

修士論文

KamLAND2-Zen に向けた集光ミラーの性能評価

Performance Evaluation of Light Collecting Mirror for KamLAND2-Zen

東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻

藤本 佑里

2025 年

## 概要

ニュートリノは素粒子の一種であり、他の素粒子と比較して極めて小さな質量をもつことが知られている。ニュートリノのみが非常に軽い質量を有する理由については未解明な点が多く、その仮説の一つとして、ニュートリノが自身の反粒子であるとするマヨラナ性が提唱されている。この性質は現在に至るまで実験的に証明されていないが、その検証手法の一つとして、KamLAND-Zen 実験ではニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) 事象の探索が行われている。本実験は、 $^{136}\text{Xe}$  の二重  $\beta$  崩壊に伴う液体シンチレータの発光を光電子増倍管 (PMT) で検出するものである。これまでに  $0\nu\beta\beta$  信号は観測されておらず、検出感度向上のためにエネルギー分解能の改善を目的とした KamLAND2-Zen 実験が計画されている。

KamLAND2-Zen 実験では、集光量の増加によるエネルギー分解能の向上を通じて背景事象を低減し、 $0\nu\beta\beta$  信号に対する感度の向上が期待されている。そのための改良案の 1 つが、PMT に集光ミラーを取り付けるというものである。長年にわたって集光ミラーの形状および素材に関する検討が行われてきたが、いまだ開発途上の段階であり、本研究では、集光ミラーの素材および形状について、その完成形をまとめる。

まず、集光ミラーの素材候補について反射率測定を行い、集光ミラーとして適切な素材の選定を行った。集光ミラーは PET ミラーとシートミラーの 2 層から成る構造であり、それぞれについて入射角を変化させたときの反射率を評価し、反射率の要求値を満たすものを選定した。

次に、油中環境におけるミラーサンプルの長期性能安定性について検証を行った。集光ミラーは、バッファオイルと呼ばれる油層内に設置される予定であり、一度インストールされると年単位での長期運用が想定されている。そのため、長期間にわたる油耐性を評価することが不可欠である。本研究では、加速劣化試験と呼ばれる、サンプルの劣化を意図的に加速させる試験手法を用い、ミラーの反射率およびバッファオイルの透過率の二項目について性能評価を行った。

さらに、各種要求条件を満たした素材を用いて六角形集光ミラーの試作を行い、PMT に取り付けられた際の集光率の変化を評価した。本章では、集光率測定に加え、集光ミラーの製作や KamLAND 検出器へのインストール試験など、実際の作業に関連する事項についても述べる。集光率測定では、シンチレータ球からの発光を離れた位置に設置した PMT で測定し、フォトンカウンティング法を用いて平均光電子数を算出した。これらの結果を、ミラー非装着時および装着時と比較することにより、集光ミラーによる集光率を評価した。

最後に、シミュレーションによる集光率評価を行った。まず、集光率測定の結果の妥当性を検証するために、測定系と同じセットアップでシミュレーションを実施した。ミラーの反射には、実際のミラー性能を反映するためにスケール化した理論値を用いた。シミュレーション値と実測値の比較を行ったのち、KamLAND2-Zen 検出器全体における集光率シミュレーションを発光点の位置を変えて行った。

# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>ニュートリノ物理</b>	<b>1</b>
1.1	ニュートリノと素粒子	1
1.2	ニュートリノ振動	2
1.2.1	太陽ニュートリノ問題	2
1.2.2	大気ニュートリノ異常	3
1.2.3	ニュートリノ振動	3
1.3	ニュートリノ質量	5
1.3.1	質量階層性	6
1.3.2	ニュートリノの絶対質量	6
1.4	マヨラナニュートリノ	7
1.4.1	ディラック粒子とマヨラナ粒子	7
1.4.2	シーソー機構	8
1.4.3	ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊	8
1.4.4	$0\nu\beta\beta$ 探索	9
<b>第 2 章</b>	<b>KamLAND</b>	<b>11</b>
2.1	KamLAND 実験	11
2.1.1	KamLAND 検出器	11
2.1.2	KamLAND 実験の成果	16
2.2	KamLAND-Zen 実験	17
2.2.1	KamLAND-Zen 検出器	17
2.2.2	KamLAND-Zen 実験の成果	19
2.2.3	KamLAND-Zen 実験のバックグラウンド	21
2.3	KamLAND2-Zen 実験	23
2.3.1	KamLAND2-Zen 検出器	24
2.3.2	KamLAND2 プロトタイプ検出器	26
<b>第 3 章</b>	<b>集光ミラー素材の反射率測定</b>	<b>29</b>
3.1	集光ミラーの形状開発	29

3.1.1	これまでの開発状況	29
3.1.2	従来仕様からの変更点	31
3.2	ミラーサンプルの詳細	33
3.3	反射率測定	34
3.3.1	測定のセットアップ	34
3.3.2	測定方法	35
3.3.3	誤差測定	36
3.3.4	測定結果	37
<b>第 4 章</b>	<b>集光ミラー素材の耐油試験</b>	<b>43</b>
4.1	加速劣化試験	43
4.2	透過率測定	44
4.2.1	測定のセットアップ	44
4.2.2	測定方法	44
4.3	測定結果	45
4.3.1	反射率	45
4.3.2	透過率	45
<b>第 5 章</b>	<b>六角形ミラーの集光率評価</b>	<b>49</b>
5.1	集光ミラーの製作	49
5.1.1	PET ミラー	49
5.1.2	シートミラー	50
5.2	集光ミラーのクリーン化処理	53
5.2.1	評価方法	53
5.2.2	評価結果	54
5.3	集光率測定	55
5.3.1	測定方法	55
5.3.2	集光ミラーのインストール	55
5.3.3	解析方法	56
5.3.4	誤差測定	63
5.3.5	測定結果	65
5.4	ミラー取り付けに関する試験	66
5.4.1	PMT 浮力試験	66
<b>第 6 章</b>	<b>シミュレーションによる集光率評価</b>	<b>73</b>
6.1	集光率測定のシミュレーション	73
6.1.1	シミュレーションの概要	73
6.1.2	LS 球の座標計算	74
6.1.3	ミラーの反射率計算	75

---

6.1.4	反射モデルのスケール化 . . . . .	77
6.1.5	誤差評価 . . . . .	80
6.1.6	シミュレーション結果 . . . . .	80
6.2	KamLAND2-Zen 検出器でのシミュレーション . . . . .	81
6.2.1	シミュレーションの概要 . . . . .	81
6.2.2	反射モデルのスケール化 . . . . .	82
6.2.3	シミュレーション結果 . . . . .	82
第 7 章	結論	85
付録 A	ミラー開発の諸々	87
A.1	3D データ変換方法 . . . . .	87
A.2	PET ミラーの成型および蒸着 . . . . .	87
付録 B	理論反射モデル	89
B.1	反射率計算 . . . . .	89
謝辞		91



# 目次

1.1	標準模型を構成する素粒子	2
1.2	KamLAND 実験で得られた原子炉ニュートリノの振動	5
1.3	二重 $\beta$ 崩壊のファインマンダイアグラム	9
2.1	KamLAND 検出器周辺の構造	12
2.2	KamLAND 検出器の概略図	13
2.3	17 インチ PMT と 20 インチ PMT の概略図	14
2.4	R3600-06MOD の概略図	16
2.5	KamLAND-Zen 検出器の概略図	17
2.6	ミニバルーンの概略図	19
2.7	KamLAND-Zen 400 で得られたエネルギースペクトル	20
2.8	KamLAND-Zen 800 から得られた結果	21
2.9	二重 $\beta$ 崩壊における電子のエネルギースペクトル	21
2.10	$^{10}\text{C}$ の生成過程	22
2.11	$^{238}\text{U}$ 系列の崩壊過程	23
2.12	ミニバルーンにおける $^{214}\text{Bi}$ の崩壊のイメージ図	24
2.13	KamLAND2-Zen 検出器のイメージ図	25
2.14	PMT の量子効率	26
2.15	Bis-MSB による発光波長シフト	27
2.16	KamLAND2 プロトタイプ検出器の概略図	27
3.1	円形ミラーのイメージ	30
3.2	ステンレスフレーム内の構造	30
3.3	各菱形におけるミラー形状	31
3.4	多角形ミラーのイメージ	31
3.5	ミラーの高さ変更イメージ	32
3.6	集光ミラー	33
3.7	分割型 PET ミラー	33
3.8	ミラーサンプルの構造	34
3.9	ミラーサンプルの写真	35

3.10	反射率測定装置のセットアップ	35
3.11	円柱容器	36
3.12	サンプル固定用治具	36
3.13	反射率の系統誤差測定の実データ	37
3.14	BO 中の反射率測定の波長依存性	38
3.15	空気中の反射率測定	39
3.16	BO 中の反射率測定	40
3.17	PET ミラーサンプルの入射角ごとの BO 中の反射率測定結果	41
3.18	シートミラーサンプルの入射角ごとの BO 中の反射率測定結果	41
4.1	サンプルの保管方法	44
4.2	透過率測定装置のセットアップ	44
4.3	1cm セルと 10cm セル	44
4.4	加速劣化試験後の反射率	45
4.5	加速劣化試験後の透過率測定結果	46
4.6	Kam-BO のみの透過率と試料の透過率の比較	46
4.7	加速劣化試験で得られたミラーによる劣化度	47
4.8	KamLAND 環境に規格化した透過率	48
5.1	ミラー片の切れ込みとリベット穴	50
5.2	ミラー片をクリップとリベットで固定した後	50
5.3	組み立て後の六角形 PET ミラー	50
5.4	六角形 PET ミラーの表面状態	51
5.5	カッティングプロッター	51
5.6	カット後のシートミラー	52
5.7	シートミラー同士を接続した様子	52
5.8	組み立て後のシートミラー	53
5.9	サンプル拭き取り後の加速劣化試験の反射率測定	54
5.10	サンプル拭き取り後の加速劣化試験の透過率測定	54
5.11	集光率測定のセットアップ	55
5.12	集光率測定の回路図	56
5.13	PET ミラーとシートミラーの固定	57
5.14	アクリルプレート	57
5.15	ロープによるミラーの固定	58
5.16	PMT にミラーを取り付けた図	58
5.17	生の信号データ	61
5.18	20 インチ PMT および 2 インチ PMT の T 分布図	61
5.19	20 インチ PMT の Q 分布図	63

---

5.20	PET ミラーの集光率測定の測定パターン	64
5.21	集光率測定で光源から見た PMT とミラーの様子	67
5.22	セットアップを KamLAND 検出器に置き換えた場合の位置関係	68
5.23	PMT にステンレスサポートをつけた図	68
5.24	PMT をステンレスの枠組みに固定した図	68
5.25	PMT 浮力試験の様子	69
5.26	ミラーの取り付け作業の様子	69
5.27	PET ミラーインストール試験後	70
5.28	ステンレスフレームとの距離が近いミラー	70
5.29	一体となったシートミラーの取り付け	71
5.30	改良後の繋げたシートミラー	71
6.1	集光率測定シミュレーションのセットアップ	74
6.2	角度をつけた集光率測定の暗箱内の位置関係	75
6.3	金属反射モデルの反射率計算	76
6.4	金属反射モデルの構造	77
6.5	金属反射モデルによる反射率計算の入射角依存性	77
6.6	SiO <sub>2</sub> + Al モデルの反射率の膜厚依存性	79
6.7	金属反射モデルのフィッティング	80
6.8	集光率測定のシミュレーション値と実測値の比較	81
6.9	KL2 シミュレーションで得られた集光率のプロット	84
6.10	KL2 シミュレーションの発光位置	84
A.1	PET ミラー制作風景	88



# 表目次

2.1	Kam-LS の組成	12
2.2	バッファオイルの組成	14
2.3	17 インチ PMT と 20 インチ PMT の性能	15
2.4	OD に取り付けられた 20 インチ PMT の性能	15
2.5	KamLAND-Zen 800 実験における XeLS の構成要素	18
2.6	濃縮 Xe 中の同位体濃縮比	18
3.1	PET ミラーの素材や特徴	34
3.2	シートミラーの素材や特徴	34
3.3	Kam-BO の組成	36
3.4	空気中の反射率測定 of 系統誤差	38
3.5	BO 中の反射率測定 of 系統誤差	38
3.6	各サンプルの入射角 45 度における反射率	40
4.1	波長 390nm における恒温槽保管前と比較した透過率の減少値	46
4.2	ミラー表面積 $S$ 、BO 体積 $V$ および $S/V$ 比の一覧	47
5.1	ミラーなしの集光率測定 of 系統誤差	64
5.2	PET ミラーの集光率測定 of 系統誤差	65
5.3	PET ミラー + シートミラーの集光率測定 of 系統誤差	65
5.4	PET ミラーおよびシートミラー取り付け時の集光率	66
5.5	六角形集光ミラーの角度依存性	66
6.1	集光率測定 of シミュレーションにおける角度ごとの光源の位置	75
6.2	金属反射モデルのスケールファクター決め of 条件	79
6.3	シミュレーションによる六角形ミラーの集光率 of 角度依存性	81
6.4	KamLAND2-Zen 検出器における集光率シミュレーション of 発光位置依存性	83



# 第 1 章

## ニュートリノ物理

### 1.1 ニュートリノと素粒子

この世界には、陽子、中性子などをさらに分解して表れる極小の粒子が存在する。このような粒子を素粒子といい、これ以上分割できない最小単位の粒子である。現在発見されている素粒子は全部で 17 種類で、それぞれさまざまな特徴を持っており、素粒子同士で力を及ぼしあったりする。これらの粒子の性質や粒子間に働く相互作用などを記述する学問を素粒子物理学という。現在素粒子を体系的に記述する理論として最も有力なのが「標準理論」である。標準理論において、素粒子は大きく分けてフェルミオンとボソンの 2 種類に分けられる。前者が物質を構成する粒子であり、これらはさらにクォークとレプトンに分けられる。後者は、フェルミオン間の力を媒介する粒子であり、4 つの基本相互作用のうち、電磁相互作用、強い相互作用、弱い相互作用の 3 つを担う。我々が観測しているニュートリノは、レプトンに分類される素粒子であり、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 3 種類が存在する。

ニュートリノは、1930 年にパウリによって存在が理論的に予言された粒子である [1]。当時、 $\beta$  崩壊で放出される電子のエネルギー分布が連続的であるという実験結果が得られており、 $\beta$  崩壊は 2 体崩壊と考えられていたため、エネルギー保存則が破れているように思われた。そこでパウリは、 $\beta$  崩壊で電子とともに電氣的に中性な未知の粒子が放出されているという仮説を立てた。その後、1932 年にフェルミはこの仮説を  $\beta$  崩壊の理論の中に取り入れ、中性粒子を「ニュートリノ」と名付けた。

しかし、ニュートリノは電氣的に中性で、他の粒子との相互作用が弱いため、実験的な観測が難しい。ニュートリノが初めて実験的に観測されたのは 1956 年で、フレデリック・ライネスとクライド・カウアンにより行われた原子炉ニュートリノ検出実験である [2]。サウスカロライナ州にある原子力発電所の核分裂反応で生成された反電子ニュートリノを、逆  $\beta$  崩壊を利用して検出した。これにより、パウリの提案から四半世紀以上を経てニュートリノの存在が実証され、ニュートリノ観測実験の幕開けとなった。

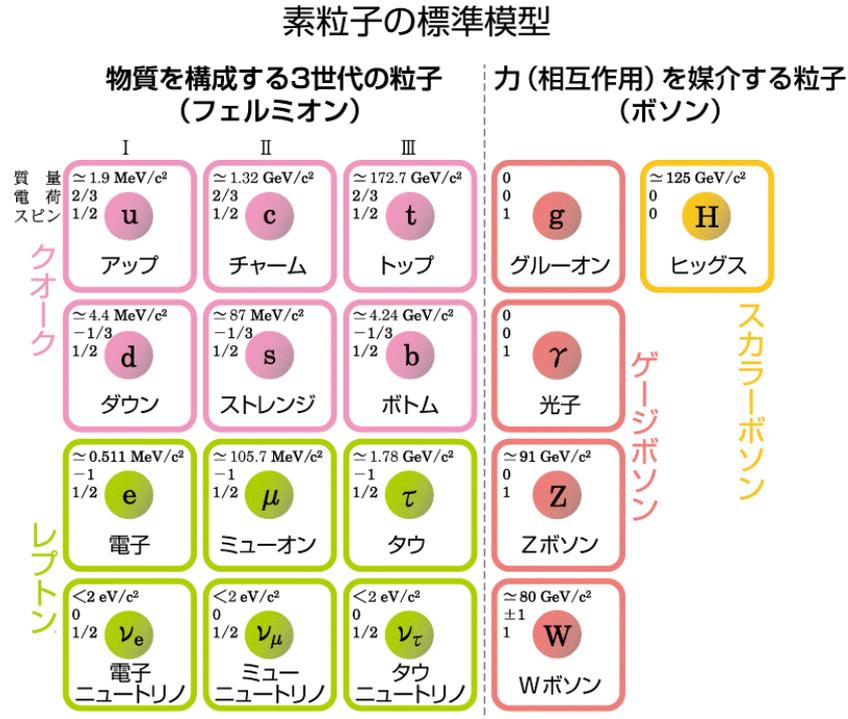


図 1.1: 標準模型を構成する素粒子 [3]

## 1.2 ニュートリノ振動

ニュートリノ観測実験が進む中で特に重要な成果の1つがニュートリノ振動の発見である。これにより、質量をもたないとされてきたニュートリノが質量をもつと明らかになり、標準理論を超えるさらなる理論形態の構築が必要となった。

### 1.2.1 太陽ニュートリノ問題

太陽ニュートリノは、太陽内部で進行する核融合反応によって生成される。太陽は、水素をヘリウムに変換する pp 連鎖反応により主なエネルギーを生み出しており、この過程でニュートリノを放出する。



単体の pp 反応 ( $p + p \longrightarrow d + e^+ + \nu_e$ ) で生成されるニュートリノは最大エネルギーが 0.42MeV 程度である。また、 ${}^7\text{Be}$  や  ${}^8\text{B}$  からニュートリノが放出されるが、これらのエネルギーは、pp 連鎖反応で放出されるニュートリノより比較的高エネルギーである。



太陽ニュートリノの観測は理論予測と測定したニュートリノフラックスの比較で進められてきた。1960年代に行われたホームステイク実験では、615トンのテトラクロロエチレンを用いた塩素検出器で、太陽ニュートリノと $^{37}\text{Cl}$ の逆 $\beta$ 崩壊を観測した[4]。しかし、この実験の測定結果は理論で予測された値の3分の1しかなく、これは「太陽ニュートリノ問題」として長年研究が進められることになった。

### 1.2.2 大気ニュートリノ異常

大気ニュートリノとは、宇宙線が大気原子核と反応してパイオンの連鎖崩壊が起こった際に放出されるニュートリノである。

$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (1.4)$$

$$\pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad \mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad (1.5)$$

この反応では、 $\nu_\mu$ と $\nu_e$ がおおよそ2:1の比で生成される。しかし、水チェレンコフ光検出器を使ったスーパーカミオカンデ実験による観測では、 $\nu_e$ は理論予測にほぼ一致する一方、 $\nu_\mu$ が予測より少ないことが確認された[5]。また、ニュートリノの到来方向に依存する上下非対称性も観測された。これらの不可解な現象は、大気ニュートリノ異常と呼ばれるようになった。

### 1.2.3 ニュートリノ振動

太陽ニュートリノ問題や大気ニュートリノ異常はニュートリノ振動の観測により解決される。ニュートリノ振動とは、ニュートリノが伝播する途中で異なるフレーバーに変化する現象であり、ニュートリノのフレーバー固有状態 $|\nu_\alpha\rangle$ は、質量固有状態 $|\nu_i\rangle$ の重ね合わせで表現される。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (1.6)$$

ここで、 $U_{\alpha i}$ はポンテコルボ・牧・中川・坂田行列 (PMNS 行列) と呼ばれるユニタリー行列であり、異なる質量固有値を持つ状態の混合角 $\theta_{ij}$ と、CP対称性の破れを表すCP位相 $\delta$ をパラメータに持つ。

シュレディンガー方程式より、質量固有状態の時間発展は、エネルギー固有値 $E_i$ を用いて以下のように記述できる。

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.7)$$

これを用いると、フレーバー固有状態の時間発展は、

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(t)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} |\nu_i(0)\rangle \\ &= \sum_i U_{\alpha i} e^{-iE_i t} \sum_\beta (U^\dagger)_{i\beta} |\nu_\beta\rangle \\ &= \sum_i \sum_\beta U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} |\nu_\beta\rangle \end{aligned} \quad (1.8)$$

