# WAGASCI 実験における大角度散乱ミューオン検出器の 性能評価及びシミュレーションの構築 (Performance Evaluation of Large-Angle Scattering Muon Detectors in the WAGASCI Experiment and Construction of

Simulation Software)

理学研究科

数物系専攻

小幡 拓也

#### 概要

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は, 茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) でニュートリノビームを生成し, プラスチック標的である前置検出器 ND280 と 295 km 離れた岐阜県神岡町にある水標的のスーパーカミオカンデで観測する長基線ニュート リノ振動実験である. この実験では, ニュートリノ振動現象の詳細な理解を目的として物質と反物質の非 対称性の謎を検証しようとしている.

T2K 実験では,前置検出器を用いてニュートリノフラックスやニュートリノ反応断面積の不定性によ る系統誤差の削減を行うが,スーパーカミオカンデとの標的原子核の違いによるニュートリノ原子核反応 断面積の不定性とアクセプタンスの違いによる系統誤差が存在する.これらの系統誤差が T2K 実験にお ける振動パラメータの測定に大きく影響を与えている.この課題を解決するためにニュートリの反応精 密測定として, T2K-WAGASCI 実験が始まった.

T2K-WAGASCI 実験では、プラスチック標的、水標的の検出器と MRD(Muon Range Detector)を 使用し、水とプラスチックのニュートリノ反応断面積比を測定する. プラスチック標的と水標的検出器を 並べて配置し、ニュートリノ反応断面積比の測定におけるニュートリノフラックスに依存する系統誤差を 抑制している. 検出器の構成は、ニュートリノ標的検出器(WAGASCI 検出器、プロトンモジュール)を中 心に、その側面にニュートリノの原子核反応により大角度に散乱したミューオンを検出する Wall MRD が 2 台、ビーム下流側には前方散乱したミューオンを検出する Baby MIND が設置されている. WAGASCI 検出器は、三次元格子構造のシンチレータを含む水標的検出器で 4π のアクセプタンスを持っている. プロ トンモジュールは、プラスチック標的検出器で 2 種類のシンチレータから構成されている. Baby MIND は、ミューオンの運動量の測定や電荷の符号の識別を目的としている. Wall MRD は、ミューオンの飛 跡および運動量推定を目的としている. 2019 年 11 月末から 2020 年 2 月中旬にかけて J-PARC で ニュートリノビーム測定を行った. このビーム測定で、初めて T2K-WAGASCI 実験で使用する全ての検 出器の側面に設置された Wall MRD の性能評価および Wall MRD に関するシミュレーションの構成に ついて報告する.

# 目次

概要		ii
第1章	ニュートリノ	1
1.1	ニュートリノとは	1
1.2	ニュートリノ振動	1
1.3	ニュートリノと原子核の反応	3
第2章	T2K 実験	5
2.1	概要と物理目的	5
2.2	ニュートリノビーム	5
	2.2.1 J-PARC 加速器とニュートリノビームライン	5
2.3	前置検出器	7
	2.3.1 INGRID	7
	2.3.2 ND280	8
2.4	後置検出器:スーパーカミオカンデ................................	9
2.5	Off-axis 法	10
第3章	T2K-WAGASCI 実験	12
3.1	目的	12
3.2	検出器について....................................	12
	3.2.1 WAGASCI (WAter Grid And SCIntillator) 検出器	13
	3.2.2 プロトンモジュール (Proton Module)	14
	3.2.3 Baby MIND	15
	3.2.4 NINJA 検出器	17
第4章	Wall MRD	18
4.1	検出器について....................................	18
	4.1.1 波長変換ファイバー	20
	4.1.2 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)	20
	4.1.3 DAQ について	22
4.2	Strange Hit 問題	25
4.3	性能評価	26
	4.3.1 飛跡再構成アルゴリズムを使用していないデータでの解析	26

	4.3.2 飛跡再構成アルゴリズムを使用したデータでの解析	34
第5章	シミュレーションによるパラメータ調整	55
5.1	モンテカルロシミュレーション	55
	5.1.1 JNUBEAM について	55
	5.1.2 NEUT について	56
	5.1.3 GEANT4 について	56
5.2	宇宙線試験	58
5.3	パラメータ調整....................................	63
第6章	結論	66
参考文献		72

## 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, 弱い相互作用と重力相互作用による力が働く中性レプトンである. 1930 年に W. Pauli によって存在が提唱された [1]. 1956 年に F. Reines と C. Cowan が原子炉からの反電子ニュートリノ を検出し, ニュートリノの存在が証明された [2]. 1962 年にブルックヘブン国立研究所での実験により荷 電パイ中間子  $\pi^{\pm}$  から生成されるミューオンニュートリノビーム  $\nu_{\mu}$  ( $\pi \rightarrow \mu + \nu$ )を標的に照射すること で, 電子ニュートリノ  $\nu_{e}$  が生成しないことを確認し, ニュートリノには少なくとも 2 種類存在することが 示された.

現代の素粒子物理学における標準模型ではニュートリノは, 電子ニュートリノ ( $\nu_e$ ), ミューニュートリ ノ ( $\nu_\mu$ ), タウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) の3種類 (フレーバー) とその反ニュートリノ ( $\bar{\nu}_e$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\bar{\nu}_\tau$ ) が存在する とされている.

### 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノは標準模型の中では左巻きのみが存在し、質量がないものとされている.しかし、1962年 に牧二郎、中川昌美,坂田昌一により、ニュートリノに質量が存在すれば、時間発展とともに別の種類の ニュートリノに変化するという理論が提唱された.そして、1988年にスーパーカミオカンデグループによ る大気ニュートリノの観測から、ニュートリノが質量を持ち世代間で振動している、ということが示唆さ れた.

ニュートリノ振動は, ニュートリノが質量を持ち, 弱い相互作用の固有状態 (フレーバー固有状態)  $|\nu_{\alpha}\rangle(\alpha = e, \mu, \tau)$  と質量の固有状態  $|\nu_{i}\rangle(i = 1, 2, 3)$  が異なり, 3 つの質量固有状態がひとつに縮退し ていない場合に起こる. この時, フレーバー固有状態は以下のように質量固有状態の重ね合わせの状態に なっており, 質量固有状態の線形結合で書ける.

$$|\nu_{\alpha}\rangle = \sum_{i} U_{\alpha i} |\nu_{i}\rangle \tag{1.1}$$

ここで  $U_{\alpha i}$  は、牧・中川・坂田行列 (MNS 行列) と呼ばれる  $3 \times 3$  のユニタリ行列で、以下の式で表される.

$$U_{\alpha i} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix}$$
(1.2)

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{c_p}} \\ 0 & 1 & 0 \\ s_{13}e^{i\delta_{c_p}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$
(1.3)

ここで,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$  であり,  $\theta_{ij}$  は質量固有状態の混合角,  $\delta_{cp}$  は複素位相を表しており,  $\delta \neq 0$ ,  $\pi$  の時, MNS 行列は虚部を含み, それは CP 非対称性を生むので,  $\delta_{cp}$  は CP 位相とも呼ばれる.

ニュートリノ振動を定式化するために, ニュートリノの時間発展を考える. 質量固有状態が |ν<sub>i</sub>〉である ニュートリノが真空中を時間 *t* だけ飛行した時の時間発展の式は, Schrödinger 方程式と MNS 行列を用 いて以下のように書ける.

$$|\nu_{\alpha}(t)\rangle = \sum_{i} U_{\alpha i} e^{-E_{i}t} |\nu_{i}\rangle \tag{1.4}$$

ニュートリノは相対論的であるので,

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E_i}$$
 (1.5)

と近似できる. ここで,  $E_i$ ,  $p_i$ ,  $m_i$  は  $\nu_i$  のエネルギー, 運動量, 質量である. よって, 時間発展後のフレー バー固有状態は以下のように書ける.

$$|\nu_{\alpha}(t)\rangle = \sum_{i} U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{-i\frac{m_{i}^{2}}{2E_{i}}t} |\nu_{i}\rangle$$
(1.6)

$$=\sum_{i} U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}t} |\nu_i\rangle \tag{1.7}$$

$$\simeq \sum_{i} U_{\alpha i} e^{-i \frac{m^2 i}{2E_i} L} |\nu_i\rangle \tag{1.8}$$

 $e^{ipt}$ は振動確率の計算の際には全体の位相を変えるだけなので,式 (1.7),式 (1.8) では無視した.また, Lを飛行距離とした (自然単位系では  $L \simeq t$ となる).

ニュートリノのエネルギーを固定されたものと考え,  $E_i = E_{\nu}$ とし, 式 (1.8) の右辺の質量固有状態の式 をフレーバー固有状態の式に書き換えると,

$$|\nu_{\alpha}(t)\rangle = \sum_{i} U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_{i}^{2}}{2E_{\nu}}t} U_{\beta i}^{*} |\nu_{\beta}\rangle$$
(1.9)

となるので,  $\nu_{\alpha}$  が時刻 t = 0 に生成され, 時間 t 後に  $\nu_{\beta}$  になる確率は,

$$P(\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}) = |\langle \nu_{\beta} | \nu_{\alpha}(t) \rangle|^{2}$$

$$= \left| \sum_{i} U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_{i}^{2}}{2E_{\nu}} L} U_{\beta i}^{*} \right|^{2}$$

$$= \sum_{i} U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_{i}^{2}}{2E_{\nu}} L} U_{\beta i}^{*} \sum_{j} U_{\alpha j}^{*} e^{i \frac{m_{j}^{2}}{2E_{\nu}} L} U_{\beta j}$$

$$= \sum_{i} U_{\alpha i} U_{\beta i}^{*} U_{\alpha i}^{*} U_{\beta i} + \sum_{i>j} 2Re(U_{\alpha i} U_{\beta i}^{*} U_{\alpha j}^{*} U_{\beta j} e^{-i \frac{m_{i}^{2}}{2E_{\nu}} L})$$

$$= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} Re\left(U_{\alpha i} U_{\beta i}^{*} U_{\alpha j}^{*} U_{\beta j} \sin^{2}\left(\Delta m_{ij}^{2} \frac{L}{4E_{\nu}}\right)\right)$$

$$+ 2 \sum_{i>j} Im\left(U_{\alpha i} U_{\beta i}^{*} U_{\alpha j}^{*} U_{\beta j} \sin\left(\Delta m_{ij}^{2} \frac{L}{2E_{\nu}}\right)\right) \qquad (1.10)$$

となる. ここで  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  とし, ユニタリー条件,

$$\delta_{\alpha\beta} = \left| \sum_{i} U_{\alpha i} U_{\beta i}^{*} \right|^{2} = \sum_{i} |U_{\alpha i}|^{2} |U_{\beta i}|^{2} + \sum_{i \neq j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^{*} U_{\alpha j}^{*} U_{\beta j}$$
(1.11)

を使用した. 反ニュートリノの場合は式 (1.10) の第3項の符号が逆転するため, 以下のように書ける.

$$P(\bar{\nu}_{\alpha} \to \bar{\nu}_{\beta}) = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} Re\left(U_{\alpha i}U^*_{\beta i}U^*_{\alpha j}U_{\beta j}\sin^2\left(\Delta m^2_{ij}\frac{L}{4E_{\nu}}\right)\right) - 2 \sum_{i>j} Im\left(U_{\alpha i}U^*_{\beta i}U^*_{\alpha j}U_{\beta j}\sin\left(\Delta m^2_{ij}\frac{L}{2E_{\nu}}\right)\right)$$
(1.12)

## 1.3 ニュートリノと原子核の反応

ニュートリノは直接観測することができないので、実験では検出器におけるニュートリノと原子核 (核 子)の散乱により生成する粒子を観測する. ニュートリノと原子核の反応は大きく分けて 2 種類あり、荷 電カレント反応 (Charged Current (CC)) と中性カレント反応 (Neutral Current (NC)) と呼ばれる (図 1.1). 後述する T2K 実験ではフレーバーを識別するのに用いる荷電カレント反応を扱う. T2K 実験で は、ニュートリノのエネルギー  $E_{\nu}$  = 約 0.6 GeV のニュートリノビーム ( $\nu_{\mu}$ ) が使用されている. この エネルギー領域で支配的なニュートリノと原子核の反応は荷電カレント準弾性散乱 (Charged Current Quasi Elastic (CCQE)) 反応である. CCQE 反応は、ニュートリノが核子と準弾性散乱を行う 2 体の反応 であり、以下のような反応を起こす (図 1.2).

$$\nu_l + n \to l^- + p$$
  
$$\bar{\nu}_l + p \to l^+ + n$$

*l*<sup>-</sup>(*l*<sup>+</sup>) は (反) レプトン (*l* = *e*, μ, τ), *n* は中性子, *p* は陽子である (T2K 実験の場合はミューオンとなる). この反応ではニュートリノのエネルギーは以下のように荷電レプトンの運動量, 角度から再構成する ことができる.

$$E_{\nu} = \frac{m_n E_{\mu} - \frac{m_{\mu}^2}{2}}{m_n - E_{\mu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}}$$
(1.13)

ここで,  $m_n$ ,  $m_\mu$ ,  $E_\mu$ ,  $p_\mu$ ,  $\theta_\mu$  はそれぞれ中性子, ミューオンの質量, ミューオンのエネルギー, 運動量, 角度を表す.

