

T2K-WAGASCI 実験における Minimum Spanning Tree を  
用いた飛跡再構成アルゴリズムの  
パラメータ調整と性能評価  
(Parameter Tuning and Performance Evaluation of the  
Minimum-Spanning-Tree Based Track-Reconstruction  
Algorithm in the T2k-WAGASCI Experiment)

理学研究科

数物系専攻

西崎 勁矢





# 目次

概要	ii
<b>第 1 章 ニュートリノ</b>	<b>1</b>
1.1 ニュートリノとは	1
1.2 ニュートリノ振動	1
1.2.1 ニュートリノ振動の定式化 (2 世代間の混合)	2
1.2.2 ニュートリノ振動の定式化 (3 世代間の混合)	3
1.3 ニュートリノと原子核の反応	4
<b>第 2 章 T2K 実験</b>	<b>7</b>
2.1 概要と物理目的	7
2.2 ニュートリノビーム	7
2.2.1 J-PARC 加速器とニュートリノビームライン	7
2.3 前置検出器	9
2.3.1 INGRID	9
2.3.2 ND280	10
2.4 後置検出器：スーパーカミオカンデ	11
2.5 Off-axis 法	12
2.5.1 Off-axis 法の原理	12
2.5.2 T2K 実験における off-axis 角の決定	13
<b>第 3 章 T2K-WAGASCI 実験</b>	<b>15</b>
3.1 目的	15
3.2 検出器について	15
3.2.1 WAGASCI (WATER Grid And SCIntillator) 検出器	16
3.2.2 プロトンモジュール (Proton Module)	17
3.2.3 Baby MIND	18
3.2.4 Detector Module	18
3.2.5 Magnet Module	19
<b>第 4 章 飛跡再構成アルゴリズムの性能評価</b>	<b>20</b>
4.1 T2K-WAGASCI 実験における飛跡再構成アルゴリズム	20
4.1.1 プリム法	20

---

4.1.2	T2K-WAGASCI 実験における飛跡の再構成 . . . . .	21
4.1.3	clustering の手順 . . . . .	23
4.1.4	MST のパラメータ . . . . .	26
4.2	評価方法 . . . . .	29
4.2.1	シミュレーションのヒットとの一致具合を高めるようにチューニング . . . . .	30
4.2.2	トラックの数によるチューニング . . . . .	30
4.2.3	角度を使ったチューニング . . . . .	31
4.3	チューニングの準備 . . . . .	31
4.3.1	FLUKA について . . . . .	31
4.3.2	JNUBEAM について . . . . .	31
4.3.3	NEUT について . . . . .	32
4.3.4	GEANT4 について . . . . .	32
4.3.5	sample の条件 . . . . .	32
4.4	結果 . . . . .	33
4.4.1	シミュレーションのヒットとの一致具合を高めるようにチューニングした結果 . . . . .	33
4.4.2	トラック数によるチューニングの結果 . . . . .	39
4.4.3	角度を用いたチューニングの結果 . . . . .	42
4.5	再構成できていないイベント . . . . .	44
4.6	Parameter 調整後の再構成精度 . . . . .	47
<b>第 5 章 結論</b>		<b>49</b>
<b>参考文献</b>		<b>55</b>

# 第1章

## ニュートリノ

### 1.1 ニュートリノとは

ニュートリノは電荷 0、スピン 1/2 のレプトンである。質量は非常に小さいが 0 ではない。1930 年に W.Pauli が中性子の  $\beta$  崩壊でエネルギー保存則と角運動量保存則が成り立つようにニュートリノの存在仮説を提唱した [1]。1956 年に F.Reines と C.Cowan が原子炉からのニュートリノビームを水分子中の原子核と相互作用させ、それによって生じた中性子と陽電子を観測し、ニュートリノの存在が証明された。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、第一世代の電子ニュートリノ ( $\nu_e$ )、第二世代のミューニュートリノ ( $\nu_\mu$ )、第三世代のタウニュートリノ ( $\nu_\tau$ ) の 3 種類とそれぞれの反ニュートリノ ( $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ ) が存在するとされている。それぞれのフレーバーにおいて質量固有状態の混合具合はこれまでの測定から分かっているが、 $\nu_1$  と  $\nu_3$  の大小関係は分かっていない。 $\nu_1 < \nu_2 < \nu_3$  の場合を正階層、 $\nu_3 < \nu_1 < \nu_2$  の場合を逆階層という。相互作用には、弱い相互作用、強い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用の 4 種類があり、ニュートリノは弱い相互作用と重力相互作用を行う。

### 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが時間発展とともに異なるフレーバーのニュートリノに変化する現象である。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。1962 年に牧二郎、中川昌美、坂田昌一が、ニュートリノが質量をもつとすると時間発展とともに別のニュートリノに変化するという理論を提唱した。1988 年にスーパーカミオカンデ実験グループが大気ニュートリノの観測からニュートリノが時間発展とともに世代間で振動していることを観測した。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。この定式化に用いられた行列はポンテコルボ・牧・中川・坂田行列と呼ばれている。

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

ここで  $U_{\alpha i}$  は、ポンテコルボ・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) で  $3 \times 3$  のユニタリ行列であり、以下の式で表される。

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

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

$$= \begin{pmatrix} c_{12}s_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

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、 $\delta_{cp} \neq 0, \pi$  の時、PMNS 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。

### 1.2.1 ニュートリノ振動の定式化 (2 世代間の混合)

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  $|\nu_i\rangle$  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 PMNS 行列を用いて以下のように書ける。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-E_i t} |\nu_i\rangle \quad (1.5)$$

ニュートリノは相対論的であるので、

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq p + \frac{m_i^2}{2E_i} \quad (1.6)$$

と近似できる。

以下では簡単のため 2 世代の混合を考える。混合角を  $\theta$  とすると、フレーバー固有状態  $|\nu_{\alpha,\beta}\rangle$  は、質量固有状態  $|\nu_{i,j}\rangle$  との線形結合で以下のように書ける。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \\ \equiv \begin{pmatrix} \cos \theta_{\alpha\beta} & \sin \theta_{\alpha\beta} \\ -\sin \theta_{\alpha\beta} & \cos \theta_{\alpha\beta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_i\rangle \\ |\nu_j\rangle \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

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 (1.8) のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha(t)\rangle \\ |\nu_\beta(t)\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(E_i t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_i)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_j t - \mathbf{r} \cdot \mathbf{p}_j)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} |\nu_i(0)\rangle \\ |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

ここで、ニュートリノの全エネルギーを  $E_\nu$  とし、 $E_\nu$  を持つニュートリノ  $\nu_\alpha$  が距離  $L$  だけ飛行した後、 $\nu_\beta$  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  $\nu_i$  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 (1.8) は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\alpha\rangle \\ |\nu_\beta\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(m_i^2 L/2E_i)} & 0 \\ 0 & e^{-i(m_j^2 L/2E_j)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} |\nu_i(0)\rangle \\ |\nu_j(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

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、

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta} &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta_{\alpha\beta} \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \end{aligned} \quad (1.10)$$

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

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \alpha} &= 1 - P_{\alpha \rightarrow \beta} \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta_{12}^2 L/4E_\nu) \end{aligned} \quad (1.11)$$

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。

### 1.2.2 ニュートリノ振動の定式化 (3 世代間の混合)

先程の 2 世代間のニュートリノ振動の式を 3 世代間に拡張すると

3 世代間のニュートリノ振動を考える。

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。

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-ipt} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}t} |\nu_i\rangle \quad (1.12)$$

$$= \sum_i U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}t} |\nu_i\rangle \quad (1.13)$$

$$\simeq \sum_i U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_i}L} |\nu_i\rangle \quad (1.14)$$

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。 $e^{ipt}$  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 (1.13)、式 (1.14) 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 (1.14) 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、

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_i U_{\alpha i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E_\nu}t} U_{\beta i}^* |\nu_\beta\rangle \quad (1.15)$$



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、

$$\begin{aligned}
P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\
&= \left| \sum_i U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_i^2}{2E_\nu} L} U_{\beta i}^* \right|^2 \\
&= \sum_i U_{\alpha i} e^{-i \frac{m_i^2}{2E_\nu} L} U_{\beta i}^* \sum_j U_{\alpha j}^* e^{i \frac{m_j^2}{2E_\nu} L} U_{\beta j} \\
&= \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i} + \sum_{i>j} 2 \operatorname{Re} \left( U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} e^{-i \frac{m_i^2 - m_j^2}{2E_\nu} L} \right) \\
&= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re} \left( U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} \sin^2 \left( \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E_\nu} \right) \right) \\
&\quad + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im} \left( U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} \sin \left( \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E_\nu} \right) \right) \tag{1.16}
\end{aligned}$$

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、

$$\delta_{\alpha\beta} = \left| \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* \right|^2 = \sum_i |U_{\alpha i}|^2 |U_{\beta i}|^2 + \sum_{i \neq j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} \tag{1.17}$$

を使用した。反ニュートリノの場合は式 (1.16) の第 3 項の符号が逆転するため、以下のように書ける。

$$\begin{aligned}
P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re} \left( U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} \sin^2 \left( \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E_\nu} \right) \right) \\
&\quad - 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im} \left( U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} \sin \left( \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E_\nu} \right) \right) \tag{1.18}
\end{aligned}$$

### 1.3 ニュートリノと原子核の反応

ニュートリノは電磁相互作用をしないため直接観測できず、実験では他の粒子との散乱により生じる粒子を観測する。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。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。

後述の T2K 実験では荷電カレント反応を用いてニュートリノのフレーバーの識別を行う。T2K 実験では約 0.6GeV のニュートリノビームが使われており、このエネルギー領域では荷電カレント準弾性散乱反応 (Charged Current Quasi Elastic interaction(CCQE)) が支配的である。CCQE 反応はニュートリノが原子核と準弾性散乱を行う反応であり以下のような反応である。(図??) CCQE 反応ではニュートリノのエネルギーを以下のように求めることができる。

$$E_\nu = \frac{m_n E_\mu - \frac{m_\mu^2}{2}}{m_n - E_\mu + p_\mu \cos \theta_\mu} \tag{1.19}$$

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。

以下に CC 反応の例を挙げる。

- 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、 $\pi^+$  が生成される反応である。(例えば、共鳴反応により  $\Delta^{++}$  が生成されて崩壊することで  $\pi^+$  が生成される。)

- コヒーレント  $\pi$  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、 $\pi$  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。

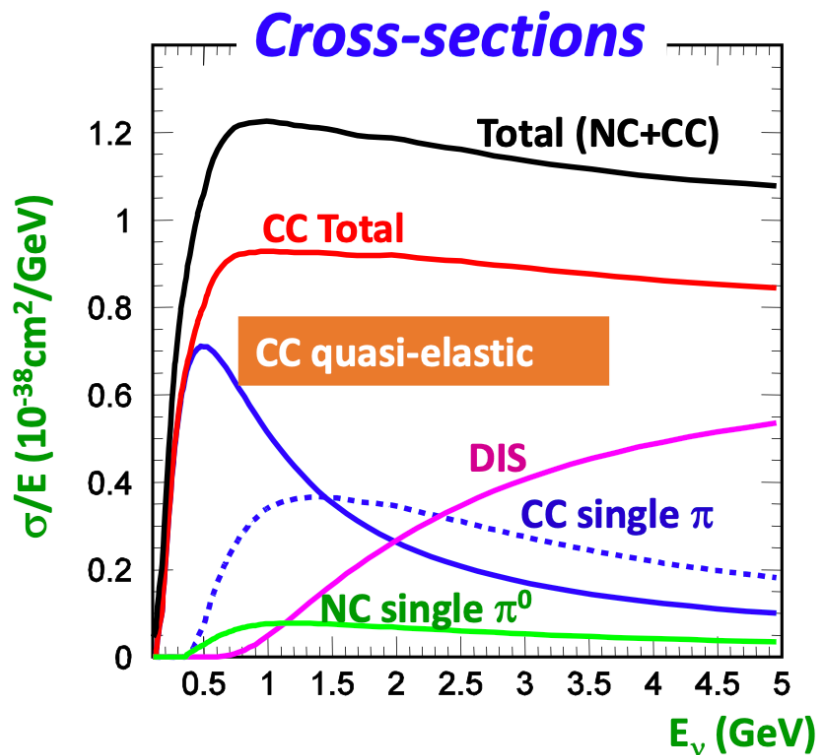


図 1.1 CC 反応と NC 反応の反応断面積 ( $E_\nu = 0 \sim 5 \text{ GeV}$ )

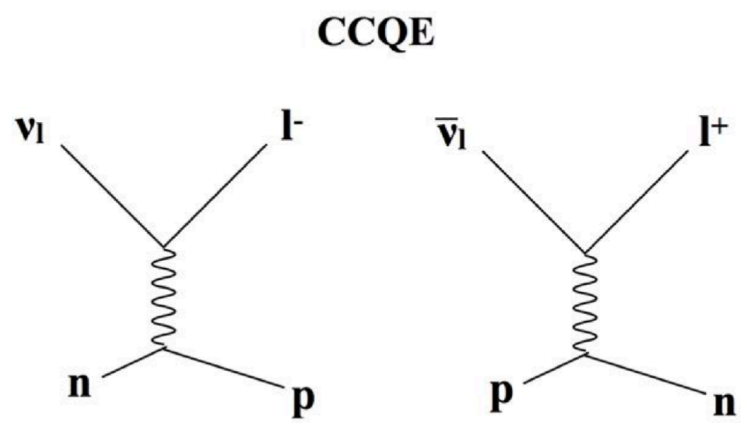


図 1.2 CCQE 反応

## 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 295km 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、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。

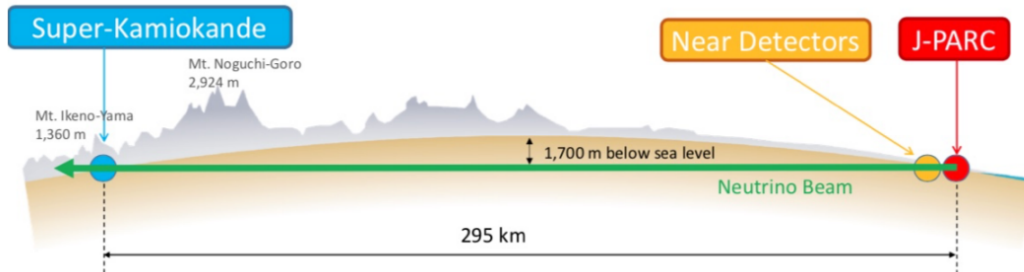


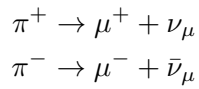
図 2.1 T2K 実験の概要図

### 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

T2K 実験のニュートリノビームは茨城県東海村の J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) でつくられる。J-PARC の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 つから構成される。LINAC で 400MeV まで加速された  $H^-$  が陽子に変換された後、RCS で 3GeV に加速され、MR でさらに 30GeV 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 SK の方向に曲げられ、標的に打ち込まれる。MR の陽子ビームは 2.48s 毎のスピルという単位で加速され、各スピルは 4.1  $\mu$ s の幅を持ち、その中には図に示すように 8 つのバンチ構造がある。標的にあたっ

た陽子はハドロン反応を起こし、 $\pi$  中間子を含む多数の粒子を生成する。生成された  $\pi$  中間子は 3 台の電磁ホーンを用いて収束され、標的の下流にある崩壊領域で以下のような崩壊をすることでニュートリノビームが生成される。



ニュートリノを多く集めたい場合は  $\pi^+$  を、反ニュートリノを多く集めたい場合は  $\pi^-$  を集めるようにホーンの電流を変化させることで 2 種類のビームモードを生成することが可能である。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

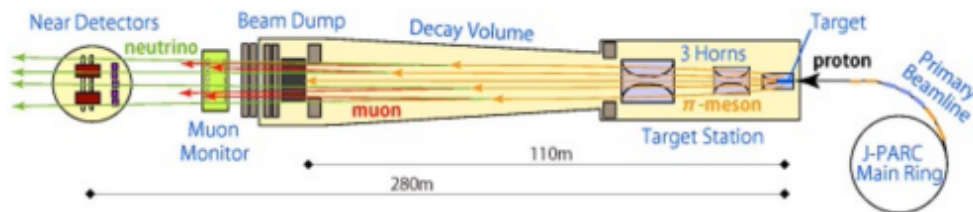


図 2.3 ニュートリノビームラインの生成と前置検出器

## 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 INGRID と ND280 という 2 つの検出器がある。INGRID(on-axis 検出器) はビーム軸上に設置されており、ND280(off-axis 検出器) は  $\pi$  中間子の平均崩壊地点とスーパーカミオカンデを結ぶ直線上に設置されている。これらの検出器はグラフィット標的から 280m 離れた地下に設置されている。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).

