

T2K 実験 WAGASCI 検出器
フロントエンドエレクトロニクスを用いた
電荷測定の線形性評価

横浜国立大学 理工学部
数物・電子情報系学科 物理工学 EP
学籍番号 1864100
小林 北斗

2022 年 2 月 15 日

概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC で作られたニュートリノビームを岐阜県飛騨市神岡町のニュートリノ検出器スーパーカミオカンデで観測するニュートリノ振動実験である。T2K 実験ではビーム標的から 280 m 下流に設置された前置ニュートリノ検出器群と後置ニュートリノ検出器であるスーパーカミオカンデでニュートリノ振動を観測している。前置ニュートリノ検出器のうち WAGASCI 検出器ではニュートリノと水標的の、反応断面積を測定することで T2K 実験ニュートリノ振動解析における系統誤差の削減を目指している。

WAGASCI 検出器ではニュートリノの水を標的とした反応から生成される荷電粒子をシンチレータの光により検出している。シンチレーション光は半導体型光検出器 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) により電気信号に変換しその信号を SPIROC2D という ASIC によって ADC カウント (Analog to Digital Converter) というデジタル値に変換し記録している。

本論文では SPIROC2D を搭載した T2K 実験 WAGASCI 検出器フロントエンドエレクトロニクスを用いた電荷測定の線形性評価の方法及び結果について述べる。

目次

第 1 章 ニュートリノ	3
1.1 ニュートリノとは	3
1.2 ニュートリノ振動	3
第 2 章 T2K 実験	5
2.1 概要と目的	5
2.2 ニュートリノビームライン	5
2.3 off-axis 法	7
2.4 前置ニュートリノ検出器群	8
2.5 後置ニュートリノ検出器: スーパーカミオカンデ	10
第 3 章 WAGASCI-Baby MIND 検出器群	11
3.1 目的	11
3.2 構造	11
第 4 章 WAGASCI 検出器のエレクトロニクス	14
4.1 概要	14
4.2 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)	17
4.3 SPIROC2D	20
第 5 章 SPIROC2D-ADC カウントの線形性評価	22
5.1 本研究の目的	22
5.2 測定の概要	22
5.3 測定結果・考察	28
第 6 章 結論	35
参考文献	37

第1章

ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

ニュートリノは1930年にパウリによって β 崩壊時のエネルギースペクトルを説明するために示唆された。ニュートリノは中世のレプトンであり電子ニュートリノ(ν_e), ミューニュートリノ(ν_μ), タウニュートリノ(ν_τ)の3つのフレーバーを持ち, 各々に対応した反粒子が存在する。

1.2 ニュートリノ振動

素粒子物理学の標準模型からニュートリノの質量は0であると想定されていたが1962年にフレーバー間で変化するニュートリノ振動という現象が理論的に提唱され、有限の質量をもつことが示唆された。ニュートリノは質量を持ち、弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \nu, \tau$)と質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$)は異なり以下のような混合状態をとるとする。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum^i U_{\text{MNS}}^{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.1)$$

U_{MNS} は牧・中川・坂田(MNS)行列と呼ばれ以下で表される。[1]

$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

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

このとき $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり θ_{ij} は質量固有状態 ν_i, ν_j の混合角、 δ は複素位相を表し $\delta \neq 0$ のときMNS行列はCP対称性が破れることから δ はCP位相とも呼ばれる。弱い相互作用の固有状態 ν_α, ν_β は質量固有状態 ν_1, ν_2 を用いて、以下のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

質量固有状態の時間発展は

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1(0)\rangle \quad (1.6)$$

となる。相対論的には $m_1 \ll E_i$ なので距離 L 進行したとき,

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} |\nu_1\rangle \\ e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

と近似される。このとき $|\nu_\alpha\rangle$ が $|\nu_\beta\rangle$ へと変化する確率は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \quad (1.8)$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu} \quad (1.9)$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \quad (1.10)$$

であり, $\Delta m_{ij} = m_i^2 - m_j^2$ は質量二乗誤差 E_ν はニュートリノのエネルギーである。
 $|\nu_\alpha\rangle$ である確率も同様にして

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) = 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \quad (1.11)$$

$$= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \quad (1.12)$$

ニュートリノ三世代での振動確率は

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}^* \sin^2 \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu}) \quad (1.13)$$

$$+ 2 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}^* \sin^2 \frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu}) \quad (1.14)$$

となる。

第 2 章

T2K 実験

2.1 概要と目的

図 2.1 に T2K 実験の全体図を示す。T2K 実験は日本で行われている長基線ニュートリノ実験である。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC から発射されたミューニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県神岡に位置するスーパーカミオカンデで観測している。検出器として後置ニュートリノ検出器スーパーカミオカンデとともにニュートリノビーム生成地点から 280 m の位置に前置ニュートリノ検出器群が設置されており、双方の結果を比較してニュートリノ振動解析をしている。[5]



図 2.1: T2K 実験の全体図 [5]

2.2 ニュートリノビームライン

J-PARC の陽子加速器群は LINAC,RCS,MR の 3 つからなる。[6]

2.2.1 LINAC(LINear ACcelerator)

LINAC では陽子 1 個と電子 1 個からなる負水素イオンを直線型の加速器で加速する。LINAC は全長 330 m からなり、41 台の加速空洞と呼ばれる円筒型のタンク中を負水素イオンが通過し、合わせてクライストロンという装置で 324 MHz および 972 MHz の電磁波を加えることで電場によって加速させ、最終的な運動エネルギーは 400 MeV となる。

2.2.2 RCS(Rapid-Cycling Synchrotron)

LINAC で加速された負水素イオンは周回型加速器である 3 GeV シンクロトロン RCS に入射するところで炭素の薄膜を通過し、電子が剥ぎ取られ陽子ビームとなる。3 GeV まで加速された陽子は物質・生命実験施設に送られ、一部が加速器 MR へと送られる。RCS では約 160 台の電磁石によって周長 350 m のドーナツ状のビームダクトを 1 周 1.63 μ s で 1 万回以上周回させることで大強度ビームを生成している。



図 2.2: LINAC の加速空洞 [6]



図 2.3: RCS[6]

2.2.3 MR(Main Ring)

MR では RCS からそれぞれ二十兆個以上の陽子を含む 8 つの塊 (パンチ) を受け取り、ドーナツ型の周長約 1600 m からなる真空ダクト中を 1.4 s で約 30 万回周回させ 30 GeV の陽子ビームを生成する。加速後、大強度陽子をハドロン実験施設とニュートリノ実験施設に送り、各施設で標的にぶつけて二次粒子を生成する。



図 2.4: MR の電磁石 [6]

2.2.4 ニュートリノ実験施設

MR から発射された陽子ビームは多数の常伝導電磁石や超伝導電磁石、ビームモニターを軌道上に配列した一次ビームラインを通って西向きに曲げられる。陽子ビームはターゲットステーション内のグラファイトで作られた標的に衝突して多数のハドロンを作り出す。このうち正電荷を持つ π 中間子を、電磁ホーンによって前

方に収束させる。電磁ホーンは、ビーム射出に同期した数百キロアンペアのパルス状の電流によって荷電パイメソンを収束させるよう設計された特殊な電磁石である。 π 中間子は長さ 100 m のトンネル（ディケイボリューム）を飛行中に μ と ν_μ に崩壊する。このとき π 中間子の電荷を選択することでニュートリノビームを選択できる。ニュートリノ以外の粒子（陽子や π 中間子など）は、大型グラファイトブロックで作られたビームダンプで吸収することで実験施設外には出ていかない。ビームダンプを通過した μ の空間分布をミューオンモニターによって観測することで、ニュートリノの空間分布を間接的にモニターする。標的から 280 m 下流には、前置ニュートリノ検出器群があり、ニュートリノの空間分布、ミューニュートリノの純度やエネルギー分布を測定し、295 km 離れた後置ニュートリノ検出器スーパーカミオカンデの測定結果と比較することで、ニュートリノ振動を詳細に研究している。[6]

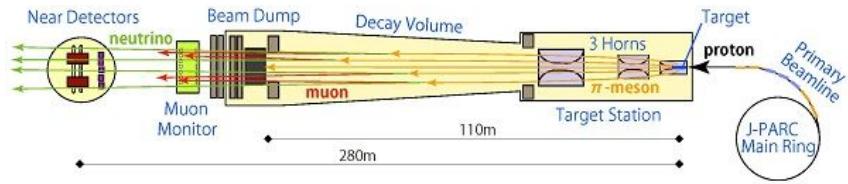


図 2.5: ニュートリノビームライン [6]

2.3 off-axis 法

T2K 実験は世界で初めての off-axis 法を採用したニュートリノ実験である。off-axis 法によって検出器をニュートリノビーム中心から 2.5° ずらすことでエネルギー分布の幅を調整している。ニュートリノ振動はニュートリノのエネルギーと距離によって振動の仕方が変化する。T2K 実験の場合距離 295 km に対して、最も振動の効果が大きくなるニュートリノエネルギーは 0.5~0.7 GeV である。ニュートリノビームの中心をスーパーカミオカンデから 2.5° ずらすことで 0.7 GeV にピークをもつエネルギー分布のビームを生成している。

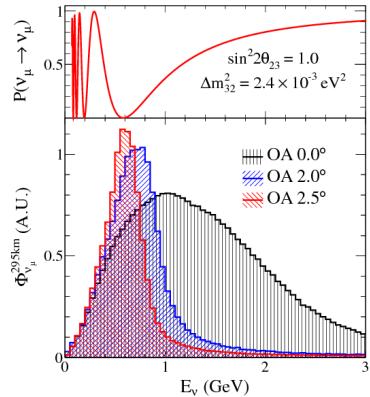


図 2.6: ニュートリノエネルギーと振動確率 (上)off-axis 角度 (下)[8]

2.4 前置ニュートリノ検出器群

T2K 実験の前置ニュートリノ検出器群はグラファイト標的から 280 m 下流に位置している。大きく分けてビーム軸上 (on-axis) に位置する INGRID 検出器と π 中間子の平均崩壊点とスーパーカミオカンデの直線上に位置する (off-axis) ND280 検出器からなる。[3][5]

2.4.1 INGRID

on-axis 検出器 INGRID(図 2.7) はニュートリのビーム軸上に配置され、ビームの方向及び強度モニターとして使用されている。計 16 個のモジュールから構成されており、各々十字に配置されている。各モジュールは 9 層の鉄と 11 層のシンチレータのサンドイッチ構造をとっており、鉄・ニュートリノ反応から生成された荷電粒子をシンチレータで検出している。



図 2.7: INGRID[8]

