

J-PARC T59 実験(WAGASCI プロジェクト)における横方向
ミューオン検出器 sideMRD の建設及び宇宙線を用いた
性能評価試験

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 1464014
浅田 祐希

平成 30 年 2 月 15 日

概要

T2K 実験は、ニュートリノ振動を高精度で測定するための長基線ニュートリノ振動実験である。現在、ニュートリノ生成後約 300m 先に設置された前置検出器を用いてニュートリノの反応断面積などの不定性を除去しているが、精密測定のために系統誤差の削減が求められており、前置検出器ホール B2 フロアに新型検出器である WAGASCI 検出器を設置しこれらを用いることによって誤差を削減する予定である。

WAGASCI 検出器は、シンチレータを三次元格子状に組み込み、その格子の空間内にニュートリノ標的となる水またはプラスチックを入れ、荷電粒子のトラックに対して 4π 方向のアクセプタンスを得ることができる。WAGASCI 検出器の周囲には、側面側にミューオントラッキング検出器 (side MRD)、下流側に磁場を印加した鉄構造体のミューオンの粒子反粒子を識別する目的をもった検出器 (Baby MIND) を設置し、ニュートリノ反応で生じた運動量も測定する。

WAGASCI 検出器から大角度方向に飛んだ二次粒子 (主にミューオン) に対してのトラッキングや粒子の判別の精度を向上させることができるので side MRD の目的であり、本研究では、WAGASCI 検出器の側面側に設置される side MRD の建設及び宇宙線を用いた性能評価試験について述べる。side MRD は、鉄板 11 層とシンチレータ 10 層からなり、シンチレータの各層はプラスチックシンチレータを 8 枚で構成されている。このシンチレータは薄さに対して幅が大きいので、波長変換ファイバーを波状に埋め込んで用いる。

また、WAGASCI 検出器を設置する場所について、off-axis 角が 1.5° 、 1.06° となる場所と候補が 2箇所あげられている。off-axis 角の違いでニュートリノビームのフラックスが変化するので、どの場所に設置する方がニュートリノビームのエネルギー分布の不定性除去を向上することができるのかということを本研究にて検証した。

目 次

第 1 章 ニュートリノ振動	4
1.1 ニュートリノ振動とは	4
1.2 今までのニュートリノ振動測定	5
第 2 章 T2K 実験	7
2.1 概要	7
2.2 ニュートリノビーム	7
2.2.1 ニュートリノビームライン	7
2.2.2 off-axis 法	8
2.3 前置検出器	8
2.3.1 INGRID	10
2.3.2 ND280	10
2.4 後置検出器：スーパーカミオカンデ	13
第 3 章 WAGASCI (WAter Grid And SCIntillator) 検出器	14
3.1 目的	14
3.2 設計	14
3.2.1 検出器の概要	14
3.2.2 設置場所	15
3.2.3 WAGASCI 検出器	15
3.2.4 Muon range detector (MRD)	16
3.2.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)	17
第 4 章 ニュートリノ反応	20
4.1 ニュートリノと核子・原子核反応	20
第 5 章 side MRD の建設	23
5.1 sideMRD の概要	23
5.2 side MRD の構造及び建設作業	23
5.3 プラスチックシンチレータの挿入	26
5.4 エレクトロニクスの取り付け	29
5.4.1 MPPC のセッティング	30
5.4.2 使用する DAQ システム	31
5.4.3 エレクトロニクスのマウントの準備	34
5.4.4 エレキボックス内の光漏れのテスト	34
5.5 宇宙線を用いた性能評価試験	39
5.5.1 イベントディスプレイ	42
5.5.2 データ解析 ゲインの算出	47

5.5.3 データ解析 スレッショルド値の変更による平均光量の比較	50
5.6 検出器の搬出	57
5.7 sideMRD の耐震強度計算	59
第 6 章 検出器設置場所のエネルギー分布解析	62
6.1 目的	62
6.2 JNUBEAM ニュートリノビームフラックス生成のシミュレーション	63
6.3 NEUT ニュートリノ反応シミュレーションプログラム	63
6.4 手法	63
6.5 検出器のジオメトリ	64
6.6 結果	64
第 7 章 結論	70

第1章 ニュートリノ振動

ニュートリノは、重力相互作用を除いた弱い相互作用のみを行う中性のレプトンである。ニュートリノには、電子ニュートリノ (ν_e)、ミュー・ニュートリノ (ν_μ)、タウ・ニュートリノ (ν_τ) の3世代とその反粒子が存在している。ニュートリノはかつて素粒子物理学の標準模型において質量を持たないものと考えられてきたが、ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノに質量を持つことが示唆されるようになった。本章では、ニュートリノ振動の経緯について述べる。

1.1 ニュートリノ振動とは

1962年、ニュートリノが質量を持ち時間発展とともにその種類を変化させるニュートリノ振動という現象が理論的に提唱された。

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 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) は異なっており、以下のように質量の固有状態の混合状態であるとする。

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

U_{MNS} は、牧・中川・坂田行列 (MNS 行列) と呼ばれ、以下の行列で表される [1]。

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

ここで $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量の固有状態 ν_i 、 ν_j の混合角、 δ は複素位相を表しており、 $\delta \neq 0$ のとき MNS 行列は CP 対称性が破れるので、 δ は CP 位相とも呼ばれる。弱い相互作用の固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ 、 $|\nu_\beta\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_1\rangle$ 、 $|\nu_2\rangle$ を用いると、

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

と表され、質量固有状態の時間発展は、

$$|\nu_1(t)\rangle = e^{-i(E_1 t - p_1 x)} |\nu_1(0)\rangle \quad (1.4)$$

と書ける。相対論的に考えると、 $m_i \ll E_i$ なので、距離 L だけ進んだときは

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} |\nu_1(0)\rangle \\ e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} |\nu_2(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

と近似できる。このとき $|\nu_\alpha\rangle$ が $|\nu_\beta\rangle$ に変化する確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4E_\nu}\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

となる。ここで、 $\Delta m_{ij} = m_i^2 - m_j^2$ 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。また、 $|\nu_\alpha\rangle$ である確率も同様に、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) &= 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]}\right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

と求まる。ニュートリノ 3 世代での振動確率は

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}\right) \end{aligned} \quad (1.8)$$

と表される。

1.2 今までのニュートリノ振動測定

ニュートリノには質量が存在することがニュートリノ振動により示唆されたが、ニュートリノの質量起源はまだ解明されていない。MNS 行列の精密な測定はその質量起源を探るために重要である、今までの実験測定により MNS 行列は

$$|U_{MNS}| \sim \begin{pmatrix} 0.82 & 0.54 & 0.15 \\ 0.48 & 0.53 & 0.71 \\ 0.31 & 0.65 & 0.69 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

と求められている。また、クォークの混合行列である CKM 行列は、

$$|V_{CKM}| \sim \begin{pmatrix} 0.97434^{+0.00011}_{-0.00012} & 0.22506 \pm 0.00050 & 0.00357 \pm 0.00015 \\ 0.22492 \pm 0.00050 & 0.97351 \pm 0.00013 & 0.0411 \pm 0.0013 \\ 0.00875^{+0.00032}_{-0.00033} & 0.040 \pm 0.0013 & 0.99915 \pm 0.00005 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

であり、これらを比較すると MNS 行列の非対角成分は大きいことがわかり、これはニュートリノの混合が大きいことを示している。Tri-bimaximal モデルでは、 $\theta_{13} = 0^\circ$ 、 $\theta_{23} = 45^\circ$ と考えて

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix} \quad (1.11)$$

であると提唱している。しかし、これまでの θ_{13} の測定結果では Tri-bimaximal モデルに反している結果となっており、また θ_{23} では 45° の最大混合を示すことが示唆されており、 θ_{23} のより良い

精密測定が課題となっている。また、レプトンの CP 対称性の破れの測定は、物質優勢宇宙の謎を解く手がかりになる可能性があり、そのためにも δ_{CP} 測定もまた重要な課題の一つである。

他にも、ニュートリノ振動では質量二乗誤差の絶対値を測定できるが質量の固有値の順番がまだわかっていない、ニュートリノは粒子と反粒子が同じマヨラナ粒子であるかなどの問題もあり、これらの謎を解決するために様々なニュートリノ実験が行われている。

第2章 T2K 実験

T2K 実験の概要やビームライン、検出器について及び現状の課題について本章にて述べる。

2.1 概要

T2K 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC からのニュートリノビームによるニュートリノ反応を、J-PARC 構内の前置検出器及び 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町に位置するスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノ振動のパラメータを精密測定している長基線ニュートリノ振動実験である (図 2.1)。



図 2.1: T2K 実験の概要。

2.2 ニュートリノビーム

2.2.1 ニュートリノビームライン

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は LINAC (LINear ACcelerator)、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring) の 3 つの加速器からなる大強度陽子加速器施設である (図 2.2)。

LINAC で生成された陽子ビームは RCS と MR で加速され、8 パンチの内部構造をもつスピルとなり 2.48 秒ごとにグラファイト標的に送られる。陽子ビームはグラファイト標的に照射され、ハドロン反応により、 π 中間子を中心とする多くのハドロンが生成される。生成された π 中間子は、3 台の電磁ホーンによって平行に収束され、標的下流にある 94m の崩壊領域で以下のように崩壊することでニュートリノビームが生成される。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (2.1)$$



図 2.2: J-PARC の 3 つの加速器

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.2)$$

電磁ホーンの極性を変化させることによって、収束させる π 中間子の電荷を選ぶことで変更することが可能である。図 2.3 にニュートリノビームラインと検出器の位置関係を示す。

2.2.2 off-axis 法

off-axis 法とは、検出器をニュートリノビーム軸の中心からはずれたところに配置することで、幅の狭いニュートリノのエネルギー分布を得る方法であり T2K では世界初で採用している。T2K での off-axis 角 2.5° であり、エネルギーを $0.5 \sim 0.7\text{GeV}$ に合わせ、ニュートリノ振動効果が最もよくみえる角度を採用している(図 2.4)。

T2K では主に CCQE(Charged Current Quasi Elastic) 反応を信号として用いる。1 GeV 以下では CCQE 反応が主な反応であるが、on-axis のエネルギー領域である 2GeV 付近では ν_e が現れるバックグラウンドとなる π^0 を生じる NC1 π^0 反応や ν_μ が消失するバックグラウンドとなる π 中間子を生じる CC1 π 反応が増加してしまうので、これらのバックグラウンドを減らすために off-axis 法は重要である。したがって、ビーム方向は重要なパラメータであり、前置検出器 INGRID などにおいて常にモニターされている。

2.3 前置検出器

前置検出器は、グラファイト標的から 280 m 下流にある検出器群であり、ビーム軸上に設置された INGRID (on-axis 検出器) と π 中間子の平均崩壊地点とスーパーカミオカンデを結ぶ直線上に位置する ND280 (off-axis 検出器) から構成されている。図 2.5 に前置検出器が設置されているニュートリノモニター棟の概観を示す。

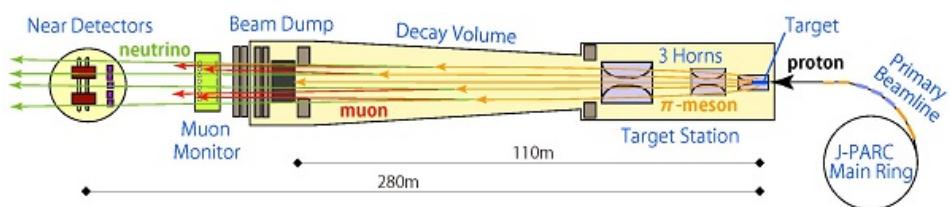


図 2.3: ニュートリノビームラインの生成と前置検出器

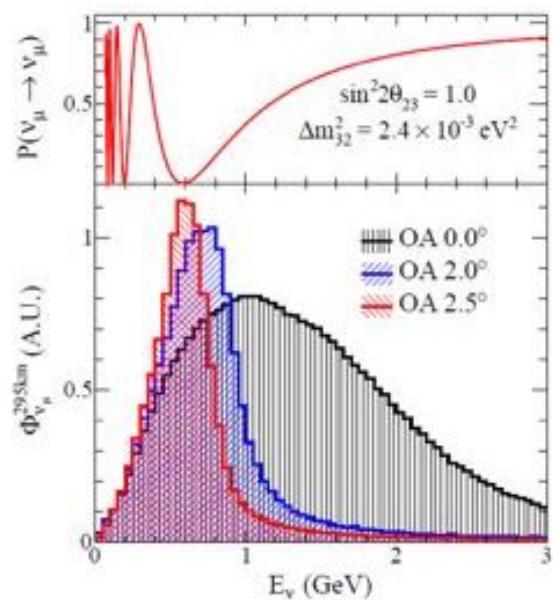


図 2.4: off-axis 角とニュートリノエネルギー及び振動確率の関係

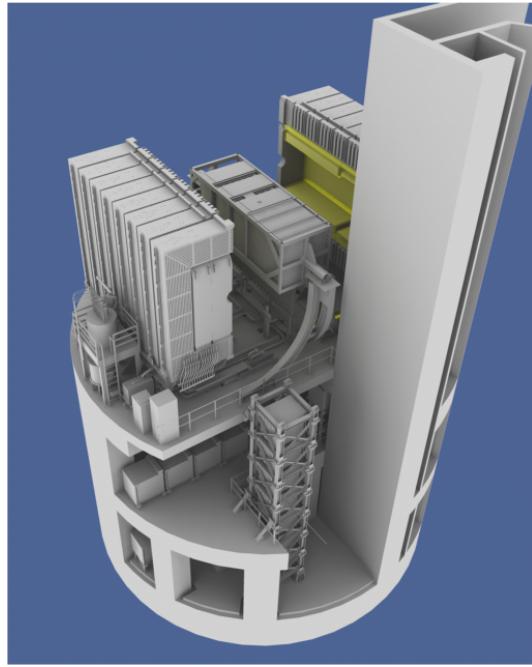


図 2.5: 前置検出器の概観図

2.3.1 INGRID

on-axis 検出器 INGRID は、ニュートリノビーム方向を高精度でモニターするための検出器であり、水平・鉛直にそれぞれ 7 台ずつ設置されたモジュール及び 2 台のショルダーモジュールからなる（図 2.6 及び 図 2.7）。

各モジュールは鉄の層が 9 層、シンチレータの層が 11 層のサンドウィッチ構造をしている。ニュートリノ反応は基本的に鉄の層にて、鉄との間で起こり、生成された荷電粒子（主に μ ）をシンチレータで検出し、波長変換ファイバーと光検出器 MPPC で読み出す。こうしてニュートリノ反応のイベントレートを算出し、その値が各モジュールにおけるニュートリノ空間分布に対応すると考える。水平・鉛直方向それぞれにおいてこの分布をガウシアンでフィットした中心ビーム方向中心と考えることでニュートリノビームの方向をモニターしている。ビーム方向がずれると、スーパーカミオカンデにおけるニュートリノフラックスのエネルギー分布が変化してしまうので、INGRID では 1 mrad よりも良い精度でビーム方向をモニタリングしている。

2.3.2 ND280

ここでは、図 2.8 に示された ND280 検出器群について述べる。

UA1 magnet

検出器全体に 0.2 T の磁場を加えている大型常伝導電磁石。UA1 実験で使用されたものを CERN より寄贈された。

P0D : π^0 Detector

π^0 を含む終状態におけるニュートリノ反応検出器。鉛の薄膜とシンチレータ及び水ターゲッ

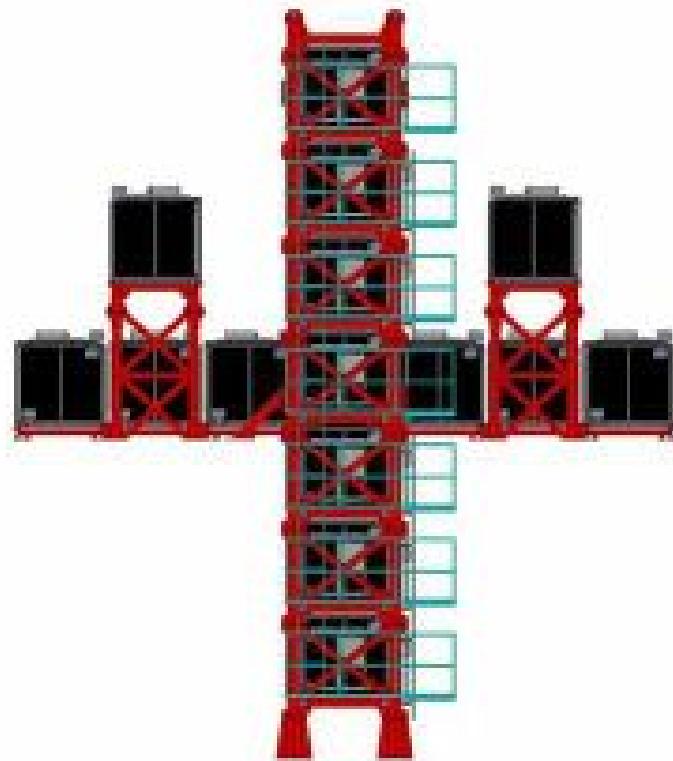


図 2.6: INGRID の概観図

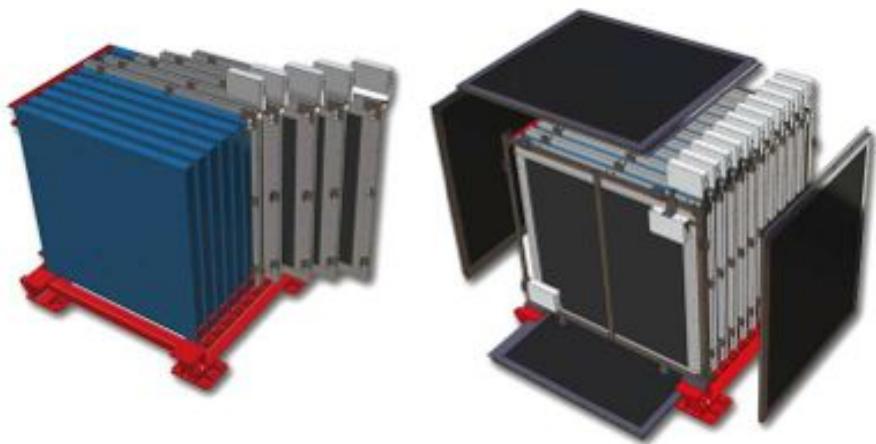


図 2.7: INGRID モジュール

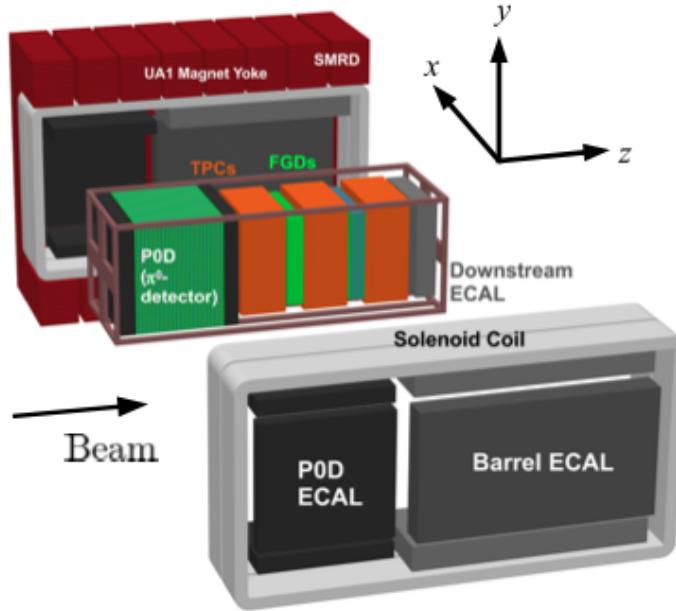


図 2.8: ND280 検出器群

トのサンドウィッチ構造になっている。

FGD : Fine Grained Detector

断面が約 1 cm 四方の細かく区分されたシンチレータからなるトラッカー。検出器がニュートリノ標的となり、反応点付近の粒子を観測することができる。シンチレータのみのモジュール、水標的とシンチレータとのサンドウィッチ構造のモジュールの 2 台からなる。

TPC : Time Projection Chamber

ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子の磁場で曲げられた軌道とエネルギー損失から粒子の識別および運動量の観測を行う。

ECAL : Electromagnetic CALorimeter

ニュートリノ反応によって生成された電子や γ 粒子の電磁シャワーを観測しエネルギーを測定している。訛りとシンチレータのサンドwich構造になっている。

SMRD : Side Muon Range Detector

UA1 magnet の鉄レイヤー同士の隙間に設置された、プラスチックシンチレータからなる検出器。大角度での散乱にて TPC に入射しなかった荷電粒子の軌跡及びエネルギーの再構成を行う。

2.4 後置検出器：スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデとは、J-PARC から 295 km 離れた岐阜県飛騨市神岡町神岡鉱山の地下 1000 m に位置する後置検出器であり、50 kt の純粋を用いた直径 39.3 m、高さ 41.4 m の円筒の形をした水チエレンコフ検出器である(図 2.9)。スーパーカミオカンデの内部は 20 インチの光電子増倍管が内側向きに 11200 本、外部は 8 インチの光電子増倍管が外側向きに 1885 本設置されている。

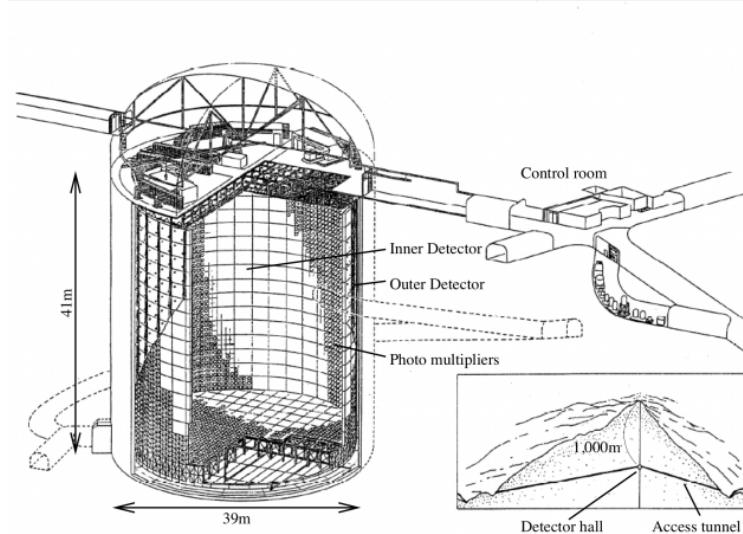


図 2.9: スーパーカミオカンデの概観図

水標的とニュートリノの反応によって生じた荷電粒子が、

$$\beta > \frac{1}{n} \quad (2.3)$$

であるとき (n は水の屈折率)、

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2.4)$$

となる方向に円錐状のチエレンコフ光を放射し、リング状の像を作る。その光を光電子増倍管で観測し、粒子の種類や生成点、エネルギー、運動方向を再構成している。

第3章 WAGASCI (WAter Grid And SCIntillator) 検出器

この章では新型ニュートリノ検出器である WAGASCI について述べる。

3.1 目的

T2K 実験では、ニュートリノ生成直後に設置された前置検出器を用いてニュートリノフラックスや反応断面積などの不定性の削減を行っている。現在 off-axis 前置検出器には水を標的とした検出器が設置されており、ニュートリノの水に対する反応断面積の解析が進められている。off-axis 前置検出器は、ニュートリノ反応で生成された荷電粒子を検出できる方向が構造上により前方方向に限られている。そのため、スーパーカミオカンデにて観測を行う phase space に測定できない領域が存在し、その部分については外部のデータ (MiniBooNE など) に依存している。よって、我々は三次元格子構造を持った新型ニュートリノ検出器群を製作し、 4π 方向のアクセプタンスでの測定を目指した。