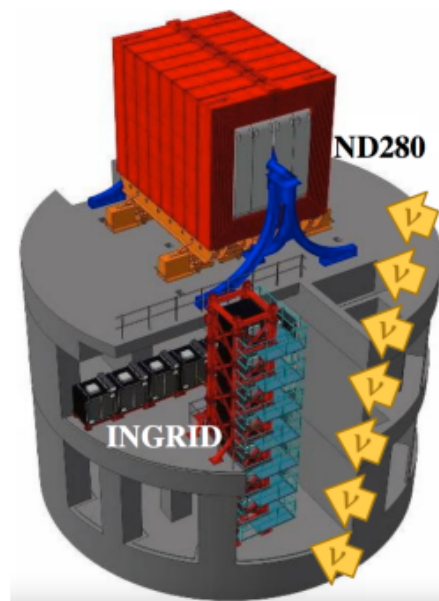


図 2.4 前置検出器の概観図

### 2.3.1 INGRID

INGRID(On-axis 検出器) は水平方向に 7 つ、鉛直方向に 7 つのモジュールが配置されている。1 つのモジュールの大きさは  $1.24 \times 1.24 \times 0.95\text{m}^3$  の大きさを持ち、鉄 9 層とシンチレータ 11 層から構成されている。ビーム軸上を中心に各位置でニュートリノを検出しニュートリノビームのプロファイルを調べる役割を持つ。ビーム方向は各モジュールのイベントレートをそれぞれ導き、導かれた値をガウシアンでフィットし見積もっている。主に鉄がニュートリノ反応標的となり、生成された荷電粒子をシンチレータで観測し、波長変換ファイバーと光検出器 MPPC を用いて測定する。

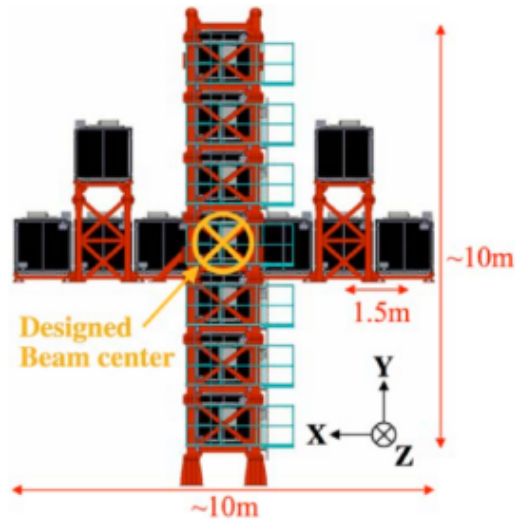


図 2.5 INGRID の概観図

### 2.3.2 ND280

ND280(off-axis 検出器) は off-axis 角におけるニュートリノビームのフラックスとエネルギー分布、電子ニュートリノの含有量とそのエネルギー分布を測定している。ビーム軸上から  $2.5^\circ$  ずれ、標的から 280m 離れた位置に設置されている。

検出器の構成要素は以下の通りである。

- UA1 Magnet  
0.2T の磁場でニュートリノ反応で生成された荷電粒子を曲げ、運動量を測定する。
- P0D ( $\pi^0$  Detector)  
プラスチックシンチレータと鉛層、水標的層が交互配置されたサンドイッチ構造である。水標的を用いて  $\pi^0$  を生成する中性カレント反応の断面積を測定する。
- FGD (Fine Grained Detector)  
ビームの上流と下流に 1 台ずつ設置されている。上流側ではプラスチックシンチレータを X,Y 方向に重ねて荷電粒子の飛跡を検出する。下流側ではシンチレータ層と水層のサンドイッチ構造になっており、シンチレータと水の散乱断面積比を測定する。
- TPC (Time Projection Chamber)  
ニュートリノ反応で生じた荷電粒子の電荷、運動量を測定し、粒子の識別を行う。
- ECal (Electromagnetic Calorimeter)  
P0D、FGD、TPC の周りを覆うように設置されている。これらの検出器での反応の再構成を補助する。鉛層とシンチレータ層が交互に重ねられており、ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子を検出する。
- SMRD (Side Muon Range Detector)  
シンチレータ検出器。大角度に散乱したミューオンの方向と運動量を測定する。

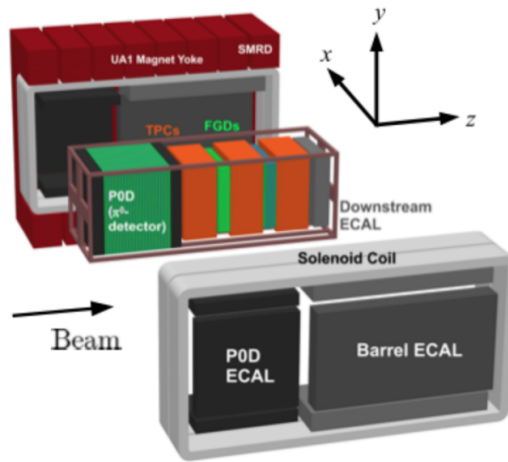


図 2.6 ND280 の概観図

## 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で岐阜県飛騨市神岡町に位置する水チェレンコフ検出器である。宇宙線を遮蔽するため神岡鉱山地下 1000m に設置されている。直径 39.3m、高さ 41.4m で、中は 50kt の超純水で満たされている。水タンクは 2 層構造である。内側の inner detector (ID) 表面には 50cm 口径の光電子増倍管が 11129 個取り付けられておりニュートリノが超純水と反応してできるミュオンまたは電子のチェレンコフ光を検出する。外側の outer detector (OD) では 20cm 口径の光電子増倍管が 1885 個取り付けられており、バックグラウンドである宇宙線ミュオンを取り除く。

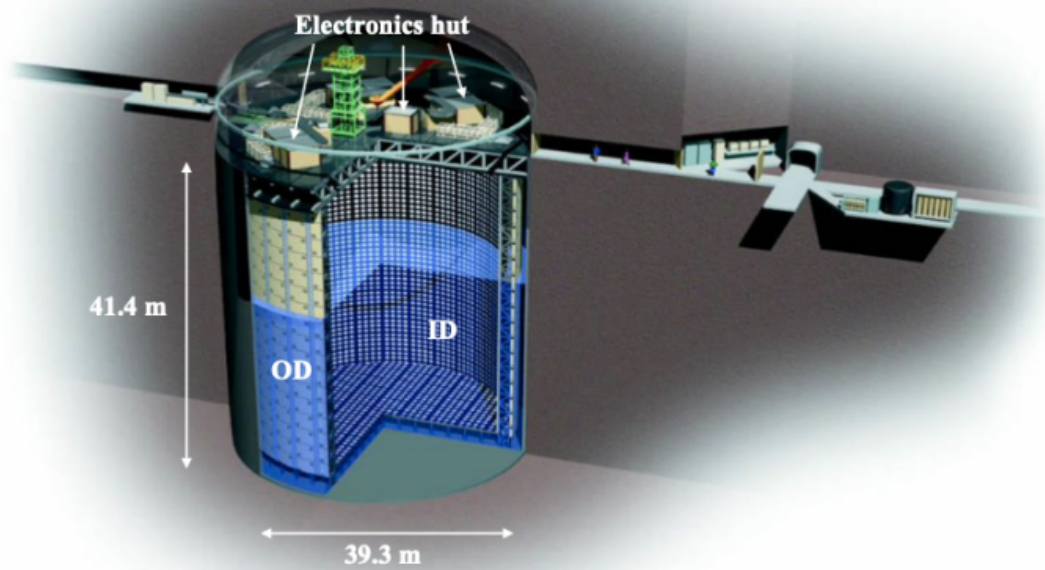


図 2.7 後置検出器スーパーカミオカンデの概観図



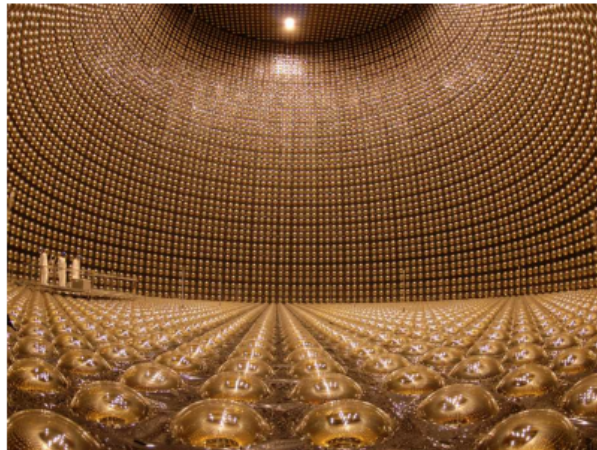


図 2.8 スーパーカミオカンデの内部図

## 2.5 Off-axis 法

off-axis 法とはビーム軸の方向を検出器 (SK) の方向から数度ずらすことにより、シャープなニュートリノエネルギー分布を持った強いビームを作る方法である。T2K 実験は世界で初めてこの off-axis 法をニュートリノ実験で採用した。T2K 実験の検出器は 2.9 のように配置されている。J-PARC で生成されたニュートリノビームは、スーパーカミオカンデの方向から  $2.5^\circ$  ずれており、この角度を off-axis 角と呼ぶ。

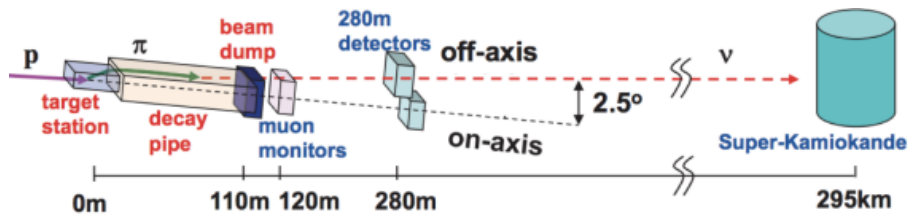


図 2.9 T2K 実験の検出器の配置図

### 2.5.1 Off-axis 法の原理

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  について考える。

図のように上式の崩壊で生成された  $\nu_\mu$  のエネルギーを  $E_\nu$ 、 $\pi$  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  $E_\nu$  は次の式で表される。

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

$E_\nu$  を  $p_\pi$  の関数とみると、 $\theta = 0^\circ$  (on-axis)、 $\theta = 2^\circ$  (off-axis  $2^\circ$ :OA $2^\circ$ )、 $\theta = 2.5^\circ$  (OA $2.5^\circ$ )、 $\theta = 3^\circ$  (OA $3^\circ$ ) の関係はそれぞれ図 2.11 のようになる。 $\theta$  が有限の時  $E_\nu$  は  $p_\pi$  にあまり依らなくなる。つまり、 $\pi$  中間子が広い範囲の運動量分布を持っていたとしても、ニュートリノのエネルギーは狭い範囲に絞られる。

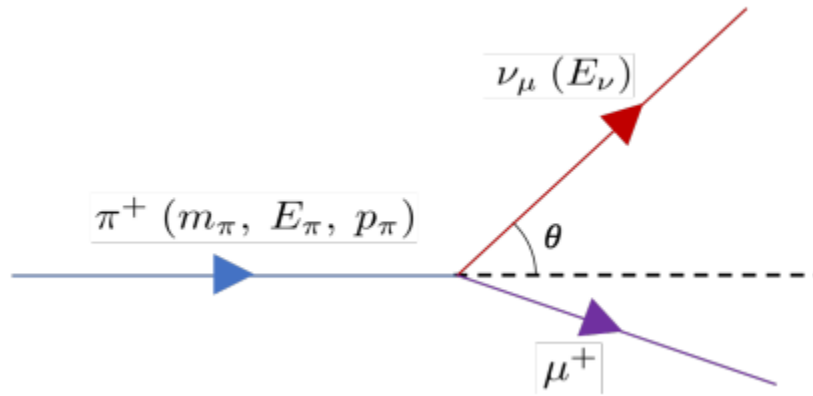


図 2.10  $\pi^+$  の崩壊

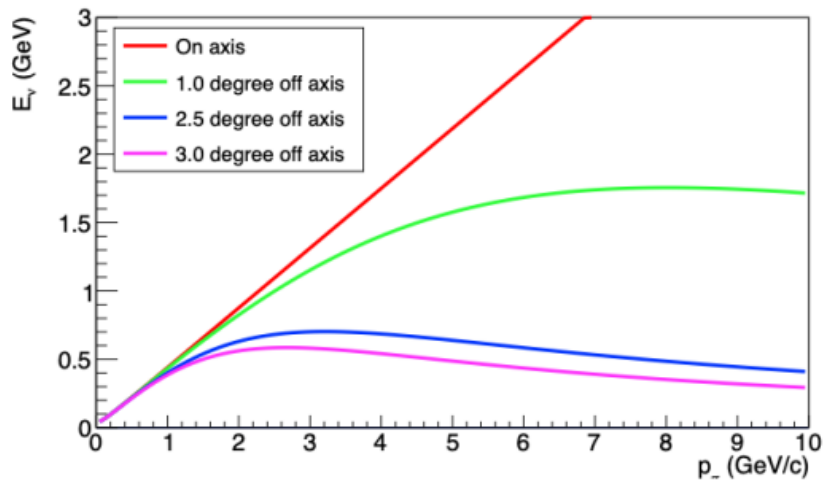


図 2.11 崩壊角に対する親パイオンの運動量とニュートリノエネルギーの関係

### 2.5.2 T2K 実験における off-axis 角の決定

T2K 実験では off-axis 角 2.5 度を採用している。図 2.12 は T2K 実験におけるニュートリノの振動確率と off-axis 角におけるニュートリノフラックスの分布である。ニュートリノ振動の確率は  $E_\nu$  に依存していることから、ニュートリノ振動の確率が最大になるところにニュートリノフラックスの最大値をとるような off-axis 角を選択すればよい。このことから T2K 実験では off-axis 角 2.5 度に設定している。

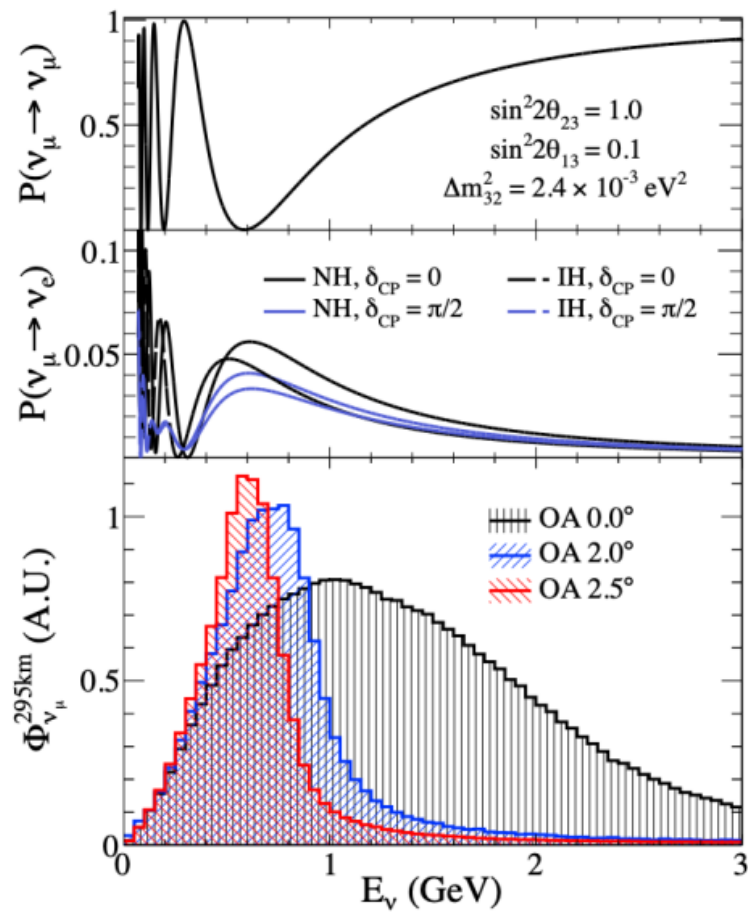


図 2.12 ニュートリノ振動の確率とエネルギーの関係と異なる off-axis 角におけるニュートリノフラックスの違い。 $\nu_\mu$  の残存確率 (上図),  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  の出現確率 (中図), off-axis 角ごとのニュートリノフラックス (下図)

## 第3章

# T2K-WAGASCI 実験

### 3.1 目的

T2K-WAGASCI 実験は J-PARC で生成されたニュートリノを、シンチレータを三次元格子状に組み立てた水標的検出器 WAGASCI と、プラスチック標的検出器 Proton Module で検出し、ニュートリノと水の反応断面積を精密測定する実験である。T2K 実験では前置検出器 ND280 と後置検出器スーパーカミオカンデのニュートリノ標的原子核の違いとから、ニュートリノ振動解析における系統誤差が生まれている。また、前置検出器 ND280 のアクセプタンスは前方方向のみであるのに対して、後置検出器スーパーカミオカンデは  $4\pi$  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 実験では水と炭素のニュートリノ反応断面積比を 3% の範囲内で測定し、ニュートリノと原子核の反応の理解を含め、T2K 実験及びニュートリノ反応を伴う実験の系統誤差を削減することを目指している。

### 3.2 検出器について

T2K-WAGASCI 実験では 4 種類 6 つの検出器を用いる。

- WAGASCI …… 水標的型検出器。ビーム上流と下流に 2 台設置されている。
- Proton Module …… 炭素標的型検出器
- Baby MIND …… ニュートリノ反応で生成されたミューオンを磁場で曲げることで電荷と運動量を測定する。
- Wall MRD …… ニュートリノ反応で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。ビーム方向に向かって左右に設置されている。

検出器群は前置検出器ホールの地下 2 階、off-axis 角  $1.6^\circ$  位置に設計されている。図に検出器群の配置を示す。ビーム上流から WAGASCI Upstream、Proton Module、WAGASCI Downstream、Baby MIND の順で並んでおり、Proton Module を挟む形で Wall MRD north と Wall MRD south が設置されている。すべての検出器は、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、波長変換ファイバーを用いて光検出器 MPPC で読み出しを行う。

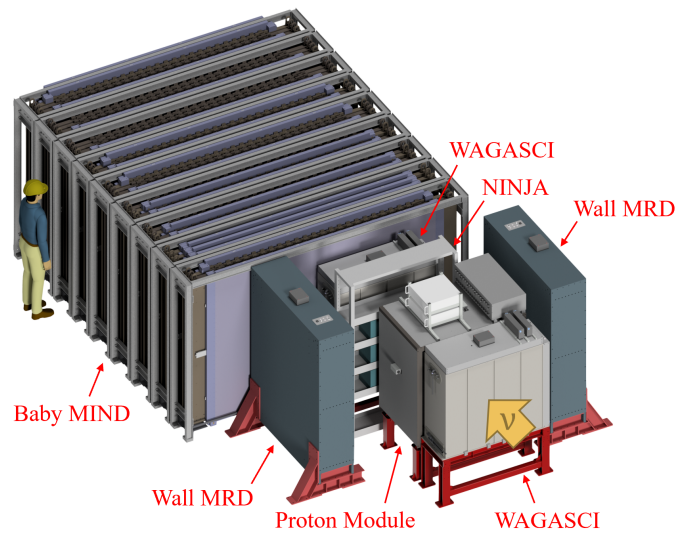


図 3.1 T2K-WAGASCI 実験の全体図

### 3.2.1 WAGASCI (WATER GRID AND SCINTILLATOR) 検出器

WAGASCI 検出器は水標的型検出器である。ビームの上流側に WAGASCI Upstream、下流側に WAGASCI Downstream の 2 台が設置されている。プラスチックシンチレータを三次元格子状に並べることで  $4\pi$  のアクセプタンスを実現している。図に概観を示す。大きさが  $5.0 \times 5.0 \times 2.5 \text{ cm}^3$  のグリッドシンチレータと、 $1020 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$  の平行シンチレータ XY 方向に交互に並べた平行シンチレータ層を重ねた構造である。グリッドシンチレータは 16 層、平行シンチレータは XY 方向にそれぞれ 8 層使用されており、合計で 1280 チャンネルを持つ。最小電離損失粒子 (MIP) に対するシンチレータの光量は 1.7 p.e (光電子数) である。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。

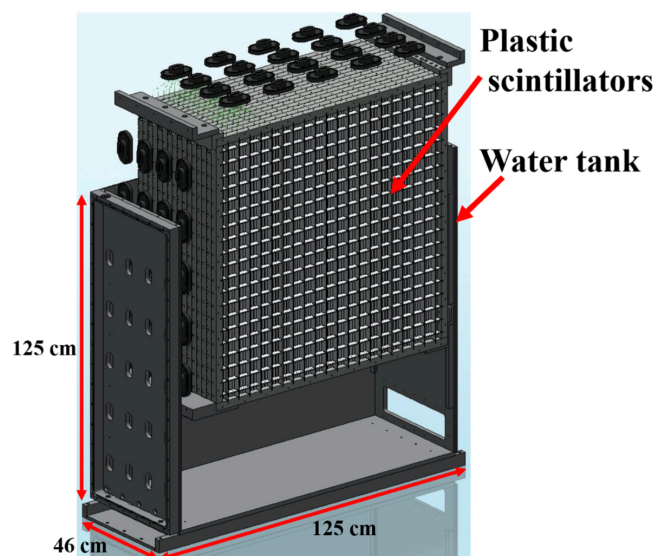


図 3.2 WAGASCI 検出器の概観図. プラスチックシンチレータと水タンクで構成されている

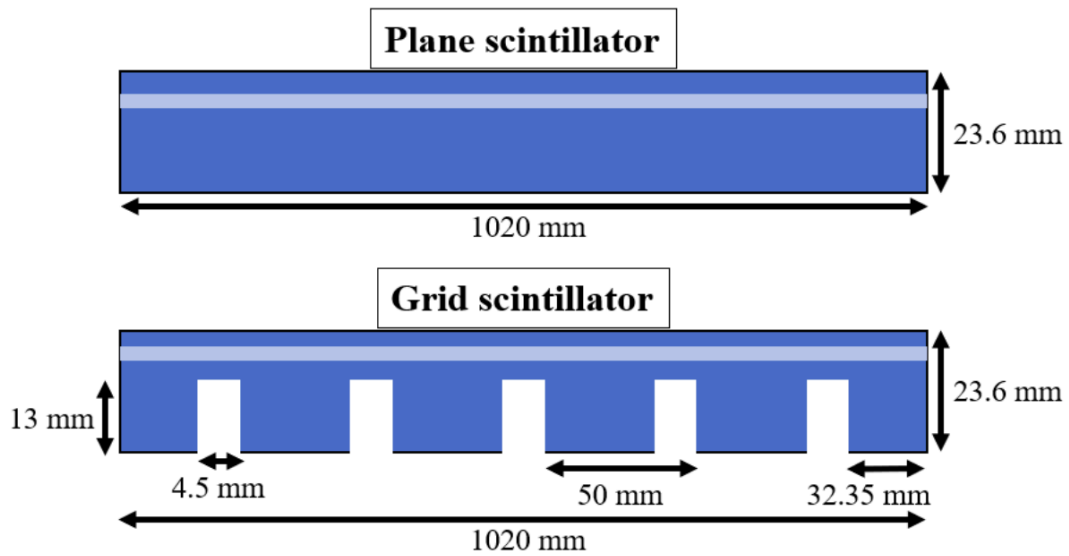


図 3.3 パラレルシンチレータ (上図) とグリッドシンチレータ (下図). 色の薄い部分に波長変換ファイバーを通す.

