコネクタをマスキングテープで一時的に保護した. 遮光 シートの切断部分をブラックテープと RTV ゴムを用いて遮光し, RTV ゴムが固化するまで 24 時間経過させ た. RTV ゴムの固化を確認したのちに, 信号ケーブルを再接続し, 遮光・接続試験を行った. 試験の結果,



(a)

(b)

図 4.18: (a)U-8-2 の MPPC-PCB 取り付け前の大量試験時の ADC 分布と (b) 再試験時の結果. 横軸が MPPC のチャンネルで縦軸が ADC 値の二次元ヒストグラム. (b) において矢印で示した ch48 ではペデスタ ルのピークのみが見える.



図 4.19: 不良 MPPC-PCB の交換作業の手順. 交換する PCB の周囲の信号ケーブルを外し,遮光シートを切断した (左図). PCB を交換した後,信号ケーブルを外した PCB のコネクタをマスキングテープで保護した (中央図). 最後にブラックテープと RTV ゴムを用いてシートの切断部分を遮光した (右図).

交換した MPPC-PCB と信号ケーブルが外された PCB で,遮光・接続に問題がないことを確かめられた.以 上の作業により,SuperFGD の 5.6 万チャンネル全てで正しく信号ケーブルの接続ができていることを確認 した.

4.5.4 遮光試験の結果

遮光試験では、ノイズデータの比が 1.5 以上となるチャンネルを含む MPPC-PCB を 40 個発見した. これ らの MPPC-PCB については、図 4.20 のようにセルフトリガーレートをモニターした状態で、光漏れが疑わ れる部分に懐中電灯を当てることによって、トリガーレートが変化するかどうかを調査した. その結果、コネ クタを接続するために開けられた遮光シートの穴、遮光シートの接着部分、アルミプレートと SuperFGD の パネルの隙間 (図 4.21a)、そしてアルミプレートに開けられた予備のネジ穴 (図 4.21b) から光漏れが起こって いることを発見した. 発見した光漏れの箇所と該当する MPPC-PCB の数を表 4.2 に示した.

コネクタ部分の遮光シートの穴については, PCB に対して 30° 程度の角度でコネクタ部分に懐中電灯の光 を当てた場合にのみ光漏れが起こることが判明した.逆に垂直に近い角度で光を当てた場合には, 光漏れは確 認できなかった.このような特定の角度で入射する強い光は, ND280 の電磁石の中には存在しないため, こ の箇所からの光漏れは問題がないと判断した.



図 4.20: ライトを当てたときのセルフトリガーレートの変化. 縦軸がセルフトリガーのイベントレートで, 横軸が時間に対応する値. イベントレートが 10 倍以上になってる区間で, 光漏れがあった箇所に懐中電灯の光を当てた.



(a)

(b)

図 4.21: 発見された光漏れ箇所. (a) アルミプレートと SuperFGD のパネルの隙間と (b) アルミプレートの 予備のネジ穴.

表 4.2: 遮光確認試験で発見した光漏れの箇所と MPPC-PCB の数

光漏れの箇所	MPPC-PCB の数
コネクタ部分の遮光シートの穴	14
遮光シートの接着部分	21
アルミプレートとパネルの隙間	3
アルミプレートの予備のネジ穴	2

遮光シートの接着部分については目視で確認したところ. RTV ゴムが固まった部分に隙間ができていたり, 遮光シートを十分に接着できていない箇所を発見した. そこで光漏れが確認された MPPC-PCB の周辺の遮 光シートの接着を RTV ゴムで補強した.

アルミプレートとパネルの隙間については,すでにブラックテープでの遮光が行われていたものの,それだ けでは不十分であったことが本試験で明らかになった.そのため,すでに貼られていたブラックテープの上か ら RTV ゴムを塗ることで遮光を補修した.

アルミプレートの予備のネジ穴については, 塞いでしまっても問題のないものであったため, ブラックテー プで穴を覆い, その上から RTV ゴムを塗ることで遮光した.

このような遮光の補修作業後,再びセルフトリガーをモニターした状態でライトを当てたところ,トリガー レートの変化がないことを確認した.以上の作業によって,SuperFGD の 5.6 万チャンネル全てで遮光が正 しく行えたことを確認した.

4.6 SuperFGD 実機を用いた宇宙線の測定

動機と目的

遮光試験のために取得したデータの中に, MPPC のダークカレント (1 p.e. 程度) を大きく超える数十 p.e. 程度の信号が測定されたイベントが発見された. 5 p.e. 以上の信号が合計 3 チャンネル以上でヒットした場合 のイベントディスプレイの例を図 4.22 に示す. 図 4.22 では,数十 p.e. 程度の大きな信号を受け取ったチャ ンネルが一直線上に分布しており,宇宙線による信号である可能性が高いと考えた.なお,図 4.22 において MPPC-PCB の半分に当たる 4 × 8 チャンネルのデータしか取得できていないのは,遮光試験において 2 台 の DT5702 の同期をしていなかったためである.

そこで,接続・遮光試験のセットアップを転用することで宇宙線の飛跡を捉えることができると考え,接続・遮光試験終了後に,SuperFGD 実機を用いた宇宙線の測定を行った.

方法

実験のセットアップを図 4.23 に示す. 図 4.23 に示したように, DT5702 を 4 台用いることで 2 枚の MPPC-PCB からの信号を読み出し, 16 cm × 8 cm の読み出し面における二次元飛跡を捉えることを試みた. メーカーから提供されているソフトウェアでは, 複数台の DT5702 をハードウェア的に同期ことができなかっ たため, データ取得後に解析的に同期をすることを試みた. 方法としては, まず 4 台の DT5702 の threshold をおよそ 4.5 p.e. に設定し, セルフトリガーでデータを取得した. そして, データ取得の開始後 1 秒ほどだ け, LGP で大きなパルス光を MPPC に与えた. この LGP 由来のイベントは, 図 4.24 に示したようにほぼ 全てのチャンネルで大きな信号が取得されるため, その他のイベントと容易に区別することができる. そし



図 4.22: 遮光試験のためのデータで発見された大きな信号が観測されたイベントディスプレイの例. 各ビンに かかれている値はそのチャンネルの信号値で単位は p.e.



図 4.23: SuperFGD 実機を用いた宇宙線の測定のセットアップ.



図 4.24: LGP を光らせたときの二次元ヒストグラム.

て,このデータが取れなくなった瞬間の DT5702 の TDC の値を取得することで,4 台の DT5702 の TDC の 零点を合わせ,エレクトロニクスの同期を取ることを試みた.これ以降の時間で,4 台の TDC が 40 ns 以内 のデータを宇宙線候補事象としてタグ付けを行い,二次元ヒストグラムとして描画した.

結果と考察

データ取得レートは 10 Hz 程度であり、1 分程度の測定を 6 回繰り返して行った. 各データには、35 イベント程度の宇宙線候補事象が含まれ、合計で 216 イベントを取得した. こうして得られた宇宙線候補事象のイベントディスプレイの例を、図 4.25 に示した. およそ 16 cm の飛跡を捉えることができた.

得られた宇宙線候補事象から光量分布を求めることで,これらが宇宙線によるイベントであることを実証す ることを試みた.1つの宇宙線候補事象に対して,128 チャンネル分の信号の情報が得られている.この中に は,宇宙線によるものと考えられる大きな信号と,それらとは無関係なノイズなどの信号が含まれている.そ の中から,水平方向の8 チャンネルのヒットのうち最も大きな値を宇宙線によるものだとして,1 イベントに つき16 チャンネル分のヒットを選別した.こうして得られた光量分布を図 4.26 に示す.この分布をランダウ 関数でフィッティングをした結果,最確値 (MPV)が 30.7±0.3 p.e.であった.SuperFGD のプロトタイプ を用いた先行研究 [36] から,最小電離粒子 (MIP) が通過した場合には MPPC 1 チャンネルあたり 50 p.e. 程 度の光量があることが確かめられている.今回の測定結果はそれよりも 40% 少ないものとなった.

最も影響が大きいと考えられるファイバーの減衰の影響について考察を行った. 光がファイバーを通るとき に受ける減衰 f(x) は,

$$f(x) = \alpha \times e^{-x/A_L} + (1 - \alpha) \times e^{-x/A_s}$$

$$(4.6.1)$$

でモデル化される.ここで、xは荷電粒子がヒットしたキューブと MPPC までの距離、 A_L 、 A_S はそれぞれ



図 4.25: 宇宙線事象の二次元ヒストグラム. 各ビンに書かれた値はそのチャンネルの波高値で単位は p.e.

