

修士論文

ニュートリノ反応数測定のための
小型水チェレンコフ検出器”Mizuche”の開発

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室
高橋 将太

2011年1月27日

概要

T2K (Tokai-to-Kamioka) 長基線ニュートリノ実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC の陽子ビームを使って生成した人工ニュートリノビームを、295 km 離れた岐阜県飛騨市にあるスーパーカミオカンデに向けて飛ばし、その飛行中に起こるニュートリノ振動を観測する実験である。

2009 年 4 月に稼働開始したこの実験は、ミューオンニュートリノ消失モードによる振動パラメータの精密測定、および未発見の電子ニュートリノ出現モードの世界初観測を目標にしている。

ニュートリノ振動の精密測定には、ニュートリノビームのフラックス、ニュートリノ反応断面積、検出効率の不定性に起因する系統誤差を低く抑えることが必要となってくる。そこで、前置検出器部分において、後置検出器であるスーパーカミオカンデと同じ測定原理・ニュートリノ反応標的を持つ水チェレンコフ光検出器で測定することができれば、これらの系統誤差を削減することが期待できる。

T2K 実験のニュートリノビーム強度では、大型の水チェレンコフ光検出器に対するニュートリノ反応レートが大きく、1 バンチ内で多数のニュートリノが反応してしまい、バンチ毎にイベントを区別して測定することが困難になる。そのため、本実験では容積を 2.5 トンと小型化し、ニュートリノ反応数を計数することに特化した検出器の開発を行うことにした。

本検出器は、直径 1400 mm、長さ 1600 mm のタンクの周囲に光電子増倍管を 164 本配置し、水とニュートリノ反応により生じた荷電粒子のチェレンコフ光を検出する。検出器内部に有効体積領域として、直径 800mm、長さ 1000mm のアクリル製内タンクが入っており、物理的に区切られた 2 層構造になっている。

本実験は次の 2 つを目標にしている。

1. 前置検出器部分で水チェレンコフ光を用いたニュートリノ反応数の測定
(目標精度 2%)
2. スーパーカミオカンデでのニュートリノ反応予測数の精度向上

まず、大強度ニュートリノビームに対しても水チェレンコフ検出器が有効であることを実証しながら、2 % の精度での測定を目指す。その結果を基に、我々は本検出器を T2K 前置検出器群と合わせて利用し、T2K 実験の測定感度の向上を最終目標として目指す。

本論文では、T2K 実験の前置検出器ホールにて開発を行った新型の水チェレンコフ検出器について、その実験原理、検出器シミュレーションによる期待される性能の評価、強度解析・耐震解析の結果を踏まえた構造体の設計、使用する光電子増倍管のキャリブレーションについて報告する。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	ニュートリノ	1
1.2	ニュートリノ振動	1
1.3	ニュートリノ振動実験の現状	3
第2章	T2K 長基線ニュートリノ振動実験	4
2.1	実験概要・目的	4
2.1.1	ニュートリノ振動解析	4
2.2	J-PARC 加速器及びニュートリノビームライン	5
2.2.1	J-PARC 加速器	5
2.2.2	ニュートリノビームライン	7
2.3	T2K 前置検出器群	7
2.3.1	INGRID	7
2.3.2	オフアクシス検出器	7
2.4	後置検出器：スーパーカミオカンデ	8
第3章	小型水チェレンコフ検出器 Mizuche	10
3.1	Mizuche の概要	10
3.2	Mizuche の目的	10
3.3	Mizuche の実験原理	11
3.3.1	チェレンコフ放射	11
3.3.2	測定原理	15
3.4	簡単なニュートリノ反応数の見積もり	16
3.4.1	有効体積内でのニュートリノ反応頻度	16
3.4.2	測定時間による統計誤差	17
3.4.3	1年間で期待されるニュートリノ反応数	18
第4章	GEANT4 による検出器シミュレーション	19
4.1	目的・目標	19
4.2	検出器シミュレーションの概要	19
4.3	検出器シミュレーションのモデル	20
4.3.1	検出器のジオメトリ	20
4.3.2	物理プロセス	20
4.3.3	典型的なイベントディスプレイ	21

4.4	シグナルイベントのシミュレーション	22
4.4.1	ニュートリノビームフラックス	22
4.4.2	ニュートリノ反応エネルギー分布	22
4.4.3	ニュートリノ反応に対する総光量分布	25
4.4.4	ニュートリノ反応の種類による検出効率の違い	26
4.4.5	シグナルに対する OV 混入イベントの割合	29
4.4.6	シグナルイベントシミュレーションのまとめ	29
第 5 章	Mizuche 検出器の設計	30
5.1	検出器の構成	30
5.1.1	外タンク	31
5.1.2	内タンク	33
5.1.3	光電子増倍管	34
5.1.4	光電子増倍管取り付け部分	36
5.1.5	水循環系	37
5.2	強度解析	39
5.2.1	目的	39
5.2.2	有限要素法	39
5.2.3	材料特性	40
5.2.4	外タンク	40
5.2.5	内タンクモデル	49
5.3	耐震解析	53
5.3.1	震度と重力加速度	54
5.3.2	横方向のゆれに対する解析	54
5.3.3	長さ方向のゆれに対する解析	56
5.4	水漏れ試験・インストレーション	57
5.4.1	水漏れ試験	57
5.4.2	インストレーション	59
第 6 章	光電子増倍管のキャリブレーション	60
6.1	目的	60
6.2	測定原理	60
6.2.1	光電子数と電流増幅率	60
6.2.2	相対的量子効率	61
6.2.3	電流増幅率曲線	61
6.3	方法・手順	62
6.3.1	実験器具	62
6.3.2	基本的な測定手順	63
6.4	等方性・再現性の測定	63
6.4.1	等方性と再現性	64
6.5	相対的量子効率・電流増幅率曲線の測定	66

6.5.1	相対的量子効率	66
6.5.2	電流増幅率曲線	67
6.5.3	印加電圧と光量の関係の問題点	70
第7章 まとめ		71

第1章 はじめに

1.1 ニュートリノ

ニュートリノは弱い相互作用を通してのみ反応する中性レプトンで、1931年に Pauli によってその存在が仮定され、1935年に Fermi によって理論付けられた粒子である。弱い相互作用しかしないため、ニュートリノを直接検出することは非常に困難だが、1956年に Reines と Cowan による実験によってその存在が初めて確認された。1962年には Lederman、Schwartz、Steinberger らの測定によって電子の反応に現れるニュートリノとミュオンとの反応に現れるニュートリノの2種類存在することが確認された。その後、これまでに、電子ニュートリノ (ν_e)、ミュオンニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) という3世代のフレーバーとその反粒子が存在することが分かった。

ニュートリノの質量に関しては、素粒子物理学の理論である「標準模型」においてゼロとして扱われてきた。また、直接測定による上限値が与えられるにとどまっている。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少する、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オンニュートリノの数が減少する、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と考えられている。

ニュートリノ振動現象は、ニュートリノが質量をもつ場合にのみ起きるため、その観測は、ニュートリノが有限の質量をもつことを意味する。

1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ振動とは、ある種類のニュートリノが、その時間発展とともに、他の種類のニュートリノに変化する現象で、ニュートリノ間の質量が異なる場合にのみ起こり得る。ニュートリノ振動現象が起きるということは、ニュートリノ質量の存在を示すとともに、質量の固有状態がレプトン世代間で混合していることを示している。

ニュートリノ振動は、フレーバーの固有状態 (ν_e, ν_μ, ν_τ) と質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3) が一致せず、さらに3つの質量固有状態が1つに縮退していない場合に起こる。この場合、混合状態は3つの混合角 ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) と1つのCP複素位相 δ を用いて以下の用に記述することができる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

この 3×3 行列は世代間の混合を表すユニタリ行列で、MNS(Maki-Nakagawa-Sakata) 行列と呼ばれ [1]、通常以下のように書かれる。

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

ここで、 $\alpha = (e, \mu, \tau)$, $i = (1, 2, 3)$, $C_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $S_{ij} = \sin \theta_{ij}$ である。

ここでは、最も簡単な場合として2つのフレーバー (ν_α, ν_β) 間の振動を考えることにする ($\theta_{12} = \theta, \theta_{23} = \theta_{13} = 0$ とする)。この2つのフレーバー固有状態は質量固有状態 (ν_1, ν_2) を用いて

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

と表すことができ、質量固有状態の時間発展は、

$$\begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i(E_1 t - p_1 x)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_2 t - p_2 x)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1(t=0) \\ \nu_2(t=0) \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

と表すことができる。ここで E_i, p_i はそれぞれ ν_i のエネルギー、運動量を表す。

これより、フレーバー固有状態の時間発展は、

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha(t) \\ \nu_\beta(t) \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i(E_1 t - p_1 x)} & 0 \\ 0 & e^{-i(E_2 t - p_2 x)} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} \nu_\alpha(t=0) \\ \nu_\beta(t=0) \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

となる。

時刻 $t=0$ 、位置 $x=0$ で生成されたニュートリノが距離 L だけ飛行した場合を考える。ニュートリノの質量はエネルギーより十分小さいとしてよく ($m_i \ll E_i$)、

$$p_i = \sqrt{E_i^2 - m_i^2} \sim E_i + \frac{m_i^2}{2E_i} \quad (1.6)$$

$$t \sim L \quad (1.7)$$

と近似でき、式 (1.5) は、

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha(t) \\ \nu_\beta(t) \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} e^{-i\frac{m_1^2 L}{2E_1}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{m_2^2 L}{2E_2}} \end{pmatrix} U^{-1} \begin{pmatrix} \nu_\alpha(t=0) \\ \nu_\beta(t=0) \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

となる。

以下ではある決まったエネルギーのニュートリノを考え、 $E_i = E_\nu$ とする。位置 $x=0$ において ν_α だったニュートリノが、距離 L 飛行した後に ν_β になる確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ 、および、 ν_α のままである確率 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha)$ はそれぞれ、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha \rangle|^2 \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \times \Delta m^2 [\text{eV}^2] \times \frac{L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \end{aligned} \quad (1.9)$$

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha) &= 1 - P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \\ &= 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \times \Delta m^2 [\text{eV}^2] \times \frac{L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right) \end{aligned} \quad (1.10)$$

となる。ここで、 $\Delta m^2 \equiv |m_1^2 - m_2^2|$ は質量二乗差のことである。

これらの式から、確率 P は質量二乗差 Δm^2 と混合角 θ をパラメータとして、飛行距離 L およびニュートリノエネルギー E_ν の関数としてフレーバー間で振動することがわかる。また、この振動が起こるのは、フレーバー固有状態が質量固有状態と異なっており ($\theta \neq 0$)、かつ質量固有状態が縮退していない ($\Delta m^2 \neq 0$) 場合であることが分かる。

このニュートリノ振動の存在を実証出来れば、少なくとも2種類のニュートリノの間に質量差が生じることになり、したがって、少なくとも1種類のニュートリノが質量を持つことの証明となる。

1.3 ニュートリノ振動実験の現状

ニュートリノ振動観測実験はニュートリノの生成過程によって、大気ニュートリノ観測、太陽ニュートリノ観測、原子炉ニュートリノ観測、および加速器ニュートリノ実験の4つに大別される。現在までに行われたこれらの観測・実験によって分かっていることをまとめる。

$\Delta m_{23}^2, \theta_{23}$ (大気ニュートリノ領域)

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の振動モードに関しては、スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測 [5] で発見され、加速器ニュートリノを用いた K2K 実験 [3] により確立された。MINOS の最新の結果 [4] によると、振動パラメータは $2.31 \times 10^{-3} < \Delta m_{23}^2 < 3.43 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta > 0.78$ (90% C.L.) である。

$\Delta m_{12}^2, \theta_{12}$ (太陽ニュートリノ領域)

$\nu_e \rightarrow \nu_x$ ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ 及び $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$) の振動モードに関しては、スーパーカミオカンデ [?] や SNO 実験 [6] による太陽ニュートリノ観測や KamLAND 実験 [7] による原子炉ニュートリノ観測により確立された。振動パラメータは $\Delta m_{12}^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2, \tan^2 \theta_{12} \sim 0.5$ である。

$\Delta m_{13}^2, \theta_{13}$

θ_{13} を介した $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動モードは未だ見つかっておらず、振動パラメータも CHOOZ 実験による原子炉ニュートリノの観測 [8] により $\Delta m_{23}^2 \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ のとき $\sin^2 2\theta_{13} < 0.15$ という上限値しか分かっていない。

また、CP 非対称性の複素位相 δ は MNS 行列の $\sin \theta_{13}$ の項についてくるため、 θ_{13} がゼロでない時にのみ、測定可能となる。

第2章 T2K長基線ニュートリノ振動実験

2.1 実験概要・目的

T2K(Tokai to Kamioka)長基線ニュートリノ振動実験の概念図を図2.1に示す。

T2K実験[9]は茨城県東海村にあるJ-PARC大強度陽子加速器施設で生成したミュオンニュートリノビームを岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデ検出器で観測する全長295kmの長基線ニュートリノ振動実験である。本実験は2009年4月に稼働開始した。T2K実験では世界最大強度のニュートリノビームと世界最大の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデを用いて、

1. ミュオンニュートリノ消失による混合角 θ_{23} 及び Δm_{23}^2 の精密測定
2. 電子ニュートリノ出現モードによる混合角 θ_{13} の世界初観測

を世界最高感度で実現することを目標としている。

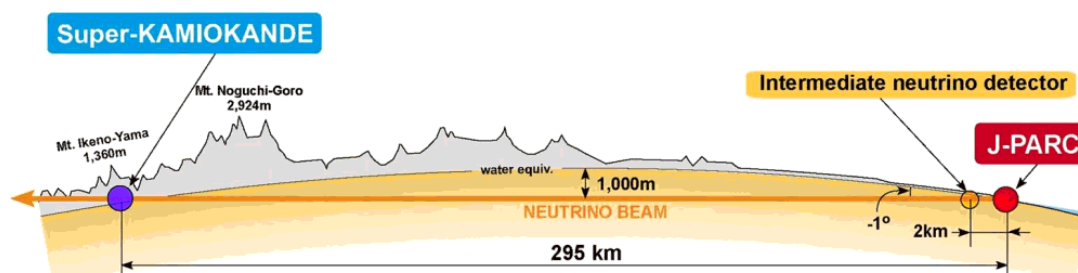


図 2.1: T2K 実験の概要。茨城県東海村の J-PARC 加速器施設で生成した人工ミュオンニュートリノを、295km 離れたスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノ振動測定を行う。

2.1.1 ニュートリノ振動解析

生成点直後と長距離飛行後のニュートリノの状態をそれぞれ前置検出器、後置検出器で測定を行う。前置検出器での測定結果を外挿して、後置検出器の結果を予測し、その値を後置検出器の測定結果と比較することにより、ニュートリノ振動解析を行う。このとき、振動確率を表す式(1.9)より、混合角は主にニュートリノ反応数の増減から、質量二乗差は主にエネルギースペクトルの歪みから求められる。

T2K 実験では、ニュートリノ生成点から 280m 下流に配置した前置検出器と、295 km 離れた後置検出器にスーパーカミオカンデを使用する。前置検出器での結果 $N_{\text{ND}}^{\text{obs}}$ を外挿して、スーパーカミオカンデでのニュートリノ反応数予測 $N_{\text{SK}}^{\text{exp}}$ を求める式は次のようになる。

$$N_{\text{SK}}^{\text{exp}} = R_{\text{Far/Near}} \times N_{\text{ND}}^{\text{obs}} \quad (2.1)$$

ここで $R_{\text{Far/Near}}$ は F/N 比 (Far-to-Near ratio) と呼ばれるもので、モンテカルロシミュレーションにより求めた前置検出器、スーパーカミオカンデの、それぞれのニュートリノ反応数 $N_{\text{ND}}^{\text{MC}}, N_{\text{SK}}^{\text{MC}}$ を用いて次式で定義される数である。

$$R_{\text{Far/Near}} \equiv \frac{N_{\text{SK}}^{\text{MC}}}{N_{\text{ND}}^{\text{MC}}} = \frac{\int \Phi_{\text{SK}}^{\text{MC}} \times \sigma \times \epsilon_{\text{SK}}}{\int \Phi_{\text{ND}}^{\text{MC}} \times \sigma \times \epsilon_{\text{ND}}} \quad (2.2)$$

ここで、右辺の各変数は以下の通りである。

- $\Phi_{\text{SK,ND}}^{\text{MC}}$... MC によるスーパーカミオカンデ、前置検出器でのエネルギースペクトル
- σ ... ニュートリノ反応断面積
- $\epsilon_{\text{SK,ND}}$... スーパーカミオカンデ、前置検出器の検出効率

式 (2.2) より前置検出器のエネルギースペクトル、反応標的、検出効率などをスーパーカミオカンデのそれに近づけることで、それらに付いてくる不定性がお互い打ち消しあい、F/N 比の系統誤差を小さくすることができる。その結果、スーパーカミオカンデでのニュートリノ反応数予測の精度を向上させることができる。

2.2 J-PARC 加速器及びニュートリノビームライン

2.2.1 J-PARC 加速器

J-PARC 加速器の構成を図 2.2 に示す。全長 330 m の線形加速器リニアック (LINAC) で加速された陽子は、全周 350 m の 3 GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、全周 1600 m の陽子シンクロトロン (MR) の順に加速され、最終的にビームエネルギー 30 GeV、ビーム強度 750 kW (デザイン値) にまで到達する。その後、超伝導磁石を用いた速い取り出し (FX) によって 2 ~ 4 秒の間隔でニュートリノビームラインへと蹴り出される。1 スピルあたり 8 バンチ、1 バンチの幅 58 nsec、バンチ間隔 581 nsec のビーム構造をしている。これらの J-PARC 加速器の陽子ビームパラメータを表 2.1 にまとめた。なお、ビームエネルギー 30 GeV、ビーム強度 750 kW を達成するために、今後これらのパラメータを変更する可能性もある。



図 2.2: J-PARC 加速器の構成。LINAC、RCS、MR で徐々に加速された陽子は最終的に 30 GeV のエネルギーに達する。(図は J-PARC 公式 HP より)

表 2.1: J-PARC 加速器ビームパラメータのデザイン値

ビームエネルギー	30	[GeV]
ビーム強度	750	[kW] (現在は約 100 kW)
1 スピル当たりの陽子数	3.3×10^{14}	[pps] (現在は 7×10^7 pps)
スピル周期	2.11	[sec] (現在は 3.2 sec)
スピル構造	8	[bunches/spill]
バンチ間隔	581	[nsec]
バンチ幅	58	[nsec] (現在は半値幅 10 nsec)

pps = protons/spill

2.2.2 ニュートリノビームライン

ニュートリノビームラインの構成を図 2.3 に示す。MR で 30 GeV まで加速された陽子は、超電導磁石によって曲げられ、ニュートリノビームラインに導かれる。その後、陽子ビームは炭素標的に衝突し π 中間子、K 中間子を生成する。これらの荷電粒子を電磁ホーンによって収束させてから、崩壊トンネルに入射させる。崩壊トンネル内では、粒子の崩壊によってニュートリノやその他の粒子が生成する。ニュートリノ以外の粒子はビームダンプによって堰き止められるため、ニュートリノのみが、前置検出器群よびスーパーカミオカンデに向かって飛んでいくことができる。

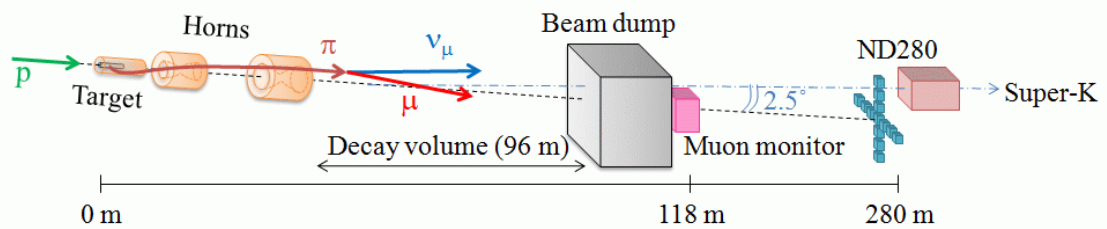


図 2.3: ニュートリノビームラインの構成。MR で 30 GeV まで加速された陽子は、超電導磁石によって曲げられたのち、炭素標的に衝突し荷電粒子を生成する。荷電粒子は電磁ホーンによって収束させられ、崩壊トンネル中でニュートリノへと崩壊し、前置検出器群・スーパーカミオカンデへと飛んでいく。

2.3 T2K 前置検出器群

2.3.1 INGRID

INGRID はニュートリノビーム軸上に置かれた検出器である。合計 14 個のモジュールからなる大質量の検出器である。ニュートリノビームの軸中心がどの方向を向いているのかを毎日確認することができる。

2.3.2 オフアクシス検出器

オフアクシス検出器はニュートリノ生成点から下流 280 m に設置されており、ビーム軸からずれたスーパーカミオカンデ方向を向いている。その断面図を図 2.4 に示す。オフアクシス検出器は P0D、TPC、FGD、ECAL、SMRD の 5 つの検出器で構成される複合型検出器である。飛跡検出をメインに、運動量再構成、エネルギー再構成、粒子識別を行い、振動前のニュートリノのフラックスおよびエネルギーの測定を行う。測定結果を基にスーパーカミオカンデでのフラックスおよびエネルギースペクトルを予測する。

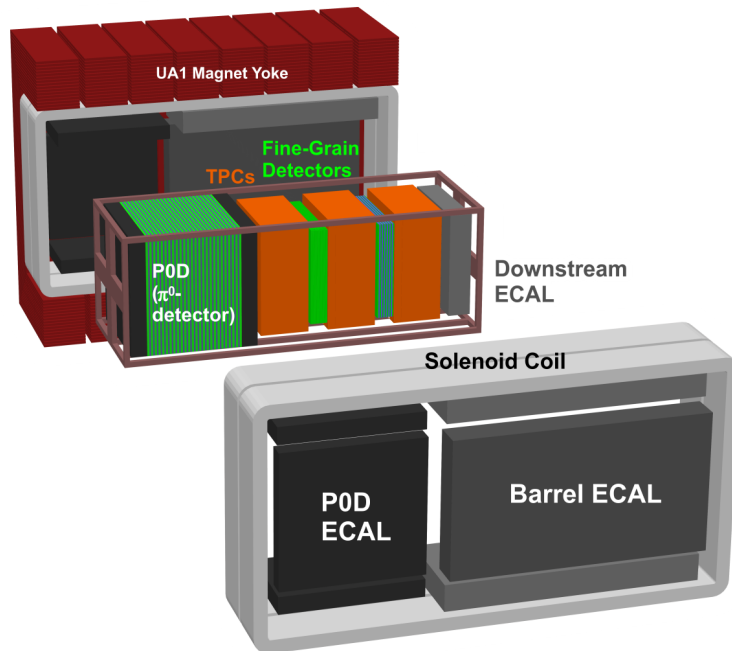


図 2.4: T2K オフアクシス検出器

2.4 後置検出器：スーパーカミオカンデ

T2K 実験ではスーパーカミオカンデを、ニュートリノ発生点から 295km の地点に置かれた後置検出器として使用する。

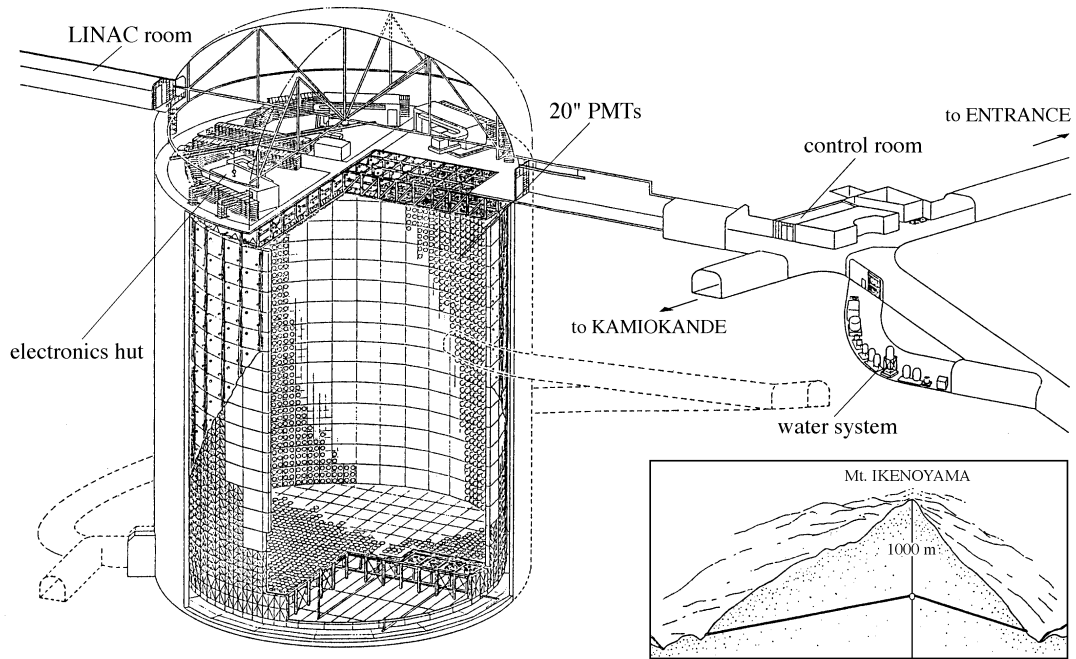
スーパーカミオカンデは、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山茂住坑内に、東京大学宇宙線研究所附属の観測装置として建設された、水チェレンコフ光検出器である。宇宙線起源のミュオンによるバックグラウンドを減らすため、池の山山頂の地下 1000m (2700m w.q.e) に建設された。実際に検出器付近での宇宙線ミュオンの強度は、地表での強度の約 10^{-5} となっており、スーパーカミオカンデにおける宇宙線ミュオン事象の頻度は 4Hz にまで抑えられている。

スーパーカミオカンデ検出器の全体図を図 2.5 に示す。スーパーカミオカンデ検出器の本体となるタンクは、直径 39.3m、高さ 41.4m の円筒形をしており、その中は総質量 5 万トンの超純水で満たされている。タンクの内部は光学的に内タンク（直径 33.8m、高さ 36.2m、有効体積 22.5 トン）と外タンクに分けられており、内タンクには直径 20 インチの光電子増倍管約 11200 本が内向きに、外タンクには直径 8 インチの光電子増倍管約 1900 本が外向きに、それぞれ取り付けられている。

内タンクは粒子検出の主となる部分であり、タンクの中もしくは外で起こった反応により生じた荷電粒子が、水中を通過する際に放出するチェレンコフ光を、内タンク壁面に並べられた光電子増倍管で検出し、その光量・到達時間・リングパターンなどから、粒子の種類・エネルギー・発生点・運動方向などを決定する。

