

T2K-WAGASCI 実験における
セルオートマトンを用いた飛跡再構成アルゴリズム
および検出器の性能評価
(Performance Evaluation of Track Reconstruction
Algorithm Using Cellular Automata and Detectors in
T2K-WAGASCI Experiment)

理学研究科
数物系専攻
高安咲妃

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 Reserch Complex) から、295 km 離れた岐阜県神岡町の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を飛ばし、前置検出器と後置検出器でニュートリノ反応を観測することで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。T2K 実験で精密な振動解析を行うためには統計誤差の他、ニュートリノ-原子核反応モデルの不定性が生む系統誤差を低減することが必要となる。その系統誤差の削減のため、ニュートリノ-原子核反応モデルを構築・精緻化することを目的として始まったのが T2K-WAGASCI 実験である。

T2K-WAGASCI 実験の検出器群は、J-PARC ニュートリノ棟地下二階、オフアクシス角 1.5° の場所に設置されており、既存の検出器であるスーパーカミオカンデ、ND280(オフアクシス角 2.5°) よりも高いエネルギーでニュートリノ反応を測定している。検出器群は、CH 標的検出器、水標的検出器、 μ 粒子検出器、MRD (Muon Range Detector) で構成されている。中心に CH 標的検出器 Proton Module、その上流側と下流側に二台の水標的検出器があり、側面には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、これらの検出器でニュートリノ反応を捉えている。

本論文では、WAGASCI 実験で重要視されているニュートリノ反応モードの識別のために必要となる、飛跡再構成アルゴリズムのチューニングおよび評価の結果について述べる。また、チューニングにより最適化した飛跡再構成アルゴリズムを用いて、2021 年に取得されたデータとモンテカルロシミュレーションを比較した検出器の性能評価の結果についても述べる。

目次

1	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	ニュートリノ反応	3
2	T2K 実験	5
2.1	概要	5
2.2	大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ニュートリノビームライン	5
2.3	off-axis 法	6
2.4	前置検出器	7
2.5	後置検出器: スーパーカミオカンデ	9
3	T2K-WAGASCI 実験	11
3.1	目的	11
3.2	検出器の構成	11
3.2.1	Proton Module	12
3.2.2	WAGASCI(WATER Grid And SCIntillator)	13
3.2.3	Wall MRD	15
3.2.4	BabyMIND	16
3.2.5	NINJA 実験	17
3.2.6	波長変換ファイバーと MPPC	17
4	飛跡再構成アルゴリズム	19
4.1	セルオートマトンを用いた飛跡再構成アルゴリズム	19
4.2	セルオートマトン	19
4.3	チューニングを行ったパラメータ	20
4.4	チューニングに使用しなかったパラメータ	21
4.5	評価用サンプル	23
4.6	評価方法および結果	25
4.6.1	再構成トラック数	26
4.6.2	角度の再構成精度	28
4.6.3	true track に含まれるヒットと再構成トラックに含まれるヒットを比較した際の正確さ	32
4.6.4	総合評価	34
4.6.5	まとめと展望	38
5	検出器の性能評価	41
5.1	光量分布	41
5.1.1	Proton Module	41

5.1.2	WAGASCI	43
5.1.3	BabyMIND	45
6	結論	48

図目次

1.1	荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) のダイアグラム	3
1.2	荷電カレント 1π 生成反応 (CC 1π) のダイアグラム	3
1.3	中性カレント弾性散乱反応のダイアグラム	4
1.4	中性カレント π^0 生成反応のダイアグラム	4
2.1	T2K 実験のビームライン	5
2.2	J-PARC 加速器群	6
2.3	陽子ビームの時間構造	6
2.4	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。 ν, μ 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)	7
2.5	ニュートリノの反応断面積	7
2.6	ニュートリノモニター棟の概観図	8
2.7	INGRID の概観図	8
2.8	ND280 の概観図	9
2.9	スーパーカミオカンデの概観	10
2.10	スーパーカミオカンデの内部構造	10
3.1	WAGASCI 実験のセットアップ	12
3.2	ProtonModule の概観	13
3.3	トラッキングプレーンの構造	13
3.4	最上流のプレーンを除いたトラッキングプレーンの構造	13
3.5	WAGASCI の概観	14
3.6	WAGASCI の構造	14
3.7	グリッドシンチレータとパラレルシンチレータ	15
3.8	Wall MRD の概観	15
3.9	Wall MRD の構造	15
3.10	Wall MRD に使用されているシンチレータ	16
3.11	Baby MIND の概観	16
3.12	Baby MIND の構造	17
3.13	波長変換ファイバー	18
3.14	MPPC の概観	18
3.15	ピクセルの構造	18
4.1	飛跡再構成の手順	20
4.2	違う種類のシンチレータのヒットを結んだ時と同じ種類のシンチレータのヒットを結んだときの比較	21
4.3	χ^2 のヒストグラムの例	21
4.4	パラメータの説明 1(2つのセルの角度を確認するパラメータ)、2(枝分かれしたセルを選択するパラメータ)	22

4.5	パラメータの説明 3(トラック内の角度を確認するパラメータ)、4(χ^2 値の変化を確認するパラメータ)、5(トラック内の χ^2 値を確認するパラメータ)	22
4.6	5 パラメータを用いたトラックの選別を行った場合の再構成効率	23
4.7	5 パラメータを用いたトラックの選別を行わなかった場合の再構成効率	23
4.8	飛跡予測が困難だと考えられる例	23
4.9	サンプルに使用した、再構成出来ることが望ましいイベントの例	24
4.10	1track イベントにおける side view のヒット数ごとの再構成効率	25
4.11	1track イベントにおける top view のヒット数ごとの再構成効率	25
4.12	2track イベントにおける side view のヒット数ごとの再構成効率	25
4.13	2track イベントにおける top view のヒット数ごとの再構成効率	25
4.14	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	26
4.15	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	26
4.16	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	27
4.17	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	27
4.18	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	27
4.19	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	27
4.20	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	27
4.21	Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	27
4.22	WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	28
4.23	WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	28
4.24	WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	28
4.25	WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)	28
4.26	角度のヒストグラムの例	29
4.27	Proton Module におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの RMS	29
4.28	Proton Module におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの角度差のヒストグラムの RMS	29
4.29	Proton Module におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN	30
4.30	Proton Module におけるパラメータ (sigmafactor) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN	30

4.31	角度のヒストグラムの例	30
4.32	WAGASCI Upstream におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの RMS	31
4.33	WAGASCI Upstream におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの角度差のヒストグラムの RMS	31
4.34	WAGASCI Upstream におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN	31
4.35	WAGASCI Upstream におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN	31
4.36	WAGASCI Downstream におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの RMS	32
4.37	WAGASCI Downstream におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの角度差のヒストグラムの RMS	32
4.38	WAGASCI Downstream におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN	32
4.39	WAGASCI Downstream におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN	32
4.40	再構成効率の導出過程	33
4.41	Proton Module におけるパラメータ (固定値) ごとの再構成効率	33
4.42	Proton Module におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの再構成効率	33
4.43	WAGASCI Upstream におけるパラメータ (固定値) ごとの再構成効率	34
4.44	WAGASCI Upstream におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの再構成効率	34
4.45	WAGASCI Downstream におけるパラメータ (固定値) ごとの再構成効率	34
4.46	WAGASCI Downstream におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの再構成効率	34
4.47	パラメータ (固定値) ごとのスコアの積	37
4.48	パラメータ (sigmfactor) ごとのスコアの積	37
4.49	パラメータ (固定値) ごとのスコアの積の変化	37
4.50	パラメータ (sigmfactor) ごとのスコアの積の変化	37
4.51	パラメータ (固定値) ごとのスコアの積	38
4.52	パラメータ (sigmfactor) ごとのスコアの積	38
4.53	パラメータ (固定値) ごとのスコアの積	38
4.54	パラメータ (sigmfactor) ごとのスコアの積	38
4.55	Proton Module の 2track sample のうち一本に再構成された例	39
4.56	Proton Module の 2track sample のうち一本に再構成された例	40
5.1	サンドミュオンイベントの例	41
5.2	3次元飛跡の角度を用いた光量の補正	42
5.3	Proton Module の INGRID シンチレータにおける光量分布	42
5.4	Proton Module の SCIBAR シンチレータにおける光量分布	43
5.5	WAGASCI Upstream のグリッドシンチレータにおける光量分布	43
5.6	WAGASCI Upstream のパラレルシンチレータにおける光量分布	44
5.7	WAGASCI Downstream のグリッドシンチレータにおける光量分布	44

5.8	WAGASCI Downstream の平行シンチレータにおける光量分布	45
5.9	BabyMIND の side view における光量分布 (right readout)	45
5.10	BabyMIND の top view における光量分布 (right readout)	46
5.11	BabyMIND の side view における光量分布 (left readout)	46
5.12	BabyMIND の top view における光量分布 (left readout)	47

1 ニュートリノ

1.1 ニュートリノとは

ニュートリノとは、標準模型において物質を構成する素粒子の一つである。物質を構成する素粒子にはクォークとレプトンがあるが、ニュートリノは中性レプトンである。1930年にヴォルフガング・パウリによりその存在仮説が提唱され [1]、1956年にフレデリック・ライネスとクライド・コーワンによりその存在が証明された。[2] クォークとレプトンはボソンと呼ばれる素粒子を媒介して相互作用を行うが、ニュートリノは強い相互作用と電磁相互作用をせず、弱い相互作用と重力相互作用を行う。標準理論においてニュートリノは3世代存在し、その反粒子を含め6種類ある。荷電カレント反応 (1.1) を通して電子 (e)、ミューオン (μ)、タウ (τ) が生成されるニュートリノをそれぞれ、電子ニュートリノ (ν_e)、ミューオンニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) と呼ぶ。

$$\nu_l + n \rightarrow p + l^- \quad (l = e, \mu, \tau) \quad (1.1)$$

1.2 ニュートリノ振動

1962年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一がニュートリノは質量を持ち、各フレーバーのニュートリノが異なる質量固有状態の重ね合わせであるとすれば時間発展と共にそのフレーバーを変えると理論を提唱した [3]。1998年にスーパーカミオカンデ実験グループによりニュートリノ振動が観測され、ニュートリノに質量があることが確認された [4]。

ニュートリノの質量固有状態を $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$)、フレーバーの固有状態を $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) とする。フレーバーの固有状態は質量の固有状態の混合和として表されるとする。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{PMNS}^{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.2)$$

U_{PMNS} は Pontecorvo・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれる3行3列のユニタリー行列であり、以下のように表される。

$$\begin{aligned} U_{PMNS} &= \begin{pmatrix} U_{PMNS}^{e1} & U_{PMNS}^{e2} & U_{PMNS}^{e3} \\ U_{PMNS}^{\mu1} & U_{PMNS}^{\mu2} & U_{PMNS}^{\mu3} \\ U_{PMNS}^{\tau1} & U_{PMNS}^{\tau2} & U_{PMNS}^{\tau3} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}s_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.3)$$

ここで、 $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ 、 $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ であり、 θ_{ij} は質量固有状態 ν_i と ν_j との混合角である。 δ_{CP} は複素位相である。以下簡単のために2世代間での混合を考える。このとき混合角を $\theta_{\alpha\beta}$ として、フレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ 、 $|\nu_\beta\rangle$ は質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ 、 $|\nu_j\rangle$ の線型結合で表される。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} &= U \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \\ &\equiv \begin{pmatrix} \cos \theta_{\alpha\beta} & \sin \theta_{\alpha\beta} \\ -\sin \theta_{\alpha\beta} & \cos \theta_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1.4)$$

質量固有状態の時間発展は、 ν_i のエネルギーを E_i 、運動量を \mathbf{p}_i 、位置を \mathbf{r} として、

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r})} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.5)$$

と表される。ここで自然単位系を使用している。よって、フレーバー固有状態の時間発展は式 (1.6) のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(E_i t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_i)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_j t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_j)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} |\nu_i(0)\rangle \\ |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

ここで、ニュートリノの全エネルギーを E_ν とし、 E_ν を持つニュートリノ ν_α が距離 L だけ飛行した後、 ν_β になる確率 $P_{\alpha \rightarrow \beta}$ について考える。ニュートリノの質量 m_i は非常に小さく、 $m_i \ll E_i$ であるとし $|\mathbf{p}| \approx (E_i - m_i^2/2E_i)$ 、 $L = t$ であるので、式 (1.6) は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(m_i^2 L/2E_i)} & 0 \\ 0 & e^{-i(m_j^2 L/2E_j)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} |\nu_i(0)\rangle \\ |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

よって、質量固有状態 i, j 間の質量二乗差 $\Delta_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$ を用いて、

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \end{aligned} \quad (1.8)$$

と表される。また、エネルギー E_ν を持つ ν_α が距離 L だけ飛行した後、 ν_α である確率 $P_{\alpha \rightarrow \alpha}$ は

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \alpha} &= 1 - P_{\alpha \rightarrow \beta} \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \end{aligned} \quad (1.9)$$

となる。このように、ニュートリノ振動の振動確率はニュートリノの飛行距離とエネルギーの関数となる。これを 3 世代に拡張すると同様に計算でき、 ν_α が距離 L だけ飛行した後 ν_β になる確率 $P_{\alpha \rightarrow \beta}$ は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\alpha | \nu_\beta \rangle|^2 \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \\ &\quad + 2 \sum_{i > j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/2E_\nu) \end{aligned} \quad (1.10)$$

また、反ニュートリノにおける振動確率 $P_{\bar{\alpha} \rightarrow \bar{\beta}}$ は U_{ab} を U_{ab}^* にすることで得られ次式のようになる。

$$\begin{aligned} P_{\bar{\alpha} \rightarrow \bar{\beta}} &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i < j} \text{Re}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \\ &\quad - 2 \sum_{i > j} \text{Im}(U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}) \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/2E_\nu) \end{aligned} \quad (1.11)$$

式 (1.10) と式 (1.11) を比較すると U_{PMNS} に含まれる δ_{CP} の値が $0, \pi$ でない値ならば、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率が異なり CP 対称性が破れる。

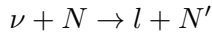
以上のように振動確率は混合角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ 、 $\Delta m_{12}^2, \Delta m_{13}^2, \Delta m_{23}^2, \delta_{CP}$ によって記述される。

1.3 ニュートリノ反応

ニュートリノと他の物質との反応の例として、ニュートリノと原子核（核子）の反応がある。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 (CC 反応:Charge Current interaction) と中性カレント反応 (NC 反応:Neutral Current interaction) がある。CC 反応は W^\pm ボソンを媒介する反応で、NC 反応は Z^0 ボソンを媒介する反応である。

CC 反応の例を挙げる。ここで N は核子、 l は荷電レプトン、 A は原子核をあらわす

- 荷電カレント準弾性散乱反応 (CCQE:Charged Current Quasi-Elastic interaction)



荷電カレント準弾性散乱反応 (図: 1.1) はニュートリノが核子と準弾性散乱を行う二体反応である。

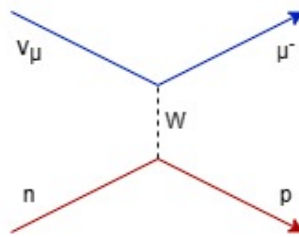


図 1.1 荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) のダイアグラム

T2K 実験で使用されているニュートリノビームのエネルギー領域である $E_\nu =$ 約 0.7GeV では最も支配的な反応である。

- 荷電カレント 1π 生成反応 (CC1 π) (図:1.2)

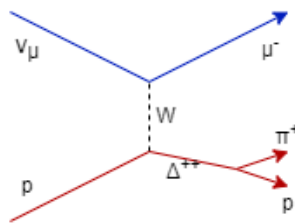
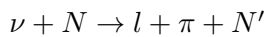
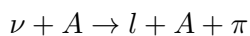


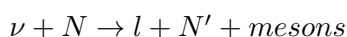
図 1.2 荷電カレント 1π 生成反応 (CC1 π) のダイアグラム

CCQE の次に断面積が大きく、数 GeV の領域で支配的な反応である。

- 荷電カレントコヒーレント π 生成反応 (CC coh. π)



- 荷電カレント深非弾性散乱 (CCDIS:Charged Current Deep Inelastic Scattering)



NC 反応の例を挙げる。

- 中性カレント弾性散乱反応 (図:1.3)

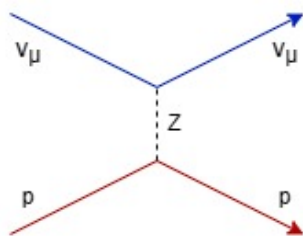
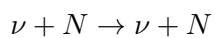


図 1.3 中性カレント弾性散乱反応のダイアグラム

- 中性カレント π^0 生成反応 (図:1.4)

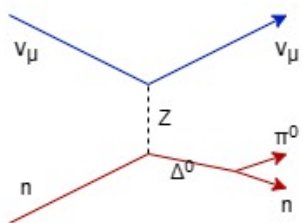
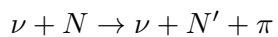


図 1.4 中性カレント π^0 生成反応のダイアグラム

2 T2K 実験

2.1 概要

T2K(Tokai to Kamioka) 実験 [5] とは、ニュートリノ振動を測定することを目的とした長基線ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC(Japan Proton Accelerator Reserch Complex) [6] から、295 km 離れた岐阜県神岡町の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を飛ばし、前置検出器と後置検出器でニュートリノ反応を観測することでニュートリノ振動を測定する。



図 2.1 T2K 実験のビームライン

2.2 大強度陽子加速器施設 (J-PARC) ニュートリノビームライン

J-PARC の陽子加速器は、線形加速器 LINAC (LINear ACcelerator)、シンクロトロン RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、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へ送られる陽子ビームは、図 2.3 のような時間構造をもち、1 つの陽子ビームの塊をバンチ、8 バンチから構成されるビーム構造をスパイルと呼ぶ。陽子ビームはグラフィイト標的に照射され、ハドロン反応により π 中間子を含む多数のハドロンが生成される。生成された π 中間子は電磁ホーンで収束され、下流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。



