

修士論文

ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器に向けたシンチレータの劣化評価および新開発 MPPC 読み出し ASIC の性能評価

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

有元 隼太

2023年3月3日

概要

宇宙における物質・反物質非対称性の起源は今なお未知であり、ニュートリノにおける CP 対称性の破れがその鍵を握っているとされる。現在はニュートリノにおける CP 対称性の破れを探索すべく、J-PARC 加速器からのニュートリノビームをビーム生成点 280 m 下流の前置検出器と 295 km 下流の後置検出器スーパーカミオカンデで測定し、ニュートリノ振動を精密測定する T2K 実験が行われている。

CP 対称性の破れの発見のためには、現在の T2K 実験の統計・系統誤差では不十分であり両方を改善する必要がある。統計誤差の削減のためには、スーパーカミオカンデの約 8.4 倍の有効体積をもつ超大型水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデが 2027 年に設置され、後置検出器として 10-20 年にわたり運用される予定である。系統誤差の削減のためには、2023 年から前置検出器に新型検出器 SuperFGD が導入される。

SuperFGD やニュートリノビームプロファイルを測定する前置検出器 INGRID はハイパーカミオカンデ導入後も使用が想定されるが、長期間の運用となるためシンチレータの経年劣化やシンチレーション光読み出しのためのエレクトロニクス (ASIC) の故障が問題となりうる。

INGRID のシンチレータについては 2010 年から 2021 年までの期間で経年劣化による光量の減少が報告されている。この劣化が今後も続くかある時点で劣化が止まるかを調べるため、シンチレータを高温環境下に置くことで劣化の原因であると考えられる酸化反応を促進し (加速劣化試験)、シンチレータの光量変化を確認した。また、SuperFGD についても実機での劣化が確認されていないため、加速劣化試験により同様の評価を行った。しかし光量の再現性が小さく見積もっても 10% 程度であり、想定される最大の光量減少率約 20% と比較しても不十分であったので、検出器構成要素を固定するジグを変更することで光量の再現性を約 3% にまで改善した。その結果、測定精度の範囲内で光量の減少が見られなかったため、測定精度の 3 倍の約 9% の光量減少が実際のニュートリノ振動測定に及ぼす影響を GEANT4 シミュレーションで評価した。評価項目は SuperFGD による短飛程の陽子・ π 粒子の粒子識別効率の変化と、INGRID でのミューオンの検出効率の変化であり、前者については粒子を誤認する確率が最大でも 0.05%、後者では検出効率の悪化が $0.048 \pm 0.029\%$ であり、問題にはならないと結論した。

ASIC については、現在 INGRID 等で用いられている Trip-t ASIC がハイパーカミオカンデ導入後に寿命をむかえ多くが故障する可能性がある。そのため多チャンネル MPPC 読み出し用の新 ASIC が KEK の E-System グループを中心に開発された。これは多くの実験での使用を目指した汎用 ASIC であるため、ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器で用いることができるか評価する必要がある。今回はこの ASIC について、1 p.e. を十分に識別できる分解能、100 p.e. までの線形性、1% より十分小さなチャンネル間クロストークを達成できているか評価を行い、実際にこの要請を満たすことを確認した。また、前置検出器では 1 ns 程度の時間分解能をもつ TDC が必要となるので、この ASIC に接続した FPGA に TDC のプロトタイプを開発し評価を行った。

目次

第1章	ニュートリノ振動	1
1.1	ニュートリノ	1
1.2	ニュートリノ振動	1
1.3	ニュートリノ振動実験のこれまでの測定結果	3
1.4	ニュートリノの未解決問題	5
第2章	J-PARC ニュートリノビーム実験	7
2.1	T2K 実験	7
2.2	ニュートリノビーム	7
2.2.1	加速器による陽子生成	7
2.2.2	ニュートリノビームの生成	9
2.2.3	Off-axis 法	10
2.3	ニュートリノ反応	11
2.4	前置検出器	13
2.4.1	INGRID	13
2.4.2	ND280	14
2.4.3	WAGASCI-BabyMIND	16
2.5	後置検出器	16
2.6	T2K 実験のこれまでの測定結果	17
2.7	J-PARC ニュートリノビーム実験のアップグレード計画	18
2.7.1	ニュートリノビーム増強および ND280 アップグレード	18
2.7.2	ハイパーカミオカンデ実験	19
第3章	ハイパーカミオカンデ実験と前置検出器	20
3.1	ハイパーカミオカンデ実験	20
3.1.1	ハイパーカミオカンデ (HK)	20
3.1.2	IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector)	21
3.1.3	ND280 のさらなるアップグレード	22
3.2	ハイパーカミオカンデの予想感度	22
3.3	ハイパーカミオカンデ実験で予想される問題	23
3.3.1	シンチレータの劣化	23
3.3.2	エレクトロニクスの故障	24
第4章	シンチレータの加速劣化試験	26
4.1	加速劣化試験の目的	26
4.2	加速劣化試験の方針	26
4.3	1 回目の加速劣化試験のセットアップ	27

4.3.1	シンチレータ	27
4.3.2	波長変換ファイバー	29
4.3.3	光検出器 MPPC	29
4.3.4	シンチレータボックス	32
4.3.5	NIM EASIROC モジュール	33
4.3.6	全体セットアップ	34
4.3.7	恒温槽の使用	35
4.4	測定方法	35
4.4.1	光量のキャリブレーション	35
4.4.2	イベント選択	36
4.5	加速劣化試験の測定結果 (1 回目)	37
4.6	2 回目の加速劣化試験のセットアップ (変更点のみ)	38
4.7	変更後セットアップの再現性の確認	41
4.8	加速劣化試験の測定結果 (2 回目)	41
4.9	GEANT4 による光学シミュレーション	42
4.9.1	ジオメトリ	42
4.9.2	光学的パラメータ	43
4.10	シミュレーションにもとづく経年劣化の影響評価	45
4.10.1	SuperFGD による p - π 粒子識別	46
4.10.2	INGRID での検出効率	47
4.11	まとめ	48
第 5 章	新開発 MPPC 読み出し ASIC の評価試験	49
5.1	新 ASIC 開発の経緯	49
5.2	ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器からの要請	49
5.3	新 ASIC のデザイン	49
5.4	評価試験のセットアップ	51
5.4.1	MPPC ASIC 評価ボード	51
5.4.2	全体のセットアップ	52
5.5	ADC 読み出しの確認	54
5.6	評価試験の結果	55
5.6.1	1 p.e. 分解能と 150 p.e. までのフルスケールレンジ	55
5.6.2	線形性評価	63
5.6.3	チャンネル間クロストーク	64
5.6.4	まとめ	65
第 6 章	TDC の実装	68
6.1	目的	68
6.2	ファームウェア概要	68
6.3	20 ns TDC の実装	69
6.4	4 相 TDC の実装	70
6.4.1	4 相 TDC の概要	70
6.4.2	Fine Counter	71
6.5	TDC 実装の結果	73

6.6 今後の予定	74
第7章 まとめ	75
謝辞	76
参考文献	77

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。 β 崩壊により放出される電子のエネルギー Spektrum が連続的であることを説明するため、1930年に W. Pauli により仮説上の粒子として提唱された [1]。その後、1956年に C.L. Cowan および F. Reines が原子炉からの反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) と水との反応を検出することにより、その存在を確認した [2]。1962年には、 π 中間子の崩壊により生じたニュートリノが β 崩壊により生じるニュートリノとは異なる性質を持つことから、L. Lederman らによりミューオンニュートリノ (ν_μ) の存在が確認された [3]。これによりニュートリノに種類 (世代、フレーバー) があることがわかったが、この世代数は 1989年に Z ボゾンの崩壊幅から 3 であると決定された [4]。そして 2000年、DONUT 実験によりタウニュートリノ (ν_τ) の存在が確かめられた [5]。このように、現在の標準模型には 3 世代の荷電レプトン e, μ, τ に対応する 3 世代のニュートリノ ν_e, ν_μ, ν_τ およびその反粒子 $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ が組み込まれている。

1.2 ニュートリノ振動

標準理論においてニュートリノは質量を持たないとされるが、実際には質量を持ち、周期的にフレーバーが変化する。この現象をニュートリノ振動という。ニュートリノ振動は 1957年に B. Pontecorvo によりニュートリノ-反ニュートリノ間の遷移という形で提唱され [6]、1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一によりフレーバー間の遷移という形で予言された [7]。以下、本節ではこの現象の理論的側面を述べる。([8] を一部参考にした。)

ニュートリノがゼロでない質量を持つとし、その質量固有状態を $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$)、フレーバー固有状態を $|\nu_l\rangle$ ($l = e, \mu, \tau$) とおく。また、フレーバー固有状態を質量固有状態の重ね合わせで以下のように書くことができるとする。

$$|\nu_l\rangle = \sum_{i=1,2,3} U_{li} |\nu_i\rangle$$

ここで、 U_{li} は 3×3 のユニタリ行列の li 成分であり、Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列 (PMNS 行列) とよばれる。

これは一般に、混合角 $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ および複素位相 δ を用いて

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

と表される。ここで、 $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$ である。 $\delta \neq 0, \pi$ のとき CP 対称性が破れるため、 δ は CP 位相とよばれ δ_{CP} と表記される。

以下、ニュートリノ振動の確率を導出する。フレーバー固有状態間の遷移 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ を考える。質量固有状態の時間発展は、各状態 $|\nu_i\rangle$ の時刻 t における状態を $|\nu_i(t)\rangle$ 、エネルギーを E_i 、 x 方向にのみ運動すると仮定しその運動量を p_i とすると

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - p_i x)} |\nu_i(0)\rangle$$

であるから、フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ のニュートリノの時間発展は

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - p_i x)} |\nu_i(0)\rangle = \sum_{i,l} U_{li}^* U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - p_i x)} |\nu_l(0)\rangle.$$

ゆえに、 $t=0$ で ν_α であったニュートリノが時刻 t で ν_β に遷移する振幅 $A_{\alpha \rightarrow \beta}(t)$ は

$$A_{\alpha \rightarrow \beta}(t) = \langle \nu_\beta(0) | \nu_\alpha(t) \rangle = \langle \nu_\beta(0) | \sum_{i,l} U_{li}^* U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - p_i x)} |\nu_l(0)\rangle = \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} e^{-i(E_i t - p_i x)}.$$

ここで、ニュートリノが相対論的粒子であることから $t = x = L$ (L は時間 t でニュートリノが飛行した距離) とおき、質量固有状態がすべて同じ運動量 $p \gg m_i$ を持つとして、以下の近似を行う。

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p \left(1 + \frac{m_i^2}{2p^2} \right) \simeq p + \frac{m_i^2}{2E}.$$

第3等号では $E_i \gg m_i$ より、粒子のエネルギー E が質量固有状態によらずほぼ一定であると仮定した。これにより遷移振幅は

$$A_{\alpha \rightarrow \beta}(L) \simeq \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}}$$

と書けるから、 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ の遷移確率 $P_{\alpha \rightarrow \beta}(L)$ は

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta}(L) &= |A_{\alpha \rightarrow \beta}(L)|^2 \\ &= \sum_{i,j} U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} e^{i \frac{m_j^2 L}{2E}} \\ &= \sum_i U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* + 2 \sum_{i>j} \Re(U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}}) \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 2 \sum_{i>j} \Re(U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^*) \left[1 - \cos \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right] + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^*) \sin \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^*) \sin^2 \left(1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\beta i}^* U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^*) \sin \left(2.54 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] \frac{L[\text{km}]}{E[\text{GeV}]} \right). \end{aligned} \tag{1.1}$$

ここで、 $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ であり、第4等号ではユニタリ条件 $\sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* = (UU^\dagger)_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta}$ を用いた。表式から明らかなように、少なくとも一組の (i, j) について $\Delta m_{ij}^2 \neq 0$ でなければニュートリノ振動は起こらない。

1.3 ニュートリノ振動実験のこれまでの測定結果

1968 年 Homestake 実験が太陽ニュートリノの観測を行い、 ν_e が標準太陽模型による予測よりも少ないことを発見した。この問題を太陽ニュートリノ問題という。太陽ニュートリノ問題はカミオカンデ検出器や SAGE 検出器でも同様に確認され 30 年以上未解決であったが、以下のような測定からその解決の糸口が見つかった。まず、1998 年スーパーカミオカンデ検出器において大気ニュートリノの天頂角分布が測定され、理論から計算されたフラックスよりも $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ が少ないことがわかった [9]。また 2001 年、SNO コラボレーションが太陽ニュートリノの荷電カレント反応 (ν_e にのみ感度あり) と弾性散乱 (全フレーバーに感度があるが ν_μ, ν_τ への感度が低い) からそれぞれフラックスを計算し、太陽ニュートリノに ν_e 以外のフレーバーが含まれていることを明らかにした [10]。これらの測定から、太陽ニュートリノ問題はニュートリノのフレーバーが ν_e から別のものへと変化することにより起こっていると結論付けられ、ニュートリノ振動が確認された。これ以降はニュートリノ振動を記述する各パラメータの精密な測定を行う段階へと移行した。

本節ではニュートリノ振動の各パラメータ $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}, \delta_{CP}, \Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$ のこれまでの測定結果について述べる [11]。

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

大気ニュートリノの ν_μ 消失事象により制限され、そのために θ_{23} は”atmospheric mixing angle”, $|\Delta m_{32}^2|$ は”atmospheric mass splitting”ともよばれる。しかしながら、近年はこれらのパラメータに対し、T2K 実験や NOvA 実験といった加速器を用いた長基線ニュートリノ実験が大気ニュートリノ実験よりも強い制限をかけている (図 1.1)。

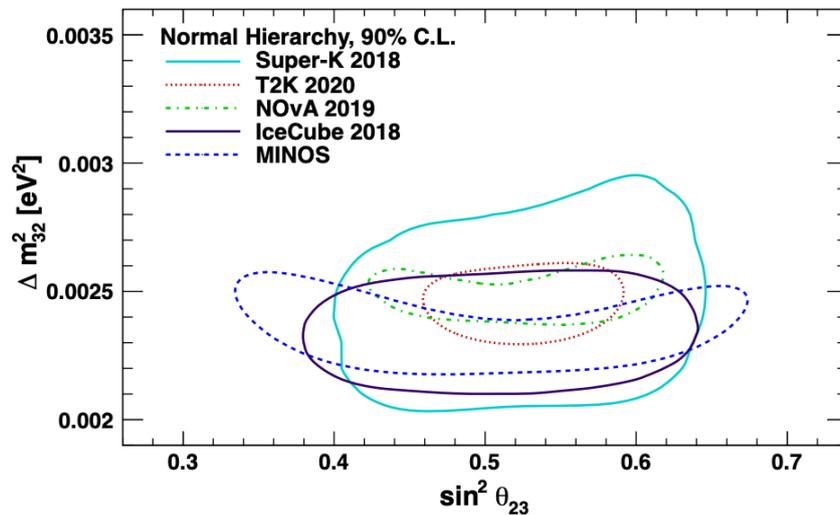


図 1.1: 大気ニュートリノ振動パラメータの制限 [11]。

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

太陽ニュートリノの ν_e 消失事象や長基線原子炉ニュートリノ実験である KamLAND 実験の $\bar{\nu}_e$ 消失事象により制限されており、 θ_{12} は”solar mixing angle”, Δm_{21}^2 は”solar mass splitting”とも

よばれる。図 1.2 に太陽ニュートリノ実験および KamLAND 実験による太陽ニュートリノ振動パラメータの制限について示す。

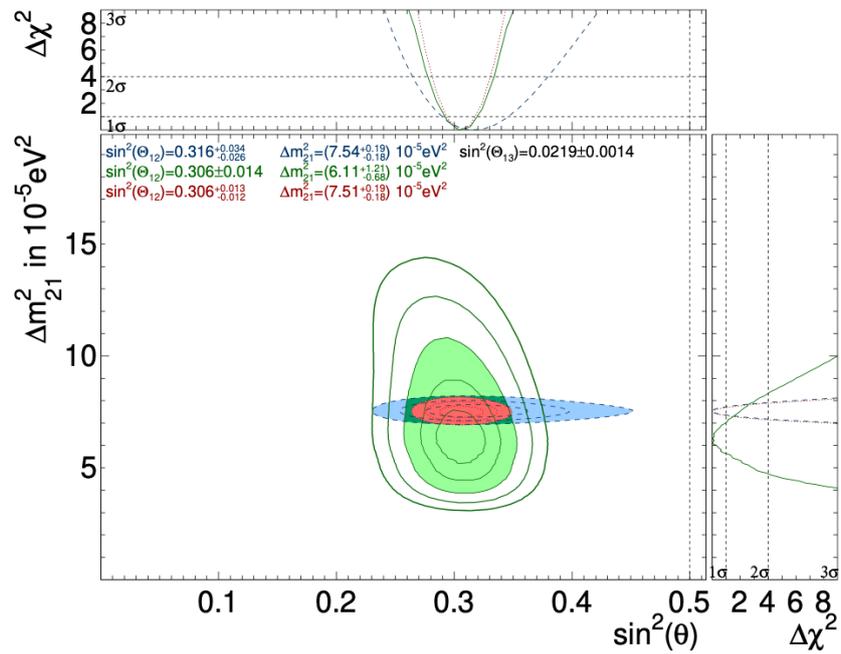


図 1.2: 太陽ニュートリノ振動パラメータの制限。横軸の θ は θ_{12} である。緑が太陽ニュートリノ実験による制限、青が KamLAND 実験による制限、赤がそれらをあわせた制限である。[11]

・ θ_{13}

短基線原子炉ニュートリノ実験の $\bar{\nu}_e$ 消失事象から測定される。 θ_{13} は非常に小さい値であり、2012 年に Double Chooz, RENO, Daya Bay によって 0 でないことが初めて判明した。

・ δ_{CP}

加速器ニュートリノ実験において $\nu_\mu \rightarrow \nu_e, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ の振動確率を測定することで求められる。T2K 実験により 95% の信頼度で $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ であることがわかっているが、いまだ決定には至っていない。

これらのパラメータの現在までの測定結果を表 1.1 に示す。

表 1.1: ニュートリノ振動のパラメータ。表中の値は best-fit $\pm 1\sigma$ (3σ range) である。また、 Δm_{3l}^2 は $l=1$ (順階層)、 $l=2$ (逆階層) である。[12]

パラメータ	順階層	逆階層
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$ (0.269 - 0.343)	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$ (0.269 - 0.343)
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.450^{+0.019}_{-0.016}$ (0.408 - 0.603)	$0.570^{+0.016}_{-0.022}$ (0.410 - 0.613)
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02246^{+0.00062}_{-0.00062}$ (0.002060 - 0.02435)	$0.02241^{+0.00074}_{-0.00062}$ (0.002055 - 0.02457)
δ_{CP} (rad)	$1.28^{+0.20}_{-0.14}$ (0.80 - 1.94)	$1.54^{+0.12}_{-0.17}$ (1.08 - 1.91)
Δm_{21}^2 ($\times 10^{-5} \text{eV}^2$)	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$ (6.82 - 8.04)	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$ (6.82 - 8.04)
Δm_{3l}^2 ($\times 10^{-3} \text{eV}^2$)	$+2.510^{+0.027}_{-0.027}$ (+2.430 - +2.593)	$-2.490^{+0.026}_{-0.028}$ (-2.574 - -2.410)

1.4 ニュートリノの未解決問題

ニュートリノ振動とそこから帰結されるニュートリノ質量の発見以降、大気ニュートリノ、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と、様々なニュートリノ発生源を用いたニュートリノ振動実験が行われてきた。しかし、2012 年によく 0 でないことが確認された θ_{13} の測定も進み、多くのニュートリノ振動パラメータが高精度で測定されるようになった 2023 年現在においても、ニュートリノに関する未解決問題は少なくない。

ニュートリノの CP 対称性

現在の宇宙における物質・反物質非対称性を説明するためには CP 対称性の破れが必要となる。クォークの CP 対称性の破れはすでに発見されているが、宇宙における物質・反物質非対称性を説明するには CP 対称性の破れが弱く、ニュートリノにおける CP 対称性の破れがその鍵を握っていると考えられる。2020 年に T2K 実験により 95% の信頼度で $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ であることが確認されたものの [13]、CP 対称性の破れを宣言するには不十分であり、さらに精密な測定が求められている。

θ_{23} 最大混合問題

表 1.1 に示すように θ_{23} は最大混合角 $\pi/4$ 付近に真値をもつため、 $\theta_{23} = \pi/4$ であるか $\neq \pi/4$ であるかはニュートリノの理論モデルを検証するうえで重要な情報である。たとえば、[14, 15] のように ν_μ, ν_τ に対称性を要求すると $\theta_{23} = \pi/4$ が帰結されるので、測定により $\theta_{23} \neq \pi/4$ が確認できれば上記モデルは除外できる。

質量階層性

Δm_{21}^2 は物質効果を考慮することで符号まで含めて測定されているが、 Δm_{32}^2 の測定は真空中のニュートリノ振動実験の結果が支配的であり、真空中での振動確率 (1.1) には 2 乗の形でしか現れないため Δm_{32}^2 の符号は未知である。 $\Delta m_{32}^2 > 0$ の場合を順階層 (NO: Normal Ordering)、 $\Delta m_{32}^2 < 0$ の場合を逆階層 (IO: Inverted Ordering) という (図 1.3)。NO であるか IO であるかはニュートリノ振動のパターンの決定という意味でも重要であるが、ニュートリノを記述する理論モデルを大きく制限することができる点で意味を持つ。

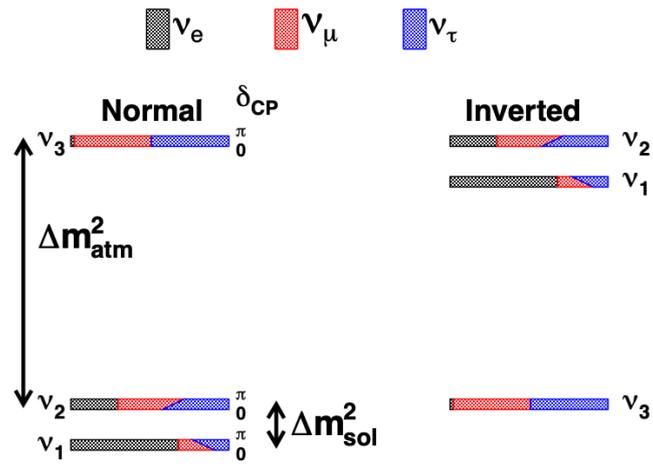


図 1.3: ニュートリノの質量階層性。[16]

第2章 J-PARCニュートリノビーム実験

2.1 T2K 実験

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は、茨城県那珂郡東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の加速器から射出したニュートリノビーム ($\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$) を、ニュートリノ生成点から 280 m 下流の前置検出器、および 295 km 下流の岐阜県飛騨市神岡町にある後置検出器スーパーカミオカンデ (SK) で検出する、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 $\theta_{23}, |\Delta m_{32}^2|$ の精密測定と、 ν_e 出現事象を用いた δ_{CP} の測定を主目的としている。



図 2.1: T2K 実験の概念図。[17]

2.2 ニュートリノビーム

2.2.1 加速器による陽子生成

ニュートリノを生成する前段階として陽子を生成する。この陽子の生成・加速には J-PARC の 3 台の加速器 LINAC (Linear Accelerator)、RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring) が用いられる。まず、負水素イオン H^- が LINAC において作られ、400 MeV まで加速される。加速された H^- は RCS の入射部で電子を 2 つはぎとられて陽子へと変換され、RCS 中で 3 GeV まで加速される。RCS 中の陽子は 2 バンチ構造を持っており、そのうち 5% が MR へと入射される (残りは物質・生命科学実験施設へと入射される)。その後、MR へと入射された陽子は 30 GeV まで加速され、SK 方向に置かれた炭素標的へと 2.48 s 間隔で入射される。この一度の入射 (スピル) は 4.1 μs の時間幅を持ち、そのなかに 8 つのバンチ構造がある (図 2.3)。

生成される陽子のパラメータの現在値は表 2.1 の通り。同表には 2028 年までの達成を目指しているパラメータの値も同時に掲載する。



図 2.2: J-PARC の加速器群 [18]

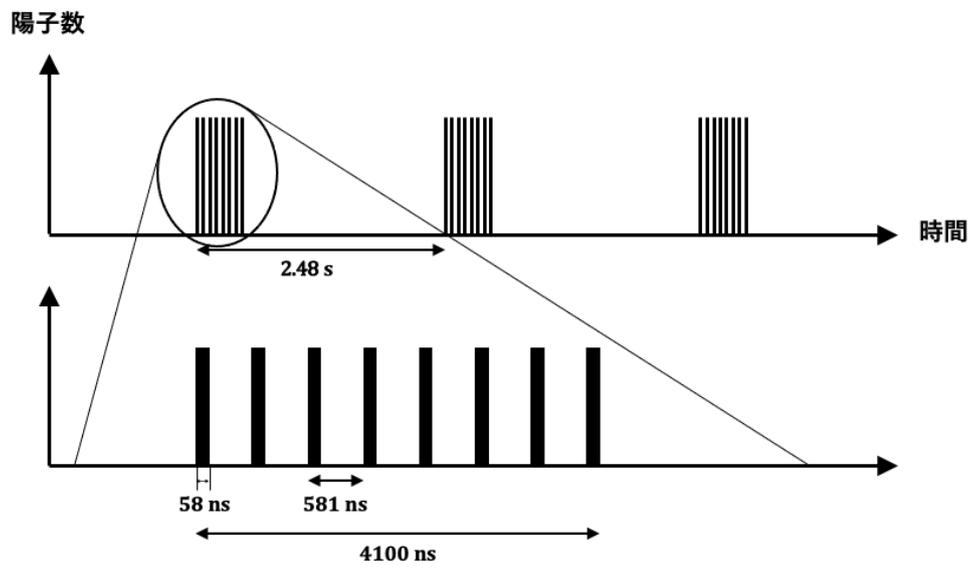


図 2.3: MR から射出される陽子のバンチ構造

表 2.1: 陽子ビームのパラメータ

パラメータ	現在値	2028 年目標
ビーム強度	515 kW	1.3 MW
ビームエネルギー	30 GeV	
陽子数	2.1×10^{14}	3.3×10^{14}
スプリル間隔	2.48 s	1.16 s
バンチ数	8	
バンチ幅	58 ns	

2.2.2 ニュートリノビームの生成

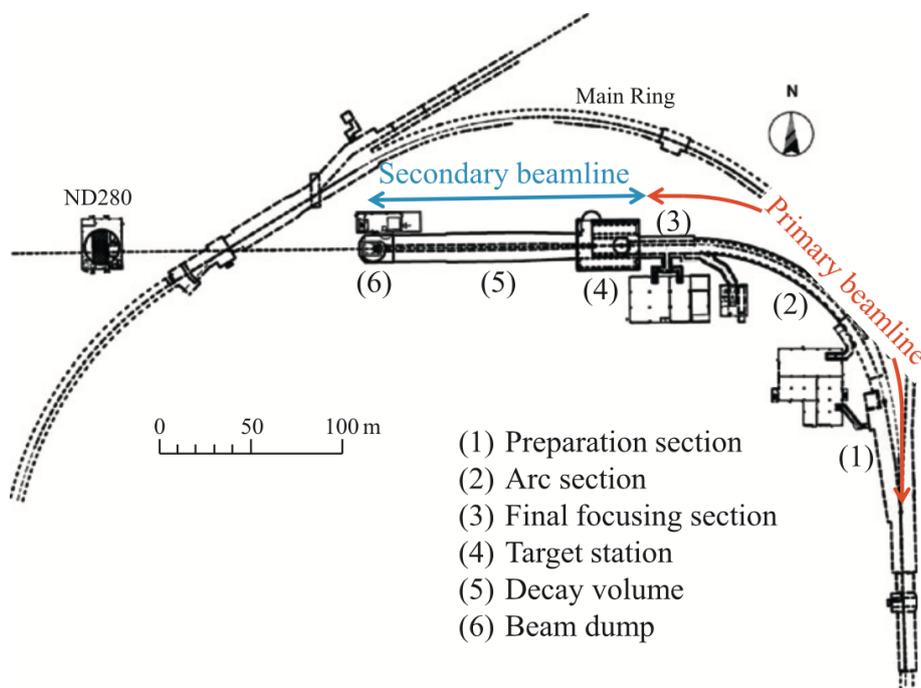


図 2.4: J-PARC ニュートリノビームライン [19]

MR を回転する陽子ビームは、図 2.4 右下にあるキッカー電磁石により周回軌道から取り出され、一次ビームラインへと送られる。一次ビームラインでは偏極電磁石により陽子ビームがSK方向へ曲げられ、同時に陽子ビームのパラメータやビームロスがモニターにより確認される。

その後、陽子がターゲットステーション棟にある炭素標的に衝突することでハドロン反応が起こり、大量の π 粒子が生成される。 π 粒子は標的直後にある3台の電磁ホーンによりSK方向から 2.5° だけずれた方向へと収束され、さらに下流にある96 mのディケイボリュームにおいて

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

の崩壊が起こりニュートリノが生じる。 $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ のいずれを生成するか(SK方向から 2.5° だけずれた方向へと収束させるか)は電磁ホーンの電流の向きにより切り替えることが可能であり、主に ν_μ が生じるような電磁ホーンの運転モードを、電磁ホーンに流れる電流の向きからFHC(Forward

Horn Current)、 $\bar{\nu}_\mu$ が生じるモードを RHC (Reverse Horn Current) という。 π^\pm の崩壊によりニュートリノとともに生成される μ^\pm のうち 5.0 GeV 以下のものはディケイボリウム下流のビームダンプにおいて吸収される。

2.2.3 Off-axis 法

J-PARC からのニュートリノビームは SK に向かって射出されるが、ビーム中心軸は正確に SK の中心を向いてはおらず、意図的に中心から 2.5° だけずらされている。これは SK の位置において ν_μ 消失事象数が最大になる (すなわちニュートリノ振動の効果が最も顕著に現れる) ようなエネルギーにピークを持ち、かつピークまわりのエネルギーのばらつきが小さいような ν_μ ビームを得ることができるからである。また、高エネルギーのニュートリノは中性カレント反応により陽子と π^0 粒子を生成し、 π^0 粒子の崩壊で電子が生じるため ν_e 出現事象のバックグラウンドとなるが、off-axis 法で高エネルギーのニュートリノを減らすことによりこのバックグラウンドの最小化を行うことができる。図 2.5 にビーム中心軸と SK 方向との角度差によるニュートリノのエネルギー分布の違いを示す。

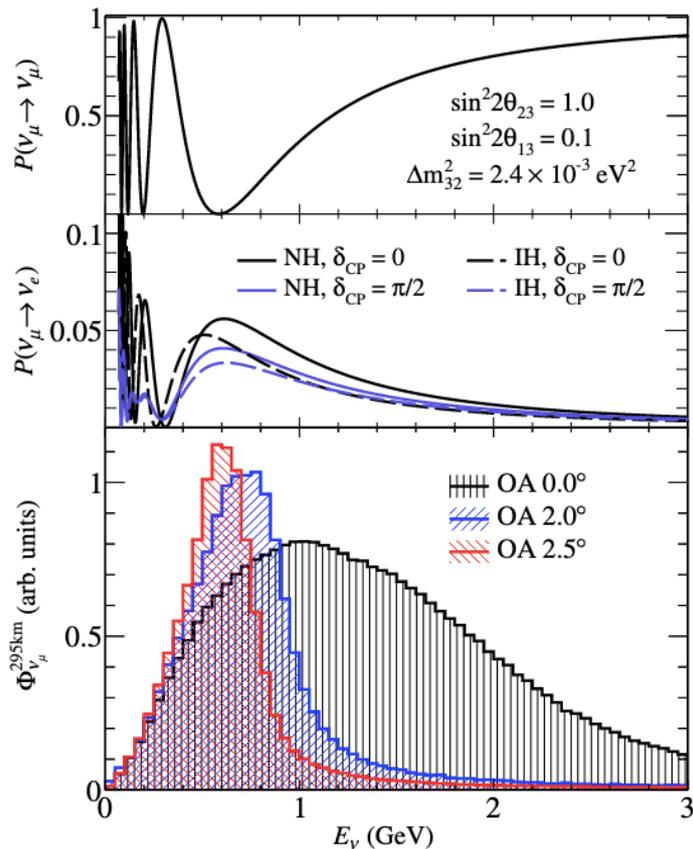


図 2.5: ニュートリノエネルギーと $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 振動確率 (上図)、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率 (中央図)、フラックス (下図)。下図より、off-axis にすることでエネルギー分布がシャープなピークを持つようになることがわかる [20]。

2.3 ニュートリノ反応

次節以降で検出器の詳細を述べる前にどのようなニュートリノ反応が存在するか概観しておく。ここでの分類は [21] を参考にしている。

荷電カレント準弾性散乱 (CCQE)

CCQE はニュートリノ ν_l と核子 N とが W ボソンを交換して荷電レプトン l と核子 N' となる反応

$$\nu_l + N \rightarrow l + N'$$

であり、ダイアグラムは図 2.6 のようになる。反応前後の核子 N, N' は同質量 m_N であり、静止していると仮定すると、ニュートリノ質量が 0 という妥当な近似のもとでニュートリノのエネルギー E_{ν_l} は

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

と求まる。ここで、パラメータは図 2.7 のように設定している。右辺の未知パラメータは荷電レプトンのエネルギー E_l と運動量 p_l 、および散乱角 θ であり、これらを測定することでニュートリノエネルギー E_{ν_l} を決定できる。ニュートリノ振動の確率は式 (1.1) で示すようにニュートリノのエネルギーに依存するため、ニュートリノ振動の解析の際にはエネルギーを正確に測定できる CCQE が信号事象として用いられる。