3.2 設計

3.2.1 検出器の概要

図 3.1 に検出器の全体図を掲載する。

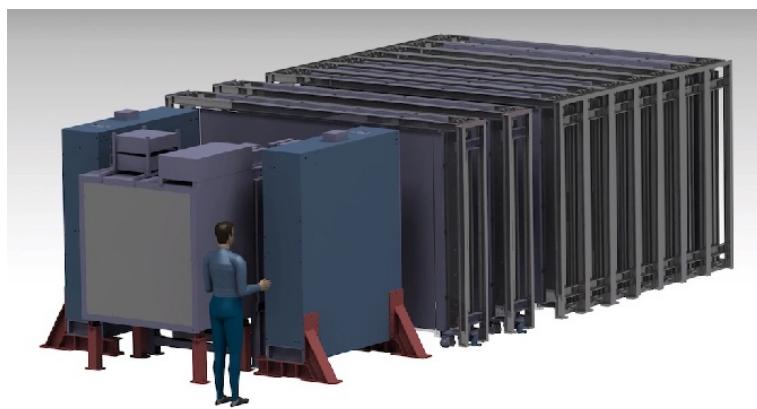


図 3.1: WAGASCI 検出器の全体図

中心に置かれている WAGASCI 検出器はニュートリノ標的の水と CH、プラスチックシンチレータが用いられており、ビーム方向にそって、水標的層、CH 標的層という順番で 4 層から構成

されている。WAGASCI 検出器は INGRID 型の陽子モジュールと INGRID モジュールに挟まれるように設置し、その側面に 2 台の Muon Range Detector (side MRD) 、下流側に、磁場を印加した検出器 (Baby MIND) 1 台を配置する予定である。WAGASCI 検出器と side MRDs の間は 50 cm ほどの間隔を空け、ヒットタイミングの時間差から荷電粒子の運動方向を求め、バックグラウンドのイベントを除去する。

3.2.2 設置場所

設置場所はニュートリノモニター棟地下 2 階に設置し、ニュートリノビームを測定に用いる。設置場所に関しては、off-axis 角が 1.5° 、 1.06° となる場所と候補が 2 箇所あげられている。角度の違いでニュートリノビームのフラックスが変化するので、どの場所に設置する方がニュートリノビームの反応断面積を向上することができるのかについて本論文の第 6 章にて検証した。

3.2.3 WAGASCI 検出器

WAGASCI 検出器は、1280 枚のプラスチックシンチレータとそれを取り囲む 0.7 トンの水で構成されている。その内部は、プラスチックシンチレータを格子状に組み込むことで三次元の格子構造を実現している。その様子が図 3.2 である。プラスチックシンチレータは、縦方向、グ

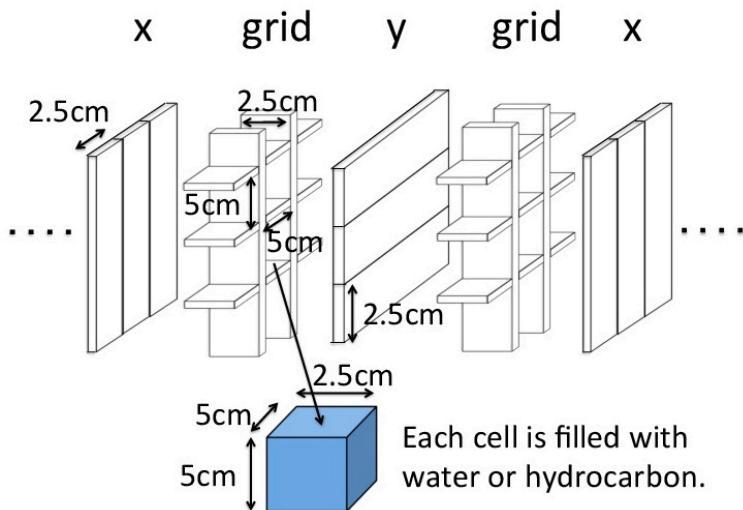


図 3.2: WAGASCI 検出器内部の三次元格子構造

リッド構造、横構造、グリッド構造という順番で並んでおり、そしてグリッド構造内のプラスチックシンチレータは縦横 5 cm 間隔で並んでおり、その中に水を入れるので、 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ の水のセルが並んでいるようになる (水抜きの場合は空洞である)。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子はプラスチックシンチレータを通った際にトラックが形成され、WAGASCI 検出器ではプラスチックシンチレータを三次元格子構造に組むことで 4π 方向のアクセプタンスを実現できる。

3.2.4 Muon range detector (MRD)

MRDとは、鉄とプラスチックシンチレータのサンドウィッチ構造をした検出器であり、ミューオンの検出とその運動量の測定を目的としている。MRDは下流側に1台、側面側に2台設置する予定である。

side MRD

side MRDとは、WAGASCI 検出器の側面側に設置される MRD (図 3.3) である。

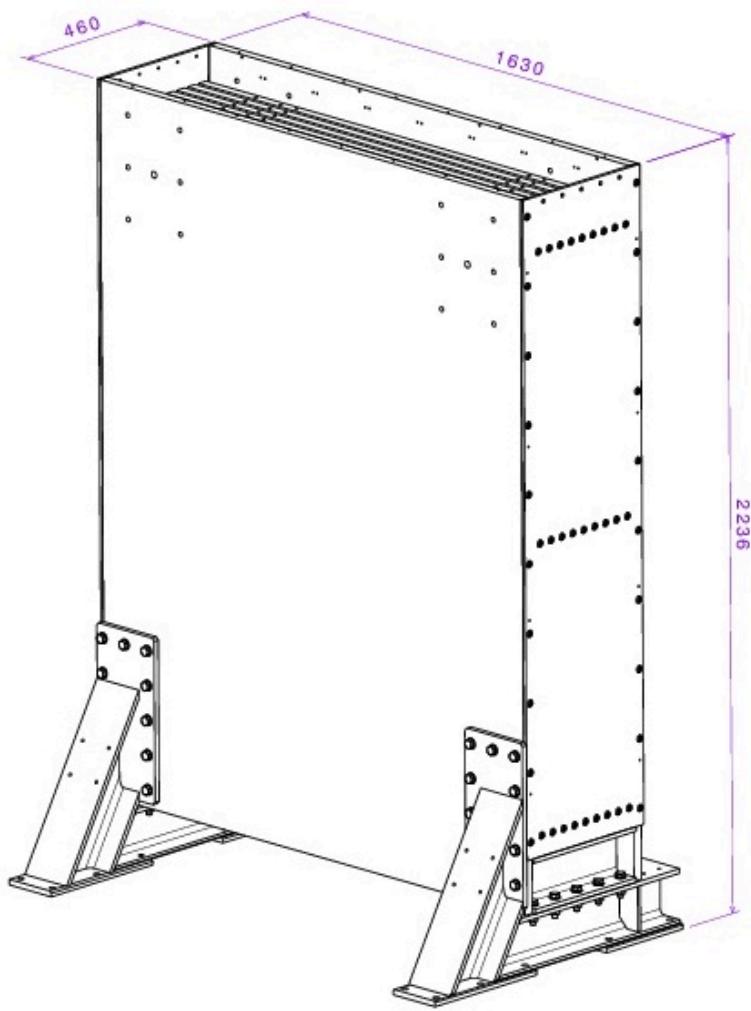


図 3.3: side MRD の構造体

今回、我々は sideMRD の建設及び性能試験を行ったので、5 章にて後述する。

baby MIND

Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector) とは、WAGASCI 検出器の下流側に設置する MRD である。ニュートリノ反応によって生成される荷電粒子 μ の粒子か反粒子かを判別

するために、磁場を印加させた鉄によるニュートリノ検出器である。図 3.4 は、構造体内の磁場の分布である。

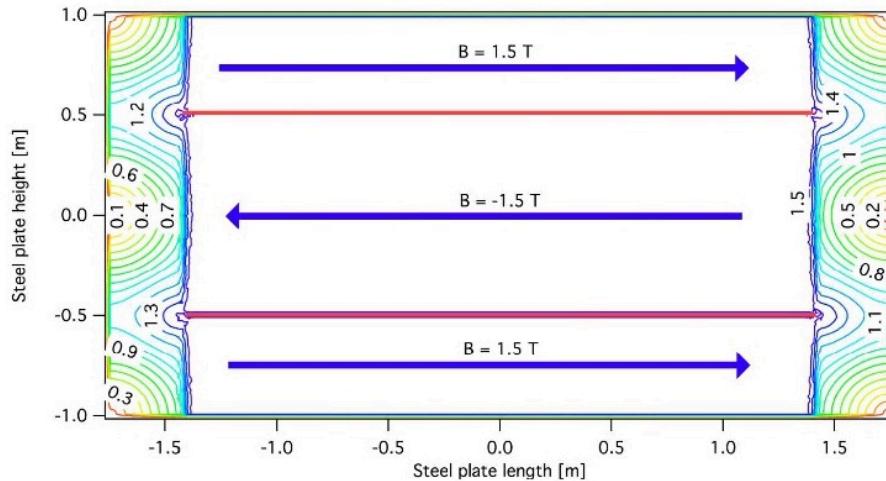


図 3.4: Baby MIND 内の磁場の分布

3.2.5 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

MPPC(Multi Pixel Photon Counter) は、数光子から数千光子程度の微弱光測定のために開発された半導体光検出器(図 3.5)である。ピクセル化された APD をガイガーモードで動作させ、

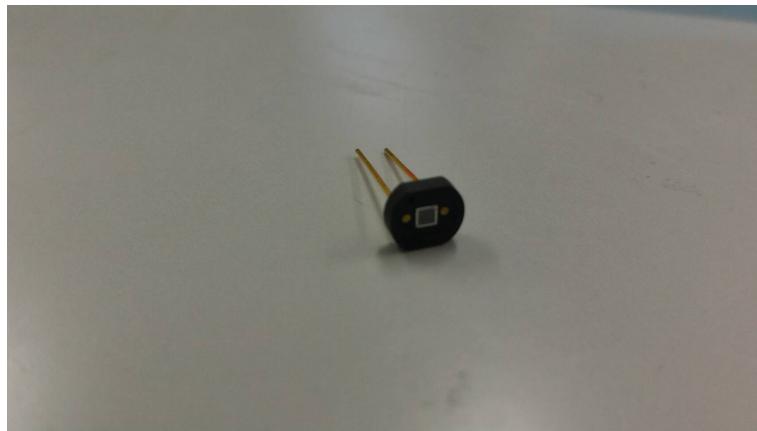


図 3.5: MPPC (S13360 シリーズ)

各ピクセルの信号の和を並列に読み出すタイプの半導体光検出器を一般的に Pixelated Photon Detector (PPD) と呼ぶが、MPPC は浜松ホトニクス製の PPD である [2]。MPPC は、その小ささ、光電子増倍管に並ぶゲイン、と光検出効率、磁場に対する耐性、高いコストパフォーマンス、70 V 程度の電圧で動作する、など光電子増倍管と比較して数々の優れた性質を持ち、非常に手軽に使用することができる。さらに、読み出しチャンネル数を飛躍的に増やすため、より再分割された超高精度検出器を作ることを可能とする。また、増幅幅領域が $2\mu\text{m}$ 程度のため信号の立ち上がりは早く、時間分解能にも優れている。

動作原理

MPPC は、1 ~ 3 mm 四方のシリコンチップが搭載された多数の APD ピクセルで構成されている。ピクセル内の p-n 接合面にブレイクダウン電圧 (APD がガイガーモードで動作するための閾値電圧) より 1 ~ 4 V 程度高い逆バイアス電圧をかけることにより、増幅領域はガイガーモードで動作し、入射光子によりはじき出された光電子がこの領域中で雪崩崩壊する。電子雪崩が発生したピクセルには電流が流れることでピクセルに直列に接続された数百 kΩ 程度のクエンチング抵抗に電圧降下が発生し、増幅領域にかかっている電位降下が発生し、増幅領域にかかっている電位差を下げることで雪崩を終息させる。このとき、1 ピクセルからの出力電荷 Q_{pix} は、 C_{pix} をピクセル一つのキャパシタンス、 V を印加電圧、 V_{bd} ブレイクダウン電圧とすると、

$$Q_{pix} = C_{pix}(V - V_{bd}) \quad (3.1)$$

と表される。全ピクセルの出力電荷の和が出力信号なので、 C_{pix} および印加電圧が一様であれば MPPC の出力電荷 Q は、

$$Q = \sum_i^N Q_i = N Q_{pix} \quad (3.2)$$

となり、電子雪崩を起こしたピクセルの数 N に比例した電荷が得られる。MPPC のゲイン g は Q_{pix} を素電荷 $|e|$ で割ったものとして定義され、 $C_{pix} \sim 10 - 100 \text{ pF}$ 、 $\Delta V \sim 1\text{V}$ の範囲では、 $g = 10^5 \sim 10^6$ という値になる。

基礎特性

以下に、MPPC の基礎特性について述べる。

- ゲイン、ブレイクダウン電圧

電圧降下により印加電圧がブレイクダウン電圧以下になると電子雪崩が終了するので、ゲインは $\Delta V = V - V_{bd}$ に比例する。ブレイクダウン電圧は温度に線形に依存することがわかつており、室温から液体窒素温度までの温度係数は約 50 mV/K であることが確認されている。

- ダークノイズ

一般的に、PPD は高室温で高いダークノイズレートを持つ。ダークノイズの原因は、主に熱励起による電子が電子雪崩を起こすことによると考えられ、ノイズの大きさは 1 光電子相当がほとんどであり、ピクセル間クロストークやアフターパルスの影響で 2 光電子以上現れる。また、不純物による中間準位や局所的な高電圧の領域が存在すると電子雪崩が発生しやすくなりノイズ源となる。

- 光子検出率 (Photon Detection Efficiency, PDE)

MPPC の PDE は量子効率 (QE)、受光面積中の有感領域の割合、電子雪崩を起こす確率の三つの確率で決まっている。MPPC は APD の構造を基にしているため、PMT に比べて高い QE をもつ。しかし、各ピクセル外周にバイアス抵抗と絶縁用の不感領域があるため、有感領域の割合が 100 % ではない。電子-正孔雪崩を起こす確率は ΔV に依存するため、MPPC の PDE もまた ΔV に依存する。

- ピクセル間クロストーク

あるピクセルで電子雪崩が発生した際、その雪崩中で赤外波長の光子が発生し、周囲のピク

セルに伝搬して別の雪崩を引き起こしてしまうことがある。このような現象をピクセル間クロストークという。これが頻繁に起きると、MPPC の出力が実際に検出されるべき光電子数より大きくなってしまう。また、この頻度からピクセル毎にばらついていると、応答関数の形に不定性を生じる。クロストークが起きる確率は、一定時間内に発生する熱電子ノイズの数から、次のようにして測定された。

$$\text{クロストーク確率} = \frac{\text{2 ピクセル相当以上のノイズ数}}{\text{1 ピクセル相当以上のノイズ数}} \quad (3.3)$$

熱電子ノイズは各ピクセルでランダムに起きるので、二つ以上のピクセルが同時に熱電子ノイズを出す確率は非常に小さい。よって、2 ピクセル相当以上のノイズはほとんどがクロストークによって引き起こされたものと考えられる。

- アフターパルス

MPPC の増幅領域内には結晶の格子欠陥が存在してここに雪崩電子が捕獲され、行って時間後に再放出されることにより再び雪崩を引き起こすことがある。このような現象はアフターパルスと呼ばれる。この欠陥のポテンシャルの深さは様々であり、どの程度の深さの欠陥に電子が落ち込むかでその捕獲確率や再放出の時定数が変化する。この現象の定量的な理解や改善は未だ進行中であるが、結晶の質を向上させることによりアフターパルスを減少させることを期待され、今後の改善が待たれる。

MPPC 信号読み出し回路

以下に、MPPC の基本接続回路を示す(図 3.6)。47 kΩ の抵抗と 0.1 μF のコンデンサのロー

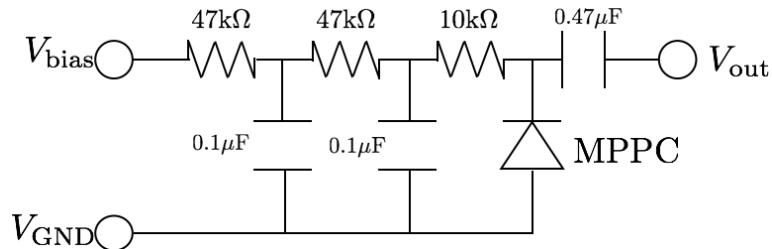


図 3.6: MPPC 信号読み出し回路

バスフィルターの 2 段を用いて電源からくるノイズを除去し、読み出し側は 0.47 μF のコンデンサで電源からくる直流成分を除去する。この MPPC 信号読み出し回路は、後述の sideMRD 検出器の建設におけるエレキボックス内の光漏れテストの際に使用した。

第4章 ニュートリノ反応

本章では、T2K 実験においての系統誤差の最大の要因である反応断面積の不定性について関わるニュートリノ反応について述べる。

4.1 ニュートリノと核子・原子核反応

ニュートリノは、実験において反応が起こった場合にその存在を検出することしかできない。ニュートリノと核子・原子核反応には、荷電カレント反応 (Charged Current) 中性カレント反応 (Neutral Current) の2種類の反応がある。荷電カレント反応は、ニュートリノは同一タイプの荷電レプトンに転換し、実験では荷電レプトンを検出する。中性カレント反応は、ニュートリノはニュートリノのまま残るが、それが反応した核子・原子核にエネルギーと運動量を受け渡す。これによって標的が反跳したり、破碎したりするので、実験ではこのエネルギー移行を検出する。

エネルギーが 100 MeV 以上におけるニュートリノ反応は、図 4.1 のように、以下の反応が確率的に起こる。

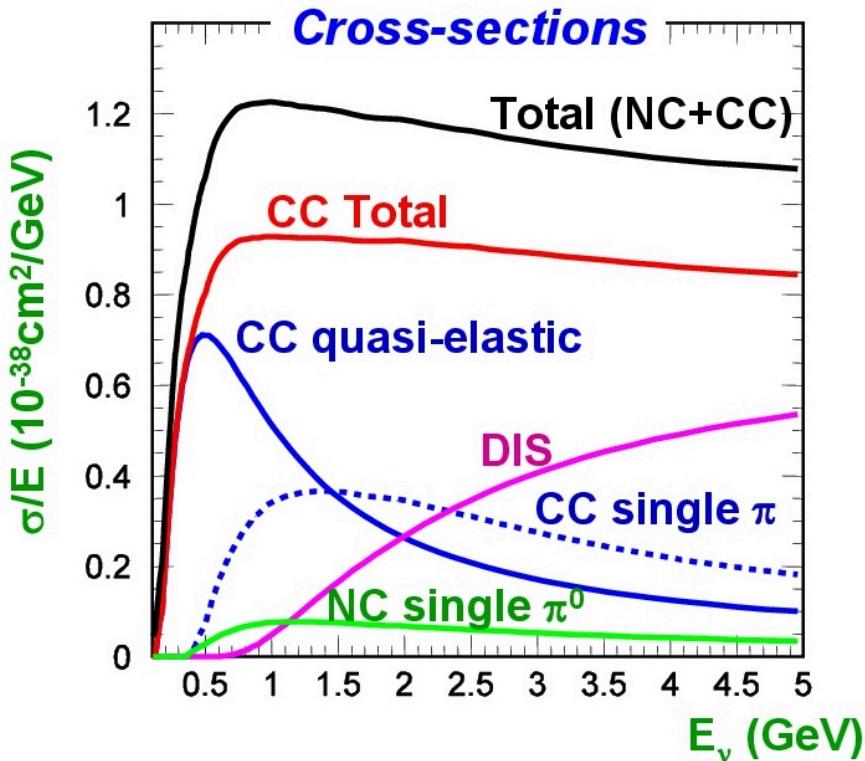


図 4.1: ニュートリノの反応断面積とエネルギーの関係

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

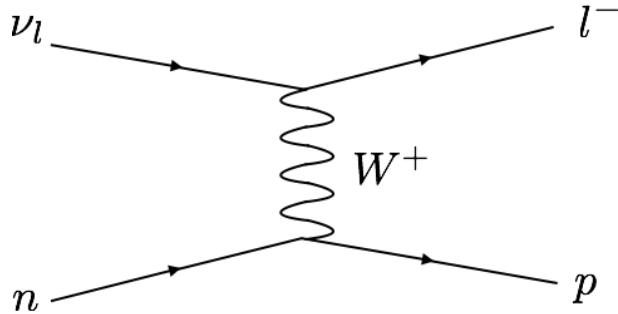


図 4.2: CCQE 反応

CCQE 反応 (図 4.2) は、数百 MeV の低エネルギー領域での主な反応であり、T2K 実験では、もとのニュートリノのエネルギーを再構成することができる CCQE 反応を主に信号として用いている。生成された荷電レプトンの散乱角 θ_l およびエネルギー E_l を用いることによって、2 体問題としてニュートリノのエネルギーを以下のように再構成が可能となる。

$$E_\nu = \frac{m_N E_l - m_l^2/2}{m_N - E_l + p_l \cos \theta_l} \quad (4.1)$$

ここで、 m_N は核子の質量、 m_l 、 p_l はそれぞれのレプトンの質量と運動量である。

単一パイオニン生成反応 (Single pion production)