長い減衰成分と短い減衰成分の減衰長, α は長い減衰成分の割合である.よって,長さ X のファイバーで光 を読みだしたとき, MPPC に到達する光は平均で,

$$\frac{1}{X} \int_0^X \mathrm{d}x \ f(x) = \frac{1}{X} \left[\alpha A_L (1 - \mathrm{e}^{-X/A_L}) + (1 - \alpha) A_S (1 - \mathrm{e}^{-X/A_S}) \right]$$
(4.6.2)

だけ小さくなる. プロトタイプのファイバーの長さは 24 cm, 今回の測定で用いたチャンネルのファイバー の長さは 192 cm であった. また使用されたファイバーは, どちらも KURARAY 社製 Y-11 であり, 各パラ メータの値を表 4.3 に示した. 式 4.6.2 と表 4.3 より, ファイバーでの光の減衰のみを考えた場合, 今回の測定 ではプロトタイプの場合の 0.733 倍の光量となる. よって, 今回の測定で減衰の補正を行うと, MPV は 42.3 p.e. 程度である. また先行研究の記述が曖昧だが, 光量分布の平均から光量の評価を行っているとも読み取



図 4.26: 宇宙線候補事象の光量分布. 赤線はランダウ関数でのフィッティング結果. MPV は, 30.7±0.3 p.e.

表 4.3:	波長変換ファ	ァイバー Y	-11 の演	「衰に関す	まるパラ	メータの)値[37].

パラメータ	值
A_L	$463.4\mathrm{cm}$
A_S	$33.2\mathrm{cm}$
α	0.77

れる. この場合,今回得られた光量分布の平均は 37 p.e. 程度であり,ファイバーの減衰の影響を補正すると 50.5 p.e. である. またプロトタイプでの MPPC への印加電圧は降伏電圧 +5 V であり,このときの MPPC の検出効率は 25% である.一方,今回測定ではおよそ降伏電圧 +4 V 程度であり,このときの検出効率は約 22% である.これより印加電圧による検出効率の影響で,光量が約 12% 小さくなり得る.よって,ファイ バーでの光の減衰と検出効率の影響を考えると,今回測定された MIP が通過した場合の 1 チャンネルあたり の光量は,MPV で 46 p.e.,平均は 57 p.e. であった.

ファイバーでの光の減衰と検出効率の違い以外の光量への影響としては、宇宙線の入射角度による影響、 ADC のサチュレーションによる影響、ファイバーと MPPC の光学的接続の違いの影響などが考えられる. これらの影響が 10% 程度の系統誤差になることは十分考えられるため、先行研究と今回の測定の結果は無矛 盾であると言える.以上の結果から、得られた飛跡は宇宙線によるものであると結論づけられ、SuperFGD が 荷電粒子の飛跡を観測することができることを実証した.

4.7 まとめ

SuperFGD 建設時に, 5.6 万個の MPPC を含む検出器全体の遮光と 900 本の信号ケーブルの接続を検査 し,問題のあるチャンネルを全体の1%未満に抑えることを目的に,ケーブル接続・遮光試験を行った.この 試験を効率的・定量的に行うために開発したシステムは,MPPC の信号が正しく読み出せていることを確認 でき,MPPC のダークノイズ程度の微弱な光漏れであっても MPPC の個体差に依らずに検出することがで きた.加えて半自動かつ素早い動作により,約 900 回繰り返す必要がある試験であっても作業者の負担を軽減 することができた.

接続試験では,信号が正しく読み出せないチャンネルを含む MPPC-PCB を 34 個発見した. この内 32 個の MPPC-PCB については,ケーブルの再接続によりすべてのチャンネルで正常に信号が読み出せる状態に することができた.残り 2 個の MPPC-PCB については,コネクタまたは MPPC 自体が破損していることを 発見し,正常な MPPC-PCB と交換した.

遮光試験では,遮光に問題のある MPPC-PCB を 40 個発見した. この内,14 個の MPPC-PCB について は遮光シートに開けられたコネクタ用の穴から光漏れであることを確認し,ND280 の電磁石内ではデータ取 得の問題となるほどの光漏れが起こらないと判断した.残りの 26 個の MPPC-PCB については,発見された 光漏れ箇所を補修し,遮光を万全なものにした.

MPPC-PCB の交換と遮光の補修,および再試験を通して,5.6 万チャンネルすべてに信号ケーブルが正常 に接続され,かつ遮光に問題がないことを確認した.

またシステムを転用し, SuperFGD を用いた最初の宇宙線観測試験を行った.4台の読み出しエレクトロニ クスを解析段階で同期することで,2枚の MPPC-PCB を用いてデータを取得した.1分程度の測定を6回繰 り返し,合計で216 イベントの宇宙線候補事象を取得した.

得られたイベントから光量分布を求め, ランダウ関数でフィッティングした結果, MPV が 30.7±0.3 p.e., 分布の平均が 37 p.e. であった. 先行研究では, MPC もしくは平均の光量が 50 p.e. 程度であり, それよりも 小さい結果となった. しかしながら, 使われたファイバーの長さの違いによる光の減衰の影響と印加電圧の違 いによる検出効率の影響を補正すると,本研究の結果は MPV が 46 p.e., 平均が 57 p.e. となった. 宇宙線の 入射角度やファイバーと MPPC の光学接続の違いによる影響も考えると,本試験の結果は先行研究と無矛盾 であると結論づけられ, SuperFGD が荷電粒子の飛跡を観測できることを実証した.

第5章

SuperFGD 運転時におけるチャンネルの健全 性検査

5.1 目的

SuperFGD のエレクトロニクスは,検出器ととも ND280 内に設置されるため,電磁石が閉じている運転期 間中にアクセスすることができない.したがって,運転期間前にエレクトロニクスと信号ケーブルの接続や, エレクトロニクス自体に問題ないかを確認し,必要があればケーブルの再接続などといった対処をする必要が ある.運転期間中には,温度変化などによるゲインのふらつきなどをモニターすることを目的に,ニュートリ ノビームのスピル間にも LED キャリブレーションシステムを用いてゲインキャリブレーションが行われる. ここで得られた情報は検出器の異常を検知することにも有用である.さらに,運転期間中に週1回ある整備日 に全チャンネルに対して LED キャリブレーションシステムを用いてゲインの測定が行われるものの,LGP モジュールの光量の非一様性により,すべてのチャンネルを1回の測定でキャリブレーションをすることがで きないと分かっている.そこで異なる光量の設定で2回測定を行い,それぞれのデータからより正確にキャリ ブレーションができるデータを選ぶことを考えた.しかしながら,後述するように光量が大きなチャンネルに 対して,測定されるゲインが安定しないことが分かっている.そのため,異なる光量設定での測定を比較しど ちらのデータを用いてゲインを測定するかを,光量についての情報を用いて選別する必要がある.

このように,検出器の整備と状態の監視,さらにはゲインの測定のために,LED キャリブレーションシス テムによるゲインの測定と同時に,信号分布自体の情報からそのチャンネルに問題があるかどうかを判定する 必要がある.本章では問題があると判定されたチャンネルを不良チャンネルと呼ぶ.チャンネルの健全性検査 の目的は,そのような不良チャンネルを把握し適切な対処を行うことで,不良チャンネルの数を1%未満に抑 えることである.

本章では、まず SuperFGD におけるゲインキャリブレーションについて概要を説明したのちに、それと同時に行った不良チャンネルの分類について述べる.その後、地上での試運転時とインストール後の運転時における、不良チャンネルの分類を用いたチャンネルの健全性検査について述べる.

5.2 HG キャリブレーション

SuperFGD のエレクトロニクスは, High Gain(HG), Low Gain(LG), Time-over-Threshold(ToT) の 3 つ の情報を取得することで, 高い分解能かつ広いダイナミックレンジ, そして少ない不感時間で MPPC からの



図 5.1: HG キャリブレーションの例. (a)HG ADC の典型的な分布をシングルガウシアンでフィティング した結果.赤線は各ピークのフィッティング結果で点線がガウシアンの mean の位置. (b) 各ガウシアンの mean の値を線形フィットした結果.

信号を記録することができる.キャリブレーションの目的は,これらの信号の値と MPPC に到達した光子数 の関係を求めることである.これらのうち HG の信号を用いた HG キャリブレーションについて簡単に説明 する.他の信号のキャリブレーションについては,付録 A に記した.

LED キャリブレーションシステムを光らせて取得した HG の信号のデータを,LED データと呼ぶ.LED データの典型的な HG ADC 分布の例を図 5.1a に示した.MPPC の信号に特徴的な複数のピークが見えて ることが分かる.LED データの各チャンネルの ADC 分布から,ROOT[35] のピークサーチを用いてピーク 位置を取得する.そこで得られたピークの高さやピーク間距離などを用いて,LED 由来の信号として妥当と 考えられるピークを選別する.そして,選別されたピークを図 5.1a のようにそれぞれシングルガウシアンで フィッティングする.そうして得られた各ガウシアンの mean の値を図 5.1b のように線形フィットすること で,その傾きから HG のゲイン G_{HG} を求める.