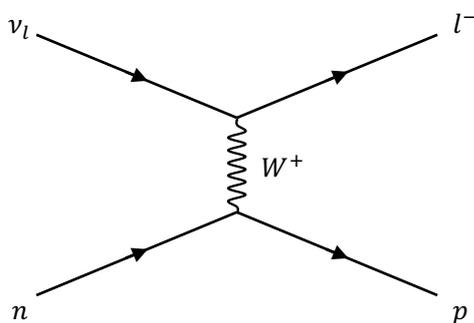


図 2.6: CCQE 反応のダイアグラム

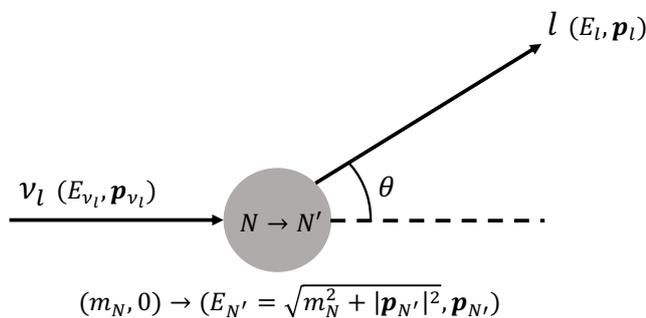


図 2.7: CCQE のパラメータ

2 particle 2 hole 反応 (2p2h)

2p2h は、原子核中に束縛された 2 つの核子とニュートリノが相互作用して、陽子が 2 つ出てくる反応である。生成陽子の飛程が非常に短いため前置検出器での同定が特に難しく、CCQE と誤認しやすい。2p2h を誤って CCQE であるとする、陽子のエネルギー分再構成エネルギーがシフトした位置に余分な CCQE イベントが生じてしまう。2p2h は CCQE の 10% 程度存在していると見積もられており、上記の理由で系統誤差の一因となる。

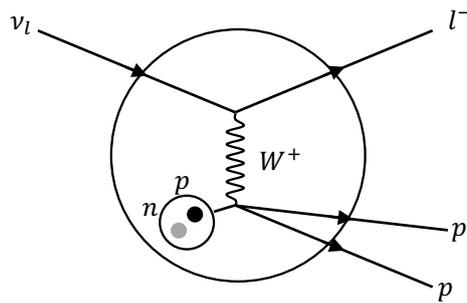


図 2.8: 2p2h 反応

荷電カレント共鳴単一 π 粒子生成 (RES)

ニュートリノがある程度大きなエネルギーを持つ場合には、核子を励起させてバリオン共鳴状態を作り、その崩壊から核子-単一 π 粒子が生成される。核子を N, N' とすると、この反応は以下のように書かれる。

$$\nu_l + N \rightarrow l + N^*, \quad N^* \rightarrow \pi + N'$$

この反応は π 粒子を検出できずに CCQE と誤認される可能性があり、バックグラウンドとなる。

荷電カレントコヒーレント π 粒子生成

ニュートリノが原子核全体とコヒーレントに散乱して π 粒子を生成する反応で、原子核を X とすると

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + X \rightarrow l^-(l^+) + X + \pi^+(\pi^-).$$

RES と同様に、 π 粒子を検出できずに CCQE と誤認される可能性があり、バックグラウンドとなる。

深非弾性散乱 (DIS)

高エネルギー領域ではニュートリノはクォークと直接散乱していると近似でき、これにより複数のハドロンが生成される。

上記のニュートリノ反応の、T2K 実験でのエネルギー領域 (sub-GeV ~ multi-GeV) における断面積を図 2.9 に示す。エネルギーを精度良く再構成できる CCQE が最も支配的であるのが 0.6 GeV 周辺であり、これをもとに T2K 実験での off-axis 角が 2.5° とされている。

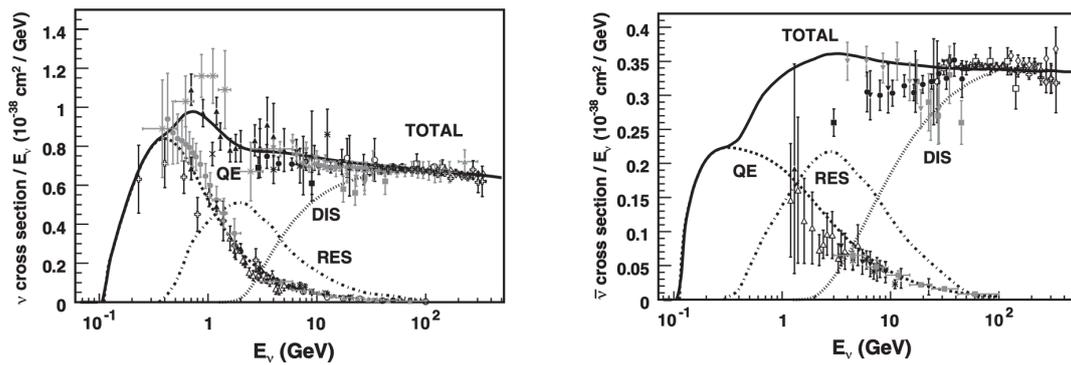


図 2.9: 荷電カレントのニュートリノ反応断面積。左図は 1 核子あたりのニュートリノ反応断面積、右図は反ニュートリノのそれである [21]。

2.4 前置検出器

T2K 実験ではニュートリノビーム生成点の 280 m 下流に、大別して以下の 3 台の前置検出器が置かれている。本節ではこれらの検出器の特性と役割について述べる。

2.4.1 INGRID

前述のとおり、T2K 実験では off-axis 法を採用することで SK 方向に鋭いピークをもつようなエネルギー分布のニュートリノビームを射出している。図 2.5 からわかるように、このエネルギー分布は off-axis 角が数度ずれるだけで大きく変化し系統誤差を生む。この誤差を削減するためには、ニュートリノビームの方向・強度とその安定性を測定する必要があり、INGRID はこのモニターの役割を担っている。

INGRID は箱型のモジュール (1.2 m×1.2 m×0.9 m) を縦 7 個、横 7 個並べた十字型の検出器であり、各モジュールは 6.5 cm 厚の鉄標的 9 枚とトラッキングプレート 11 枚をビーム軸方向に交互に重ねた構造をしている (図 2.10)。ここで、トラッキングプレートとは棒状シンチレータを並べて板状にしたものを 90° ずらして 2 枚重ねたもので、検出器を通過した荷電粒子のビーム軸に垂直な位置を測定できるようになっている。INGRID は十字の中心をビーム軸が通るように設計されており (on-axis)、再構成されたニュートリノ反応点を水平、鉛直方向にプロットすることにより、実際のビーム中心を 0.1 mrad の精度で同定できるようになっている。

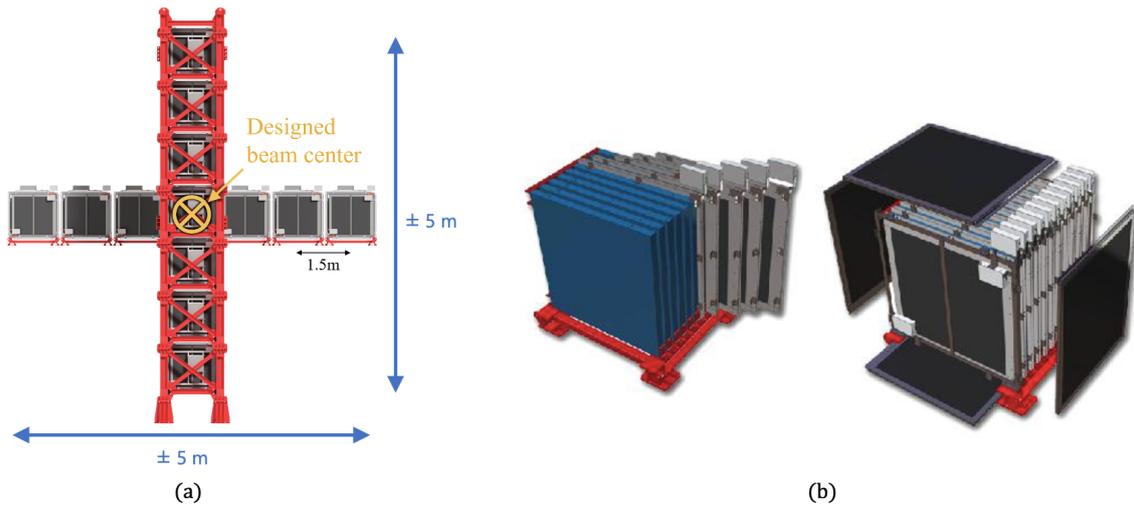


図 2.10: (a) INGRID 検出器の全体図。十字の中心をビーム軸が通るよう配置されている。(b) INGRID 検出器のモジュール [23]。

2.4.2 ND280

ND280 は off-axis 角 2.5° の位置に置かれた前置検出器であり、ニュートリノビームのフラックスやエネルギー分布、ニュートリノビーム中に含まれる ν_e の割合の測定、ニュートリノ反応断面積の測定に用いられる。この検出器の測定から、SK 地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。

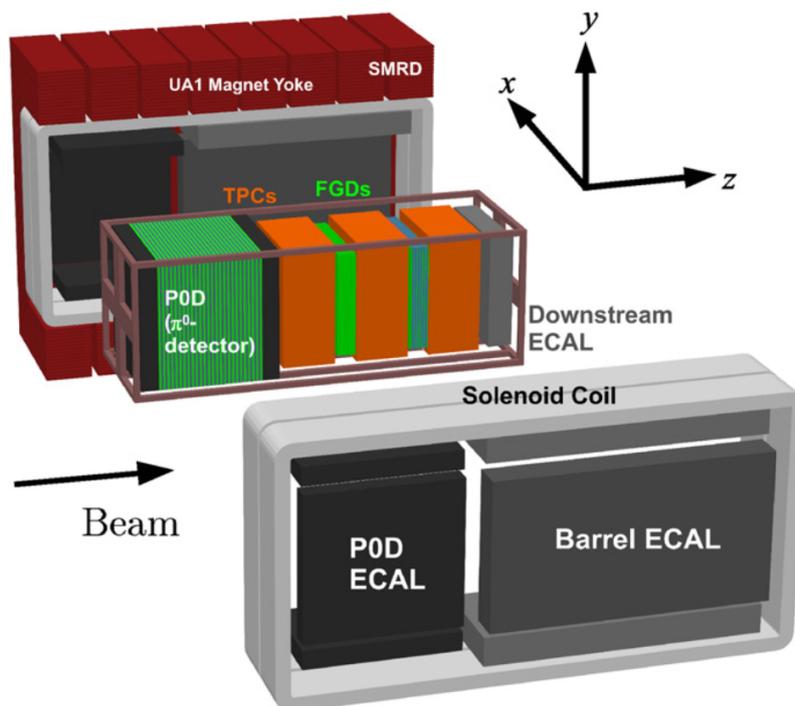
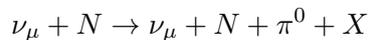


図 2.11: ND280 検出器の構造 [19]。

ND280 は図 2.11 のように複数のサブ検出器を組み合わせた検出器で、各サブ検出器は次の通り。

P0D (Pi 0 Detector)

ν_e 測定時にバックグラウンドとなる中性カレント π^0 生成反応



を、水標的で測定するために導入されたシンチレータトラッカー。シンチレータと水標的のサンドイッチ構造をもつ上流水標的層、中央水標的層、シンチレータと鉛板のサンドイッチ構造をもつ上流 ECal 層、中央 ECal 層からなるが、現在は ND280 アップグレード (2.7.1 節) のために上流 ECal 層以外は取り除かれている。

FGD (Fine Grained Detector)

ニュートリノ反応の標的兼シンチレータトラッカー。断面約 1 cm 四方、長さ約 2 m の棒状シンチレータを図 2.11 の x 方向、 y 方向にそれぞれしきつめて板状にし、 z 方向に向かって交互に重ねた構造をしている。この細分化構造により、FGD 内で反応が起こった後すぐに止まった低エネルギー粒子のトラッキング・識別が可能となる。

TPC (Time Projection Chamber)

飛跡を 3 次元的に再構成可能なガス検出器。FGD から抜け出した長い飛跡をもつ粒子（主にミューオン）の精密なトラッキングを行う。TPC を通過する荷電粒子は磁場の影響下にあるため曲げられ、その曲率から運動量の測定も行う。また、エネルギー損失を用いた粒子識別も可能である。

ECal (Electromagnetic Calorimeter)

P0D、FGD、TPC を覆うような形で配置されており、電子や γ 線により生じる電磁シャワーのエネルギーを測定する。

電磁石 & SMRD (Side Muon Range Detector)

上記サブ検出器をすべて覆うような形でソレノイドコイルと C 型リターンヨークが設置されており、ND280 に 0.2 T の磁場を印加する。リターンヨークは鉄板 16 層を 17 mm の隙間をあけて重ねたもので、この隙間には内側から 3 層または 6 層だけシンチレータが挿入されており、SMRD とよばれる。SMRD の役割は、ビーム軸と大きな角度をなすミューオンの検出、宇宙線ミューオンの同定・トリガーの発行、ビームと ND280 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である。

2.4.3 WAGASCI-BabyMIND

WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator detector) および BabyMIND は off-axis 角 1.5° に位置する前置検出器であり、図 2.12(a) のようなモジュールで構成される。WAGASCI はシンチレータからなる枠に水を満たした 3 次元の格子状構造の検出器である (図 2.12)。ND280 が主に CH 標的で (ビーム軸に対する) 大角度散乱への感度が悪いのに対し、WAGASCI は SK と同様に水標的であり、 4π のアクセプタンスを持つため系統誤差の削減に役立つ。また、off-axis 角が ND280 よりも小さいためピークエネルギーが少し高く、ND280 とは異なるエネルギーのニュートリノイベントを観測できるという利点もある。Proton Module はシンチレータトラッカー、Wall MRD はシンチレータと鉛板のサンドイッチ構造でありミューオンの同定と運動量測定を行う。BabyMIND は 33 枚の磁化された鉄板と 18 枚のシンチレータプレートを WAGASCI 下流に並べた検出器であり、 μ^+ , μ^- の識別を行う。

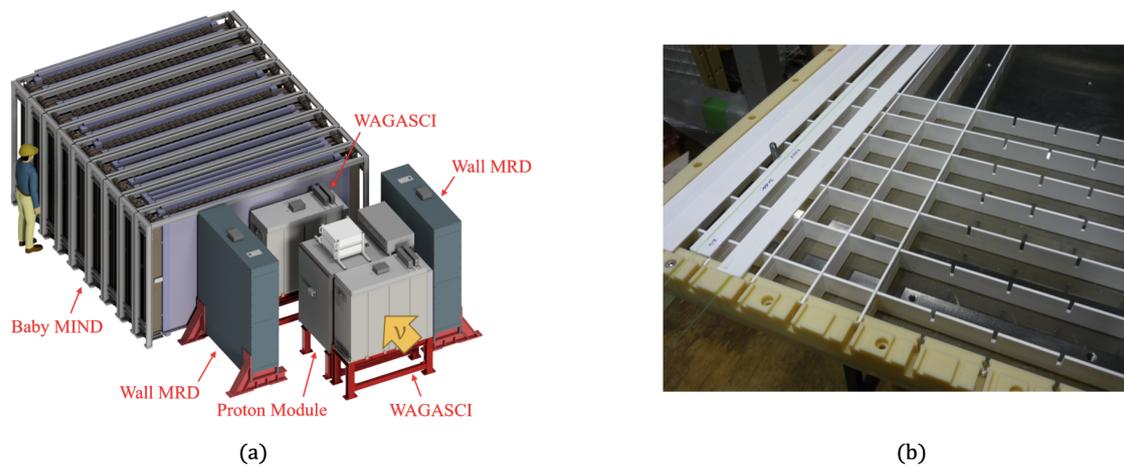


図 2.12: (a) WAGASCI-BabyMIND の全体図 [25]。 (b) WAGASCI の構造 [26]。

2.5 後置検出器

T2K 実験の後置検出器スーパーカミオカンデ (SK: Super-Kamiokande) は、J-PARC から 295 km 下流の岐阜県飛騨市神岡町、池ノ山山頂地下約 1 km に位置する巨大水チェレンコフ検出器である。5 万トンの純水を満たした直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒形水槽であり、内水槽とそれを取り囲む外水槽からなる。内水槽には約 1 万 1000 本、外水槽には約 2000 本の光電子増倍管が取り付けられている。

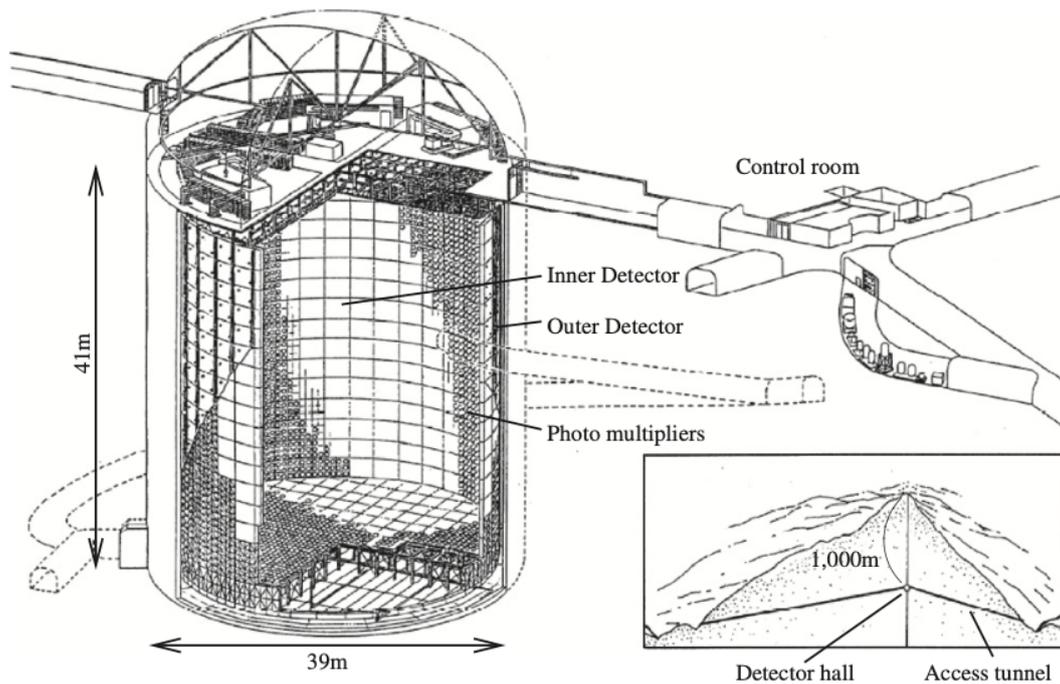


図 2.13: SK 検出器の全体図。[19]

SK の主目的は陽子崩壊の探索および、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観測である。SK 中では ν_μ の荷電カレント反応で生じるミューオンが水中を直進してきれいなチェレンコフリングを作るのに対し、 ν_e の反応で生じる電子は電磁シャワーとなるため、電子の進行方向から少しずれたいくつものチェレンコフ光が重なり、ぼやけたチェレンコフリングとなる。これにより、 ν_μ 消失事象や ν_e 出現事象の数を精度良く計数することができる。

2.6 T2K 実験のこれまでの測定結果

T2K 実験は 2010 年に実験を開始して以来、大きな結果を 2 つ発表している。一つは 2013 年の $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動事象の発見であり、 7.3σ でこの振動を観測している。これが δ_{CP} 測定の足がかりとなり、以後ニュートリノ反応の統計をためることにより、2020 年に 2σ の信頼度で $\delta_{CP} \neq 0, \pi$ であること、すなわちニュートリノの CP 対称性が破れていることを示唆する結果を発表した。

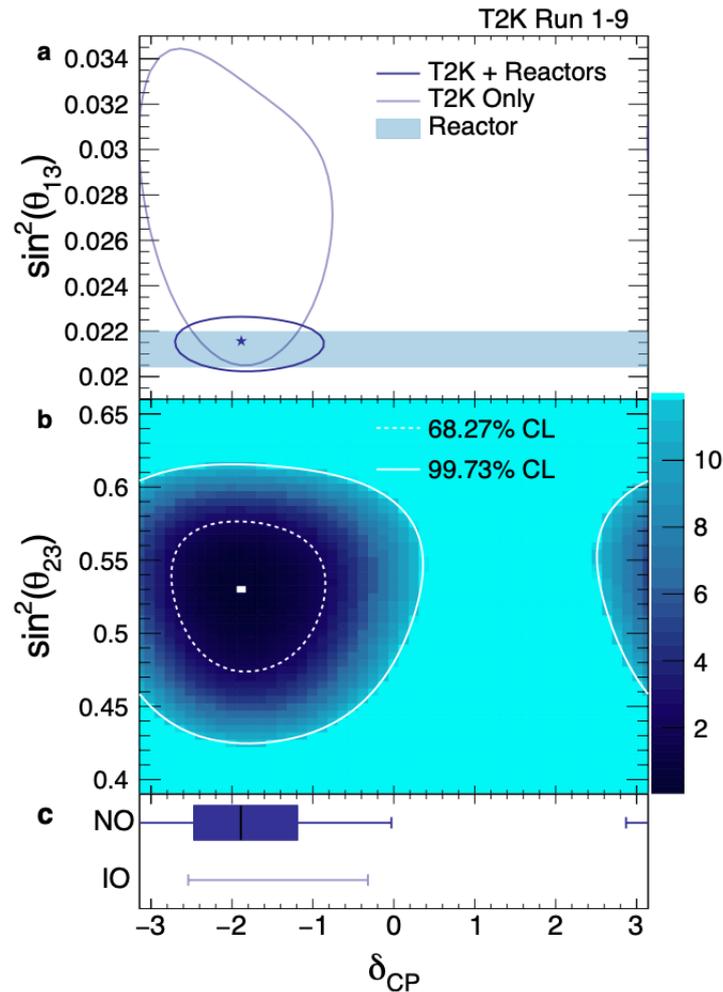


図 2.14: T2K 実験が 2020 年に発表した δ_{CP} の信頼区間 [13]。

2.7 J-PARC ニュートリノビーム実験のアップグレード計画

ニュートリノの CP 対称性が破れているか否か実証するためには統計の増大に加え、系統誤差の削減が必要となる。本節では、現在進行中の J-PARC ニュートリノビーム実験アップグレード計画について述べる。

2.7.1 ニュートリノビーム増強および ND280 アップグレード

T2K 実験では 2023 年から 2026 年までのデータ取得とそれによる CP 対称性の破れの 3σ での観測を目的としており、そのために以下のアップグレードが予定されている。

まず、ビームラインについては 2023 年度までに 1 バンチ中の陽子数を $2.66 \times 10^{14} \rightarrow 2.1 \times 10^{14}$ 、スピン間隔を $2.48 \text{ s} \rightarrow 1.36 \text{ s}$ とすることで、ビーム強度を 515 kW から 750 kW へと増強する。さらに、電磁ホーンの電流を $250 \text{ kA} \rightarrow 320 \text{ kA}$ へと増強することで収束力を上げ、SK におけるニュートリノフラックスを 10% 程度増加させる。

以上は統計を向上させるものだが、系統誤差の削減のために ND280 のアップグレードも行われる。旧来の ND280 は FGD の構造上、短飛程の粒子やビーム軸から大角度に散乱した粒子のト

ラッキングに不利であった。これを解消するため、SuperFGD が導入される。SuperFGD は 3 方向に穴のあいた約 1 cm 角のシンチレータキューブを 3 次的に積層し、その穴に波長変換ファイバーを通して MPPC で読み出す構造をした検出器であり、FGD では測定できなかった 0.3 GeV 程度の低エネルギー陽子やビーム軸に対して大角度に散乱した粒子にも感度がある。

SuperFGD の導入に向け、2022 年 10 月には ND280 の最上流部にある P0D が上流 ECal 層を除いて撤去された。2022 年末から SuperFGD の建設がはじまり、2023 年春には組み立てが完了する予定である。

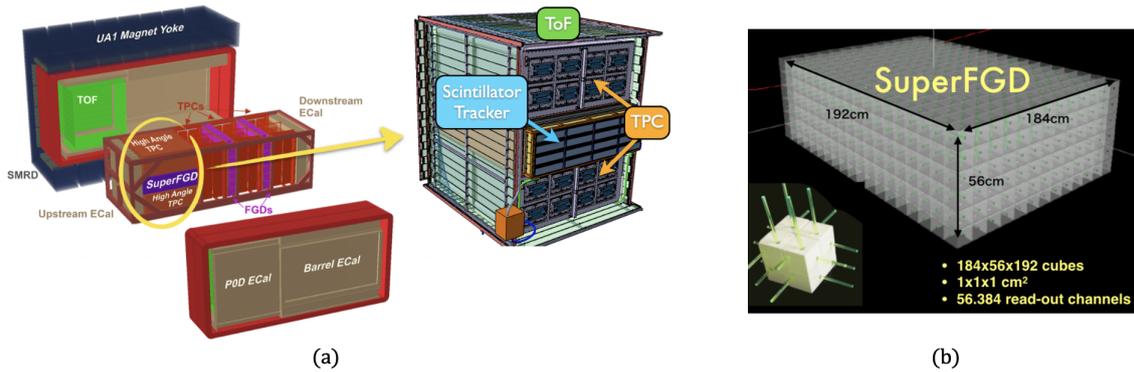


図 2.15: (a) ND280 アップグレード [27]。 (b) SuperFGD の構造図 [28]。

2.7.2 ハイパーカミオカンデ実験

T2K 実験では後置検出器として SK を用いており統計量に限界があるため、2027 年にはハイパーカミオカンデ (HK: Hyper-Kamiokande) が建設され、これを後置検出器として用いる長基線ニュートリノ振動実験として HK 実験が始動する (HK については次章で詳述する)。また、2028 年までに 1300kW (1 バンチ中の陽子数 3.3×10^{14} , スピル間隔 1.16 s) へとビームが増強される予定である。

第3章 ハイパーカミオカンデ実験と前置検出器

本章では、SKの次の世代の検出器であるハイパーカミオカンデ（HK: Hyper-Kamiokande）の概要と、これを後置検出器として用いるHK実験、そしてHK実験の前置検出器において問題となりうる点について述べる。

3.1 ハイパーカミオカンデ実験

前章ではT2K実験でこれまでに 2σ の信頼度でニュートリノのCP対称性の破れが示唆されていることや、2026年までのビームライン・ND280アップグレードでこれを 3σ まで引き上げる目標があることを述べた。しかし、後置検出器がSKであるため統計には限界があり、これはむしろND280アップグレードによる系統誤差の削減やJ-PARCニュートリノビームアップグレードが可能かどうかをテストする段階であるといえる。ニュートリノのCP対称性の破れを実証する段階がこのHK実験である。

3.1.1 ハイパーカミオカンデ（HK）

HKは直径68 m、高さ71 mの大水槽（超大型水チェレンコフ検出器）であり、岐阜県飛騨市神岡町にある二十五山の地下650 mに建設予定である。HKは内水槽に4万本、外水槽に1万5000本のPMTを設置予定で、SKの8.4倍程度の有効体積を持ち、10年でSK100年分のデータ取得が見込める。2022年末までにHK設置地点へのアクセストンネルが開通、水槽を設置する空洞の掘削も進行しており、2027年のデータ取得を予定している。

HK実験の主たる実験目的は以下の3つである。以降、HK実験というときには(1)の、特にJ-PARCからの加速器ニュートリノを用いた長基線ニュートリノ振動実験を指す。

- (1) 大気・太陽・加速器ニュートリノの振動の観測によるニュートリノ振動パラメータの精密測定とそれによるニュートリノのCP対称性の破れの発見
- (2) 陽子崩壊の探索とそれによる大統一理論の制限
- (3) 超新星ニュートリノの観測による超新星爆発の機構解明

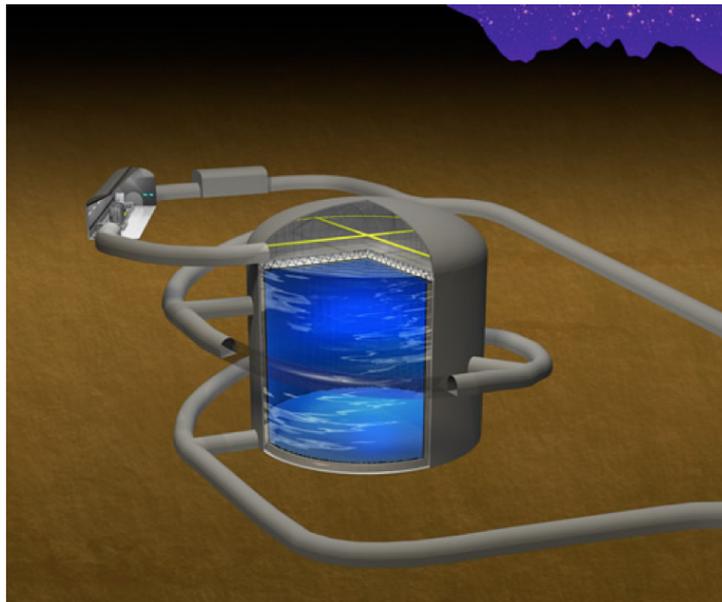


図 3.1: HK の概念図。[29]

3.1.2 IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector)

HK 実験では既存の前置検出器群に加え、ニュートリノ標的の約 1 km 下流に水チェレンコフ検出器 IWCD が設置される。この検出器は 50 m の円筒形の空洞と、直径 8 m、高さ 6 m の円筒形の密閉された水槽からなり、空洞中を水槽を上下させることで off-axis 角 1° - 4° の範囲で位置を変更することができる。

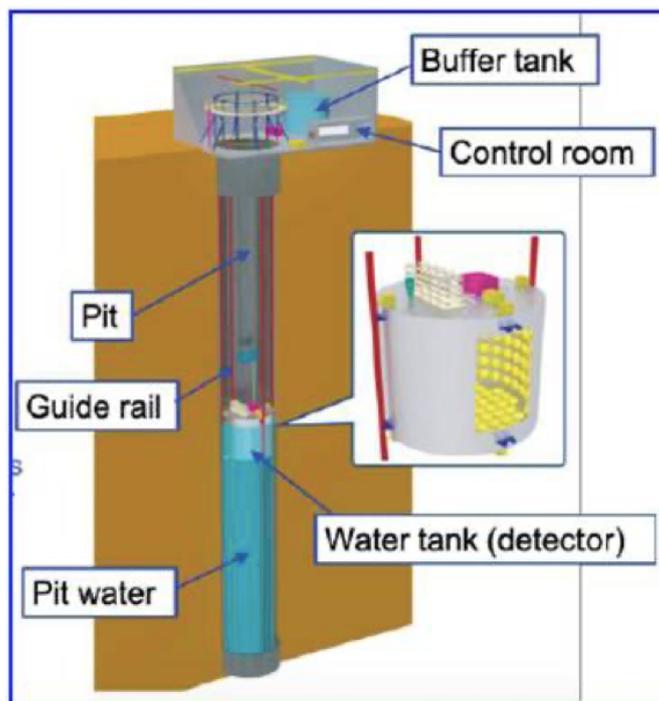


図 3.2: IWCD の構造。水槽を上下させることで off-axis 角を調整できる。[30]

3.1.3 ND280 のさらなるアップグレード

現在進行中の ND280 アップグレード、すなわち Super-FGD 等の導入に加え、水標的を用いることでさらなる系統誤差の削減を目指す案もある。Super-FGD はプラスチックシンチレータのキューブを積層したものであるが、これを水ベースの液体シンチレータへと変更するというものである。

3.2 ハイパーカミオカンデの予想感度

HK 実験において統計誤差は 10 年で数%にまで達する。これに対し、2018 年時点での $\nu_e/\bar{\nu}_e$ の系統誤差 4.9%、ND280 アップグレードと IWCD による系統誤差削減後の予想値 2.9%それぞれの場合について、 δ_{CP} に対する HK 実験の感度を示したものが図 3.3 である。

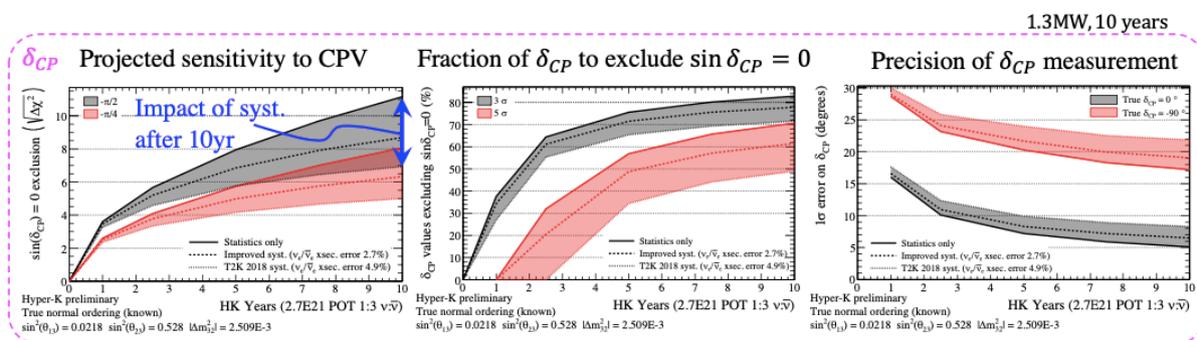


図 3.3: HK 実験の δ_{CP} に対する感度 [31]