2.4.2 ND280

off-axis 検出器 ND280(図 2.8) はビーム標的からスーパーカミオカンデ方向 (ビーム中心から 2.5°) へ 280 m 下流に位置しており、ニュートリノ振動前のビームを測定している。ここではビームフラックス・エネルギースペクトル・反応断面積を測定している。以下の 5 つの検出器と電磁石で構成される。[3]

Magnet

CERN の UA1 実験で使用されていた大型常伝導ダイポール電磁石。0.2 T の磁場を印加することで荷電粒子の飛跡を曲げている。

FGD(Fine Grained Detector)

FGD は細分化された構造のシンチレーショントラッカーでニュートリノ反応点検出と FGD 内で停止する低エネルギー粒子のトラッキング・識別が可能である。2 つのモジュールから構成されており、後方モジュー

ルではシンチレータと水が層状に組み込まれておりニュートリノと水標的の反応断面積を測定する。

SMRD(Side Muon Range Detector)

マグネットの隙間に設置されたシンチレータから構成される。荷電粒子の粒子識別とエネルギー測定を行うミューオン飛程検出機である。

TPC(Time Projection Chamber)

ニュートリノ反応で生成された荷電粒子を識別し、磁場によって曲げられた飛跡の曲率を測定することでその運動量を分析できる。

P0D(Pi 0 Detector)

最上流に設置されている π^0 生成反応測定に特化された検出器であり、鉛薄膜とシンチレータのサンドイッチ構造から成るシンチレータトラッカーである。

ECAL(Electromagnetic Calorimeter)

マグネット内側の最外層に位置しており、P0D, TPC, FGD でのニュートリノ反応で生成した電子と γ 線の電磁シャワーを捕らえ、エネルギーを測定できる。

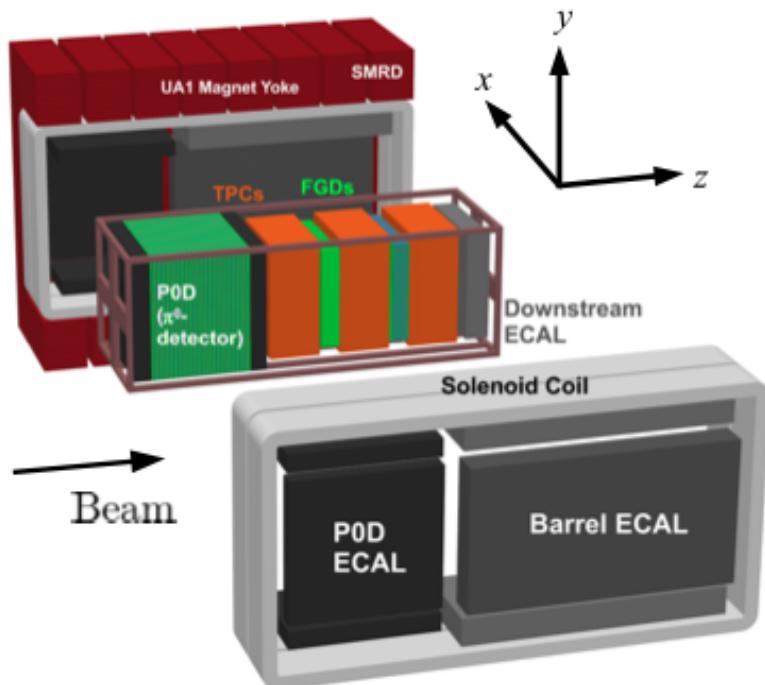


図 2.8: ND280 の概略図 [5]

2.5 後置ニュートリノ検出器: スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは水チェレンコフ検出器であり、J-PARC から 295 km の岐阜県飛騨市神岡鉱山内に位置している。山頂地下 1000 m に建設されており、宇宙線による影響を約 10 万分の 1 に減少している。検出器の概観を図 2.9 に示す。検出器は 5 万トンの純水で満たされた 2 層式水タンクとその内部に設置されている 20 インチ光電子倍増管・外部に設置された 8 インチ光電子倍増管から構成されている。スーパーカミオカンデでは水中で発生するチェレンコフ光によって粒子の検出を行う。T2K 実験ではニュートリノ振動後のニュートリノを測定している。[4][7]

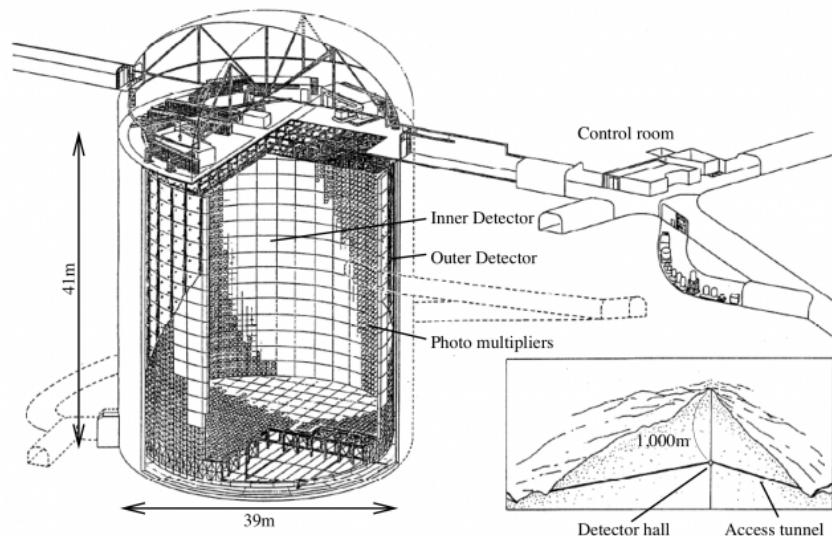


図 2.9: スーパーカミオカンデ検出器の概観図 [5]

第3章

WAGASCI-Baby MIND 検出器群

3.1 目的

T2K 実験では前置ニュートリノ検出器 ND280 によってニュートリノの CH・水標的の反応断面積の解析が進められているが、構造上の問題で前方に対してのみにしか荷電粒子を検出できない。後置検出器スーパーカミオカンデでは 4π 方向のアクセプタンスで測定を行なっており、検出方法の違いにより大きな系統誤差が生じてしまう。そこで 4π 方向で CH・水標的の反応を測定できる WAGASCI 検出器が開発された。[14],[15]

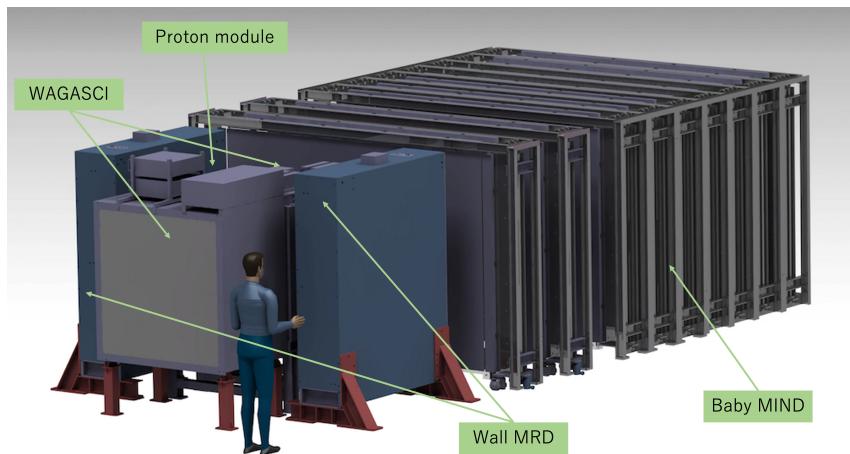


図 3.1: 検出器群の全体図

3.2 構造

図 3.1 に検出器群の全体図を示す。これらの検出器は ND280 のある前置検出器ホール地下 2 階の off-axis 角 1.5° の位置に設置されている。中央の WAGASCI 検出器は 2 台設置されており中身は水で満たされている。WAGASCI 検出器の間には CH 標的検出器 Proton Module が設置されている。両側面にはミューオン飛程検出器 Wall MRD2 台が、下流にはミューオン飛程検出器 Baby MIND1 台が設置されている。[9]

3.2.1 WAGASCI

WAGASCI モジュールの構造を図 3.2 に示す。WAGASCI 検出器 1 台の大きさはビーム軸上に対し、垂直方向 1 m, 水平方向 0.5 m であり、内部は 1280 枚のプラスチックシンチレータとその間が 0.6 トンの水で満

たされた構造をしている。プラスチックシンチレータは3次元的な格子構造をとるように設計されている。5 cm×5 cm×2.5 cm の水のセルが並んでおり、ニュートリノ相互作用で生成された荷電粒子をプラスチックシンチレータの3次元構造により 4π 方向のアクセプタンスで測定できる。WAGASCI 検出器では 32chArray 型半導体光検出器 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter:S13360 型) を用いて 1 台あたり 1280ch で光を検出しており、変換された電気信号を SPIROC2D と呼ばれる ASIC で処理している、MPPC および SPIROC2D については次章で述べる。

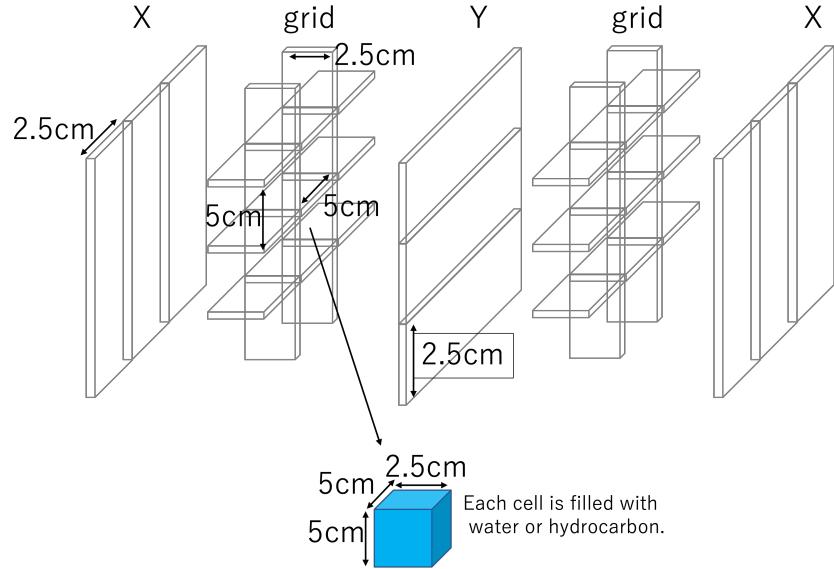


図 3.2: WAGASCI module の内部構造

3.2.2 Proton Module

Proton Module の構造を図 3.3 に示す。Proton Module は 2 台の WAGASCI 検出器の間に設置されており、CH 標的検出器として機能する。Tracking plane で囲まれた Veto plane で構成されており、1203 mm×50 mm×10 mm の INGRID タイプと 1203 mm×25 mm×13 mm の SciBar タイプの 2 つのシンチレータが使用されている。Proton module における信号読み出しあは WAGASCI 検出器とは異なり Trip-t という ASIC が用いられている。