他にも荷電カレント反応には、以下の反応が存在する.

• 2p2h 反応

原子核で他の核子と相関状態にある核子との反応である. ニュートリノの断面積のデータや電子-原 子核散乱実験などからほとんど確実に存在する反応であると考えられているが, その断面積の不定 性は大きい. CCQE 反応と区別することが難しく, エネルギーの再構成に影響を及ぼす.

- ・ 共鳴による中間子の生成反応
   ニュートリノと原子核内の核子の共鳴反応によって, π<sup>+</sup> が生成される反応である (例えば, 共鳴反応により Δ<sup>++</sup> が生成されて崩壊することで π<sup>+</sup> が生成される.).
- コヒーレント π 生成反応
   ニュートリノが原子核とコヒーレントに反応し, π を放出する反応である.
- 深非弾性散乱 (Deep Inelastic Scattering : DIS)
   数 GeV 程度のニュートリノに支配的な反応である.



図 1.1 CC 反応と NC 反応の反応断面積 ( $E_{\nu} = 0 \sim 5 \text{ GeV}$ )



図 1.2 CCQE 反応

## 第2章

# T2K 実験

### 2.1 概要と物理目的

T2K (Tokai to Kamioka) 実験は茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) から 295 km 離れた岐阜県神岡町にある水チェレンコフ検出器, スー パーカミオカンデ (SK) に向けてニュートリノビーム ( $\nu_{\mu}$ ) を飛ばしニュートリノ振動を測定する長基線 ニュートリノ振動実験である (図 2.1). T2K 実験のニュートリノフラックスは大部分を  $\nu_{\mu}$ , または  $\bar{\nu}_{\mu}$  を 占めているため,  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  の出現を観測するか,  $\nu_{\mu}$  の消失を観測することでニュートリノ振動を測定でき る. CP 位相角  $\delta_{cp}$  の値が 0,  $\pi$  と異なる値であることを示すことで, レプトンセクターにおける CP 対称 性の破れの発見に繋がる. ニュートリノ振動に関するパラメータの測定を通して, ニュートリノ振動の全 容解明を目指している.



図 2.1 T2K 実験の概要図

## 2.2 ニュートリノビーム

### 2.2.1 J-PARC 加速器とニュートリノビームライン

J-PARC は線形加速器 LINAC (LINear ACcelerator), シンクロトロン RCS (Rapid Cycling Synchrotoron), シンクロトロン MR (Main Ring) の3つの加速器から構成される (図 2.2). LINAC で生成 された陽子ビームは約 400 MeV にまで加速され, RCS に渡される. RCS は 3 GeV 陽子シンクロトロン で, 陽子ビームはそこで加速された後 MR に渡され 30 GeV まで加速される. その後, 複合磁場型超伝導 磁石 (Superconducting Function Magnet : SCFM) により, 陽子ビームを SK の方向に曲げて, ニュー トリノビームラインへ送られる. ニュートリノビームライン (図 2.3) では, 陽子ビームは 8 バ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照射される. ターゲットに当たった陽子はハドロン反応を起こし, π 中間子 を含む多数の粒子を生成する. 生成された π 中間子は, 3 台の電磁ホーンによって収束され, 標的下流にあ る Decay Volume (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.

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

電磁ホーンの極性を変化させ, 収束させる π 中間子の電荷を選ぶことでニュートリノビームと反ニュート リノビームの生成が可能となる. T2K 実験ではこの 2 種類のニュートリノビームモードを交互に行ってお り, CP 対称性の破れの探索を行う.



図 2.2 J-PARC 加速器群



図 2.3 ニュートリノビームラインの生成と前置検出器

## 2.3 前置検出器

T2K 実験では生成直後のニュートリノを測定する前置検出器として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に位置する ND280 (off-axis 検出器) の 2 種類で構成されている. これらの検出器はグラファイト標的から 280 m 下流に設置 されている. 前置検出器のあるニュートリノモニター棟の概観図を示す (図 2.4).



図 2.4 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役割を持つ. INGRID は, 鉛直方向に 7 モジュール, 水平方向に 7 モジュールを配置した十字の検出器である (図 2.5). 1 つの モジュールは 1.24 × 1.24 × 0.95 m<sup>3</sup> の大きさを持ち, 鉄層が 9 層, シンチレータ層が 11 層から構成され ている. 標的の大部分を担う鉄の質量は 1 つのモジュールあたり 7.1 t である. ニュートリノ反応は主に 鉄層にて起こり, 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. 鉛直, 水平方向それぞれのモジュールで計算したニュートリノ反応数からニュートリ ノのビーム中心を測定する.



図 2.5 INGRID の概観図

#### 2.3.2 ND280

Off-axis 検出器 ND280 は, ビーム軸から 2.5° だけずれた位置に設置されており, スーパーカミオカン デ方向のニュートリノを測定している (図 2.6). 検出器の構成要素は, Pi Zero Detector (P0D) [3], Time Projection Chamber (TPC) [4], Fine Grained Detector (FGD) [5], Electromagnetic Calorimeter (ECal) [6], Side Muon Range Detector (SMRD) [7] およびソレノイド磁石である. ND280 の磁石は 0.2 T の磁場で, 荷電粒子の電荷の符号と運動量を高精度で求めることができる. ND280 は水とプラス チックを標的としており, 水のみを標的としているスーパーカミオカンデとは構成物質が異なる. また スーパーカミオカンデがニュートリノの反応で出てくる荷電粒子に 4π のアクセプタンスを持っているの に対し, ND280 のアクセプタンスは前方方向に限られている. これらの違いが ND280 で制限するニュー トリノ断面積の系統誤差となる.



図 2.6 ND280 の概観図

## 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 [8] 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 に位置する水チェレンコフ検出器である (図 2.7, 図 2.8). 大きさは直径 39.3 m, 高さ 41.4 m で, 中は 50 kt の超純水で満たされている. スーパーカミオカンデは宇宙線の veto カウンターの役割を果たす Outer Detector (OD) と, ニュートリノ反応による荷電レプトンのチェレンコフ光を検出する Inner Detector (ID) の 2 層構造をなしている. ID は 11129 個の 50 cm 口径の光電子増倍管が検出器内全ての 表面の 40% をカバーし, ニュートリノと水が反応してできるミューオンまたは電子のチェレンコフ光を検 出する. OD は 1885 個の 20 cm 口径の光電子増倍管が取り付けられており, 背景事象となる宇宙線ミュー オンをほぼ 100% の効率で除去することができる. スーパーカミオカンデはミューオンと電子それぞれの チェレンコフ光から, ニュートリノ反応点, エネルギー, 方向等の情報を求めることができる. T2K 実験に おいてはスーパーカミオカンデで ν<sub>4</sub> 事象と ν<sub>e</sub> 事象を観測することで振動パラメータを決定する.



図 2.7 後置検出器スーパーカミオカンデの概観図



図 2.8 スーパーカミオカンデの内部図

## 2.5 Off-axis 法

T2K 実験では各検出器を図 2.9 のように配置している. スーパーカミオカンデに飛んでいくニュート リノの方向はビームライン軸から 2.5° ずれている. この角度を off-axis 角と呼ぶ. Off-axis 角はニュート リノフラックスを決める上で重要なパラメータである. 荷電パイ粒子が崩壊してニュートリノが生成され る崩壊は 2 体崩壊であり, 実験室系におけるニュートリノのエネルギー  $E_{\nu}$  は,  $\pi$  の質量を  $m_{\pi}$ , 運動量を  $p_{\pi}$ , エネルギーを  $E_{\pi}$ , ミューオンの質量を  $m_{\mu}$ , ニュートリノの方向と荷電パイ粒子の進行方向とのなす 崩壊角を  $\theta_{\nu}$  とすると, 以下の式のように求められる.

$$E_{\nu} = \frac{m_{\pi}^2 - m_{\mu}^2}{2(E_{\pi} - p_{\pi}\cos\theta_{\nu})}$$
(2.1)

式 (2.1) より,  $E_{\nu} \geq p_{\pi}$  の関数として表すと図 2.10 となる.  $\theta_{\nu}$  が大きくなるほど, 図 2.10 のグラフは平 坦な形となる. つまり, 検出器をビーム軸からずらしてある崩壊角のニュートリノを検出することで, あ る  $E_{\nu}$  をとる  $p_{\pi}$  の値の範囲が大きくなり単色エネルギーに近づいていく. これが off-axis 法の特徴とな る. ニュートリノ振動確率と off-axis 角を変えた時のエネルギースペクトルを図 2.11 に示す.  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ のニュートリノ振動の確率は  $E_{\nu}$  に依存しているため, ニュートリノ振動の確率が最大となるところ にニュートリノフラックスの最大値をとるエネルギーを選べば良い. T2K 実験ではこの目的のために off-axis 角を 2.5° に設定している.



図 2.9 T2K 実験の検出器の配置図



図 2.10 崩壊角に対する親パイオンの運動量とニュートリノエネルギーの関係



図 2.11 ニュートリノ振動の確率とエネルギーの関係と異なる off-axis 角におけるニュートリノフ ラックスの違い.  $\nu_{\mu}$  の残存確率 (上図),  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  の出現確率 (中図), off-axis 角ごとのニュートリノフ ラックス (下図)

## 第3章

## T2K-WAGASCI 実験

## 3.1 目的

T2K 実験では, ニュートリノ検出器である ND280 を用いてニュートリノフラックスやニュートリノ反応断面積の不定性による系統誤差の削減を行う. しかし, 前置検出器 ND280 と, 後置検出器スーパーカミオカンデでのニュートリノ標的原子核の違いによりニュートリノ振動解析における系統誤差が大きくなる. この誤差は, 前置検出器ではニュートリノ標的としてプラスチックシンチレータ (CH) を用い、後置検出器では水 (H<sub>2</sub>O) を用いるために生じるもので, ND280 による測定では制限されていない誤差である. また, ND280 のアクセプタンスが前方方向のみであるのに対し, スーパーカミオカンデでは 4π のアクセプタンスを持つ. この 2 つの系統誤差の削減のために WAGASCI 実験が発足された. WAGASCI 実験では 4π のアクセプタンスを持つ 3 次元格子構造のニュートリノ検出器を使用して, 水と CH のニュートリノ反応断面積比を 3% 以内の精度で測定することを目的としている. また, ミューオンの角度と運動量に関するニュートリノ反応微分断面積を測定し, ニュートリノ反応モデルの理解を深め, ニュートリノ反応モデルの不定性による振動パラメーターの系統誤差を削減することも目的としている.

2019 年 11 月から始まった J-PARC での物理測定において, 初めて T2K-WAGASCI 実験で使用する 検出器が全て設置された状態でデータが取得された. 本研究では, この物理測定の取得データを用いて後 述する Wall MRD 検出器の性能評価及びモンテカルロシミュレーションの評価を行う.