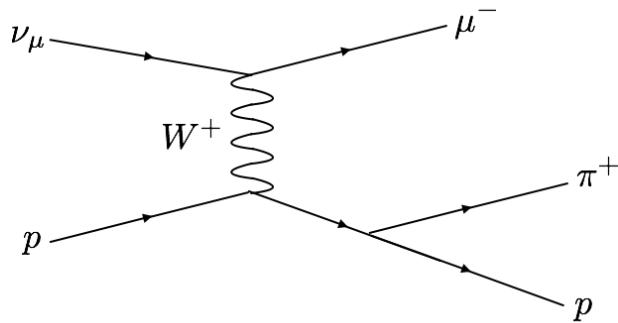


図 4.3: CC (Charged Current) 1 π 反応

CC (Charged Current) 1 π 反応 (図 4.3) は、 π 中間子を生成する反応であり、数 GeV 以下で Charged Current Quasi Elastic 散乱の次にくる反応であり、低エネルギーのニュートリノ振動実験にも影響を与える。 π 粒子が何らかの理由 (検出器の性質・原子核内反応など) で検出できなかった場合、CCQE 反応と誤認される可能性があり、CCQE 反応の主となるバックグラウンドと

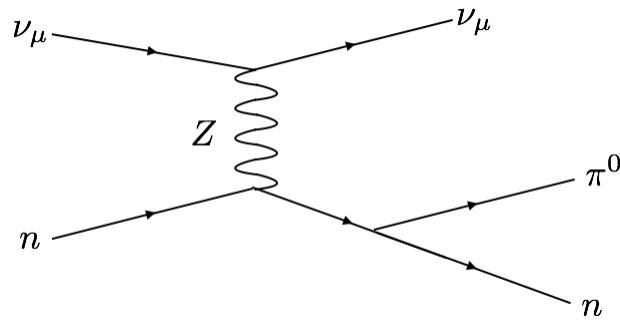


図 4.4: NC (Neutral Current)1 π 反応

なる。NC (Neutral Current)1 π 反応 (図 4.4) は、 π^0 を生成する反応であり、 π^0 が崩壊して発生する γ のうち片方が非対称崩壊などにより運動量が小さく検出されなかった場合や、2つの γ のなす角が小さくて1つの γ と判別された場合は、CCQE 反応と誤認される可能性がある。

深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering)

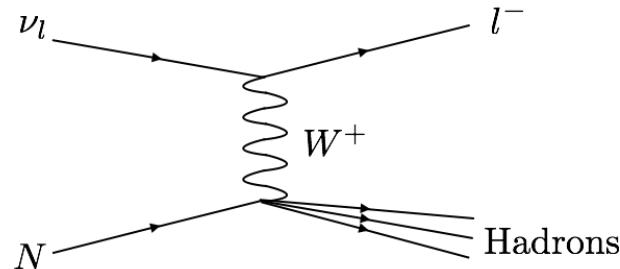


図 4.5: DIS 反応

DIS 反応 (図 4.5) は、高エネルギー領域 (\sim 数十 GeV) の主要な反応であり、ニュートリノが quark と散乱していると近似できる。

第5章 side MRD の建設

本章では、side MRD の構造体の建設、シンチレータの挿入やエレクトロニクスの取り付け、宇宙線を用いた試験テストについて述べる。ロシアの INR (The Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences) にて製作されたプラスチックシンチレータを 2017 年 7 月横浜国立大学にて再度性能試験を行った。同年 11 月下旬、1 台目の side MRD の鉄構造体を搬入・組み立てを行った。組み立てた後、シンチレータを鉄層の間に挿入、エレクトロニクス及び MPPC の取り付け、最後に宇宙線を用いたテストを行い、side MRD の性能を評価した。2018 年 2 月下旬から 2 台目の side MRD の建設にとりかかり、2018 年 6 月に 2 台の検出器を J-PARC に搬出し、NM 棟 B2 フロアに設置する予定である。したがって、本論文では 1 台目の sideMRD の建設について述べる。

5.1 sideMRD の概要

side MRD とは、WAGASCI 検出器の側面側に設置される MRD である。高さ 1.8 m、長さ 1.6 m、厚さ 3 cm の鉄板が 11 層とシンチレータ 10 層からなり、シンチレータの各層は高さ 1.8 m、長さ 0.2 m、厚さ 7 mm のプラスチックシンチレータを 8 枚で構成されており、1 台につき総重量は約 8 トンである。重量を約 8 トンにおさめた理由は、検出器建設後に J-PARC に搬出し NM 棟 B2 フロアに設置する際に使用できるクレーンの許容荷重が 10 トンのため、作成する検出器の重量を 10 トン以内に制限する必要があったためである。WAGASCI 検出器から大角度方向に飛んだ二次粒子（主に μ ）に対してのトラッキングや粒子の判別の精度を向上させることが side MRD の目的である。このシンチレータは薄さに対して幅が大きいので、直径 1.0 mm の波長変換ファイバー (Y-11 (S タイプ)) を波状に埋め込んで用いる。その様子を図 5.1 に示す。そのため、波長変換ファイバーが長くなるので、MRD に用いるシンチレータに関しては両側読み出しで用いる。MPPC は、浜松フォトニクス製の S13081-050CS(X1) を用いた。

5.2 side MRD の構造及び建設作業

11 月下旬、1 台目の sideMRD の構造体部分の部品が横浜国立大学に搬入され、構造体の組み立てが行われた。sideMRD の鉄構造体は、以下の部品で構成されている（表 5.1 及び図 5.2、5.3）。図面の製作者及び組み立て手順書はフランスの LLR (Laboratoire Leprince-Ringuet) の共同研究者 (Oscar, Alain, Thomas ら) が作成し、構造体の部品のうちサイズが大きな部品に関しては日本の日鈴精機工業に発注し、その他の部品は LLR にて製造され日本に送られた。

この後の作業（シンチレータの挿入、エレクトロニクスの取り付け）の利便性や搬出のことを考慮して、横浜国立大学にて行われる作業は全て sideMRD 構造体及び検出器が地面に水平に置かれた状態で行った。

以下に、組み立て手順を示す。このときの組み立て作業者は、日鈴精機工業の作業員 3 名である。

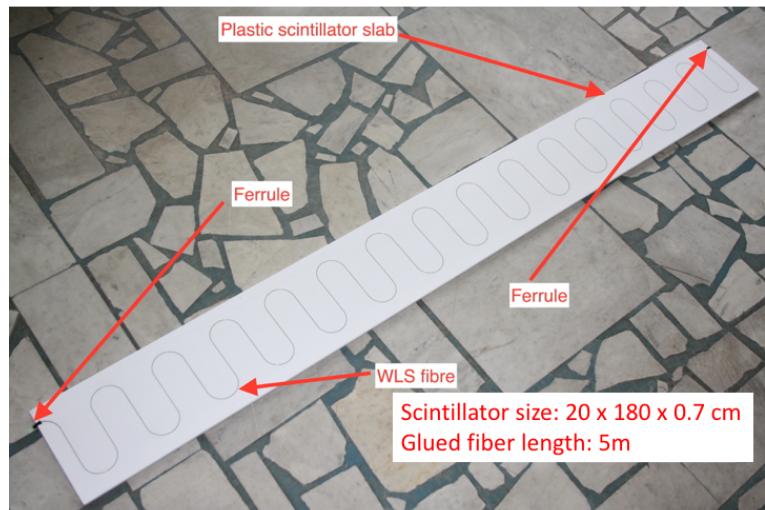


図 5.1: sideMRD にて用いるプラスチックシンチレータ

表 5.1: sideMRD 鉄構造体の部品

図面番号	参照番号	名称	数量(1台)
WGI-MD-03-001	3	Right Foot	1
WGI-MD-03-002	3	Left Foot	1
WGI-MD-03-003	5	Rear Plate	1
WGI-MD-03-004	1	Front Plate	1
WGI-MD-03-005	4	Central Plate	9
WGI-MD-03-006	2	Side Plate	2
WGI-MD-03-007	15	Spacer H Beam	2
WGI-MD-03-014	6	Spacer 1	16
WGI-MD-03-015	7	Spacer 2	16
WGI-MD-03-016	8	Spacer 3	4
WGI-MD-03-017	16	Lifting Bar	2
WGI-MD-03-020	9	Vertical Foot	2
WGI-MD-03-021	10	H Position Foot	2
WGI-MD-03-022	11	Rotating Part	2
WGI-MD-03-023	12	Interface Rotating	2
WGI-MD-03-024	13	Washer	2
WGI-MD-03-025	14	Rotating Shat	2

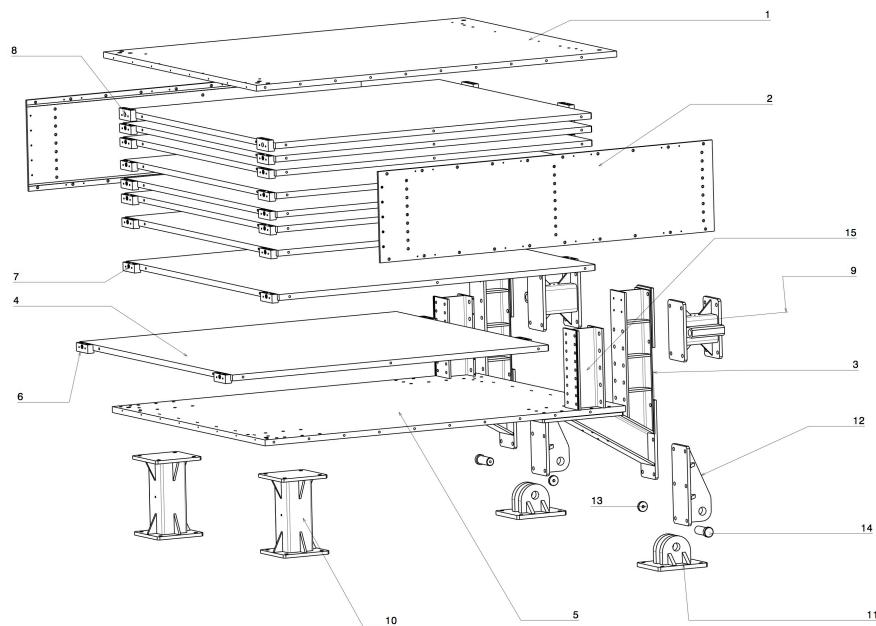


図 5.2: sideMRD 構造体の設計図 1

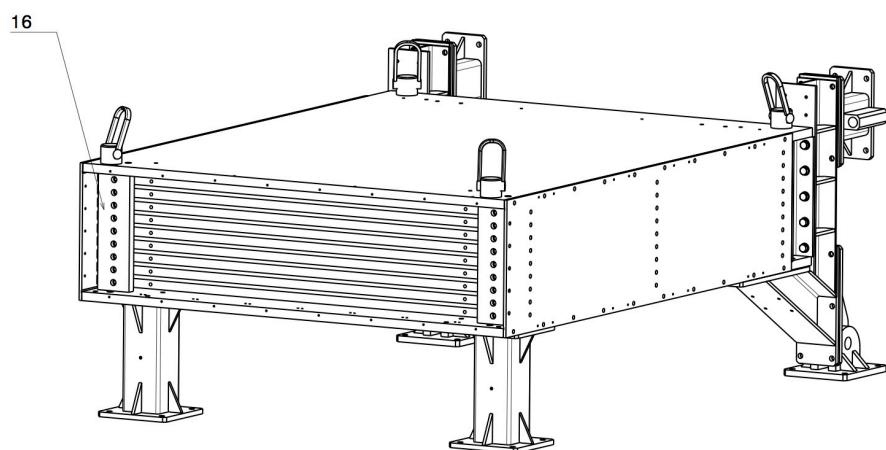


図 5.3: sideMRD 構造体の設計図 2

- (1) Foot 部分、Rear Plate があらかじめ取り付けられた状態で、2.8 トンクレーンを用いてワーキングルームのシャッター側から建設作業地点へ移動させた。
- (2) Side Plate 2 枚を取り付けた。
- (3) 事前に Spacer が取り付けられた Central Plate 8 枚を Rear Plate の上に順番に置いてゆき、Side Plate ボルトで留めた。このとき、各 Central Plate の荷重は 4 つの Spacer にほとんど集まっていることになり、最終的に Foot 部分にて荷重が支えられていることになり、Side Plate 部分における荷重負荷はほとんどないと考えた。
- (4) Front Plate を置き、全体をボルトで固定した。最後に、Spacer H Beam と Front Plate、Rear Plate 間が接触する箇所を溶接で固定した。

組み立て完了後の構造体は図 5.4 である。



図 5.4: 組み立て直後の sideMRD 構造体

このあと、鉄の層の間に挟まっている Spacer を取り除き、指定箇所に Lifting Bar を取り付けた。このとき、一度に全ての Spacer を取り除くと、13 mm の隙間が鉄板の荷重により狭くなり、かつ Side Plate における荷重が集中するので、Spacer を 1 つずつ取り外して Lifting Bar を取り付けた。このときの作業者は、浅田、岡本浩大君、INR から建設作業を手伝いに来てくださった Nikolay Yershov である。このときの構造体の各長さを図 5.5 にまとめた。

5.3 プラスチックシンチレータの挿入

sideMRD 構造体の完成後、front plate と rear plate の間の central plate で仕切られた隙間 10 層に、プラスチックシンチレータを 1 層につき各 8 枚挿入する。隙間は 13 mm、シンチレータの厚さは 7 mm なのでそのまま挿入すると余分に 6 mm の隙間が生じてしまい、J-PARC への運

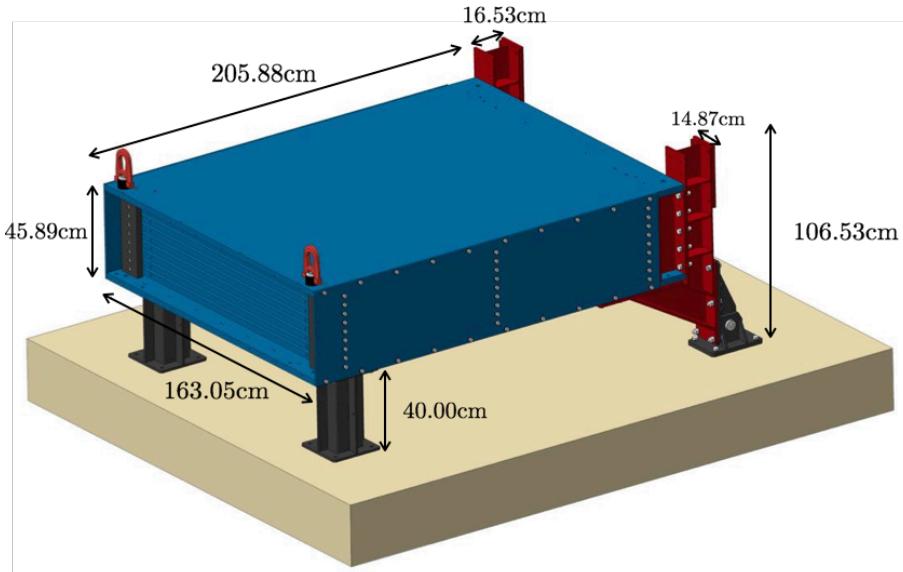


図 5.5: sideMRD 構造体のジオメトリ

搬、NM 棟にて検出器を垂直に立てる際や地震などの振動によりシンチレータが隙間の中で動き、ファイバーに傷が付き光量が変化するといった問題が懸念されていた。それらの対策として、シンチレータの両側面に厚さ 3 mm のスポンジゴム (EPDM 製, 厚さ 3 mm, 幅 20 mm, 長さ 1.8 m) を両端に 2 枚貼り、更に、挿入におけるスポンジゴムと plate 間の摩擦の軽減及びシンチレーションファイバーの保護を考慮して、シンチレータをシートで巻いた状態 (図 5.6) で挿入を行うことにした。



図 5.6: 鉄板間に挿入するためのシンチレータ

この際に使用したシートは、デュポン社のタイベックハウスラップ (Tyvek sheet) であり、透湿性、防水性、引っ搔きや引っ張りに対する強度をもつ。

シンチレータを挿入する層の全体の幅は 1610 mm であり、幅 200 mm のシンチレータを 8 枚

挿入すると理想では 10 mm の猶予があるが、巻いたシートのシワや挿入位置のズレなどで猶予が足りなくなる恐れがあるので、図 5.7 のような形状のシートを使用して幅の方向に対してのシートのしわ寄せが来ないようにした。

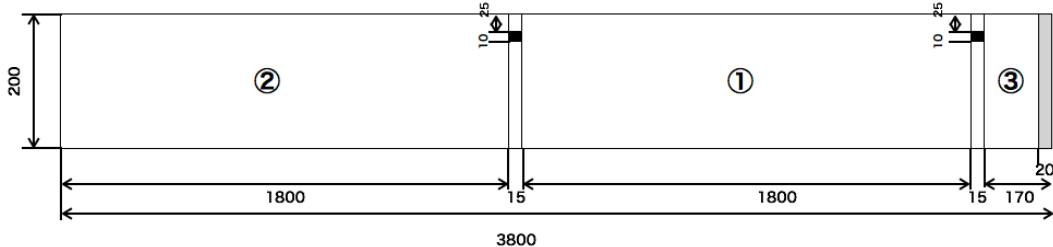


図 5.7: シートの形状

黒塗りの部分はシンチレータと MPPC とのコネクションのための穴であり、灰色の部分はシートを留めるためのシールである。

スポンジゴムを貼ったシンチレータを 1 面の上に置き、2 面をシンチレータの上にかぶせ、その上に 3 面をかぶせシールで留める、という手順で挿入前のシンチレータを作成した。10 層 80 枚全てのシンチレータを挿入した構造体は図 5.8 である。このときの作業者は、淺田、岡本浩大君、Nikolay yershov、大阪市立大学大学院理学研究科高エネルギー物理学研究室 田中慎也さんである。



図 5.8: シンチレータ挿入後の構造体

このとき、シンチレータを挿入する層は 13 mm が理想であるが、鉄板の製作の段階での誤差や荷重の位置によるたわみが原因で、隙間の厚さが 13 mm より狭い箇所があり、両面にスポンジゴムを取り付けてシンチレータを挿入できないことがあったので、その箇所に関してはファイバーがむき出しになっている側面のみにスポンジゴムを取り付けて挿入した。挿入後の各シンチレータ層の厚さを表 5.2 にまとめる。

このままの状態では、検出器を垂直に起こしたと際にシンチレータが bottomo 側から滑り落ち

表 5.2: シンチレータ挿入後の各層の厚さ (1 台目)

層	左側 (mm)	中央部 (mm)	右側 (mm)
第一層 (最上部)	13.2	13.5	14.5
第二層	14.1	13.9	15.1
第三層	12.6	12.5	11.6
第四層	13.6	14.0	14.7
第五層	12.1	11.8	11.8
第六層	13.7	14.7	14.2
第七層	15.3	14.5	13.7
第八層	12.2	12.6	13.2
第九層	13.9	14.2	13.7
第十層 (最下部)	13.0	11.3	11.2

てしまうので、構造体の上下面に Scintillation Support Bar (図面番号 WGI-MD-03-01-009) を取り付け、シンチレータを上下方向に対して固定した (図 5.9)。このときの作業者は、浅田、岡本浩大君、Nikolay Yershov である。



図 5.9: Support Bar 取り付け後の構造体

5.4 エレクトロニクスの取り付け

シンチレータの挿入後、構造体の両側面側に、データ読み出し用のエレクトロニクスを取り付けた。まずは、各シンチレータに取り付ける MPPC のセッティングについて述べる。

5.4.1 MPPC のセッティング

MPPC とエレクトロニクスは、Single MPPC Board の入力チャンネルから同軸ケーブル、PCB ボードを通して接続される。さらに、今回使用するプラスチックシンチレータのファイバー面と MPPC の受光面を固定するために、MPPC の足側ににスポンジを装着したのち、オプティカルコネクタを着用する。Single MPPC Card は構造体の上下面の中央部に取り付けるので、中央部から最も遠いシンチレータのファイバーのコネクタに MPPC が取り付けられるような長さを用意しなければならない。図 5.10 より、最長の長さは約 90 cm と見積もられるので、長さ 1.1 m の同軸ケーブル (高槻無線、U.FL-2LP-068N1-A-1100) を用意した。single MPPC board の各チャ

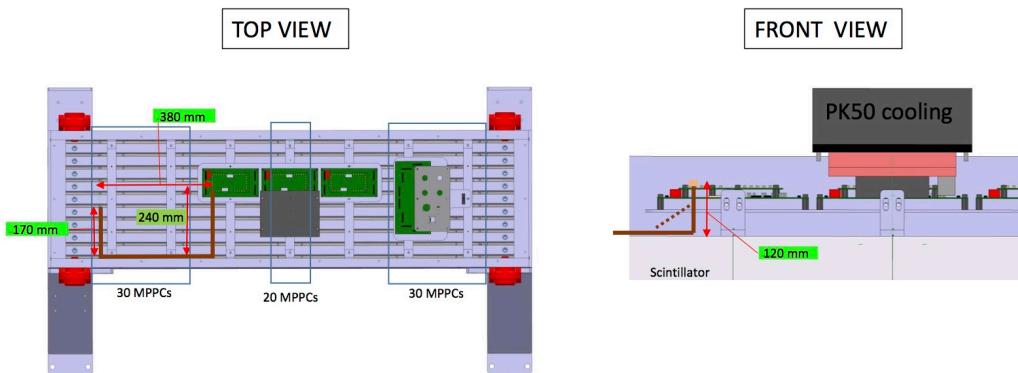


図 5.10: 同軸ケーブルの配線予想図

ンネルに対してどの MPPC が接続されているかをわかるように同軸ケーブルの両端にタグをつけた (図 5.11)。このときの作業者は、浅田、岡本君、Nikolay である。また、MPPC には固有の



図 5.11: MPPC、オプティカルコネクタ、PCB ボード、同軸ケーブルのセット

operation voltage や breakdown voltage があり一つ一つ区別する必要があるので、シンチレータの固有番号、それに取り付ける MPPC の固有番号と single MPPC board のチャンネルの対応を表にて作成した (表 5.4 は 1 台目の sideMRD に関しての各番号の対応表である)。このとき、使

用する MPPC 160 個の operation voltage は出来るだけ近い数値のものを選び、1 つのシンチレータの両端に取り付ける MPPC の operation voltage が等しくなるように組み合わせた。

この表は左側が Top 、右側が Bottom になるように水平に置いた検出器を上から見たときの各層各シンチレータの並びをそのまま表している。

5.4.2 使用する DAQ システム

今回の sideMRD 検出器にマウントされる DAQ(データ収集) システムは以下のエレクトロニクスで構成されている。図 5.12 は、WAGASCI 検出器にて使用されている DAQ システムであり、今回の sideMRD 検出器においても同様の DAQ システムを使用した。