3.2.3 Wall MRD

Wall MRD は WAGASCI 検出器の左右に各 1 台設置されておりニュートリノ反応の 2 次粒子をトラッキングする。各モジュールは 11 枚の鉄板 (1.8 m×1.6 m×3 cm) と 10 枚のシンチレータ (1.8 m×0.2 m×7 mm) で層状に構成されておりモジュール全体の大きさは 2236 mm×1630 mm×975 mm となる。Wall MRD ではセラミック型 MPPC(S13081 型) が用いられており 1 台あたり 80ch で検出器の上下から光を検出する。MPPC からの信号処理には WAGASCI 検出器と同じく SPIROC2D を搭載したフロントエンドエレクトロニクスが使用されている。

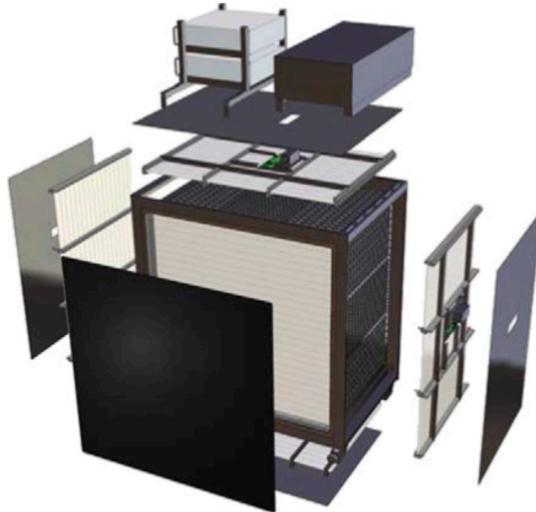


図 3.3: Proton module の構造 [14]

3.2.4 Baby MIND

Baby MIND は WAGASCI 検出器の下流に設置されたミューオン飛程検出器である。図 3.4 のようなレイアウトをとっており 33 枚の磁石モジュールと 18 枚のプラスチックシンチレータが搭載されており、磁場を印加することで μ^+ と μ^- の判別をしている。磁石モジュールは鉄板と電磁コイルで構成されており 3500 mm × 2000 mm × 50 mm で 1900 kg である。150 A の電流で 1.5 T の磁場を印加し μ^+ と μ^- の判別ができるようになっている。プラスチックシンチレータは 95 枚の水平シンチレータと 16 枚の垂直シンチレータから構成されており大きさは 2880 mm × 31 mm × 7.5 mm となる。Baby-MIND では WAGASCI 検出器とは異なり CITIROC という ASIC を搭載したフロントエンドエレクトロニクスで信号読み出しを行っている。

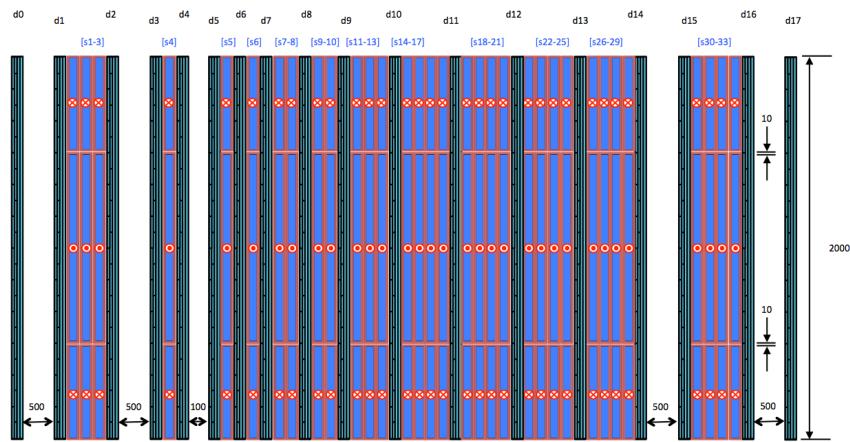


図 3.4: Baby-MIND のレイアウト図 [8]

第 4 章

WAGASCI 検出器のエレクトロニクス

4.1 概要

WAGASCI 検出器のエレクトロニクスの概要を図 4.1 に示す。これらのシステムはフランスの LLR(Laboratoire Leprince-Ringuet) で設計されたものである。[12]

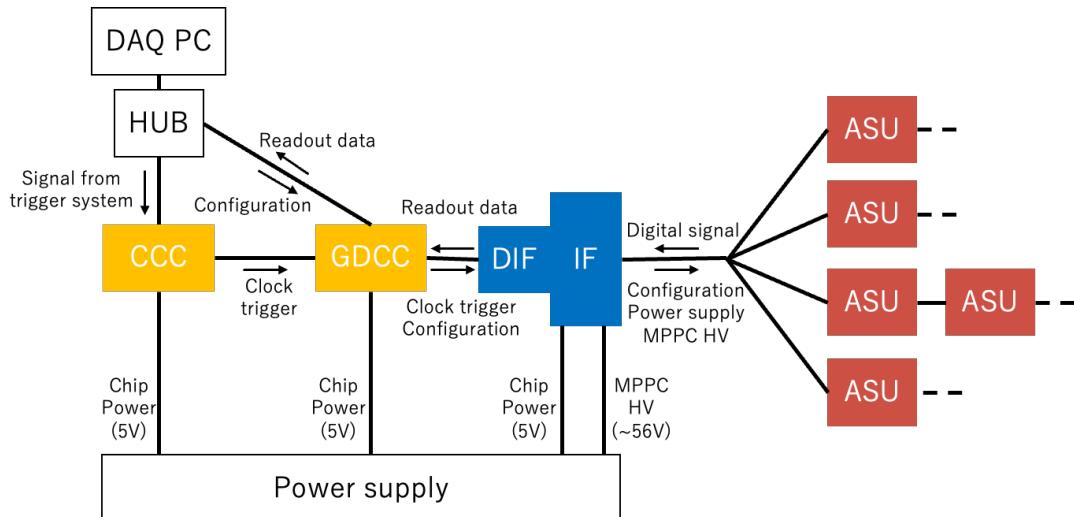


図 4.1: エレクトロニクス

4.1.1 GDCC(Gigabit Data Concentrator Card)

図 4.2 は GDCC の写真である。GDCC は FPGA チップが搭載されたボードであり、DAQ PC と Ethernet を介して測定の制御・及びデータのやりとりを行う。

4.1.2 CCC(Clock and Control Card)

図 4.3 は CCC の写真である。CCC は測定のトリガー信号をクロックする。GDCC にファームウェアを設定すること CCC として機能する。DAQPC 及び GDCC と Ethernet によって接続される。

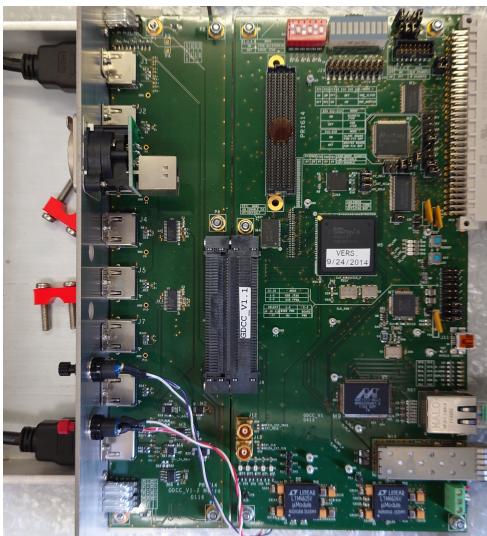


図 4.2: GDCC

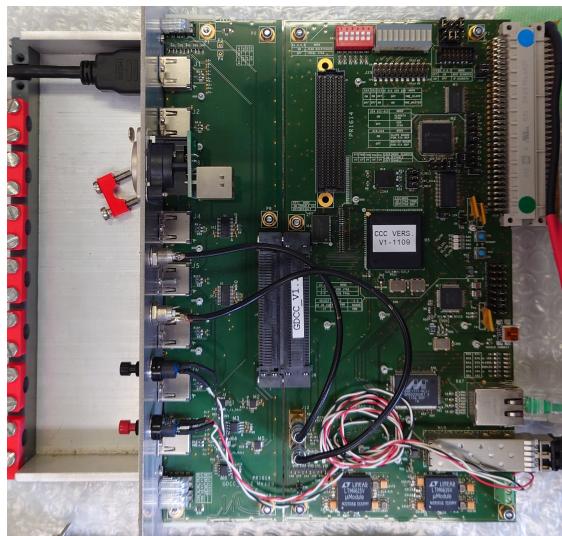


図 4.3: CCC

4.1.3 IF(InterFace)

図 4.4 上部の基盤が IF である。IF 単体では機能を持たないが、DIF・ASU のアダプタ及び DIF や ASU の電源及び MPPC の逆電圧である HV(High Voltage) の供給を担っている。

4.1.4 DIF(Detector InterFace)

図 4.4 で IF に接続された下部の基盤が DIF である。DIF は ASU から送信されたデジタル信号を処理して GDCC へ HDMI を介して送信する。また Slow Clock(BCID) の同期及びリセットも担っている。BCID とは 580 ns ごとの時間単位である。

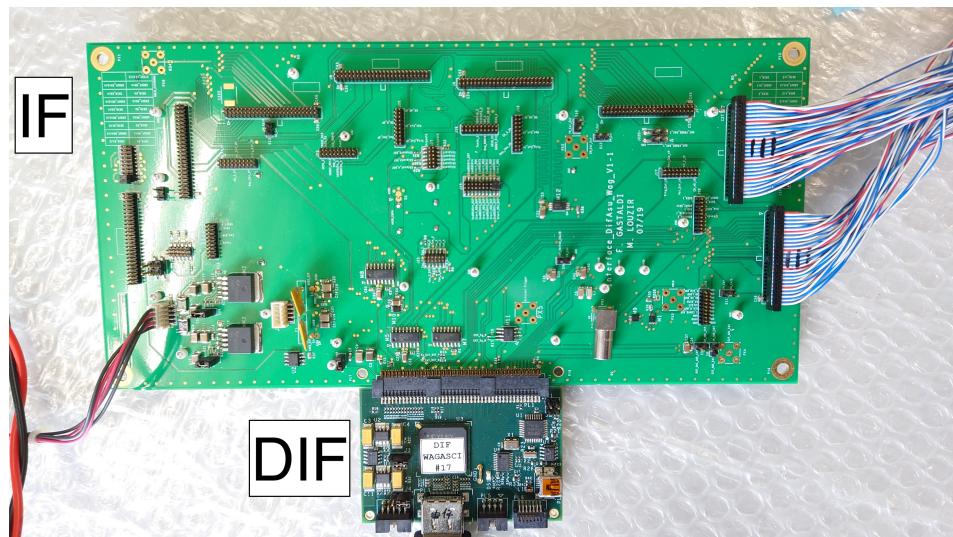


図 4.4: IF(上)&DIF(下)

