

T2K ニュートリノ振動実験での
ニュートリノビームモニター INGRID の性能評価
(A Study of the Neutrino Beam Monitor INGRID
for the T2K Neutrino Oscillation Experiment)

理学研究科

数物系専攻

松村知恵

概要

T2K(Tokai to Kamioka) ニュートリノ振動実験とは、茨城県東海村に建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC でニュートリノビームをつくり、295km 離れた水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデ (SK) で検出することで、その間のニュートリノフレーバー振動を研究するための実験である。特に電子ニュートリノ出現モードの発見とミューオンニュートリノ消失モードの精密測定を主な目的としている。実験の特徴に off-axis 法があげられ、SK でのニュートリノ振動確率が最大になるように、中心軸 2.5° ずらしたビームを使っている。ここで、ビーム方向とニュートリノエネルギーには相関があるため、ビーム方向を 1mrad 以上の精度でモニターする必要がある。

ニュートリノビームモニター INGRID(Interactive Neutrino GRID) は、ビーム中心軸上に位置し、ニュートリノビームの方向、プロファイル、強度を監視する。INGRID は同一モジュール 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プレートを交互に並べたサンドイッチ構造をしている。シンチレータ、波長変換ファイバー、半導体光検出器 MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) を 1 チャンネルとし、プレート 1 枚には 48 チャンネルある。

INGRID 内で反応した荷電粒子の飛跡を再構成することでニュートリノイベントを特定し、ニュートリノイベントの統計を溜めビームの方向を求める。このとき各チャンネルの hit efficiency を求めておかなければ、ニュートリノイベントの検出効率が正確に求まらない。

2010 年 3 月から 6 月までに取得した宇宙線データを使い、INGRID の性能評価として各チャンネルの hit efficiency と平均光量を求め、安定に動作していることを確かめるため長期安定性を調べた。

目次

第 1 章	ニュートリノ振動	2
第 2 章	T2K ニュートリノ振動実験	4
2.1	Off-axis 法	4
2.2	大強度陽子加速器 (J-PARC)	5
2.3	ミューオンモニター (MUMON)	5
2.4	前置検出器	8
2.4.1	On-axis 検出器	8
2.4.2	Off-axis 検出器	8
2.5	後置検出器 (スーパーカミオカンデ)	10
第 3 章	ニュートリノモニター INGRID の性能評価	12
3.1	INGRID の構造	12
3.1.1	トラッキングプレーン	13
3.1.2	VETO プレーン	17
3.2	データ読み出し	18
3.3	データ収集	18
3.3.1	セットアップ	19
3.4	データ解析	20
3.4.1	宇宙線イベントの選出	20
3.4.2	宇宙線飛跡の再構成	20
3.4.3	光量補正	20
3.4.4	チャンネルの hit efficiency、光量の求めかた	21
3.4.5	長期安定性のチェック	25
第 4 章	結論	27
第 5 章	謝辞	28

第1章 ニュートリノ振動

素粒子物理学の標準理論では、ニュートリノは質量を持たない中性のレプトンとして扱われている。しかし近年、太陽ニュートリノや原子炉ニュートリノの観測で電子ニュートリノの数が減っている、あるいは大気ニュートリノの観測や加速器ニュートリノ実験でミューニュートリノの数が減る、という現象が観測された。これは、ニュートリノが飛行中に別のフレーバーに変わるニュートリノ振動現象によるものと考えられている。ニュートリノ振動は、ニュートリノが質量をもつ場合にのみ起こる現象で、これにより、ニュートリノの質量の存在が実証された。

ニュートリノ振動はニュートリノのフレーバーの固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ ($\alpha = e, \mu, \tau$) が以下のように異なった質量の固有状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) が混じり合った状態であるために起こると考えられている。

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

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

この行列は Maki-Nakagawa-Sakata 行列 (MNS 行列) と呼ばれ、 s_{ij}, c_{ij} は $\sin \theta_{ij}, \cos \theta_{ij}$ 、 θ_{ij} は ν_i と ν_j の混合角、 δ は CP 位相を表す。

ここで簡単のため 2 成分ニュートリノを考え、以下のようにフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle, |\nu_\beta\rangle$ が質量固有状態 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle$ の線形結合で表されているとする。

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

質量固有状態の時間発展は E_i を ν_i のエネルギーとすると

$$\begin{pmatrix} |\nu_1(t)\rangle \\ |\nu_2(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1(0)\rangle \\ |\nu_2(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

となり、フレーバーの固有状態の時間発展は次のように表される。

$$\begin{pmatrix} |\nu_\beta(t)\rangle \\ |\nu_\alpha(t)\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-iE_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-iE_2 t} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_\beta(0)\rangle \\ |\nu_\alpha(0)\rangle \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

次に、 $t=0, x=0$ の時 ν_α が L 飛んだときに ν_β になっている確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ を求める。

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta(t) | \nu_\alpha(0) \rangle|^2 \quad (1.6)$$

$$= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right) \quad (1.7)$$

ここで、 Δm_{ij}^2 は質量固有状態 i, j 間の質量二乗差 ($\Delta m_i^2, \Delta m_j^2$) である。 $m_i \ll E_i$ とすると、 $r \approx L, p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \approx E_i - \frac{m_i^2}{2E_i}$

T2K 実験では $L = 295\text{km}, \Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$ として、ミューニュートリノがニュートリノ振動を起こす確率が最大になるときのエネルギーは次のように求まる。

$$\frac{1.27 \times 2.5 \times 10^{-3} \times 295}{E_\nu} = \frac{\pi}{2} \quad (1.8)$$

$$E_\nu \sim 0.6(\text{GeV}) \quad (1.9)$$

第2章 T2K ニュートリノ振動実験

T2K 実験はニュートリノ振動の測定を目的とした実験である。そこではまず大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で陽子を加速させてグラファイト標的に当てパイオンを生成する。パイオンは 3 つの電磁ホーンで収束され、ミューオンとミューオンニュートリノに崩壊する。このニュートリノを 295km 離れたニュートリノ検出器スーパーカミオカンデで観測する。実験は 2009 年 1 月から開始され、2010 年 1 月より物理ランが始まった。



図 2.1: T2K 概略図

T2K 実験の最初 5 年間での主な目的は以下の 2 つである。

- 未発見の電子ニュートリノの出現モード ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) を探索し、 $\sin^2 2\theta_{13}$ を決定すること
- ミューオンニュートリノの消失モードの精密測定し、 $\sin^2 2\theta_{23}$ 、 Δm_{23}^2 の精密測定

2.1 Off-axis 法

Off-axis 法とは、ニュートリノビームの中心軸を後置検出器への方向からずらし、それによって後置検出器へ向かうニュートリノビームのエネルギーを狭い範囲に揃える手法である。

パイオンはミューオンとミューオンニュートリノに崩壊する (図 2.2)。このときのニュートリノエネルギー E_ν は次のように表される。

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

ここで、 m_π 、 E_π 、 p_π はパイオンの質量、エネルギー、運動量を、 m_μ はミューオンの質量を、 θ はパイオンの入射方向に対するニュートリノの放出角を表す。この式より、 θ を変化させたときのニュートリノエネルギーは図 2.3 のようになる。角度が 0 のときニュートリノエネルギーはパイオンの運動量に比例するが、

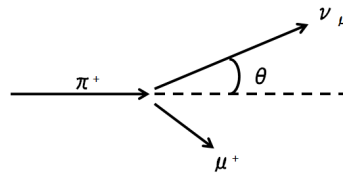


図 2.2: パイオンの崩壊図

角度をずらす ($\theta = 2.0, 2.5, 3.0$) とニュートリノエネルギーはパイオンの運動量に関わらず、狭い範囲に揃うことがわかる。

T2K 実験では、後置検出器であるスーパーカミオカンデまでの基線長が 295km であるので、過去の観測・実験から得られているベストフィット値 $\Delta m_{23}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ を用いると、スーパーカミオカンデでミューニュートリノの振動確率が最大になるためには、図 2.4 に示すようにニュートリノのエネルギーを 0.5~0.7GeV に設定する必要がある、そのためには J-PARC でのニュートリノビームの中心値を 2.5 度ずらさなければならない。