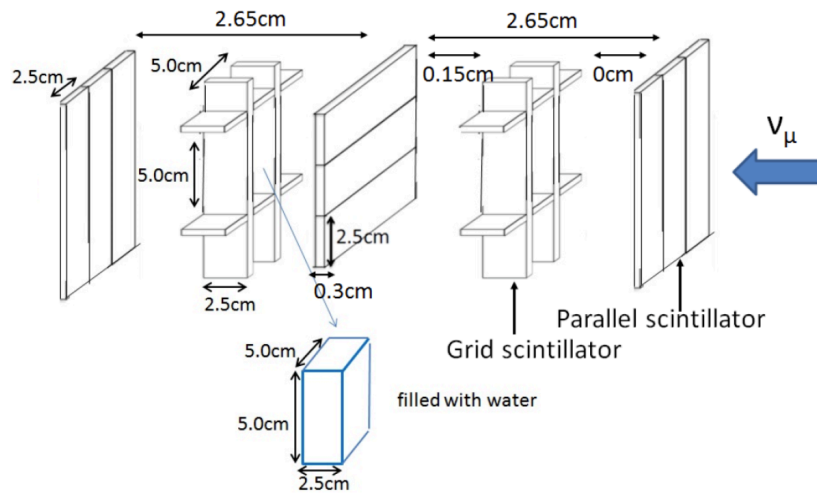


図 3.4 WAGASCI 検出器の構造

### 3.2.2 プロトンモジュール (Proton Module)

プロトンモジュールは炭素標的型検出器である。図??にプロトンモジュールの外観を示す。プラスチックシンチレータが重なった構造をしており、ニュートリノ反応で生成された陽子の飛跡を捉えるために開発された。プロトンモジュールは 2 種類のシンチレータが使用されており、それぞれ INGRID タイプと SciBar タイプと呼ばれている (図??)。合計で 1204 チャンネルを持つ。MIP に対するシンチレータの光量の平均は、INGRID タイプが 28.3 p.e.、SciBar タイプが 57.2 p.e. となっている []。

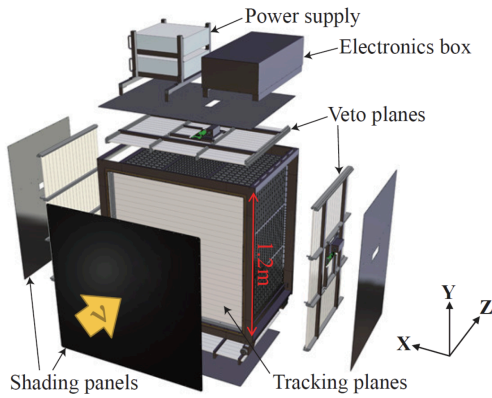


図 3.5 プロトンモジュールの概観図

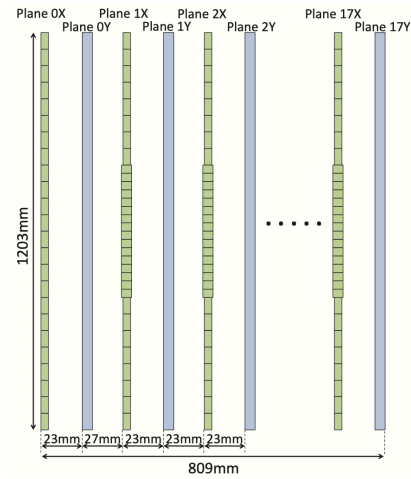


図 3.6 トラッキングプレーンの構造

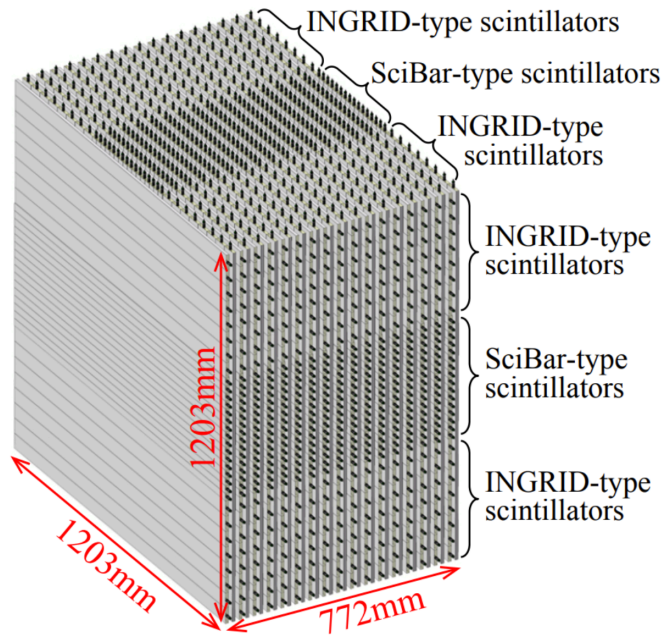


図 3.7 プロトンモジュールのシンチレータの配置図

### 3.2.3 Baby MIND

Baby MIND (Magnetized Iron Neutrino Detector) は鉄コア磁石を利用し 1.5 T の磁場を発生させることで、ニュートリノ反応で生成されたミュオンの飛跡を曲げ、電荷と運動量を測定する検出器である。Baby MIND の外観を図??に示す。Baby MIND は 18 層の Detector Module と 33 層の Magnet Module から構成されている。

### 3.2.4 Detector Module

Detector Module の構成要素は主に、プラスチックシンチレータと波長変換ファイバーと MPPC である。シンチレータをビーム軸を横切るように並べた X 層と、鉛直方向に並べられた Y 層の 2 種類がある。

X 層のシンチレータは 210 mm × 1950 mm × 7.5 mm が 16 枚、Y 層のシンチレータは 3000 mm × 31 mm × 7.5 mm が 95 枚である。Baby MIND 中の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。

### 3.2.5 Magnet Module

Magnet Module は鉄プレートにコイルを巻きつけた構造をしている。鉄プレートの大きさは 33 m × 2 m × 0.03 m である。磁場が外部に漏れないように作られている。

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  $\bar{\nu}$  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

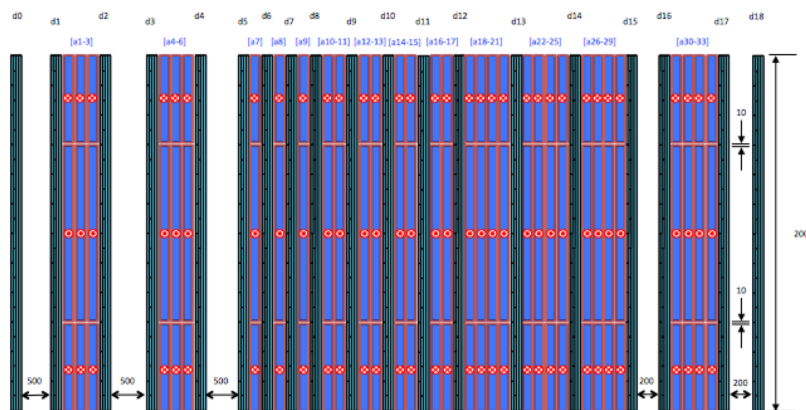


図 3.9 Baby MIND の内部構造



## 第4章

# 飛跡再構成アルゴリズムの性能評価

T2K-WAGASCI 実験において、プラスチック標的と水標的でニュートリノの断面積を測定するには検出器で記録された全ての信号から飛跡を正しく再構成することが必要である。本研究では現在 ND280 で使われている飛跡再構成アルゴリズムのパラメータ調整と性能評価を行った。

### 4.1 T2K-WAGASCI 実験における飛跡再構成アルゴリズム

#### 4.1.1 プリム法

プリム法は最小全域木問題を効率的に解くグラフ理論におけるアルゴリズムである。最小全域木 (Minimum Spanning Tree : MST) とはグラフを構成する辺の重みの総和が最小になる全域木である図 4.1。木とは連結かつ閉路がないグラフである。

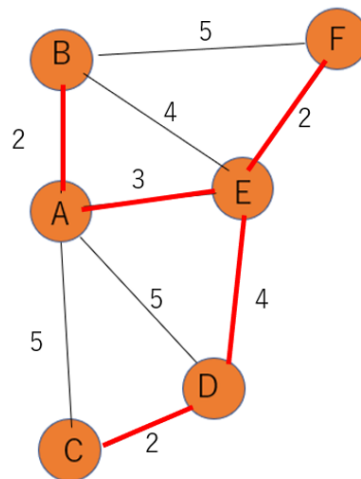


図 4.1 Minimum Spanning Tree の例。

頂点の間に書かれている数字が重み、赤色の直線が木であり、赤色の直線全体が最小全域木である。

プリム法は複数の点が存在しそれを繋ぐ辺に重みを加えた時にコストが最小になるように辺を繋いでいく。T2K 実験では点を検出器で捕らえたヒット情報、重みをヒット同士の距離に対応させることでプリム法を用いて飛跡の再構成を行っている。

プリム法のステップ

1. スタートの点を任意に1つ決める。
2. スタートの点からたどれる辺の中で一番重みが小さい辺を追加する。
3. 次に追加した辺につながっている全ての点からたどれる辺かつ追加しても閉路とならないような辺の中から一番重みが小さい辺を追加する。
4. 追加できる辺がなくなるまで続け最小全域木が作られると終了。

以下にプリム法の再構成の例を示す。

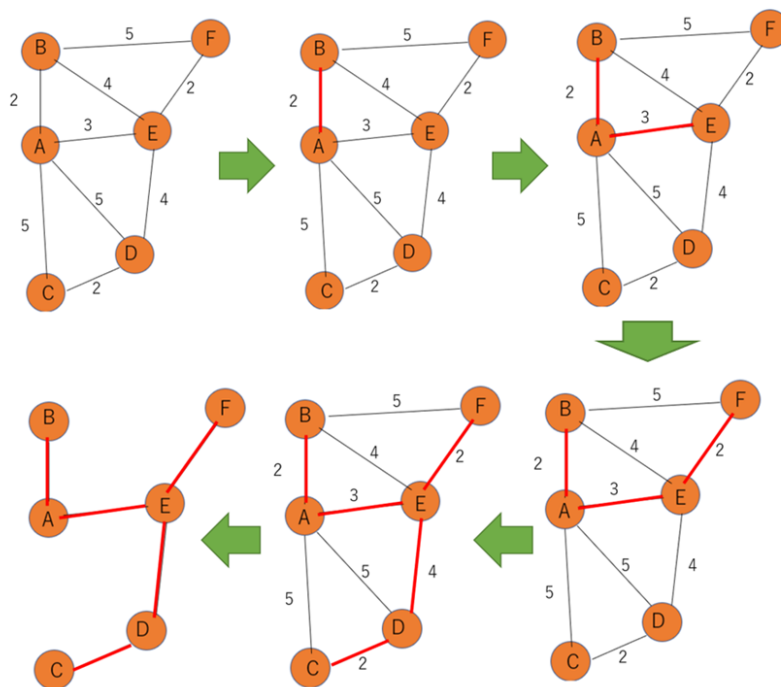


図 4.2 Minimum Spanning Tree の作成。

オレンジ色の点の間の数字を重みとする。左上図で任意の点を A とする。A からの重みが一番小さい点は B なので繋げる (中上図)。次に赤色の Tree からの重みが一番小さい点は E なので繋げる (右上図)。同様に F を繋げる (右下図)。次に Tree からの重みが一番小さいのは B と D だが、B を繋げると AEB の閉路ができてしまうので D を繋げる。同様に C を繋げる (中下図)。つなげる点が無くなれば終了 (左下図)。

#### 4.1.2 T2K-WAGASCI 実験における飛跡の再構成

飛跡の再構成は大きく分けて Clustering、Matching、Vertexing、Tracking の 4 つのステップで行う。

- Clustering

プリム法を用いて、ヒットを MST になるように繋げて、各検出器の top view と side view において線状の集合体である cluster をつくる。

- Matching

反応点のある検出器と Muon Range Detector に存在する cluster が同一粒子によるものかを判断し cluster を合体させる。Matching 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。

- $|(\text{Matchingcluster の 始点の } z \text{ 座標の値}) - (\text{その他のクラスター群の始点の } z \text{ 座標の値})| \leq \text{閾値}$
- $|(\text{Matchingcluster の 終点の } z \text{ 座標の値}) - (\text{その他のクラスター群の終点の } z \text{ 座標の値})| \leq \text{閾値}$

また、反応点の座標は matching cluster の z 座標の最小値とする。

● Vertexing

Matching cluster の始点が存在する検出器を vertex module とする。vertex module のなかの cluster から side view、top view で vertex を探す。その後 side view、top view の中の vertex と stop position をみて、matching cluster 同士をペアにして 3D cluster を作る。

● tracking

3D cluster の中から Track をつくる。

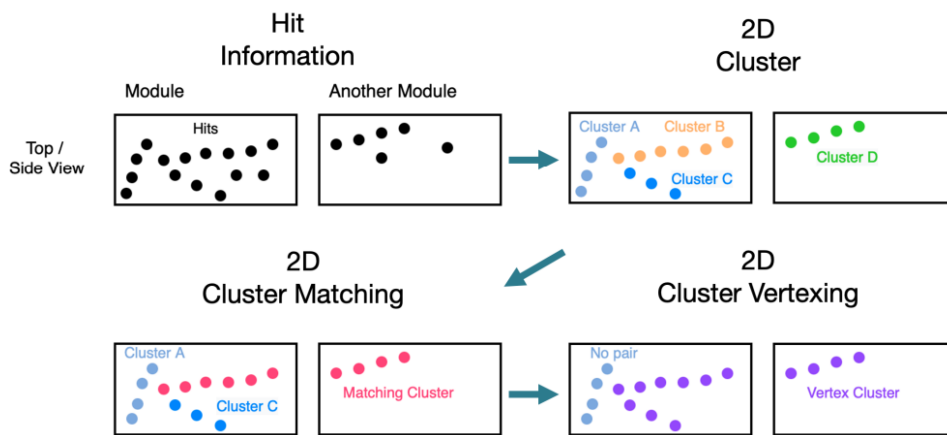


図 4.3 クラスター群を統合する流れのイメージ図。左上図は、飛跡再構成前の状態を表す。右上図は、各検出器で飛跡再構成を行なった後の状態を表す。左下図は、各クラスター群が同一粒子によるものかを計算した後の状態を表す。右下図は、各クラスター群が同一の反応点によるものかを計算した後の状態を表す。

### 4.1.3 clustering の手順

MST を用いたプリム法では 6 つのステップに分けて飛跡の clustering を行う。

下図 4.4 のようなイベントがあったとする。ステップ 1 から 3 では再構成を行う前にノイズや関係のないヒットの除去を行う。

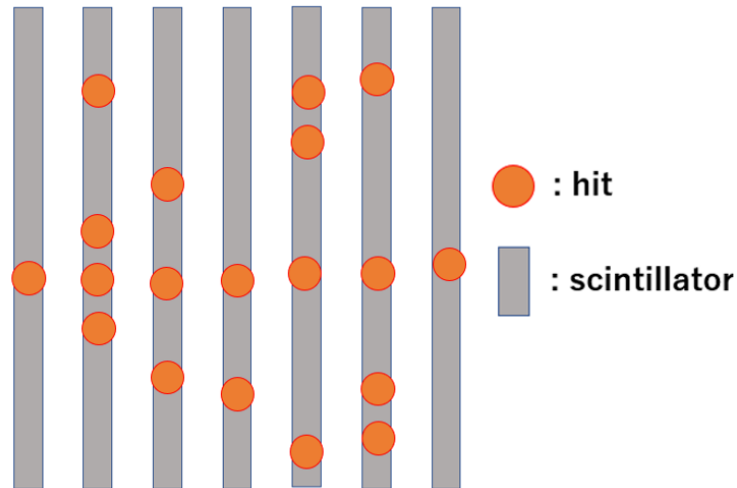


図 4.4 イベントディスプレイ

#### 1. Clean hits

あるしきい値以下の光量を持つヒットを取り除く。

#### 2. Time slice

ある時間しきい値によりイベントを分ける。

#### 3. Cluster hits

お互いに密接なヒットを 1 つにまとめる。

ノイズや関係のないヒットの除去が終わると以下の図 4.5 のようになる。

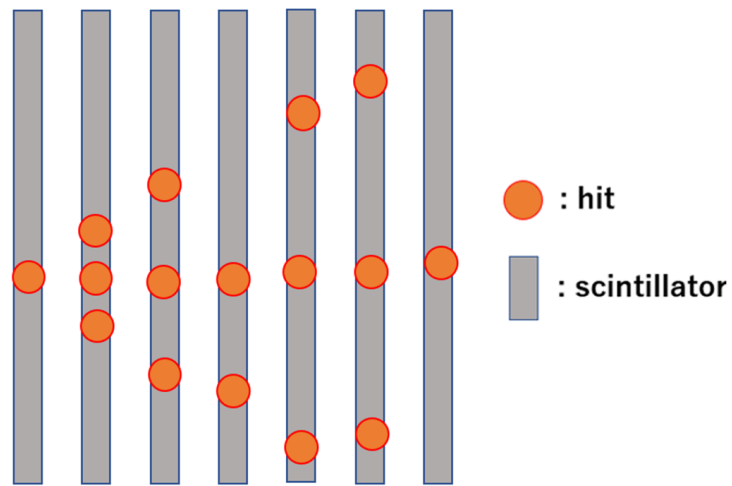


図 4.5 再構成に関係ないヒットを取り除いた時のイベントディスプレイ

#### 4. Minimum spanning tree clustering

このステップでは、プリム法の手順でヒットをつなげて行き、線状の集合体である cluster をつくる図 4.6。

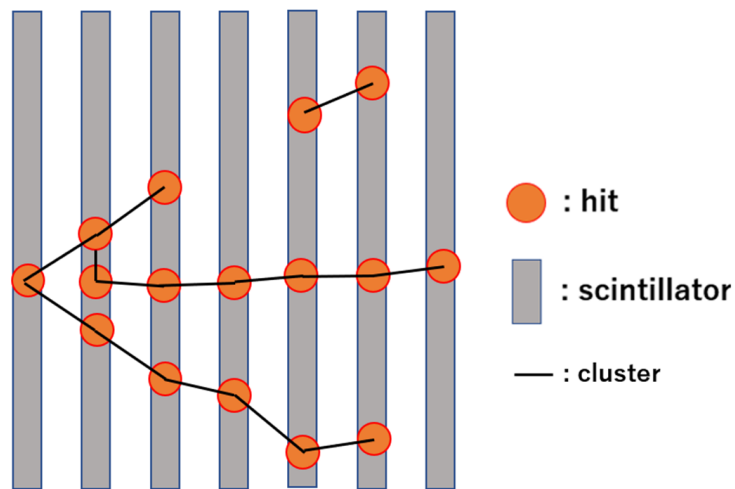


図 4.6 Minimum Spanning Tree のイベントディスプレイ

#### 5. Find kinks

このステップでは Minimum spanning tree clustering でできた cluster をスキャンし、ねじれを持つ cluster を見つけスプリットさせる。