4.1.5 ASU(Active Sensor Unit)

図 4.5 は ASU の写真である。ASU は後述の SPIROC2D と呼ばれる信号読み出しを担う ASIC が 1 枚搭載されたボードである。主な役割は MPPC のアナログ信号をデジタル値に変換し DIF へ送信することである。MPPC を接続することが可能であり IF から供給される HV を MPPC へ送る役割をもつ。ASU 同士・IF とは 50 pin・22 mm のフラットケーブル (Samtec・FFTP-25-D-08.77-01-N) で接続される。



図 4.5: ASU

4.2 MPPC(Multi Pixel Photon Counter)

MPPC は浜松ホトニクス製の SiPM(Silicon Photo-Multiplier) でガイガーモード APD(Avalanche Photo Diode) をマルチピクセル化したフォトンカウンティングデバイスである。低電圧で動作し、高い増倍率・検出効率をもつといった多くの利点をもち、手軽に実装可能である。図 4.6 は WAGASCI 検出器で実際に使用されている MPPC の写真である。[2]

WAGASCI 検出器で用いられている Array 型 MPPC(S13360) と Wall MRD で用いられているセラミック型 MPPC(S13081) の特性を表 4.1 に示す。

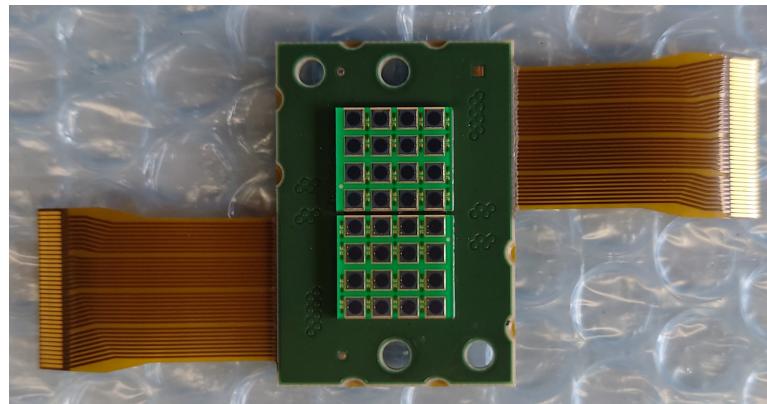


図 4.6: Array 型 MPPC

モデル名	ピクセル数	有効受光面サイズ	ピクセルピッチ	降伏電圧	動作電圧	最大感度波長	検出効率
S13360	716	1.5×1.5mm	50μm	55V	55+3.0V	450nm	35%
S13081	667	1.3×1.3mm	50μm	55V	55+3.0V	450nm	35%

表 4.1: 各 parameter

4.2.1 動作原理

図 4.7 に MPPC の基本的な回路を示す。APD の逆電圧を降伏電圧以上にして動作させると光量の大小に関係なく素子固有の飽和出力が発生する(ガイガーフォトン)。この電圧で APD を動作させる状態をガイガーモードという。ガイガーモードにおいてはフォトンが入射すると増幅領域内で電子雪崩をおこす。ガイガーフォトンが始まると素子内部の電界が保たれる間は放電が継続する。このガイガーフォトンを短時間で停止し次のフォトンを検出するために数百 kΩ 程度のクエンチング抵抗が直列に接続され電圧降下によって電子雪崩が収束する。

4.2.2 諸特性

増倍率

MPPC の増倍率 M は 1 ピクセルが 1 フォトンを検出して発生したパルスの電荷量 Q を素電荷 q_e で割った値で算出される。

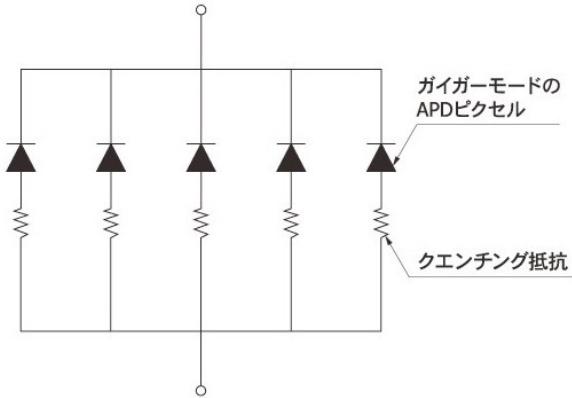


図 4.7: MPPC の回路構造 [2]

$$M = \frac{Q}{q_e} \quad (4.1)$$

Q は逆電圧 V_R と降伏電圧 V_{BR} に依存し

$$Q = C \times (V_R - V_{BR}) \quad (4.2)$$

ここで C は 1 ピクセルの容量であり、容量と逆電圧が大きいほど増倍率は高くなる。一方逆電圧が大きくなるにつれてダークカウントやアフターパルスの影響も大きくなるため注意が必要である。

ゲイン・ブレイクダウン電圧

電圧降下によって印加電圧がブレイクダウン電圧 V_{bd} 以下になると電子雪崩が終了するので MPPC のゲインは印加電圧とブレイクダウン電圧の差に比例する。またブレイクダウン電圧は温度特性をもつてゲインを一定にするためには周囲温度に合わせて逆電圧を変化させるか素子温度を一定にする必要がある。

ダークカウントレート

MPPC では光によって生成されたキャリアだけでなく熱的に発生したキャリアからもパルス (ダークパルス) が発生する。ダークパルスは信号とともに観測され検出誤差の原因となる。また熱的キャリアでも一定の信号 (1 p.e.) に増倍されるので入射フォトンによるパルスと区別することはできない。このダークパルスを測定することでフォトンを入射させなくても第 5 章 3 節で述べるようにフォトンに対する信号を測定することが可能である。

クロストーク

MPPC の 1 ピクセルにフォトンが入射したとき 2 p.e. 以上のパルスが観測されることがある。これは MPPC のピクセルでアバランシェ増倍する過程で 2 次フォトンが発生しこのフォトンを他のピクセルが検出することで発生する。これを光学的クロストークという。

アフターパルス

MPPC のピクセルでアバランシェ増倍する過程で結晶の格子欠陥にキャリアが捕獲され、一定時間後に再度アバランシェ増倍されることがある。これをアフターパルスといい、入射フォトンによるパルスと区別することはできない。

4.3 SPIROC2D

SPIROC(Silicon Photomultiplier Integrated Read Out Chip) はフランスの OMEGA 社によって開発された SiPM からの信号読み出しを行う ASIC である。SPIROC は改良を重ねられており、WAGASCI 検出器には SPIROC2D が搭載されており図 4.8 が SPIROC2D の写真である。

主に SiPM からのアナログ信号をデジタル値に変換し DAQ PC に転送することが役割であるが SPIROC2D はほかにも

- MPPC にかける逆電圧の調整
- 信号の増幅率の調整 (Pre-amplifier の feedback capacitor の電気容量を変更する)
- 閾値以上の信号をヒット認識するディスクリミネータ

としての機能をもち詳細については後述する。[10]



図 4.8: SPIROC2D

4.3.1 諸機能

図 4.9 に SPIROC2D の 1 チャンネルのアナログ回路を示す。

8-bit input DAC

MPPC のアノードの電位をチャンネルごとに 0~+5 V の範囲で上げることで逆電圧を調整することで MPPC のゲインを変更することができる。

10-bit discriminator trigger threshold DAC

trigger threshold は閾値を超える信号のヒット認識を行うディスクリミネータである。260 mV から 2.5 V の範囲を 1024 段階で変更できる。

6-bit Pre-Amplifier DAC

SPIROC2D にはゲインのことなる 2 つのプリアンプが搭載されており、小さい信号は High-gain・大きい信号は Low-gain へと自動で切り替えがなされる。ここで入力信号のうち Low-gain に切り替わる信号の割合を Gain Select Efficiency といい、threshold により異なるが 2.5 p.e. の場合 95 % 程度である。

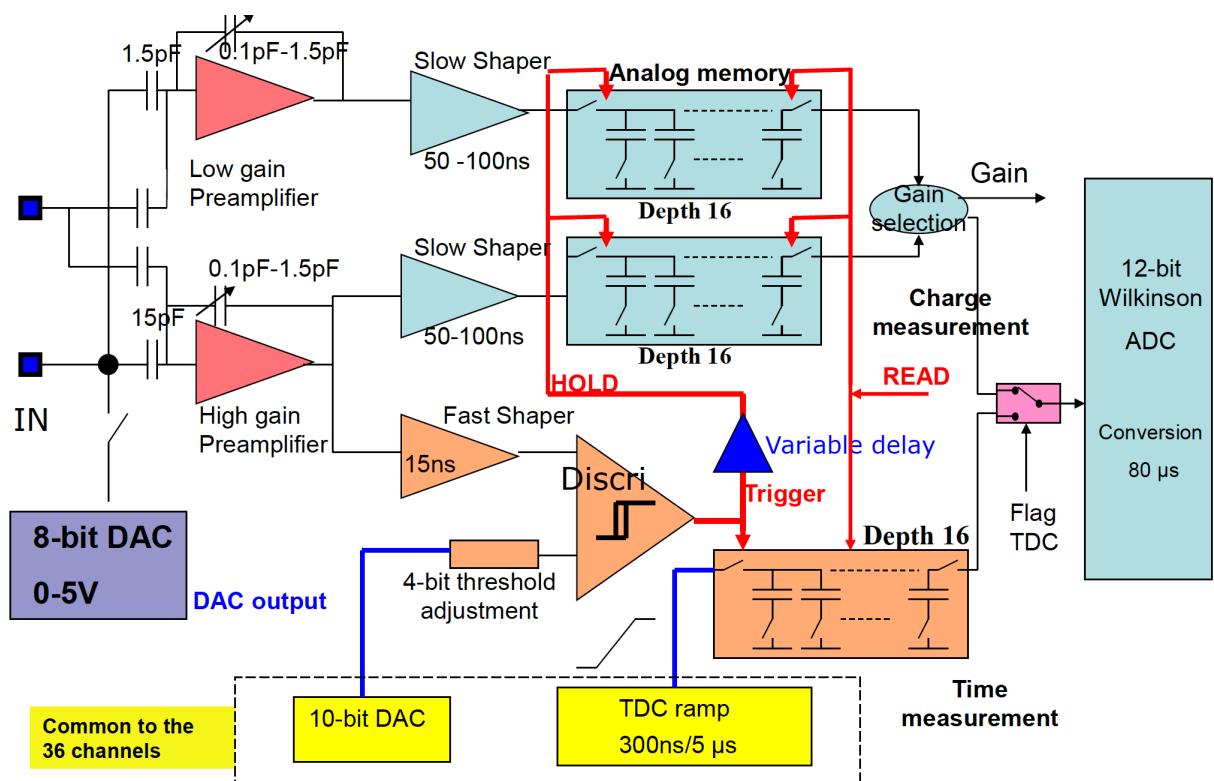


図 4.9: SPIROC2D の analog 回路 [11]

