

T2K 長基線ニュートリノ振動実験における  
ニュートリノビームモニター INGRID を用いた  
ニュートリノビームの評価

(An Evaluation of the Neutrino Beam  
by Using the Neutrino Beam Monitor INGRID  
for the T2K Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment)

理学研究科

数物系専攻

中嶋 一八

## 概要

T2K 実験は、茨城県東海村の J-PARC 加速器を用いて生成したニュートリノを、295km 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) に向けて照射し、それらを SK で観測する長基線ニュートリノ振動実験である。電子ニュートリノ出現事象の発見と、それに伴うパラメーター  $\theta_{13}$  の測定、及びミューオンニュートリノ消失事象の観測による、パラメーター  $\theta_{23}$  と  $\Delta m_{23}^2$  の精密測定がこの実験の主な目的である。T2K 実験の最大の特徴は “off-axis 法” を採用していることである。これは、ニュートリノビーム中心軸の方向を SK の方向から  $2.5^\circ$  ずらすことにより、広がりを持つビーム中において、SK に到達するニュートリノのエネルギーをミューオンニュートリノの振動確率が最大となるエネルギーに合わせるというものである。これにより、より効率的に振動現象が観測されると期待されている。この実験においては、ニュートリノのエネルギー分布の理解は重要であるが、ニュートリノビーム中心軸の方向と SK に向かうニュートリノのエネルギーとの間に強い相関があり、従ってニュートリノビームの方向を 1mrad より良い精度でモニターすることが必要不可欠となる。この目的のために、ビーム中心軸上にニュートリノビームモニター INGRID(Interactive Neutrino GRID) を設置している。

INGRID は同一のモジュール 16 台をグリッド状に設置したもので、各モジュールは鉄とシンチレータープレーンを交互に配置したサンドウィッチ構造をしている。シンチレーターの光を波長変換ファイバーを通して半導体光検出器 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) で読み出すシステムを 1 チャンネルとし、プレーン一枚につき 48 チャンネルある。ニュートリノ反応により生成される荷電粒子の飛跡を、チャンネルの信号から再構成することでニュートリノイベントを特定し、そのイベントの数をモジュール毎に数えビーム方向を計算する。

MPPC では熱電子などに由来するノイズが発生し、これによる信号は荷電粒子によるものと原理的に区別ができない。つまり MPPC のノイズはイベントの再構成に影響を与え、結果としてイベント数の見積りを変化させてしまう。またノイズ発生頻度は、MPPC への印加電圧と周囲の温度に依存して変化するため、個々のモジュールで影響の度合いが異なり、ビーム方向の測定にも影響を与える。本研究ではこのノイズによる影響を定量的に見積り、各モジュールのイベント数に補正をかけた上でビーム方向を計算した。その結果、2010 年の 1 月から 6 月までと、2010 年の 11 月から 2011 年の 3 月までの物理ランでは、水平方向、鉛直方向いずれにおいても、ビーム方向の変動は  $\pm 1\text{mrad}$  以内であることを確認した。

# 目次

概要	i
目次	ii
<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 ニュートリノと振動現象	1
1.2 ニュートリノ振動実験	2
1.2.1 歴史	2
1.2.2 現状	3
<b>第 2 章 T2K 実験</b>	<b>4</b>
2.1 概要	4
2.2 目的	4
2.3 J-PARC ニュートリノビームライン	5
2.3.1 ニュートリノビームの生成	5
2.3.2 off-axis 法	8
2.3.3 ミューオンモニター: MUMON	9
2.4 前置検出器: ND280	10
2.4.1 on-axis 検出器	10
2.4.2 off-axis 検出器	10
2.5 後置検出器: スーパーカミオカンデ	12
2.6 物理ラン	14
2.7 震災による J-PARC への影響	14
<b>第 3 章 INGRID の構成</b>	<b>16</b>
3.1 要請	16
3.2 基本設計	17
3.3 INGRID の構成要素	18
3.3.1 プラスチックシンチレーター	18
3.3.2 波長変換ファイバー	18
3.3.3 MPPC	19
3.4 データ収集システム	21
3.4.1 エレクトロニクス	21
3.4.2 トリガー	23
3.4.3 温度のモニター	24

---

第 4 章	INGRID における解析の現状	25
4.1	コンベンション	25
4.2	モンテカルロシミュレーション	26
4.2.1	ニュートリノビームラインシミュレーション: JNUBEAM	26
4.2.2	ニュートリノ反応シミュレーション: NEUT	26
4.2.3	検出器シミュレーション: GEANT4	27
4.3	ニュートリノイベントの再構成	27
4.4	ニュートリノイベント数に対する補正係数	29
第 5 章	INGRID における MPPC ノイズの解析	30
5.1	モチベーションと解析の流れ	30
5.2	MPPC ノイズデータ	36
5.3	ノイズシミュレーション	37
5.3.1	シミュレーションのプロセス	37
5.3.2	バッドチャンネル	38
5.4	ノイズによるイベント数への影響	38
5.5	補正係数	42
5.6	INGRID の系統誤差	46
5.7	イベントレートの安定性	46
5.8	ビームプロファイルの安定性	48
5.9	ビーム方向	53
第 6 章	結論	54
	謝辞	55
	図目次	57
	表目次	58
	参考文献	59

# 第1章 序論

## 1.1 ニュートリノと振動現象

ニュートリノとは中性のレプトンである。素粒子物理学の標準模型における、3つの基本的な相互作用の中で、弱い相互作用しか感じない粒子である。標準模型においては質量が0とされているが、ニュートリノ振動の存在により、有限の質量を持つということが明らかになった。

ここでニュートリノ振動の理論について触れる<sup>[1]</sup>。弱い相互作用の固有状態(フレーバー固有状態) $|\nu_\alpha\rangle$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) が、質量の固有状態  $|\nu_k\rangle$  ( $k = 1, 2, 3$ ) の混合状態で表されるとすると、

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k} |\nu_k\rangle \quad (1.1)$$

となる。ここで  $U$  は牧・中川・坂田行列 (MNS 行列) と呼ばれる  $3 \times 3$  のユニタリー行列で、次のように表される。

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

ここで、 $s_{kj} = \sin \theta_{kj}$ 、 $c_{kj} = \cos \theta_{kj}$  である。質量固有状態の時間発展を考えると、次のように書ける。

$$|\nu_k(t)\rangle = e^{-i(E_k t - px)} |\nu_k\rangle \quad (1.3)$$

するとフレーバー固有状態は

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{\beta=e,\mu,\tau} \left( \sum_k U_{\alpha k} e^{-i(E_k t - px)} U_{\beta k}^* \right) |\nu_\beta\rangle \quad (1.4)$$

となる。よって、フレーバー固有状態  $\nu_\alpha$  で生成された粒子が距離  $L$  を飛行し、 $t$  秒後に  $\nu_\beta$  に変化する確率は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \\ &= \sum_{kj} U_{\alpha k} U_{\beta k}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j} e^{-i(E_k - E_j)t} \end{aligned} \quad (1.5)$$

ここでニュートリノが相対論的粒子 ( $E \gg m$ ) であることを考慮すると、 $E_k \approx p + \frac{m_k^2}{2p}$ 、 $t \approx L$  と近似できる。

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = & \delta_{\alpha\beta} \\
 & - 4 \sum_{k>j} \text{Re} [U_{\alpha k} U_{\beta k}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E} \right\} \\
 & + 2 \sum_{k>j} \text{Im} [U_{\alpha k} U_{\beta k}^* U_{\alpha j}^* U_{\beta j}] \sin \left\{ \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E} \right\}
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

$\Delta m_{kj}^2 = m_k^2 - m_j^2$  はニュートリノの質量二乗差で、 $E$  はニュートリノのエネルギーである。

## 1.2 ニュートリノ振動実験

### 1.2.1 歴史

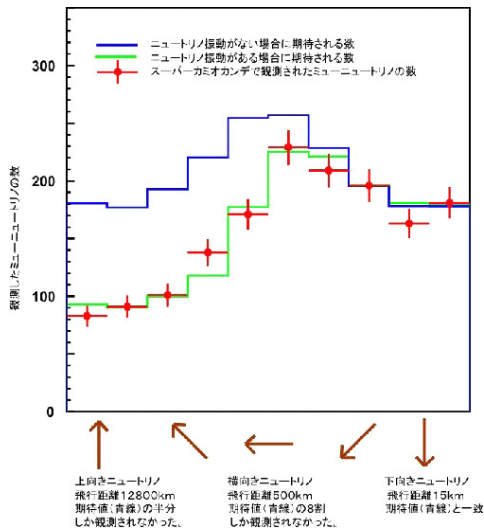


図 1.1: スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ測定の結果

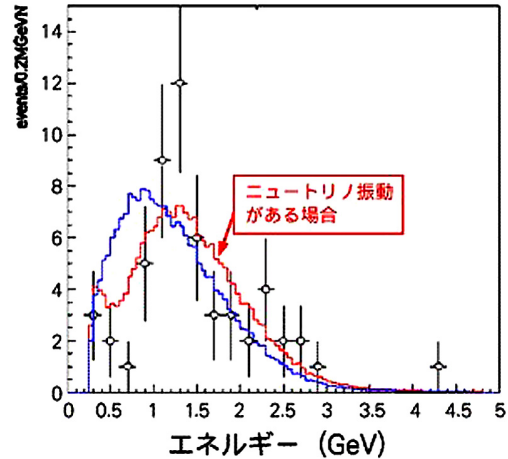


図 1.2: K2K 実験におけるミュオンニュートリノ測定の結果  
青い線はニュートリノ振動が無い時に期待される分布で、白丸が観測値。

実験におけるニュートリノ振動の歴史は、1960年代後半に行われた、レイモンド・デイビスらによる Homestake 実験 [2] にさかのぼる。太陽から飛来するニュートリノを観測したところ、太陽モデルから予想される数の 1/3 しか観測されなかったことから、“太陽ニュートリノ問題”と言われた。この問題はその後、カミオカンデ [3] や GALLEX [4]、SAGE [5] などで測定されたが、太陽モデルが間違っているのではないかといいた憶測を呼ぶなど、多くの研究者を悩ませた。

ニュートリノ振動が決定的なものとして認識されたのは、1998年にスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの測定であった [6]。宇宙線と大気中の原子核との相互作用により発生するニュートリノを観測したところ、天底方向から飛来する数が少ないことが確

認められ、これがニュートリノ振動による予想と良い一致を示した (図 1.1<sup>[7]</sup>)。この結果によりニュートリノ振動の発見とされた。

2004年には、長基線ニュートリノ振動実験 K2Kが、世界で初めて加速器による人工ニュートリノビームを使用したニュートリノ振動を確立し<sup>[8]</sup>(図 1.2<sup>[9]</sup>)、その翌年に MINOS 実験<sup>[10]</sup>が稼働した。また 2010年には OPERA 実験が  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  の振動候補事象を捉えた<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 現状

ニュートリノ振動現象の存在が認識されてからは、ニュートリノ振動を特徴づけるパラメーターの測定のために、世界中で多くのニュートリノ振動実験が実施され、現在も数多くの実験が行われている。そうして測られた値を以下にまとめる<sup>[12]</sup>。

- $\theta_{12}$ ,  $\Delta m_{12}^2$   
SNO、スーパーカミオカンデなどの太陽ニュートリノの測定や、KamLANDによる原子炉ニュートリノの測定で測られていて、 $\theta_{12} = 34.06^{+1.16}_{-0.34}$  ( $\sin^2(2\theta_{12}) = 0.861^{+0.026}_{-0.022}$ )、 $\Delta m_{12}^2 = 7.59^{+0.20}_{-0.21} \times 10^{-5} \text{eV}^2$  (68.3% C.L.) である。
- $\theta_{23}$ ,  $\Delta m_{23}^2$   
スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの測定や、K2K、MINOS、OPERAなどの加速器実験で測られていて、 $\sin^2(2\theta_{23}) > 0.92$ 、 $\Delta m_{23}^2 = 2.43 \pm 0.13 \times 10^{-3} \text{eV}^2$  (90% C.L.) である。
- $\theta_{13}$   
CHOOZ 実験による原子炉ニュートリノの測定において、 $\Delta m_{23}^2 = 2.43 \times 10^{-3} \text{eV}^2$  の場合  $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.15$  という上限が与えられている。

$\delta$  に関しては、現在のところ全くの未知である。 $\delta$  は  $\sin \theta_{13}$  に依存しているため、 $\sin \theta_{13}$  の決定にかかっている。

## 第2章 T2K 実験

### 2.1 概要

T2K 実験は茨城県の東海村の J-PARC 加速器からミュニュートリノビームを撃って、岐阜県神岡町のスーパーカミオカンデでとらえる長基線ニュートリノ振動実験である。ミュニュートリノビームは J-PARC で生成される際に ND280 と呼ばれる検出器で測定され、その後 295km 飛行しスーパーカミオカンデでも測定される。それら二つの測定を比較することで、ニュートリノの性質を調べる。

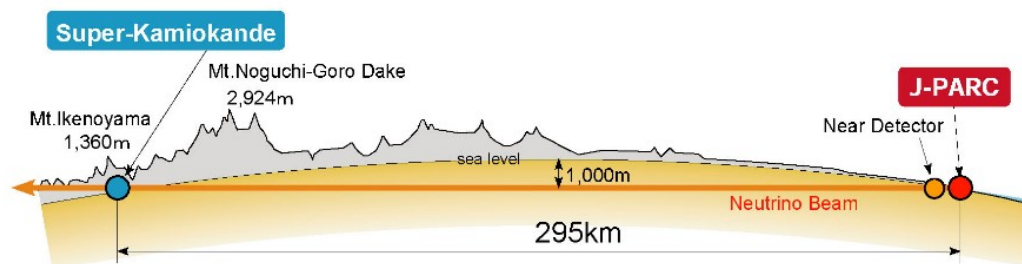


図 2.1: T2K 実験の概略図

### 2.2 目的

T2k 実験の主な目的は以下の 3 点である。

- 未発見の電子ニュートリノ出現モードの探索  
唯一発見されていない電子ニュートリノ出現モード  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  の探索と、そのパラメータである振動角  $\theta_{13}$  の測定を行う。式 (1.6) において、 $E \approx 1\text{GeV}$ 、 $L \approx 300\text{km}$  という近似<sup>\*1</sup> をすると、このモードの振動確率  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$  は次のように近似できる。<sup>\*2</sup>

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}(L, E) \simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left\{ \frac{1.27 \Delta m_{23}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right\} \quad (2.1)$$

<sup>\*1</sup>  $\Delta m_{23}^2 \sim \Delta m_{13}^2 \gg \Delta m_{12}^2$  となり、 $\Delta m_{12}^2$  の影響は無視できる。

<sup>\*2</sup>  $\frac{\Delta m_{jk}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{4E [\text{GeV}]} \frac{1}{\hbar c [\text{MeV} \cdot \text{fm}]} = \frac{[\text{eV}^2] 10^3 [\text{m}]}{4 \times 10^9 [\text{eV}] \times 197.33 \times 10^6 \times 10^{-15} [\text{eV} \cdot \text{m}]} \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{E} = 1.27 \frac{\Delta m_{jk}^2 L}{E}$



- ミューニュートリノ消失モードの精密測定  
ミューニュートリノが他のニュートリノへ振動するモード  $\nu_\mu \rightarrow \nu_x$  に伴うパラメータ、振動角  $\theta_{23}$  と質量二乗差  $\Delta m_{23}^2$  の精密測定を行う。式 (1.6) において先と同様の近似を行い、また  $\theta_{13} \simeq 0$  とすると振動する確率は、

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_x}(L, E) \simeq \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left\{ \frac{1.27 \Delta m_{23}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right\} \quad (2.2)$$

となる。

- ステライルニュートリノの探索  
ステライルニュートリノとは、重力を除くその他の基本的な力と相互作用しないとされるニュートリノである。T2K 実験では、ミューオンニュートリノ消失モードにおける、中性カレント反応事象数を計測することで、ステライルニュートリノへ振動するモードを探す。

## 2.3 J-PARC ニュートリノビームライン

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)、またの名を大強度陽子加速器施設は、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) と日本原子力研究所 (現 (独) 日本原子力研究開発機構 (JAEA)) が共同で提案し、建設された、陽子加速器群と実験施設群の呼称である。ここでは素粒子物理、原子核物理、物質科学、生命科学、原子力など、幅広い分野の最先端研究が日々行われている。

### 2.3.1 ニュートリノビームの生成



図 2.2: J-PARC ビームラインの概略図

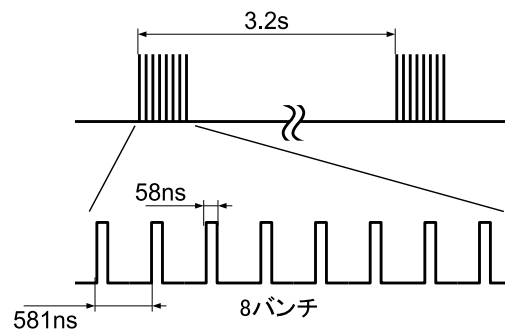


図 2.3: 陽子ビームの時間構造

T2K 実験で使用する加速器は、400MeV 線形加速器 (LINAC)<sup>\*3</sup>、3GeV シンクロトロン (RCS)<sup>\*4</sup>、50GeV シンクロトロン (MR)<sup>\*5</sup> から構成される (図 2.2)。LINAC で生成され、RCS、MR により加速された陽子ビームは、速い取り出しにより、一次ビームラインへ送

<sup>\*3</sup> LINear ACcelerator

<sup>\*4</sup> Rapid-Cycling Synchrotron

<sup>\*5</sup> Main Ring

られる。T2K 実験で使用する陽子ビームは図 2.3 のような時間構造を持つ。一つの陽子ビームの塊をバンチと呼び、複数のバンチによりスピルを形成する。陽子ビームの詳細なパラメータは表 2.1 にまとめる。

	設計値	設定値
ビームエネルギー	50GeV	30 GeV
ビーム強度	750kW	115kW
スピル中の陽子数	$3.3 \times 10^{14}$	$7.5 \times 10^{13}$
スピル幅	$5.6\mu\text{sec}$	$4.6\mu\text{sec}$
スピル間隔	2.11sec	3.52sec→3.2sec
バンチ数	8/spill	6/spill→8/spill
バンチ幅	58nsec	58nsec
バンチ間隔	約 700nsec	581nsec

表 2.1: T2K 実験の陽子ビームパラメーター  
設定値は 2011 年 3 月 11 日までのもの。矢印がある部分は左側が 2010 年 6 月までのもの。

陽子ビームはまず超伝導磁石や常伝導磁石などで構成される一次ビームラインへ送られ、神岡方向へ約 80° 曲げられ標的に導かれる。またこの一次ビームラインでは、ビームを的確に標的に当てるために、位置、形状、強度、ロスなどの各情報を測るためのビームモニター群 [14] が多数配置されている (図 2.4)。以下にそれをまとめる。

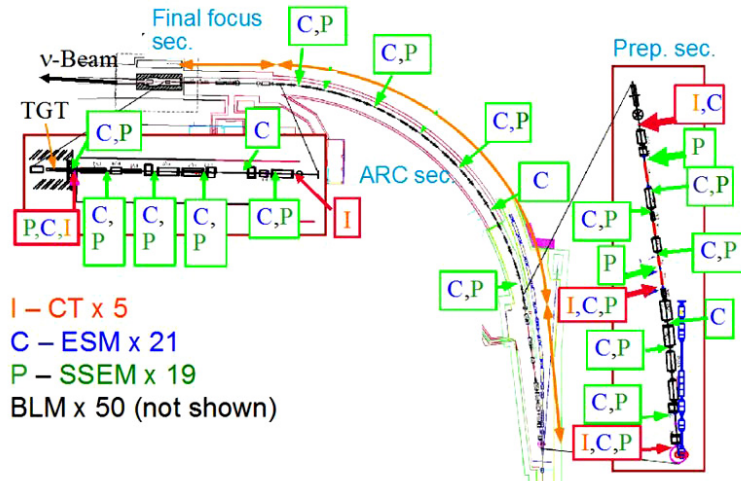


図 2.4: 各ビームモニターの配置

- ビーム位置モニター (ESM)  
ESM(ElectroStatic beam position Monitor) は、静電ピックアップ型のビーム位置モ

ニターで、21 台設置されている。ビームが電極に誘起する電荷の非対称性からビームの位置を求める測定器である。

- ビーム形状モニター (SSEM)

SSEM(Segmented Secondary Emission Monitor) は、19 台設置されている。薄いチタン膜をストリップ状に分割したものを、水平方向、鉛直方向に組み合わせた構造をしている。ビームがストリップを通過した際に放出される二次電子の量がビーム強度に比例することを利用して、形状を測定する。測定する際にビームロスが発生させるため、必要な時にビームライン上に挿入し、通常は退避させている。

- ビーム強度モニター (CT)