外タンクは、岩盤からの γ 線や中性子によるバックグラウンド事象の除去および外部か

ら入射する粒子（主に宇宙線ミュオン）や外部に抜ける粒子の識別、のために利用されている。



SUPERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

NIKKEN SEKKEI

図 2.5: スーパーカミオカンデ

現在までにスーパーカミオカンデは、そのずば抜けた性能により、太陽ニュートリノ・大気ニュートリノなどの自然から来るニュートリノを観測し、ニュートリノの質量に関する多くの情報をもたらしている

第3章 小型水チェレンコフ検出器 Mizuche

3.1 Mizuche の概要

Mizuche 実験とは、J-PARC 加速器によって生成された直後のニュートリノビーム中のニュートリノの個数を、後置検出器であるスーパーカミオカンデと同じ水チェレンコフ光検出器で測定する実験である。

ニュートリノ振動測定の精密測定には、ニュートリノビームのフラックス、ニュートリノと反応標的の反応断面積、検出器の検出効率の不定性に起因する系統誤差を低く抑えることが必要となってくる。そこで、生成直後のニュートリノビームの性質を、前置検出器で測定し、スーパーカミオカンデに外挿することにより、これらの系統誤差を小さく抑えることができる。特に、スーパーカミオカンデと同じ測定原理・検出装置を持つ水チェレンコフ光検出器で測定することにより、これらの系統誤差を削減することができる。

実際に、過去の K2K 実験では 1 キロトンの水チェレンコフ光検出器を使用することで、系統誤差をキャンセルした測定に大きく貢献している。しかし、T2K 実験の場合は、ニュートリノビーム強度が K2K 実験よりも 2 桁強いため、ニュートリノ反応レートが大きくなり、1 キロトンもの大容積では、1 バンチ内で多数のニュートリノが反応してしまい、バンチ毎にイベントを区別して測定することが困難になってしまう。そこで、本実験では容積を 2.5 トンと小型化し、ニュートリノ反応数を数えることに特化した検出器の開発を行うことにした。

3.2 Mizuche の目的

本実験は後置検出器であるスーパーカミオカンデと同じタイプの水チェレンコフ検出器を用いて前置検出器部分でのニュートリノ反応数測定を行い、外挿することで、系統誤差を低く抑えたニュートリノ反応数予測を目指す実験である。それに向けて、本実験では次の 2 つを目標にしている。

1. 前置検出器部分で水チェレンコフ光検出器を用いたニュートリノ反応数測定
(目標精度 2%)
2. スーパーカミオカンデでのニュートリノ反応数予測の精度向上

第一目標として、前置検出器部分でのニュートリノ反応数測定の精度を 2%で行うことを目指すことを掲げている。まずここまでで、T2K 実験の大強度ニュートリノビームに対しても水チェレンコフ検出器が有効であることを実証する。次の目標としては、ここまでで得られた結果を元に、本検出器を T2K 前置検出器群と合わせて利用し、スーパーカミオカ

ンデでのニュートリノ反応数予測を行う。ここで、図 3.1 に本検出器とスーパーカミオカンデで予測されるニュートリノフラックスを示した。このように、ほぼ同じ形のフラックス、同じニュートリノ反応標的（水）、同じ検出原理（チェレンコフ光）を用いることで、最終的には、系統誤差を抑えた外挿を行うことにより、T2K 実験の測定感度の向上に貢献したいと考えている。

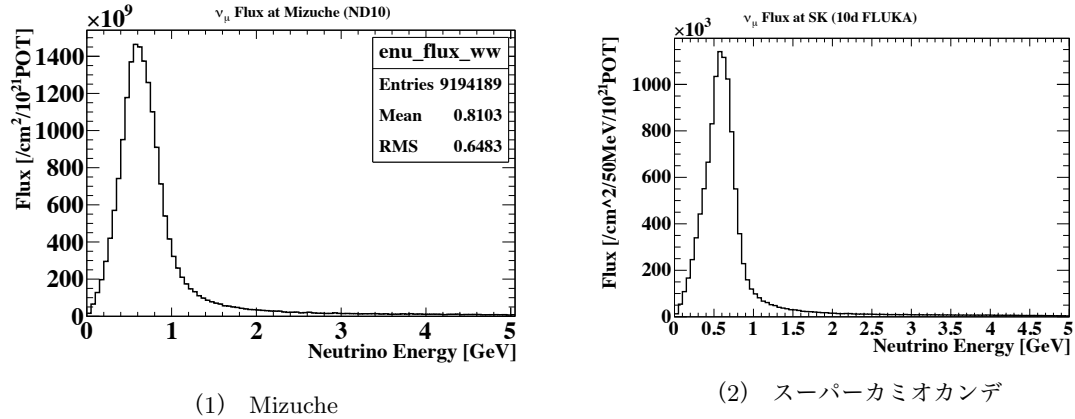


図 3.1: Mizuche とスーパーカミオカンデでのニュートリノフラックス

3.3 Mizuche の実験原理

本検出器は、水中を高速で走る荷電粒子が放出するチェレンコフ光をとらえることにより粒子を検出する、スーパーカミオカンデと同じ水チェレンコフ光検出器である。

ニュートリノが水中の水素原子核や酸素原子核と反応し荷電粒子が生成される。その時の荷電粒子（主にミューオン）が水中を進むことによって放出されるチェレンコフ光を、検出器の周りに配置した光電子増倍管で観測する。

本検出器は図 3.2 のような、外タンク（直径 1400 mm、長さ 1600 mm）の内側に、一回り小さな内タンク（直径 800 mm、長さ 1000 mm）を抱えた、2 層構造をしている。内タンクの容積約 0.5 m³ (= 500 kg) を有効体積（fiducial volume: FV）と定義する。

FV 内でのニュートリノ反応数は、(1) FV 内に水がある状態と、(2) FV 内に水がない状態の 2 状態で測定を行い、その残差から求める。この測定原理の詳細については後述する。

3.3.1 チェレンコフ放射

チェレンコフ放射とは、荷電粒子が媒質中を運動する時、その速度が媒質中の光速度よりも速い場合に光を放射する現象である。1934 年に P. A. チェレンコフによって発見されたことからその名が付いている。

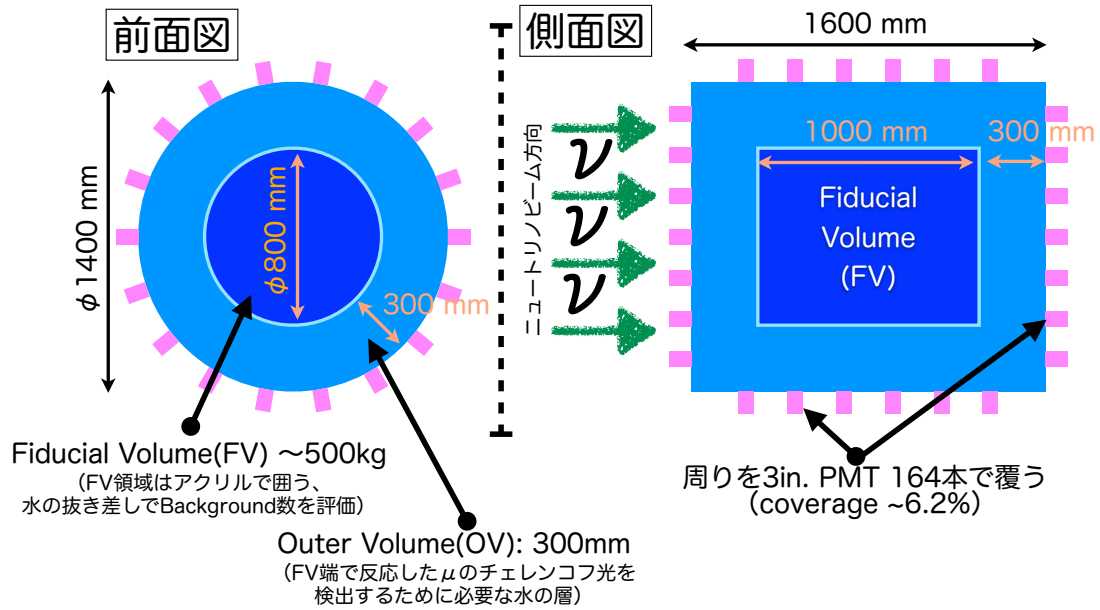


図 3.2: Mizuche 検出器の概念設計図。青：内タンク ($\phi 800$ mm \times 1000 mm)；水：外タンク ($\phi 1400$ mm \times 1600mm)；桃：3in. 光電子増倍管 \times 164本。FVの端でのニュートリノ反応によるチェレンコフ光を観測できるように、外タンクと内タンクの間には300mmの領域(Outer Volume: OV)を設定した。

チェレンコフ角とエネルギー閾値

媒質の屈折率を n 、荷電粒子の進行方向とチェレンコフ光の放出方向のなす角度を θ_c とすると、 θ_c は荷電粒子の速度 βc によって決まり、以下の関係が成り立つ。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n\beta} \quad (3.1)$$

チェレンコフ光は、荷電粒子の進行方向を軸とする円錐面に沿って放出される。荷電粒子のエネルギーが十分大きく、その速度が光速に近い速度 ($\beta = 1$) であるとき、チェレンコフ角 θ_c は最大となる。また、エネルギーが小さくなるにつれ、チェレンコフ角 θ_c は狭くなり、エネルギーが低すぎるとチェレンコフ光は放出されない。チェレンコフ光が放出される最低速度 β_t (threshold velocity) と、そのときのエネルギー閾値 E_t (energy threshold) は次式で表すことができる (式 (3.2)、式 (3.3))。

$$\beta_t = \frac{1}{n} \quad (3.2)$$

$$E_t = \frac{nm}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (3.3)$$

水の場合、屈折率 $n \sim 1.33$ なので、最大チェレンコフ角 $\theta_c \sim 42^\circ$ 、 $\beta_t \sim 0.75$ となる。また、表 3.1 に主な粒子別のエネルギーと運動量の閾値をまとめた。

表 3.1: 主な粒子の水に対するチェレンコフ光放出のエネルギー閾値 E_t と運動量閾値 p_t

	静止質量 m [MeV/c ²]	E_t [MeV]	p_t [MeV/c]
e [±]	0.511	0.775	0.583
μ [±]	105.7	160.3	120.5
π [±]	139.6	211.7	159.2
p ⁺	938.2	1423	1070

単位長さあたりに放出されるチェレンコフ光子数

荷電粒子の電荷が ze [C] であるとき、単位飛程、単位波長あたりに放出される光子数 N_{photon} は次のように表すことができる (式 (3.4))。

$$\frac{d^2 N_{\text{photon}}}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta_c \quad (3.4)$$

ここで、 λ はチェレンコフ光の波長、 $\alpha \simeq 1/137$ は微細構造定数である。これを波長で積分すると、次式が得られる (式 (3.5))。

$$\frac{dN_{\text{photon}}}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \sin^2 \theta_c \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right), (\lambda_1 < \lambda_2) \quad (3.5)$$

これまでの式から荷電粒子がエネルギーを失うに従って、チェレンコフ角 θ_c が小さくなると共に、チェレンコフ光の強度も減少していくことが分かる。

典型的な光電子増倍管で検出可能な波長は 300 nm ~ 650 nm である。この範囲を考慮すると、運動量 1 GeV/c の荷電粒子が単位長さ進むときに放出する光子数は $N_{\text{photon}}/dx \sim 823 \sin^2 \theta_c$ [photon/cm] 程度と見積もることができる。ミュオン、電子のそれぞれに対して、運動量とチェレンコフ角の関係と、荷電粒子が単位長さ進むあたりに放出されるチェレンコフ光子数の関係をそれぞれ図 3.3 と図 3.4 に図示した。

また、本検出器表面積の約 6% が光電子増倍管で覆われていることと、光電子増倍管の量子効率が約 20% であると仮定して、荷電粒子が単位長さ進んだときに期待される光量 (光電子数) を見積もったものを図 3.5 に図示する。これから 1 cm あたり 3 ~ 4 photon しか放出されないことが分かる。そのため、内タンク (FV) の外側に 300 cm のバッファ層 (OV) を設けることで、FV で生じた荷電粒子が、検出するのに十分な光量のチェレンコフ光を放射することを保証した。30 cm 進んだ際に検出できる光量を図 3.6 に示す。これらの検出器設計詳細については後述する。

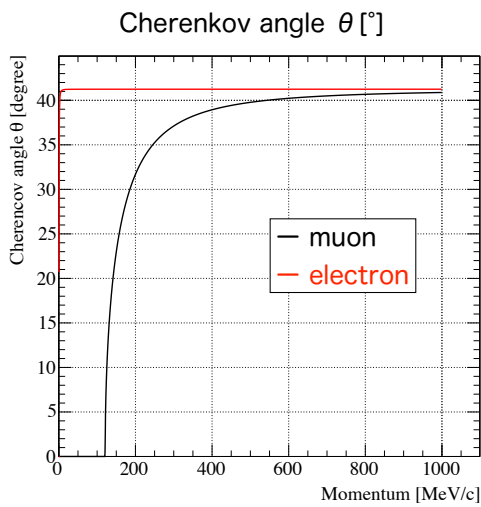


図 3.3: ミューオンと電子の運動量とチェレンコフ角の関係。黒線はミューオン、赤線は電子を表す。

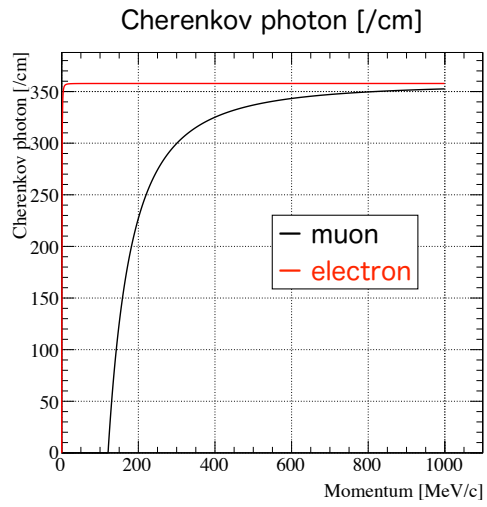


図 3.4: ミューオンと電子の運動量と単位飛程あたりに放出されるチェレンコフ光子数の関係。黒線はミューオン、赤線は電子を表す。

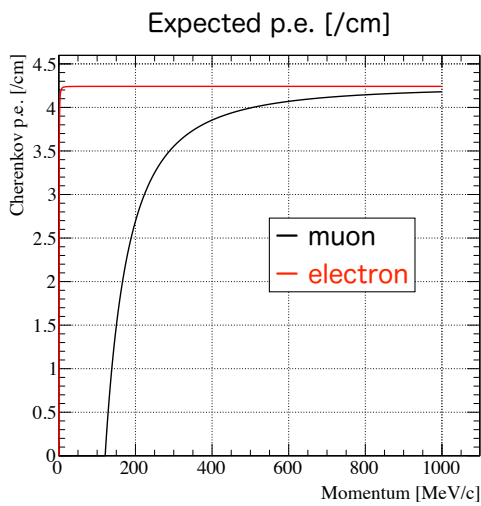


図 3.5: Mizuche で検出できる単位飛程あたり光電子数。光電被覆率 6.24%、量子効率 19%とした。黒線はミューオン、赤線は電子を表す。

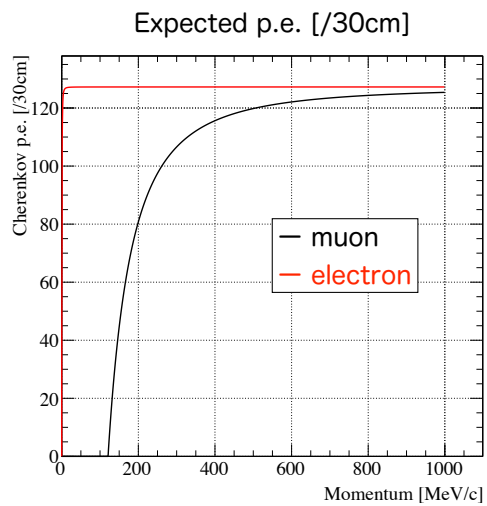


図 3.6: 荷電粒子が 300 mm 進むときに期待される光電子数。黒線はミューオン、赤線は電子を表す。

3.3.2 測定原理

前述したように、本検出器は、次の2状態で測定を行い、その残差を求める。

1. FV 内に水がある状態 (FV 水あり)
2. FV 内に水がない状態 (FV 水なし)

この測定原理について、図 3.7 を用いて詳しく説明する。上段の図は (1) FV 内に水がある状態での測定、下段の図は (2) FV 内に水がない状態での測定を表している。それぞれの場合でチェレンコフ光が発生する要因によって4つに場合分けして図示した。

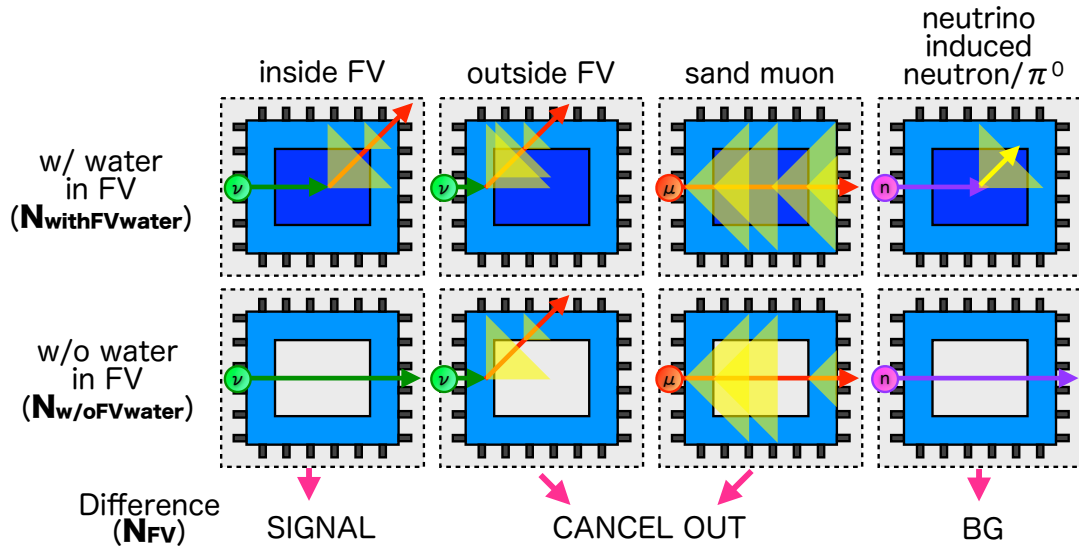


図 3.7: 測定原理の概略。上段：FV 水ありの測定、下段：FV 水なしの測定。チェレンコフ光が発生する要因によって4つに場合分けした。

1. FV 内で起こるニュートリノ反応 (左端の図)

本検出器のシグナルイベントである。FV 内でのニュートリノ反応は、FV 水ありの状態ではしか起こらないため、その残差は FV 内での反応数、すなわちシグナルイベントとなる。

2. FV 外で起こるニュートリノ反応 (左から2番目の図)

FV 外 (OV) でのニュートリノ反応は、FV 水あり、FV 水なしとも起こるため、両状態の検出効率が全く等しい場合、差をとれば反応数は相殺する。相殺しなかった場合は、バックグラウンドとなる。それぞれの場合で期待される検出効率については、第4章の検出器シミュレーションにて詳述する。

3. 砂ミュオンによるチェレンコフ放射 (左から3番目の図)

砂ミュオンが発生するチェレンコフ光によるイベントである。砂ミュオンとは、前置検出器ホールの壁とニュートリノが反応したことにより生じたミュオンのことである。このイベントはFV水あり、水なしでも起こるため、OVで起こるニュートリノ反応同様、差をとれば反応数は相殺する。相殺しなかった場合はバックグラウンドとなる。

4. 検出器外からの中性粒子による反応 (右端の図)

砂ミュオンの発生同様、前置検出器ホールの壁とニュートリノが反応したことによる中性粒子 (主に中性子) が、検出器内の水と反応し、荷電粒子を生成するイベントである。FV内でこの反応が生じた場合、差をとるとバックグラウンドとして残ることになる (OVで生じた反応は相殺する)。中性子による反応がどの程度起きるかは検出器シミュレーションにより見積もる。

3.4 簡単なニュートリノ反応数の見積もり

3.4.1 有効体積内でのニュートリノ反応頻度

T2K ニュートリノビームのデザイン強度で、FV内でのニュートリノ反応数を見積もった。ニュートリノビームのフラックスを Φ_ν 、反応断面積を σ_ν 、標的粒子数を n とすると、ニュートリノ反応数 N_ν は次の式で表すことができる。

$$N_\nu = \Phi_\nu \times \sigma_\nu \times n \quad (3.6)$$

陽子ビーム強度 750 kW の時のニュートリノフラックス $\Phi_\nu = 1.85 \times 10^6$ [/cm²/sec]、 $\sigma_\nu = 0.63 \times 10^{-38}$ [cm²/nucleon]、水 500 kg 中の核子数 $n = 3.01 \times 10^{29}$ [nucleon] より、 3.5×10^{-3} [events/sec] が期待されると見積もった。表 3.2 に計算に用いた条件をまとめた。

表 3.2: ニュートリノ反応数の見積もりに使用した条件

陽子ビームエネルギー	30	[GeV]
陽子ビーム強度	0.75	[MW]
ニュートリノビームフラックス	1.85×10^6	[/cm ² /sec]
ニュートリノエネルギー	0.7	[GeV]
水反応断面積	0.63×10^{-38}	[cm ² /nucleon]
FV 質量	0.5	[ton]
核子数	3.01×10^{29}	[nucleon]
ニュートリノ反応頻度	3.50×10^{-3}	[events/sec]

3.4.2 測定時間による統計誤差

限られたビームタイムの中で、FV内に水がある状態とない状態の2状態の測定を行わなければならない。そこで、それぞれの測定時間による統計誤差が最小となるよう、最適な水あり／水なしの測定時間の比を見積もった。

ニュートリノフラックスを Φ_ν 、反応断面積を σ_ν 、アボガドロ数を N_A とし、FV水ありの時の体積を V_1 ・測定時間を T_1 ・ニュートリノ反応数を N_1 、FV水なしでの体積を V_2 ・測定時間を T_2 ・ニュートリノ反応数を N_2 とすると、それぞれの状態でのニュートリノ反応数は次のようになる。

FV 水あり

$$N_1 = \sigma_\nu \Phi_\nu N_A V_1 T_1 \quad (3.7)$$

FV 水なし

$$N_2 = \sigma_\nu \Phi_\nu N_A V_2 T_2 \quad (3.8)$$

ここで、測定時間の比を $T_1 : T_2 = a : b$ とすると、FV内でのニュートリノ反応数は次のようになる（測定時間をFV水ありに合わせた）。

$$N_{\text{FV}} = N_1 - \frac{T_1}{T_2} N_2 = N_1 - \frac{a}{b} N_2 \quad (3.9)$$

N_1 、 N_2 はポアソン過程だと仮定すると、それぞれの統計誤差は次のようになる。

$$\sigma_{N_1} = \sqrt{N_1} \quad (3.10)$$

$$\sigma_{N_2} = \sqrt{N_2} \quad (3.11)$$

また、誤差の伝播式より、 N_{FV} の統計誤差は次のようになる。

$$\sigma_{N_{\text{FV}}} = \sqrt{\sigma_{N_1}^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 \sigma_{N_2}^2} \quad (3.12)$$

全体に対する統計誤差の割合を計算すると、

$$\frac{\sigma_{N_{\text{FV}}}}{N_{\text{FV}}} = \frac{\sqrt{\sigma_{N_1}^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 \sigma_{N_2}^2}}{N_1 - \frac{a}{b} N_2} \quad (3.13)$$

$$= \frac{\sqrt{N_1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 N_2}}{N_1 - \frac{a}{b} N_2} \quad (3.14)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{N_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{V_1}} \cdot \frac{\sqrt{V_1 + \frac{a}{b} V_2}}{V_1 - V_2} \quad (3.15)$$

$$(3.16)$$

ここで、 $\sqrt{V_1 + \frac{a}{b} V_2}$ が最小となる a 、 b を考える。

相加平均・相乗平均の定理より、

$$A + B \geq 2\sqrt{AB} \text{ (等号成立は } A = B \text{)} \quad (3.17)$$

$$V_1 + \frac{a}{b}V_2 \geq 2\sqrt{V_1 \frac{a}{b}V_2} \quad (3.18)$$

$$\text{等号成立は } V_1 = \frac{a}{b}V_2 \Rightarrow a : b = V_1 : V_2 \quad (3.19)$$

$$\text{(このとき } V_1 + \frac{a}{b}V_2 = 2V_1 \text{)} \quad (3.20)$$

したがって、

$$T_1 : T_2 = V_1 : V_2 \quad (3.21)$$

測定時間による統計誤差を最小にするためには、測定時間を測定状態の体積比に配分すれば良いことが分かった。

3.4.3 1年間で期待されるニュートリノ反応数

1年のビームタイムを100日と仮定し、前節のとおり測定時間を配分したときに期待されるニュートリノ反応数を見積もった。FV水ありの体積は2.5トン、FV水なしの体積は2.0トンであるので、測定時間はそれぞれ56日と44日になる。ビーム強度を100 kW (750 kW) と仮定したときのイベント数を表3.3にまとめた。FV内でのニュートリノ反応は1日あたり41 (304) イベントが期待できる。

表 3.3: 期待されるニュートリノ反応数

測定状態	測定日数 [days]	ニュートリノ反応頻度 [events/day]	ニュートリノ反応数 [events]
FV 水あり	56	199 (1490)	11,065 (82,985)
FV 水なし	44	158 (1186)	7,009 (52,570)
FV 内		41 (304)	

測定日数100日で計算、()内は750kWの時

第4章 GEANT4による検出器シミュレーション

4.1 目的・目標

本実験では検出器の有効体積 (FV) 内での反応数 $N_{\text{FV}}^{\text{obs}}$ は式 (4.1) のように、FV 水ありの状態での測定数 $N_{(\text{w}/\text{FVwater})}^{\text{obs}}$ と、FV 水なしの状態での測定数 $N_{(\text{w}/\text{oFVwater})}^{\text{obs}}$ の残差を求めることで算出する。

$$N_{\text{FV}}^{\text{obs}} = N_{(\text{w}/\text{FVwater})}^{\text{obs}} - N_{(\text{w}/\text{oFVwater})}^{\text{obs}} \quad (4.1)$$

ここで、 $N_{(\text{w}/\text{FVwater})}^{\text{obs}}$ 、 $N_{(\text{w}/\text{oFVwater})}^{\text{obs}}$ は、実際には以下のように、FV 内での反応検出数と、FV 外 (OV) での反応検出数からなる。

$$N_{(\text{w}/\text{FVwater})}^{\text{obs}} = N_{\text{FV}} \times \epsilon_{\text{FV}} + N_{\text{OV}} \times \epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w}/\text{FVwater})} \quad (4.2)$$

$$N_{(\text{w}/\text{oFVwater})}^{\text{obs}} = N_{\text{OV}} \times \epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w}/\text{oFVwater})} \quad (4.3)$$