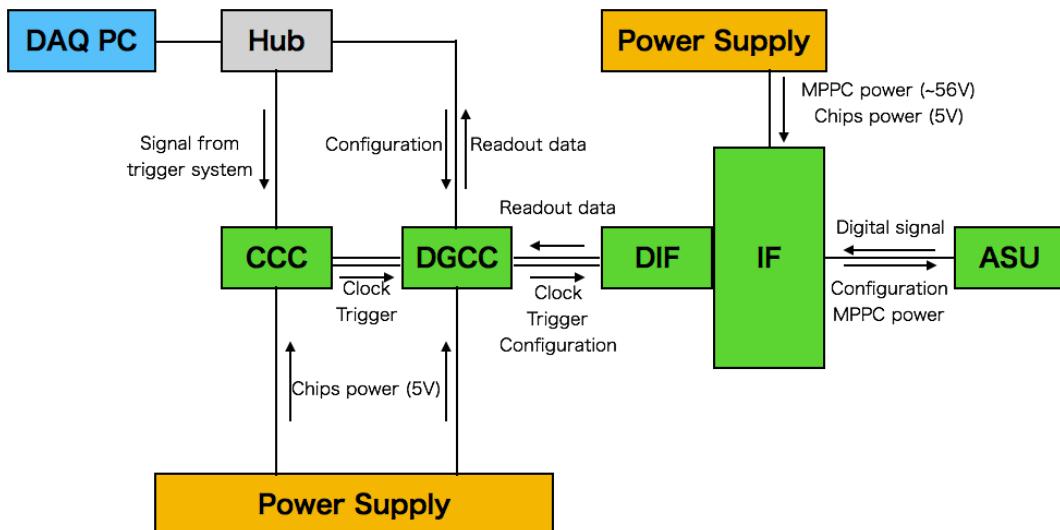


図 5.12: WAGASCI 検出器及び sideMRD 検出器の DAQ システム

- ASU (Active sensor Unit)
SPIROC(SiPM Integrated Rand Out Chip) という、フランスのオメガ社が開発した、MPPC の信号のアナログ処理、デジタル化、デジタルパートによる管理、PC に転送までを行う ASIC が搭載された基板であり、MPPC からの信号を読み出す。
- Interface
MPPC や各基板に電圧を供給する基板であり、1 つの DIF と 4 つの ASU と接続可能である。
- DIF (Detector Interface)
SPIROC2D を操作するための FPGA が搭載されている。PC 側からの信号を SPIROC に送信し、その応答信号及び出力データを得る役割をもつ。
- GDCC (Giga Data Concentrator Card) 及び CCC (Clock and Control Card)
GDCC は PC と DIF 間の信号の伝達を行う FPGA が搭載されている基板であり、CCC は GDCC に clock 信号を送信する。

表 5.3: Single MPPC Card、MPPC、シンチレータの各番号の対応表 (1 台目)

Layer	Top channel	Top MPPC ID	Scintillator ID	Bottom channel	Bottom MPPC ID
最上層	1-1	10139	37	4-1	10757
最上層	1-11	10732	196	4-11	10378
最上層	1-21	10133	180	4-21	10754
最上層	2-6	10433	192	5-6	10267
最上層	2-16	10512	195	5-16	10721
最上層	2-26	10408	194	5-26	10767
最上層	3-6	10252	193	6-6	10358
最上層	3-16	10609	199	6-16	10144
第二層	1-2	10180	160	4-2	10752
第二層	1-12	10379	139	4-12	10372
第二層	1-22	10745	138	4-22	10136
第二層	2-7	10447	200	5-7	10563
第二層	2-17	10514	182	5-17	10606
第二層	2-27	10188	181	5-27	10652
第二層	3-7	10771	184	6-7	10363
第二層	3-17	10415	207	6-17	10194
第三層	1-3	10750	157	4-3	10753
第三層	1-13	10380	93	4-13	10135
第三層	1-23	10134	152	4-23	10735
第三層	2-8	10434	36	5-8	10561
第三層	2-18	10513	144	5-18	10182
第三層	2-18	10186	145	5-28	10651
第三層	3-8	10795	146	6-8	10362
第三層	3-18	10656	306	6-18	10529
第四層	1-4	10151	203	4-4	10755
第四層	1-14	10153	204	4-14	10158
第四層	1-24	10377	307	4-24	10756
第四層	2-9	10448	158	5-9	10565
第四層	2-19	10493	164	5-19	10176
第四層	2-29	10189	149	5-29	10653
第四層	3-9	10785	150	6-9	10359
第四層	3-19	10490	212	6-19	10193
第五層	1-5	10748	143	4-5	10382
第五層	1-15	10157	128	4-15	10375
第五層	1-25	10376	142	4-25	10739
第五層	2-10	10441	188	5-10	10360
第五層	2-20	10436	187	5-20	10655
第五層	1-26	10424	148	4-26	10779
第五層	3-10	10711	151	6-10	10364
第五層	3-20	10483	156	6-20	10568

表 5.4: Single MPPC Card、MPPC、シンチレータの各番号の対応表 (1 台目)

Layer	Top channel	Top MPPC ID	Scintillator ID	Bottom channel	Bottom MPPC ID
第六層	1-16	10374	178	4-16	10751
第六層	2-1	10442	175	5-1	10562
第六層	2-11	10494	174	5-11	10177
第六層	2-21	10307	183	5-21	10654
第六層	3-1	10567	186	6-1	10356
第六層	3-11	10604	185	6-11	10361
第六層	3-21	10485	202	6-21	10236
第七層	1-7	10152	168	4-7	10337
第七層	1-17	10743	172	4-17	10759
第七層	2-2	10445	171	5-2	10268
第七層	2-12	10435	170	5-12	10183
第七層	2-22	10517	179	5-22	10303
第七層	3-2	10776	213	6-2	10357
第七層	3-12	10482	165	6-12	10196
第七層	3-22	10797	141	6-22	10202
第八層	1-8	10749	147	4-8	10137
第八層	1-18	10746	153	4-18	10353
第八層	2-3	10446	176	5-3	10564
第八層	2-13	10534	161	5-13	10173
第八層	2-23	10187	177	5-23	10389
第八層	3-3	10799	154	6-3	10178
第八層	3-13	10269	210	6-13	10197
第八層	3-23	10486	140	6-23	10439
第九層	1-9	10138	166	4-9	10384
第九層	1-19	10747	201	4-19	10351
第九層	2-4	10443	209	5-4	10566
第九層	2-14	10515	198	5-14	10131
第九層	2-24	10518	191	5-24	10658
第九層	3-4	10775	190	6-4	10179
第九層	3-14	10416	187	6-14	10354
第九層	3-24	10266	173	6-24	10605
最下層	1-10	10760	206	4-10	10383
最下層	1-20	10373	314	4-20	10352
最下層	2-5	10444	38	5-5	10524
最下層	2-15	10516	119	5-15	10119
最下層	2-25	10519	163	5-25	10650
最下層	3-5	10777	208	6-5	10366
最下層	3-15	10603	137	6-15	10195
最下層	3-25	10265	206	6-25	10484

- Single MPPC Card

Single MPPC Card(図 5.13) はシングルタイプの MPPC と ASU 間と接続するための基板であり、1 枚につき最大 32 ch の MPPC が接続可能である。

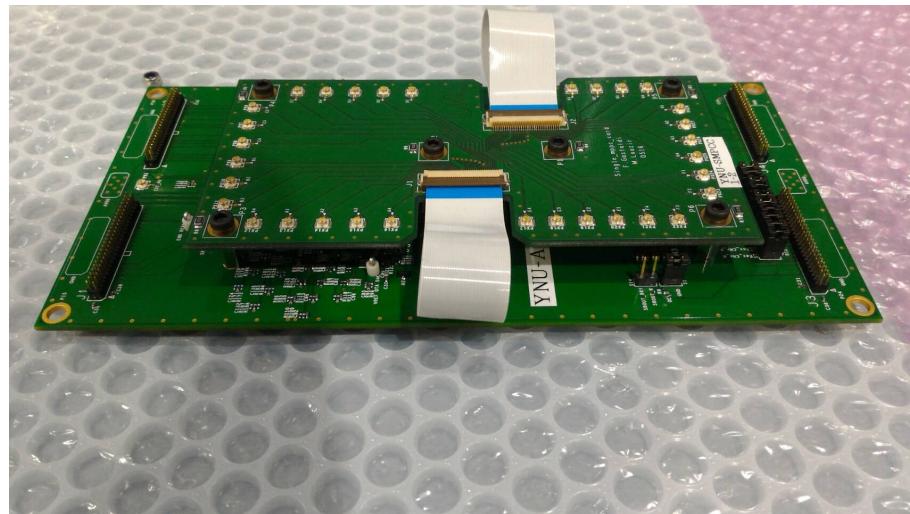


図 5.13: ASU に接続された Single MPPC Card (上部の基板)

5.4.3 エレクトロニクスのマウントの準備

以下にエレクトロニクスのマウントを行うための準備作業の手順を説明する。このときの作業者は淺田、岡本浩大君、Nikolay Yershov である。

- (1) sideMRD top 側の横側面に Top Cover Corner (図面番号 WGI-MD-03-01-010)、top 側の横側面に SMRD H Bar (図面番号 WGI-MD-03-01-008) を取り付けた。
- (2) top 側、bottom 側の外周部分に Spacer とスポンジゴムを接着した。
- (3) Scintillator Support Bar にスペーサを取り付け、その上に IF、DIF を支えるための Plate と ASU、Single MPPC Board を支えるための Plate を取り付けた。

MPPC の取り付け、基盤の取り付けを終えると最終的にはエレキボックスとして Top Cover 及び Bottom Cover を取り付ける。各 Cover には、IF が取り付けられる位置と中央部 (真ん中の ASU と Single MPPC Card が位置する場所) が長方形方に 2箇所くり抜かれており、そこにはそれぞれ Patch Panel というケーブル類の出入り口と、クーリングユニットというエレキボックス内部を冷やすための機器を取り付けるためのものである。実際にはクーリングユニットを搭載した状態で以降の実験測定を行う必要があると思われるが、クーリングユニット用の電源ケーブルが未だ納入されていないので (2018 年 2 月初旬現在)、今回はクーリングユニットは全て取り外された状態で宇宙線を用いた性能評価の試験を行った。

5.4.4 エレキボックス内の光漏れのテスト

各基盤を取り付け後、クーリングユニットとエレキボックスの内外に通すケーブルの出入り口 (feedthrough) 以外は Top Cover (図面番号 WGI-MD-03-01-011)、Bottom Cover (図面番号

WGI-MD-03-01-012) によって塞ぎ、エレキボックス内部は遮蔽されることになる。しかし、部品のサイズの誤差などで構造体側面側に隙間が発生し、エレキボックス内部に光が漏れている可能性があるので、宇宙線を用いた試験を行う前に内部の光漏れを確認するためのテストを MPPC を用いて行った。

手順

- (1) Patch Panel (エレキボックス内の各ケーブルの feedthrough を備付けるプレート) を Top Cover 及び Bottom Cover に取り付け、2 つの Cover を構造体の上下面に取り付けた。
- (2) MPPC の信号読み出し回路 (MPPC 含む) を組んだ基板 (図 5.14) を、クーリングユニットを取り付ける長方形の穴からエレキボックス内に挿入した。今回使用した MPPC の特性は以下のようである。

表 5.5: 光漏れテスト用に使用した MPPC の特性

Type No.	S13081-050CS(X1)
Serial No.	10772
Dark(μ A)	0.027
V_{br} (V)	51.00
V_{op} (V)	54.00
V_{max} (V)	55.00



図 5.14: 使用した MPPC 及び MPPC 信号読み出し回路

- (3) クーリングユニット用の穴、Patch Panel をブラックシートで塞ぎ(図 5.15)、54.00 V のバイス電圧を印加し、デジタルオシロスコープで MPPC の信号の波形を確認した。

結果

- Top Cover 側の場合
- はじめに測定した時の電流値は約 1.4μ A と非常に高い数値であった(図 5.16)。理由として



図 5.15: ブラックシートで Cover の穴を塞いだ様子 (Bottom Cover 側)



図 5.16: 貫通穴を塞ぐ前の Top Cover 側の MPPC の信号の電流値

は、Top Cover 側の Front Plate 及び Rear Plate に付けられている貫通穴(この時点では使用されていないネジ穴)がエレキボックス内に存在し、そこから光が漏れていたためである。そこで、一旦測定を止め、エレキボックス内の遮光に関する貫通穴をブラックシートで塞ぎ(図 5.17)、再度測定すると、電流値は約 $0.017 \mu\text{A}$ と小さくなり(図 5.18)、



図 5.17: 貫通穴を塞いだときの Top Cover 側の測定の様子



図 5.18: 貫通穴を塞いだ後の Top Cover 側の MPPC の信号の電流値

表 5.5 のダークカレントの値を下回る値をとった。したがって、Top Cover 側に関して光漏れはなくなったといえる。

- Bottom Cover 側の場合

はじめに測定した時の電流値は約 $0.26 \mu\text{A}$ と(図 5.19)、ダークカレントの数値に対しては

高い数値であった。Top Cover 側での場合と同様に、光漏れに影響を及ぼすと考えられる



図 5.19: 貫通穴を塞ぐ前の Bottom Cover 側の MPPC の信号の電流値

貫通穴を塞ぎ、さらに、Bottom Cover 側は Right Foot 及び Left Foot が取り付けられている箇所であり、その足回りの部品間の隙間から光が漏れる可能性があるのでその隙間をブラックシートで塞ぎ再度測定すると 約 $0.016 \mu\text{A}$ と下がり (図 5.20)、表 5.5 のダークカレントの値より小さな値をとった。したがって、Bottom Cover 側に関しても光漏れはなくなったといえる。



図 5.20: 貫通穴を塞いだ後の Bottom Cover 側の MPPC の信号の電流値

まとめ

今回の光漏れの試験の結果より、両側のエレキボックス内に光漏れは無かったが、エレキボックス内に直接通る貫通穴を塞ぐ必要があることがわかった。以下に、塞ぐ必要があると思われる貫通穴を示す(図 5.21 の赤丸箇所)。ここで、図 5.21 は Front Plate の図面で示したが、Rear Plateにおいても同じ位置の貫通穴は塞ぐ対象となっている。したがって、貫通穴はそのタップ穴に対応するネジを取り付けて穴を塞ぐ必要がある。

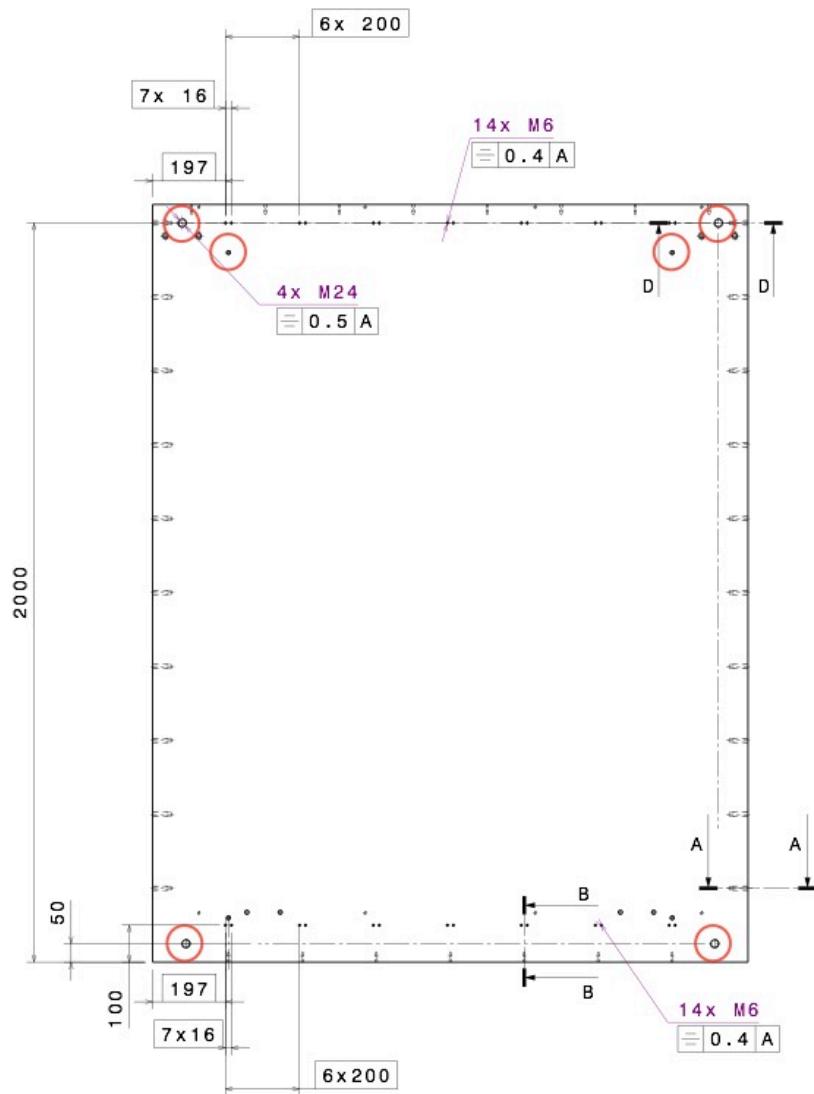


図 5.21: 塞ぐ必要があると考えられる貫通穴 (Front Plate)

5.5 宇宙線を用いた性能評価試験

宇宙線を用いた試験テストの主な目的は、今回建設した sideMRD 検出器に使用するプラチックシンチレータ及び MPPC の性能のばらつきや異常がないかを、測定データから計算した

MPPC のゲインや平均の光量を用いて確認を行うことである。

今回の測定においては、Top 側及び Bottom 側の 80 個の MPPC を用いて片側ずつ試験を行った。測定準備の手順は以下のようである。このときの作業者は浅田、岡本浩大君、松下昂平君、山口大輔さんである。

- (1) MPPC とシンチレータとの番号との対応を対応表に合わせてオプティカルコネクタを用いて接続した。
- (2) IF 及び DIF を載せる Plate を測定片側の Support Bar に付けられたスペーサに取り付けた。
- (3) ASU 及び Single MPPC Card を、それを載せる Plate に取り付けた。
- (4) IF 及び DIF 、 ASU 及び Single MPPC Card が取り付けられた Plate を測定片側の Support Bar に付けられたスペーサに取り付けた。
- (5) 同軸ケーブルと Single MPPC Card のチャンネルを対応表 (表 5.4) に合わせて接続した (図 5.22)。



図 5.22: 同軸ケーブル接続後の Top Cover の様子

- (6) 同軸ケーブルをいくつかの束でまとめた。
- (7) Top Cover を取り付けた (このとき、クリーリングユニット部分はブラックシートで塞いだ)。
- (8) エレキ関係のケーブルは、Patch Panel の穴を通したのち、Patch Panel 部分をブラックシートで塞いだ。
- (9) 光漏れの試験にて判明した、エレキボックス内の遮光に影響すると思われる貫通穴をブラックシートで塞いだ (図 5.23)。
- (10) 測定開始。

今回検出器にマウントしたエレクトロニクスの番号の対応表は以下の表 5.6 である。この表において、IF と ASU 、 ASU に接続されている Single MPPC Card の順番はそのまま上から順の



図 5.23: Top Cover 取り付け及びブラックシートで貫通穴を塞いだ図

表 5.6: 検出器 (1 台目) にマウントしたエレクトロニクスの対応表

マウント側	基板	番号
Top	IF	1-1
Top	ASU	2-3
Top	Single MPPC Card	2-24
Top	ASU	2-1
Top	Single MPPC Card	1-1
Top	ASU	2-4
Top	Single MPPC Card	1-2
Bottom	IF	2-1
Bottom	ASU	2-6
Bottom	Single MPPC Card	2-16
Bottom	ASU	2-10
Bottom	Single MPPC Card	2-20
Bottom	ASU	2-9
Bottom	Single MPPC Card	2-23

とおりである。

5.5.1 イベントディスプレイ

宇宙線によるデータが正常に取得出来ているかを確認するために、取得したイベントごとのイベントディスプレイを作成し、宇宙線の軌道がおよそ確認できるようにした。

イベントディスプレイの表示方法について

以下に、測定データのイベントごとのイベントディスプレイのサンプルを示す(図 5.24)。ここでは、Top 側から見た図となっている。1×1 マスの目が1つのシンチレータであり、縦に 10 個、

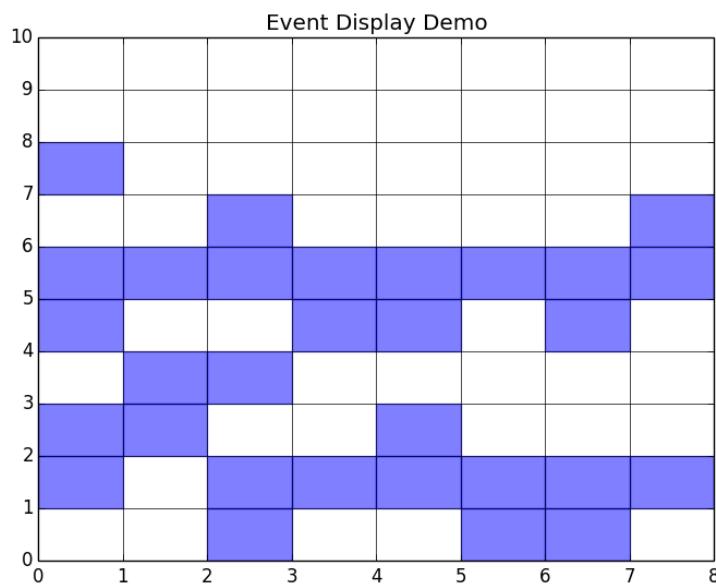


図 5.24: イベントディスプレイ (サンプル)

各層横に 8 個のブロックが並んでいる。一番上のブロックは最上層のブロック、一番下のブロックは最下層のブロックとなっている。宇宙線が検出器を通過するとその軌道上におけるシンチレータからシンチレーション光が発生するので、青いブロックが連続して表示される場合は宇宙線によるものだと判断できる。

イベントディスプレイの描画において SPIROC2D の測定データのパラメータのうち spill、time を使用した。spill は、信号データの蓄積と送信を行う時間の周期の回数のことを示し、今回の性能評価試験において spill は全て 60 ms に設定した。ちなみに、SPIROC2D によって得られる測定データでのエントリー数とは、spill の回数のことを表している。time は、hit が 1 となったときの spill の周期時間中の時間を表し、1 time が約 100 ps である。すなわち、宇宙線を光速とするとき time 値が 1 進んだとき宇宙線は約 3 cm 進むことになる。検出器面の厚さは 45 cm なので、およそ 15 time の範囲内で連続している hit を描画すればそれが宇宙線である。以下に、測定データのパラメータから粒子の位置を選定しイベントディスプレイとして表示する手順を示す。