CT(Current Transformer) は 5 台設置されている。強磁性体をコアにしたトロイダルコイルを用いた電流トランスである。ビームが CT を通過する際にトロイダル磁場が発生し、これによる生じる誘導電流を信号として読み出す。ビームの安定性、輸送効率、POT<sup>\*6</sup>などが算出される。

- ビームロスモニター (BLM)

BLM(Beam Loss Monitor) はアルゴンベースのガスを封じ込めたワイヤプロポーションカウンターで、各磁石の近傍に設置され、全部で 50 台ある。ビームロスが多いとビーム量が減るばかりでなく、ビームライン機器が故障し、放射化によりそのメンテナンスにおいても支障をきたしてしまうので、ビームロスの測定は重要である。大きなビームロスが行った際にはビームを止め、機器のメンテナンスのために放射化を正確に予測し、放射化を減らすためのビーム調整を促す。

こうして一次ビームラインを通過したビームは、ニュートリノを生成する過程としての二次ビームライン<sup>[15]</sup>へ移る。

二次ビームラインにおいて陽子ビームは直径 26mm、長さ 900mm のグラファイト標的に照射され、ハドロン反応によりパイオンを含む多数のハドロンが生成される。生成されたパイオン ( $\pi^+$ ) は三台の電磁ホーンにより、平行に収束される。その後パイオンは約 110m の崩壊トンネルに入り、ここで  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  といった崩壊をし、ミューオンニュートリノが生成される。トンネルの終端にはビームダンプが置かれ、陽子や崩壊せずに残ったパイオンなどのハドロン、低エネルギーのミューオンが吸収される。以上ニュートリノビーム生成の一連の流れを絵にしたのが図 2.5 である。

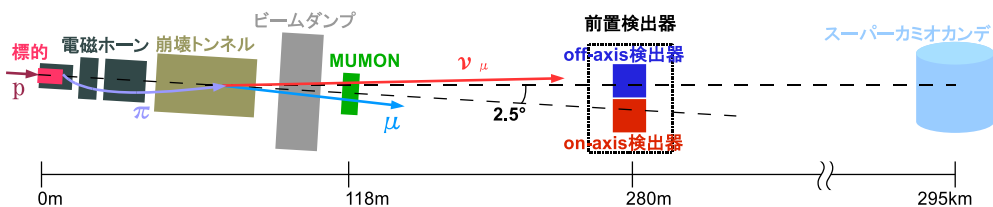


図 2.5: ニュートリノ生成過程と各検出器の配置

<sup>\*6</sup>Proton On Target の略で、標的への陽子照射数を表す。

2.3.2 off-axis 法

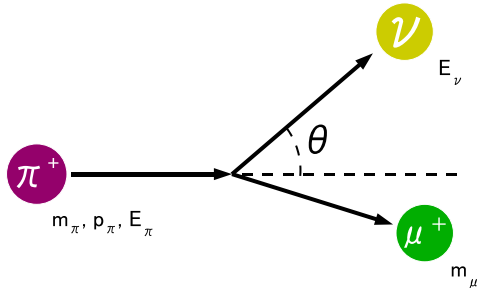


図 2.6: パイオン崩壊の模式図

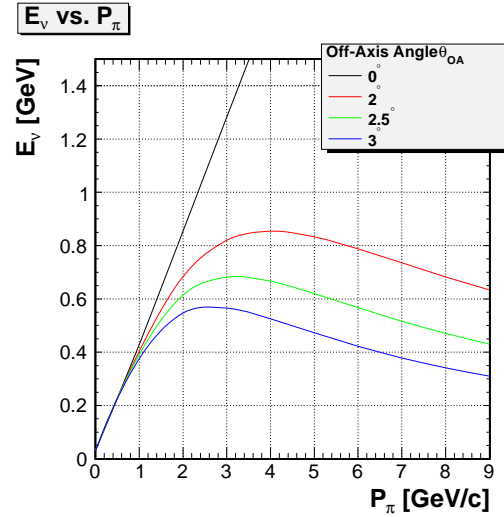


図 2.7: パイオンの運動量とニュートリノのエネルギーの関係

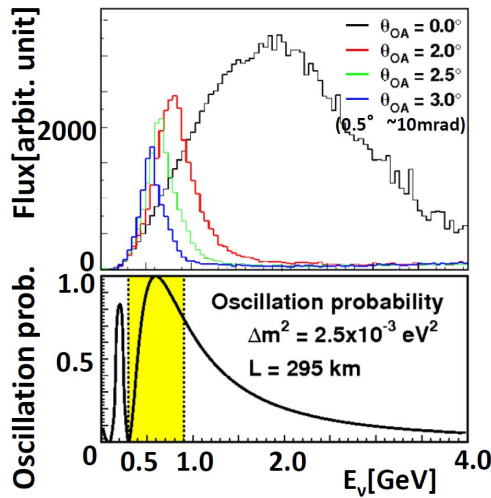


図 2.8: off-axis 角ごとのエネルギースペクトル (上) とニュートリノの振動確率 (下)

T2K 実験の大きな特徴は、off-axis 法を採用したことにある。off-axis 法とは、ニュートリノビームの中心軸を検出器の方向からわずかにずらすことにより、幅の狭いエネルギースペクトルを持ったニュートリノビームを得る方法である。このときの中心軸との角度を、off-axis 角という。

off-axis 法の原理を説明する。ニュートリノビームを標的に当てて生成したパイオンの

2 体崩壊  $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$  によって生成されるニュートリノエネルギー  $E_\nu$  は以下の通りである。

$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)} \quad (2.3)$$

ここで、 $m_\pi$ 、 $p_\pi$ 、 $E_\pi$  はそれぞれパイオンの質量、エネルギー、運動量で、 $m_\mu$  はミュオンの質量、 $\theta$  は off-axis 角である (図 2.6)。

図 2.7 はニュートリノのエネルギーを親粒子であるパイオンの運動量の関数として描いたもので、それぞれの線は off-axis 角が 0 度、2 度、2.5 度、3 度の場合に対応している。これを見ると、off-axis 角が大きくなるにつれて、ニュートリノのエネルギーがパイオンのエネルギーに依らず、一定になることがわかる。図 2.8 はそれぞれの角度におけるニュートリノのエネルギースペクトルである。

T2K 実験では off-axis 角として 2.5 度を採用しており、この角度におけるニュートリノのエネルギースペクトルのピークは、ミュニュートリノの振動確率が最大となるエネルギー領域 (500~700MeV) にほぼ一致している。これにより有効な統計量を増加させ、また電子ニュートリノ出現事象のバックグラウンドとなる  $\pi^0$  を生成するような高いエネルギーを持ったニュートリノの量を抑えることができる。しかしこれは、ビーム方向とスーパーカミオカンデにおけるビーム強度やエネルギーとの間に強い相関があるということなので、後述のミュオンモニター MUMON とニュートリノビームモニター INGRID を使って、ビーム方向を精度良く監視する必要がある。

### 2.3.3 ミュオンモニター: MUMON

ミュオンモニター (MUMON) は、ビームダンプを突き抜けてきた高エネルギーのミュオンのプロファイルと強度を測定し、ニュートリノビーム方向を間接的に測定する検出器である。ビームダンプ直後に設置されており、グラフィット標的から下流 118m に位置する。ミュオンモニターは 2 つの独立な検出器から構成されており、ビーム上流側には浜松ホトニクス製シリコン PIN フォトダイオードを、下流側にはイオンチェンバーを使用している [16] (図 2.9)。

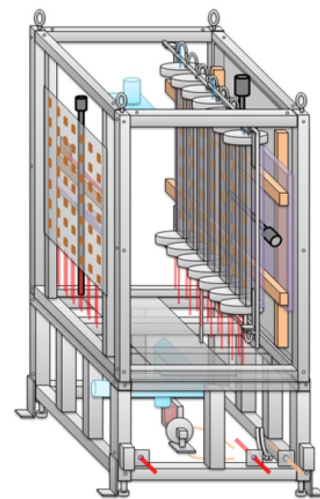


図 2.9: ミュオンモニター  
の概略図

## 2.4 前置検出器: ND280

前置検出器 (ND280) は、グラフィット標的から 280m 下流の地点に配置される検出器である。ビーム軸上の on-axis 検出器と、後置検出器 (スーパーカミオカンデ) とパイオンの平均崩壊地点を結んだ直線上の off-axis 検出器からなる (図 2.10)。

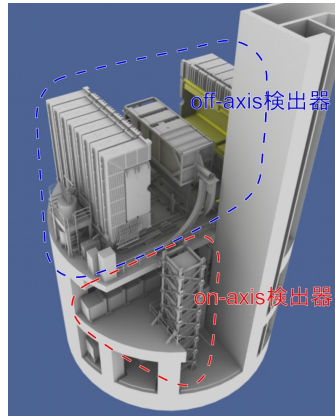


図 2.10: 前置検出器の概略図

### 2.4.1 on-axis 検出器

- INGRID(Interactive Neutrino GRID)  
INGRID は十字に配置された横型モジュール 7 台 (図 2.11)、縦型モジュール 7 台 (図 2.12) とショルダーモジュール 2 台の計 16 台の同一のモジュールからなる。先の 7 台ずつでそれぞれニュートリノビームの垂直方向、鉛直方向のプロファイルを再構成し、ビーム方向を決定する。ショルダーモジュールはニュートリノビームの歪みを測定する役割を担う。更に詳しい説明は次章で行う。
- Proton Module  
細長いプラスチックシンチレーターを XY 方向に多数並べた飛跡検出器で、INGRID 縦型モジュールと横型モジュールの間に位置する。T2K 実験のビーム軸上の低エネルギーニュートリノの反応を検出し、ニュートリノビームへの理解を深め、ニュートリノの反応断面積の不定性を抑制することを目的としている [17]。図 2.13 は Proton Module の概略図である。図 2.14 はイベントディスプレイの例で、Proton Module を突き抜けて INGRID へと入射する荷電粒子の様子がわかる。

### 2.4.2 off-axis 検出器

off-axis 検出器はスーパーカミオカンデへ向かう軸上に設置された複合型検出器である。off-axis 検出器には満たすべきいくつかの要求がある。一つ目は、スーパーカミオカンデにおけるミューニュートリノのフラックスの情報を決定することである。二つ目は、電子



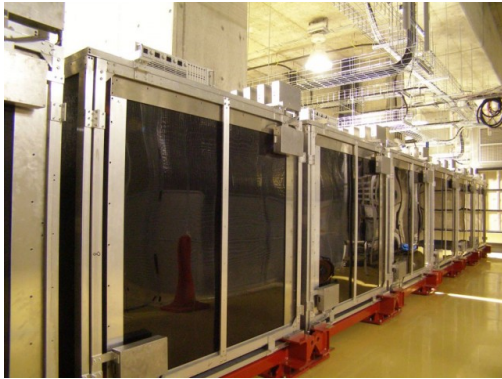


図 2.11: INGRID 横型モジュールの写真



図 2.12: INGRID 縦型モジュールの写真

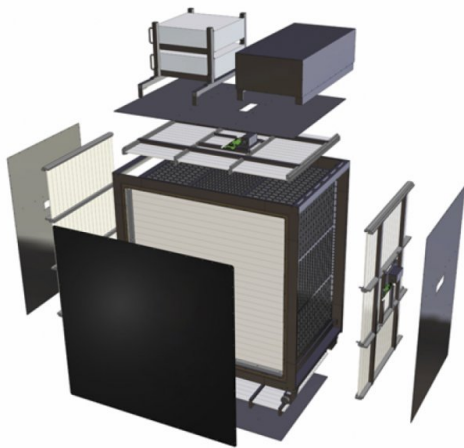


図 2.13: Proton Module の概略図

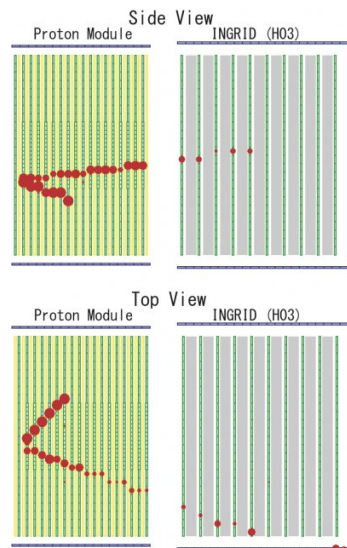


図 2.14: Proton Module のイベントディスプレイの例

ニュートリノの数をエネルギーの関数として測ることである。電子ニュートリノはおよそ1%程度混ざっていると推定されており、これはバックグラウンドとして無視できない上に、取り除けないので、詳細に調べる必要がある。三つ目は、電子ニュートリノ出現事象の探索でバックグラウンドとなるシングル  $\pi^0$  を生成する中性カレント反応の断面積を測ることである。off-axis 検出器は以下のような構成になっている。

- UA1 マグネット  
検出器全体を覆い、0.2Tの磁場により荷電粒子の飛跡を曲げるのに用いられる大型常伝導双極電磁石。粒子の運動量を決定するのに十分な分解能がある。かつてCERN(欧州原子核研究機構)のUA1実験で使われていたものであり、CERNより寄贈された。
- P $\emptyset$ D( $\pi^0$  Detector)  
P $\emptyset$ Dは、水ターゲットを用いて、シングル  $\pi^0$  を生成する中性カレント反応の断面積を測る役割を担う。X方向Y方向にシンチレーターバーを並べたトラッキングプレーンと、水ターゲットを交互に配置したサンドウィッチ構造になっている。
- FGD(Fine Grained Detector)<sup>[18]</sup>  
FGDは二つのパートからなり、上流側にある一つは、XY方向にシンチレーターバーを並べた構造をしている。ニュートリノ反応の標的となり、その反応の種類を決定するために、反応点周りの短いトラックを検出する。下流側のもう一つは、シンチレーター層と水ターゲット層のサンドウィッチ構造で、検出器内でのニュートリノ反応数を調べる。
- TPC(Time Projection Chamber)<sup>[19]</sup>  
FGD内でのニュートリノ反応から発生した $\mu$ の運動量を測る。電荷、運動量、 $dE/dx$ などの情報から粒子の識別を行う。
- ECal(Electromagnetic Calorimeter)  
P $\emptyset$ D、FGD、TPCの周りを覆い、これらの検出器内で起こった反応により発生した電子や光子の方向やエネルギーを測定し、反応の再構成を助ける役割を担っている。鉛層とシンチレーター層から構成される。
- SMRD(Side Muon Range Detector)  
UA1 マグネットの鉄層の隙間に設置されたシンチレーター検出器。大角度で散乱したミュオンの方向と運動量を測定する。off-axis 検出器内に入射、及び貫通する宇宙線ミュオンのトリガーとして使用する、検出器を取り囲む鉄や壁で反応し生成されるビーム由来のバックグラウンドを同定するなど、複数の用途に使用される。

図 2.15、図 2.16 はそれぞれ off-axis 検出器の概略図と写真、図 2.17 はイベントディスプレイの例である。

## 2.5 後置検出器: スーパーカミオカンデ

T2K 実験では後置検出器としてスーパーカミオカンデ<sup>[20]</sup>を使用している。スーパーカミオカンデは岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山地下 1000m に建設された、世界最大の水チェ



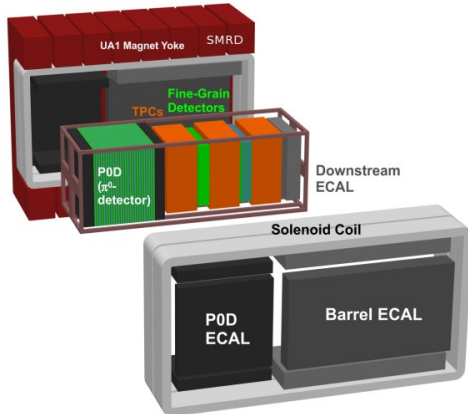


図 2.15: off-axis 検出器の概略図

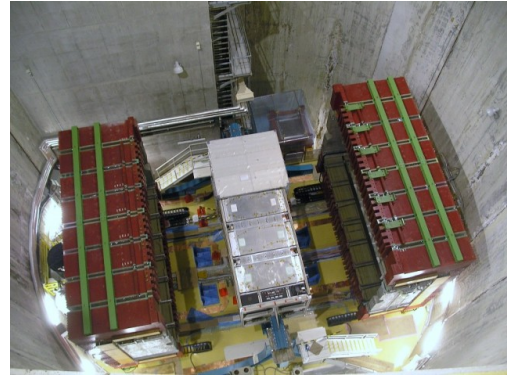


図 2.16: off-axis 検出器の写真

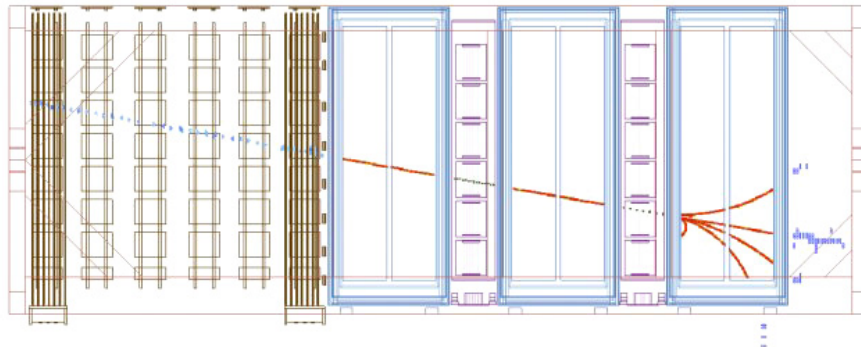


図 2.17: off-axis 検出器のイベントディスプレイの例

レンコフ検出器である。外殻は直径 39m、高さ 42m の円筒形をしている。中は大きく 2 層に分かれていて、内側の円筒形の領域をインナーディテクター (以下、ID)、ID を覆う薄い領域をアウターディテクター (以下、OD) という。ID は直径 33.8m、高さ 36.2m で、内壁に 50cm 大の光電子増倍管 (浜松ホトニクス社 R3600) を 11146 本埋め込まれ、32kt の超純水で満たされている。OD は厚みがおよそ 2.5m 程の領域で、ID へと入射する宇宙線ミュオンの除外 (VETO) や、ID から外へ抜け出す粒子を検出するのに用いる。20cm 大の光電子増倍管 (浜松ホトニクス社 R1408) を 1885 本持つ。検出器としての有効質量は ID の内壁から 2m 内側の領域で、全体の 45% にあたる 22.5kt である。図 2.18 と図 2.19 はそれぞれスーパーカミオカンデの概略図と、内部写真である。

スーパーカミオカンデ内に入射したニュートリノが、弱い相互作用により荷電粒子を生成する際、その荷電粒子が十分高エネルギーであるとき、チェレンコフ光を放射する。それを壁に取り付けられた光電子増倍管で観測すると、リング状に見える。このリングから粒子の種類、生成点、エネルギー、到来方向などを再構成する。

スーパーカミオカンデで観測されたニュートリノが、J-PARC で生成されたものであると識別するために、GPS を用いる。GPS を使って J-PARC でニュートリノビームが発射

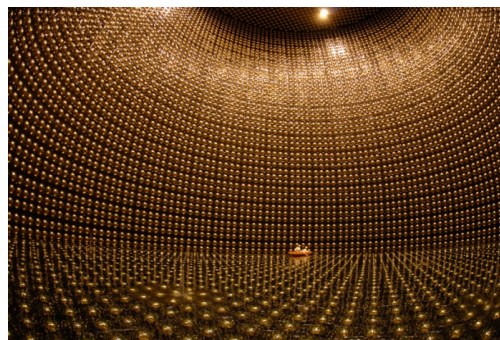
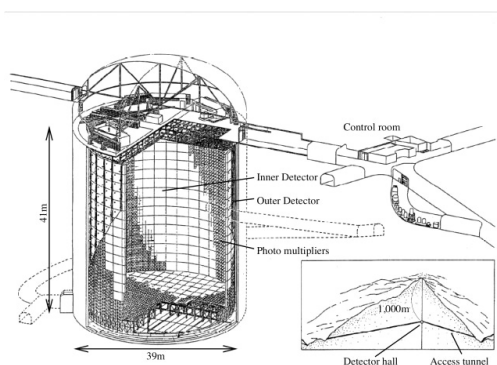


図 2.18: スーパーカミオカンデの概略図      図 2.19: スーパーカミオカンデ内部の写真

された時刻と、スーパーカミオカンデでニュートリノを観測した時刻を記録し、それらが等しい場合、J-PARC で生成されたニュートリノによるイベントであると判別する。GPS の時間測定精度は 10nsec である。

## 2.6 物理ラン

T2K における物理ランは 2010 年の 1 月から 6 月までの Run1 と、2010 年の 11 月から 2011 年の 3 月までの Run2 の二つが実施された (2012 年 1 月現在)。そしてそれぞれの Run は MR の稼働状況に応じて割り当てられている MR Run ナンバーで更にいくつかの期間に分けられる。表 2.2 は各ランナンバーの割り当てと期間をまとめたものである。