各図は HK を 10 年稼働させたときのニュートリノ CP 対称性破れへの感度を示したものであり、実線・破線・点線はそれぞれ統計誤差のみ・系統誤差改善後・2018 年時点での系統誤差を表している。左図から、 $\delta_{CP} = \pi/2$ であれば系統誤差の改善により $> 8\sigma$ でニュートリノの CP 対称性の破れを発見することができる。中央の図は $3\sigma, 5\sigma$ でニュートリノ CP 対称性破れが見つかる δ_{CP} の真値の割合であり、系統誤差改善により 60%以上の確率で CP 対称性の破れを 5σ で発見できる。また、右図は δ_{CP} の真値がそれぞれ $0^\circ, 90^\circ$ の場合の 1σ 誤差であり、それぞれ $7^\circ, 20^\circ$ となっている。

θ_{23} の感度予測もなされており、図 3.4 のようになっている。この図は横軸が $\sin^2 \theta_{23}$ の真値、縦軸がその真値から 0.5 までの信頼区間の信頼度となっている。例えば、 $\sin^2 \theta_{23}$ の真値が 0.46 であれば 0.5 までは 5σ 離れており、 $\sin^2 \theta_{23} < 0.5$ を宣言することができる。

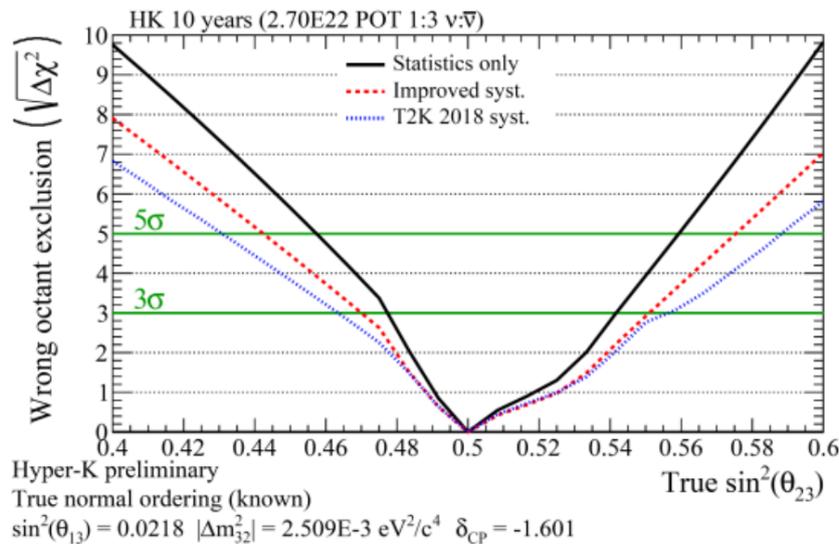


図 3.4: HK 実験の θ_{23} に対する感度（大気ニュートリノデータは含まない） [32]

3.3 ハイパーカミオカンデ実験で予想される問題

ここまで HK 実験の概要と予想感度について述べたが、前置検出器は T2K 実験でこれまで 10 年にわたり使用されてきており、HK 実験ではさらに 10 年の使用が見込まれるためその劣化が問題となる。本節ではシンチレータの劣化とエレクトロニクス故障に分けて論じる。

3.3.1 シンチレータの劣化

シンチレータの劣化機構

T2K 実験の前置検出器では多くの箇所でプラスチックシンチレータが用いられているが、これらは長期使用により劣化し、その光量が減少することがわかっている。このシンチレータ劣化の原因としては以下のようなものが考えられる。

- 熱劣化。
- 酸化劣化。
- 紫外線劣化。
- 放射線劣化。
- 機械的劣化。

このうち、熱劣化は前置検出器が $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の環境下にあるため、紫外線劣化は検出器が遮光されているため、放射線劣化はニュートリノ反応のレベルでは問題とならないため無視できると考えられる。そこで、HK 実験で問題となりうるのは以下の 2 点であるといえる。

- 酸素が存在する環境下で光化学反応を起こすことによりシンチレータが酸化し、黄変することで発光量が減少する。

- シンチレータにかかる力によって内部にひび割れや変形が生じ、シンチレータ内部での光の散乱が非一様となることで光検出器までの光の伝搬が悪くなる。

この他に、シンチレータ内部に水蒸気が入り込んだ後に低温で凝結することによりシンチレータの透明度が下がる減少も報告されているが、高湿度と激しい温度変化が条件となるためシンチレータ劣化の大きな要因ではないと考えられる。

T2K 実験におけるシンチレータの劣化

T2K 実験の前置検出器 ND280 と INGRID で使用されているシンチレータについて、2010-2021 年の期間での光量の減少が報告されている [33]。ここでいう光量とは、検出器中のシンチレータを通過した MIP が落とす光量の分布をランダウ-ガウシアン関数でフィットした際の MPV (Most Probable Value) 光量を示している。解析では、ND280 については T2K Run 1-9、INGRID については T2K Run 1-11 のデータが用いられている。図 3.5 に SMRD、INGRID の光量変化の様子を示す。図は直線でフィットされており、SMRD、INGRID それぞれの 1 年あたりの光量減少率は $0.90 \pm 0.44\%$ 、 $1.78 \pm 0.08\%$ となっている。SMRD の組成は SuperFGD と同じであるから、SuperFGD の経年劣化も似た傾向となることが予想される。INGRID の光量については、はじめの数年で大きく減少しているものの、10 年以降は横ばいのように見える。

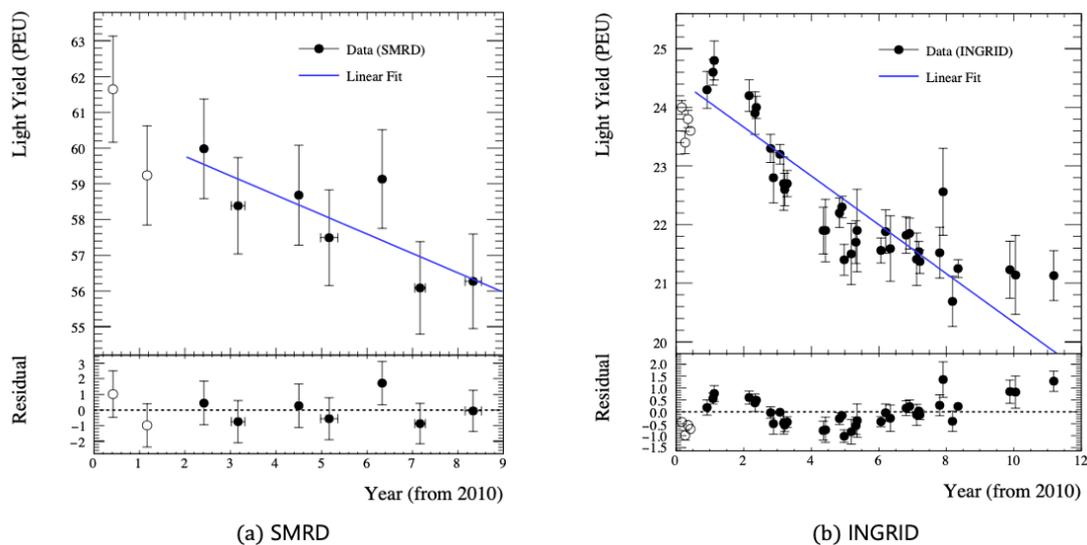


図 3.5: 前置検出器の光量変化を横軸時間としてプロットしたもの。横軸のエラーバーは各データ取得期間中での測定時刻の標準偏差。縦軸は MIP の光量分布をランダウ-ガウシアン関数でフィットした際の MPV 光量とそのふらつき。(a)、(b) はそれぞれ SMRD、INGRID の測定結果。

3.3.2 エレクトロニクスの故障

T2K 実験の前置検出器では表 3.1 のようなフロントエンドエレクトロニクス (多チャンネル MPPC 読み出し用 ASIC) が使用されている。このうち Trip-t ASIC は 1 年に 1-2 個ボードが壊れ、その度に取り替えられてきた。しかし、これは 2007 年に製造されたものであり再生産もできず、製品寿命が 15-20 年となっているため、これ以降は故障も増え取り替えも効かなくなると考えられる。したがって、HK のデータ取得が始まる 2027 年には別の ASIC に取り替える必要がある。

第5章では、この候補として日本国内で開発が進められている ASIC の概要とその性能評価について述べる。第6章では TDC の実装について述べる。

表 3.1: T2K 実験で使用中のエレクトロニクス (SuperFGD 導入後)。ASIC はすべて日本国外製。

前置検出器	サブ検出器	チャンネル数	ASIC
ND280	FGD	8,448	AFTER
	ECal	22,336	Trip-t
	SMRD	4,016	Trip-t
	SuperFGD	58,368	CITIROC
	TOF	240	MUSIC
INGRID	INGRID	10,796	Trip-t
WAGASCI-BabyMIND	WAGASCI	2,560	SPIROC2D
	Proton Module	1,204	Trip-t
	Wall MRD	160	SPIROC2D
	Baby MIND	1,998	CITIROC
Total		110,126	

第4章 シンチレータの加速劣化試験

本章ではHK実験中に前置検出器シンチレータの経年劣化が問題となりうるかどうか、加速劣化試験を行うことにより調べた。はじめに25チャンネルのMPPCと既存のジグを用いて測定を行ったが、ジグの固定があまく再現性に問題があったため再度ジグを設計し直し、再測定した。したがって、加速劣化試験を2回行っている。結論は2回目の結果をもとに述べるが、以下には1回目のセットアップや結果についても省略せずに書く。

4.1 加速劣化試験の目的

T2K実験の前置検出器は2010(2011)年以来稼働し、シンチレータの経年劣化による光量の低下が報告されている。もしこの劣化が今後も止まることなく、シンチレータの光量が減少し続ければニュートリノイベントの検出効率の低下につながる。特にINGRIDでは、測定におけるニュートリノイベントレートの主要な系統誤差となる [34]。したがって、シンチレータの劣化が止まることなく光量が落ち続けるか、ある時点で劣化現象が止まるかを知ることが重要である。

前章で述べたように、T2K実験で用いられるシンチレータの劣化には酸化劣化と機械的劣化が関わっていると考えられる。このうち後者は前置検出器の組み立て後にシンチレータにどれだけの応力がどういった形で加わるかを正確に知ることができないため再現が難しいが、前者は酸素との化学反応であるため高温環境下にシンチレータを置くことで反応を促進し、短期間で10-20年にわたる長期使用時の劣化を再現することが可能となる(加速劣化試験)。本実験ではこの加速劣化試験の測定結果とシミュレーションを比較することで、シンチレータの劣化、特に酸化劣化が今後問題となるかどうかを調べた。

4.2 加速劣化試験の方針

酸化劣化についてのみ着目すれば、それは化学反応であるから、反応速度は速度定数 k による。 k は温度に依存しており、以下のアレニウスの式で記述される。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right). \quad (4.1)$$

ここで、 A は定数、 R は気体定数、 T は反応時の絶対温度、 E_a は活性化エネルギーと呼ばれる反応に必要な最低エネルギーである。ポリスチレンの酸化劣化については $E_a = 91.19$ kJ/mol とされており [35]、T2K実験の前置検出器ホールの温度は 20°C である。そこで、温度 20°C (絶対温度 293.15 K)、絶対温度 T での速度定数をそれぞれ k, k' とおくと、絶対温度 T の環境下にシンチレータを置けば

$$\frac{k'}{k} = \exp\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293.15} - \frac{1}{T}\right)\right]$$

倍の速度で劣化が進む。あまり温度が高すぎると熱劣化が起こりうるので、本実験では $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T = 348.15\text{ K}$) に設定した恒温槽に 10~20 日間シンチレータを置き、10~20 年の酸化劣化を再現することにした (図 4.1)。

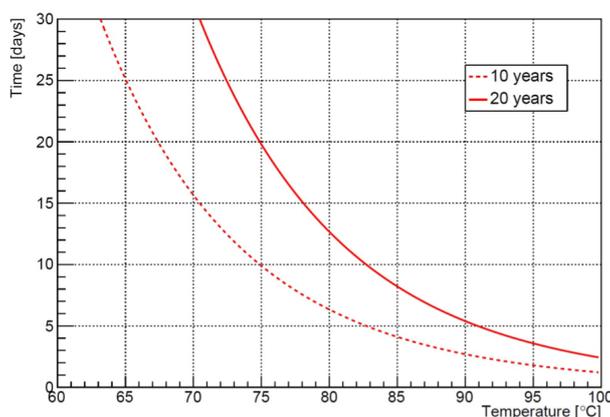


図 4.1: アレニウスの式をもとに、横軸を恒温槽内の温度、縦軸を劣化の再現に必要な日数として、10 年、20 年の劣化に相当する日数をそれぞれ点線、実線でプロットした。

4.3 1回目の加速劣化試験のセットアップ

本節ではまず 1 回目の加速劣化試験のセットアップ構成要素としてシンチレータ、波長変換ファイバー、光検出器 MPPC、シンチレータボックス、NIM EASIROC モジュール (MPPC 読み出し用エレクトロニクス) について述べる。その後、全体の測定セットアップの説明を行う。恒温槽の使用についても本節で述べる。

4.3.1 シンチレータ

今回使用したのは SuperFGD および INGRID で用いられるシンチレータである (図 4.2)。

SuperFGD シンチレータはポリスチレンに 1.5% の pTP と 0.01% の POPOP を添加した¹ 1 cm^3 の立方体状プラスチックシンチレータ (以下、キューブ) であり、3 方向に波長変換ファイバーを通すための穴が開いている。ここで、pTP は発光剤として荷電粒子の通過に際して光を発生させ、POPOP は波長変換剤として発生した光を後段で吸収しやすい波長へと変換する。pTP の発光波長のピークと POPOP の吸収波長のピークはともに 350 nm 程度であるため効率よく波長変換が行われ (図 4.3(a)、図 4.4(a))、 420 nm あたりにピークをもつ光がシンチレータから発生することになる (図 4.4(b))。表面にはケミカルエッチング処理が施されており、キューブ内外の光を反射して光検出器への光の伝達効率をよくするための白色の反射層となっている。今回はこれを $5 \times 5 \times 4$ に積み上げて使用した。

INGRID シンチレータは 1% の PPO と 0.03% の POPOP を添加した² 断面 $1\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 、長さ 120 cm の棒状シンチレータであり、断面中心に穴が開いている。PPO は発光剤の役割を果たす。PPO の発光波長は 375 nm あたりであるから (図 4.3(b))、pTP と同様に POPOP で効率よく波長変換が行われる。表面は 15% の TiO_2 を添加したポリスチレンの反射層で覆われている。今回

¹SMRD のシンチレータも同じ構成である。

²P0D、FGD、ECal のシンチレータも同じ構成である。

は50 cm程度の長さに切断した後、4つ上下方向に積み上げて使用した。また、使用したのは実際に使われている INGRID と同様にすでに製造から10年ほど経過しているものである。

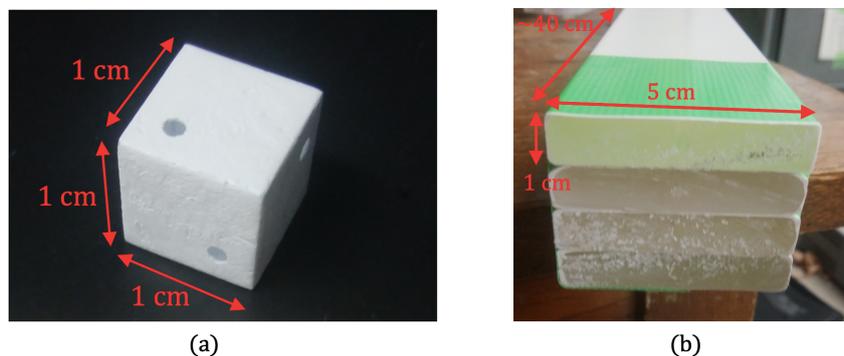


図 4.2: (a) SuperFGD シンチレータキューブ。測定では5×5×4に積み上げて使用した。(b) IN-GRID シンチレータバー。4本を積み上げ、両端を養生テープで固定して使用した。

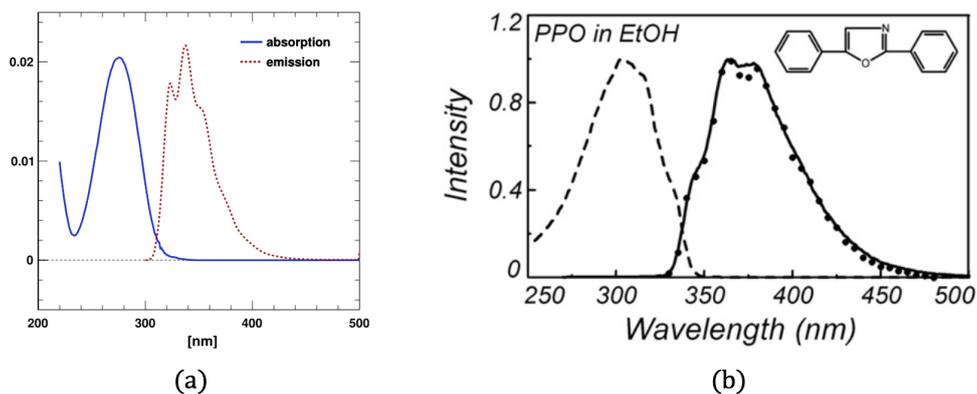


図 4.3: (a) 青は pTP の吸収波長、赤は発光波長。[36](b) 点線は PPO の吸収波長、実線は発光波長 (エタノール中)。[37]

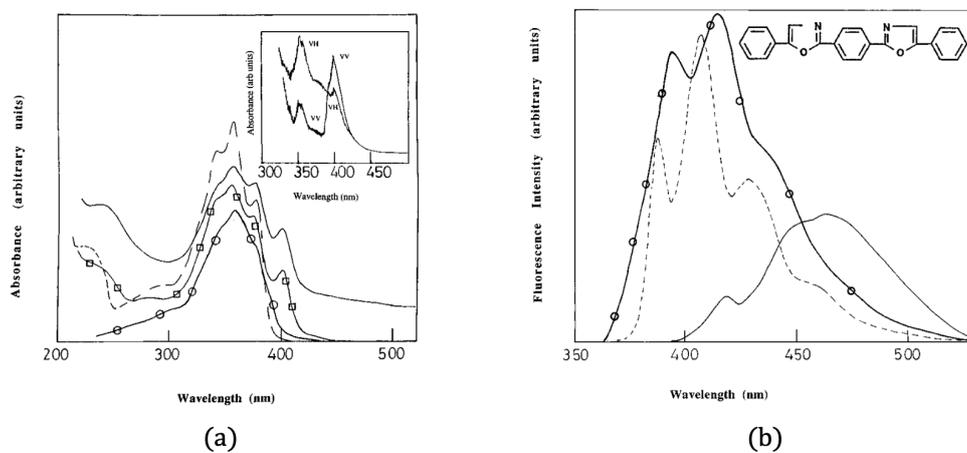


図 4.4: (a) POPOP の吸収波長。(b) POPOP の発光波長。複数の線があるがこれらは様々な媒質中での測定に対応している。[38]

4.3.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーはクラッドと波長変換剤が混ぜ込まれたコアからなるファイバーである。外部から入射した光が波長変換剤の物質を励起してファイバー内部で等方的に光が生じることで、波長変換剤なしであればファイバーを通過してしまう光をファイバー内にトラップし、全反射によりファイバー端へと伝達することが可能となる。また波長変換剤は光のトラップ効率を上げるだけでなく、入射光を光検出器で検出しやすい波長へと変換する役割も果たす。

今回使用したのは SuperFGD や INGRID で用いられているものと同じ、kuraray 製の Y-11(200)M, 1.00mmD., BSJ であり、1 mm の直径をもつ。Y11(200) ファイバーの発光・吸収波長の特徴を図 4.5(a) に示す。吸収波長の感度のピークは 425 nm あたりであるからシンチレーション光 (POPOP のピーク波長 420 nm) を効率よく吸収することができ、475 nm 程度の緑色光へと変換する。

測定に際してはファイバー端を光検出器 MPPC に合わせて固定する必要があるので、図 4.5(b) のように一方の端に光学コネクタと呼ばれる、中心付近に膨らみのあるジグを取り付けた。光学コネクタの先端から飛び出たファイバー端は MPPC に到達する光子数を増やすために、FiberFin 製のダイヤモンド研磨機 [40] を用いて研磨している。光学コネクタの使用についてはシンチレータボックスの項で後述する。

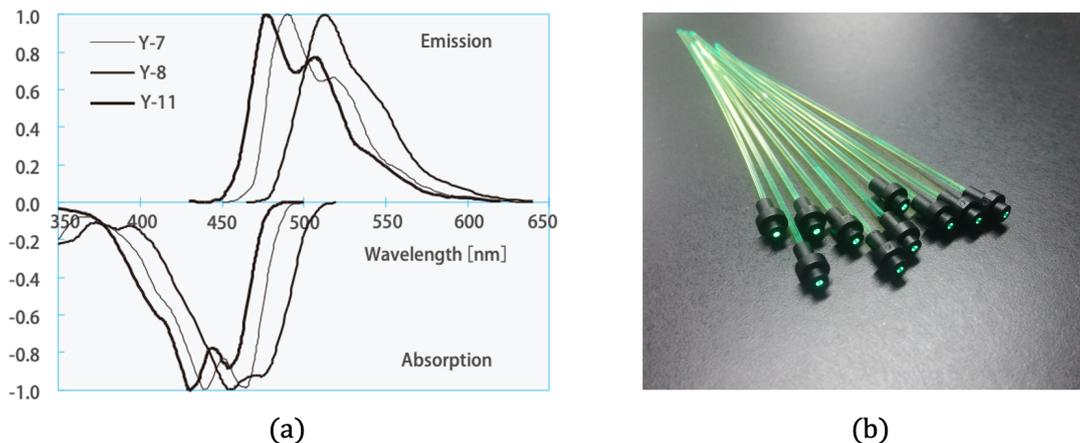


図 4.5: (a) 波長変換ファイバー Y11(200) の発光・吸収波長特性。[39] (b) Y11(200) を蛍光灯の下で撮影した写真。端面から緑色光が出ていることが確認できる。また、一方の端には光学コネクタがついている。

4.3.3 光検出器 MPPC

ファイバー端から出た光の検出には浜松ホトニクス製の SiPM (Silicon Photomultiplier) である MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を用いる。MPPC は多数の APD (Avalanche Photo Diode) を並列に接続した構造をしている (図 4.6(a))。

APD は逆電圧を加えることにより、APD 内部の PN 接合間の空乏層に入射した光子によって生じた電子・正孔対を加速させ、電子を N^+ 側に、正孔を P^+ へとドリフトさせる。APD に印加する逆電圧がある値を超えると、キャリアが大きなエネルギーを持って結晶格子に衝突することで新たな電子・正孔対が作られ、電極に多数のキャリアが到達する現象 (雪崩増幅) が起こる。図 4.6(b) では電子が増幅されやすいように P 型の雪崩増幅層が形成されているが、これはシリコン中では正孔より電子のほうが増倍率が高く、電子の増幅が支配的だからである。逆電圧をさらに

上げると、ある電圧でこの増倍率が ∞ となり入射光子数に関わらず APD から一定の出力が得られるようになる（ガイガー放電）。この閾値となる電圧を降伏電圧といい、APD に降伏電圧を超えて逆電圧を印加した状態をガイガーモードという。

MPPC では APD をガイガーモードで動作させることで、 1p.e.^3 という小さい信号を検出する。ガイガーモードでの APD（MPPC の 1 ピクセル）の出力電荷 Q_{APD} は、静電容量 C 、印加電圧 V_{op} 、降伏電圧 V_{BD} として

$$Q_{\text{APD}} = C(V_{\text{op}} - V_{\text{BD}})$$

で与えられるから、MPPC 中で雪崩増幅を起こしたピクセルの数を N とすると、MPPC の出力電荷 Q_{MPPC} は NQ_{APD} であり、出力から入射光子数を測定できる。しかし、APD にかかる電圧が一定である場合にガイガー放電が起こると、電圧が下がるまで放電が続き、次に入射した光子を検出することができなくなる。そこで、ガイガー放電が起こった後すぐに APD にかかる電圧を下げて雪崩増幅を止めるために、MPPC では 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。

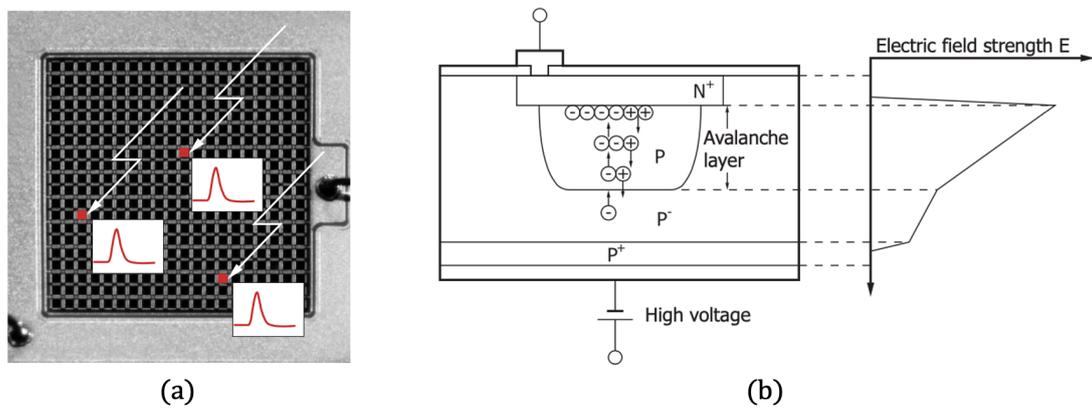


図 4.6: (a) MPPC における光子の検出イメージ [41]。黒い格子状の部分のひとつひとつが APD である。(b) APD の内部構造と逆電圧を印加した際の典型的な電場の様子 [42]。

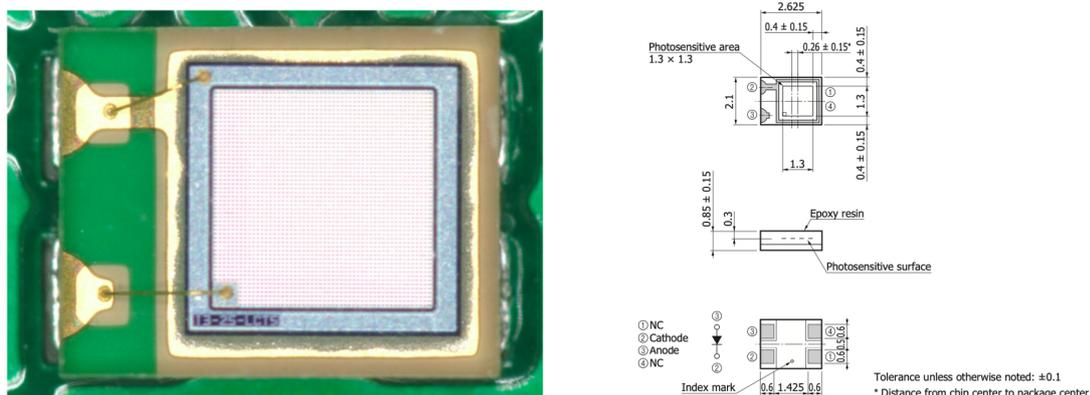


図 4.7: S13360-1325PE の有感部の拡大写真（左） [43] と寸法（右） [44]。

³p.e. は photo equivalent の略で、1 光子に対応する信号強度を表す。

表 4.1: S13360-1325PE の特性。25 °C、表中の増倍率が得られる動作電圧での値。

有効受光面サイズ	1.3×1.3 mm ²
ピクセルピッチ	25 μm
ピクセル数	2668
パッケージタイプ	表面実装型
開口率	47%
検出効率	25%
ダークカウント	70 kcps
端子間容量	60 pF
増倍率	7.0×10 ⁵
クロストーク確率	1%
推奨動作電圧	降伏電圧 +5

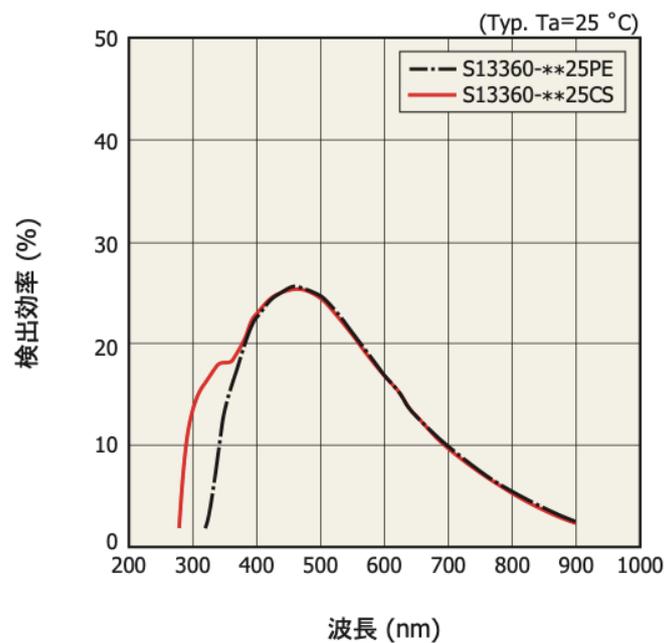


図 4.8: S13360-1325PE の波長特性 [44]。450 nm に最大の感度を持つ。

今回の測定で用いた MPPC の型番は SuperFGD で使用されるものと同じ S13660-1325PE であり、その写真と寸法を図 4.7 に、主な特性を表 4.1 に、波長特性を図 4.8 に示す。最大感度波長は波長変換ファイバーのピーク波長 476 nm に近い 450 nm となっている。今回は複数の測定を一度に行うために、図 4.9 のように寸法 60 mm×60 mm×1.6 mm で 5×5 の 25 チャンネル構成の PCB に表面実装された MPPC を用いた（以下、MPPC-PCB）。MPPC の表面実装の間隔は 1 cm ピッチである。

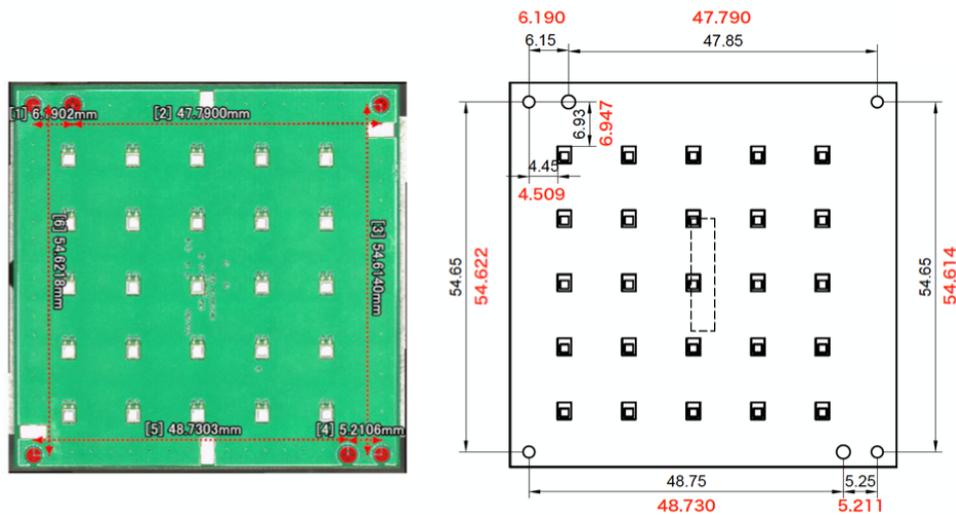


図 4.9: MPPC-PCB の設計図。黒字は設計値、赤字は測定値。[45]

4.3.4 シンチレータボックス

MPPC-PCB を用いて SuperFGD キューブからの光を読むためには、SuperFGD キューブと波長変換ファイバーを固定すること、そして MPPC-PCB を波長変換ファイバーの端面に接するように固定することが必要となる。このために、波長変換ファイバーの端には光学コネクタが取り付けられ、SuperFGD キューブ・波長変換ファイバー・MPPC-PCB を固定するためのシンチレータボックスが作られた。SuperFGD キューブはボックスに $5 \times 5 \times 4$ で積み上げ、ボックスとの隙間に発泡スチロールの板を挿入することでその圧力により固定する。ボックス前面には SuperFGD キューブの穴の位置に合うように 1 cm ピッチの穴が 5×5 個開いており、ここに波長変換ファイバーを通す (3 方向に穴が開いているが、本測定では 1 方向から読み出す)。波長変換ファイバーには中心部分に膨らみのある光学コネクタを接着しており、図 4.10(b) のように 5×5 の穴に膨らみが引っかかる。この上から MPPC-PCB をねじで固定することにより、MPPC を波長変換ファイバーの端面に押し付け、波長変換ファイバーを固定することができる。INGRID シンチレータについても、シンチレータボックスの穴にあうように配置して測定を行う。