図 4.7 では赤色、緑色、青色、黄色、黒色の 5 つの cluster にスプリットされている。

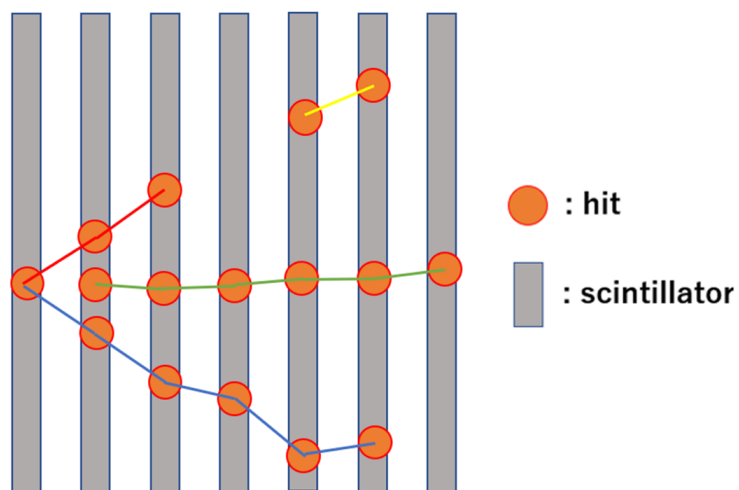


図 4.7 cluster のイベントディスプレイ

### 6. Merge delta cluster

小さな cluster をメインの cluster に合体させる。  
再構成に失敗している cluster を除去する図 4.8。

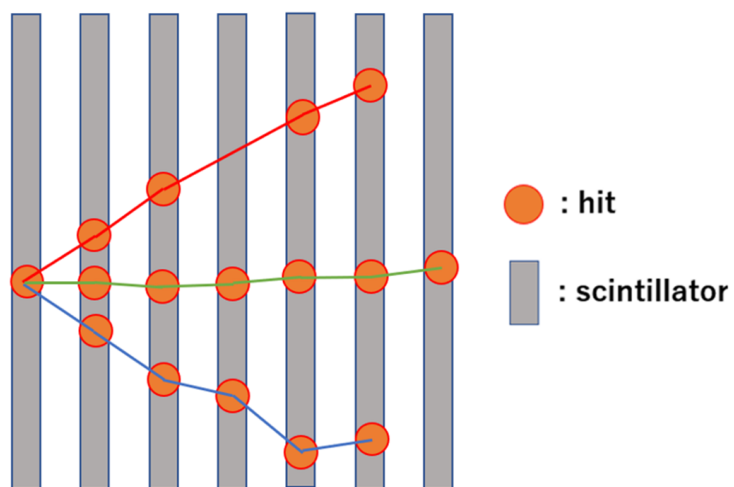


図 4.8 再構成後のイベントディスプレイ

#### 4.1.4 MST のパラメータ

今回チューニングを行ったパラメータは合計 20 種類ある。

##### 0. Ghost hit threshold (Clean hits)

このパラメータは光量の閾値である。T2K-WAGASCI 実験では各検出器の光量の閾値を 2.5PEU(Photon Equivalent Unit) に設定しているためこのパラメータの値も 2.5 に設定した。

##### 1. Time Slice (Time slice)

このステップでのパラメータはイベントを分ける時間の閾値である。下図のようにパラメータの単位を ns とし 250 と設定した。

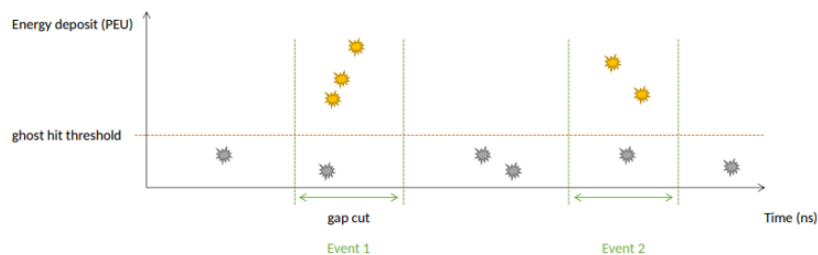


図 4.9 Clean hits と Time slice

##### 2. Max Distance (Cluster hits)

ヒット同士を一つにまとめる最大距離を決めるパラメータで 4.10。このパラメータ以下の距離にあるヒット同士は繋げない。それぞれのヒットは Max Distance 内のヒットのみ繋ぐことができる。

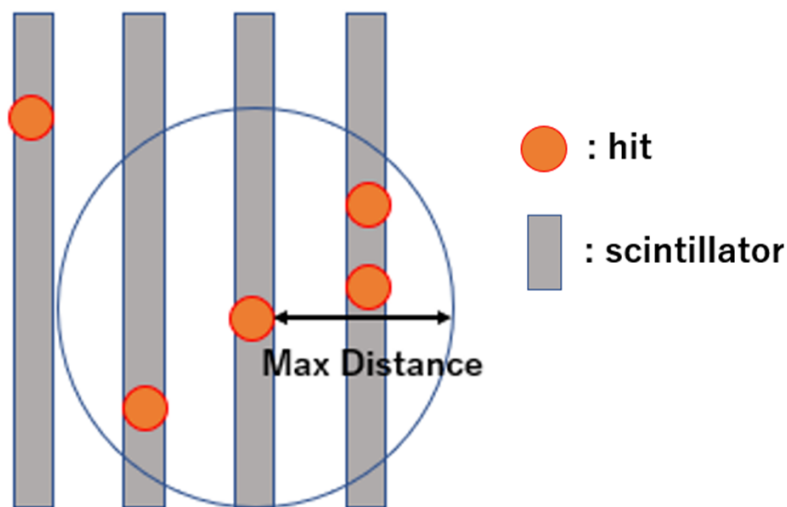


図 4.10 Max Distance の説明

### 3. Minimum Points(Cluster hits)

cluster を構成するのに必要な Max Distance 内のヒットの最小値を決めるパラメータ

### 4. Minimum Spanning Tree Minimum Hits

このパラメータの値以下のヒット数しか持たない cluster は以降のステップに進めない。

### 5. Minimum Spanning Tree Oversize Cut

ヒットが N 個あるとすると、cluster を作るには、任意のヒットに対して N-1 個の距離を計算する必要がある。その後距離が最小であったヒットをつなげて Tree をつくり、Tree に存在しているヒットから残りの (N-2) 個の距離を計算する。これを繰り返すことから  $O(N^2)$  回の計算が必要になる。ヒット数が多い場合、計算量が増え、実装に非常に時間がかかってしまう。ヒット数がこのパラメータの値よりも大きい場合そのイベントをスキップする。

### 6. Scan Length

図 4.11 のように、キंकをスキャンする長さ (ヒットの数)。クラスター全体が順次スキャンされていく。cluster のヒット数がこのパラメータ未満の場合、cluster を構成するヒット数に設定される。fScanLength は、fMinNumHitsToSplit よりも厳密に大きくする必要があることに注意してください。

### 7. Kink Threshold

図 4.11 のように Scan Length 内の Z 座標が最小の点を A、最大の点を B とする。同様に X 座標が最小の点を D とし、D から直線 AB に垂線を引き、AB の交点を C とする。

$$kinkthreshold < |\overline{CD}| = |\overline{AD} - \overline{AC}| \quad (4.1)$$

を満たすとき、キंकがあるとして、その cluster をスプリットさせる。

### 8. Length Fraction

図 4.11 のように、cluster の Z 座標が最小の点を P、最大の点を Q とする。

$$LengthFraction < \left| \frac{\overline{CD}}{\overline{PQ}} \right| \quad (4.2)$$

を満たすとき、キंकがあるとして、その cluster をスプリットさせる。

### 9. Minimum Hits To Split

このパラメータの値未満のヒット数で構成されている cluster は分割の対象と見なさない。



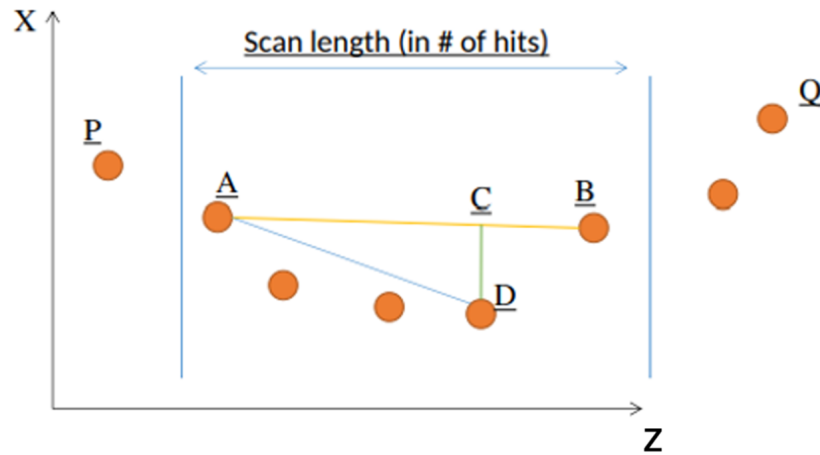


図 4.11 Kink の説明

#### 10. Max Line Hits

cluster を合体させるときに、cluster の両端で line が一致しているかどうかを確認する。このパラメータはその際に考慮するヒットの最大数。

#### 11. Minimum Track Hits

このパラメータは線状の集合体を cluster として認定するための最小ヒット数。

#### 12. Chi2 Threshold

隣接する cluster を線形フィットし、フィットの Chi2 がこの値よりも小さい場合その cluster 同士をマージさせる。

#### 13. Charge Per Hit

cluster 内のヒットあたりの最小平均光量。このパラメータの値を下回る cluster はマージの対象とは見なされない。マージはしないが後でステップで利用する。

#### 14. Merge Distance Cut

2つの cluster の距離がこの値よりも大きい場合、マージの対象とは見なさない。

#### 15. Minimum Follow Distance Cut

cluster の端から次の cluster の端までの距離の最小値。cluster がかぶっている場合はマイナスの値となる。この値よりも小さい場合マージの対象とは見なさない。

#### 16. Follow Cosine Cut

下図 4.12 の  $\theta$  がこのパラメータよりも大きい場合、Cluster1 と 2 はマージの対象とは見なさない。

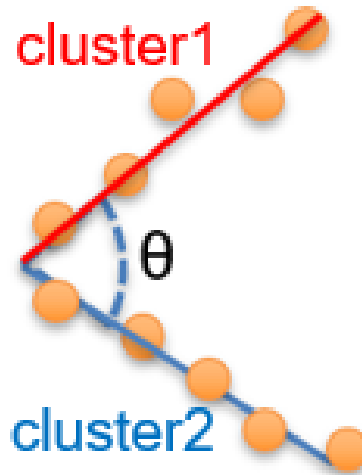


図 4.12 Cosine Cut の説明

#### 17. Goodness Cut

2つの cluster の位置の差と、角度の差の誤差を計算し、その和がこの値よりも小さければどんな場合でもマージする。

#### 18. Matched Cosine Cut

Goodness Cut の条件でマージされた cluster の中でお互いに密接している 2つの cluster の角度の差がこの値よりも大きい場合マージを解除する。

#### 19. Matched Position Cut

角度の一致の条件を満たしている cluster 同士の距離がこの値よりも小さい場合マージする。

## 4.2 評価方法

T2K-WAGASCI 実験の解析ではパイオンを伴わない荷電カレント反応 ( $CC0\pi$ ) かパイオンを一つ伴う荷電カレント反応 ( $CC1\pi$ ) の反応を見ようとしており、その区別は主にトラック数で判断する。 $cc0\pi$  は muon-like なトラックが 1本で  $CC1\pi$  は muon-like なトラックが 2本であり、これらに proton-like なトラックが混じる。トラック数をきれいに再現することが重要であり、シミュレーションで得られたトラックと再構成したトラックの数をイベント毎に確認した。

T2K-WAGASCI 実験では角度と運動量の微分断面積も測定しようとしており、角度の再構成精度も重要である。そのことから clustering だけで判断するのではなく、track matching を行った上で角度の情報を求め、角度分解能を見ながらパラメータの調整を行う必要がある。

本研究では 3つの評価方法でパラメータのチューニングを行った。

1つ目は、まず大まかなパラメータの値を決定するためにシミュレーションで得られたヒットとの一致具合をみてパラメータの調整を行った。

2つ目は、トラック数の再現性を高めるように、track vertexing を行った後、vertex module 内で再構成

された cluster の数を測定し、シミュレーションと一致するようにパラメータの調整を行った。サンプルを作る段階で 2track のイベントを集め、2 本に再現できるようにした。

3 つ目は、角度の再現性を高めるように tracking を行った後、シミュレーションとの角度のズレを測定し、ズレが小さくなるようにパラメータの調整を行った。

#### 4.2.1 シミュレーションのヒットとの一致具合を高めるようにチューニング

Reconstruction efficiency を定義し、その値が高くなるようにパラメータの調整を行なった。図のようにモンテカルロシミュレーションで得られた track に含まれるヒットを MC ヒット、再構成された cluster に含まれるヒットを Reconstruction hit とする。

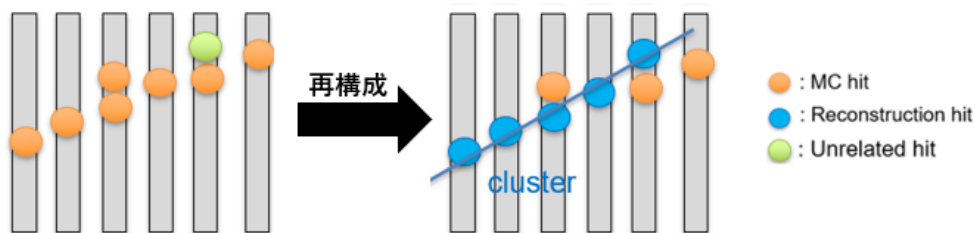


図 4.13 MC Hit と Reconstructiton Hit

Reconstruction ヒットのうち、MC ヒットと一致しているものを Match ヒットとする (4.14)。

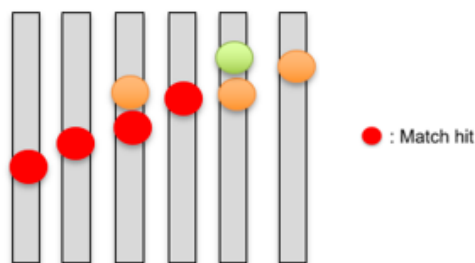


図 4.14 Match Hit

Match ヒットが MC ヒットの 7 割以上かつ Match ヒットが reconstruction ヒットの 7 割以上なら cluster を Reconstruction track とする。

Reconstruction efficiency = Reconstruction track の数/MC track の数

パラメータをある範囲で 50 分割しそれぞれの値での Reconstruction efficiency の値を side view、top view でそれぞれ測定した。

#### 4.2.2 トラックの数によるチューニング

飛跡再構成の vertexing を行った後、検出器内にある cluster の数を測定し、シミュレーションで得られた数と一致するようにチューニングを行う。tracking を行う前なので、再構成された飛跡は track ではなく、cluster なのだが、イメージを持ちやすくするために、トラックの数によるチューニングと言うこ

とにする。反応点がある検出器を vertex module とし、vertex module 内の cluster の数を測定。トラック数が 2 本のサンプルを用いて再構成された cluster の数が 2 本のイベントの割合が高くなるように調整を行う。

### 4.2.3 角度を使ったチューニング

Target Module と Muon Range Detector の両方に存在するロングトラックの角度情報を取り出し、モンテカルロシミュレーションで得られたトラックとの角度の差をプロットする。そのヒストグラムをガウス分布でフィットさせる図 4.15。パラメータの値ごとに、ガウシアン分布の Mean と RMS を記録し、Mean と RMS が小さくなるようにチューニングを行う。完璧に再構成されているならば、Mean と RMS は 0 になるはずである。

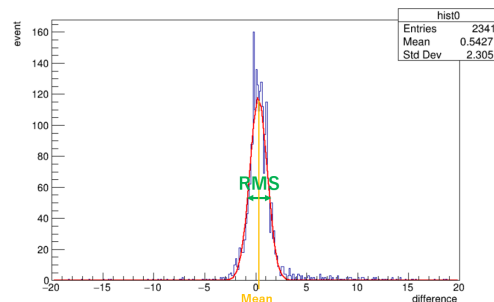


図 4.15 角度の差をヒストグラムにし、ガウス分布をフィットさせた時の Mean と RMS

## 4.3 チューニングの準備

イベントディスプレイを載せる予定。本研究は、シミュレーションでニュートリノイベントのサンプルを作成し、パラメータの調整を行った。モンテカルロシミュレーションを用い、ニュートリノビームの生成から、WAGASCI 検出器でのニュートリノ反応までをシミュレートした。J-PARC で生成された陽子ビームが炭素標的に衝突する反応は FLUKA、ニュートリノビームを生成する過程は JNUBEAM、ニュートリノの検出器での相互作用は NEUT、ニュートリノ相互作用で生成された粒子の検出器での反応は GEANT4 を用いた (??図作成中)。