T2K run ナンバー	MR run ナンバー	期間
1	29	2010 年 1 月 23 日 ~ 2010 年 2 月 5 日
1	30	2010 年 2 月 24 日 ~ 2010 年 2 月 28 日
1	31	2010 年 3 月 19 日 ~ 2010 年 3 月 25 日
1	32	2010 年 4 月 14 日 ~ 2010 年 5 月 1 日
1	33	2010 年 5 月 9 日 ~ 2010 年 6 月 1 日
1	34	2010 年 6 月 7 日 ~ 2010 年 6 月 26 日
2	36	2010 年 11 月 11 日 ~ 2010 年 12 月 25 日
2	37	2011 年 1 月 19 日 ~ 2011 年 2 月 28 日
2	38	2011 年 3 月 4 日 ~ 2011 年 3 月 11 日

表 2.2: 物理ランにおける各ランナンバーと期間

## 2.7 震災による J-PARC への影響

J-PARC は 2011 年 3 月 11 日に発生した、東日本大震災により大きな被害を受け、運転を停止した。しかしその後の迅速な復旧作業により、2011 年 12 月 9 日に LINAC のビー

△試験運転を開始。同日 11 時 20 分、RFQ<sup>\*7</sup> からの 3MeV のビームを確認した [13]。

---

<sup>\*7</sup>Radio Frequency Quadrupole Linac(高周波四重極型リニアック)。マイクロ波の力でビームを絞りながら加速する。

## 第3章 INGRIDの構成

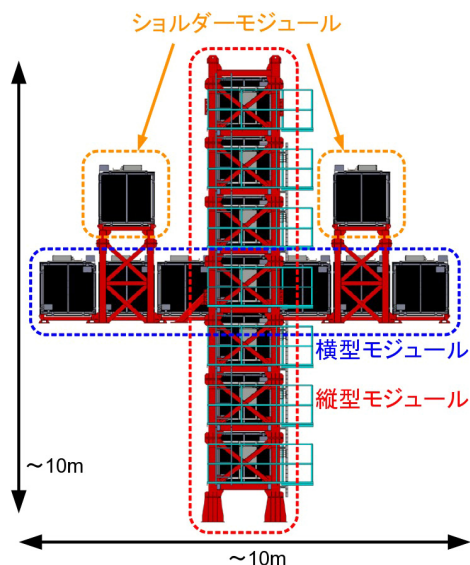


図 3.1: INGRID の概略図

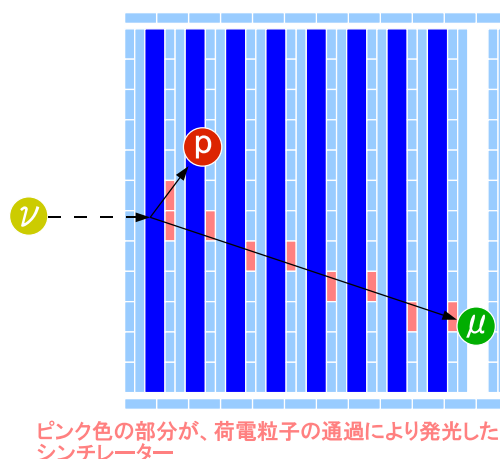


図 3.2: INGRID におけるニュートリノ検出原理の概念図

### 3.1 要請

前章で説明した通り、T2K 実験においては、ビーム方向とスーパーカミオカンデにおけるビーム強度、エネルギーとの間に強い相関があるために、ビーム方向を高精度でモニターしなければならない。そのための検出器が INGRID である。

ニュートリノのビーム方向が  $1\text{mrad}$  ずれると、ニュートリノエネルギースケール、ニュートリノフラックスにそれぞれ約 2%、約 3% の誤差が生じる [21]。これらの系統誤差を 3% 以内に抑えれば、ニュートリノ振動パラメーターの統計誤差よりも小さくすることができる。よってニュートリノビーム方向を  $1\text{mrad}$  よりも十分良い精度で測定する必要がある。つまり、ビーム生成点から  $280\text{m}$  下流に位置する INGRID においては、 $280\text{m} \times 1\text{mrad} = 28\text{cm}$  よりも十分良い精度で測定する必要がある、ということになる。

具体的な要請として、まずビームプロファイルを再構成するのに十分な大きさが必要である。この場所におけるニュートリノビームの  $1\sigma$  がおよそ  $5\text{m}$  であるので、それを十分にカバーする大きさでなければならない。次に大質量であること。INGRID はビーム強度がデザイン値の 1% (ビームコミッシング時) であるときに、1ヶ月の統計量でビーム方

向を測定することを目標として設計され、それが実現できるだけの鉄ターゲット層 (1 モジュールあたり、およそ 6.6t) を搭載することとなった [22]。

### 3.2 基本設計

それぞれのモジュールは、鉄ターゲット層 9 枚とシンチレーター層 (以下、トラッキングプレーン) 11 枚を交互に配置したサンドウィッチ構造になっている。(ビーム上流側から数えて 10 番目と 11 番目のトラッキングプレーンの間に鉄ターゲットは存在しない。) 鉄がニュートリノビーム標的となって、ニュートリノ反応で生成された荷電粒子がシンチレーターを通過することでシンチレーターが発光する。その情報から荷電粒子の飛跡を再構成することで、間接的にニュートリノを検出する (図 3.2)。トラッキングプレーンは、シンチレーターを横にして鉛直方向に並べた X レイヤーと、縦にして水平方向に並べた Y レイヤーの 2 層構造から成るため、上からと横からそれぞれで二次元の飛跡を再構成し、二つを合わせることで三次元の飛跡を再構成することができる。レイヤーの並びは、Y レイヤーの方がビーム上流側に位置する。シンチレーターとチャンネルは一対一対応になっており、トラッキングプレーンの読み出しチャンネル総数は、16 モジュール  $\times$  2 レイヤー  $\times$  11 プレーン  $\times$  24 チャンネル = 8448 チャンネルとなる。

鉄ターゲットとトラッキングプレーンを取り囲む形で、上下左右に VETO 用のシンチレーター層 (以下、VETO プレーン) が装着されている。VETO プレーンは、ビーム奥行き方向に 22 本のシンチレーターを並べた 1 層構造で、モジュールの外側から入射してきた荷電粒子を排除する役割を担う。VETO プレーンは隣り合うモジュール同士で 1 枚を共有するので、チャンネル総数は 52 プレーン  $\times$  22 チャンネル = 1144 チャンネルである。図 3.3 は INGRID の内部構造の概略図である。

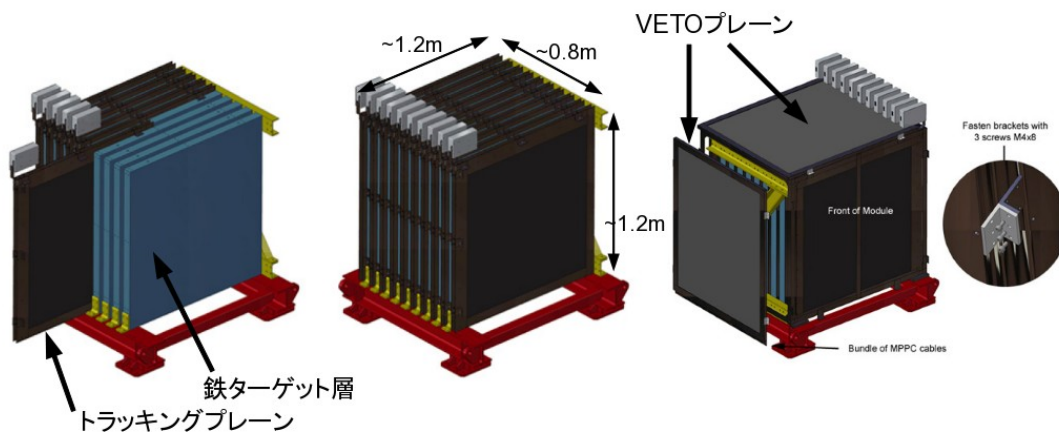


図 3.3: INGRID の内部構造



### 3.3 INGRIDの構成要素

INGRIDでは、加速器から打ち出されたニュートリノが、鉄及びシンチレーターと反応し、それにより生成された荷電粒子がシンチレーターを通過する際に発生するシンチレーション光を、波長変換ファイバーで吸収・再発光し、それがファイバー内を伝播したのち半導体光検出器 MPPC で検出され、電気信号に変換される (図 3.4)。ここでは、この過程を担うシンチレーターやファイバーなどの構成要素の性能についてまとめる。

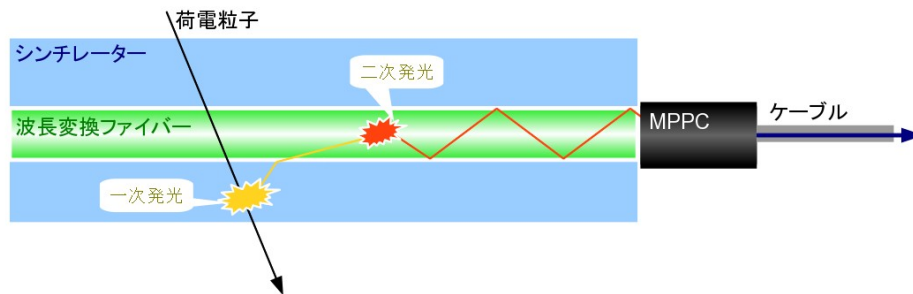


図 3.4: MPPC で荷電粒子によるヒットを検出する過程の概念図

#### 3.3.1 プラスチックシンチレーター

INGRIDで使用されているシンチレーターは全て、アメリカのフェルミ国立国際研究所で開発、製造された押し出し型シンチレーターである [23]。これはポリスチレンに PPO<sup>\*1</sup>(1%) と POPOP<sup>\*2</sup>(0.03%) を混ぜたもので、表面は製造段階で酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) ベースの反射材でコーティングされている。断面は厚み 1.0cm × 幅 5.0cm の長方形である。発光波長のピークは 425nm である。シンチレーターの中央には 2.3mm 程度の穴が空いており、ここに波長変換ファイバーを通し、それによりシンチレーション光を MPPC へと伝える。MPPC と接続する面と反対側の断面は、反射材 (ELJEN Technology 社製の EJ-510) でコーティングしてある。トラッキングプレーン、上面・下面 VETO プレーン、右面・左面 VETO プレーンでシンチレーターの長さが異なり、それぞれ 120.3cm、111.9cm、129.9cm となっている。図 3.5 は実際に使用されたシンチレーターの写真である。

#### 3.3.2 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーとは、外部から入射してきた光を吸収し、より長波長の光を再発光し、ファイバー内での全反射により光を伝える光ファイバーである。INGRIDにおいて、波長変換ファイバーはシンチレーション光を吸収・再発光し MPPC へと光信号を伝える役割を担う。INGRID で用いられているのはクラレ社の Y11(200)MS のファイバー径 1mm

<sup>\*1</sup>2,5-diphenyloxazole(C<sub>15</sub>H<sub>11</sub>NO)

<sup>\*2</sup>1,4-Bis-[2-(5-phenyloxazolyl)]-benzene(C<sub>24</sub>H<sub>16</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

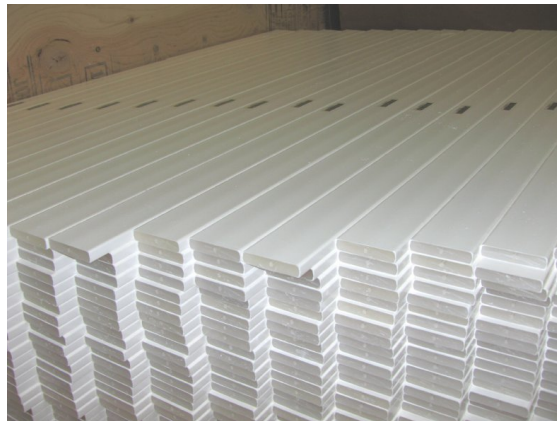


図 3.5: 押し出し型シンチレーターの写真

のもので、これは MPPC の受光面 ( $1.3 \times 1.3\text{mm}^2$ ) で十分にカバーできる大きさである。吸収波長のピークは  $420\text{nm}$  で、シンチレーターの発光波長のピーク  $425\text{nm}$  にほぼ一致する。また発光波長のピークは  $450\text{nm}$  で、この波長領域における MPPC の量子効率はおおよそ  $70\%$  である。

MPPC 側の端面は光の反射を防ぎ、再現性を高めるためにダイヤモンドカッター (Fiberfin Inc. Fiberfin 4) で研磨した上で、接着剤 (ELJEN Technology 社製 EJ-500 optical cement) を使用して GOMI コネクターと接着してある。GOMI コネクターとは、T2K 京都大学グループが開発したプラスチック製のコネクターで、MPPC に効率よく光信号を伝える事ができる [24]。MPPC 側とは反対側の端面は、反射材 (ELJEN Technology 社製の EJ-510) でコーティングしてある。

### 3.3.3 MPPC

MPPC<sup>\*3</sup> (Multi Pixel Photon Counter) [25] は浜松ホトニクス社が開発した半導体光検出器の一種である (3.6)。

- 優れたフォトンカウンティング能力
- 常温で動作
- 低い電圧 ( $100\text{V}$  以下) で動作
- 高い増幅率
- 磁場の影響を受けない
- 小型

などの特徴を持ち、T2K では INGRID の他、PØD や FGD などの前置検出器で用いられている。

<sup>\*3</sup>MPPC は浜松ホトニクス株式会社の登録商標

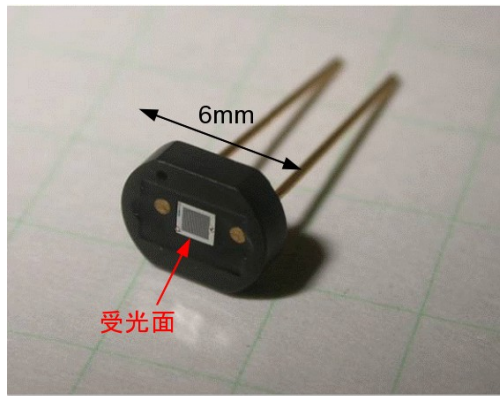


図 3.6: MPPC の写真

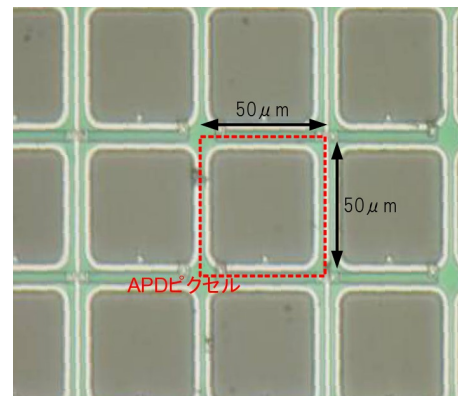


図 3.7: MPPC の受光面の拡大写真

MPPCの受光面は図3.7のようになっており、四角形の部分をAPD(Avalanche Photo-Diode)ピクセルという。APDの表面に光子が入射すると光電子が発生する。その光電子をAPDに印加した逆電圧(Bias voltage)により加速し、連鎖的に電子を発生させ、信号を増幅させることで、パルスとして一つの光子を検出することができる。APDにかかる逆電圧を降伏電圧(Breakdown voltage)という特徴的な電圧以上に設定すると、増幅率が非常に大きくなる( $10^5 \sim 10^6$ 倍)。このような状態でAPDを動作させることを、ガイガーモードと呼ぶ。MPPCはこのAPDを二次元に多数配置した構造を持つため、得られる信号は全APDピクセルの出力の総和になる。

- ゲイン

MPPCのゲインは光子によって発生した電子が幾つに増倍されたかで定義される。

$$\text{ゲイン} = \frac{Q}{e} = \frac{C}{e} (V_{bias} - V_{bd}) = \frac{C}{e} \Delta V \quad (3.1)$$

ここで、 $Q$ は1つのAPDピクセルから得られる信号の電荷量、 $e$ は素電荷、 $C$ は静電容量、 $V_{bias}$ は印加する逆電圧、 $V_{bd}$ は降伏電圧、 $\Delta V$ はオーバー電圧である。降伏電圧は温度に比例することが知られていて、その係数はおよそ $50\text{mV/K}$ である。これは温度が上昇すると結晶の格子振動が激しくなり、イオン化が起こりにくくなることに原因がある。そのためゲインを一定に保つためには、温度を一定に保ち、その温度に応じた適切な逆電圧を設定する必要がある。

- ノイズ

APDで得られるパルスは光電子によるものだけではなく、熱的に発生した暗電流によっても発生する。このパルスは原理的に光電子由来のものと区別できずにカウントされるため、測定誤差の原因となる。ノイズの発生頻度は温度が高くなるに従って高くなり、またオーバー電圧に応じて高くなる。

- アフターパルス

アフターパルスはAPDで発生した電子が結晶欠陥に捕捉され、それが遅れて解放された際に信号以外のパルスを発生させる現象のことをいう。これは検出誤差の要因



となる。温度が低いほど、電子が欠陥に捕捉される確率が高くなるため、アフターパルスは増加する。

- クロストーク

APD ピクセルにおいて、信号増幅の過程で入射した光子とは別の光子を発生させることがある。この光子が他の APD ピクセルで検出された場合、MPPC の出力は実際に MPPC に入射し検出された光子数よりも高い値を示すことになる。この現象が MPPC のクロストークの原因の 1 つと考えられている。

INGRID で使用される MPPC は、浜松ホトニクス社製の S10362-13-050C である。主な仕様は表 3.1 の通りである。

項目	仕様
受光面の大きさ	$1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$
APD ピクセルの大きさ	$50 \times 50 \text{ }\mu\text{m}^2$
APD ピクセルの数	667
動作電圧	70V(標準値)
ノイズレート (閾値 0.5pe、温度 25 度)	<1.35MHz
ノイズレート (閾値 1.2pe、温度 25 度)	<0.135MHz

表 3.1: MPPC の主な仕様

T2K で使用している MPPC は、2008 年の 2 月から 1 年かけて製造されたものである。予備を含めて 64500 個あり、内 17686 の MPPC の性質は京都大学のグループでテストされ [26]、残りの MPPC についても、他の T2K コラボレーター達によってテストされた。

### 3.4 データ収集システム

INGRID のデータ収集システム [27] は DAQ とスローコントロールの二つに分けられる。DAQ はヒットの情報を収集するなどの主なデータストリームを扱う。スローコントロールは DAQ と独立に平行して動作しており、MPPC の電圧コントロールや、温度の読み出しを行う。

#### 3.4.1 エレクトロニクス

エレクトロニクスはフロントエンドボード (TFB) とバックエンドボード (BEB) に分かれる (図 3.8)。

TFB(Trip-t Front end Board)[28] は、Trip-t チップを 4 枚使用して製作された信号読みだしボードで、TFB1 枚で最大 64 個の MPPC の同時読み出しを行うことができる。Trip-t チップはフェルミ国立加速器研究所で開発され、同研究所の加速器、テバトロンで行われた D0 実験における使用実績がある。

TFB は以下のような機能を備えている。

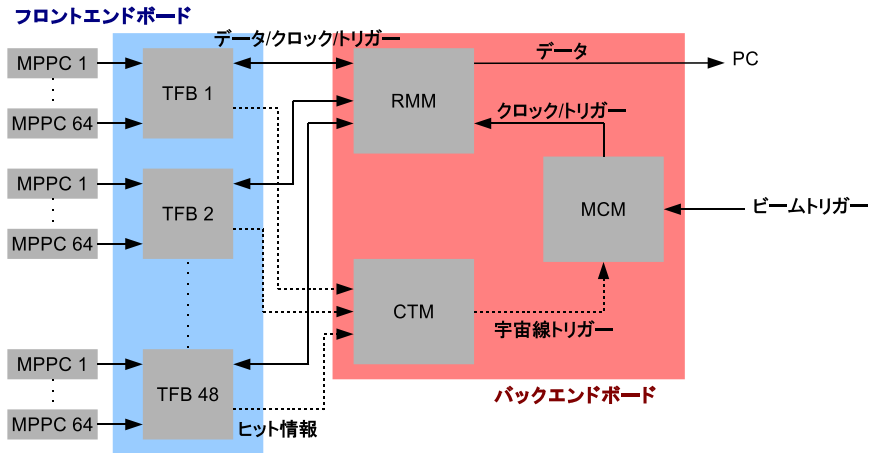


図 3.8: エレクトロニクスとデータ収集の概念図

- 電荷情報のデジタル化 (ADC)
- 時間情報のデジタル化 (TDC)
- 各 MPPC のへの印加電圧の調整  
MPPC の降伏電圧は個々によって多少異なる。そのため、同一の高電圧 (HV) を全ての MPPC にかけた上で、個々の MPPC の電圧を更に 0~5V の範囲で調整することで、全 MPPC のゲインをそろえる。この調整電圧の分解能は 8 ビットである。
- 温度情報のモニター  
後述のデジタル温度センサーの情報をモニターする。その情報はスローコントローラが 3 分毎に読み出しを行っている。

INGRID ではトラッキングプレーン 1 枚につき TFB を 1 枚、VETO プレーン 2 枚につき 1 枚使用している。表 3.2 に TFB の主な仕様をまとめる。