同時に、off-axis 法を用いるとビームの方向とニュートリノフラックス、ニュートリノスペクトルには強い相関が生まれる。ビームの方向が 1mrad ずれると、ニュートリノスペクトルのピークエネルギーが約 13MeV 変化し、フラックスは約 3% 変化する。ニュートリノエネルギーの 13MeV のふらつきは、スペクトルピーク値約 650MeV に対して 2% 程度のふらつきになり、フラックスの 3% のふらつきは、スーパーカミオカンデで予測されるニュートリノ事象数の不定性につながる。スーパーカミオカンデでのニュートリノ事象の予測数、ニュートリノのエネルギースケールの不定性がそれぞれ 5%、2% 以内であれば、ミューオンニュートリノ消失モードの振動パラメータに対して、統計誤差よりも小さい系統誤差での測定が実現できる。このため、1mrad よりも十分よい精度でビーム方向をモニターする必要がある。

2.2 大強度陽子加速器 (J-PARC)

J-PARC では陽子を線形加速器 (LINAC)、3GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、50GeV 陽子シンクロトロン (MR) で加速し、MR 内側のニュートリノビームラインへ蹴り出す。その後、陽子ビームをグラフィイト標的に当てパイオンを生成し、その崩壊よりニュートリノビームを作る。図 3.31 と表 2.1 に陽子ビームのスピルとその中のバンチの時間的構造を示す。

2.3 ミューオンモニター (MUMON)

ミューオンモニター (MUMON) は、ビームダンプ直後 (ターゲットより 117m 下流) に設置され、高エネルギーのミューオンを検出することで、間接的にニュートリノビームの方向を測定する。ビームダンプは下流 110m にあり、ビーム中の陽子、崩壊しなかったパイオン、低いエネルギーのミューオンを吸収する。

MUMON にも 1mrad の精度でビーム方向をモニターすることを要求されている。これは 11cm のビーム位置測定精度に対応し、実際の MUMON では 3cm の精度でビームの中心位置を測定できる。

MUMON にはシリコン PIN フォトダイオードを 49 個、7×7 の格子状に配置し、シリコンよりビーム下流に平行平板イオンチェンバーが 49 チャンネル設置されている (図 2.7)。

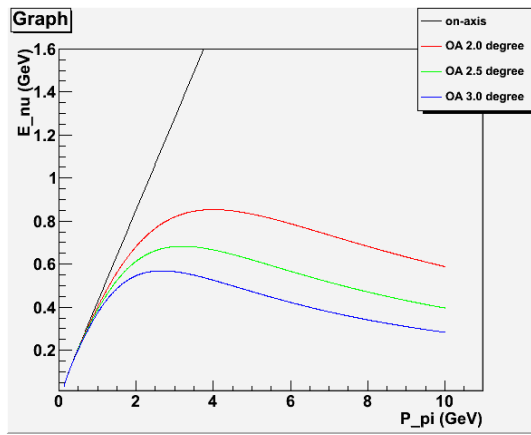


図 2.3: パイオンとニュートリノエネルギーの関係をビーム中心軸からの角度 (OA) を変えて表した

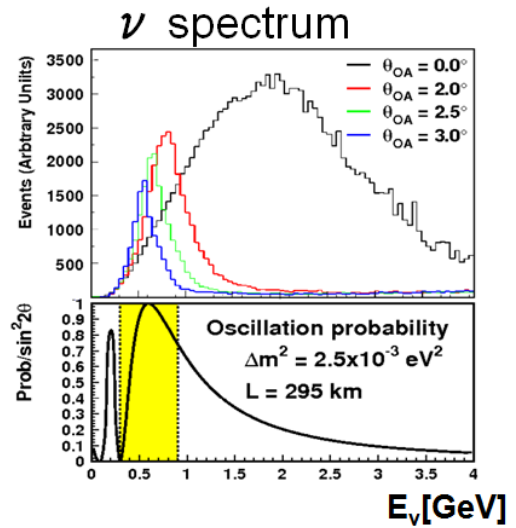


図 2.4: 上: スーパーカミオカンデでのニュートリノスペクトル 下: スーパーカミオカンデでの振動確率 どちらも横軸はニュートリノエネルギー (GeV)



図 2.5: J-PARC の概観図

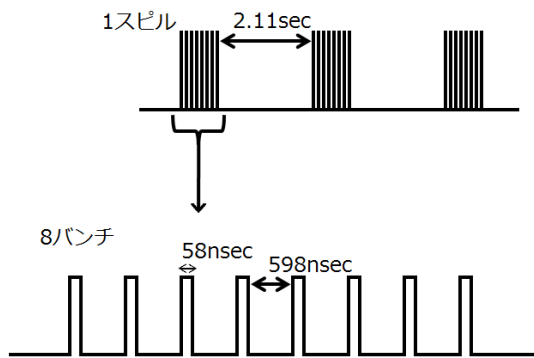


図 2.6: スピルとバンチの構造

表 2.1: 陽子ビームのデザイン値

ビームエネルギー	30GeV
ビーム強度	750kW
スピル間隔	2.11sec
スピル幅	5.6usec
スピル中の陽子数	3.3×10^{14} proton/spill
バンチ数	8 bunches/spill
バンチ間隔	598nsec
バンチ幅	58nsec

2種類の検出器を置くことで、低強度から最大強度までのビームを測定が可能であり、読み出し回路に Flash ADC を用いているので、バンチごとのビームの測定ができる。

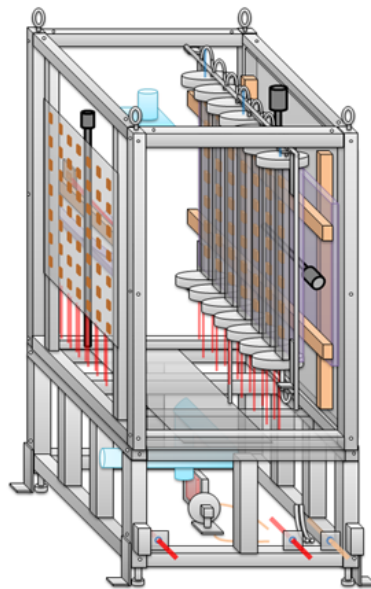


図 2.7: MUMON の概観図。左がシリコン PIN フォトダイオード、右が平行平板イオンチェンバーが設置されている

2.4 前置検出器

前置検出器は標的より 280m ビーム下流にあり、on-axis 検出器と off-axis 検出器の 2 種類ある。On-axis 検出器はビーム中心軸上に設置され、ニュートリノビームのプロファイルを測る。Off-axis 検出器は中心軸より 2.5 度ずれたスーパーカミオカンデ方向への軸上にあり、振動前のニュートリノフラックス、エネルギースペクトルを測定する事を主な目的としている。

2.4.1 On-axis 検出器

INGRID

INGRID はモジュール内で起こったニュートリノ反応を検出することで、ニュートリノビームの方向、プロファイル、強度をモニターする検出器である。詳しくは次の章で述べる。

INGRID proton module

INGRID proton module は荷電カレント反応とその他の反応との識別、および、低いエネルギーのニュートリノの検出効率の向上のため設置された (図 2.8)。Proton module は INGRID とほとんど同じ構造であるが、大きく異なる点はモジュール内に鉄を挟んでいないことである。それは、鉄がエネルギーの低い粒子を吸収するので反応モードが区別できなくなるため、proton module ではシンチレータのみで構成している。シンチレータはニュートリノ反応で生成された粒子の飛跡を細かく見るため、2 種類の大きさのものを使っている (図 2.9)。1 つは INGRID で使われているシンチレータと同じ大きさ (120cm × 5cm × 1cm)、もう 1 つは K2K 実験及び、SciBooNE 実験に使われた検出器 (SciBar) と同じ大きさのシンチレータ (120cm × 2.5cm × 1.3cm) である。

2.4.2 Off-axis 検出器

Off-axis 検出器は、図 2.10 に示す様に、マグネットの中に複数の検出器を組み合わせており、ニュートリノビームのフラックス、エネルギースペクトル、バックグラウンドレートを測定する。

次に、各検出器の構成について説明する。

マグネット

Off-axis 検出器に使われるマグネットは CERN の UA1 実験で使われていたマグネットで、0.2T の磁場をかけてニュートリノ反応により生成された荷電粒子の運動量を測定する。マグネット内側のの大きさは 3.5m × 3.6m × 7.0m。

P0D(π^0 Detector)