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いる。



図 2.2 J-PARC 加速器群

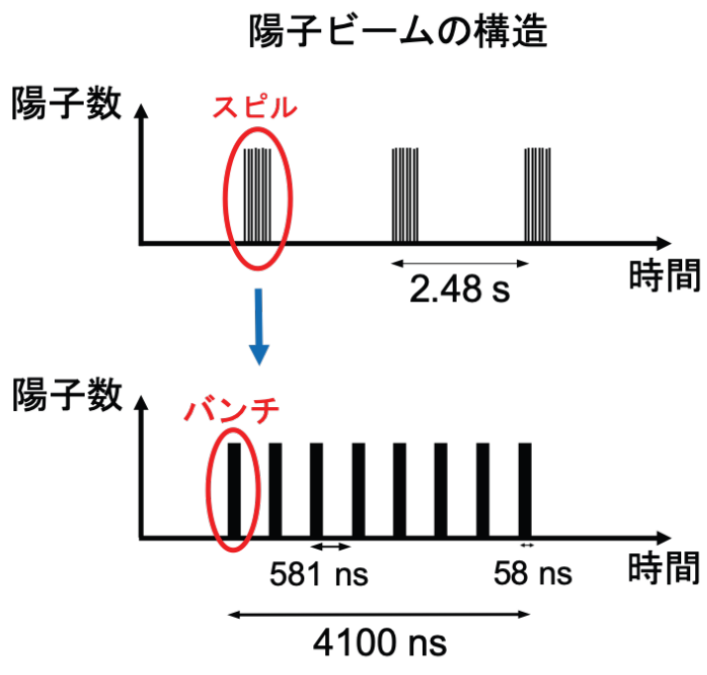


図 2.3 陽子ビームの時間構造

2.3 off-axis 法

T2K 実験は Off-axis 法を採用している。off-axis 法とはニュートリノビームの中心軸 (π 中間子の収束軸) を検出器の方向からずらすことにより、幅の狭いエネルギー分布のニュートリノビームを得る方法である。ニュートリノ振動確率をもっとも高くなるエネルギーは約 0.7GeV であるが、J-PARC のビームラインにより生成されるニュートリノビームは 0° の方向 (on-axis) においては約

2GeV にピークを持つ広いエネルギー分布となる。そのエネルギー領域において、振動確率は低く、スーパーカミオカンデにおいてバックグラウンドとなる π^0 を生成するニュートリノ反応の反応断面積が大きい (図 2.5)。そこで、スーパーカミオカンデ方向から約 2.5° ずれた軸上に π 中間子を収束させることで、約 0.7GeV にシャープなピークを持つエネルギー分布のニュートリノビームを生成することができる。これにより、バックグラウンドとなる π^0 を生成するニュートリノ反応を起こしやすい高エネルギーのニュートリノを減少させる。図 2.4 に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を示す。この off-axis 法を採用することによって、ビーム方向と後置検出器におけるニュートリノビームの強度やエネルギーに間に強い相関が生まれるため、ニュートリノビームの方向を監視することが重要である。T2K 実験では、ミューオンモニター MUMON とニュートリノビームモニター INGRID により、ビームの方向を高精度で監視している。

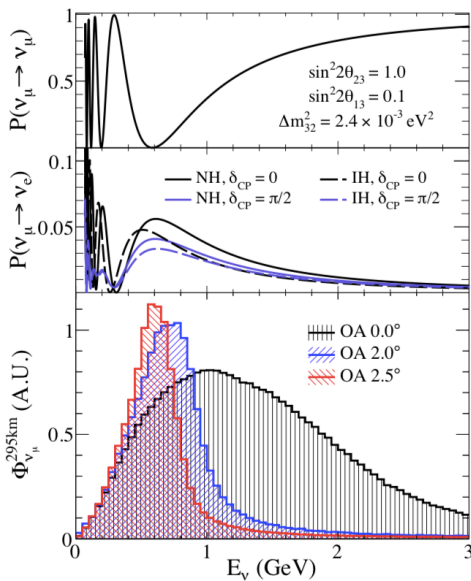


図 2.4 ニュートリノ振動の確率とエネルギーの関係と異なる off-axis 角におけるニュートリノフラックスの違い。 ν_μ の残存確率 (上図)、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の出現確率 (中図)、 off-axis 角ごとのニュートリノフラックス (下図)

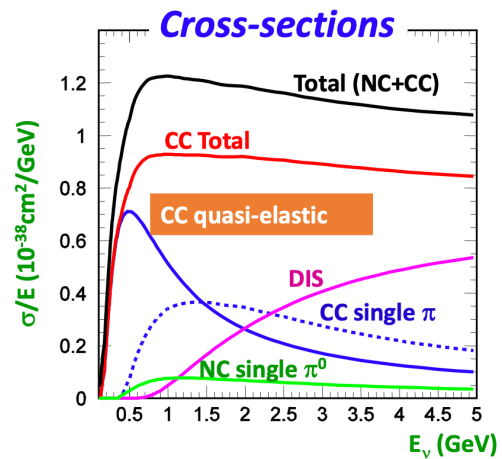


図 2.5 ニュートリノの反応断面積

2.4 前置検出器

ニュートリノ生成直後のニュートリノを測定する検出器は大きく分けて INGRID(Interactive Neutrino GRID)、ND280(Near Detector)、B2 フロア検出器群 (WAGASCI, NINJA) の3つがある。これらの検出器群はグラフィイト標的から 280m 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 2.6)

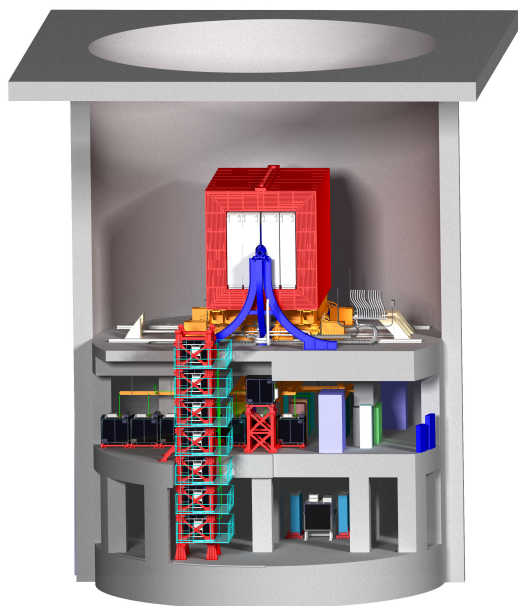


図 2.6 ニュートリノモニター棟の概観図

INGRID はニュートリノビーム軸上 (on-axis) に設置されており、ニュートリノビームの方向を高精度で監視するための検出器である。概観を図 5.3 に示す。INGRID は十字に配置された縦型モジュール 7 台、横型モジュール 7 台と非十字モジュール 2 台の計 16 台の同一モジュールからなり、ニュートリノビーム中心から垂直方向、鉛直方向に $\pm 5 \text{ m}$ の領域を覆う。各モジュールは鉄の層 9 層とシンチレータ層 11 層のサンドイッチ構造となっており、標的の大部分を担う鉄の質量は約 7.1t 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。

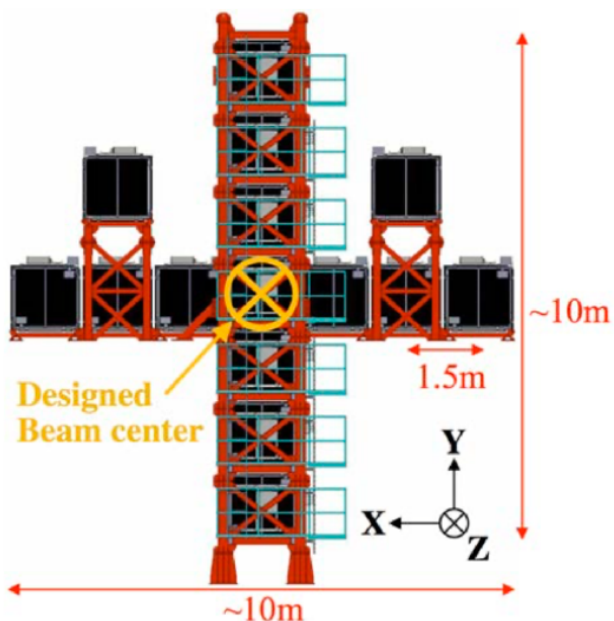


図 2.7 INGRID の概観図

ND280 は、オフ軸角 2.5° の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 2.8). 検出器の構成要素は, Pi Zero Detector (P0D)[7]、Time Projection Chamber (TPC) [8]、Fine Grained Detector (FGD) [9]、Electromagnetic Calorimeter (ECAL) [10]、Side Muon Range Detector (SMRD) [11] 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。

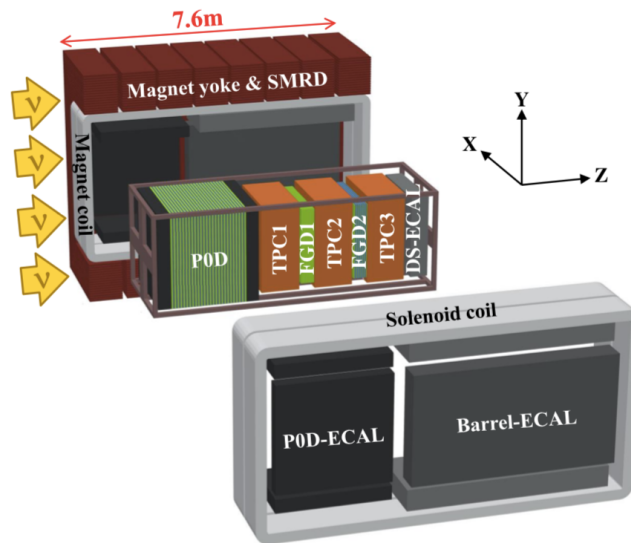


図 2.8 ND280 の概観図

2.5 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 [12] 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 2.9、図 2.10). 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_μ 事象と ν_e 事象を観測することで振動パラメータを決定する。

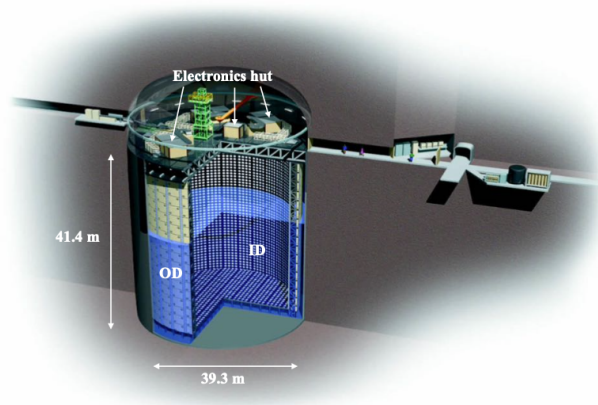


図 2.9 スーパーカミオカンデの概観

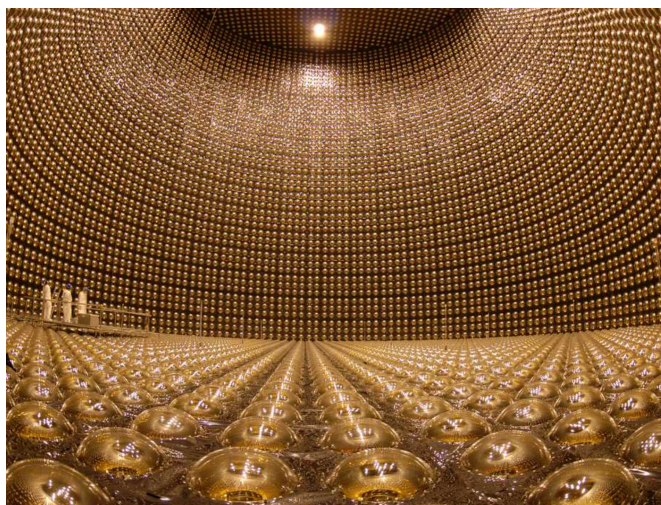


図 2.10 スーパーカミオカンデの内部構造

3 T2K-WAGASCI 実験

3.1 目的

T2K 実験において、高精度なニュートリノ振動測定のためには統計誤差に加えて系統誤差の主要な原因となっているニュートリノ-原子核反応モデルの不定性を低減することが不可欠である。現在測定対象となっているエネルギー付近のニュートリノのド・ブROI波長は約 1 fm であり、原子核中の核子や原子核自身がニュートリノ標的となる。そのため、フェルミ運動・パウリの排他律・原子核内のハドロン相互作用等の影響が無視できず、不定性が大きくなる。中でも謎の多い原子核内の複数の核子とのニュートリノ反応には特に大きな不定性が残る。これらの不定性を低減するには精密な実験データに基づいてニュートリノ-原子核反応モデルを構築・精緻化する必要がある。そこで、大角度に放出される粒子や低エネルギー陽子のような短い飛程の粒子を観測し、より精密なニュートリノ反応を測定することを目的として発足したのが T2K-WAGASCI 実験である。本稿では、ニュートリノ反応解析の際に用いる飛跡再構成アルゴリズムのチューニングおよび性能評価、また 2021 年 3 月に測定された実データを用いた検出器の性能評価を行う。

3.2 検出器の構成

図 3.1 に、T2K-WAGASCI 実験のセットアップを示す。前置検出器ホールの地下 2 階, off-axis 角が 1.6° の位置に検出器群が設置されている。Proton Module、WAGASCI、Wall MRD、BabyMIND の 4 種類、計 6 つが T2K-WAGASCI 実験で用いている検出器である。中央に設置された水標的検出器 WAGASCI とプラスチック標的検出器 Proton Module により、水標的と炭素標的のニュートリノ反応による反応点付近の荷電粒子の飛跡をとらえる。左右に設置された大角度ミューオン検出器 WallMRD(Wall MuonRange Detector)、ビーム下流側に設置された Baby-MIND (prototype Magnetized Iron Neutrino Detector) では、 μ 粒子の電荷、運動量、方向などを特に精密に測定している。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。

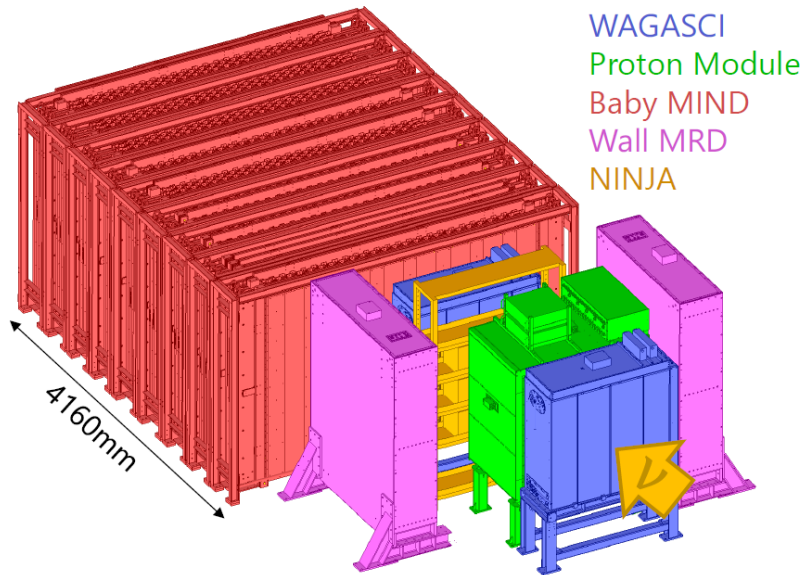


図 3.1 WAGASCI 実験のセットアップ

3.2.1 Proton Module

Proton Module は、プラスチックシンチレータのみで構成され、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。Proton Module は、棒状のシンチレータを鉛直方向に並べた層と水平方向に並べた層を交互に配置したトラッキングプレーンとよばれるシンチレータ層と、トラッキングプレーン全体を覆う veto プレーンと呼ばれる層で構成されている。トラッキングプレーンは、上と横から見た 2 次元飛跡を再構成しそれらの飛跡を合致させることにより 3 次元飛跡を再構成する役割、veto プレーンは、壁でのニュートリノ反応により生成された粒子や宇宙線など外から入射する荷電粒子をニュートリノ反応により検出器内部で生成された荷電粒子と区別する役割がある。

Proton Module の概観を図 3.2、トラッキングプレーンの構造を図 3.3、最上流のプレーンを除いたトラッキングプレーンを図 3.4 に示す。トラッキングプレーンは、二種類のプラスチックシンチレーターで構成されており、それぞれ INGRID 型と SciBar 型と呼ばれている。INGRID 型は INGRID で使用されたシンチレータのスペアで、大きさ $1230 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ 、SciBar 型は K2K 実験、SciBooNE 実験の SciBar 検出器で使用されたシンチレータで、大きさ $1203 \times 25 \times 13 \text{ mm}^3$ である。INGRID 型シンチレータには直径 2、3mm 程度、SciBar 型シンチレータには直径 1.8mm の穴がシンチレータの中央にあいており、この穴に波長変換ファイバーを通してシンチレーション光を集光する。SciBar 型シンチレータは INGRID 型シンチレータに比べて幅が狭いため位置分解能が高く、また厚いため幅当たりのニュートリノ反応数も多くなる。この理由から、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。

最小電離損失粒子 (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。[13]