- (1) シンチレータの位置と Single MPPC Card のチャンネルの対応表を元に、Top 側から見た構造体の図を用意する。

各 ASU では 同一時刻での time が異なり、さらに各チャンネルのコラムにおいても格納番号がずれことがある。たとえば、あるチャンネルのみに大きなダークノイズがシュレッショルド値を超えた信号として観測された場合、その信号もコラムの直近番号に格納されるので、その後 active time が終了するまでに宇宙線が通過した信号をコラムに格納する際に各チャンネルによってダークノイズを格納しただけズレが生じることになる。すなわち現状のデータをそのままイベントディスプレイに描画した場合ちぐはぐな図になってしまふので、time パラメータに様々な条件をかけて必要な信号における time の値及びコラムの格納順番を整えた。

- (2) まず、各エントリーごとに charge の値が 約 2 p.e. を超えた信号の time 値のみを取り出し、それ以外の信号は除去して再度コラムに格納した。このとき、active time が終了する際にコラムに格納されている最大の番号が平均して 6 ~ 7 なので、7 番目のコラムに格納されている time 値も除去の対象にした。
- (3) 各コラムごとに time 値のある値ごとにグループ分けした。
- (4) 青くするブロックが 10 ~ 15 個 (宇宙線が一直線に通過したイベントを描画するには最低 10 個のブロックが青くならなければならない) で表示される場合イベントディスプレイに描画した。

この手法では、charge の値が 約 2 p.e. を超えない宇宙線の信号はイベントディスプレイに描画しないことになるので、得られるイベントディスプレイの青のブロックが必ずしも連続しているとは限らない。しかし、約 2 p.e. を含むように設定するとダークノイズの信号と混同があるので、今回の描画に関しては前述のようなカットを施した。

結果

以下に、宇宙線の性能試験として測定したいくつかの測定データの中から得たイベントディスプレイを紹介する。

図 5.25 にて、宇宙線が一直線に進んでいる軌道を確認できる。このように、基本的に宇宙線は直線的に運動しているのでイベントディスプレイもこのように表示されることになる。

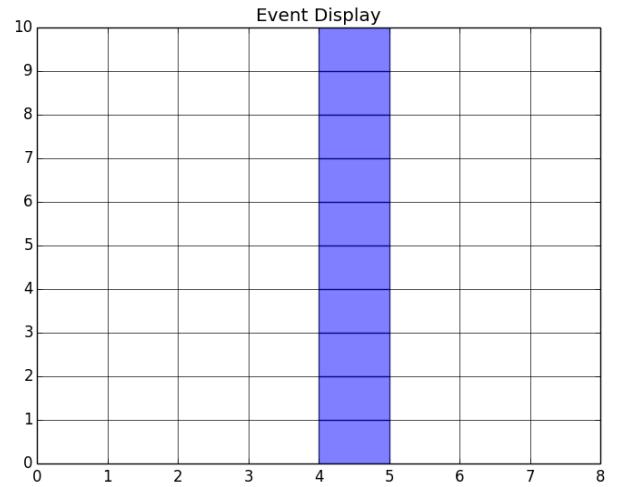
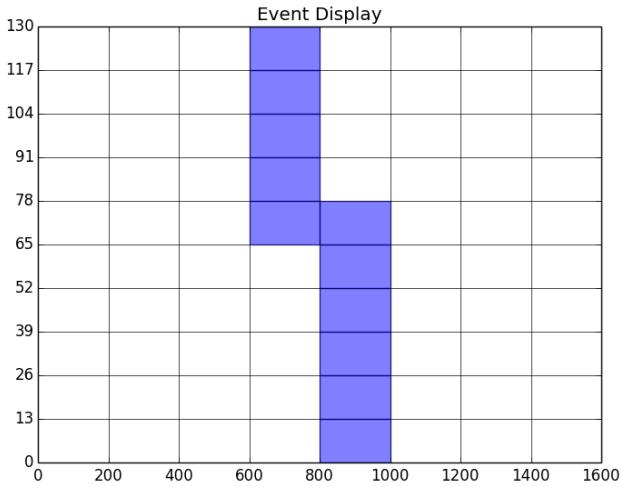


図 5.25: イベントディスプレイ 1(直線)

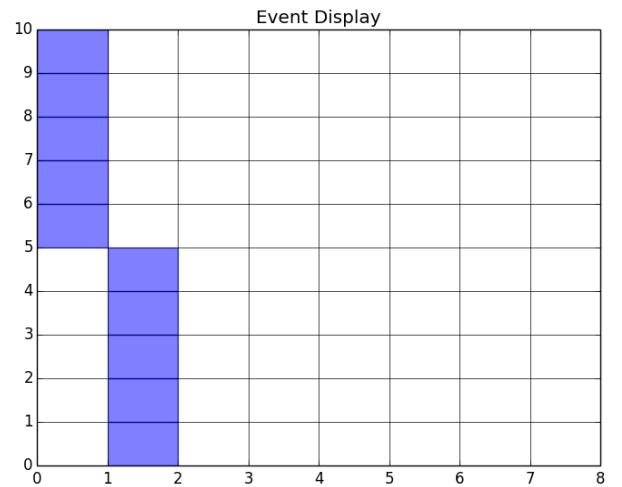
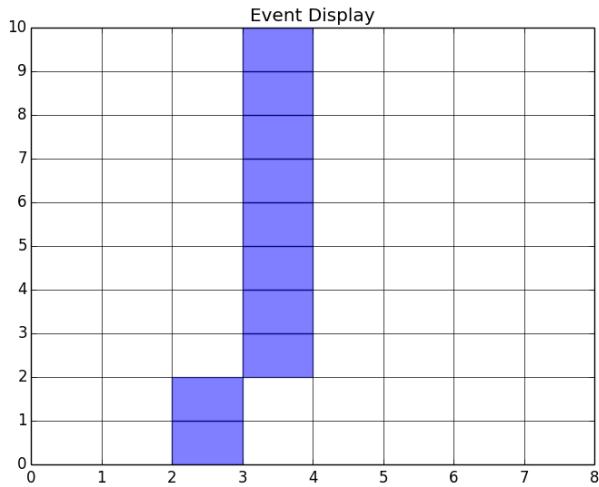


図 5.26: イベントディスプレイ 2(直線)

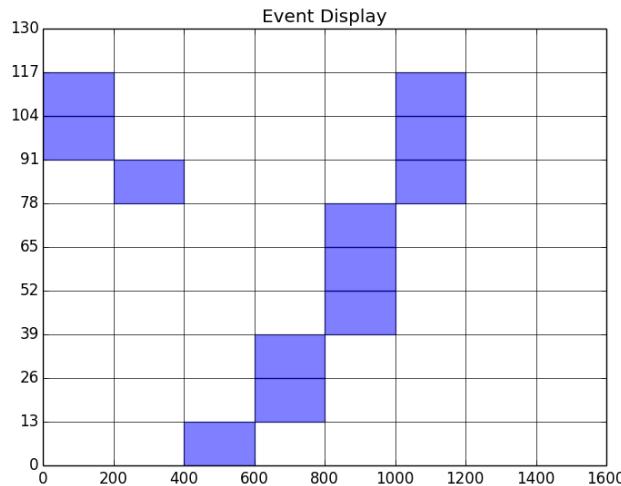


図 5.27: イベントディスプレイ 2 (直線)

図 5.27 では、左下部と右上部に連続した模様が確認され、図 5.25 とは違った直線の軌道を確認できる。また、左上部にも少し軌道が確認されるが、これは前述の宇宙線とは別の軌道の一部が観測された、または、宇宙線が左下部から検出器を通り中央部にて 1 つの粒子の生成反応が起り左上と右上にそれぞれ進んだとも考えられる。

図 5.28 では、電磁シャワー（またはカスケードシャワー）という現象が観測されていると思われる。電磁シャワーとは、高エネルギーの電子、陽電子、光子が物質内に入射し、その物質内で陽子の制動放射と光子の電子対生成を繰り返して多数の電子、陽電子、光子が増幅する現象である。今回の図では、左端から入射した高エネルギー宇宙線電子が、左から 2 ブロック目にて電磁シャワーを起こしていることが確認できる。

図 5.29 では、おおよそ連続した 2 本の縦線が見られ、これはミューオン束という現象によるものと思われる。宇宙線の陽子が崩壊した際に同じ方向に向かう 2 つ以上の π 中間子が生成され、その π 中間子が崩壊して宇宙線ミューオンが生成されることがあり、その結果、地上 1m 以内に平行なミューオンの飛跡が観測できることがあり、この現象をミューオン束という。

図 5.30 では、最上層にて描画されているブロックが横一列の軌道に対して、最上層より下の層にて描画れている部録が縦に連続している軌道が見られるが、これは直線上に運動して壊る宇宙線が検出器内を進行中にある物質中にて散乱し軌道が曲がることがあり、今回の場合は最上層と第一層のシンチレータ層の間にある鉄の層にて宇宙線が散乱したと考えられる。

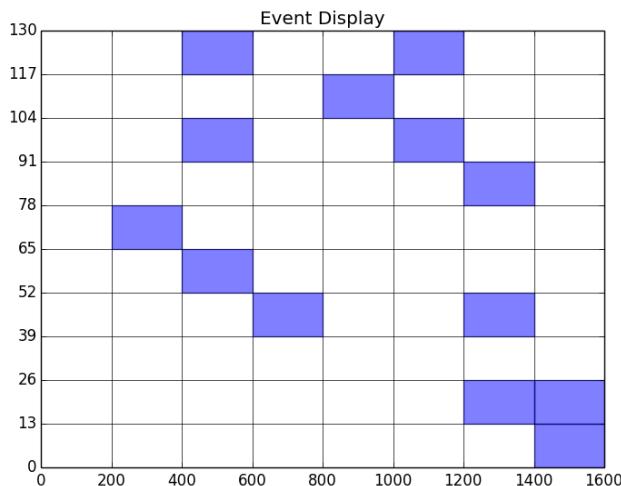


図 5.28: イベントディスプレイ 3 (電磁シャワー)

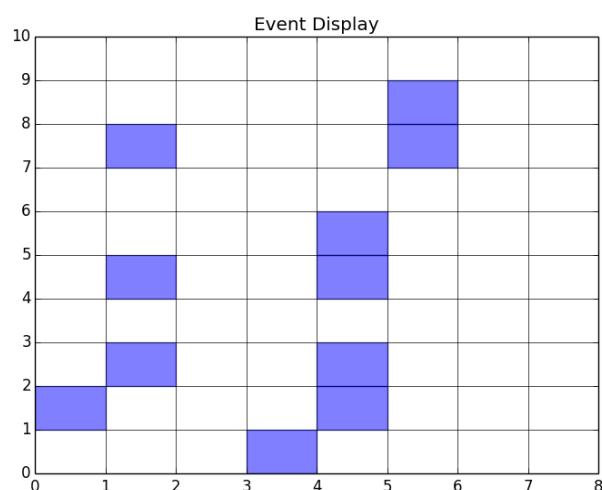


図 5.29: イベントディスプレイ 4 (ミューオン束)

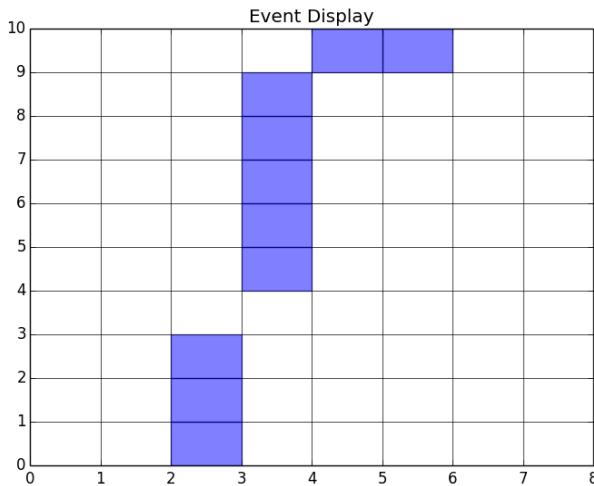


図 5.30: イベントディスプレイ 5 (宇宙線の散乱)

まとめ

以上の図から、性能評価試験において宇宙線が検出器を通過していることが確認でき、さらに単一ミューオンの軌道に限らず散乱現象や電磁シャワー、ミューオン束と思われるイベントを確認することができた。

さらなる課題として、現在のイベントディスプレイに加えて、そのときの charge の値からゲインを用いて光量を算出し、同じ画面に描画されているマスの光量を見比べて軌道の分別をすることができ、より詳細に宇宙線の諸現象や飛来する粒子を分別することが可能となるだろう。

5.5.2 データ解析 ゲインの算出

イベントディスプレイにて測定データが宇宙線によるものと判断出来たので、検出器に使用した MPPC のゲインを求めるための測定を行なった。今回は Top 側と Bottom 側の片側ずつで測定を行なった。両側測定に関しては、エレクトロニクスの Interface から供給する Low Voltage 用のケーブルの不足により 2018 年 2 月初旬現在にて行うことは出来なかった。

測定データの解析の手順について説明する。SPIROC2D によって得られたデータは、bcid, charge, time, gs, hit, col, chipch, chip, debug という値が格納された root ファイルで得られる。charge は、各 ASU の各チャンネル、さらにそのチャンネルのコラム別の、MPPC からのシンチレーション光による信号の ADC 分布である。MPPC の信号の波形の大きさによって high gain (ペデスタルからある ADC count の大きさの範囲までのゲイン) と low gain (high gain として扱われる信号よりも大きな波形のときのゲイン) に分けられて処理され、high gain に分類されたときは値が 1、low gain に分類されたときは値が 0 になるのが gs というパラメータである。今回の試験

においてスレッショルド値を 160、すなわち約 1 p.e. になるように設定した。これらのパラメータを用いて、まずは各 MPPC の high gain を計算した。その手順を以下に示す。

- (1) 30 ~ 60 個の配列を用意する。
- (2) charge のヒストグラムの 1 番目の bin の値から配列の個数分に順番に格納する。このとき用意する ADC 分布は、 $gs = 1$ という条件をかけた high gain のみの分布である。これは、2017 年 7 月にて行ったシンチレータの大量テストにて得られた宇宙線の平均光量が約 20 p.e. であったことを考慮すると、low gain に到達するような信号 (今回の設定での ADC count でいうと 3500 以上) はほとんど検出されないと予想したためである。
- (3) その配列の中での最大値を求め、もしその最大値が配列の中で中央に位置するなら、その最大値をピーク値とする。
- (4) 配列に格納する bin の順番を 1 つ分ずらし、再度 (2) 及び (3) を charge の分布の最後の bin まで繰り返す。
- (5) 得られた各ピーク値において、1 番目のピーク値から ペデルタルのピーク値を引いた値をその MPPC のゲインとした。

さらに、SPIROC2D には、inputDAC、preampDAC という 2 種のパラメータがあり、inputDAC は各チャネルに供給するバイアス電圧を $-2.5 \sim 0$ V の範囲で変化させることができ、preampDAC は各チャネルにおけるシグナルの増幅率を増やすことができる。今回の全ての測定において、電源には 58.00 V の電圧を印加し、preampDAC の値は全て 53 に設定した。今回のゲイン算出のための測定において inputDAC をデフォルト値である 41 にて測定を行った。そして、測定時間はどちらも約 20 分間である。

(1) Top 側での測定について

まず、top 側での ADC 分布及び 1 p.e. ピーク付近の図は以下のようになつた (図 5.31)。以下の図では charge[0][0] における ADC 分布を載せている。

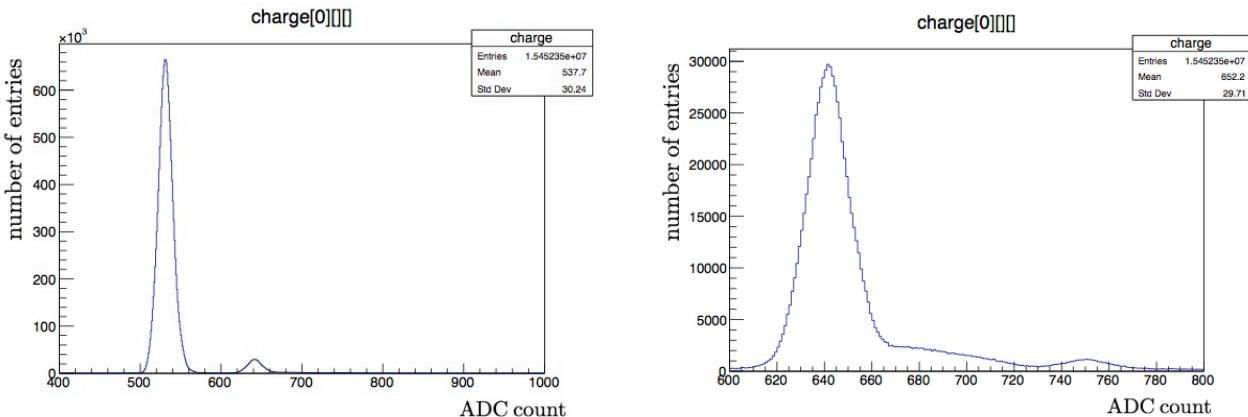


図 5.31: top 側での ADC 分布 (左図:全般、右図:1 p.e. ピーク付近)

図 5.31 左 より、今回の測定においてペデタルのピークは約 530 ADC count に位置することがわかる。そして図 5.31 右 より、検出した信号のピーク値が約 630 ~ 640 に位置していることがわかる。これらの連続したピーク値を配列を用いて走査し検出してそれらの差を取りゲインを算出したのが図 5.32 になる。

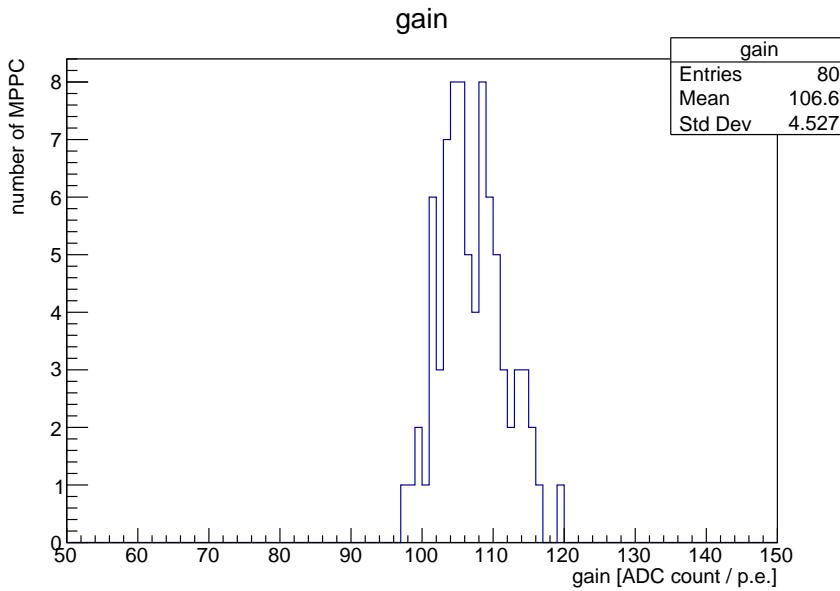


図 5.32: top 側での high gain のヒストグラム

(2) Bottom 側での測定について

まず、top 側での ADC 分布及び 1 p.e. ピーク付近の図は以下のようになつた(図 5.33)。以下の図では charge[0][0] における ADC 分布を載せている。

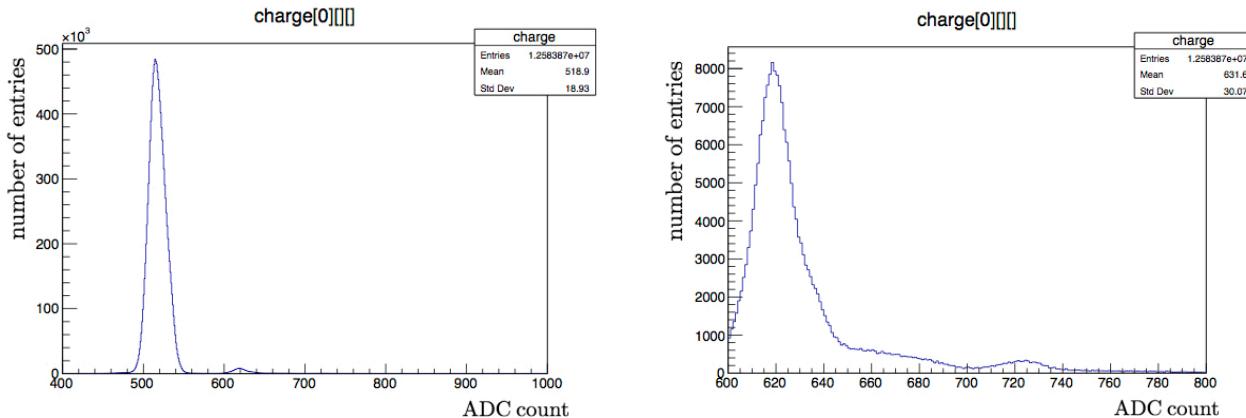


図 5.33: bottom 側での ADC 分布 (左図:全体、右図:1 p.e. ピーク付近)

図 5.33 左より、今回の測定においてペデスタルのピークは約 530 ADC count に位置することがわかる。そして図 5.33 右より、検出した信号のピーク値が約 620 ~ 630 に位置していることがわかる。これらの連続したピーク値を配列を用いて走査し検出してそれらの差を取りゲインを算出したのが図 5.34 になる。

両者のゲインの平均及び標準偏差は以下の表のようになつた。

表 5.7 より、両者のゲインの平均値はどちらもおおよそ 100 ADC count / p.e. であることがわかつた。また、ゲインの標準偏差に関しては、bottom 側でのゲインの標準偏差が top 側よりも大きい、すなわちばらつきが大きいことがわかつた。その原因の一つとしては ASU の個体差の問題