5.3 不良チャンネルの概要と判定基準

HG キャリブレーションと同時に, チャンネルの健全性検査を行った. LED データの ADC 分布を解析し, キャリブレーションやエレクトロニクス, DAQ ソフトウェアの観点から, データ取得に問題のあるチャンネ ルについて DeadSuspicious, LowLight, TooBright, HighBaseline, LowBaseline の 5 つに分類を行った. これらに当てはまらない, 3 つ以上の明瞭なピークが確認でき, キャリブレーションが可能なチャンネルは Good と分類した.本節では, これら不良チャンネルの概要とその判定基準について述べる.

5.3.1 DeadSuspicious

エレクトロニクスの故障やコネクタ部分の不完全な接続により,信号が全く取得できなかったり,複数の ピークを持った ADC 分布が得られないチャンネルが存在した.そのようなチャンネルを DeadSuspicious と 分類した. DeadSuspicious チャンネルの例を図 5.2 に示す.4章の接続試験によってすべての MPPC-PCB と信号ケーブルの間の接続に問題がないことを確かめたことから,DeadSuspicious チャンネルでは信号ケー



図 5.2: 地上での試験運用時に見つかった DeadSuspicious チャンネルの例. (a) エントリーが少なくピークが 1 つしかない. (b)100 ADC 付近にピークが存在し, 0 ADC 付近にもエントリーがある.

ブルとエレクトロニクスの間の接続やエレクトロニクス自体に問題があるものだと考えられる.特に MIB と 呼ばれる,4枚分の MPPC-PCB の信号ケーブルを接続し,エレクトロニクスに接続する中間ボードの接続に 問題があることが多かった.このようなチャンネルについては,信号ケーブルの接続やエレクトロニクス自体 を検査する必要がある.

5.3.2 LowLight

複数のピークは見えているが、そのピーク数が2つのみ、もしくは3つ目のピークがフィッティングでき ないほど小さなチャンネルが存在した.そのようなチャンネルを LowLight と分類した.LowLight チャンネ ルの例を図 5.3 に示す.LowLight チャンネルでは、MPPC やエレクトロニクスは正しく動いているものの、 LGP モジュールの光量が少ないことでピークが少なくなってしまっていると考えられる.ピークが2つだけ の場合、ソフトウェアはダブルガウシアンでゲインを計算するものの、フィッティングの精度が悪くなってし まう事がわかっている.このようなチャンネルについては該当する LGP モジュールの光量を上げることで、 観測できるピーク数を増やす必要がある.

5.3.3 TooBright

イベントは正しく取れているが,光量が大きすぎるために ADC 分布の各ピークが埋もれてしまい,キャリ ブレーションができないチャンネルが存在する. そのようなチャンネルを TooBright と分類した. TooBright チャンネルの ADC 分布の例を図 5.4 に示す. TooBright チャンネルでは,ソフトウェアが正しくピークを見 つけることができずに,ゲインを計算できなかったり,でたらめなゲインを計算してしまう事がある. そのよ うなチャンネルについては,該当する LGP モジュールの光量を下げ,適切な光量に調整することが必要であ る. またビーム期間中の整備日では,2つの LED の設定で HG キャリブレーションを行うが,その際にどち らのデータから得られたゲインを用いるのかを判断するために,この TooBright の判定を用いる.

TooBright の判定には、ADC 分布の標準偏差を用いた.分布の平均ではなく標準偏差を用いたのは、後述 するエレクトロニクスの Baseline の設定に、平均は影響されるものの、標準偏差は影響されないと考えたか



FEB 96 Channel 40 (Crate 6 Slot 0 ASIC 1 CitirocCh 8)

図 5.3: LowLight チャンネルの例.赤線は各ピークをシングルガウシアンでフィッティングした結果で,バツ 印はシングルガウシアンでフィッティングができなかったピーク.

らである. ADC の標準偏差とソフトウェアによって計算されたゲインの分布を図 5.5a に示す. 図 5.5a より, 標準偏差の値がある程度以上大きくなると,ソフトウェアが求めたゲインがばらつく傾向がある. これは,標 準偏差が大きいほど光量が大きいことを意味し,分布の各ピークが埋もれることでキャリブレーションするこ とが難しくなるからだと考えられる. そこで標準偏差の値を 1 ずつ区切り,そこに含まれるチャンネルのゲ インの分布からゲインの相対標準偏差 (ゲインの標準偏差/ゲインの平均値)を計算した. その結果をプロッ トしたグラフを,図 5.5b に示した. 図 5.5b より,ADC の標準偏差が 20 から 65 の間では相対標準偏差が 0.05 程度の一定の値になっているのに対して,65 以上からは相対標準偏差が大きくなる傾向があることがわ かる. そこで 65 以上の標準偏差を持つチャンネルでは,キャリブレーションが正しくできていないと判断し, TooBright に分類した.

5.3.4 HighBaseline

SuperFGD のエレクトロニクスは、threshold を超える信号を受け取らなかったチャンネルに対して一定の 電圧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ことがあり、これを Baseline ピークと呼ぶ. エレクトロニクスにはこの電圧値を調整する機能があるため、その値を 0 ADC に対応する電 圧値以下にすることで、Baseline ピークを除去することができる. しかし、その事前の設定が正しく行えて いない場合、図 5.6a のように Baseline ピークが残ってしまうことがある. このような Baseline ピークが存



FEB 39 Channel 176 (Crate 2 Slot 7 ASIC 5 CitirocCh 16)

図 5.4: TooBright の例. 赤線は各ピークをシングルガウシアンでフィッティングした結果で, バツ印はシン グルガウシアンでフィッティングができなかったピーク.



図 5.5: (a)ADC の標準偏差とソフトウェアで計算されたゲインの関係. (b)ADC の標準偏差の値とゲインの ばらつき (相対標準偏差)の関係. エラーバーは統計誤差のみを含む.



図 5.6: (a)HighBaseline の例. Baseline ピークが適切に除去できておらず, ソフトウェアがゲインを計算で きていない. (b)LowBaseline の例. Baseline の設定値が適切でなく, LED 由来の信号の分布が切れてしまっ ている.

在するチャンネルを HighBaseline と分類した. Baseline ピークがあったとしても多くの場合は,ソフトウェ アが Baseline ピークを適切に除いて,キャリブレーションをすることができる. しかし図 5.6a に示したよう に,このピークが LED 由来の信号の分布の最大ピークの 100 倍以上になると,ソフトウェアが正しくピーク を見つけることができない場合がある. さらに実際のビームデータ取得の場合にも,すべてのイベントに対し て何らかの値を返すことになり,DAQ に負荷をかけてしまう. 以上のような問題のために,エレクトロニク スの設定を適切にやり直し,このような Baseline ピークを除去する必要がある.

HighBaseline の判定には、LED 由来の信号の分布以外に単独でピークが存在するかを判定する必要があ る. Baseline ピークと LED 由来の最も低い ADC 値は 100 ADC 以上離れる事がわかっているので、ソフト ウェアによって見つかった最初のピークと二番目のピークが 50 ADC 以上離れている場合に HighBaseline と 判定を行った. これに加えて、Baseline ピークが完全には見えていないものの、0 ADC 付近に Baseline ピー クのテールが存在する場合があった. そこで、5 ADC 以下のエントリーが合計で 20 以上あった場合にも、 HighBaseline と判定した.

また HighBaseline と判定された場合には, Baseline ピークによって図 5.6a のようにピークを適切に検知 できていない場合がある. そのため, Baseline ピークの中心から 10 ADC 以上の領域に限定してピークサー チをやり直す. これは Baseline ピークをガウス分布とみなした場合, 典型的なガウシアンのシグマが 5 ADC 程度であったことから, 10 ADC 離れていれば十分 Baseline ピークを除去できると考えたためである. この ようにしてピークサーチをやり直し, キャリブレーションをした場合の例を図 5.7 に示した. 図 5.6a の場合 と異なり, 図 5.7 ではソフトウェアが適切にピークを見つけキャリブレーションをすることができている.

5.3.5 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ために,図 5.6b に示したよう に LED 由来の ADC 分布の一部が 0 ADC 値以下に見切れてしまう場合があった. そのようなチャンネル を LowBaseline と分類した. LowBaseline 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ず, データ取得を正常に行うことができていない. そのためエレクトロニクスの設定を適切にやり直す必要性が



FEB 250 Channel 3 (Crate 15 Slot 10 ASIC 0 CitirocCh 3)

図 5.7: Baseline ピークを除いてキャリブレーションを行った場合の例. 図 5.6a とは異なり, ピークを適切に 探すことができている.

HighBaseline の場合よりも高いと考えられる.