水あり／なしの残差でニュートリノ反応数を求める場合、式 (4.2)、式 (4.3) において、水ありの場合の検出効率 $\epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w}/\text{FVwater})}$ と、水なしの場合の検出効率 $\epsilon_{\text{OV}}^{(\text{w}/\text{oFVwater})}$ は一致している必要がある。一致していない場合は、残差を求めても OV でのニュートリノ反応数がうまく打ち消し合わず、バックグラウンドとして残ることになる。

そこで、ニュートリノ反応に対する本検出器の検出効率をモンテカルロシミュレーション (MC) によって見積もった。

4.2 検出器シミュレーションの概要

図 4.1 にニュートリノ反応に対する Mizche 検出器の検出器シミュレーションの概略を示す。今回行ったシミュレーションは次の3つのステップからなる。

1. ニュートリノフラックスの作成

T2K 実験で使用されているビームラインシミュレーション JNUBEAM を使用して、本検出器の設置場所での予測ニュートリノフラックスを作成した。

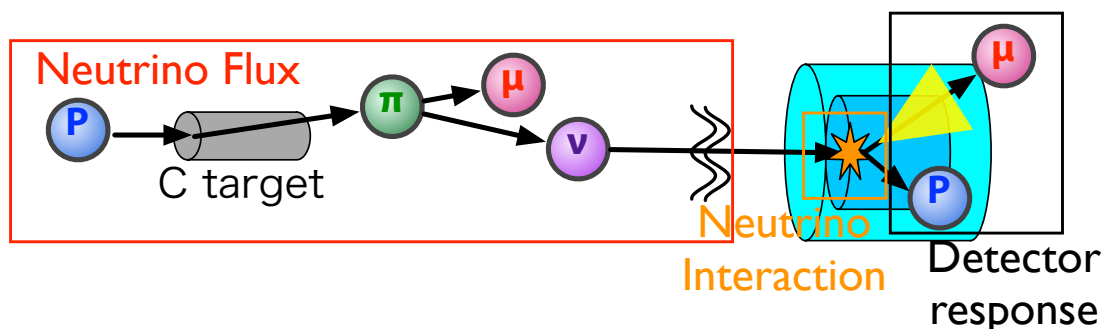


図 4.1: 検出器シミュレーションの概略

2. ニュートリノ反応の生成

JNUBEAM で作成したフラックスを元に、T2K 実験やスーパーカミオカンデで使用されているニュートリノ反応シミュレーション NEUT を使用して、水とニュートリノの反応をシミュレートさせた。

3. 検出器内での反応

GEANT4 空間内に検出器を再現し、ニュートリノ反応によって生成された粒子の水中での運動や、物理プロセス（主にチェレンコフ放射）をシミュレートさせた。また、生成したニュートリノ反応を全てのモードについて GEANT4 でシミュレートさせた。

4.3 検出器シミュレーションのモデル

4.3.1 検出器のジオメトリ

図 4.2 のように GEANT4 内に検出器をモデル化した。図 3.2 と同じように、外タンクは直径 1400 mm × 長さ 1600 mm、FV の材質にはアクリルを定義し、直径 800 mm × 長さ 1000 mm × 厚さ 5 mm（ただし、フタ部分は厚さ 8 mm）となっている。光電子増倍管 164 本も実機と全く同じになるよう配置した。外タンクと FV の間の媒質には水を定義した。FV 内の媒質は水および空気を定義することで、FV 水あり／なしの状態を再現した。

4.3.2 物理プロセス

チェレンコフ光の伝播

チェレンコフ光の伝播は以下の条件で行った。

- 外タンク内壁で光は反射しない¹ように設定

¹検出器の外タンク内壁は（マットな）黒色に塗装

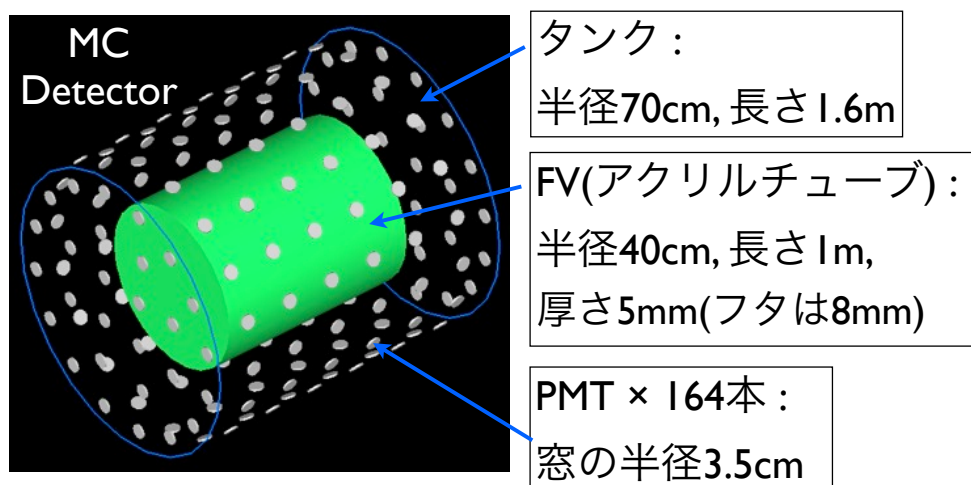


図 4.2: MC 内での検出器のジオメトリ。

- アクリルの表面は滑らかであると仮定し、理想的な反射・屈折を行うように設定
- アクリル・水の屈折率は表 4.1 のように設定
 - － 水の屈折率はなるべく現実に即した値に設定（波長に依存）
 - － 一般的なアクリルの屈折率を設定（定数値）
- 水中での光子の吸収率は波長に応じて変化するように設定

表 4.1: GEANT4 で設定した水とアクリルの屈折率

媒質	屈折率	
水	1.34~1.36	光の波長に依存して変化
アクリル	1.49	一定値

光電子増倍管の量子効率

図 4.3 に光電面の量子効率を示す。これは浜松ホトニクスの手ブックから値を読み取り反映させた（図 5.7）。MC の中では横軸を波長からエネルギーに変換したテーブルを作成し、それを使用した。

4.3.3 典型的なイベントディスプレイ

FV に水あり／なしの状態でのニュートリノ反応のイベントディスプレイを図 4.4 に示す。入射エネルギー $E_\nu = 0.56$ GeV のニュートリノが、OV で反応し、ミューオン（運動

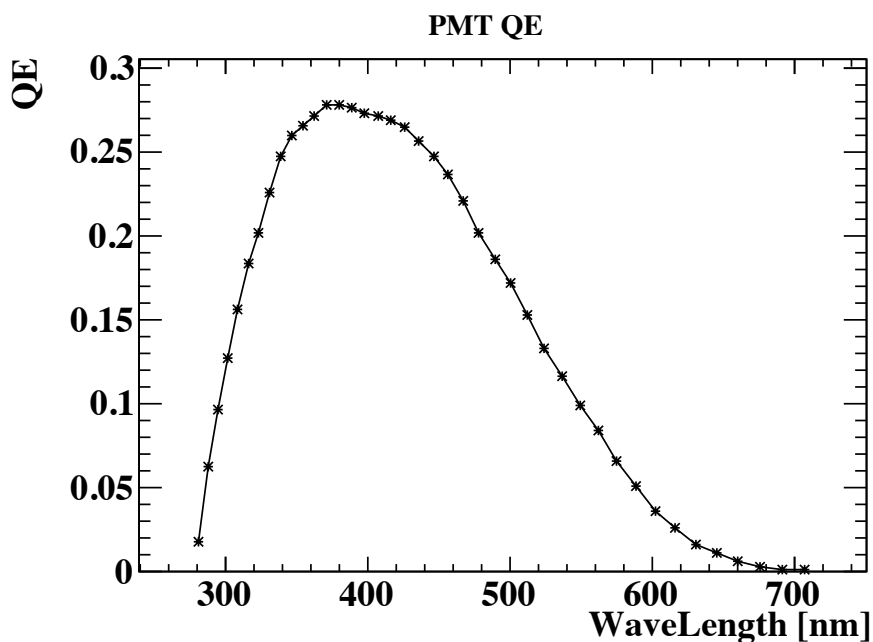


図 4.3: MCで定義した量子効率。浜松ホトニクス・ホトマルハンドブックの値を読み取った。

量 ~ 510 MeV/c) が生成し、検出器内を通過した。このミューオンによって期待されるチェレンコフ光量はそれぞれの状態で、860 p.e. と 273 p.e. であった。

4.4 シグナルイベントのシミュレーション

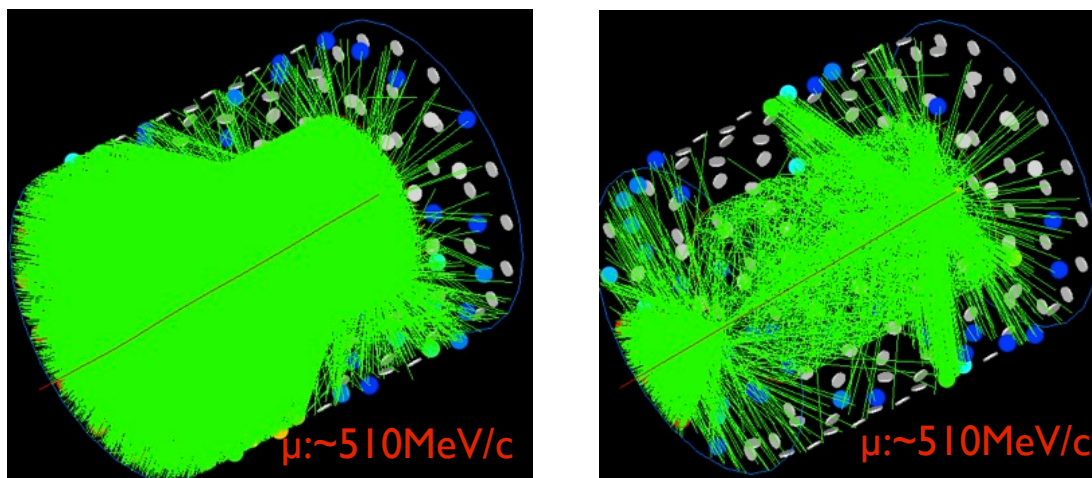
4.4.1 ニュートリノビームフラックス

本検出器の設置場所を図 4.5 に示す。本検出器は前置検出器ホール地下 2 階（地下約 40 m）の、ニュートリノビーム軸から約 19 m 離れた位置に設置する。この場所でオフアキシス角は約 2 度程度になる。これはオフアキシス検出器とほぼ同じオフアキシス角である。

この場所で予想されるニュートリノビームフラックスを図 4.6 (1) に示す。また、スーパーカミオカンデで位置でのニュートリノフラックスを図 4.6 (2) に示す。どちらのフラックスも 0.6 GeV 付近にピークがあり、幅も狭く、非常によく似ていることが分かる。

4.4.2 ニュートリノ反応エネルギー分布

図 4.7 に Mizuche 検出器内で反応したニュートリノの反応モードとそのエネルギー分布を示す。色の違いは反応モードの違いを表し、赤網掛け線は荷電カレント反応、青網掛け線は中性カレント反応の場合を示す。



(1) FV 水あり状態のイベントディスプレイ。入射ニュートリノエネルギー $E_\nu=0.56$ GeV、生成したミュオンの運動量 $p_\mu=510$ MeV/c、光電子増倍管に入射した全光電子数 860 p.e.

(2) FV 水なし状態のイベントディスプレイ。入射ニュートリノエネルギー $E_\nu=0.56$ GeV、生成したミュオンの運動量 $p_\mu=510$ MeV/c、光電子増倍管に入射した全光電子数 273 p.e.

図 4.4: ニュートリノ反応のイベントディスプレイ

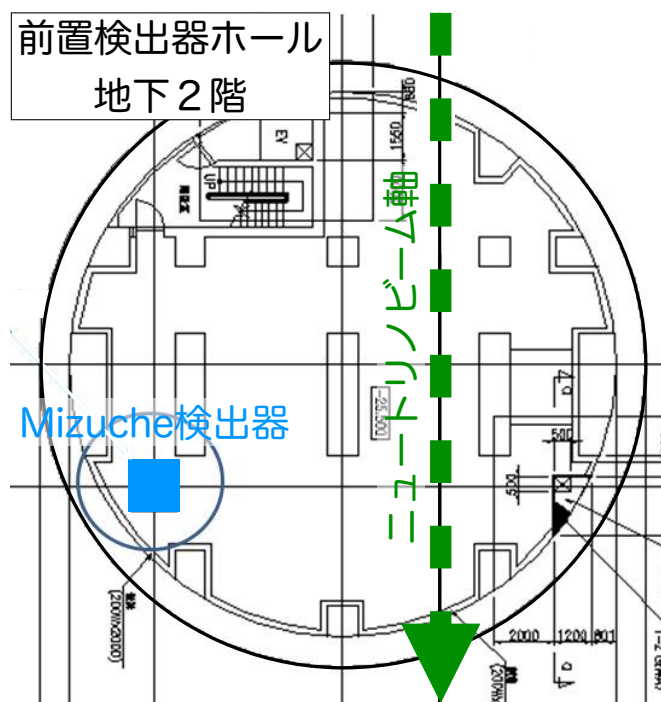


図 4.5: Mizuche の設置場所。緑矢印：ニュートリノビーム軸；青四角：本検出器設置位置、オフアクシス角約2度を確保

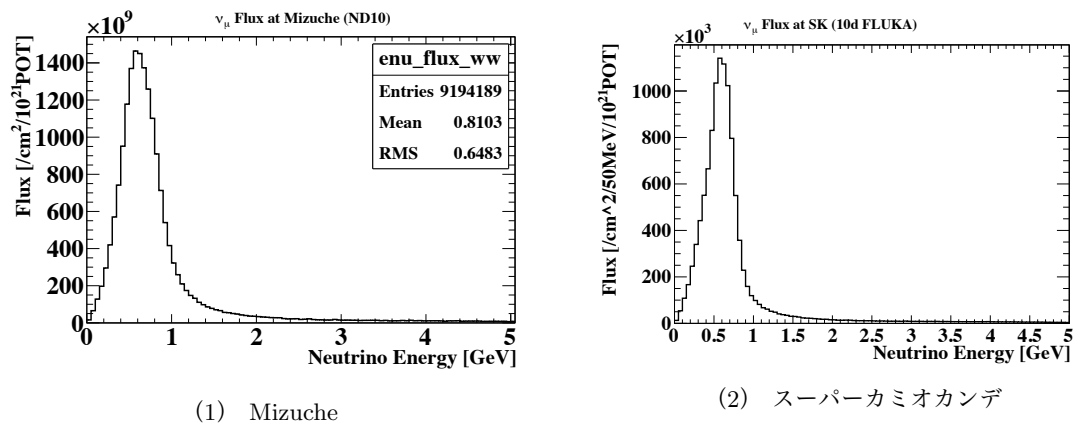


図 4.6: Mizuche とスーパーカミオカンデでのニュートリノフラックス

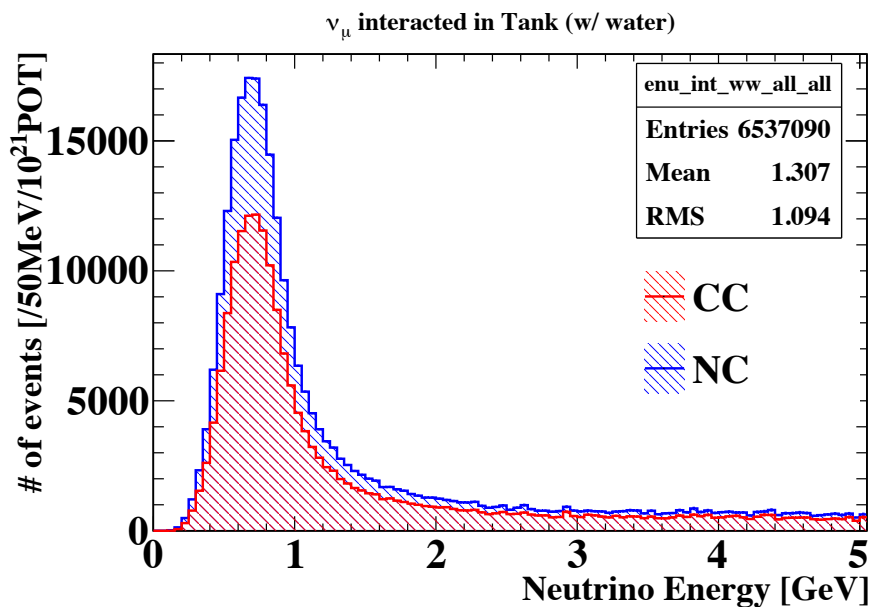


図 4.7: Mizuche 検出器内で反応するニュートリノのエネルギー分布。赤線：荷電カレント (CC) 反応、青線：中性カレント (NC) 反応を表す。

4.4.3 ニュートリノ反応に対する総光量分布

タンク内でのニュートリノ反応に対して予測される総光量分布を示す。総光量とは、ヒットがあった光電子増倍管で測定した光量の和 (total p.e.) を意味する。今回のスタディでは、一つの光電子増倍管で2 p.e. 以上の光量を測定できた場合に、その光電子増倍管にヒットがあったと判断するように設定した (i.e. ヒット閾値 (hit threshold) = 2 p.e.)。FV 水あり、水なしの2状態でシミュレーションしたときに検出される全光電子数分布を図4.8に示す。

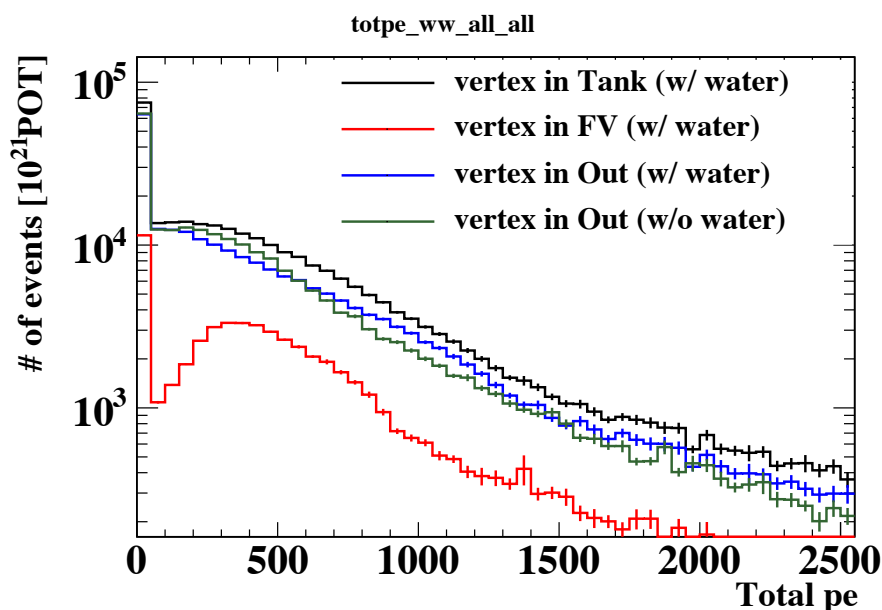


図 4.8: 予想される全光電子数分布。黒と緑が測定可能な分布である。線の色の違いについては本文を参照。

図 4.8 の線の色の違いは以下の通りである。

- 黒**： FV 水ありの状態、検出器全体 (FV + OV) に反応点があるイベント
- 緑**： FV 水なしの状態、検出器全体 (i.e. OV のみ) に反応点があるイベント
- 赤**： FV 水ありの状態、FV に反応点があるイベント
- 青**： FV 水ありの状態、OV に反応点があるイベント

これらのうち、測定可能な分布は黒と緑の2種類であり、黒は赤+青である。

赤の分布において0付近にピークが見られるが、これは中性カレント反応で荷電粒子が全く出ない場合や、荷電カレント反応で荷電粒子が生成されてもチェレンコフ光を出すエネルギーがない場合²の光量である。また、緑と青を比べてみると、200 p.e. 以下の低光量側で良く一致しているのが分かる。

²表 3.3 主な粒子のエネルギー閾値

4.4.4 ニュートリノ反応の種類による検出効率の違い

検出効率の定義

実際の測定では光電子増倍管のノイズによる偶発的なイベントが起こりうる。そのようなバックグラウンドイベントを落としてニュートリノ反応によるシグナルイベントのみを数えるために、得られた総光量に対してある光量以上のイベントを選択する「光量カット (p.e. cut)」を行った。しかし、光量カットを掛けることで、シグナルイベントの一部も落ちてしまう。このとき、どの程度のシグナルイベントが残るのか、その検出効率を見積もった。

検出効率は次のように定義した。

$$\text{検出効率} = \frac{\text{光量カット後に残るイベント数}}{\text{ニュートリノ反応数}} \quad (4.4)$$

図 4.9 は、横軸が光量カットをかけた全光電子数の値 (threshold p.e.) に対し、縦軸に検出効率をプロットしたものである。50 p.e.~200 p.e. の範囲で光量カットをかければ、OV で反応するニュートリノに対する検出効率は、FV 水ありの場合 ($\epsilon_{OV}^{(w/FVwater)}$) でも、水なしの場合 ($\epsilon_{OV}^{(w/oFVwater)}$) でもほぼ同じであることがわかる。

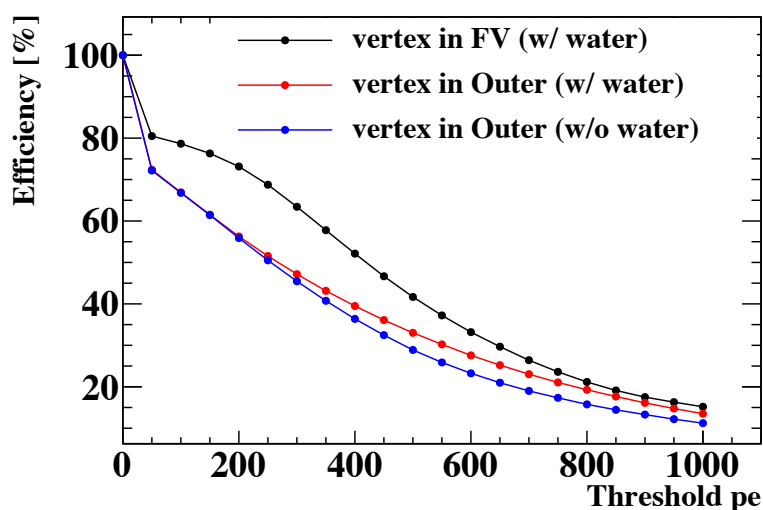


図 4.9: 光量カットの閾値と検出効率の関係。横軸は光量カット閾値 (threshold p.e.)、縦軸はニュートリノ反応に対する検出効率を表す。50 p.e.~200 p.e. の範囲では赤線 (水あり OV) と青線 (水なし OV) がほぼ一致している。

FV 外の水の層は 30cm であり、600~800 MeV/c のミューオンがその領域を通過した場合に観測される総光量は ~150 p.e. であることが手計算から見積もれる。以下では、150 p.e. で光量カットをかけた場合に測定できるニュートリノのエネルギー分布と検出効率について述べる。

光量カット後のニュートリノエネルギー分布

図4.10は150 p.e.で光量カットをかけた場合のニュートリノエネルギー分布を示す。

黒色の分布が実験で測定可能なニュートリノエネルギー分布であり、FV水あり／なしのそれぞれの場合で、検出器全体で反応したニュートリノに対し光量カットをかけた後、水ありの場合のエネルギー分布から水なしの場合のエネルギー分布の差を求めたものである。

一方、赤色は測定したいニュートリノのエネルギー分布であり、FV水ありの場合に、FVのみで反応したしたニュートリノに対して光量カットをかけたときのエネルギー分布である。

図4.10のように黒色と赤色の分布がよく一致していることから、水あり／なしの測定数の差を求めることにより、FVで反応したニュートリノと同じエネルギー分布のニュートリノの数を測定出来ることが分かる。また、このときに測定できるニュートリノエネルギー分布のピークは約750 MeVである。

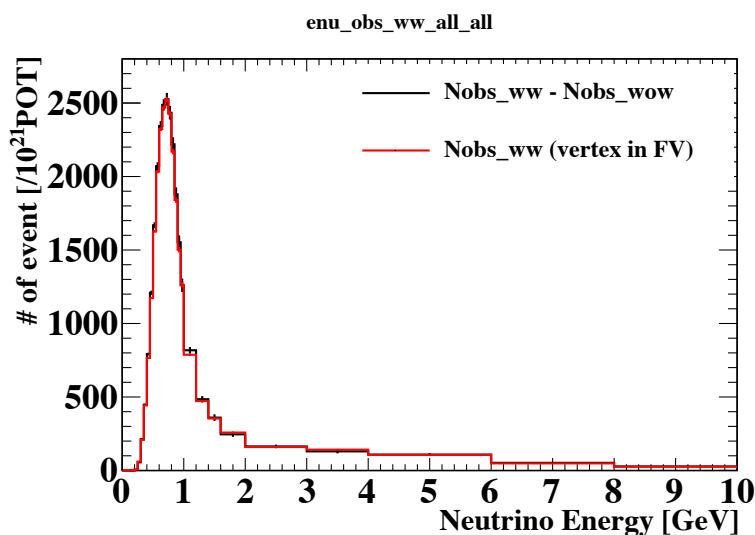


図 4.10: 光量カット後のニュートリノエネルギー分布。150 p.e. 以上で光量カットをかけた。線の色の違いに関しては本文参照。全エネルギー領域で黒と赤が良く一致していることが分かる。

FV 内でのニュートリノ反応に対する検出効率

FV 内で反応したニュートリノの検出効率を図4.11に示す。線の色の違いは反応モードの違いを表す。黒線は全ニュートリノ反応に対する検出効率、赤線は荷電カレント反応のみに対する検出効率を表す。荷電カレントに対しては200 MeV付近から検出効率が急激に立ち上がり、700 MeV以上では90%以上の高い検出効率が期待される。

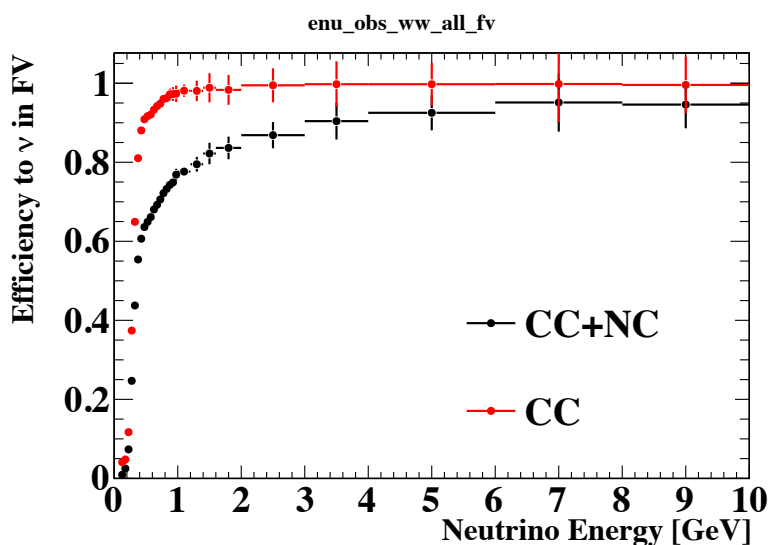


図 4.11: FV 内での検出効率。黒色：全ニュートリノ反応に対する検出効率、赤色：荷電カレント反応に対する検出効率を表す。

FV 外 (OV 内) でのニュートリノ反応に対する検出効率

FV 外 (OV 内) でのニュートリノ反応に対する検出効率を、FV 水あり／水なしの場合について見積もったものを図 4.12 に示す。全エネルギー領域において、FV 水ありの場合と、水なしの場合の検出効率が MC の統計誤差の範囲内で一致していることが分かる。