第 5 章

SPIROC2D-ADC カウントの線形性評価

5.1 本研究の目的

WAGASCI 検出器では MPPC からの電気信号の電荷を SPIROC2D によってデジタル値に変換している。このとき 2 つのゲインそれぞれの検出範囲において入力電荷(検出光子数)が小さい場合は ADC カウントが線形的に変化する。一方入力電荷が大きくなると線形性を保たなくなる。そのため実際の検出数の分析が困難である。線形性評価はフランスの OMEGA 社により行われていたが WAGASCI 検出器と同条件下での結果は不明であった。そのため WAGASCI 検出器と同条件での線形性評価を行った。

5.2 測定の概要

5.2.1 ADC カウント測定

使用機器

■WAGASCI 関連モジュール

- GDCC
- CCC
- IF
- DIF
- ASU
- Single MPPC board

図 5.1 が Single MPPC board の写真である。Wall MRD において ASU と 1ch MPPC を接続するための基盤。後述する Injection board と ASU を接続するために使用。ASU とはフラットケーブルで接続される。接続されたものを図 5.2 に示す。

- DAQ PC
- ANPAN

WAGASCI 検出器の DAQ ソフトウェア。DAQ PC にインストールされており測定及び Function generator の操作のために使用した。

- ケーブル [Ethernet,HDMI,FFC Flat cable,LEMO cable,micro coaxial cable:(U.FL-2LP-068N1-A)]
- GDCC,CCC,DIF 用電源

■追加機器

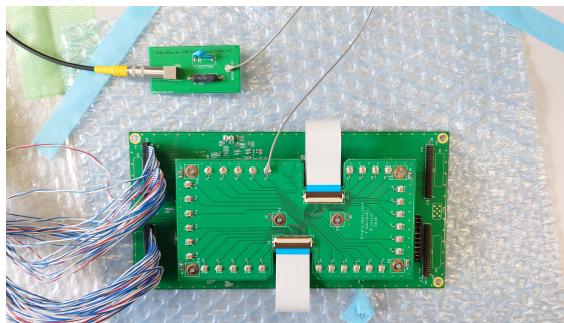


図 5.1: Single MPPC Board&Injection board

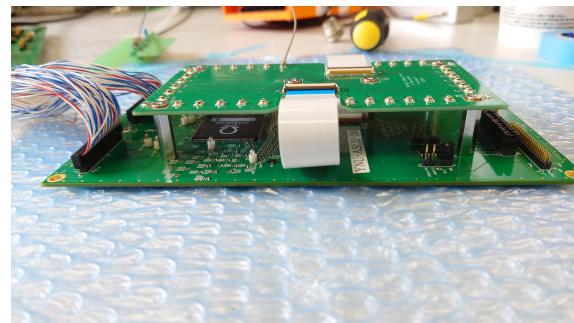


図 5.2: Single MPPC Board&ASU

- **Injection board**

図 5.3 が回路図と実際の基盤である。ASU へ任意の電荷を注入するために作成した。Function generator との接続は LEMO cable, Single MPPC board との接続は micro coaxial cable で行う。実際に注入される電荷 Q は

$$Q = CV \quad (5.1)$$

で計算される。ここで C はキャパシターの容量 (100 pF), V は Function generator で印加する電圧の大きさである。

- **Function generator(Tektronics 3390)**

Injection board にパルスを入力するために使用。

- **Attenuator**

Function generator の最小出力電圧 20 mV よりも小さい電圧を出力するために使用。図 5.4 のようにスイッチで減衰量を調整できる。

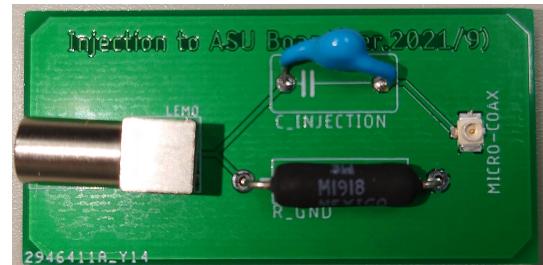
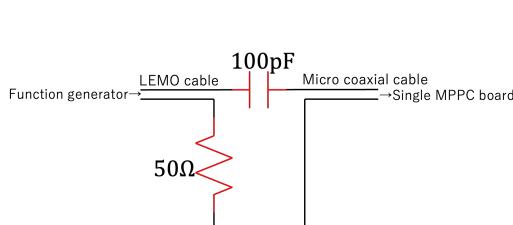


図 5.3: Injection board



図 5.4: Attenuator

測定方法

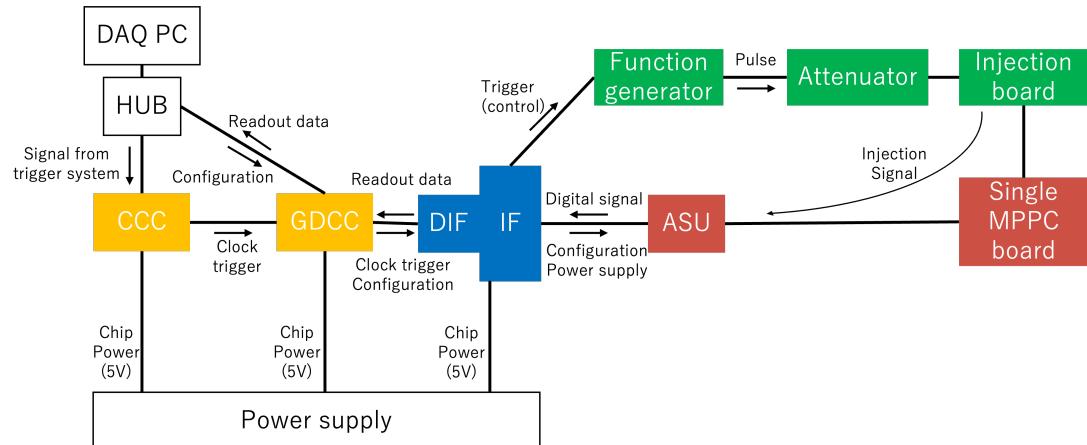


図 5.5: ADC measurement setup

1. 機器のセットアップ

図 5.5 のように機器を接続する。Attenuator を使用する場合は減衰量 (dB) も設定する。装置の故障を防ぐためにケーブル等の接続が完了してから GDCC・CCC → DIF → Function generator の順に電源を入れた。

2. ANPAN(Pyrame) の起動・測定条件の設定

PC でソフトウェアの起動後、任意の測定条件を設定する。設定項目を以下に示す。

- run time: ステップ毎の測定時間
- threshold: 閾値
- pulse width
- pulse offset
- pulse height: 任意の電圧範囲でステップ測定が可能
- load impedance: Function generator のインピーダンス
- trigger slope: 信号を立ち上がり or 下がりでトリガーする

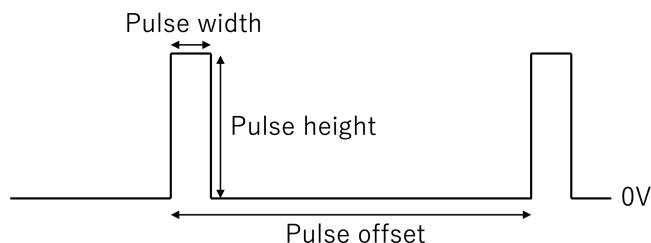


図 5.6: パルス設定値

3. 測定

ANPAN 上で上記の設定のもとで Python スクリプトを実行することで測定をした。

測定条件は表 5.1 のように設定し、8 dB を減衰量とした Attenuator を接続して測定をした。測定完

了後、連続して測定する場合は(2.ANPAN の起動)から、終了する場合は(1.機器のセットアップ)の逆順で装置の電源を落とした。

4. Decode& 解析

測定したデータは raw ファイルとして保存される。そのままでは読み取りができないため root ファイルへと decode した。root ファイルは CERN のソフトウェア ROOT[13] で解析できる。

parameter	run time	threshold	load impedance	trigger slope
設定値	8.7 min	140	high Z($100\text{ k}\Omega$)	rising
	pulse width	pulse offset	pulse height	
	$20\text{ }\mu\text{s}$	$100\text{ }\mu\text{s}$	20 mV to 8.0 V	

表 5.1: 各 parameter

5.2.2 MPPC のゲイン測定 (Gain calibration)

実際のニュートリノビーム測定においては MPPC が検出した光子量を測定する。そのために入力電荷を MPPC のピクセルに光子が入射した際の信号量 (p.e.) に変換するために Gain calibration を行った。

使用機器

■WAGASCI 関連モジュール

- GDCC
- CCC
- IF
- DIF
- ASU
- DAQ PC
- ANPAN
- Array 型 MPPC(浜松ホトニクス S13660)
ASU と図 5.7 のように接続して使用する。
- ケーブル (Ethernet,HDMI,FFC Flat cable,LEMO cable)
- 暗箱・暗幕
MPPC に光を入射させないために使用
- GDCC,CCC,DIF,HV 用電源

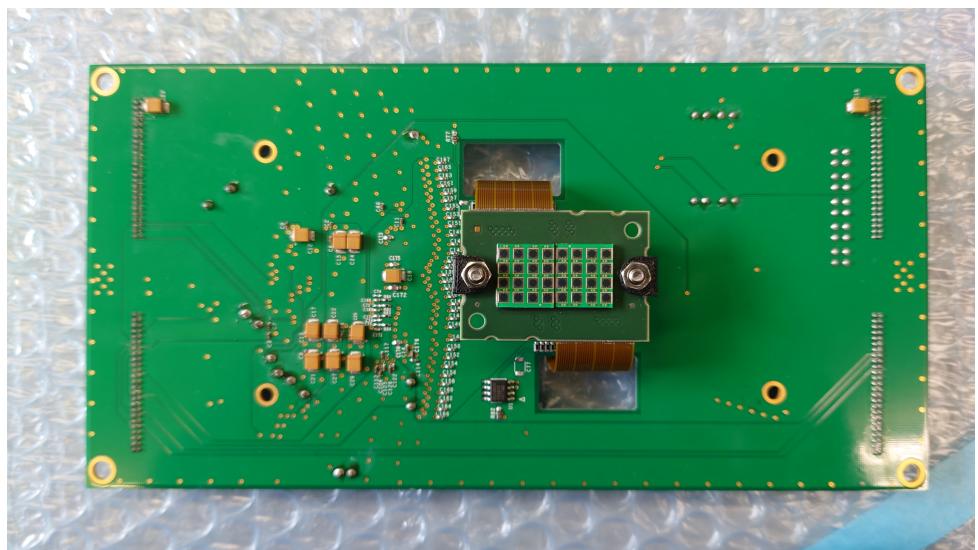


図 5.7: ASU&MPPC

測定方法

MPPC から送られる信号のうち、pedestal 1 p.e. 2 p.e. に対応する ADC のスペクトルを暗箱中でダークカウントを測定することでデータを取得できた。