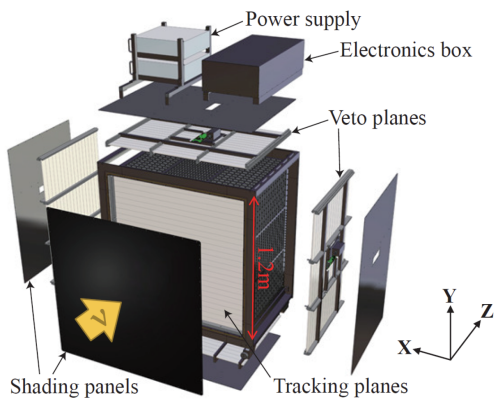


図 3.2 ProtonModule の概観

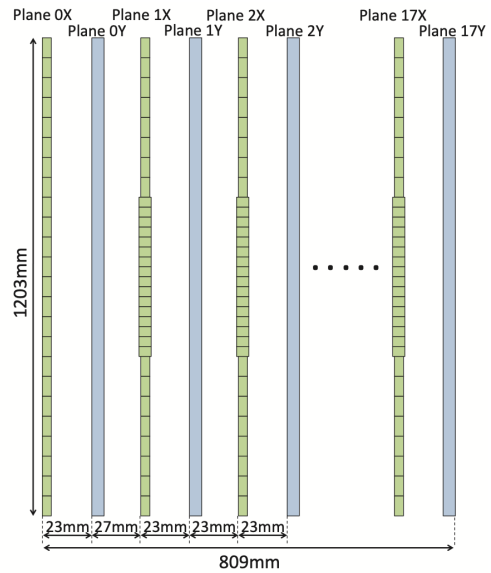


図 3.3 トラッキングプレーンの構造

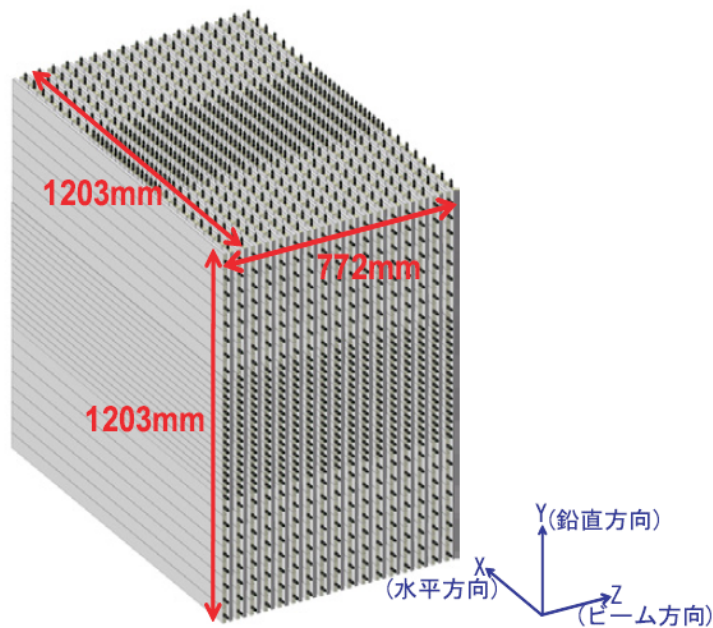


図 3.4 最上流のプレーンを除いたトラッキングプレーンの構造

3.2.2 WAGASCI(WATER Grid And SCIntillator)

WAGASCI 検出器は、Proton Module の上流側、下流側に配置されている、水標的検出器である。上流側の検出器は WAGASCI Upstream, 下流側は WAGASCI Downstream と呼ばれている。WAGASCI 検出器の概観を図 3.5、内部構造を図 3.6 に示す。WAGASCI 検出器は、図 3.6 のように、大きさが $5.0 \times 5.0 \times 2.5\text{cm}^3$ 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 種類が交互に配置されている。3次元格子状構造を持つため、 4π のアクセプタンスを実現している。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 チャンネルがある。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. である。[14] また、シンチレータ間には水を 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およそ 4 : 1 である。

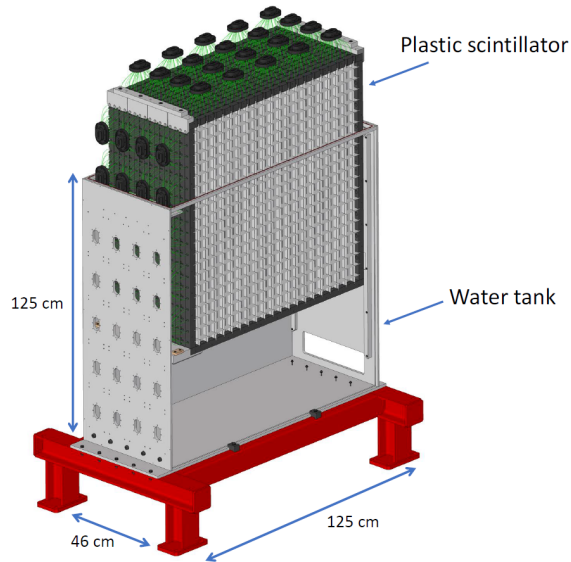


図 3.5 WAGASCI の概観

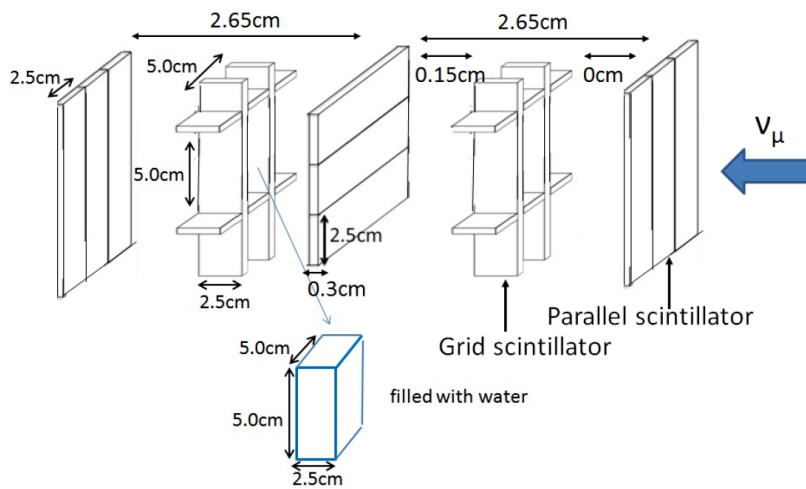


図 3.6 WAGASCI の構造

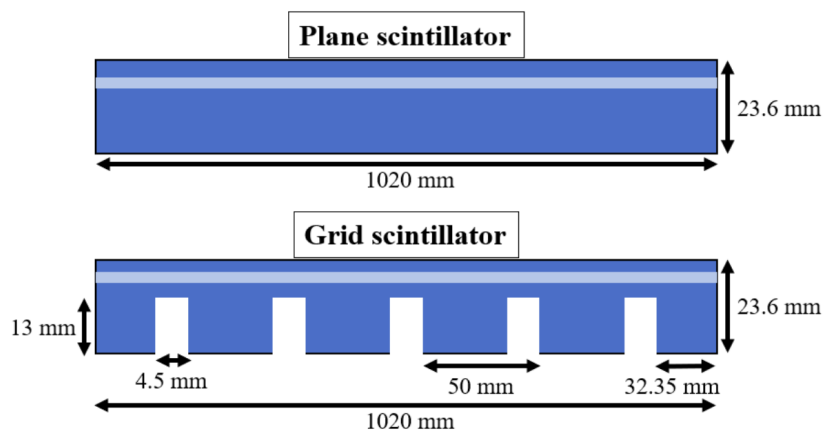


図 3.7 グリッドシンチレータと平行シンチレータ

3.2.3 Wall MRD

Wall MRD (Wall Muon Range Detector) は、中心検出器群 (WAGASCI 検出器、Proton Module) 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検出器である。ビーム上流部から見て左に位置する Wall MRD は「南 Wall MRD」、右に位置するものは「北 Wall MRD」と呼ばれている。

Wall MRD の概観を図 3.8、構造を 3.9 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。1 層のシンチレータモジュールには、図のような S 字型の波長変換ファイバーが埋め込まれたプラスチックシンチレータが 8 枚使用されている。シンチレータは、上側と下側両方に MPPC が取り付けられた両側読み出しの構造になっており、X 方向だけでなく Y 方向の位置分解能も持つ。

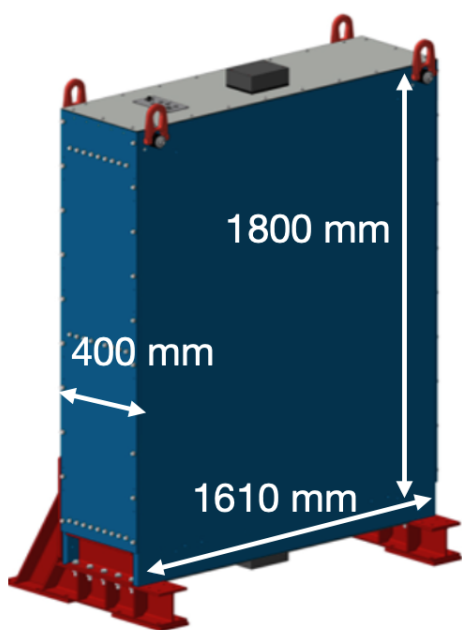


図 3.8 Wall MRD の概観

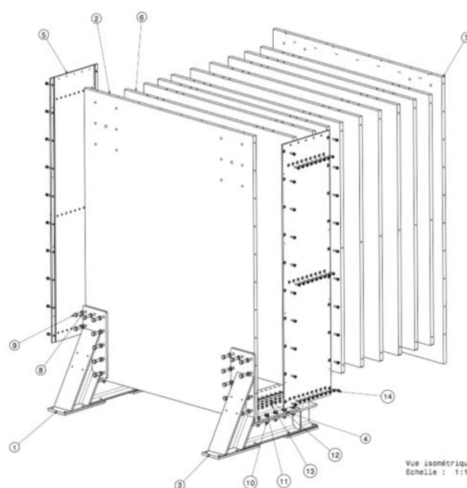


図 3.9 Wall MRD の構造

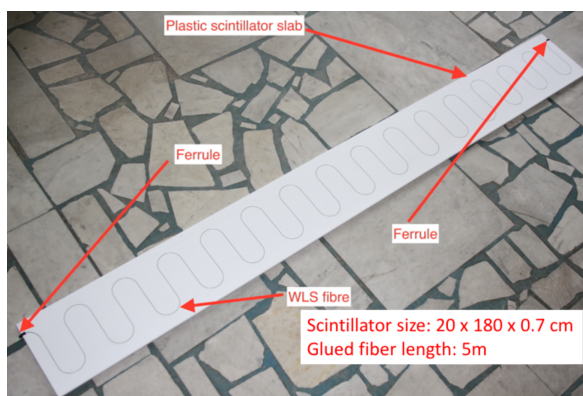


図 3.10 Wall MRD に使用されているシンチレータ

3.2.4 BabyMIND

Baby MIND(Magnetized Iron Neutrino Detector) は、WAGASCI 検出器群の最も下流側に配置された μ 粒子検出器である。Baby MIND は、欧州のニュートリノファクトリー計画におけるプロトタイプ検出器として CERN で開発されていた検出器である。コイルの巻かれた鉄層とシンチレータ層のサンドイッチ構造になっており、鉄層に印加された 1.5T の磁場により曲がった荷電粒子の飛跡をシンチレータで検出し、電荷の識別と運動量の測定をする役割を持つ。Baby MIND の概観を図 3.11、構造を図 3.12 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 $210 \times 1950 \times 7.5\text{mm}^3 \times 16$ 枚であり、Y 層のシンチレータは $3000 \times 31 \times 7.5\text{mm}^3 \times 95$ 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。

最小電離損失粒子 (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。[15]



図 3.11 Baby MIND の概観

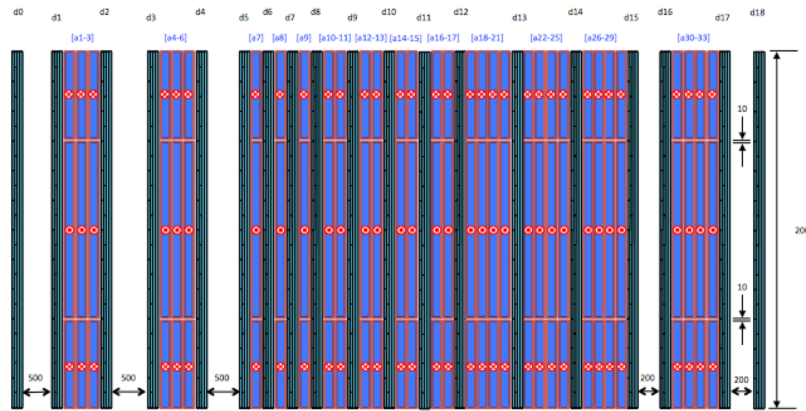


図 3.12 Baby MIND の構造

3.2.5 NINJA 実験

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。[16] 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。

3.2.6 波長変換ファイバーと MPPC

上で述べたとおり、WAGASCI 検出器群では、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。使用されている波長変換ファイバーおよび MPPC について説明する。

- 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーはシンチレータのシンチレーション光を吸収し、より長波長の光を再発光し、その光を全反射により光検出器まで伝搬する。使用している波長変換ファイバーは、クラレ社の Y-11(200)MS (図 3.13) である。また、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に示す。このファイバーの吸収波長のピークは 430nm であり、これはシンチレータのシンチレーション光の集光波長のピーク 420nm とほぼ一致する。また、発光波長のピークは 460nm であり、これは MPPC の最大感度波長 440nm とほぼ一致する。

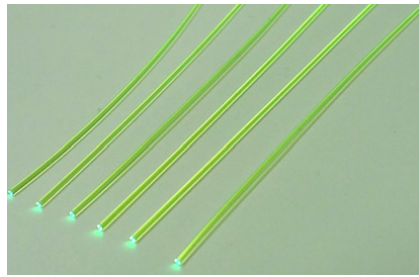


図 3.13 波長変換ファイバー

表 3.1 Y-11(200)MS の特性

直径	1.0mm
コアの直径率	1.59
内側クラッドの屈折率	1.49
外側クラッドの屈折率	1.42
最大吸収波長	430nm
最大発光波長	460nm
減衰長	~3m

• MPPC

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) とは、浜松ホトニクスが開発した、2次元に並列接続された多数の APD(Avalanche PhotoDiode) のピクセルからなる光子検出器である。図 3.14 に MPPC の概観、図 3.15 にピクセルの構造を示す。MPPC の APD ピクセルに光子が入射すると、それぞれの APD ピクセルは同じパルスを出力し、複数の APD ピクセルからの出力の総和が MPPC の出力信号になる。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。



図 3.14 MPPC の概観

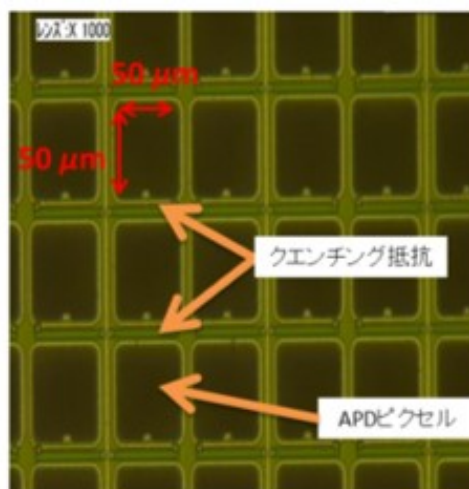


図 3.15 ピクセルの構造

4 飛跡再構成アルゴリズム

4.1 セルオートマトンを用いた飛跡再構成アルゴリズム

T2K-WAGASCI 実験では、現在検出器内での二次元飛跡を再構成するために MST(プリム法と呼ばれる方法を応用してヒットを結び飛跡を再構成するアルゴリズム) を用いた方法と、セルオートマトンと呼ばれる離散的計算モデルを用いた方法の二種類の方法が提案されている。本稿では、この二種の再構成方法のうちの一つであるセルオートマトンを用いた方法について、再構成アルゴリズム最適化のためのパラメータチューニングおよび性能評価を行った。

4.2 セルオートマトン

セル・オートマトンは多数のセルから構成されるモデルである。各セルは特定の状態を持ち、その状態は時間の経過と共に変化する。ここでの時間とは離散的な時間であり、以後、ステップと呼ぶ。ステップ $t+1$ における、あるセルの状態はステップ t におけるそのセル自身と隣接するセルの状態から、定められたルールに基づき決定される。各セルの初期状態を決定すれば、ステップが進むとともに各セルの状態もこのルールの下で変化していく。以下、セルオートマトン用いて二次元ヒット情報から飛跡を再構成する際のルールについて説明する。

1. アルゴリズムを適用する前に、図 4.1 (a) に示すように、斜めのトラックが 1 つのレイヤで複数のチャンネルにヒットすることがあるので、同一 plane 上にありチャンネル差が 1 のヒットを一つのクラスターとしてまとめる
2. plane 差が 2 以下の隣接する 2 つのクラスターを、図 4.1(b) に示すように線分で結ぶ。この線分はセルオートマトンでのセルと定義される。各セルにはそれぞれ状態値が定義されており、初期段階ではすべてのセルの状態値は 0 で初期化されている。
3. ある χ^2 値の条件を満たす隣接する二つのセルを、セルオートマトンの近傍領域として定義する。 χ^2 値とは、そのセルのペアに属する 3 つのクラスターの中心位置に対して、シンチレータの大きさを位置の誤差とみなして線形最小二乗フィットを行い計算した値である。この χ^2 値の条件となるしきい値については、後の節で説明する。
4. それぞれのステップにおいて、セルの上流側の近傍がそのセルと同じ状態値を持つ場合、そのセルの状態値を 1 増やす。4.1(c) は、最初の進化後の状態値を示している。4.1(d) に示すように、同じ状態値を持つ近傍領域がなくなるとステップは停止する。
5. ステップが停止した後、状態値が 0 より大きくかつ隣接する状態値がないセルを、トラックの下流端と定義する (4.1(e))。これらのセルから、上流側の近傍セルを 1plane ずつ追跡し、状態値が 0 のセルに戻る。最後に、追跡されたセルに含まれるクラスターに対して線形最小二乗フィットを行い、2次元トラックを再構成する (4.1(f))。