LowBaseline の判定には,LED 由来の信号の分布が0 ADC 付近に存在しているかを判断する必要がある. そこでソフトウェアで見つかったはじめのピークが 50 ADC 以下に存在し,かつ二番目とのピークの距離が 40 ADC 以下の場合に LowBaseline と判定を行った.ピーク間の距離が 40 ADC 以下の場合に判定を行った のは,今回の測定での典型的なゲインが 22 ADC/p.e. で分布の標準偏差が 1.6 ADC/p.e. であったため,40 ADC/p.e. 以上のゲインを持つチャンネルは存在しないと考えたためである.

5.4 不良チャンネルの判定手順

前節で分類した不良チャンネルの判定手順を説明する.不良チャンネルの判定手順のフローチャートを図 5.8 に示す.

まず,ソフトウェアによりフィッティングされたピーク数によって分類を行う.ここで用いたピーク数は, ピークサーチで見つかったもののうち,シングルガウシアンでフィッティングすることができた数である. ピーク数が0または1の場合,データを正常に取得できていない可能性が高いため,DeadSuspiciousと分類 した.次にピーク数が2つの場合,光量が大きすぎる,または小さすぎることの2通りであると考えた.そこ でADC 分布の標準偏差が65以上の場合には,TooBright,そうでない場合にはLowLightと分類した.最 後にピーク数が3つ以上の場合,まずBaselineの判定に従って,HighBaselineまたはLowBaselineと分類し



図 5.8: 不良チャンネルの判定手順.

た. Baseline が適切な場合には, ADC 分布の標準偏差が 65 以上の場合に TooBright, そうでなければ Good と分類した.

5.5 地上での試運転時に発見された不良チャンネル

2023年5月から,地上でのSuperFGDの試運転が行われた. SuperFGDのエレクトロニクスは検出器本 体とともに電磁石の中に設置されるため,一度運転が開始されると,信号ケーブルやエレクトロニクスにアク セスすることができない.よって,地上で行われた試運用でのチャンネルの健全性検査の目的は,エレクトロ ニクスと信号ケーブル間の接続や,エレクトロニクスの不具合によって,正常に動作しないチャンネルを発見 することであった.したがって,本節では発見された DeadSuspicious についてのみ述べる.DeadSuspicious 以外の不良チャンネルについては,LGP モジュールの光量調整やエレクトロニクスの設定の変更などにより, インストール後に対処することが可能である.

表 5.1: 地上で信号ケーブルの再接続などを試したものの正常にデータ取得が行えなかったチャンネル. 〇 が Good で × が DeadSuspicious と判定されたことを意味する.

Crate	FEB	$^{\rm ch}$	地上での1回目の試験	2 回目の試験	運転時
3	48	79	0	×	\bigcirc
4	71	131	×	×	\bigcirc
4	69	169	×	×	×
6	97	235	×	×	×
12	200	22	×	\bigcirc	×

5.5.1 地上での試運転時に発見された DeadSuspicious チャンネル

地上での試運転開始時には DAQ ソフトウェアが未完成の状態であったため、データ取得は 1 クレートずつ 行われた. この試験を通して複数回のデータ取得に対して、DeadSuspicious と判定されたチャンネルが合計 で 539 チャンネル発見された. これらのうちの 512 チャンネルが、256 チャンネル全てでデータを取得できな い 2 つの FEB に属するチャンネルだった. 残りの 29 チャンネルのうち 10 チャンネルが同じ MIB に属する チャンネルであり、19 チャンネルについては関連性が認められなかった.

データ取得ができなかった2つの FEB については,FEB を一度クレートから引き抜いたあと,再びイン ストールした.10 個のチャンネルが DeadSuspicious と判定された MIB については,破損が発見されたため MIB が交換された.残りの19 チャンネルについては,対応する信号ケーブルとエレクトロニクスの再接続が 行われた.以上の作業の結果,535 チャンネルについては正常にデータ取得をすることが可能になった.一方 で,残りの4 チャンネルについては上記の作業を通じてもデータ取得が可能とはならなかった.これら4 チャ ンネルと後述する Crate12 FEB200 ch22 の,地上で行った2 回の試験での結果と運転時の結果を表 5.1 に示 した.これらのチャンネルについては,更なる試験を行う時間が確保できなかったために,もう一度信号ケー ブルの再接続が試された後に SuperFGD がインストールされた.

5.6 SuperFGD のインストール

地上での健全性検査の結果,データが正常に取得できるチャンネルが全体の 99.99% 以上であることを確認 した. これは SuperFGD が荷電粒子の飛跡を捉えるのに十分な割合であると判断され,2023 年 10 月 11 日, SuperFGD は ND280 内へインストールされた (図 5.9). インストールは無事完了し,エレクトロニクスのイ ンストールやエレクトロニクスと信号ケーブルの接続などが行われた.そして,2023 年 11 月 14 日に電磁石 が閉じられ,11 月末から約 1 ヶ月間,ニュートリノビームのデータの取得が開始された.

5.7 運転時に発見された不良チャンネル

2023 年 11 月から行われた SuperFGD の運転では,全体の 30 % のチャンネルでデータ取得を行うことが できなかった.これはエレクトロニクスが全て日本に到着していなかったことと,一部のエレクトロニクスと の通信ができなかったことによる.また Crate4 のチャンネルについては,他のクレートと同時にデータ取得



図 5.9: SuperFGD の ND280 へのインストールの様子.

表 5.2: データ取得を行うことができたチャンネルの健全性検査の結果.

分類	数	割合 [%]
Good	37559	95.85
DeadSuspicious	58	0.15
LowLight	11	0.03
TooBright	1211	3.09
HighBaseline	300	0.77
LowBaseline	45	0.11

を行うことができなかった.

そこでデータ取得を行うことができた合計 39184 チャンネルの健全性検査を行った. その結果を表 5.2 に, そしてそれらのチャンネルの SuperFGD 上での位置を図 5.10 に示す.

DeadSuspicious チャンネルについては、58 チャンネルを発見した. これらのチャンネルについての詳細は 次節で述べる. なお表 5.1 に示した、地上での試運転時に発見された Crate3 FEB49 ch79 と Crate4 FEB71 ch131 では正常にデータ取得が可能であったことを確認した.

LowLight チャンネルについては、11 チャンネルを発見した. これらのうち 9 チャンネルは、図 5.10 の上 面の中央付近に赤色の丸印で示したように同じ LGP モジュールに属している. 該当する LGP モジュールに は TooBright チャンネルが比較的少ないことから、この LGP モジュールの光量が比較的小さいと考えられ る. 今後の運転では、他の LGP モジュールよりも高い電圧を与えることが予定されている.



図 5.10: 各不良チャンネルの SuperFGD 上の位置の例. 左の 56 × 192 の枠が SuperFGD の上流のチャンネ ル,中央の 182 × 192 の枠が上面のチャンネル,下の 182 × 56 の枠が壁面のチャンネルである. また点線は LGP モジュールの境界部分.

TooBright チャンネルについては、1211 チャンネルを発見した. 図 5.10 に示したように、これらのチャ ンネルは一直線上に並ぶ傾向があることがわかる. この TooBright がまとまって位置する箇所は、LGP モ ジュールの両端付近や、LGP モジュールを SuperFGD に固定するためのネジ穴に対応する. この LGP モ ジュールの両端やネジ穴付近で光量が大きくなってしまう傾向は、LGP モジュールのインストール前に行わ れた品質確認試験の結果に一致している. ネジ穴付近については、導光板を進む光がネジで散乱されること で、他の部分に比べて光量が大きくなる. LGP モジュールの LED に近い側の端では LED から直接拡散板に 光が伝わることで、LED の反対側の端では反射した光が再びノッチで拡散されることで、光量が大きくなる と考えられる. このことから TooBright の判定は、うまく光量についての特徴を引き出せていると考えられ る. このような光量の非一様性は、LGP モジュールの構造上仕方のないものである. 一部のチャンネルで光 量が大きすぎる場合に、HG キャリブレーションをどのように行うかについては 5.8 節で検討した. またこの ような箇所以外に、図 5.10 で SuperFGD の上流側の矢印で示した位置に、TooBright と判定されたチャンネ ルを多く含む LGP モジュールが 2 つ発見された. これは光量を変えた測定においても同様の結果であったこ とから、この 2 つの LGP モジュールの特徴であると考えられる. この 2 つの LGP モジュールに比べて低い電圧を与えることが予定されている.

HighBaseline チャンネルは 300 チャンネル, LowBaseline チャンネルは 45 チャンネルを発見した. その

Crate	FEB	ch	ADC 分布の問題点
4	69	169	異常な ADC 分布
6	97	PCB 上半分の 31 チャンネル	エントリー数が 0
6	97	235	エントリー数が 0
12	200	22	エントリー数が 0
15	241	203	エントリー数が少なく,複数のピークが見えない
15	252	128 - 159 の 24 チャンネル	エントリー数が 0

表 5.3: SuperFGD 運転時に発見された 59 個の DeadSuspicious チャンネルと問題点

うち図 5.10 にそれぞれ緑とピンクの丸印で示した集団が同じ ASIC に属する High/LowBaseline チャンネル のである. これは Baseline がエレクトロニクスで設定されているものであることから,対応する ASIC に対 しての設定値が不適切であったと考えられる. これらの ASIC については, Baseline を除去するためにエレ クトロニクスの設定がやり直される予定である.