項目	仕様
ADC のダイナミックレンジ	0~500pe
ADC のノイズ	<0.21pe
ADC の非線形性	<5%
TDC の時間分解能	<3nsec
調整電圧の範囲	0~5V
調整電圧の分解能	8 ビット

表 3.2: TFB の主な仕様

BEB(Back End Board) は以下の 3 つから構成される。

- RMM(Readout Merger Modules)

トリガー信号や制御信号を TFB に送り、TFB からのデータを統合して PC に転送する。

- CTM(Cosmic Trigger Module)  
TFB のヒット情報から宇宙線トリガーを生成し、MCM に送る。
- MCM(Master Clock Module)  
ビームラインからビームトリガーを、CTM から宇宙線トリガーを受け取り、RMM を通じて TFB にトリガー情報を送る。

### 3.4.2 トリガー

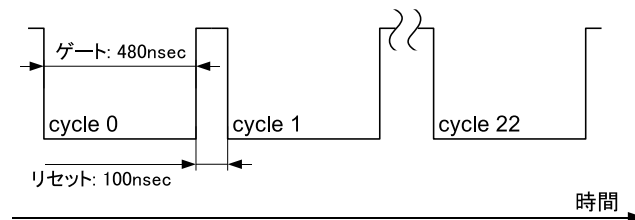


図 3.9: データ取得のサイクル構造

データ取得のためのトリガーは以下の3種類あり、それらを組み合わせることで複数のトリガーモードでデータを取得することもできる。

- ビームトリガー  
ビームデータを取得するためのトリガーで、ビームラインより送られる。
- 宇宙線トリガー  
宇宙線データを取得するためのトリガーで、TFB のヒット情報を受けて CTM が生成する。
- ピリオディックトリガー  
一定周期で発生するトリガーで、MPPC のノイズ信号を用いたゲインの調整などに用いられる。

トリガーを受けた TFB は 23 サイクルのデータ取得を開始する。データはバッファに保持され、23 サイクル分の取得が完了した時点で、BEB に転送される。サイクル構造は図 3.9 のようになっており、ゲート時間 480nsec と読み出しボードのリセット時間 100nsec の合わせて 580nsec が、ビームのバンチの時間間隔に一致するように設定されている。リセット時間は不感時間となる。

### 3.4.3 温度のモニター

MPPCの性能は温度に大きく左右されるため、MPPCの特性を知る上でも温度をモニターすることは重要である。INGRIDではデジタル温度センサ LM92(ナショナルセミコンダクター社)<sup>[29]</sup>を使用している。主な仕様は表 3.3の通りである。

各モジュールに2個ずつ取り付けられており、その位置は、ビーム上流側から見て右側面、高さ方向にして真ん中で、最下流のプレーンと中流のプレーンに1つずつである。

項目	仕様
精度	±0.33 度
分解能	12ビット+サイン
電源電圧範囲	2.7~5.5V
消費電流	0.625mA
動作温度範囲	-55~+150 度

表 3.3: デジタル温度センサ LM92 の主な仕様

## 第4章 INGRIDにおける解析の現状

### 4.1 コンベンション

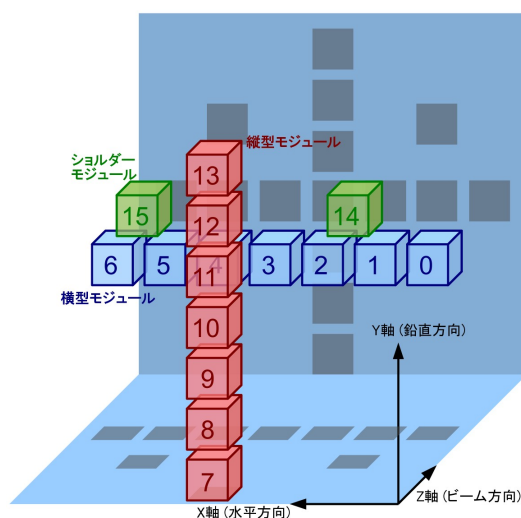


図 4.1: 座標系とモジュールナンバー

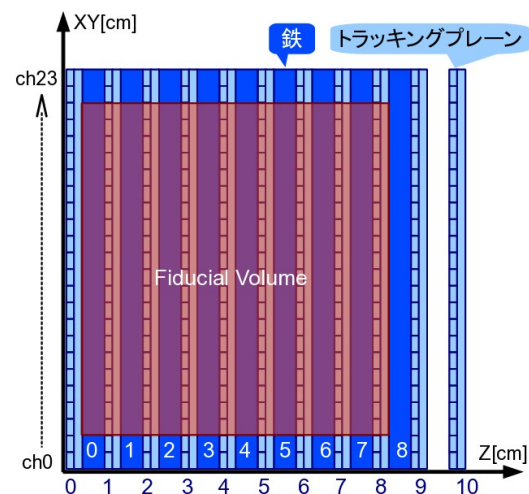


図 4.2: 各種 ID ナンバーと Fiducial volume の定義

INGRID の解析の話をするにあたって、座標系やモジュールナンバーなどの特に必要なコンベンションについて紹介する。図 4.1 は座標系と各モジュールに振り分けられた番号を示したものである。水平方向を X 軸、鉛直方向を Y 軸、ビームが進行する方向を Z 軸とする座標系である。それぞれのモジュールを意味する箱に書かれた数字が、ID ナンバーである。

図 4.2 は一つの INGRID モジュールを横ないし上から見た図で、鉄ターゲットに書かれてある白地の番号が鉄の ID ナンバー、トラッキングプレーンの下に書かれてある番号がトラッキングプレーンの ID ナンバーである。チャンネルナンバーは軸の正方向に向かって 0 から 23 までである。XY 方向においてチャンネルナンバー 2 から 21、Z 方向において鉄ターゲット 0 からトラッキングプレーン 8 までの直方体の領域を Fiducial volume と言い、これについては後の 4.3 において詳しく説明する。また INGRID モジュールを横から見ることを X ビュー (Side view)、上から見ることを Y ビュー (Top view) と言う。

VETO プレーンの ID ナンバーはビーム進行方向 (Z 軸方向) むかって右側が 11、左側が 12、下側が 13、上側が 14 である。チャンネルナンバーは、ビーム進行方向に向かって、0 から 21 までである。横型モジュールにおいて、右側のモジュールのプレーン 12 は、左隣のモジュールのプレーン 11 と共有しており、縦型モジュールにおいて、下側のモジュール

ルのプレーン 14 は、隣接する上側のモジュールのプレーン 13 と共有している。

## 4.2 モンテカルロシミュレーション

モンテカルロシミュレーション（以下、MC）には大きく分けて3つのステップがある（図4.3）。1つ目はニュートリノビームラインシミュレーション（JNUBEAM）である。それぞれのフレーバーのニュートリノのフラックスとエネルギースペクトラムを再現する。2つ目のステップは、ニュートリノ反応シミュレーション（NEUT）である。ニュートリノの相互作用の反応断面積を計算し、反応の終状態の粒子の運動をシミュレートする。最後は検出器シミュレーションで、シンチレーターの光量の再現や、波長変換ファイバー、MPPCの応答をシミュレートする（GEANT4ベース）。以下の節ではそれら3つのステップを詳しく紹介する。

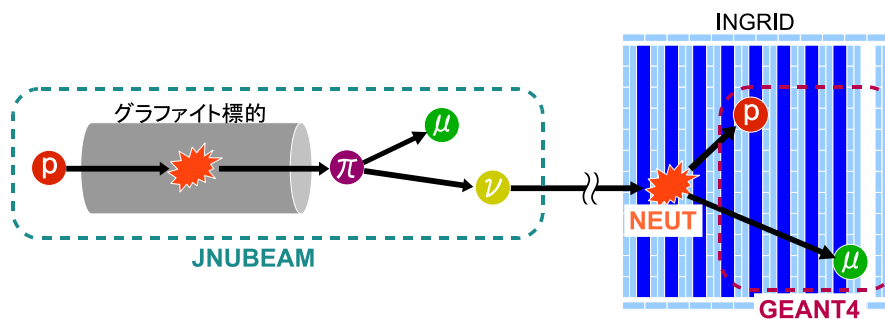


図 4.3: MC の概念図

### 4.2.1 ニュートリノビームラインシミュレーション: JNUBEAM

ニュートリノビームのシミュレーションには JNUBEAM と呼ばれるシミュレーターが使われており、これは GEANT3<sup>[31]</sup> をベースに開発されたものである。ハドロン生成モデル（FLUKA<sup>[32]</sup>, GCALOR）によりハドロンの生成をシミュレートし、電磁ホーンによる収束、崩壊トンネルにおけるハドロンの崩壊を再現し、ニュートリノフラックスを得る。

### 4.2.2 ニュートリノ反応シミュレーション: NEUT

INGRID の鉄ターゲットとのニュートリノ反応のシミュレーションには、NEUT が使われている。NEUT<sup>[33]</sup> はカミオカンデにおける大気ニュートリノや核子崩壊を調べるために開発されたシミュレーターで、その後も開発が継続され、スーパーカミオカンデや K2K 実験、SciBooNE 実験などにおける使用実績がある。

### 4.2.3 検出器シミュレーション: GEANT4

検出器のシミュレーターは GEANT4 を使って開発された。このシミュレーターでは INGRID が設置されている実験ホールが再現されている。粒子がシンチレーターに落とすエネルギーは GEANT4 のライブラリーを用いて計算され、そのエネルギーが MPPC で測定される光量 (p.e.) となる際の変換効率は、宇宙線試験の測定結果を元に決定している。

実際のシンチレーターは反射材が塗布されているために断面の形状が完全な長方形となっておらず、この反射材の部分は荷電粒子が通過しても発光しない、不感領域となっている。これは検出効率を下げる要因となっており、シミュレーションではこの検出効率を再現するように断面の形状を設定している (図 4.4)。

鉄ターゲットの質量はデザイン値の通りにしているが、実際の質量と差がある。これによる影響については 4.4 で説明する。また、MPPC のノイズについてもこのシミュレーターでは再現しておらず、別途生成している。これについては 5.3 で詳しく紹介する。

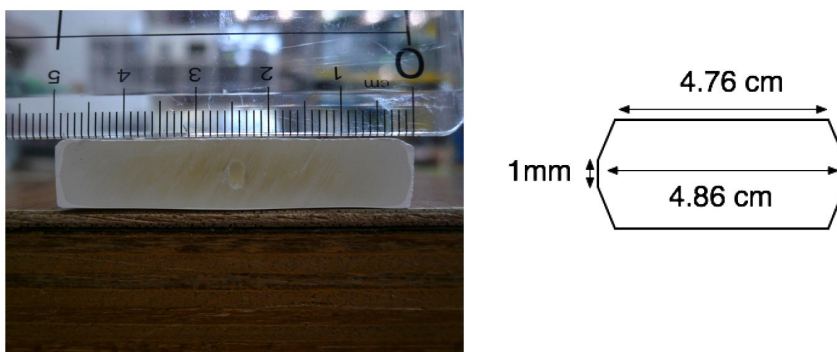


図 4.4: シンチレーターの断面の写真 (左) と、MC における断面の形状 (右)

## 4.3 ニュートリノイベントの再構成

INGRID では以下のような 8 つの条件を 1 モジュール、1 サイクル毎の測定データに対して順に課していく、最終的に全ての条件をクリアしたものをニュートリノイベントとしている。

### 1. Time clustering

一つのもジュール内で 100nsec に 3 ヒット以上あった場合、それらのヒット時間の平均値からの残差が  $\pm 50\text{nsec}$  以内であるヒットの集まりをイベントと定義する。これは MPPC のノイズによるヒットを除外することを目的としている。以下の選択条件は全て、ここで定義したイベントに対して行われるものとする。

### 2. Number of active planes selection

トラッキングプレーンの中で、X レイヤー、Y レイヤーいずれにも最低 1 つのヒットがあるプレーンのことをアクティブプレーンと定義する。またアクティブプレーンの X レイヤー、Y レイヤーをアクティブレイヤーと呼ぶ。そのアクティブプレーン



ンが3つ以上あることをイベントに要求する。これは MPPC のノイズにより、偶然アクティブプレーンとなったイベントを除去することを目的としている。

3. PE/(number of active layers) selection

アクティブレイヤーあたりの光量が 6.5p.e. 以上であることを要求する。これにより、MPPC ノイズによるイベントをニュートリノイベントに対して数 % 程度まで抑えることができる [30]。

4. Tracking

上記の条件を課して残ったイベントに対して、トラックの再構成(以下、トラッキング)を行う。トラッキングは X ビューと Y ビューでそれぞれ独立に行う。最下流のアクティブプレーンのヒットをイベントの終端とし、そこから上流のプレーンへ順にさかのぼり、ヒットを選択していく。このとき、隣り合う前後のプレーン同士のヒットが、3チャンネル以上離れていないことを要求する。上流のプレーンにヒットがなくなった時点でヒットの選択を終了し、選択した最上流のヒット点をそのビューにおける始端とする。そうして選択したヒット点に対して最小二乗法でトラッキングする。もし、最下流のアクティブプレーンに2ヒット以上あった場合は、それぞれを終端として同様のトラッキングを行い、最終的に最も長いトラックを選択する。

5. Track matching

トラッキングを X ビュー、Y ビューそれぞれで行った結果、それらの結果がニュートリノイベントとして矛盾しないかどうか確かめる。そのために、それぞれのトラックの始端のヒット(以下、パーテックス)の Z 方向の位置が2プレーン以上離れていないことを要求する。

6. Beam timing cut

宇宙線のような荷電粒子由来のイベントを除外するために、ビームタイミングから  $\pm 100\text{nsec}$  以内のイベントのみを選択する。

7. Upstream VETO cut

INGRID 外部から入射してきた荷電粒子を除外するための一つ目の条件である。トラックをビーム上流側へ外挿し、そのトラックと VETO プレーンの交点にヒットがあった場合、そのイベントは除外する。これにより、偶然ビームタイミングと一致した宇宙線イベントや、隣のモジュールの反応によって生成された荷電粒子、サンドミュオン<sup>\*1</sup>などのバックグラウンドとなるイベントを除外することができる。

8. Fiducial volume cut

Z 軸においてナンバー 1 から 8 のトラッキングプレーン、XY 平面において各プレーンの中心から  $(\pm 50) \times (\pm 50)\text{cm}^2$  の直方体の領域を Fiducial volume と定義し、イベントのパーテックスがこの Fiducial volume 内にあることを要求する。この条件の目的の一つは、サンドミュオンなどのようなビーム由来のバックグラウンドを除外することである。もう一つは偶然 VETO プレーンのシンチレーターを通過するなどして、先の Upstream VETO cut を通過してきたものを除外することである。

<sup>\*1</sup>INGRID は地下およそ 30m に設置された検出器であるため、まわりの壁の奥には大量の土がある。ニュートリノビームが INGRID 上流側の土と反応し、生成されたミュオンのことをサンドミュオンと呼ぶ。



モジュールナンバー	0	1	2	3	4	5	6
デザイン値との質量差 [%]	0.9	0.2	0.0	0.2	0.1	0.5	0.6
モジュールナンバー	7	8	9	10	11	12	13
デザイン値との質量差 [%]	-0.3	0.0	0.4	-1.1	0.2	-1.1	-0.9

表 4.1: モジュール毎のデザイン値との質量差

#### 4.4 ニュートリノイベント数に対する補正係数

INGRIDでは、データとMCのイベント数を比較するために、いくつかの補正を行っている。またこの補正はモジュール毎の系統的な差を無くすと考えられるため、正しいビーム方向を決定する上でも重要である。

補正係数は以下の式で定義される。

$$N^{cor.} = N^{sel.} \times \frac{1}{1+C} \quad (4.1)$$

$N^{sel.}$  はニュートリノイベント数、 $N^{cor.}$  は補正後のイベント数、 $C$  が各補正係数の和である。

##### 1. 鉄の質量

鉄のプレートの質量を 1kg の精度で測り、その測定値とデザイン値との差を補正係数として採用する。各モジュールの補正係数は表 4.1 の通り。

##### 2. ビーム由来のバックグラウンド

ニュートリノイベントにおけるバックグラウンドのほとんどは、中性子やガンマ線、そして Upstream VETO cut や Fiducial volume cut で除外しきれないようなごく少数のミュオンによるものである。実際の実験データにおけるこれらのイベント数を見積もるために、バックグラウンド MC のイベント数を、Upstream VETO selection で除外したイベント数で規格化する。バックグラウンド MC は、INGRID が設置されているホールの壁とニュートリノビームが相互作用することによって生成されるイベントに関するもので、この MC におけるミュオン数はデータにおいて Upstream VETO selection によって除外されるイベント数とほぼ同じであると考えられるため、このように規格化する。これにより、MC における中性子やガンマ線の割合が 0.4% と見積もられ、これを補正係数として採用する。

##### 3. MPPC のノイズ

MPPC のノイズは荷電粒子による信号と原理的に区別ができないため、ニュートリノイベントの再構成に影響を与え、結果としてイベント数を変化させていると考えられるため、これによる補正を行う。詳しい説明は次章で行う。

## 第5章 INGRIDにおけるMPPCノイズの解析

### 5.1 モチベーションと解析の流れ

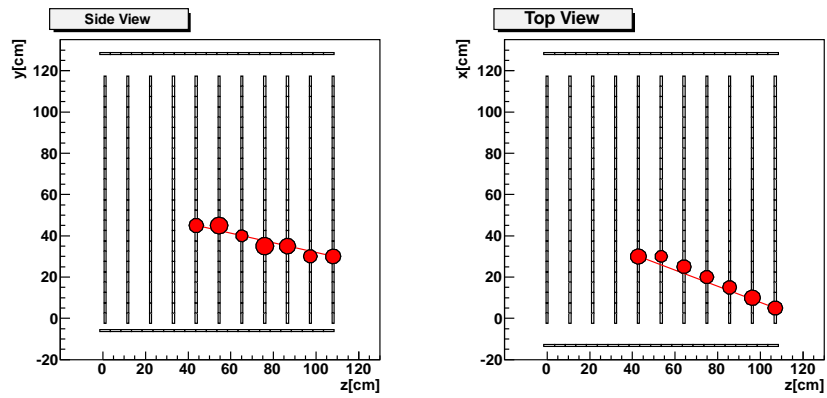
3.3.3で紹介したように、MPPCでは熱的なゆらぎによりノイズが発生し、これは荷電粒子による信号と原理的に区別はできない。そのため、INGRIDのイベント再構成において、このノイズが少なからず影響を及ぼす。図5.1は、MCにおいて、ノイズ無しの場合(a)と有りの場合(b)におけるニュートリノイベントの再構成の違いを示したものである。(a)はニュートリノイベントとして認識されるが、(b)はXビュー(Side view)において、上流側でノイズが発生したため、トラッキングの際にそのヒットもニュートリノイベントによるものとして再構成されている。そのため、このイベントはXビューとYビューでバーテックスの位置が矛盾し、Track matchingをクリアできず除外されてしまう。このように、MPPCノイズはニュートリノイベントの再構成に影響を及ぼし、ひいてはイベント数の見積りを変化させてしまうため、この影響を定量的に見積り、補正する必要がある。

ノイズによる補正を行う上で一つ重要なことは、その影響が一定ではなく、変動することである。図5.2は、T2K Run1,2における、各モジュールのノイズレートと、温度の変動を表したグラフである。グラフの一点は一日の平均値である。ノイズレートの単位は[/cycle]で、サイクルあたりのノイズ発生頻度を表している(詳しくは5.2で説明する)。これを見ると、ノイズレートがモジュール毎に大きく異なり、温度に応じて変化していることがわかる。このノイズレートと温度の関係性は、概ね逆相関であることはわかっているが、詳しくは現在調査中である。またMR runの切り替わるところで、不連続に変化しているものがある。これは新たにランが始まる際に、MPPCで十分なゲインが得られるよう、設定しなおしているためである。特にRun37では、ランの途中(2011年2月9日)で、縦型モジュールの温度が一定に保てず、MPPCをガイガーモードで動作させることができない恐れがあったため、新たに印加電圧を設定しなおしている。このように、ノイズレートが日によって大きく変動しているため、ニュートリノイベント数への影響もそれに応じて変動していると考えられる。またモジュール間の違いから、ビームプロファイルにも影響を及ぼしていると見ることができる。従って、この解析のモチベーションとしては、

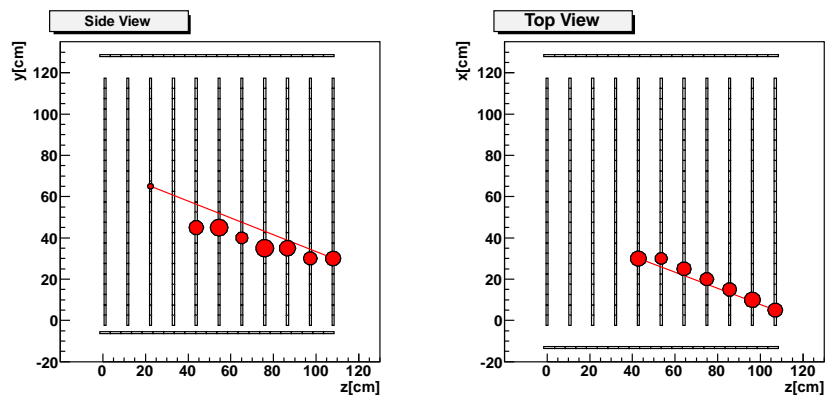
- ノイズレートとニュートリノイベント数の関係性を定量的に導く
- その関係性から、モジュール毎、日毎にイベント数を補正し、ビームプロファイルを求める