と表せる。これを用いると、遷移振幅  $A_{\alpha \rightarrow \beta}(t)$  は、

$$\begin{aligned} A_{\alpha \rightarrow \beta}(t) &= \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle \\ &= \sum_i U_{\alpha i} U_{\beta i}^* e^{-iE_i t} \end{aligned} \quad (1.9)$$

となり、遷移確率  $P_{\alpha \rightarrow \beta}(t)$  は、

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta}(t) &= |A_{\alpha \rightarrow \beta}(t)|^2 \\ &= \sum_i \sum_j U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* e^{-iE_i t} e^{iE_j t} \\ &= \sum_i \sum_j U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \cos((E_i - E_j)t) \end{aligned} \quad (1.10)$$

ニュートリノは質量が非常に小さいことから、相対論的近似が適用できる。

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.11)$$

また、光速で移動すると仮定すれば、自然単位系で  $t = L$  ( $L$ : ニュートリノの移動距離) となる。これを踏まえると遷移確率は、

$$\begin{aligned} P_{\alpha \rightarrow \beta}(t) &= \sum_i \sum_j U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \cos\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E} L\right) \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\beta j} U_{\alpha j}^* \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L\right) \end{aligned} \quad (1.12)$$

となる。ただし、 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  である。もしニュートリノが2フレーバーの場合、ユニタリ行列は

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (1.13)$$

と表せる。 $\nu_e$  から  $\nu_\mu$  へフレーバーが変化したとすると、その確率は、

$$\begin{aligned} P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(t) &= 4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2}{4E} L\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2}{4E} L\right) \\ &= \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{21}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{GeV}]} L [\text{km}]\right) \end{aligned} \quad (1.14)$$

と記述できる。

続いて、ニュートリノ振動が実験的に観測された例をいくつか紹介する。スーパーカミオカンデ実験では、大気ニュートリノの測定で入射角に依存したニュートリノの消失パターンを解析し、 $\nu_\mu$  が消えていることを明確に示した [6]。これは、ニュートリノのフレーバーが変化する直接的な証拠となり、ニュートリノ振動の発見として注目された。

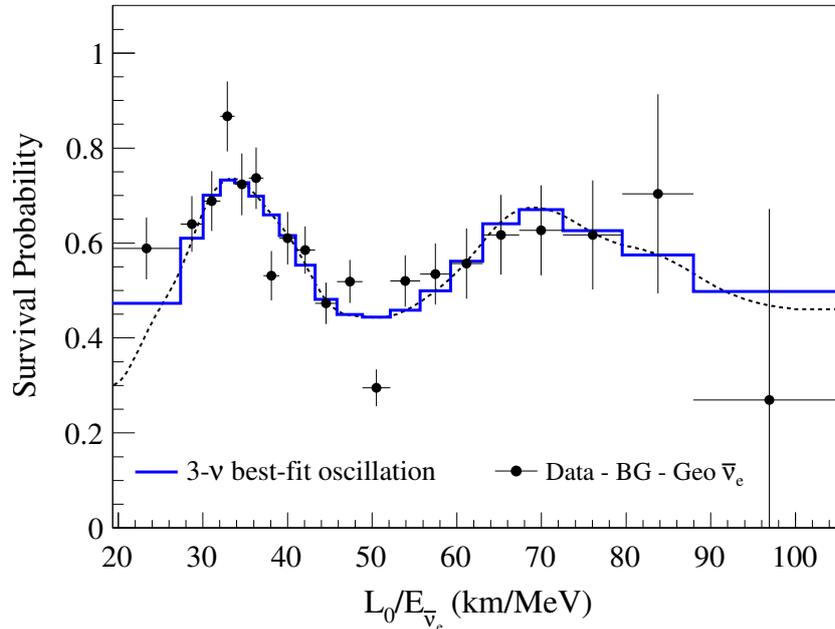


図 1.2: KamLAND 実験で得られた原子炉ニュートリノの振動 [8]。 $\bar{\nu}_e$  の振動が 2 周期分確認できる。

また、太陽ニュートリノの観測を行った SNO 実験では、重水チェレンコフ検出器を使って  $\nu_e$  にのみ感度を持つ反応と 3 フレーバーに等しく感度を持つ反応を同時に測定した。ニュートリノが物質中を伝播する場合は、電子との前方散乱により振動確率が変わる MSW 効果が発生する。この実験により、 $\nu_e$  は損失しているもののニュートリノの総フラックスは理論予測と矛盾がないことがわかり、太陽ニュートリノに対する MSW 効果による  $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$  変換が実験的に確立された [7]。

KamLAND 実験では原子炉から放出される  $\bar{\nu}_e$  を観測し、 $\bar{\nu}_e$  の数が有意に減少していることや飛行距離とエネルギーの比  $L/E$  に依存した振動パターンが見られることを明らかにした [8]。また、この観測結果によって、太陽ニュートリノ観測から示唆されていた大混合角解 (LMA) が支持された。また、振動パラメータが高精度で定まり、太陽ニュートリノ問題は解決へと導かれた。なお、KamLAND 検出器については 2 章で詳細に述べる。

### 1.3 ニュートリノ質量

標準模型ではニュートリノの質量はゼロであると仮定されていたが、ニュートリノ振動の発見により、ニュートリノは質量をもつことが明らかになった。いまだニュートリノの質量の絶対値はわかっていないが、いくつかの実験的観測により質量へ制限が与えられている。

### 1.3.1 質量階層性

ニュートリノ振動の発見と観測により、ニュートリノ質量の二乗差  $\Delta m_{ij}^2$  の高精度な測定が進んだ。それに伴い、ニュートリノの質量固有状態は2つの質量パターンに分けられることがわかった。このパターンを質量階層構造と呼ぶ。

1つ目は順階層で、質量固有状態  $\nu_1$  が最も軽く、 $\nu_3$  が最も重い場合である。このとき、質量の大小は  $m_1 < m_2 \ll m_3$  となる。2つ目は逆階層で、 $\nu_3$  が最も軽く、 $\nu_2$  が最も重い。このパターンは、 $m_3 \ll m_1 < m_2$  と表される。スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ測定や、加速器を使った T2K 実験でのニュートリノ検出などにより階層性の研究は進められてきたが、いまだ解明には至っていない。

### 1.3.2 ニュートリノの絶対質量

ニュートリノの絶対質量に上限を与える観測実験も行われている。

KATRIN 実験では、トリチウムの  $\beta$  崩壊



を利用し、電子ニュートリノの有効質量に対して直接的な制限を与えている。これは、ニュートリノが質量を持つことで、放出される電子のエネルギースペクトルの終端(エンドポイント)付近の形状がわずかに変化することを利用した手法である。2025年の測定結果によると、

$$m_{\nu_e} < 0.45 \text{ eV} \quad (90\% \text{ 信頼水準}) \quad (1.16)$$

という上限が与えられた [9]。

また、宇宙論的観測でも制限が与えられている。宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) や大規模構造 (LSS) の観測により、ニュートリノの総質量

$$\sum m_\nu = m_1 + m_2 + m_3 \quad (1.17)$$

に制限が与えられる。CMB の温度や偏光を高精度に観測するプランク衛星のデータでは、ニュートリノの総質量は

$$\sum m_\nu < 0.12 \text{ eV} \quad (95\% \text{ 信頼水準}) \quad (1.18)$$

と制限されている [10]。

別のアプローチとして挙げられるのが、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の探索である。もしこの現象が観測されれば、ニュートリノの有効質量を直接得ることができる。 $0\nu\beta\beta$  事象とそれに関連するニュートリノの性質については、1.4 節で詳細に述べる。

## 1.4 マヨラナニュートリノ

ニュートリノは質量をもつことが判明したが、その値は他のレプトンと比較して非常に小さい。この謎を解明するための理論として、ニュートリノのマヨラナ性という性質が提唱されている。マヨラナ性とは、粒子と反粒子が同じという性質のことであり、ニュートリノが電荷をもたないことに基づく。この性質が正しければ、ニュートリノの極小質量問題や未発見の右巻きニュートリノについて説明することができ、宇宙の物質優勢の謎も自然に説明することができる。

### 1.4.1 ディラック粒子とマヨラナ粒子

ニュートリノの波動関数は Dirac 方程式に従う。

$$(i\gamma_\mu \partial^\mu - m_D)\psi = 0 \quad (1.19)$$

これを満たすラグランジアン密度は

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_D)\psi \quad (1.20)$$

であり、そのうち質量項は

$$\mathcal{L}_{mass} = m_D \bar{\psi}\psi \quad (1.21)$$

である。ラグランジアン密度の質量項はローレンツ不変でエルミートである。ただ、ローレンツ不変であるという条件を満たすものは他にも考えることができ、例えば  $\psi$  の荷電共役  $\psi^c = C\bar{\psi}^T$  ( $C$ : 荷電共役演算子) を用いたものである。 $\bar{\psi}^c\psi^c$  はローレンツ不変でエルミートであり、 $\bar{\psi}\psi^c, \bar{\psi}^c\psi$  という項もローレンツ不変であり、お互いがエルミート共役である。そのため、この3項を使って

$$\mathcal{L}_M = m_a \bar{\psi}^c\psi^c + m_b \bar{\psi}\psi^c + m_c \bar{\psi}^c\psi \quad (1.22)$$

をラグランジアンに加えることができる。ここに、左手系、右手系の射影演算子  $P_L, P_R$  を導入する。これらを波動関数に作用させると、

$$P_L\psi = \psi_L, \quad P_R\psi = \psi_R \quad (1.23)$$

となる。ここで、 $\bar{\psi}_L^c\psi_L^c = \bar{\psi}_L\psi_L^c = \bar{\psi}_L^c\psi_L = 0, \bar{\psi}_R^c\psi_R^c = \bar{\psi}_R\psi_R^c = \bar{\psi}_R^c\psi_R = 0$  を使うと、新たに加えたラグランジアン項は、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_M &= m_a \bar{\psi}^c\psi^c + m_b \bar{\psi}\psi^c + m_c \bar{\psi}^c\psi \\ &= m_a (\bar{\psi}_L^c + \bar{\psi}_R^c)(\psi_L^c + \psi_R^c) + m_b (\bar{\psi}_L + \bar{\psi}_R)(\psi_L^c + \psi_R^c) + m_c (\bar{\psi}_L^c + \bar{\psi}_R^c)(\psi_L + \psi_R) \\ &= m_a (\bar{\psi}_L^c\psi_R^c + \bar{\psi}_R^c\psi_L^c) + m_b (\bar{\psi}_L\psi_R^c + \bar{\psi}_R\psi_L^c) + m_c (\bar{\psi}_L^c\psi_R + \bar{\psi}_R^c\psi_L) \end{aligned} \quad (1.24)$$

となる。エルミート共役となる項同士をまとめると、

$$\mathcal{L}_M = m_D (\bar{\psi}_L^c\psi_R^c + \bar{\psi}_R^c\psi_L^c) + m_L (\bar{\psi}_L\psi_R^c + \bar{\psi}_R^c\psi_L) + m_R (\bar{\psi}_L^c\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L^c) \quad (1.25)$$

と整理される。 $m_D$  はディラック質量で、 $m_L, m_R$  は左巻き、右巻きニュートリノの質量である。

### 1.4.2 シーソー機構

ニュートリノは質量をもつことがわかったが、その値は他のフェルミオンに比べて非常に小さい。この質量のメカニズムを解き明かす1つの発想がシーソー機構である。ディラック方程式のラグランジアンの方々の質量項に、前節で新たに考えた項を加えると以下のようにあらわせる。

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{mass} &= m_D \bar{\psi} \psi + m_D (\bar{\psi}_L^c \psi_R^c + \bar{\psi}_R^c \psi_L^c) + m_L (\bar{\psi}_L \psi_R^c + \bar{\psi}_R^c \psi_L) + m_R (\bar{\psi}_L^c \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L^c) \\ &= m_D (\bar{\psi}_L \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L + \bar{\psi}_L^c \psi_R^c + \bar{\psi}_R^c \psi_L^c) + m_L (\bar{\psi}_L \psi_R^c + \bar{\psi}_R^c \psi_L) + m_R (\bar{\psi}_L^c \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L^c)\end{aligned}$$

ここで、ニュートリノがマヨラナ性を持つとすると、

$$\psi_{L,R} = (\psi_{R,L})^c \quad (1.26)$$

がいえるので、ラグランジアンは、

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{mass} &= m_D (\bar{\psi}_L \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L + \bar{\psi}_L^c \psi_R^c + \bar{\psi}_R^c \psi_L^c) + m_L (\bar{\psi}_L \psi_R^c + \bar{\psi}_R^c \psi_L) + m_R (\bar{\psi}_L^c \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L^c) \\ &= m_D (\bar{\psi}_L \psi_R + \bar{\psi}_L^c \psi_R^c + h.c.) + m_L (\bar{\psi}_L \psi_R^c + h.c.) + m_R (\bar{\psi}_L^c \psi_R + h.c.)\end{aligned} \quad (1.27)$$

と変形できる。また、

$$M = \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \quad (1.28)$$

という行列を導入すれば、ラグランジアンは、

$$\mathcal{L}_{mass} = (\bar{\psi}_L \quad \bar{\psi}_L^c) \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_R^c \\ \psi_R \end{pmatrix} + h.c. \quad (1.29)$$

となる。左巻きニュートリノの質量が非常に軽く ( $m_L \simeq 0$ )、右巻きニュートリノの質量が非常に重い ( $m_R \gg m_D$ ) とすると、行列  $M$  の固有値  $m_1, m_2$  は、

$$m_1 = -\frac{m_R}{2} + \frac{m_R}{2} \sqrt{1 + \frac{4m_D^2}{m_R^2}} \simeq \frac{m_D^2}{m_R} \ll m_D \quad (1.30)$$

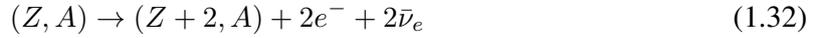
$$m_2 = \frac{m_R}{2} + \frac{m_R}{2} \sqrt{1 + \frac{4m_D^2}{m_R^2}} \simeq m_R \gg m_D \quad (1.31)$$

と求まる。これらの式は、右巻きニュートリノの質量  $m_R$  が大きければ、 $m_1$  が小さくなる代わりに  $m_2$  が大きくなることを意味する。この構造をシーソー機構という。ニュートリノがマヨラナ粒子であるとすると、 $m_1$  をニュートリノ質量、 $m_2$  を未発見の重い右巻きニュートリノの質量とみなすことで、現在わかっているニュートリノの質量が異常に軽いことを説明できる。

### 1.4.3 ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊

前節でニュートリノのマヨラナ性について記述したが、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、粒子と反粒子は同一となる。この性質を使ってみられる事象が、「ニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊」である。

$\beta$  崩壊とは、中性子が電子と反電子ニュートリノを放出して、陽子に変わる反応である。この反応がエネルギー的に禁じられている偶偶核では、 $\beta$  崩壊が同時に起こることがあり、これを二重  $\beta$  崩壊 ( $2\nu\beta\beta$ ) という。



この反応では全系のレプトン数が保存されるため、標準模型の範囲内で説明できる。

一方、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば粒子と反粒子が同一になるため、一方の二重  $\beta$  崩壊過程で放出される反電子ニュートリノが、電子ニュートリノとしてもう一方で吸収されることが可能になる。その結果、図 1.3 のように、ニュートリノは放出されず、2 個の電子のみ観測される「ニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ )」が発生する。



つまり、ニュートリノを伴わない二重  $\beta$  が観測されれば、ニュートリノがマヨラナ粒子であると証明され、標準模型を超える新たな理論構築への重要な一歩となる。

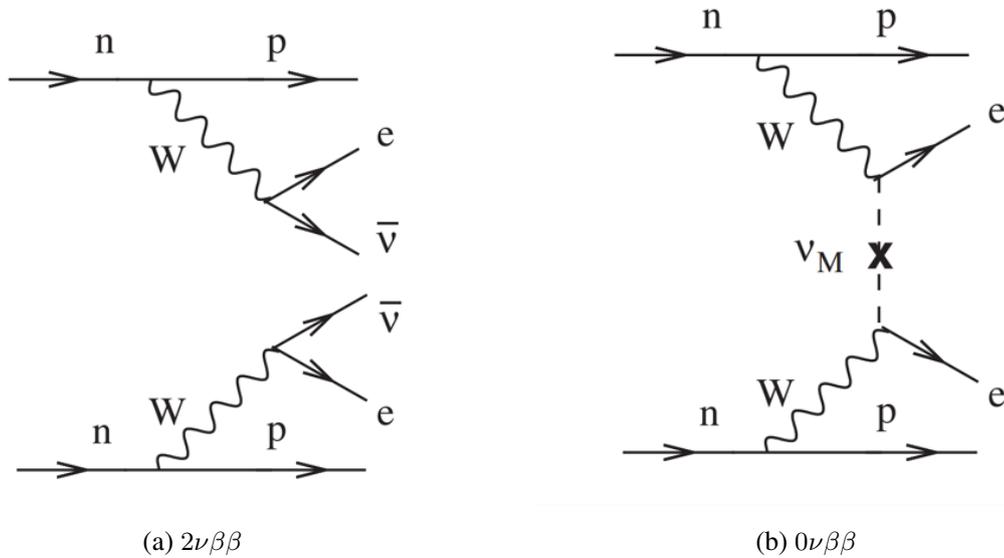


図 1.3: 二重  $\beta$  崩壊のファインマンダイアグラム

#### 1.4.4 $0\nu\beta\beta$ 探索

$0\nu\beta\beta$  事象を見つけることは、ニュートリノ物理だけでなく、素粒子・宇宙論の観点からも有意義であり、現在いくつか探索実験が稼働している。探索実験では、 $0\nu\beta\beta$  崩壊の半減期  $T_{1/2}^{0\nu}$  が、

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (1.34)$$

と表せることから、マヨラナ有効質量  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  に制限を与えられる。ここで、 $G^{0\nu}$  は位相空間因子、 $M^{0\nu}$  は核行列要素である。マヨラナ有効質量は

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_i U_{ei}^2 m_i \right| \quad (1.35)$$

で定義される。

これまで世界各地で  $0\nu\beta\beta$  の探索が進められてきた。実験では、二重  $\beta$  崩壊核を用いて、放出される2つの電子の総エネルギーを精密に測定することで探索が行われる。 $2\nu\beta\beta$  では、放出されたニュートリノがエネルギーを持ち去るため、電子のエネルギー分布は連続的であるのに対し、 $0\nu\beta\beta$  では、電子のエネルギーが原子核の崩壊エネルギーをすべて担うため、 $2\nu\beta\beta$  スペクトルのエンドポイントに鋭いピークが現れる。このピークを検出するために、より高感度な検出器の開発が各地で進められている。

代表的な実験として、KamLAND-Zen 実験、GERDA 実験、CUORE 実験が挙げられる。KamLAND-Zen 実験とは、日本の神岡鉱山に設置された  $^{136}\text{Xe}$  溶解の液体シンチレータ検出器を使った実験である。大量の二重  $\beta$  崩壊核と大型検出器を活かして、現在世界最高感度で半減期に制限を与えている。KamLAND-Zen 実験の詳細は2章で説明する。

GERDA 実験とは、イタリアのグラン・サッソ国立研究所にある  $^{76}\text{Ge}$  を用いた高純度ゲルマニウム検出器による実験である。高純度と低バックグラウンド化技術の追求により高い検出感度を達成しており、2020年9月に出した結果では、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.8 \times 10^{26} \text{ year (90\% 信頼水準)} \quad (1.36)$$

という制限をかけている [11]。現在は他の実験と合併して LEGEND-200 実験となっているが、最新の結果では

$$T_{1/2}^{0\nu} \geq 1.9 \times 10^{26} \text{ year (90\% 信頼水準)} \quad (1.37)$$

という下限を記録している [12]。

CUORE 実験も、GERDA 実験と同じグラン・サッソ国立研究所で行われている実験で、 $^{130}\text{Te}$  を用いて極低温ボロメータ法で測定している。 $\text{TeO}_2$  結晶内部で発生した崩壊エネルギーを温度上昇として直接検出し、低バックグラウンド環境で測定を行うことで、高いエネルギー分解能を誇っている。2022年の最新結果では、

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.2 \times 10^{25} \text{ year (90\% 信頼水準)} \quad (1.38)$$

という下限の測定に成功している [13]。

## 第 2 章

# KamLAND

KamLAND(**Kamioka Liquid-scintillator Anti-Neutrino Detector**)とは、岐阜県飛騨市神岡鉱山内に建設された大型液体シンチレータ型反電子ニュートリノ検出器である。図 2.1 に KamLAND 検出器周辺の構造を示す。KamLAND はカミオカンデ検出器跡地に建設され、山頂直下約 1000m の地下に位置している。この深度により、宇宙線ミュオンのフラックスは地上の約  $10^{-5}$  にまで低減され、極めて低バックグラウンドな環境が実現されている。KamLAND では、液体シンチレータを用いてシンチレーション光を高感度で測定可能であり、数 MeV 領域の低エネルギーニュートリノ観測に強みを持つ。本実験はこれまでに、原子炉ニュートリノ振動の直接観測や地球ニュートリノの観測に成功し、ニュートリノ物理の発展に貢献してきた。現在では、ニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊探索を中心に研究対象を拡大し、より高感度な検出器を目指して KamLAND2 の建設を進めている。