このことから、外部からのバックグラウンドがないと仮定すると、実験原理の通り、FV 水あり・水なしで測定した数の差をとることで、FV 内でのニュートリノ反応のみを数えることが期待できる。

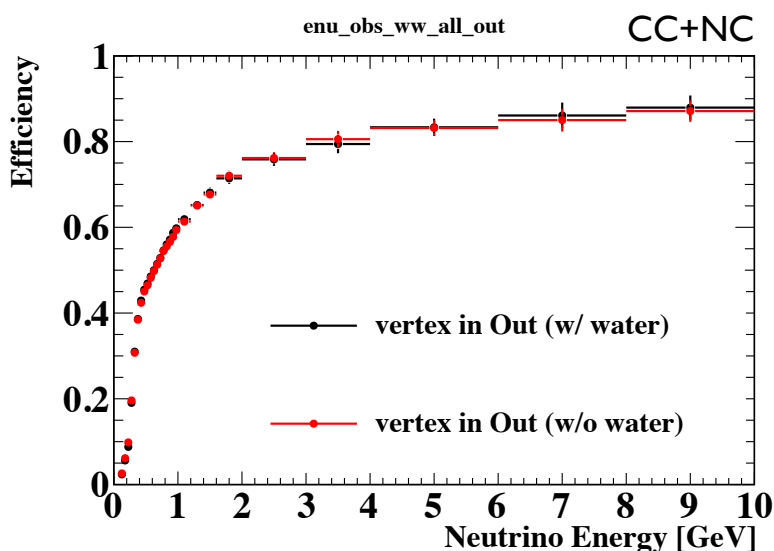


図 4.12: FV 外での検出効率。黒色：FV 水あり、赤色：FV 水なしの状態を表す。

4.4.5 シグナルに対するOV混入イベントの割合

OVで反応したニュートリノイベントで、水の抜き差しでも残ってしまうイベント（＝OV混入イベント）が、FV内で反応したニュートリノイベント（＝シグナル）に対して、どの程度存在するかを見積もった。

シグナル (S) に対するOV混入イベント (N) の割合を次の式で定義した。

$$N/S = \frac{N_{OV}^{(w/FVwater)} \text{ (after p.e. cut)} - N_{OV}^{(w/oFVwater)} \text{ (after p.e. cut)}}{N_{FV}^{(w/FVwater)} \text{ (after p.e. cut)}} \quad (4.5)$$

図 4.13 は各光量カットの閾値に対する N/S を表す。光量カット閾値 <200 p.e. の場合、OV混入イベントはシグナルに対して小さいことがわかる。

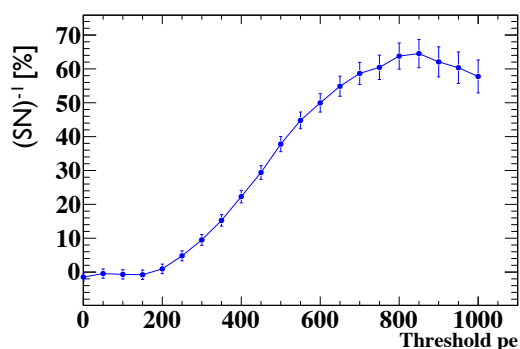


図 4.13: N/S と光量カット閾値

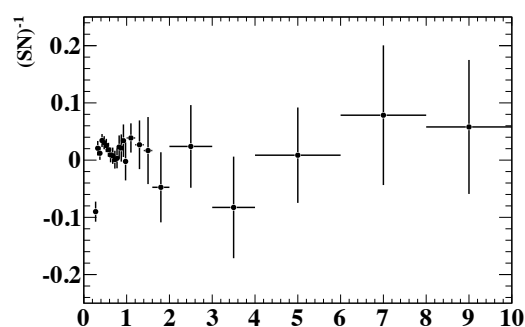


図 4.14: N/S とニュートリノエネルギー

図 4.14 は光量カット >150 p.e. をかけた場合の N/S のニュートリノエネルギー依存性を表す。このプロットより、測定出来るエネルギーの分布のピーク付近では N/S が約 3% と OV混入イベントに対しては低いバックグラウンド環境下での測定が期待できる。

4.4.6 シグナルイベントシミュレーションのまとめ

本章で述べてきた検出器シミュレーションの結果より、p.e. threshold = 150 p.e. での光量カットを行えば、OVで反応したニュートリノに対する検出効率はFV水あり／なしで等しくなることが分かった。

これにより、FV水あり／なしの残差からFV内のニュートリノ反応数を計数するという測定原理が有効であることが分かった。さらに、シグナルに対するOV混入イベントの割合3%と非常に高いS/N比での測定が期待できることが分かった。

第5章 Mizuche 検出器の設計

5.1 検出器の構成

Mizuche 検出器全体を図 5.1 に示す。外タンクの胴体およびフタはステンレスで、それを支える架台は鉄で作製した。胴体およびフタには合計 164 本の光電子増倍管がほぼ等間隔に配置されている。本検出器は 2 層構造になっており、内部には紫外光が透過可能な UVT アクリル¹で作製した内タンクが入っている。

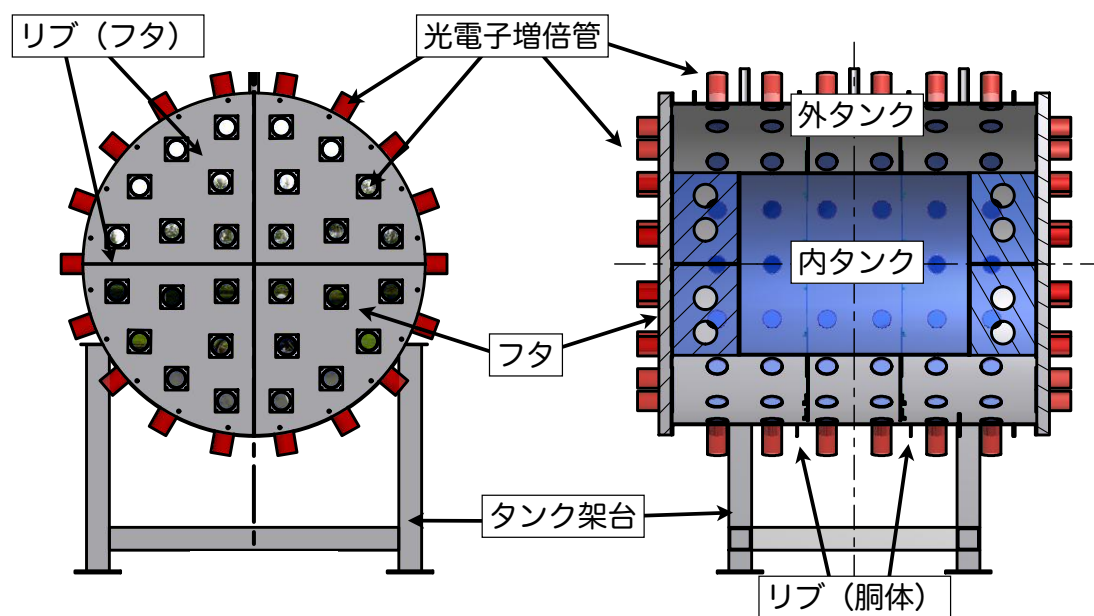


図 5.1: Mizuche 検出器全体図。(左) 正面図。胴体およびフタはステンレス製、架台は鉄製。164 本の光電子増倍管をほぼ等間隔に配置。(右) 側面断面図。検出器内部は 2 層構造。内タンクは UVT アクリル製。

¹UVT : UltraViolet Transparent; 紫外線吸収剤を含まないため、紫外光が透過可能なアクリル

5.1.1 外タンク

胴体部分

図 5.2 に外タンク胴体部分の図面を示す。胴体はステンレス SUS304 で作製した。円筒の大きさは直径 1400mm、長さ 1600mm、厚さ 5mm である。両端には幅 50mm、厚さ 9mm のフランジを取り付けた²。胴体下部には幅 50mm、厚さ 4.5mm のリブ（鉄）を 2 箇所取り付けた（図 5.1 参照）。

タンク上部に 2 つ、下部に 2 つ外タンクと内タンクの水を常時循環させるのに必要な配管口を取り付けた。上部にはさらに 2 つ空気穴を用意した。またタンク上部に 3 つのキャリブレーションポートを取り付けた。このポートはタンク内に LED 光源をいれて、本検出器のキャリブレーションに使用する予定である。

円筒の壁には光電子増倍管を取り付けるための窓を、円周方向に 18 個、長さ方向に 6 個の合計 108 個空けた。先に述べたようにタンク上部と下部には配管口などを取り付けたため、窓は鉛直方向に対して 10 度傾けて取り付けた。

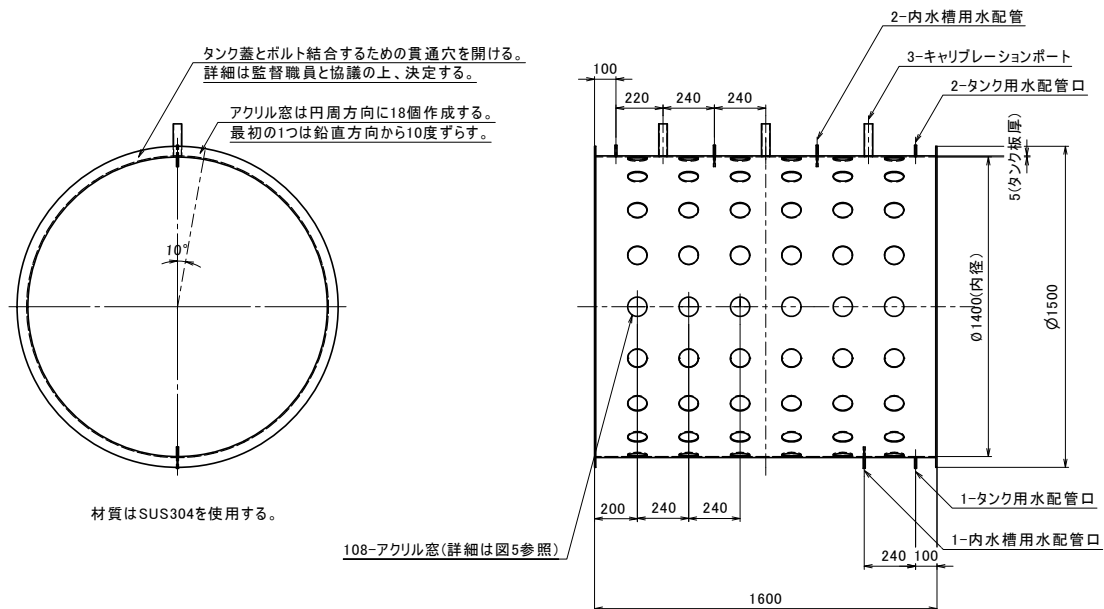


図 5.2: 外タンク胴体部分の図面。円筒部、フランジはステンレスで作製。リブは鉄で作製。光電子増倍管取り付け用窓 108 個。水循環、キャリブレーション用の配管も用意。

フタ部分

図 5.3 にフタ部分の図面を示す。フタはステンレスで作製した。直径 1500mm、厚さ 6mm のステンレスの円板に、光電子増倍管を取り付けるための窓を 28 個空けた。また厚

²最初は厚さ 6mm で設計したが、作製段階で 9mm に変更した

さ 4.5mm、幅 50mm、長さ 1500mm の鉄板を十字に取り付けて補強した³。鉄は SS400 を使用した。

水漏れを防ぐため、胴体とフタの間には板ゴムを挟み、ボルトで 36 箇所固定する。必要な箇所には板ナットを使用して、できるだけ均等な力で固定できるようにする。

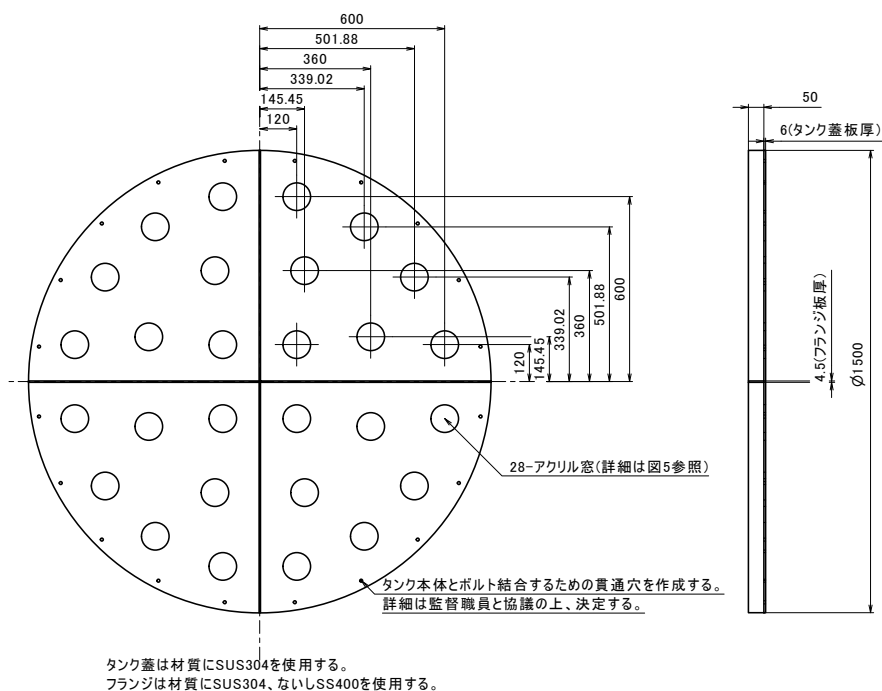


図 5.3: 外タンクフタ部分の図面。ステンレス製。リブを十字に取り付けて補強。光電子増倍管取り付け用窓 28 個。

タンク架台

図 5.4 にタンク架台部分の図面を示す。胴体部分と架台は溶接した。タンク架台は鉄で作製した。鉄は SS400 を使用し、防錆剤を塗布した。

検出器の移動を容易にするために、架台底面には 8 個のボールベアリング⁴を取り付けた。測定中はアンカーボルトで固定できるようになっている。

³鉄の板の端には穴があいており、フタを取り外すときなどに、アイボルトとして使えるようになっている

⁴オリメック社製キャリセット CS-6 (ロングボルト仕様)

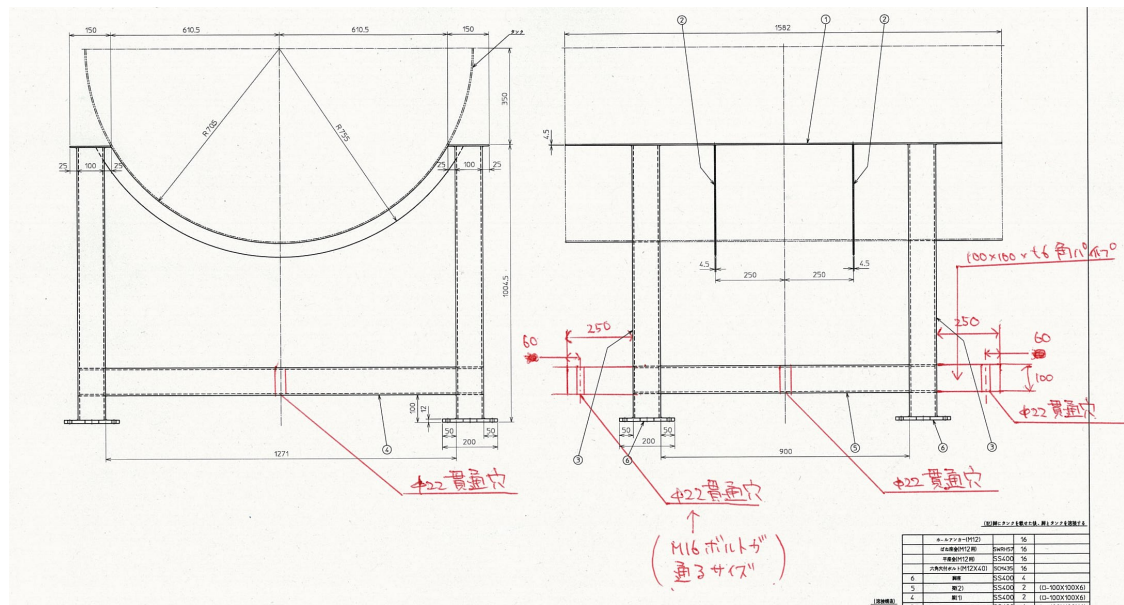


図 5.4: 外タンク架台部分の図面。鉄製

5.1.2 内タンク

内タンクの形状を 5.5 に示す。

内タンクの材質には全て UVT アクリルを使用した。内タンクの FV 部分は外径 800mm、長さ 1000mm、厚さ 5mm である。FV には上部に 2 つ、下部に 1 つ、水を循環させるための配管口を取り付けた（上部 1 つは空気穴用）。これらは外タンクの配管口と透明なホースで接続する。

フタ部分は直径 800mm、厚さ 8mm のアクリル円板を使用し、長さ 800mm、幅 287mm、厚さ 8mm のリブを十字に取り付けた⁵。FV の胴回りにハネのような形状のサポートを 2 セット取り付けた。ハネの大きさは半径 400mm、幅 300mm、厚さ 5mm である。4 分割して溶着してある。

⁵リブは当初 5mm で設計していたが、材料の在庫と納期の都合で厚さ 8mm に変更した

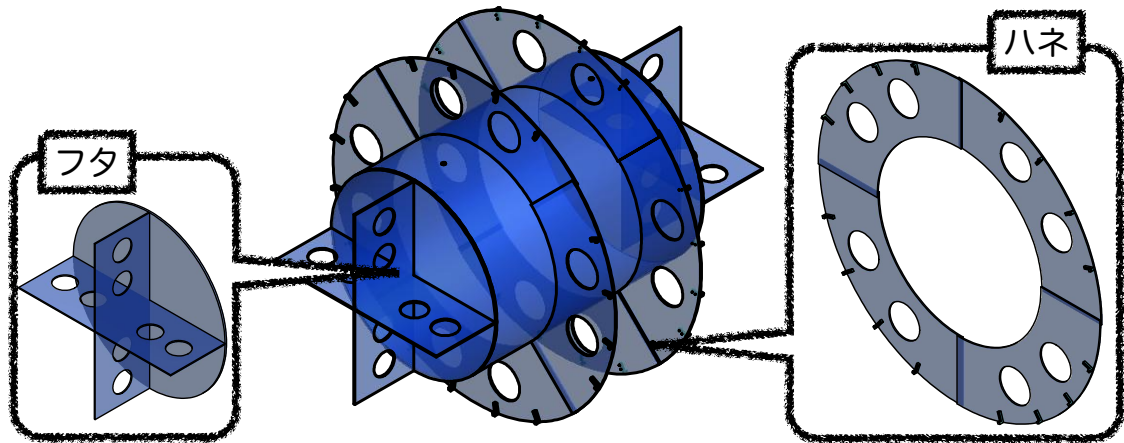
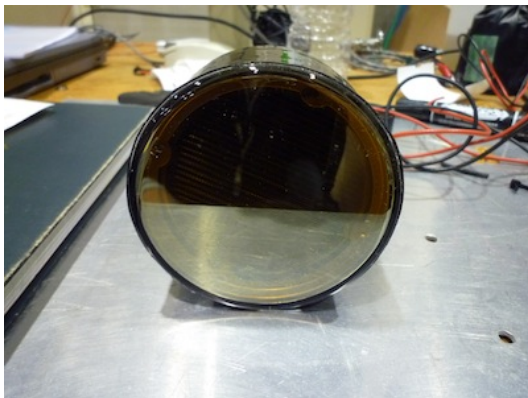


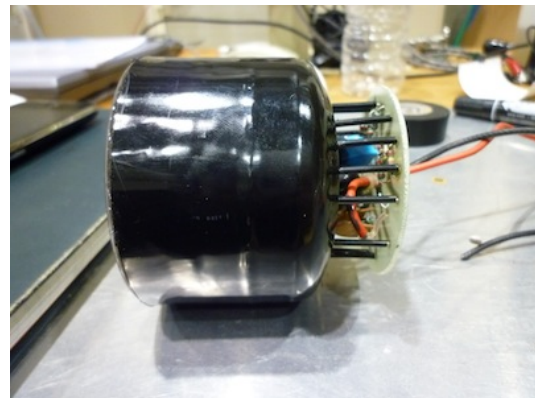
図 5.5: 内タンク形状

5.1.3 光電子増倍管

チェレンコフ光を検出する光電子増倍管には浜松ホトニクス社製 R1652-01ASSY を使用する。R1652-01ASSY の外観を図 5.6 に示す。この光電子増倍管は過去に TRISTAN の TOPAZ 実験や、K2K 実験の鉛ガラス検出器で使用されていたものの再利用である。



(1) 光電面：直径約 80 mm (有効径 70 mm)



(2) 側面：全長約 60 mm

図 5.6: R1652-01ASSY

光電面にバイアルカリとコパールガラスを使用している透過型光電子増倍管で、その有効受光面積は約 70mm である。300nm~650nm の波長に対して感度⁶があり、チェレンコフ光の波長ピークと同じ 420nm 周辺に感度のピークを持っている。ダイノードはファインメッシュとベネチアンブラインドを組み合わせた形をしており、印加電圧 1100 V での典型的な電流増幅率は 2×10^5 程度である。これら一般特性を表 5.1 にまとめた。

本検出器ではこの光電子増倍管は合計 164 本使用する。検出器表面積に対する光電面の被覆率は 6.2% である。検出効率の一様性を考慮して、光電子増倍管は約 23cm の一定間

⁶光電子増倍管の一般的な分光感度特性を図 5.7 に示す

表 5.1: R1652-01ASSY の一般特性

光電面窓材	コパールガラス
光電面材質	バイアルカリ
分光感度特性	300nm - 650nm
(ピーク)	(420nm)
有効径	φ70mm
量子効率	19%
ダイノード形状	ファインメッシュ + ベネチアンブラインド
ダイノード材質	バイアルカリ
ダイノード段数	10
電流増幅率	2×10^5 (印加電圧 1100V)

隔で取り付けた。光電子増倍管の取り付け方法については次に述べる。

また今回使用する全ての光電子増倍管に対して、それぞれの電流増幅率曲線、相対的な量子効率の測定を行った。その測定方法・結果については第6章で詳しく述べる。

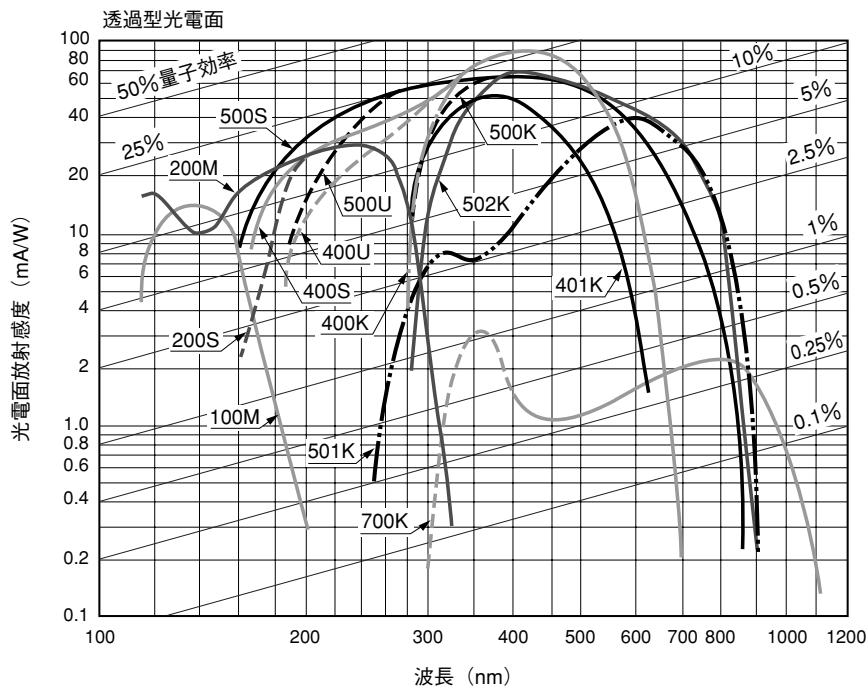


図 5.7: 透過型光電子増倍管の一般的な分光感度特性。400K が本検出器で用いる光電面・入射窓の組み合わせ (バイアルカリ+コパールガラス)。浜松ホトニクス・ホトマルハンドブック 4.1 章より

5.1.4 光電子増倍管取り付け部分

光電子増倍管を取り付ける部分の形状を図5.8に示す。タンク内壁にはアクリル窓1を接着し、タンク外壁にはPMT接合部品1（鉄）をスポット溶接する。溶接したPMT接合部品1とタンク外壁に生じる隙間は、シリコン系のコーキング剤を注入することによって遮光する。

アクリル窓1はタンク内壁に合わせた曲率を持った円板であり、その接着にはエポキシ接着剤を使用した。その接着能力は実際にタンク壁面の試作を作製して確認した。最初、接着剤にアラルダイトを使用したのだが、長時間経過⁷すると剥離してしまった。温度変化によってアクリルと鉄が収縮したことによって、接着強度限界以上のひずみ生じたことが原因と考え、より柔軟性のある接着剤セメダイン EP-001に変更した。セメダイン EP-001は耐水性に不安があったため、水に触れないようシリコン系のコーキング剤を上塗りした。また接着面をサンドブラストによって梨地に加工することで接着表面積を増やした。これに対して恒温槽を使用した加速試験⁸を行ったのち、荷重を掛けても剥がれないことを確認した。

アクリル窓2は光電面より一回り大きく設計した平らな円板であり、光電子増倍管とオプティカルセメントで接着する。光電面より一回り大きいいため、接着後にはでっぱりが生じる。このでっぱりを利用して、ミューメタルを被せ、さらにPMT接合部品2（四角板）で抑えこみ、PMT接合部品1にネジ留めすることにより、光電子増倍管をタンク壁に取り付ける。ネジの締め過ぎによりアクリル窓1の接着が剥がれるのを防ぐため、トルク管理を行う。