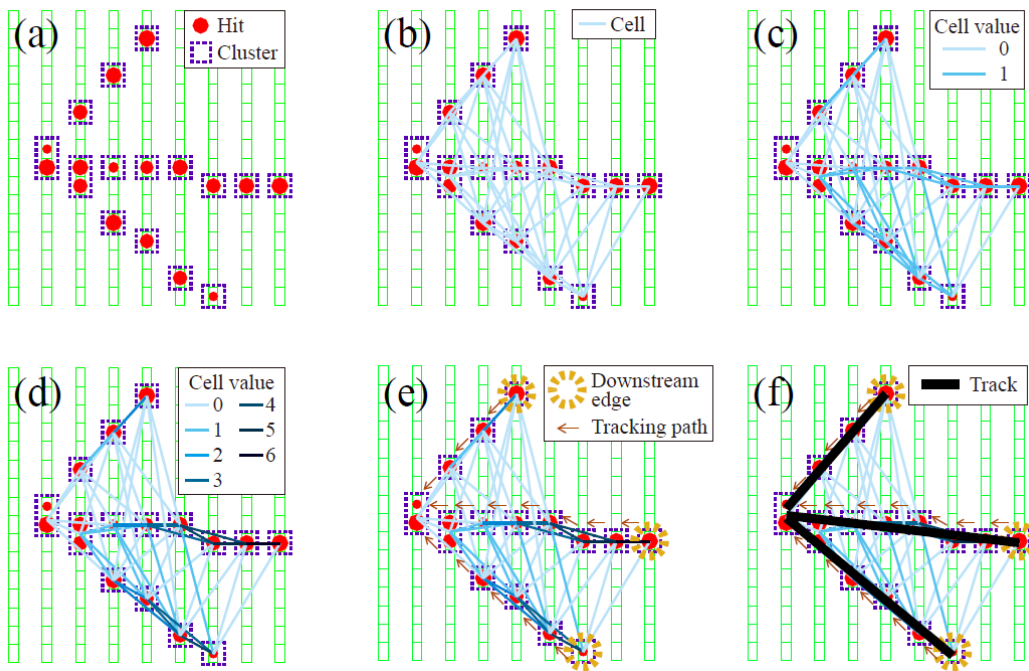


図 4.1 飛跡再構成の手順

4.3 チューニングを行ったパラメータ

今回、再構成アルゴリズムの最適化のためにチューニングしたパラメータはセルオートマトンにおいて近傍と定義されるしきい値となる χ^2 値である。 χ^2 値のしきい値の決め方には次の二通りの方法がある。

1. 固定値

しきい値を検出器や場所によらず一定の数値にする。数値は 400, 500, 600, 700, 800, 900 で比較した。

2. シンチレータの組み合わせごとに χ^2 値のしきい値を決める

この方法は、ヒットを結びフィットした際の χ^2 値を集計し、場所毎に数値のヒストグラムを作り、ヒストグラムの MEAN および RMS からしきい値を決める。この方法が提案された理由としては、Proton Module のように厚さの異なる二種類のシンチレータを使用している場合、図 4.2 のように、同じ種類のシンチレータでのヒットを結んだ時と違う種類のシンチレータのヒットを結んだ時で、隣接するセルを線形フィットした際の χ^2 値が異なるためである。

しきい値は、モンテカルロシミュレーションで生成したファイル 50 ファイルを用いてヒストグラム (例: 図 4.3) の mean, RMS を計算し、 $\text{MEAN} + \text{RMS} \times \text{constant value}$ として決めた。この constant value を変化させ、アルゴリズムのパフォーマンスを評価しチューニングを行った。以後、この constant value を sigmafactor というパラメータ名で呼ぶこととする。

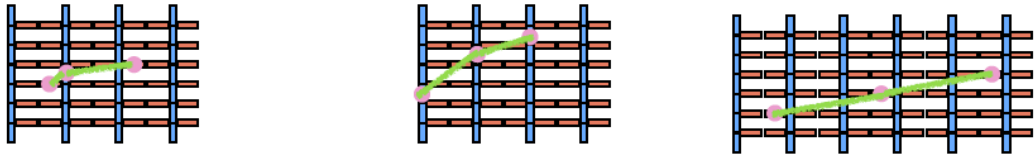


図 4.2 違う種類のシンチレータのヒットを結んだ時と同じ種類のシンチレータのヒットを結んだときの比較

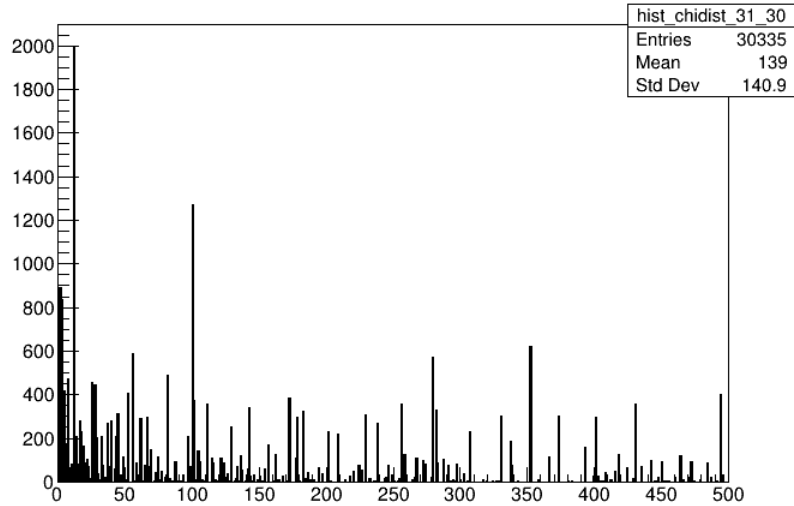


図 4.3 χ^2 のヒストグラムの例

4.4 チューニングに使用しなかったパラメータ

今回チューニングを行ったパラメータ以外に、使用を検討したが評価には使用しなかった5つのパラメータについて述べる。これらのパラメータは、上で述べたセルオートマトンのステップにさらに基準を追加し、トラックを選別するためのパラメータである。

1. 2つのセルの角度を確認するパラメータ
3つのクラスターからなる2つのセルにおいて、2つのセルがなす角がこのパラメータよりも大きかった際、それらのセルを近傍としないことにする。(図 4.4、1)
2. 枝分かれしたセルを選択するパラメータ
1つのセルに対して、近傍だと判断されたセルが二種類あった場合、このパラメータよりも低い χ^2 値を有するセルのみを近傍とする。(図 4.4、2)
3. トラック内の角度を確認するパラメータ
セルオートマトンのステップが終了した後トラックを結ぶ際、そのトラックに含まれる隣接したセルのペアのなす角を確認する。その中にこのパラメータよりも大きい角のセルのペアが含まれていた場合、そのトラックを除く。(図 4.5、3)
4. χ^2 値の変化を確認するパラメータ (後方に散乱したトラックを確認するパラメータ)

セルオートマトンのステップ終了後にトラックを結ぶ際、そのトラックに含まれる隣接したセルのペアの χ^2 値を順に確認する。 χ^2 値の変化量がこのパラメータより大きいセルの組の中心クラスターでトラックを分ける。(図 4.5、4)

5. トラック内の χ^2 値を確認するパラメータ (後方に散乱したトラックを確認するパラメータ)
セルオートマトンのステップ終了後に、クラスターに線形フィットを行う際の χ^2 値を確認する。このパラメータよりも大きい χ^2 値をもつクラスターが含まれていた場合、そのクラスターでトラックを分ける。(図 4.5、4)

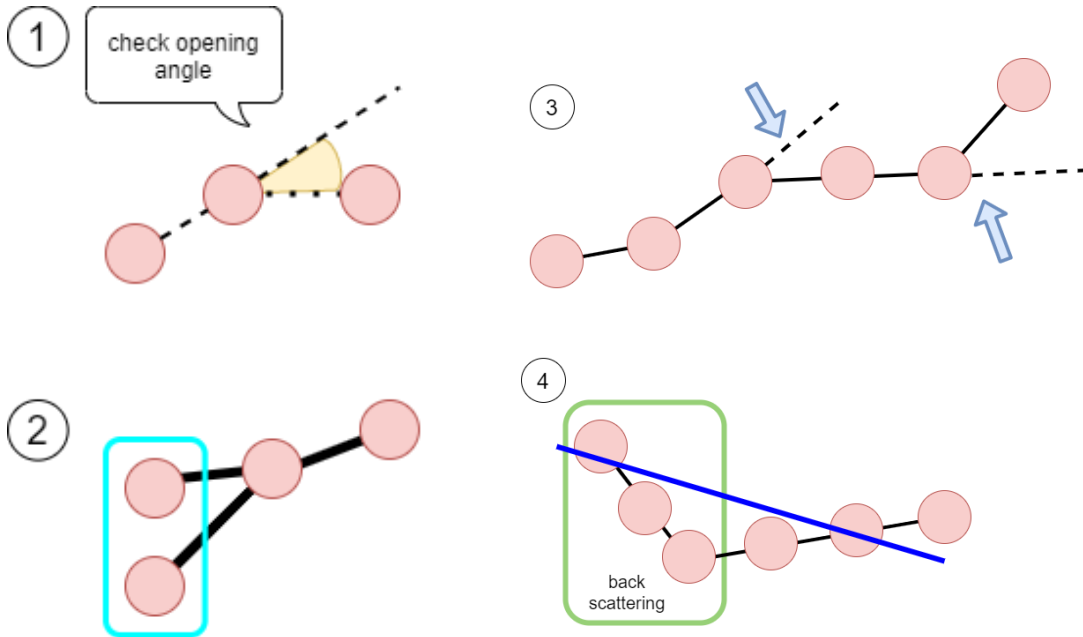


図 4.4 パラメータの説明 1(2つのセルの角度を確認するパラメータ)、2(枝分かれしたセルを選択するパラメータ)

図 4.5 パラメータの説明 3(トラック内の角度を確認するパラメータ)、4(χ^2 値の変化を確認するパラメータ)、5(トラック内の χ^2 値を確認するパラメータ)

これらのパラメータのチューニングの検討に際して、上で述べた 5 パラメータを用いたトラックの選別を行った場合、行わなかった場合で再構成効率の比較を行った。図 4.6、4.7 は、横軸をモンテカルロシミュレーションにおける true track の数、縦軸は true track と再構成されたトラックを比較し正確に再構成出来たイベントの割合である。このプロットでは青い点が再構成効率となっている。なお、true track が 0 の点は true track の本数ごとでないすべてのイベントにおける再構成効率となっている。このプロットでは true track が二本のイベントのみのファイルを使用しているため、横軸 0 と 2 の点は同じになっている。

図 4.6 が 5 パラメータを用いたトラックの選別を行った場合、図 4.7 が行わなかった場合であるが、行わなかった場合のほうが再構成効率は高くなっていたため、このパラメータを使用したトラックの選別は今回は行わないこととした。

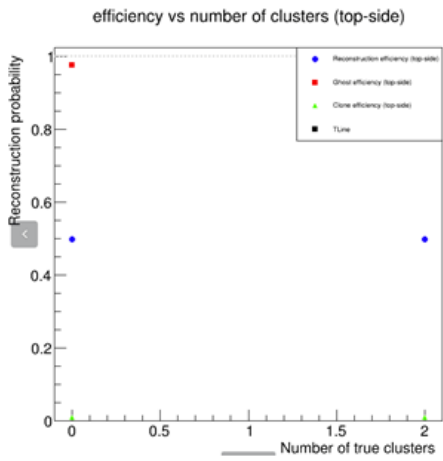


図 4.6 5 パラメータを用いたトラックの選別を行った場合の再構成効率

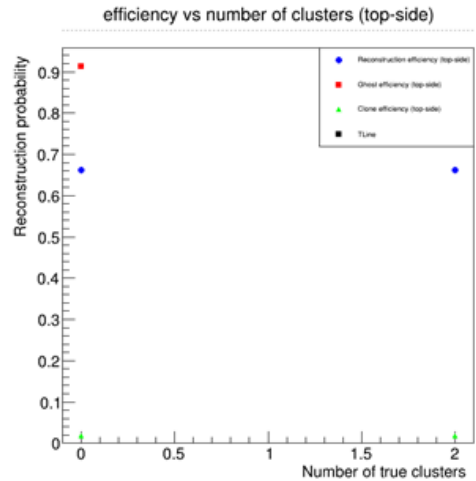


図 4.7 5 パラメータを用いたトラックの選別を行わなかった場合の再構成効率

4.5 評価用サンプル

今回のパラメータチューニングの目的は、アルゴリズムを用いてヒット情報から正確に飛跡を再構成する過程の最適化である。このため、アルゴリズムが適用出来ないほどヒットが少ないために再構成が不可能なイベントや、図 4.8 のような目視でも飛跡が予測困難なイベントは可能な限り除去し、再構成が可能だと考えられるイベントのみを準備し、その飛跡再構成精度からアルゴリズムの評価を行う。

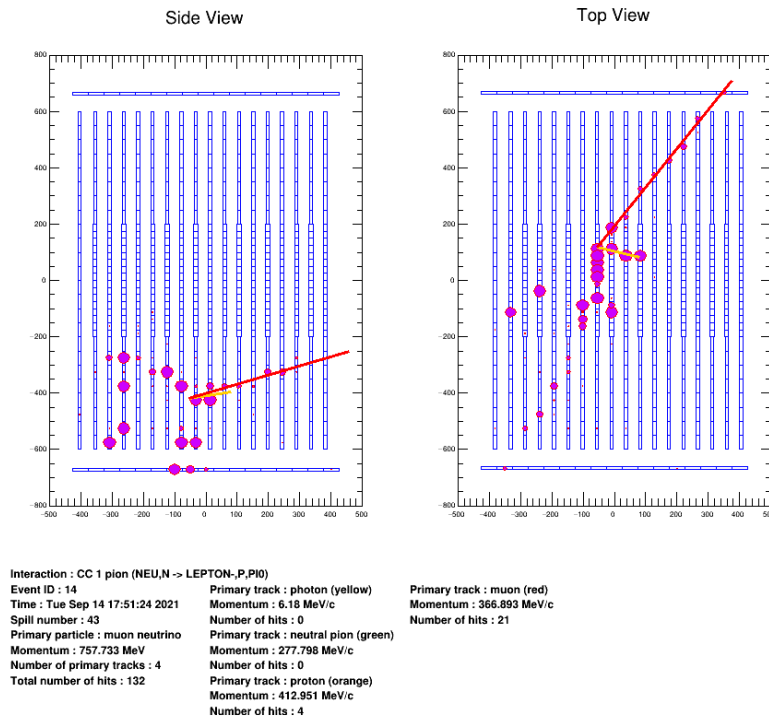


図 4.8 飛跡予測が困難だと考えられる例

再構成が可能であると考えられるイベントのみ収集するために、以下の条件を満たすイベントのみをサンプルとした。また、サンプルに使用したイベントのイベントディスプレイの例を図 4.9 に示す。

1. top view, side view 両方に 3hit 以上ある
2. secondary track (π 中間子の崩壊粒子などの二次粒子) の hit 数が primary track の 70% 以下
3. 反応の種類 (CCQE, MEC, CC1pi, delta resonance)
4. ヒット数が top side それぞれ 50 以下

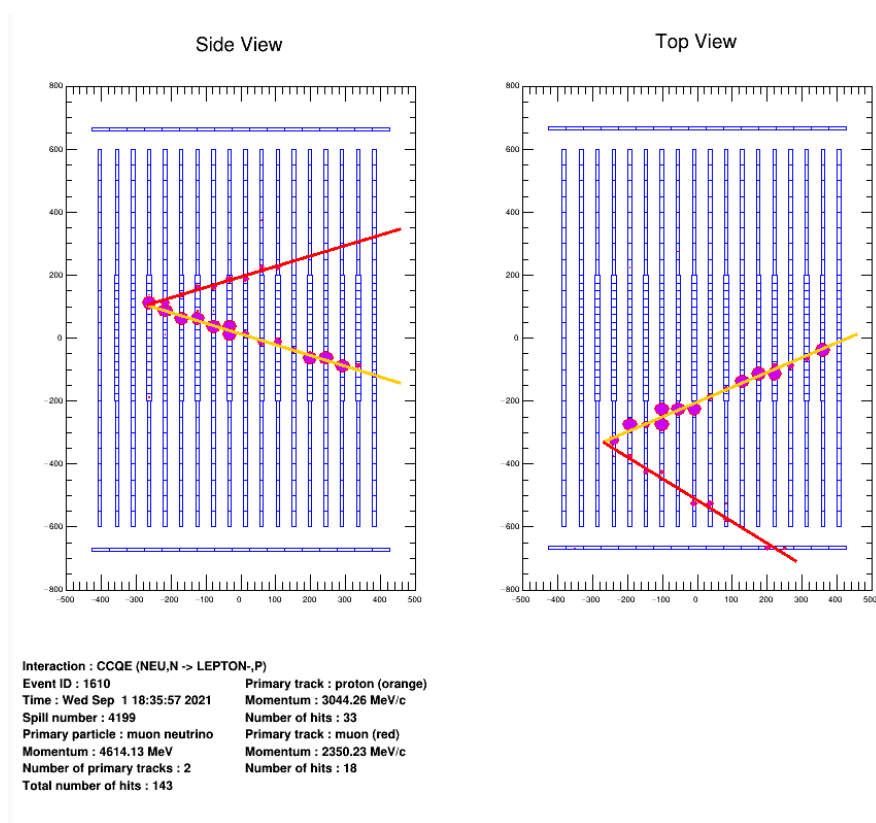


図 4.9 サンプルに使用した、再構成出来ることが望ましいイベントの例

条件 1 は、最低限 3 つのクラスターを含む 2 つのセルの組がなければアルゴリズムを適用出来ないため、条件として課した。条件 2 は、再構成したいトラック (primary track) 以外のヒットが極端に多すぎる際、primary track とそれ以外を目視でも区別することが不可能なことが多いため、そのようなイベントを除外するために課した。条件 3 は、物理データ解析の際に特に判別が重要となる CCQE, CC1 π を再構成出来やすいように最適化するために課した。条件 4 は、view ごとのヒット数が極端に多すぎる際に目視でもトラックを識別不可能な可能性が高いため、そのようなイベントを除外するために課した。なお、50 というしきい値は以下の結果から判断した。

図 4.10, 4.11 は、モンテカルロシミュレーションにおいて true track が 1 本のみイベントを飛跡再構成アルゴリズムを用いて再構成した際の、それぞれの view におけるヒット数を横軸とし、再構成ができたイベントの割合を縦軸としてプロットしたものである。図 4.12, 4.13 は同様の調査を、true track が 2 本のイベントを用いて行ったものである。これらの結果から、1track イベントではヒット数がおおよそ 30 を超えるイベント、2track イベントではヒット数がおおよそ 40 以上のイベ

ントではヒット数が増えると効率が下がる傾向にあり、目視でも識別が不可能なイベントが混ざると推測した。今回のチューニングでは 2track のイベントをサンプルとし、選別するヒット数のしきい値は 50 とした。