P0D はニュートリノ反応によって生成された π^0 を検出し、プラスチックシンチレータと水ターゲットで構成されている。

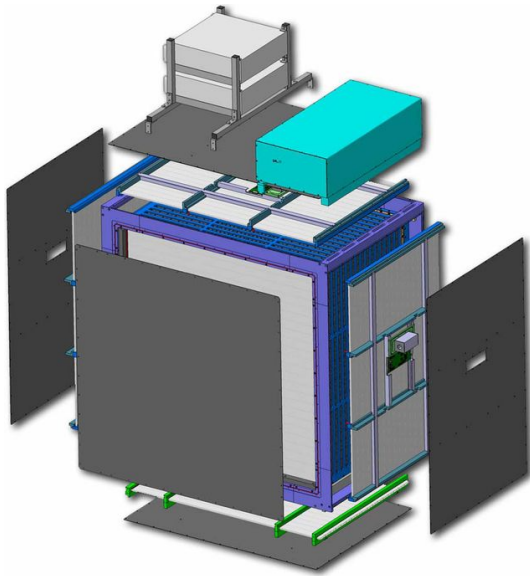


図 2.8: proton module の概観図

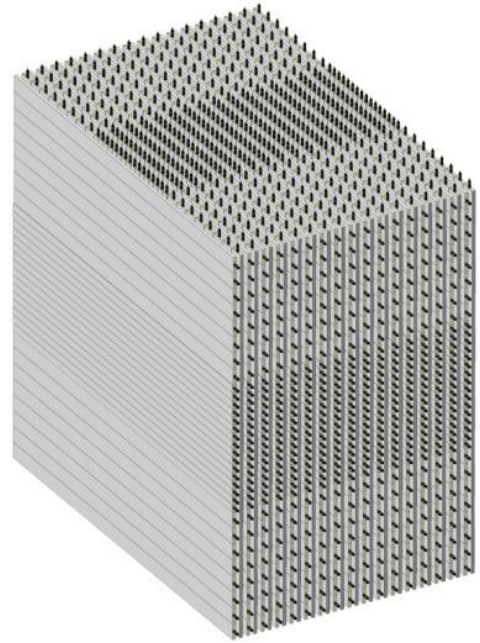


図 2.9: proton module のシンチレータ層

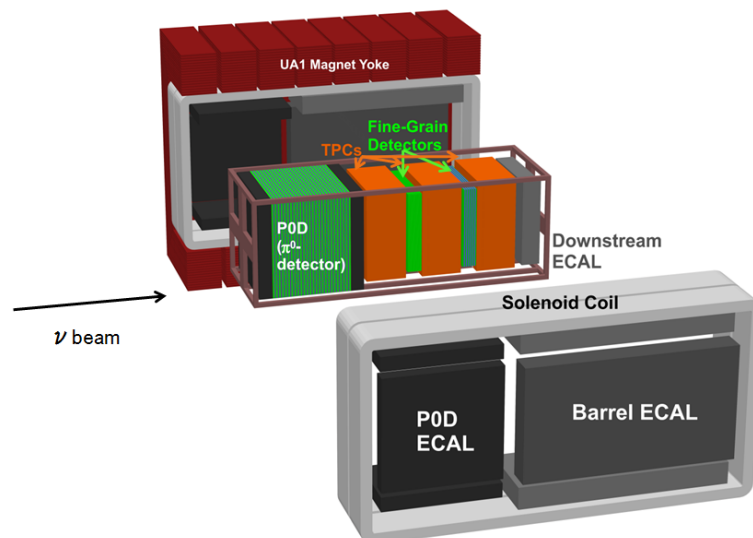


図 2.10: Off-axis の概観図

TPC(Time Projection Chamber) と FGD(Fine-Grained Detector)

FGD はニュートリノ反応のターゲットとなると同時に反応点付近の軌跡の検出を行い、TPC と共にニュートリノ反応の奇跡を検出する。こうして、振動前のニュートリノのフラックス・エネルギースペクトルを測定し、スーパーカミオカンデでのフラックスを予測し、さまざまなニュートリノ反応の断面積を測定し、スーパーカミオカンデでのバックグラウンド事象の割合を予測することを目的としている。

FGD のサイズは $2.3\text{m} \times 2.4\text{m} \times 0.35\text{m}$ 、重さは約 1 トン、これが 2 台設置されている。ビーム上流から FGD1、FGD2 と読んでいる。FGD1 はシンチレータ層のみ、FGD2 はシンチレータ層と水層で構成されている (図 2.11)。シンチレータ 1 本の大きさは $184\text{cm} \times 0.96\text{cm} \times 0.96\text{cm}$ 、シンチレータの中心には穴が開いており、シンチレータと同じ長さの波長変換ファイバーを通し、ファイバーの片端には半導体光検出器 MPPC を取り付けている。

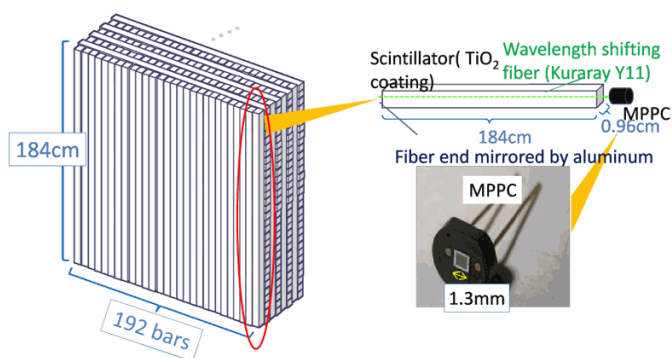


図 2.11: FGD の構成図。FGD2 は真ん中のシンチレータ 16 層分に水層が組み込まれている。

ECAL(Electromagnetic CALorimeter)

ECAL は P0D、TPL、FGD を覆うように位置し、プラスチックシンチレータと鉛からなる。 π^0 の崩壊からのガンマ線の測定を主な目的としており、電子ニュートリノの荷電カレント反応から生成された電子の検出も行う。

SMRD(Side Muon Range Detector)

SMRD は磁石のヨークのすき間にプラスチックシンチレータを挿入し、TPC で検出されなかったミューオンを検出する。シンチレータの大きさは、水平方向では $87.0\text{cm} \times 16.7\text{cm} \times 7.0\text{cm}$ 、垂直方向では $87.0\text{cm} \times 17.5\text{cm} \times 7.0\text{cm}$ 。シンチレータに s 字の溝をつけ、その溝に波長変換ファイバーを通し、方端に MPPC を取り付けている (図 2.12)。

2.5 後置検出器 (スーパーカミオカンデ)

スーパーカミオカンデは岐阜県神岡鉱山の地下 1000m にあり、直径 39.3m 高さ 41.4m の水槽に 5 万トンの純水を蓄え、その壁に約 1 万 3 千本の光電子増倍管が設置された水チェレンコフ検出器である (図 2.13)。

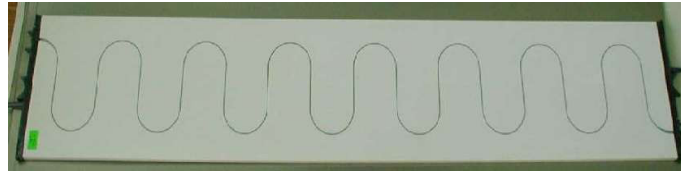


図 2.12: SMRD で使われているプラスチックシンチレータの写真。S 字の溝に波長変換ファイバーを通して、方端に MPPC を取り付けている。

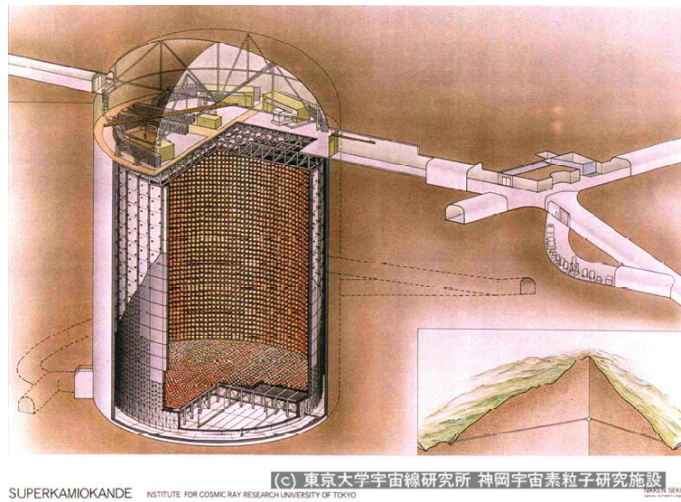


図 2.13: スーパーカミオカンデの概観図

第3章 ニュートリノモニター INGRID の性能評価

この章ではニュートリノモニター INGRID の概要と、性能評価として各チャンネルの hit efficiency、光量と長期安定性を評価した結果について述べる。