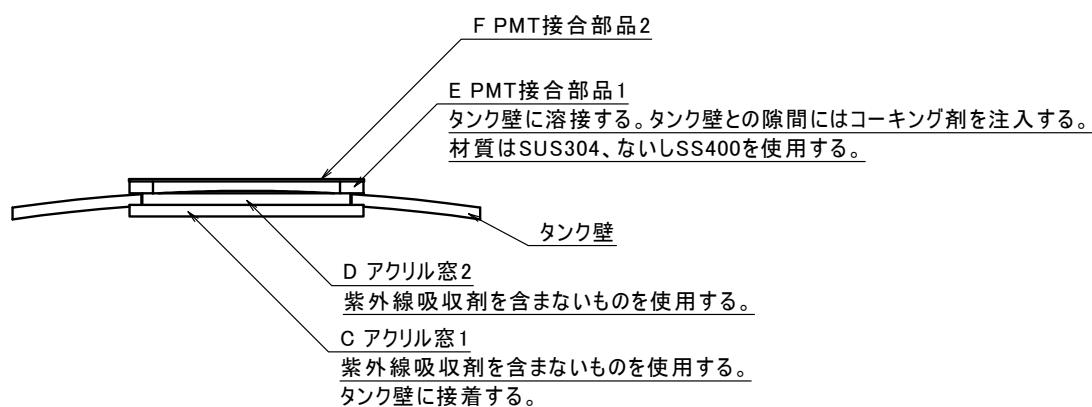


図 5.8: 光電子増倍管取り付け部分の図面。

光電子増倍管を取り付ける手順を以下に説明する（図5.9参照）

図5.9 (1) 光電子増倍管とアクリル窓2をオプティカルセメントで接着した様子。写真のように5mm程度のでっぱりが生じる。

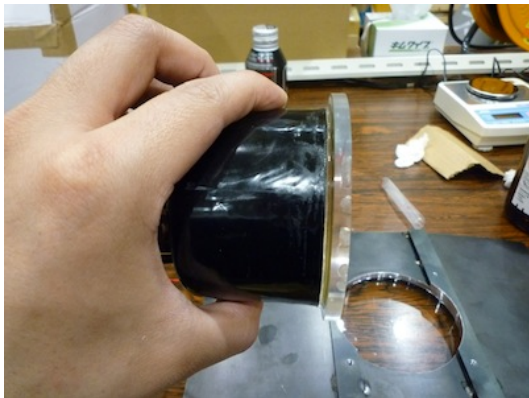
⁷6月から10月までの約4ヶ月間

⁸温度：0°C~40°C、周期：2時間、繰り返し回数：10セット

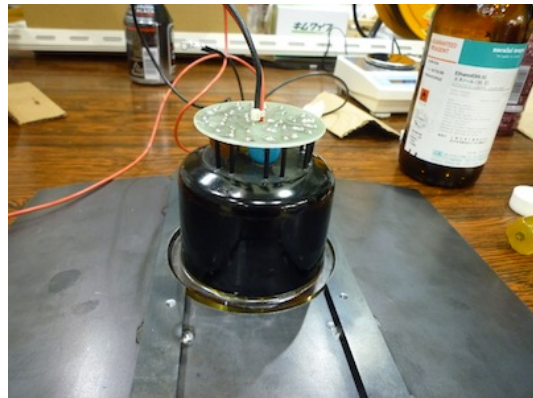
図 5.9 (2) タンク壁に接着されたアクリル窓2の上に(1)の光電子増倍管をセットする。アクリル窓2は曲率を持っているが、アクリル窓1は平面なため、隙間と同じ形状をしたシリコンクッキーを挿入して空気層ができないようにする(シリコンクッキーの材質には信越シリコン KE-103 を使用した。透過率は86~90%(300~400 nm)程度である)。

図 5.9 (3) ミューメタル、PMT 接合部品2の順番に装着する。

図 5.9 (4) トルク管理を行いながら、ネジで均等に固定する。



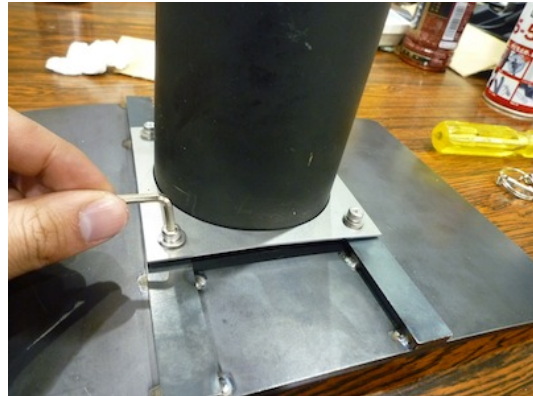
(1) 手順1: 光電子増倍管とアクリル窓2をオプティカルセメントで接着する。



(2) 手順2: アクリル窓1の上に光電子増倍管を配置する。間にシリコンクッキーを挟む。



(3) 手順3: ミューメタルをかぶせ、PMT 接合部品2を通す。



(4) 手順4: トルクを管理しながらネジで締め付け、光電子増倍管を押さえつける。

図 5.9: 光電子増倍管取り付け手順

5.1.5 水循環系

検出器の水を循環させるための配管系統図を図5.10に示す。

地上にある蛇口を使用して、水道水を3台のバッファータンクに貯水した。バッファータンクに貯水された水はポンプを用いて循環させる。ポンプから吐出された水はイオン交

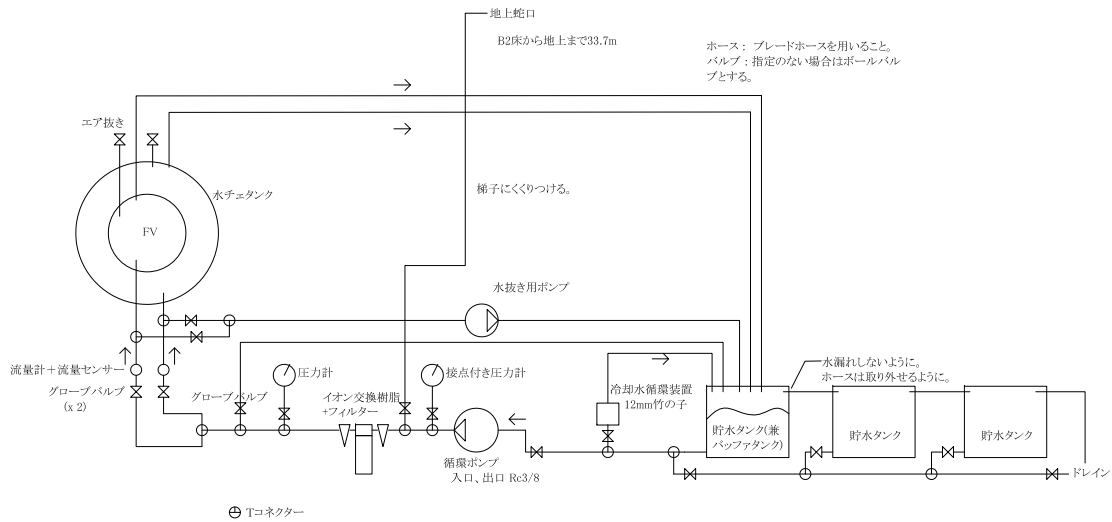


図 5.10: 水循環系統図。

換樹脂によって濾過され、純水となり検出器に運ばれる。検出器の外タンクと内タンクはそれぞれ独立に循環できるようになっている。検出器内を通った純水は再び同じ系統に戻り、1台目のバッファータンクへと戻ってくる。

循環させる途中で冷凍機を通すことにより、水温は一定に保たれている。また、ポンプ吐出直後とイオン交換樹脂後には圧力計を設置し、イオン交換樹脂に圧力がかかりすぎないように監視できるようになっている。特にポンプ吐出直後は接点付き圧力計を使用し、圧力が設定値を超えた場合はポンプを停止するようフィードバックをかけるようにする。

図 5.11 にイオン交換樹脂周辺の様子を示す。イオン交換樹脂本体にはオルガノ製純水器 G-10C を使用する。水中の微粒子を濾しとるフィルターを前後に取り付け、前フィルターには FAC-2、後フィルターにはマイクロポー EU タイプを使用する。水の純度は電気伝導率計によってモニターしており、電気伝導度が $1\mu\text{S}$ 以上になるとのアラームが鳴るようになっている。

図 5.12 にバッファータンク周辺の様子を示す。容積 1000L を 3 台、合計 3000L のバッファータンクを使用する。3つのバッファータンクは隣り合ったものどうしお互いにタンク上部と下部でホースにより接続されている。検出器に最も近い 1 つを水の常時循環用に使用し、残り 2 つは検出器から水を抜く際や水が漏れた場合の緊急時に水を逃がすために使用する予定である。



図 5.11: イオン交換樹脂全体。イオン交換樹脂にはオルガノ製純水器 G-10C、前フィルターには FAC-2、後フィルターにはマイクロポア EU タイプを使用する。電気伝導率計を使用して純化を監視しており、電気伝導度が $1\mu\text{S}$ 以上になるとのアラームが鳴る。水は図の右から左へと流れる。



図 5.12: 合計 3000L のバッファータンク。3つのバッファータンクは互いにタンク上部と下部でホースにより接続されている。検出器に最も近い1つを水の常時循環用に使用し、残り2つは検出器から水を抜く際や水が漏れた場合の緊急時に水を逃がす用途で用いる予定である。

5.2 強度解析

5.2.1 目的

本検出器はその内部に最大約 2.5 トンの水を使用するため、耐水圧仕様の構造にしなければならない。そこで強度解析ツールによる強度解析シミュレーションを行い、その結果を元に構造の詳細を決定していった。

強度解析ツールには ANSYS Inc. の有限要素法マルチフィジックス解析ツール ANSYS を使用した。

5.2.2 有限要素法

有限要素法とは数値解析手法の 1 つであり、解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る方法の 1 つである。複雑な形状・性質を持つ物体を、単純な形状・性質の要素に分割し、その 1 つ 1 つの要素に対して、境界条件などを考慮した連立方程式を立て、そのれら全てが成立する解を求めることによって、全体の挙動を予測することができる。

ANSYS を使った実際に手順は以下の通りである。

1. モデルを作成
2. 材料特性の設定
3. 荷重・拘束の定義

4. メッシュ分割
5. 強度計算
6. 結果を記録
7. 結果を参考にモデルを修正
8. (1.に戻って繰り返す)

5.2.3 材料特性

検出器の材料には主に鉄、ステンレス、アクリルを用いた。それぞれの材料特性は表5.2のとおりである。下記パラメータ（特に密度、ヤング率、ポアソン比）を与えることにより、ANSYS空間に作成したモデルの材料を定義した。

表 5.2: 鉄、ステンレス、アクリルの材料特性

材料名	JIS 記号	密度 D [kg/m ³]	ヤング率 E [GPa]	ずれ弾性率 G [GPa]	ポアソン比 σ
鉄	SS400	7.9×10^3	206	79	0.3038
ステンレス	SUS304	8.0×10^3	197	74	0.3311
アクリル		1.19×10^3	3.2		0.38

ここで、ポアソン比 σ はヤング率 E とずれ弾性率 G から次式を使って求めた。

$$E = 2G(\sigma + 1) \quad (5.1)$$

引張強度と安全強度

材料に力を加わるとひずみが生じる。ひずみが小さいとき、ひずみと応力は比例する（弾性）。ひずみが大きくなると、ひずみと応力の関係は比例しなくなり、応力を取り除いてもひずみが残る場合がある（降伏）。さらにひずみが大きくなると材料は破断する。破断する前に材料に表れる最大の引張応力を引張強度と呼ぶ。

本解析では、引張強度に対して安全係数3を設定して強度解析を行った。表5.3に鉄とステンレスのそれぞれの引張強度と、設定した安全強度をまとめた。

5.2.4 外タンク

FV水ありの状態の時、外タンクには自重の他に、水の質量約2.5トンの負荷がかかる。本解析では、主にその2つの荷重を考慮して、それらに耐える構造となるよう強度計算を行い構造を決定した。

表 5.3: 引張強度と安全強度

	引張強度 [MPa]	安全強度 [MPa]
鉄	400	130
ステンレス	520	170
アクリル	65-76	21-25

二次元円筒モデル

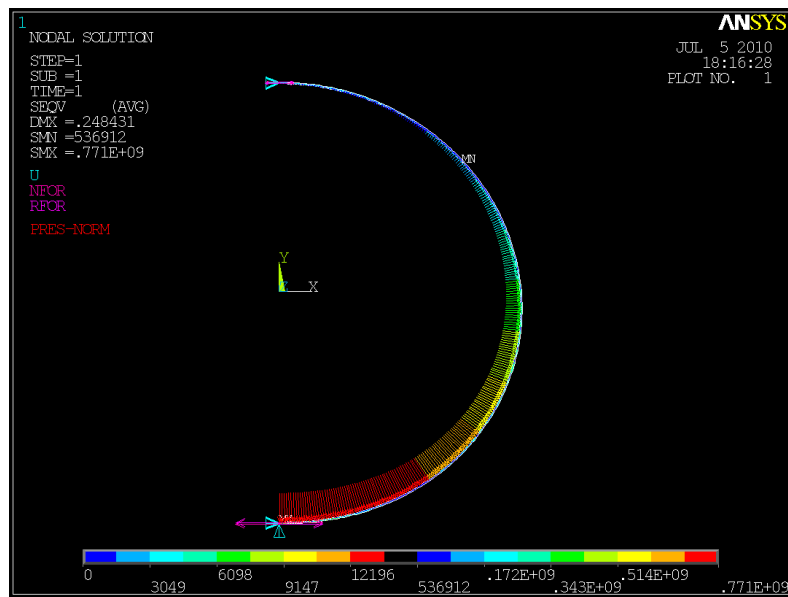


図 5.13: 二次元円筒モデル。ANSYS 空間内で仮想的な奥行き無限の 2 次元の円筒を作成。モデルの内壁には 0~13720 Pa の圧力がかかっている。図中の矢印の色・大きさ・方向はそれぞれの部分でかかっている圧力を表す。

簡単のために、まず奥行き無限の二次元円筒モデルを作成し、強度解析を行った。材料に鉄を定義し、荷重に水圧を定義し、必要な厚みを見積もった。

水圧が一番大きくなるのはタンク最下部で、水の密度 $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ 、最下部の水深 1.4m より、水圧 $P=13720 \text{ Pa}$ がかかる。また水圧が一番小さいのはタンク最上部で 0 Pa である。二次元モデルの内壁にはかかる圧力に勾配をもたせ、この範囲 (0~13720 Pa) で勾配を持つ圧力がかかるように定義した。図 5.13 にその様子を示す。

この設定で円筒の厚みを 5~10 mm に変化させたときの、それぞれの相当応力の最大値を表 5.4 にまとめた。この表から鉄の円筒だけで約 2.5 トンの水に耐えるには、円筒の厚みが 10mm 以上必要になることが分かる。

表 5.4: 円筒の厚さの違いによる相当応力の大きさの比較

円筒の厚み [mm]	5	6	7	8	9	10
相当応力 [MPa]	488	330	248	185	146	118

3次元円筒モデル

今度は、奥行きを持たせた3次元円筒モデルを作成し、強度解析を行った。2次元円筒モデルと同じように、材料には鉄を定義し、荷重には水圧を定義した。

2次元円筒モデルの結果より、円筒の厚みは10mm以上にすれば良いことが分かったが、検出器が不必要に重たくなるのを避けるため⁹、円筒にフランジを取り付けることで、円筒が厚みを抑えることができないか検討した。

フランジをつけて強度計算を行った結果を図5.14（左）に示す。局所的には安全強度を越えている部分はあるものの、全体的には厚さ4.5mmでも問題ないことが分かる。図5.14（右）はフランジの他にフタも取り付け付けた場合である。この場合も同様の結果が得られた。

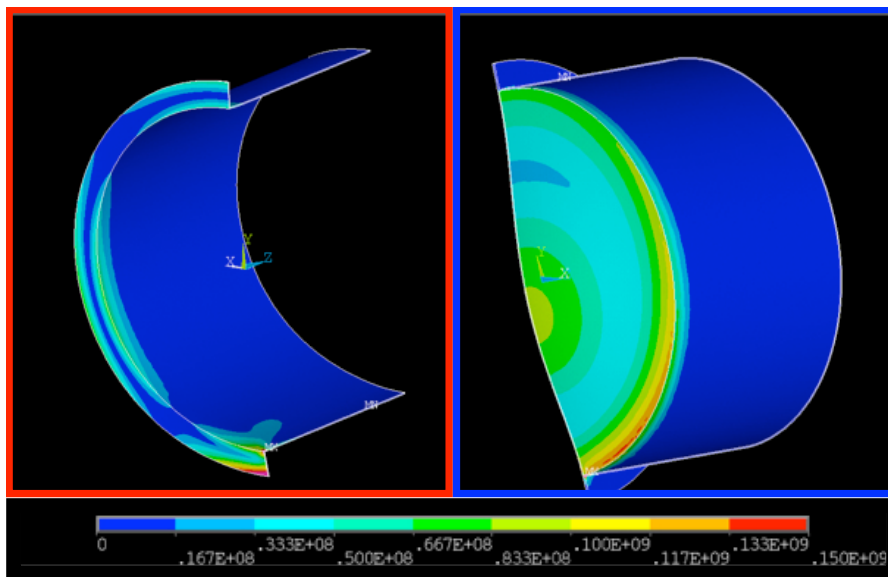


図 5.14: 3次元円筒モデル。左：奥行きを持たせた円筒にフランジを取り付けたモデル、右：さらにフタを取り付けたモデル。図下のカラーバーは相当応力の大きさを表す（単位はPa）

⁹本検出器の場合、重量が増えるとアンバランスになる可能性があるため。また材料が増えることにより、必然とコストが増すため。

Mizuche モデル

次に、図 5.15 のような、より Mizuche 検出器実機を想定したモデルを作成した。解析時間短縮のため対称化可能な部分はカットし、実機の 1/4 をモデル化してある。

タンク本体の円筒にはフランジを取り付け、腹部にはリブを取り付けた。円筒は架台の上に乗せ、フタも取り付けた。

最初、材料には鉄を定義¹⁰し、厚みは基本的に 4.5 mm とした。これはこの厚みの鉄材が既製品として存在していたからである。この厚みの既製品がない場合は、それに近いものを使用した。以下ではこの Mizuche モデルに修正を加えながら、強度解析を繰り返し行った。

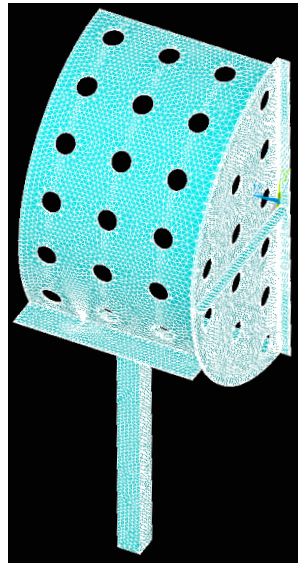


図 5.15: Mizuche モデル

拘束条件と荷重定義

本モデルに定義した拘束条件の箇所と荷重を図 5.16 にまとめた。1/4 モデルにしたことで、YZ 断面、XY 断面にはそれぞれ対称拘束条件を定義¹¹した。また、脚先の XZ 平面は全軸固定の拘束条件を定義した。

モデル内壁の面に対して水圧を定義し、また重力加速度を下向きに与えることで自重を定義した。

光電子増倍管取り付け用窓の配置

光電子増倍管を取り付けるための窓を開けたときの相当応力を計算した (図 5.17)。約 230 mm の等間隔になるよう全部で 40 箇所の窓を配置した。窓周辺のひずみを確認したと

¹⁰ ステンレスは鉄より高価なため、開発当初は鉄に防錆剤 (黒) を塗る方針だった

¹¹ 「対称 (sys)」という ANSYS コマンドがある

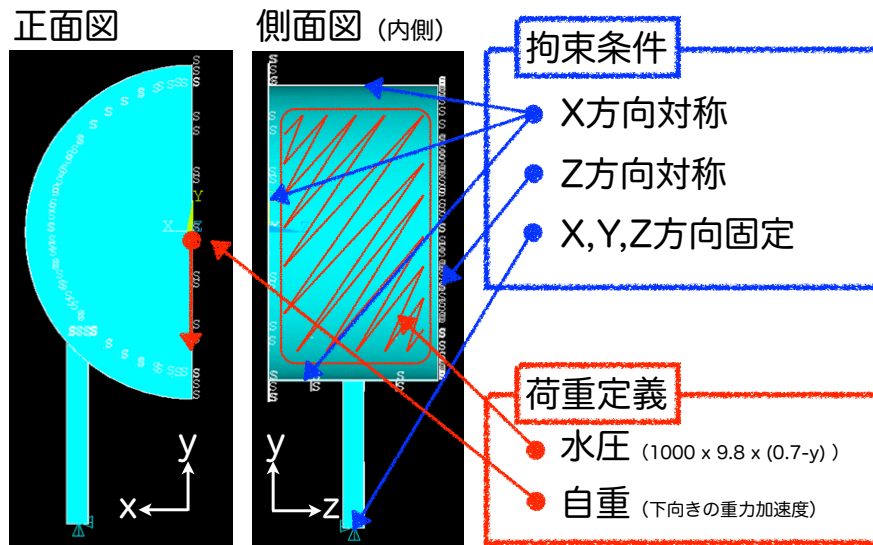


図 5.16: モデルに与えた拘束条件と定義した荷重のまとめ。YZ 断面、XY 断面にはそれぞれ対称拘束条件を、脚先の XZ 平面は全軸固定の拘束条件を定義した。荷重としてタンク自重とタンク内壁面に水圧を定義した。

ころ、全ての部分で 70 MPa 以下 (図の緑マーカー) であった。これは設定した安全強度の範囲内である。また、円筒部 (図 5.17 右) を見ると、円型の窓を空けることによるひずみはそれほど生じないことが分かる。

脚を取り付ける水平・垂直位置の検討

これまでの Mizuche モデルの強度解析より、脚の付け根で相当応力が最大となることが分かってきた。そこで、検出器を支える架台の脚を取り付ける位置を変えて相当応力を計算した。

水平位置はフタからの距離を基準に、350 mm、300 mm、250 mm (図 5.18) と 550 mm、300 mm (図 5.19) で解析を行った。図 5.18 と図 5.19 の違いは光電子増倍管取り付け用窓の穴あけを考慮する前と後である。図 5.18 より、フタに近づけた方が最大相当応力が小さくなることが分かる。しかし、光電子増倍管を取り付けることによる空間的制限のため、最終的には図 5.19 のように、フタからの距離 300mm に設置することにした。

垂直位置はフタ中心を基準に、下向きに 250 mm と 480 mm (図 5.20) に変えて解析した結果を比較した。図 5.20 からフタ中心から遠ざけるほど最大相当応力が小さくなることが分かる。しかし、外タンク真下付近にすると、検出器全体が不安定になってしまうので、フタ中心から下 480 mm に配置することにした。

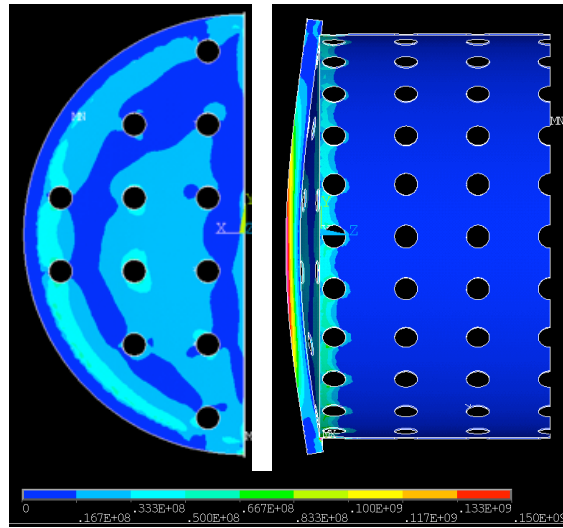


図 5.17: 光電子増倍管取り付け用窓を空けたときの相当応力

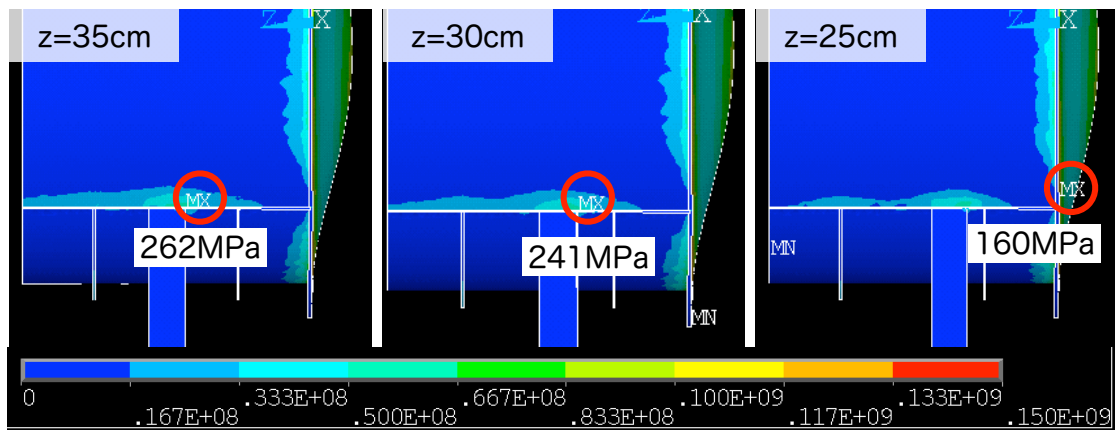


図 5.18: 脚を取り付ける場所による相当応力の比較 1。フタの位置を基準に脚を取り付ける位置を変化させた。フタに近くなるにつれ、最大相当応力が小さくなるのが分かる。

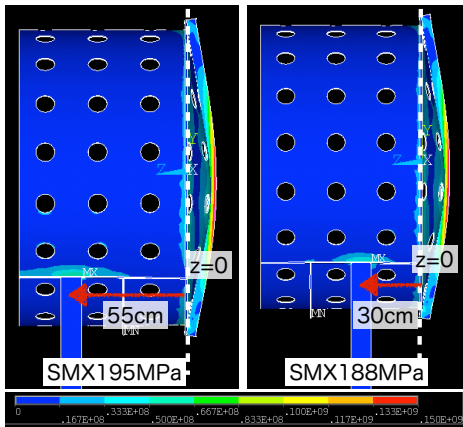


図 5.19: 脚を取り付ける場所による相当応力の比較2。光電子増倍管を取り付けることを考慮して、再度脚を取り付ける水平位置の検討を行った。フタからの距離300mmに配置することに決定した。