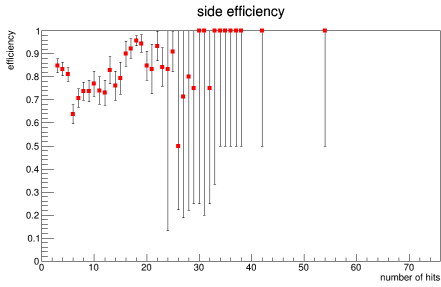


図 4.10 1track イベントにおける side view のヒット数ごとの再構成効率

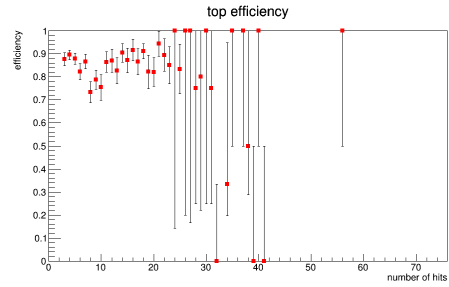


図 4.11 1track イベントにおける top view のヒット数ごとの再構成効率

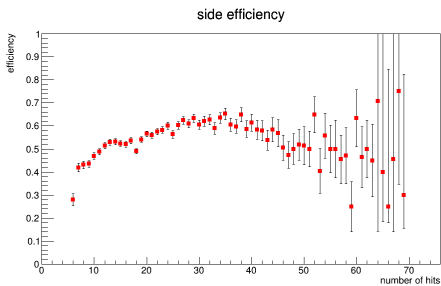


図 4.12 2track イベントにおける side view のヒット数ごとの再構成効率

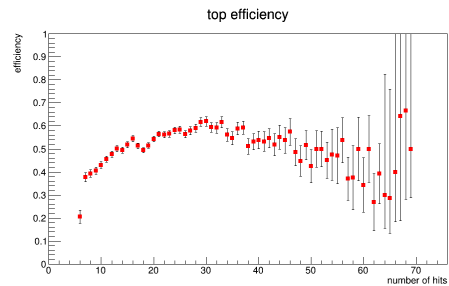


図 4.13 2track イベントにおける top view のヒット数ごとの再構成効率

上で述べた 4 つの条件を満たし、モンテカルロシミュレーションでの true track が 2 本のみ、3 本のみあるイベントを集めたサンプルファイルをそれぞれ準備し、チューニングに使用した。

4.6 評価方法および結果

今回のチューニングの評価基準は、次の三点とした。

1. 再構成できたトラック数の正確さ
2. 角度の再構成精度
3. true track に含まれるヒットと再構成トラックに含まれるヒットを比較した際の正確さ（再構成効率）

基準 1 は、物理ランの結果を解析する際、CCQE、 $CC1\pi$ のような反応の種類を区別するためには正確にトラック数を測定することが必要なことから基準として選んだ。基準 2 は、角度の分解能は再構成アルゴリズムの影響を受けやすいことから、正確さを重視するチューニングのために基準とした。基準 3 は、より具体的にヒットそれぞれを比較する再構成の精度の確認のために行った。

以下、それぞれの基準における具体的な評価方法と結果を説明する。

4.6.1 再構成トラック数

チューニングおよび評価は、検出器ごとに行った。まず、モンテカルロシミュレーションで目的検出器内の true track が 2track、3track のイベントのみを集めたサンプルをそれぞれ 100 ファイル用意する。このファイルをアルゴリズムを用いて二次元の飛跡再構成、三次元再構成および他検出器とのマッチングを行い、マッチングに成功したイベントのみを集計の対象とする。(対象となるイベントは、100 ファイルで 30000 イベント程度) 今回は Proton Module, WAGASCI Upstream, WAGASCI Downstream での評価を行ったため、Wall MRD, BabyMIND とのマッチングに成功したイベントを収集対象とした。収集したイベントのうち、再構成トラック数が正しいイベントの割合を評価する。

以下より、結果のプロットを示す。

- Proton Module

図 4.14~4.17 は、横軸をパラメータの数値、縦軸を再構成出来たトラックの数とした二次元ヒストグラムである。それぞれの bin の数値は、パラメータの数値ごとに再構成出来たイベント数をサンプルの全イベント数で割ったものである。横軸をパラメータ、縦軸をこれらの bin の数値としたグラフが図 4.18~4.21 である。それぞれの点は、緑が 0track、青が 1track、赤が 2track、ピンクが 3track に再構成されたイベントの割合となっている。ここでは、true track が 2track のサンプルを用いているため、2track に再構成された割合が高いほど評価が高くなる。固定しきい値 500~900 の場合と、sigamafactor2~5 の場合で、2track に再構成された割合はおおよそ似通っており、70% 程度となっている。2track に再構成された割合が最も高くなっているのは、固定値で 500 の時、sigamafactor で 2 の時となっている。

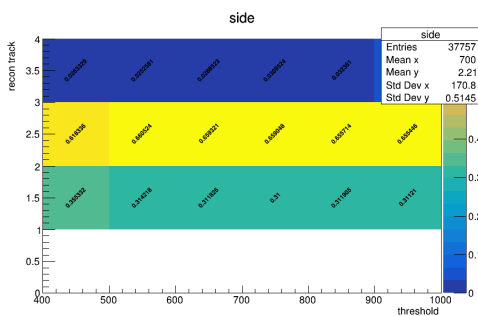


図 4.14 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

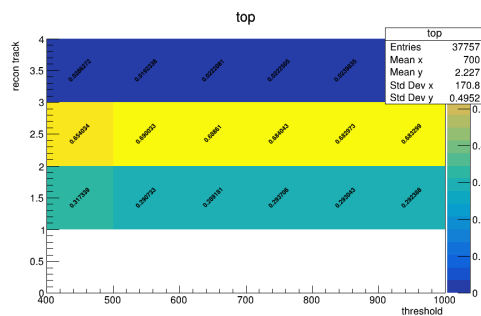


図 4.15 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

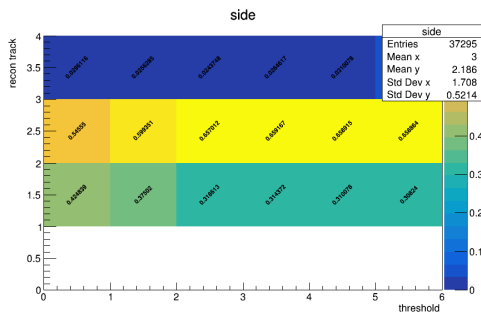


図 4.16 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

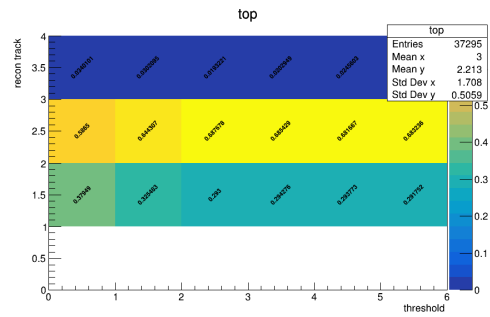


図 4.17 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

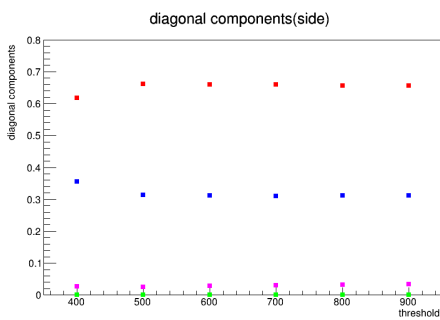


図 4.18 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

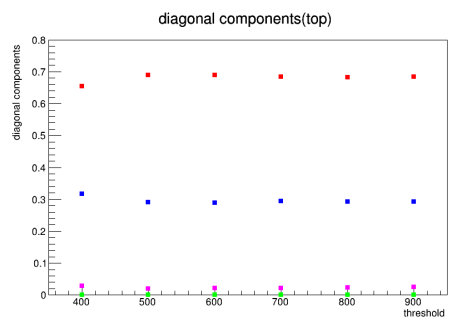


図 4.19 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

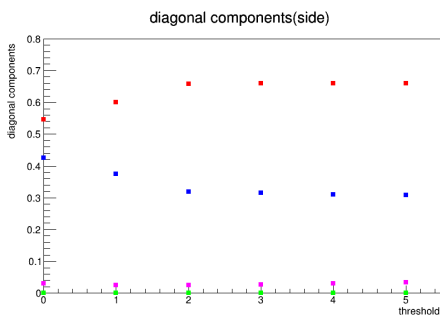


図 4.20 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

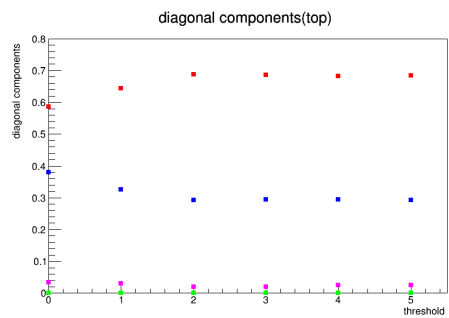


図 4.21 Proton Module の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

- WAGASCI Upstream

Proton Module と同様の方法で、WAGASCI Upstream 内の true track が 2track のサンプルファイルを用いた際の結果を図 4.22~4.25 に示す。横軸をパラメータ、縦軸をこれらの bin の数値としたグラフである。

WAGASCI Upstream で 2track に再構成された割合はどのパラメータでもほぼ同じ数値とい

う結果になった。割合としては、Proton Module と同じく 70% 程度となった。最も 2track に再構成された割合が高いのは固定値だと 400、sigmafactor だと 1 の時だが、どれも大きな差は無いためこの基準のみでは判断は難しいと考えられる。

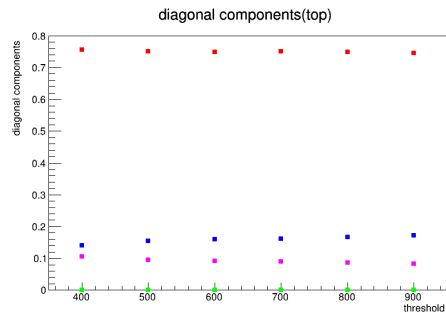
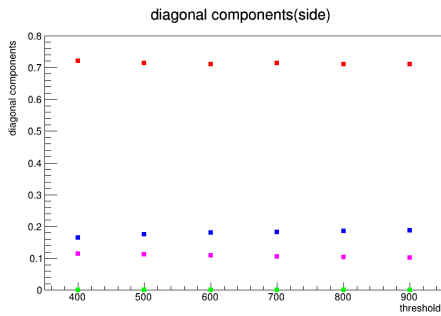


図 4.22 WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

図 4.23 WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (固定値) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

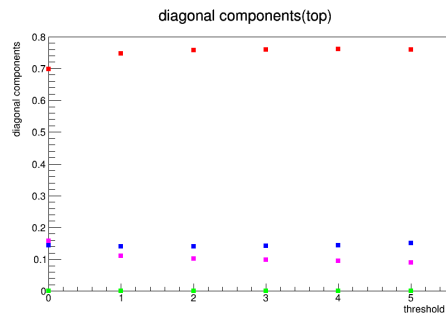
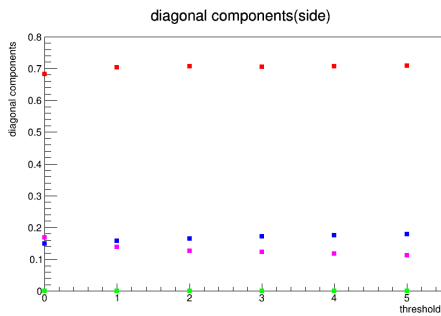


図 4.24 WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

図 4.25 WAGASCI Upstream の 2track イベントにおけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成トラックの本数 (side view)

4.6.2 角度の再構成精度

角度の再構成精度は、true track の角度と recon track の角度の差をヒストグラムにし、ガウス関数でフィットした際の RMS および MEAN で比較する。角度は、三次元の飛跡が z 軸（ビーム方向）となす角 (degree) を用いる。トラック数の評価時同様、評価は検出器ごとに行い、二次元の飛跡再構成、三次元再構成および他検出器とのマッチングを行い、マッチングに成功したイベントを集計の対象とした。

- Proton Module

図 4.26 に、Proton Module において recon track の角度-true track の角度を横軸とし、ヒストグラムにした後ガウス関数でフィットした例を示す。ここで、このヒストグラムはパラメータ sigmafactor が 2 に設定されている場合の例である。また、横軸の単位は度で bin は 0.5 度で、ガウス関数によるフィットは ± 3 度で行った。

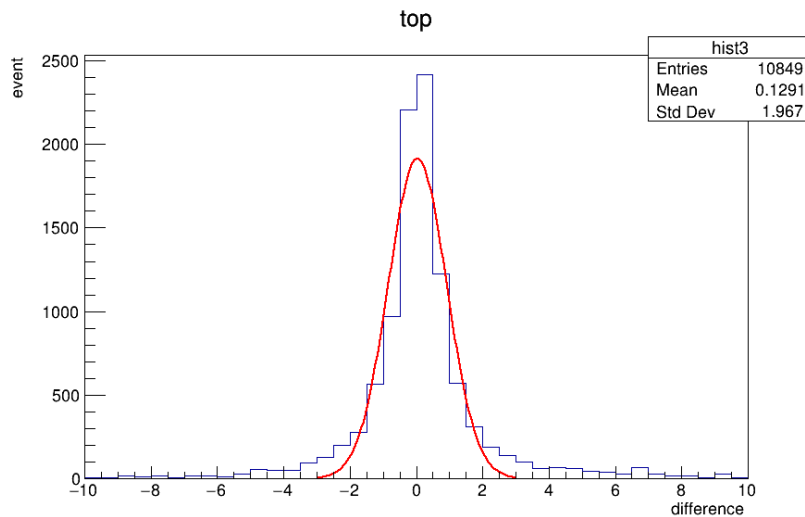


図 4.26 角度のヒストグラムの例

このヒストグラムをパラメータごとに生成し、RMS を比較したのが図 4.27、4.28、MEAN を比較したのが図 4.29、4.30 である。

RMS は固定しきい値 500~900、sigmfactor2~5 で同程度の評価となっており、0.88 度程度である。どちらの場合でも χ^2 値が高いほうが RMS の評価が高い傾向にある。また、MEAN のズレは固定のしきい値 400 の場合、sigmfactor が 1 の場合が突出して高く 0.01 度程度、それ以外の場合は評価が同等で 0.04 度程度となっている。MEAN のズレの傾向に関しては、イベントを選別する条件として BabyMIND, Wall MRD とマッチングしているトラックであること、を条件としていることが影響していることが考えられる。Baby MIND の配置がビーム軸方向から見て Proton Module よりも左側にずれているため、マッチング条件を課すことで左にずれたイベントが多く選別されている可能性、また、Baby MIND や Wall MRD 内のトラックの角度のずれが影響している可能性がある。

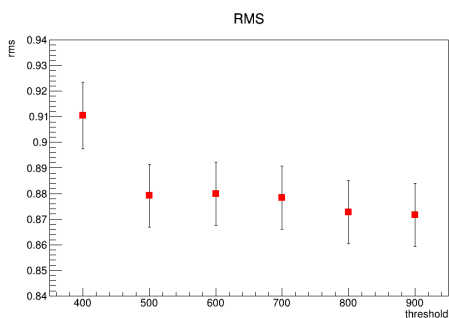


図 4.27 Proton Module におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの RMS

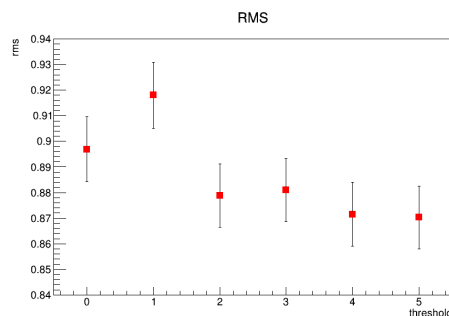


図 4.28 Proton Module におけるパラメータ (sigmfactor) ごとの角度差のヒストグラムの RMS

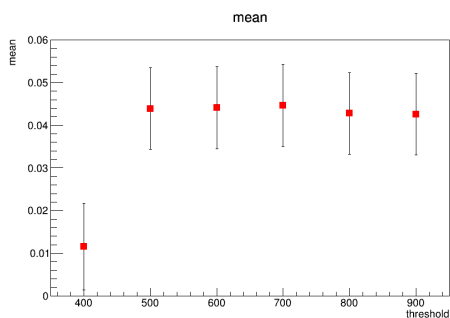


図 4.29 Proton Module におけるパラメータ (固定値) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN

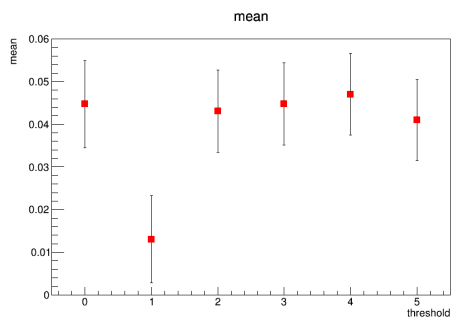


図 4.30 Proton Module におけるパラメータ (sigmafactor) ごとの角度差のヒストグラムの MEAN

- WAGASCI Upstream

Proton Module と同様の方法で角度の評価を行った。図 4.31 は recon track の角度-true track の角度を横軸とし、ヒストグラムにした後ガウス関数でフィットした例である。ここで、このヒストグラムはパラメータ **sigmafactor** が 2 に設定されている場合の例である。また、横軸の単位は度で bin は 0.5 度である。フィットは ±10 度の範囲としている。