3.1 INGRID の構造

INGRID はニュートリノビームの方向をモジュール内で起こったニュートリノ荷電カレント反応より測定する。設置場所はパイオン生成標的の下流 280m、約 30m 地下にあり (図 3.1)、同一のモジュール 16 台を十字に並べ (縦に 7 台、横に 7 台、十字から外れた場所に 2 台)、ビームの中心から 5m の領域をカバーしている (図 3.2)。横に並べた 7 台のモジュールを横モジュール、縦に並べた 7 台のモジュールを縦モジュール、十字から外れた 2 台は shoulder モジュールと呼び、shoulder モジュールは 2010 年 10 月にインストールされた。

INGRID はビーム強度が設計値の 1% (ビームコミッショニング時) の運転のときに約 1ヶ月の統計量でビーム方向を 1mrad の精度で測定できるように設計されている。ニュートリノ反応の検出効率を 20% 程度と仮定したとき、系統誤差を 2% に抑えるため 1 モジュールのターゲット質量は約 7 トンになっている。

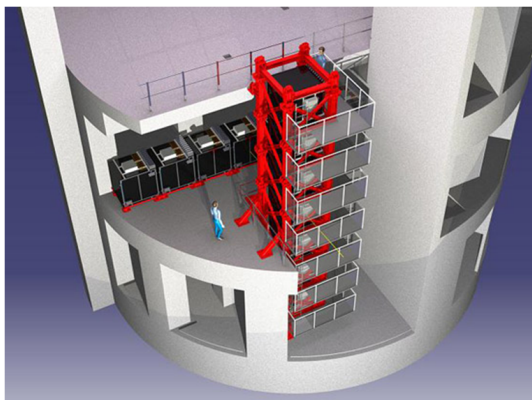


図 3.1: INGRID が設置してある地下の概観図

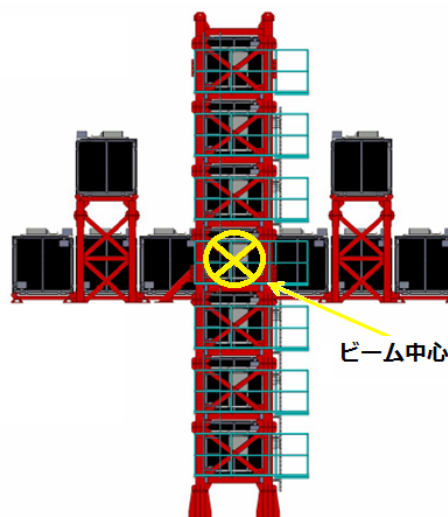


図 3.2: INGRID を正面から見た時の図。横に並べた 7 台のモジュールを横モジュール、縦に並べた 7 台のモジュールを縦モジュール、十字から外れた 2 台は shoulder モジュールと呼ぶ。

1 モジュールの大きさは $120\text{cm} \times 120\text{cm}$ 、鉄 9 枚とトラッキングプレーンと呼んでいるプラスチックシンチレータ層 11 枚を交互に並べ (図 3.3)、周りを VETO 用のシンチレータプレーン (VETO プレーン) で覆った構造をとっている (図 3.4)。モジュールの両端と中央のプレーンには温度センサーを取り付けているので、モジュール全体の温度をモニター出来る。

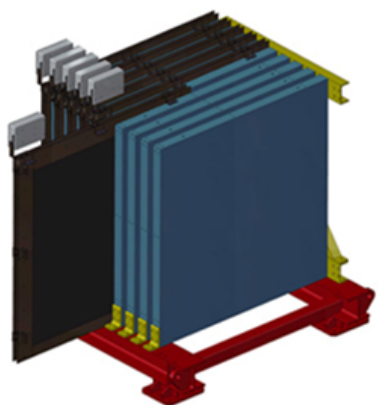


図 3.3: INGRID モジュール。青色の板が鉄、黒色の板がトラッキングプレーン。

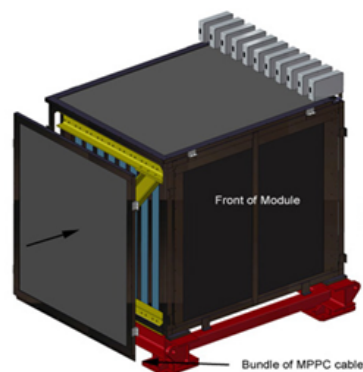


図 3.4: INGRID のモジュールの完成図。モジュールの周りを VETO プレーンで覆っている。

3.1.1 トラッキングプレーン

トラッキングプレーンの概観図は図 3.5 である。図 3.5 の真ん中の白い層がシンチレータ層で、その周りを遮光用のパネルとゴムで覆い、アルミ製のフレームで固定している。

トラッキングプレーンは $120\text{cm} \times 5\text{cm} \times 1\text{cm}$ の大きさのプラスチックシンチレータを 24 本ずつ XY 方向に並べている。プラスチックシンチレータの中心に直径 3mm の穴を空け、その穴に波長変換ファイバーを通し、片端には半導体光検出器 Multi-Pixel Photon Counter(MPPC) を取り付けている (図 3.6)。

次に、プラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、MPPC の概要に付いて述べる。

シンチレータ

INGRID で使用するプラスチックシンチレータはアメリカのフェルミ国立加速器研究所で開発された、押し出し成型シンチレータである。ポリスチレンに PPO¹、POPOP²を質量比 1% : 0.03% の割合で混ぜ合わせたもので、発光量が最大となる波長は 420nm である。2007 年 12 月から翌年 2 月にかけて、INGRID 用のシンチレータが同研究所で製作された。シンチレータの側面には製作過程で酸化チタンベースの反射材をコーティングし、トラッキングプレーン製作の際に MPPC を取り付けた面の反対側に反射材 (ELJEN Technology 社製の EJ-510) をコーティングしている。

¹2,5-diphenyloxazole

²1,4bis(5-phenyloxazol-2-yl)benzene

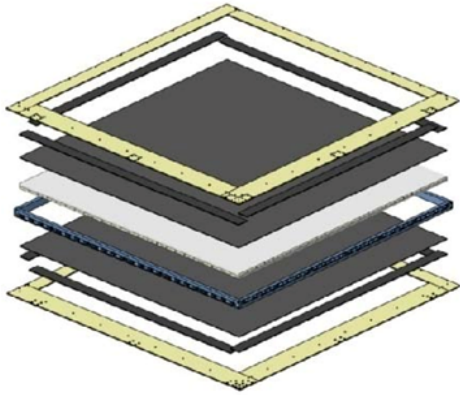


図 3.5: INGRID のプレーンの概観図。上からアルミ製のフレーム、遮光用のゴム、プラスチックパネル、シンチレータ層、遮光用のアルミ製フレーム、遮光用のゴム、プラスチックパネル、フレーム

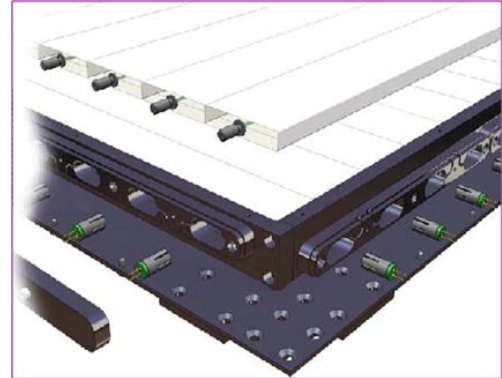


図 3.6: シンチレータ層の拡大図

波長変換ファイバー

今回用いるシンチレータは 120cm と長いので、シンチレータ単体では中央で発光した光信号を端で読み出す前に減衰し、十分な光量が得られない。そのため、シンチレータ内で発生した光を波長変換ファイバーを用いて集める。INGRID で使用する波長変換ファイバーはクラレ社の Y-11(200)MS で、断面は直径 1mm の円型である。吸収、発光波長は図 3.7 の通り、吸収率が最大となる波長は 420nm、発光量が最大となる波長は 450nm である。

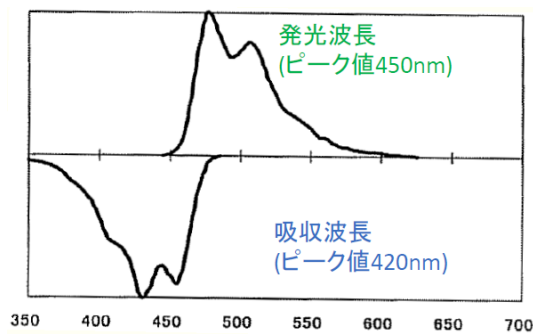


図 3.7: Y-11(200)MS の吸収、発光スペクトル。

MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)