### 3.2 検出器について

T2K-WAGASCI 実験で用いられる検出器全体図を図 3.1 に示す. 検出器は 4 種類, 計 6 つである. 設 置位置は前置検出器ホールの地下 2 階, off-axis 角が 1.6° である. プラスチック標的 (プロトンモジュー ル) と水標的検出器 (WAGASCI 検出器) を中心に据え, 左右には大角度散乱ミューオン検出器 (Wall MuonRange Detector) が配置されている. ビーム下流側にはミューオンの運動量測定および電荷識別を 目的とした Baby-MIND (prototype Magnetized Iron Neutrino Detector) が配置されている. 全ての検 出器において, ニュートリノ反応からの荷電粒子をプラスチックシンチレータで捕らえ, その光を波長変 換ファイバーで伝播させて, 光検出器 MPPC で読み出すという方法がとられている.



図 3.1 T2K-WAGASCI 実験の全体図

#### 3.2.1 WAGASCI (WAter Grid And SCIntillator) 検出器

WAGASCI 検出器は, 主に水を標的としている. 図 3.2 に概観を示す. 大きさが 5.0 × 5.0 × 2.5 cm<sup>3</sup> と なる格子状に組み込まれたシンチレータ (グリッドシンチレータ) と格子状になっていないシンチレータ (パラレルシンチレータ) の 2 種類を使用することで, 3 次元格子状構造を持ち 4π のアクセプタンスを実 現した検出器である (図 3.3, 図 3.4). WAGASCI 検出器はパラレルシンチレータが水平, 鉛直方向にそれ ぞれ 8 層, グリッドシンチレータを 16 層持ち, 合計で 1280 チャンネルとなる. 最小電離損失粒子 (MIP) に対するシンチレータの光量は 17 p.e. (光電子数) である [9]. また, シンチレータ間に水を 500 kg 程度 含むことができ, 水とプラスチックの体積比は, およそ 4:1 である. T2K-WAGASCI 実験では, 2 台の WAGASCI 検出器を用いて断面積の測定を目指す.



図 3.2 WAGASCI 検出器の概観図. プラスチックシンチレータと水タンクで構成されている



図 3.3 パラレルシンチレータ (上図) とグリッドシンチレータ (下図). 色の薄い部分に波長変換ファイバーを通す.



図 3.4 WAGASCI 検出器の構造

#### 3.2.2 プロトンモジュール (Proton Module)

プロトンモジュールはプラスチックシンチレータのみで構成されており, ニュートリノ反応による ミューオンと共に生成される陽子やπ中間子を検出することで, ニュートリノ反応モードを区別する飛跡 検出器である. プロトンモジュールの概観とトラッキングプレーンの構造を図 3.5, 図 3.6 に示す. プロト ンモジュールは 2 種類のシンチレータを使用しており, それぞれ INGRID 型と SciBar 型と呼ばれてい る. INGRID 型はニュートリノビームのプロファイル測定するために作られた INGRID 検出器で使用さ れた, 大きさ 1230 × 50 × 10 mm<sup>3</sup> を持つ. SciBar 型は K2K 実験, SciBooNE 実験の SciBar 検出器で使 用された, 大きさ 1203 × 25 × 13 mm<sup>3</sup> を持つ. どちらも断面にファイバーを通すための穴が空けられて いる. SciBar 型は INGRID 型のシンチレータに比べて幅が半分であることから位置分解能が 2 倍ほどよ く, また厚みが大きいことから幅あたりのニュートリノ反応数も多い. これらの理由より, 検出器の中心 部分に SciBar 型のシンチレータが配置されており, INGRID 型のシンチレータがそれを挟むように配置 されている (図 3.7). MIP に対するシンチレータの光量の平均は, INGRID 型が 28.3 p.e., SciBar 型が 57.2 p.e. となっている [10]. プロトンモジュールの総チャンネル数は 1204 チャンネルで, プラスチック 部分の全質量は 556 kg である. この検出器は T2K-WAGASCI 実験でプラスチック標的の検出器として 使用される.







図 3.6 トラッキングプレーンの構造



図 3.7 プロトンモジュールのシンチレータの配置図

#### 3.2.3 Baby MIND

Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector) はビーム下流部に位置しており, 鉄コア磁石とシ ンチレータが使用されている. ニュートリノ反応により生成されたミューオンを磁場で曲げることでそ の電荷を識別することができる飛跡検出器である. Baby MIND の概観と内部構造を図 3.8, 図 3.9 に示 す. Baby MIND は 18 層の Detector Module と 33 層の Magnet Module で構成されている. Detector Module の構成要素は、プラスチックシンチレータと波長変換ファイバー、MPPC である. シンチレー タはビーム軸を横切るように水平方向に並べられた層 (X 層), 鉛直方向に並べられた層 (Y 層) の 2 種類である. X 層のシンチレータは 210 × 1950 × 7.5 mm<sup>3</sup> × 16 枚 であり, Y 層のシンチレータは 3000 × 31 × 7.5 mm<sup>3</sup> × 95 枚 である. Baby MIND の磁石の中で荷電粒子は鉛直方向に曲がるため, Y 層 のシンチレータをより細かいセグメンテーションにすることで電荷識別能力を向上させている. MIP に対 するシンチレータの光量の平均は, X 層では 37 p.e., Y 層では 67 p.e. となる [11]. Magnet Module は鉄 の板にコイルを巻きつけた構造をしており, 1.5 T の一様な磁場がかけられている. ミューオンの電荷を識 別することで,ニュートリノモードと反ニュートリノモードにおける誤った電荷を持つミューオンのイベ ント (ニュートリノモードでは  $\nu$  から発生する  $\mu^+$ , 反ニュートリノモードでは  $\nu$  から発生する  $\mu^-$ ) を排 除することができる.



図 3.8 Baby MIND の概観図



図 3.9 Baby MIND の内部構造

#### 3.2.4 NINJA 検出器

NINJA (Neutrino Interaction research with Nuclear Emulsion and J-PARC Acelerator) とは, 原 子核乾板を用いたニュートリノ振動研究におけるサブミクロンスケールでの精密測定を行う実験であ る [12]. ニュートリノ反応標的に原子核乾板検出器を使用することで, 従来のニュートリノ反応研究に おける検出器よりも 100 倍以上の位置分解能を達成し, 精密な測定データを取得することが可能とな る. NINJA 実験で得られる 100 MeV ~ 数 GeV のエネルギー帯のニュートリノ反応を用いること で, LSND 実験, MiniBooNE 実験等で示唆されているステライルニュートリノの検証やチャーム粒子を 含む原子核やチャームクォークを含むペンタクォークの探索といったエキゾチックな原子核, ハドロンの 研究にも繋がる可能性がある. NINJA 実験にて使用する検出器は, NINJA 検出器という. 本実験におい ては, WAGASCI 実験との統合的なデータ解析を図ることを目的とし, 水標的及び二次粒子であるミュー オン以外の粒子による超短飛程のトラックの検出という役割を担う.

## 第4章

# Wall MRD

以前までは, T2K-WAGASCI 実験で使用する中心検出器群の左右に位置していることから Side MRD と呼んでいた. しかし, 前置検出器 ND280 にも同一の名前の検出器が存在することから, 区別するために T2K-WAGASCI 実験で使用するものを Wall MRD と名付けた. T2K-WAGASCI 実験では 2 台の Wall MRD を使用するので, ビーム上流部から見て, 左に位置する Wall MRD を「南 Wall MRD」, 右に位置 するものを「北 Wall MRD」と呼ぶ (図 4.1).



図 4.1 WAGASCI 実験の検出器群の位置図

## 4.1 検出器について

Wall MRD (Wall Muon Range Detector) は、中心検出器群 (WAGASCI 検出器、プロトンモジュー ル)でニュートリノ反応により大角度に散乱されたミューオンを検出し、その運動量を測定する役割を持 つ.Wall MRD の概観を図 4.2 に示す.Wall MRD は、シンチレータモジュールと鉄モジュールのサンド イッチ構造で、シンチレータモジュールが 10 層、鉄モジュールが 11 層で構成されている (図 4.3).1 層 のシンチレータモジュールには、大きさが 1800 × 200 × 7 mm<sup>3</sup> のプラスチックシンチレータが 8 枚使 用されている.また、1 層の鉄モジュールは 1800 × 1610 × 30 mm<sup>3</sup> の大きさの鉄板が 1 枚使用されてい る.シンチレータは、図 4.4 のように波長変換ファイバーが S 字状に埋め込んで接着されており左右で光 検出器 MPPC に繋がっている. 左右に繋がっている MPPC を区別するために鉛直方向で見て高い位置 にある (上側) MPPC を top 側, 低い位置にある (下側) MPPC を bottom 側の MPPC とする. 平均光 量は 20 p.e., 時間分解能は 1.15 ns, 位置分解能は 6.1 cm である [13]. Wall MRD のシンチレータは水 平方向に並べたシンチレータモジュールしか持たず, 粒子の X 方向にしか感度がないように見える. しか し, MPPC の両側読み出しを利用した信号の時間差を利用することで, 粒子の Y 方向の位置を 6 cm 程度 の精度で求めることができる.



図 4.2 Wall MRD の概観図



図 4.3 Wall MRD の内部構造



図 4.4 Wall MRD のシンチレータ. S 字状の波長変換ファイバーが埋め込まれている.

#### 4.1.1 波長変換ファイバー

Wall MRD で使用する波長変換ファイバーは, Kuraray 社の Y11 (200) である (図 4.5). ファイバーの 直径は 1.0 mm, 吸収波長は 430 nm でありシンチレータの発光波長のピークである 420 nm にほぼ一致 する. Kuraray 社が製造する波長変換ファイバーのカタログスペックを表 4.1 に示す。



図 4.5 Wall MRD で用いる波長変換ファイバー

表 4.1 波長変換ファイバーのカタログスペッ ク [14]

直径	1.0 mm
Core の屈折率	1.59
Inner cladding の屈折率	1.49
Outer cladding の屈折率	1.42
最大吸収波長	430 nm
最大発光波長	460 nm
減衰長	$\simeq 3 \text{ m}$

#### 4.1.2 MPPC (Multi Pixel Photon Counter)

MPPC (図 4.6) は, 浜松ホトニクス社が開発した光子測定装置であり, 逆電圧を印加することにより光 電流が増倍される高速, 高感度フォトダイオードである APD (Avalanche PhotoDiode) のピクセルが並 列に接続された構造を持つ (図 4.7). 特徴としては, 70 V 程度の低電圧で動作する, 光電子増倍管に並ぶ ゲインを持つ, 高い検出効率, 高速応答, 優れた時間分解能, 磁場の影響を受けない, 衝撃に強い, が挙げら れる. APD に一定値以上の電圧を印加すると, 光量に関係なく飽和出力が発生する. このことをガイガー 放電と呼び, この状態で動作させることをガイガーモードと呼ぶ.



図 4.6 MPPC の概観図



図 4.7 ピクセルの構造

#### 動作原理

APD 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 射光子により弾き出された光電子がこの領域内でアバランシェ(雪崩)増倍する. アバランシェ増倍が発 生したピクセルに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 圧降下が発生する. そして, 増幅領域にかかっている電圧降下が発生し, その領域での電位差を下げること でアバランシェ増倍を収束させる (図 4.8).



図 4.8 APD によるアバランシェ増幅の仕組み

#### 基礎特性

以下に MPPC の基礎特性について述べる.

・ゲイン

1 つのピクセル内の APD における, ガイガー放電による電子の増幅率のことを示す. 1 ピクセルの 出力する電荷量 *Q* を素電荷 *q* で割ることで得られる.

$$Gain = \frac{Q}{q} \tag{4.1}$$

• ダークノイズ

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 電子以上にも現れる.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アバラン シェ増倍が発生しやすくなりノイズ源となる。

- 光子検出効率 (Photon Detection Efficiency, PDE)
   MPPC の PDE は量子効率 (Quantumu Efficiency, QE), 受光面積中の有感領域の割合, アバランシェ確率の3つの確率で決まる. 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. アバランシェ増倍を起こす確率は MPPC に印加する逆電圧に依存するため, MPPC の PDE も同様に印加する逆電圧に依存する.
- ピクセル間クロストーク

あるピクセルでアバランシェ増倍が発生した際, その中で赤外波長の光子が発生し, 周囲のピクセ ルに伝搬して別のアバランシェ増倍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, この頻度が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.