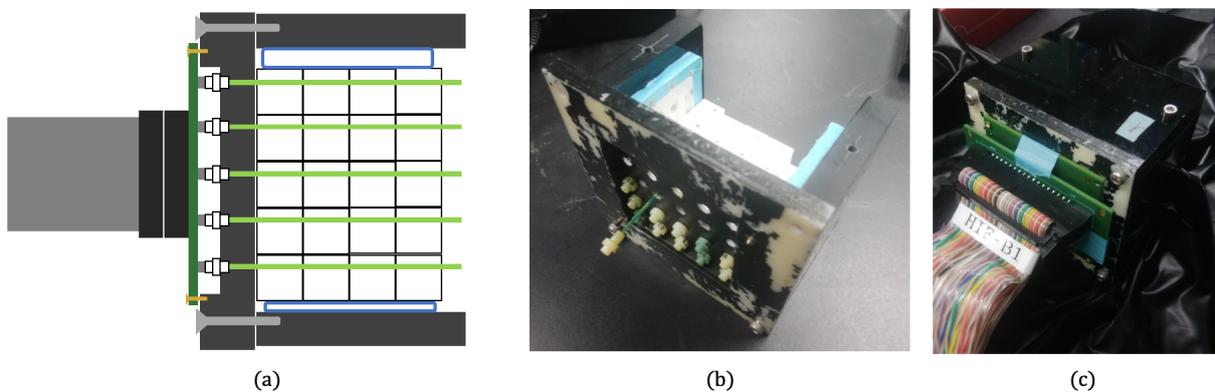


図 4.10: (a) シンチレータボックスと SuperFGD キューブ・波長変換ファイバー・MPPC-PCB の固定の断面図 (横)。 (b) SuperFGD キューブを並べ、波長変換ファイバーを挿している写真。 (c) MPPC-PCB 固定後の写真。この後、ブラックシートで遮光する。

4.3.5 NIM EASIROC モジュール

多チャンネルの MPPC 信号を読み出すためのエレクトロニクスとしては NIM EASIROC モジュールを用いた。NIM EASIROC モジュールの外観と EASIROC チップの内部構成の概要を図 4.11 に示す。NIM EASIROC モジュールは Omega 製の EASIROC チップ 2 枚を搭載しており、1 台で 64 チャンネルの MPPC 信号を同時に読み出すことができる。また、各チャンネルの入力線には別々に 0~5 V、8 bit の電圧をかけることができ、チャンネルごとに MPPC への印加電圧を調整することができる。

EASIROC チップに入力された信号はまず 1.5 pF、15 pF のコンデンサにより low gain 側と high gain 側に 1:10 の比で電荷が分けられる。今回の測定では high gain の信号しか用いていないので、以下では high gain 側の信号についてのみ述べる。high gain のプリアンプを通過した信号は slow shaper と fast shaper という 2 つの波形整形器に分けられる。slow shaper に入った信号は電荷測定用として立ち上がり時間 25~175 ns (可変) の波形に整形される。一方、fast shaper に入った信号は時間測定・トリガー用として立ち上がり時間 15 ns 程度で整形され、10 bit DAC で設定した値を閾値を持つディスクリミネータを通過してデジタル信号となる。

一般に電荷測定を行うエレクトロニクスには、信号を積分して電荷を得る電荷積分型と、信号の波高から電荷を得る波高測定型があるが、EASIROC チップは後者にあたる。EASIROC チップでは波高を自動で検出できないので、外部から波高が最大となるタイミングを入力する必要がある。この外部入力を HOLD 信号といい、HOLD 信号が L のとき図 4.11 の slow shaper 後段にあるスイッチが断線され、スイッチ後段のバッファで HOLD 信号が H から L へ遷移した瞬間の電圧が保持される。この電圧が 12 bit ADC で記録される。ただし、データを取得するためには ACCEPT 信号が事前に入力されている必要がある。

NIM EASIROC モジュールの FPGA に書き込むファームウェアには multi-hit TDC という、各チャンネルでの信号の立ち上がり時間と立ち下がり時間を 1 ns の時間分解能で測定する機能も実装されている。これはディスクリミネータの信号から外部入力の T STOP 信号までの時間計測により行われる。今回の測定では時間情報を取得していないが、ファームウェアの都合上、HOLD 信号、T STOP 信号、ACCEPT 信号の順で NIM EASIROC モジュールに入力する必要があるため使用した。また、HOLD 信号と ACCEPT 信号との時間差は 2 μ s 以上でなければならないので、余裕を持たせて 4 μ s とした。

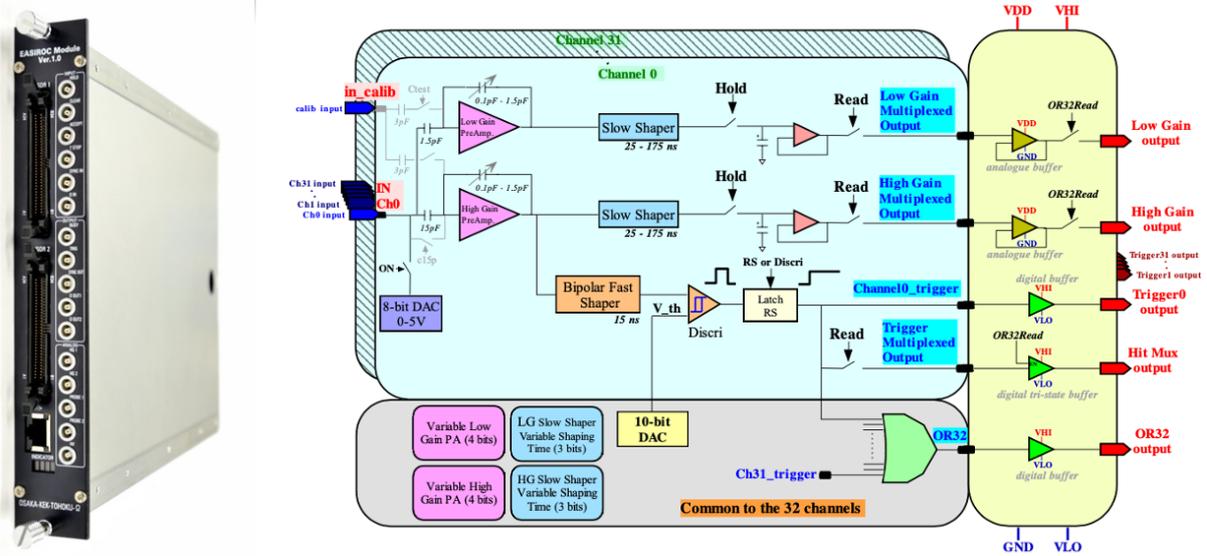


図 4.11: NIM EASIROC モジュールの外観 (左) [46] と EASIROC チップの回路の概要 (右) [47]

4.3.6 全体セットアップ

全体のセットアップを図 4.12 に示す。シンチレータから出た光は波長変換ファイバーを通して 25 チャンネル MPPC で検出され、フラットケーブルを通じて NIM EASIROC モジュールへと送られる。NIM EASIROC モジュールに信号が入ると TRIG 信号が発行されるので、NIM ゲートジェネレータにこれを入力し、適当な時間遅延させて 100 ns のゲート信号を作り、HOLD 信号としてこれを NIM EASIROC モジュールに入力する。ここでいう「適当な時間」は、EASIROC チップ中での電圧保持の開始がちょうど MPPC 信号の波高が最大となるタイミングに一致するように、オシロスコープを目で確認しながら設定した。HOLD 信号の幅 100 ns は次のイベントに重ならないように MPPC 信号のおおよその時間スケールから設定した (ただし、ACCEPT 信号入力まではデータを取らないので本質的ではない)。また、HOLD 信号と全く同じ信号を 2 チャンネルの NIM ゲートジェネレータに入力し、T STOP 信号と ACCEPT 信号を作り、NIM EASIROC モジュールへと入力する。NIM EASIROC モジュールにはイーサネットケーブルのポートがあるため、そこから DAC の値の変更やデータ取得の制御を行う。

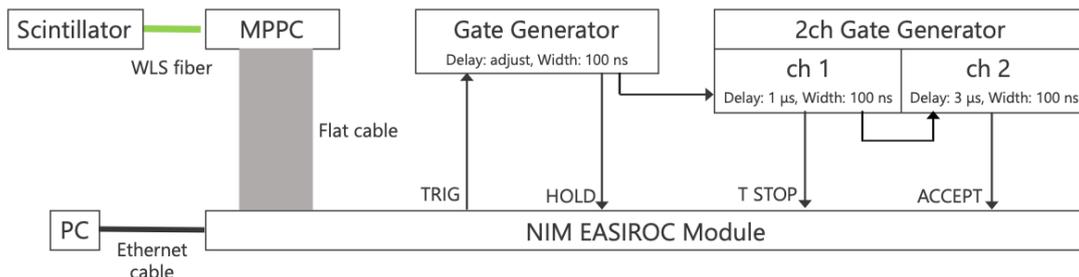


図 4.12: 加速劣化試験のセットアップ。

4.3.7 恒温槽の使用

1 回目にシンチレータを恒温槽で劣化させた際のチャンネルマッピングを図 4.13 に示す。SuperFGD キューブは図の C、D、E 列のシンチレータおよび B、E 列の波長変換ファイバーを恒温槽に入れた。それ以外は恒温槽に入れず、光量の減少があった際にそれが本当に恒温槽で加速劣化を行ったことによるものかを確かめるために使用した。INGRID シンチレータについては 4 層のシンチレータ全体を恒温槽に入れたが、ファイバーは恒温槽に入れていない。

データ取得は、恒温槽に入れる前、75°C の恒温槽に 10 日間置いた後（10 年の酸化劣化に対応）、20 日置いた後（20 年の酸化劣化に対応）の 3 回行っている。なお、恒温槽には外気とのやりとりができるように小さな換気口があり、酸素濃度が変化しないようになっている。

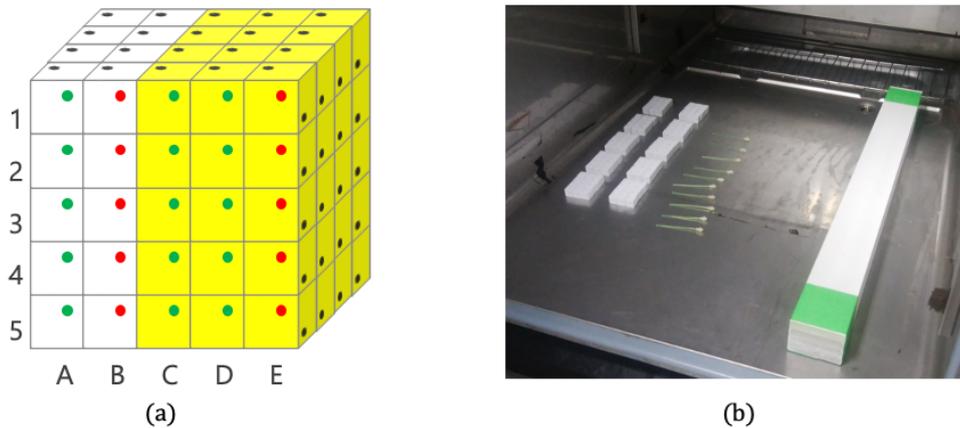


図 4.13: (a) SuperFGD キューブのチャンネルマッピング。黄色いシンチレータ、赤いファイバーが恒温槽に入れて劣化させた部分。(b) 恒温槽に入れたシンチレータ・ファイバーの写真。

4.4 測定方法

4.4.1 光量のキャリブレーション

シンチレータの酸化劣化の評価には、宇宙線ミューオン（MIP）がシンチレータを通過した際に落とす光量を用いる。測定では EASIROC で読みだした ADC 値が何 p.e. に対応しているかを正しく知る必要があるので、まずは MPPC に LED からの光を当てて光量のキャリブレーションを行った。

LED 光を当てた MPPC 信号を EASIROC で読みだした際の ADC 値の分布を図 4.14 に示す。図に示すように 2 p.e. と 3 p.e. をダブルガウシアンでフィットして 1 p.e. に対応する ADC の間隔（ゲイン） G と、2 p.e. ピークに対応する ADC 値 p を求めた。これにより、同じ電圧で宇宙線の測定を行ったときに ADC 値を

$$2 + ((\text{ADC 値}) - p)/G$$

の計算式で光量へと変換することができる。

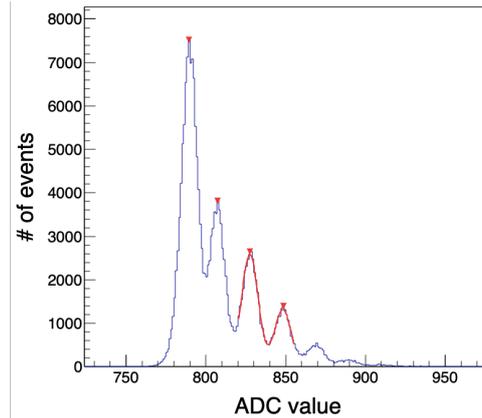


図 4.14: チャンネル A1 の MPPC に 57.31 V を印加した際の光量分布。2 p.e.、3 p.e. のピーク間隔をこの MPPC のゲインとして定義。

4.4.2 イベント選択

今回は鉛直方向のミュオン光量を取得するため、着目チャンネルの上下の光量がある閾値を超えた際に、ミュオンが着目チャンネルを通過したとしてイベントを選択した。閾値については 1 回目の試験では SuperFGD、INGRID ともに 5 p.e. と設定したが、INGRID シンチレータの光量が SuperFGD よりも小さいことを考慮して、2 回目の試験では SuperFGD、INGRID についてそれぞれ 15.5 p.e.、5.5 p.e. に設定した。なお、上端、下端にあるチャンネルのデータはイベント選択用としてのみ利用し、解析からは除外した。選択したイベントについて光量分布をヒストグラムにするとランダウ分布に従うので、これを ROOT を用いてフィットした (図 4.15)。加速劣化試験の結果について述べる際には、この分布がピークをとる横軸の値 MPV (Most Probable Value) 光量を指標としている。

なお、イベント数は 1 回目の測定では SuperFGD シンチレータについては 25,000 イベント、INGRID シンチレータについては 20,000 イベント取得し、イベント選択後のイベント数はそれぞれ約 900 イベント、約 2,000 イベントとなった。また、2 回目の測定では SuperFGD、INGRID シンチレータそれぞれ 100,000 イベント、200,000 イベント取得し、イベント選択後のイベント数はそれぞれ約 1,200 イベント、約 10,000 イベントとなった。

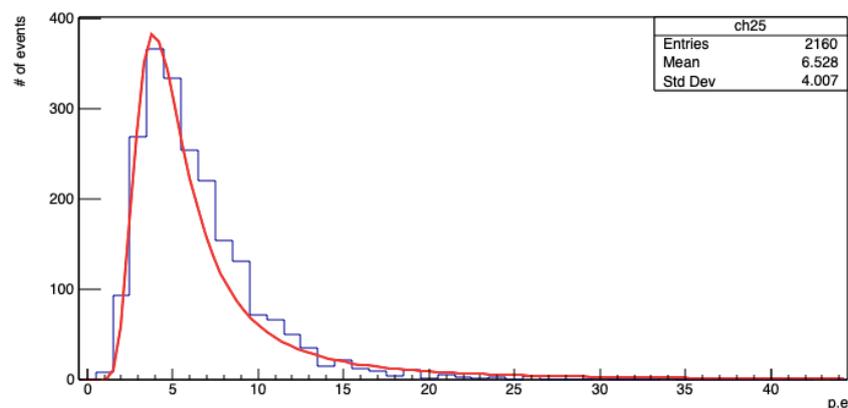


図 4.15: ランダウ関数でフィッティングを行う様子。データは 1 回目の、恒温槽に入れる前の INGRID シンチレータのもの。チャンネルは 4 層あるシンチレータの上から 2 つめ。

4.5 加速劣化試験の測定結果（1回目）

図4.16に SuperFGD の加速劣化試験の結果を示す。測定は0日目(2021/9/2)、10日目(2021/9/13)、20日目(2021/9/25)の3回行った。シンチレータを恒温槽に入れたC、D、E列については10日目にMPV光量が微増し、20日目に減少するという傾向が見られるが、シンチレータを恒温槽に入れていないチャンネルAにもMPV光量のふらつきというには少し大きな減少が見られる。また、ファイバーのみを恒温槽に入れたB列では逆に光量が増加している。

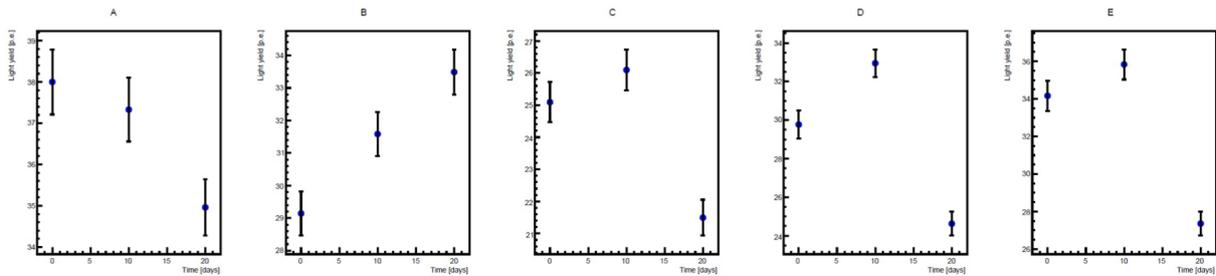


図 4.16: SuperFGD の測定結果。横軸は恒温槽に入れた日数、縦軸はランダウ関数のMPV光量。A～Eの各列について3個の有効なチャンネルがある（2個はイベント選択用）ので、3チャンネルで平均をとっている。

図4.17に INGRID の加速劣化試験の結果を示す。測定は0日目(2021/9/3)、10日目(2021/9/14)、20日目(2021/9/26)の3回行った。C列の2～5番のチャンネルを用いて測定を行ったため、図のC3、C4はそれぞれ上から2、3段目のシンチレータに対応する。図の左半分はMPV光量のプロットであり、図の右半分では恒温槽に入れる前の光量を100%とした際の相対光量のプロットである。エラーバーはMPV光量をフィットした際の統計的ふらつきである。INGRIDのデータについては減少傾向が見られるためフィッティングを行ったところ、C3、C4でそれぞれ1年あたり $0.95 \pm 0.07\%$ 、 $1.17 \pm 0.07\%$ の減少があるという結果になった。これらの結果は矛盾しないものの、図4.17の右上を見ると直線があまりにもデータによく乗っており、統計誤差以外にも光量を変化させる要素があると考えられる。

これらの結果から、SuperFGDについてはシンチレータボックスにMPPC-PCBを固定する際に使用している4つのネジの固定が不均一かつ毎回ネジをしめる強さが異なっていたため光量の変化が起これ、INGRIDについてはこの変化がたまたま減少傾向を生んだと考えた。ファイバー端とMPPC面に0.6 mmの距離があるだけで、隙間が全くない場合と比べて約40%光量が落ちるほどファイバー端-MPPC面の接続は距離に敏感であるため[45]、このようなジグでは経年劣化による光量の低下を測るためには不十分であると考えた。そこで、ジグを別のものに変更し再現性を確認した後に再測定を行うことにした。

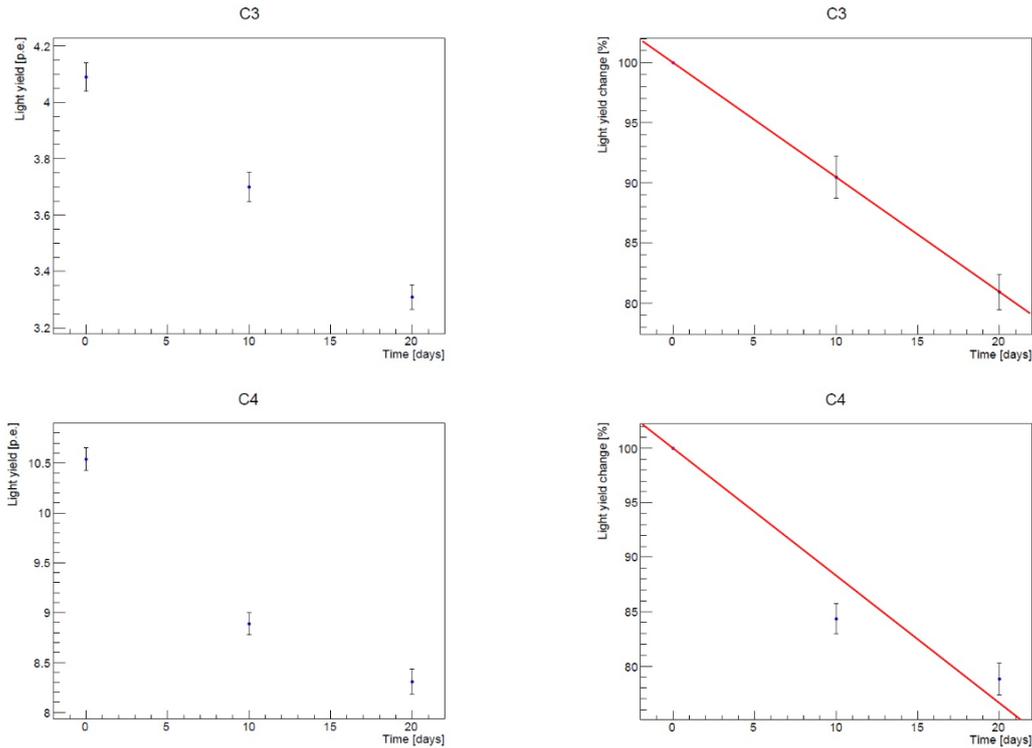


図 4.17: INGRID の測定結果。C3、C4 は 4 段あるシンチレータの上から 2、3 段目にあたる。左半分は絶対光量、右半分は劣化前を 100%とした相対光量。

4.6 2回目の加速劣化試験のセットアップ（変更点のみ）

1 回目の実験では MPPC-波長変換ファイバー間の距離の再現性に難があった。また、確認したところ MPPC も表面に傷があり光量が少し落ちていた。そこで、MPPC を S13081-1350CS(X1) というセラミックパッケージのものに変更し（図 4.18）、MPPC-ファイバー間の距離を担保するために T2K 実験で開発された GOMI コネクタを用いた（図 4.19）。このコネクタは MPPC 側とファイバー側に分かれており、MPPC 側のコネクタについてのツメがファイバー側のコネクタに引っかかることで MPPC-ファイバー間距離を $100\ \mu\text{m}$ 程度の精度で担保できる。[45] によれば、MPPC-ファイバー間の距離の変化を $100\ \mu\text{m}$ 程度まで抑えることで、光量のふらつきを 4%程度にまで抑えることができる。これについては実際に恒温槽にシンチレータを入れる前に測定を 2 回行い、実際にこの程度の再現性があるかどうか確認した（後述）。

これに伴い、シンチレータボックスのジグも変更する。はじめに光学コネクタから GOMI コネクタに変更したので、波長変換ファイバーの固定方法を変える必要がある。そこで、3D プリンタで作った 2 枚の板で波長変換ファイバーの円板部分を挟むことで固定し、さらにその上から GOMI コネクタが横方向にずれないようにもう 1 つのジグを重ねている（図 4.20）。

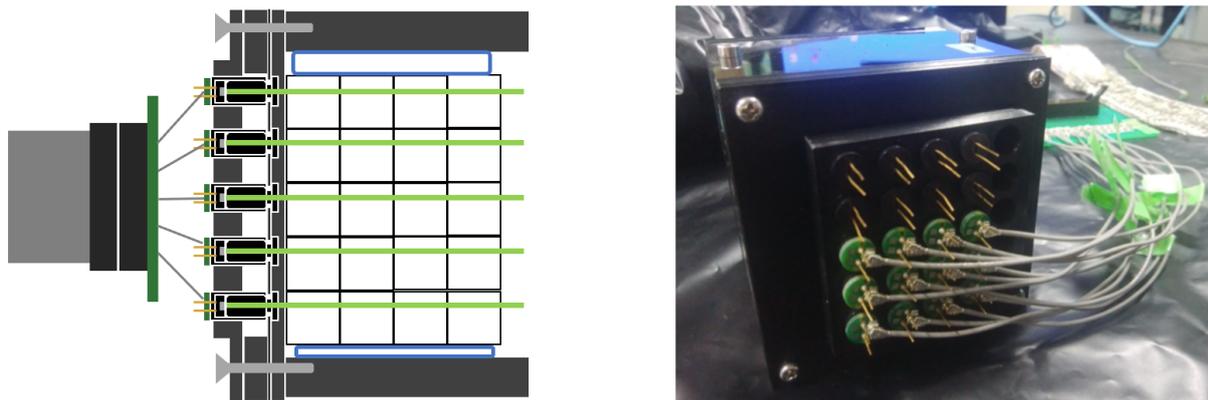


図 4.20: GOMI コネクタに合わせた新たなジグ。波長変換ファイバーの固定用ジグに加え、GOMI コネクタの横ずれを防ぐジグを重ねている。

また、シンチレータの個数や並べ方も変更した。SuperFGD キューブについては1回目のセットアップでは5×5×4に並べていたが、2回目は図 4.21 のように中央の列に黒のソフトフォームをはさみ、D、E列のシンチレータを恒温槽に入れた（ファイバーは恒温槽に入れていない）。ソフトフォームを入れた理由は以下の通りである。恒温槽に入れていないシンチレータの光量を x 、恒温槽に入れたシンチレータの光量減少の割合を α 、隣接するチャンネルの光量のうち割合 β が着目チャンネルにクロストークとして入ってくるとする。このとき、もし恒温槽に入れていない（劣化なし）チャンネルが恒温槽に入れた（劣化あり）チャンネルに隣接していると、劣化なしチャンネルの光量は

$$x + \beta x + \dots$$

劣化ありチャンネルの光量は

$$\alpha x + \beta x + \dots$$

であるから、 βx 以降の項のために、劣化ありチャンネルの光量は単純に劣化なしチャンネルの光量の α 倍とはならない。ここで、劣化なしチャンネルと劣化ありチャンネルの間に光を遮ると、劣化ありチャンネルの光量は

$$\alpha(x + \beta x + \dots)$$

となり、ちょうど劣化なしチャンネルの光量の α 倍となるのでより正確に加速劣化試験による光量減少を測定できる。

INGRID については1回目は4層であったが、取得できるデータを増やすために5層に変更した。その他の全体のセットアップは1回目の測定と同じである。

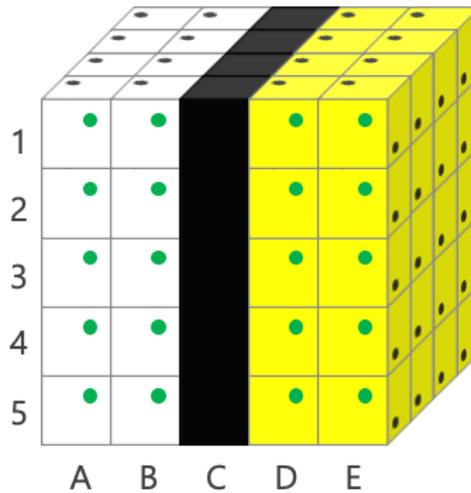


図 4.21: 2 回目の測定でのチャンネルマッピング。シンチレータを黄色くした部分を恒温槽に入れて加速劣化させる。黒い部分はソフトフォーム。

4.7 変更後セットアップの再現性の確認

上記セットアップに変更した後、再現性の確認を行った。測定は 1 回目と同様の方法で 2021/12/1 に宇宙線のデータを取得した後、MPPC-ファイバー間の結合を 1 度外してから再度付け直し、2021/12/3 に再度データを取得した。そして、12/3 に測定した宇宙線の MPV 光量が 12/1 に測定した MPV 光量からどれだけ変化したかを確認した。表 4.3 にチャンネルごとの光量変化の割合を示す。表中の 12 チャンネルの光量変化について平均を取ると -0.08% 、標準偏差は 2.9% であるから、 3% 程度の再現性があるといえる。

表 4.3: 再現性の確認。

	A	B	D	E
2	-1.5%	$+2.1\%$	-5.9%	$+0.4\%$
3	-0.4%	$+5.1\%$	$+2.3\%$	-1.5%
4	-2.9%	-2.0%	-0.5%	$+3.9\%$

4.8 加速劣化試験の測定結果 (2 回目)

表 4.4、表 4.5 にそれぞれ SuperFGD、INGRID の加速劣化試験 (2 回目) の測定結果を示す。2 回目の測定では 10 日目に恒温槽を止めることができなかつたため、0 日目と 20 日目での光量変化を計算している。この測定結果と先述の再現性の結果 (約 3%) を比較すると、SuperFGD のチャンネル B3 で大きな光量変化が見られるものの、それ以外には有意な光量の変化は見られない。チャンネル B3 のシンチレータは恒温槽に入れていないので、この光量変化は GOMI コネクタのカップリングが不十分であったためであると考えられる。したがって、加速劣化試験により、20 年間ニュートリノビーム実験を行ったときに測定精度 $\sigma \simeq 3\%$ の範囲で劣化はないという結論に至った。

表 4.4: SuperFGD の測定結果。

	A	B	D	E
2	-2.5%	-1.1%	-4.3%	+4.7%
3	+1.1%	-12.1%	-4.4%	+0.4%
4	+2.8%	-1.4%	-3.6%	-1.4%

表 4.5: INGRID の測定結果。

	C
2	-5.1%
3	-5.1%
4	+1.8%

4.9 GEANT4による光学シミュレーション

ここでは、劣化があるとはいえない最大の光量減少率である $3\sigma \simeq 8.8\%$ が実際に起こっていたとして、それが検出器での測定にどれだけの影響を及ぼすか、GEANT4を用いたシミュレーションを開発し、確認した。

4.9.1 ジオメトリ

GEANT4シミュレーションにおける SuperFGD シンチレータキューブ、INGRID シンチレータバーのジオメトリを図 4.22 に示す。SuperFGD キューブに 3 方向に開いた半径 0.7 mm の穴にファイバーを挿入しており、各ファイバーの先端に有効受光面 $1.3 \times 1.3 \text{ cm}^2$ の MPPC を配置している。ファイバーの長さは 2 cm であり、ファイバー両端がキューブから同じ長さだけ出るように配置している INGRID シンチレータには半径 1.5 mm の穴が開いており、140.5 cm のファイバーを通して、シンチレータの両端からそれぞれ 20 cm、0.5 cm のファイバーが出るようにし、20 cm 出たファイバーの先端に MPPC を配置している。ファイバーの半径は Y11(200) に合わせて 1.0 mm とし、外側から外層クラッド 0.02 mm、内層クラッド 0.02 mm、コア 0.96 mm とした。

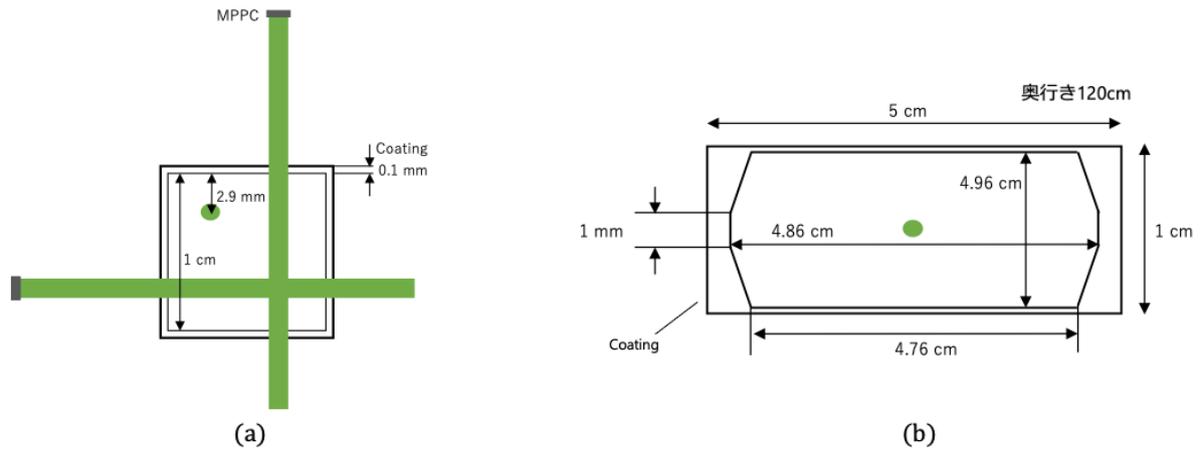


図 4.22: (a) 1 方向のファイバーに垂直な SuperFGD シンチレータの断面図。(b) ファイバーに垂直な INGRID シンチレータの断面図。

4.9.2 光学的パラメータ

シミュレーションにおけるシンチレータ、波長変換ファイバー、MPPC の光学的なパラメータの設定について以下で述べる。設定値は最後にまとめて表 4.6 に示している。

シンチレータ

シンチレータのパラメータとしては主に減衰長、シンチレーション光量、Birks 係数、反射層の反射率、シンチレーション時間がある。

シンチレータ中を光が進むとき、光は進んだ距離に応じて指数関数的な減衰を示す。 N 個の光子がシンチレータ中を距離 l だけ進んだ後 Ne^{-1} 個となったとき、この距離 l を減衰長という。減衰長は SciBooNE 実験で用いられた FNAL-NICADD 押出成形シンチレータの測定結果から、38.0 cm と設定されている [50]。

シンチレーション効率は荷電粒子がシンチレータを通過した際に落とした単位エネルギーあたりに生じる光量である。実際には、粒子のエネルギー損失 dE/dx に応じて光量が変化するので、これを表す Birks の法則

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{\frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

から実効的な光量 L を算出する。この式で S はシンチレーション効率であり、 kB は Birks 係数と呼ばれる。Birks 係数は物質によって異なり、ポリスチレンベースのシンチレータについては $kB = 0.126 \text{ mm/MeV}$ である [51]。