### 4.3.1 FLUKA について

FLUKA とは、素粒子物理学の統合的なモンテカルロシミュレーションパッケージの一つである。ハドロン反応モデルを用いて、陽子ビームと炭素標的の衝突反応をシミュレートする。

### 4.3.2 JNUBEAM について

JNUBEAM とは、T2K 実験のニュートリノフラックスを予測するために GEANT3 をベースとして開発されたプログラムである。FLUKA によって生成されたハドロンを追跡し、ニュートリノへの崩壊をシミュレートする。ニュートリノのフラックス、運動量、エネルギー、角度などを予測し、指定した領域におけるニュートリノフラックスのファイルを出力する。

### 4.3.3 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。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 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。

### 4.3.4 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。GEANT4 の中に T2K-WAGASCI 検出器群 が組み込まれている

### 4.3.5 sample の条件

T2K-WAGASCI 実験では、パイオンを伴わないもしくは 1 つ伴う荷電カレント反応のイベントを観測しようとしている。それらのトラックの数は 1 か 2 本であり、それらをより再構成できるようにパラメータの調整を行うべきである。再構成が可能なイベントを集めるために以下の条件を加えた。

- トラックの数が 2 本
- secondary track 図 4.16 のヒット数が primary track のヒット数の 70 パーセント以下
- top,side view のヒット数がそれぞれ 3 以上 50 未満
- ニュートリノの反応点が WAGASCI Upstream

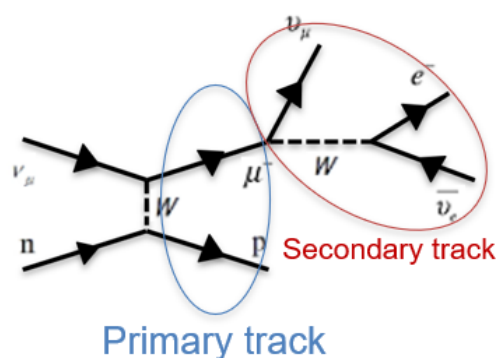


図 4.16 Primary track と Secondary track の説明

## 4.4 結果

### 4.4.1 シミュレーションのヒットとの一致具合を高めるようにチューニングした結果

parameter をある範囲で 50 分割し、各値での Reconstruction efficiency を測定した。(図 4.17、図 4.18、図 4.19) 左図が side view、右図が top view である。約 8000 イベントを用いた。

- Ghost Hit Threshold

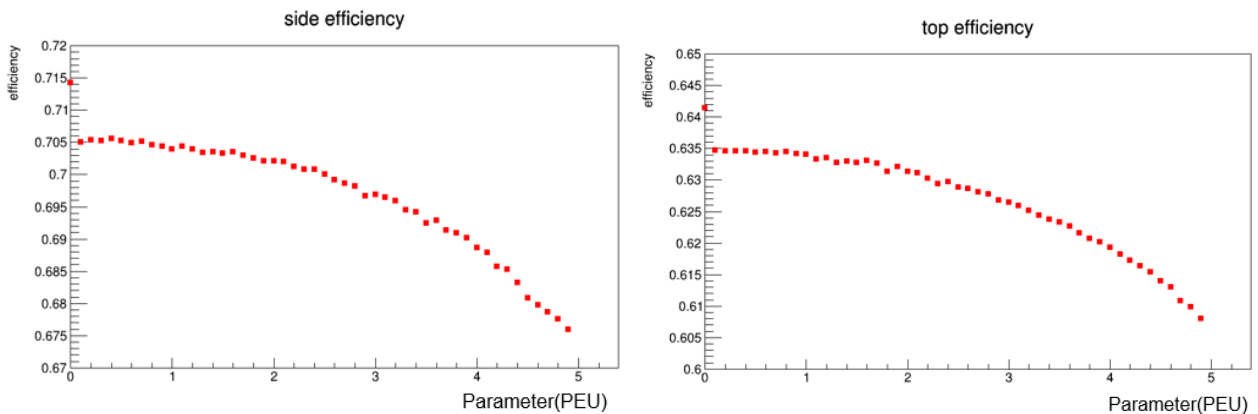


図 4.17 Ghost Hit Threshold を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

しきい値を高くするほど Reconstruction efficiency は下がっている。T2K-WAGASCI 実験では各検出器の光量の閾値を 2.5PEU(Photon Equivalent Unit) に設定しているためこのパラメータの値も 2.5 に設定した。

- Time Slice

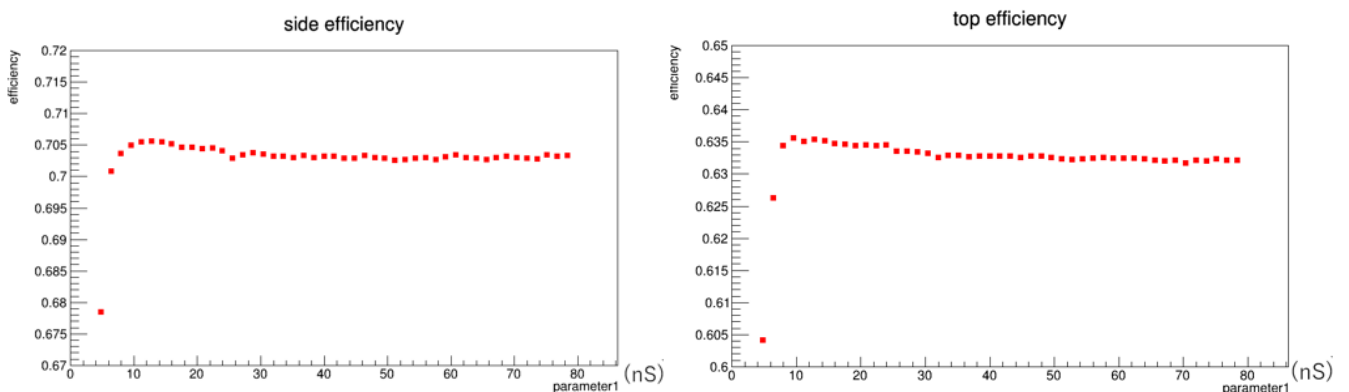


図 4.18 Time Slice を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

- Max Distance

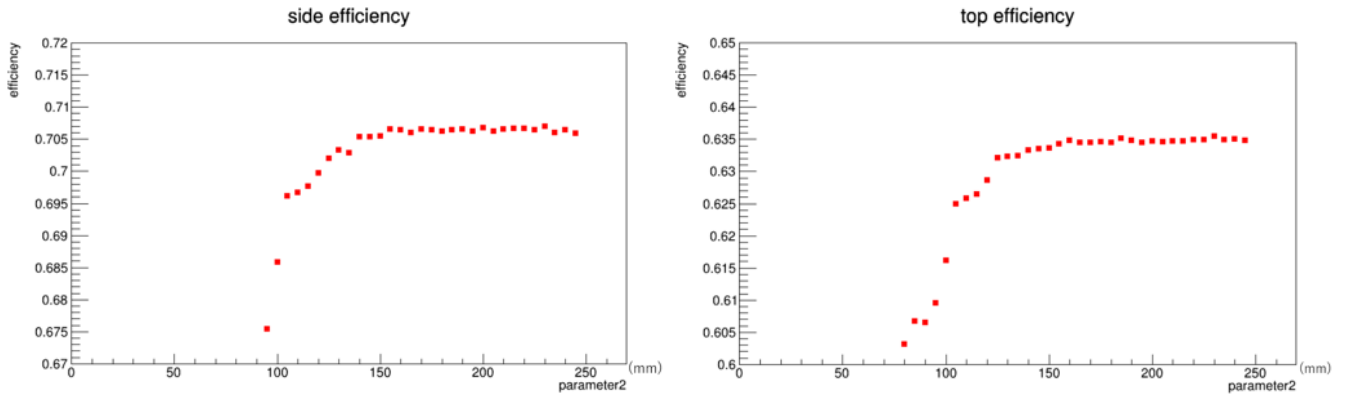


図 4.19 Max Distance を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

WAGASCI Upstream の平行シンチレータの間隔は 5.0 cm である。Reconstruction efficiency は、平行シンチレータの間隔 2 個分である 10.0 cm から急増し、その後一定となっている。

- Minimum Points

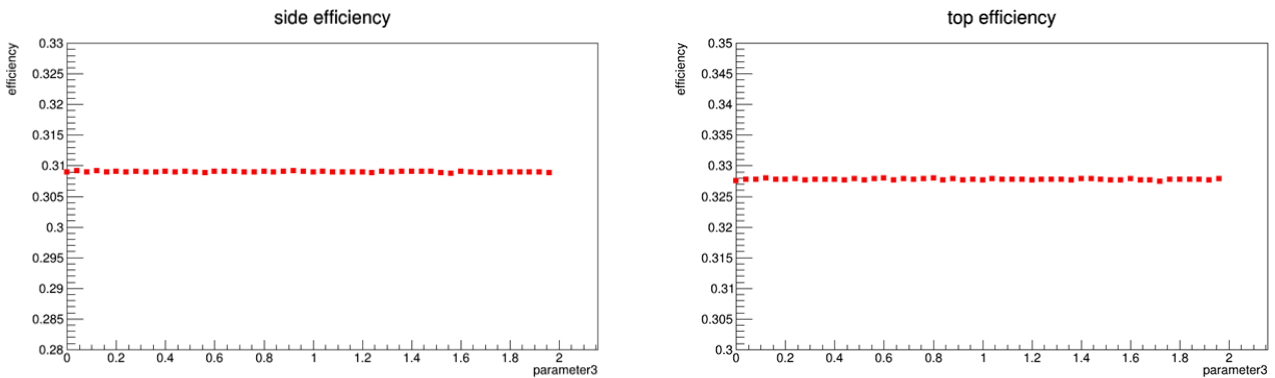


図 4.20 Minimum Points を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

- Minimum Spanning Tree Oversize Cut

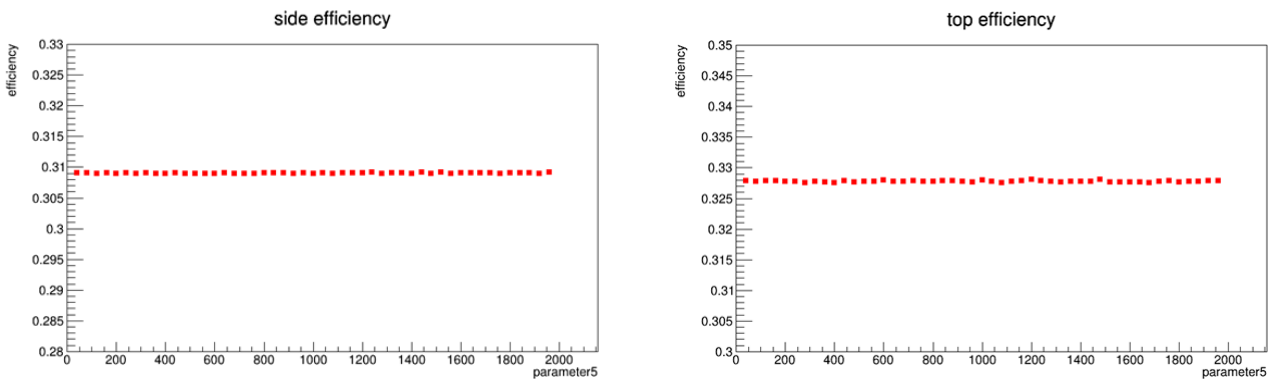


図 4.21 Minimum Spanning Tree Oversize Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

reconstruction efficiency は、2000 まで一定である。2000 以上のヒットがあるイベントはないの

でこのパラメータの調整はこれ以上は行わない。

- Scan Length

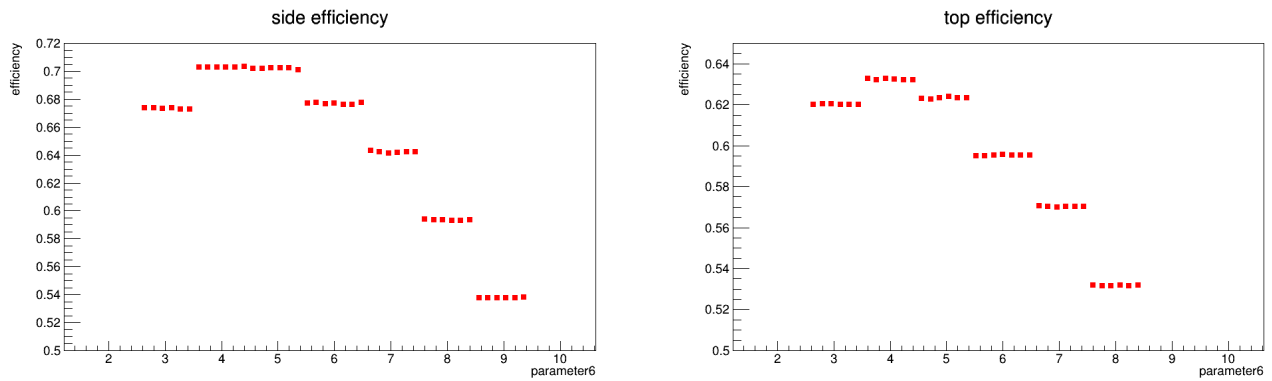


図 4.22 Scan Length を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

Kink を判断するときのヒット数を示したパラメータである。Kink を判断するには 3 以上は必要であることは自明であり、4 のところで最大になっている。

- Kink Threshold (cm)

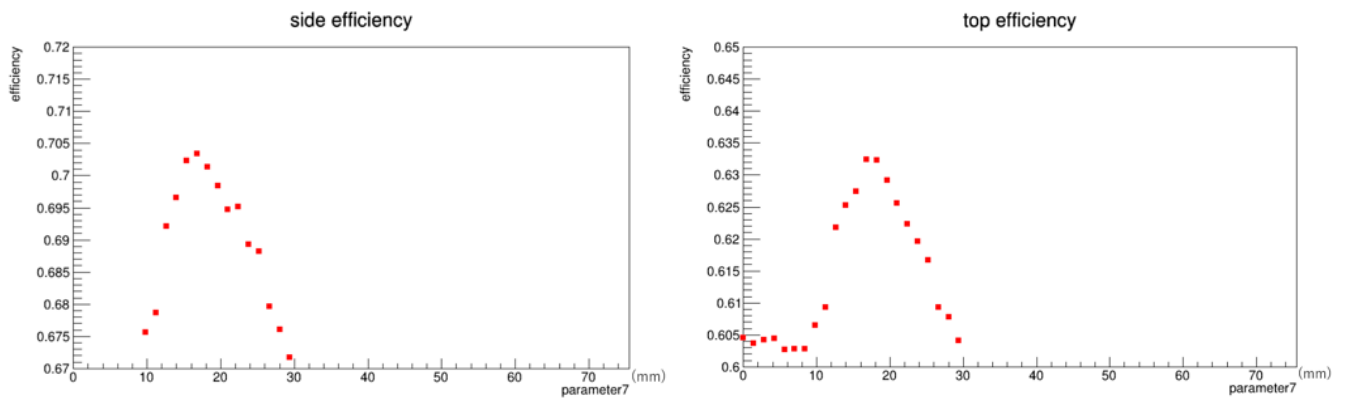


図 4.23 Kink Threshold を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

Kink と判断するときの閾値は 17cm あたりで最大になっている。

- Length Fraction



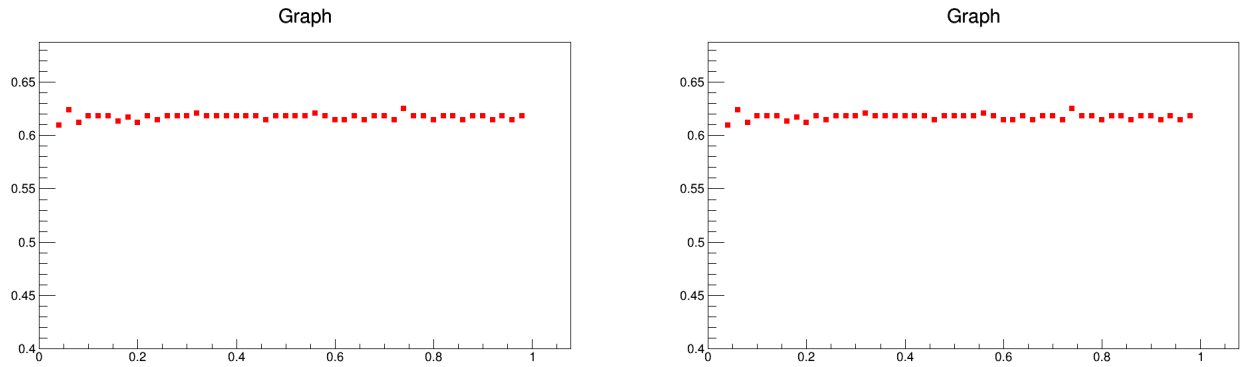


図 4.24 Length Fraction を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

- Max Line Hits

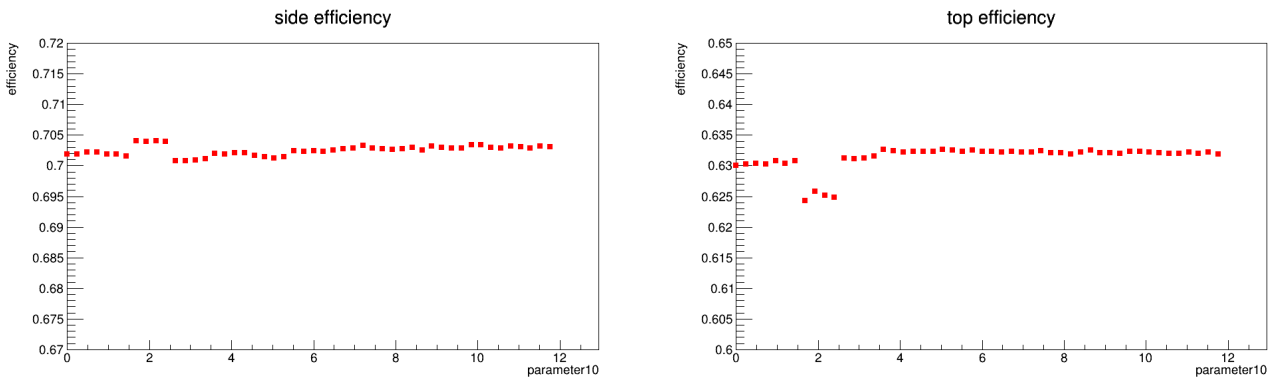


図 4.25 Max Line Hits を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

Max Line Hits が 2 の時、side veiw では Reconstuction efficiency が上がり、tip view では下がっている。これに関しては現在原因を調査中である。