熱電子ノイズは各ピクセルでランダムに起きるので,2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キャリアが捕獲され,一定時間後に再 放出されることにより再びアバランシェ増倍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.

#### 4.1.3 DAQ について

Wall MRD に搭載される 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る (図 4.9). DAQ システムは WAGASCI 検出器で使用するものと同様である.



図 4.9 Wall MRD の DAQ システムの全体図

• ASU (Active Sensor Unit) (🗵 4.10)

SPIROC2D (SiPM Integrated Rand Out Chip) という, フランスのオメガ社が開発した, シリコ ン光センサ用読み出し及び制御チップ (ASIC) が搭載された基板であり, MPPC からの信号を読 み出す. SPIROC2D は, 電圧制御 (InputDAC) とアナログ信号の読み出し, 増幅とデジタル化を 行う. InputDAC は, MPPC の電源側には一定電圧をかけ, 読み出し側にかける電圧を変えること で, MPPC 自体に印加される電圧を制御する.

- Interface (図 4.11)
   MPPC や各基板に電圧を供給する基板であり、1 つの DIF、4 つの ASU と接続ができる.
- DIF (Detector InterFace) (図 4.12)
   SPIROC2D を操作するための FPGA (Field-Programmable Gate Array) が搭載されている. PC 側からの信号を SPIROC2D に送信し、その応答信号および出力データを得る役割を持つ.
- GDCC (Giga Data Concentrator Card) (図 4.13)
   GDCC は、DIF と HDMI ケーブルにより接続されている. データ保存および解析のための PC へのデータ転送はイーサネットケーブルを使用している. そのため DIF と PC との信号伝達の中継としての役割を持つ. また、FPGA を内部に持ちファームウェアの書き換えにより CCC モードとして利用可能である.
- CCC (Clock and Control Card) (図 4.14)
   CCC はエレクトロニクス全体へのクロック信号 (50 MHz) を生成する. このクロック信号を用い てゲート信号を生成できる. また,ニュートリノビームを用いた測定時には, J-PARC からビーム トリガーを受け取りそのタイミングでゲート信号を生成する.
- Single MPPC card
   シングルタイプの MPPC と ASU 間を接続するための基板であり、1 枚につき最大 32 チャンネルの MPPC が接続可能である。後述する strange hit 問題を改善するために改良がなされた。



図 4.10 ASU (Active Sensor Unit)



図 4.11 Interface



 $\boxtimes$  4.12 DIF (Detector InterFace)



⊠ 4.13 GDCC (Giga Data Concentrator Card)



X 4.14 CCC (Clock and Control Card)

## 4.2 Strange Hit 問題

2019 年 11 月から 2020 年 2 月にかけて測定された J-PARC 物理測定において, Wall MRD はエレク トロニクスに問題を抱えていた. ダークノイズや光による信号ではない原因不明のノイズが生じていたた め, 測定データの解析が困難な状態であった. 通常, 閾値を超える信号が検出された場合, SPIROC2D 内 の"hit"というパラメータが"1"という値で記録され, その他の信号に対しては"0"という値を取る. しか し, Wall MRD では閾値の設定に関係なく"hit"が"1"を取る信号が存在した. 高い閾値の設定やエレクト ロニクスにおけるケーブルのノイズ発生を抑制する対策を行ったが, 改善は見られなかった. 原因は, Wall MRD で使用している single MPPC card のグラウンド接続に起因するノイズであることが判明した. 従 来に使用していた single MPPC card は, MPPC の PCB ボードと 1 本の同軸ケーブルで接続され, 印加 電圧 (HV) の供給および MPPC からの信号の伝達を行なっていた. このため, 信号に高電圧供給側から 来るノイズがかかりやすい状況だった. 以下 2 点の特徴を持つ新しい single MPPC card (図 4.15) を開 発したことで strange hit は大きく減少した.

- Single MPPC card に接続できる全 32 チャンネルがそれぞれグラウンドに接続されている.
- 信号用と HV 用でそれぞれ同軸ケーブルを使用する.



図 4.15 新しく開発された single MPPC card. オレンジ色で囲まれている部分がグラウンドとなっている.

## 4.3 性能評価

T2K-WAGASCI 実験において, CH 標的と水標的でニュートリノの断面積を測定するためには, 各検出 器の性能評価が必要となる. また, 記録された全ての信号をある基準に従って飛跡再構成するためには, ア ルゴリズムを用いた自動再構成が必要となる. 本研究では, Strange hit 問題もあり, Wall MRD が飛跡検 出器としての機能を持つのか否かも含めて性能評価を行った. 早急に確認を行う必要があったため, 飛跡 再構成アルゴリズムを使用していないデータを用いて簡易的に解析した後に再構成したデータを用いて解 析を行った. 以下, データは, strange hit が改善した後のものである. また, イベントはサンドミューオン によるものを選択する.

#### 4.3.1 飛跡再構成アルゴリズムを使用していないデータでの解析

#### サンドミューオンイベントの選択方法

前置検出器ホールの壁などでニュートリノが反応することで生じる非常に高いエネルギーを持つミュー オンをサンドミューオンと呼ぶ. エネルギーが高いため性能評価する上で解析が行いやすい利点があ る. Wall MRD は, 図 4.1 の z 軸に沿ってシンチレータが層を成している. シンチレータ層を中心検出器 群に近い方から 1, 2,...,10 と番号を振り分ける (図 4.17). top 側と bottom 側でコインシデンスを取っ たデータを使用する. また, サンドミューオンのイベントを選択するために以下の条件を要求する.

1. 600 ADC counts を閾値とする.

閾値を 600 ADC counts とした理由としては, 図 4.16 のように ADC 分布でノイズ, またはペデス タルと考えられるピークを除くためである.

2. 1 層目か 10 層目, 又はビーム最上流部のシンチレータに信号がある (図 4.17 では左端のシンチレー タ).

- 3. 信号位置での直線フィッティングによるカイ二乗の値がある値より小さい.
- 4. MPPC の信号が 6 つ以上ある.



図 4.16 ある Run データでの ADC 分布. 500 ADC counts にノイズ, もしくはペデスタルと考えら れるノイズが見られたため, 閾値を 600 ADC counts に設定した.



図 4.17 Wall MRD のシンチレータ層と位置番号の関係

また、ミューオンの入射角度を以下のように求める (図 4.18).

- X-Z 平面から入射粒子を見た時 (鉛直方向), シンチレータの面に垂直な軸を基準 (ビーム軸に垂直) とし, 反時計回りの方向を正とする.
- 信号位置による直線フィッティングの傾きから角度を計算する.

信号位置の直線フィッティングによるカイ二乗値の制限は, ミューオンの入射角度ごとに閾値を設けてイ ベントを選択した.



図 4.18 入射ミューオンの角度の導出

#### ADC 分布

飛跡再構成前のデータでは、ゲインキャリブレーションが行われていなかったため、p.e. による光量分 布ではなく、ADC 分布を作成した. サンドミューオンによるイベントを選択した場合の、全ての入射粒子 に対する ADC 分布は図 4.19、図 4.20 のようになった. 図 4.19、図 4.20 ともに 800 ADC counts 付近に 鋭いピークとそれ以降になだらかになっている部分が見られた. 後述するゲインキャリブレーションの結 果から飛跡再構成を行ったサンドミューオンイベントによる平均の ADC 値は約 2000 ADCcounts であ ることから、サンドミューオン以外のイベントも混入している可能性がある.



図 4.19 南 Wall MRD の ADC 分布. 全ての入射角度に対する ADC 分布である.



図 4.20 北 Wall MRD の ADC 分布

#### ヒット検出効率

ヒット検出効率は1層目,10層目を除いた各層で計算をした.以下の場合に,要件を満たしたイベント としてカウントし,その数から効率を計算する (サンドミューオンによるイベントを選択していることを 前提とする) (図 4.21).

(1) 効率を計算する層の前後の層にヒット (信号) がある

② 効率を計算する層にヒットがある

検出効率 = 
$$\frac{(1) \cap (2)}{(1)}$$
 (4.3)



図 4.21 ヒット検出効率のイベントの選択

Strange hit 改善後のヒット検出効率は, 南と北で図 4.22, 図 4.23, 表 4.2 のようになった. ここでは, サンドミューオンイベントにおける全角度のヒット検出効率である.



#### Hit Detection Efficiency : South

図 4.22 南 Wall MRD のヒット検出効率. サンドミューオンイベントにおける全角度のヒット検出効率である.


図 4.23 北 Wall MRD のヒット検出効率

層目	南	北			
	イベント数	%	イベント数	%	
2	8362 / 8534	98.0	$6943 \ / \ 7048$	98.5	
3	9584 / 9753	98.3	6878 / 7014	98.0	
4	11332 / 11554	98.1	$7672 \ / \ 8654$	88.7	
5	12817 / 13047	98.2	$8399 \ / \ 8593$	97.7	
6	12943 / 13263	97.6	$9002 \ / \ 9388$	95.9	
7	10400 / 10536	98.7	$7799 \ / \ 7942$	98.2	
8	8986 / 10303	87.2	$6687 \ / \ 6826$	98.0	
9	7858 / 8037	97.8	5722 / 5857	97.7	

表 4.2 ヒット検出効率 (全角度, 飛跡再構成なし)

南, 北 Wall MRD ともに 1 部の層を除いて, 95% 以上のヒット検出効率がある. 南 Wall MRD の 8 層目 と北 4 層目の検出効率が相対的に低い原因は, dead channel が 1 つ存在しているからである. また, ミューオンの入射角度ごと (5°間隔) の 2 から 9 層を統合したヒット検出効率は図 4.24, 図 4.25, 表 4.3 のようになった.



図 4.24 南 Wall MRD のヒット検出効率. 各入射角度に対するヒット検出効率である.



図 4.25 北 Wall MRD のヒット検出効率 (角度ごと)

以上の結果から, サンドミューオンイベントのみを選択できていないが, strange hit 改善後の Wall MRD はヒット信号を検出する能力を有し, 物理解析にも応用できると考えられる.

入射角度 [°]	南	07	北	07
97 F 99 F		%	1ベント奴	<u>%</u>
$-87.3 \sim -82.3$	1205 / 1274	98.0	659 / 690	98.7
$-82.3 \sim -77.5$	1203 / 1274	94.0	030 / 089	95.5
$-77.5 \sim -72.5$	1429 / 1479	95.0	930 / 984	94.5
$-72.5 \sim -67.5$	1518 / 1558	97.4	1101 / 1132	97.3
$-67.5 \sim -62.5$	1764 / 1802	97.9	946 / 981	96.4
$-62.5 \sim -57.5$	1714 / 1761	97.3	1028 / 1065	96.5
$-57.5 \sim -52.5$	1519 / 1563	97.2	986 / 1018	96.9
$-52.5 \sim -47.5$	1019 / 1058	96.3	735 / 754	97.5
$-47.5 \sim -42.5$	2183 / 2242	97.4	1660 / 1694	98.0
$-42.5 \sim -37.5$	1691 / 1743	97.0	1313 / 1354	97.0
$-37.5 \sim -32.5$	2568 / 2670	96.2	1853 / 1929	96.1
$-32.5 \sim -27.5$	1102 / 1181	93.3	668 / 708	94.4
$-27.5 \sim -22.5$	1089 / 1148	94.9	553 / 587	94.2
$-22.5 \sim -17.5$	789 / 845	93.4	$583 \ / \ 615$	94.8
-17.5 $\sim$ -12.5	602 / 637	94.5	403 / 432	93.3
$-12.5 \sim -7.5$	402 / 435	92.4	238 / 256	93.0
$-7.5 \sim -2.5$	326 / 362	90.1	142 / 155	91.6
$-2.5 \sim 2.5$	12991 / 13389	97.0	9376 / 9699	96.7
$2.5 \sim 7.5$	167 / 182	91.8	87 / 103	84.5
$7.5 \sim 12.5$	531 / 556	95.5	209 / 233	89.7
$12.5 \sim 17.5$	510 / 536	95.1	464 / 477	97.3
$17.5 \sim 22.5$	1035 / 1101	94.0	$583 \ / \ 607$	96.0
$22.5 \sim 27.5$	1625 / 1687	96.3	1185 / 1231	96.3
$27.5 \sim 32.5$	948 / 1025	92.5	789 / 843	93.6
$32.5 \sim 37.5$	4210 / 4367	96.4	3385 / 3509	96.5
$37.5 \sim 42.5$	3697 / 3767	98.1	2921 / 3018	96.8
$42.5 \sim 47.5$	3830 / 3915	97.8	3203 / 3275	97.8
$47.5 \sim 52.5$	4108 / 4245	96.8	3499 / 3617	96.7
$52.5 \sim 57.5$	3501 / 3610	97.0	2926 / 3038	95.0
$57.5 \sim 62.5$	5119 / 5218	98.1	4318 / 4441	97.2
$62.5 \sim 67.5$	5915 / 6070	97.4	4597 / 4742	96.9
$67.5 \sim 72.5$	3748 / 3863	97.0	2195 / 2263	97.0
$72.5 \sim 77.5$	2570 / 2688	95.6	1759 / 1840	95.6
$77.5 \sim 82.5$	4402 / 4546	96.8	2520 / 2681	94.0
$82.5 \sim 87.5$	1691 / 1728	97.9	914 / 930	98.3
$87.5 \sim 92.5$	0 / 0	0	3 / 3	100

表 4.3 ヒット検出効率 (入射角度ごと)

## 4.3.2 飛跡再構成アルゴリズムを使用したデータでの解析

飛跡再構成アルゴリズムを用いて, サンドミューオンによるイベントを抽出したデータを用いて解析を 行った.