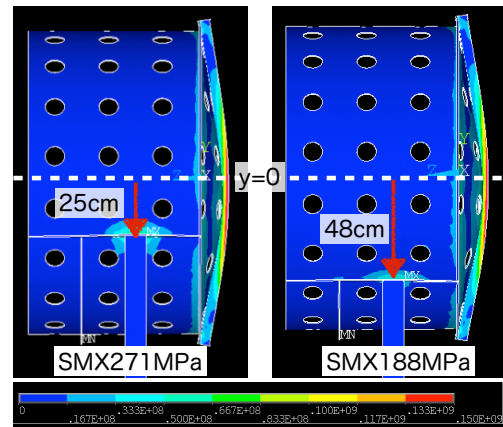


図 5.20: 脚を取り付ける場所による相当応力の比較3。光電子増倍管を取り付けることを考慮して、脚を取り付ける垂直位置の検討を行った。フタ中心からの距離480mmに配置することに決定した。

フタの厚みの検討

フタの厚みを変化させて相当応力を比較した。図 5.21 にフタの厚みが (左) 5 mm、(中) 6 mm、(右) 9 mm のときの相当応力を示す。またそのときの変形量の最大値 (DMX) を図下に記した。

フタにかかる相当応力はどの場合も 67 MPa 以下で安全強度を満たしている。その時の変形量の最大値はそれぞれ、4.2 mm、2.9 mm、1.7 mm で、長さ (750 mm¹²) に対する変化の割合 $\Delta L/L$ はそれぞれ 5.6%、3.9%、0.23%であった。

6 mm と 9 mm の場合には、フタにリブを取り付けた場合とそうでない場合の比較も行った。図 5.22 にその結果を示す。両厚みとも相当応力は安全強度の範囲にあるが、9 mm の場合、 $\Delta L/L$ はリブあり／なしでそれぞれ 0.23%、0.37%と変化は見られないのに対し、6 mm の場合は 0.39%、1.1%となり、リブを取り付けた方が良いことが分かる。

図 5.21 と図 5.22 の結果と、質量の増加分を考慮し、フタの厚みは 6 mm にし、リブを取り付けることにした。

フタのリブの形状の検討

フタのリブの幅は上から 50 mm、100 mm である。その時のフタの最大変形量 (図 5.23 右の赤い部分) はそれぞれ 4.0 mm (0.53%)、2.2 mm (0.29%) であった。変形量の割合はどちらも問題ないと判断したので、リブの幅は 50 mm にした。

¹²フタの半径を基準にした

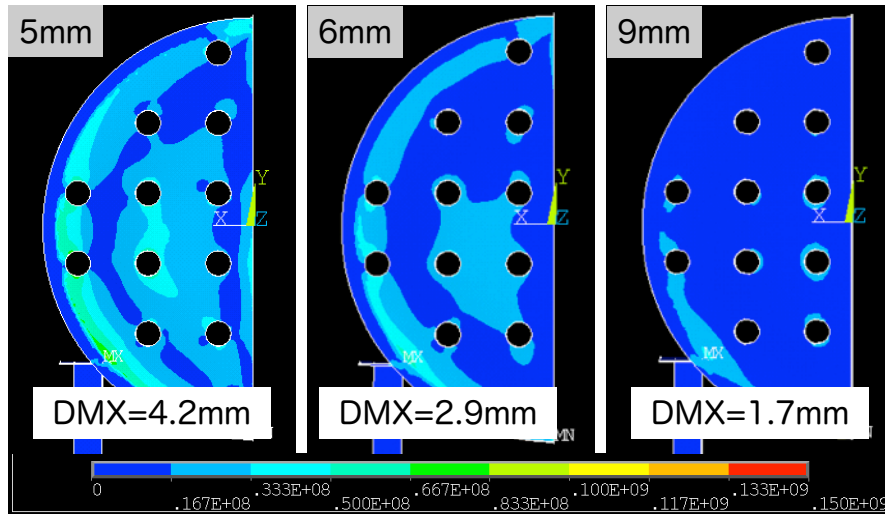


図 5.21: フタの厚みの違いによる相当応力と変形量の比較。フタの厚みは左から 5mm、6mm、9mm である。その時の変形量の最大値 (DMX) はそれぞれ、4.2mm、2.9mm、1.7mm であった。相当応力の大きさは図下のカラーバーで表す (単位は Pa)。

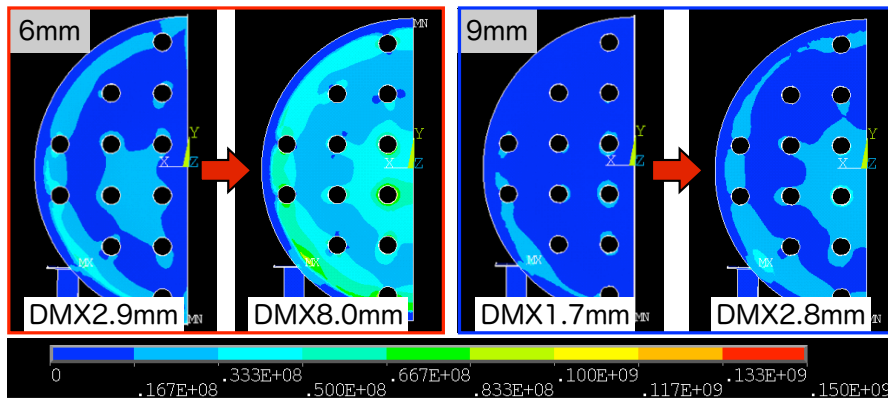


図 5.22: フタの厚みの違いとリブのある／なしによる相当応力と変形量の比較。フタの厚みは左から 6mm (赤枠図)、9mm (青枠図) である。枠内の図はそれぞれ、リブあり (左図)、リブなし (右図) である。その時の変形量の最大値を DMX の値にしめす。相当応力は図下のカラーバーで表す (単位は Pa)。

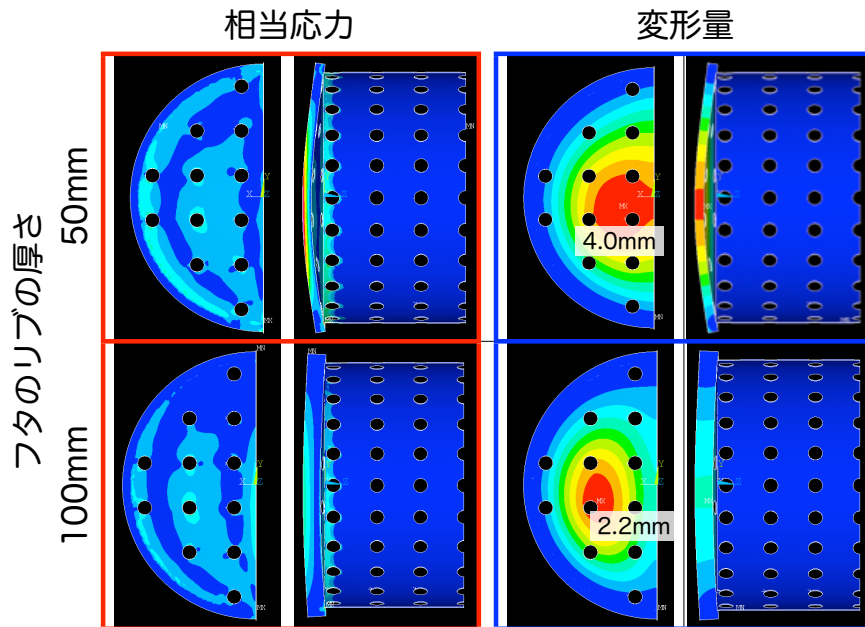


図 5.23: フタを補強するリブの厚みによる相当応力・変形量の比較。フタのリブの厚みは上から 50mm、100mm である。その時のフタの最大変形量はそれぞれ 4.0mm、2.2mm であった (図右の赤い部分)。相当応力の色のスケールは前の図 5.21 と同じである。

外タンク構造の決定

これまでの強度解析から決定した各部位のサイズを表 5.5 と図 5.24 にまとめた。これらを基に図面を作成し、業者に製作を依頼した。

表 5.5: 外タンク詳細設計のまとめ

	直径 [mm]	長さ [mm]	幅 [mm]	厚さ [mm]	個数	合計質量 [kg]	材質
タンク本体	1400	1600	—	5.0	1	282	SUS304
+フランジ	1400	—	50	9.0	2	16.7	SUS304
+リブ	(700)	—	50	4.5	2	8.24	SS400
フタ	1500	—	—	6.0	2	170	SUS304
+リブ	—	1500	50	4.5	4	10.7	SS400
脚	—	1000	100×100	6.0	4	7.58	SS400 角パイプ
サイドバー	—	1600	150	4.5	2	8.24	SS400
総質量	—	—	—	—	—	511	—

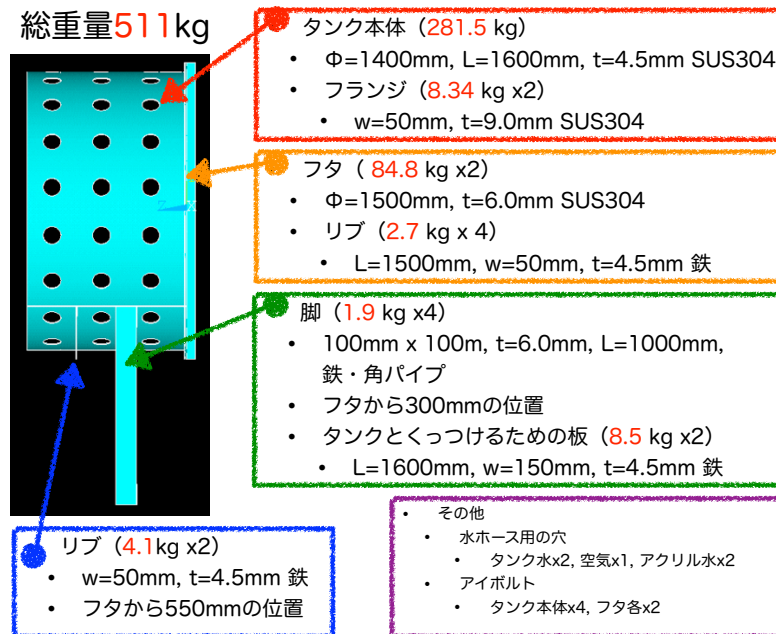


図 5.24: 外タンク詳細設計のまとめ

5.2.5 内タンクモデル

FV 水なしの状態のときに、内タンクにかかる水圧は最も大きくなると予想できる。そこで図 5.25 に示したように、内タンクの外から内へ向かう向きに水圧を定義し、強度解析を行った。

モデルの厚みは、円筒：5 mm、フタ：8 mm、フタに取り付けたリブ：5 mm、ハネ：5 mm である。図 5.26 では図 5.25 の総変形量についての解析結果を示す。変形量が 2 mm 以上の部分はピンク色で表示される。図 5.26 より、フタ部分の変形量（凹む量）が大きいことが分かる。厚さ 5 mm のアクリルの変形量の許容値として 2 mm を設定した。

フタに取り付けるリブの大きさの検討

フタ部分が最も水圧の影響を受け、凹むことが分かったので、水平方向にリブを増設して補強することにした。フタに取り付けるリブの大きさを変更して、変形量（特に Z 成分）の比較を行った結果を図 5.27 にまとめた。リブの幅を大きくするにつれ、Z 方向の変形量が小さくなっているのが分かる。そこでリブの幅は 300 mm¹³に決定した。

¹³内タンクをインストール時のクリアランスを考慮し、最終的には 287 mm に変更した

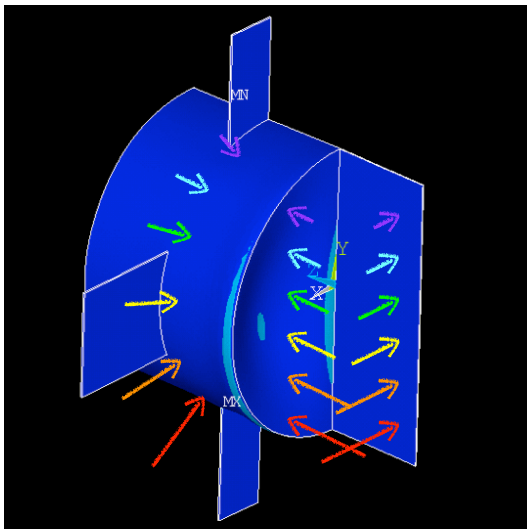


図 5.25: 内タンクモデルに定義した水圧。FV 水なしの状態を想定して強度解析を行った。

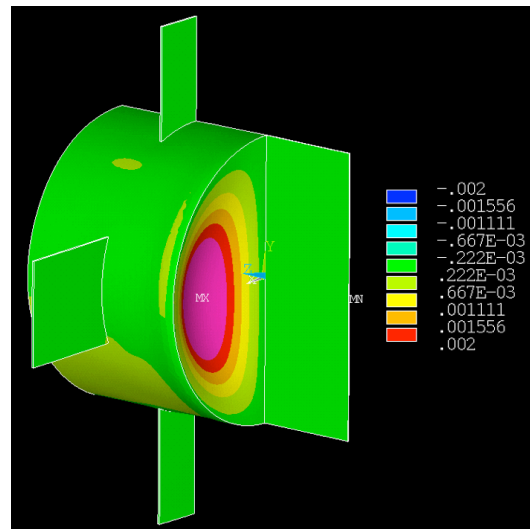


図 5.26: 図 5.25 の解析結果（総変形量）。総変形量が2mm を超える部分はピンク色で表示される。

ハネの形状の決定

ハネの形状を、四角と円形に変化させ、相当応力・変形量の比較を行った結果を図 5.28 にまとめた。

四角いハネの場合、ハネと胴体の接合部分に応力が集中しており、変形量も大きいことが分かる（図 5.28 (1)、図 5.28 (2)）。

それに比べると、円形にした場合は応力、変形量とも小さいので、ハネの形は円形に決定した（図 5.28 (3)、図 5.28 (4)）。

ハネの枚数の決定

胴回りに取り付けるハネの枚数を変化させて、相当応力・変形量の比較を行った結果を図 5.29 にまとめた。ハネが2枚（図 5.28 (3)、図 5.28 (4)）と、3枚（図 5.29 (1)、図 5.29 (2)）を比較しても応力の集中箇所と大きさ、変形量に変化が見られないことが分かった。

ハネの枚数が多いとチェレンコフ光の進行の妨げになる可能性があること、また検出器内へのインストールの煩雑さを想像して、ハネは2枚に決定した。

ハネを分割した場合

ハネの直径、一体物の作成が困難という材料上の都合から、ハネを分割して作製できないか検討した。ハネを3分割にし、それぞれを図 5.30 の示したように、10 mm ののりしるで接着¹⁴したモデルを作成し解析を行った。

¹⁴実際のアクリルは溶着した；アクリルの接着面を溶かして貼り合わせる方法

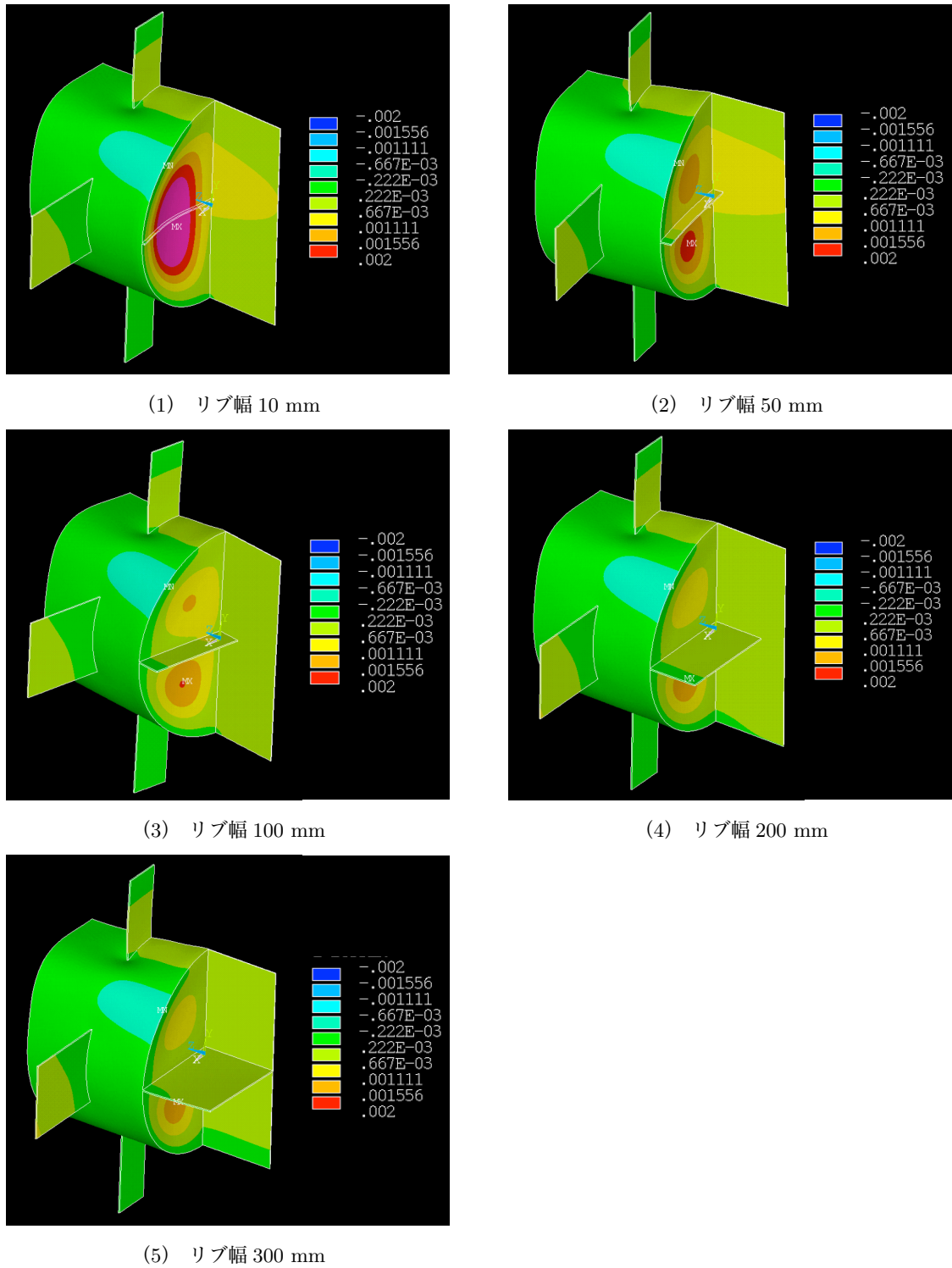
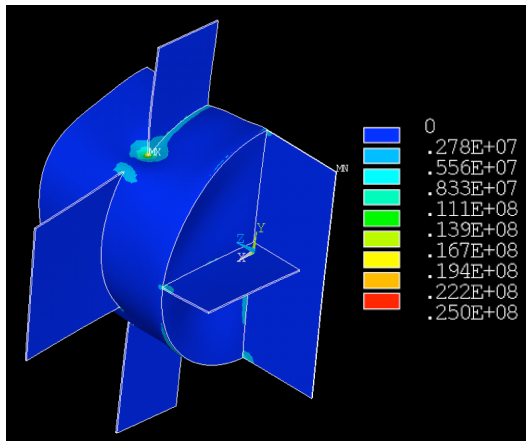
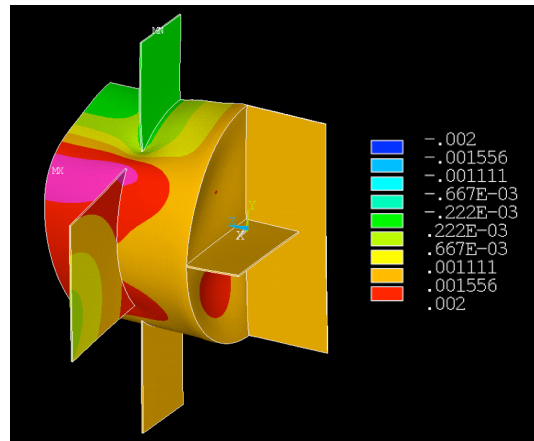


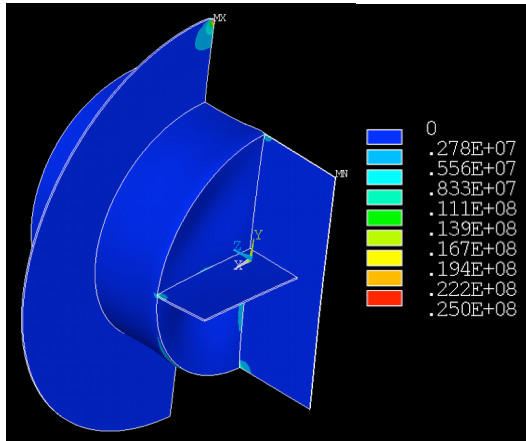
図 5.27: フタに取り付けるリブの大きさを変えたときの Z 方向の変形量の比較



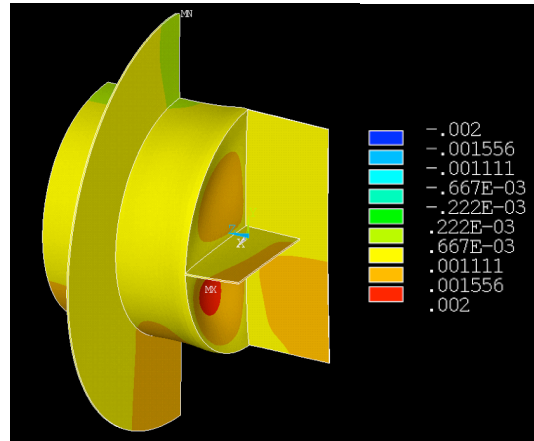
(1) ハネを四角にした場合の相当応力



(2) ハネを四角にした場合の変形量

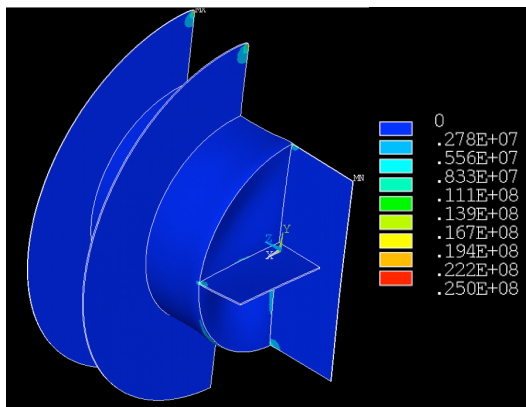


(3) ハネを円形にした時の相当応力

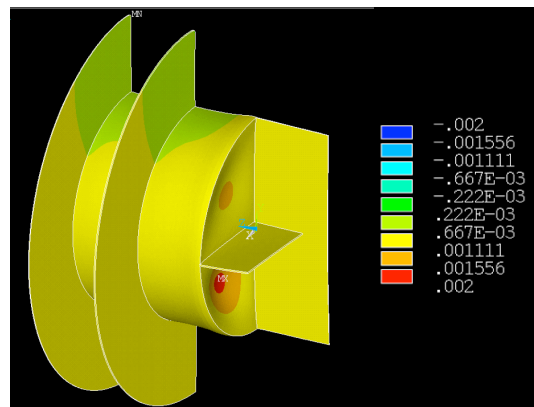


(4) ハネを円形にした時の変形量

図 5.28: ハネの形状を変化させたときの相当応力・変形量の比較



(1) 円形ハネを3枚にした時の相当応力



(2) 円形ハネを3枚にした時の変形量

図 5.29: ハネの枚数を変えたときの相当応力・変形量の比較

一体物と比較すると、貼りあわせた部分の変形量が変化するものの、許容範囲と判断し、ハネを分割することに決定した。

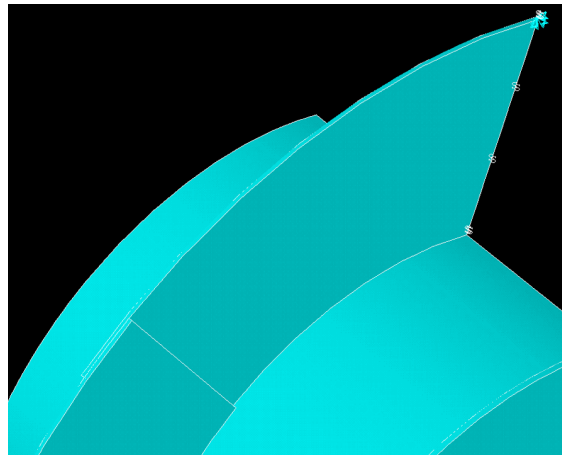


図 5.30: ハネを重ねた部分。10mm 分重なっている。

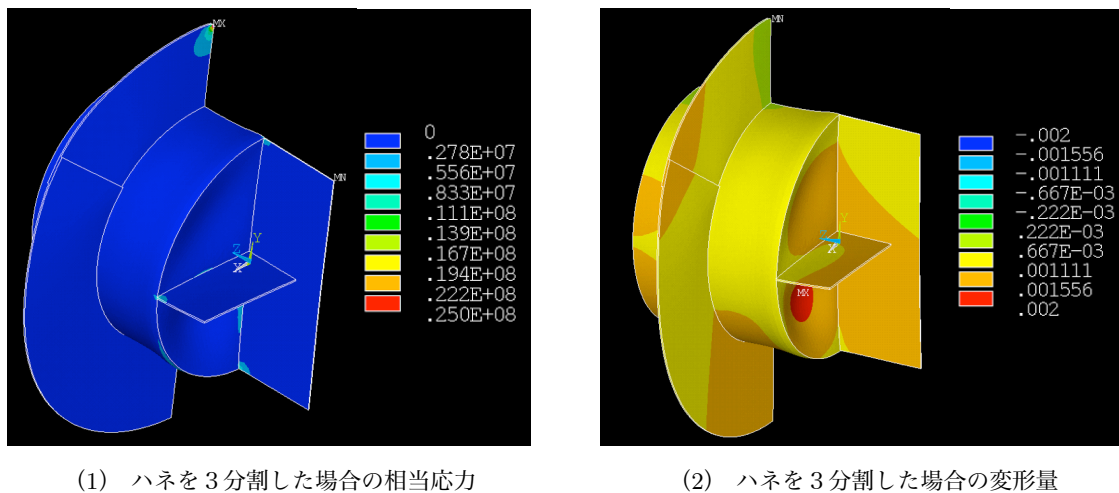


図 5.31: ハネを3分割したときの相当応力・変形量

5.3 耐震解析

地震などによって、検出器が倒れないことを、水平方向に加速度を与えた静解析を行って確認した。このために図 5.32 と図 5.33 の示すように X 方向加速モデルと Z 方向加速モデルの2種類の1/2モデルを作成した。

両モデルとも自重として-Y方向に1G、そして、X方向加速モデルには+X方向に0.5GとZ方向加速モデルには+Z方向に0.5Gを与えた。また、水圧はそれらの加速度を足しあわせた方向にを考慮して定義した（図中の虹色のグラデーションは水圧の勾配を示す）。