となる。

解析のおおまかな流れは以下である。

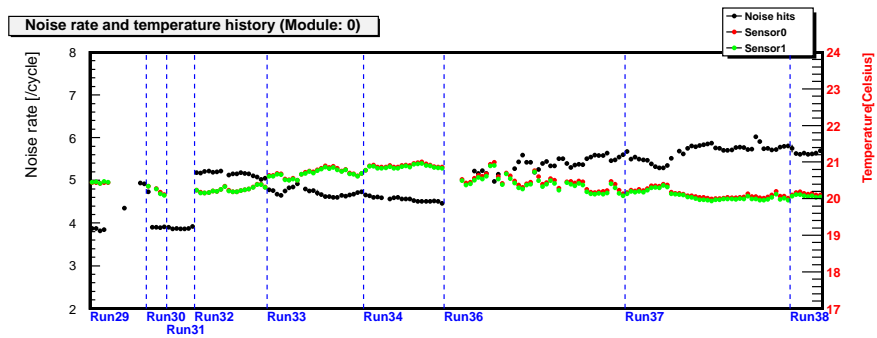


(a) ノイズ無し

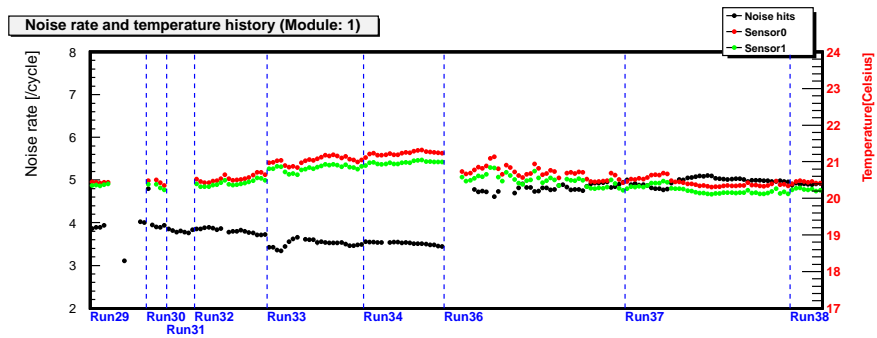


(b) ノイズ有り

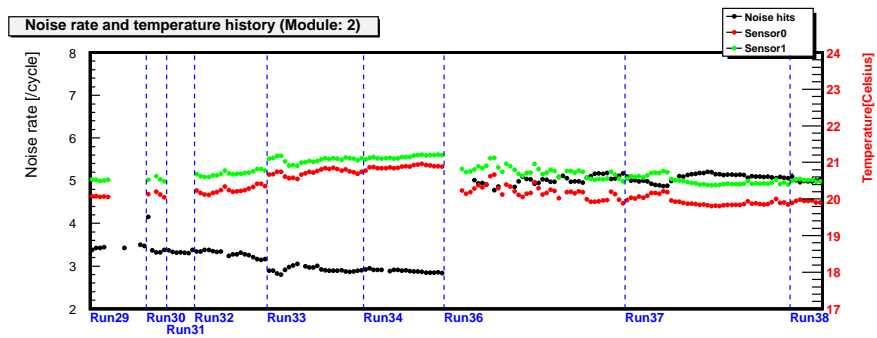
図 5.1: ニュートリノイベント再構成におけるノイズの有無による違い (Track matching の例)



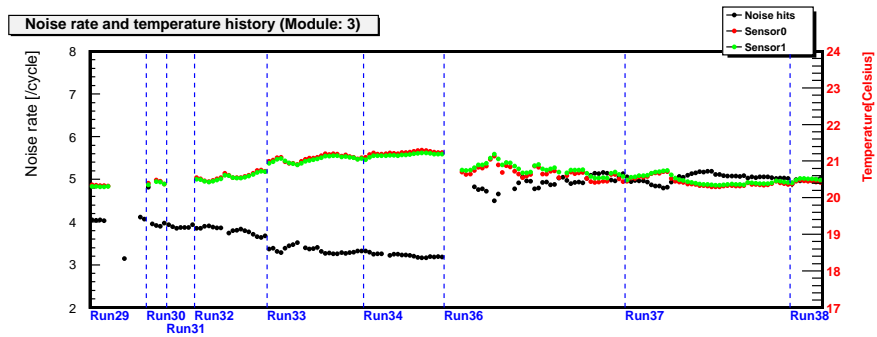
(a) モジュール 0



(b) モジュール 1

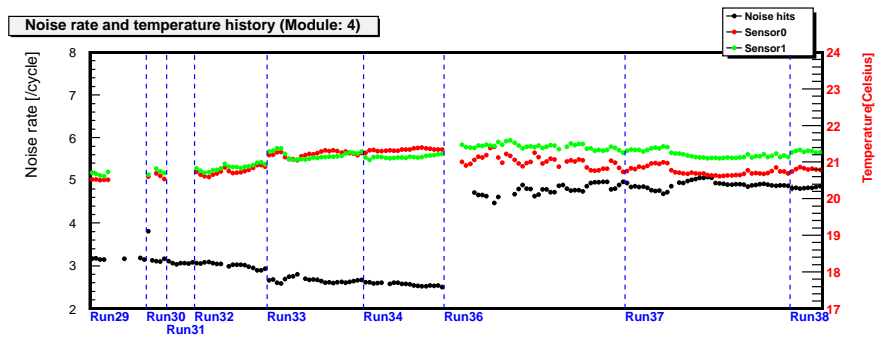


(c) モジュール 2

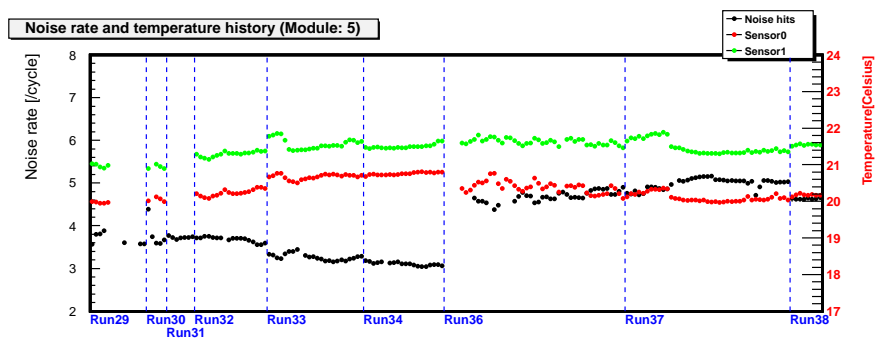


(d) モジュール 3

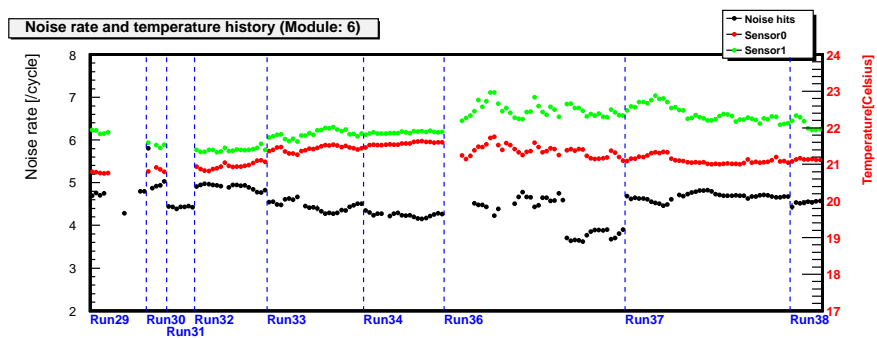
図 5.2: T2K 全物理ランにおける各モジュールのノイズレートと温度の変動



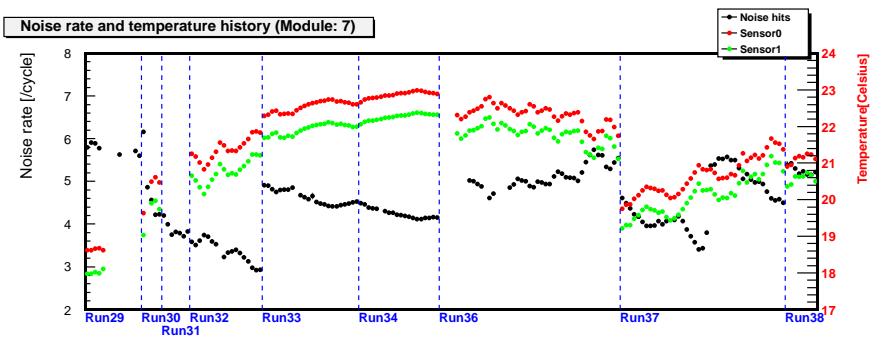
(e) モジュール 4



(f) モジュール 5

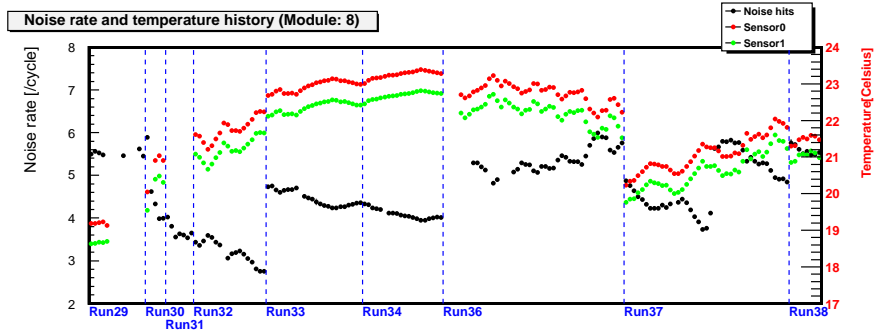


(g) モジュール 6

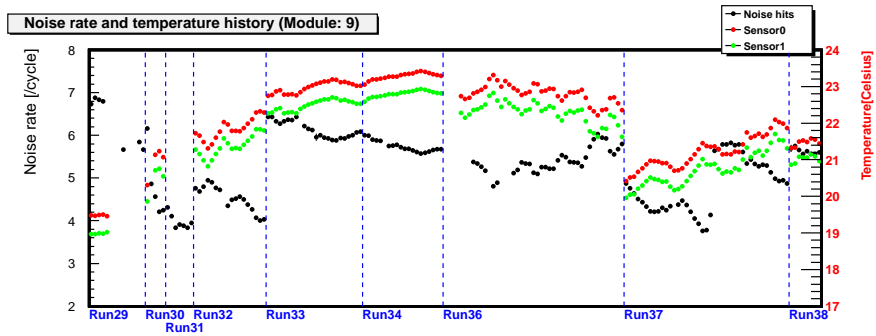


(h) モジュール 7

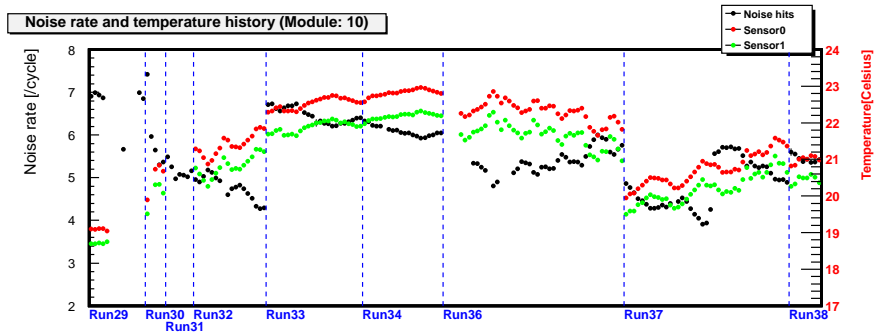
図 5.2: T2K 全物理ランにおける各モジュールのノイズレートと温度の変動



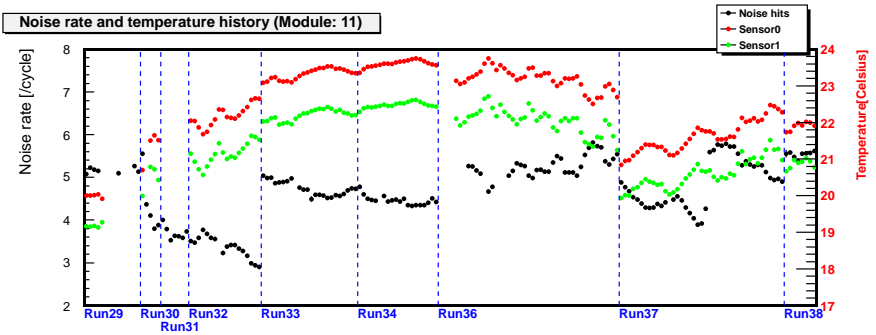
(i) モジュール 8



(j) モジュール 9

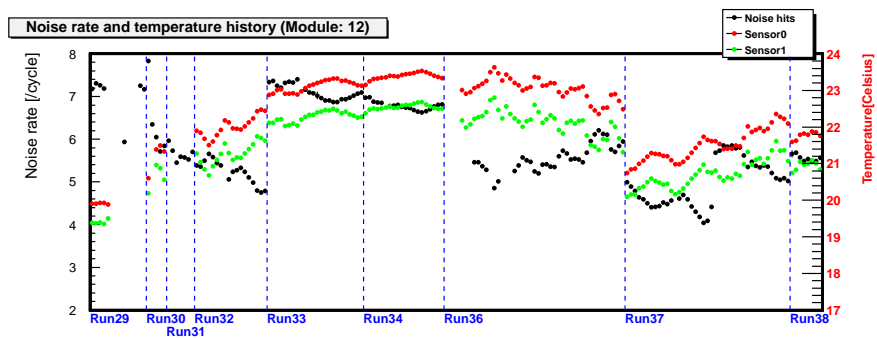


(k) モジュール 10

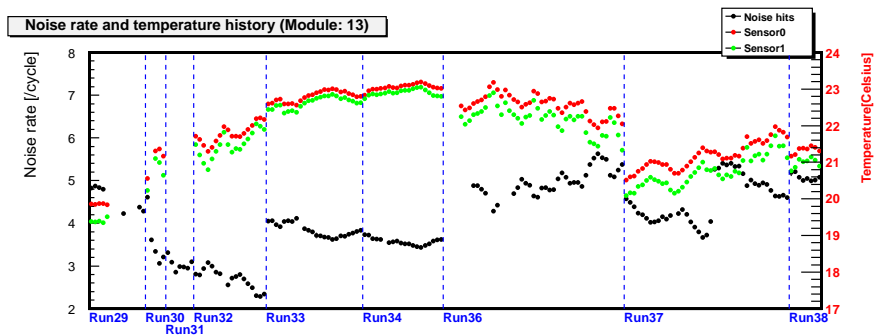


(l) モジュール 11

図 5.2: T2K 全物理ランにおける各モジュールのノイズレートと温度の変動



(m) モジュール 12



(n) モジュール 13

図 5.2: T2K 全物理ランにおける各モジュールのノイズレートと温度の変動

1. ビームが来ていないサイクルのデータから、各チャンネルのノイズレート、モジュール毎の光量分布とTDC分布を得る。
2. それらのデータを再現するようなノイズデータを生成し、あらかじめ用意しておいたノイズ無しのMCにそれらを加える。
3. そうして得られたノイズ有りのMCと、ノイズ無しのMCでそれぞれニュートリノイベントの再構成を行い、二つのMCのイベント数の差が何%であるかモジュール毎に計算する。
4. 横軸をモジュール毎のノイズレート、縦軸をイベント数の差として散布図を作り、これを一次関数でフィットする。
5. MPPCノイズによるニュートリノイベント数への影響はこの一次関数に従うものとして、新たに日毎、モジュール毎にノイズレートを計算し直し、日毎にデータに補正をかけていく。

以上の流れを、以下の節で詳しく説明していく。

## 5.2 MPPCノイズデータ

3.4.2で述べたように、INGRIDにおけるデータ収集は一回のビームショットに対して23サイクル行われる。そのため、23サイクルのうちビームデータが保存されているサイクルは8パンチに相当する8サイクル分のみであり、残りのサイクルはMPPCのノイズ、もしくは偶然INGRID内に入射した宇宙線などの荷電粒子によるヒットの情報が保存されている。図5.3は全23サイクルのうち、サイクル0から12までのTDC分布である。一つの山が一つのサイクルに相当する。5つめのサイクルから始まって8サイクルにはピークがあり、これがニュートリノビーム由来のヒットである。

本解析では具体的に以下の二つの条件を満たすサイクルのデータを、ノイズデータとする。

- ニュートリノビームデータが含まれていないサイクル
- Time clustering条件をクリアしていないサイクル

4.3で説明したように、Time clusteringとはイベントを再構成する条件の1つめである。もしこの条件をクリアしているとすると、そのサイクルでは宇宙線などの荷電粒子によるヒットが存在する可能性があるため、これを除外する。

ノイズレートは以下の式で定義する。

$$\text{ノイズレート} [\text{/cycle}] = \frac{\text{ノイズ数}}{\text{サイクル数}} \quad (5.1)$$



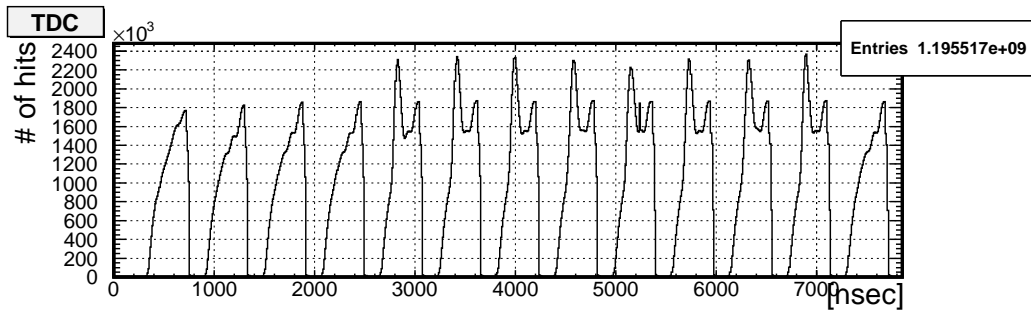


図 5.3: サイクル 0 から 12 までの TDC 分布 (Run36)

## 5.3 ノイズシミュレーション

### 5.3.1 シミュレーションのプロセス

シミュレーションのプロセスが以下である。

1. データから得たチャンネルのノイズレートを元に、そのチャンネルでノイズが発生するかどうかを乱数を用いて決定する。
2. 乱数を用いて、データから得た TDC 分布を再現するように TDC の値を決定する。
3. 光量対 TDC の二次元分布より、そのタイミングにおける光量分布を得て、それを再現するように乱数を用いて光量を決定する。
4. これらのプロセスを全チャンネルにわたって繰り返し、必要なサイクル数分だけ生成する。

MPPC への印加電圧や温度変化によるノイズレートの変動に応じて、ノイズデータを 10 の区間に分けた (表 5.1)。そしてそれぞれの区間で再現元となるチャンネルのノイズレートや TDC 分布などを得て、シミュレーションを行った。

区間	MR run ナンバー	INGRID run ナンバー	期間
1	32	12398~12437	2010年4月14日 ~ 2010年5月1日
2	33	12444~12492	2010年5月9日 ~ 2010年6月1日
3	34	12494~12522	2010年6月7日 ~ 2010年6月26日
4	36	13048~13076	2010年11月11日 ~ 2010年12月10日
5	36	13082~13093	2010年12月10日 ~ 2011年12月25日
6	37	13107~13128	2011年1月19日 ~ 2011年1月28日
7	37	13130~13138	2011年1月29日 ~ 2011年2月9日
8	37	13144~13151	2011年2月9日 ~ 2011年2月19日
9	37	13153~13159	2011年2月20日 ~ 2011年2月28日
10	38	13166~13175	2011年3月4日 ~ 2011年3月11日

表 5.1: シミュレーションを行った区間の詳細

シミュレーションで生成したノイズと、データを比較したものが図 5.4 である。シミュレーションは十分にデータを再現していることがわかる。ここに載せている以外のモジュールや区間についても、データを再現していることを確認した。

### 5.3.2 バッドチャンネル

INGRID モジュールではいくつかのバッドチャンネルが確認されている。バッドチャンネルとは、MPPC の故障やケーブル損傷などにより、MPPC からの信号を正しく読み出すことができなくなったチャンネルのことを言う。表 5.2 はその一覧である。