## 2.1 KamLAND 実験

### 2.1.1 KamLAND 検出器

KamLAND 検出器は、図 2.2 に示すように内部検出器 (Inner Detector, ID) と外部検出器 (Outer Detector, OD) に分けられる。ID は直径 18 m のステンレス製球形タンクに囲まれた領域であり、物理事象の観測に利用される。タンク内部には直径 13 m のナイロン製バルーンが設置されており、内側は液体シンチレータ、外側はバッファオイルで満たされている。ID の内壁には 1879 本の光電子増倍管 (PMT) が取り付けられており、液体シンチレータからの発光を検出する。OD は ID を取り囲む形で配置され、純水で満たされている。OD にも PMT が設置されており、宇宙線ミュオン由来のバックグラウンド事象を識別することが可能である。さらに、OD は岩盤からの中性子や  $\gamma$  線を遮蔽する役割も果たし、ID のバックグラウンド低減に寄与している。

### KamLAND 液体シンチレータ

液体シンチレータ (Liquid Scintillator, LS) は、放射線に反応して発光する物質であり、この光をシンチレーション光という。液体シンチレータは形状を自由に変えられることや、大規模実験

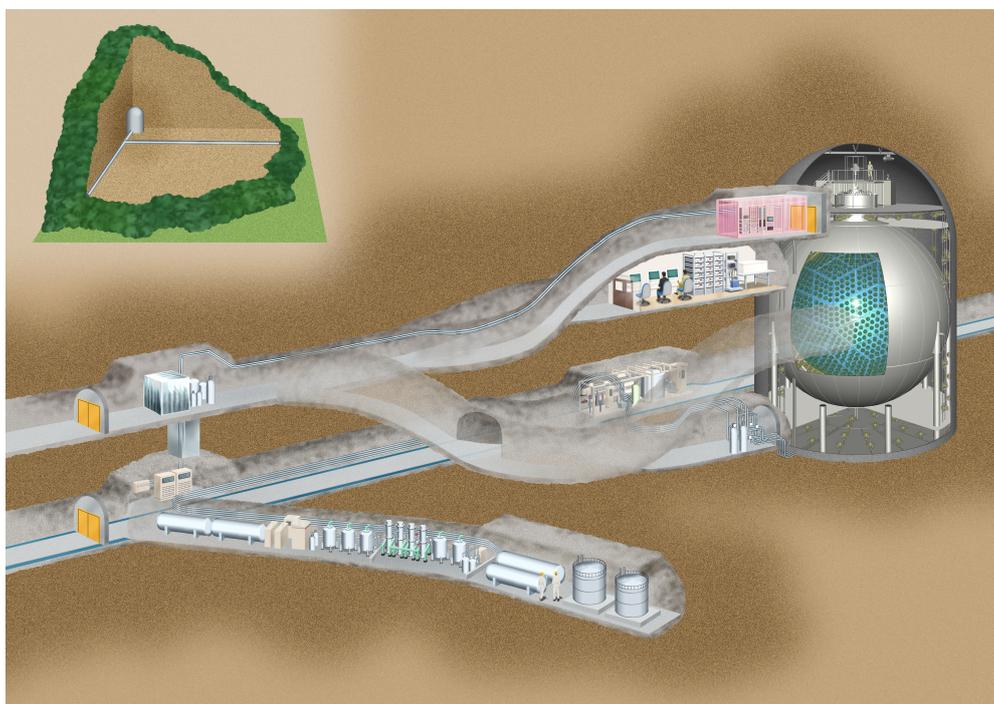


図 2.1: KamLAND 検出器周辺の構造

への適用が容易であることが利点であり、一般に有機溶媒に発光剤や波長変換剤などの溶質を溶かし込むことで構成される。荷電粒子がシンチレータ中を通過すると、溶媒分子が励起され、脱励起の際に溶質分子へエネルギーが吸収される。その溶質分子が励起・脱励起することで発光が起こる。溶質に波長変換材も溶かされている場合はさらにその光を吸収して、光検出器の感度に合わせた光を放出する。

KamLAND 検出器で用いられている液体シンチレータは KamLAND 液体シンチレータ (Kam-LS) と呼ばれ、バルーン内に約 1kt 充填されている。溶媒をプソイドクメン、発光剤をジフェニルオキサゾールとし、密度調整や透過率低下防止目的でドデカンを入れている。その化学組成は表 2.1 の通りである。

表 2.1: Kam-LS の組成

物質名	分子式	密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	比率
ドデカン	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	0.749	80%
プソイドクメン	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	0.875	20%
ジフェニルオキサゾール	C <sub>15</sub> H <sub>11</sub> NO	—	1.36 g/l
Kam-LS	—	0.77721	—

Kam-LS は PMT の感度波長である約 400 nm に合わせ、発光波長を約 380 nm としている。また、液体シンチレータは水に不溶であり、数百度で気化する性質を利用して、液液抽出や蒸留

などの精製により不純物を除去することで、極低放射能環境を実現している。この特性により、Kam-LS は超純水を用いた水チェレンコフ検出器に比べて約 100 倍の発光量を持ち、透明度が高く、安価で大量に入手できる点で大規模実験に適している。

## バルーン

バルーンは、バッファオイルと液体シンチレータを分離する構造であり、大きさはおよそ半径 6.5m である。バルーンの材質はナイロンの 3 層とエチレン-ビニルアルコール共重合体 (EVOH) の 2 層からなる計 5 層のフィルムで構成されており、フィルムの厚さは約  $135\mu\text{m}$  で、高い透過率や強度を保持している。

## バッファオイル

ID のバルーン外側はバッファオイル (buffer oil, BO) で満たされている。役割としては、検出器外部や球形タンク、PMT に含まれる放射性不純物由来の  $\gamma$  線などの環境放射線が液体シンチレータに到達するのを遮蔽することで、背景事象を抑制する。このオイルは、バルーンに浮力を与え位置を安定させるために、Kam-LS と同程度の密度でなければならない。また、バッファオイル自体は発光せず、物理事象の観測には直接用いられないが、シンチレーション光を吸収・屈折させずに PMT へ届けるために、高透過率で Kam-LS とほぼ同等の屈折率を持つことが求められる。化学組成は、表 2.2 のとおりである。

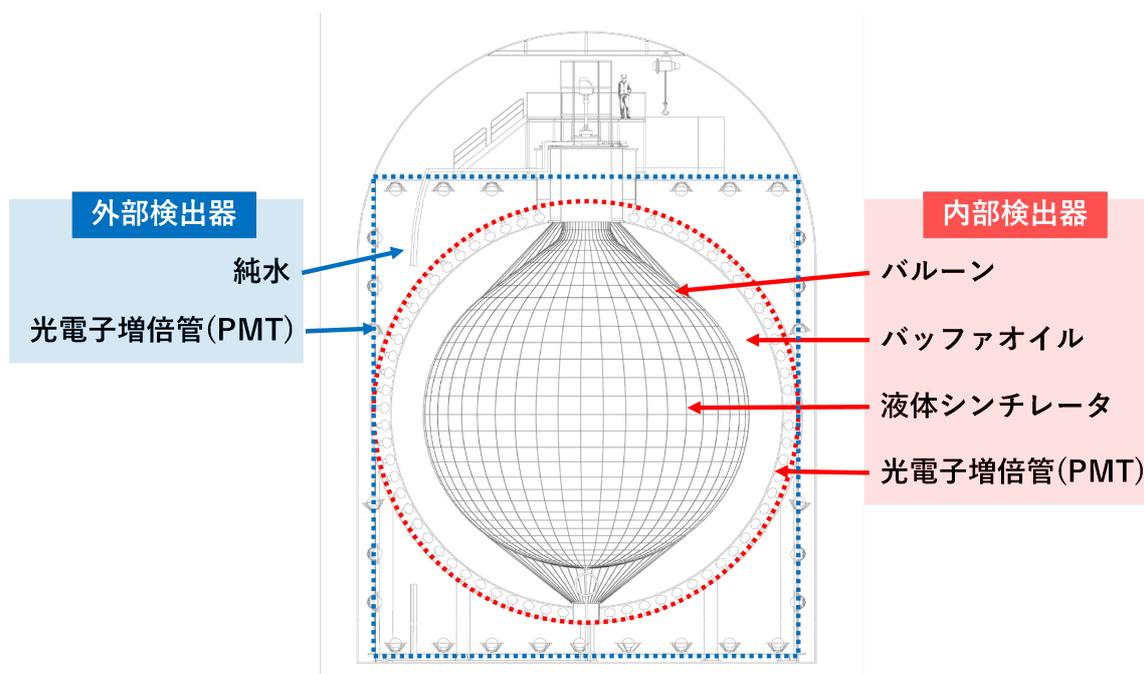


図 2.2: KamLAND 検出器の概略図

表 2.2: バッファオイルの組成

物質名	分子式	密度	比率
ドデカン	$C_{12}H_{26}$	0.749 g/cm <sup>3</sup>	53%
イソパラフィン	$C_nH_{2n+2}$	0.795 g/cm <sup>3</sup>	47%
バッファオイル	-	0.77690 g/cm <sup>3</sup>	-

### 光電子増倍管

光電子増倍管は、シンチレーション光やチェレンコフ光といった極めて微弱な光信号を高感度かつ高時間分解能で検出し、電気信号に変換する光センサーである。光が PMT の光電面に入射すると、光電効果によって光電子が放出される。この光電子は高電圧の電場によって加速され、複数段のダイノードに衝突するたびに電子が放出されることで、約  $10^7$  倍にまで信号が増幅される。最終的に増幅された電子群は陽極に集められ、電気信号として読み出される。

KamLAND 検出器には、図 2.3 に示すような 17 インチ PMT とカミオカンデ実験で使用されていた 20 インチ PMT の 2 種類が用いられている。17 インチ PMT はエネルギー分解能および時間分解能の向上を目的として導入され、20 インチ PMT は耐油処理を施したうえで再利用された。17 インチ PMT の電子増倍部は、光電子を効率よく集められるボックス型と、電子の進行方向を整えて増幅を繰り返すラインフォーカス型を組み合わせた「ボックス&ライン型」となっており、電子収集効率が高く、時間分解能に優れるという特徴を持つ。一方 20 インチ PMT は、斜めに傾いた金属板を複数回配置した「ベネシアンブラインド型」であり、比較的単純構造で量産しやすく、増倍率も高いという特徴がある。それぞれの PMT の性能を表 2.3 に示す。

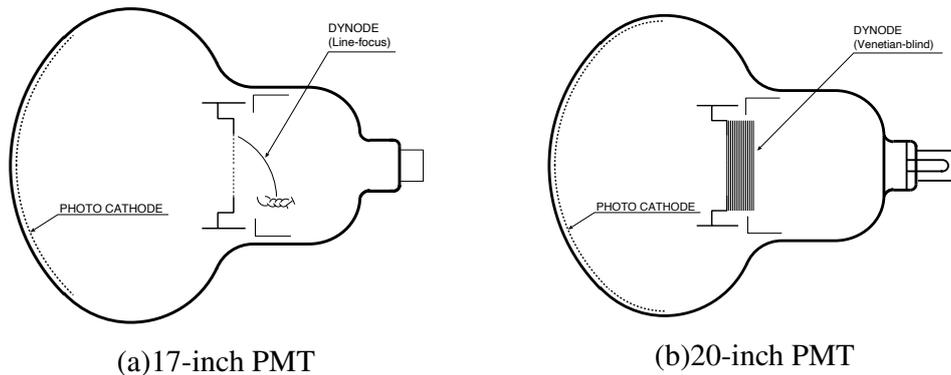


図 2.3: 17 インチ PMT と 20 インチ PMT の概略図

ID には、17 インチ PMT が 1325 本、20 インチ PMT が 554 本取り付けられており、これらはステンレス製の球状フレーム上に格子状に配置されている。この配置は幾何的対称性を高め、イ

表 2.3: 17 インチ PMT と 20 インチ PMT の性能

パラメータ	17-inch PMT	20-inch PMT
有効光電面 ( $\phi$ [mm])	430	460
ダイノード	ボックス・ライン (10 段)	ベネシアンブラインド (13 段)
量子効率 ( $\lambda = 390$ nm)	22%	23%
電子走行時間	110 ns	90 ns
電子走行時間の広がり	3.5 ns	7.7 ns
PV 比	3	1.5
ダークレート	22 kHz	40 kHz

ベント再構成や物理解析を容易にするように組まれている。ID における全体の光検出面積の被覆率は、17 インチ PMT が 22%、20 インチ PMT が 12% の計 34% である。

OD には、140 本の 20 インチ PMT が取り付けられている。OD 建設当時は、カミオカンデ実験で使用されていた 20 インチ PMT が 225 本、検出器外壁に内向きに配置されていたが、長年の運用により一部の PMT に劣化が見られたことや、赤道部での検出効率低下が課題となったため、改修工事を経て現在の 140 本となった。140 本のうち、47 本は高量子効率 (High Quantum Efficiency, HQE)PMT である。これらは特に感度が低下しやすい赤道部および検出器底部に配置されており、宇宙線ミュオンの検出感度向上に寄与している。残りの 93 本は、図 2.4 に示すようなスーパーカミオカンデ実験で使用された PMT である。また、検出器上部を通過するミュオンを補足するため、20 インチ PMT のほかに、16 本の 8 インチ PMT と 6 本の 5 インチ PMT も設置されている。これにより、検出器全体でのミュオン検出効率および位置再構成精度が向上した。OD に取り付けられた PMT の性能を表 2.4 に示す。

表 2.4: OD に取り付けられた 20 インチ PMT の性能。 $\lambda$  は光の入射波長である。

パラメータ	OD PMT	OD HQE PMT
有効光電面 ( $\phi$ [mm])		460
ダイノード		ベネシアンブラインド (11 段)
量子効率 ( $\lambda = 390$ nm)	20–21%	32%
電子走行時間		95 ns
電子走行時間の広がり		5.9 ns
PV 比		1.6
ダークレート	17 kHz	25 kHz

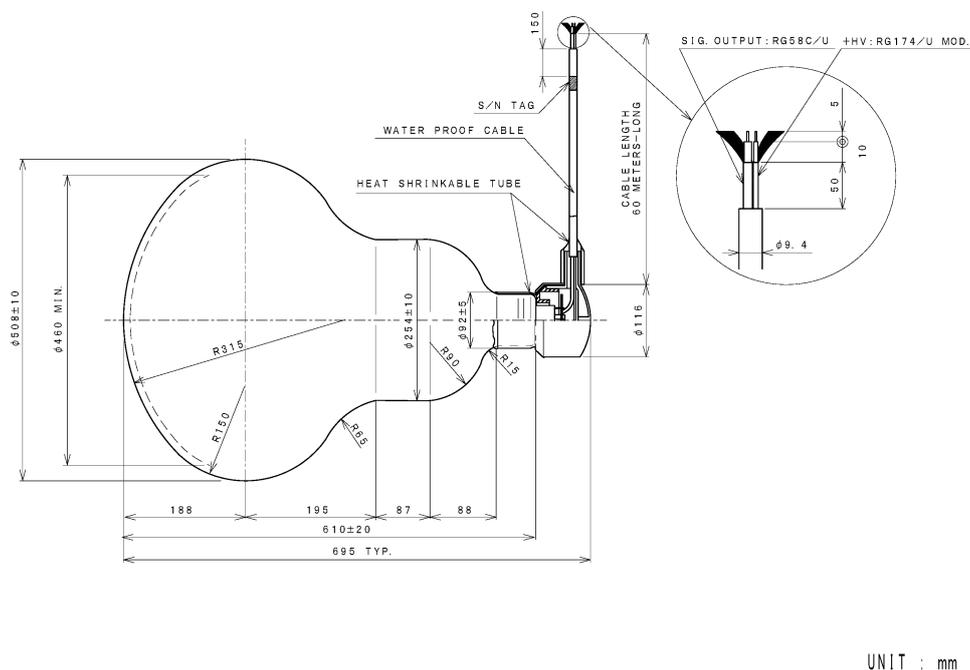


図 2.4: R3600-06MOD の概略図

### 2.1.2 KamLAND 実験の成果

KamLAND 実験は、液体シンチレータによる高いエネルギー分解能と、地下深部に設置されたことによる極めて低バックグラウンド環境を活かし、低エネルギー領域で数多くの重要な成果を挙げてきた。

代表的な成果の一つは、原子炉から放出される反電子ニュートリノの欠損を観測し、ニュートリノがフレーバー振動を起こすことを直接的に示した点である。この観測により、ニュートリノが質量を持つことを裏付けただけでなく、太陽ニュートリノ問題の解明にも決定的な役割を果たした。これまで、二世世代ニュートリノ振動におけるパラメータ空間には複数の解が存在すると考えられていたが、KamLAND の観測結果により、LMA 解のみが実際の解であることが確定した [14]。

さらに、KamLAND は世界で初めて地球ニュートリノの観測に成功している。これは地殻やマントル中のウランおよびトリウム系列核種の放射性崩壊に伴って放出される反電子ニュートリノを捉えたものである。観測結果から、地球内部の放射性崩壊による熱生成量は約 21TW と推定され、地球化学的モデルの予測とよく一致することが示された [15]。この成果は、地球内部構造や熱収支を研究する上で、ニュートリノ観測が有効な手法であることを意味する。

## 2.2 KamLAND-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験 (**K**amioka **L**iquid-scintillator **A**nti-**N**eutrino **D**etector– **Z**ero neutrino double beta decay search) は、KamLAND 検出器を利用して行われているニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) 探索実験である。崩壊核として同位体  $^{136}\text{Xe}$  を採用し、大量の濃縮キセノンを含む液体シンチレータを用いることで、世界最高水準の感度を実現している。

KamLAND-Zen 実験は、使用するキセノン量と検出系構成の違いにより、KamLAND-Zen400 および KamLAND-Zen800 の 2 つの期間に区分される。これらの実験を通じて、 $0\nu\beta\beta$  崩壊探索の感度は飛躍的に向上し、KamLAND-Zen は Xe を用いた実験の中でも最先端の成果を上げている。現在はデータ取得をストップし、 $0\nu\beta\beta$  の発見に向けて、次世代検出器である KamLAND2-Zen の建設が進められている。

### 2.2.1 KamLAND-Zen 検出器

KamLAND-Zen 検出器は、図 2.5 に示すように KamLAND 検出器を基盤とし、バルーン内部にミニバルーンと呼ばれる独立した空間が追加された二重構造である。このミニバルーン内には Xe 含有液体シンチレータ (Xe-LS) が封入されており、この中で  $^{136}\text{Xe}$  が二重ベータ崩壊を起こすと、放出された電子がシンチレータ分子を励起させ、シンチレーション光が生成される。これらの光を PMT が検出することで、 $0\nu\beta\beta$  崩壊事象の探索が行われる。なお、Xe-LS 領域は放射性不純物による背景放射が多く存在するため、通常の反電子ニュートリノ解析には含まれない。

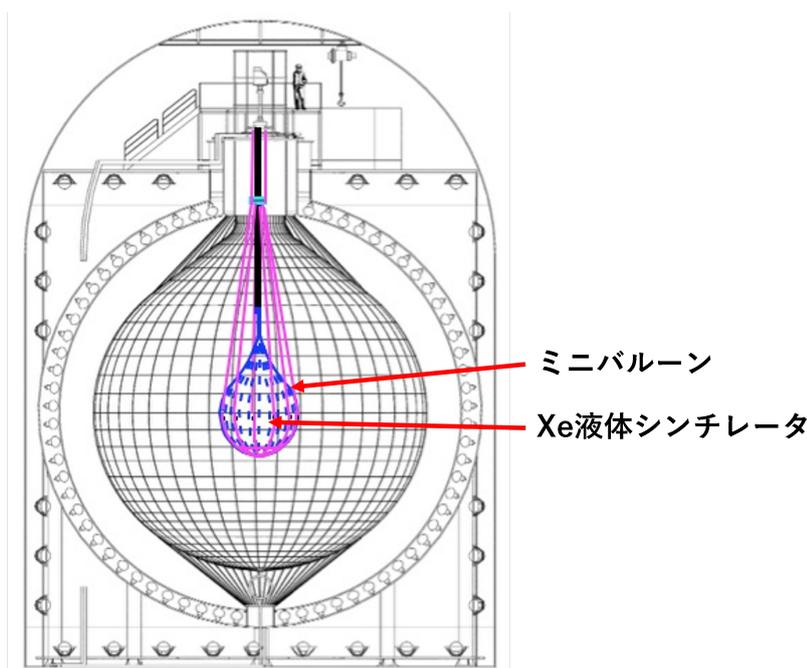


図 2.5: KamLAND-Zen 検出器の概略図

## Xe 液体シンチレータ

Xe 液体シンチレータ (Xe-LS) とは、二重  $\beta$  崩壊核である同位体  $^{136}\text{Xe}$  を溶解させた液体シンチレータである。Xe-LS の主成分は Kam-LS とほぼ同一であるが、密度や光学特性を考慮した補正が施されている。具体的には、Kam-LS と密度を同程度にするために、ドデカンより密度の低いデカンを主溶媒として採用することで、バルーン内部の浮力バランスが保たれてミニバルーンの負荷が軽減する。また、Xe の溶解によって生じる発光量の減少を補うため、蛍光体 PPO の濃度を通常より高い 2.4g/L としている。Xe-LS の組成を表に示す。