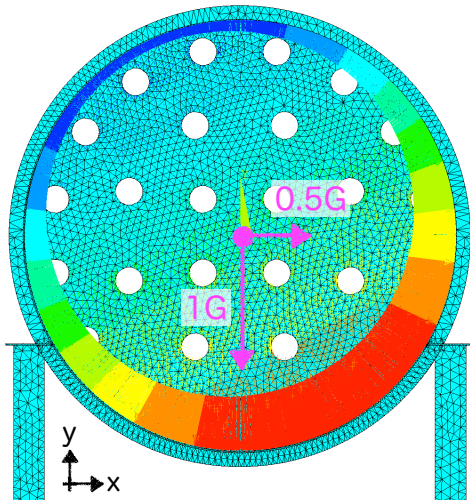


図 5.32: X 方向の耐震解析モデル。XY 平面で対称にした 1/2 モデルを作成した。検出器の自重 (1G) の他に、X 方向に+0.5G の加速度を与えた。青～赤色のグラデーションは水圧を表す。

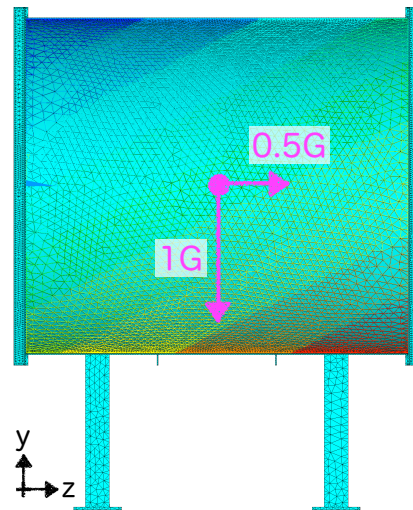


図 5.33: Z 方向の耐震解析モデル。YZ 平面で対称にした 1/2 モデルを作成した。検出器の自重 (1G) の他に、Z 方向に+0.5G の加速度を与えた。青～赤色のグラデーションは水圧を表す。

5.3.1 震度と重力加速度

地震の震度と、それに対応する重力加速度は図 5.6 のとおりである。今回は 0.5 G の加速度を与えたので、約震度 5 強相当の地震に耐えられることになる。

表 5.6: 震度と重力加速度の対応

震度		4	5 弱	5 強	6 弱	6 強	7
kine	[cm/s]	4-10	10-20	20-40	40-60	60-100	100-
gal	[cm/s ²]	100	240	520	830	1100	1500
重力加速度	[G]	0.1	0.24	0.52	0.83	1.1	1.5

$$1 \text{ G} = 9.8 \text{ m/s}^2 = 980 \text{ gal}$$

5.3.2 横方向のゆれに対する解析

X 方向に加速度を与えて解析を行った結果を図 5.34 に示す。図 5.34 (2) は相当応力、図 5.34 (1) は変形量に対する結果を表している。また、図 5.35 に最大相当応力のかかる部分の拡大図を示す。変形量、応力ともに脚の部分がもっとも大きくなるが、最大変形量は 0.892 mm (0.09%) と問題なく、最大相当応力は 181 MPa となり安全強度を越えているが、一時的にかかる応力なので問題ないと判断した。

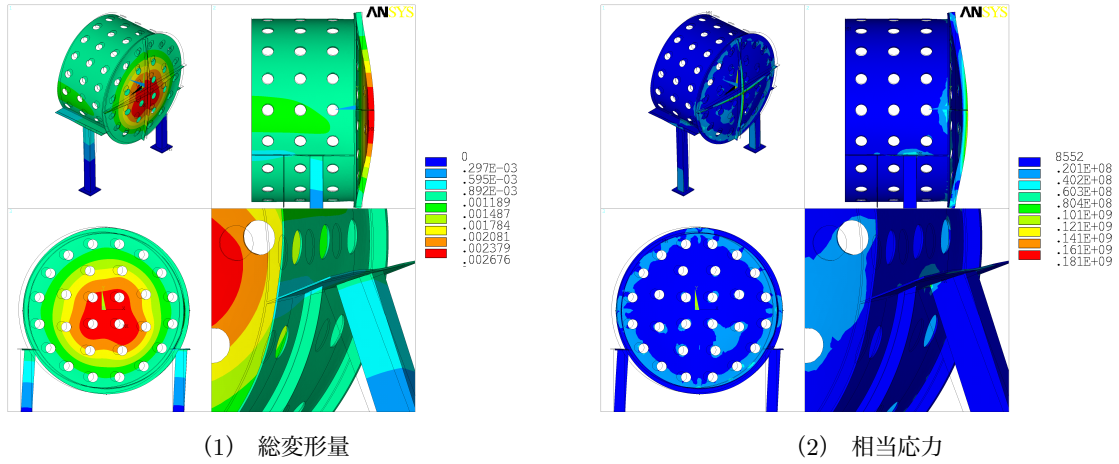


図 5.34: X 方向加速度モデルの解析結果

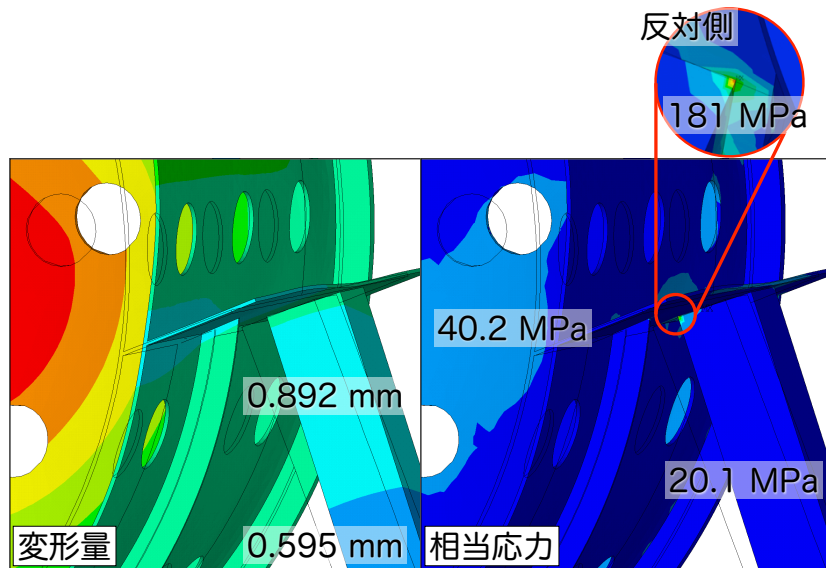


図 5.35: X 方向に加速度を与えたときの総変形量 (左) と相当応力 (右)

5.3.3 長さ方向のゆれに対する解析

Z方向に加速度を与えて解析を行った結果を図5.36(2)、図5.36(1)に示す。図5.36(2)は応力、図5.36(1)は変形量に対する結果を表している。また、図5.37に最大相当応力のかかる部分の拡大図を示す。相当応力は脚の部分でもっとも大きくなり、最大相当応力272 MPaは安全強度を超えているが、一時的にかかる応力なのでX方向加速度モデルと同じく問題ないと判断した。変形量はフタ中心で最大4.178 mm(0.56%)であり問題ないと判断した。

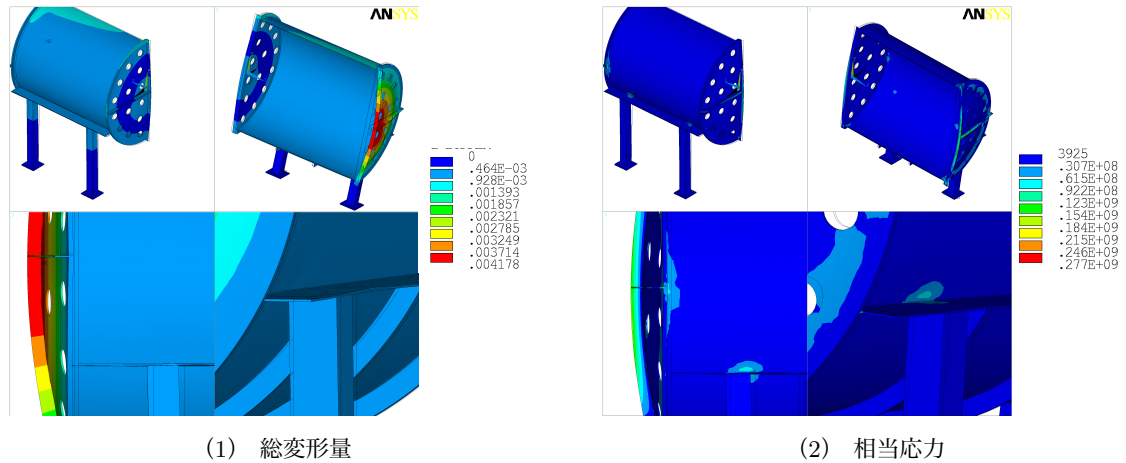


図 5.36: Z方向加速度モデルの解析結果

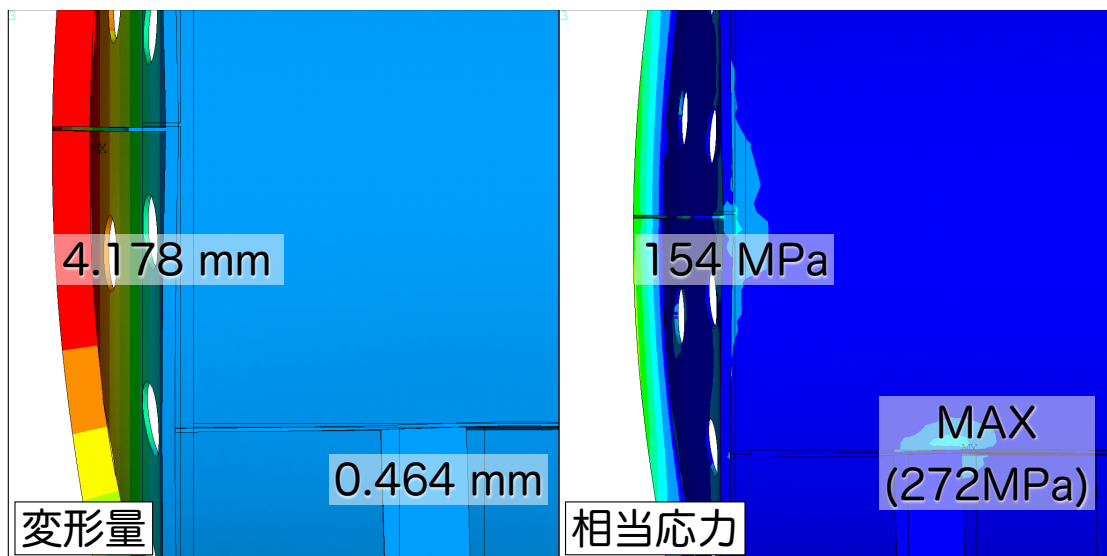


図 5.37: Z方向に加速度を与えたときの総変形量(左)と相当応力(右)

5.4 水漏れ試験・インストレーション

5.4.1 水漏れ試験

図 5.38 は外タンク製作現場にて水漏れ試験をしたときの様子である。タンク内を水道水で満たし、水漏れする箇所がないかを実際に立ち会って確認した。このとき、板ゴムの繋ぎ目¹⁵部分から少量の水漏れと、光電子増倍管取り付け用窓 3 箇所から水漏れが生じた（図 5.39、図 5.40）。

板ゴムからの水漏れに対しては、繋ぎ目が真下にならないよう板ゴムをずらして配置することと、板ナットを使用して固定することにした。窓部分からの水漏れに対しては、窓を接着した際の隙間が原因だったので、業者の方に修整と再接着をお願いし、後日再試験をした。

また、水圧による変形量の実測値と ANSYS との比較を表 5.7 にまとめた。フタ中心の変形量に関しては実測値は ANSYS 予測値を下回っているので、問題ないと判断した。本体中心下の変形量に関しては、実測値が ANSYS 予測値の 2 倍となっているが、理由はよく分からなかった。ただし、この変形量によるステンレスの伸びは $\Delta L/L = 0.4/800 = 0.05\%$ なので強度には問題ないと判断した。



図 5.38: 外タンク水漏れ試験の様子。タンク製作現場にてタンク内を満水にし、水漏れする箇所がないか確認した。水はタンク上部から注水した。タンク前、両横、下にはマイクロメータを設置し、変形量を確認した。

¹⁵板ゴムは周長が大きく一体物の作成が出来なかったため、4分割品を繋ぎあわせてある



図 5.39: 板ゴムのつなぎ目からの水漏れ箇所。図では分かりにくいですが、板ゴムの隙間から少量だが水漏れをしている。板ゴムは 1/4 品を突き合わせで接着しているため、このような水漏れが生じたと見られる。繋ぎ目の位置を工夫することで調整した。



図 5.40: 窓部分の水漏れ箇所。水漏れ箇所はフタ部分に 1 箇所（この図）、タンク上部に 2 箇所あった。全箇所とも接着状態が悪かったため隙間から水漏れが生じたと思われる。再接着後の試験では水漏れは起こらなかった。

表 5.7: タンク変形量の ANSYS による結果と実測値の比較

		ANSYS	実測値
フタ中心の変形量	[mm]	+1.6	+1.3
本体中心下の変形量	[mm]	+0.2	+0.4

+は膨張したことを意味する

5.4.2 インストール

2010年11月2日と4日に外タンクと内タンクを前置検出器ホールの地下2階に降ろす作業を行った。図5.41は外タンクを、図5.42は内タンクをそれぞれクレーンで吊り降ろしているところである。

地下に降ろされた後、外タンクは指定した位置(図4.5)に運ばれ、アンカーボルトで固定した。内タンクはまだ外タンク内部には設置されておらず、今後設置作業をする予定である。



図 5.41: 外タンクのインストール風景。外タンクはクレーンによって無事ホール地下2階まで降ろされた。



図 5.42: 内タンクのインストール風景。内タンクもクレーンを使って丁寧にホール地下2階まで降ろされた。

第6章 光電子増倍管のキャリブレーション

6.1 目的

本実験では直径3インチの光電子増倍管を164本使用する。第4章で説明したような光量カットによるイベント選択をうまく行うためには、ある入射光量に対して全ての光電子増倍管から一様の応答が返ってくる必要がある。

そのため、光電子増倍管間の相対的量子効率と、各光電子増倍管の電流増幅率曲線の測定を予め行うことにより、各光電子増倍管間の量子効率の違いを把握することと、印加電圧を制御することで、電流増幅率が調整可能なようにした。

6.2 測定原理

6.2.1 光電子数と電流増幅率

光子が発生し光電子増倍管の光電面に入射し、光電子に変換される過程はポアソン分布に従う。平均入射光電子数を $\lambda_{p.e.}$ 、光電子増倍管の電流増幅率を G とすると、測定出来る平均信号 μ は

$$\mu = G \cdot e \cdot \lambda_{p.e.} \quad (6.1)$$

となる。ここで e は素電荷である。

このとき、電流増幅率 G は常に一定であり、信号の標準偏差 σ_μ は平均入射光電子数 λ のポアソンゆらぎによることとなり、

$$\sigma_\mu = Ge \cdot \sigma_{\lambda_{p.e.}} = Ge \cdot \sqrt{\lambda_{p.e.}} \quad (6.2)$$

が成り立つ。上2式より、入射光電子数 $\lambda_{p.e.}$ 、電流増幅率 G が計算でき、

$$\lambda_{p.e.} = \left(\frac{\mu}{\sigma_\mu} \right)^2, \quad G = \frac{1}{e} \cdot \frac{\sigma_\mu^2}{\mu} \quad (6.3)$$

となる。

今回の測定で得られるADCのヒストグラムの平均値 $Mean$ 、と標準偏差 RMS^1 の関係は、AD変換係数 C_{AD} とすると、次のようになり、

$$\mu = C_{AD} \times Mean, \quad \sigma_\mu = C_{AD} \times RMS \quad (6.4)$$

¹本来、標準偏差とRMSは異なるものであるが、今回用いた解析ツールROOTでは、標準偏差をRMSと表記しているため、それに従うことにする

これらを式(6.3)に代入すると、

$$\lambda_{\text{p.e.}} = \left(\frac{\text{Mean}}{\text{RMS}} \right)^2 \quad (6.5)$$

$$G = \frac{\text{RMS}^2}{\text{Mean}} \times \frac{C_{AD}}{e} \quad (6.6)$$

が得られる。このようにして、入射光電子数 $\lambda_{\text{p.e.}}$ と電流増幅率 G を計算した。

本測定では使用した CAMAC ADC (LeCroy 2249W) のスペック値 $C_{AD} = 0.25$ [pC/count] を使用した。

6.2.2 相対的量子効率

光源から放出され、光電面に入射した光子数を λ_{photon} 、光電面の量子効率を Q とすると、光電面から放出される光電子数は $\lambda_{\text{p.e.}} = Q \cdot \lambda_{\text{photon}}$ である。入射光子数の絶対値が分かっているならば、 Q を求めることができるが、今回の測定では入射光子数の絶対値が分からないため、下記のようにして相対的量子効率を求めることにした

基準となる光電子増倍管の量子効率を $Q^{(ref)}$ 、測定した i 番目の光電子増倍管の量子効率を $Q^{(i)}$ とすると、同量の光子が入射した時のそれぞれの光電子増倍管で測定される光電子数は次のようになる。

$$\lambda_{\text{p.e.}}^{(ref)} = Q^{(ref)} \lambda_{\text{photon}} \quad (6.7)$$

$$\lambda_{\text{p.e.}}^{(i)} = Q^{(i)} \lambda_{\text{photon}} \quad (6.8)$$

よって、相対的量子効率 $Q_{rel}^{(i)}$ は

$$Q_{rel}^{(i)} \equiv \frac{Q^{(i)}}{Q^{(ref)}} = \frac{Q^{(i)} \lambda_{\text{photon}}}{Q^{(ref)} \lambda_{\text{photon}}} = \frac{\lambda_{\text{p.e.}}^{(i)}}{\lambda_{\text{p.e.}}^{(ref)}} \quad (6.9)$$

となる。

6.2.3 電流増幅率曲線

光電子増倍管の二次電子放出比 δ はダイノード間電圧 E の関数となり次のように表すことができる。

$$\delta = a \cdot E^k \quad (6.10)$$

ここで、 a は定数、 k は電極の構造・材質で決まる数である (通常 $k = 0.7 \sim 0.8$ 程度)。

等分割デバイダの場合、印加電圧を V 、ダイノード段数を n とすると、各ダイノード間の電圧 E は次のようになり (式(6.11))、

$$E = \frac{V}{n+1} \quad (6.11)$$

電流増幅率 G は、

$$\begin{aligned}
 G &= \delta^n = aE^k \cdot aE^k \cdots aE^k \\
 &= a^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} \\
 &= A \cdot V^B \quad \left(A \equiv \frac{a^n}{(n+1)^{kn}}, B \equiv kn \text{ とした} \right)
 \end{aligned}
 \tag{6.12}$$

となり、印加電圧 V の冪関数で表すことができる。また、この両辺の対数をとると、

$$\log_{10} G = \log_{10} A + B \log_{10} V
 \tag{6.13}$$

となり、両対数目盛上で直線となる。電流増幅率曲線の解析では式 (6.13) を使ってフィッティングすることでその係数を求めた。

6.3 方法・手順

6.3.1 実験器具

測定の際のセットアップの概略図を図 6.1 に示す。光電子増倍管や LED など必要な装置は図 6.2 (1) のように暗箱の中に設置した。

光電子増倍管は LED を中心に 8 個セットした。それぞれ予め取り付けられているジグにマジックテープで固定できるようになっている。設置場所は、図 6.1 の CH1 の位置を基準に反時計回りに CH2~CH8 と呼ぶことにする。

LED には青色光のものを使用した。この青色光の波長は 470 nm 程度であり、これはチェレンコフ光や、光電面の感度波長ピークに近い波長である。

LED は暗箱の中心に、上を向けた状態でセットした。またその高さを光電面の中心にできるように台座を調整した。LED 光は指向性が強いため、光をできるだけ等方的に散乱させるためのキャップを取り付けた。図 6.2 (2) に LED をセットした状態を示す。

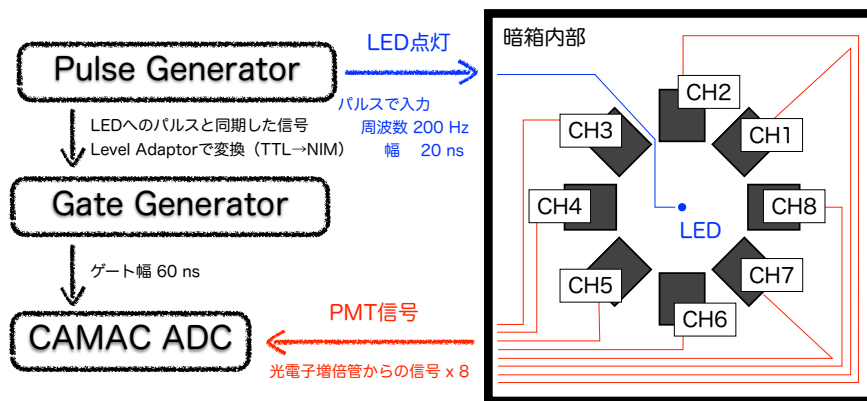
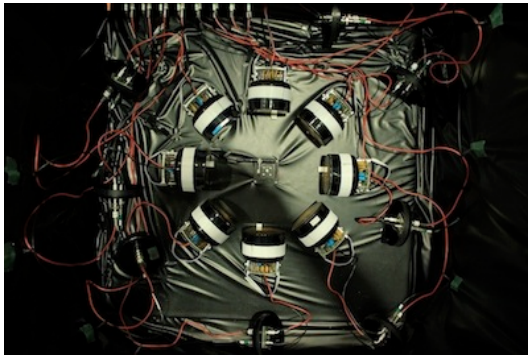
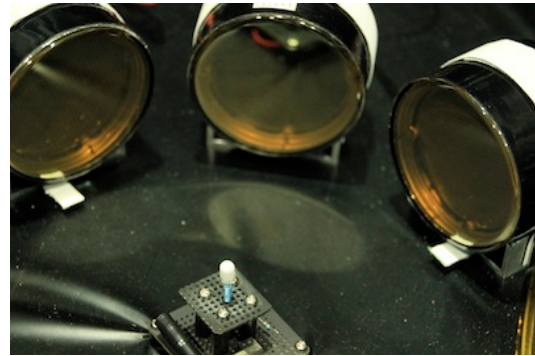


図 6.1: 測定セットアップ概略図。パルスジェネレータの信号をトリガにして、LED を光らせるとともに、ADC のゲートを開き、光電子増倍管からの信号を取得する。



(1) 暗箱の中に LED と光電子増倍管をセットした。LED を中心に、8 本の光電子増倍管を設置し、それぞれの光電子増倍管はマジックテープで固定する。



(2) LED には散乱キャップ (図手前の白い被せ物) を取り付け、光が等方的に放出されるようにした。また高さがほぼ光電面の中心に来るようにした。

図 6.2: 実際の測定セットアップ

6.3.2 基本的な測定手順

パルスジェネレータからの信号をトリガにして、LED とゲートジェネレータに入力することによって、LED が点灯したタイミングで光電子増倍管の信号を CAMAC ADC を使って読み取った。

パルスジェネレータから、幅 20 ns、周波数 200 Hz、高さ 3.2 V のパルス信号を入力し LED を点灯させた。またパルス信号と同期して出力されている TTL 信号を、レベルアダプターを通し NIM 信号へ変換させた後、ゲートジェネレータへと入力した。ゲートジェネレータからは幅 60 ns のゲート信号を出力し、CAMAC ADC に入力した。

シグナル、ペDESTALそれぞれ 10000 イベントのデータを取得した。ペDESTALの測定は LED へのパルスを OFF にした状態²で行い、シグナルを測定する前に毎行行った。

図 6.3 にオシロスコープで確認した信号の波形と、その測定の際に得られた ADC 分布を示す。

6.4 等方性・再現性の測定

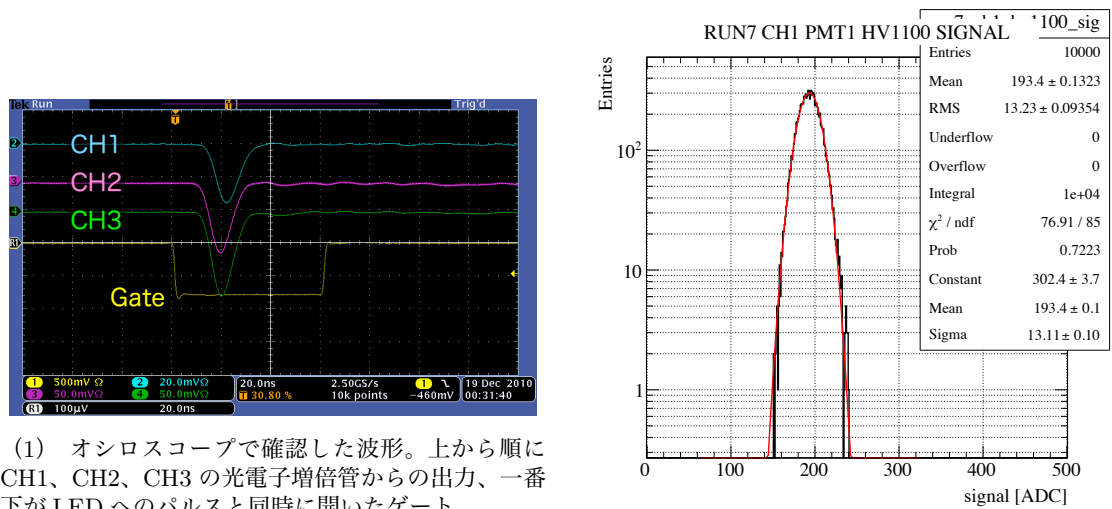
全ての光電子増倍管の相対的量子効率・電流増幅率曲線の測定を行う前に、前述した設定の下、LED から放出される光量の等方性、また本セットアップの測定の再現性を確認した。

まず、光電子増倍管を適当に 2 本選択した。1 本 (PMT1) は LED からの光量をモニターする参照用として図 6.1 の CH1 に固定し、残りの 1 本 (PMT2) を、CH2 から CH8 まで順番に移動させて、光量の測定を行った。このとき、PMT1、PMT2 の印加電圧はともに 1100 V に設定した。

実験原理で説明した方法で求めた各位置 (=CH) での光電子数を、PMT1 の光電子数で規格化する。

$$\text{規格化した光電子数 } R_{p.e.} \equiv \frac{\text{PMT2 で観測した光電子数}}{\text{PMT1 で観測した光電子数}} \quad (6.14)$$

²この状態でも 200Hz で TTL 信号が出ている



(1) オシロスコープで確認した波形。上から順に CH1、CH2、CH3 の光電子増倍管からの出力、一番下が LED へのパルスと同時に開いたゲート

(2) 左図のときに得られた CH1 の光電子増倍管の ADC 分布。黒線：実測値、赤線：ガウス関数でフィットした曲線

図 6.3: 測定データ

PMT1 の光電子数で規格化することにより、LED から放出される光子数の測定ごとの不定性を抑えるようにした。

各 CH での $R_{p.e.}$ を比較することによって、光量の等方性を確認した。また、CH2 から CH8 までの測定を 1 回として複数回測定を行うことにより、本セットアップの再現性を確認した。