1. 機器のセットアップ

図 5.8 のように機器を接続する。装置の故障を防ぐためにケーブル等の接続が完了してから GDCC・CCC → DIF → MPPC 用 HV の順に電源を入れた。MPPC の損傷を防ぐために HV は段階的に電圧を上昇させた。

2. ANPAN(Pyrame) の起動・測定条件の設定

PC でソフトウェアの起動後、任意の測定条件を設定する。設定項目を以下に示す。

- run time: 測定時間
- threshold: 閾値
- input dac: HV 値の調整
- trigger slope: 信号の立ち上がり or 下がりでトリガーするかの選択

3. 測定

ANPAN 上で上記の設定のもとで Python スクリプトを実行することで測定をした。

測定完了後、連続して測定する場合は (2.ANPAN の起動) から、終了する場合は (1. 機器のセットアップ) の逆順で装置の電源を落とした。

4. Decode& 解析

測定したデータは raw ファイルとして保存される。そのままでは読み取りができないため root ファイルへと decode する。root ファイルは CERN のソフトウェア ROOT[13] で解析できる。

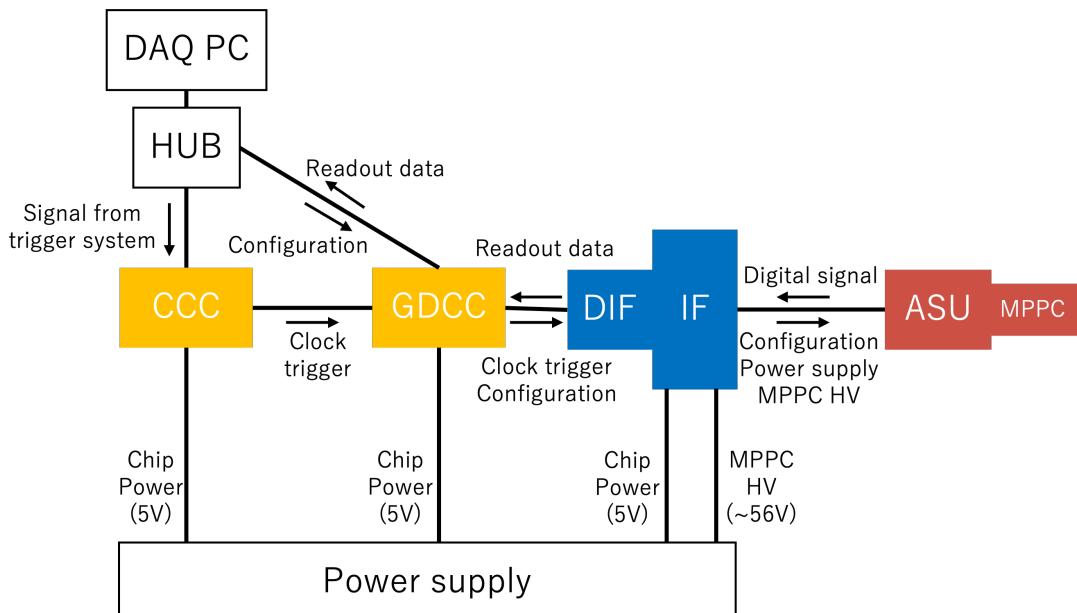


図 5.8: gain calibration setup

5.3 測定結果・考察

5.3.1 ADC カウント測定

図 5.9 に pulse height=1.5 V で -8 dB の attenuator を接続した測定結果を示す。このとき、実際の印加電圧は $1.5 \times 10^{-8/20} \simeq 0.597$ V, 入力電荷は $0.597 \text{ V} \times 100 \text{ pF} = 59.7 \text{ pC}$ である。High-gain では ADC $\simeq 500$ ・ADC $\simeq 2700$ の 2 ピークがみられる。このうち ADC $\simeq 500$ は図 5.10~5.12 に示すように任意の入力に対して大きく変化しないため pedestal として処理した。Low-gain では 1 ピークのみが確認できるためそのまま分析をした。

各電圧ステップの入力電荷に対する ADC カウント応答を High-gain は図 5.10,5.11,5.12、Low-gain は図 5.13,5.14 に示す。

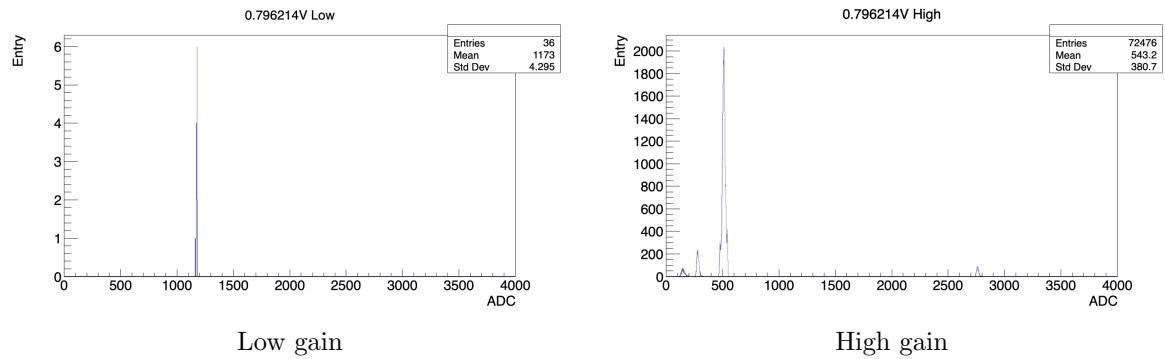


図 5.9: ADC カウント

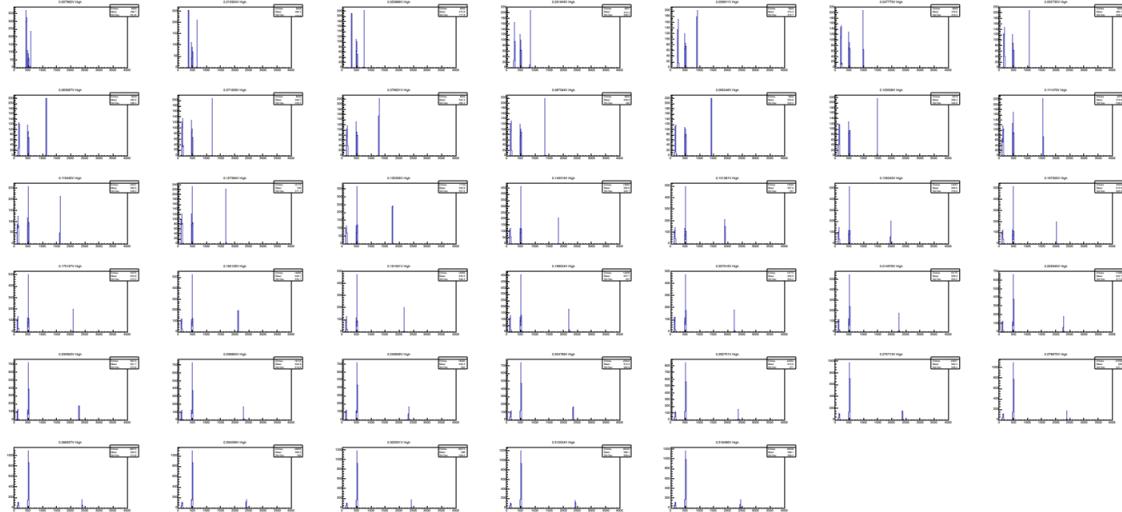


図 5.10: High-gain の ADC カウント (入力電圧 8 mV~320 mV)

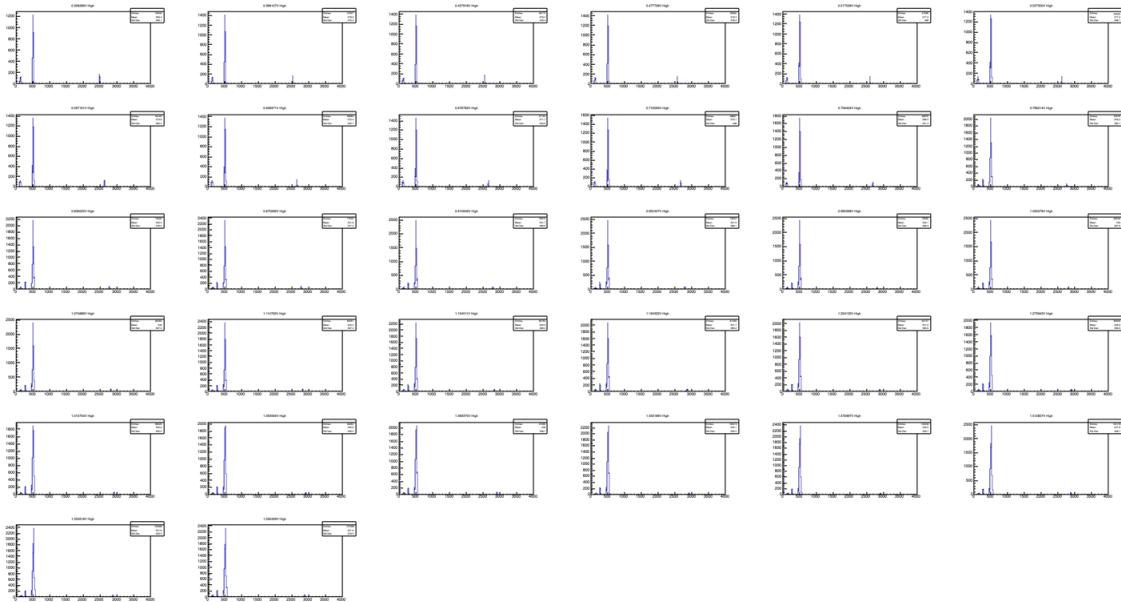


図 5.11: High-gain の ADC カウント (入力電圧 360 mV~1.6 V)