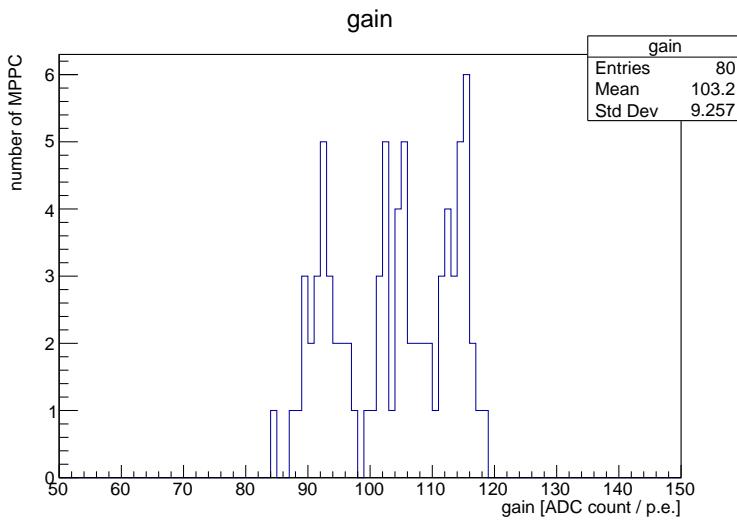


図 5.34: bottom 側での high gain のヒストグラム

表 5.7:

	Mean	Standard Deviation
Top 側 の high gain [ADC count / p.e.]	106.6	4.527
Bottom 側 の high gain [ADC count / p.e.]	103.2	9.257

が考えられ、各チャンネルでの operation voltage の違いによるゲインの差が top 側よりも大きくなるような ASU を選んでいたことによるものと思われる。また、性能評価の点に関して、両方のヒストグラムの全体の分布に対して大きく離れているようなチャンネルのエントリーがないことから、今回の 1 台目の sideMRD 建設において使用したプラスチックシンチレータ及び MPPC にシンチレーション光やその信号が減少するような破損やその他の異常が見られる部品はなかったといえる。

5.5.3 データ解析 スレッシュルド値の変更による平均光量の比較

前述の測定ではスレショルド値は全て 160 で設定されていたが、1 ~ 3 p.e. 以降のイベント数がほぼなくこの ADC 分布で光量を計算するととても小さい値になり、2017 年 7 月に行なったシンチレータの大量測定にて算出された光量である 20 p.e. よりも小さい値をとることになってしまう。それは、スレショルド値が大きかった、すなわちカットする光量が小さいことが理由である。spill の 1 周期中に各 chip の中のチャンネルに信号が入るとコラムに格納され、計 16 個の信号が格納されたら active time は終了し格納されていた信号がデジタル変換されるが、検出する信号がノイズである割合が多い場合、コラムに格納される信号もノイズでほとんど占められ、宇宙線の信号がコラムにほとんど格納されないという現象が起こる。今回のスレショルド値は約 1 p.e. であるが、これを超える大きなダークノイズが多く測定データに混入し、結果的にその ADC 分布を用いて算出された平均光量が小さくなることになってしまった。

そこで、スレショルド値を 160 から 10 まで 10 ずつ変更して、5 分間の片側での測定を行い平

均光量を算出した。その後、スレショルド値と平均光量の関係をグラフに示す。このとき、iDAC は全て 初期値の 41 に設定した。

以下に、平均光量の計算手順を示す。手順の中で示す図は全てスレショルド値 50 のときの Top 側 の測定データである。

- (1) charge 分布を high gain (gs = 1 のとき) 及び low gain (gs = 0 のとき) の場合で分けてそれぞれの分布を作成する (図 5.35)。

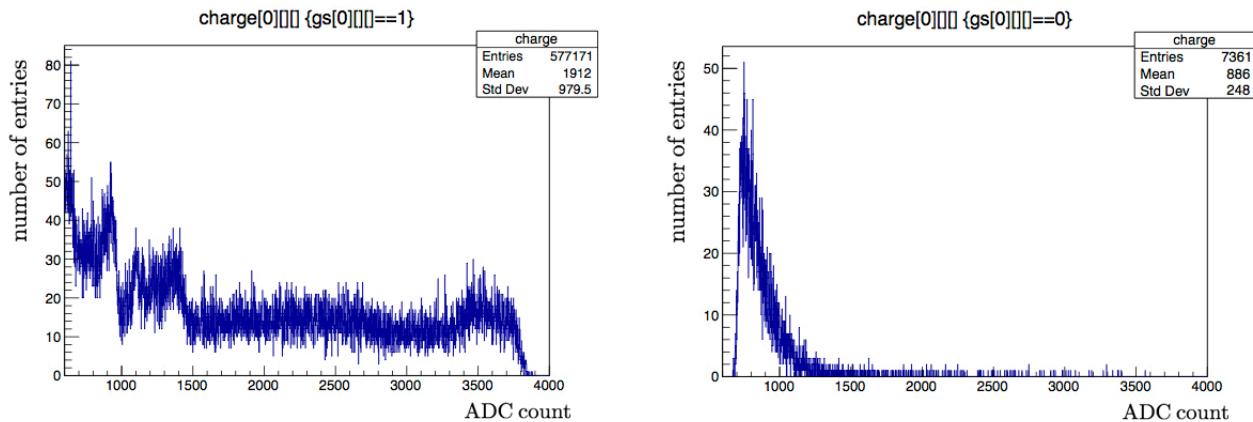


図 5.35: スレショルド値 50 のときの ADC 分布 (左図:high gain の分布、右図: low gain の分布)

- (2) 各分布での平均値からペデスタル値を引き、分布全体のピーク値と平均値のファクター (比率) をかけ、各ゲインで割った値をその分布での光量とした (図 5.36)。光量の算出法は 2017 年 7 月の大量テストの光量の算出法と同様である。

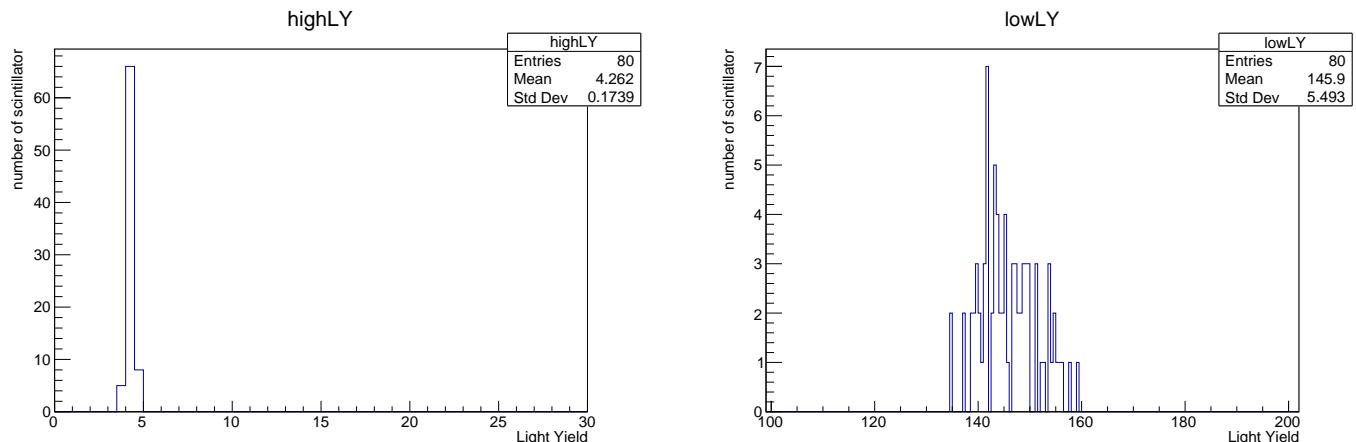


図 5.36: スレショルド値 50 のときの各光量 (左図:high gain の分布での光量、右図: low gain の分布での光量)

- (3) 全体の hit の合計値と 全体の gs の合計値の割合を用いて、全体の分布での平均光量を以下の式に従って算出した (図 5.37)。

$$L.Y. = L.Y.(highgain) \times (\text{全体の gs の割合}) + L.Y.(lowgain) \times (1 - (\text{全体の gs の割合})) \quad (5.1)$$

ここで、L.Y.(high gain) 及び L.Y.(low gain) はそれぞれのゲインで分けた分布での光量である。

また、今回使用するエレクトロニクス (SPIROC2D) の設定において high gain と low gain の信号増幅率の比はおよそ 50 : 1 である事が知られており、前項にて top 側及び bottom 側のゲインの平均値はどちらもおおよそ 100 ADC count / p.e. であることがわかったので、今回の光量算出の際に使用する low gain の値は 2.0 ADC count / p.e. とした。

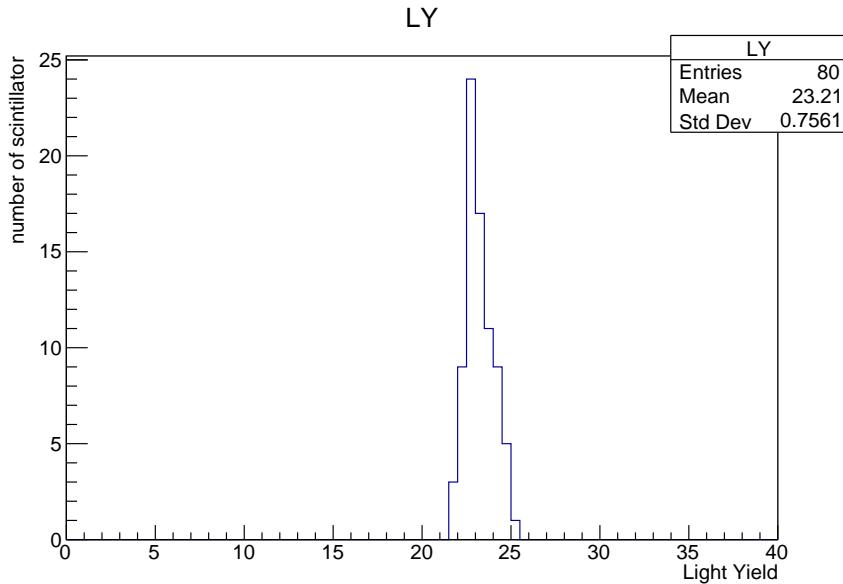


図 5.37: スレショルド値 50 のときの平均光量

結果

(1) Top 側での測定

各スレショルド値での charge 分布の gs の割合の関係は図 5.38 のようになった。

図 5.38 より、スレショルド値が 160 から 120 まではほぼ 100 % の割合で high gain となる信号を検出していることがわかり、110 から 80 の範囲では、low gain の信号の検出が多くなりプロットの傾きが大きくなっている。これは、スレショルド値が 110 を超えるとダークノイズがほとんどカットされエネルギーの大きい宇宙線の信号の検出率が上がることを表している。スレショルド値が 70 からはプロットの傾きが緩やかになり、gs の割合がおおよそ線形に下がっていることが確認できる。これは低エネルギーの宇宙線の信号がスレショルド値によってカットされた分高エネルギーの宇宙線の信号の検出が増えたためである。

次に、スレショルドと high gain 及び low gain の charge 分布より得た光量の関係は図 5.39 なった。

図 5.39 左において、スレショルド値 80 を境に 2 つのプロット線に分かれているが、これは光量を計算する際のファクターの大きな違いによる。ファクターは分布全体のピーク値と

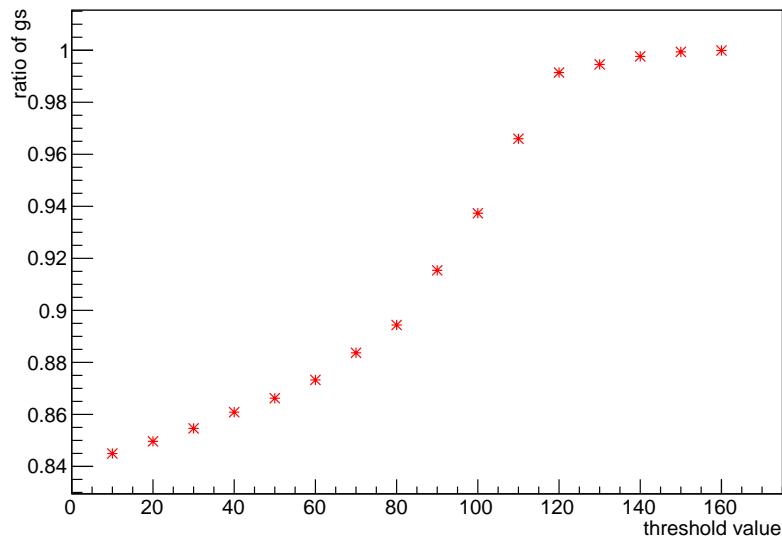


図 5.38: スレショルドと gs の割合の関係 (Top 側)

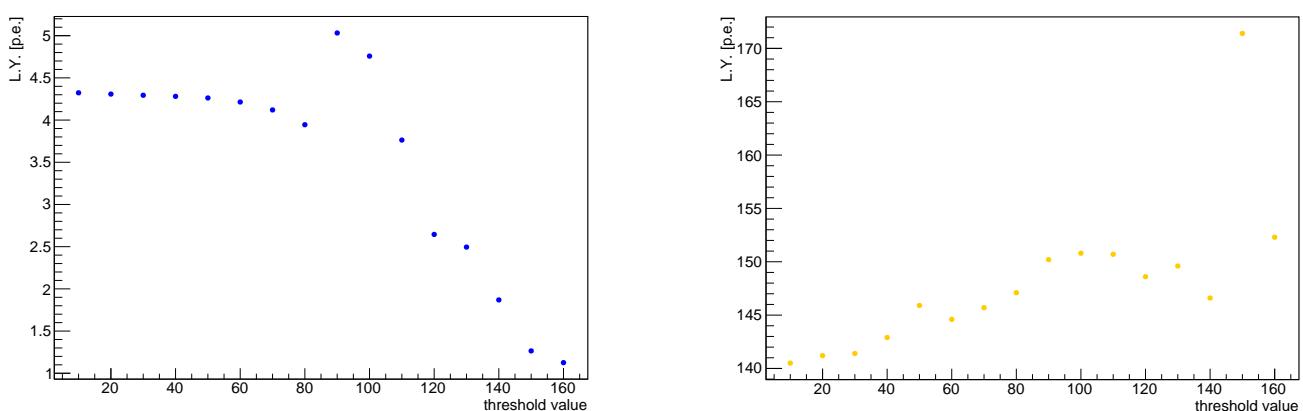


図 5.39: スレショルドと各 gain での光量の関係 (Top 側)(左図:high gain の分布での光量、右図: low gain の分布での光量)

平均値の比率で計算されるが、スレショルド値 160 から 90 までは分布全体のピーク値が 1 p.e. から 数 p.e. に次第に大きくなる傾向であったのに対して、スレショルド値 80 からの分布全体のピーク値はほぼ全て 1 p.e. であった。

図 5.39 右において、スレショルド値 150 を除きスレショルド値を下げるに光量は全体的に下がる傾向があることがわかった。low gain に相当する信号の検出数は小さく、スレショルド値が大きい場合測定中に得られた low gain の分布のばらつきが特に激しくなる。スレショルド値が小さい場合の low gain の分布のピーク値はおおよそ 750 であったが、スレショルド値 150 のときの low gain の分布のピーク値は 900 であった。さらに、スレショルド値が小さい場合 low gain の分布のおおよそのピーク値である 750 付近の信号の検出数が大きくなるので、分布の平均値はだんだん小さくなると考えられる。

そして、図 5.38 及び図 5.39 を用いてスレショルドと分布全体の平均光量を算出した。(図 5.40)。

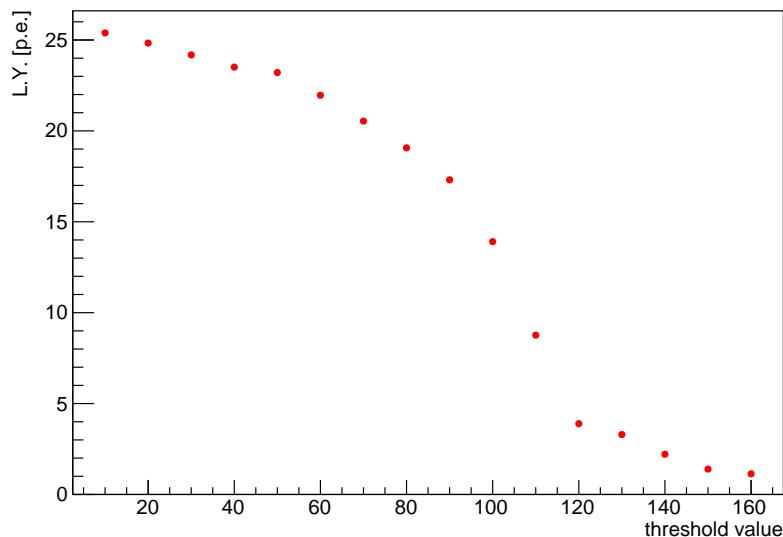


図 5.40: スレショルドと平均光量の関係 (Top 側)

図 5.40 より、スレショルド値 160 ~ 10 の範囲で平均光量は 1 ~ 25 p.e. をとることがわかった。特に、図 5.38 から考察したようにスレショルド値が 110 ~ 80 のときの平均光量の上昇が大きく、70 以降は平均光量はゆるやかに上昇し 25 p.e. 付近に到達する。

この図から、平均光量が 20 p.e. となるのはスレショルド値が約 75 に設定したときということがわかった。2017 年 7 月に行なったシンチレータの大量測定では、プラスチックシンチレータの中央上下に 2 つの無機 (NaI) シンチレータをトリガー用のシンチレータとして置き、この中央の無機シンチレータに信号が同時に検出されたときのプラスチックシンチレータの光量を測定し、そのときの光量が約 20 p.e. であった。今回の測定で得た charge 分布は検出器内を通過する全ての宇宙線の信号であるので、図 5.40 は検出器の中央部に限らずあらゆる位置及び角度で検出器を通過した宇宙線による平均光量である。しかし、宇宙線が通過する検出器の位置及び入射角度が全て等確率であるならば、図 5.40 にて算出した平均光量

は検出器面の中央部に垂直に入射した宇宙線の信号による光量とみなしてよく、スレショルド値を 75 に設定することは 7 月の大量測定の結果に揃えるための指標となり得る。

(2) Bottom 側での測定

Bottom 側での測定結果は、前項の Top 側での測定結果との比較しながら考察していくこととする。

各スレショルド値での charge 分布の gs の割合の関係は図 5.41 のようになった。

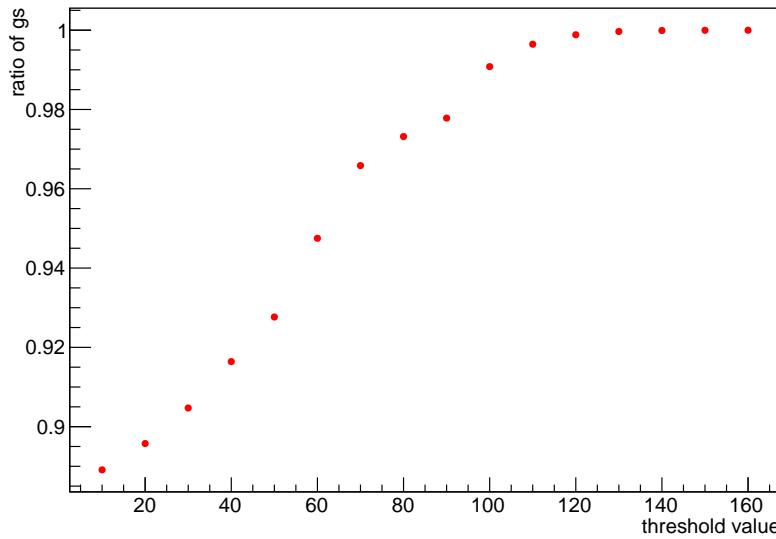


図 5.41: スレショルドと gs の割合の関係 (Bottom 側)

図 5.41 より、スレショルド値が 160 から 110 まではほぼ 100 % の割合で high gain となる信号を検出していることがわかり、110 から一定の傾きで gs の割合が減少している。Top 側の図 5.38 と比較すると、全スレショルドの範囲において gs の割合の値が大きいことが確認できる。これは、測定中に検出された low gain 相当の宇宙線の信号の検出数が同じスレショルド値において Top 側よりも少ないということである。この原因は、測定に用いるエレクトロニクスの固有の差であると思われる。

次に、スレショルドと high gain 及び low gain の charge 分布より得た光量の関係は図 5.42 になった。

図 5.42 左において、スレショルド値 20 及び 30 を境に 2 つのプロット線に分かれている。今回の各分布におけるファクターの計算において、スレショルド値 160 から 80 までは分布全体のピーク値が ほぼ 1 p.e. であったのに対して、スレショルド値 20 からの分布全体のピーク値は ほぼ 全て 1000 ADC count 程度であった。図 5.39 左と比較すると、スレショルド値 30 以上の範囲ではゲインは共に 0 から 4.3 の範囲をとっていることがわかる。

図 5.42 右において、スレショルド値 150 を除きスレショルド値を下げるごとに光量は全体的に下がる傾向があることがわかった。スレショルド値が小さい場合の low gain の分布のピーク値はおおよそ 730 であったが、スレショルド値 150 のときの low gain の分布のピーク値

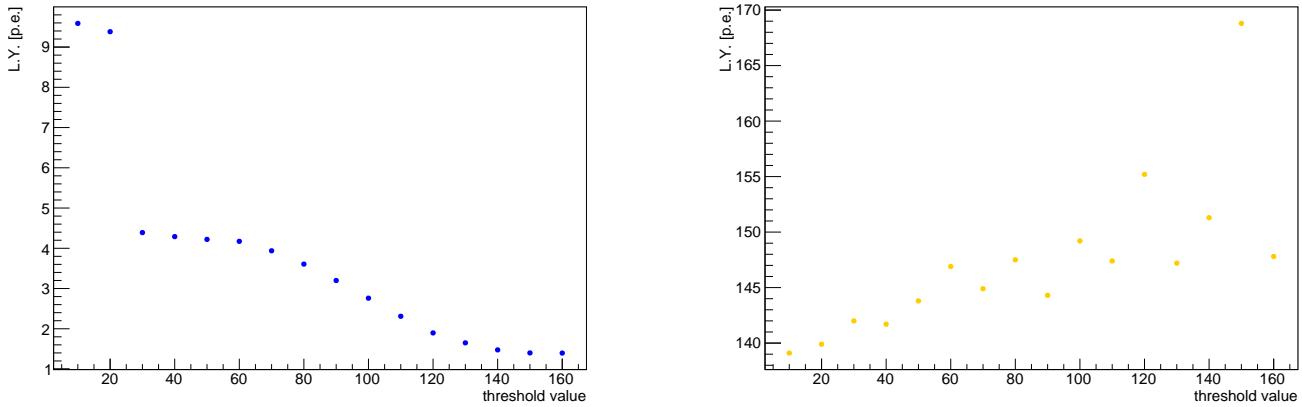


図 5.42: スレショルドと各 gain での光量の関係 (Bottom 側)(左図:high gain の分布での光量、右図: low gain の分布での光量)