以上のように, SuperFGD の運転時におけるチャンネルの健全性検査では, データ取得と HG キャリブ レーションに問題のない Good チャンネルは, 全体の 95.85% であった. 健全性検査の目標であった 99% に 到達していないものの, DeadSuspicious チャンネルを除いた不良チャンネルについては, エレクトロニクス の設定や LED キャリブレーションシステムの光量設定を調整することで, Good チャンネルにすることが可 能である. したがって今回の健全性検査では, DeadSuspicious チャンネルを除いた 99.58% のチャンネルで, データ取得を行うことができた.

5.7.1 運転時に発見された DeadSuspicious チャンネル

表 5.2 に示した DeadSuspicious の 58 チャンネルと Crate4 で見つかった異常な ADC 分布を示すチャンネ ルの合計 59 チャンネルが,光量やエレクトロニクスの設定以外の問題が原因で,データを適切に読み出せて いないチャンネルだと判断した.これらのチャンネルの ADC 分布を目視で確認し判明した問題点を表 5.3 に 示す.それぞれのチャンネルについて,現在わかっていることについて述べる.

Crate4 FEB69 ch169

Crate4 FEB69 ch169 については,図 5.11 に示したように,900 ADC 付近で ADC がサチュレーションし ているような分布をしている. HG の信号は 12 bit ADC でデジタル化されるため,サチュレーションが起こ るのであれば 4095 ADC であるはずである. この FEB は地上での試運転の際に他の PCB に接続されていた が,そのチャンネルにおいても同様の分布が得られていた.またこの FEB の他のチャンネルについては正常 にデータを取得できていることが確認できた.以上のことから,このチャンネルに関わるエレクトロニクス のどこかの部分が破損していると考えられる.将来的にエレクトロニクスの数が十分用意された際に,この FEB を交換することが予定されている.

Crate6 FEB97 PCB 上半分の 31 チャンネルと ch235

Crate6 FEB97 の 32 チャンネルについては,エントリーが 0 であった. 該当する MPPC-PCB は, SuperFGD が ND280 にインストールされたあとに, MPPC-PCB と信号ケーブルの接続が非常に不安定で



FEB 69 Channel 169 (Crate 4 Slot 5 ASIC 5 CitirocCh 9)

図 5.11: FEB69 ch169 の ADC 分布. 900 ADC 付近で ADC 値がサチュレーションしたような分布をしてい る.

あることが分かっている. これはインストール後に PCB 側のコネクターが外れているのを発見し再接続した ものの、少し力を加えただけで簡単に外れてしまうことで確認された. インストールのために信号ケーブルを 検出器に固定する際にコネクターに誤って力が加わり、コネクターが破損したものと考えられている. なお表 5.1 で示した地上の試験で DeadSuspicious と判定された FEB97 ch235 はこの MPPC-PCB に含まれる. 幸 いにも該当する MPPC-PCB は比較的アクセスが容易な検出器上面の周縁部に位置する. 2024 年 1 月に行わ れた、電磁石を開けての SuperFGD の保守点検では、信号ケーブル側のコネクタの破損が確認された. 信号 ケーブルを正常なものに交換した結果、すべてのチャンネルでデータ取得を行うことが可能になった.

Crate12 FEB200 ch22

Crate12 FEB200 ch22 については, エントリー数が0 であった.表 5.1 にあるように, 地上の試験ではエレクトロニクス側のケーブルの再接続によって正常にデータ取得を行うことができていたことから, ケーブルの接続に問題があると考えられる.そのため, エレクトロニクス側のケーブルの再接続が試される予定である.

Crate15 FEB241 ch203

Crate15 FEB 241 ch203 については,図 5.12a に示したように,何らかの分布のようなものが見えているものの複数のピークが確認できない.しかし,地上での試運転では複数のピークを確認することができていた.



図 5.12: Crate15 FEB241 ch203 の ADC 分布. (a) 標準的なエレクトロニクスの設定で測定した場合の ADC 分布. エントリーが少なく,複数のピークも見えない. (b) エレクトロニクスの threshold を下げて測定した 場合の ADC 分布. 複数のピークが確認でき,ゲインをキャリブレーションすることができている.

これに加えて、別日に他の試験のために threshold の設定値を下げてデータ取得が行われた際に、図 5.12b に 示したような ADC 分布が得られた.図 5.12b では、複数のピークが確認でき、ゲインを測定することができ た.測定されたゲインの値は 13.0±0.2 ADC/p.e. であり、今回の測定で得られた典型的なゲインである 22 ADC/p.e. に比べて非常に低い.したがって、エレクトロニクスの不具合によりこのチャンネルへの印加電圧 が低くなっていることが疑われる.このチャンネルに与える印加電圧を大きくして、他のチャンネルと同程度 のゲインが得られるかどうかを確認する試験が予定されている.

Crate15 FEB252

Crate15 FEB252 の 24 チャンネルについては,該当する ASIC のすべてのチャンネルに対応する.一つの ASIC では合計で 32 チャンネルのデータ取得が行えるものの,この AISC では 24 チャンネルだけでデータ を読み出している.これは,SuperFGD の最下流ではスペースの都合から一層キューブの層が少ないために, SuperFGD 上面の最下流に位置する MPPC-PCB の合計 8 チャンネルが使用されていないからである.2024 年 1 月に行われた保守点検作業で,該当する信号ケーブルの MPPC-PCB 側のコネクターが不完全に接続さ れていることが発見された.コネクターを再接続したところ,すべてのチャンネルでデータ取得が可能である ことが確認された.

5.8 異なる光量設定のデータを用いた全チャンネルキャリブレーション

現状使われている最も標準的な光量設定での測定と,それよりも光量の低い設定での測定から得られたそれ ぞれのゲインの分布を,図 5.13 に示す.図 5.13a では,22 ADC/p.e. を中心にしたガウス分布と,その分布 から4シグマ以上大きなゲインが測定されたチャンネルの分布が存在している事がわかる.大きなゲインが測 定されたチャンネルの多くは,TooBright チャンネルのキャリブレーション結果である.一方で,図 5.13b で は,22 ADC/p.e. を中心とした分布よりもゲインが小さく測定されたチャンネルが多く存在する.これらの 多くは LowLight に分類されるチャンネルである.このように光量が大きすぎるチャンネルに合わせて光量設



図 5.13: (a) 標準的な光量設定でのゲインの分布と (b) 光量を落とした設定でのゲインの分布.赤線が分布の 中央付近をガウシアンでフィッティングした結果で,点線が分布の中心から4シグマに対応するゲインの値.

表 5.4: 分布の中心から 4 シグマ以上大きいゲインが測定されたチャンネルのチャンネル数と大きいゲインを 持つ理由.

チャンネル数	理由
14	キャリブレーションが適切に行えており,ゲインが真に大きい
2	光量を落とした設定であっても TooBright と判定されている
17	適切にキャリブレーションを行えていないデータを選んでしまった

定を行うと,逆に光量が足りないチャンネルが多くなってしまい,単一の光量設定だけではすべてのチャンネルを適切にキャリブレーションすることができないことが分かる.

そこでこれらのデータからチャンネル単位でより適切にキャリブレーションが行えるデータを, TooBright の判定を用いて選別することを試みた.標準的な光量設定で TooBright 以外に判定されたチャンネルについ てはその測定でのゲインを, TooBright と判定されたチャンネルについては光量を落とした測定でのゲインを それぞれ用いた.このようにして得られたゲインの分布を図 5.14 に示した.図 5.14 より,ほとんどのチャン ネルがガウス分布に従っている事が分かり,得られたゲインの分布をガウシアンでフィッティングした結果, 中心が 21.7 ADC/p.e.で標準偏差が 1.3 ADC/p.e.であった.相対標準偏差は 0.06 であり,これは図 5.5b で光量が適切であると判断した HG ADC の標準偏差が 20 から 65 の領域の値と一致している.

分布の中心から 4 シグマ小さい 16.4 ADC/p.e. 以下の領域に 1 チャンネル, 4 シグマ大きい 27.0 ADC/p.e. 以上の領域に 33 チャンネルが存在した. ゲインが小さいチャンネルについては, キャリブレーションが適切 に行えていることが確認できた. よってこのチャンネルのゲインが何らかの理由で小さくなっていることが判 明した.