- Minimum Track Hits

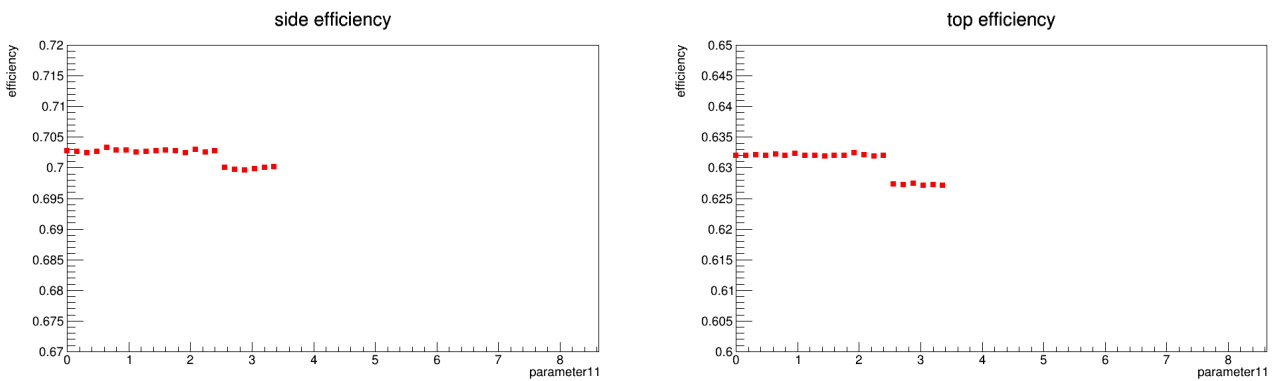


図 4.26 Minimum Track Hits を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化

このパラメータの値が 4 以上で Reconstuction efficiency は急激に減少している。このパラメータの値以下のヒットを持つ cluster は cluster として扱わない。つまりこのパラメータの値が 4

のとき、3つ以下のヒットで構成されている cluster を cluster として扱わず、消去してしまう。Reconstruction efficiency が急激に減少している理由は、proton-like なトラックは短く3つのヒットから構成されている場合があり、それが消去されている為であると考えられる。

- Chi2 Threshold

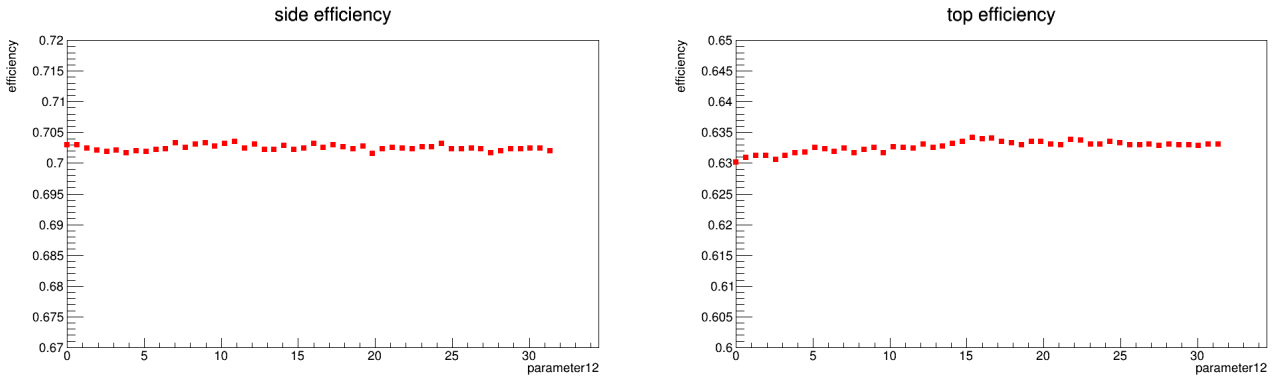


図 4.27 Chi2 Threshold を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

- Charge Per Hit (PEU)

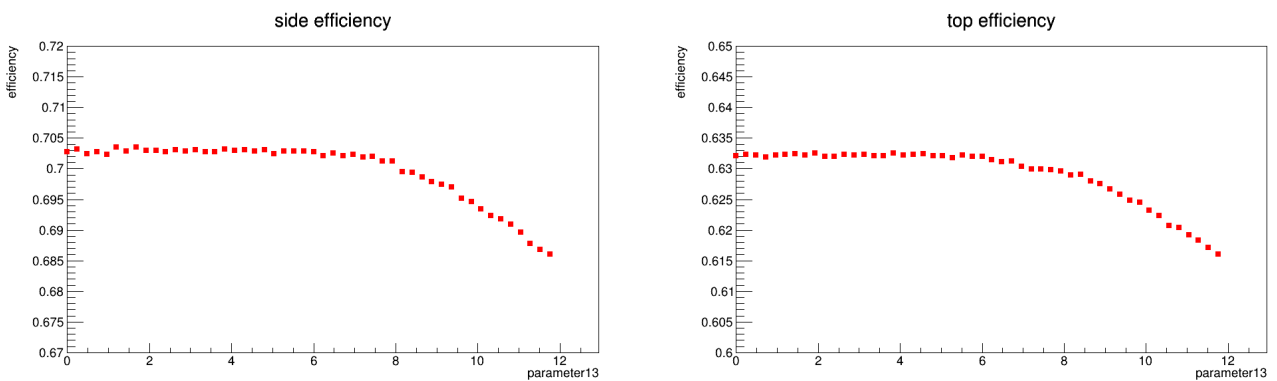


図 4.28 Charge Per Hit を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

- Merge Distance Cut (mm)

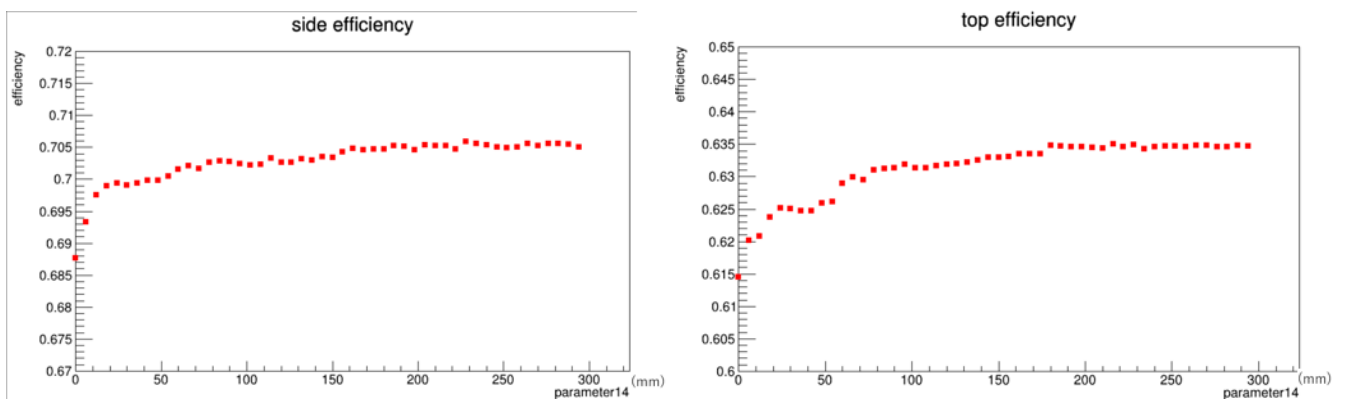


図 4.29 Merge Distance Cut を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

- Minimum Follow Distance Cut (mm)

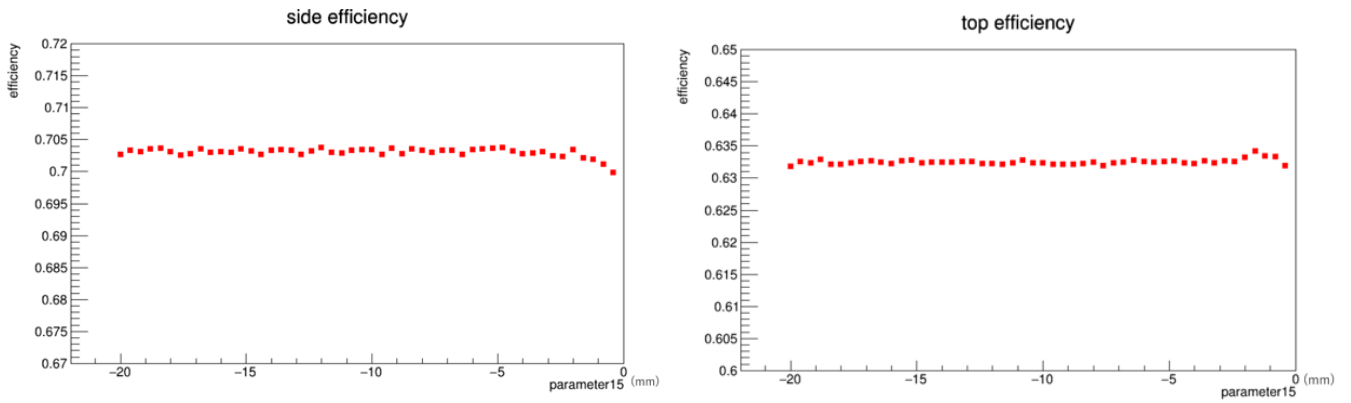


図 4.30 Minimum Follow Distance Cut を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

- Follow Cosine Cut (rad)

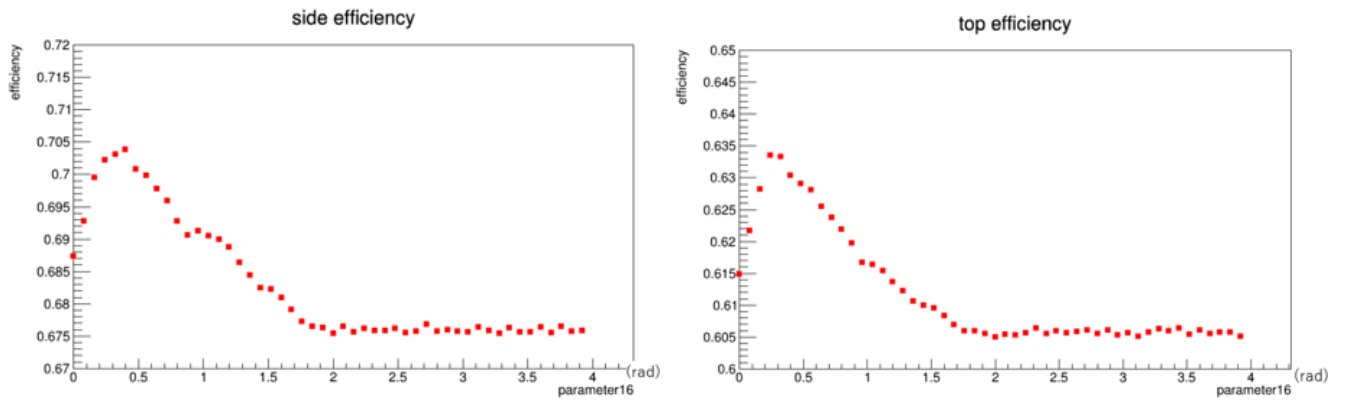


図 4.31 Follow Cosine Cut を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

35 度あたりで Reconstruction efficiency は最大になっている。

- Goodness Cut

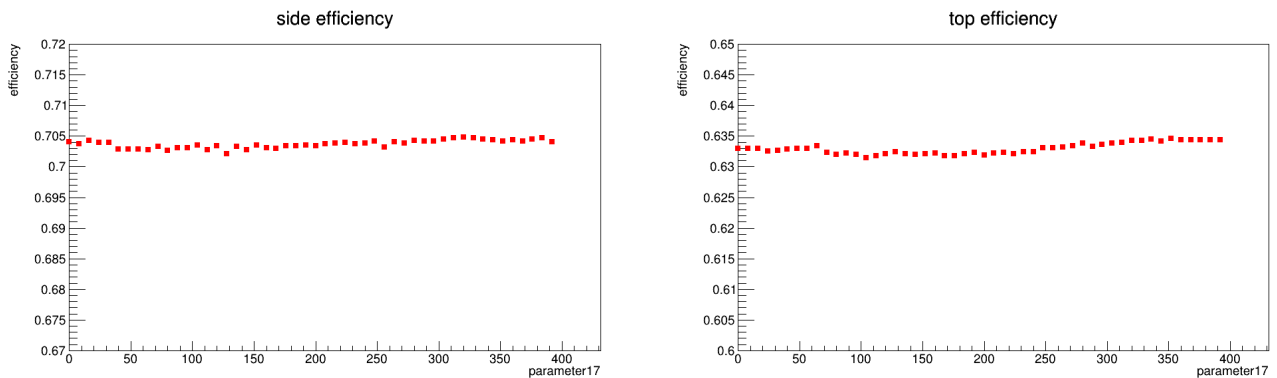


図 4.32 Goodness Cut を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

- Matched Cosine Cut (rad)

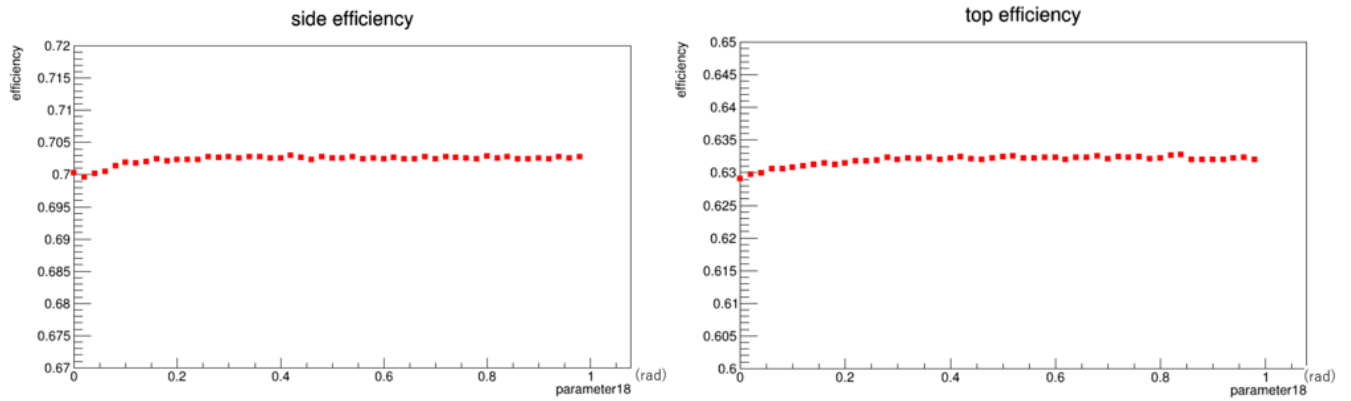


図 4.33 Matched Cosine Cut を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

- Merged Position Cut (mm)

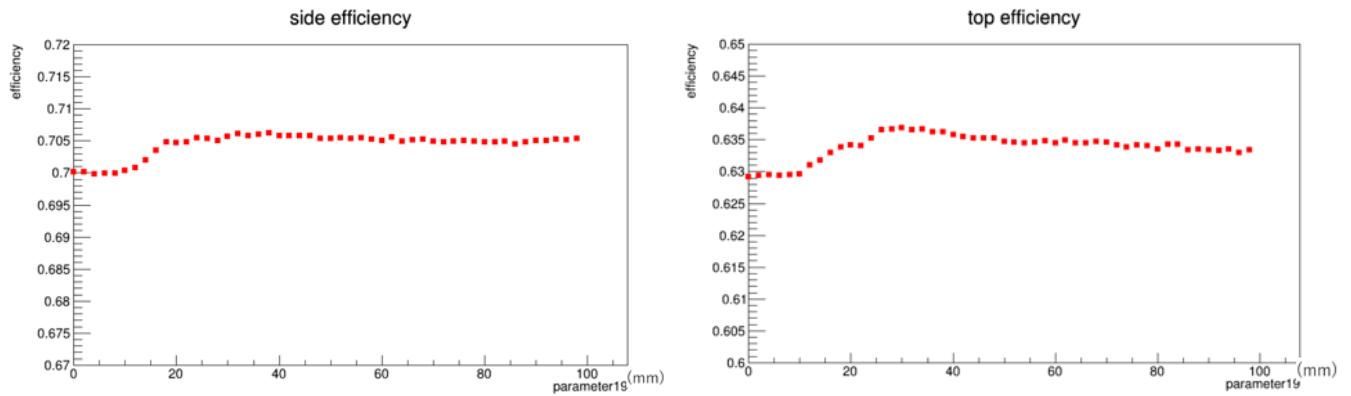


図 4.34 Merged Position Cut を変化させたときの Reconstruction efficiency の変化

#### 4.4.2 トラック数によるチューニングの結果

Parameter をある範囲で 4 分割し、parameter の値毎の vertexing 後の cluster の数を測った。(??、図 4.35)。2track のサンプルを使用し、vertexing 後の cluster の数が 2 になるように parameter の調整を行った Parameter の範囲は Reconstruction efficiency を用いたチューニングの結果から決定した。左図が side view、右図が top view である。Reconstruction efficiency が高くても、同様にトラック数の再構成率も高いとは限らないので、全パラメータについて測定を行った。Parameter をある範囲で変化させたところ、vertexing 後の cluster の数に変化が現れたのは、Kink Scan Length、Kink Threshold、Minimum Track Hits であった (図 4.35、図 4.36、図 4.38)。2Track のサンプルを使用しているにもかかわらず、全体的に vertexing 後の cluster の数が 3, 4 である割合が高い。これについては後の章でイベントディスプレイで確認を行った。Kink Threshold は値をさらに細かく分割して、vertexing 後の cluster の数と角度の分布を調べた。

- Kink Scan Length

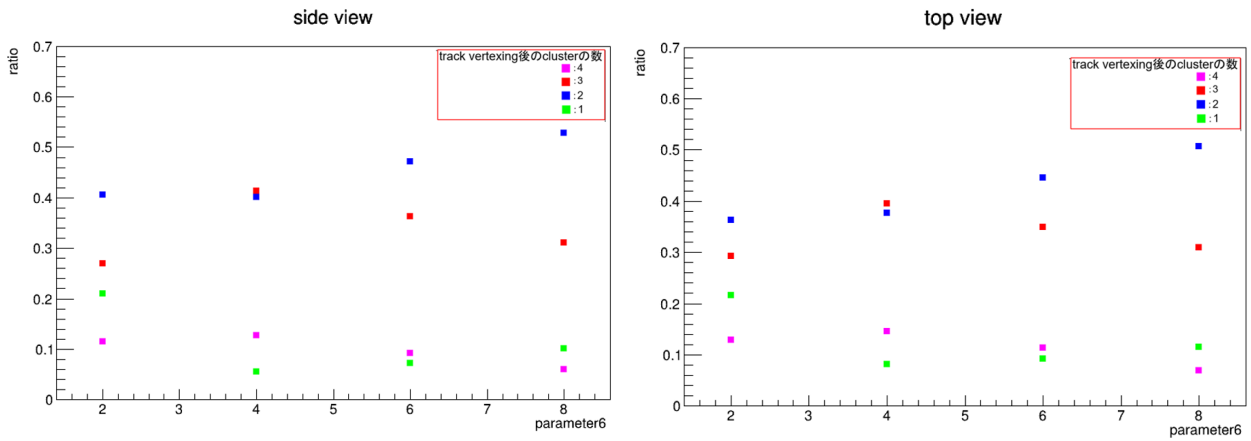


図 4.35 Kink Scan Length を変化させた時の cluster の数の変化

Kink Scan Length は Kink を判断する範囲 (ヒット数) である。4 以上にすると 2 本に再構成されている割合が増えている。Reconstruction efficiency の結果では 4 と 5 が良かったので違う結果となった。7 以上にすると Reconstruction efficiency が大きく下がってしまうので 5 か 6 が良い。このパラメータは角度の再構成精度をみて 5 か 6 のどちらに設定するかを決める。