は 800 であった。図 5.39 右と比較すると、どちらもおおむね同じ low gain をとりながらスレショルド値の減少とともに low gain も減少していることが確認できる。図 5.42 右のほうがプロットのばらつきが大きい原因是、low gain 相当の信号の検出数が Top 側と比べて少ないことによると考えられる。

そして、スレショルドと分布全体の平均光量の関係は図 5.43 のようになった。

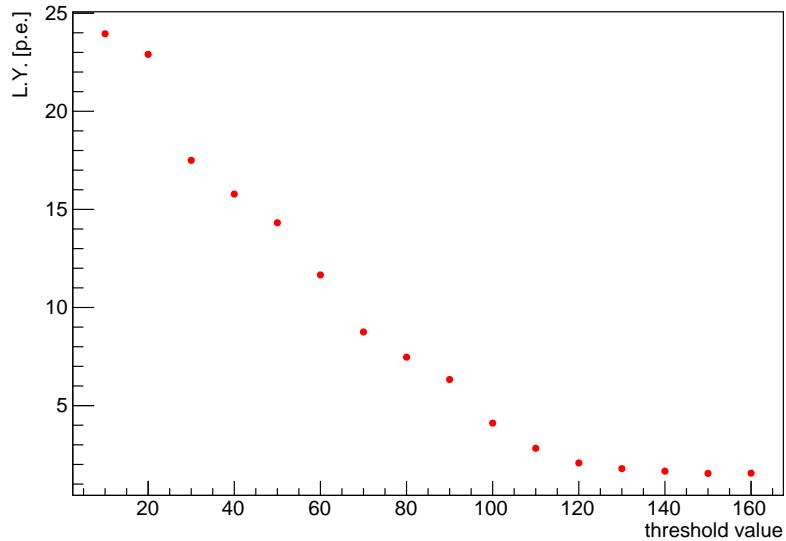


図 5.43: スレショルドと平均光量の関係 (Bottom 側)

図 5.43 より、スレショルド値 160 ~ 10 の範囲で平均光量は 1 ~ 25 p.e. をとることがわかった。スレショルド値が 20 以降のときの平均光量が大きくなったのは、図 5.42 左におい

て、スレショルド値 20 以降の high gain が大きく上昇したことによるものと考えられる。この図から、平均光量が 20 p.e. となるのはスレショルド値が約 30 に設定したときということがわかった。

まとめ及び課題

各 SPIROC2D のパラメータにおいて、iDAC = 41、preampDAC = 53 に設定して宇宙線の測定を行なった場合、平均光量が 20 p.e. となるようなスレショルド値は Top 側では 75、Bottom 側では 30 であるということがわかった。今回のデータ解析では 7 月のシンチレータの大量測定にて得られた光量を指標として全く同じ計算手法で光量を算出したが、測定データの high gain 分布にはスレショルドによってカットされるはずの光量以下のエントリーが多く検出されており、分布全体のピーク値が総じて 1000 ADC count 以下になってしまっていた。このことにより光量算出において分布全体の平均値およびファクター値（シンチレータの大量測定の光量計算の際にはファクター値は 0.77 であったが今回の解析におけるファクター値はおよそ 0.3 ~ 0.5 であった）が予想よりも小さく、結果的に high gain 分布における光量が本来より小さい値となってしまった。したがって、大量測定の際の光量と今回の解析によつて得た光量は全く同じ物理量とはいえず、現状での比較は難しいことがわかった。しかし、本論文の目的である、検出器内に使用したプラチックシンチレータ及び MPPC を含むエレクトロニクスに異常がなく、算出したゲインや光量に大きなばらつきがないことの確認に関しては、前述のデータ解析の結果から十分満たしていると考えて良い。そして、大量測定の際に得た光量の再現性をさらに目指すのであれば、SPIROC2D は iDAC、preampDAC、スレショルド値以外にも shaping time (MPPC の電荷信号を ADC 変換するための電荷に比例した電圧信号の幅) などの他のパラメータも存在し、これらのパラメータを全て考慮し設定することが望ましい。また、Top 側 及び Bottom 側のエレキボックス内の使用するエレクトロニクスの個体差の影響を考慮しなければないことがわかり、各種のパラメータの変更及び似た性質をもつ個体を選定するとより両者の測定結果ができるだけ一致するようになると思われる。

5.6 検出器の搬出

横浜国立大学にて建設した 2 台の sideMRD 検出器は J-PARC へ搬出され、その後 NM 棟 B2 フロア、WAGASCI 検出器の側面へ設置される。その設置までの手順を以下に示す。

- (1) トランクを用いて sideMRD を J-PARC NM 棟 1 階まで運ぶ。この際、検出器は建設作業のときと同じく水平に置かれている。
- (2) 4 つの M24 回転目付きボルトを検出器の front plate の M24 ネジ穴に取り付け、NM ピット の 10 トンクレーンを用いて持ち上げ、水平状態で地面に下ろす。
- (3) vertical foot 2 つを検出器に取り付ける。
- (4) rotating foot 2 つに 8 つの M14 アンカーボルトを地面に打ち付け固定する。
- (5) 2 つの M24 回転目付きボルトを検出器の front plate の M24 ネジ穴に取り付け、クレーンでゆっくりと引き上げて horizontal foot を取り外す。M24 回転目付きボルトの許容荷重は 1 本につき 27400 kgf である（図 5.44）。

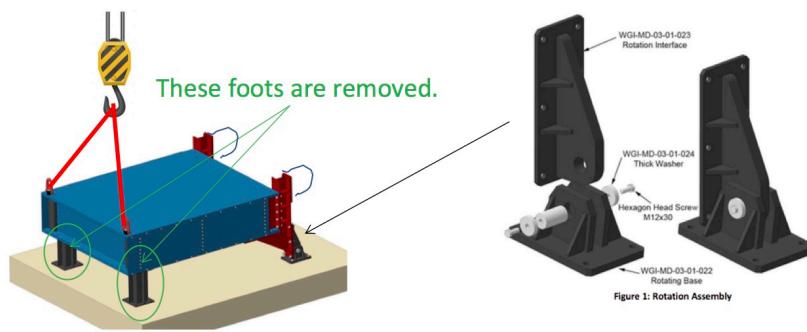


図 5.44: 作業手順 (6) の様子

- (6) 10 トンクレーンを用いて検出器を垂直にして持ち上げる。
- (7) M24 回転目付きボルトをもう 2 つ取り付ける。
- (8) rotating foot に取り付けてあるアンカーボルトを取り外し、検出器を少しづつ持ち上げ、vertical foot と rotating foot を取り外す。このとき、検出器とクレーン間の距離は約 1.2 m、回転目付きボルト間の距離は 1.63 m である。
- (9) 10 トンクレーンを用いて B2 階の吹き抜け (シャフト) 部分を通り、検出器を B2 フロアへ移動させ、4 つのローラーに固定する (図 5.45)。

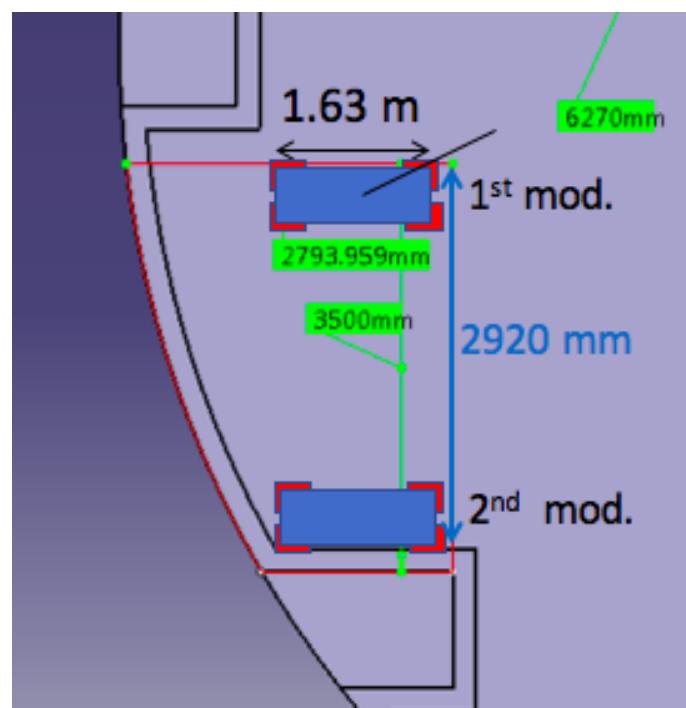


図 5.45: 検出器を B2 フロアに下ろした図

- (10) B2 シャフト部分の壁にアンカーポイントを挿入し、1 台目の sideMRD を 4 つのスリング (アンカーロープ) を用いて固定した後、クレーンを取り外す。

- (11) 2台目の sideMRD も同様に J-PARC NM 棟 B2 フロアまで搬出し、1台目から 2920 mm 離して置く。
- (12) 2つのバーを用いて、1台目と2台目の検出器を繋げて固定し、アンカー、アンカーロープを解く。
- (13) レバーブロックを用いて、検出器をクレーンサポートを取り付ける位置まで移動させる(図 5.46)。

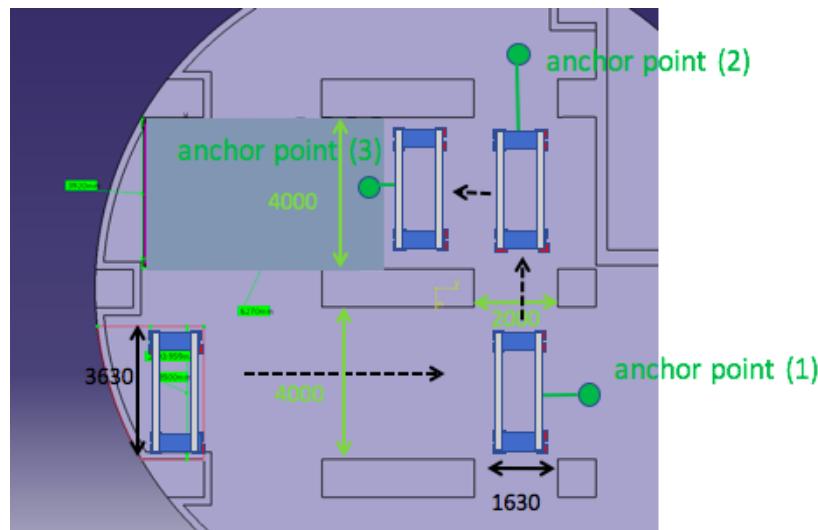


図 5.46: レバーブロックを用いた検出器の移動手順図

- (14) 2つの検出器を、8つのローラーを使って設置位置まで移動させ、40 個の M12 アンカーボルトを床に打ち付け固定する。
- (15) WAGASCI 検出器、Proton Module のためのアンカーポジションを設ける。
- (16) WAGASCI 検出器及び Proton Module 移動のためのアンカーポイントを設ける。
- (17) WAGASCI 検出器をハンドリフターを用いて移動させ、最終的な設置位置にてアンカーを打ち固定する。同様に、Proton Module をハンドリフターを持ち知恵最終設置位置に移動、アンカーで固定する。
- (18) 図 5.47 が検出器群の最終的な設置位置である。

5.7 sideMRD の耐震強度計算

今回設計した sideMRD が、地震などによる振動によってアンカーボルトが引き抜きまたはせん断し検出器が転倒することがない、すなわちアンカーボルトが十分な強度を有していることを以下に証明する [3]。

図 5.48 のような検出器の設定に対して、各数値は以下のように考えた。

- 機器質量: $W = 8000 \text{ kg}$

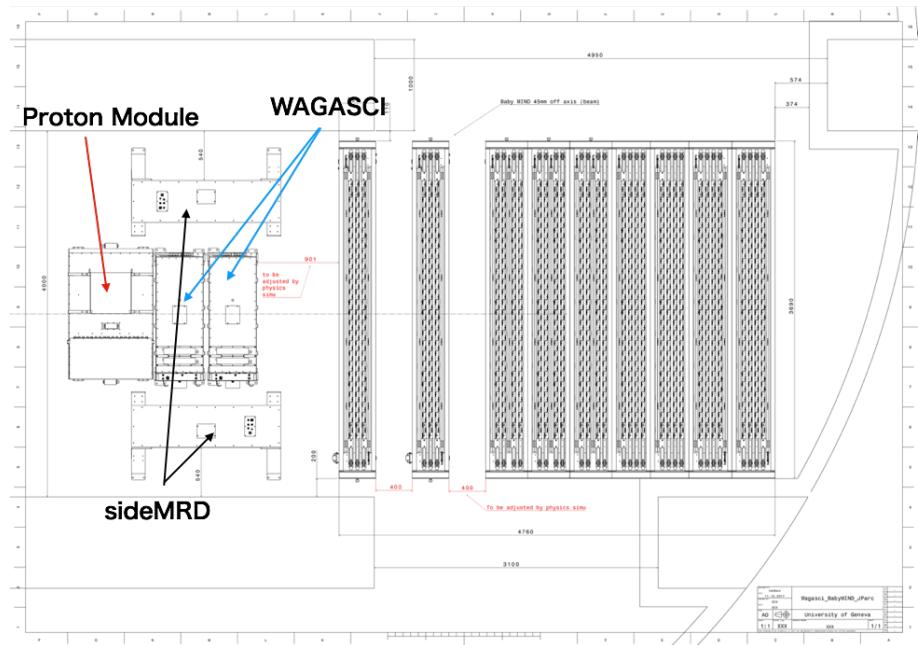


図 5.47: 検出器群の最終的な設置位置

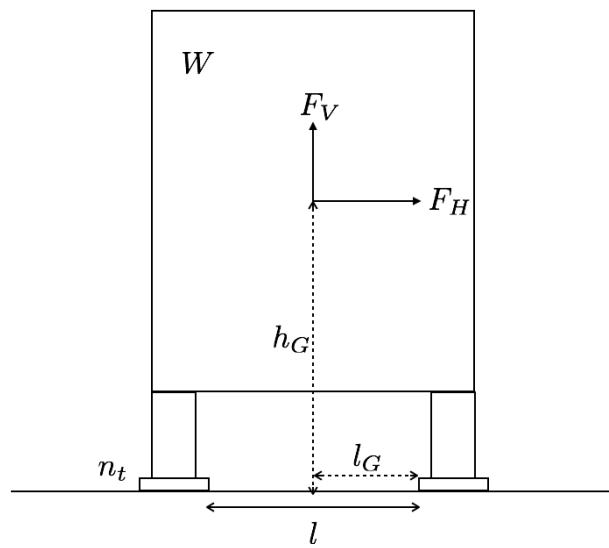


図 5.48: 耐震強度を考える場合の検出器の概略図

- アンカーボルトの総本数: $n = 20$ 本
- アンカーボルトのサイズ: M12 (I 型)
- 一本あたりの軸断面積: $A = 8.43 \times 10^{-5} \text{m}^2$
- 機器転倒を考えた場合の引っ張りを受ける片側のアンカーボルトの本数: $n_t = 10$ 本
- 引っ張りに対する許容荷重: $f_t = 17000 \text{ N}$ (コンクリート強度 $F_c = 2100 \text{ N/cm}^2$ の場合)
- せん断に対する許容荷重: $f_s = 21000 \text{ N}$
- 据付け面より機器重心までの高さ: $h_G = 120 \text{ cm}$
- 検討する方向から見たボルトスパン: $l = 160$ (長辺のとき), 96(短辺のとき) cm
- 検討する方向から見たボルト中心から機器重心までの水平距離: $l_G = 80$ (長辺のとき), 23(短辺のとき) cm

ここから、検討計算に移る。

- 設計用水平震度: $K_H = 1.0 \text{ G}$
- 設計用垂直震度: $K_V = KV/2 = 0.5 \text{ G}$
- 設計用水平地震力: $F_H = g \times K_H \times W = 9.8 \times 1 \times 8000 = 78400 \text{ N}$
- 設計用垂直地震力: $F_V = g \times K_H \times W = 9.8 \times 0.5 \times 8000 = 39200 \text{ N}$
- アンカーボルトの 1 本あたりに作用する引き抜き力: $R_b = \frac{F_H \times h_G - (g \times W - F_V) \times l_G}{l \times n_t} = 5684$ (長辺のとき), 8861(短辺のとき) N
- アンカーボルトの 1 本あたりに作用するせん断力: $Q = F_H/n = 3920 \text{ N}$
- アンカーボルトに生ずる応力度
 - 引っ張り応力度: $\sigma = R_b/A/10^6 = 67.5$ (長辺のとき), 105(短辺のとき) MPa < $f_t/A/10^6 = 202$ MPa
 - せん断応力度: $\tau = Q/A/10^6 = 46.5 \text{ MPa} < f_s/A/10^6 = 249 \text{ MPa}$

以上の計算より、アンカーボルトは十分な強度を有している。

第6章 検出器設置場所のエネルギー分布解析

本章では、新型ニュートリノ検出器である WAGASCI 検出器、side MRD 、 Baby MIND の設置場所としてあげられている、off-axis 角 1.5° 及び 1.06° 地点でのニュートリノビームのエネルギー分布解析について述べる。

6.1 目的

検出器をニュートリノビーム軸の中心から 2.5° ずれたところに配置することで幅の狭いニュートリノのエネルギー分布を得る方法が off-axis 法であるが、 2.5° 以外の off-axis 角でのフラックスの統計データがあればそれらのデータとの差をとることにより off-axis 角 2.5° だけの場合より幅の狭くピークのエネルギーが小さいエネルギー分布(より単一エネルギー分布に近い分布)を得ることができ、イベントごとのニュートリノエネルギーの不定性を取り除くことが可能となる。したがって、NM 棟 B2 フロア各 off-axis 角 地点(図 6.1 参照)でのニュートリノビームのエネルギー分布をモンテカルロシミュレーションを用いることによって比較し、どの角度地点にて新型検出器を設置すべきかを考察する。

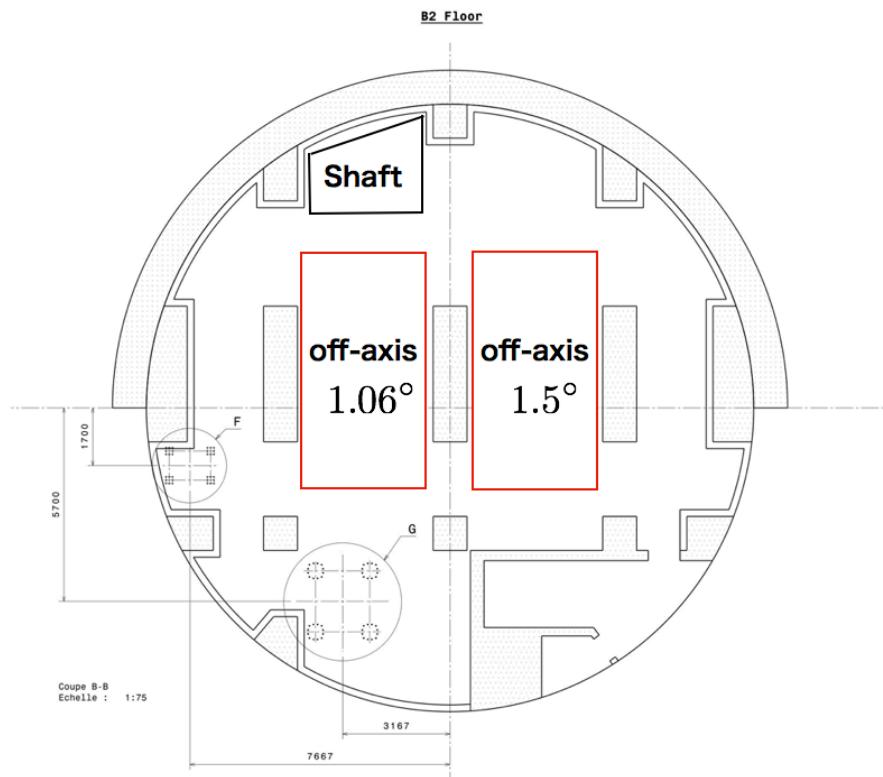


図 6.1: 各 off-axis 角でのニュートリノエネルギー分布

6.2 JNUBEAM ニュートリノビームフラックス生成のシミュレーション

JNUBEAM とは、ニュートリノのビームラインにおけるモンテカルロシミュレーションを用いて、ニュートリノの反応断面積とエネルギースペクトルを推測するために開発された Geant3 のフレームワークを基にしたプログラムライブラリである。

二次ビームラインの詳細なジオメトリがプログラムによって記述されており、30 GeV の運動エネルギーを持つ陽子が炭素標的に衝突し二次粒子が生成され、その粒子が電磁ホーンに集中される。二次粒子や反応しなかった陽子はニュートリノに崩壊するかビームがなくなるまで飛程を続ける。ニュートリノの軌道は前置、後置検出器（のモデル）が置いてある方向へと飛程する。

はじめの反応である、30 GeV の運動エネルギーを持つ陽子と炭素標的との反応は NA61/SHINE データを基にシミュレートされる。標的内部のその他のハドロンの相互作用は FLUKA によってシミュレートされる。標的外部での反応は 実験データを使った反応断面積のフレームワーク GEANT3/GCALOR を用いてシミュレートされる。

6.3 NEUT ニュートリノ反応シミュレーションプログラム

NEUT とは、ニュートリノと核子・原子核との相互作用のシミュレーションするためのプログラムライブラリである。ニュートリノのイベント生成の手順は以下のようにになっている。

(1) ニュートリノエネルギーの決定

最終的な事象のエネルギー分布がニュートリノフラックスと全反応断面積の積の分布を再現するようにする。

(2) ニュートリノエネルギーと反応位置の決定

ニュートリノビームシミュレーション (JNUBEAM) からニュートリノの種類、方向、エネルギーを得て、各検出器内の各物質について通過する距離（厚さ）を計算する。そして、各物質についての反応確率を計算する。反応したか、どの物質で反応したかを決めた後、検出器内での反応位置を決める。

(3) 反応種別の決定

(1) で決定したエネルギーにおける反応種別ごとの散乱断面積を用いて反応種別を選択する。

(4) 素過程ニュートリノ反応のシミュレーション

反応から生成する粒子種類、数、方向、運動量を決める。あらかじめ決定したエネルギーでの反応によって生成するすべての粒子について運動量を与える。初期状態の核子の運動量もここで決める。

(5) 生成粒子の原子核内での散乱シミュレーション

原子核内での生成粒子の再散乱を考慮する。前のステップで生成した粒子のうち、原子核内で再散乱する可能性のある粒子についてのシミュレーションを行う。各粒子について、原子核から出るときの運動量を決める。