MPPC は近年開発された半導体光検出器である。磁場中でも使用でき、低い印加電圧で動作し、優れたフォトカウンティング能力を持つ。INGRID で使用する光検出器は浜松ホトニクス社製の MPPC である(図 3.8)。受光面の大きさは 1.3mm×1.3mm。この中に 667 個の APD(Avalanche Photo Diode) ピクセルが並んでいる。APD ピクセルはある電圧を境に動作モードがガイガーモードに変化する。この時の電圧を

ブレイクダウン電圧と呼ぶ。

MPPCにはブレイクダウン電圧より高い電圧をかけ、この電圧とブレイクダウン電圧との差を ΔV と呼ぶ。

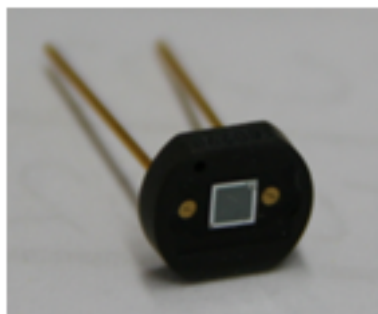


図 3.8: MPPC の写真

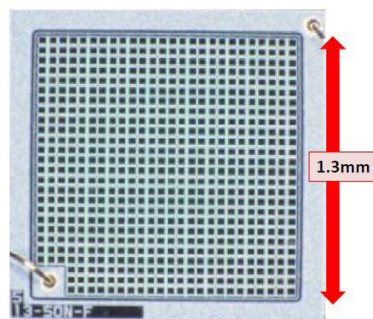


図 3.9: MPPC 受光面の拡大写真

次に MPPC の特性について述べる。

- ゲイン

APD ピクセルに光子が入射すると、電子・ホール対が生成され、ガイガー放電によって増幅する。この増幅率をゲインと呼び、ゲインは ΔV に依存する。

$$\text{ゲイン} = \frac{1 \text{ ピクセルが出す電荷量}}{\text{素電荷}} \quad (3.1)$$

本論文において、ゲインはペDESTALピークと 1p.e. ピーク差 (ADC カウント) とする (図 3.10)。

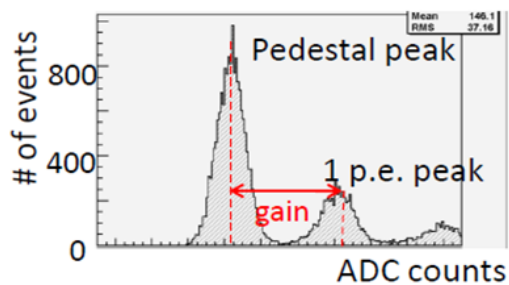


図 3.10: MPPC の ADC 分布

- ノイズレート

MPPC は熱電子由来のガイガー放電、トンネル効果によっても信号が検出される。

ノイズレートは温度と ΔV に依存し、INGRID で使用する MPPC では、 20°C 、 $\Delta V = 1.0\text{V}$ において、 500kHz 程度で光子による信号と区別がつかない。

- 光子検出効率 (PDE: Photon Detection Efficiency)

MPPC の PED は、APD ピクセルの量子効率と APD ピクセルの有感領域、APD ピクセル内部でアバランシェが起こる確率に依存する。波長変換ファイバーの発光波長 450nm に対して、 $\Delta V = 1.1$ 付近で PMT の約 2 倍高い PDE を持つ。

- クロストーク&アフターパルス

MPPCの信号が増加して見える現象に、クロストークとアフターパルスがある。

クロストークは、ある APD ピクセルで発生した電子・ホール対の増倍過程で発生する 2 次的な光子が隣のピクセルで検出される現象である。この場合 2 つのピクセルでほぼ同時に光子が検出されたように見える。

アフターパルスは、増幅過程の途中で増幅された電子の一部が半導体中の格子欠陥にトラップされ、一定時間後解放された電子が再び増幅される現象である。始めの信号から遅れて検出されるので、本来 1 つの光電子による信号が 2 つ以上の光電子による信号に見えてしまう。

いずれも ADC 分布からはもとの信号と区別がつかないため、事前に測定してあるクロストーク&アフターパルスレートをを用いて、検出した信号からその分を取り除く。

- 温度依存性

MPPCのブレイクダウン電圧は温度依存性を持つ(図 3.11)。印加電圧が一定の状況でブレイクダウン電圧が変化すると ΔV も変化するため、ゲイン、ノイズレート、クロストーク&アフターパルス、PDE も温度に従って変化する(図 3.12)。

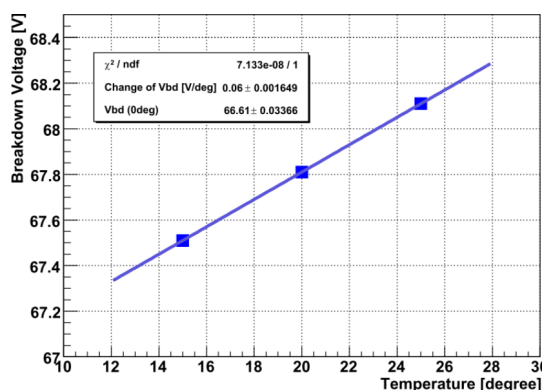


図 3.11: ブレイクダウン電圧の温度依存性

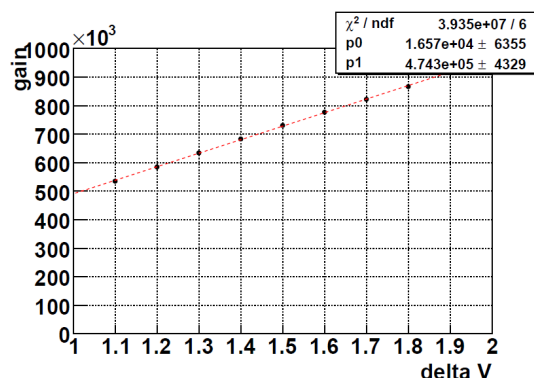


図 3.12: ゲインの ΔV 依存性

波長変換ファイバーと MPPC の接続には T2K 京都大学グループによって開発された GOMI(General Optical MPPC Injection) コネクタ(図 3.13)を使用している。GOMI コネクタは波長変換ファイバーの端面の中心と MPPC の受光領域の中心を一致させ、互いの面を密着させる。なおかつ、取り外しが用意で、取り付け位置の再現性が高い。

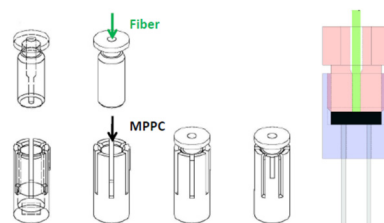


図 3.13: GOMI コネクタ

1組のプラスチックシンチレータ、波長変換ファイバー、MPPCで1チャンネルと呼ぶ。INGRIDには全9592チャンネルあるが、2モジュール(shoulderモジュール)はデータ取得時にはまだインストールされていないので、取得したデータのチャンネル総数は8360チャンネルになる。

ここで、ビームコミッショニング時には、1モジュールにつき約2000のニュートリノイベントが見込まれる(ニュートリノ反応の検出効率を20%と仮定)。この時の統計誤差は $\sqrt{2000}/2000 \sim 2\%$ である。そこで、系統誤差も2%以下に抑えることを目標にする。

系統誤差の要因として、バックグラウンド含有率の不定性と検出効率の不定性が考えられる。このうち、各モジュールにおけるバックグラウンド含有率はシミュレーションよりシグナルに対して0.1%以下であると見積もられており無視できる。

次に、検出効率の不定性について考える。3チャンネルでニュートリノイベントを同定すると仮定し、系統誤差を2%以下に抑えるためには、1チャンネルあたりの系統誤差を0.66%以下に抑えなければならない。

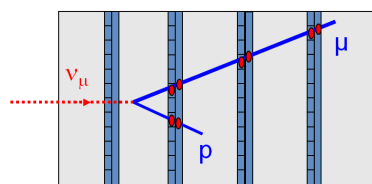


図 3.14: モジュール内で反応したニュートリノイベントのイメージ図

INGRIDには信号が読み出せないデッドチャンネルが10チャンネルある。デッドチャンネルの原因には主にケーブルの断線が考えられるが、ベDESTALが変動するために信号が読み出せないチャンネルもある。この原因は調査中である。

3.1.2 VETO プレーン

VETO プレーンはプラスチックシンチレータ層は1層のみで22チャンネルあり、外から入ってきた荷電粒子のイベントを除くために取り付けられている(図 3.15)。荷電粒子の入射位置が分かるように、シンチレータはビーム入射方向と垂直に並べてある。