6.4.1 等方性と再現性

上記の測定を 5 回測行つた結果を図 6.4 にまとめた。横軸を CH 番号（光電子増倍管を固定した場所）、縦軸を $R_{p.e.}$ にしてプロットした。線の色の違いは、それを測定したセット番号を表している。

図 6.4 から、各 CH での 5 回の測定結果は統計誤差の範囲でほとんど一致していることが分かる。これより、LED からの光量は等方的ではないが、再現する位置依存性があることが分かる。そこで、位置による光量の違いを補正する数を次に述べるように定義した。

場所による光量補正係数

光電子増倍管の設置場所による光量の補正係数を表 6.1 にまとめた。場所による光量補正係数は図 6.4 の 5 回の測定で得られた設置場所ごとの $R_{p.e.}$ の平均値で定義した。また再現性は、その平均値周りの標準偏差の大きさの割合で評価した。相対的量子効率を求める際は、この補正係数を考慮して算出する。

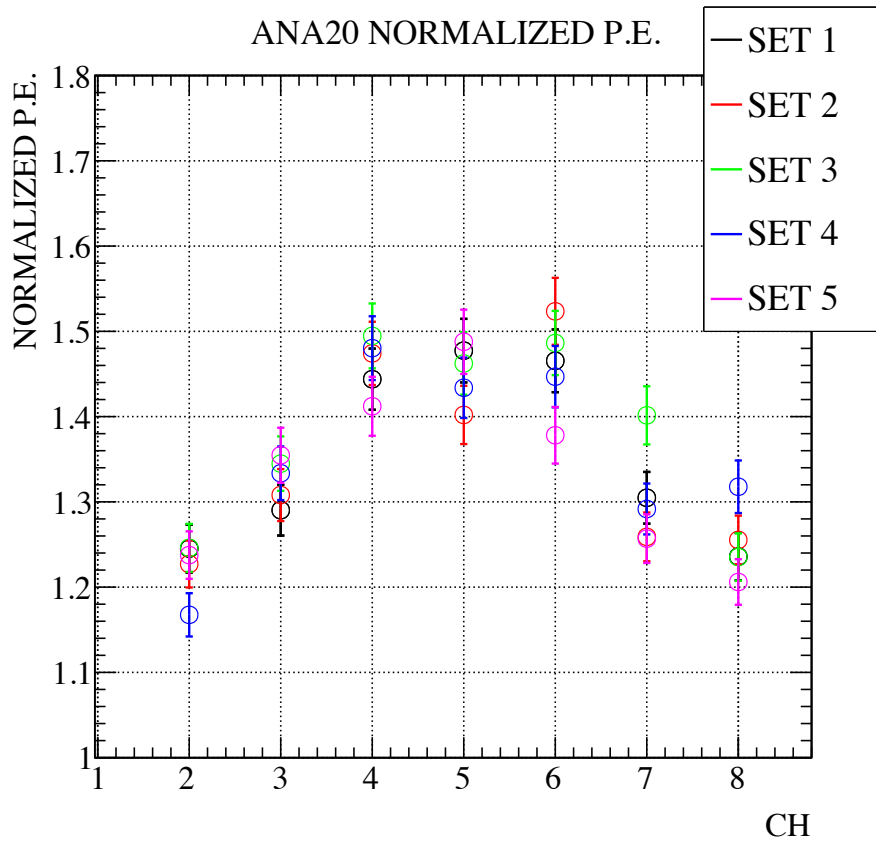


図 6.4: 等方性と再現性の確認。横軸に光電子増倍管を置いた場所、縦軸に規格化した光電子数をプロットした。線の色は測定セットの違いを表す。5セット分の測定が同じような分布をしていることから位置依存性があることが分かる

表 6.1: 光電子増倍管設置場所での光量補正係数

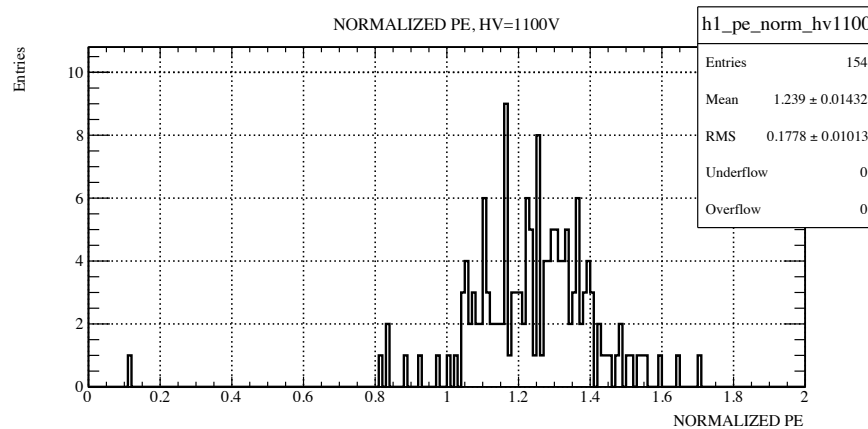
設置場所	2	3	4	5	6	7	8
補正係数	1.22	1.33	1.46	1.45	1.46	1.30	1.25
再現性 (%)	2.40	1.80	2.02	2.15	3.30	4.05	2.99

6.5 相対的量子効率・電流増幅率曲線の測定

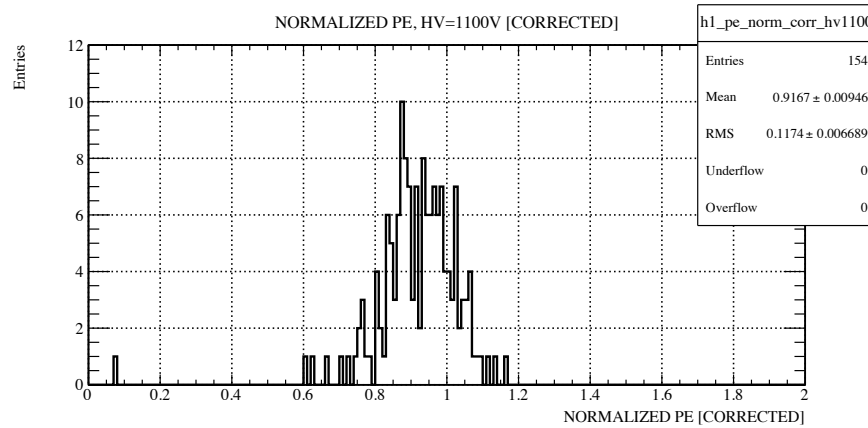
等方性・再現性確認のときに使用した光電子増倍管 (PMT1) を引き続き光量モニター用光電子増倍管として使用し、154本の光電子増倍管の測定を行った。基本的な測定手順はこれまでと同様である。

ただし、今回は一度に7本ずつ (PMT1は除く) 測定を行い、印加電圧に対する電流増幅率を調べるために、印加電圧を1000 Vから1300 Vまで50 V刻みで変化させて測定を行った³。7本の光電子増倍管を、1000 Vから1300 Vまで測定することを1ランと呼ぶことにする。

6.5.1 相対的量子効率



(1) 光量補正前: Mean=1.239, RMS=0.1778



(2) 光量補正後: Mean=0.9167, RMS=0.1174

図 6.5: 規格化された光電子数分布。光量補正を行うことによって、分布の幅 (RMS) が $0.1778 \rightarrow 0.1174$ と良くなっている。

³PMT1 は光量モニターの役割があるため常に 1100 V を印加した

図 6.5 は、印加電圧 1100 V で測定した全光電子増倍管の $R_{p.e.}$ の分布を示す。図 6.5 (1) に表 6.1 を用いて場所による光量補正を行うと図 6.5 (2) になる。

光量補正を行うことによって、 $R_{p.e.}$ は平均値は $1.22 \rightarrow 0.92$ に変化し、標準偏差は $0.17 \rightarrow 0.12$ と改善した。補正後の結果から、相対的量子効率のばらつきは 13%程度である。

6.5.2 電流増幅率曲線

光電子増倍管の印加電圧を 1000 V から 1300 V まで 50V 刻みで変化させながら、全部で 154 本の光電子増倍管に対して上記の測定を行った。図 6.7、図 6.8 はその測定で得られた、各印加電圧での全光電子増倍管の電流増幅率分布を示す。これらのプロットから印加電圧 1100 V~1250 V の範囲で平均して $1 \sim 2 \times 10^6$ 程度の電流増幅率が得られることが分かった。

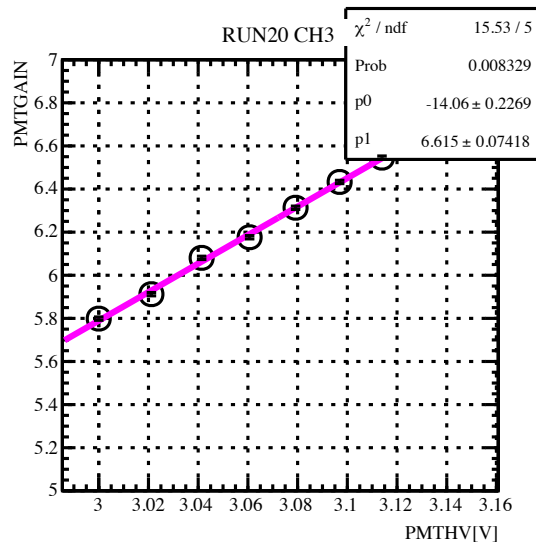
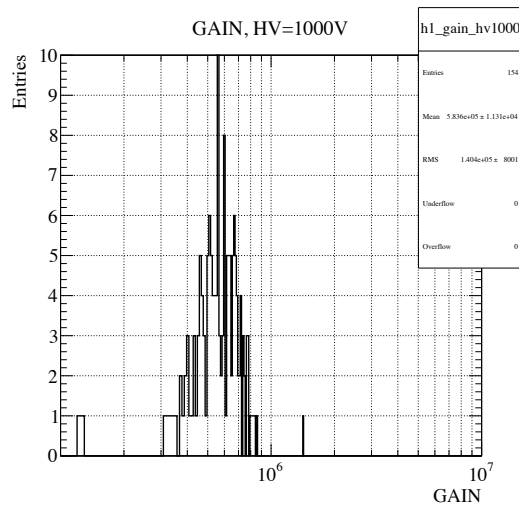


図 6.6: 電流増幅率曲線のフィッティング。横軸に印加電圧、縦軸に電流増幅率を取り、両対数グラフにプロットした。フィッティング関数に $y = Ax + B$ を使用した。

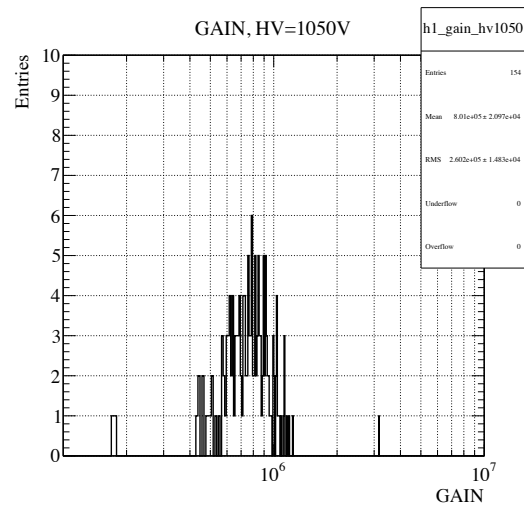
また、各印加電圧で計算した電流増幅率、横軸を印加電圧、縦軸を電流増幅率とした両対数軸にプロットし、直線 $y = Ax + B$ でフィッティングを行った結果の一例を図 6.6 に示す。このフィットから得た係数 A, B および、前述した相対的量子効率を考慮した上での、各光電子増倍管ごとに必要とされる電流増幅率から、その光電子増倍管に最適な印加電圧を逆算してもとめる。

今回フィットがうまくできなかつたり、測定がうまくできなかった光電子増倍管については今後再試験をする予定である。

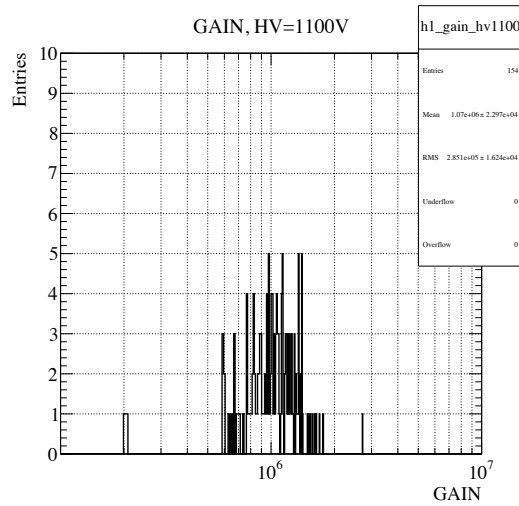
第6章 光電子増倍管のキャリブレーション



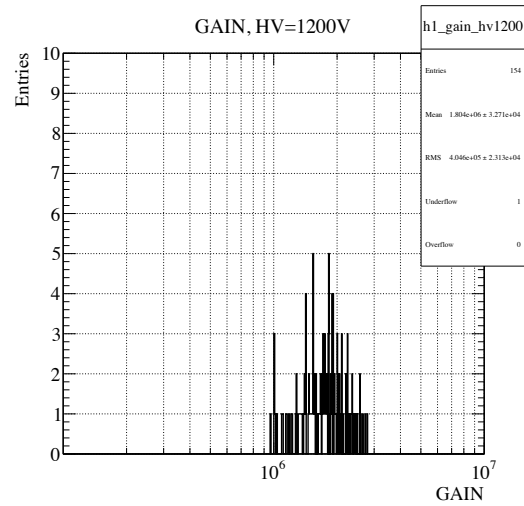
(1) 印加電圧 1000 V : Mean = 5.8×10^5 、RMS = 1.4×10^4



(2) 印加電圧 1040 V : Mean = 8.0×10^5 、RMS = 2.6×10^5



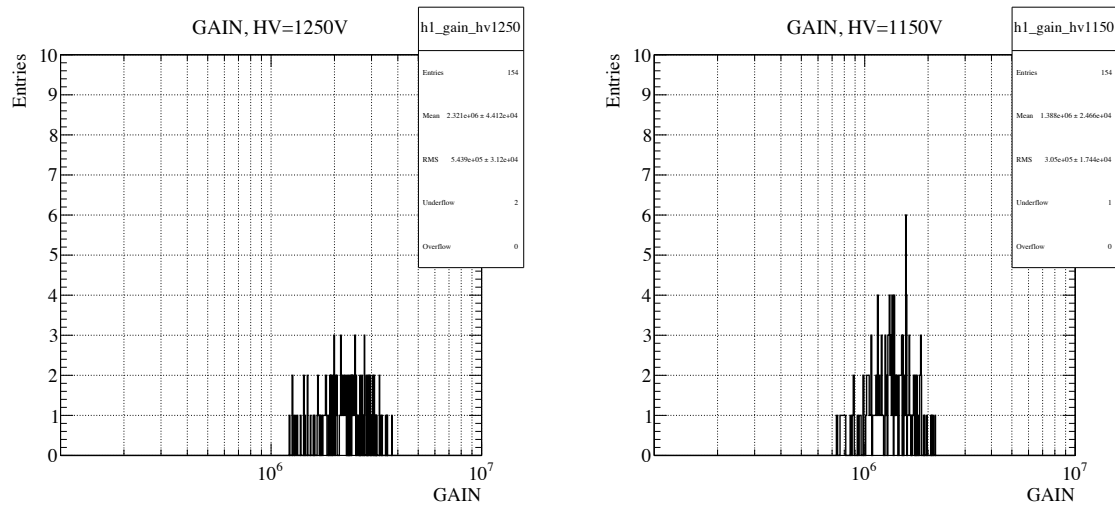
(3) 印加電圧 1100 V : Mean = 1.7×10^6 、RMS = 2.9×10^5



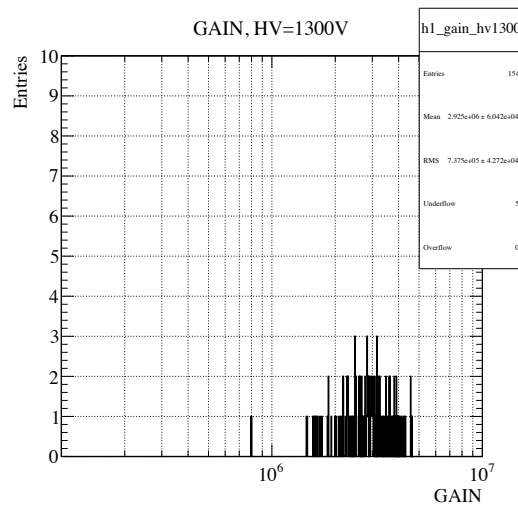
(4) 印加電圧 1200 V : Mean = 1.8×10^6 、RMS = 4.1×10^5

図 6.7: 印加電圧別の電流増幅率分布 1

第6章 光電子増倍管のキャリブレーション



(1) 印加電圧 1250 V : Mean = 2.3×10^6 、RMS = 5.4×10^5 (2) 印加電圧 1150 V : Mean = 1.4×10^6 、RMS = 3.1×10^5



(3) 印加電圧 1300 V : Mean = 2.9×10^6 、RMS = 7.4×10^5

図 6.8: 印加電圧別の電流増幅率分布 2

6.5.3 印加電圧と光量の関係の問題点

図 6.9 はラン 20 の各 CH に対して、横軸を印加電圧、縦軸を光量としてプロットした図である。光量モニター用の光電子増倍管（図左上）は一定の光量を観測しているにも関わらず、その他の光電子増倍管では、印加電圧を大きくすると光量が下がる傾向があるように見える。

原因の特定はできておらず、現在まだスタディ中の項目である。

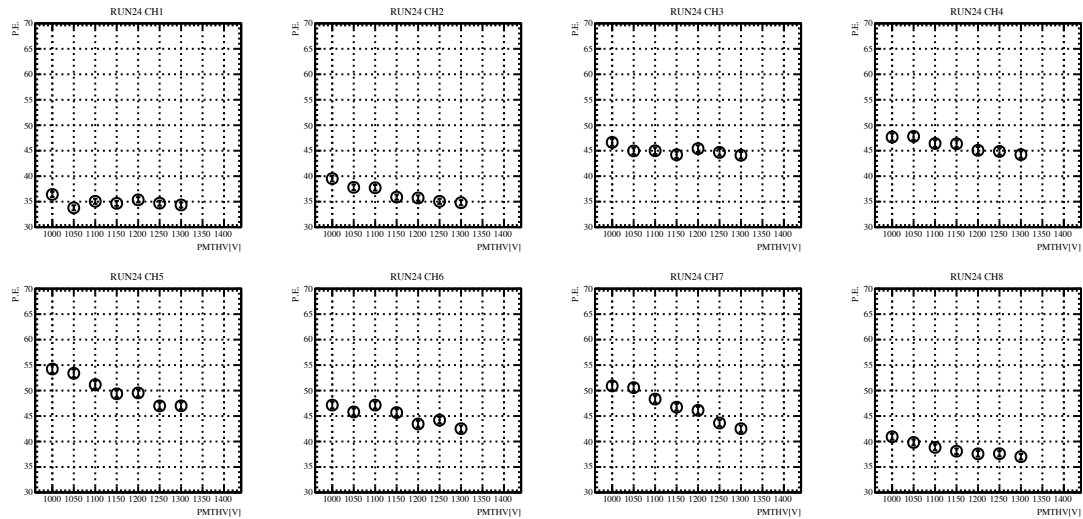


図 6.9: 印加電圧と光量の関係

本測定の測定原理のところに書いたように、今回は式 (6.6) のように測定した ADC 分布の Mean と RMS から、入射光電子数を計算する。印加電圧が大きい場所で、この Mean と RMS の線型性が違っていたら、光量が変わってくるため、LED の光量を少なくして測定することを検討している。

第7章 まとめ

本研究では、T2K 実験前置検出器ホールにて開発中の小型水チェレンコフ検出器 “Mizuche” の開発を行った。検出器シミュレーションによる期待される性能評価と、強度解析・耐震解析の結果を踏まえた実機の構造の決定ならびに製作、そして、使用する光電子増倍管の相対的量子効率・電流増幅率の測定を行った。

Mizuche 検出器は、水とニュートリノの反応によって生じる荷電粒子（主にミュオン）が放出するチェレンコフ光を、周りに設置した光電子増倍管で検出することによって、ニュートリノを観測する水チェレンコフ光検出器である。

T2K 実験の後置検出器であるスーパーカミオカンデと同じニュートリノ反応標的（水）と検出原理（チェレンコフ光）を持つ本検出器により振動前のニュートリノ反応数を測定することにより、スーパーカミオカンデへの外挿を系統誤差を小さく抑えて行うことこそ最終目標としている。

本検出器は有効体積 0.5 トンの内タンク（FV）と一回り大きい外タンク（OV）を同軸上に配置した 2 層構造をしている。外タンクと内タンクの間には 300 mm のバッファ層を設け、FV の端で起こったニュートリノ反応によるミュオンでも十分なチェレンコフ光を発生させることができるようになっている。FV と OV は物理的に区切られており、その内部の水はそれぞれ独立して充填することが可能である。そのため、FV の水だけを抜き差しして測定を行うことが可能である。

本検出器の測定原理は、FV 水ありと、FV 水なしの 2 状態で測定を行い、その残差を FV で起きたニュートリノ反応数として計数することである。これは 2 状態の差をとることにより、OV での反応は相殺し、FV での反応だけが残るからである。ただし、この測定原理が成り立つためには、2 状態の OV でのニュートリノ反応検出効率が一致している必要がある。

そこで、ニュートリノ反応に対する検出器シミュレーションを行い、2 状態の OV の検出効率をそれぞれ見積もった。その結果、期待される総光量に対するカットを 150 p.e. に設定すると、2 状態の OV の検出効率はよく一致し、測定原理が成り立つことを示すことができた。またその際に、シグナルに対する OV 混入イベントの割合を 3% 程度にまで抑えて測定することが可能だということが分かった。

次に強度・耐震性の確認を行いながら、検出器の詳細設計を行った。強度・耐震性の解析には ANSYS という強度解析ツールを使用した。材料の引張強度に対して安全係数を 3 に設定した設計を行い、業者に製作を依頼した。検出器を満水試験による変形量は、ANSYS で得られた結果とほぼ同じ結果を示した。強度の安全性は問題ないと判断し、検出器を前置検出器ホール地下 2 階へインストールした。

光電子増倍管のキャリブレーションに関しては、必要数 164 本に対して、現在までに 153

本の相対的量子効率、電流増幅率曲線の測定を終えた。本測定のセットアップの再現性による光量補正を行った結果、相対的量子効率は13%程度のばらつきがあることが分かった。今後は、合わせて測定した電流増幅率曲線を利用して、電流増幅率の制御を行い、ある入射光量に対して全ての光電子増倍管からの出力が一樣となるよう印加電圧の調整を行う予定である。

今後の予定として、まず、検出器への光電子増倍管取り付けやケーブリングなどのアセンブリー作業を完了させる。次に、LED光源を用いた検出器応答のキャリブレーションや、ニュートリノビーム由来の壁からのミュオンを用いた光量キャリブレーションなどの作業を行う。そして、FV水ありの状態でのニュートリノ反応数の測定を開始し、十分なデータを取得できた後は、水なしの状態での測定を開始する。そして、T2K実験の大強度ビームに対する小型水チェレンコフ検出器の実用性の検証、および前置検出器部分でのニュートリノ反応数測定精度2%を目指したい。

謝辞

修士課程の2年間は、とても短く感じられましたが、多くの方々に支えられて、充実した日々を送ることができました。ここに感謝の意を表したいと思います。本当にありがとうございます。

中家剛教授、市川温子准教授、そして小林隆教授には、T2K 実験という世界最先端の実験場で本研究の機会を与えてくださったことに感謝いたします。

特に、市川温子准教授には、のんびりな私を要所要所で引き締めていただき、根気よく丁寧にご指導いただいたことを深く感謝しております。

坂下健助教には、本研究を進める上でとてもたくさんのご助言をいただきました。また、研究者としての姿勢を間近で学ばせていただきました。村上明さんには、検出器シミュレーションをはじめ、本研究の至る所でたくさんお世話になりました。山内隆寛くん、年末の光電子増倍管の測定を手伝っていただいのおかげで、測定をほぼ終わらせることができました。本当にありがとう。

検出器の作製に関して、スズノ技研株式会社の皆様に本当に感謝しております。できあがった検出器を初めて見たときの嬉しさはいまでも忘れません。本当にありがとうございます。

検出器のインストールや地下での作業には第一鉄工株式会社の皆様に大変お世話になりました。いろいろと急なお願いが多いにも関わらず、引き受けてくださり本当にありがとうございます。

メカサポートの田井野ご夫妻と石井さんには、光電子増倍管の準備およびコネクタ付けの際には大変お世話になりました。本当にありがとうございます。

J-PARCでの生活では、大谷将士さん、木河達也くん、鈴木研人くん、矢野孝臣さん、とたまに来る松村知恵さんのおかげで、楽しく過ごせました。大谷さんは、何かと研究の進捗を気にかけて下さり、アドバイスなどもたくさんしていただきました。ありがとうございます。

最後に、これまで研究生生活を支えてくれた家族と最愛の人に心から感謝します。本当にありがとう。

2011年1月 吉日
高橋 将太

参考文献

- [1] Ziro Maki, Masami Nakagawa, and Shoichi Sakata. Remarks on the unified model of elementary particles. *Prog. Theor. Phys.*, Vol. 28, pp. 870.880, (1962).
- [2] Y. Ashie, et al. A Measurement of Atmospheric Neutrino Oscillation Parameters by Super-Kamiokande I. *Phys. Rev.*, Vol. D71, p. 112005, (2005).
- [3] M. H. Ahn, et al. Measurement of Neutrino Oscillation by the K2K Experiment. *Phys. Rev.*, Vol. D74, p. 072003, (2006).
- [4] D. G. Michael, et al. Observation of muon neutrino disappearance with the MINOS detectors and the NuMI neutrino beam. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 97, p. 191801, (2006).
- [5] J. Hosaka, et al. Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-I. *Phys. Rev.*, Vol. D73, p. 112001, (2006).
- [6] B. Aharmim, et al. Electron energy spectra, fluxes, and day-night asymmetries of B-8 solar neutrinos from the 391-day salt phase SNO data set. *Phys. Rev.*, Vol. C72, p. 055502, (2005).
- [7] S. Abe, et al. Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 100, p. 221803, (2008).
- [8] M. Apollonio et al. (CHOOZ Collaboration). Search for neutrino oscillations on a long base-line at the chooz nuclear power station. *Eur. Phys. J.*, Vol. C27, p.331, (2003).
- [9] Y. Itow et al., “The JHF-Kamioka neutrino project,” arXiv:hep-ex/0106019
- [10] 浜松ホトニクス, 「光電子増倍管 — その基礎と応用 — 日本語版/第 3a 版」.