モジュール ナンバー	ビュー	プレーン ナンバー	チャンネル	原因
0	Y	8	2	ケーブルの損傷
0	Y	8	14	ケーブルの損傷
0	X	13	12	ケーブルの損傷
1	Y	1	14	ケーブルの損傷
5	Y	2	0	ケーブルの損傷
5	Y	4	2	ハイゲイン
5	Y	4	18	ケーブルの損傷
5	Y	4	20	ケーブルの損傷
5	Y	7	9	ケーブルの損傷
7	X	5	0	ペDESTAL
7	X	6	9	ペDESTAL
9	Y	0	12	ケーブルの損傷
9	X	4	11	ケーブルの損傷
11	X	5	13	ペDESTALシフト

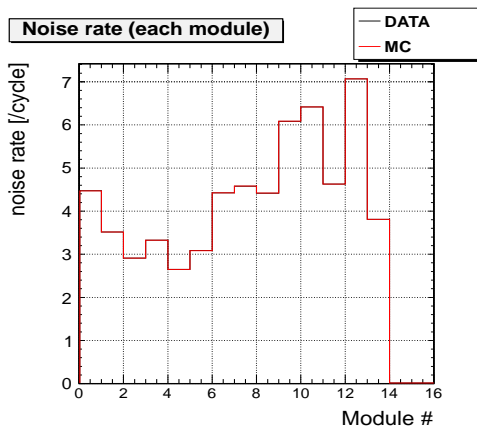
表 5.2: バッドチャンネルとその原因

MC では全ての MPPC が適切に動作することを前提としているため、ノイズのシミュレーションに関しても同様に適当な信号が得られるものとする。測定データにおけるバッドチャンネルのノイズレートは、異常に高いものや、0 になっているものがあるため、これを用いず、その他の適切に動作しているチャンネルのノイズレートの平均値を採用し、シミュレーションを行った。つまり、この MC はバッドチャンネルの一切存在しない、理想的なモジュールを想定したものとなっている。

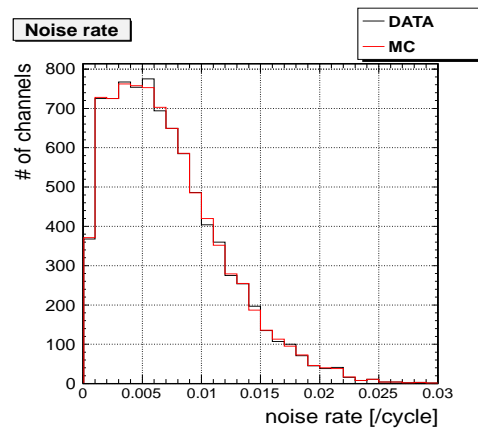
また、シミュレーションの過程で参考に行っている TDC や光量の分布においても、バッドチャンネルの情報は使わないようにしている。図 5.5 はその理由で、(a) がバッドチャンネルにおけるノイズを含めた光量分布で、(b) がバッドチャンネルを抜いた場合である。バッドチャンネルにおけるノイズにより、光量分布の形状がが大きく変化する様子がわかる。

## 5.4 ノイズによるイベント数への影響

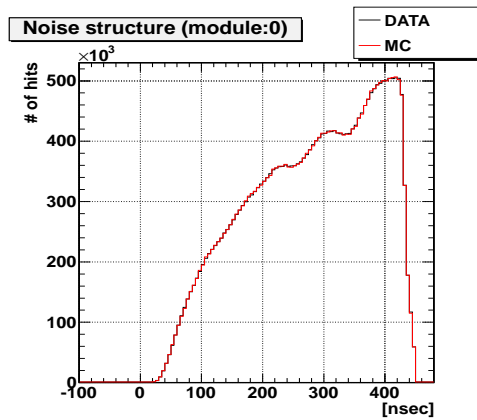
5.3.1 で生成したノイズを MC に加えたノイズ有り MC と、ノイズを加えていないノイズ無し MC で、それぞれニュートリノイベントの再構成を行い、両方でイベント数にどのような違いが表れるかを調べる。使用した MC の統計数は 200000protons×200files 相当



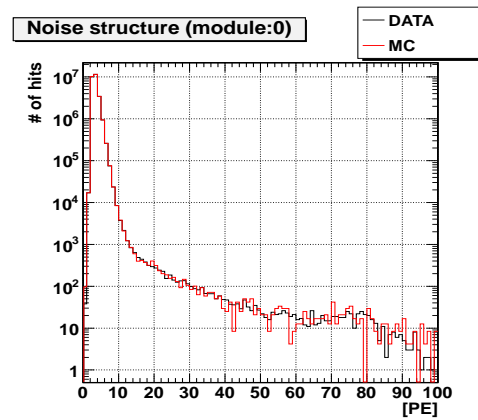
(a) モジュール毎のノイズレート



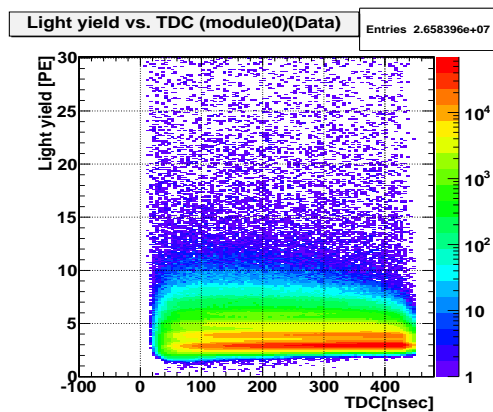
(b) チャンネル毎のノイズレート



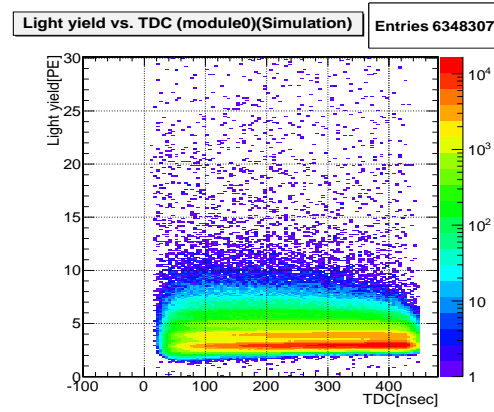
(c) TDC 分布 (モジュール 0)



(d) 光量分布 (モジュール 0)



(e) モジュール 0 の光量 vs. TDC 分布 (データ)



(f) モジュール 0 の光量 vs. TDC 分布 (シミュレーション)

図 5.4: ノイズデータとそのシミュレーションとの比較 (区間 2)

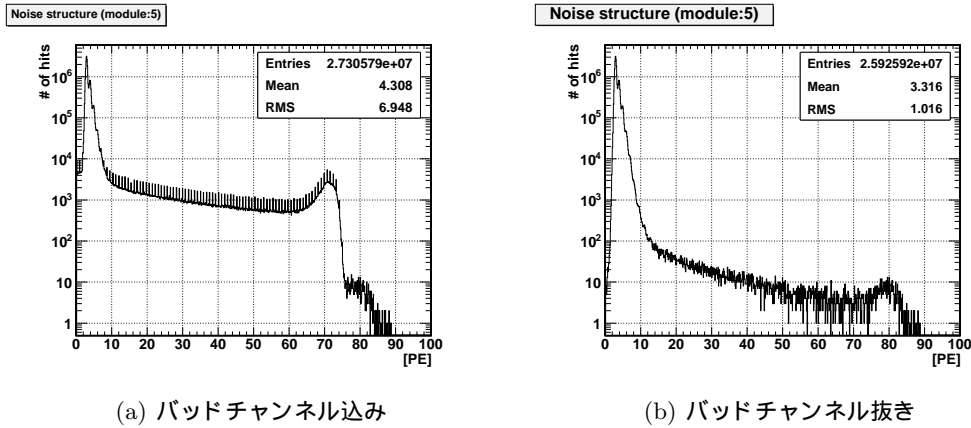


図 5.5: 光量分布におけるパッドチャンネルの有無による違い

で、全てミュニュートリノである。表 5.3 はノイズ有り MC とノイズ無し MC それぞれにおける、ニュートリノイベント再構成のための選択条件を課したときのイベント数とその差をまとめたものである。選択効率とは、選択条件を課して残ったイベント数が、課す前のイベント数の何% であるかを表した数字である。Beam timing cut でそれが 100% であるのは、MC においてビームタイミングを再現していないため、実質この選択条件が効力をなしていないことを意味する。

この表から、ノイズがイベント数に大きく影響しているのは、Tracking と Track matching のときであるとわかる。Tracking においてノイズが影響する理由は、下流のプレーンでノイズが発生し、それがアクティブプレーンとなって、トラックの終点と判定されたときに、それよりも上流のプレーンに  $\pm 2$  チャンネル以内のヒットが見つからなくなるためである。図 5.6 がその具体例で、(a) ではノイズが無いため、アクティブプレーンは 7 となり、トラッキングできている。ここで、赤い丸がトラッキングに使用したヒット点、赤い線が再構成されたトラック、青い丸がトラッキングに使用されていないヒットである。一方 (b) ではノイズが有るためにアクティブプレーンが 8 となってしまう、X ビューにおいて上流のプレーン 7 に、トラッキングとして使用できるヒット点が存在しないため、トラッキングができなくなってしまっている。Track matching に関しては、本章冒頭で説明した通りである。

横軸をノイズレート、縦軸をイベント数の差として、区間毎に散布図を作成する (図 5.7)。グラフの 1 点は 1 モジュールに対応している。もしノイズレートが 0 だとすると、ノイズ有り MC とノイズ無し MC は厳密に同じものとなり、イベント数の差は 0 である。よって散布図は次のような一次関数でフィットする。

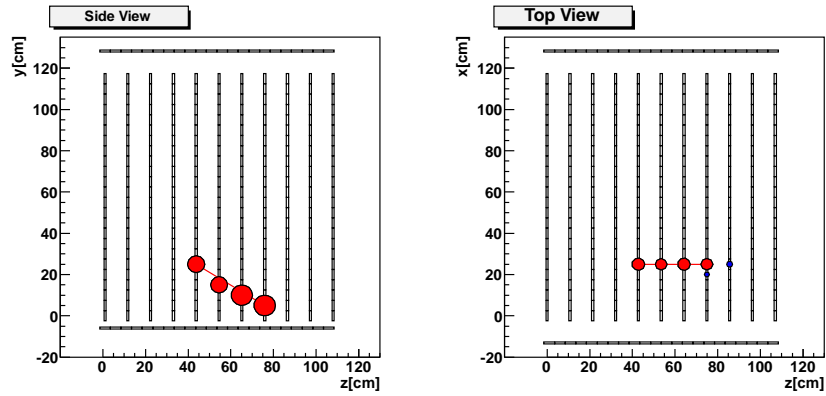
$$(\text{variation}) = p_0 \times (\text{noise rate}) \quad (5.2)$$

ここで  $p_0$  は直線の傾きを表すフィットパラメーターである。図 5.7 のそれぞれにおける右上の  $p_0$  が、フィットにより決定された値である。それぞれの区間で決定した  $p_0$  をプロットしたものが図 5.8 で、これにおける  $p_0$  は平均値であり、この値を採用する。

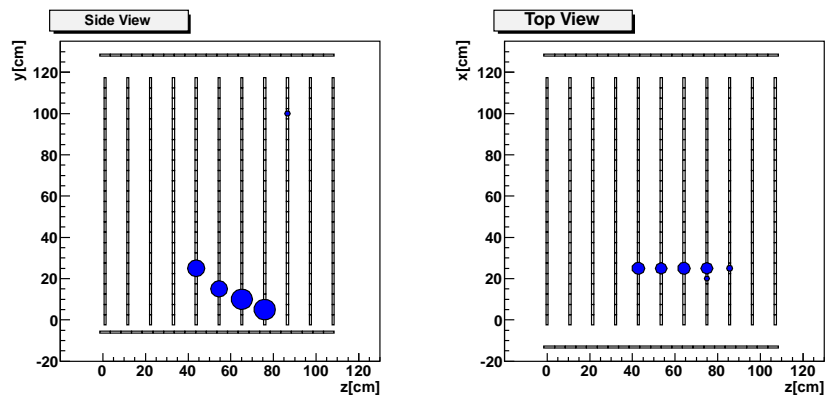
$$(\text{variation}) = (-0.5752 \pm 0.0033) \times (\text{noise rate}) \quad (5.3)$$

選択条件	イベント数 [/POT] (MC ノイズ有)	選択効率 [%]	イベント数 [/POT] (MC ノイズ無)	選択効率 [%]	差 [%]
Time clustering	$4.21 \times 10^{-14}$		$3.85 \times 10^{-14}$		9.67
# of active plnaes	$2.31 \times 10^{-14}$	54.9	$2.29 \times 10^{-14}$	59.4	1.31
PE/(# of active layers)	$2.31 \times 10^{-14}$	99.9	$2.28 \times 10^{-14}$	99.9	1.30
Tracking	$2.11 \times 10^{-14}$	91.0	$2.11 \times 10^{-14}$	92.5	-0.40
Track matching	$2.00 \times 10^{-14}$	94.8	$2.04 \times 10^{-14}$	96.3	-1.95
Beam timing cut	$2.00 \times 10^{-14}$	100.0	$2.04 \times 10^{-14}$	100.0	-1.95
Upstream VETO cut	$1.88 \times 10^{-14}$	94.3	$1.93 \times 10^{-14}$	94.8	-2.50
Fiducial volume cut	$1.47 \times 10^{-14}$	78.0	$1.50 \times 10^{-14}$	77.9	-2.36

表 5.3: ノイズ有り MC とノイズ無し MC の Selection summary table (区間 2)



(a) ノイズ無し



(b) ノイズ有り

図 5.6: ニュートリノイベント再構成におけるノイズの有無による違い (Tracking の例)

## 5.5 補正係数

日毎、モジュール毎にノイズレートを計算し、式 5.3 を使って日毎の補正係数を計算する。その際、4.4 で説明した、鉄の質量とビーム由来のバックグラウンドに関する補正係数も加える。そして日毎、モジュール毎のニュートリノイベント数を補正し、その結果が表 5.4 である。この表における補正係数は、日毎の補正をかける前と後のイベント数の差をラン毎に計算しなおしたものであるが、実質的にラン毎のイベント数に対する補正係数と言える。