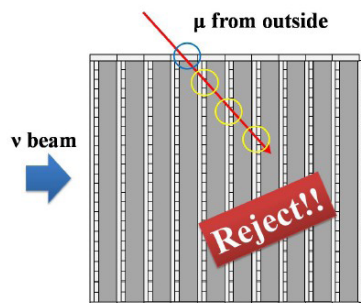


図 3.15: VETO プレーンが光ったことで除かれるイベントの例。青色の丸で囲ったシンチレータが VETO シンチレータ層

3.2 データ読み出し

MPPC の出力信号はフロントエンドボードで信号の大きさと時間情報がデジタル化され、バックエンドボードに送られる。バックエンドボードではトリガー信号を受け取ると 23 サイクル分のデータが遡って取得される。1 サイクルは ADC ゲート幅に対応しており、ADC ゲート幅は 10nsec 単位で 100nsec~2000sec の範囲内で調整できる。

ただし、ゲートの最初数 nsec は ADC 情報が、最後の 50nsec は TDC 情報が記録されず、ゲート終了後、100nsec は不感時間になっている。

フロントエンドボード 1 枚で 64 チャンネル分の読み出しが出来き、トラッキングプレーン 1 枚に対しフロントエンドボード 1 枚取り付けられている。VETO プレーンは 2 枚で 1 枚のフロントエンドボードを使っている。

各 MPPC の印加電圧の調整もフロントエンドボードで行なっている。

INGRID でのトリガーは periodic トリガー、cosmic トリガー、beam トリガーの 3 種類ある。

periodic トリガーは任意の周期でトリガー信号をだす。主に MPPC のゲインを求める際に使用する。

cosmic トリガーは宇宙線測定を行う際に用いるトリガーである。モジュール内の任意のトラッキングプレーンを任意の枚数だけトリガーに設定でき、最大 4 種類の cosmic トリガーを設定できる。

beam トリガーは、ニュートリノビームのデータを測定するためのトリガーで、陽子ビームが入射するとトリガー信号が出ようになっている。

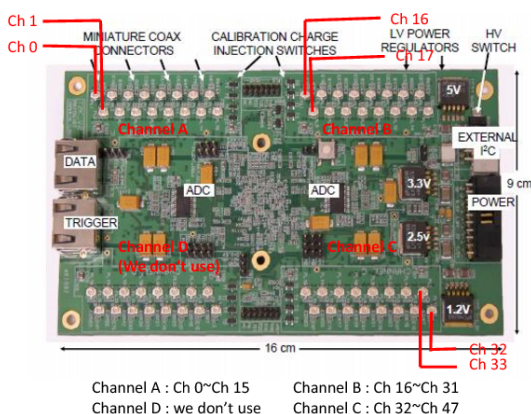


図 3.16: フロントエンドボード

デジタル変換された MPPC の出力信号は次の式で光量に変換される。

$$\text{光量} = \frac{\text{ADC} - \text{ベデスタルピーク値}}{\text{MPPCゲイン}} \times (1 - c) \quad (3.2)$$

ここで、 c はクロストーク&アフターパルスレートである。

3.3 データ収集

2010 年 2 月~6 月までに取得した宇宙線データを用いて、チャンネルの hit efficiency と平均光量、各長期安定性を求めた。取得したデータはメインリングのラン番号 30~34 にあたり、各ランのおよその日程は以下の通り。

表 3.1: 各ランの期間

ラン番号	期間
30	2月23日～3月1日
31	3月18日～3月25日
32	4月13日～5月1日
33	5月9日～6月1日
34	6月6日～6月27日

表 3.2: データ取得時の設定値

MPPC ΔV	1.0V
TDC threshold	2.5p.e.
ADC ゲート幅	480nsec

3.3.1 セットアップ

データ取得時の設定は以下の通り。

取得したデータのトリガーはプレーン 4 枚使い、図 3.17 に示すように 4 種類の cosmic トリガーを同時にかけた。

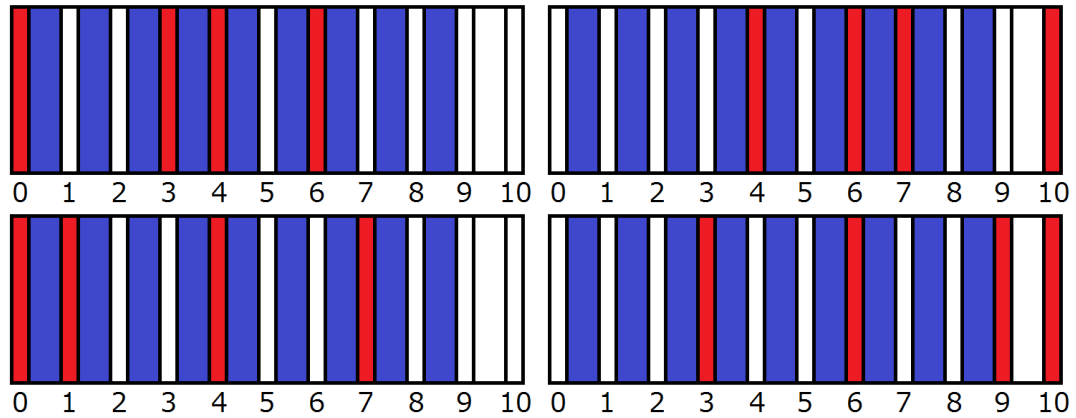


図 3.17: データに取得に使用したトリガー。赤色のプレーンがトリガープレーン、青色は鉄を表す。プレーン番号はビーム上流より 0,1,2,...,8,9,10 となっている。

3.4 データ解析

取得した宇宙線データ (約 2807 万イベント) より宇宙線イベントを選び、宇宙線の飛跡を再構成した後、各チャンネルの hit efficiency、光量を求めた。

3.4.1 宇宙線イベントの選出

1 モジュール内に、TDC 情報で 100nsec の範囲内で 8 チャンネル以上光ったチャンネル群を宇宙線イベントとした。トリガーは各トリガープレーン内に 2 チャンネル光ったときにかかり、トリガーには 4 枚のプレーンを使用しているため 8 チャンネルという条件を課した。

3.4.2 宇宙線飛跡の再構成

ビーム下流のプレーンより光ったチャンネルがあるプレーンを 3 つ探し、チャンネルの位置を求める (図 3.18 の青色の四角で囲ったのチャンネル)。

次に、隣り合うプレーン内のチャンネル位置の差が 1 以下の場合、その隣のプレーン内のヒットチャンネルを探す (図 3.18 の黄色の四角で囲ったのチャンネル)。

この操作を続け、選ばれたチャンネルを使い、1 次関数で飛跡を再構成した。

この時、ビーム入射方向を 0° として、再構成された飛跡より θ_x, θ_y を決める。 θ_x はモジュールを上から見た時の飛跡の角度、 θ_y はモジュールを横から見た時の飛跡の角度である (図 3.19)。

θ_x, θ_y それぞれの角度分布は図 3.20、図 3.21 の通りである。

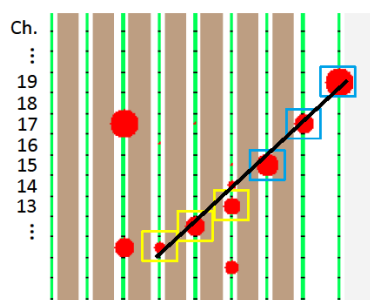


図 3.18: 飛跡の再構成

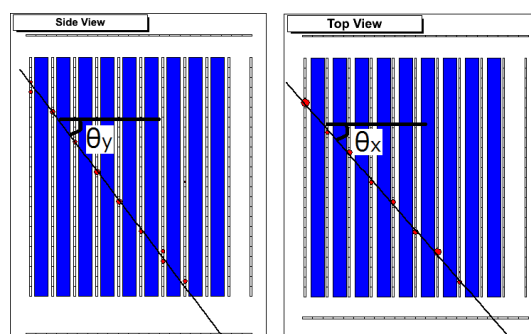


図 3.19: 角度 θ_x, θ_y の定義。赤い丸がヒット点、丸の大きさは光量に比例。白色の四角がシンチレータ、青色は鉄、直線は再構成した飛跡。左図はモジュールを横から見た図 (side view)。右図はモジュールを上空から見た図 (top view)。