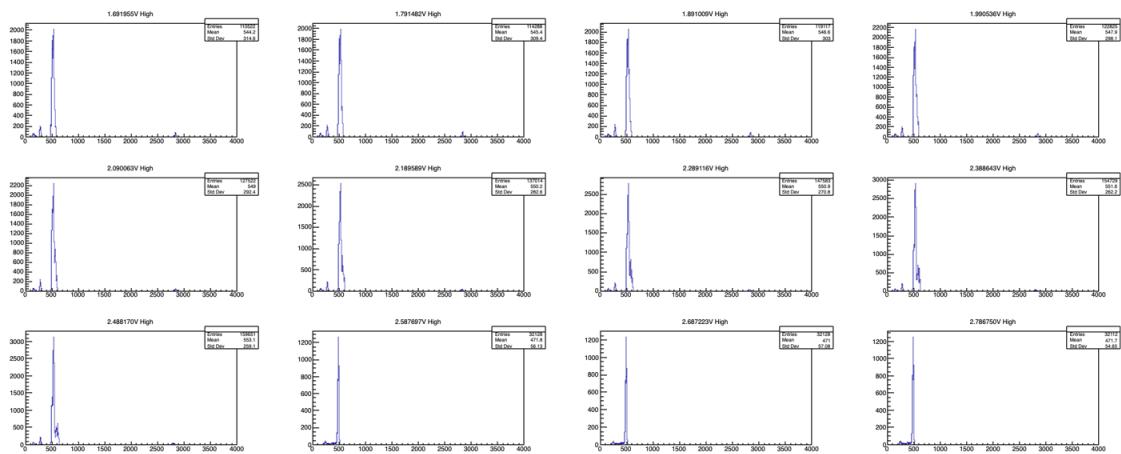


図 5.12: High-gain の ADC カウント (入力電圧 1.7 V~2.8 V)

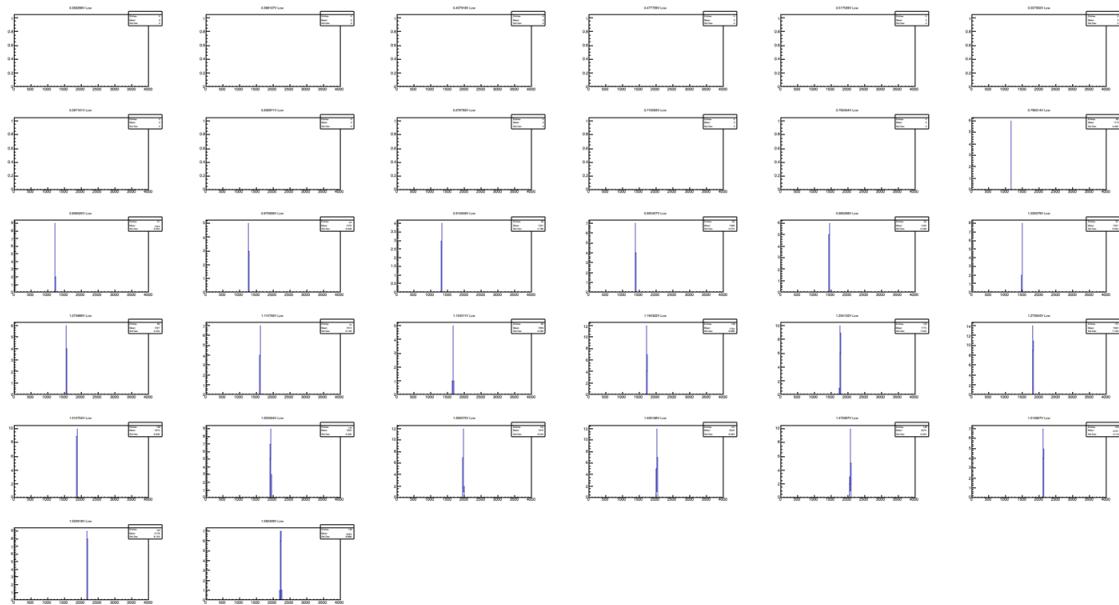


図 5.13: Low-gain の ADC カウント (入力電圧 360 mV~1.6 V)

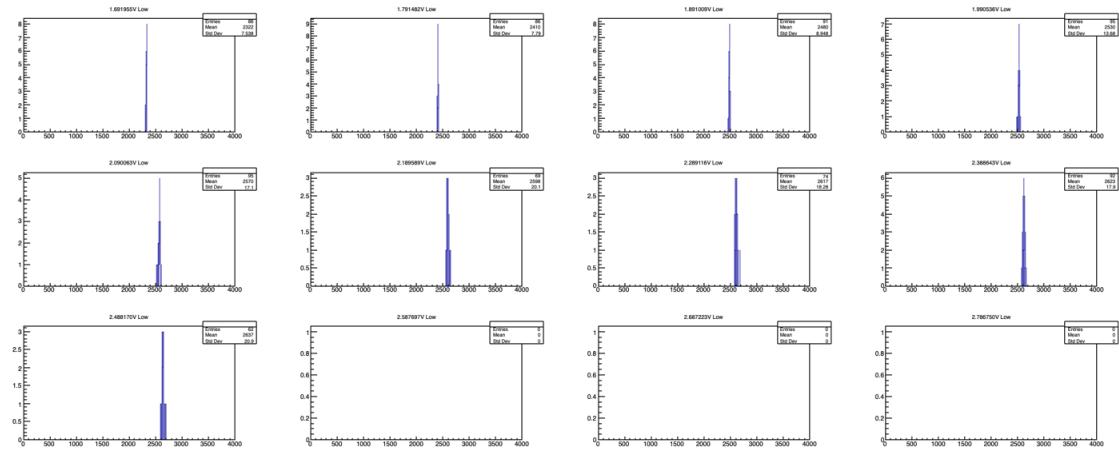


図 5.14: Low-gain の ADC カウント (入力電圧 1.7 V~2.8 V)

5.3.2 Gain calibration

MPPC のゲインは逆電圧によって変化する。WAGASCI 検出器では 57.0 V の HV を ASU へ入力し SPIROC2D によって調整することで 1 p.e. の増加に対し ADC が 50 増加するようしている。また Wall MRD では 80 増加する。その値に合わせるため、MPPC の逆電圧として HV55.7 V・57.0 V に設定して SPIROC2D で調整せずにそのまま電圧を印加して Gain calibrationを行った。

図 5.15 に各 HV でのダークカウント測定結果を示す。HV が大きくなるとゲインが大きくなることが確認できた。

入力電荷 C と光子相当量 p.e. を対応させるため 0 p.e. に対応する ADC カウント (intercept) 及び 1p.e. の増加に対応する ADC カウント (slope) の結果を表 5.2 に示す。pedestal は MPPC や SPIROC 2 D 特有の電気的ノイズを含んでしまい、0 p.e. に対応しないため slope は 1 p.e. と 2 p.e. の増加量から、intercept は (1p.e.) - slope として計算した。

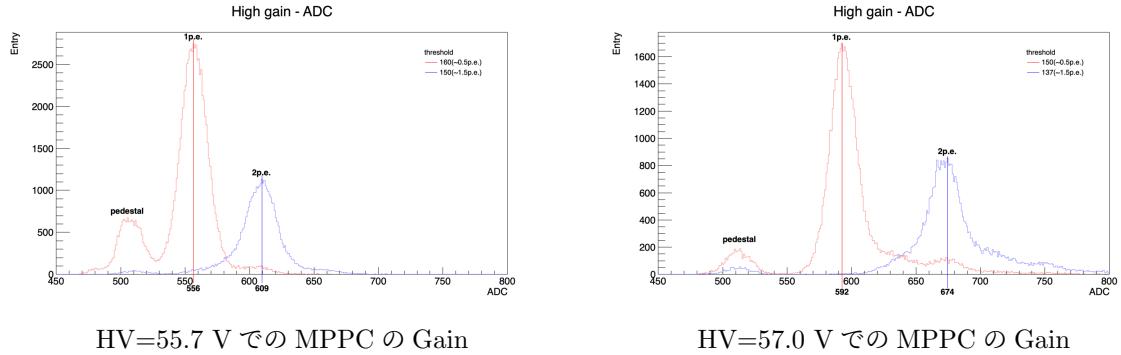


図 5.15: Gain calibration

HV	1 p.e.	2 p.e.	intercept	slope
55.7 V	556	609	503	53
57.0 V	592	674	510	82

表 5.2: Gain calibration

5.3.3 印加電圧 V から光子相当量 p.e. への変換

ADC カウント測定と Gain calibration の結果を対応させると HV=55.7 V の場合で図 5.16 のようになる。1 p.e.・2 p.e. に対応する ADC カウントを $ADC_{1\text{p.e.}}$, $ADC_{2\text{p.e.}}$ 1 p.e.・2 p.e.、に対応する入力電圧を $V_{1\text{p.e.}}$, $V_{2\text{p.e.}}$ 、ADC カウント測定と Gain calibration それぞれの slope・intercept を (a,b), (A,B) とすると、

$$ADC_{1\text{p.e.}} = a \times V_{1\text{p.e.}} + b = A \times (1\text{ p.e.}) + B \quad (5.2)$$

$$ADC_{2\text{p.e.}} = a \times V_{2\text{p.e.}} + b = A \times (2\text{ p.e.}) + B \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

となる。ここで印加電圧 V から光子相当量 p.e. の変換を $(\text{p.e.}) = s \times (V) + t$ と定義すると変換式は以下のようになる。

$$(\text{p.e.}) = \frac{a \times (V) + b - B}{A} \quad (5.5)$$

さらに 1p.e. に対応する印加電圧から MPPC のゲインを計算すると表 5.3 のようになった。

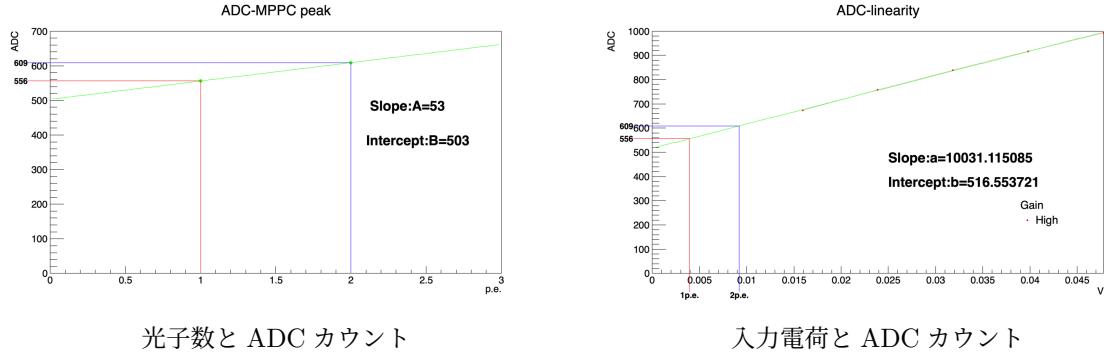


図 5.16: HV=55.7 V での ADC カウント比較

HV	ゲイン
55.7 V	3.70×10^6
57.0 V	5.73×10^6

表 5.3: MPPC のゲイン

5.3.4 ADC カウントの線形性評価

式 5.5 より図 5.10~5.14 の入力電荷を光子相当量 p.e. へと変換すると各 HV で図 5.17, 図 5.18 の結果が得られた。High-gain・Low-gain とともに ADC カウントが 2000 を超えると線形性が保たれなくなっている。