一方で,ゲインが大きく測定された 33 チャンネルを目視で確認したところ,表 5.4 のような原因があるこ とがわかった.キャリブレーションが適切に行えている 14 チャンネルについては,MPPC への印加電圧を適 切に調整することで,他のチャンネルと同程度のゲインにすることが可能である.

光量を落とした設定であっても TooBright と判定された 2 チャンネルについては,該当する LGP モジュールに与える電圧値を更に小さくしてデータ取得することで,適切な光量に調整できるかを確かめる必要があ


図 5.14: 2 つの LED 設定から TooBright の判定を用いてデータを選別した場合のゲインの分布.赤線はガウ シアンでのフィッティング結果で,点線は分布の中心から 4 シグマに対応するゲインの値.

る. その際,光量を調整する LGP モジュールに属する他のチャンネルにおいて,標準的な光量での測定と光量を落とした測定の両方で,LowLight と判定されるチャンネルが存在してしまう可能性がある. 仮に適切な光量設定が行えなかった場合には,今回発見した 2 つの TooBright チャンネルをキャリブレーションするために,さらに光量を小さくした測定が必要となってしまう. そのような必要があるかどうかを確認するのは今後の課題である.

適切にキャリブレーションができていないデータを選んでしまった 17 チャンネルについては, TooBright の判定に用いた「HG ADC 分布の標準偏差が 65 以上」という条件が最適でないことが原因だと考えられる. 標準偏差が 65 ADC 以上であっても MPPC のゲインが大きいチャンネルについてはキャリブレーションが 行えるのに対して, 65 ADC 以下の標準偏差であってもゲインが小さいチャンネルについては, キャリブレー ションが適切に行えない場合があるためである. 今回の測定では行えなかったが, 2023 年 2 月から始まる ニュートリノビームの測定では, ゲインのばらつきを小さくするために MPPC への印加電圧を調整すること が予定されている. そこで得られたゲインのばらつきが小さいデータを用いて, 再び基準となる標準偏差を決 めることで, TooBright の判定の最適化が行うことができると考えられる.

以上の結果から、本研究での TooBright の判定を用いることで、58 個の DeadSuspicious チャンネルと TooBright の判定で適切に選別ができなかった 19 チャンネルを除いた、全体の 99.95% のチャンネルで適切 にキャリブレーションを行えることを実証した.

5.9 まとめ

データ取得やキャリブレーションが適切に行えない不良チャンネルを全体の1%未満に抑えることを目的 に、SuperFGD のチャンネルの健全性検査を行った.不良チャンネルとして DeadSuspicious, LowLight, TooBright, HighBaseline, LowBaseline と正常なチャンネルである Good の6 つにチャンネルを分類した. DeadSuspicous はデータを適切に取得できていないチャンネルであり, LowLight と TooBright はデータ は取得できているがキャリブレーションの際の光量の設定が不適切なチャンネル, そして HighBaseline と LowBaseline はエレクトロニクスの設定が不適切なチャンネルである.

地上での試運転では、合計で 539 チャンネルが DeadSuspicious として発見された. これらのうち 535 チャ ンネルについては、信号ケーブルとエレクトロニクスの再接続などにより、正常にデータを取得することがで きるようになった. 残りの 4 チャンネルについては十分な検査を行う時間が確保できなかったため、ケーブル の再接続が試された後に SuperFGD は ND280 内にインストールされた. 地上でのチャンネルの健全性検査 の結果、99.99% のチャンネルで適切にデータが取得できることを確認した.

2023 年 11 月から開始された SuperFGD の運転では、エレクトロニクスの数や通信の問題により全体の 約 70% のチャンネルでデータ取得が行われた.電磁石が閉じた後でのチャンネルの健全性チェックの結果、 データ取得を行ったチャンネルのうち 95.85% が Good と判定された.不良チャンネルを 1% 未満に抑え るという目標には到達できなかったものの、DeadSuspicous 以外の不良チャンネルについてはキャリブレー ションに用いた光量やエレクトロニクスの設定を適切に調整することで、適切にデータ取得を行うことがで きると考えられる.よって、DeadSuspicious を除いた 99.85% のチャンネルでデータ取得を行うことがで きた.DeadSuspicious チャンネルについては、エレクトロニクスやコネクタの故障、ケーブルの接続など に問題があると考えられた.そして、運転終了の 2024 年 1 月に行われた、電磁石を開けての保守点検で、 DeadSuspicious がまとまって存在した信号ケーブルの不完全な接続が確認され、56 チャンネルが正常にデー タ取得を行うことが可能になった.

最後に,異なる光量設定のデータを用いて,全チャンネルのキャリブレーションを試みた.最も標準的な光 量設定での測定と,光量を落とした測定の2つのデータを,TooBrightの判定を用いて比較し,よりよくキャ リブレーションができるデータをチャンネル単位で選別した.そうして得られたゲインの分布は,中心が21.7 ADC/p.e. でシグマが 1.3 ADC/p.e. のガウス分布となった.分布の中心から4シグマ以上異なるゲインが測 定されたチャンネルは,全部で34 チャンネル存在した.

これらを目視で確認した結果,15 チャンネルについては適切にキャリブレーションを行うことができていた.一方で,残りの19 チャンネルについては今回設定した TooBright の判定で正しくデータが選別できていなかった.よって,本研究で考案した TooBright の判定を用いることで,99.95% のチャンネルで適切にデータを選別することができた.今後予定されている MPPC への印加電圧の調整によりゲインのばらつきを抑えた場合でのデータを用いることで,TooBright の基準を最適化することが今後の課題となる.

以上の結果から、本研究で考案した不良チャンネルの分類結果から、光量やエレクトロニクスの設定の調整 をすることで、99.85%以上のチャンネルで適切にデータを取得し、キャリブレーションが可能であることを 実証した.

第6章

SuperFGD の運用状況と今後の展望

SuperFGD を用いた最初のニュートリノビームデータの取得が 2023 年 11 月 23 日から 12 月 25 日まで行われた. 今回の運転の目的は,新しくインストールされた SuperFGD, HATPC, ToF を,既存の検出器の データ取得システムに統合し,すべての検出器で同期してニュートリノ反応事象を検出できることを実証する ことであった.

SuperFGD 単体でのデータ取得が可能になった後に,HATPC と ToF とのシステムの統合が行われた. そして,最終的に既存の ND280 の検出器である FGD, TPC, ECAL と,今回新しくインストールされた SuperFGD, HATPC, ToF の検出器を用いて,ニュートリノ反応によって生成した荷電粒子の飛跡を観測す ることに成功した.イベントディスプレイの例を図 6.1 に示す.図 6.1 は ND280 を側面から見たもので,左 側からニュートリノビームが入射する.また電磁石による磁場は紙面に垂直下向きにかかっている.



図 6.1: SuperFGD で捉えられたニュートリノ反応による荷電粒子の飛跡の例. 信号ケーブルの接続が誤って いるために, SuperFGD の下流側の飛跡は途切れているように見える.



図 6.2: 飛跡の弦とサジッタの長さ. 図中の長さは,紙面に印刷したイベントディスプレイを定規で測り,実際の長さと紙面上の長さの比から計算した値.

上流の ECAL と SuperFGD でそれぞれ別のニュートリノが反応して、荷電粒子の飛跡が捉えられたと考え られる. ECAL での反応は CCQE 反応で、上向きに μ^- が飛び SuperFGD に到達し、下向きに陽子が飛び ECAL 内に短い飛跡を残したと思われる.

一方, SuperFGD 内で起こった反応は、CC1 π 反応と呼ばれる荷電カレント反応であると思われる. これ は終状態に μ^- と核子に加えて、 π^+ などが観測される反応である. SuperFGD から下流の TPC と FGD に 飛跡を残したものは μ^- で、HATPC に入射したものは π^+ であると考えられる. そして、 μ^- と思われる粒 子の鉛直方向の運動量がほぼ 0 で、 π^+ と思われる粒子が鉛直下向きに運動量を持っている. よって、鉛直方 向の運動量の保存のためには、3 つ目の粒子が必要で、それは核子であると考えられる. 陽子の場合は、十分 な運動量を受け取らず核内にとどまったか、非常に短い飛跡であったと推測される. 実際、反応点付近に数 キューブ程度、他と比べて光量が大きいヒットが存在し、これが低運動量の陽子の飛跡である可能性がある. なお、 μ^- と思われる粒子の飛跡が SuperFGD 下流側で途切れているのは、信号ケーブルが入れ替わってし まっていたからである. 2024 年 1 月に行われた点検作業で、正しい位置に接続がなされた.

SuperFGD で反応したニュートリノのエネルギーの再構成を試みた.反応に関わった核子を陽子だとすると、今回観測された CC1π 反応は、

$$\nu_{\mu} + p \to p + \mu^{-} + \pi^{+}$$
 (6.0.1)

となる.