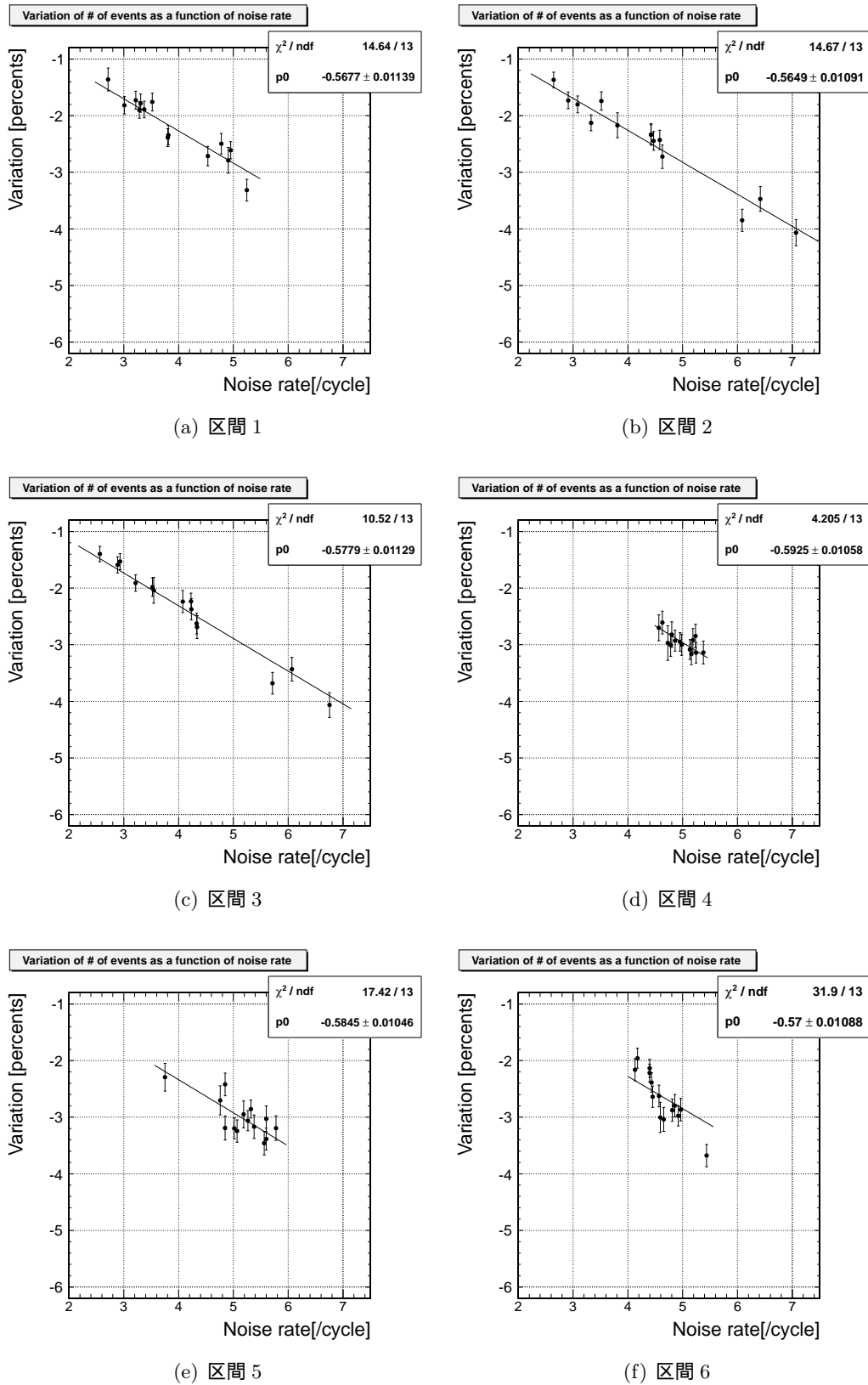


図 5.7: 各区間におけるフィットパラメーターの値



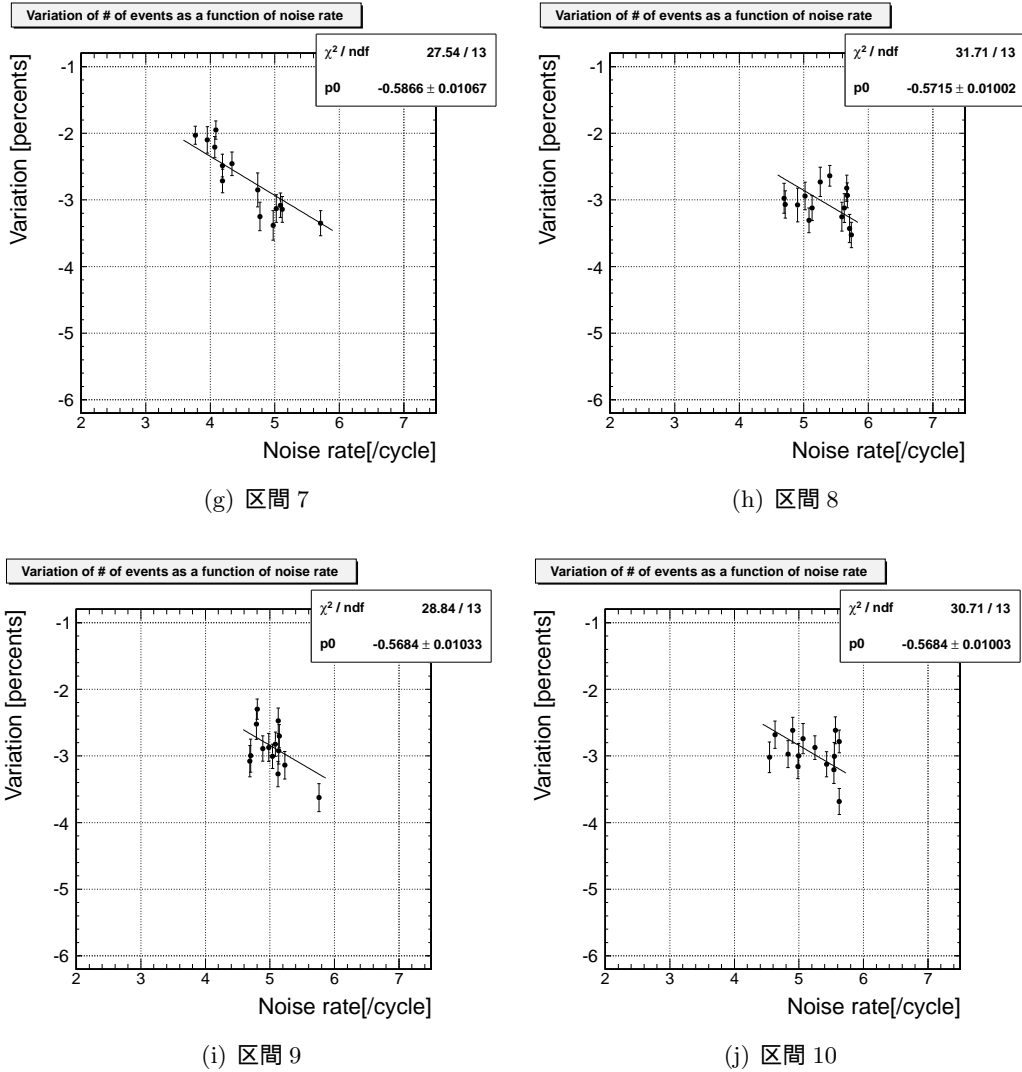


図 5.7: 各区間におけるフィット

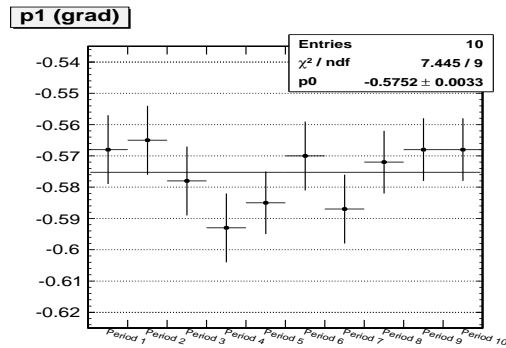


図 5.8: 各区間におけるフィットパラメーターの値

	29	30	31	32	33	34	36	37	38
0	221	833	1548	5957	9545	6962	32393	43183	9508
1	336	1189	2031	7828	12555	9520	43305	58628	12753
2	409	1466	2477	9358	15046	11622	51936	69960	15163
3	430	1451	2570	10133	15872	12191	55142	74685	16383
4	380	1451	2458	9627	15320	11651	51848	69864	15416
5	337	1187	2175	7875	12638	9558	43014	58484	12965
6	267	792	1585	5838	9589	7285	32844	44722	9973
7	266	963	1717	6637	10337	8100	34988	48081	10744
8	362	1225	2188	8350	13438	10270	46102	62224	13484
9	397	1488	2562	9770	15397	11946	53109	72869	15797
10	451	1498	2682	10308	16362	12473	56560	77439	16680
11	399	1508	2521	9770	15609	11871	53183	72621	15849
12	364	1197	2132	8146	12706	9822	45531	61758	13648
13	276	942	1659	6263	10143	7734	34985	47444	10506
0	-1.1	-1.0	-0.9	-1.7	-1.4	-1.3	-1.8	-2.0	-1.9
1	-1.5	-1.7	-1.6	-1.6	-1.4	-1.4	-2.2	-2.3	-2.2
2	-1.6	-1.6	-1.5	-1.5	-1.3	-1.3	-2.5	-2.5	-2.5
3	-1.6	-1.7	-1.6	-1.6	-1.3	-1.3	-2.2	-2.3	-2.3
4	-1.3	-1.3	-1.3	-1.2	-1.0	-1.0	-2.3	-2.3	-2.3
5	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2	-1.0	-0.9	-1.8	-2.0	-1.8
6	-1.7	-1.9	-1.5	-1.8	-1.5	-1.4	-1.4	-1.7	-1.6
7	-3.2	-2.5	-2.1	-1.8	-2.5	-2.3	-2.9	-2.5	-2.9
8	-2.8	-2.1	-1.7	-1.4	-2.1	-1.9	-2.7	-2.4	-2.8
9	-2.8	-1.8	-1.5	-1.8	-2.7	-2.5	-2.3	-2.0	-2.4
10	-4.5	-4.0	-3.6	-3.4	-4.4	-4.2	-3.8	-3.5	-3.8
11	-2.4	-1.8	-1.5	-1.3	-2.1	-1.9	-2.4	-2.2	-2.6
12	-4.7	-4.2	-3.9	-3.7	-4.8	-4.6	-3.9	-3.6	-3.9
13	-3.1	-2.4	-2.2	-2.0	-2.7	-2.5	-3.4	-3.1	-3.4
0	224	841	1562	6058	9681	7055	32990	44053	9696
1	341	1210	2064	7954	12736	9658	44267	59987	13043
2	416	1489	2515	9499	15240	11770	53263	71772	15547
3	437	1476	2613	10296	16083	12345	56409	76444	16763
4	385	1471	2489	9747	15478	11766	53045	71525	15775
5	341	1202	2202	7972	12762	9643	43804	59663	13198
6	272	807	1610	5946	9740	7391	33304	45493	10136
7	275	988	1754	6760	10607	8293	36019	49325	11067
8	372	1251	2226	8471	13733	10473	47381	63747	13873
9	408	1516	2600	9947	15826	12251	54373	74353	16191
10	472	1560	2783	10674	17115	13019	58807	80247	17343
11	409	1535	2559	9901	15946	12107	54511	74263	16270
12	382	1250	2219	8458	13343	10294	47386	64045	14200
13	285	966	1697	6394	10424	7936	36209	48979	10877

表 5.4: MR run 毎のイベント数と補正係数

## 5.6 INGRID の系統誤差

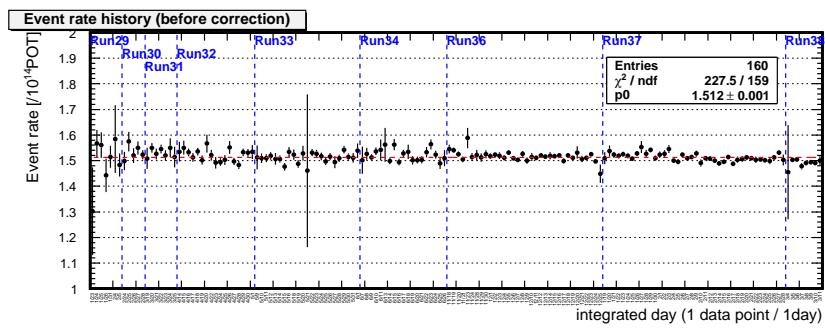
ニュートリノイベントの再構成と補正係数に関する系統誤差は、すでに見積もられており [34]、表 5.5 はその一覧である。ニュートリノイベントの再構成に関する系統誤差は、シミュレーションを用いて見積もられている。まずシミュレーションにおいて、再構成に関する条件を変更し、イベント数を算出する。そしてデータでも同様に条件を変え、イベント数を算出し、それをシミュレーションと比較する。何パターンか条件を変えてこれを繰り返し、最も両者の違いが大きかった条件における、選択効率の差を系統誤差としている。これらの Quadratic sum である 3.7% を、ニュートリノイベント数に対する系統誤差とする。

項目	誤差 [%]
鉄の質量	0.1
ビーム由来のバックグラウンド	0.2
MPPC ノイズ	0.7
Fiducial selection	1.1
Hit efficiency	1.8
Tracking efficiency	1.4
Track matching selection	2.7
Not beam-related background	< 0.1
p.e./active layer selection	< 0.1
Beam timing selection	< 0.1
計	3.7

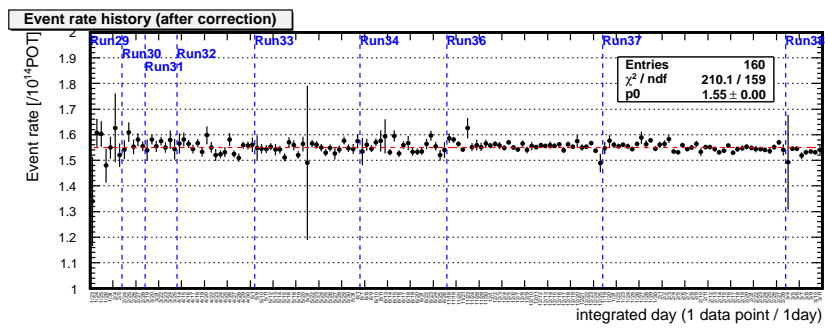
表 5.5: INGRID における系統誤差

## 5.7 イベントレートの安定性

補正前と補正後のイベントレートの安定性を調べた (図 5.9)。グラフの 1 点が 1 日に相当する。補正後の全ランの平均値は  $1.550 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.057(\text{detector sys.}) \pm 0.031(\text{POT sys.})/10^{14}\text{POT}$  である。この一日毎のイベントレートからヒストグラムを作成すると、RMS が平均値の 1.8% に相当する。イベントレートを計算するにあたって使用した POT の値は、最もグラフィット標的に近い地点に設置された CT により測定された値で、系統誤差は 2% である。



(a) 補正前



(b) 補正後

図 5.9: T2K run1,2 におけるイベントレート (日毎)

## 5.8 ビームプロファイルの安定性

補正したイベント数から、ビームプロファイルを求める。図 5.10 は Run32 の全ニュートリノイベントを使ったビームプロファイルの例である。それぞれのモジュールにおけるイベント数をプロットし、正規分布でフィットし、ビーム中心及びビームの広がり  $\sigma$  を得る。

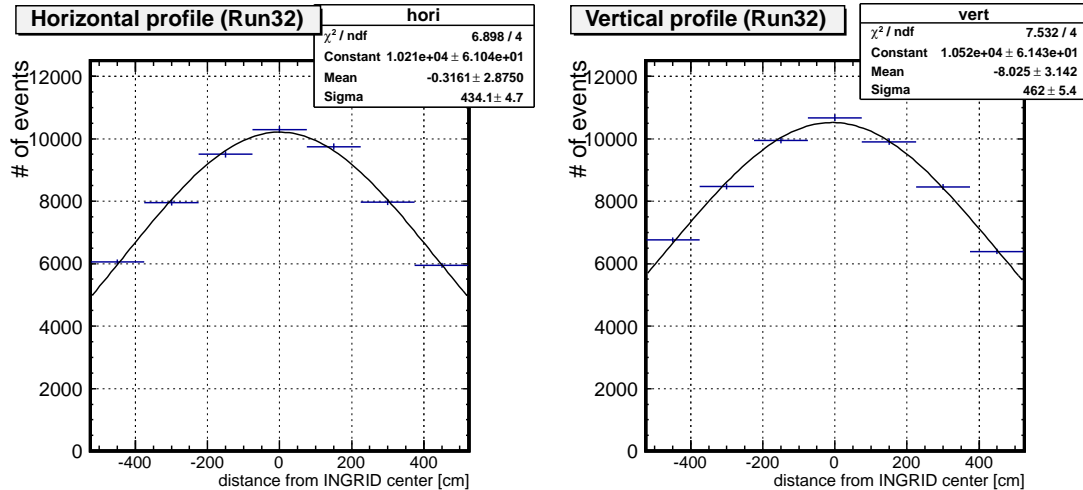


図 5.10: Run32 における水平方向 (左) と鉛直方向 (右) のビームプロファイル

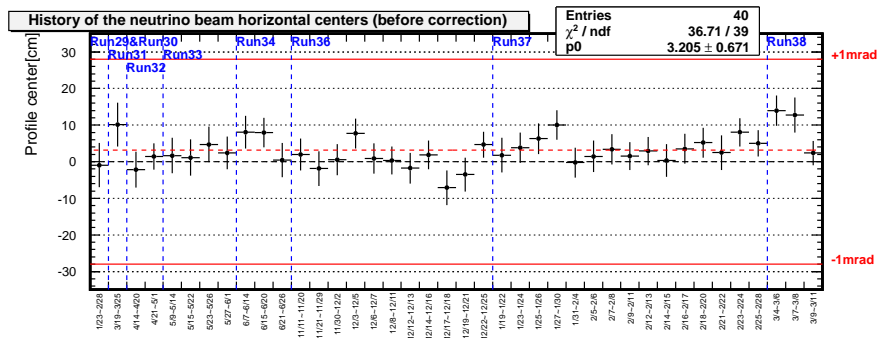
補正前の横型モジュールにおけるイベント数が 20000 を越えるように (Run29,30,31 を除く) 期間を区切り、ビームプロファイルを求めた。表 5.6 はその期間とイベント数をまとめたものである。図 5.11 はビーム中心の変動である。なお、鉛直方向のビーム軸は INGRID の中心より 1.9cm 上となっているので、この図における Profile center は、(フィットにより求めた中心値)-1.9cm となっている。図 5.12 はビームの  $\sigma$  の変動である。

この系統誤差をもとに、ビーム中心、及び  $\sigma$  に対する系統誤差を、簡単なシミュレーションにより見積もる。まず、実際のデータ (今回は Run36) の各モジュールにおけるイベント数を、乱数を用いることで不定性をシミュレーションする。その乱数は、元のイベント数を平均値、その値の  $\pm 3.7\%$  を  $\sigma$  とするガウス分布に従うものとする。そうして得たビームプロファイルを、ガウス分布でフィットし、ビーム中心、及び  $\sigma$  を得る。これを 100000 回繰り返して得たヒストグラムが図 5.13 である。これらの RMS をそれぞれの系統誤差として採用する。

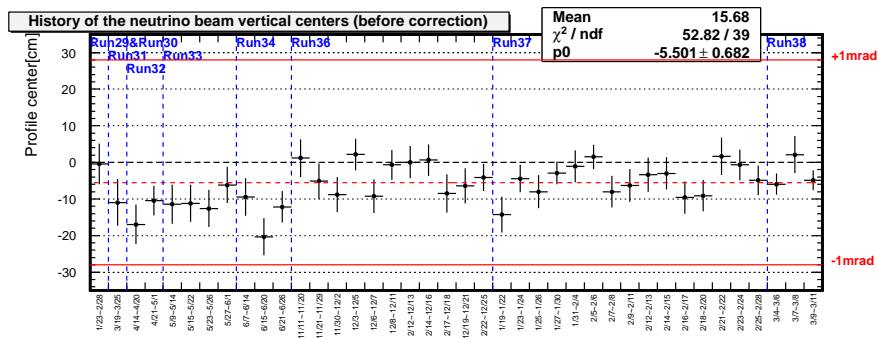
Run1、Run2、全 Run のそれぞれにおける、水平方向、鉛直方向の中心と  $\sigma$  をまとめたものが表 5.7 である。それぞれに二つずつの誤差がついているが、前者が統計誤差、後者が系統誤差である。

	横型 モジュール における イベント数 (補正前)	横型 モジュール における イベント数 (補正後)	縦型 モジュール における イベント数 (補正前)	縦型 モジュール における イベント数 (補正後)	POT [ $10^{14}$ ]
1月23日~2月28日	10749	10912	11336	11668	14457
3月19日~3月25日	14844	15056	15461	15839	19736
4月14日~4月20日	20714	21036	21446	21978	27604
4月21日~5月1日	35902	36435	37798	38627	48767
5月9日~5月14日	22067	22350	22748	23504	29667
5月15日~5月22日	22789	23089	23922	24697	30959
5月23日~5月26日	22295	22572	22990	23700	29908
5月27日~6月1日	23414	23709	24332	25093	31430
6月7日~6月14日	22327	22604	23298	24011	30082
6月15日~6月20日	26274	26594	27784	28606	35734
6月21日~6月26日	20188	20430	21134	21757	27196
11月11日~11月20日	23199	23682	24407	25158	31022
11月21日~11月29日	22107	22564	23275	23962	29999
11月30日~12月2日	26298	26869	27537	28392	35396
12月3日~12月5日	30413	31054	32121	33084	41114
12月6日~12月7日	27295	27878	28412	29274	36976
12月8日~12月11日	32862	33567	34290	35373	44394
12月12日~12月13日	28183	28767	29354	30265	37900
12月14日~12月16日	33064	33758	34148	35214	44246
12月17日~12月18日	21715	22190	22760	23535	29427
12月19日~12月21日	23626	24146	24535	25389	31872
12月22日~12月25日	41720	42606	43619	45041	56500
1月19日~1月22日	22508	22999	23378	24004	30168
1月23日~1月24日	25146	25693	27007	27698	34265
1月25日~1月26日	25196	25736	26513	27167	34048
1月27日~1月30日	29933	30575	31787	32587	40358
1月31日~2月4日	30879	31582	32887	33718	42060
2月5日~2月6日	26785	27405	28324	28986	36457
2月7日~2月8日	28708	29375	30570	31249	39204
2月9日~2月11日	28206	28853	29659	30568	38302
2月12日~2月13日	23499	24031	24649	25479	31996
2月14日~2月15日	28485	29129	29573	30569	38899
2月16日~2月17日	30092	30774	30964	31985	40685
2月18日~2月20日	29853	30522	31842	32831	40922
2月21日~2月22日	21690	22179	23020	23727	29674
2月23日~2月24日	32916	33656	34873	35927	45112
2月25日~2月28日	35630	36429	37390	38464	48207
3月4日~3月6日	31405	32084	33060	34139	42856
3月7日~3月8日	23044	23543	24489	25273	31969
3月9日~3月11日	37712	38531	39159	40408	51476

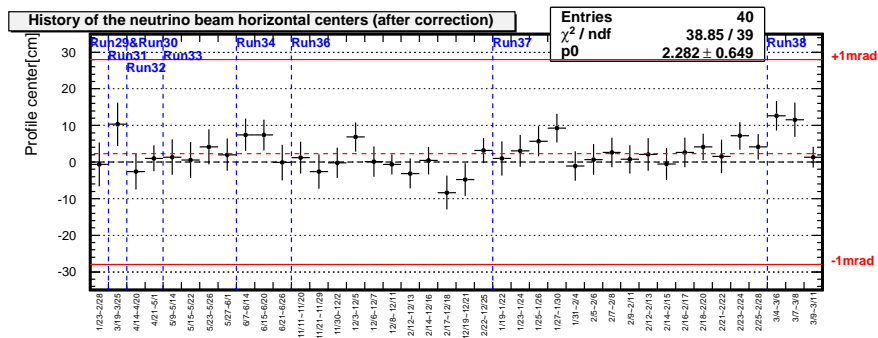
表 5.6: ビームプロファイルにおけるエントリー数一覧



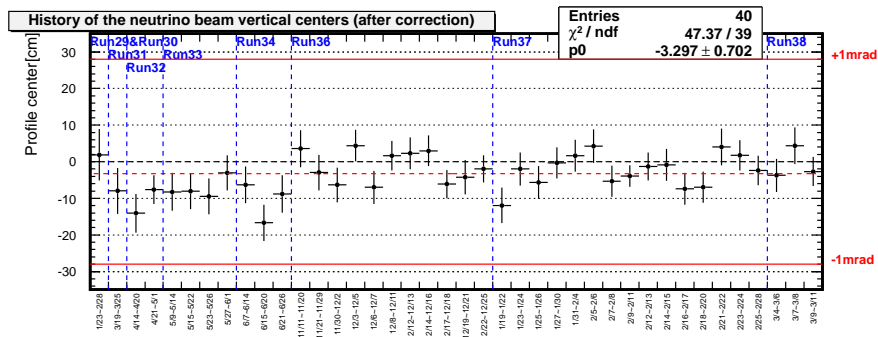
(a) 水平方向 (補正前)



(b) 鉛直方向 (補正前)



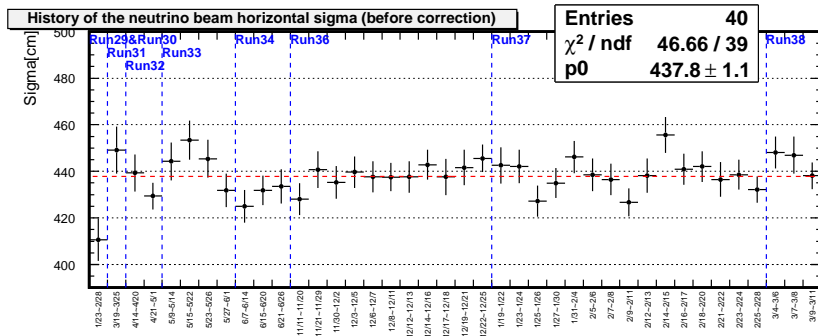
(c) 水平方向 (補正後)



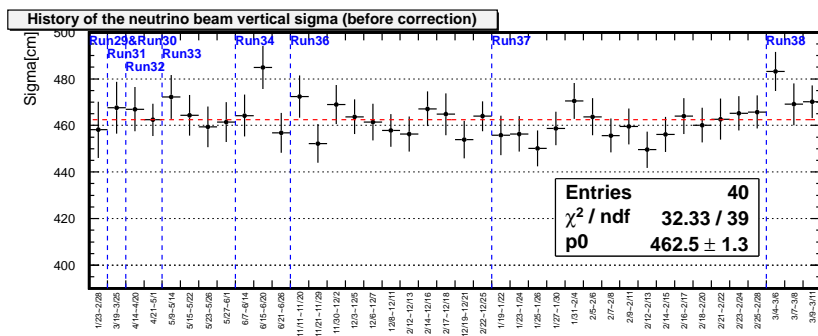
(d) 鉛直方向 (補正後)