反射層の反射率は SuperFGD シンチレータキューブを用いたビームテストの結果から 98.5% と決められている [52]。シンチレーション効率はこの反射率の調整後に、ビームテストの観測光量との比較から調整された。

減衰時間はシンチレータが発光をはじめてからその発光量がはじめの $1/e$ となるまでの時間であり、有機シンチレータについては 1 ns 程度であることが知られている。パラメータとしてはこの典型的な値 1 ns を用いている。

シンチレータの発光波長分布はPOPOPの発光波長分布 [53] をそのまま実装しており、図 4.23 のようになっている。

ここまでは SuperFGD シンチレータのパラメータであるが、ビームテストから定められた反射層の反射率とシンチレーション効率、そして劣化が関係するシンチレータの減衰長以外は INGRID シンチレータでも同じである。INGRID シンチレータではあるシンチレータから隣接するシンチレータへのクロストーク確率が 0.5% 以下と非常に低いため、反射層の反射率は 1% と設定した。シンチレータの減衰長は、INGRID シンチレータはすでに 11 年ほど経過したものを使用したため、次節の議論より 29.7 cm と設定した。シンチレーション効率は 12.8 p.e./keV で加速劣化試験での MPV 光量 10 ± 2 p.e. と誤差の範囲内で一致していたため、変更していない。

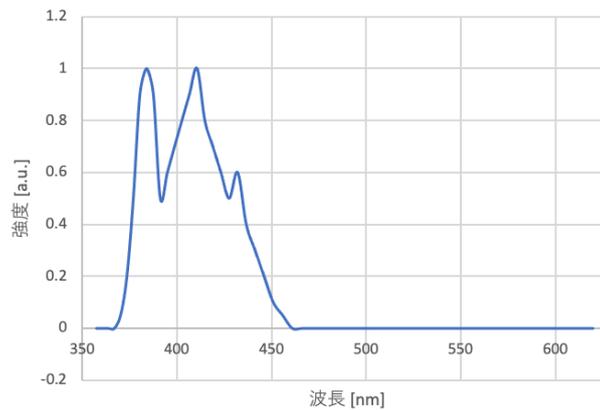


図 4.23: シンチレータ (POPOP) の発光スペクトラム。

波長変換ファイバー

波長変換ファイバーについては Kuraray 製の Y11(200) のデータシートをもとに屈折率が定められている。減衰時間は Y11(200) について 12 ± 0.5 ns という測定結果があり、これをもとに 12 ns と設定されている [54]。また、減衰長の波長依存性は [54] にもとづいて図 4.24 のように定められている。

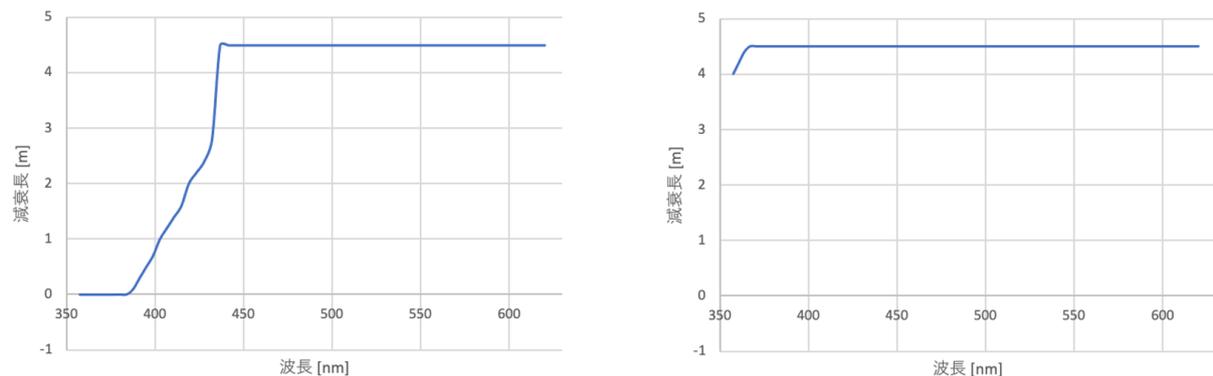


図 4.24: コアの減衰長の波長分布 (左) とクラッドの減衰長の波長分布 (右)。

MPPC

MPPC については図 4.8 の波長特性をもとに光子検出効率が設定されている。

表 4.6: シミュレーションの光学パラメータ。シンチレータの項目では SuperFGD シンチレータの値を示しており、INGRID シンチレータのシミュレーションで変更した値は括弧内に示している。

構成要素	パラメータ	数値
シンチレータ	減衰長	38 cm (29.7 cm)
	シンチレーション効率	12.8 p.e./keV
	Birks 係数	0.126 mm/MeV
	反射層の反射率	98.5% (100%)
	減衰時間	1 ns
波長変換ファイバー	減衰時間	12 ns
	コアの屈折率	1.59
	内側クラッドの屈折率	1.49
	外側クラッドの屈折率	1.42
	減衰長	約 4.5 m
MPPC	光子検出効率	約 25%

4.10 シミュレーションにもとづく経年劣化の影響評価

本節では、シンチレータの経年劣化で生じる光量減少による SuperFGD を用いた p - π 粒子識別への影響、INGRID での検出効率への影響について述べる。経年劣化による光量減少は、酸化劣化によってシンチレータが黄色く濁り透明度が落ちることによって生じると考え、シンチレータの減衰長を変更することでシミュレーションに反映することとした。図 4.25 に SuperFGD シンチレータ、INGRID シンチレータの減衰長に対する光量減少率を示す。データは減衰長を 38 cm から 18 cm まで 5 cm ずつ取っており、これを 3 次関数でフィットした結果が赤線である。SuperFGD シンチレータは劣化前の減衰長を 38 cm とし、劣化後は光量が 8.8% 減少するとして減衰長を 29.3 cm へ変更した。INGRID シンチレータは製造から 11 年経過しており、[33] のデータを指数関数でフィットした結果より、すでに光量が 15.9% 減少していることがわかる。そこで、劣化前の減衰長を 29.7 cm、劣化後の減衰長をここから 8.8% 減少した 26.1 cm とした。

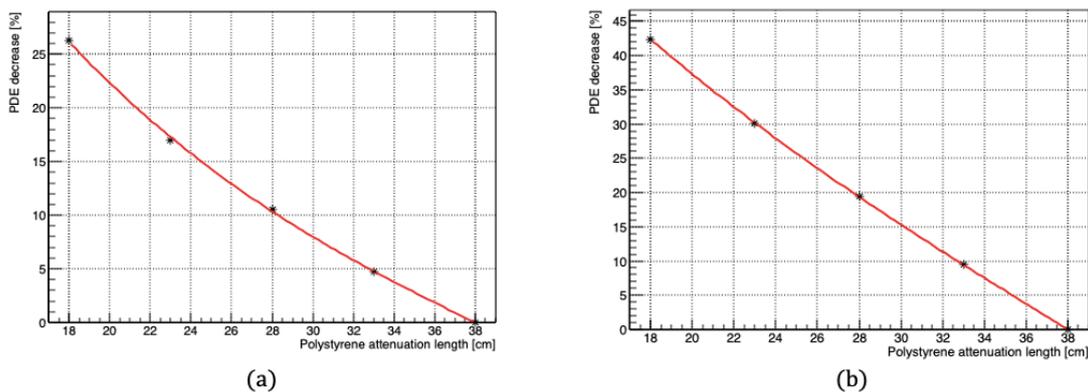


図 4.25: 減衰長と光量減少率の対応。GEANT4 シミュレーションでシンチレータの減衰長を 38 cm から 18 cm まで 5 cm ずつ変えながら光量を取得し、3 次関数でフィッティングを行った。(a) SuperFGD、(b) INGRID。

4.10.1 SuperFGD による p - π 粒子識別

GEANT4 シミュレーションを用いて、SuperFGD シンチレータの光量が減少した際に粒子識別にどれほど影響が出るか確認した。ミューオンや飛程の長い荷電粒子は SuperFGD の外の TPC で高精度の粒子識別が行われるため、今回は飛跡の再構成で使われうる 3 cm 程度の短飛程の p 、 π の粒子識別について調べた。 p と π の識別を誤るとニュートリノ反応モードを誤ることになるため、ニュートリノの再構成エネルギーや反応断面積の系統誤差が増加する。あるニュートリノモードのあるエネルギー領域におけるイベント数の不定性を 20-30% とし、 p - π の識別を 5% 誤るとすると、このイベントには p - π の誤った粒子識別により 1-1.5% の系統誤差がつくことになる。ニュートリノ反応の測定において主要な系統誤差となっているニュートリノフラックスの系統誤差は 5% 程度であるから、 p - π 粒子識別を誤る確率が 5% 程度であればこれがニュートリノ反応測定に与えるは系統誤差 1-1.5% 程度であり、ニュートリノフラックスに起因する系統誤差よりも十分に小さく問題にはならないといえる。そこで今回は p - π 粒子識別を誤る確率として 5% 以下を要求する

セットアップは 3cm 程度の荷電粒子の測定ができればよいので、SuperFGD シンチレータを $7 \times 7 \times 7$ に並べて、3 方向に波長変換ファイバーを通し、中心のシンチレータ内から一様等方的に p 、 π が発生するようにした。MPPC は各ファイバーの片方の端にのみ配置しており、これらの MPPC で測定したすべての光量の和を荷電粒子の真の飛跡長でわった値を dE/dx とし、粒子識別に用いることとした。なお、3 cm の飛跡に対応する p 、 π のエネルギーはそのおおよその値を定めたのち、その値の周りでエネルギーを 5 MeV ずつ変えて 4 点で飛跡長の平均値を出し、これを直線でフィッティングすることにより求めた。この結果 p は 59.5 MeV、 π は 25.8 MeV となったため、この値に設定し、 dE/dx を用いた粒子識別を行う際にはさらに飛跡長 l_t が $2.5 \leq l_t \leq 3.5$ であることを要求した。

減衰長 38 cm、29.3 cm の場合の p 、 π の dE/dx 分布を図 4.26 に示す。 p 、 π はそれぞれ 10,000 個生成している。減衰長 38 cm の場合には $dE/dx = 800$ p.e./cm に識別の閾値をもうけ、 dE/dx がこれ以下のイベントを π 、これより大きいイベントを p であるとする。このとき、 π と識別されたイベントに含まれる p の割合は 0.05%、 p と識別されたイベントに含まれる π の割合は 0.02%。減衰長 29.3 cm の場合には $dE/dx = 680$ p.e./cm に識別の閾値をもうける。このとき、 π と識別されたイベントに含まれる p の割合は 0%、 p と識別されたイベントに含まれる π の割合は 0.02%。したがって、SuperFGD シンチレータの光量が経年劣化により 8.8% 減少したとしても 3 cm 程度の短飛程の p - π 識別を誤る確率は要求の 5% より十分小さく、問題とはならないといえる。

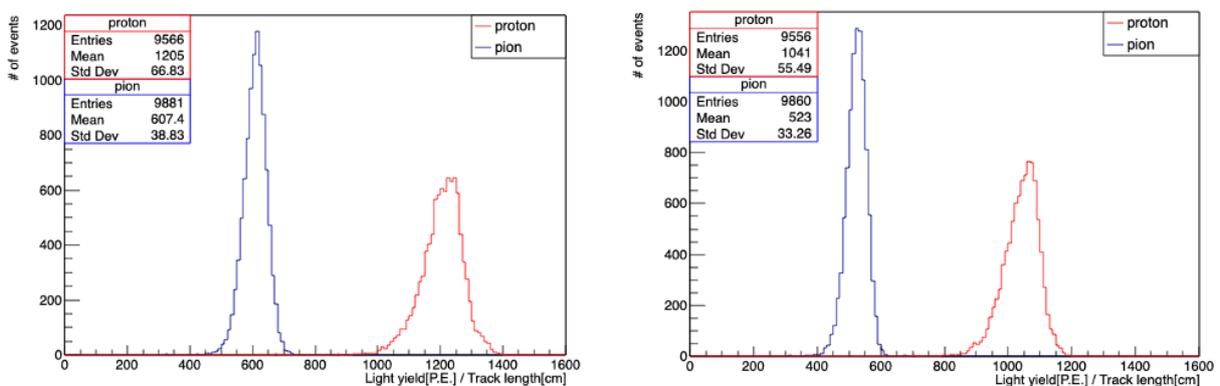


図 4.26: p と π のエネルギー損失 dE/dx の分布。左図では SuperFGD シンチレータの減衰長 38 cm、右図では減衰長 29.3 cm (8.8% の光量減少に対応)。

4.10.2 INGRID での検出効率

GEANT4シミュレーションを用いて、INGRIDシンチレータの光量が減少した際にシンチレータで検出されるミュオンの割合に違いが出るか確認した。[34]によれば、検出効率に対してイベントのパイルアップとデッドチャンネルがそれぞれ0.2%程度の系統誤差を与え、これら2つとシンチレータの経年劣化以外の要因が0.9%程度の系統誤差を与える。したがって、シンチレータの劣化による検出効率の減少率が1%以下であれば検出効率への影響は小さく、問題ないといえる。そこで今回は検出効率の減少率として1%以下であることを要請した。

セットアップとしては、5 cm×1 cm×120 cmのINGRIDシンチレータを1 cm×120 cmの面が互いに接するように24本並べ、120×120 cm²の平板とする。この平板の一方の面から垂直に6.5 cm離れた120×120 cm²の平面から0-5 GeVの範囲で一様なエネルギー分布をもつミュオンを等方的に発する。

シンチレータの反射層を除く部分を通じたミュオンの数のうち、光量が2.5 p.e.より大きいものの割合をINGRIDの検出効率と定義した。図4.27にシンチレータの検出効率を減衰長29.7 cm、26.1 cmの場合についてシミュレーションで求めた結果を示す。生成したミュオンの個数は各10,000個である。また、表4.7に検出効率の減少率を示す。表より検出効率の減少は0と無矛盾であり、要求の1%と比較して十分小さく、今後20年のINGRIDシンチレータの光量減少が検出効率に与える影響はないといえる。

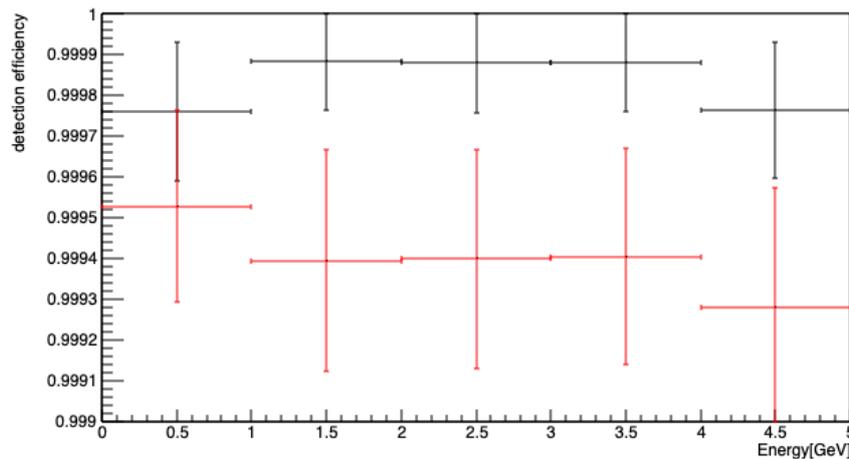


図 4.27: INGRID シンチレータでのミュオン検出効率。黒が減衰長 29.7 cm の場合、赤が減衰長 26.1 cm の場合（8.8%の光量減少に対応）である。

表 4.7: 減衰長を変更する前後の検出効率の減少率

エネルギー領域 (GeV)	検出効率の変化 (%)
0-1	0.023±0.029
1-2	0.049±0.029
2-3	0.048±0.029
3-4	0.048±0.029
4-5	0.048±0.034

4.11 まとめ

本章では HK 実験の前置検出器としても現行の INGRID 検出器や、2023 年にインストール予定の SuperFGD 検出器を長期間（10-20 年）にわたり使用できるか、シンチレータの経年劣化の側面から調べた。シンチレータの劣化の原因と考えられる酸化劣化は、高温環境下にシンチレータを置き化学反応を促進することで再現できると考え、75 °C のもとに約 20 日間シンチレータを置く加速劣化試験を行った。高温環境下に 20 日間置く前後にシンチレータを用いて宇宙線の MPV 光量の測定を行った結果、測定精度（～3%）の範囲内で劣化はないという結論へと至った。この結果をもとに、劣化がないといえる最大の光量減少率として測定精度の 3 倍の 8.8%を設定し、8.8%という光量減少が実際の HK 実験の測定において問題となりうるか、GEANT4 を用いた光学シミュレーションで検証した。その結果、SuperFGD での短飛程の p - π 粒子識別には影響がないことを確認した。また、INGRID でのミューオン検出効率の変化は全体として減少傾向であるもののその減少率は 0.048%程度であり測定に影響はない。したがって、SuperFGD および INGRID のシンチレータは HK 実験の期間中も問題なく使用できる。

第5章 新開発MPPC読み出しASICの評価試験

5.1 新ASIC開発の経緯

第3章で述べたように、2027年のHK実験開始後には前置検出器に現在用いられている多チャンネルMPPC読み出し用ASIC Trip-tは使用が難しくなると考えられる。この際、(1)既存の海外製ASICに取り替える、(2)新たなASICが海外で開発されるのを待つ、(3)日本国内で新たなASICを開発する、という3つの選択肢がある。T2K実験だけであれば(1)や(2)でも問題ないが、日本国内にMPPCを用いる実験が多数あることを考えると入手性の観点から(3)が望ましいと考えた。そこで、KEK E-Sysグループ中心に新たな多チャンネルMPPC読み出し用ASICが開発された。

5.2 ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器からの要請

HK実験の前置検出器に用いられるASICには以下のような特性が要求される。

- (1) チャンネルごとのMPPCへの印加電圧の調整
- (2) 1 p.e.の分解能と150 p.e.程度までのフルスケールレンジ
- (3) ADCの応答の100 p.e.程度までの線形性
- (4) 1%以下のチャンネル間クロストーク

(1)はMPPCごとに降伏電圧にばらつきがあるため、ASICに接続する複数のMPPCのゲインを揃えるために必要となる。(2)はTrip-tが用いられているINGRIDやECalにおけるMIPの光量分布が20-30 p.e.をピークに持つランダウ分布であり、この分布のフィッティングに100 p.e.程度までのレンジが必要であるためである。150 p.e.としたのは次の線形性を評価する際に100 p.e.ちょうどまでしか測定できないと不十分であると考えてのことである。また、MPPCのゲインを計算するためには0 p.e.と1 p.e.とが区別できる必要がある。(3)はMPPCからの光量を正しく記録するために必要である。ただし、完全に線形でなくとも入力に対するADCの応答がわかれば修正は可能であるから、入力に対する応答が連続的かつ一意的であれば大きな問題とはならないと考えられる。(4)はASICの複数ある入力チャンネルのうちのあるチャンネルに大光量が入力された際に、他のチャンネルに1%より大きな影響を及ぼさないことを保証するために必要である。新ASICはこれらの要請(と他の実験からの要請)をもとに設計された。

5.3 新ASICのデザイン

新ASICの構成は図5.1の通り。図5.1(a)に示すようにASIC1チップあたり8チャンネルで構成されている。各チャンネルはASD (Amplifier-Shaper-Discriminator)部とADC、シリアルライ

ザーからなり、図 5.1(a) 左側からのアナログ入力に対し、右側に出力として各チャンネルからの ADC 出力、デジタルデータの開始タイミングを与えるフレーム、ADC 出力に同期したクロックがある。また、ユーザーは PC からのコマンド入力により ASD 部の波形増幅・整形パラメータを変更することができる。

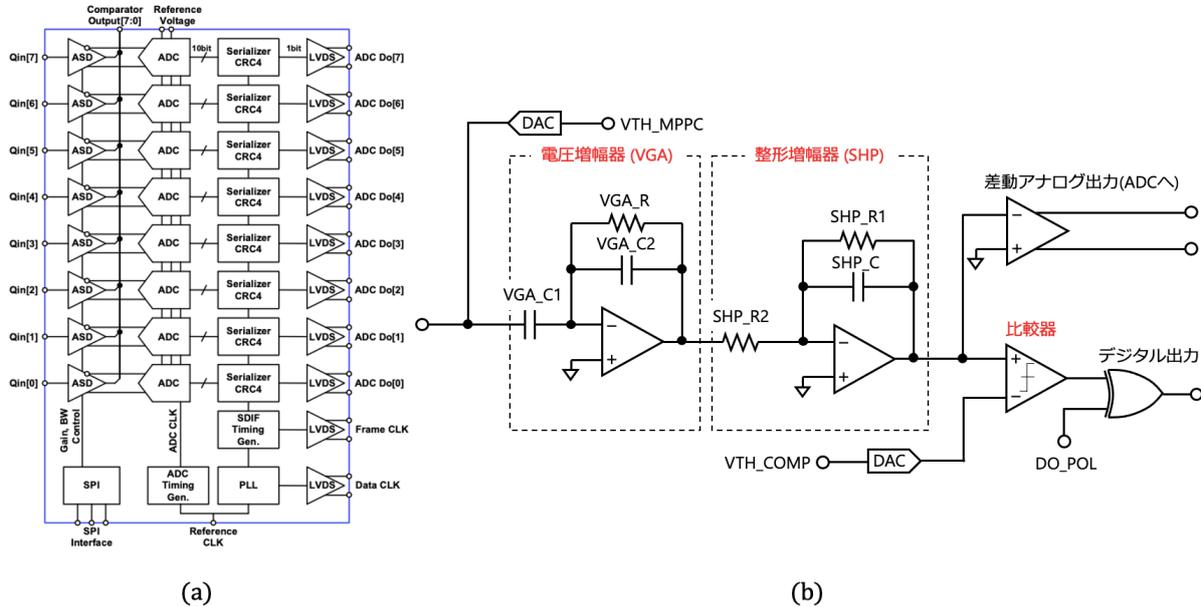


図 5.1: (a) ASIC の全体像 [55]。 (b) ASIC の 1 チャンネル構成。図 (a) の ASD 部分に対応している。

図 5.1(b) は、図 (a)5.1 の ASD 部の詳細であり、波形増幅と整形は可変電圧増幅器 VGA (Variable Gain Amplifier) と整形増幅器 SHP (Shaper) で行われる。VGA と SHP のゲイン G_{VGA}, G_{SHP} は

$$G_{VGA} \simeq \text{VGA_C1}/\text{VGA_C2}, \quad G_{SHP} \simeq \text{SHP_R1}/\text{SHP_R2} \quad (5.1)$$

で定まり、取りうる値はそれぞれ $1x \sim 32x$ 、 $0.25x \sim 4x$ 、ASIC 全体で $0.25 \sim 128x$ となっている。

図 5.1(a) に示されている ASD の出力は図 5.1(b) 右上の差動アナログ出力であるが、これとは別に比較器と XOR からなるデジタル出力がある。これは増幅・整形後の信号が比較器に設定された閾値よりも大きい（あるいは小さい）ときに 1 となる 1 bit 出力であり、ADC に送られる差動アナログ出力と異なり ASIC から出力される際にクロックに同期しないため、高分解能の時間測定に利用できる。また、図 5.1(b) 左上の 10 bit DAC を用いることでチャンネルごとに入力線にかかる電圧を $0 \sim 3.3 \text{ V}$ で調整することができる。

図 5.1(b) のパラメータとそのビット数、最小値・最大値を表 5.1 にまとめる。実際に取りうる値は、最小値と最大値をそのビット数で等分した値である。また、右端にはデフォルト値も示す¹。抵抗とコンデンサは直列・並列につなぐ個数を変更することで可変としているため、デフォルト値はその個数で示した。以下、パラメータの表示にはこの個数を用いる。表で示したデフォルト値から、デフォルトのゲインが最大 $128x$ であることがわかる。

本章では、ASD のパラメータを変更することで実際に 5.2 節で述べた (2)~(4) を達成できるか評価するために行った試験の結果を述べる。

¹デフォルト値は ASIC そのもので定まっているのではなく FPGA にプログラムされたファームウェアで設定されるものなので、ここで述べるのは適切でないかもしれないが、後の利便性を考えてここで取り上げた。

表 5.1: ASD の各パラメータと取りうる値。

パラメータ	ビット数	最小値～最大値	デフォルト値
VGA_C1	2 bit	2～8 pF	4 (x2 pF)
VGA_C2	3 bit	0.25～2 pF	1 (x0.25 pF)
VGA_R	固定	10 M Ω	10 M Ω
SHP_C	3 bit	0.1～0.8 pF	1 (x0.1 pF)
SHP_R1	2 bit	15～60 k Ω	4 (x15 k Ω)
SHP_R2	2 bit	15～60 k Ω	1 (x15 k Ω)
VTH_MPPC	10 bit	0～3.3 V	
VTH_COMP	10 bit	0～3.3 V	

5.4 評価試験のセットアップ

5.4.1 MPPC ASIC 評価ボード

ASIC の評価を行うにあたり、ASIC チップ単体では動作しないため、入出力や電源、クロックとの接続インターフェースを備えた MPPC ASIC 評価ボードが KEK で開発された。このボードの入力部は 8 チャンネルあり、各チャンネルごとに入力部の回路を変更することができる。すべてのチャンネルで MPPC からの読み出しを行うようにすると、線形性を評価する際に特定の光量を持つ信号が MPPC から出るように MPPC に照射する光量を調整する必要があり煩雑である。そこで、4～7 チャンネルは MPPC からの信号をそのまま入力できるように設計し、0～3 チャンネルは入力部に RC 回路を実装することでファンクションジェネレータ (FG) からのステップ波を MPPC 波形に似た形へと歪め、線形性の評価を行う際に容易に特定の光量を出せるように設計した (MPPC 入力に対してこれをインジェクタ入力と呼ぶ)。

評価ボードの入力部の概要を図 5.2 に示す。

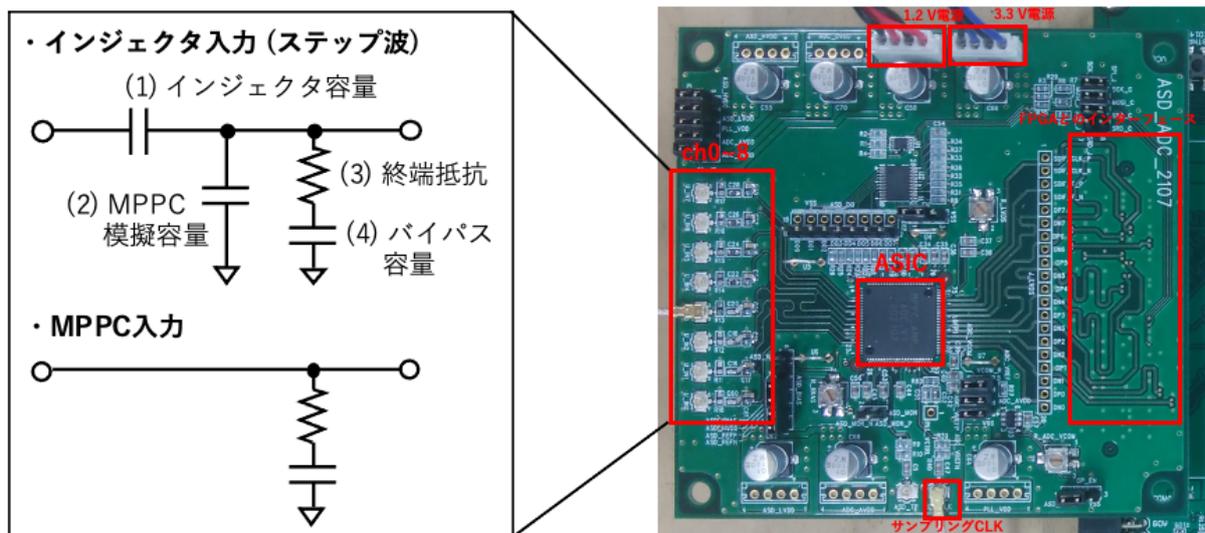


図 5.2: MPPC ASIC 評価ボードの全体写真と入力部。

図中の入力部 (1)～(4) の役割はそれぞれ以下のようにになっている。

- (1) FG から入力された電圧を電荷へ変換。
FG のステップ波振幅の最大値が線形性評価に十分になるように調整。
- (2) 入力された電荷を一時的に保持し、波形を MPPC のような形へ歪める。時定数の調整。
- (3) 電荷を電圧に変換。
- (4) ASIC の入力線にかかる DC オフセットをカットし、AC のみを GND へと逃がす。

また、これらの値は次のように設定した。

- ch0, 1: (1) 10 pF, (2) 220 pF, (3) 50 Ω , (4) 22 μ F
- ch2: (1) 10 pF, (2) 220 pF, (3) 50 Ω , (4) 0.22 μ F
- ch3: (1) 10 pF, (2) 220 pF, (3) 100 Ω , (4) 22 μ F
- ch4, 5: (1) 短絡, (2) 開放, (3) 50 Ω , (4) 22 μ F
- ch6: (1) 短絡, (2) 開放, (3) 50 Ω , (4) 0.22 μ F
- ch7: (1) 短絡, (2) 開放, (3) 100 Ω , (4) 22 μ F

インジェクタ入力の (1) を 10 pF としたのは、FG からの 10 mV の入力に対して MPPC からの 1 p.e. の信号に相当する 100 fC が抵抗に流れるようにするためである。FG が出力できるステップ波の最大振幅が 4 V 程度なので、これにより 400p.e. 程度までの MPPC 信号を再現することができ、100p.e. までの線形性評価を行う際に十分な余裕をもたせることができる。

(2) は MPPC 信号の時定数が 10 ns 程度であることから、(2)→(3)→(4) と電流が流れるときの時定数が 10 ns 程度となるように 220 pF に調整した。

(3) は入力部に接続するケーブルのインピーダンスに合わせて調整しており、低ノイズの同軸ケーブルの使用を考慮した 50 Ω と、配線の際に有利なフラットケーブルの使用を考慮した 100 Ω を用意した。

(4) は 10 ns 程度の MPPC 信号に対して短絡のように振る舞うように設定した。(3) と (4) の部分のカットオフ周波数は $1/(2\pi RC)$ であるから、これが 100 MHz (10 ns) より十分小さければよく、 $C \gg 30\text{pF}$ を満たすように 22 μ F を選んだ。また、過去の ASIC (EASIROC) の 0.22 μ F を参考に、信号に差が出ないかどうかを確認するために 0.22 μ F に設定したチャンネルも用意した。

5.4.2 全体のセットアップ

今回の評価試験全体のセットアップを図 5.3 に、MPPC ASIC 評価ボードと FPGA、およびそれらに接続されたケーブルの写真を図 5.4 に示す。

MPPC ASIC 評価ボードには直流電源、信号源、FG を接続し、データ読み出しや制御は Digilent 製の FPGA ボード Nexys Video を通じて PC から行う。1.2 V 直流電源、3.3 V 直流電源にはそれぞれ菊水電子工業製の PMC35-2A、PMC18-3A を使用しており、それぞれ ADC の出力電圧、比較器の基準電圧等として利用する。MPPC ASIC 評価ボードに接続した FG (Teledyne Lecroy 製 T3AFG350) からは振幅 1.2 V、周波数 100 MHz の矩形波を出力しており、これが ADC のサンプリングクロックの役割を果たす。サンプリング周波数としては最大 100 MHz まで使用可能である。信号としては青色 LED を照射した MPPC (型番 S13081-050CS(X1))、あるいは FG (GW

Instek 製 AFG-3051) からのステップ波を用いており、U.FL 同軸ケーブルで MPPC ASIC 評価ボードと接続している。

FPGA には JTAG ポートを通じてファームウェア (KEK の濱田さんによる) をインストールした。使用ソフトウェアは Vivado 2021.2 である。これにより ASD 部のパラメータを調整しつつ、ADC を (FG の周波数 100 MHz より) 10 ns ごとにサンプリングし、その波高を 10bit (-1.2 V ~ $+1.2\text{ V}$) で取得する。ベースラインは 511 である。