まず μ^-, π^+ の運動量を飛跡から求めた. 図 6.1 のイベントディスプレイを紙面に印刷し, 飛跡が完全に円 弧を描いていると仮定し, 円弧の弦の長さ *L* とサジッタ *s*(弦の中点と円弧の中点を結んだ線) を定規で測定し た. イベントディスプレイ中での SuperFGD の長さから, 図 6.1 の縮尺を計算し, *L*,*s* を実際の長さに変換 した値を図 6.2 に示した. 紙面と垂直に 0.2 T の磁場 *B* がかけられているので, 紙面内の運動量 *P* は,

$$P \simeq \frac{0.3BL^2}{8s}$$
 (6.0.2)

で与えられる.以上より、 μ^-, π^+ の紙面内での運動量の大きさは、それぞれ 0.29 GeV/c、0.20 GeV/c となる.

次に反応前後の各粒子の四元運動量を考える.ニュートリノ、反応後の陽子、 μ^-, π^+ の四元運動量をそれ ぞれ $P_{\nu}, P_p, P_{\mu^-}, P_{\pi^+}$ とすると、四元運動量保存より、

$$P_{\nu} + \binom{m_p}{\mathbf{0}} = P_p + P_{\mu^-} + P_{\pi^+}$$
(6.0.3)

となる. ここで m_p は陽子の質量である. また反応前の陽子は静止していたとした. ここで $P_p^2 = m_p^2$ より, 反応後の陽子の情報を消去することで,

$$m_p^2 = \left[P_\nu + \binom{m_p}{\mathbf{0}} - P_{\mu^-} - P_{\pi^+} \right]^2.$$
 (6.0.4)

図 6.2 より, μ^-, π^+ の散乱角はそれぞれ 0°, 45° であり,ニュートリノはビーム軸と平行に入射したとする と,ニュートリノのエネルギー E_{ν} は式 6.0.4 を用いて,

$$E_{\nu} = 0.58 \text{ GeV}$$
 (6.0.5)

と測定することができた. T2K 実験のニュートリノビームのエネルギーピークは 0.6 GeV であり, この結果 は妥当であると言える.

このように、本研究において SuperFGD は 99.9% 以上のチャンネルを安定的に動作させ、期待されていた ようにニュートリノ反応標的かつ、高い分解能を持った飛跡検出器として機能していることを実証した. 2024 年5月までに SuperFGD のすべてのエレクトロニクスと上側の HATPC、そして残りの ToF をインストール し、6月から物理測定を開始する.この際にも、運転開始前の信号読み出し検査や、運転中の2種類の光量設 定を用いたキャリブレーションなど、本研究で開発したチャンネルの健全性検査手法が用いられる.この物理 データにおいて、従来の前置検出器では検出できなかった大角度や低運動量の飛跡を含めた詳細な解析をする ことで、ニュートリノ反応についての理解が飛躍的に進み、CP 対称性の破れの探索など、T2K 実験における ニュートリノ振動測定の高精度化につながることが期待される.

第7章

結論

T2K 実験では, CP 位相測定の系統誤差削減を目的に, 前置検出器群のアップグレードが行われた. その中の一つに, SuperFGD というニュートリノ反応標的兼飛跡検出器がある. SuperFGD は, 1 cm 角のプラス チックシンチレータ 200 万個とそれらすべてを 3 方向から貫く 5.6 万本の波長変換ファイバー, そして 5.6 万 個の光検出器から構成されている.

SuperFGD の 5.6 万チャンネルのうち,信号を正常に読み出すことのできないチャンネルが多数存在して しまうと,荷電粒子の飛跡を再構成することができなくなってしまう.そのため,検出器の建設時と運転時に おいて,問題のあるチャンネルの把握と適切な対処によって,99%以上のチャンネルで正常にデータ取得が 可能である状態にする必要があった.

建設時には,検出器全体の遮光と約 900 本の信号読み出しケーブルの接続作業を行った.この際,最終的に 信号ケーブルが表面を覆うため,後戻りして作業を行うことができない.そのため,接続と遮光を確認する試 験を並行して行う必要があった.この試験を効率的・定量的に行うために,安定的に正確かつ素早い動作をす る検査システムを開発した.そして,開発したシステムを用いて問題を発見・改善し,5.6万個すべてのチャ ンネルで正常にデータ取得を行える状態にした.

また,試験システムを転用し, SuperFGD を用いた最初の宇宙線観測試験を行った.得られた宇宙線候補事 象から光量分布を求めた結果,MPV が 30.7±0.3 p.e.,分布の平均は 37 p.e. であった.先行研究の 50 p.e. という結果と比較するために,ファイバーによる光の減衰と MPPC への印加電圧の検出効率への影響を考え て補正すると,MPV が 46 p.e.,平均が 57 p.e. であった.宇宙線の入射角度やファイバーと MPPC の光学 接続の違いによる影響も考えると,本試験の結果は先行研究と無矛盾であると結論づけられ,SuperFGD が 荷電粒子の飛跡を観測できることを実証した.

運転時には、検出器の整備と監視、さらに増倍率較正のために、チャンネルの信号分布の情報自体から正常 性を検査した.そのために、データ取得やエレクトロニクスの設定、さらには光量設定に問題のあるチャンネ ルについて、5 つの分類を考案し、分類に応じて対処を行った.そして、地上での試運転から実際のニュート リノビームデータ取得において、チャンネルの健全性を確認した.その結果、約 95% のチャンネルでデータ が正常に読み出すことができ、エレクトロニクスや光量を適切に設定することで 99.85% のチャンネルについ てもデータ取得に問題のない状態とした.

そして, SuperFGD は 2023 年 11 月から行われたニュートリノビームデータ取得においても 99 % 以上の チャンネルを安定的に動作させ,ニュートリノ反応による荷電粒子の飛跡を観測することに成功した. 今後も 本研究で開発したキャリブレーションの手法などが用いられ,ニュートリノ反応の詳細な理解と δ_{CP} などの ニュートリノ振動パラメータの測定に貢献することができると考えられる.



本研究を進めるにあたりお世話になった方々にこの場をお借りして感謝申し上げます.

指導教員の中家剛教授には、研究の方向性を決めるような重要なご助言を頂き、大変お世話になりました. また、春の学校などのイベントにもお誘いいただき、他大学の学生との貴重な交流の機会を与えていただきま した.副指導教員の木河達也助教には、研究の細かな相談から研究全体の話に至るまで大変お世話になりまし た.学部3回生時代から、基本的な機器の使い方の指導や実際のデータを見ながら相談などをしていただき、 次にやるべきことが明確にしながら研究を進めることができました.また学会発表の資料や本論文の添削など でも多くの助言をいただき、大変勉強になりました.

KEK の松原綱之助教には, J-PARC での現場作業で大変お世話になりました.作業をしている私をいつも 気にかけてくださり,温かい言葉をかけていただきました.KEK の谷川さんには,J-PARC での現地作業全 般にわたり大変お世話になりました.研究での相談事やケーブル接続作業にも協力していただき,鋭い洞察と 的確な助言に驚嘆するばかりでした.

Imperial College of London の Chien さん, Jake さんには, SuperFGD のキャリブレーショングループと して,たくさんのご助力をしていただきました. Chien さんには,クラスすら理解できていない私の素人質問 にも真摯に答えていただき,ソフトウェアの相談に何度も乗っていただきました. Chien さんと一緒にキャリ ブレーションソフトウェアについて議論でき,今後 10 年単位で使われるソフトウェアに関われることができ たのは幸運でした. Jake さんには,キャリブレーショングループ全体の方向性についてや,英語が苦手な私 のために発表への助言などをしていただきました.

東京都立大学の在原さん,古藤さん,古井くんには,LED キャリブレーションシステム関係で大変お世話 になりました.在原さんには,接続・遮光システムの初期段階から様々な助言をいただきました.古藤さんに は,古藤さんが卒業する直前の数ヶ月でしたが,やはりキャリブレーションシステムについて多くのご助言を 頂きました.古井くんには,キャリブレーショングループの唯一の同期として,一緒に研究を進めてくれまし た.東京大学の児玉さん,小林くん,沖永くん、新居くんには,東海での生活から建設作業の手伝いで協力頂 きました. 児玉さんには,一番近いキャリブレーショングループの先輩として,様々な相談に乗っていただき ました. 同期の小林くん,沖永くんと新居くんには,東海の生活で仲良くしてくれただけでなく,接続試験や キャリブレーションのデータ取得なども手伝って頂きました.東海村での生活が非常に楽しいものになったの は皆さんのおかげです.

T2K の先輩の川上さん,吉村さん,有元さん,浅野さんには,研究を進める上で実験器具の使い方から研究 室の基本的なことについて,教えていただきました.同期の恩田くん,竹内くん,疋田くん,松下くん,武藤 くんには,同じ研究室の仲間として,そしてかけがいのない友人として,私の研究生活を支えてくれました. 卒業してからもまた同期飲み会やりましょう.