6.4 手法

今回は、ミューイオンニュートリノ ν_μ のフラックスを用いて解析を行う。

- (1) off-axis 角 2.5° 、 1.5° 及び 1.06° での位置に検出器を設置した場合のフラックスを jnubeam によるシミュレーションにて得る。各ヒストグラムについてのエネルギー幅などを見積るために、ガウシアンフィッティングなどによって平均と標準偏差を求めた。
- (2) off-axis 角 2.5° と 1.5° 、 2.5° と 1.06° 地点でのエネルギー分布のヒストグラムについて、 2.5° または候補地の角度のヒストグラムに Scale をして調整する。Scale の方法については、
 - (ア) 1.5° のヒストグラムを Scale する場合はエネルギーが 1.0 GeV のときの bin のエントリー数が両方のヒストグラムとも有効数字 3 衔まで一致するようにした。
 - (イ) 1.06° のヒストグラムを Scale する場合はエネルギーが 1.5 GeV のときの bin のエントリー数が両方のヒストグラムとも有効数字 3 衔まで一致するように Scale の値を決定した。
 - (ウ) 2.5° を Scale する場合は、エネルギーが 0.5 GeV のときの bin のエントリー数が両方のヒストグラムとも有効数字 3 衔まで一致するように Scale の値を決定した。
- (3) 2 つのヒストグラムの差を取り、新たなヒストグラムを得た。
- (4) 得られたヒストグラムに対してガウシアンフィッティングをとることによって平均と標準偏差を得た。その平均がピーク時のエネルギーであり、標準偏差はそのエネルギー分布の幅を表している。その平均と標準偏差が最も小さくなるようなヒストグラムを作成できた off-axis 角を候補地として求めた。

6.5 検出器のジオメトリ

ニュートリノ反応生成生成及び比較を行うためには、標的の検出器の断面積や物質の種類、密度、厚さなどを考慮するために重み付けをして規格化する必要がある。今回は、off-axis 角 1.5° 及び 1.06° での位置に新型検出器 WAGASCI を設置した場合を考えた。WAGASCI 検出器のサイズは、一辺 1 m の正方形、奥行き 50 cm である。奥行き 1 m のうち、 50 cm ごとに水ターゲットと水抜きターゲットが設置されているとして、今回はある CH ターゲット一層のみにおけるニュートリノのフラックスを生成したので、物質の厚さは 50 cm とした。

また、off-axis 角 2.5° での位置に前置検出器 ND280 を設置した場合を考えた。ND280 の断面積は $258 \text{ cm} \times 262 \text{ cm}$ であり、厚さ 50 cm の CH を標的とした。

6.6 結果

- (1) 各角度のヒストグラムの平均値、標準偏差について
off-axis 角 2.5° 、 1.5° 及び 1.06° での位置に検出器を設置した場合のニュートリノエネルギー分布は図 6.2 のようになる。このとき、黒線は off-axis 角 2.5° 地点、赤線は 1.5° 地点、緑線は 1.06° 地点でのニュートリノエネルギー分布である。各分布にガウシアンフィッティングをして平均値及び標準偏差を求めると、表 6.1 になった。
- (2) off-axis 角 2.5° 及び 1.50° の ν_μ エネルギー分布について
off-axis 角 2.5° のヒストグラムを Scale して並べた図(左側)及び 1.50° のヒストグラムからの差をとったヒストグラム(右側)は以下のようになる(図 6.3)。黒線は off-axis 角 2.5° 地

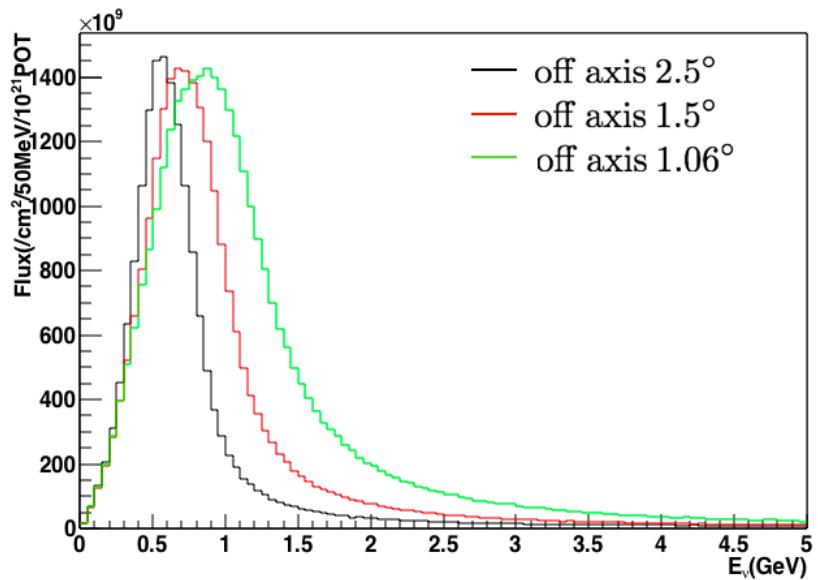


図 6.2: 各 off-axis 角でのニュートリノエネルギー分布

表 6.1: 各 off-axis 角でのフラックスの平均値及び標準偏差

off-axis 角	Mean (GeV)	Std (GeV)
2.5°	0.59	0.22
1.5°	0.74	0.29
1.06°	0.90	0.37

点、赤線は 1.5° 地点でのニュートリノエネルギー分布であり、青線は 2 つのヒストグラムを用いて作成された新たなニュートリノエネルギー分布である。このとき Scale 値は 0.748 で

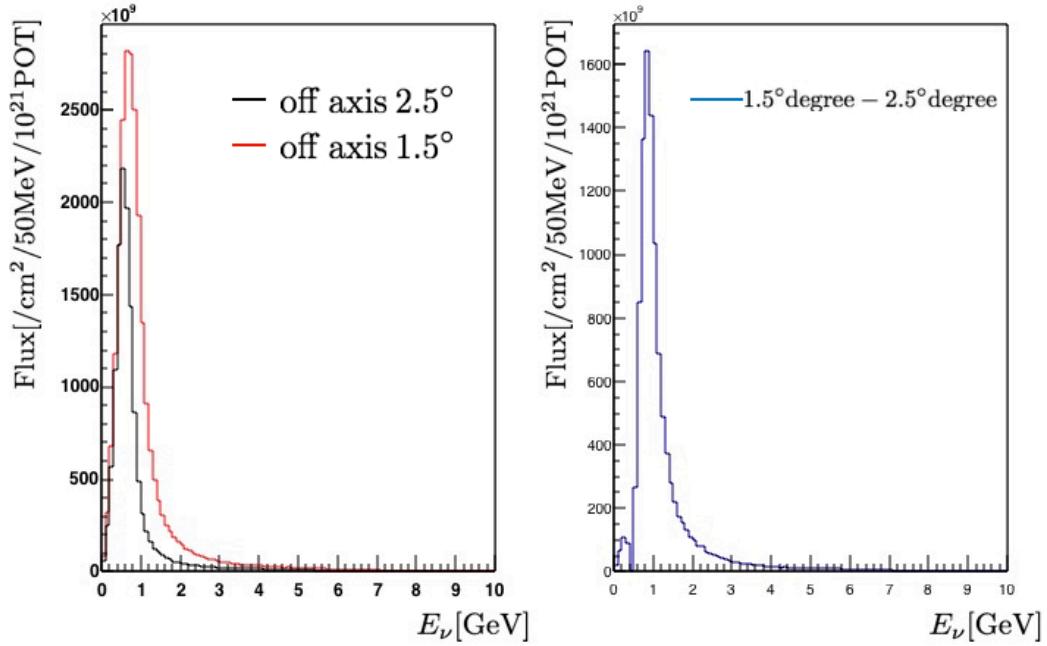


図 6.3: $1.50 \text{ deg} - 2.5 \text{ deg}$ のヒストグラム

あり、両方のヒストグラムの 0.5 GeV での bin のエントリー数はともに 1.76×10^{12} であった。新たなヒストグラムにガウシアンフィッティングを取り、平均と標準偏差は以下のように求まった。

$$\text{Mean} = 0.92[\text{GeV}] \quad (6.1)$$

$$\text{Stv} = 0.15[\text{GeV}] \quad (6.2)$$

また、off-axis 角 1.50° のヒストグラムを Scale して並べた図及び 2.5° のヒストグラムからの差をとったヒストグラムは以下のようになる(図 6.4)。このとき Scale 値は 0.34 であり、両方のヒストグラムの 1.0 GeV での bin のエントリー数はともに 6.56×10^{11} であった。新たなヒストグラムにガウシアンフィッティングを取り、平均と標準偏差は以下のように求まった。

$$\text{Mean} = 0.53[\text{GeV}] \quad (6.3)$$

$$\text{Stv} = 0.17[\text{GeV}] \quad (6.4)$$

(3) off-axis 角 2.5° 及び 1.06° の ν_μ エネルギー分布について

off-axis 角 2.5° のヒストグラムを Scale して並べた図及び 1.06° のヒストグラムからの差をとったヒストグラムは以下のようになる(図 6.5)。黒線は off-axis 角 2.5° 地点、緑線は 1.06° 地点でのニュートリノエネルギー分布であり、青線は 2 つのヒストグラムを用いて作成された新たなニュートリノエネルギー分布である。このとき Scale 値は 0.688 であり、両方のヒストグラムの 0.5 GeV での bin のエントリー数はともに 1.62×10^{12} であった。新たなヒ

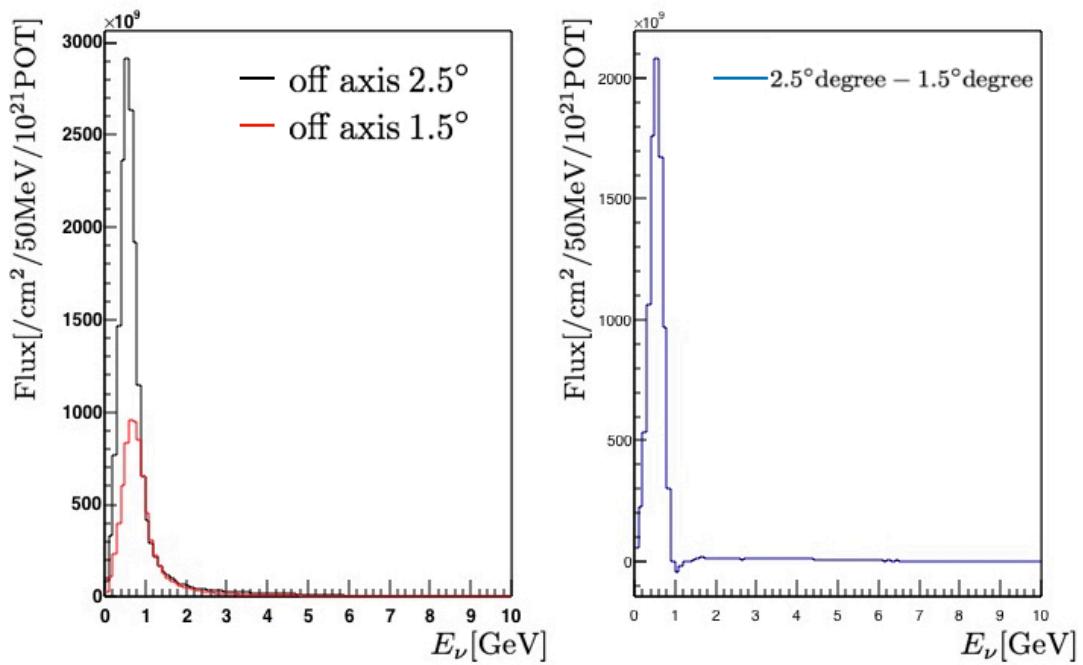


図 6.4: 2.5 deg - 1.50 deg のヒストグラム

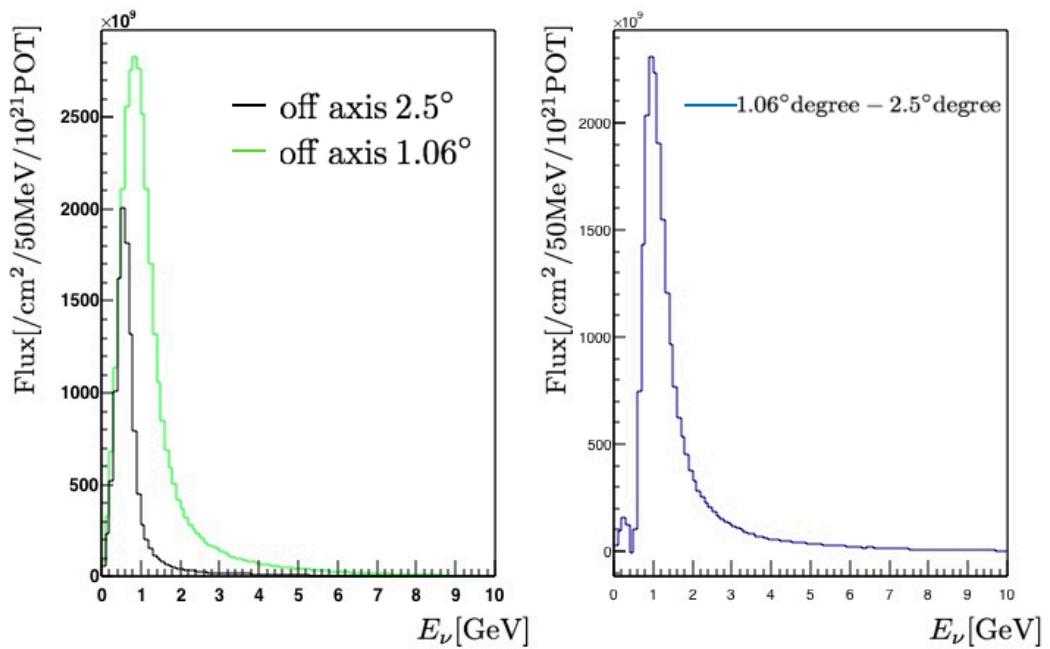


図 6.5: 1.06 deg - 2.5 deg のヒストグラム

トグラムにガウシアンフィッティングをとり、平均と標準偏差は以下のように求まった。

$$\text{Mean} = 1.1[\text{GeV}] \quad (6.5)$$

$$\text{Stv} = 0.22[\text{GeV}] \quad (6.6)$$

また、off-axis 角 1.06° のヒストグラムを Scale して並べた図及び 2.5° のヒストグラムからの差をとったヒストグラムは以下のようなになる(図 6.6)。このとき Scale 値は 0.1315 であ

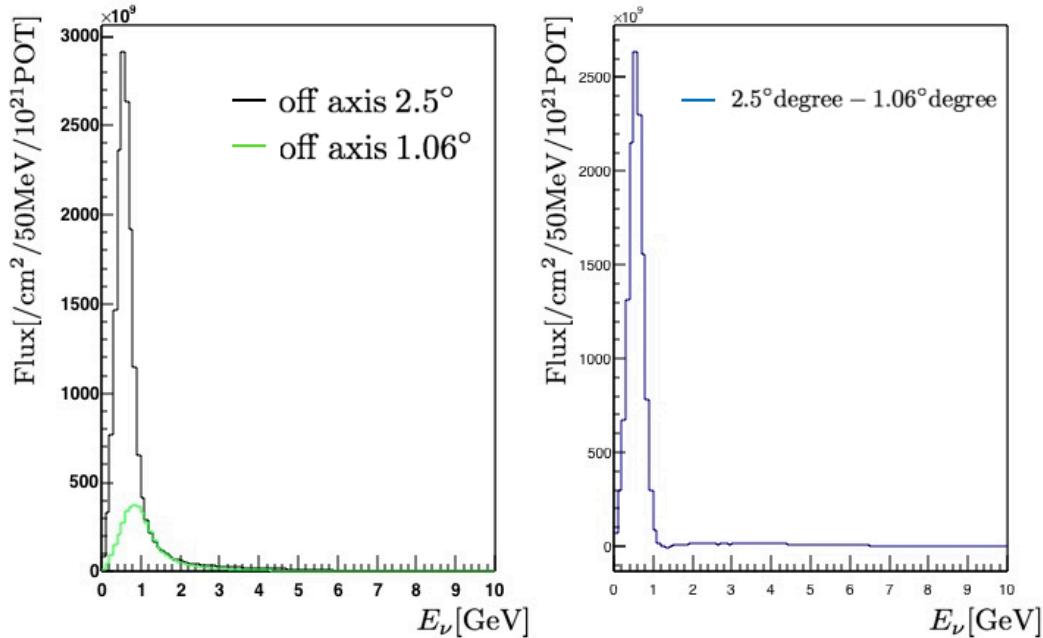


図 6.6: $2.5 \text{ deg} - 1.06 \text{ deg}$ のヒストグラム

り、両方のヒストグラムの 1.5 GeV での bin のエントリー数はともに 1.39×10^{11} であった。新たなヒストグラムにガウシアンフィッティングをとり、平均と標準偏差は以下のように求まつた。

$$\text{Mean} = 0.55[\text{GeV}] \quad (6.7)$$

$$\text{Stv} = 0.18[\text{GeV}] \quad (6.8)$$

生成したヒストグラムの平均及び標準偏差をまとめると表 6.2 のようになった。以上から、off-axis 角 1.50° によるフラックスを用いたヒストグラムの平均値及び標準偏差が最も値が小さくなることが分かった。平均値が小さいことはピークのエネルギーが小さい、標準偏差が小さいことはエネルギー分布の幅が狭いことを意味する。これは、off-axis 角 2.5° 地点及び 1.50° 地点でのニュートリノのフラックスを用いれば、最も不定性を除去した単一ニュートリノエネルギー分布を得ることができるということである。したがって、off-axis 角 1.50° 地点が、新型ニュートリノ検出器である WAGASCI 検出器、side MRD、Baby MIND の設置場所として適している。

表 6.2: ミューオンについての各ヒストグラムの平均及び標準偏差

off-axis 角	Mean (GeV)	Std (GeV)
1.50° - 2.5°	0.92	0.15
2.5° - 1.50°	0.53	0.17
1.06° - 2.5°	1.1	0.22
2.5° - 1.06°	0.55	0.18

第7章 結論

T2K 実験の系統誤差の削減のため、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を誤差 3 % 以内で測定することを目的とした新型検出器 WAGASCI が開発された。そして WAGASCI 検出器の横方向に side MRD 、後方に Baby MIND が設置される。sideMRD は鉄板 11 層と各層プラスチックシンチレータを 8 枚で構成されたシンチレータ 10 層からなり、WAGASCI 検出器から大角度方向に飛んだ二次粒子 (主に μ) に対してのトラッキングや粒子の判別の精度を向上させることができが side MRD の目的である。Baby MIND は、WAGASCI 検出器の下流側に設置する MRD であり、ニュートリノ反応によって生成される荷電粒子 μ の粒子か反粒子かを判別するために、磁場を印加させた鉄によるニュートリノ検出器である。

本論文ではまず side MRD の建設について述べた。鉄の層の間の 13 mm の隙間に 7 mm のシンチレータを挿入する際に余分の隙間をスポンジゴムで埋めることにし、挿入中や挿入後にシンチレータ内のファイバーが傷つかないようにタイベックシートを巻いた。エレクトロニクス取り付け前に Top 側及び Bottom 側のエレクボックス内の光漏れのテストを行い、光漏れのある貫通穴を塞ぐ必要があることを確認した。本論文では片側ずつの宇宙線を用いた性能試験を行った。測定データを元に各イベントごとのイベントディスプレイを描画し、実際に宇宙線が検出器内を通過していることを確認し、宇宙線の種々の現象も確認することができた。スレショルドが大きい値でのダークノイズの長時間測定にて各片側での high gain を算出し、スレショルド値変更による光量の変化を確認した。

次に、検出器搬出手順を示したのち、sideMRD を固定するアンカーボルトについての検出器の耐震強度を計算し、長辺側及び短辺側に対してどちらも十分な強度があることを見積もった。また、搬出先である J-PARC NM 棟 B2 フロアのどの地点に検出器を最終的に設置するのかを NEUT というニュートリノ反応シミュレーションを用いて考察した。off-axis 角 1.5° 及び 1.06° 地点でのニュートリノのエネルギー分布と 2.5° 地点でのニュートリノのエネルギー分布の差をとり、新たに得られたエネルギー分布のピーク値及び標準偏差を比較すると、1.5° 地点と 2.5° 地点でのデータを用いた場合の方がピーク値及び標準偏差が小さくなることがわかった。すなわち、off-axis 角 1.5° 地点に WAGASCI 検出器群を設置するとより単一エネルギー分布に近い分布を得ることができ、イベントごとのニュートリノエネルギーの不定性を取り除くことがより可能となることがわかった。

謝辞

本研究室に配属してからの1年間、研究を通して多くの方と出会い様々な助言をしてくださいり自分の成長につながりました。この卒業論文を作成する際にもご協力及びご指導してくださった方々にお礼申し上げます。

本研究室の南野准教授は以前から構造体の図面制作やエレクトロニクス構築に携わっているLLRやシンチレータの開発をされたINRの研究員の方々と連絡及び会議を行っており、sideMRDの建設及び搬出計画について様々なことを教えてくださいました。日々多忙でいらっしゃる中、丁寧かつ熱心にご指導をしてくださいました。ここに感謝の意を表します。

7月のシンチレータの大量測定の際にINRからお越しくださったNikolayとOlegには、測定機器及びオンラインモニター(Midas)の操作方法、さらにデータ解析の手法などをご指導してくださいました。特にNikolayは11月末以降の1台目の検出器の建設の際にも作業の手伝いとして横浜国立大学に来てくださいり、ハードウェア作業の進め方、光漏れテストの必要性などを教えてくださいました。また、LLRのOscar及びAlainは構造体に関してシンチレータの挿入に関する諸問題などについて議論を交わし助言していただきました。本研究室に配属して外国人研究者と議論をすることが多くなり、自身の大きな成長の機会をいただきました。

大阪市立大学の久木田さんと田中さんは度々横浜国立大学に出張してくださいり検出器の建設作業及びエレクトロニクスのセッティング作業などを手伝ってくださいました。外部の共同研究者との交流が未だなかった我々に気さくに話しかけてくださいりとても安心しました。

そして、本研究室の同期の岡本君、松下君、山口さんも検出器の建設作業の手伝いや作業中の問題などについて一緒に考えてくださいり本当にありがとうございました。本研究室は本年度から立ち上げた研究室なので先輩後輩がおらず、同期のみなさんと共に多くの新しいことを経験し、4人がいるといつもとても楽しく研究生活を送ることができました。

参考文献

- [1] Mark Thomson (2013) Modern Particle Physics, United Kingdom : Cambridge University Press.
- [2] 浜松ホトニクス社 MPPC カタログ
- [3] 建築設備耐震設計・施工指針 2014 年版編集委員会編 (2014) 『建築設備耐震設計・施工指針』日本建築センター