3.4.3 光量補正

光量は再構成した宇宙線飛跡の通過距離によって補正した。

補正前の光量を $N_{p.e.}$ 、補正後の光量を $N_{p.e.}^{corr}$ とすると、次の式で補正した。

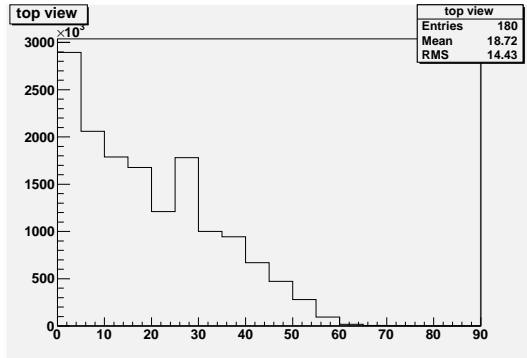


図 3.20: θ_x の角度分布

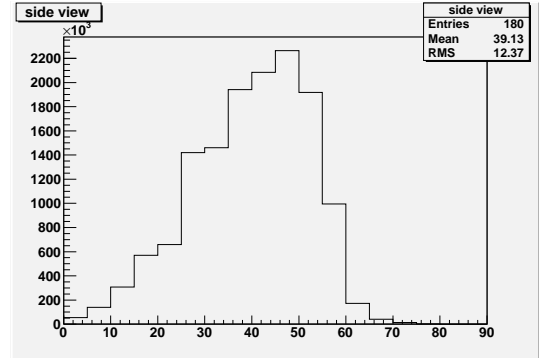


図 3.21: θ_y の角度分布

$$N_{p.e.}^{corr} = \frac{N_{p.e.}}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}} \quad (3.3)$$

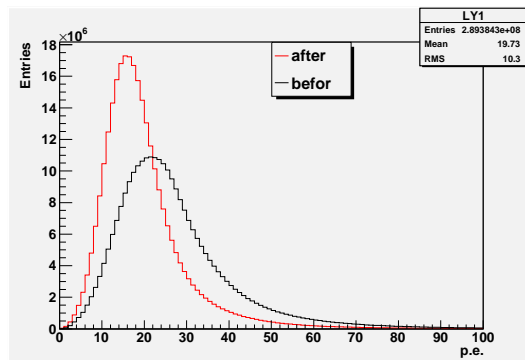


図 3.22: 全チャンネルの光量分布。黒：補正前の光量分布。赤：補正後の光量分布。

3.4.4 チャンネルの hit efficiency、光量の求めかた

- トラッキングプレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency を求める場合 (図 3.23)
 - 1 着目プレーンを挟むプレーンにそれぞれ光ったチャンネルが 1 つ (6.5p.e. 以上) あり、反対の view に光ったチャンネルがある
 - 2 着目プレーンに光ったチャンネルが 1 つ

$$hit\ efficiency = \frac{1\ と\ 2\ を\ 満たす\ イベント数}{1\ を\ 満たす\ イベント数} \quad (3.4)$$

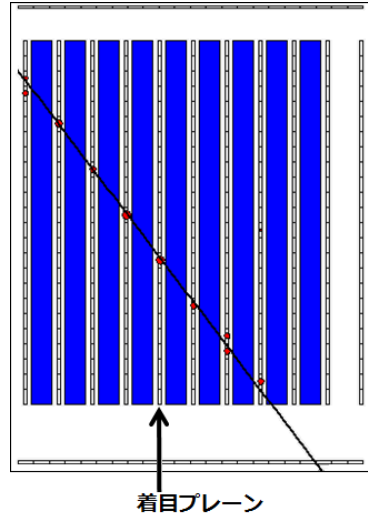


図 3.23: 赤い丸が光ったチャンネル、丸の大きさは光量に比例。白色の四角がシンチレータ、青色は鉄、直線は再構成した飛跡。

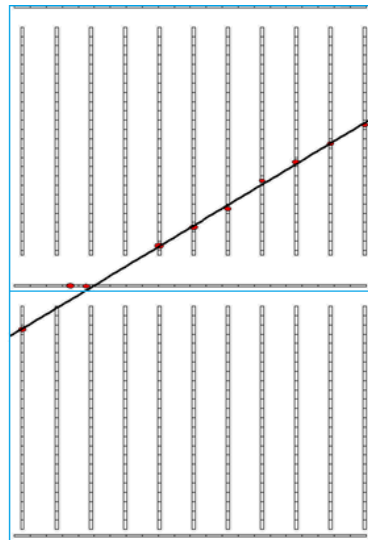


図 3.24: 1 モジュールを水色の線で囲んでいる。赤丸が光ったチャンネル、丸の大きさは光量に比例。四角はシンチレータ、直線は再構成した飛跡。

- VETO プレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency を求める場合 (図 3.24)
モジュールに挟まれた VETO プレーンが対象。

- 1 VETO プレーンを挟むモジュールどちらかに宇宙線イベントがあり、再構成した飛跡が両モジュールを通る
- 2 再構成した飛跡より VETO プレーンのヒットチャンネルを探し、そのチャンネルが光っている

$$\text{hit efficiency} = \frac{1 \text{ と } 2 \text{ を満たすイベント数}}{1 \text{ を満たすイベント数}} \quad (3.5)$$

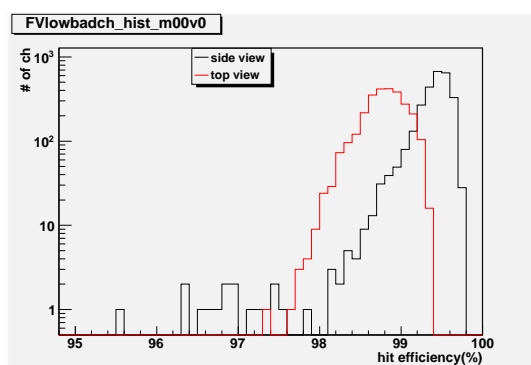


図 3.25: トラッキングプレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency

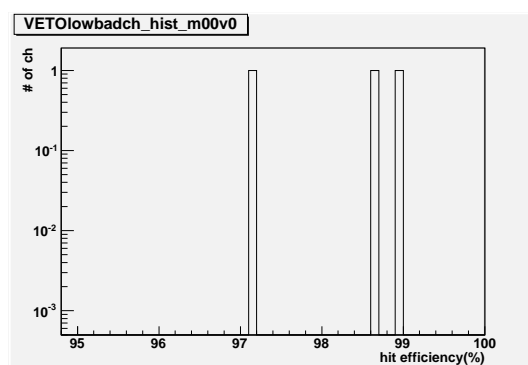


図 3.26: VETO プレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency

トラッキングプレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency は $99.1 \pm 0.4\%$ 、VETO プレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency は $98.3 \pm 0.7\%$ 、各チャンネルの hit efficiency のばらつきは INGRID の要請の 0.6% 以内だった (図??)。

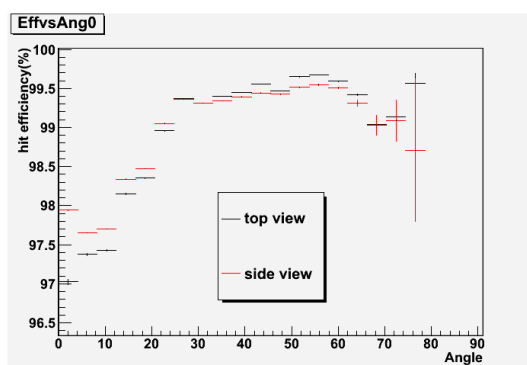


図 3.27: hit efficiency の角度分布

飛跡の角度が浅い場合、top view のチャンネルは hit efficiency が低い (図 3.27)。これは、シンチレータの周りに塗ってある反射材の厚さ分すき間 (約 2mm) が出来き、飛跡の角度が浅い場

合このすき間を通るイベントが多いためだと考えられる。

各モジュールごとの hit efficiency は下の表のにまとめた。
モジュール番号は INGRID を正面から見たときに、横モジュールは右から 0,1,...,5,6、縦モジュールは下から 7,8,...,12,13 となっている。

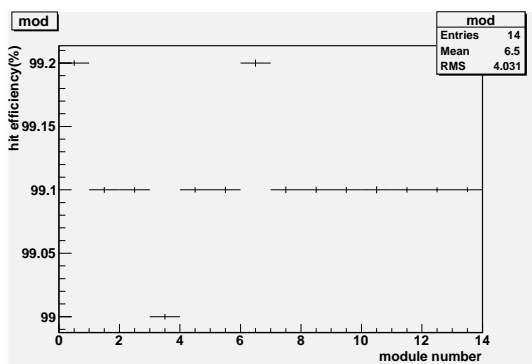


図 3.28: モジュールごとの hit efficiency。横軸がモジュール番号、縦軸が hit efficiency(%)