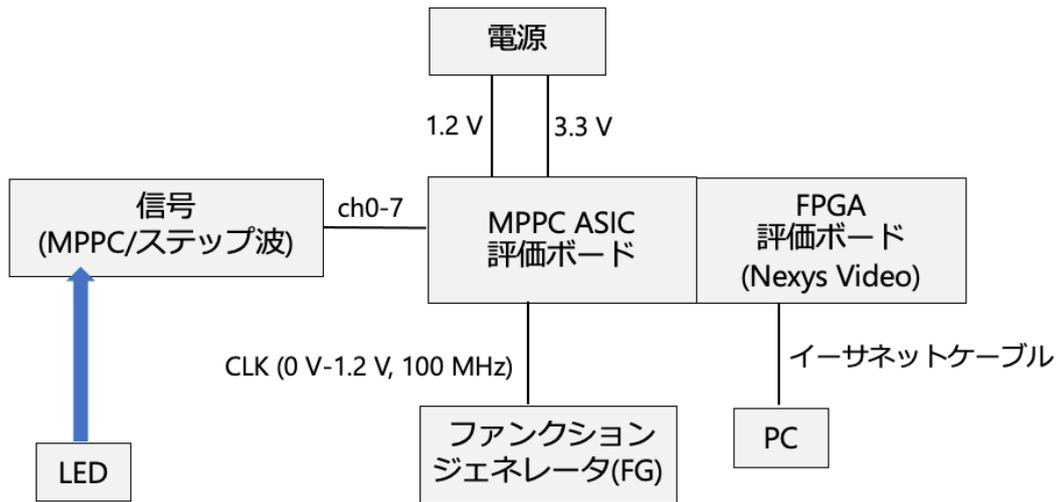


図 5.3: MPPC ASIC 評価のセットアップ。

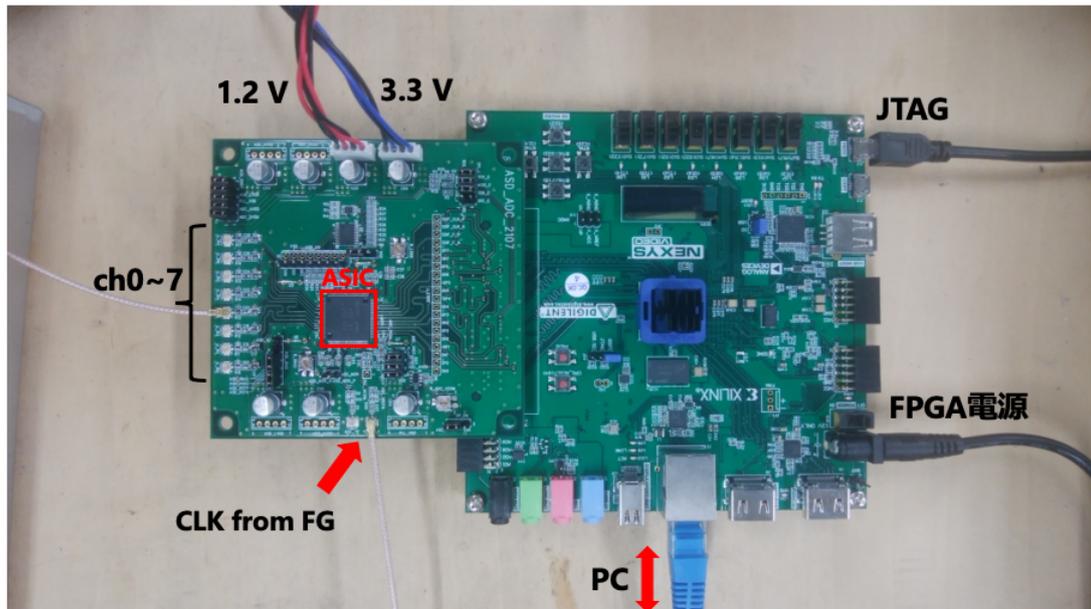


図 5.4: MPPC ASIC 評価ボードと FPGA ボードの写真。

5.5 ADC 読み出しの確認

評価試験に入る前に、上記セットアップでデータが正しく取れるか確認する必要がある。本節では降伏電圧の測定結果を用いて、データが問題なく取れていることを示す。なお、ここでの測定は 100 MHz FG を手に入れる前に行ったものであり、サンプリングクロックとして 50 MHz 矩形波を用いている。

ASD 部のパラメータをデフォルト設定 (最大ゲイン 128x) のまま、チャンネル 4 で約 $10 \mu\text{s}$ にわたって MPPC 信号のデータを 200,000 イベント取得し、重ねてプロットしたものが図 5.5 である。MPPC への印加電圧は 55.00 V である。ベースラインに多少のゆらぎが見られるものの、1,760~1,960 ns にわたって MPPC 信号が見える。図 5.5(a) において MPPC 信号の後ろに $2 \mu\text{s}$ 程度見られる ADC 値の大きい箇所は、アフターパルスという。これは入射光子により生成された電子・正孔対が MPPC 中の格子欠陥に捉えられることで、入射光子より少し遅れて信号が出てくる現象であり、MPPC で光子を検出する際の一つの特徴である。

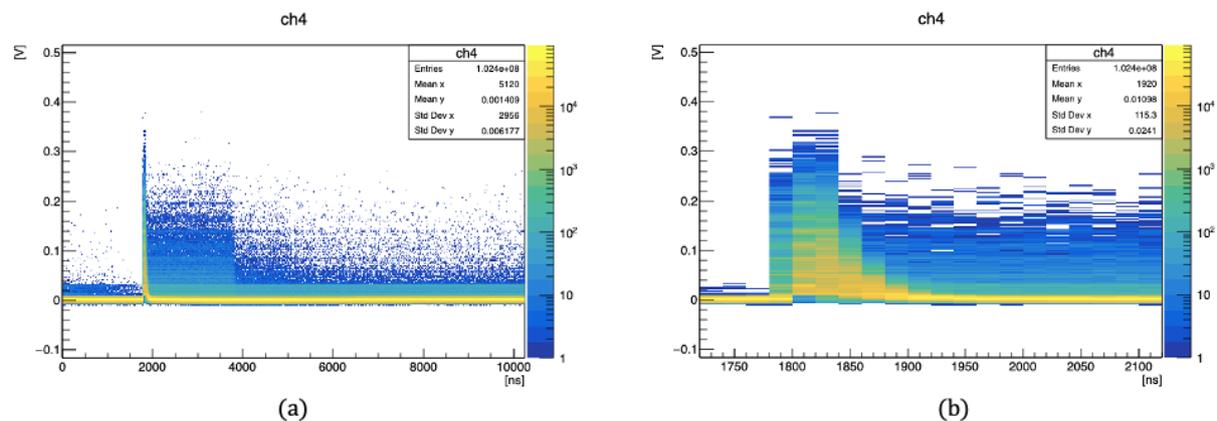


図 5.5: ADC のチャンネル 4 (MPPC 読み出し) のデータ。縦軸は 10 bit ADC に対応する電圧、横軸は時間であり 512 点 \times 20 ns ~ $10 \mu\text{s}$ の時間幅を持つ。200,000 イベント取得して全データを重ねてプロットしている。(a) 全時間幅。(b) MPPC ピーク周辺に横軸を拡大したもの。

上図を 1,760~1,960 ns で積分すればそれは MPPC が出力した電荷に比例し、MPPC 信号の光量分布が得られる。MPPC への印加電圧を 54.00 V、56.00 V と変更した際の光量分布の変化を図 5.6 に示す。横軸は ADC を積分した値であるが、上図の縦軸と異なり、ここでは ADC を電圧へと変換せず、511 をベースラインに持ち 0~1023 の値を取る ADC 値をそのまま加算する形をとった。縦軸はイベント数である。図より明らかに、印加電圧の上昇に伴い横軸の値が大きい部分にも分布が広がること、分解能がよくなるのがわかる。

この図を用いて MPPC の降伏電圧を求めてみる。まず、図 5.6(b) のように ROOT を用いてピークサーチを行った後、1 p.e.、2 p.e. のピークをダブルガウシアンでフィットしてピークの横軸の値の差をゲインと定義し、この操作を印加電圧を 54.00 V、54.50 V、55.00 V、55.50 V、56.00 V と変えながら繰り返す。これを横軸電圧、縦軸ゲインの図にプロットし、直線でフィットすると、得られた直線とゲイン = 0 との交点の電圧が降伏電圧となる (図 5.7)。

今回の測定では降伏電圧は 52.06 V となったが、MPPC の降伏電圧はスペックシートから 53 ± 5 V であるからこれは妥当な値である。浜松ホトニクスによる推奨動作電圧は降伏電圧 +3 V となっているため、以降の測定では印加電圧を 55.00V に設定した。

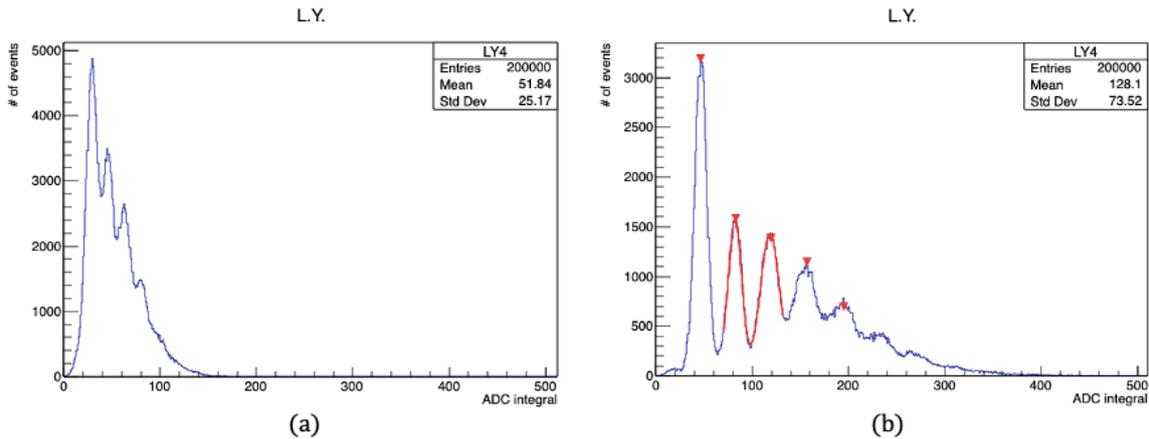


図 5.6: MPPC の光量分布。(a) 54.00 V を印加。(b) 56.00 V を印加。ROOT によるピークサーチと 1 p.e.、2 p.e. のフィッティングの様子も示した。

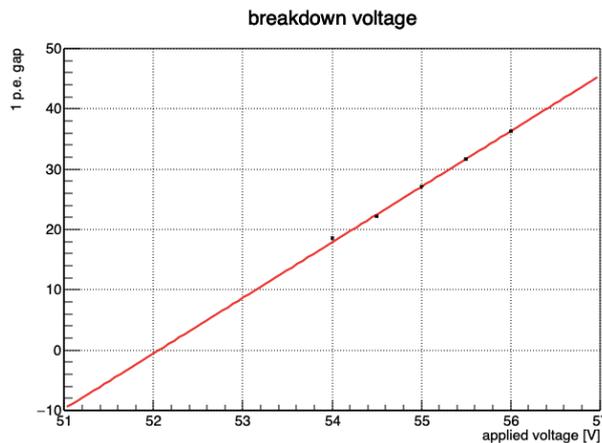


図 5.7: 横軸電圧、縦軸ゲインで直線フィットを行った結果。降伏電圧は 52.06 V と求まる。

5.6 評価試験の結果

以下の試験では、100 MHz FG を用いてサンプリングを行い、主にチャンネル 7 を使用した。チャンネル 7 を選択したのは、これが終端抵抗として 100 Ω を持っており、実際の T2K 実験では配線の都合上特性インピーダンス 100 Ω のフラットケーブルが用いられると想定してのことである。ただし、今回の読み出しでは同軸ケーブルを用いたため、終端抵抗と整合はしていない。しかし、それでも特に信号の反射が見られなかったため、問題ないと判断しチャンネル 7 の測定を行った。

5.6.1 1 p.e. 分解能と 150 p.e. までのフルスケールレンジ

デフォルトの ASD ゲインは 128x であるが、この場合 8 p.e. の MPPC 入力に対して ADC 出力が 0.4 V 程度となる。ADC 出力の最大値は +1.2 V であるため、このままでは 24 p.e. までしか測定できない。HK 前置検出器の要請は 150 p.e. 程度が検出可能であることであるから、線形性等

の評価を行う前にまずはゲインを下げて 150 p.e. のデータを取れるようにする必要がある。この際、同時に MPPC の光量分布の分解能を悪化させないようにしつつ、十分なレンジを取れるような ASD のパラメータを探した。以下の議論では (1) SHP_R1 の変更、(2) SHP_C の変更、(3) VGA_C1 の変更、(4) VGA_C2 の変更の順に述べる。

(1) SHP_R1 の変更

SHP_R1 を変更しながら取った波形を図 5.8 に、波形を 650~850 ns で積分して得られた光量分布を図 5.9 に示す。他のパラメータはデフォルトのままである。図 5.8 を見ると、波高が SHP_R1 の値に比例して変化している。SHP_R1=4 で 24 p.e. 程度までのレンジがあるから、これより SHP_R1=3,2,1 ではそれぞれ 32 p.e.、48 p.e.、96 p.e. まで測定可能であることがわかる。SHP_R1=1 であれば要求をほぼ満たすが、図 5.9 に示すように ASIC ゲインが小さすぎると分解能が悪くなる。そこで、ひとまずデフォルトよりゲインが小さくて分解能がほぼ同じ SHP_R1=3 を選択する。なお、図 5.9 に示した gain は 1 p.e.、2 p.e. ピークの間隔、sigma は 2 p.e. ピークの標準偏差を表しており、 σ/gain で分解能を定義している。

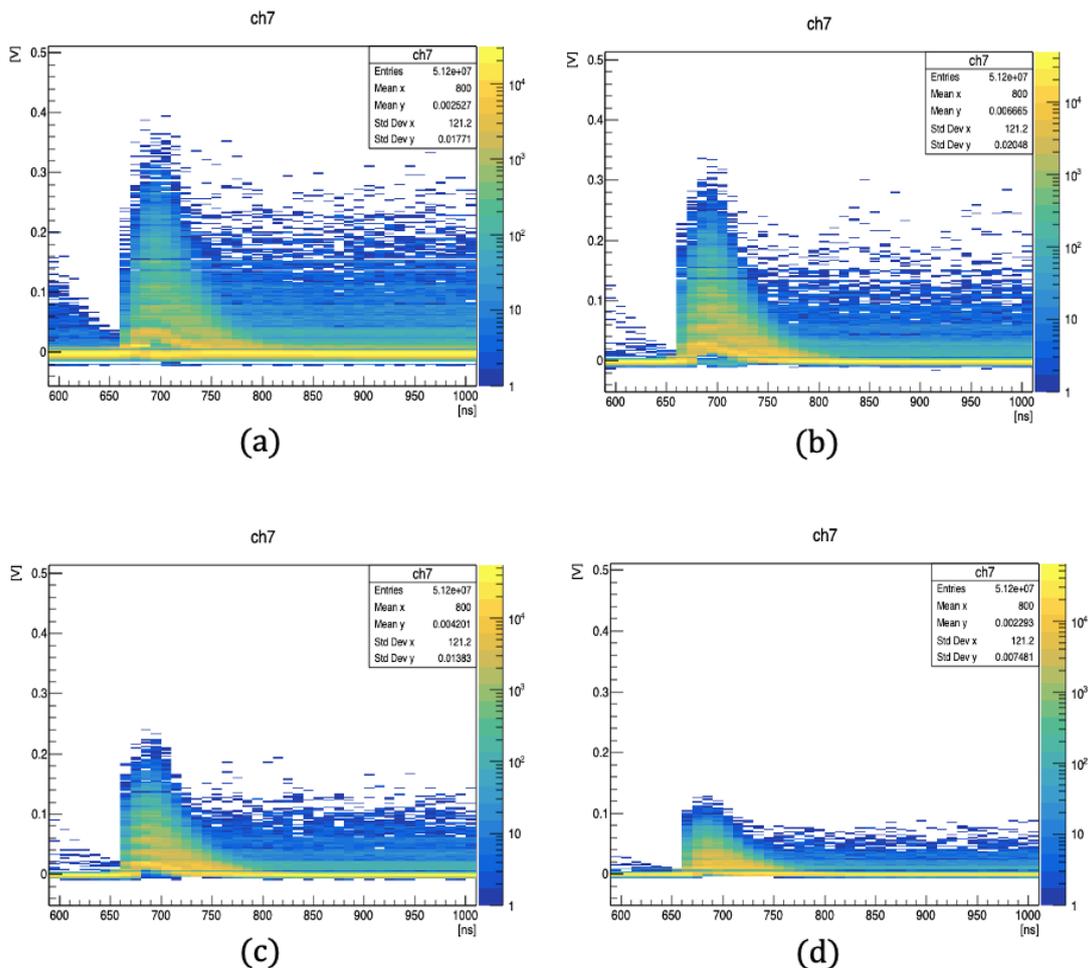


図 5.8: SHP_R1 を変化させながら取得した 100,000 イベントの MPPC 信号の波形を重ねてプロットした図。(a) SHP_R1=4。(b) SHP_R1=3。(c) SHP_R1=2。(d) SHP_R1=1。

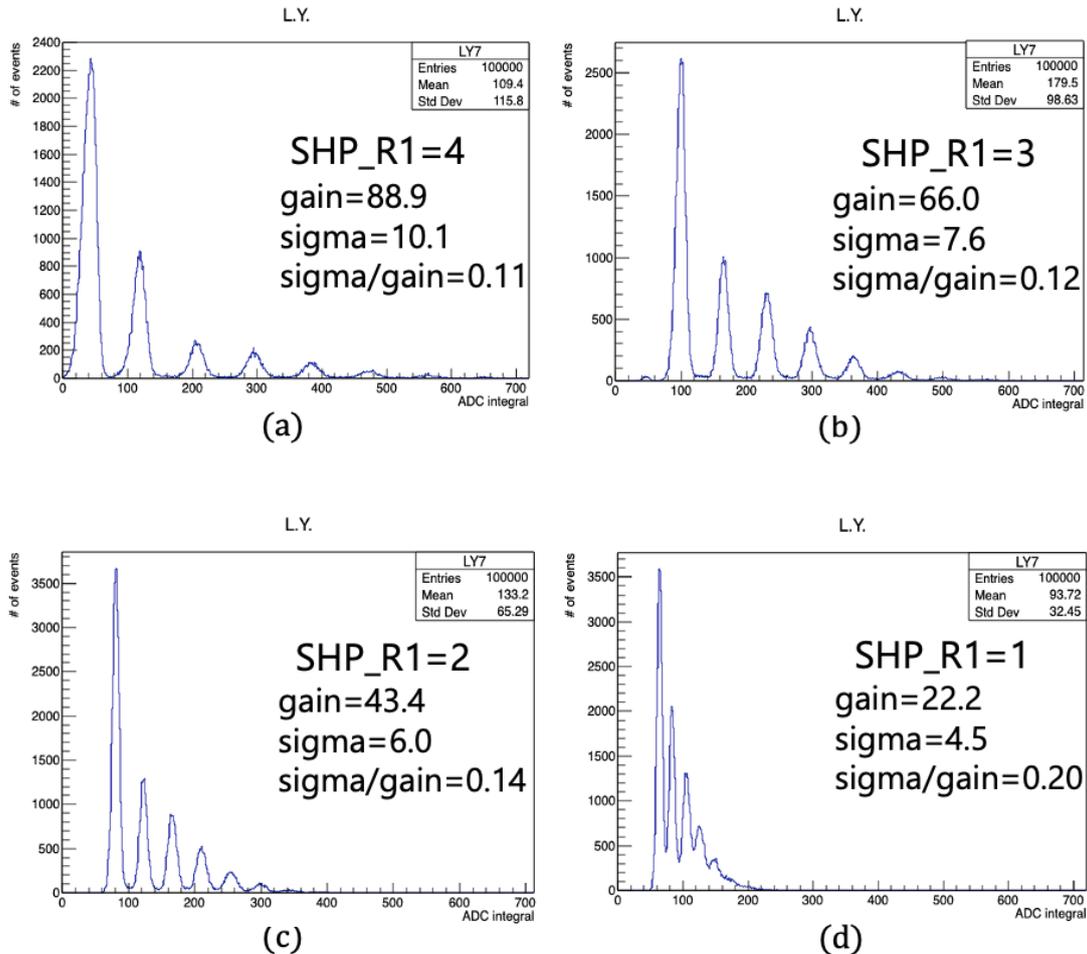


図 5.9: SHP_R1 を変化させながら取得した MPPC の光量分布。(a) SHP_R1=4。(b) SHP_R1=3。(c) SHP_R1=2。(d) SHP_R1=1。

(2) SHP_C の変更

(1) で SHP_R1=3 に設定したが、最大 32 p.e. 程度までしか測定できないためまだ不十分である。式 (5.1) の近似では SHP_C が現れていないが、実際には分母に SHP_C が入る形になるため、このパラメータを増大させることでゲインをさらに下げることができる。

SHP_C を変更しながら取った波形を図 5.10 に、波形を 650~850 ns で積分して得られた光量分布を図 5.11 に示す。ここで、SHP_R1=3 に設定している。図 5.10 より、SHP_C の増大に伴って波高が小さくなっていること、信号の時間幅が伸びていることがわかる。このうち後者は時定数が $SHP_R1 \times SHP_C$ で与えられることに起因している。また、SHP_R1 を変化させたときに比べ、同程度の波高でも光量の異なる波形がきれいに分かれている（波形の黄色い箇所がシャープに見える）。これは、RC が大きくなることにより回路のカットオフ周波数が下がり、ベースラインノイズが緩和されたためと考えられる。パラメータによらず固定した時間幅 650~850 ns で積分を行っているため、SHP_C を大きくした際に波高は下がるものの、信号の時間幅が広がることで積分区間中の S/N 比がよくなり、結果的に図 5.11 のようにゲインは一定となっている。したがって、SHP_C は大きい方がよく、最大の 8 を選択する。

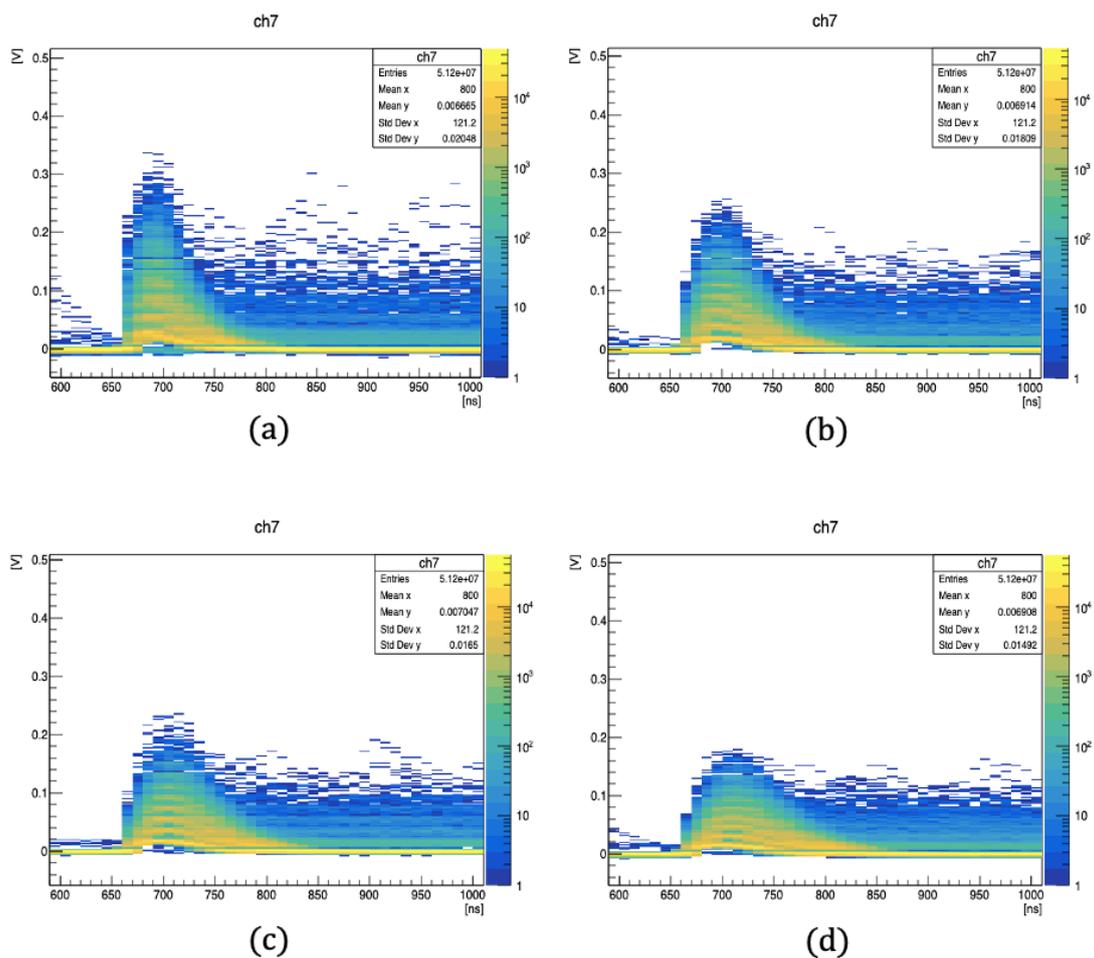


図 5.10: SHP_C を変化させながら取得した 100,000 イベントの MPPC 信号の波形を重ねてプロットした図。SHP_R1=3 に設定。(a) SHP_C=1。(b) SHP_C=3。(c) SHP_C=5。(d) SHP_C=7。

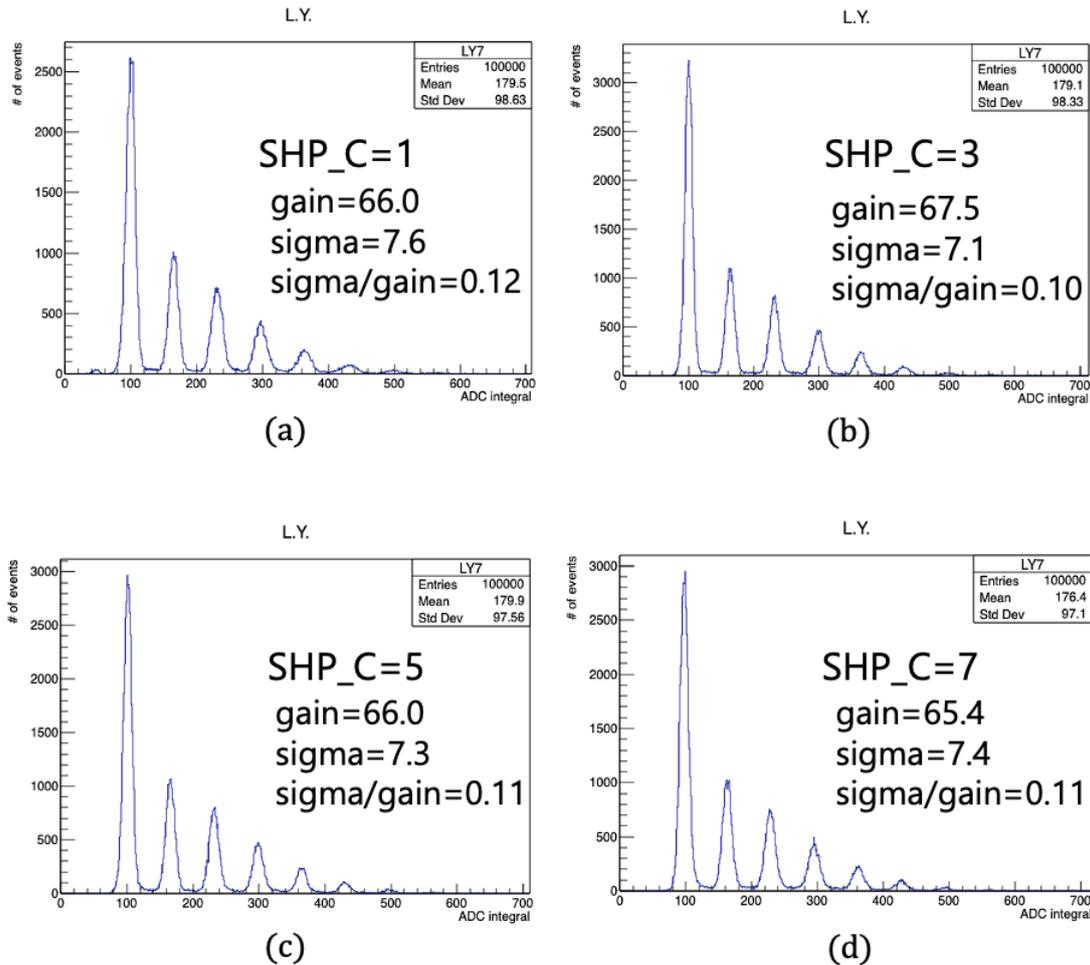


図 5.11: SHP_C を変化させながら取得した MPPC の光量分布。SHP_R1=3 に設定。(a) SHP_C=1。(b) SHP_C=3。(c) SHP_C=5。(d) SHP_C=7。

(3) VGA_C1 の変更

ここまでで SHP パラメータの調整が済んだので、フルスケールレンジがどの程度になっているかを一度確認する。

図 5.12 は MPPC 波形のピーク電圧を取り出したものである。設定は (SHP_R1, SHP_C)=(4,7)。1 p.e. に ADC 出力 25 mV 程度が対応するので、50 p.e. 程度までは検出可能である。しかし 150 p.e. までの線形性を測るためにはあと 3~4 倍のレンジが必要である。さらなるレンジの確保のために、VGA_C1 または VGA_C2 を調整してゲインを下げる必要がある。本項ではまず VGA_C1 の変更について述べる。他のパラメータの設定は、(SHP_R1, SHP_C)=(3,8) である。

G_{VGA} の式 (5.1) より、大雑把にゲインは VGA_C1 に比例するが、図 5.13 では VGA_C1 の値の低下にともなって波高も低下していることがわかる。分解能については図 5.14 に示したが、VGA_C1=2 の分解能は VGA_C1=4 と比べてもそれほど悪化していないものの、150 p.e. の測定にはまだ不十分であると考えられる。また、VGA_C1=1 は 200 p.e. 程度まで測定できそうであるが、分解能はかなり落ちている。そこで、VGA_C1 の変更については保留し、VGA_C2 を変更した場合にどうゲイン・分解能が変化するかを確認することにした。

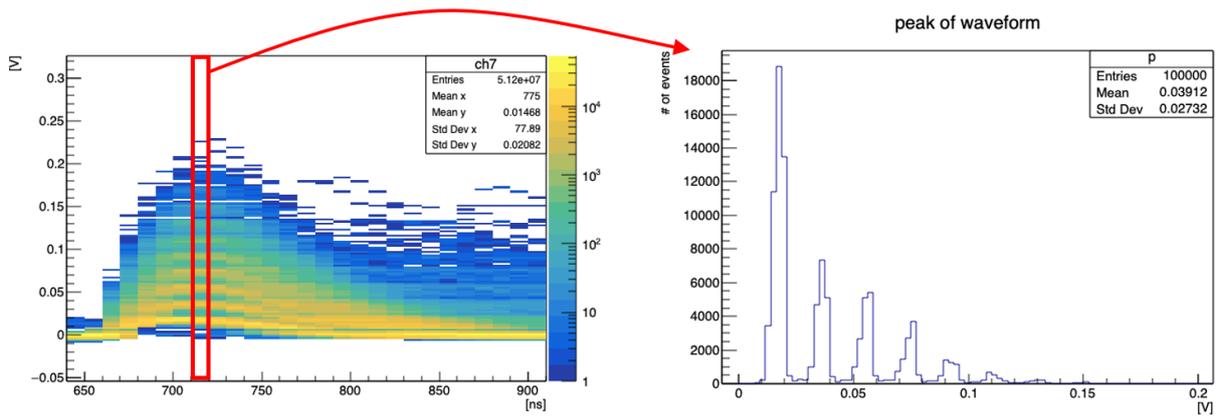


図 5.12: (SHP_R1, SHP_C)=(4,7)のもと、波形のピーク (710~720 ns の範囲) を取り出したもの。

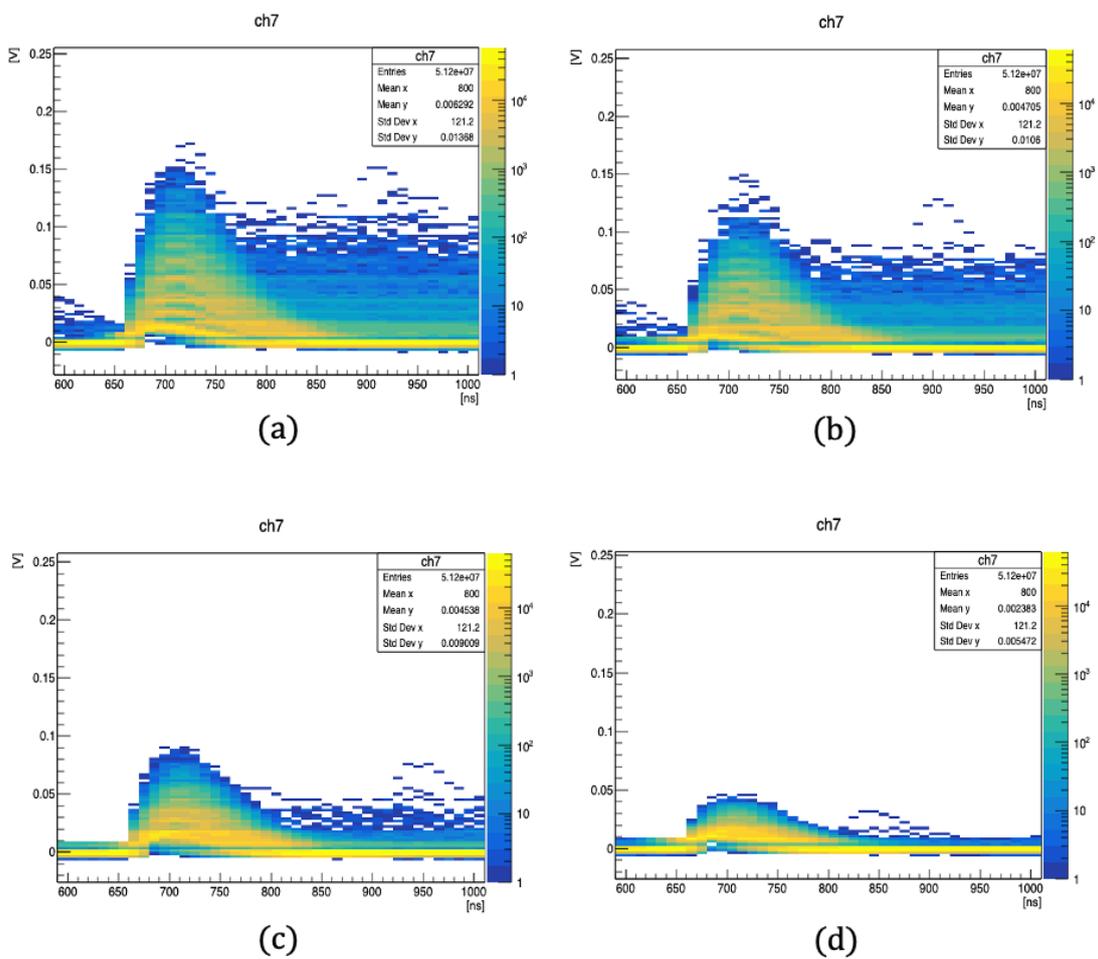


図 5.13: VGA_C1 を変化させながら取得した 100,000 イベントの MPPC 信号の波形を重ねてプロットした図。(a) VGA_C1=4。(b) VGA_C1=3。(c) VGA_C1=2。(d) VGA_C1=1。