最後に、学部時代から京都での生活を様々な面から応援してくれた家族に感謝します.

付録 A

SuperFGD におけるキャリブレーション

A.1 概要

SuperFGD のエレクトロニクスは, High Gain(HG), Low Gain(LG), Time-over-Threshold(ToT) の 3 つ の情報を取得することで,高い分解能かつ広いダイナミックレンジ,そして少ない dead time で MPPC から の信号を記録することでができる.キャリブレーションの目的は,これらの信号の値と MPPC に到達した光 子数の関係を求めることである.第5章で述べた HG キャリブレーションを除いた,Pedestal, LG, ToT の キャリブレーションの手法を説明する.

A.2 Pedestal キャリブレーション

SuperFGD のエレクトロニクスは、threshold を越える信号を取得したチャンネルに対して、一定の電圧値 を返す. そのため、0 p.e. に対応する ADC 値である Pedestal を直接測定することができなく、Pedestal に 対してもキャリブレーションを行う必要がある. Pedestal キャリブレーションのためには、HG の増倍率を 変えたデータが複数必要である. それらのデータから得られた各ピーク位置の線形関係を図 A.1 のようにプ ロットする. Pedestal の位置はアンプの設定によらず一定であるため、これらの直線は一点で交わりその交点 の ADC 値がペデスタル位置 P である. これらの値を用い、MPPC に到達した光子数 N_{p.e.} と HG で測定さ れた ADC 値 ADC_{HG} の関係式

$$N_{\rm p.e.}[\rm ADC_{\rm HG}] = \frac{\rm ADC_{\rm HG} - P}{G_{\rm HG}}$$
(A.2.1)

を用いて,光子数を測定する事ができる.

A.3 LG キャリブレーション

LG と HG は,同じ信号を分割しそれぞれを増倍率の異なるアンプで増幅することで取得しているため,信 号の比が一定になる.よって同じヒットイベントで取得された LG と HG の値を二次元プロットすると図 A.2 のような線形関係を持つ.よってこのプロットを線形フィットすることで LG と HG の関係式

$$ADC_{LG} = a * ADC_{HG} + b \tag{A.3.1}$$



図 A.1: ペデスタルキャリブレーションの例.



図 A.2: LG キャリブレーションの例 [38].



図 A.3: ToT キャリブレーションの例 [38]. HG と ToT の関係のみを示したが,実際には LG と ToT の関係 においても同様のキャリブレーションを行う.

を得る.式 A.3.1, A.2.1 を用いて,光子数と LG の ADC 値の関係式

$$N_{\text{p.e.}}[\text{ADC}_{\text{LG}}] = \frac{(\text{ADC}_{\text{LG}} - b)/a - P}{G_{\text{HG}}}$$
(A.3.2)

を用いて,光子数を測定することができる.

A.4 ToT キャリブレーション

同じヒットイベントでの ToT と HG, LG の値をそれぞれ二次元プロットする. これを 5 次多項式でフィットすることで, ToT と HG, LG の関係式を得る.

参考文献

- [1] W. Pauli. Dear radioactive ladies and gentlemen. Phys. Today, Vol. 31N9, p. 27, 1978.
- [2] E. Fermi. An attempt of a theory of beta radiation. 1. Z. Phys., Vol. 88, pp. 161–177, 1934.
- [3] C. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. Kruse, and A. D. McGuire. Detection of the free neutrino: a confirmation. *Science*, Vol. 124 3212, pp. 103–4, 1956.
- [4] G. Danby, et al. Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 9, pp. 36–44, 1962.
- [5] K. Kodama, et al. Observation of tau neutrino interactions. *Phys. Lett. B*, Vol. 504, pp. 218–224, 2001.
- [6] K. S. Hirata, et al. Experimental Study of the Atmospheric Neutrino Flux. *Phys. Lett. B*, Vol. 205, p. 416, 1988.
- [7] 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.
- [8] M.C Gonzalez-Garcia, M Maltoni, and T Schwetz. Nufit: Three-flavour global analyses of neutrino oscillation experiments. Universe, Vol. 7, No. 12, 2021.
- [9] R. Abbasi, et al. Measurement of atmospheric neutrino mixing with improved icecube deepcore calibration and data processing. *Phys. Rev. D*, Vol. 108, p. 012014, Jul 2023.
- [10] K. Abe, et al. Measurements of neutrino oscillation parameters from the t2k experiment using 3.6×10^{21} protons on target. *Eur. Phys. J. C*, Vol. 83, No. 9, p. 782, 2023.
- [11] M. A. Acero, et al. Improved measurement of neutrino oscillation parameters by the nova experiment. *Phys. Rev. D*, Vol. 106, p. 032004, Aug 2022.
- [12] A. Bellerive, et al. The sudbury neutrino observatory. Nuclear Physics B, Vol. 908, pp. 30–51, 2016. Neutrino Oscillations: Celebrating the Nobel Prize in Physics 2015.
- [13] S. Abe, et al. Precision measurement of neutrino oscillation parameters with kamland. Phys. Rev. Lett., Vol. 100, p. 221803, Jun 2008.
- [14] K. Abe, et al. Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam. Phys. Rev. Lett., Vol. 107, p. 041801, 2011.
- [15] F. P. An, et al. Observation of electron-antineutrino disappearance at Daya Bay. Phys. Rev. Lett., Vol. 108, p. 171803, 2012.
- [16] T2K-experiment.org About T2K. https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/.
- [17] J-PARC—加速器とは. http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html.
- [18] K. Abe, 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.

- [19] K. Abe, et al. Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam. Phys. Rev. D, Vol. 88, p. 032002, 2013.
- [20] Luigi Di Lella and Carlo Rubbia. The discovery of the w and z particles. https://cds.cern.ch/ record/2103277/files/9789814644150_0006.pdf.
- [21] Kenji Yasutome. Towards the measurement of neutrino cross section on H2O and CH target at 1 GeV region by T2K-WAGASCI experiment. PoS, Vol. NuFact2021, p. 075, 2022.
- [22] Davide Sgalaberna. The T2K ND280 Upgrade. PoS, Vol. ICHEP2020, p. 175, 2021.
- [23] 技術資料 MPPC. https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/ documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf.
- [24] D Renker and E Lorenz. Advances in solid state photon detectors. Journal of Instrumentation, Vol. 4, No. 04, p. P04004, apr 2009.
- [25] MPPC S13360-1325PE. https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/ mppc_mppc-array/S13360-1325PE.html.
- [26] 鞠谷温士. T2K 実験の新型検出器 Super-FGD 用 MPPC の大量試験システムの開発. 第 26 回 ICEPP シンポジウム, 2020.
- [27] CITIROC. https://www.weeroc.com/products/sipm-read-out/citiroc-1a.
- [28] Cesar JESUS-VALLS. The t2k new detector upgrade. https://indico.in2p3.fr/event/28466/ contributions/121700/attachments/76826/111512/ICP2I_ND280up.pdf, 2023.
- [29] D. Sgalaberna. The t2k nd280 upgrade. Vol. 390, , 2021.
- [30] A Blondel, M Yokoyama, and M Zito. The T2K-ND280 upgrade proposal. Technical report, CERN, Geneva, Jan 2018.
- [31] Dergacheva A, et al. Current status of the novel 3d superfgd detector for the t2k experiment. *Phyics*, Vol. 5, .
- [32] DT5702 32 Channel SiPM Readout Board for Cosmic Rays Veto BOXED. https://www.caen.it/ products/dt5702/.
- [33] Keysight 33500B and 33600A Series Manual. https://www.testequipmentdepot.com/media/ akeneo_connector/asset_files/3/3/33500b_33600a_series_manual_4dd4.pdf.
- [34] ファンクションジェネレータ SG-4200 シリーズ. https://www.iwatsu.co.jp/tme/sg/sg4222_62/.
- [35] https://root.cern.
- [36] O. Mineev, et al. Beam test results of 3d fine-grained scintillator detector prototype for a t2k nd280 neutrino active target. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 923, pp. 134–138, 2019.
- [37] S. Kidama. Development of calibration methods for the new t2k neutrino detector superfgd and evaluation of new wavelength shifting fiber. Master's thesis, Tokyo, 2023.
- [38] A. Blondel, et al. The superfied prototype charged particle beam tests. *Journal of Instrumentation*, Vol. 15, No. 12, p. P12003, dec 2020.
- [39] ニュートリノ検出器.http://accwww2.kek.jp/oho/oho16/OHO16_txt/08_Yokoyama_Masashi.pdf.
- [40] T2K ND280 Upgrade Technical Design Report. https://arxiv.org/pdf/1901.03750.pdf, 2020.

[41] KEK. T2k experiment enters a new phase with significantly improved sensitivity for its world leading neutrino oscillation research. https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2024/01/ pr20240117T2K_en.pdf, 2024.