モジュール番号	hit efficiency(%)
0	99.2
1	99.1
2	99.1
3	99.0
4	99.1
5	99.1
6	99.2
7	99.1
8	99.1
9	99.1
10	99.1
11	99.1
12	99.1
13	99.1
all	99.1

各チャンネルの光量分布はトラッキングプレーン、VETO プレーンとも条件 1、2 を満たす場合に着目プレーン上にあるチャンネルの光量を使って求めた。各チャンネルの光量分布をガウス分布でフィットして、この中心値を平均光量とした (図 3.29)。

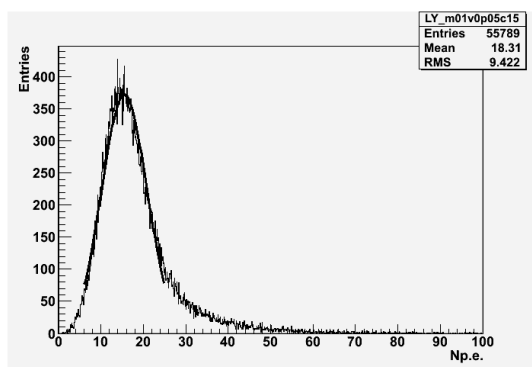


図 3.29: あるチャンネルの光量分布

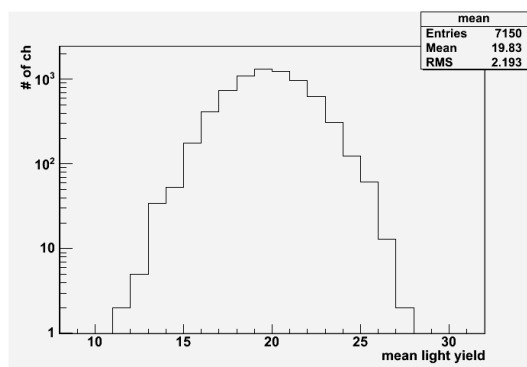


図 3.30: 各チャンネルの平均光量

チャンネルの平均光量は 19.8 ± 2.1 p.e.。
平均光量は最低でも 11p.e.、データ解析に十分な光量があることを確認した (図 3.30)。

3.4.5 長期安定性のチェック

取得したデータはメインリングのラン番号 30~34 にあたり、各ランに分けて hit efficiency と平均光量をそれぞれ求めた。

ラン 31 が始まる前までに取得した宇宙線データを基準データとして、このデータからのずれの割合を求めた。

hit efficiency の長期安定性

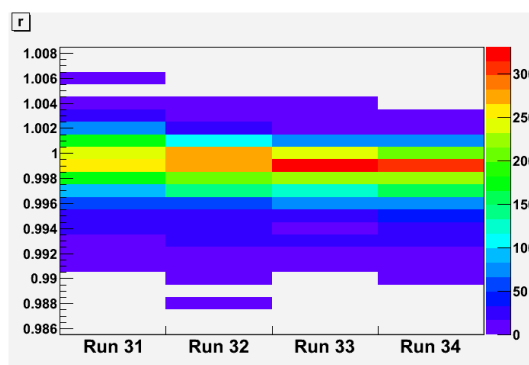


図 3.31: hit efficiency の長期安定性。縦軸は基準データからのずれの割合、z 軸はチャンネル数

98 % のチャンネルが INGRID の要請 0.6 % 以内を満たしていた。

光量の長期安定性

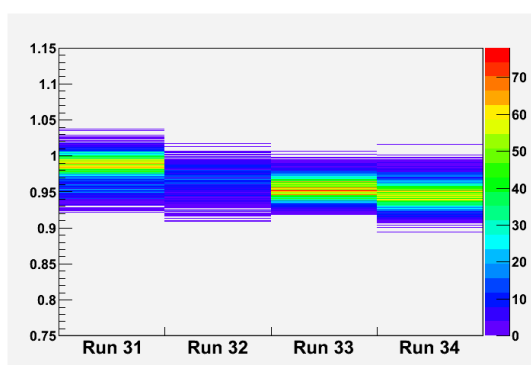


図 3.32: 横モジュールに含まれるチャンネルの平均光量の長期安定性。縦軸は基準データからのずれの割合、z 軸はチャンネル数

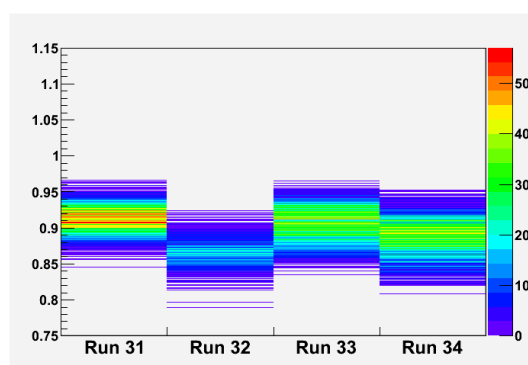


図 3.33: 縦モジュールに含まれるチャンネルの平均光量の長期安定性。縦軸は基準データからのずれの割合、z 軸はチャンネル数

ほとんどのチャンネルで INGRID の要請 10 % 以内の変動だった。
ただし、縦モジュールの平均光量 (図 3.33) は基準のデータから大きくずれているがこれは温度変化による

ものだと考えられる。ラン 33 からは縦モジュール全体にカバーをかけて、横モジュールのフロアの空気を取入れ循環するようにした。

縦モジュールはラン 31 からの平均光量の変動が 10 % 以内に収まっている

第4章 結論

T2K 実験の前置検出器であるニュートリノビームモニター INGRID の性能評価を行った。INGRID 内で起こったニュートリノ反応を検出することで、ニュートリノビームの方向、プロファイル、強度をモニターする検出器である。INGRID は鉄とシンチレータ層が交互に並んだ構造で、シンチレータ、波長変換ファイバー、MPPC で構成されるチャンネルが全 9592 チャンネルある。性能評価として各チャンネルの hit efficiency と光量を調べた。

INGRID は 1mrad の制度でビームをモニターしなければならず、そのためにはチャンネルの hit efficiency の不定性が 0.6 % 以内である必要がある。

2月～6月までに取得した宇宙線データよりチャンネルの hit efficiency と光量を評価した。トラッキングプレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency は 99.1 ± 0.4 %、VETO プレーンに含まれるチャンネルの hit efficiency は 98.3 ± 0.7 %、チャンネルの不定性は 0.6 % 以内。チャンネルの平均光量は 19.8 ± 2.1 p.e.、データ解析に十分な光量でデータ解析に十分な光量があることを確認した。

そして、取得したデータをランごとに分けて、チャンネルの hit efficiency、光量を求めた結果、どのランも全てのチャンネルに十分なイベント数はなかったが、チャンネルの hit efficiency の変動は 98 % のチャンネルが 0.6 % 以内を満たし、平均光量の変動はほとんどのチャンネルで 10 % 以内だった。

第5章 謝辞

この論文を完成させるにあたり多くの方々にお世話になりました。

奥沢徹先生、清矢良治先生、山本和弘先生にはお忙しい中、ご指導・ご鞭撻頂きにありがとうございました。

京都大学の中家剛先生、市川温子先生、東京大学の横山将志先生には適切なアドバイスを頂き、ありがとうございました。

南野彰宏さん、大谷将士さん、京都大学高エネルギー物理学研究室の皆様には大変お世話になりました。ありがとうございました。

研究室の先輩方、同級生・後輩達には、何度となく相談に乗っていただき、心から感謝致しております。

不出来な学生でしたが、修士課程の2年間を乗り越えることが出来たのは、先生方のおかげです。本当にありがとうございました。

松村知恵

参考文献

- [1] Y.Itow et al.,The JHF-Kamioka neutrino project,,Institute for Cosmic Ray Researc, Universit of Tokyo,(2001).
- [2] 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,Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科,(2009).
- [3] 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,Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科,(2010).
- [4] 家城佳,Construction and Performance of Fine Grained Detector for T2K Experiment,Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科,(2010).
- 栗本佳典,T2K 実験におけるニュートリノビームモニターの開発,Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科,(2006).
- 平出克樹,J-PARC ニュートリノ振動実験のための off-axis 前置検出器の基本設計および APD 読み出し系の開発,Master's thesis, 京都大学大学院理学研究科,(2005).
- 尾崎称,T2K 長基線ニュートリノ振動実験における INGRID 検出器によるニュートリノイベントの探索,Master's thesis, 大阪市立大学大学院理学研究科,(2010).