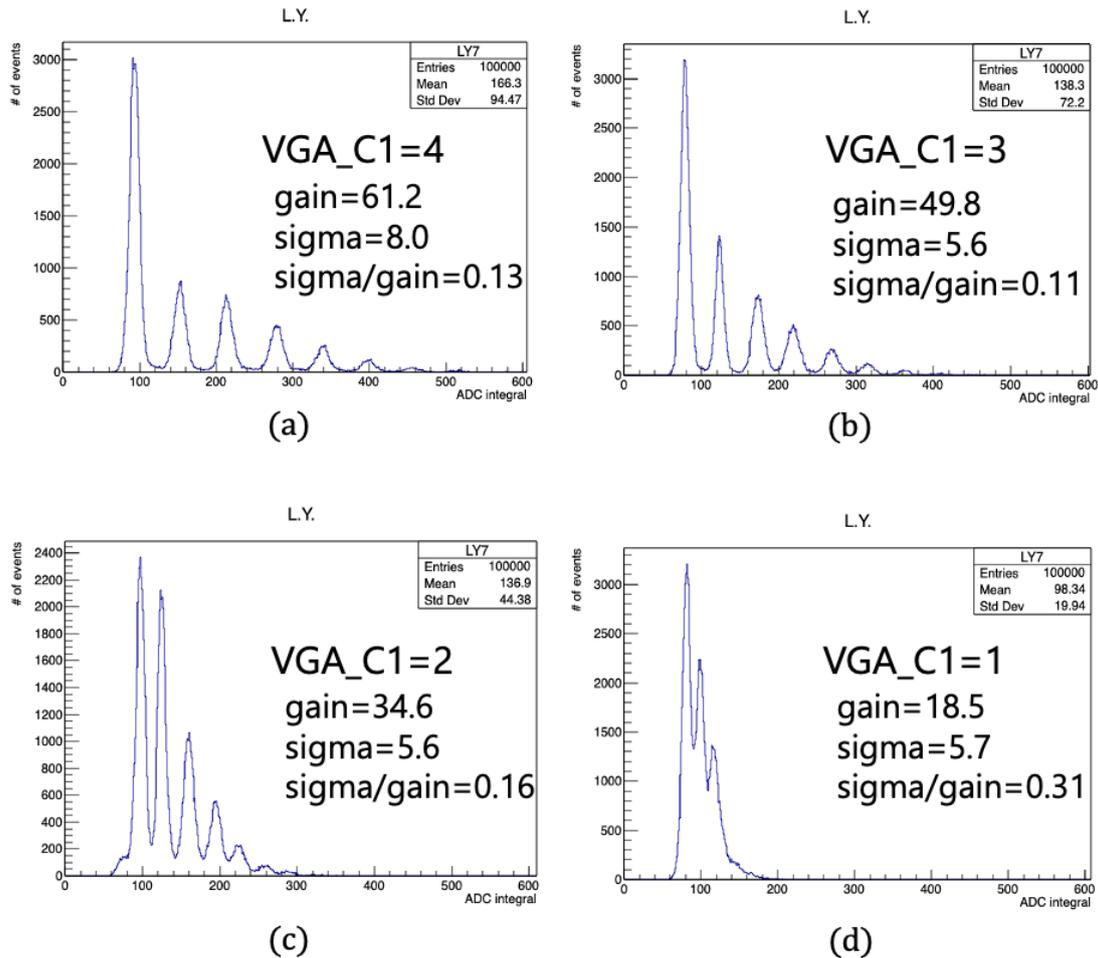


図 5.14: VGA_C1 を変化させながら取得した MPPC の光量分布。(a) VGA_C1=4。(b) VGA_C1=3。(c) VGA_C1=2。(d) VGA_C1=1。

(4) VGA_C2 の変更

VGA_C2 を変更しながら取った波形を図 5.15 に、波形を 650~850 ns で積分して得られた光量分布を図 5.16 に示す。他のパラメータの設定は、(SHP_R1, SHP_C)=(3,8) である。

図 5.15 で波高を確認すると、これは VGA_C2 の値の増大にともなって高くなっており、式 (5.1) と矛盾しない。また、図 5.16 に示したゲインも、VGA_C2=2 の場合に少し大きくなっているものの、おおよそ VGA_C2 に反比例している。図より、VGA_C2=3 であれば分解能を比較的良好に保ったまま 150 p.e. まで測定することができるので、(SHP_R1, SHP_C, VGA_C2)=(3,8,3) を採用する。

MPPC に照射する LED の出力が小さく 150 p.e. まででは出せないため、実際に 150 p.e. 程度まで測定できるかどうかは線形性評価と並行して行うことにした。

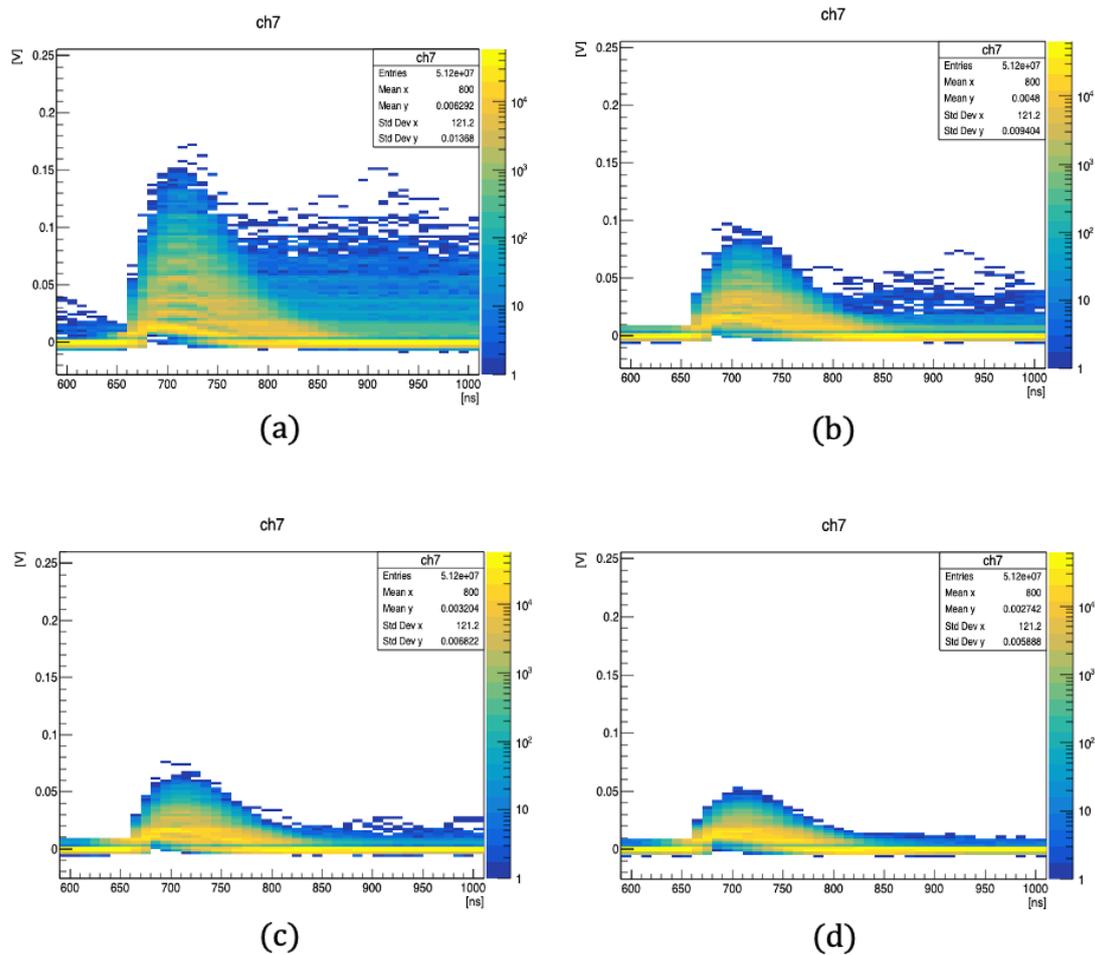


図 5.15: VGA_C2 を変化させながら取得した 100,000 イベントの MPPC 信号の波形を重ねてプロットした図。(a) VGA_C2=1。(b) VGA_C2=2。(c) VGA_C2=3。(d) VGA_C2=4。

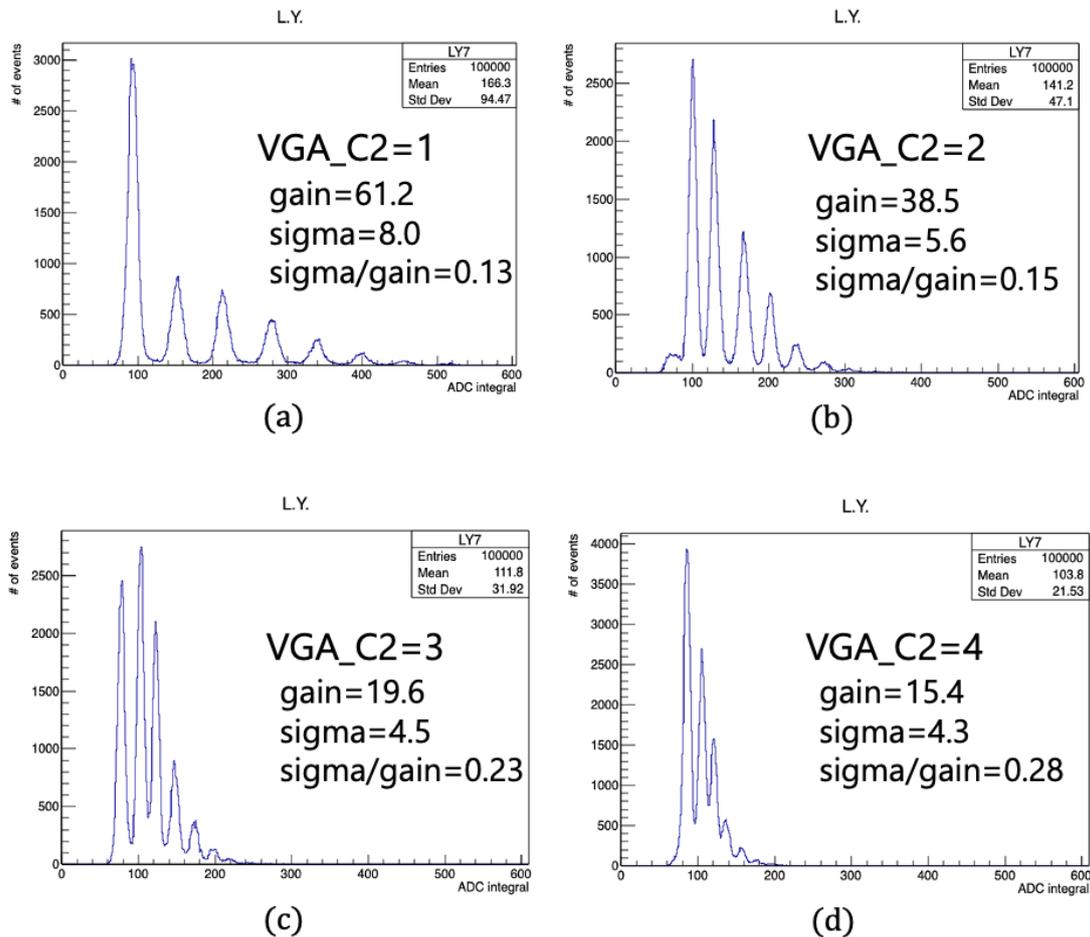


図 5.16: VGA_C2 を変化させながら取得した MPPC の光量分布。(a) VGA_C2=1。(b) VGA_C2=2。(c) VGA_C2=3。(d) VGA_C2=4。

5.6.2 線形性評価

十分な分解能、フルスケールレンジが確認できたため、線形性評価に移る。この評価では MPPC 入力ではなくインジェクタ入力を使用し、FG からのステップ波の振幅を 100 mV, 200 mV, ... と変化させながら入力することで MPPC からの異なる光量の信号を再現した。ここで、ステップ波の振幅は電荷量に対応している (5.2 のインジェクタ容量で電荷量へと変換されている)。

線形性評価の方法は以下の通り。

- (1) 100 mV~1600 mV まで振幅を変化させながら ch3 に FG 信号を入力。
- (2) 信号の波形を 650~850 ns で積分して、MPPC の光量に対応する値を計算。
- (3) 横軸に FG の振幅、縦軸に光量をプロットし、振幅の小さい方から $n(> 3)$ 個のデータ点で直線フィッティング。
- (4) 直線を基準にデータ点がどれだけずれているか計算し、1%のずれ (残差) で収まるデータ点の個数が最大となるまで n を増やして (3) を繰り返す。

- (5) MPPC 信号から 2 p.e. ピークとゲインを計算した後、FG 信号の振幅の小さいデータ点 5 つについて横軸振幅、縦軸光量でフィッティングを行い、FG 信号の振幅に光量を対応させる。この振幅-光量対応から、1%のずれで収まっている最大の点の光量を求める (図 5.17)。

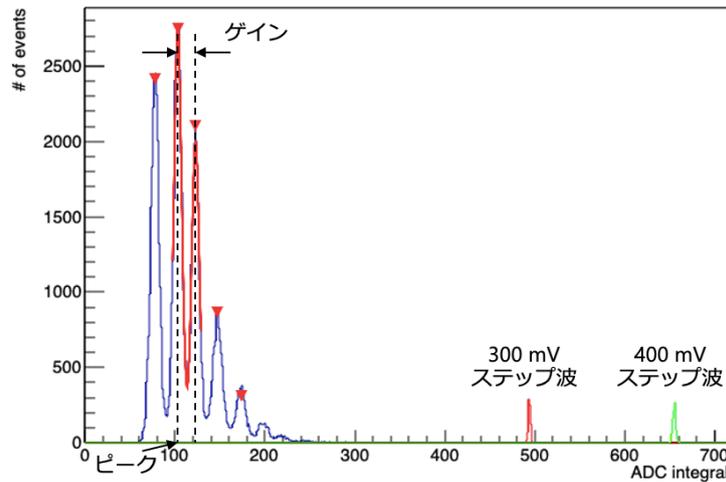


図 5.17: (SHP_R1, SHP_C, VGA_C2)=(3,8,3) の設定で取った MPPC の光量分布 (図 5.16 と同じもの) と、FG から振幅 300 mV、400 mV のステップ波を入力した際の MPPC 模擬信号を積分したイベント。

線形性評価の結果を図 5.18 に示す。(b) より、FG 信号の振幅 1000 mV までは残差 1%以内で線形性が成り立っている。この振幅 1000 mV を光量に変換すると 99.8 p.e. であり、100 p.e. 程度までの線形性を達成している。

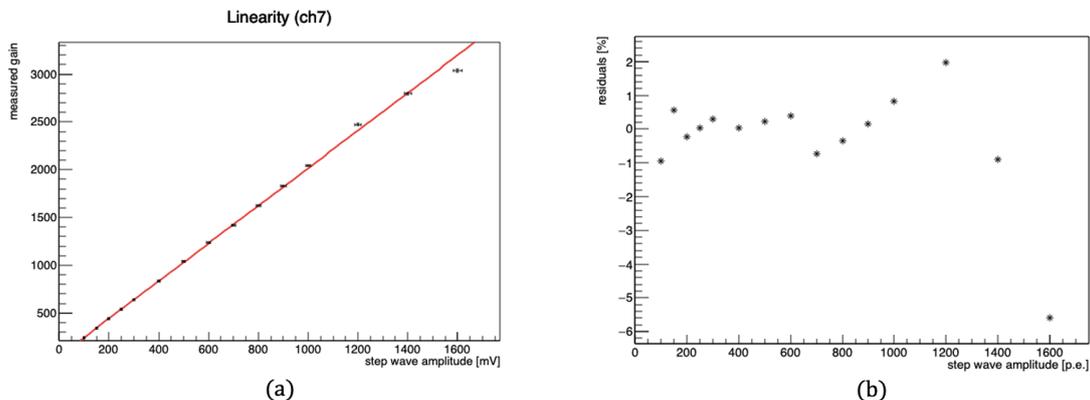


図 5.18: 線形性評価の結果。(a) 横軸は FG 信号の振幅、縦軸は信号の波形を 650~850 ns で積分して得られた値。直線は残差が 1%以内で収まるデータ点の数が最大になる場合のフィッティング結果。(b) 横軸は FG 信号の振幅、縦軸は (a) の直線とデータ点とのずれ。

5.6.3 チャンネル間クロストーク

あるチャンネルに大きな信号が入った際に他のチャンネルにクロストークがあるかどうか (チャンネル間クロストーク) は以下の手順で確認した。

- (1) あるチャンネルに小さな信号 (5 p.e. 程度) を入れてデータを取得し、全チャンネルについて信号領域 (650~850 ns) 外で ADC の標準偏差 σ を求める。
- (2) 同じチャンネルに大きな信号 (100 p.e. 以上) を入れてデータを取得し、全チャンネルについてイベントごとに ADC の平均 μ を信号領域外で計算する。そして、3つの連続した時間 (30 ns) で ADC が $\mu + 5\sigma$ を超えていれば「信号が見られた」としてカウントする。なお、ここで 100 p.e. 以上としたのは dE/dx の大きな陽子やニュートリノ反応点付近で複数の粒子がエネルギーを落とす場合の典型的な値が 100 p.e. 程度であるからである。
- (3) (1) と (2) をすべてのチャンネルに対して行う。データは 100,000 イベントである。

結果は表 5.2 の通り。チャンネル 1 や 2 に入力し同じチャンネルで読みだした際に少なくないイベントがカットされている。これは、チャンネル 1 や 2 に入れる信号が真のステップ波ではなく十分に時間の長い矩形パルス波であることに起因する。本来であればステップ波の立ち上がりの部分が正極性の MPPC 信号を模倣するのだが、ステップ波の立ち下がりがつくる負極性の MPPC 模擬信号がある程度大きな ADC 値を持ってトリガーにかかる場合もある (図 5.19)。このとき、(2) の条件「ADC が時間的に連続する 3 点で $\mu + 5\sigma$ を超える」を満たさないためカウントされず表の対角のイベントが減少することになる。

表の非対角部分にあるイベント、つまりチャンネル間のクロストークがどのようになっているかは図 5.20 で確認した。図を見ると、多少他チャンネルの入力に同期したノイズのようなものが見られるものの、信号と混同するようなイベントはない。また、クロストークが起こる頻度としても 0.02% 程度であり、要求の 1% は十分に達成している。

表 5.2: チャンネル間クロストーク。表中の値は各チャンネルに大きな信号を入れて 100,000 イベントのデータ取得を行ったときに得られた、上記の条件 (2) を満たすイベントの数。左端の列が大きな信号を入力したチャンネルであり、上端の行は読み出しチャンネルとなっている。

入力\読出	ch0	ch1	ch2	ch3	ch4	ch5	ch6	ch7
ch0	99994	0	0	18	0	0	0	0
ch1	0	99814	0	0	0	0	0	0
ch2	0	0	96532	0	0	0	0	0
ch3	0	0	0	99961	0	0	0	0
ch4	2	0	1	8	100000	4	0	0
ch5	0	0	0	3	0	100000	0	0
ch6	1	0	2	10	0	10	100000	0
ch7	0	0	0	2	0	1	0	100000

5.6.4 まとめ

本章では、分解能・フルスケールレンジの確保と線形性の評価、チャンネル間クロストークの評価の結果を述べた。これらのすべてについて、HK 実験の前置検出器からの要請を満たしていることを確認した。なお、本章で詳しく述べなかったが、他の (終端抵抗が同軸ケーブルにインピーダンス整合した) チャンネルについては、パラメータとして (SHP_R1, SHP_C, VGA_C2)=(3,3,3) を選択した以外には差はなく、チャンネル 4 では 92 p.e. までの線形性を確認した。

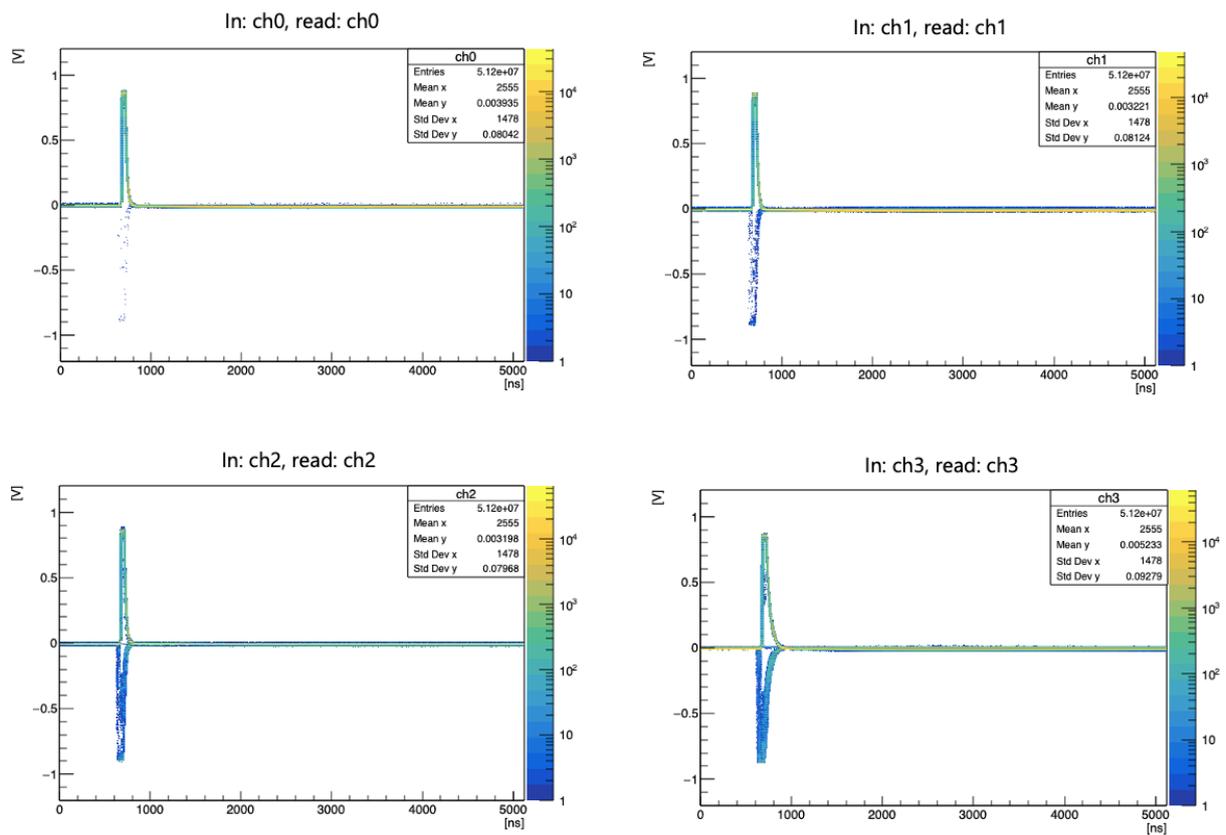


図 5.19: 表 5.2 の ch0-3 の対角部分をプロットしたもの。イベント数の欠損が負極性の信号によるものであることがわかる。

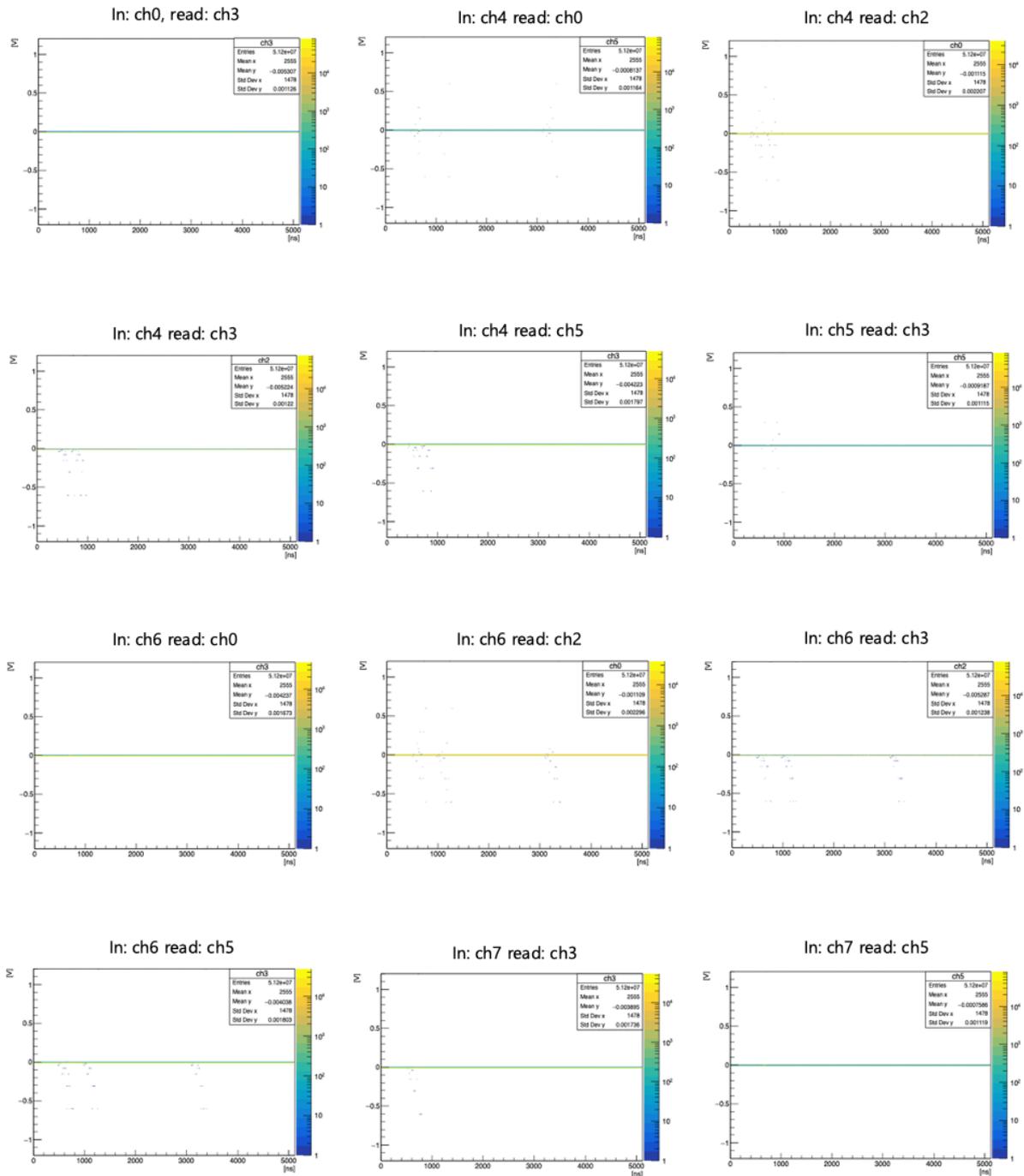


図 5.20: 表 5.2 の非対角部分のうち、値が 0 でない部分をプロットしたもの。各プロットのタイトルには入力チャンネルと読み出しチャンネルを表記している。

第6章 TDCの実装

6.1 目的

J-PARCのニュートリノビームは2章の図2.3に示したようなバンチ構造を持っている。1スピル4.1 μs あたり8バンチあり、いずれのバンチで起こった反応かを同定するためには $O(10\text{ ns})$ の時間情報が必要となる。また、現在T2K実験の前置検出器で用いられているTrip-tボードでは400 MHzのTDCを用いて2.5 nsで時間取得しているため、取り替えに際しては時間分解能2.5 ns以下であることが望ましい。本章では新ASICに接続したFPGAに1 nsのTDC実装を目指したその途中経過について述べる。

6.2 ファームウェア概要

TDCの実装はKEKの濱田氏により開発されたファームウェアを編集することで行うため、まずはこのファームウェアの概要を述べる。ファームウェアのおおまかな構造を図6.1に示す。図に青色、橙色で示したブロックはそれぞれVerilogで記述されたソフトウェアモジュール、FPGA外部のハードウェアモジュールを表す。

このファームウェアの動作は以下の通りである。まず、ADCから常にクロックとそれに同期するデータがADC_datareadへと送られており、このモジュール内でサンプリングされる。サンプリング後のデータADC_DATAはADC_dataread内のバッファに格納されると同時に、TriggerCreateへと送られる。内部トリガーでデータ取得を行うように設定している場合には、TriggerCreateでADC_DATAからトリガー信号を生成し、ADC_datareadへと送る。外部トリガーでデータ取得を行う設定では、PMODインターフェースへのTTL入力がHの場合にトリガー信号を生成し、ADC_datareadへ送る。トリガーを受け取ったADC_datareadはバッファから1イベント分のADC時系列データを取り出し、これにヘッダやフッタが付けられたEventDataをNetworkモジュールへと送る。NetworkモジュールにはSiTCPが組み込まれており、EventDataは外部のPHYチップへと送られる。これをPCへと送ることでデータの読み出しが可能となる。

上でトリガー設定として内部トリガーと外部トリガーがあることを述べたが、この切り替えやトリガー閾値の設定にはSlow Control信号を用いる。SiTCPはUDP通信によりSlow Control信号を受け取ることができ、Controlモジュールへと送られたSlow Control信号はこのモジュール内で設定用パラメータSetting_Parameterへとデコードされる。これが各モジュールのレジスタ値として設定されることで、ファームウェアの動作が変更される。

今回はこのVerilogHDLで書かれたファームウェアを編集した後Vivado 2021.2で論理合成、FPGAへのインストールを行った。FPGAボードとしてはDigilent製のNexys Videoを用いている。このFPGAボードにはArtix-7 FPGAチップの他、ネットワーク通信のためのPHYチップやPMODが実装されている。

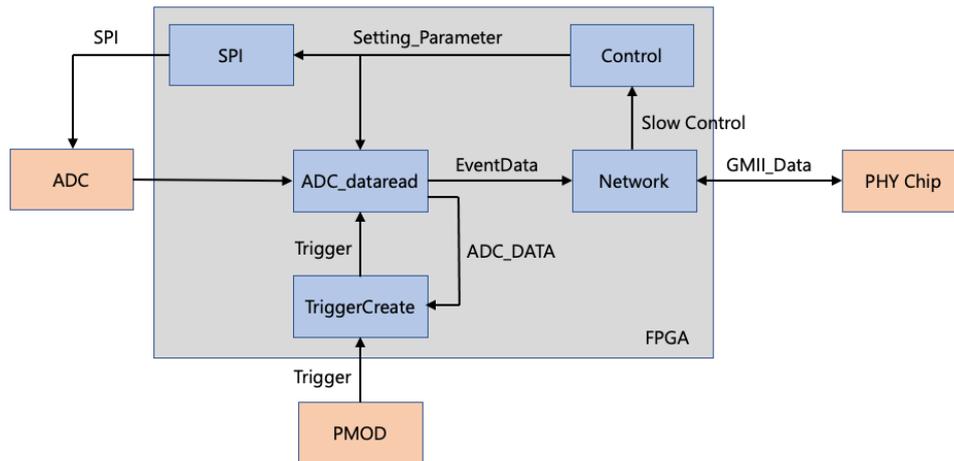


図 6.1: ファームウェアの構造。

6.3 20 ns TDC の実装

1 ns の TDC 実装をはじめるときの前にまずはどのバンチで生じたかを同定するために最低限必要となる $O(10 \text{ ns})$ の TDC の実装を行った。この TDC の実装には TriggerCreate からのトリガー信号を用いる。実装は単純で、トリガー信号が立ち上がったタイミングから次のタイミングまで、ファームウェアのシステムクロック (50 MHz) の数をカウントするだけである。このトリガー信号は 50 MHz でサンプリングされた後のものであるから、20 ns よりよい精度は出せないが目的のためには十分である。カウントした値は EventData に格納し、PC でデータ取得した後デコードして確認する。

時間分解能測定に際してはトリガーを内部トリガーに設定し、ファンクションジェネレータ T3AFG350 からの 1kHz 50 mV のステップ信号をチャンネル 0 に入力した。ASIC 入力部のパラメータ設定は 5 章で定めた $(\text{SHP_R1}, \text{SHP_C}, \text{VGA_C2}) = (3, 3, 3)$ である。このとき得られた TDC 分布を図 6.2 に示す。図 6.2 の右の赤線は TDC 分布をガウス関数でフィットした結果であり、その時間分解能は 24.9 ns であった。T3AFG350 のカタログによれば、ステップ信号の立ち上がり時間は 2.4 ns、ジッタは 100 ps であるから 20 ns よりは少し悪いものの、8 バンチの間隔 581 ns よりは十分小さく、バンチの同定にはこの TDC が使用できるレベルであることがわかった。