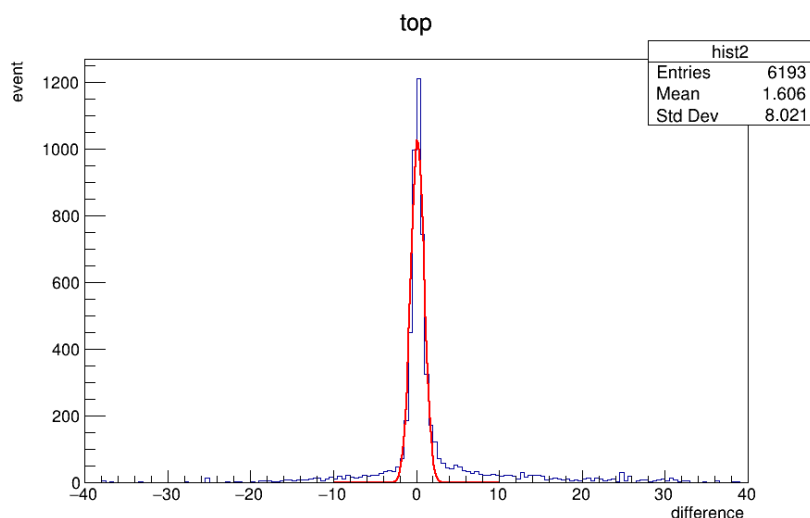


図 4.31 角度のヒストグラムの例

このヒストグラムをパラメータごとに生成し、RMS を比較したのが図 4.32, 4.33、MEAN を比較したのが図 4.34, 4.35 である。

全体的な RMS は 0.83 度以下となった。また、MEAN のずれは 0.18 度以下となっている。固定のしきい値の場合は RMS、MEAN とともに誤差棒の範囲内で、あまり差はなかった。RMS が最も小さいのは sigmafactor が 0 の時、MEAN が最も小さいのは sigmafactor が 1 の時だった。

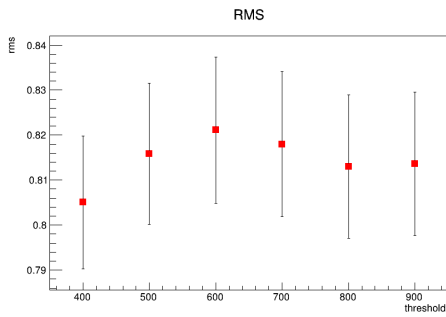


図 4.32 WAGASCI Upstream におけるパラメータ（固定値）ごとの角度差のヒストグラムの RMS

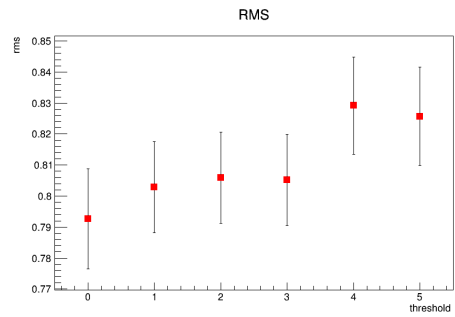


図 4.33 WAGASCI Upstream におけるパラメータ（sigmfactor）ごとの角度差のヒストグラムの RMS

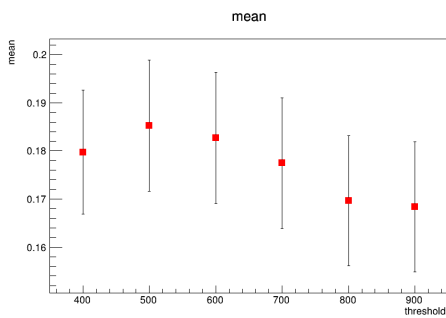


図 4.34 WAGASCI Upstream におけるパラメータ（固定値）ごとの角度差のヒストグラムの MEAN

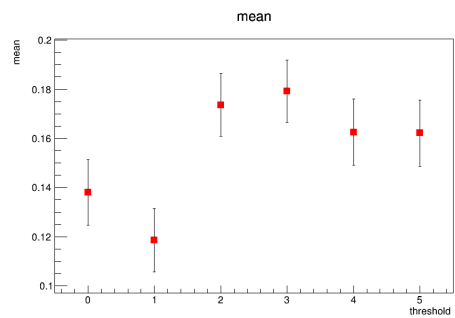


図 4.35 WAGASCI Upstream におけるパラメータ（sigmfactor）ごとの角度差のヒストグラムの MEAN

- WAGASCI Downstream

WAGASCI Upstream と同様に Down stream でも角度の評価を行った。ヒストグラムは Upstream 同様、bin は 0.5 度、フィットは ±10 度の範囲で行った。

RMS を比較したのが図 4.36, 4.37、MEAN を比較したのが図 4.38, 4.39 である。

RMS の評価が高いのは sigmfactor が 0, 1 の時、で 4.1~4.2 度である。MEAN の評価が高いのは sigmfactor が 0 の時で 1.6 度である。Upstream 同様、固定のしきい値の場合は RMS、MEAN とともに誤差棒の範囲内であり差はなく、sigmfactor を用いた場合の評価が高かった。

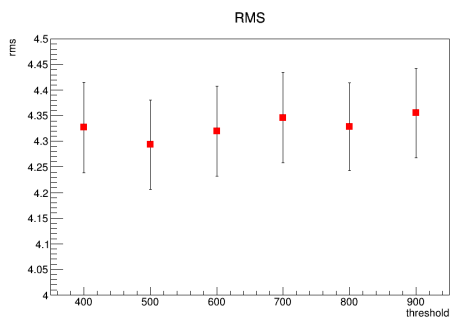


図 4.36 WAGASCI Downstream におけるパラメータ（固定値）ごとの角度差のヒストグラムの RMS

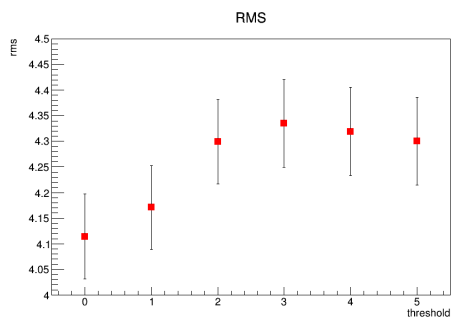


図 4.37 WAGASCI Downstream におけるパラメータ（sigmfactor）ごとの角度差のヒストグラムの RMS

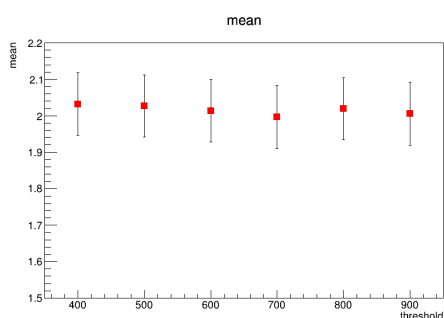


図 4.38 WAGASCI Downstream におけるパラメータ（固定値）ごとの角度差のヒストグラムの MEAN

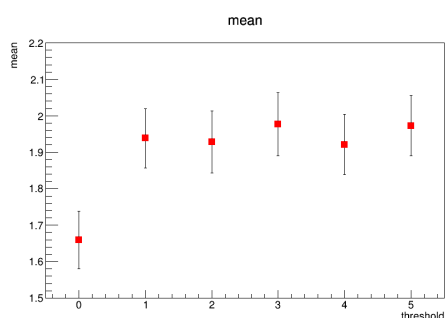


図 4.39 WAGASCI Downstream におけるパラメータ（sigmfactor）ごとの角度差のヒストグラムの MEAN

4.6.3 true track に含まれるヒットと再構成トラックに含まれるヒットを比較した際の正確さ

ここでは、再構成された二次元飛跡に含まれるヒットと true track に含まれるヒットを比較し、一致したヒット割合が一定以上の場合「再構成に成功した」と判断し、成功トラックの全イベントにおける割合、すなわち再構成効率で再構成精度を評価する。次に、具体的に再構成効率を導出する手順を示す。

1. 再構成されたトラック（recon track）に含まれるヒット、true track に含まれるヒットを比較し、一致するヒットの集団を”matched cluster”と呼ぶ。
2. matched cluster が true track のヒット数の 60% 以上であること、かつ、matched cluster が recon track のヒット数の 60% 以上であることの両方を満たす場合、その飛跡の再構成に成功したと判断する。
3. 再構成に成功したトラックの数を、すべての true track の数で割り、再構成効率として計算する。

図 4.40 に例を示す。画像 1 番では、赤丸が true track のヒット、緑丸がそれ以外のヒットである。このようなイベントを、例えば画像 2 番のように青丸のヒットを含む青線として再構成したと仮

定する。すると、matched cluster は3番の紫丸となる。この場合、matched cluster の true track のヒット数における割合、および recon track のヒット数における割合はともに 60% 以上となり、再構成に成功したと判断される。

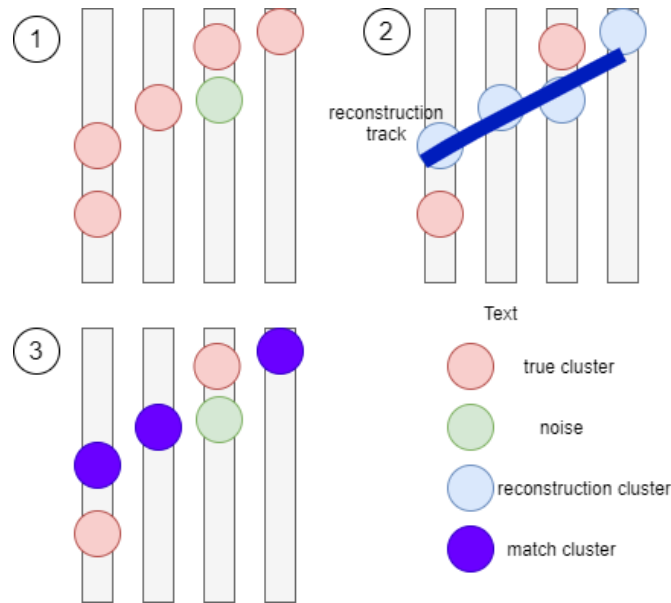


図 4.40 再構成効率の導出過程

評価は、true track が 2track のイベントのみを集めたサンプルを用いて、二次元再構成のみを行った際の結果を用いて行った。

- Proton Module

Proton Module における、パラメーターごとの再構成効率を図 4.41 (固定値)、4.42 (sigmafactor) に示す。図中の赤い点は top view, 緑の点は side view である。

固定のしきい値における 500~900 での再構成効率、sigmafactor が 2~5 での再構成効率は同程度の評価となっているが、最も効率が高くなっているのは sigmafactor が 2 の時である。

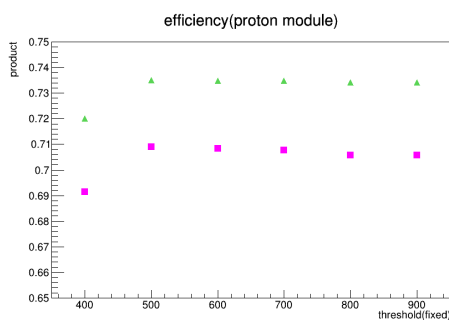


図 4.41 Proton Module におけるパラメータ (固定値) ごとの再構成効率

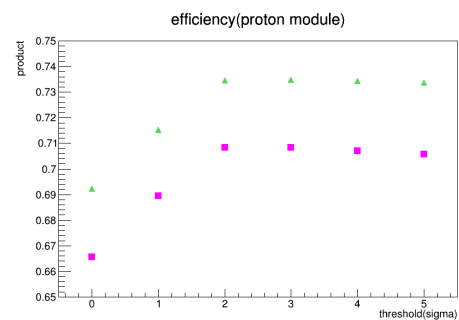


図 4.42 Proton Module におけるパラメータ (sigmafactor) ごとの再構成効率

- WAGASCI Upstream

WAGASCI Upstream における、パラメーターごとの再構成効率を図 4.43 (固定値)、4.44

(sigmafactor) に示す。図中の赤い点は top view, 緑の点は side view である。固定のしきい値と sigmafactor を比較すると全体的に sigmafactor の方が再構成効率が高くなっている。どちらの場合でもパラメータが高くなるほど、すなわち、ヒットを結ぶ基準が厳しくなるほど再構成効率が下がっている。最も再構成効率が高いのは、top では sigmafactor が 1 の時、side では sigmafactor が 0 の時である。

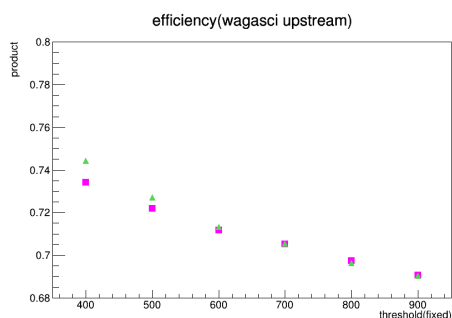


図 4.43 WAGASCI Upstream におけるパラメータ（固定値）ごとの再構成効率

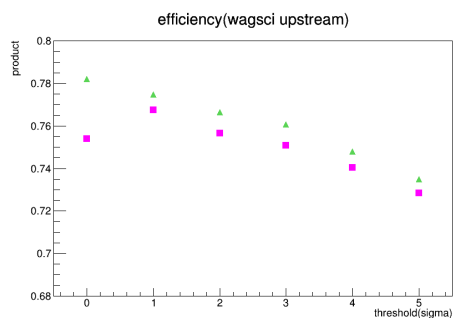


図 4.44 WAGASCI Upstream におけるパラメータ（sigmafactor）ごとの再構成効率

• WAGASCI Downstream

WAGASCI Downstream における、パラメーターごとの再構成効率を図 4.45（固定値）、4.46（sigmafactor）に示す。図中の赤い点は top view, 緑の点は side view である。Upstream と同様に、固定のしきい値と sigmafactor を比較すると全体的に sigmafactor の方が再構成効率が高い。また、パラメータが低い方が再構成効率が低い傾向にある。最も再構成効率が高いのは、sigmafactor が 1 の時である。

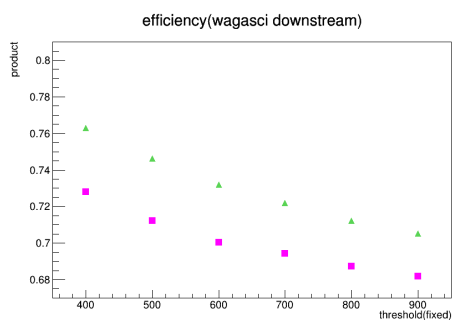


図 4.45 WAGASCI Downstream におけるパラメータ（固定値）ごとの再構成効率

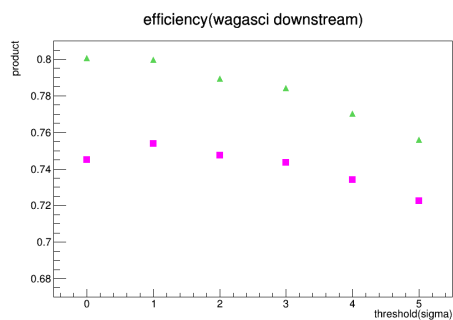


図 4.46 WAGASCI Downstream におけるパラメータ（sigmafactor）ごとの再構成効率

4.6.4 総合評価

前述した三つの基準による評価を総合し、最終的なパラメータ決定および評価を行う。評価は、それぞれの基準を 0～1 の数値で評価したものの積とした。評価に使用したのは、正確なトラック数で再構成できたイベントの割合、角度の再構成精度の RMS、MEAN、再構成効率の top view お

よび side view の 5 つである。それぞれのスコアの決め方について以下に示す。

1. 正確なトラック数で再構成できたイベントの割合

top view, side view のどちらか高い方のみ、割合をそのままスコアとして用いた。

2. 角度の再構成精度

角度の評価基準である RMS および MEAN は数値が低ければ低いほど評価が高いため、高ければ高いほど評価が高くなるように数値を変換した。以下に変換方法を示す。

整数 i を 1 から 1000 まで 1 ずつ大きくしていった際に、RMS もしくは MEAN が $i * A < |RMS| \leq (i + 1) * A$ を満たした場合、 $1 - B * i$ と変換する。A、B の数値は、任意の実数で調整する。例えば、RMS が 0.79、0.81、0.83 だったとする。ここで A を 0.01、B を 0.005 とすると、0.79 は、 $78 * 0.01 < |0.79| \leq (78 + 1) * 0.01$ 、すなわち、 $i=78$ で条件を満たすため、数値は、 $1 - 0.005 * 78 = 0.61$ と変換される。同様に 0.81 は $80 * 0.01 < |0.81| \leq (80 + 1) * 0.01$ で、 $i=80$ で条件を満たすため、 $1 - 0.005 * 80 = 0.6$ と変換される。0.83 は $82 * 0.01 < |0.83| \leq (82 + 1) * 0.01$ で、 $i=82$ で条件を満たすため、 $1 - 0.005 * 80 = 0.59$ と変換される。結果、この条件では 0.79、0.81、0.83 は 0.61、0.6、0.59 と評価が高い方が高い数値のスコアに変換される。スコアの変換には、A、B の値が重要となるが、今回はトラック数および再構成効率のスコアと大きく違うスコアにならないように、最大値、最小値、レンジが同程度になるように調整した。Proton Module での RMS 変換例を 4.1、4.2 に、MEAN の変換例を 4.3、4.4 に示す。なお、この時の A は 0.01、B は 0.001 とし、MEAN 変換時の A は 0.0005、B は 0.01 とした。

表 4.1 RMS 変換例 (sigmafactor)

パラメータ (sigmafactor)	RMS	スコア
0	0.896906	0.7312
1	0.918069	0.7246
2	0.878893	0.7366
3	0.880937	0.736
4	0.87151	0.7387
5	0.870257	0.739

表 4.2 RMS 変換例 (固定値)

パラメータ (固定値)	RMS	スコア
400	0.910508	0.727
500	0.87919	0.7363
600	0.879961	0.7363
700	0.878385	0.7366
800	0.872737	0.7384
900	0.87165	0.7387

表 4.3 MEAN 変換例 (sigmafactor)

パラメータ (sigmafactor)	MEAN	スコア
0	0.0447148	0.912
1	0.0130474	0.974
2	0.0430887	0.914
3	0.0447625	0.912
4	0.0470275	0.906
5	0.0410195	0.918

表 4.4 MEAN 変換例 (固定値)

パラメータ (固定値)	MEAN	スコア
400	0.0115651	0.978
500	0.0439289	0.914
600	0.0441511	0.912
700	0.044637	0.912
800	0.0428096	0.916
900	0.0426199	0.916