### 飛跡再構成について

T2K-WAGASCI 実験ではセルオートマトンを用いて飛跡の再構成を行う. この手法は直線の飛跡に対して非常に有効である.

セルオートマトンとは,ある状態を持つ「セル」と呼ばれるユニットが,時間とともに一定のルールに従っ てその状態を変えるというモデルである.ここでの時間は「ステップ」と呼ばれる離散的なものを表す.こ こでは,図 4.26 のプロトンモジュールを例に概要を説明する [10]. 荷電粒子の飛跡を再構成するためのセ ルオートマトンにおいて,セル,隣接,ルールを以下のように設定する.

・セル

初めに各シンチレータ層において隣接したヒット信号を1つにまとめ, クラスターを形成する.次に, 隣り合ったトラッキングプレーン, もしくは間に1枚を隔てたトラッキングプレーンの2つの クラスターを線でつなぐ.この線をセルと呼ぶ.

● 隣接

同じクラスターを共有している 2 つのセルのうち, 一方はそのクラスターを上流側, もう一方はそ のクラスターを下流側のクラスターとしているものが, 隣接関係の候補となる. その 2 つのセルに 含まれる 3 つのクラスター (1 つは共有している) の位置について, 最小二乗法によるフィッティン グをする. その結果の χ<sup>2</sup> が閾値より小さい場合, 2 つのセルは隣接関係にあると定義する.

・ルール

すべてのセルの初期状態は0とする. ステップt にて隣接関係にある下流のセルの状態が自身の 状態と同じセルはステップt+1 にて状態が1増える.

このルールのもとでステップ 0(初期状態) ではすべて 0 のセルの状態は, ステップ 1 においていくつかは 1 に変化する. その後もステップが進むにつれて, セルの状態も変化をしていくが, あるステップ (プロト ンモジュールの場合は最大で 17, Wall MRD の場合は最大 10) までいくと, 隣接関係にある下流のセル の状態が自身の状態と同じセルがなくなるため, それ以上変化が起きなくなる. そのステップでのセルの うち, 状態が 1 以上で, 下流に隣接しているセルを持たないものを探す. そのセルから, 上流に隣接して おり状態が 1 つ小さいセルへと遡っていき, 最終的に状態が 0 のセルまでたどり着く. 遡る過程で通過し たセル同士を繋ぎ合わせたものが飛跡の候補となる. 最後に飛跡の候補に対して飛跡らしさの順位をつけ る. WAGASCI や Baby MIND はプロトンモジュールと構造が異なるためアルゴリズムの改良が進めら れている. 本実験では 6 台の検出器を使用するため解析を進めていく上で各検出器のヒット信号を統合 する必要がある. 各検出器でのクラスター群を統合する流れは以下のようになる (図 4.27).



図 4.26 セルオートマトンを用いた飛跡再構成 (プロトンモジュール). 左上図はトラッキングプレー ンでのヒットをクラスターでまとめた様子を表す. 中上図は, 全てのセルを図示している. 右上図は, ス テップを一つ進めたときの各セルの状態を表す. 左下図は, 全てのステップが終了したときの各セルの 状態を表す. 中下図は, 状態の大きい方から 1 小さい状態のセルへと遡ったときの飛跡らしさに順位を つけている様子を表す. 右下図は, 最終的に再構成された飛跡を表す.

• 2D Cluster

セルオートマトンを用いて, 各検出器で top view と side view において飛跡再構成を行う (Wall MRD は構造上 side view の情報を持たない).

• 2D Cluster Matching

各検出器のクラスター群が同一粒子によるものかを判断する過程である. Wall MRD では, 標的検 出器 (WAGASCI 検出器, プロトンモジュール) のクラスター群と以下の2つの条件を満たした場 合に同一粒子によるクラスター群として判断する.

- |(標的検出器の飛跡から外挿した時の z 座標の値) (Wall MRD の始点の z 座標の値)| ≤
  20 cm
- (標的検出器と Wall MRD の飛跡の角度差) < 30°</li>

下流側に位置する標的検出器から順番に Wall MRD のクラスター群と同一粒子によるものかを判断する (図 4.28).

• 2D Cluster Vertexing

各クラスター群が同一の反応点から生成されているのかを判断する過程である. Mathching cluster とその他のクラスター群が同一の反応点によるものかを判断する場合は, 以下のどちらかの条件を 満たせば良い.

- |(Matching cluster の始点の z 座標の値) (その他のクラスター群の始点の z 座標の値)| ≤ 閾値
- |(Matching cluster の始点の z 座標の値) (その他のクラスター群の終点の z 座標の値)| ≤ 閾値
- また、反応点の座標は matching cluster の z 座標の最小値とする.

Wall MRD は side view の情報を持たないため,同一の反応点かどうかを判断する場合は, top view において Wall MRD と標的検出器のクラスター群が一致している上で,以下の条件を満たす場合とする.

- |(Top viewの matching cluster の始点の z 座標の値) (Side viewのその他のクラスター群の 始点の z 座標の値)| < 閾値</li>
- |(Top viewの matching cluster の始点の z 座標の値) (Side viewのその他のクラスター群の 終点の z 座標の値)| < 閾値</li>



図 4.27 クラスター群を統合する流れのイメージ図. 左上図は, 飛跡再構成前の状態を表す. 右上図 は, 各検出器で飛跡再構成を行なった後の状態を表す. 左下図は, 各クラスター群が同一粒子によるも のかを計算した後の状態を表す. 右下図は, 各クラスター群が同一の反応点によるものかを計算した後 の状態を表す.



図 4.28 Wall MRD の 2D Cluster Matching におけるフローチャート

## サンドミューオンイベントの選択方法

飛跡再構成後にサンドミューオンイベントの判定を行う. その判定条件について述べる. まず, Wall MRD における有効体積 (Fiducial Volume) を以下のように定義する (図 4.29). ここで, x, z 座標の値は 検出器座標とする.

•  $-140 \text{ mm} \le x \le 140 \text{ mm}$ 

•  $-500 \text{ mm} \le z \le 500 \text{ mm}$ 



図 4.29 Wall MRD の有効体積

飛跡再構成したデータから Wall MRD におけるサンドミューオンイベントは以下の条件を満たす場合と する (図 4.30).

- 飛跡の始点の z 座標が有効体積の外にある
- ヒット信号が5つ以上である



図 4.30 Wall MRD の飛跡に関するイベントを選択するフローチャート

#### Wall MRD での飛跡再構成データについて

データの閾値は, WAGASCI 実験で使用される他の検出器と同じ 2.5 p.e. と, 後述するが 2.5 p.e. では ノイズが混入している可能性があるため, 6 p.e. とした. Wall MRD での飛跡再構成は, top 側の信号に対 して飛跡再構成を行い, bottom 側の信号情報は, 再構成されたイベントと同じタイミングで記録された信 号を使用した.

#### キャリブレーション

ゲインやペデスタルに関するキャリブレーションを行なった. その結果をもとに再構成データを作成 し,解析を行った. 全 320 チャンネルでのペデスタルの平均は 500 ADC counts となった. ゲインに関し ては,計 24 チャンネルで上手くキャリブレーションができなかった. 原因としては, エレクトロニクスが 不調のため適切にデータを取得できていなかった可能性が考えられる. そのため, 24 チャンネルを除い た 296 チャンネルのゲインの平均 83 ADC coutns/p.e. をそれらのチャンネルでのゲインとすることに した.

### 性能評価

飛跡の情報のみを使用して解析を行う場合は片側読み出しで良いが,時間差の情報を使用して解析を行 う場合は両側読み出しによる信号が必要となる.そのため,再構成データを用いた性能評価では片側読み 出しと両側読み出しによる光量分布とヒット検出効率を計算した. 片側読み出しと両側読み出しにおけ るヒット検出効率の定義は,それぞれ以下の条件を満たすものとした.

- 片側読み出しによるヒット検出効率の定義
  - (1) 効率を計算する層の前後の層に top もしくは bottom のヒット (信号) がある
  - (2) 効率を計算する層に top もしくは bottom のヒットがある
- 両側読み出しによるヒット検出効率の定義
  - (1) 効率を計算する層の前後の層に top と bottom の両方にヒット (信号) がある
  - (2) 効率を計算する層に top と bottom の両方にヒットがある

検出効率 = 
$$\frac{(1) \cap (2)}{(1)}$$
 (4.4)

サンドミューオンイベントによる片側読み出しでの光量分布は, 南, 北 Wall MRD の top 側と bottom 側 で図 4.31, 図 4.32 となった. 南, 北 Wall MRD の top 側の光量に関して 4 p.e. 付近でピークが見られる 原因としては, ヒット信号とノイズを含めて飛跡再構成を行なっている可能性が考えられる.



図 4.31 南 Wall MRD の片側読み出しによる光量分布.



図 4.32 北 Wall MRD の片側読み出しによる光量分布

ヒット検出効率はそれぞれ図 4.33, 図 4.34 となった (表 4.4). 南では, 全ての層で 81% 以上の検出効率 を記録した.北では、77%以上の検出効率を記録した.





図 4.33 南 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率. 全ての入射角度に対する光量分布である.



図 4.34 北 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率

閾値が 2.5 p.e. における top の光量分布で 4 p.e. 付近に現れたピークが, 再構成時に混入したノイズだ と考え, 閾値を 6 p.e. に設定して解析を行った. 片側読み出しによる光量分布は, 南, 北 Wall MRD の top と bottom 側で図 4.35, 図 4.36 となった. bottom の光量分布に比べて top の光量分布のピーク付近 が緩やかに見える要因としては, top で記録された光量がシンチレータやファイバーの減衰により bottom 側の MPPC に到達していない可能性や top 側の信号のみで再構成をしているため, bottom 側の信号は 考慮されていないことが考えられる.



図 4.35 南 Wall MRD の片側読み出しによる光量分布.



図 4.36 北 Wall MRD の片側読み出しによる光量分布

ヒット検出効率はそれぞれ図 4.37, 図 4.38 となった (表 4.5). 南では, 82% 以上の検出効率を記録した. 北では, 81% 以上の検出効率を記録した.



図 4.37 南 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率. 全ての入射角度に対する光量分布である.