なお、図 6.2 の左のプロットで TDC が 1 ms の倍の時間にも分布しているが、これは 50 mV のステップ信号入力では、ADC 値が閾値を超えない場合があるためである。しかし、今回は時間分解能の測定であるから問題はないとした。

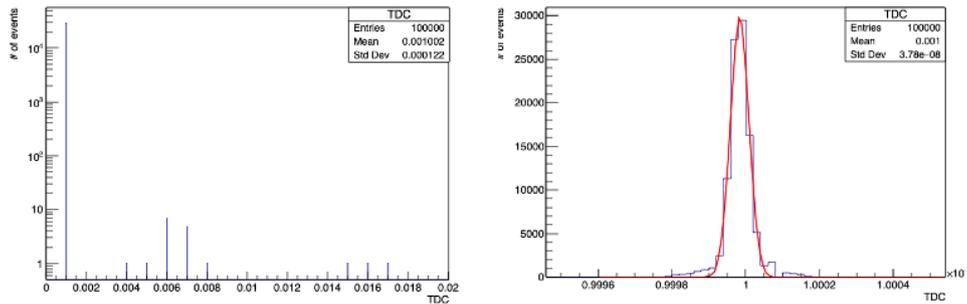


図 6.2: 20 ns TDC の測定結果。左が全データを log スケールで表示したものであり、右は 1 ms 周辺を拡大し、ガウス関数でフィットしたものの。

6.4 4相 TDC の実装

ASIC の評価では FPGA ボードとして Digilent 製の Nexys Video を用いるが、このボードに実装された FPGA Artix-7 の内部クロックは最大 450 MHz であり、時間分解能 2.5 ns の達成はトリガーのサンプリング周波数を 400 MHz へと上げることで可能である。しかし、ニュートリノ反応の精密な同定にはさらに時間分解能が高い方がよい。2.5 ns より良い時間分解能は単純にクロック周波数を上げることで達成できないため、位相のずれた複数のクロックを用い、各クロックの立ち上がりを用いる。今回は 250 MHz のクロックを正確に 90° ずつずらした 4 相クロックを用い、1 ns の達成を目指した。今回はプロトタイプのためチャンネル 0 のみ TDC を実装しており、ADC との同期も取っていない。なお、実装に際しては [57]、[58] を参考にした。

6.4.1 4相 TDC の概要

図 6.3 に実装した 4 相 TDC の概要を示す。この TDC は外部からのトリガー入力 Trigger が H となると時間計測を始め、チャンネル 0 に設定した VTH_COMP の値を超えた際に比較器から出力される 1 bit 信号 ASD_DO[0] が H となるまでの時間を返す。どのクロックにも同期しない信号は ASD_DO[0] のみのため、1 ns の TDC 実装のためには必然的に入力信号としてこれを用いる必要がある。Coarse Counter は Trigger 入力後から 50 MHz SYSCLK の立ち上がりごとに 16 bit の CoarseTDC[0][15:0] を 20 ずつカウントアップする、20 ns 精度の TDC である。この TDC では 1 ns を達成できないので、SYSCLK 1 クロック中に 20 回のサンプリングが可能のように 90° ずつ位相の異なる 4 つの 250 MHz クロックを用意し、Fine Counter ではこの 4 つのクロックの立ち上がりで ASD_DO[0] をサンプリングする。Fine Counter からは 50 MHz ごとに、ASD_DO[0] が H になったかどうかを示す 1 bit 信号 ASD_Rise_ch[0] と、20 回のサンプリング点のどこで ASD_DO[0] が H になったかという情報をもつ 5 bit の FineTDC[0][4:0] が出力される。ASD_DO[0] が H になると、上記の CoarseTDC[0][15:0] と FineTDC[0][4:0] が足し合わされ、32 bit 信号 TDC[0][31:0] としてデータが記録される。なお、ここで冗長な 32 bit としたのはデータを PC でデコードする際に簡単になるからである。

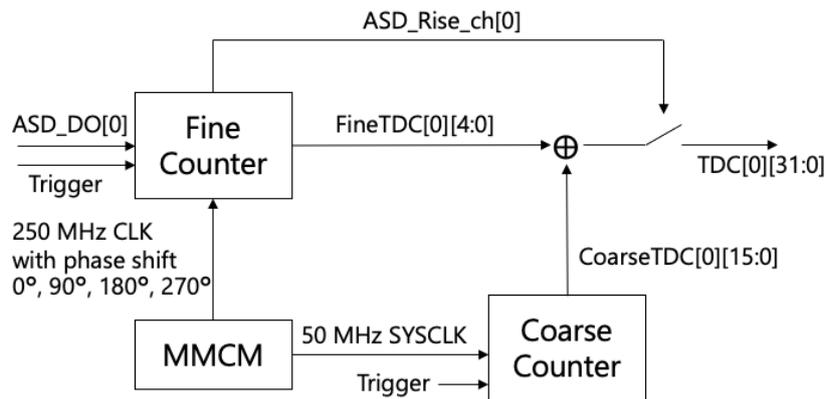


図 6.3: 4相クロック TDC の概要。

6.4.2 Fine Counter

Coarse Counter は 50 MHz でカウントアップを行う単純な構造であるが、Fine Counter は位相の異なる 4 つの 250 MHz クロックを用いてサンプリングを行う必要がある。また、FineTDC[0][4:0] は 50 MHz で出力されるが、このためには 250 MHz から 50 MHz へのクロックの乗り換えも必要である。したがって、Fine Counter は特別な実装をする必要があり本小節ではその実装の詳細を述べる。

図 6.4 に Fine Counter の構造を示す。Fine Counter では図 6.4 中の括弧付き番号に対応して (1) ~ (4) のステップで処理を行う。

- (1) ASD_DO[0] を 90° ずつ位相の異なる 4 つの 250 MHz クロック (250 MHz CLK(0°)、250 MHz CLK(90°)、250 MHz CLK(180°)、250 MHz CLK(270°)) の立ち上がりでサンプリングし、1 ns 精度の情報を得る。位相ずれが 0°、90°、180°、270° の 250 MHz クロックでサンプリングしたデータをそれぞれ ASD_sampled_stage0[0]、ASD_sampled_stage0[1]、ASD_sampled_stage0[2]、ASD_sampled_stage0[3] とし、これら 4 bit のデータをまとめて ASD_sampled_stage0[3:0] と書くことにする。
- (2) データ読み出しのためには位相ずれをなくす必要がある。ここでは 250MHz CLK(0°) を接続した D フリップフロップ (DFF) を用いることで、ASD_sampled_stage0[3:0] を 1 つの 250MHz クロックに同期した 4 つのデータへと変換する。ここでのデータは (1) と同様に ASD_sampled_stage1[3:0] と書く。また、このビット列の並びを逆順に変えたものを ASD_sampled_stage1_inv[3:0] と書く。
- (3) 50MHz SYSCLK へと周波数の乗り換えを行うため DFF を 5 段用意し、順に後段へと送る。
- (4) (3) の DFF5 段にデータがたまったタイミングで SYSCLK に同期してデータが 20 個の DFF に送られる。図 6.4 のように Q1,...,Q20 を定め、Q1 を最上位ビットとして FineTDC[0][4:0]=Q1,...,Q20 と並べると、これは SYSCLK 1 クロック (20 ns) 中に入力された ASD_DO[0] を 20 個の点でサンプリングしたときの時系列データとなっている。Q1 から順に古く、例えば ASD_DO[0] が 20 ns 中の 7 ns で立ち上がり、13 ns で立ち下がる場合には FineTDC[0][4:0]=0x03F80 (0000 0011 1111 1000 0000) となる。

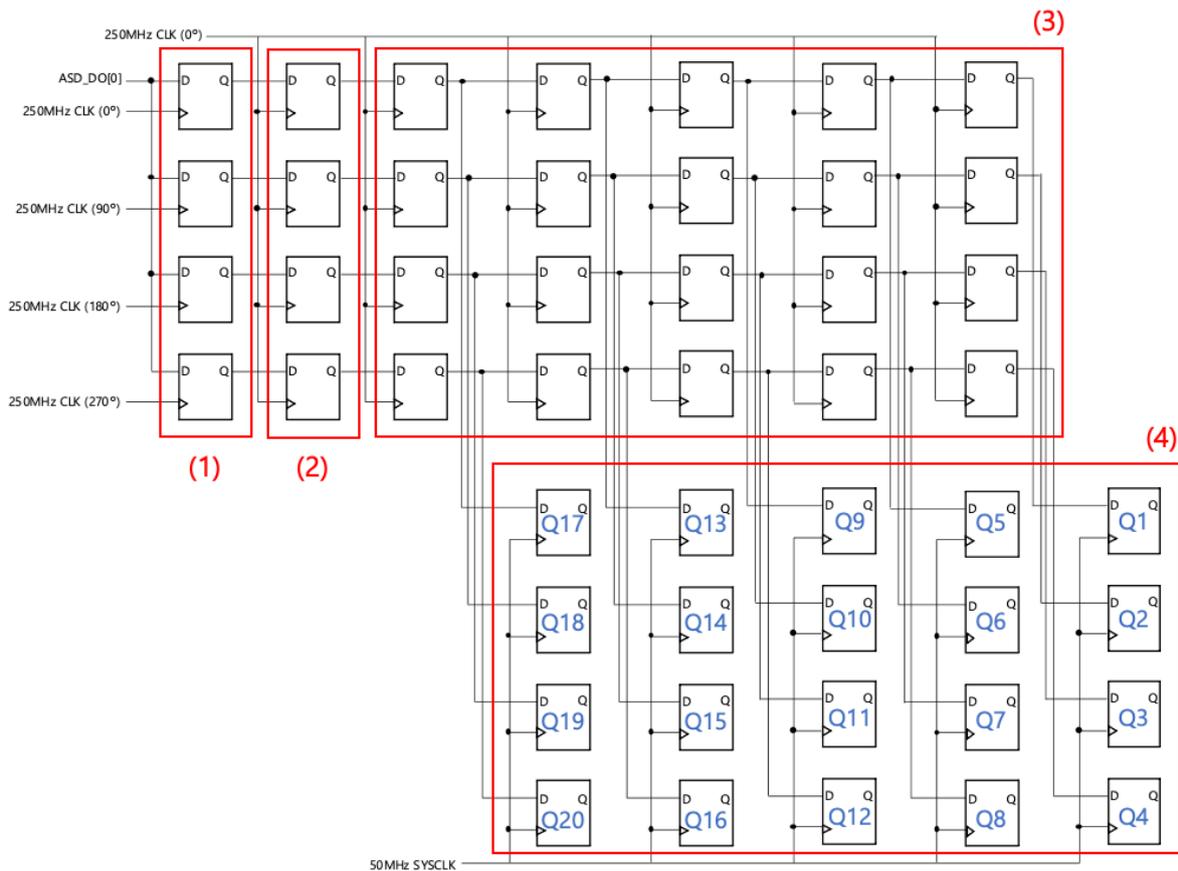


図 6.4: Fine Counter の構造。

この Fine Counter の (1)、(2) の動作を図 6.5 に示す。(1) では 4 つの各クロックの立ち上がりのタイミング（青色線、橙色線）でサンプリングが行われる。サンプリングされたデータ ASD_sampled_stage0[3:0] は、立ち上がりのタイミングに応じて 0 から F までの過渡的な遷移を行う。図 6.5 のように 250 MHz CLK(90°) の直前に ASD_DO[0] が立ち上がる場合には 0→2→6→E→F と遷移する。立ち上がりは 250 MHz CLK(0°)、250 MHz CLK(180°)、250 MHz CLK(270°) の直前にある場合にはそれぞれ、0→1→3→7→F、0→4→C→D→F、0→8→9→B→F のように遷移する。(2) では 250 MHz CLK(0°) の立ち上がりのタイミング（橙色線）でサンプリングが行われる。(2) でデータを 250 MHz CLK(0°) に同期させた後も、ASD_DO[0] が 4 つのどのクロックの直前で立ち上がったかという情報は ASD_sampled_stage1[3:0] の遷移の仕方に現れる。250 MHz CLK(0°) の直前であれば 0→0(F)→F であり、他のクロックの場合には位相ずれの小さいクロックから順に、0→E→F、0→C→F、0→8→F となる。実際にデータを 50 MHz に送る際には ASD_sampled_stage1_inv[3:0] のようにビット列を並べた方が、ASD_DO[0] が立ち上がっている間 1 が続くため直観的でわかりやすくなる（図 6.5 の最下段を参照）。

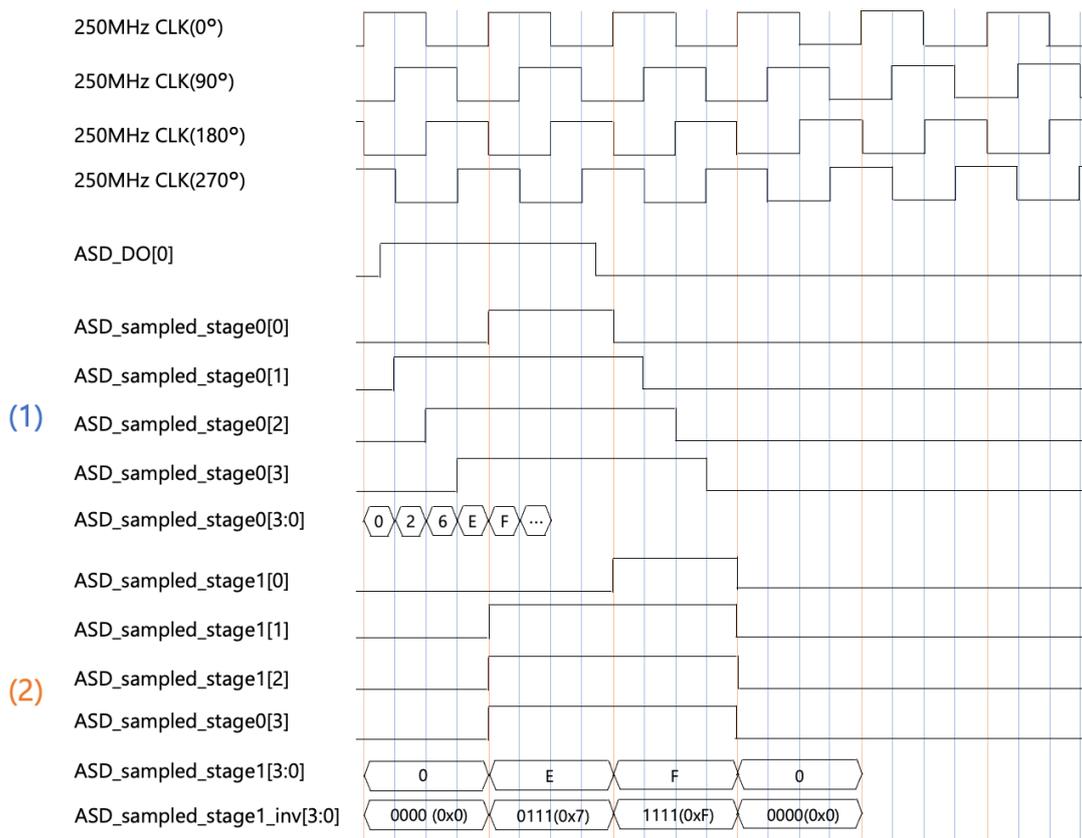


図 6.5: 250 MHz CLK(90°) の直前に ASD_DO[0] が立ち上がった場合のデータの様子。

6.5 TDC 実装の結果

外部トリガーの約 $2 \mu\text{s}$ 後に信号をチャンネル 0 に入れた際に得られた TDC のヒストグラムを図 6.6 に示す。左図からおおよそ $2 \mu\text{s}$ の位置にデータが集中していることがわかるが、TDC=0 にも 14912 イベント存在する。これは、 Q_{all} が $0x03F70$ ($0000\ 0011\ 1111\ 0111\ 0000$) のように 1 が連続していないようなイベントを TDC=0 とするようにしたためであり、まだ実装が不十分である。また、(2) で定義した ASD_sampled_stage1[3:0] は、ASD_DO[0] の立ち上がり位置に応じて 250 MHz の 1 クロックが進むごとに $0 \rightarrow E \rightarrow F$ 、 $0 \rightarrow C \rightarrow F$ 、 $0 \rightarrow 8 \rightarrow F$ 、 $0 \rightarrow 0 \rightarrow F$ という値の遷移を行うはずであるが、 $0 \rightarrow x \rightarrow F$ という立ち上がりがあったときに x が E、C、8、0、F のどれでもない場合になるイベントが 4,200 イベントあり、これも TDC=0 としている。また、右図からわかるように、1940 ns や 1960 ns といった、 $0 \rightarrow 0 \rightarrow F$ の立ち上がりをするイベントが極端に多くカウントされていることがわかる。このような部分を除くと TDC は 1950 ns を中心に 20 ns 程度の広がりを持って分布している。これは外部トリガーをはじめに 50 MHz で処理してしまっていたためであり、ASD_DO[0] と同様に 4 相クロックで読み出すことで分解能を向上させることが可能であると考えられる。ただし、ASD_DO[0] の読み出しにおいても ASD_sampled_stage1[3:0] が異常な値の遷移をする場合が多く見られるため、単に外部トリガーを 4 相クロックで読み出す変更を行うだけでは 1 ns での達成は難しそうである。

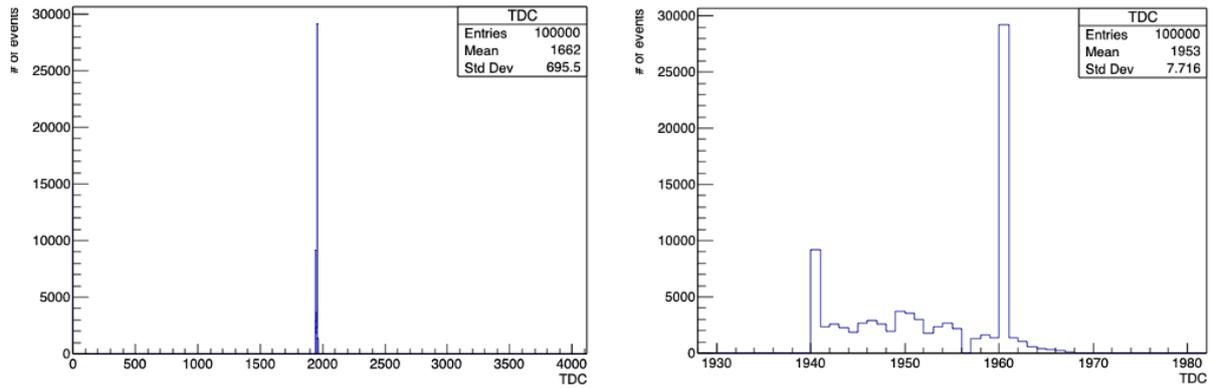


図 6.6: TDC の分布。全体（左）と 1950 ns 周辺を拡大した図（右）。

6.6 今後の予定

今回の TDC 実装では 1 ns の達成を目的に実装を始めたため、250 MHz クロックを使う必要があった。しかし、250 MHz クロックを用いる場合にはタイミング違反が生じやすい。というのは、例えば図 6.3 の (1) から (2) のデータ受け渡しを考えると、(1) で 250 MHz CLK(270°) でサンプリングしたデータが (2) の 250 MHz CLK(0°) でサンプリングされるまでの時間はわずか 1 ns であり、FPGA の信号線間の伝送速度よりも短い。したがって、今後はまず 100 MHz クロックを 4 相用いて 2.5 ns の分解能を持つ TDC の実装を目指し、これが完成した後に 1 ns まで可能かどうか TDC 実装を進めることにする。

第7章 まとめ

宇宙における物質・反物質非対称性の起源を探るうえでニュートリノにおける CP 対称性の破れが大きな役割を果たすと考えられている。このニュートリノにおける CP 対称性の破れの発見を一つの目的として、2027年にはハイパーカミオカンデ実験が始まる。ハイパーカミオカンデ実験では現在 T2K 実験で使用されている前置検出器がそのまま使用される予定であるが、その際前置検出器のシンチレータの経年劣化による観測光量の減少や、エレクトロニクス (ASIC) の故障が問題となる。

シンチレータについてはハイパーカミオカンデ実験で 10-20 年にわたり使用するため、この長期間での経年劣化による光量の低下が測定に影響を及ぼすか評価する必要がある。シンチレータの経年劣化による光量の低下の割合を見積もるため、まず INGRID シンチレータと SuperFGD シンチレータを高温環境下において酸化劣化を促進することで 20 年の経年劣化を再現した。この再現した経年劣化の前後での光量を測定し変化を確認したところ、測定精度約 3% の範囲内で光量の低下はないという結論に至った。次に、測定精度の 3 倍の光量の低下が実際に起こっていたとして、その場合にハイパーカミオカンデ実験での測定に影響があるかどうか GEANT4 の光学シミュレーションで確認した。確認項目は、光量減少による SuperFGD での短飛程の陽子・ π 粒子の粒子識別効率の変化、INGRID でのミューオン検出効率の変化の 2 つである。前者については光量減少後に粒子識別を誤る確率が 0.02%、後者については検出効率の低下が $0.048 \pm 0.029\%$ 程度という結果になり、どちらも測定に影響のない変化であることを確認した。

ASIC の故障に対しては新開発の多チャンネル MPPC 読み出し用 ASIC に取り替えることで対処する。この新 ASIC は多くの実験での使用を目指した汎用 ASIC であるため、ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器で使用可能かどうかは別に調べる必要がある。要求は 1 p.e. を十分識別可能な分解能、100 p.e. 程度までの応答の線形性、1% より十分小さいチャンネル間クロストークである。今回の測定により、分解能は 1 p.e. のピークが十分に見える程度であり、線形性については 1% の残差で 99.8 p.e. まで成り立っていることを確認した。また、チャンネル間クロストークは 0.02% 程度で、要求の 1% より小さいことを確認した。

ASIC を前置検出器で使用するためには、ニュートリノ反応が J-PARC ニュートリノビームの 8 バンチのうちどこで起こったかを知るために最低でも $O(10 \text{ ns})$ の時間分解能が必要となる。また、新 ASIC は Trip-t ASIC の代わりに用いるため Trip-t ボードの時間分解能 2.5 ns より良いことが必要であり、今回は 1 ns を目指した。結果として 20 ns 程度の時間分解能までは確認できたが、1 ns の時間分解能は 4 相 TDC の実装がうまくいかなかったため確認できなかった。今後の予定としては、4 相 TDC のクロック周波数を 250 MHz から 100 MHz へと下げることでタイミング違反をなくし、まずは 2.5 ns 程度の TDC 実装を行う。

謝辞

本論文を作成するにあたりご助力いただいたみなさまにこの場を借りて感謝の意を表します。

指導教員の中家剛教授には、本論文や審査書類の添削をしていただきました。また JENNIFER2 Summer School や春の学校、NNN22 などの多くのイベントにお誘いいただき、発表の機会をいただきました。副指導教員の木河達也助教は、物理実験をほとんど行ったことのない僕に、MPPC の使い方や測定時に生じる電氣的ノイズの抑え方、実験データの解析方法など 0 から必要なことをすべて丁寧に教えてくださいました。また、実験で行き詰まった際にはいつも的確な助言をいただきました。修士論文のテーマに関してもその多くが木河さんからの提案であり、ROOT、GEANT4、VerilogHDL など実験に必要な様々な手段を学ぶことができました。修士論文をこのような形でまとめることができたのも木河さんに幾度となく添削していただいたおかげです。出張手続きなどの事務的なことも教えていただき、本当に何から何までお世話になりました。KEK E-Sys グループの本多良太郎准教授、宮原正也准教授、濱田英太郎氏には新しい ASIC の説明をしていただきました。特に、濱田氏には読み出し用のファームウェアを 3 日間にもおよび説明していただき、変な質問も多くしましたが、すべてに答えていただきました。

京都 T2K グループの先輩である栗林さん、小田川さん、川上さんには実験をすすめる上で様々な助言や実験に必要な道具をいただきました。栗林さんには NIM EASIROC モジュールや、それを動かすためのプログラムの使い方を教えていただいた他、光学シミュレーションのもととなるファイルもいただきました。小田川さんには NIM EASIROC モジュールの設定ファイルの変更方法について教えていただいた他、2 回目の加速劣化試験の際に必要な同軸ケーブル-フラットケーブル間の変換インターフェースもいただきました。川上さんには実験中に生じたつまらない質問をしたこともありましたが、それに対しても丁寧に答えていただきました。京都の先輩で宇宙線研へと移られた野口さんには、ASIC 評価をはじめた際にどう実験を進めればよいか示していただきました。T2K 実験の同期の児玉君、西森さん、古藤君、永井君や後輩の小林君、渡辺君、沖永君には T2K コラボレーションミーティングや春の学校で顔を合わせ、実験の話をしたり、一緒に食事をしたりと非常に楽しい時間を過ごせました。ありがとうございました。

最後になりますが、入学前に落ち込んでいる時期から僕を励まし、2 年間大学院に通わせてくれた家族に感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] W. Pauli, "Dear radioactive ladies and gentlemen", *Phys. Today* **31N9** p.27, 1978.
- [2] C.L. Cowan, F. Reines, "Detection of the free neutrino: A Confirmation", *Science* **124** pp.103-104, 1956.
- [3] G. Danby *et al.*, "Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos", *Phys. Rev. Lett.* **9** pp.36-44, 1962.
- [4] D. Decamp *et al.*, "Determination of the Number of Light Neutrino Species", *Phys. Lett. B* **231** pp.519-529, 1989.
- [5] K. Kodama *et al.*, "Observation of tau neutrino interactions", *Phys. Lett B* **504** pp.218-224, 2001.
- [6] B. Pontecorvo, "Mesonium and anti-mesonium", *Sov. Phys. JETP* **6** p.429, 1957.
- [7] Z. Maki, M. Nakagawa, S. Sakata, "Remarks on the unified model of elementary particles", *Prog. Theor. Phys.* **28** pp.870-880, 1962.
- [8] C. Giunti, "Theory of Neutrino Oscillations", arXiv:hep-ph/0409230.
- [9] Y. Fukuda *et al.*, "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos", *Phys. Rev. Lett.* **81** pp.1562-1567, 1998.
- [10] Q.R. Ahmad *et al.*, "Measurement of the rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory", *Phys. Rev. Lett.* **87** P071301, 2001.
- [11] M.S. Athar *et al.*, "Status and perspectives of neutrino physics", *Prog. Part. Nucl. Phys.* **124** P103947, 2022.
- [12] M.C. Gonzales-Garcia, M. Maltoni, T. Schwetz, "NuFIT: Three-Flavour Global Analyses of Neutrino Oscillation Experiments", *Universe* **7** 12 p.459, 2021.
- [13] K. Abe *et al.*, "Constraint on the matter–antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations", *Nature* **580** 7803 pp.339-344, 2020.
- [14] W. Rodejohann, Xun-Jie Xu, "Trimaximal μ - τ reflection symmetry", *Phys. Rev. D* **96** 5 055039, 2017.
- [15] Zhi-zhong Xing, "The μ - τ reflection symmetry of Majorana neutrinos", arXiv:2210.11922 [hep-ph].
- [16] X. Qian, P. Vogel, "Neutrino mass hierarchy", *Prog. Part. Nucl. Phys.* **83** pp.1-30, 2015.

- [17] T2K Collaboration, "About T2K", <https://t2k-experiment.org/ja/about-t2k/>.
- [18] J-PARC, "加速器とは", <http://j-parc.jp/Acc/ja/index.html>.
- [19] K. Abe *et al.*, "The T2K Experiment", *Nucl. Instrum. Meth. A* **659** pp.106-135, 2011.
- [20] K. Abe *et al.*, "Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam", *Phys. Rev. D* **88** 3 P032002, 2013.
- [21] J.A. Formaggio, G.P. Zeller, "From eV to EeV: Neutrino Cross Sections Across Energy Scales", *Rev. Mod. Phys.* **84** pp.1307-1341, 2012.
- [22] 南野彰宏, 大谷将士, "T2K 実験ニュートリノビームモニター (INGRID)", 高エネルギーニューズ **29-1**, 2010.
- [23] K. Abe *et al.*, "Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector", *Nucl. Instrum. Meth. A* **694** pp.211-223, 2012.
- [24] 青木茂樹, 中屋剛, 塚本敏文, "T2K 実験 前置ニュートリノ測定器 ND280 Off-Axis", 高エネルギーニューズ **29-2**, 2010.
- [25] K. Yasutome, "Towards the measurement of neutrino cross-section on H₂O and CH target at 1 GeV region by T2K-WAGASCI experiment", *PoS NuFact2021* 075, 2022.
- [26] A. Blondel *et al.*, "The WAGASCI experiment at JPARC to measure neutrino cross-sections on water", *PoS EPS-HEP2015* 292, 2015.
- [27] D. Sgalaberna, "The T2K ND280 Upgrade", *PoS ICHEP2020* 175, 2021.
- [28] C. Jesús-Valls, "The SuperFGD prototype PID beam tests results", *J. Phys. Conf. Ser.* **2374** 1 P012030, 2022.
- [29] K. Abe *et al.*, "Hyper-Kamiokande Design Report", arXiv:1805.04163 [physics.ins-det]
- [30] Y. Kudenko, "Hyper-Kamiokande", *JINST* **15** C07029, 2020.
- [31] Hyper-Kamiokande Project, the next generation nucleon decay and neutrino experiment, <https://indico.fnal.gov/event/22303/contributions/246993/attachments/157567/206512/220721-Snowmass-Hyper-Kamiokande-Shiozawa-v0.3-1.pdf>
- [32] Current status and prospects of Hyper-Kamiokande, <https://www-kam2.icrr.u-tokyo.ac.jp/event/13/contributions/642/attachments/515/569/220929HKCurrentStatus-NNN22-asaoka.pdf>
- [33] K. Abe *et al.*, "Scintillator ageing of the T2K near detectors from 2010 to 2021", *JINST* **17** 10 P10028, 2022.
- [34] INGRID for Hyper-K, https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/member/kikawa/tmp/ingrid_hk.conv_20210120.pdf
- [35] The Production and Qualification of Scintillator Tiles for the ATLAS Hadronic Calorimeter, <https://cds.cern.ch/record/1075711/files/cer-002731189.pdf>

- [36] S. Joosten *et al.*, "Enhanced UV light detection using a p-terphenyl wavelength shifter", *Nucl. Instrum. Meth. A* **870** pp.110-115, 2017.
- [37] R. Luchowski, "Two-photon excitation of 2,5-diphenyloxazole using a low power green solid state laser", *Chem. Phys. Lett.* **501** pp.572-574, 2011.
- [38] A. K. Dutta, "Spectroscopic Study of Nonamphiphilic 2,2'-p-Phenylenebis(5-phenyloxazol) (POPOP) Assembled in Supramolecular Langmuir-Blodgett Films", *J. Phys. Chem. B* **101** 4 pp.569-575, 1997.
- [39] Plastic Scintillating Fibers, <https://www.kuraray.co.jp/uploads/5a717515df6f5/PR0150.-psf01.pdf>
- [40] FiberFin 4, <https://fiberfin.com/product/fiberfin4-finishing-machine/>
- [41] Technical note / MPPC, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008e.pdf
- [42] The WITS\$ guide to selecting a photodetector, <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/detector-selection/the-wits-guide-to-selecting-a-photodetector.html>
- [43] T. Matsubara, "Application of MPPC for T2K near detector upgrade", *JPS Conf. Proc.* **27** 011006, 2019.
- [44] MPPC S13360 series datasheet, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf
- [45] 栗林宗一郎, 修士論文 "T2K 実験における新型ニュートリノ検出器 Super FGD のための研究開発", https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/kuri_mt.pdf
- [46] 汎用 MPPC 読み出しモジュール, <http://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public/MPPC-Readout-Module>
- [47] Omega, EASIROC DATASHEET Version:5 April 2011.
- [48] MPPC S13081 series datasheet
- [49] 五味慎一, 修士論文 "半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築", https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/theses/master/gomi_mt.pdf
- [50] D. Beznosko *et al.*, "FNAL-NICADD extruded scintillator", <https://lss.fnal.gov/archive/2005/pub/fermilab-pub-05-344.pdf>.
- [51] B.D. Leverington *et al.*, "A 1 mm Scintillating Fibre Tracker Readout by a Multi-anode Photomultiplier", arXiv:1106.5649 [physics.ins-det].
- [52] 栗田口唯人, 修士論文 "T2K 実験次世代前置検出器 SuperFGD のビーム試験及びシミュレーションによる性能評価"
- [53] POPOP の発光波長分布, https://indico.cern.ch/event/143675/contributions/164201/attachments/132452/near_detector_workshop.pdf

-
- [54] O. Mineev *et al.*, "Scintillatro detectors with long WLS fibers and multi-pixel photodiodes", *JINST* **6** P12004, 2011.
- [55] 宮原正也, "MPPC 読み出し用汎用 ASIC の開発状況", 計測システム研究会 2021.
- [56] 任意波形発生器 T3AFG シリーズ (T3AFG200/T3AFG350/T3AFG500) 仕様書, <https://teledynelecroy.com/japan/pdf/cata/t3afg-200-350-500-spec.pdf>
- [57] Z. Yin *et al.*, "A high-resolution time-to-digital converter based on multi-phase clock implement in field-programmable-gate-array", *2012 18th IEEE-NPSS Real Time Conference*, pp.1-4, 2012.
- [58] 塩崎健弘, 修士論文 "Σp 散乱実験のための MPPC 多チャンネル読み出しシステムの開発"