図 5.11: ビームプロファイルの中心値

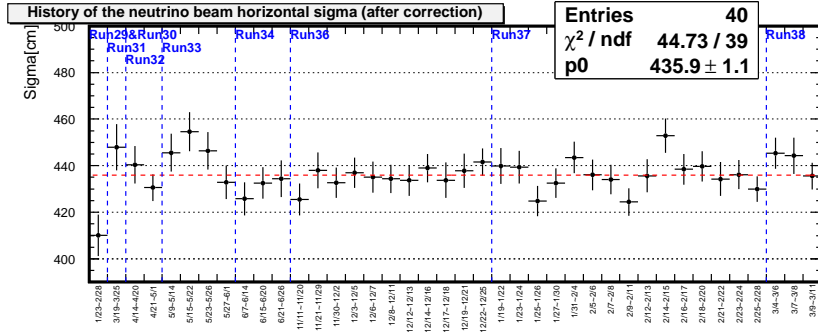




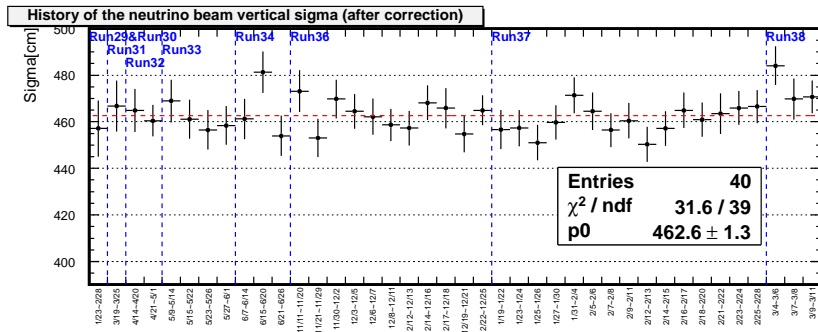
(a) 水平方向 (補正前)



(b) 鉛直方向 (補正前)



(c) 水平方向 (補正後)



(d) 鉛直方向 (補正後)

図 5.12: ビームプロファイルの  $\sigma$

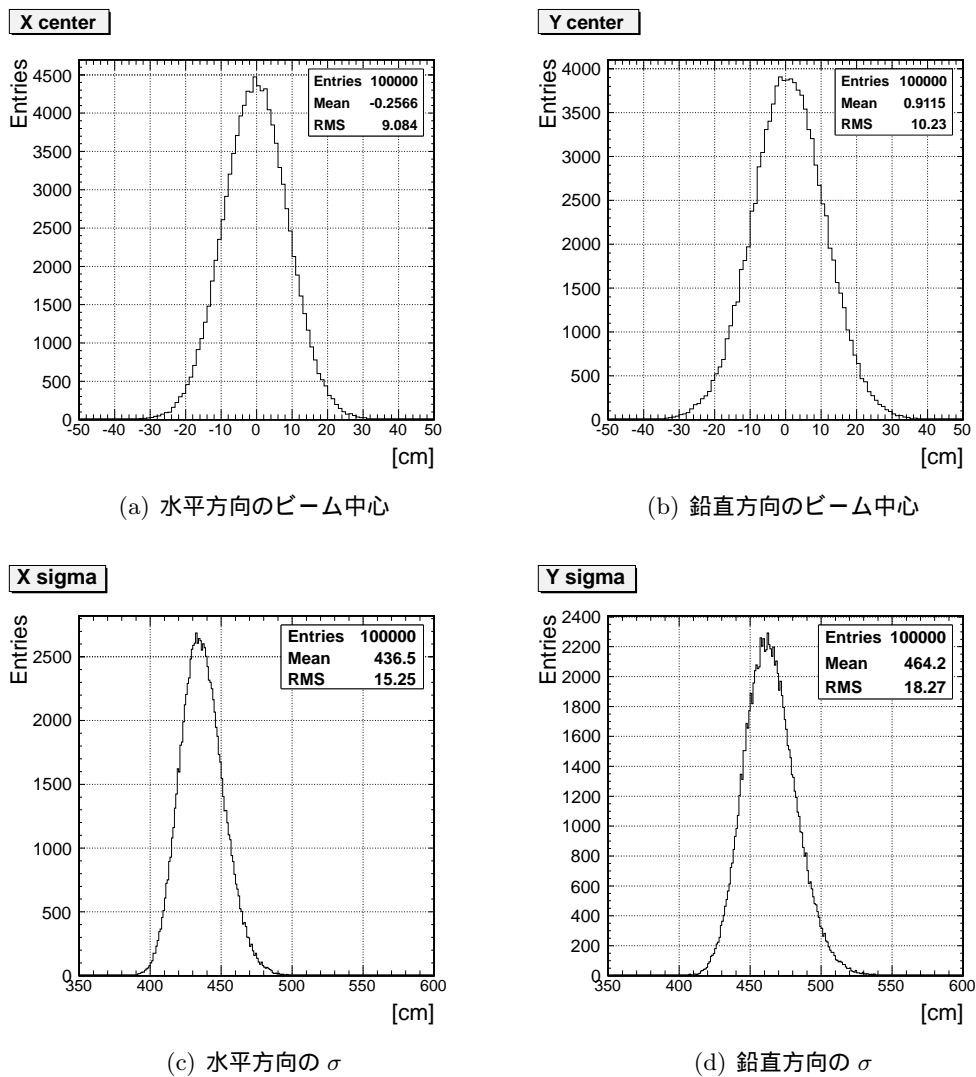


図 5.13: ビームプロファイルの系統誤差

補正前	中心 (水平方向)[cm]	中心 (鉛直方向)[cm]	$\sigma$ (水平方向)[cm]	$\sigma$ (鉛直方向)[cm]
Run1	$3.20 \pm 1.40 \pm 9.08$	$-11.17 \pm 1.51 \pm 10.23$	$434.7 \pm 2.3 \pm 15.3$	$465.0 \pm 2.7 \pm 18.3$
Run2	$3.21 \pm 0.76 \pm 9.08$	$-4.05 \pm 0.77 \pm 10.23$	$438.7 \pm 1.3 \pm 15.3$	$461.8 \pm 1.4 \pm 18.3$
Run1+Run2	$3.21 \pm 0.67 \pm 9.08$	$-5.50 \pm 0.68 \pm 10.23$	$437.8 \pm 1.1 \pm 15.3$	$462.5 \pm 1.3 \pm 18.3$
補正後	中心 (水平方向)[cm]	中心 (鉛直方向)[cm]	$\sigma$ (水平方向)[cm]	$\sigma$ (鉛直方向)[cm]
Run1	$2.76 \pm 1.14 \pm 9.08$	$-8.38 \pm 1.52 \pm 10.23$	$435.5 \pm 2.3 \pm 15.3$	$462.5 \pm 2.6 \pm 18.3$
Run2	$2.15 \pm 0.73 \pm 9.08$	$-1.92 \pm 0.79 \pm 10.23$	$436.0 \pm 1.2 \pm 15.3$	$462.7 \pm 1.4 \pm 18.3$
Run1+Run2	$2.28 \pm 0.65 \pm 9.08$	$-3.30 \pm 0.70 \pm 10.23$	$435.9 \pm 1.1 \pm 15.3$	$462.6 \pm 1.3 \pm 18.3$

表 5.7: ビームプロファイルのまとめ

## 5.9 ビーム方向

INGRIDで測定したビーム中心と、標的INGRID間距離から、ビーム方向を算出する。ニュートリノ反応シミュレーションNEUTの座標系における、標的とINGRIDの位置関係は表5.8の通りである。またINGRIDの中心と、目標とするビーム軸は完全には一致していない。その差は表5.9に示す通りである。

	X[cm]	Y[cm]	Z[cm]
グラフィット標的	0	30.603	-462
INGRID 横型モジュール中心	-0.0863	-1755.557	27736.844
INGRID 縦型モジュール中心	-3.8371	-1738.257	27335.956

表 5.8: NEUT 座標系におけるグラフィット標的と INGRID の位置関係

	X[cm]	Y[cm]
ビーム軸から見た横型モジュールの中心	-3.8	-1.9
ビーム軸から見た縦型モジュールの中心	0	6.2

表 5.9: ビーム軸から見たそれぞれのモジュールの中心

以上を踏まえて、表5.7からビーム中心を計算すると、表5.10のようになる。

補正前	ビーム水平方向 [mrad]	ビーム鉛直方向 [mrad]
Run1	$0.113 \pm 0.050 \pm 0.321$	$-0.401 \pm 0.054 \pm 0.367$
Run2	$0.114 \pm 0.027 \pm 0.321$	$-0.145 \pm 0.028 \pm 0.367$
Run1+Run2	$0.114 \pm 0.024 \pm 0.321$	$-0.197 \pm 0.024 \pm 0.367$
補正後	ビーム水平方向 [mrad]	ビーム鉛直方向 [mrad]
Run1	$0.098 \pm 0.040 \pm 0.321$	$-0.301 \pm 0.055 \pm 0.367$
Run2	$0.076 \pm 0.026 \pm 0.321$	$-0.069 \pm 0.028 \pm 0.367$
Run1+Run2	$0.081 \pm 0.023 \pm 0.321$	$-0.118 \pm 0.025 \pm 0.367$

表 5.10: ビーム方向まとめ

## 第6章 結論

T2K 実験で、2010年1月から6月と、2010年11月から2011年3月の間実施された物理ランにおいて、INGRIDにより測定されたニュートリノイベントの解析を行った。

MPPCのノイズによる、ニュートリノイベント数への影響を定量的に見積もったところ、 $(-0.5752 \pm 0.0033(\text{stat.})) \times (\text{ノイズレート})[\%]$ の影響があることがわかった。これによる補正と、鉄の質量、及びビーム関連のバックグラウンドに関する補正を行った上で、イベントレートを算出したところ、

$$\text{イベントレート} = 1.550 \pm 0.001(\text{stat.}) \pm 0.057(\text{detector sys.}) \pm 0.031(\text{POT sys.})$$

となり、 $\pm 1.8\%$ 以内で安定であることがわかった。また、ビーム中心は

$$\text{水平方向} = 2.28 \pm 0.65(\text{stat.}) \pm 9.08(\text{sys.})\text{cm}$$

$$\text{鉛直方向} = -3.30 \pm 0.70(\text{stat.}) \pm 10.23(\text{sys.})\text{cm}$$

であった。これは角度にして

$$\text{水平方向} = 0.081 \pm 0.023(\text{stat.}) \pm 0.321(\text{sys.})\text{mrad}$$

$$\text{鉛直方向} = -0.118 \pm 0.025(\text{stat.}) \pm 0.367(\text{sys.})\text{mrad}$$

であり、要求されている $\pm 1\text{mrad}$ 以内であることを確認した。

## 謝辞

非常に多くの方々のご指導、ご協力により、本論文を無事完成させることができました。

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた指導教員である清矢良浩教授に深謝いたします。清矢教授からは高エネルギー物理の実験方法や解析手法など、この分野における研究の基本を学びました。山本和弘准教授には、日頃から解析の相談に乗っていただき、感謝いたします。大阪市立大学大学院 理学研究科名誉教授 奥沢徹先生はミーティングで私の研究に対して、質問や有益なコメントなどしてくださいました。感謝いたします。

研究室の先輩方、同輩、後輩にも大変お世話になりました。松村知恵氏には、T2K で研究を行う上で大切なことをたくさん教えていただきました。同輩の中居貴士氏とは、同じ T2K コラボレーターとして、研究に関する相談をしたり、一緒に出張に行ったりと、苦楽を共にした二年間でした。みなさま、本当にありがとうございます。

そして大学という枠組を越えて、多くの T2K コラボレーターの方々に大変お世話になりました。京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室の中家剛教授、市川温子准教授には、ミーティングの際にアドバイスや有益なコメントなどいただきました。感謝いたします。南野彰宏助教は INGRID の研究を行うにあたり、常に方向性を示してくださいました。また解析の相談のために、幾度となく時間を割いていただき、感謝いたします。大谷将士氏、村上明氏、木河達也氏には、INGRID のデータの扱い方を懇切丁寧に教えていただきました。特に村上明氏には、モンテカルロシミュレーションのデータを提供していただきました。LLR Ecole Polytechnique の Christophe Bronner 氏 (現・京都大学大学院理学研究科 物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室研究員) には、データの扱い方や解析の手法を教えていただきました。コラボレーターの皆様に、心より感謝申し上げます。

最後になりましたが、家族に感謝します。私が研究に専念できたのは、家族の支えがあったからこそです。本当にありがとうございます。

## 目 次

1.1	スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ測定の結果	2
1.2	K2K 実験におけるミューニュートリノ測定の結果	2
2.1	T2K 実験の概略図	4
2.2	J-PARC ビームラインの概略図	5
2.3	陽子ビームの時間構造	5
2.4	各ビームモニターの配置	6
2.5	ニュートリノ生成過程と各検出器の配置	7
2.6	パイオン崩壊の模式図	8
2.7	パイオンの運動量とニュートリノのエネルギーの関係	8
2.8	off-axis 角ごとのエネルギースペクトル (上) とニュートリノの振動確率 (下)	8
2.9	ミューオンモニターの概略図	9
2.10	前置検出器の概略図	10
2.11	INGRID 横型モジュールの写真	11
2.12	INGRID 縦型モジュールの写真	11
2.13	Proton Module の概略図	11
2.14	Proton Module のイベントディスプレイの例	11
2.15	off-axis 検出器の概略図	13
2.16	off-axis 検出器の写真	13
2.17	off-axis 検出器のイベントディスプレイの例	13
2.18	スーパーカミオカンデの概略図	14
2.19	スーパーカミオカンデ内部の写真	14
3.1	INGRID の概略図	16
3.2	INGRID におけるニュートリノ検出原理の概念図	16
3.3	INGRID の内部構造	17
3.4	MPPC で荷電粒子によるヒットを検出する過程の概念図	18
3.5	押し出し型シンチレーターの写真	19
3.6	MPPC の写真	20
3.7	MPPC の受光面の拡大写真	20
3.8	エレクトロニクスとデータ収集の概念図	22
3.9	データ取得のサイクル構造	23
4.1	座標系とモジュールナンバー	25
4.2	各種 ID ナンバーと Fiducial volume の定義	25

4.3	MC の概念図	26
4.4	シンチレーターの断面の写真 (左) と、MC における断面の形状 (右)	27
5.1	ニュートリノイベント再構成におけるノイズの有無による違い (Track matching の例)	31
5.2	T2K 全物理ランにおける各モジュールのノイズレートと温度の変動	32
5.3	サイクル 0 から 12 までの TDC 分布 (Run36)	37
5.4	ノイズデータとそのシミュレーションとの比較 (区間 2)	39
5.5	光量分布におけるバッドチャンネルの有無による違い	40
5.6	ニュートリノイベント再構成におけるノイズの有無による違い (Tracking の例)	41
5.7	各区間におけるフィットパラメーターの値	43
5.8	各区間におけるフィットパラメーターの値	44
5.9	T2K run1,2 におけるイベントレート (日毎)	47
5.10	Run32 における水平方向 (左) と鉛直方向 (右) のビームプロファイル	48
5.11	ビームプロファイルの中心値	50
5.12	ビームプロファイルの $\sigma$	51
5.13	ビームプロファイルの系統誤差	52



## 表 目 次

2.1	T2K 実験の陽子ビームパラメーター	6
2.2	物理ランにおける各ランナンバーと期間	14
3.1	MPPC の主な仕様	21
3.2	TFB の主な仕様	22
3.3	デジタル温度センサ LM92 の主な仕様	24
4.1	モジュール毎のデザイン値との質量差	29
5.1	シミュレーションを行った区間の詳細	37
5.2	バッドチャンネルとその原因	38
5.3	ノイズ有り MC とノイズ無し MC の Selection summary table (区間 2)	41
5.4	MR run 毎のイベント数と補正係数	45
5.5	INGRID における系統誤差	46
5.6	ビームプロファイルにおけるエントリー数一覧	49
5.7	ビームプロファイルのまとめ	52
5.8	NEUT 座標系におけるグラフィット標的と INGRID の位置関係	53
5.9	ビーム軸から見たそれぞれのモジュールの中心	53
5.10	ビーム方向まとめ	53

## 参考文献

- 1) C. Giunti, C. W. Kim, “Fundamentals of neutrino physics and astrophysics”, Oxford University Press (2007)
- 2) Bruce T. Cleveland et al., “Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector”, *Astrophys. J.* 496 505 (1998)
- 3) K. S. Hirata et al., “Observation of  $^8\text{B}$  solar neutrinos in the Kamiokande-II detector”, *Phys. Rev. Lett.* 63, 16 (1989)
- 4) S. Wänninger et al., “Probing Neutrino Vacuum Oscillations with the GALLEX Solar Neutrino Results”, *Phys. Rev. Lett.* 83, 1088 (1999)
- 5) J.N. Abdurashitov et al. [SAGE Collaboration], “Measurement of the Solar Neutrino Capture Rate by SAGE and Implications for Neutrino Oscillations in Vacuum”, *Phys. Rev. Lett.* 83, 4686 (1999)
- 6) Y. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos”, *Phys. Rev. Lett.* 81, 1562 (1998)
- 7) 東京大学宇宙線研究所, 神岡宇宙素粒子研究施設, “研究内容 大気ニュートリノ”, スーパーカミオカンデ 公式ホームページ (<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>) (2012年1月現在)
- 8) E. Aliu et al. [K2K Collaboration], “Evidence for Muon Neutrino Oscillation in an Accelerator-Based Experiment”, *Phys. Rev. Lett.* 94, 081802 (2005)
- 9) 高エネルギー加速器研究機構, 東京大学宇宙線研究所 “K2K 実験でニュートリノ振動を確立(概要)”, プレスリリース (2004年6月12日) KEK—大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 (<http://legacy.kek.jp/>) (2012年1月現在)
- 10) D.G. Michael et al. [MINOS Collaboration], “Observation of Muon Neutrino Disappearance with the MINOS Detectors in the NuMI Neutrino Beam”, *Phys. Rev. Lett.* 97, 191801 (2006)
- 11) N. Agafonova et al., “Observation of a first  $\nu_\tau$  candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam”, *Phys. Lett.* B691 (2010)
- 12) K. Nakamura et al. (Particle Data Group), *J. Phys. G* 37, 075021 (2010)

- 13) 高エネルギー加速器研究機構, 独立行政法人日本原子力研究開発機構, “J-PARC 加速器、陽子ビーム試験運転を開始!”, J-PARC ニュース 第 81 号 (2011.12) J-PARC—大強度陽子加速器施設 (<http://j-parc.jp/>) (2012 年 1 月現在)
- 14) 柴田 政宏, Nicholas C. Hastings, 石井 孝信, 角野 秀一, “T2K 実験の陽子ビームモニター”, 高エネルギー物理学研究者会議 高エネルギーニュース 研究紹介 vol.28 No.4 (2010)
- 15) 藤井 芳昭, 山田 善一, “ニュートリノ実験施設の概要”, 高エネルギー物理学研究者会議 高エネルギーニュース 研究紹介 vol.28 No.2 (2009)
- 16) 鈴木 研人, “T2K ニュートリノ振動実験におけるニュートリノビームの測定とビーム形状に起因する系統誤差の評価”, 京都大学修士論文 (2011)
- 17) 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 (2011)
- 18) 家城 佳, “Construction and Performance of Fine-Grained Detector for T2K experiment”, 京都大学修士論文 (2009)
- 19) N. Abgrall et al., “Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors”, arXiv:1012.0865 (2010)
- 20) Y. Fukuda et al. [Super-Kamiokande Collaboration], “The Super-Kamiokande detector”, Nucl. Instrum. Meth. A 501 418 (2003)
- 21) 平出 克樹, “J-PARC ニュートリノ振動実験のための off-axis 検出器の基本設計および APD 読み出し系の開発”, 京都大学修士論文 (2004)
- 22) 大谷 将士, “T2K 長基線ニュートリノ振動実験 ニュートリノビームモニター INGRID の製作と性能評価”, 京都大学修士論文 (2009)
- 23) A. Pla-Dalmau et al., “FNAL-NICADD Extruded Scintillator.”, FERMILAB-PUB-05-344, Nuclear Science Symposium Conference Record, 2004 IEEE 790-793 Vol.2 (2005)
- 24) 五味 慎一, “半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築”, 京都大学修士論文 (2007)
- 25) MPPC 技術資料, 浜松ホトニクス株式会社
- 26) M. Yokoyama et al., “Application of Hamamatsu MPPC to T2K Neutrino Detectors”, Nucl. Instrum. Meth. A 610 (2009)
- 27) K. Abe et al. [The T2K Collaboration], “The T2K experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A 659 106-135 (2011)

- 28) A. Vacheret, S. Greenwood, M. Noy, M. Raymond, A. Weber, “The front end read-out system for the T2K-ND280 detectors”, Nuclear Science Symposium Conference Record, 2007. NSS '07. IEEE vol3 1984-1991 (2007)
- 29) デジタル温度センサ LM92 仕様書, National Semiconductor Corporation
- 30) 村上 明, “ミューオンビームモニター及びニュートリノビームモニターによる T2K 実験ニュートリノビームの評価”, 京都大学修士論文 (2010)
- 31) R. Brun et al., “GEANT-Detector Description and Simulation Tool”, Cern Program Library Long Write-up W5013 (1993)
- 32) A. Fasso et al., “FLUKA: A Multi-Particle Transport Code”, CERN-2005-10, INFN/TC-05/11, SLAC-R-773 (2005)
- 33) Y. Hayato, “NEUT”, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 112, 171 (2002)
- 34) M. Otani et al., “Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector”, arXiv:1111.3119 (2011)