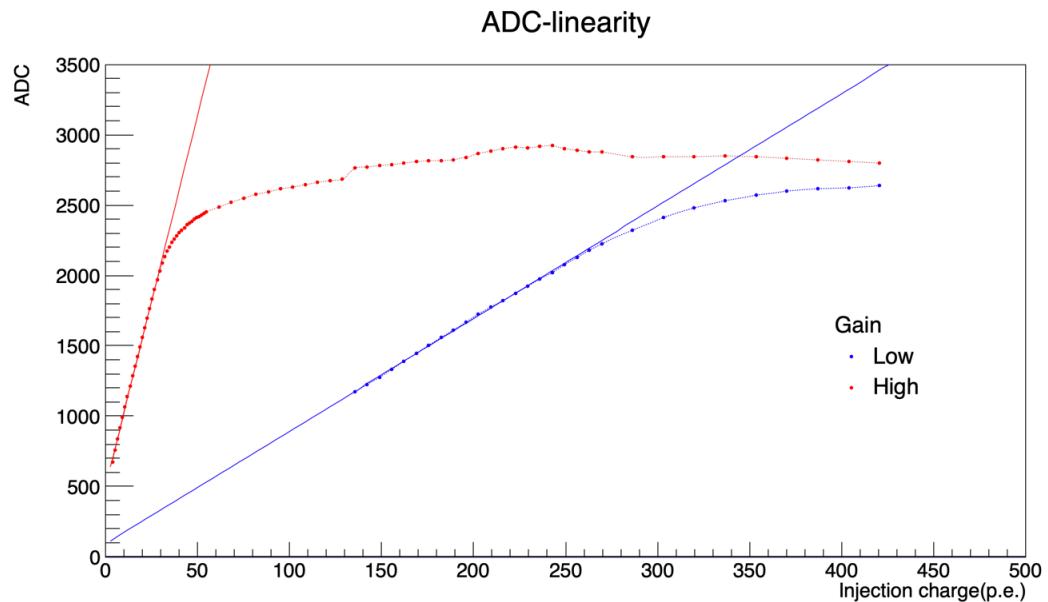


図 5.17: 線形性評価 (HV=55.7 V)

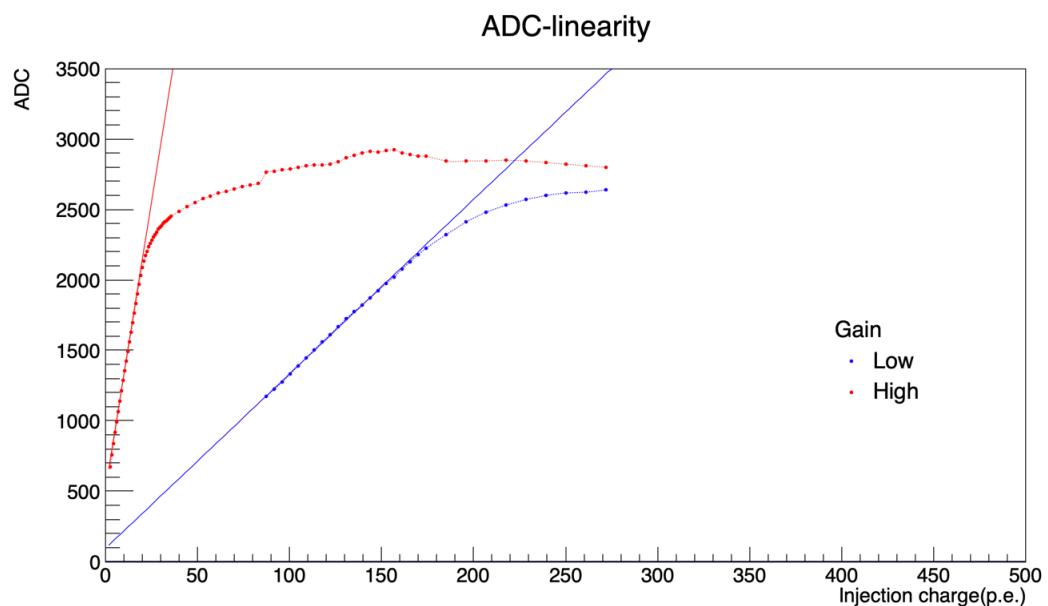


図 5.18: 線形性評価 (HV=57.0 V)

HV=55.7V

High-gain では約 40 p.e. で線形性が失われている。そして約 100 p.e. を超えると ADC カウントの増加はほぼなくなる。Low-gain への切り替えは約 130 p.e. でなされており Low-gain の線形性は約 250 p.e. まで保たれる。Low-gain の測定限界は 420 p.e. でありこれは SPIROC2D の入力電荷に対する処理限界より小さい値となっている。

HV=57.0V

High-gain では約 25 p.e. で線形性が失われている。そして約 75 p.e. を超えると ADC カウントの増加はほぼなくなる。Low-gain への切り替えは約 80 p.e. でなされており Low-gain の線形性は約 275 p.e. まで保たれる。

WAGASCI 検出器の設定における改善点

線形性評価の結果をみると High-gain の線形性が失われてから Low-gain への切り替えがなされていることがわかる。HV=55.7 V を例にとると約 50 p.e. から約 120 p.e. は線形性が失われている High-gain の出力しか得られておらず MPPC が検出した光子量を正確に算出することができない。これを改善するためには以下の 2 つの方法が考えられる。

- Low-gain への切り替えをより小さい電荷で行う Low-gain 側の設定を変更する方法である。High-gain における線形性が失われるより小さい電荷で Low-gain への切り替えをすることで線形性の消失に対応できる。約 100 p.e. 以下では Low-gain への切り替えは確実に実行されない。その切り替え確率も加味しての設定変更が必要である。
- High-gain の線形性をより大きい電荷にまで保つ High-gain 側の設定を変更する方法である。High-gain 側の ADC カウントの入力電荷に対する増加率を減少させることで ADC カウントの飽和する入力電荷をより大きくできる。具体的には High-gain 側の feedback capacitor の電気容量を小さくすることで SPIROC2D 内部の增幅率を減少させ、ADC カウントの出力が小さくなる。

第 6 章

結論

T2K 実験 WAGASCI 検出器のフロントエンドエレクトロニクスに搭載されている MPPC からの電気信号を読み出している SPIROC2D について入力電荷に対する ADC カウントの測定及び線形性評価を行った。增幅率のことなる High-gain,Low-gain それぞれで ADC カウントが約 2000 を超えると線形性が消失し始めることが確認された。また Low-gain への切り替えタイミングについてのデータも取得できた。その結果 High-gain の線形性が失われてから Low-gain への切り替えがなされていることが判明した。

WAGASCI 検出器の測定データから実際に MPPC が検出した光子量を分析するためには ADC カウントの線形性が保たれている必要があるため、現在ビーム測定で利用されている SPIROC2D の設定を改良する必要があることが判明した。SPIROC2D の設定を変更することで次回のビーム測定までに光子量の分析ができるようになるとよい。具体的にはどのような MPPC のゲインに対しても、High-gain の ADC カウントが 2000 になるタイミングで Low-gain への切り替えがなされるように設定を変更する。

謝辞

本研究の進行にあたり多くの人に協力していただきました。この場をお借りして感謝いたします。

指導教員の南野彰宏准教授には授業等でお忙しい中測定の進め方や文献の提示など多くのことでご指導いただきました。心から感謝申し上げます。

本研究室の Giorgio 先輩、永井先輩や WAGASCI の研究メンバーの方々には検出器のエレクトロニクスについて測定などの様々な面で多くのご指導をいただきました。心から感謝申し上げます。

また本研究室の同期とは互いに研究の相談や雑談などで心の支えにもなりました。心から感謝しています。

さらに本研究室のメンバーの皆様とはミーティング等で研究に関して様々な話を聞くことができ私自身の成長にも繋がりました。心から感謝申し上げます。

最後に私を心身ともに支えてくれた友人及び家族の皆様にも感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Mark Thomson (2013) Modern Particle Physics, United Kingdom : Cambridge University Press.
- [2] 浜松ホトニクス MPPC 技術資料,
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9005e.pdf,(参照 2022-1-23)
- [3] <http://www.jahew.org/hepnews/2010/Vol29No2-2010.7.8.9.Aoki.pdf>
- [4] 中畠雅行, 東京大学,Super-Kamiokande による天体ニュートリノ観測,
RADIOISOTOPES, 68, 893–906 (2019)
- [5] T2K-experiment HP,<https://t2k-experiment.org/>,(参照 2022-1-23)
- [6] J-PARC HP,<https://j-parc.jp>,(参照 2022-1-23)
- [7] SuperKamiokande HP,<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.html>,(参照 2022-1-23)
- [8] CERN Document server,<https://cds.cern.ch/>,(参照 2022-1-23)
- [9] A. Bonnemaison *et al* ,”Study of neutrino-nucleus interaction at around 1 GeV using cuboid lattice neutrino detector, WAGASCI, muon range detectors and magnetized spectrometer, Baby MIND, at J-PARC neutrino monitor hall”,25th PAC meeting, 15-17 January 2018,
https://j-parc.jp/researcher/Hadron/en/pac_1801/pdf/P69_2018-5.pdf
- [10] S Conforti Di Lorenzo *et al* ,
”SPIROC: design and performances of a dedicated very front-end electronics for an ILC Analog Hadronic CALorimeter (AHCAL) prototype with SiPM read-out”,
2013 JINST 8 C01027
- [11] SPIROC2 datasheet
https://indico.cern.ch/event/232082/contributions/493652/attachments/385835/536707/Spiroc2_userGuide2009_datasheet.pdf
- [12] WAGASCI-hardware-documentation,
<https://github.com/YNUneutrino/WAGASCI-hardware-documentation>
- [13] ROOT,<https://root.cern/>
- [14] 片山優菜, 横浜国立大学, 修士論文
- [15] 浅田祐希, 横浜国立大学, 修士論文