- Kink Threshold

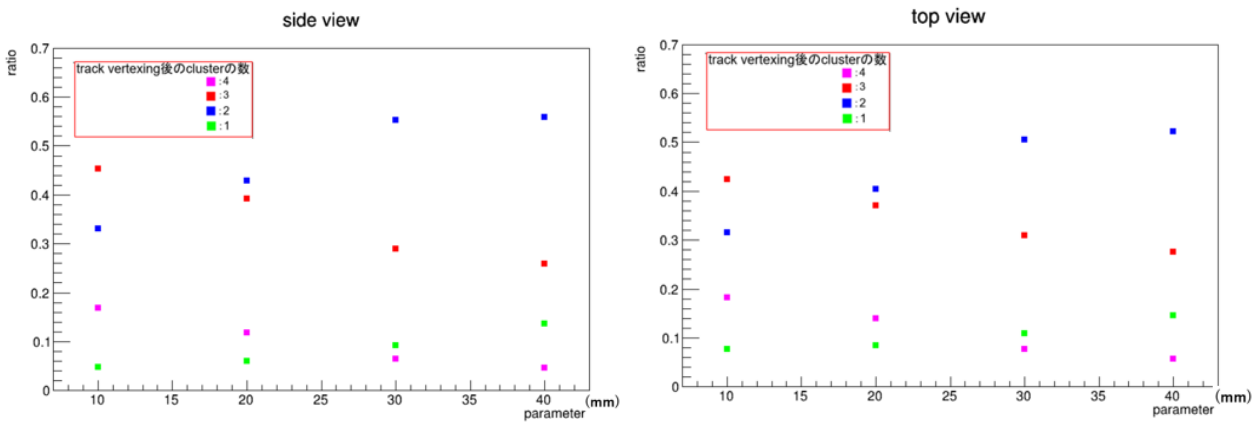


図 4.36 Kink Threshold を変化させた時の cluster の数の変化

Reconstruction efficiency を用いた評価では Kink Threshold の値は 17 が一番 Efficiency が高かった。しかし、vertexing 後の cluster の数は、10 から 30 にかけて値が大きくなるほど 2 本に再構成されている割合が高い。このパラメータは 4 分割した範囲では山が見られなかったため、さらに細かく分割して変化を見た (図 4.37)

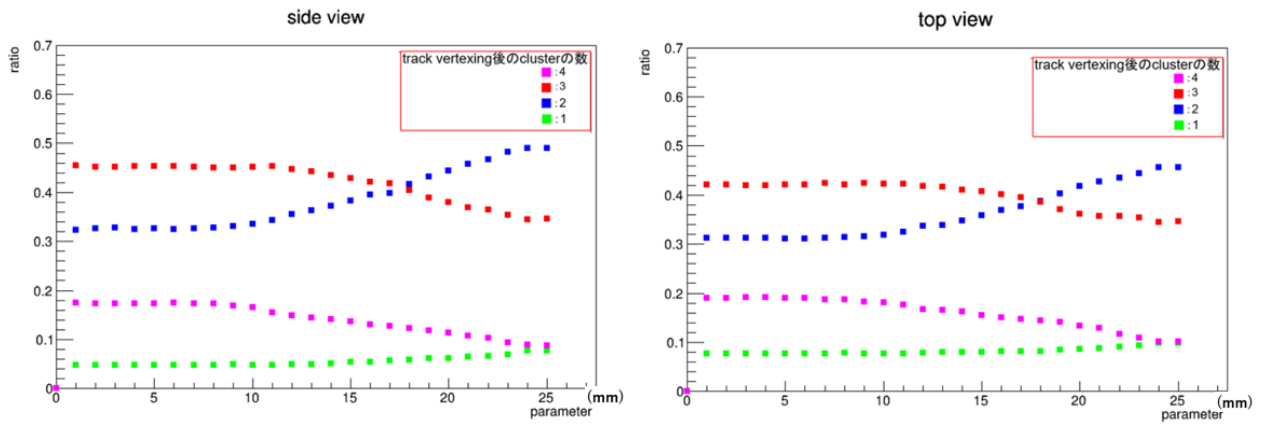


図 4.37 Kink Threshold を変化させた時の cluster の数の変化

上図 4.37 のように、再構成された cluster の数が 2 本の割合が最大になるのは 25 のときであり、10 から 25 の範囲で cluster の数が変化していることがわかる。17 あたりで 1 本と 2 本に再構成された割合が交差している。10 以下では Kink として判断されすぎて cluster がスプリットされ、cluster の数が 3 本のイベントが多くなっており、25 以上で Kink と判断されなさすぎて cluster がスプリットされず、2 本のイベントが多くなっていると考えられる。Reconstruction efficiency の結果も考慮し、Kink Threshold は 17 が適切と判断した。

● Minimum Track Hits

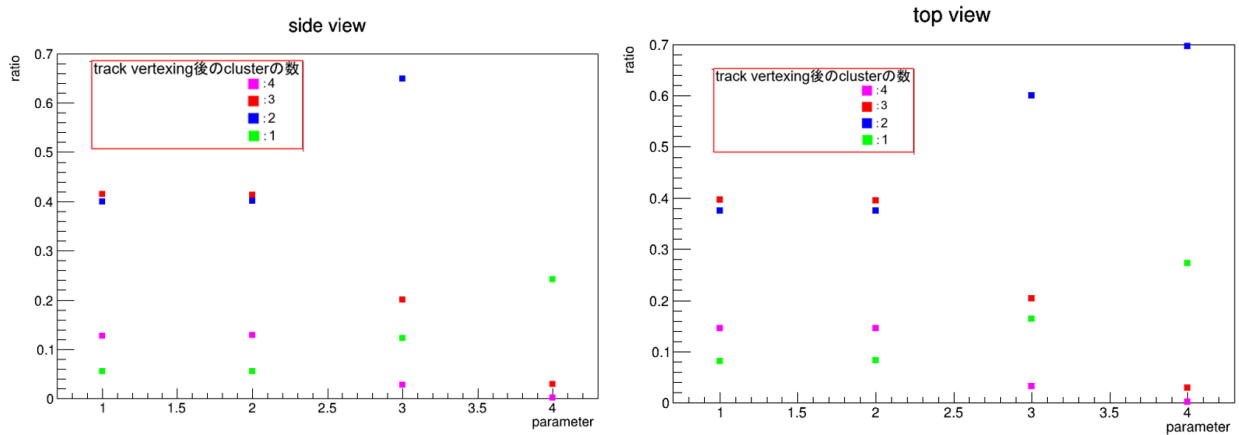


図 4.38 Minimum Track Hits を変化させた時の cluster の数の変化

Minimum Track Hits が 2 から 3 になると、cluster の数が 2 本の割合が 4 割から 6.5 割に増加し、3 本の割合が 4 割から 2 割程度に減少している。このことから、2つのヒットから構成された cluster が存在するイベントが 2 割程度存在することが分かる。Minimum Track Hits が 3 から 4 になると、cluster の数が 2 本の割合が 6.5 割から 7.3 割に増加し、3 本の割合が 2 割からほぼ 0 に減少している。このことから、3つのヒットから構成された cluster が存在するイベントが 2 割程度存在することが分かる。この parameter の値は、cluster の数が 2 本の割合が増えるように調整するなら 4、またはそれ以上が良いという結果であった。しかし、proton-like な短いトラックは 4 つのヒットから結ばれることが考えられ、この parameter の値を 4 以上にしてしまうと、そのようなトラックを除去してしまうことになる。Reconstruction efficiency の結果も考え、parameter

の値は 3 が良いと判断した。

- cluster の数に変化がなかったパラメータの例

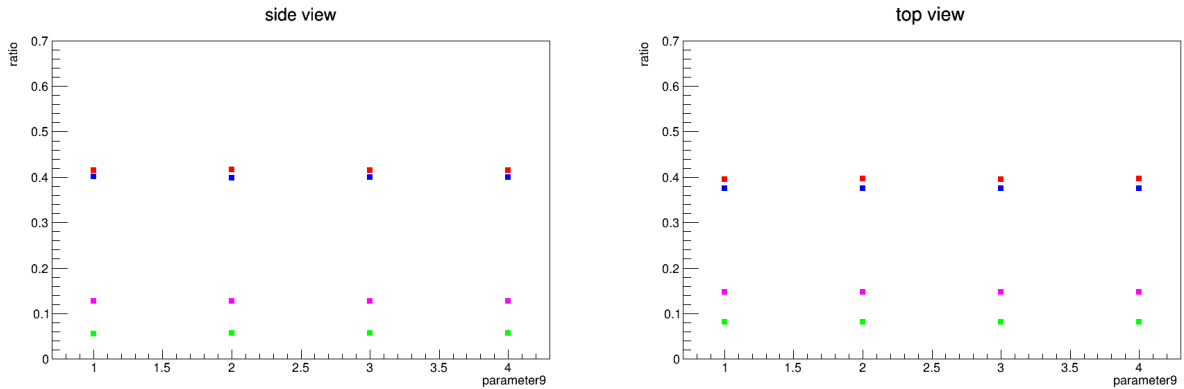


図 4.39 cluster の数に変化がなかったパラメータ

上で述べたパラメータ以外は図 4.39 のように vertexing 後の cluster の数に変化はほとんどなかった。

### 4.4.3 角度を用いたチューニングの結果

再構成後の BabyMIND に WAGASCI upstream から接続された muon-like なロング track の角度とシミュレーションで得られた track の角度の差をヒストグラムにプロットし、そのヒストグラムにガウス分布をフィットさせた。そのガウシアン の RMS と mean を各パラメータの値毎にプロットし、RMS と mean が小さくなるようにパラメータの調整を行った。角度に変化があったパラメータは、

- Kink Scan Length
- Kink Threshold
- Minimum Track Hits

であった (図 4.40、図 4.36、図 4.38)。他のパラメータは図 4.44 のように角度に影響がないことが分かった。

- Kink Scan Length

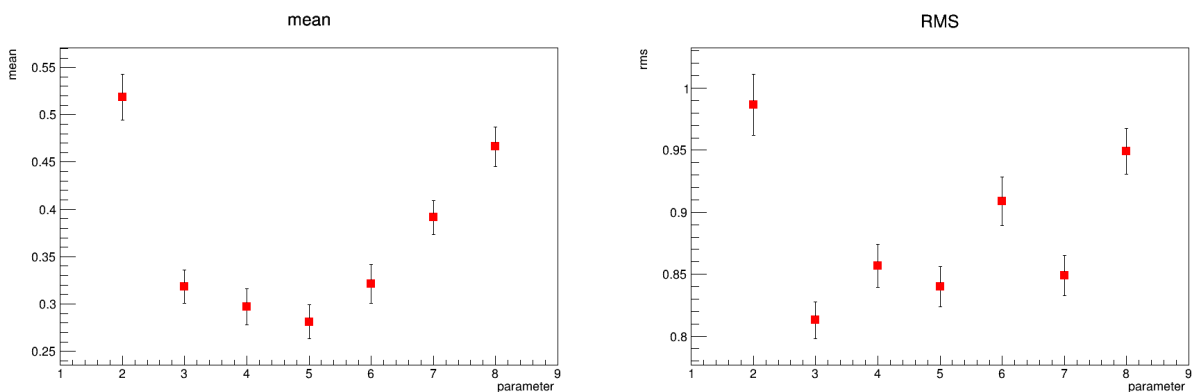


図 4.40 Kink Scan Length を変化させたときの Mean と RMS の変化

Reconstruction efficiency の評価方法の結果と一貫しており、Mean と RMS が一番低くなるのは 4 の時であった。トラック数の結果からこのパラメータの値は 5 に決定した。

● Kink Threshold

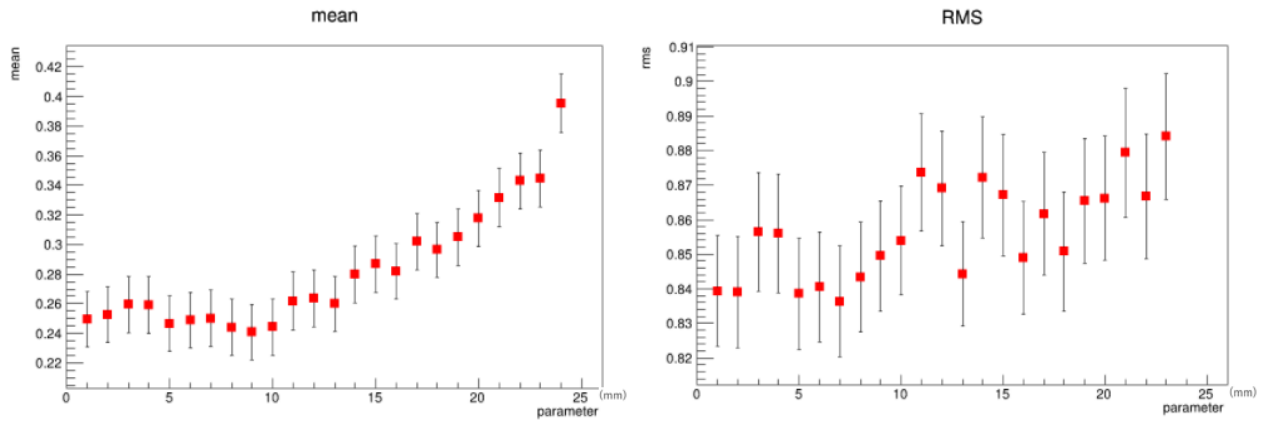


図 4.41 Kink Threshold を変化させたときの Mean と RMS の変化

Kink Threshold を変化させたときの角度の差の分布を以下に示す 4.42。Kink Threshold の値が 1 から 10 のとき Mean が低いが、Baby MIND にマッチしているイベントの数が 17 の時と比べて減少していることが分かる。よって Kink Threshold は 17 とする。

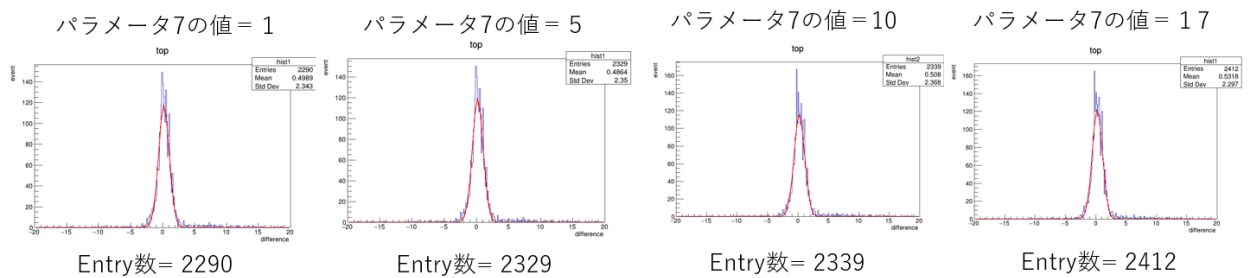


図 4.42 Kink Threshold を変化させたときの角度の分布

● Minimum Track Hits

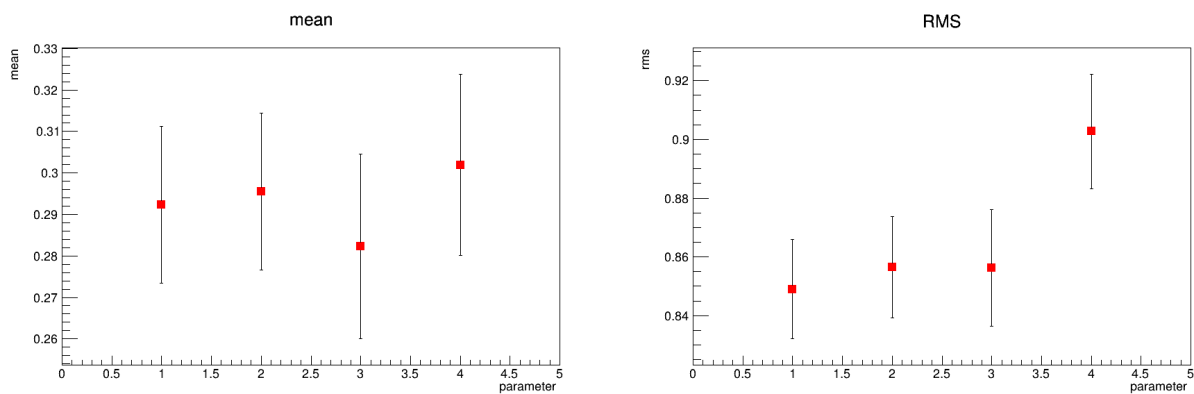


図 4.43 Minimum Track Hits を変化させたときの Mean と RMS の変化



これまでの結果と同じく、Minimum Track Hits が 3 のとき Mean も RMS も低い値を取っている。

- 角度分布の Mean と rms に変化がなかったパラメータ (図 4.44 は Chi2 Threshold)

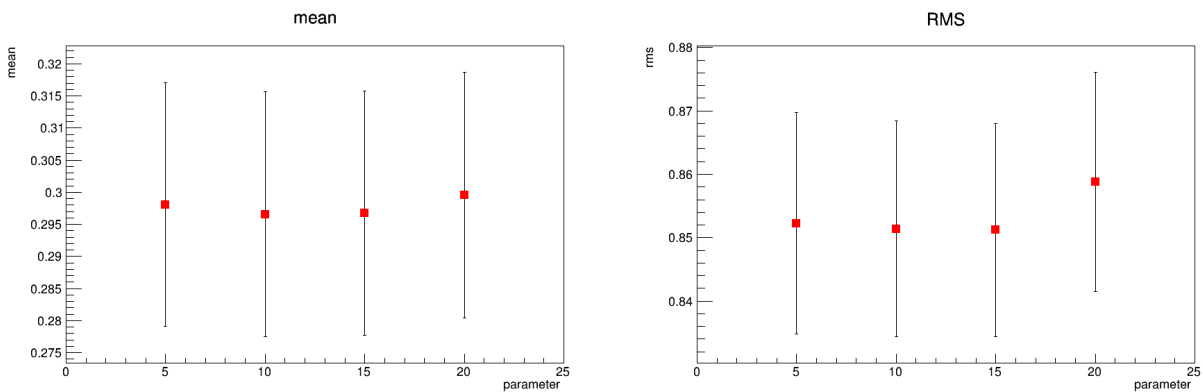


図 4.44 角度分布の Mean と rms に変化がなかったパラメータの例

上で述べたパラメータ以外は図 4.44 のように角度に影響はほとんどなかった。

## 4.5 再構成できていないイベント

トラック数による評価の結果で見た通り、2トラックのサンプルを使っているにもかかわらず、cluster が 3 本以上に再構成されている割合が高い。どのようなイベントが 3 本以上に再構成されているのか、再構成されていないイベントはどういう特徴があるのかをイベントディスプレイで確認した。