表 2.5: KamLAND-Zen 800 実験における XeLS の構成要素

物質名	分子式	密度	比率
デカン	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	0.735 g/cm <sup>3</sup>	82.4%
プソイドクメン	$\text{C}_9\text{H}_{12}$	0.875 g/cm <sup>3</sup>	17.6%
キセノン	Xe	—	3.13 wt%

KamLAND-Zen 400 では、320kg(Phase 1) および 380kg(Phase 2) の濃縮 Xe が溶かされた。その後の KamLAND-Zen 800 では、ミニバルーンの大きさを拡張し、約 745kg の Xe が使用された。KamLAND-Zen 800 における濃縮 Xe の同位体存在比を表 2.6 に示す。

表 2.6: 濃縮 Xe 中の同位体濃縮比 [16]

	$^{136}\text{Xe}$	$^{134}\text{Xe}$	$^{132}\text{Xe}$	その他	合計
原子量 [u]	135.907	133.905	131.904	-	135.80
比率 [%]	90.85	8.82	0.17	0.16	100.0
総質量 [kg]	677.39	64.83	1.26	1.53	745.0

## ミニバルーン

ミニバルーンは、KamLAND 検出器のバルーン内部に位置し、前述した Xe-LS が封入されている。バルーンの素材には、液体シンチレータに対して十分な化学的安定性と高い光透過性、そして低い放射性不純物濃度を実現するため、厚さ 25  $\mu\text{m}$  のナイロンフィルムが採用されている。製作工程では、外部からの放射性汚染を最小限に抑えるため、高クラスのクリーンルーム環境下で成形・組立が行われた。ミニバルーンの概略図を図 2.6 に示す。

KamLAND-Zen 400 では、直径 3.08 m のミニバルーンが使用され、続く KamLAND-Zen 800 では、Xe-LS の量を増やすために直径 3.84 m の大きさにアップデートされた。

## 2.2.2 KamLAND-Zen 実験の成果

## KamLAND-Zen 400

KamLAND-Zen 400 は、2011 年 9 月に開始され、2015 年 10 月まで実施された。本実験は大きく二つの測定期間に分けられ、2011 年 10 月から 2012 年 6 月までを第 1 期 (Phase 1)、2013 年 12 月から 2015 年 10 月までを第 2 期 (Phase 2) と呼んでいる。

Phase 1 では、 $^{136}\text{Xe}$  の二重ベータ崩壊探索を行う過程で、エネルギースペクトル中に予期しないバックグラウンド成分が検出された。この成分は  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  に由来するものであり、福島第一原発事故によって生成された銀同位体が、ミニバルーン製作時に表面へ付着したことが原因と考えられている [17]。この  $^{110\text{m}}\text{Ag}$  の  $\beta^-$  崩壊は、 $0\nu\beta\beta$  崩壊探索における大きなバックグラウンド要因となった。

この問題を解決するため、2012 年 6 月以降に LS およびキセノンガスの純化が実施された。蒸留および液液抽出法によって放射性不純物を除去した結果、バックグラウンドレベルを Phase 1 の約 10 分の 1 にまで低減させることに成功し、Phase 2 として観測を始めた。両期間のデータを統合して解析した結果、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0$  崩壊に対して以下のような制限が得られた。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26} \text{ yr} \quad (90\% \text{ C.L.}) \quad (2.1)$$

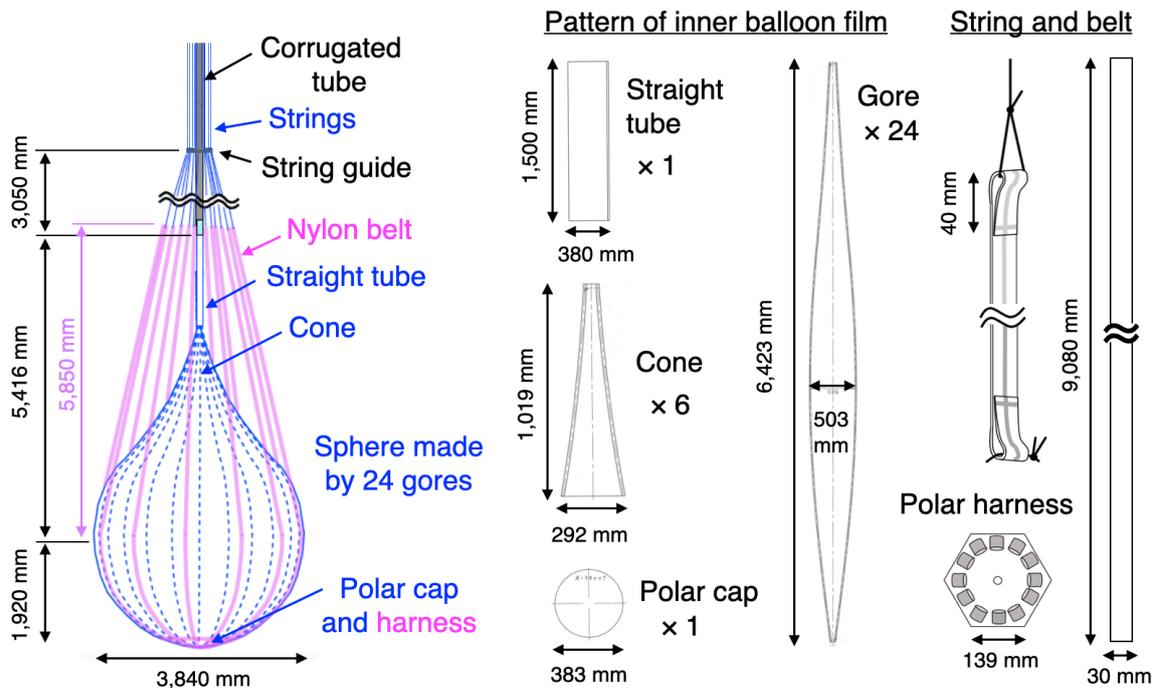


図 2.6: ミニバルーンの概略図

この結果から導かれるニュートリノの有効マヨラナ質量の上限値は、

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 61\text{--}165 \text{ meV} \quad (2.2)$$

であり、当時としては世界で最も厳しい制限値を与えたものである [18]。この成果は、ニュートリノがマヨラナ粒子である可能性の検証において重要な一歩となった。図 2.7 に Phase 1 および Phase 2 で得られたエネルギースペクトルを示す。

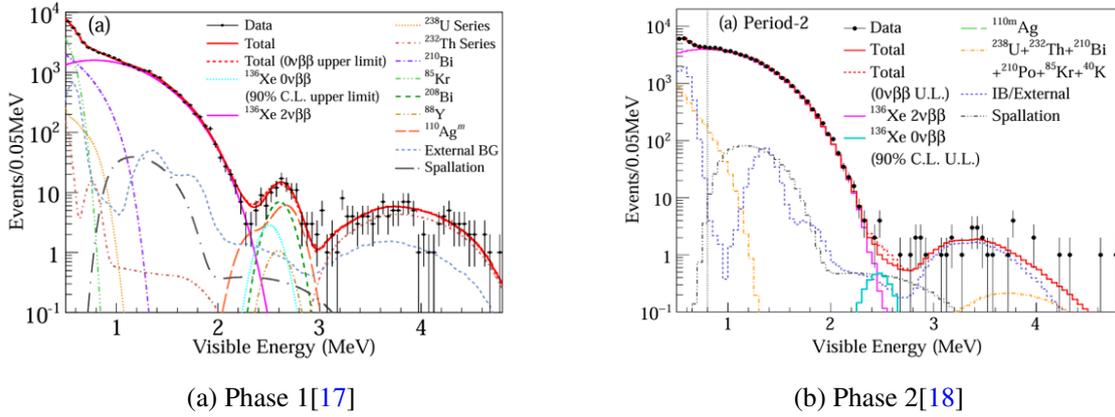


図 2.7: KamLAND-Zen 400 で得られたエネルギースペクトル

## KamLAND-Zen 800

KamLAND-Zen 800 は、2019 年 1 月から 2024 年 1 月まで行われた。本実験では、Xe-LS を封入するミニバルーンを新たに製作し、より高い清浄度環境下で組み立てを行うことで、バルーン由来の放射性不純物を前実験の 10 分の 1 以下に抑制した

さらに、宇宙線起源のバックグラウンド低減のため、ミュオン飛跡に沿った発光量を解析し、シャワー生成点を特定する新たな解析手法を導入した。この手法により、主要な背景事象であった  $^{10}\text{C}$  事象を 99.3% の効率で除去することに成功した。一方で、より感度を高めた結果、ミュオンによるキセノン原子核破碎事象といった新しいタイプのバックグラウンドも確認されている。これらの改良により、KamLAND-Zen 400 のデータも含めた最新の結果として、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta\beta$  崩壊に対して次のような制限が得られた。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 3.8 \times 10^{26} \text{ yr} \quad (90\% \text{ C.L.}) \quad (2.3)$$

この結果から、ニュートリノの有効マヨラナ質量に対しては、

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 28 - 122 \text{ meV} \quad (2.4)$$

という世界最高水準の制限を与えている [19]。KamLAND-Zen 800 で得られたエネルギースペクトルとマヨラナ有効質量への制限を図 2.8 に示す。

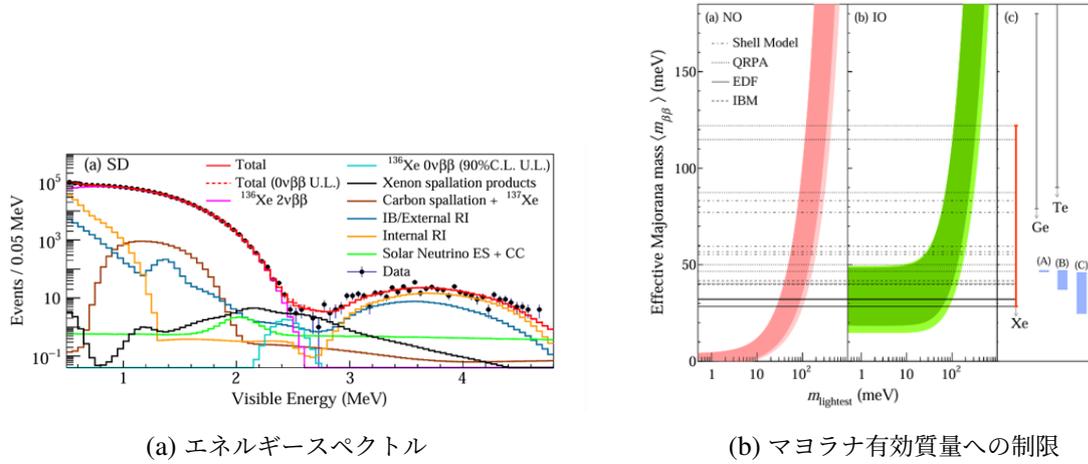


図 2.8: KamLAND-Zen 800 から得られた結果

### 2.2.3 KamLAND-Zen 実験のバックグラウンド

$0\nu\beta\beta$  事象は非常にまれであり、検出にはバックグラウンドをいかに低減させるのが重要である。以下では、KamLAND-Zen 実験の主なバックグラウンドを説明する。

#### $^{136}\text{Xe}$ の $2\nu\beta\beta$

二重  $\beta$  崩壊で放出される電子のエネルギースペクトルは、崩壊の種類によって形状が異なる。図 2.9 に示すように、 $0\nu\beta\beta$  崩壊では  $Q$  値 (2.46 MeV) に対応する線スペクトルとなるのに対し、 $2\nu\beta\beta$  崩壊では  $Q$  値を上限とする連続スペクトルを示す。理論的には両者を明確に区別できるが、実際の検出器ではエネルギー分解能が有限であるため、 $0\nu\beta\beta$  崩壊のピークが広がり、 $2\nu\beta\beta$  崩壊のスペクトルと一部重なって観測される。このため、 $0\nu\beta\beta$  崩壊をより精度高く識別するには、検出器のエネルギー分解能を向上させることが重要となる。

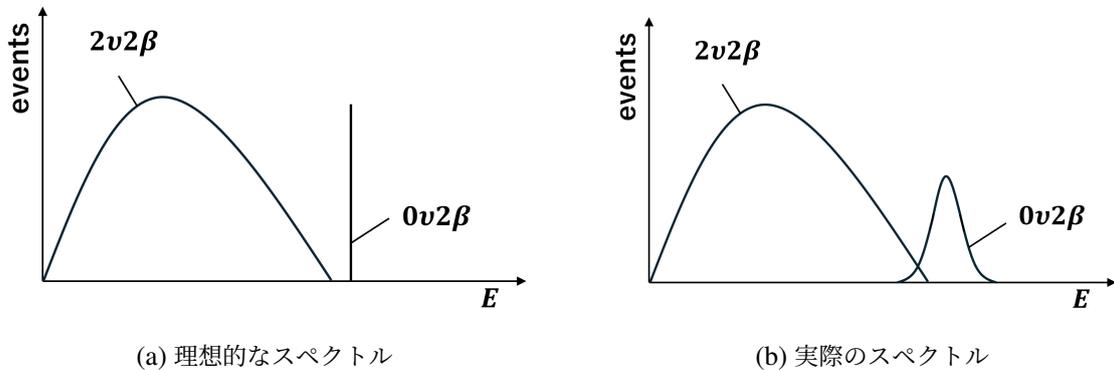


図 2.9: 二重  $\beta$  崩壊における電子のエネルギースペクトル

## 長寿命核の崩壊事象

KamLAND-Zen800 実験における主要な背景事象に、宇宙線ミュオンが液体シンチレータ中の Xe に衝突して引き起こす原子核破碎反応がある。この過程ではキセノン原子核の近傍で不安定核が生成されるが、これらは  $^{10}\text{C}$  などの破碎生成物と比較して長寿命な核種を多く含む。そのため、単純な解析のみでこれらを識別・除去することは困難であり、従来はミュオンから生成される多重中性子による遅延同時計測で背景事象の選別を試みてきた。将来的には、機械学習を用いた粒子識別法による除去も期待されている。

### $^{10}\text{C}$ の崩壊事象

$^{136}\text{Xe}$  の崩壊事象と同じく、宇宙線ミュオンが液体シンチレータ中の  $^{12}\text{C}$  原子核と相互作用すると、核破碎反応によって  $^{10}\text{C}$  が生成される。KamLAND では、この  $^{10}\text{C}$  が起こす  $\beta^+$  崩壊が主要なバックグラウンドの一つである。しかし、 $^{10}\text{C}$  生成時には大きな確率で中性子が同時に放出されることが知られており、飛来ミュオンの通過、続く中性子捕獲、そして  $^{10}\text{C}$  の崩壊を時系列で観測する遅延同時計測により、これらの事象を識別・除去することが可能となっている。 $^{10}\text{C}$  の生成過程を図 2.10 に示す。

### $^{214}\text{Bi}$ の崩壊事象

KamLAND-Zen 実験で使用される Xe-LS およびミニバルーンには、製造過程で混入した  $^{238}\text{U}$  系列由来の放射性核種が含まれており、その娘核である  $^{214}\text{Bi}$  の  $\beta^-$  崩壊が  $0\nu\beta\beta$  探索における主要なバックグラウンド源の一つとなっている。 $^{214}\text{Bi}$  の崩壊後には、 $^{214}\text{Po}$  が  $\alpha$  崩壊するため、こ

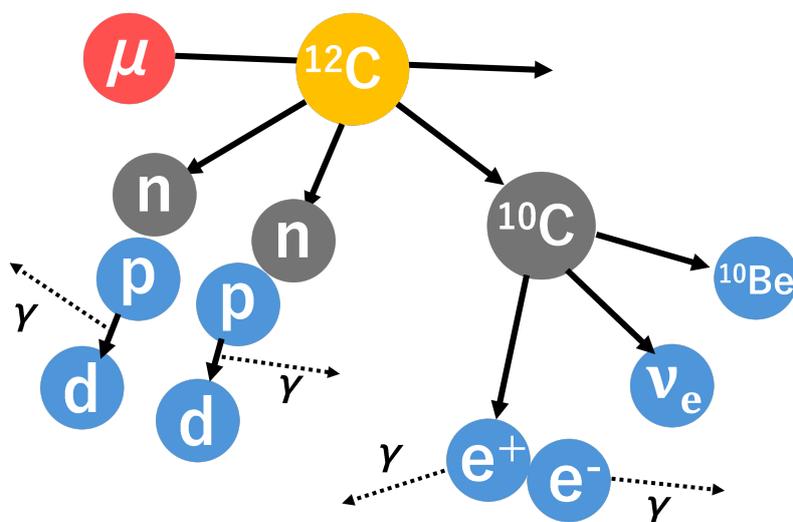


図 2.10:  $^{10}\text{C}$  の生成過程

の連続した崩壊を遅延同時計測することで  $^{214}\text{Bi}$  由来の事象を識別できる。しかし、ミニバルーン表面付近で発生した  $\alpha$  線はバルーン素材によって吸収されるため検出が困難となる。この問題を考慮し、解析時にはミニバルーン近傍の領域を除外することでバックグラウンドの影響を低減している。 $^{238}\text{U}$  系列の崩壊過程を図 2.11 に、ミニバルーンにおける  $^{214}\text{Bi}$  の崩壊のイメージを図 2.12 に示す。

## 2.3 KamLAND2-Zen 実験

KamLAND-Zen 実験は 2011 年の開始以来、 $0\nu\beta\beta$  崩壊探索において世界最高水準の感度を達成してきた。しかし、これまでのところ  $0\nu\beta\beta$  崩壊の直接観測には至っておらず、ニュートリノ質量階層の決定も実現していない。そこで、さらなる性能向上を目指した次世代実験として KamLAND2-Zen が計画されている。

KamLAND2-Zen では、バックグラウンド低減と検出感度の向上を目指してハードウェアおよびソフトウェアの両面からの改良が検討されている。ハードウェア面では、バルーンに発光物質を加えることで  $^{214}\text{Bi}$  由来のバックグラウンド抑制を目指す。また、集光ミラーや高量子効率 PMT の導入により集光量を増やし、エネルギー分解能を向上させることで  $2\nu\beta\beta$  事象との差別化を行う。集光量の増加は、光子統計数の増加でもあるため、宇宙線による Xe 原子核破砕由来

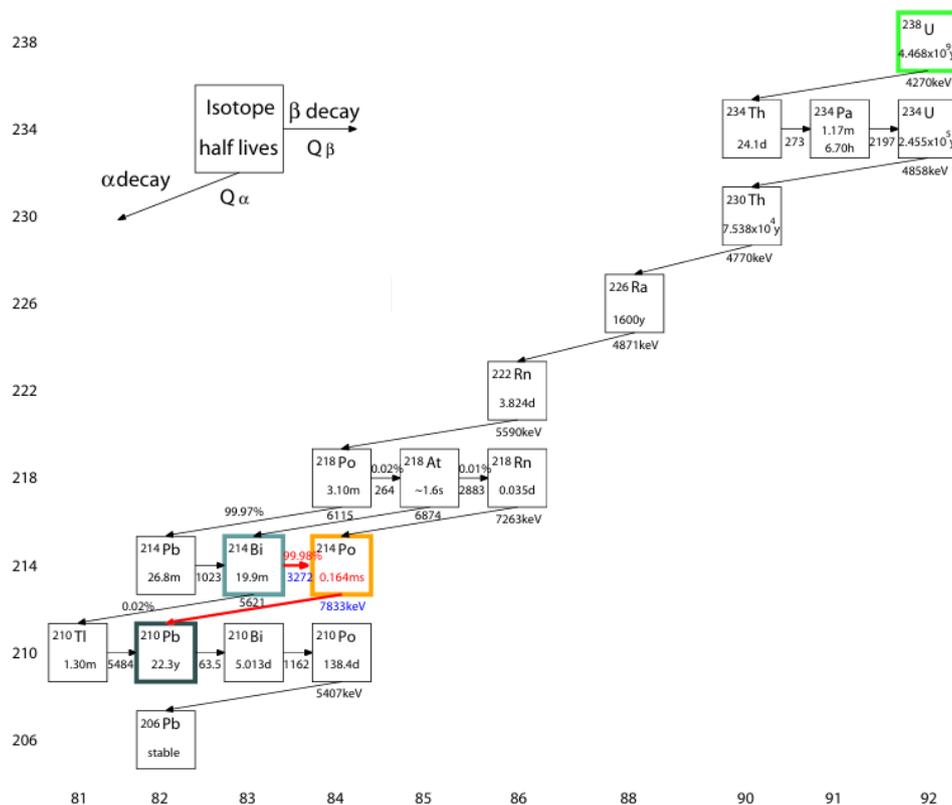


図 2.11:  $^{238}\text{U}$  系列の崩壊過程 [20]