図 4.38 北 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率

また, シンチレータの面に対してのサンドミューオンによる角度分布は, 南, 北 Wall MRD で図 4.39 と なった. シンチレータに対して垂直に入射するイベントが一番多く観測された. 入射角度ごとのヒット検 出効率はそれぞれ図 4.40, 図 4.41 となった. 南では ±67.5° 以下のイベントに対して 80% 以上の検出効 率を記録した. 北では ±60° 以下のイベントに対して 80% 以上の検出効率を記録した.



図 4.39 南, 北 Wall MRD の片側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布



図 4.40 南 Wall MRD の入射角度ごとのヒット検出効率



図 4.41 北 Wall MRD の入射角度ごとのヒット検出効率

次に両側読み出しによる解析を行った. 全チャンネルを合わせた光量分布は, 図 4.42, 図 4.43 のように なった. また, 図 4.44, 図 4.45 より, 各チャンネルの平均光量からサンドミューオンイベントの光量は, 南 Wall MRD では 67 p.e., 北 Wall MRD では 61 p.e. となった. 南, 北 Wall MRD でそれぞれ 1 チャンネ ルずつ dead channel が存在していたため, 平均光量が 0 p.e. となっていた. 北 Wall MRD ではそれとは 別でもう 1 チャンネルが平均光量が 0 p.e. となっていたが, 片側読み出しでは信号を確認できていたこと から, コインシデンスを取ることでサンドミューオンイベントの条件に当てはまらなかったためにチャン ネル自体にイベントがなかったことが考えられる. top, bottom それぞれの光量分布は図 4.46, 図 4.47 と なった. top の光量分布ではピークが鋭くなっていることから, 片側読み出しでは top では記録されたが bottom では, シンチレータとファイバーを伝送する上での減衰により信号が記録されていないイベント の存在が確認できた.



図 4.42 南 Wall MRD の両側読み出しによる光量分布



図 4.43 北 Wall MRD の両側読み出しによる光量分布



図 4.44 南 Wall MRD の両側読み出しによる各チャンネルの平均光量



図 4.45 北 Wall MRD の両側読み出しによる各チャンネルの平均光量



図 4.46 南 Wall MRD の両側読み出しによる top と bottom の光量分布. 全ての入射角度に対する 光量分布である.



図 4.47 北 Wall MRD の両側読み出しによる top と bottom の光量分布

両側読み出しによるヒット検出効率は, 図 4.48, 図 4.49 となった (表 4.6). 南は, 5 層目を除いて全ての 入射角度に対して 74% 以上の検出効率を記録し, 北は, 2 層目を除き 79% 以上の検出効率を記録した. 再 構成データでは, ビーム上流側に位置するチャンネルに信号が多かったため, ビーム下流側に位置してい た dead channel の影響は少なかった. この 2 つの層で検出効率が低い原因については調査中である.



図 4.48 南 Wall MRD の両側読み出しによるヒット検出効率.全ての入射角度に対する光量分布である.



図 4.49 北 Wall MRD の両側読み出しによるヒット検出効率

両側読み出しにおけるシンチレータの面に対してのサンドミューオンによる角度分布は,南,北 Wall MRD で図 4.50 となった.入射角度ごとのヒット検出効率はそれぞれ図 4.51,図 4.52 となった.シンチレータの面に対して入射するサンドミューオンイベントに対しては南も北も 90% 以上の検出効率を記録した.



図 4.50 南, 北 Wall MRD の両側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布



図 4.51 南 Wall MRD の入射角度ごとのヒット検出効率



図 4.52 北 Wall MRD の入射角度ごとのヒット検出効率

Wall MRD では、図 4.53 のようにシンチレータの面に対して ±27° までの入射粒子が 0° の入射粒子 による信号として記録される可能性が考えられる.そのため、角度ごとによるヒット検出効率において ±27.5° までの入射粒子によるイベントを1つのビンにまとめて計算を行った. 閾値 6 p.e. での片側読み 出しによる角度分布は図 4.54 のようになり、角度ごとのヒット検出効率は図 4.55、図 4.56 となった.最も 多く観測された ±27.5° 以下の入射粒子に対しての検出効率は、南では 90.4%、北では 89.5% を記録した.



図 4.53 Wall MRD の角度分解能についての図. ±27<sup>°</sup> までの入射粒子では 0<sup>*c*</sup>*irc* の入射粒子による イベントとして記録される可能性がある.



図 4.54 南, 北 Wall MRD の片側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布 (±27.5° の範囲を 1 つのビンに変更)



図 4.55 南 Wall MRD の片側読み出しにおける入射角度ごとのヒット検出効率 (±27.5°の範囲を 1 つのビンに変更)



図 4.56 北 Wall MRD の片側読み出しにおける入射角度ごとのヒット検出効率 (±27.5°の範囲を 1 つのビンに変更)

±27.5°以下のイベントを1つのビンにまとめた時の,両側読み出しにおける角度分布は図 4.57 となった. 角度ごとのヒット検出効率は,図 4.58,図 4.59 となった. ±27.5°以下の入射粒子に対しての検出効率は,南では 89.5%,北では 88.6% を記録した. ただし, Wall MRD における角度分解能についての研究は行われていないため,詳細な理解に関しては今後行う必要がある.



図 4.57 南, 北 Wall MRD の両側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布 (±27.5° の範囲を 1 つのビンに変更)



図 4.58 南 Wall MRD の片側読み出しにおける入射角度ごとのヒット検出効率 (±27.5°の範囲を 1 つのビンに変更)



図 4.59 北 Wall MRD の片側読み出しにおける入射角度ごとのヒット検出効率 (±27.5°の範囲を 1 つのビンに変更)

再構成データの閾値は 6 p.e. で, ゲインとペデスタルのキャリブレーション結果から ADC 値に変換 すると約 1000ADC counts となる. 再構成前の解析では閾値を 600ADC counts に設定していたことか ら, 再構成前のデータでは信号となっていた部分が再構成後では閾値によりカットされて検出効率が低く なった可能性が考えられる.

## 飛跡再構成アルゴリズムの課題

現在の飛跡再構成アルゴリズムにおいて Wall MRD では図 4.60 の左側の信号のような比較的単純な飛跡に対しての再構成は上手く機能していた.一方で右側のような信号が多数存在する複雑な飛跡に対して は上手く再構成ができなかったことを確認した.飛跡再構成アルゴリズムの改善は現在進められている.



図 4.60 飛跡再構成時のイベントディスプレイ. 灰色と黒色の線により結ばれた信号が飛跡再構成に より採用される信号である. 現在のアルゴリズムでは, 左側の単純な飛跡に対しての再構成は機能して いてとして, 右側のような信号が多数存在する飛跡に対しては上手く機能しないことを確認した.

層目	南		32			
	イベント数	%	イベント数	%		
2	1539 / 1739	88.5	$966 \ / \ 1230$	78.5		
3	1834 / 2198	83.4	$1257 \ / \ 1580$	79.6		
4	1974 / 2296	86.0	$1319 \ / \ 1591$	82.9		
5	2171 / 2645	82.1	$1409 \ / \ 1809$	77.9		
6	2015 / 2351	85.7	$1396 \ / \ 1760$	79.3		
7	1876 / 2307	81.3	$1339 \ / \ 1660$	80.7		
8	1541 / 1847	83.4	1188 / 1475	80.5		
9	1283 / 1575	81.5	1003 / 1180	85.0		

表 4.4 南, 北 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率 (全角度, 飛跡再構成あり)

層目	南		北			
	イベント数	%	イベント数	%		
2	1106 / 1225	90.3	664 / 812	81.8		
3	1312 / 1536	85.4	$875 \ / \ 1064$	82.2		
4	1436 / 1614	89.0	$944\ /\ 1063$	88.8		
5	1562 / 1833	85.2	$1043\ /\ 1259$	82.8		
6	1405 / 1573	89.3	$1006 \ / \ 1144$	87.9		
7	1315 / 1591	82.7	$951\ /\ 1132$	84.0		
8	1006 / 1164	86.4	$809 \ / \ 937$	86.3		
9	832 / 1002	83.0	697 / 783	89.0		

表 4.5 南, 北 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり)

表 4.6 南, 北 Wall MRD の両側読み出しによるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり)

層目	南		北			
	イベント数	%	イベント数	%		
2	484 / 549	88.2	$109 \ / \ 174$	62.6		
3	570 / 657	86.8	$135 \ / \ 158$	85.4		
4	441 / 506	87.2	264 / 316	83.5		
5	368 / 542	67.9	$312 \ / \ 375$	83.2		
6	285 / 355	80.3	302 / 339	89.1		
7	270 / 344	78.5	$299\ /\ 374$	79.4		
8	195 / 257	75.9	234 / 273	85.7		
9	166 / 223	74.4	205 / 241	85.1		

## 第5章

# シミュレーションによるパラメータ調整

## 5.1 モンテカルロシミュレーション

J-PARC の加速器により生成されたニュートリノを検出器で検出することをシミュレートするには, い くつかのステップを踏む必要がある.大きく分けて 3 つのステップが存在する (図 5.1). 1 つ目は, 陽子 ビームを標的に打ち込み, ハドロン反応を通してニュートリノビームを生成する JNUBEAM である. 2 つ 目は, 生成したニュートリノビームのフラックスを用いて, プラスチックや水標的とのニュートリノ反応 をシミュレートする NEUT, 3 つ目は, ニュートリノ反応からの二次粒子を検出器の中で発生させて, 検出 器の応答を調べる GEANT4 である.



図 5.1 シミュレーションの構造図

## 5.1.1 JNUBEAM について

T2K 実験のビームラインにおいてニュートリノビームを生成する過程をシミュレートするプログラム であり, Geant3 をベースに作られている [15]. 具体的には, ビームラインに設置されたバッフル, 炭素標 的, ホーン磁石, ヘリウム容器, ディケイボリューム, ビームダンプのジオメトリーを正確に再現して陽子 ビームを炭素標的に打ち込み, そこで発生する反応をシミュレートする. さらに, 発生した粒子がホーン 磁石により収束, 発散する様子をシミュレートし, 粒子の崩壊や反応により発生するニュートリノについ て, 標的から 280 m 離れた WAGASCI 検出器群の位置におけるフラックス, 運動量, エネルギー, 角度等 を予測する. 陽子ビームの強度, グラファイト標的への入射位置, 電磁ホーンの電流等を入力パラメータと し、指定した領域におけるニュートリノフラックスファイルを出力する.

## 5.1.2 NEUT について

ニュートリノと核子, 原子核との相互作用をシミュレートするプログラムライブラリであり, カミオカ ンデグループにより開発された [16]. JNUBEAM のフラックスをインプットとしてニュートリノ反応, 原 子核内の二次粒子をシミュレートし, 反応の種類に応じて生成される粒子の種類, エネルギー, 運動量, 位 置の情報を JNUBEAM のフラックスファイルに追加する形で出力する. NEUT ではニュートリノ反応 の種類は表 5.1 のように分類される. NEUT におけるニュートリノ反応と二次粒子の原子核内の反応は ニュートリノ核子散乱実験のデータをもとに再現されている.

## 5.1.3 GEANT4 について

CERN により開発された,粒子が物質中で起こす振る舞いや反応をシミュレートするツールキットで ある [17]. NEUT で得られたニュートリノ反応およびその二次反応で生成された全ての粒子の情報をイ ンプットとして,検出器内での粒子と物質の反応をシミュレートする.本研究では,GEANT4シミュレー ションの中に WAGASCI 実験で使用する全ての検出器 (WAGASCI 検出器,プロトンモジュール,Wall MRD, BabyMIND) が組み込まれている (図 5.2). ニュートリノ検出器である WAGASCI 検出器,プロ トンモジュールに関しては測定データに基づいて詳細なパラメータ調整がなされている. そのため,シン チレータでのクエンチング,ファイバー中の減衰や伝播時間,MPPC のノイズ,検出効率,クロストークや アフターパルス,光量に関する非線形性等の点で実際の検出器をシミュレーションで再現している.本研 究では,2019 年から 2020 年にかけて行われた物理測定のデータからサンドミューオンサンプルを使用し て Wall MRD のパラメータの調整を行った結果を報告する.



図 5.2 GEANT4 で構築した WAGASCI 検出器群

表 5.1 NEUT におけるニュートリノ反応の種類 (νの場合). *l*<sup>-</sup> はニュートリノのフレーバーに対応 する荷電レプトン.