3. 再構成効率

top view および side view、それぞれの再構成効率をそのままスコアとして用いた。

以下、検出器ごとにこれら三つの評価を総合した積を示す。

- Proton Module

Proton Module におけるスコアの積の比較を図 4.47、4.48 に示す。

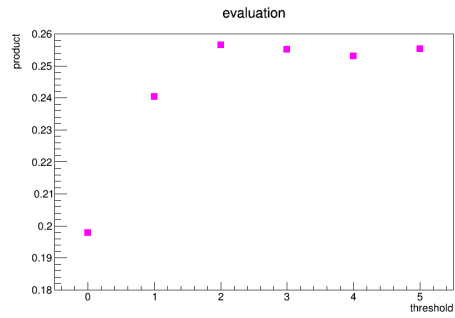
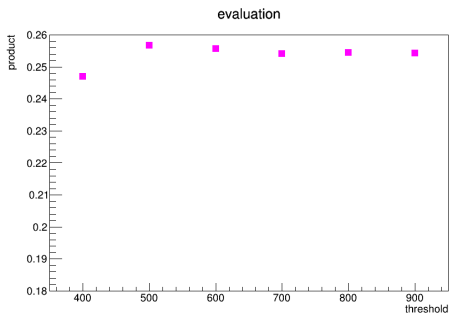


図 4.47 パラメータ（固定値）ごとのスコアの積 図 4.48 パラメータ（sigmafactor）ごとのスコアの積

また、評価に使用したスコアの種類を横軸とし、左から順に乗じていった際の積の変化を縦軸とした場合、次の図 4.49、4.49 のようになった。なお、左のプロットは固定のしきい値、右のプロットは sigmafactor の比較となっており、それぞれの点は、明るい緑は固定値 400, sigmafactor0、青は固定値 500, sigmafactor1、緑は固定値 600, sigmafactor2、赤は固定値 700, sigmafactor3、ピンクは固定値 800, sigmafactor4、水色は固定値 900, sigmafactor5 である。

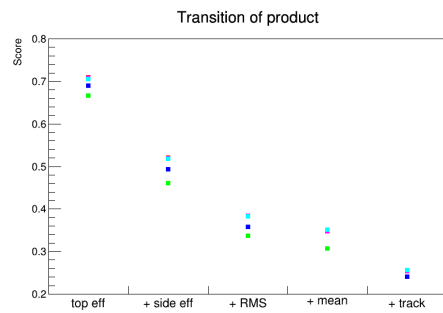
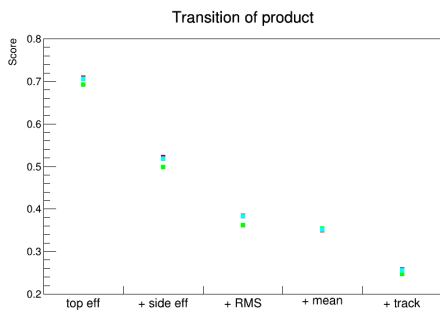


図 4.49 パラメータ（固定値）ごとのスコアの積の変化

図 4.50 パラメータ（sigmafactor）ごとのスコアの積の変化

これらのプロットから、評価のスコアが最も高いのは sigmafactor が 2 の時、次点で固定のしきい値で 600 の時である。

- WAGASCI Upstream

WAGASCI Upstream におけるスコアの積の比較を図 4.51、4.52 に示す。固定のしきい値を使うときと、sigmafactor を使うときでは、全体的に sigmafactor を使うときの方がスコアの積が高くなっている。最もスコアが高いのは sigmafactor が 1 の時である。

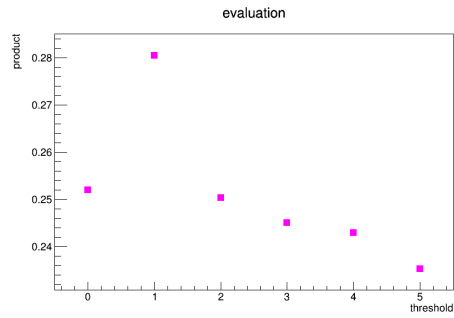
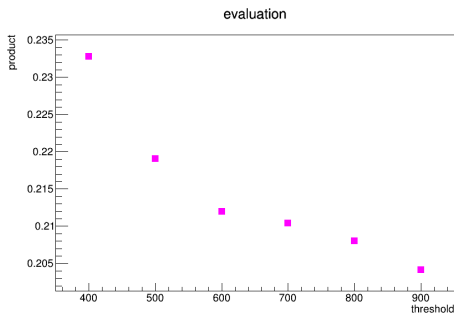


図 4.51 パラメータ（固定値）ごとのスコアの積 図 4.52 パラメータ（sigmafactor）ごとのスコアの積

• WAGASCI Downstream

WAGASCI Downstream におけるスコアの積の比較を図 4.53、4.54 に示す。upstream と同様、固定のしきい値を使うときと、sigmafactor を使うときでは、全体的に sigmafactor を使うときの方がスコアの積が高くなっている。最もスコアが高いのは sigmafactor が 1 の時である。

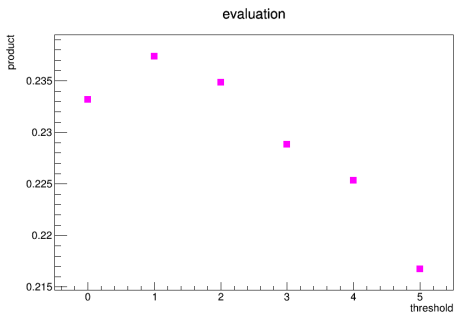
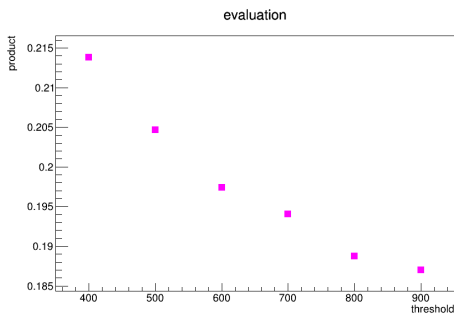


図 4.53 パラメータ（固定値）ごとのスコアの積 図 4.54 パラメータ（sigmafactor）ごとのスコアの積

4.6.5 まとめと展望

再構成することが望ましいイベントのサンプルを用いて、次の 3 つの基準で再構成アルゴリズムの評価を行った。

1. 再構成できたトラック数の正確さ

WAGASCI、Proton Module の双方とも、およそ 70% のイベントを正確に再構成出来ていた。

2. 角度の再構成精度

再構成されたトラックの角度と true track の角度の差のヒストグラムは、Proton Module では RMS がおよそ 0.08 度前後、mean のずれは 0.01~0.04 度だった。WAGASCI では、RMS が 0.8 度前後、mean は 0.12~0.19 度の精度で再構成出来ていた。

3. true track に含まれるヒットと再構成トラックに含まれるヒットを比較した際の正確さ（再構成効率）

再構成効率は、Proton Module でおよそ 70%、WAGASCI Upstream では sigmafactor が 0 の時に最も高い 78%、WAGASCI Downstream では sigmafactor が 0、1 の時に 80% の精度で

再構成が出来ていた。

これらの結果を総合的にスコアの積として評価した結果、セルオートマトンにおいて近傍と定義されるしきい値となる χ^2 値は、Proton Module では sigmafactor を 2 として統計をとったしきい値、WAGASCI では sigmafactor を 1 として統計をとったしきい値を使うことが望ましいと考えられる。

再構成できたトラック数の正確さの点で、再構成することが望ましいイベントのサンプルのうちおよそ 70% のイベントを正確に再構成出来ていたという結果は少し低いと考えられる。再構成が正確に出来ていなかったイベントの特徴をイベントディスプレイで確認した結果、図 4.55、4.56 のように、二本のトラックが近すぎるため、一本と判断してしまったことが多くを占めていた。このようなイベントは目視でもトラックを判別することが難しく、アルゴリズムの性能により再構成が出来なかったかどうかの判断の妨げとなると考えられる。より正確にアルゴリズムの性能を評価するためには、サンプルから目視でもトラックが一本に見えるイベントを除くことが挙げられる。例えば、二次元平面における二本のトラックの角度の差に基準を設け、小さすぎるものを除くことで、より評価に適切なイベントのみを集めたサンプルを作成することができ、正確な評価が可能になると考えられる。

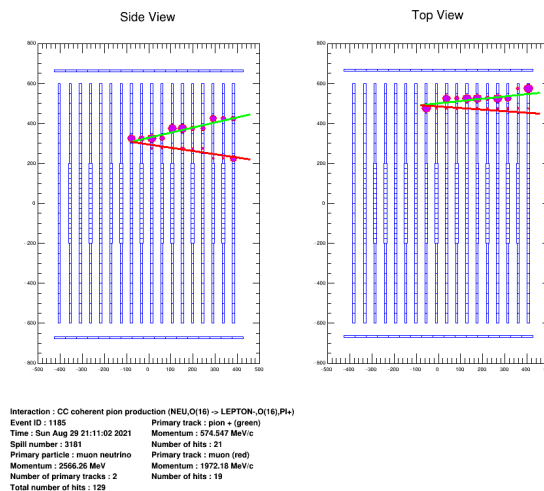


図 4.55 Proton Module の 2track sample のうち一本に再構成された例

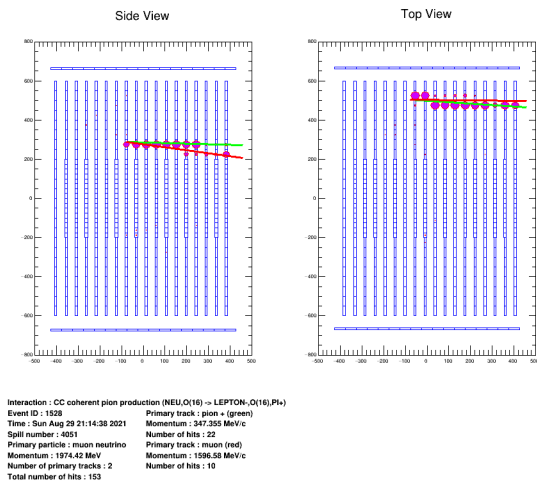


図 4.56 Proton Module の 2track sample のうち一本に再構成された例

5 検出器の性能評価

飛跡再構成アルゴリズムのパラメータチューニング後、実際に J-PARC で取得されたデータとモンテカルロシミュレーションのデータから、最適化したアルゴリズムを使用して再構成したイベントを選別し、比較を行った。使用したデータは、2021 年 3 月 12 日～3 月 19 日までに取得されたものである。

5.1 光量分布

光量分布には、サンドミュオンイベントを選択し用いた。サンドミュオンイベントとは、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オンである。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。今回は、サンドミュオンイベントとして、WAGASCI Upstream に vertex があること、かつ、BabyMIND までのマッチングが出来たトラックが 1 本あること、を条件としてイベントを選択した。図 5.1 に、使用したイベントのイベントディスプレイの例を挙げる。

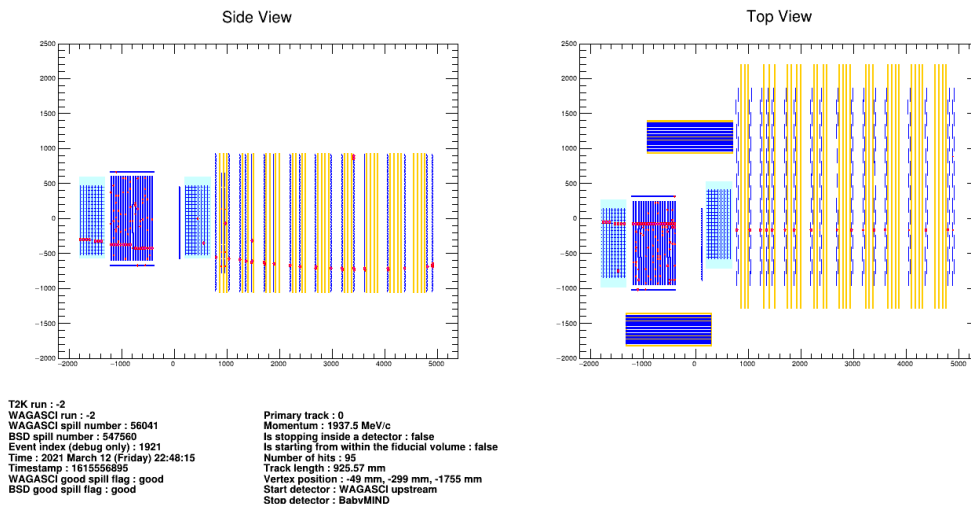


図 5.1 サンドミュオンイベントの例

5.1.1 Proton Module

Proton Module は、3.2.1 節図 3.3 のように、INGRID シンチレータおよび SCIBAR シンチレータと呼ばれる厚みの違う二種類のプラスチックシンチレーターから構成されている。そのため、光量分布はシンチレータの種類ごとに作成した。光量は、入射角度による飛程を考慮し、図 5.3 のように 3 次元の飛跡が z 軸となす角度の余弦を掛けた。また、それぞれシンチレータの厚みで割り、単位長さあたりの光量に変換した。

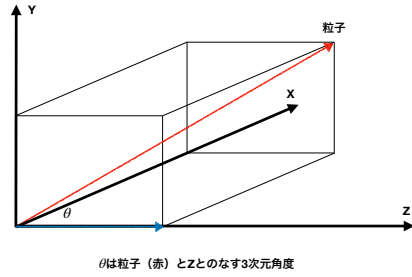


図 5.2 3次元飛跡の角度を用いた光量の補正

以上の補正を行い、実データとモンテカルロシミュレーションで光量分布を比較した結果が次の図 5.3、5.4 である。なお、モンテカルロシミュレーションの分布は実データの分布の面積分で規格化している。実データとモンテカルロシミュレーションで分布はよく一致している。平均光量は、INGRID シンチレータで 25.4p.e.、SCIBAR シンチレータは 47.8p.e. となった。

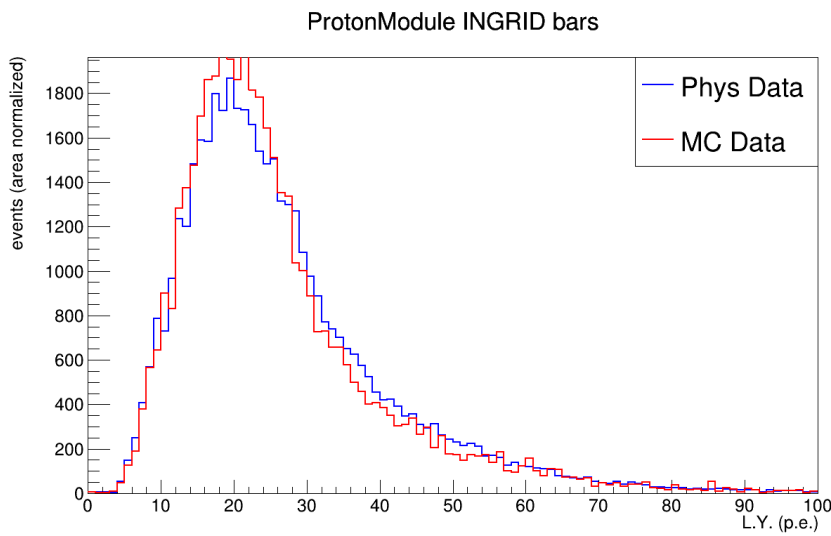


図 5.3 Proton Module の INGRID シンチレータにおける光量分布

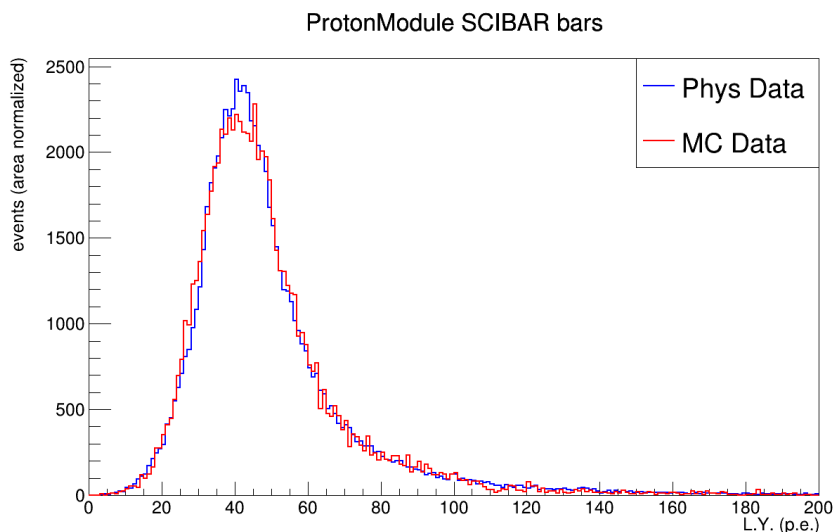


図 5.4 Proton Module の SCIBAR シンチレータにおける光量分布

5.1.2 WAGASCI

WAGASCI 検出器は、3.2.2 節図 3.6、3.7 のように、GRID シンチレータおよび平行シンチレータの二種類で構成されているため、それぞれのシンチレータについての光量分布を作成した。Proton Module 同様、入射角度による飛程を考慮し、平行シンチレータには 3 次元の飛跡が Z 軸となす角度の余弦を、グリッドシンチレータには Y 軸となす角度の余弦を掛けた。また、それぞれシンチレータの厚みで割り、単位長さあたりの光量に変換した。

WAGASCI Upstream の光量分布を図 5.5、5.6、WAGASCI Downstream の光量分布を図 5.7、5.8 に示す。WAGASCI Upstream は、実データとモンテカルロシミュレーションでほぼ分布は一致している。WAGASCI Downstream も、Upstream ほどではないものの、おおむね分布は一致しているといえる。