の長寿命核の崩壊における放出  $\gamma$  線の空間的な広がりを利用した粒子識別能の向上にも寄与する。一方、ソフトウェア面では、機械学習を用いたイベント再構成技術やデッドタイムフリーエレクトロニクスを導入により、位置・エネルギー再構成の精度向上と宇宙線由来のバックグラウンド除去能力の強化を図っている。これらの改良により、KamLAND2-Zen 実験は、これまでの KamLAND-Zen 実験を超える感度で  $0\nu\beta\beta$  崩壊探索を行い、ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかの決定的検証に向けた重要なステップになると期待されている。以下では、ハードウェア面についての詳細を述べる。

### 2.3.1 KamLAND2-Zen 検出器

KamLAND2-Zen 検出器では、ID の PMT に集光ミラーを取り付けることが予定されている。図 2.13 に KamLAND2-Zen 検出器のイメージを示す。集光ミラーは、従来 PMT の光電面がカバーしていなかった領域の光を集めることで、全体の集光量を向上させることを目的としている。そのほかの検出器の構造は KamLAND-Zen 検出器と大きく変わらないものの、各構成要素において性能向上を目的とした改良が計画されている。

#### 高量子効率 PMT

PMT における量子効率とは、光電面に入射した光子が光電子へ変換される確率を示す指標であり、この値が高いほど検出効率や信号出力が向上する。現在の KamLAND 検出器で使用されている PMT の量子効率は最大で約 20 % であるのに対し、KamLAND2-Zen 実験では最大約 30% の高量子効率を有する 20 インチ PMT の導入が計画されている (図 2.14 参照)。KamLAND2-Zen

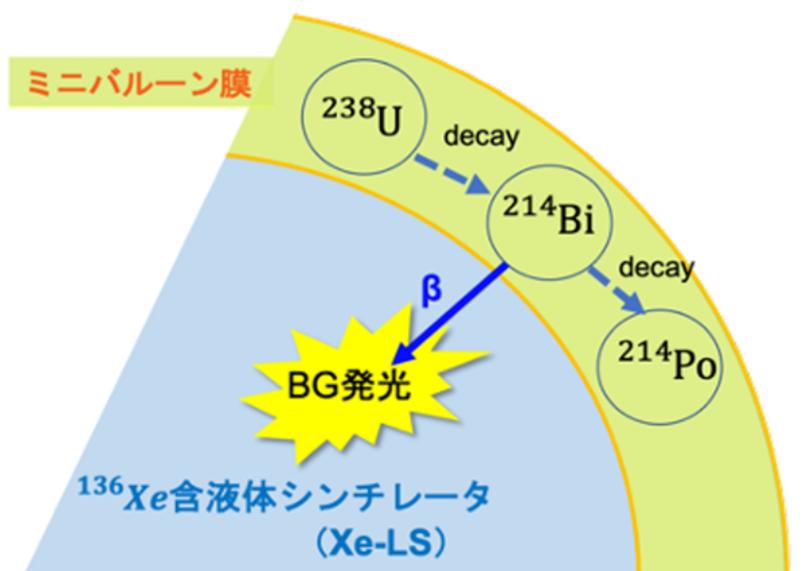


図 2.12: ミニバルーンにおける  $^{214}\text{Bi}$  の崩壊のイメージ図 [21]

では、高量子効率 20 インチ PMT が 1885 本導入される予定であり、被覆率は 42% まで向上する見込みである。量子効率と被覆率の双方の改善により、全体の集光量は約 1.9 倍に増加すると予想される。

### 集光ミラー

KamLAND-Zen 検出器における ID PMT の被覆率は 34% であり、20 インチの高量子効率 PMT に置き換わったとしても 42% と、PMT の光電面でカバーできない領域が存在する。そのため、PMT に集光ミラーと呼ばれる鏡を装着することで、被覆率を上げ、集光量を増やすことが予定されている。集光ミラーの導入によって全体の集光量は約 1.8 倍以上になると期待されている。集光ミラーの詳細は、3 章以降で言及する。

### 発光性ミニバルーン PEN

前述のとおり、KamLAND-Zen 実験におけるミニバルーンには  $^{214}\text{Bi}$  が付着しており、その  $\beta^-$  崩壊が  $0\nu\beta\beta$  崩壊探索におけるバックグラウンドの 1 つとなっている。この事象は、娘核である  $^{214}\text{Po}$  の  $\alpha$  崩壊との遅延同時計測によって識別可能であるが、 $\alpha$  線がミニバルーンを通過す

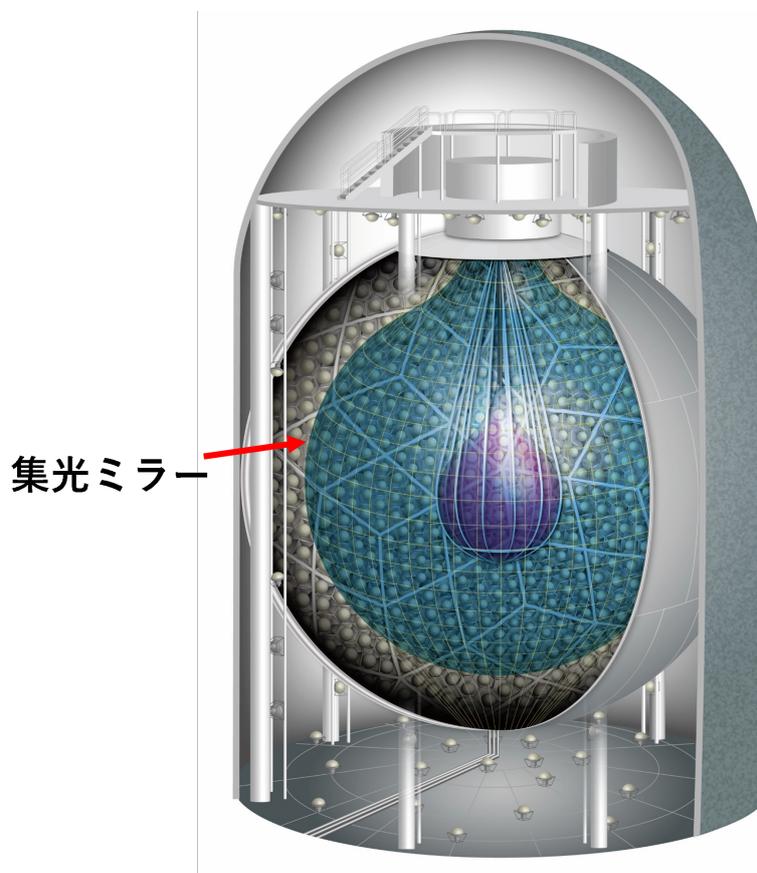


図 2.13: KamLAND2-Zen 検出器のイメージ図

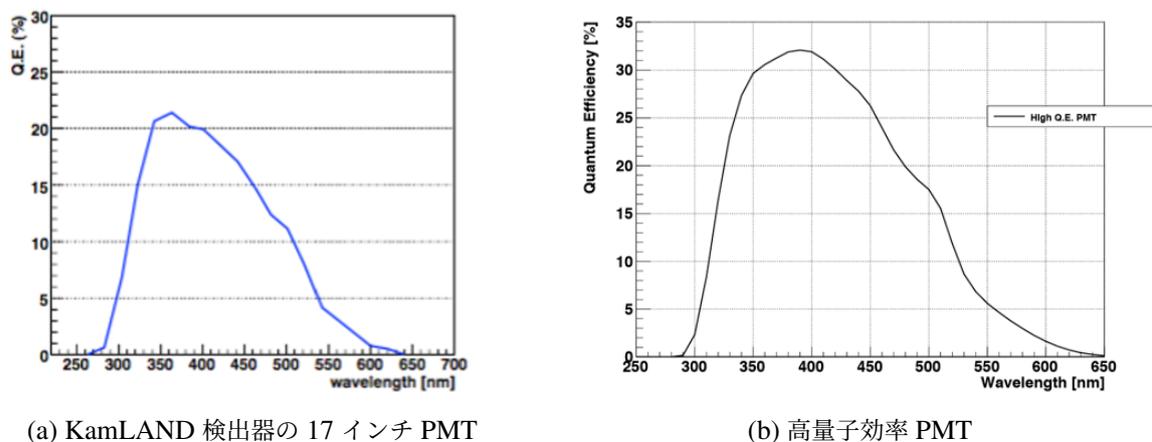


図 2.14: PMT の量子効率 [20]

際に吸収されてしまうため、実際の検出は困難である。そこで、ミニバルーンの素材に発光性フィルムを組み込むことにより、 $\alpha$ 線通過時にミニバルーンを発光させ、遅延同時計測を実現する手法が検討されている。発光性フィルムの素材としてはポリエチレンナフタレート（PEN）が有力な候補とされており、この発光性ミニバルーンの導入によって、 $^{214}\text{Bi}$ 由来のバックグラウンドを約99.7%除去できると期待されている [22]。

### 波長変換剤 Bis-MSB

発光性ミニバルーンとしてPENを採用することで $^{214}\text{Bi}$ 由来のバックグラウンド事象を大幅に低減できる一方で、新たな課題も生じる。それは、Xe-LS中に含まれる蛍光体PPOの発光がPENフィルムを透過せず、光検出が難しくなる点である。この問題を解決するため、Xe-LSに波長変換剤であるBis-MSBを入れ、発光波長を変換させる手法が検討されている。PPOの発光ピークは約370 nm付近に位置するが、Bis-MSBを混合することで発光波長は約430 nmへとシフトし、PENフィルムの透過領域と重なるようになる(図2.15参照)。さらに、仮にミニバルーンにPENを採用しない場合であっても、Bis-MSBの添加によって発光波長領域が長くなるため、ミニバルーン内の発光量は約1.37倍に増加すると予想されている [23]。

### 2.3.2 KamLAND2 プロトタイプ検出器

KamLAND2-Zen 実験に向けて計画されている複数の改良案は、これまで個別に研究開発が進められてきたが、それらを組み合わせた際の総合的な性能評価は実施されていなかった。そこで、各改良の効果を実際に確認するため、神岡鉱山内に半径2m、高さ4mの円筒型プロトタイプ検出器が建設され、集光量の実測評価が行われた。建設は2021年11月に始まり、2022年12月に完了、データの取得は2023年12月まで行われた。

KamLAND2 プロトタイプ検出器の構造を図2.16に示す。検出器の内側には、光反射性の高いタイベックシートが2枚重ねて貼り付けられた。これは、PMT配置領域が狭いために直接光の検

出量が減少し、エネルギー分解能が低下することへの対策である。シートの内側には、20 インチの高量子効率 PMT が 14 本設置され、各 PMT にアクリルドームを被せた上から、集光ミラーが取り付けられた。PMT は傾斜を持つ台座上に設置され、KamLAND 検出器内の一部 PMT と同様の幾何配置となるように調整された。集光ミラーは、隣接する PMT 中心の垂直二等分線を一辺とする多角形ミラーであり、構造は、アクリル基板にアルミニウムを蒸着し、表面にはアクリルシリコン樹脂系のトップコートが施されている。その後、検出器は純水で満たされ、その中心には、リニアアルキルベンゼンを使用した液体シンチレータ (LAB-LS) が封入されたアクリル箱が設置された。

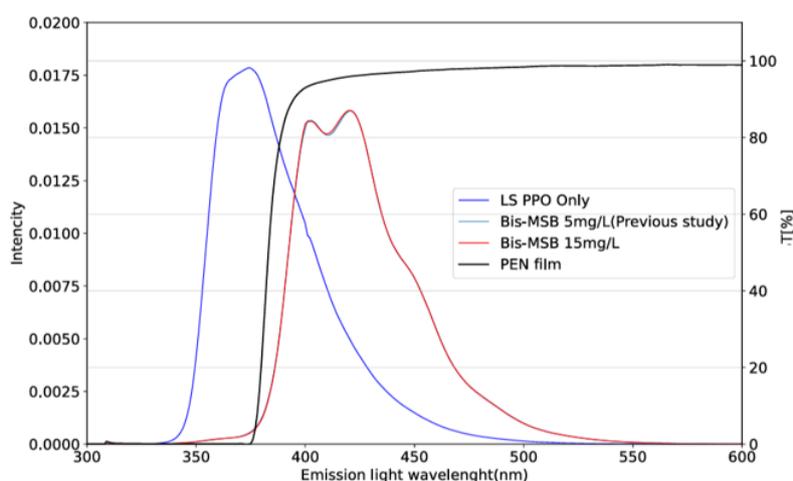


図 2.15: Bis-MSB による発光波長シフト [23]。以前の液体シンチレータ候補であった LAB の結果だが、波長シフトの様子は現在の候補と同じである。

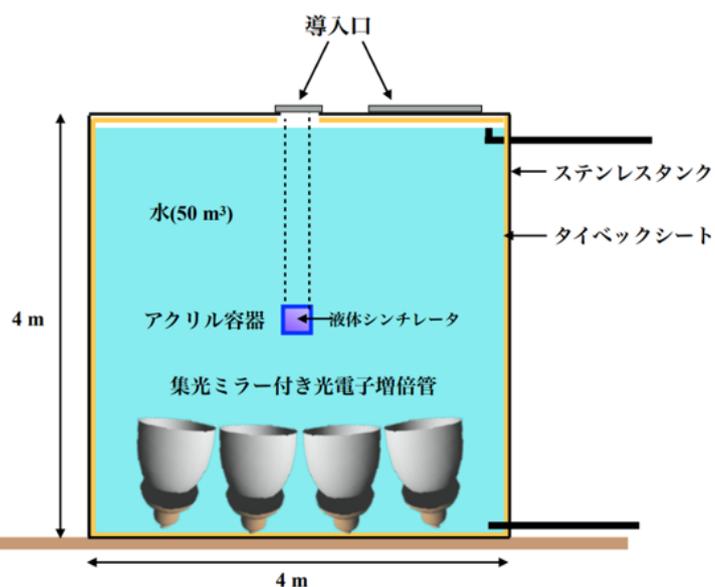


図 2.16: KamLAND2 プロトタイプ検出器の概略図 [24]

集光性能の評価には、LED を光源としたシンチレーション球が用いられた。測定の結果、集光ミラーをつけた場合は、つけていない場合と比較して集光性能が 1.7~2.6 倍に向上することが確認された。これより、KamLAND2 検出器において集光ミラーを導入することは、エネルギー分解能を向上させ、 $0\nu\beta\beta$  探索の感度をあげる有効な手段だといえる [24]。

## 第 3 章

# 集光ミラー素材の反射率測定

前述のとおり、KamLAND2-Zen 実験では集光量の増加によるエネルギー分解能の向上を通じて、ニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の発見を目指している。この目的のために導入が検討されている集光ミラーについては、これまでの先行研究において形状および素材の検討が進められてきたものの、完成形には至っていなかった。まず本章では、ミラー素材の選定を目的として実施した反射率測定について述べる。先行研究では、アクリル基板上にアルミニウムを蒸着し、トップコートとしてアクリル系樹脂を塗布した素材が、約 81.6% の反射率を示すとともに、油中における長期安定性が確認されており、コスト面においても有望な素材であることが報告されている [25]。本研究では、反射率の要求値を 85%、期待値を 90% と設定し、素材の選定を行った。加えて、反射率の入射角依存性や、Kam-LS および Bis-MSB を入れた Xe-LS の両領域において高い反射性能を誇るかを素材選定における判断基準とした。

### 3.1 集光ミラーの形状開発

素材の性能評価の話に入る前に、自身の研究の対象外ではあるが予備知識として、集光ミラーの形状開発についてまとめたいと思う。

#### 3.1.1 これまでの開発状況

形状開発の初期段階として、ミラー曲面にはストリングメソッドを用いて設計されたウィンストンコーン型の円形ミラー (図 3.1 参照) が採用された。ウィンストンコーン型は、反射率が 100% であり、かつ二次元空間においては、有効半径内から入射した光を理論上 100% 光電面へ集光し、一方で有効半径外からの入射光は完全に遮断できるという特性を有する。このため、集光ミラーに適した形状であると考えられてきた。しかし、KamLAND における集光ミラーの目標である集光率 1.8 倍を達成するには至らず、実機への適用には課題が残る結果となった [26]。

そこで、集光ミラーの開口部形状を円形から多角形へと変更する開発が進められた。円形ミラーの導入により光電面の被覆率は向上したものの、依然として約 23% のデッドスペースが残存しており、さらなる被覆率の改善が課題であった。この課題を解決するため、ミラー開口部を多

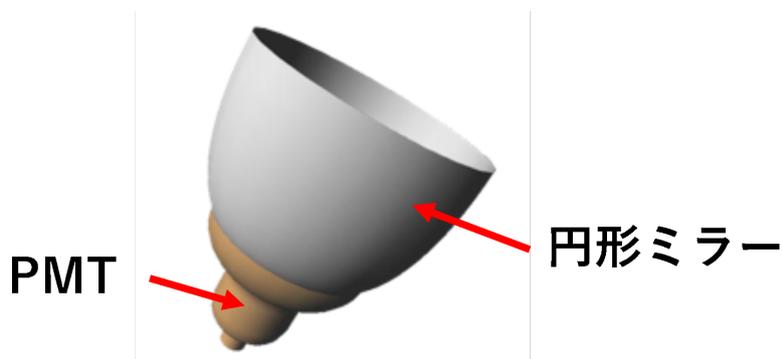


図 3.1: 円形ミラーのイメージ (20 インチ PMT)

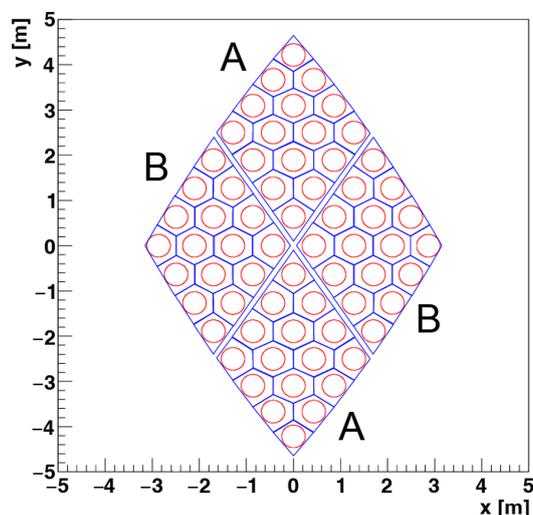


図 3.2: ステンレスフレーム内の構造 [27]。赤丸が PMT、青枠がミラーである。

角形状とし、光電面周辺の空間をより有効に利用する試みが行われた。内部検出器の PMT は、図 3.2 のように菱形状のステンレスフレームをさらに四等分してできた菱形の中に収められており、1つの菱形につき 16 個の PMT が設置されている。多角形ミラーの形状は、隣接する 2 本の PMT 中心を結ぶ線分の垂直二等分線を一辺とし、菱形を充填するように設計されている。この設計により、ひし形内のデッドスペースが約 2% に減少した [20]。なお、この 2% のデッドスペースは、ミラー制作費用を抑えるために、似た形状のミラーを共通化したことで生まれたものである。菱形の形状はタイプ A とタイプ B の 2 パターンに分けられ、図 3.3 のようにそれぞれ計 8 種類の多角形ミラーで敷き詰められる。KamLAND 多角形ミラーのイメージを図 3.4 に示す。