イベントディスプレイではイベントごとにそれぞれの検出器で

- 実際の粒子の飛跡
- 検出器に入力されたヒットとヒット数
- 反応の種類
- イベント番号
- Spill number
- 反応したニュートリノの種類と運動量

を確認することができる。

図 4.45 はある CCQE 反応のイベントディスプレイである。左図が Side view、右図が Top view である。オレンジ色のトラックが陽子のトラック、赤色のトラックがミュオンズのトラックで、赤色の点がノイズなどのヒットを表している。

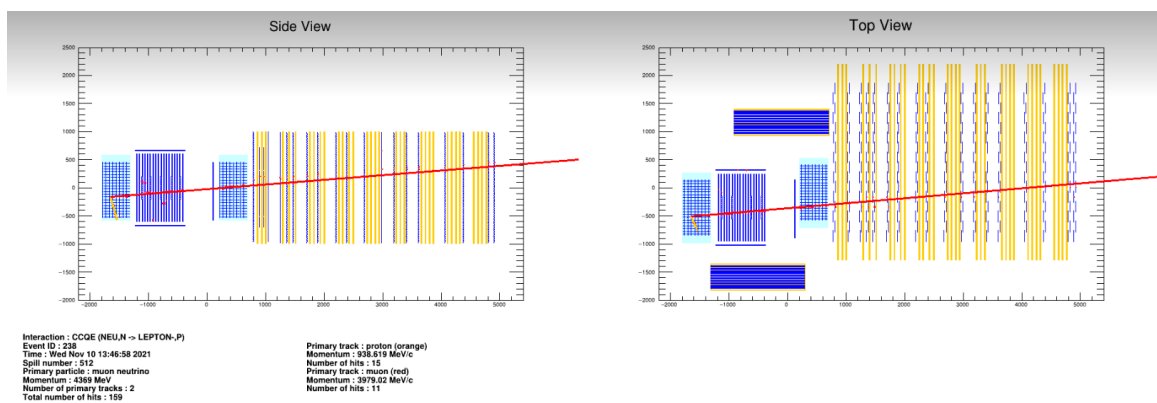


図 4.45 CCQE 反応のイベントディスプレイ

イベントディスプレイで vertexing 後の cluster の数が 2 でない、2 トラックのイベントを WAGASCI Upstream で確認した。きれいに再構成できていないイベントは以下の 4 つに区分される。

- トラックの角度が小さい (図 4.46)。  
トラックの角度が小さい場合、飛跡がつぶれたように再構成されてしまっている。
- ヒット同士の距離が長い (図 4.47)。
- トラックと関係のないヒットが多い (図 4.48)。
- トラックが短い (図 4.49)。

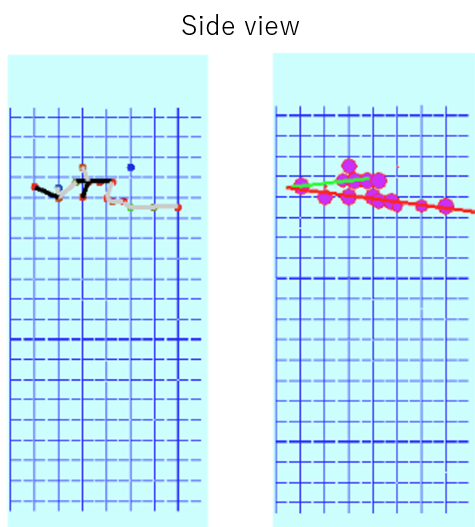


図 4.46 トラックの角度が小さいイベント

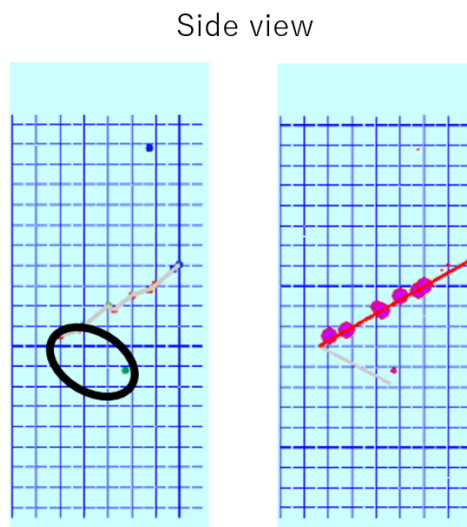


図 4.47 ヒット同士の距離が長いイベント

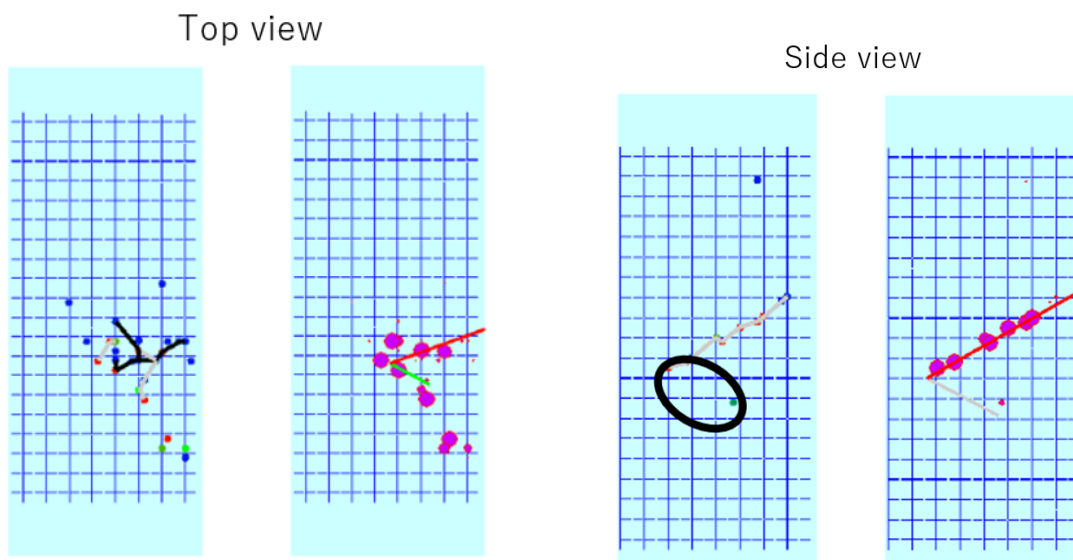


図 4.48 トラックと関係のないヒットが多いイベント

図 4.49 トラックが短いイベント

トラックの角度が小さい場合はイベントディスプレイを確認しながらパラメータを変化させることで調整可能かもしれない。それ以外の種類のイベントはそもそも再構成が不可能であった。

vertexing 後の cluster の数が 3, 4 のイベントの多くは、上記のイベントに加えて、vertex 部分で小さい cluster が合体されていないイベントがあった (図 4.50)。

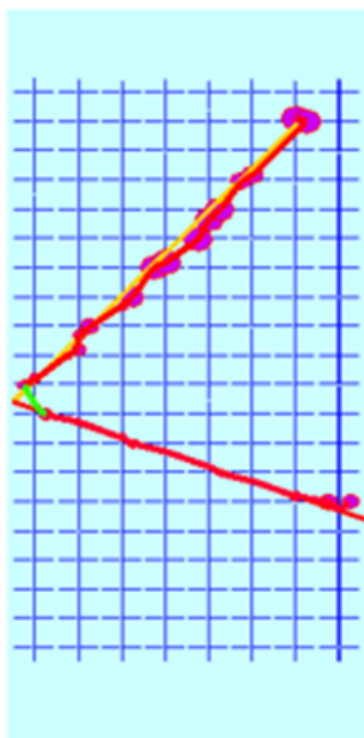


図 4.50 vertex 部分で小さな cluster が合体されていないイベント

小さい cluster を合体させるしきい値を高めると、正しくない cluster も合体させてしまう可能性がある。小さい部分以外の cluster は他の MRD とマッチングし、トラックとして判断されるはずなので、今のところ実際の解析にはほとんど影響がない考えられる。

## 4.6 Parameter 調整後の再構成精度

3つの評価方法から最終的にパラメータを以下のように値を設定した。()内の値はある程度再構成できるようにパラメータ調整時に使用していた値である。

- Clean ghost hit threshold = 2.5 PEU (2.5 PEU)
- Kink scan length = 5 (7)
- Kink threshold = 1.7 cm (20 cm)
- Kink Length Fraction = 0.5 (0.5)
- Minimum Track Hits = 3 (3)
- Cluster max distance = 17.5 cm (15.0 cm)
- Cosine cut = 0.3 rad (0.3)
- Time Slice = 40.0 nS (40.0 nS)
- Hits Minimum Points = 1 (1)
- Minimum Spanning Tree Minimum Hits = 3 (3)
- Minimum Spanning Tree Over Size Cut = 1000 (1000)
- Minimum Hits To Split = 3 (5)
- Max Line Hits = 6 (6)
- Chi2 Threshold = 8 (8)
- Charge Per Hit = 1.5 (1.5)
- Merge Distance Cut = 200.0 (200.0)mm
- Minimum Follow Distance Cut = -10.0 mm (-10.0)mm
- Goodness Cut = 85.0 (85.0)
- Matched Cosine Cut = 0.3 rad (0.3 rad)
- Matched Position Cut = 30.0 mm (30.0 mm)

パラメータ調整後の Reconstruction efficiency、トラック数の再構成精度、角度の再構成精度を調べた。Reconstruction efficiency の値は side view で 0.77、top view で 0.71 であった。トラック数の再構成精度は以下ようになった。

表 4.1 2track のイベントの再構成精度

再構成された cluster の数	イベントの割合 (side view)	イベントの割合 (top view)
1	0.238	0.261
2	0.634	0.605
3	0.119	0.123
4	0.009	0.011

2本に再構成されているイベントは6割程度であった。

WAGASCI と BabyMIND でマッチしたロング track の角度の差は以下のようなになった (図 4.51)。

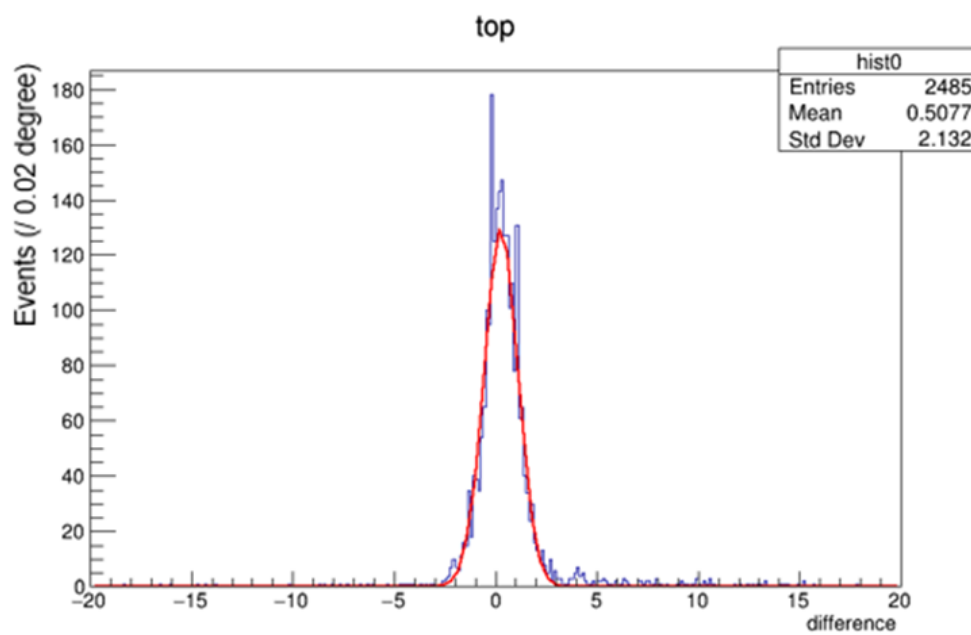


図 4.51 パラメータ調整後の角度の分布

ほとんどのイベントが  $\pm 2$  度の範囲で再構成されていることが分かる。

## 第5章

# 結論

T2K-WAGASCI 実験における Minimum Spanning Tree を用いた飛跡再構成アルゴリズムの 20 個のパラメータ調整と性能評価を行った。パラメータの調整と性能評価を行う上でトラック数が 2 本であるイベントを選択した。飛跡再構成効率が高くなるように調整、トラック数の再構成精度が高くなるように調整、角度の再構成精度が高くなるように調整、と 3 つの方法でパラメータの調整を行った。変化させることでトラック数と角度の再構成精度に大きく変化があったパラメータは、Kink に関するパラメータと、トラックとみなすための必要な最小ヒット数を決めるパラメータであった。パラメータの調整後再構成効率は、side view で 0.77、top view で 0.71 であった。トラック数が 2 本に再構成できていた割合は 63.4% であった。3 本に再構成されている割合は 11.9% で、これは vertex 部分で小さい cluster が 1 本とカウントされてしまっていることが原因であった。今後、トラック数の再構成精度をもう少し重視してパラメータの調整を行う必要があると考えられる。WAGASCI と BabyMIND でマッチしたロング track のシミュレーションとの角度の差は Mean が  $0.22 \pm 0.02$  度、RMS が  $0.85 \pm 0.01$  度であった。

今後は WAGASCI だけでなく、他の検出器でもパラメータの調整を行う予定である。

# 謝辞

本修士論文を作成するまでに沢山の方に支えられ助けられました。2年間という短い期間に、新型コロナウイルスの流行が始まり、これまでの研究環境と大きく変わった中、研究を行えたことに感謝します。清矢良浩教授には、物理や研究の考え方について多くのことをご教授いただきました。常日頃からミーティングや学会などのスライド作成や、プログラムなどの疑問に丁寧にご指導いただき大変感謝しております。山本和弘准教授には、研究を行う環境の整備やコンピュータの知識を教えていただき、コロナ禍での研究をサポートしていただきました。ありがとうございます。豊田博俊氏には、私が授業のアシスタントをした際に非常にお世話になりました。研究だけでなく就職活動などたくさんのアドバイスをいただきました。ありがとうございます。T2K-WAGASCI 実験ではたくさんの方々に助けていただきました。京都大学の安留さん、横浜国立大学の jojo さんには、本研究のための知識をすべて教えていただきました。毎週のように、初歩的な質問にも丁寧にお答えいただき、研究のアドバイスや知識を教えていただきました。大変感謝しております。横浜国立大学の南野准教授と永井君には J-PARC での WAGASCI の TDC キャリブレーションでお世話になりました。キャリブレーションに必要なハードウェアの知識を教えてくださいました。ありがとうございます。本学高エネルギー物理学研究室の方々には大変感謝しています。本條貴司さんには、普段からゼミなどの物理学の疑問点を教えていただいたり、研究のサポートをしていただき大変お世話になりました。同期の高安咲妃さん、植松泰智君には学部を合わせると6年間を共に過ごし、いろんな場面で助けていただきました。最後に、いつも私を支えて研究させてくれた家族に深く感謝します。

# 目次

1.1	CC 反応と NC 反応の反応断面積 ( $E_\nu = 0 \sim 5$ GeV)	5
1.2	CCQE 反応	6
2.1	T2K 実験の概要図	7
2.2	J-PARC 加速器群	8
2.3	ニュートリノビームラインの生成と前置検出器	8
2.4	前置検出器の概観図	9
2.5	INGRID の概観図	10
2.6	ND280 の概観図	11
2.7	後置検出器スーパーカミオカンデの概観図	11
2.8	スーパーカミオカンデの内部図	12
2.9	T2K 実験の検出器の配置図	12
2.10	$\pi^+$ の崩壊	13
2.11	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	13
2.12	ニュートリノ振動確率のエネルギー依存性	14
3.1	T2K-WAGASCI 実験の全体図	16
3.2	WAGASCI 検出器の概観図	16
3.3	WAGASCI 検出器のシンチレータの構造	17
3.4	WAGASCI 検出器の構造	17
3.5	プロトンモジュールの概観図	18
3.6	トラッキングプレーンの構造	18
3.7	プロトンモジュールのシンチレータの配置図	18
3.8	Baby MIND の概観図	19
3.9	Baby MIND の内部構造	19
4.1	Minimum Spanning Tree の作成	20
4.2	Minimum Spanning Tree の作成	21
4.3	クラスター群を統合する流れのイメージ図	22
4.4	イベントディスプレイ	23
4.5	再構成に関係ないヒットを取り除いた時のイベントディスプレイ	24
4.6	Minimum Spanning Tree のイベントディスプレイ	24
4.7	cluster のイベントディスプレイ	25



4.8	再構成後のイベントディスプレイ	25
4.9	Clean hits と Time slice	26
4.10	Max Distance の説明	26
4.11	Kink の説明	28
4.12	Cosine Cut の説明	29
4.13	MC Hit と Reconstructiton Hit	30
4.14	Match Hit	30
4.15	角度の差をヒストグラムにし、ガウス分布をフィットさせた時の Mean と RMS	31
4.16	Primary track と Secondary track の説明	32
4.17	Ghost Hit Threshold を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	33
4.18	Time Slice を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	33
4.19	Max Distance を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	34
4.20	Minimum Points を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	34
4.21	Minimum Spanning Tree Oversize Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	34
4.22	Scan Length を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	35
4.23	Kink Threshold を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	35
4.24	Length Fraction を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	36
4.25	Max Line Hits を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	36
4.26	Minimum Track Hits を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	36
4.27	Chi2 Threshold を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	37
4.28	Charge Per Hit を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	37
4.29	Merge Distance Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	37
4.30	Minimum Follow Distance Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	38
4.31	Follow Cosine Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	38
4.32	Goodness Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	38
4.33	Matched Cosine Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	39
4.34	Merged Position Cut を変化させたときの Reconstuction efficiency の変化	39
4.35	Kink Scan Length を変化させた時の cluster の数の変化	40
4.36	Kink Threshold を変化させた時の cluster の数の変化	40
4.37	Kink Threshold を変化させた時の cluster の数の変化	41
4.38	Minimum Track Hits を変化させた時の cluster の数の変化	41
4.39	cluster の数に変化がなかったパラメータ	42
4.40	Kink Scan Length を変化させた時の Mean と RMS の変化	42
4.41	Kink Threshold を変化させた時の Mean と RMS の変化	43
4.42	Kink Threshold を変化させた時の角度の分布	43
4.43	Minimum Track Hits を変化させた時の Mean と RMS の変化	43
4.44	角度分布の Mean と rms に変化がなかったパラメータの例	44
4.45	CCQE 反応のイベントディスプレイ	45
4.46	トラックの角度が小さいイベント	45
4.47	ヒット同士の距離が長いイベント	45

---

4.48	トラックと関係のないヒットが多いイベント . . . . .	46
4.49	トラックが短いイベント . . . . .	46
4.50	vertex 部分で小さな cluster が合体されていないイベント . . . . .	46
4.51	パラメータ調整後の角度の分布 . . . . .	48

# 表目次

4.1	2track のイベントの再構成精度 . . . . .	47
-----	------------------------------	----

## 参考文献

- [1] W.Pauli Letter of 4 December to L.Meitner et al. (1930)