荷電カレント反応				
 準弾性散乱	$\nu + n \rightarrow l^- + p$			
	$\nu + n + X \rightarrow l^- + p + X \ (X = n \ or \ p)$			
$\Delta$ 共鳴反応	$\nu + n \rightarrow l^- + p + \gamma$			
(π 中間子を生成しないもの)	$\nu + n \rightarrow l^- + p + \eta$			
	$\nu + n \rightarrow l^- + \Lambda + K^+$			
1π 生成反応	$\nu + p \rightarrow l^- + p + \pi^+$			
	$\nu+n \rightarrow l^- + p + \pi^0$			
	$\nu+n \rightarrow l^- + n + \pi^+$			
	$\nu+O\rightarrow l^-+O(16)+\pi^+$			
マルチ π 生成反応	$\nu + n \text{ or } p \rightarrow l^- + n \text{ or } p + multi \pi$			
深弾性散乱	$\nu + n \text{ or } p \rightarrow l^- + n \text{ or } p + mesons$			
 中性カレント反応				
	$\nu + p \rightarrow \nu + p$			
	$\nu+n \rightarrow \nu+n$			
$\Delta$ 共鳴反応	$\nu+n \rightarrow \nu + \Lambda + K^0$			
(π 中間子を生成しないもの)	$\nu + n \rightarrow \nu + \Lambda + k^+$			
	$\nu+n \rightarrow \nu+n+\gamma$			
	$\nu + \rightarrow \nu + p + \gamma$			
	$\nu+n \rightarrow \nu+n+\eta$			
	$\nu + p \rightarrow \nu + p + \eta$			
1π 生成反応	$\nu + p \rightarrow \nu + n + \pi^+$			
	$\nu+n \rightarrow \nu+p+\pi^-$			
	$\nu + p \rightarrow \nu + p \pi^0$			
	$\nu + n \rightarrow \nu + n + \pi^0$			
	$\nu + n \text{ or } p \rightarrow \nu + O(16) + \pi^0$			
マルチ π 生成反応	$\nu + n \text{ or } p \rightarrow \nu + n \text{ or } p + multi \pi$			
深非弾性散乱	$\nu + n \text{ or } p \rightarrow \nu + n \text{ or } p + mesons$			

## 5.2 宇宙線試験

2018 年に Wall MRD の宇宙線試験が行われた. この試験で得られた結果からシミュレーション における Wall MRD のファイバーの減衰に関するパラメータを決定した. 実験のセットアップを図 5.3, 図 5.4 に示す. MPPC の信号を波形記録モジュールである CAEN digitizer DT5742 を用いて記録 した. この digitizer は 200 ns 間信号を記録し, データを 1024 samples 保持する. よって, 1 TDC count は, 200/1024 ns となる. Digitizer による波形を図 5.5 に示す.



図 5.3 宇宙線測定試験のセットアップ図



図 5.4 トリガーシンチレータの配置図



図 5.5 宇宙線試験での digitizer による波形

4 枚のシンチレータ (1800 × 200 × 7 mm<sup>3</sup>) を使用して測定を行った. また, トリガーとなるシンチレー タ (60 × 60 × 170 mm<sup>3</sup>) 2 枚を測定するシンチレータを上下に挟む形で使用した. シンチレータの中心を 原点として, 長さ方向で見た際に –80 cm ~ 80 cm まで 10 cm 間隔でトリガーシンチレータを移動して 宇宙線を測定した. 各位置での平均光量を求め, チャンネル毎にトリガーシンチレータの位置と光量の関 係から減衰長を求めた.

光量を計算する前に 1 p.e. あたりの ADC counts を求める. 図 5.6, 図 5.7 のように ADC 分布のそれぞ れのピークの ADC counts が 0, 1, 2, 3 p.e. に相当する.



ADC Distribution ch\_0

図 5.6 あるチャンネルの ADC 分布



図 5.7 図 5.6 を拡大した ADC 分布

各ピークの差の平均を Gain とし, 光量に変換する際に使用した. 各チャンネルのピークの差と Gain は 表 5.2 となった.

	0 p.e. $\sim$ 1 p.e. [ADC counts]	1 p.e. $\sim 2$ p.e.	2 p.e. $\sim 3$ p.e.	Gain [ADC counts/p.e.]
channel 0	10441	11054	10636	10710
1	10527	10955	11068	10850
2	12804	13008	13217	13010
3	9363	9855	9457	9558
4	9861	10914	10235	10337
5	10187	10966	10530	10561
6	9934	11275	11058	10756
7	10357	10970	10668	10665

表 5.2 チャンネルごとによる各ピークの差と Gain

この結果を使用して,トリガーシンチレータの位置ごとの光量分布を作成する. 光量 (p.e.) は以下のように求める.

光量 [p.e.] = 
$$\frac{$$
測定データの ADC counts – そのチャンネルのペデスタルの ADC counts Gain [ADC counts/p.e.] (5.1)

閾値を 2.5 p.e. として, 光量分布を作成すると, 図 5.8 のようになる. 全チャンネルを含めた光量分布の ピークは約 16 p.e., ADC の値にすると約 16 × 10<sup>4</sup> ADC counts であった. この分布を各チャンネル, 各 位置でのトリガーシンチレータごとに作成して, それぞれの平均光量とトリガーシンチレータの位置の 関係による図を作る (図 5.9). この図を指数関数でフィッティングを行い, 各チャンネルで減衰長を計 算する. 計算した減衰長を表 5.3 に示す. また, 各チャンネルの減衰長は図 5.10 のようになった. 平均 は, 185.3 cm, ばらつきは, 6.4% となった.

channel	0	1	2	3	4	5	6	7
	187.9	186.2	166.6	179.7	175.5	185.2	191.5	210.2

表 5.3 チャンネルごとの減衰長



図 5.8 あるチャンネルの光量分布



図 5.9 あるチャンネルの平均光量 vs トリガーシンチレータの位置



図 5.10 各チャンネルの減衰長

この実験では,長さ方向に対してトリガーシンチレータを用いて減衰長の測定を行ったので,S字状のファイバーの減衰長を近似的に求めることに相当する.よって,得られた減衰長の値をシミュレーションにおけるファイバーの減衰長のパラメータに採用する.

## 5.3 パラメータ調整

2019 年 11 月末から 2020 年 2 月中旬に J-PARC で行われたニュートリノビーム測定から, 飛跡再構成によって得られたサンドミューオンイベントの解析結果を用いて, Wall MRD に関するパラメータの調整を行なった. シミュレーションにおいて, Wall MRD はファイバーによる減衰長, エレクトロニクスに関するパラメータ, エネルギーを光量に変換するパラメータが必要となる. 本論文では, 閾値 6 p.e. での実データの両側読み出しによる解析結果からエネルギーを光量に変換するパラメータ (パラメータ名: mev2pe)の調整を行い, 光量分布の再現を行った.

### 光量分布

シミュレーションによる光量分布は南 Wall MRD では, 図 5.11 となった. 実データとの比較を行う と図 5.12 となる. 実データはモンテカルロシミュレーションのイベント数で規格化している. テールの 部分でシミュレーションによるデータが多くなる要因としては, SPIROC2D の性能試験が行われていな いために高い光量での非線形性を再現できていないことが考えられる. 20 p.e. から 100 p.e. の範囲で ランダウフィットを行うと, シミュレーションによるピークは 46.7 ± 0.5 p.e., 実データによるピーク は 46.0 ± 0.5 p.e. となりピーク位置の再現を確認した. 図 5.13 は, mev2pe の値と南 Wall MRD の実 データのピーク位置の比の関係になる. 一方で北 Wall MRD では, 図 5.14 となった. 実データと比較する と, 図 5.15 となった. Geant4 によるシミュレーションでは, 南も北も同じパラメータを使用しているた め, 北 Wall MRD での光量の再現を行うことができなかった.

本研究ではエネルギーを光量に変換するパラメータの調整を行った. Wall MRD の波長変換ファイバー の伝達における減衰長の測定は行われたが, シンチレータにおける減衰長の測定や SPIROC2D の性能試 験が行われていないため, シンチレータによる減衰の補正や SPIROC2D 内の ADC での線形性や非線形 性の再現, クロストークに関するパラメータを調整することができない. 実データの結果をより正確に再 現するためには, これらの試験が必要となる. また, 南, 北 Wall MRD でそれぞれのパラメータを調整す ることが必要である.



図 5.11 シミュレーションによる南 Wall MRD の光量分布



図 5.12 シミュレーションと実データによる南 Wall MRD の光量分布



図 5.13 シミュレーションと実データによる南 Wall MRD のピーク位置の比と mev2peの関係



図 5.14 シミュレーションによる北 Wall MRD の光量分布



図 5.15 シミュレーションと実データによる北 Wall MRD の光量分布

## 第6章

# 結論

2019 年 11 月末から 2020 年 2 月中旬にかけて行われたニュートリノビーム測定において, T2K-WAGASCI 実験で使用される大角度散乱ミューオン検出器 Wall MRD の性能評価を行なった. 性能評価を行う上で, サンドミューオンイベントを選択した. 飛跡再構成前のデータによる両側読み出しでの ヒット検出効率は, dead channel が存在している層を除いて, 南, 北 Wall MRD ともに 95 % 以上であった. ただし, ADC 分布からサンドミューオン由来とは別のイベントを選択している可能性がある.

次に飛跡再構成を行ったデータによるサンドミューオンイベントの光量分布とヒット検出効率の計算 を行なった. 光量と検出効率は片側読み出しと両側読み出しで計算を行った. 閾値を 6 p.e. に設定した データによる片側読み出しのヒット検出効率は,南 Wall MRD では 82% 以上を記録した.北 Wall MRD では 81% 以上を記録した.入射角度ごとの検出効率は,南では ±67.5°以下のイベントに対して 80% 以上 を記録し,北では ±60°以下のイベントに対して 80% 以上を記録した.

閾値を 6 p.e. に設定したデータによる両側読み出しのヒット検出効率は, 南では 5 層目を除き 74% 以 上を記録し, 北では 2 層目を除き 79% 以上を記録した. 南の 5 層目と北の 2 層目の検出効率が低い原因に ついては調査中である. サンドミューオンイベントによる平均光量は, 南で 67 p.e., 北で 60 p.e. となっ た. また南, 北それぞれの top 側での光量分布は, 片側読み出しで見られた 20 p.e. 付近の緩やかなピーク が鋭くなっていたことを確認した. 飛跡構成前の検出効率と比較して低くなっている要因としては, 閾値 の設定による違いが考えられる. 再構成を行っていないデータでは 600ADC counts を閾値に設定してお り, 飛跡再構成を行ったデータでは約 1000ADC counts を閾値に設定していた. また角度分布より, 飛跡 再構成を行ったサンドミューオンイベントはシンチレータの面に対して垂直に入射するものが最も多く観 測され, その角度に対する検出効率は南, 北ともに 90% 以上を記録した.

Wall MRD において, 飛跡再構成アルゴリズムは単純な飛跡に対しての再構成は上手く機能し, 信号が 多く存在する複雑な飛跡に対しては上手く機能していないことを確認した. 飛跡再構成アルゴリズムにつ いては, パラメータの調整や改善が進められている.