先行研究として開発された形状については以上である。続いて、先行研究の形状を土台として、さらにアップデートされた点を述べる。

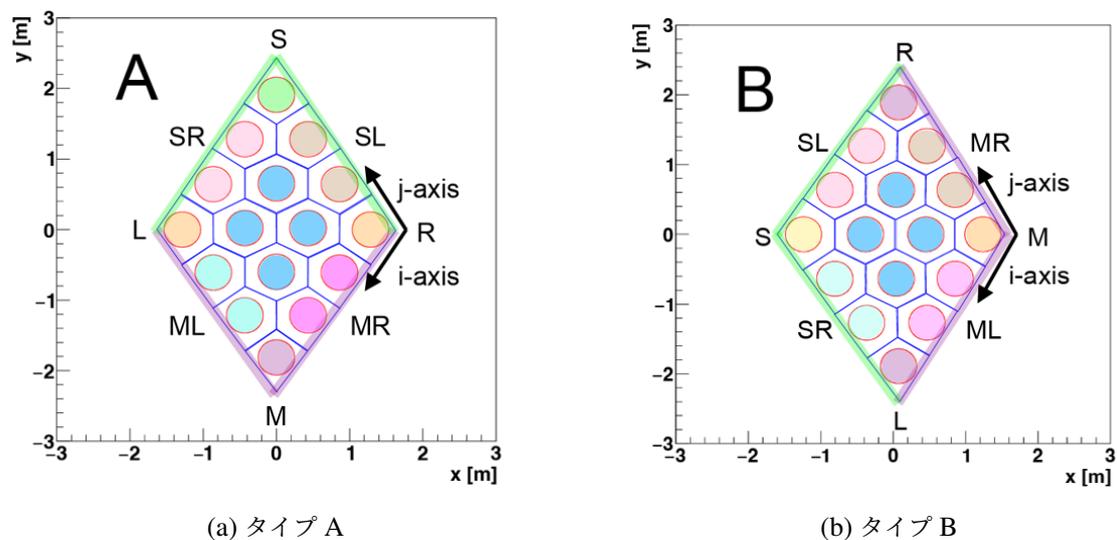


図 3.3: 各菱形におけるミラー形状 [27]。1つの菱形につき、2種類の四角形ミラーと5種類の五角形ミラーと1種類の六角形ミラーで構成される。

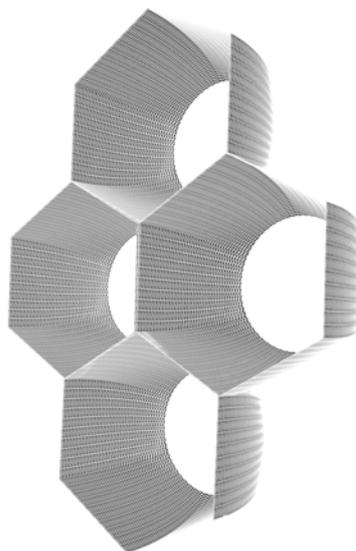


図 3.4: 多角形ミラーのイメージ [20]

### 3.1.2 従来仕様からの変更点

さらなる集光率向上を目指し、KamLAND2 プロトタイプ検出器での建設経験を活かして、先行研究から形状がアップデートされた。その内容は以下のとおりである。



図 3.5: ミラーの高さ変更イメージ [28]

### ミラー高さの短縮

従来開発されてきた集光ミラーは高さが 419 mm であったが、これを PMT に装着した場合、菱形領域を覆うアクリルプレートと物理的に干渉するという課題があった。このアクリルプレートは、内部検出器のステンレスタンク付近で発生するラドンや放射性不純物が、対流によってバルーン付近へ流れるのを防ぐ目的で導入されたものである。この問題を解決するため、図 3.5 のように集光ミラーの高さを 180 mm まで短縮し、アクリルプレート内部に収まる寸法へと設計変更が行われた。単に高さを短縮するとミラー開口部が小さくなり、デッドスペースが増大してしまう。そのため、本設計ではミラー口外周の長さを短縮前と変えないようにスケール化を施している。KamLAND 全体系を対象としたシミュレーションの結果、ミラー高さを 419 mm から 180 mm へ変更しても集光量に顕著な低下は見られないことが確認された。しかし、一方で入射角に対するアクセプタンスが狭まったことで、特に中心から離れた領域での発光に対して迷光が増加するという課題も生じている。事象再構成自体に問題はないが、この問題に対して機械学習を用いた最適化も進められている [28]。

### ミラー入り口の材質の変更

2.3.2 節で述べた KamLAND2 プロトタイプ検出器の建設において、ステンレスタンク底面板の歪みに起因し、純水注入後に集光ミラーの相対的な位置関係が変化した。その結果、ミラー同士が干渉し、一部のミラーに変形が生じるという問題が確認された [24]。KamLAND2 の建設においても、これと同様のミラー間干渉が発生する可能性がある。そこで、ミラー間の位置ずれに対する許容度を高めるため、集光ミラーの入口部分を従来の剛性構造からシート状素材へと変更した。この構造により、ミラーの配置にずれが生じた場合でも、相互干渉を緩和できる設計となっている。以降、本研究では集光ミラーのうち、図 3.6 のように、入口部に用いたシート状素材を「シートミラー」と呼び、それ以外の従来開発部分を「PET ミラー」と呼ぶ。

### 一体型ミラーから分割型ミラーへ

従来の集光ミラーは、ミラー全体形状に対応した一体型の型を作成し、その型を用いて基板成型を行う方法で製作されていた。この製作手法を見直し、多角形ミラーを構成する各面を個別に

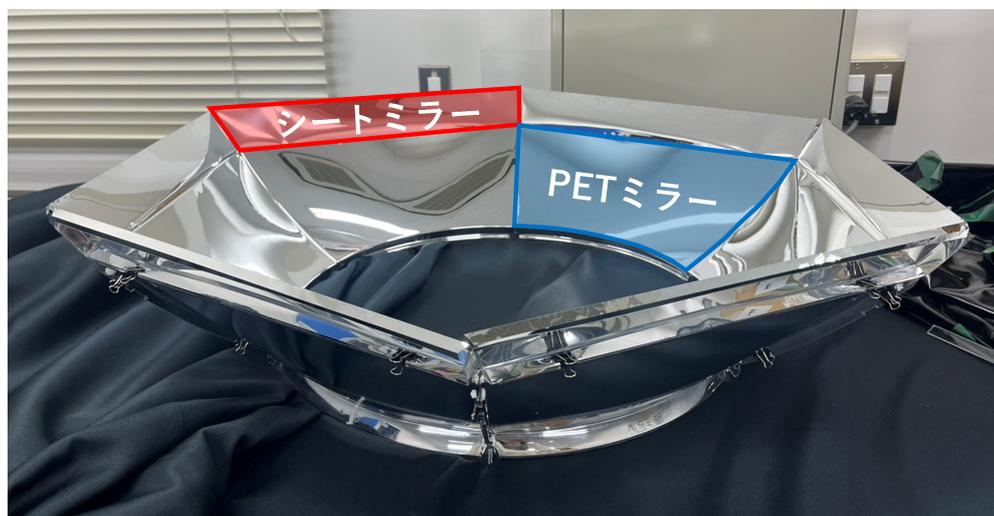


図 3.6: 集光ミラー

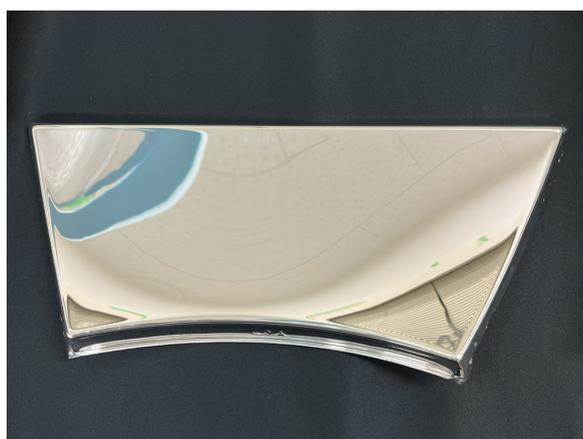


図 3.7: 分割型 PET ミラー

成型・蒸着した後、最終的に組み合わせる分割型ミラーへと変更した（図 3.7）。この分割型構造の採用により、大型かつ高精度な一体型の型を作成する必要がなくなり、製作コストの削減が可能となった。また、蒸着対象となる面積が小さくなることで、蒸着膜厚や反射性能の均一性が向上するという利点がある。さらに、各パーツを個別に取り扱えるため、狭い作業空間においてもミラーの搬入やインストールが容易になる。

## 3.2 ミラーサンプルの詳細

それでは、本章の主題である反射率測定について述べる。まず、本研究において反射率評価の対象とした素材候補の一覧を示す。本研究で検証したサンプルは、PET ミラーが 4 種類、シートミラーが 3 種類の計 7 種類である。PET ミラーおよびシートミラーの基本構造を図 3.8 に示す。図 3.8(a) に示す PET ミラーについて、先行研究では基板材料としてアクリルを用いていたが、本

研究ではすべて PET 基板を採用した。先行研究においては、基板裏面へのアルミニウム蒸着の可能性を考慮し、光透過率の高いアクリル基板が選択されていた。一方、本研究では光透過率の高いトップコートが実現可能となり、裏面への蒸着が不要となったことから、柔軟性に優れ、割れにくい PET を基板材料として採用した。各サンプルの詳細な素材構成については、PET ミラーに関しては表 3.1 に、シートミラーに関しては表 3.2 にそれぞれ示す。



図 3.8: PET ミラーおよびシートミラーサンプルの構造

表 3.1: PET ミラーの素材や特徴

サンプル名	コーティング	コーティングの素材	厚さ
P_A	保護コーティング	アクリル系樹脂	3mm
P_B	増反射コーティング	$\text{SiO}_2 + \text{ZrO}_2 + \text{SiO}_2$	3mm
P_C	増反射コーティング	$\text{SiO}_2$	3mm
P_D	増反射コーティング	P_B と似た組成 (詳細は不明)	2mm

表 3.2: シートミラーの素材や特徴

サンプル名	シート	反射材	厚さ
S_A	PET シート	Al 蒸着	100 $\mu\text{m}$
S_B	液晶ポリマーフィルム	誘電体多層膜	206 $\mu\text{m}$
S_C	-	アルミニウム箔	200 $\mu\text{m}$

### 3.3 反射率測定

上記サンプルについて空気中と BO 中の反射率測定を行った。以下に測定方法とその結果を示す。

#### 3.3.1 測定のセットアップ

反射率測定の実験セットアップを図 3.10 に示す。光源にはキセノンランプを用い、分光器によって所望の波長に分光した光をミラーサンプルへ入射させる。サンプルで反射した光は積分球



(a) P\_B サンプル

(b) S\_A サンプル

図 3.9: PET ミラーおよびシートミラーサンプルの写真。例として、P\_B と S\_A を載せている。

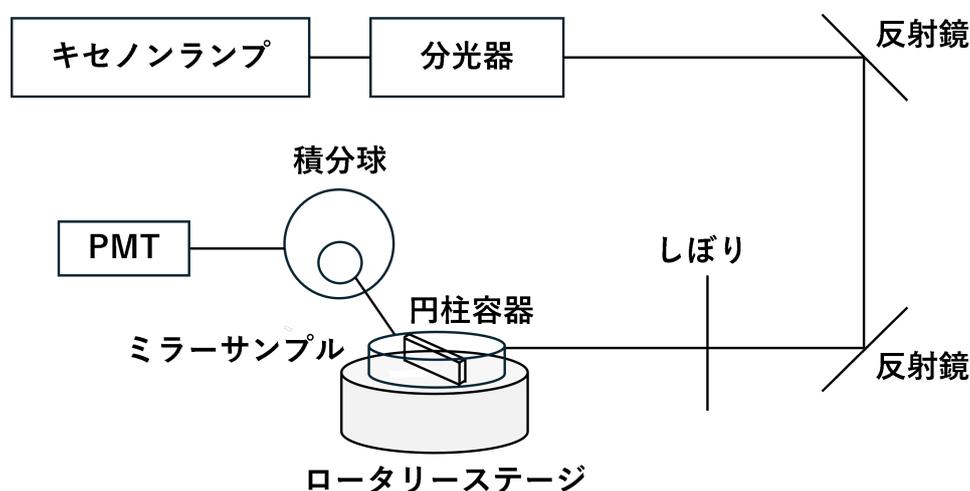


図 3.10: 反射率測定装置のセットアップ

により収集され、PMT によって測定される。入射光はしぼりを通してサンプル表面に照射される光径が適切となるよう調整されている。ミラーサンプルは固定用治具 (3.12) に取り付け、治具ごとミラー台の溝に差し込むことで自立させる構造である。サンプルはロータリーステージ上に設置されており、PC 上の制御ソフトウェアによって回転させることで、入射角依存性の測定が可能である。加えて、同ソフトウェアにより分光器の波長制御も行える。さらに、ロータリーステージ上に 30 度刻みで石英製窓を備えた円柱容器を設置し、容器内をバッファオイル (BO) で満たすことで、油中環境における反射率測定も行える。

### 3.3.2 測定方法

測定波長は 300 ~ 600 nm とし、以下の手順で反射率測定を行った。

1. ミラーサンプルをセットしない状態の光をリファレンス光とし、5 回測定する。
2. ミラーサンプルをセットして反射光を測定する。このとき、入射角を 15°、30°、45°、60°、

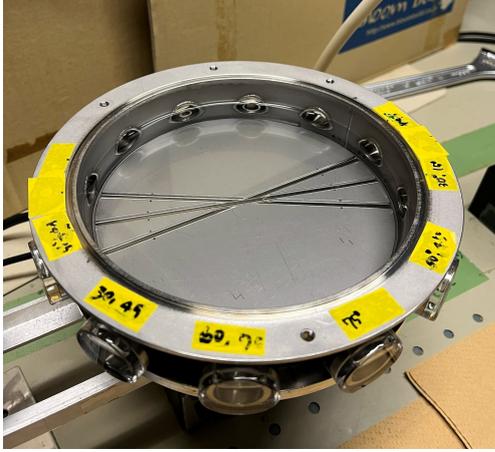


図 3.11: 円柱容器



図 3.12: サンプル固定用治具

75° の 5 パターンとした。

3. リファレンス光を再度 5 回測定する。

反射率は以下の式で定義する。

$$\text{反射率 [\%]} = \frac{\text{反射光の PMT 出力値 [V]}}{\text{計 10 回のリファレンス光の PMT 出力値 [V]}} \times 100$$

なお、本測定で使用した BO は、KamLAND から 2025 年 1 月 10 日に採取した BO(Kam-BO) である。Kam-BO は、KamLAND2 検出器で再利用される予定である。表 3.3 に、Kam-BO の組成を示す。

表 3.3: Kam-BO の組成

物質名	比率
ドデカン	約 52.5%
イソパラフィン	約 46.5%
Kam-LS	約 1%
純水	70 ppm

### 3.3.3 誤差測定

本章では、PET ミラーおよびシートミラーを対象として反射率測定を行う。PET ミラーは厚さが 2, 3mm である一方、シートミラーは極めて薄いため、サンプルの厚みに応じて溝の位置が異なるミラー台を使用する必要がある。そのため、測定対象に応じてミラー台を交換する作業が生じる。ミラー台の回転方向の位置合わせは、容器内に設けた目印に合わせて手動で行っており、測定ごとにわずかなずれが生じる可能性がある。ミラー台の位置ずれは入射角のずれに直結するた

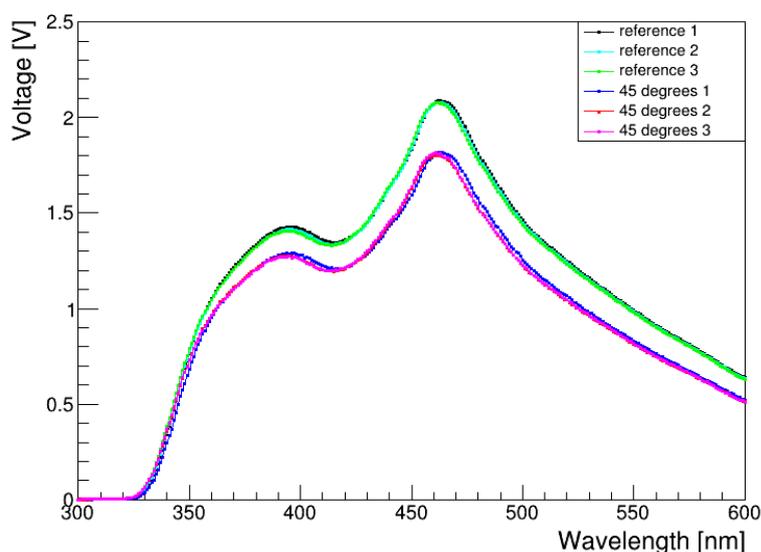


図 3.13: 反射率の系統誤差測定生のデータ。各測定のリファレンスの平均値と入射角 45 度の測定値を載せている。

め、その影響を誤差として評価する必要がある。また、ミラーサンプルをミラー台の溝に設置する作業についても、ミラー台につけた目印に合わせて手動で行っているため同様の位置決め誤差が生じる。これらの誤差を評価するため、測定前に手動で設置する要素（ミラーサンプルおよびミラー台）を毎回置き直し、反射率測定を 3 回繰り返した。測定で得られた生のデータを図 3.13 に示す。そして、得られた 3 回の測定結果における反射率の最大差を系統誤差として定義した。系統誤差をつける波長領域は、Kam-LS の発光に対する PMT 感度領域である 365 ~ 500 nm および、Xe-LS (with Bis-MSB) の発光に対する PMT 感度領域である 400 ~ 530 nm の 2 領域とした。入射角 45 度、BO 中における反射率の測定結果を図 3.14 に示す。これより、いずれの波長領域においても系統誤差は約 2% であることが分かった。他の入射角における空気中および BO 中の系統誤差を、表 3.4, 3.5 にまとめる。

### 3.3.4 測定結果

本測定では、反射率の要求値を 85%、理想値を 90% と設定した。反射率を評価する波長領域は、Kam-LS および Xe-LS(with Bis-MSB) の発光に対する PMT 感度領域とした [23]。特に集光ミラーは、 $0\nu\beta\beta$  事象の発見を目的として導入される検出器要素の 1 つであることから、反射率測定における代表値には、Xe-LS(with Bis-MSB) の発光ピークに相当する 430 nm での反射率を採用した。

PET ミラーサンプルおよびシートミラーサンプルについて、空気中における反射率測定結果を図 3.15 に示す。入射角はいずれも 45 度である。また、各サンプルの反射率の代表値を表 3.6 にまとめた。なお、365 nm 以下の波長領域において反射率が 100% を超えて変動しているのは、

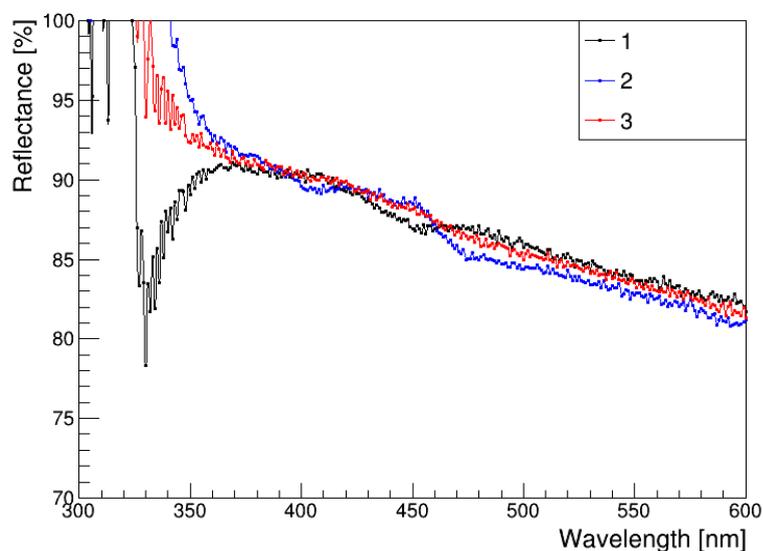


図 3.14: BO 中の反射率測定の波長依存性 (入射角 45 度)

表 3.4: 空気中の反射率測定の系統誤差

入射角 [度]	系統誤差 [%]	
	365 ~ 500 nm	400 ~ 530 nm
15	1.33	1.33
30	1.22	1.22
45	1.33	1.33
60	1.43	1.43
75	1.32	1.15

表 3.5: BO 中の反射率測定の系統誤差

入射角 [度]	系統誤差 [%]	
	365 ~ 500 nm	400 ~ 530 nm
15	1.53	1.53
30	1.78	1.78
45	2.11	2.11
60	1.42	1.42
75	2.82	1.86

Kam-BO 中に Kam-LS が混入している影響により、図 3.14 に示すように 365 nm より短波長の光が透過せず、反射率算出時に分母および分子がともに極めて小さくなるためである。

図 3.15(a) より、PET ミラーでは P\_A が Kam-LS および Xe-LS の両発光領域において要求値である 85% を下回っている一方、残る 3 種の増反射コーティングサンプルはいずれも要求値を満たしていることが分かる。また、図 3.15(b) より、シートミラーでは S\_C が両発光領域において要求値を下回っているのに対し、S\_B は 365 ~ 380 nm の短波長領域で反射率がやや低下するものの、それより長波長側では高い反射率を示している。以上の結果を踏まえ、PET ミラーについては P\_B、P\_C、P\_D を、シートミラーについては S\_A および S\_B を候補として選定し、次段階として Kam-BO 中における反射率測定を行うこととした。