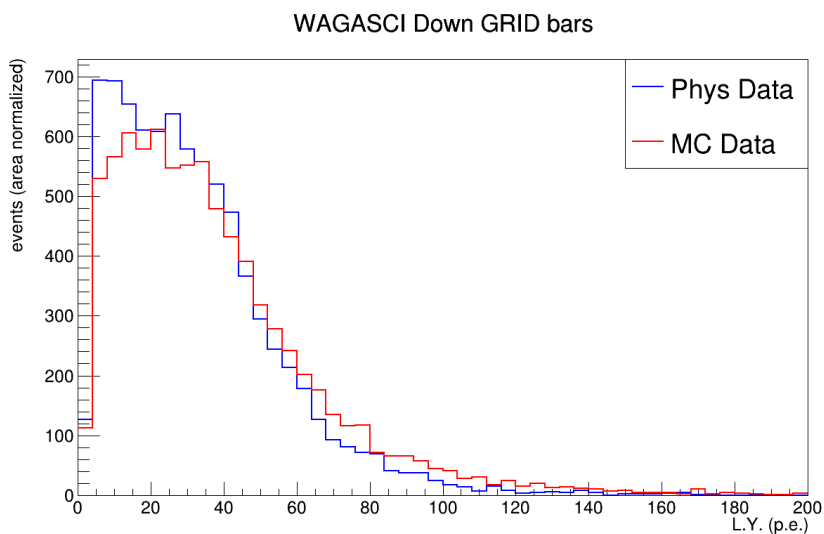


図 5.5 WAGASCI Upstream のグリッドシンチレータにおける光量分布

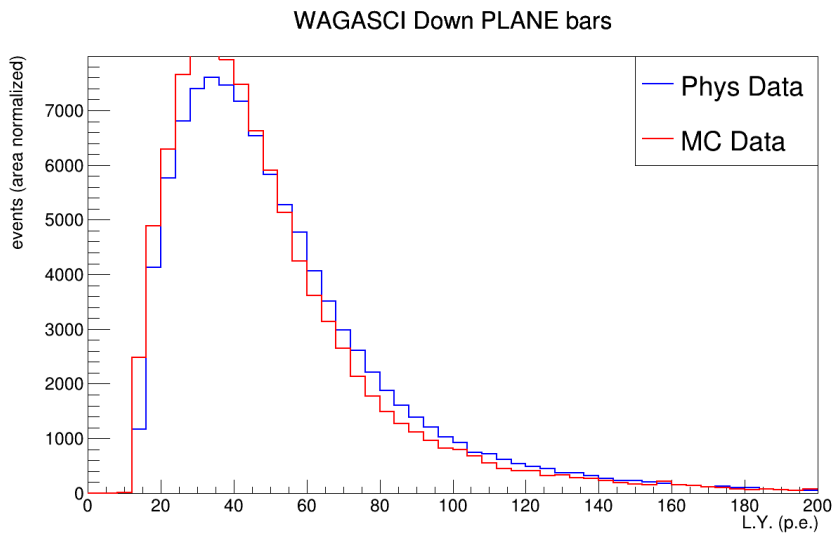


図 5.6 WAGASCI Upstream のパラレルシンチレータにおける光量分布

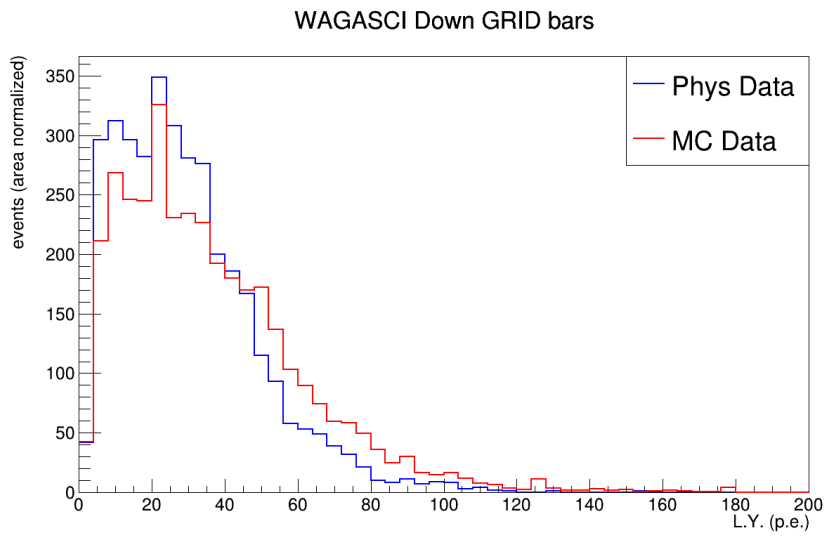


図 5.7 WAGASCI Downstream のグリッドシンチレータにおける光量分布

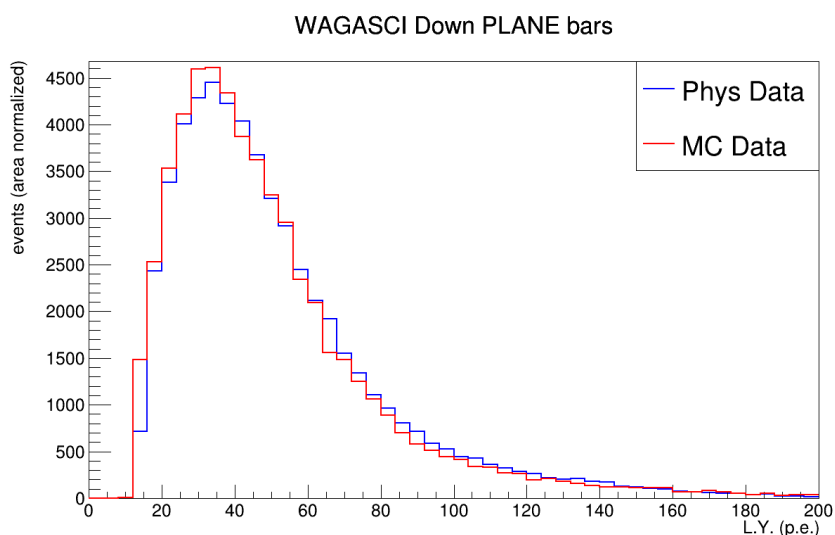


図 5.8 WAGASCI Downstream のパラレルシンチレータにおける光量分布

5.1.3 BabyMIND

BabyMIND は、3.2.4 節の通り、水平方向に並べられたシンチレータ層、鉛直方向に並べられた層の二種類で構成されている。そのため、それぞれの層ごとに光量分布を作成した。また、両側読み出しとなっているため、ビーム方向から見て左 (Left Readout) と、ビーム方向から見て右 (Right Readout) に分けて光量分布を確認した。図 5.9、5.10 に Right Readout の光量分布、図 5.11、5.12 に Left Readout の光量分布を示す。

実データとモンテカルロシミュレーションで分布はよく一致している。side view において、Left Readout に比べると Left Readout の方が光量のピークが高くなっているが、これは WAGASCI Upstream に vertex があるサンドミューオンイベントを選択することによって、ビーム方向から見て右側に寄ったヒットが多くなるためだと考えられる。

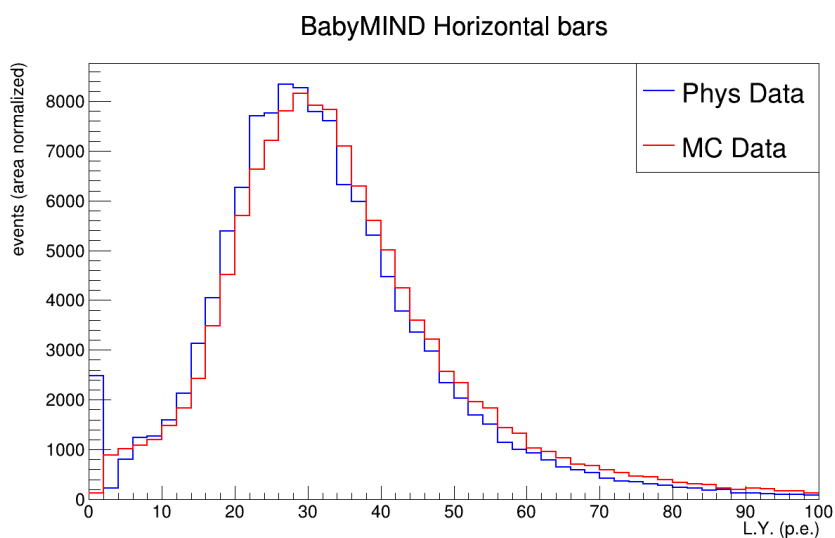


図 5.9 BabyMIND の side view における光量分布 (right readout)

BabyMIND Vertical bars

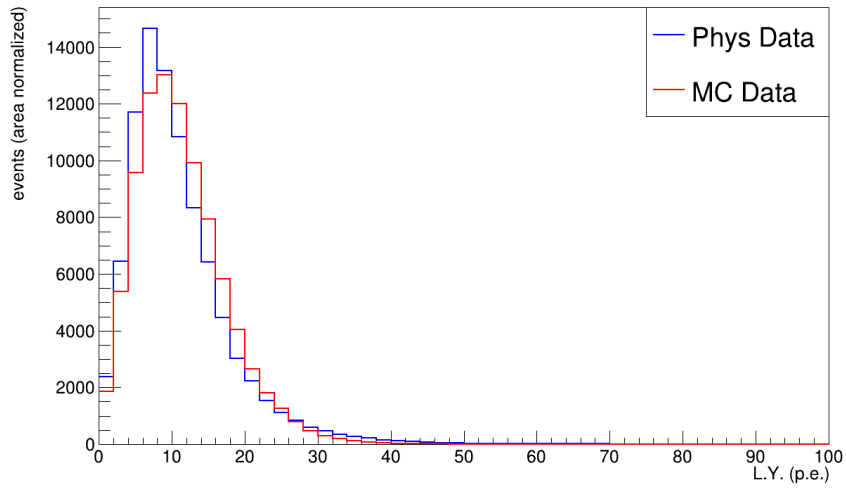


図 5.10 BabyMIND の top view における光量分布 (right readout)

BabyMIND Horizontal bars

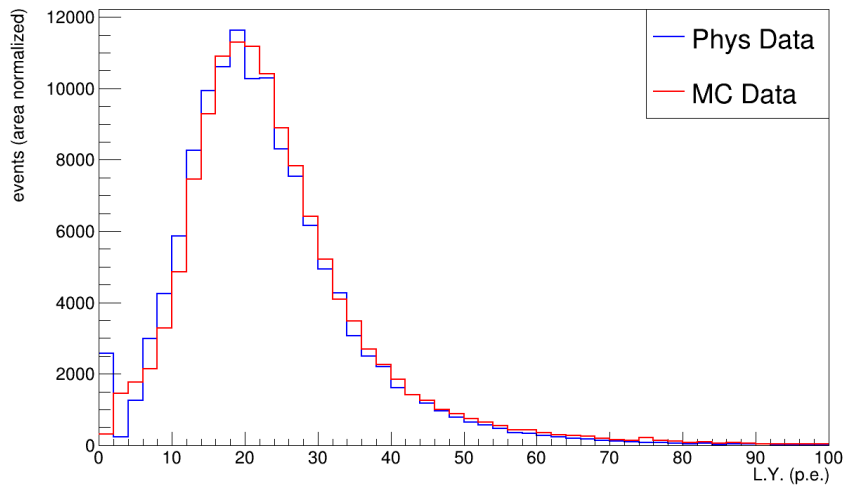


図 5.11 BabyMIND の side view における光量分布 (left readout)

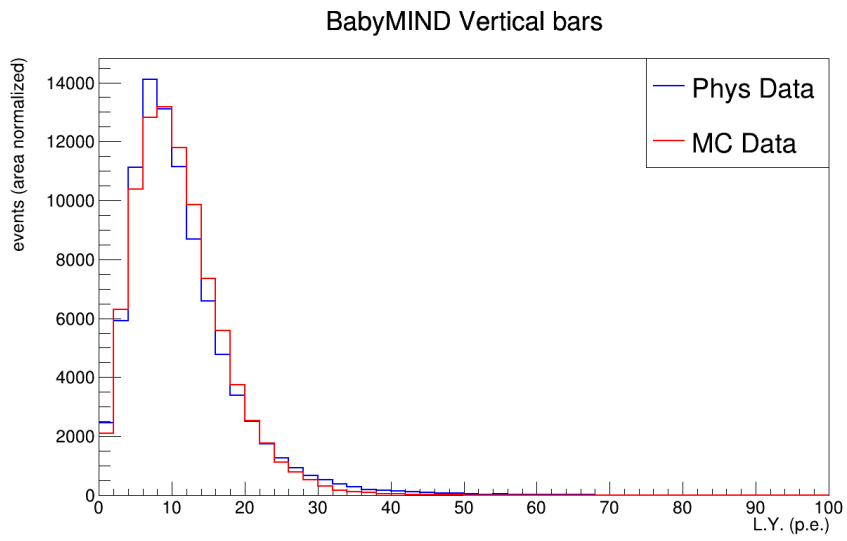


図 5.12 BabyMIND の top view における光量分布 (left readout)

6 結論

セルオートマトンを用いた飛跡再構成アルゴリズムのチューニングおよび性能評価を、Proton Module、WAGASCI に対して行った。評価は3つの基準に分けて行い、それらの結果から総合的に使用するパラメータを決定した。評価基準は、1. 再構成できたトラック数の正確さ、2. 角度の再構成精度、3. true track に含まれるヒットと再構成トラックに含まれるヒットを比較した際の正確さ（再構成効率）の3つである。なお、評価に使用したサンプルは、再構成がされていることが望ましいイベントのみになるように条件を設定した。

再構成できたトラック数の正確さに関しては、モンテカルロシミュレーションで true track が2本のサンプルを用意し、そのうち何本を再構成できたかを調べた。結果、Proton Module、WAGASCI ともにおよそ70%のイベントが、2本とも再構成できていた。

再構成されたトラックの角度と true track の角度の差のヒストグラムは、Proton Module では RMS がおよそ0.88度前後、mean のずれは0.01~0.04度だった。WAGASCI では、RMS が0.8度前後、mean は0.12~0.19度の精度で再構成出来ていた。

再構成効率は、Proton Module でおよそ70%、WAGASCI Upstream では sigmafactor が0の時に最も高い78%、WAGASCI Downstream では sigmafactor が0、1の時に80%の精度で再構成が出来ていた。

これらの評価を総合し、それぞれを0~1のスコアで評価したものの積を比較した結果、Proton Module では sigmafactor を2としたパラメータ、WAGASCI では sigmafactor を1としたパラメータを使うことが望ましいことが分かった。

また、実際に J-PARC で取得されたデータとモンテカルロシミュレーションのデータから、上のパラメータを使用して最適化したアルゴリズムを用いて再構成したイベントを選別し、光量分布の比較を行った。結果、Proton Module、WAGASCI Upstream、WAGASCI Downstream、Baby MIND で、光量分布はよく一致していた。

今回は性能評価として光量分布の比較を行ったが、今後ヒット検出効率の比較、再構成効率、マッチング効率など取得したデータを用いて行うことが可能な解析が多くある。今後は、このような解析をより進めていき、具体的に検出器の性能評価を行うことが必要である。

謝辞

二年という短い期間ではありましたが、多くの人に支えられ、充実した大学院生活を送ることが出来ました。つらくて研究をやめたいと思ったことは星の数ほどありましたが、皆様の支えがあったおかげでなんとか研究を続け、こうして修士論文としてまとめることができました。

指導教員である清矢良浩教授には、多くの研究アドバイスやスライドの添削をしていただきました。私の資料作成が非常に遅く直前になってしまったときでも、急いでコメントを付けていただいたり発表練習をしてくださって、非常に助かりました。また、山本和弘准教授には研究に必要な環境構築のための手続きや、J-PARC へ出張に行く際の準備など、多くのサポートをしていただきました。

また、T2K-WAGASCI 実験のメンバーの方々にも多くの手助けをしていただきました。横浜国立大学准教授の南野彰宏氏、京都大学助教の木河達也氏は、ND280Jmeeting や WAGASCI meeting で多くの研究アドバイスをしていただき、研究方針を示してくださり、感謝しています。また、出張の際に分からないことがあったとき、深夜でも slack に返信してくださったおかげで問題解決をすることができ、非常に助かりました。京都大学の安留さん、横浜国立大学の jojo さんは、何も分からなかった私に WAGASCI のソフトウェアの基本を教えてくださいました。お忙しい中、分からないことがあっても slack ですぐに返答してくださり、時には ZOOM で時間をとって丁寧に教えてくださったこと、感謝の念にたえません。お二人がいなければ私は今のような結果を出すことは出来なかったと思います。本当にありがとうございます。また、東京大学の江口さん、小田川さんには J-PARC への出張時、検出器のことやビームのことについて教えていただきました。ありがとうございます。

研究室の同期である、植松くん、西崎くん、また、先輩の本條さん、小幡さん、小向さん、池内さんにも感謝申し上げます。研究で行き詰まった際にアドバイスをしてくださったり、雑談で元気づけてくださったことで、豊かで充実した研究生活を送ることが出来ました。ありがとうございます。

最後に、大学院生活を支えてくれた家族に、心から感謝します。

参考文献

- [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] Z.Maki, M.Nakagawa, and S.Sakata. , "Remarks on the uni ed model of elementary particles", Prog. Theor. Phys. Vol. 28, p. 870 (1962)
- [4] Y.Fukuda et al. ,"Measurement of the Flux and Zenith-Angle Distribution of Upward Through-going Muons by Super-Kamiokande" Phys. Rev. Lett. 82 2644-2648 (1999)
- [5] Y.Itow et al. " The JHF-Kamioka neutrino project" arXiv:hep-ex/0106019 (2001)
- [6] Y.Yamazaki et al. " Accelerator Technical Design Report for J-PARC" KEK-Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044 (2003)
- [7] S. Assylbekov et al., " The T2K ND280 Off-Axis Pi-Zero Detector" , Nucl. Instrum. Meth. A 686 48 (2012)
- [8] N. Abgrall et al., " Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors" , Nucl. Instrum. Meth. A 637 25 (2011)
- [9] P. A. Amaudruz et al., " The T2K Fine-Grained Detectors" , Nucl. Instrum. Meth. A 696 1 (2012)
- [10] D. Allan et al., " The electromagnetic calorimeter for the T2K near detector ND280" , Journal of Instrum. 8 10019 (2013)
- [11] S. Aoki et al., " The T2K Side Muon Range Detector (SMRD)" , Nucl. Instrum. Meth. A 698 135 (2013)
- [12] Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration), " The Super-Kamiokande detector" , Nucl. Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- [13] 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
- [14] 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
- [15] 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
- [16] T. Fukuda et al., " First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline" , PTEP 2017, 063C02 (2017)