再構成したサンドミューオンイベントを使用して, Wall MRD の光量に関するパラメータの調整を行 なった. 光量分布に関して, 南 Wall MRD でピークの位置を再現したことを確認した. 光量の高い部分での イベントでは, シミュレーションデータが実データに比べてイベントが多かった要因として, SPIROC2D の性能試験が行われていないために高い光量での振る舞いを再現できていないことが考えられる. Wall MRD のファイバーにおける減衰長の測定は行われたが, シンチレータでの減衰長の測定や SPIROC2D の ADC に関する試験, SPIROC2D でのクロストークの試験が今後精密にパラメータの調整を行うため に必要となる.
## 謝辞

2年という短い期間の中, 学部生では味わうことのできない多くのことを経験させて頂きました. 海外 でのコラボレーションミーティング (機内で起こった事故も含めて) や仙台でのビームテストなど, 研究 生活が充実したものとなりました. また, 多くの人達の支えがあって今の自分がいる, ということを実感し ています. 指導教員である清矢良浩教授には, 私の拙い日本語を幾度となく指摘して頂き, 自分の言葉で伝 える力がつきました. また, 研究の面では解析のアイデアやアドバイスを頂いたり, コンピュータに関する 疑問に丁寧に答えて頂き大変感謝しております. 山本和弘准教授には, 研究を行うための環境を整えて頂 き, 我々学生が研究に専念できていると日々実感しています, ありがとうございます. 手島菜月特任助教に は, 日々身の回りの環境を清潔に努める姿勢を学び, また東海での過ごし方や実験の作業をお手伝いして 頂きました. 豊田さんは, 物理やコンピュータに関する知識や研究生活の実体験をご教示頂き, 研究の進め 方や解析に必要な基礎知識を身につける事ができました. また, 私が修論執筆で追い込まれる中, 何気ない 言葉をかけて頂いたことで何度も救われました.

T2K-WAGASCI 実験ではたくさんの方々に助けて頂きました. 京都大学の安留さん, 横浜国立大学の jojo には, 解析を行うための全ての知識を教えて頂きました. 何も分からないゼロの状態から現在なんと か解析を進めることができているのは, お二人の支えがあったからにほかなりません. 初歩的な質問に対 しても大変忙しい中で丁寧に答えて頂き本当にありがとうございます. また, 横浜国立大学准教授の南野 彰宏氏には, コラボレーションミーティングや Wall MRD の研究でお世話になりました. COVID-19 の 影響で最初の1年ほどしか作業をともにできませんでしたが, 東京大学の江口くん, 横浜国立大学の片山 さんにも感謝を申し上げたいです. 京都大学准教授の市川温子氏, 助教授の木河達也氏, 安留さん, KEK 助教授の松原綱之氏, 東京理科大学教授の石塚正基氏, 同じく東京理科大学の和泉さん, 中村さんには, 力 不足な部分がありましたが, ビームテストを通してお世話になりました.

研究室の同期である本條くんと池内くん,小向くんにも感謝申し上げます. 学部生を合わせると 6 年間,力を合わせて乗り越えなければいけない局面が何度もあったと思います. 大変な時期や迷惑をかける こともあったと思いますが,楽しい研究生活でした. また, 賑やかな雰囲気で研究できた研究室での思い出 は感慨深いものがあります.

最後に, 研究生活のみならずこの約 25 年間私を応援し, 鼓舞し続けてくれた家族に深く感謝いたします.

## 図目次

1.1	CC 反応と NC 反応の反応断面積 $(E_{\nu} = 0 \sim 5 \text{ GeV})$
1.2	CCQE 反応
2.1	T2K 実験の概要図
2.2	J-PARC 加速器群
2.3	ニュートリノビームラインの生成と前置検出器
2.4	前置検出器の概観図
2.5	INGRID の概観図
2.6	ND280 の概観図
2.7	後置検出器スーパーカミオカンデの概観図
2.8	スーパーカミオカンデの内部図 10
2.9	T2K 実験の検出器の配置図
2.10	崩壊角に対する親パイオンの運動量とニュートリノエネルギーの関係
2.11	ニュートリノ振動確率のエネルギー依存性11
3.1	T2K-WAGASCI 実験の全体図
3.2	WAGASCI 検出器の概観図
3.3	WAGASCI 検出器のシンチレータの構造 14
3.4	WAGASCI 検出器の構造
3.5	プロトンモジュールの概観図 15
3.6	トラッキングプレーンの構造15
3.7	プロトンモジュールのシンチレータの配置図15
3.8	Baby MIND の概観図
3.9	Baby MIND の内部構造
4.1	WAGASCI 実験の検出器群の位置図
4.2	Wall MRD の概観図
4.3	Wall MRD の内部構造
4.4	Wall MRD のシンチレータの構造
4.5	Wall MRD の波長変換ファイバー 20
4.6	MPPC の概観図
4.7	ピクセルの構造
4.8	APD によるアバランシェ増幅の仕組み

4.9	Wall MRD の DAQ システムの全体図 ............................	23
4.10	ASU (Active Sensor Unit)	24
4.11	Interface	24
4.12	DIF (Detector InterFace)	24
4.13	GDCC (Giga Data Concentrator Card)	25
4.14	CCC (Clock and Control Card) $\ldots \ldots \ldots$	25
4.15	新しく開発された single MPPC card	26
4.16	ある Run データでの ADC 分布	27
4.17	Wall MRD のシンチレータ層と位置番号の関係	27
4.18	入射ミューオンの角度の導出....................................	28
4.19	南 Wall MRD の ADC 分布 (全角度, 飛跡再構成なし)	29
4.20	北 Wall MRD の ADC 分布 (全角度, 飛跡再構成なし)	29
4.21	ヒット検出効率のイベントの選択	30
4.22	南 Wall MRD のヒット検出効率 (全角度, 飛跡再構成なし) ..........	30
4.23	北 Wall MRD のヒット検出効率 (全角度, 飛跡再構成なし) ..........	31
4.24	南 Wall MRD のヒット検出効率 (角度ごと, 飛跡再構成なし) .........	32
4.25	北 Wall MRD のヒット検出効率 (角度ごと, 飛跡再構成なし) .........	32
4.26	セルオートマトンを用いた飛跡再構成...............................	35
4.27	クラスター群を統合する流れのイメージ図	36
4.28	Wall MRD の 2D Cluster Matching におけるフローチャート	36
4.29	Wall MRD の有効体積	37
4.30	Wall MRD の飛跡に関するイベントを選択するフローチャート ........	37
4.31	南 Wall MRD の光量分布 (閾値 2.5 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し)	39
4.32	北 Wall MRD の光量分布 (閾値 2.5 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し)	39
4.33	南 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 2.5 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し)	39
4.34	北 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 2.5 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し)	40
4.35	南 Wall MRD の光量分布 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し)  ...	40
4.36	北 Wall MRD の光量分布 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し)	41
4.37	南 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し) .	41
4.38	北 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 片側読み出し) .	42
4.39	南, 北 Wall MRD の片側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布 ....	42
4.40	南 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構成あり, 両側読み出し)	43
4.41	北 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構成あり, 両側読み出し)	43
4.42	南 Wall MRD の光量分布 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 両側読み出し)    .  .  .	44
4.43	北 Wall MRD の光量分布 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 両側読み出し)	44
4.44	南 Wall MRD の各チャンネルの平均光量 (飛跡再構成あり, 両側読み出し) .....	45
4.45	北 Wall MRD の各チャンネルの平均光量 (飛跡再構成あり, 両側読み出し) .....	45
4.46	南 Wall MRD の光量分布 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 両側読み出し, top, bot-	
	tom) $\ldots$	46
4.47	北 Wall MRD の光量分布 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 両側読み出し, top, bot-	
	tom)	46

4.48	南 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 両側読み出し) .	47
4.49	北 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構成あり, 両側読み出し) .	47
4.50	南, 北 Wall MRD の両側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布....	48
4.51	南 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構成あり, 両側読み出し)	48
4.52	北 Wall MRD のヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構成あり, 両側読み出し)	49
4.53	Wall MRD の角度分解能についての図 .................................	49
4.54	南, 北 Wall MRD の片側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布	
	(±27.5° の範囲を 1 つのビンに変更)	50
4.55	南 Wall MRD の片側読み出しにおけるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構	
	成あり, ビン幅を変更)	50
4.56	北 Wall MRD の片側読み出しにおけるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構	
	成あり, ビン幅を変更)	51
4.57	南, 北 Wall MRD の両側読み出しにおけるサンドミューオンイベントの角度分布	
	(±27.5° の範囲を 1 つのビンに変更)	51
4.58	南 Wall MRD の両側読み出しにおけるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構	
	成あり, ビン幅を変更) ...................................	52
4.59	北 Wall MRD の両側読み出しにおけるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 角度ごと, 飛跡再構	
	成あり, ビン幅を変更) ...................................	52
4.60	飛跡再構成時のイベントディスプレイ................................	53
5.1	シミュレーションの構造図....................................	55
5.2	GEANT4 で構築した WAGASCI 検出器群	56
5.3	宇宙線測定試験のセットアップ図...................................	58
5.4	トリガーシンチレータの配置図	58
5.5	宇宙線試験での digitizer による波形 ..............................	59
5.6	あるチャンネルの ADC 分布	59
5.7	図 5.6 を拡大した ADC 分布	60
5.8	あるチャンネルの光量分布...................................	61
5.9	あるチャンネルの平均光量 vs トリガーシンチレータの位置 ..........	62
5.10	各チャンネルの減衰長	62
5.11	シミュレーションによる南 Wall MRD の光量分布 ...............	63
5.12	シミュレーションと実データによる南 Wall MRD の光量分布 ..........	64
5.13	シミュレーションと実データによる南 Wall MRD のピーク位置の比と mev2pe の関係 .	64
5.14	シミュレーションによる北 Wall MRD の光量分布 ................	65
5.15	シミュレーションと実データによる北 Wall MRD の光量分布 ...........	65

## 表目次

4.1	波長変換ファイバーのカタログスペック [14]	20
4.2	ヒット検出効率 (全角度, 飛跡再構成なし)	31
4.3	ヒット検出効率 (入射角度ごと, 飛跡再構成なし) .............	33
4.4	南, 北 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率 (全角度, 飛跡再構成あり)	53
4.5	南, 北 Wall MRD の片側読み出しによるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構	
	成あり)	54
4.6	南, 北 Wall MRD の両側読み出しによるヒット検出効率 (閾値 6 p.e., 全角度, 飛跡再構	
	成あり)	54
5.1	NEUT におけるニュートリノ反応の種類 (νの場合). l <sup>-</sup> はニュートリノのフレーバーに	
	対応する荷電レプトン	57
5.2	チャンネルごとによる各ピークの差と Gain	60
5.3	チャンネルごとの減衰長....................................	61



- [1] W.Pauli Letter of 4 December to L.Meitner et al. (1930)
- [2] F.Reines and C.L. Cowan et al. "Detection of the Free Antineutrino" Phys. Rev. 117 (1960)
- [3] S. Assylbekov et al., "The T2K ND280 Off-Axis Pi-Zero Detector", Nucl. Instrum. Meth. A 686 48 (2012)
- [4] N. Abgrall et al., "Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors", Nucl. Instrum. Meth. A 637 25 (2011)
- [5] P. A. Amaudruz et al., "The T2K Fine-Grained Detectors", Nucl. Instrum. Meth. A 696 1 (2012)
- [6] D. Allan et al., "The electromagnetic calorimeter for the T2K near detector ND280", Journal of Instrum. 8 10019 (2013)
- [7] S. Aoki et al., "The T2K Side Muon Range Detector (SMRD)", Nucl. Instrum. Meth. A 698 135 (2013)
- [8] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), "The Super-Kamiokande detector", Nucl. Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- [9] 田村陸 "ニュートリノ-原子核反応断面積測定のためのニュートリノ検出器の構成と性能"東京大学 修士論文
- [10] 木河達也 "T2K 実験新ニュートリノ検出器の開発及び製作とそれを用いたニュートリノ反応の研究" 京都大学修士論文
- [11] 安留健嗣 "新検出器 Baby MIND を導入した T2K-WAGASCI 実験の最適化と解析アルゴリズムの 構築" 京都大学修士論文
- [12] T. Fukuda et al., "First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline", PTEP 2017, 063C02 (2017).
- [13] 岡本浩大 他, J-PARC WAGASCI プロジェクトの横方向ミューオン検出器用シンチレータの性能評価, 日本物理学会 2018 年次大会
- [14] Kuraray 社 Scintillation Materials カタログ
- [15] K.Abe et al [T2K collaboration], T2K neutrino flux prediction, Phys.Rev. D87 (2013) no.1, 012001
- [16] Y.Hayato, "NEUT", Nucl. Phys. Proc. Suppl. 112, 171 (2002)
- [17] R.Brun et al. "GEANT-Detector Description and Simulation Tool" Cern Program Library 194 Long Write-up W5013 (1993)