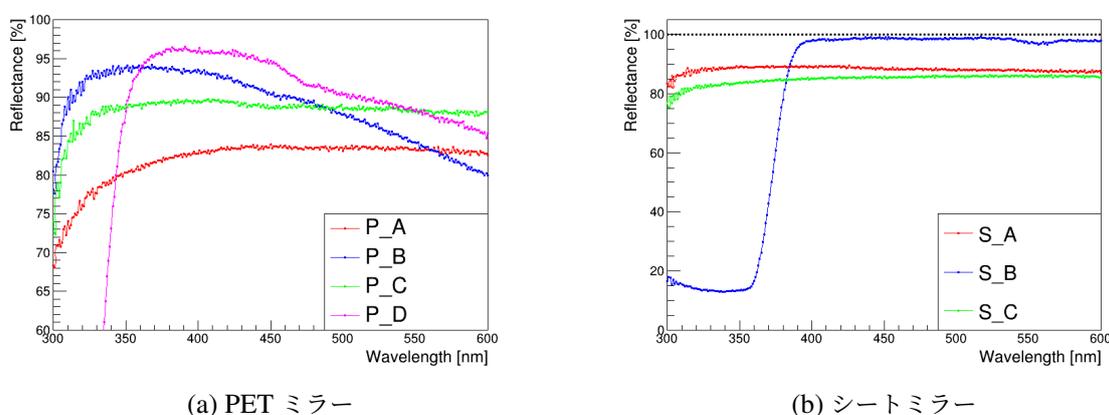


図 3.15: PET ミラーサンプルおよびシートミラーサンプルの空气中的反射率測定 (入射角 45 度)

PET ミラーサンプルおよびシートミラーサンプルについて、Kam-BO 中における反射率測定結果を図 3.16 に示す。また、各サンプルの反射率の代表値を表 3.6 にまとめた。入射角はいずれも 45 度である。図 3.16(a) より、PET ミラーについては、Kam-LS 発光領域において P\_D が最も高い反射率を示していることが分かる。一方、Kam-LS および Xe-LS の両発光領域全体を通して評価すると、P\_C が反射率の要求値を満たしている。P\_B は P\_C と比較して価格が約 2 倍であるにもかかわらず、反射性能に大きな差が見られなかったため、候補から除外することとした。図 3.16(b) より、シートミラーについては、空气中における測定結果と同様の傾向を示しており、Xe-LS 発光領域および Kam-LS 発光領域の一部においては S\_B が高い反射率を示している。一方で、2 つの発光領域全体を通して評価すると、S\_A が反射率の要求値を満たしていることが確認された。以上の結果から、シートミラーについては候補を一つに絞らず、両者を対象として次の評価を進めることとした。

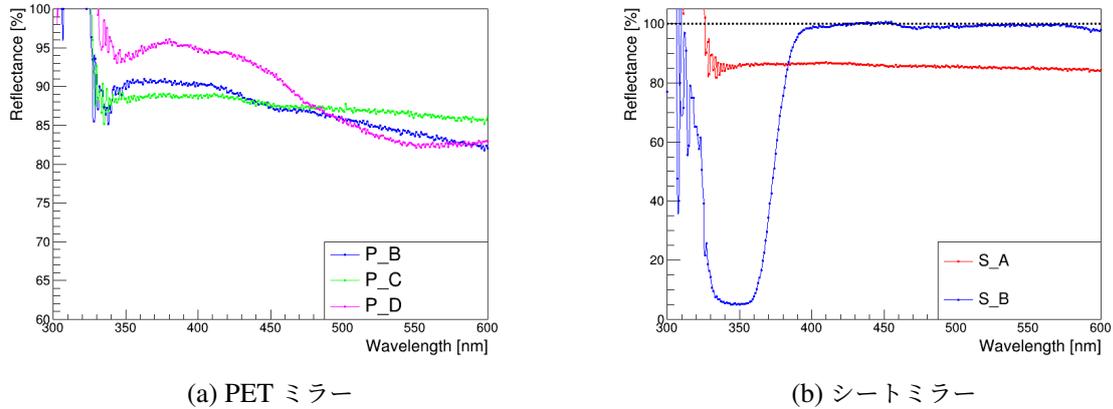


図 3.16: PET ミラーサンプルおよびシートミラーサンプルの BO 中の反射率測定 (入射角 45 度)。図中の黒い点線は、反射率 100% のラインを示している。

表 3.6: 各サンプルの入射角 45 度における反射率

サンプル名	代表値 430nm における反射率 [%]	
	空気中	BO 中
P_A	83.76	-
P_B	91.89	88.91
P_C	89.27	88.34
P_D	95.52	93.85
S_A	88.64	86.30
S_B	98.98	99.92
S_C	85.33	-

KamLAND に取り付けられた集光ミラーは、さまざまな入射角の光を集光することになる。そのため、入射角の変化に対して反射性能が大きく変化しないかを検討する必要がある。そこで、素材候補として残った P\_C および P\_D、ならびに S\_A および S\_B について、反射率の入射角依存性を評価した。P\_C および P\_D について、入射角ごとの反射率測定結果を図 3.17 に示す。図 3.17 より、入射角が小さい領域 (15 ~ 45 度) では、P\_D が相対的に高い反射率を示している一方、P\_C も反射率の要求値を満たしていることが分かる。また、入射角が大きい領域 (60 度および 75 度) では、いずれのサンプルにおいても Xe-LS 発光領域において反射率の低下が確認された。以上の結果から、入射角依存性の観点では両サンプルに顕著な優劣は見られなかったため、本段階では候補を一つに限定せず、P\_C および P\_D の両者を PET ミラー素材の候補として採用

することとした。

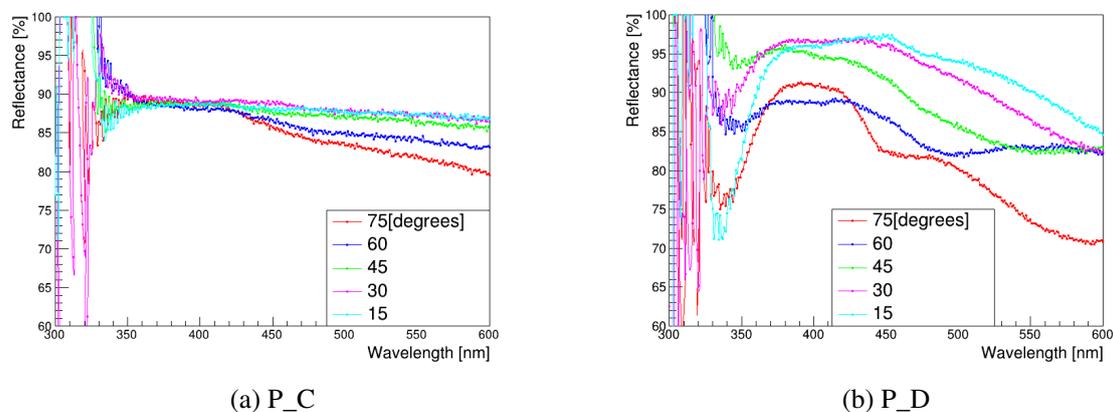


図 3.17: PET ミラーサンプルの入射角ごとの BO 中の反射率測定結果

S\_A および S\_B について、入射角ごとの反射率測定結果を図 3.18 に示す。図 3.18 より、S\_A は全体として反射率の要求値を概ね満たしていることが確認できる。一方で、S\_B はすべての入射角において低波長領域で反射率の低下が見られる。S\_B を用いた場合、Kam-LS 発光の集光性能が低下することが懸念されるため、本研究では、Kam-LS および Xe-LS の両発光領域において安定した反射性能を示した S\_A を、シートミラーの素材として選定することとした。

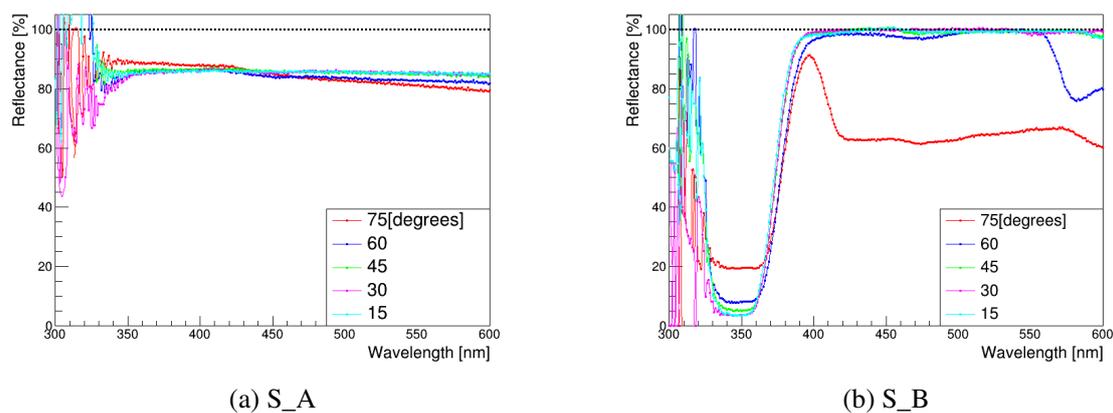


図 3.18: シートミラーサンプルの入射角ごとの BO 中の反射率測定結果



## 第 4 章

# 集光ミラー素材の耐油試験

集光ミラーは、KamLAND 検出器内のバッファオイル (BO) 中において、年単位の長期間にわたり運用される。そのため、BO 環境下でアルミニウム層の剥離や溶出などが生じず、集光ミラーの素材が十分な耐久性を有しているかを検証する必要がある。そこで本研究では、第 3 章において選定した PET ミラーおよびシートミラーの素材を対象として、加速劣化試験を実施し、長期運用を想定した耐油性の評価を行った。

### 4.1 加速劣化試験

加速劣化試験とは、サンプルの劣化速度を意図的に促進させることで、比較的短期間の実験から長期的な耐性を評価する試験手法である。本研究では、サンプルを高温環境下で保管することにより劣化を加速させる手法を採用した。アレニウスの式によれば、温度が  $10^{\circ}\text{C}$  上昇すると、劣化速度は約 2 倍になることが知られている。KamLAND 検出器が設置されている坑内環境の温度は、年間を通して約  $11^{\circ}\text{C}$  に保たれている。一方、本試験では  $43^{\circ}\text{C}$  に設定した恒温槽内でサンプルを保管したため、坑内環境と比較して約  $33^{\circ}\text{C}$  高温条件となる。この温度差から、劣化速度は約  $2^3 = 8$  倍に相当すると見積もられる。これは、恒温槽内で 1 か月間保管した場合、KamLAND 環境下で約 8 か月間保管したことを意味する。

サンプルの保管方法を図 4.1 に示す。本試験で検証したサンプルは、PET ミラーの候補である P\_C、P\_D およびシートミラーの候補である S\_A の計 3 種である。バイアル内に Kam-BO とミラーサンプルを封入し、光による劣化を防ぐため、これらをアルミニウム製のジップバッグに入れた上で恒温槽内に設置し、一定期間保管した。本研究では、保管前後におけるミラーの反射率および Kam-BO の透過率を比較することで、サンプルの長期的な性能安定性を評価した。そのため、反射率測定用および透過率測定用の 2 種類のバイアルを用意した。反射率測定用のバイアルには、測定に必要な固定用治具を取り付けた状態のミラーサンプルを封入している。バイアル内の Kam-BO の液量は、反射率測定用で 150ml、透過率測定用で 130ml とした。

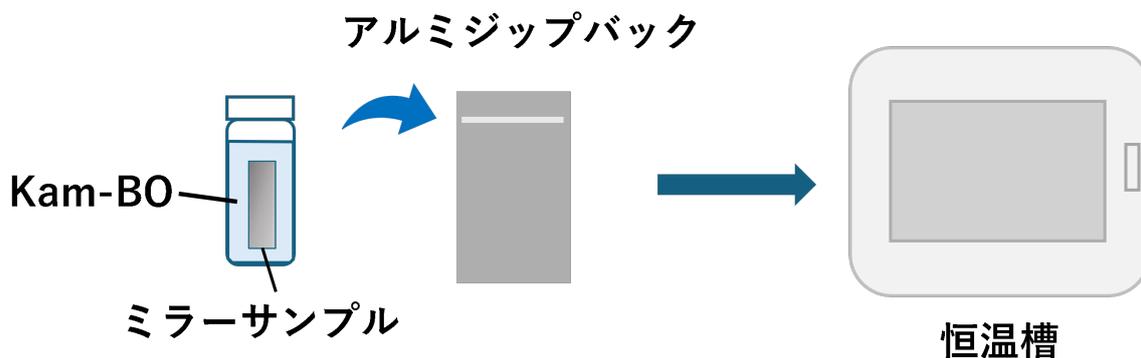


図 4.1: サンプルの保管方法

## 4.2 透過率測定

耐油試験の評価項目の1つである透過率について、測定のセットアップや測定方法について述べる。

### 4.2.1 測定のセットアップ

透過率測定のセットアップを図 4.2 に示す。本測定には、日立ハイテク社製の分光光度計 U-3900 を用いた。特定波長の光を、試料を封入した 1 cm および 10 cm の石英セルに入射させ、試料透過後の光強度を PMT により測定する。得られた 2 種類のセル透過後の光強度の比をとることで、9 cm 分の透過率を算出する。異なる光路長のセルを用いる理由は、セル表面での反射や入射・出射面に起因する光学的損失の影響を相殺し、試料そのものによる透過率を評価するためである。

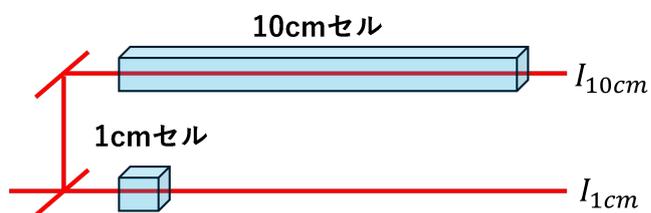


図 4.2: 透過率測定装置のセットアップ



図 4.3: 1cm セルと 10cm セル

### 4.2.2 測定方法

本測定では、特定物質の透過率を基準値（ベースライン）として設定し、Kam-BO の相対的な透過率を評価する仕様になっている。そこでベースラインとして、高い光透過度を有し、かつ屈

折率が Kam-BO に比較的近いシクロヘキサンを用いることで、測定系に起因する影響を抑えた上で、実質的な透過率を求めることとした。測定波長範囲は 300 ~ 600 nm とし、透過率測定は以下に示す手順に従って実施した。

1. シクロヘキサンをベースラインとして設定したのち、シクロヘキサンを測定する。
2. Kam-BO を 3 回測定する。
3. シクロヘキサンを再度測定する。

透過率は以下の式で算出できる。

$$\text{透過率} [\%] = \frac{I_{10 \text{ cm}}(\text{Kam-BO})/I_{1 \text{ cm}}(\text{Kam-BO})}{I_{10 \text{ cm}}(\text{シクロヘキサン})/I_{1 \text{ cm}}(\text{シクロヘキサン})} \times 100$$

透過率測定の系統誤差は、先行研究 [29] により  $\pm 0.3\%$  と求まっている。

## 4.3 測定結果

### 4.3.1 反射率

反射率の比較結果を図 4.4 に示す。入射角は  $45^\circ$  とし、P\_C および S\_A については恒温槽で 20 週間保管後 (KamLAND 環境換算で約 3 年相当)、P\_D については 8 週間保管後 (同約 1.2 年相当) に反射率測定を行った。測定結果より、Kam-LS 発光の PMT 感度領域である 365 ~ 500 nm および Xe-LS(with Bis-MSB) 発光の PMT 感度領域である 400 ~ 530 nm のいずれの波長領域においても、有意な反射率の低下は確認されなかった。

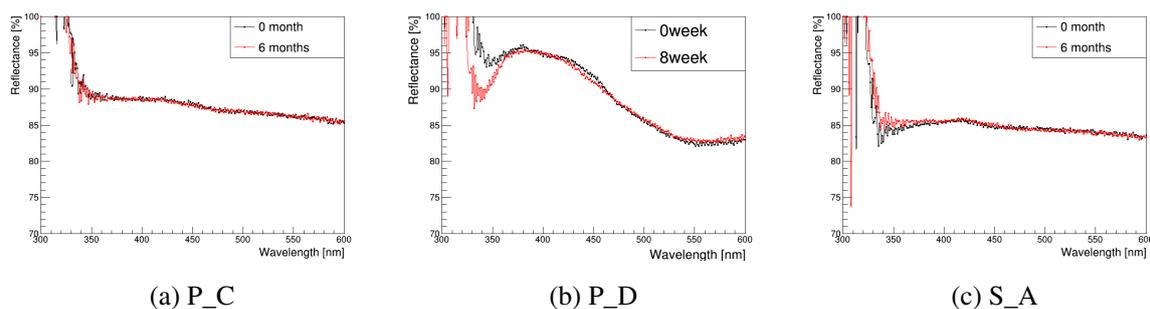


図 4.4: 加速劣化試験後の反射率測定結果

### 4.3.2 透過率

続いて、透過率測定の結果を図 4.5 に示す。恒温槽に保管した期間は、反射率測定と同一条件である。この図より、3つのサンプルすべてにおいて、450 nm より高波長側では恒温槽保管前後で透過率に有意な変化は認められない一方、それより低波長側では誤差を超える透過率の低下が確認された。この原因を調べるために、対照実験として行った、Kam-BO のみを封入したパイア

ルの加速劣化試験の結果と比較したものを図 4.6 に示す。この図より、Kam-BO のみの透過率もミラーサンプルを含む場合と同様の透過率低下が見られていることがわかった。以上の結果から、観測された透過率の低下はミラーサンプル自体の劣化に起因するものではないことが判明した。

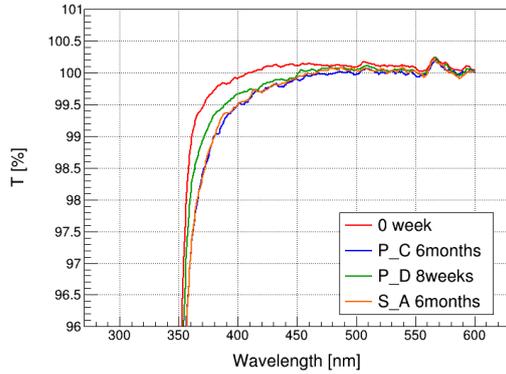
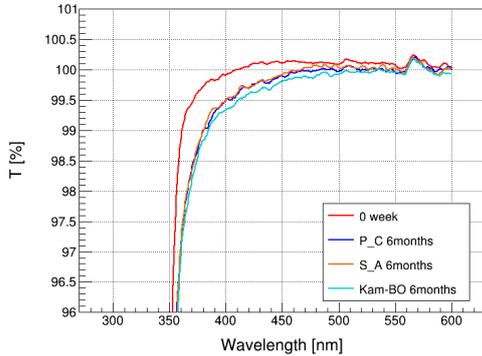


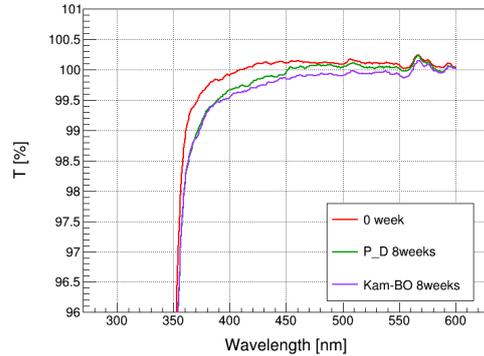
図 4.5: 加速劣化試験後の透過率測定結果

表 4.1: 波長 390nm における恒温槽保管前と比較した透過率の減少値

サンプル	透過率の減少値 [%]
P_C	0.517
P_D	0.301
S_A	0.462



(a) P\_C および S\_A



(b) P\_D

図 4.6: Kam-BO のみの透過率と試料の透過率の比較

この測定結果は実験室スケールで得られたものであるため、測定した透過率を規格化し、KamLAND 検出器における透過率を見積もる必要がある。まず、本測定では BO を 9 cm 透過した際の透過率を測定したが、KamLAND 検出器では、光が発光して PMT に到達するまでに通過する BO の厚さは約 2 m である。そのため、透過距離を 9 cm から 2 m に換算すると、実験室環境と比較して透過率はより大きく減少すると考えられる。一方で、バイアル内に封入したミラーの表面積と BO 体積の比 (S/V 比) についても、KamLAND 検出器環境へ換算する必要がある。バイアル内および KamLAND 検出器内における S, V および S/V 比の値を表 4.2 に示す。表より、バイアル内の S/V 比は KamLAND 検出器内よりも大きく、バイアル内ではミラーが BO に与える影響が相対的に強いことがわかる。

KamLAND 検出器における透過率を算出する際は、実験室での劣化度を BO 厚および S/V 比

表 4.2: ミラー表面積  $S$ 、BO 体積  $V$  および  $S/V$  比の一覧。KamLAND におけるミラー表面積は全て六角形ミラーと仮定して概算した。

環境	$S$ [m <sup>2</sup> ]		$V$ [m <sup>3</sup> ]	$S/V$ 比 [1/m]	
	PET	シート		PET	シート
バイアル内	$16 \times 10^{-4}$	$16 \times 10^{-4}$	$130 \times 10^{-6}$	12.3	12.3
KamLAND 検出器	605.8	272.0	1800	0.337	0.151

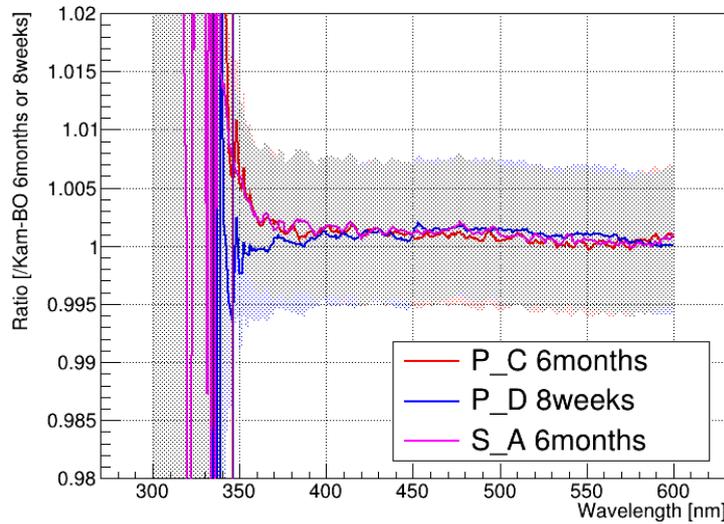


図 4.7: 加速劣化試験で得られたミラーによる劣化度

による指標で規格化する。実験室での劣化度は、ミラーを入れていない加速劣化試験とミラーを入れた加速劣化試験の比で表すことができ、実験室での透過率と KamLAND 検出器での透過率の関係は以下の式で表せる。

$$\left( \frac{T_{\text{lab with mirror}}}{T_{\text{lab without mirror}}} \right)^{\left( \frac{200}{9} \times \frac{S/V(\text{KamLAND})}{S/V(\text{vial})} \right)} = \frac{T_{\text{KamLAND with mirror}}}{T_{\text{KamLAND without mirror}}} \quad (4.1)$$

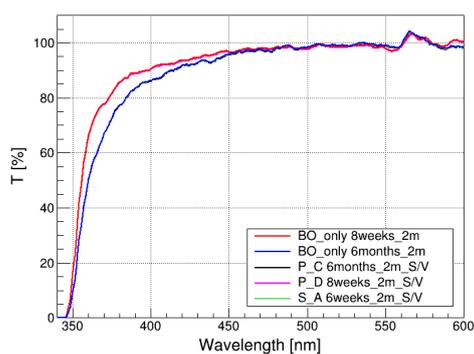
上式左辺の比率  $T_{\text{lab with mirror}}/T_{\text{lab without mirror}}$  は図 4.7 のようになった。

以下では、最も透過率が劣化した場合 (図 4.7 のエラーバー底辺) の規格化を行った。KamLAND 検出器でのミラーなし BO 透過率 ( $T_{\text{KamLAND without mirror}}$ ) は、実験室でのミラーなし BO 透過率 ( $T_{\text{lab without mirror}}$ ) を用いて以下のように表せる [30]。

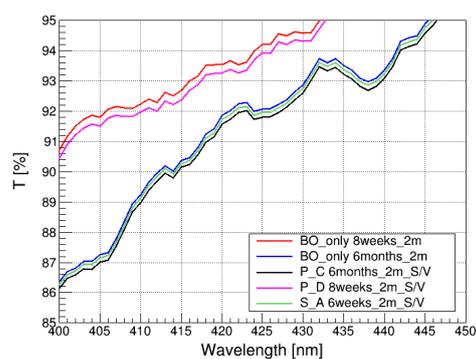
$$T_{\text{KamLAND without mirror}} = T_{\text{lab without mirror}}^{\frac{200}{9}}$$

この透過率を式 4.1 に代入すると、KamLAND 環境に規格化したミラーなしの BO 透過率および

ミラーありの BO 透過率は図 4.8a のように表せる。規格化による透過率の減少量は、10% 以内を目標とする。この図には、BO のみの加速劣化試験 (8 週間および 6 か月保管) で得られた透過率と、ミラーサンプルを入れた加速劣化試験で得られた透過率を重ねて描画しているが、線同士が重なっていて違いが見えないため、わかりやすいようにズームしたグラフを図 4.8b に示す。



(a) 全体図



(b) クローズアップした図

図 4.8: KamLAND 環境に規格化した透過率

図より、BO のみの透過率とミラーを入れた場合の透過率の減少量は 0.2% ほどであり、目標の 10% 以内を達成できることがわかった。

## 第 5 章

# 六角形ミラーの集光率評価

反射性能に基づく素材選定の結果、候補材料がバッファオイル中において長期的に十分な化学的安定性を有することを確認した。これを踏まえ、本研究では選定素材をもとに集光ミラーの試作を行い、20 インチ PMT へ実装した際の集光率の変化を評価した。なお、KamLAND2-Zen 実験で導入が計画されている集光ミラーは、四角形や五角形など複数の開口形状が設計されているが、本章では、六角形ミラーについて評価を行った。

### 5.1 集光ミラーの製作

集光率測定の内容に移る前に、PET ミラーおよびシートミラーの製作について述べる。

#### 5.1.1 PET ミラー

PET ミラーは、PET 基板の成型および Al 蒸着工程を企業側に委託し、我々で納入後の PET ミラー片の組立を行う予定である。したがって本節では組立手法に限定して述べ、委託工程を含む PET ミラーの製作過程は付録 A.2 に記載する。

PET ミラーは分割されたミラー片の状態で作成される。各片の縁はリブと呼ばれる構造で囲まれており、このリブ部分にミラー片同士の接続機構や PET ミラーとシートミラーの結合機構等が実装されている。ミラー片の左右リブには、1 辺につき 2 つずつの切れ込みとリベット穴があり (図 5.1 参照)、切れ込みにはクリップを、穴にはリベットを挿入することでミラー片同士を固定する (図 5.2 参照)。切れ込みは凸状になっており、クリップをひっかけるように差し込むことで意図的な取り外し操作を行わない限り脱落しない構造である。全てのミラー片を組み合わせることで、図 5.3 に示す六角形集光ミラーが完成する。

#### ミラー片の表面状態

第 3 章で述べたとおり、PET ミラーの素材候補は P\_C および P\_D の 2 種である。六角形集光ミラーの試作に際しては、それぞれの素材を用いたミラー片の製作を依頼した。すると、図 5.4(b) に示すように、P\_D の表面は外観上の品質が十分でないことが明らかとなった。P\_C と比較する



図 5.1: ミラー片の切れ込みとリベット穴

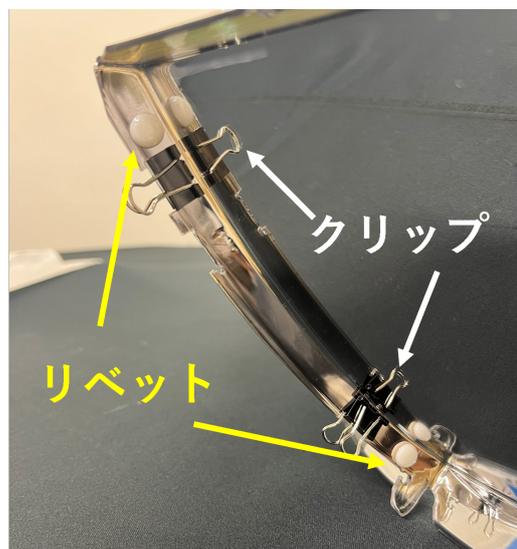


図 5.2: ミラー片をクリップとリベットで固定した後



図 5.3: 組み立て後の六角形 PET ミラー

と、P\_D には白い跡のような痕跡が多く確認され、表面の均一性が低いことが視認できる。それに加え、この時点で P\_C は量産体制が確立されていたのに対し、P\_D については生産ラインに不確定要素が残っていた。これらの結果を踏まえ、反射性能に加えて外観品質と量産の実現性が優れている P\_C を PET ミラー素材として採用することとした。

### 5.1.2 シートミラー

シートミラーについては、シート素材の切り出しから組み立てに至るまでの工程を、すべて我々で行う予定である。

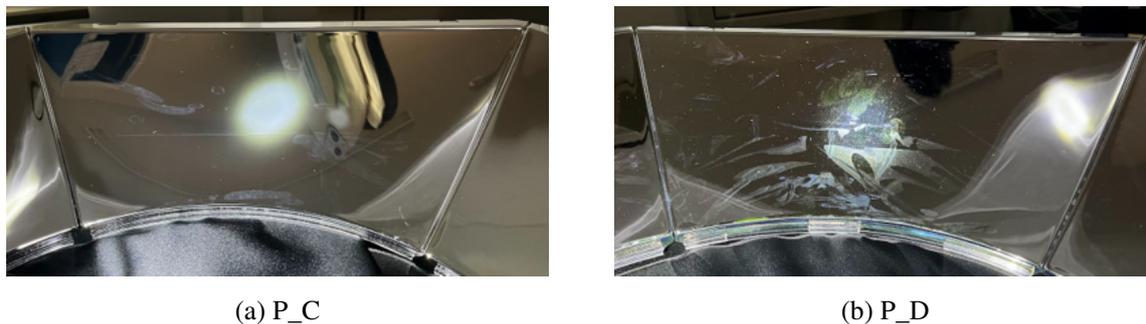


図 5.4: 六角形 PET ミラーの表面状態



図 5.5: カuttingプロッター

## 切り出し

シートミラーの切り出しには、カuttingプロッターを使用した(図 5.5 参照)。これは、ミマキエンジニアリング社製 MimakiCF-0907 というモデルであり、PC から 2 次元デザインデータを転送すると、設計形状どおりに自動でシートを切断する機械である。この装置ではフルカット(完全切断)とハーフカット(表面のみの切り込み加工)の 2 種類のカット方式が利用できる。ハーフカットを用いることで、シートに山折り用の切れ込みを形成でき、立体形状の組立を前提とした加工が可能になる。組立後のシートミラーの外観を図 5.6 に示す。



図 5.6: カット後のシートミラー。薄く線のように見えているのは全てハーフカットである。



図 5.7: シートミラー同士を接続した様子

## 組み立て

カッティングプロッタで加工したシートミラーは、ハーフカット部を山折りすることで立体形状へ成型できる。KamLAND2 検出器に導入予定のシートミラーは、対向配置されたシートミラーの上辺リブ同士をつなぎ合わせることで形状を保持する設計になっている (図 5.7 参照)。

一方本研究では、1つのPMTでの集光率測定を行うため、シートミラー単体での形状保持が必要となる。そのため、組立時の角度が維持されるよう、左右のリブを補助的にセロハンテープで固定し、プロトタイプシートミラーとして使用した (図 5.8)。

組み立てたシートミラーの形状と設計値のずれを角度で表すと、シートミラーの両端部は最大で1度ずれがあった。また、シートミラー平面部は反射面側に出っ張るように少し湾曲しており、両端と比較して最大0.4度ずれていた。

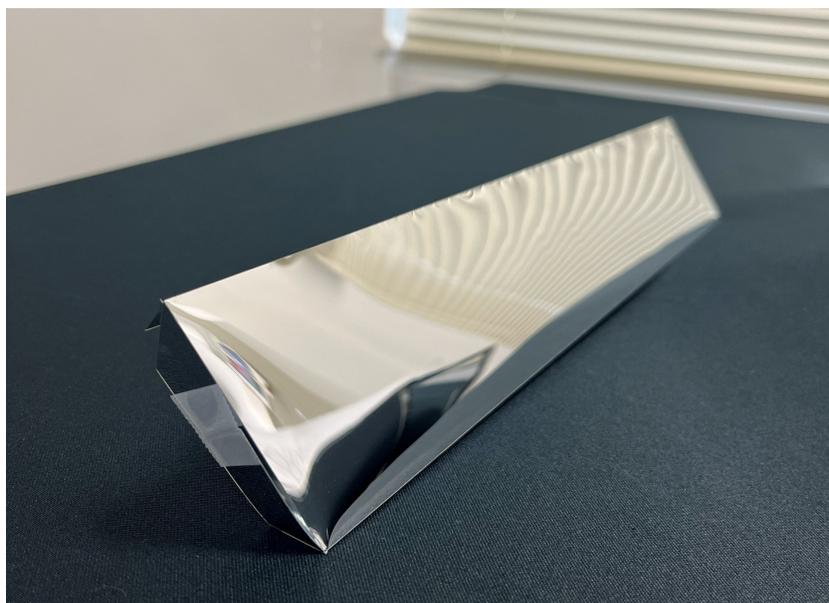


図 5.8: 組み立て後のシートミラー。白く見えるのがゼロハンテープ。

## 5.2 集光ミラーのクリーン化処理

PET ミラーおよびシートミラーは KamLAND2 検出器へ可能な限りきれいな状態で導入・設置する必要があるが、ミラーの成型・組立工程や検出器内への搬入の過程で、表面にダストや汚れが付着することが考えられる。そこで、ミラーのクリーン化工程を組み込み、この処理がミラーの光学特性や表面状態へ悪影響を与えないことを確認する実験を行った。

クリーン化手法の具体案として、イソプロピルアルコール (IPA) を含浸させた無塵布でミラー表面を拭き取る方法が提案された。使用する拭き取り布の候補は、MCC 社製 MAX クリーンクロス 9"×9" の 3 種 (MAX-5019, MAX-5029, MAX-5039) および KB セーレン社製サヴィーナミニマックスの計 4 種である。これらはいずれもクリーンルーム環境での使用を前提に設計された工業用無塵クロスであり、微粒子の発生抑制・高い表面清浄性・耐溶剤性の観点から、KamLAND2 での使用条件を満たす製品である。

### 5.2.1 評価方法

まず、各クロスを用いて、PET ミラーおよびシートミラーのサンプル片に対し乾拭きを行い、表面に傷がつかないかを確認した。その結果、サヴィーナミニマックスが最もミラー表面へ傷が付きにくかったことから、サヴィーナミニマックスを拭き取り布として採用した。

続いて、IPA を含浸させてミラーサンプル片の表面を拭き取り、その後加速劣化試験 (第 4 章で実施した手法) を行い、拭き取りがミラーの反射率およびバッファオイルの光透過率に悪影響を与えないかを評価した。試験は、PET ミラー素材 P\_C とシートミラー素材 S\_A の 2 種類を対

象に実施した。第4章では加速劣化試験に KamLAND から採取した BO を用いていたが、今回の試験開始時点で使い切ってしまったため、同等組成の BO を実験室で調製した。この溶液は、純粋な BO(組成は表 2.2 に記載) を 10L 作製し、そこへ KamLAND-LS(組成は表 2.1 に記載) を 1% 添加した後、水との液液抽出を行うことで調製した。以降、実験室で調整した BO は KamLAND から採取した BO と区別するために、「自作 Kam-BO」と呼ぶ。

### 5.2.2 評価結果

加速劣化試験後の反射率測定結果および透過率測定結果を、それぞれ図 5.9、図 5.10 に示す。測定は、PET ミラー試験片については恒温槽保管 3 週間後、シートミラー試験片については 4 週間後に実施した。図から、いずれの試験片においても反射率および透過率の有意な低下は確認されなかった。そのため、サヴィーナミニマックスに IPA を含浸させて表面を拭く方法は、ミラーの光学性能に影響を与えず、かつ表面の清浄化に有効な手法であると考えられる。

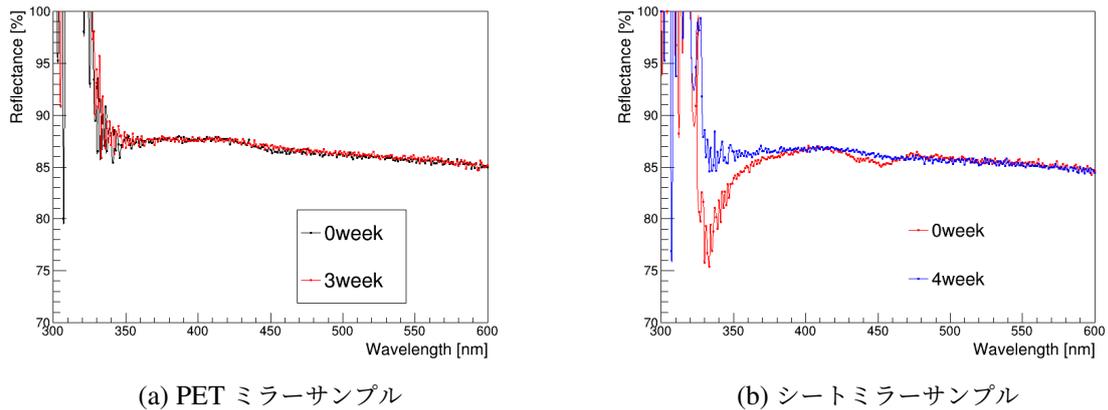


図 5.9: サンプル拭き取り後の加速劣化試験の反射率測定

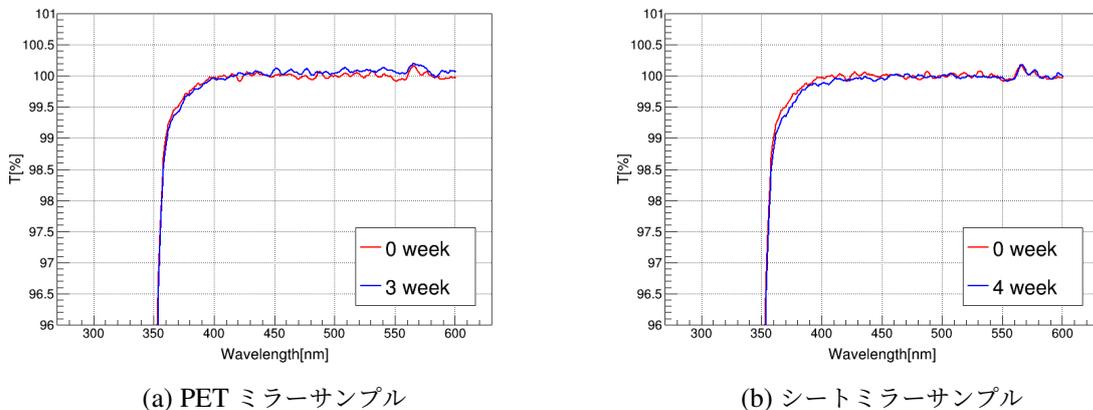


図 5.10: サンプル拭き取り後の加速劣化試験の透過率測定



図 5.11: 集光率測定のセットアップ

## 5.3 集光率測定

### 5.3.1 測定方法

集光率測定のセットアップを図 5.11 に示す。測定は暗箱内で行った。暗箱は完全な遮光が難しく、光漏れが生じることが確認されているため、遮光用の暗幕を上からかけ、外光の影響が最も小さくなる夜間に測定を実施した。

暗箱内両端に光源と 20 インチ PMT を配置している。光源には出力波長  $248 \pm 8, \text{nm}$  の UV-LED ドライバー (CAEN, SP5605) を使用し、光ファイバーを介してシンチレータ球へ接続している。シンチレータ球は、KamLAND で過去に検討されたシンチレータ候補 LAB-LS の光学特性を模擬して作られたシンチレーション光発光体である [24]。この発光体は発光スペクトルが Xe-LS(with Bis-MSB) に近いことから、集光ミラーの性能評価に適していると考えられる。

20 インチ PMT は光源から約 6.5m 離して設置しており、KamLAND 検出器におけるミニバルーン表面付近の発光を PMT で検出するという状況を再現した配置となっている。また、PMT には KamLAND2 で導入される高量子効率 20 インチ PMT を用いている。この PMT の光電面にミラーを取り付けることで、集光ミラーによる集光率を評価した。さらに、PMT は水平方向に 0 度から 40 度まで角度調整が可能であり、集光率の角度依存性も測定可能である。

加えて、光源付近には 2 インチ PMT を 2 本配置し、シンチレーション光の光量モニターとして使用している。測定系の回路図を図 5.12 に示すが、PMT からの信号は、2 回アンプで増幅させた後 Flash ADC へ入力し、データ収集を行った。Flash ADC のトリガーには、LED ドライバーの発光と同じタイミングで出力される信号を使用している。

### 5.3.2 集光ミラーのインストール

本測定で行った集光ミラーのインストール方法について説明する。

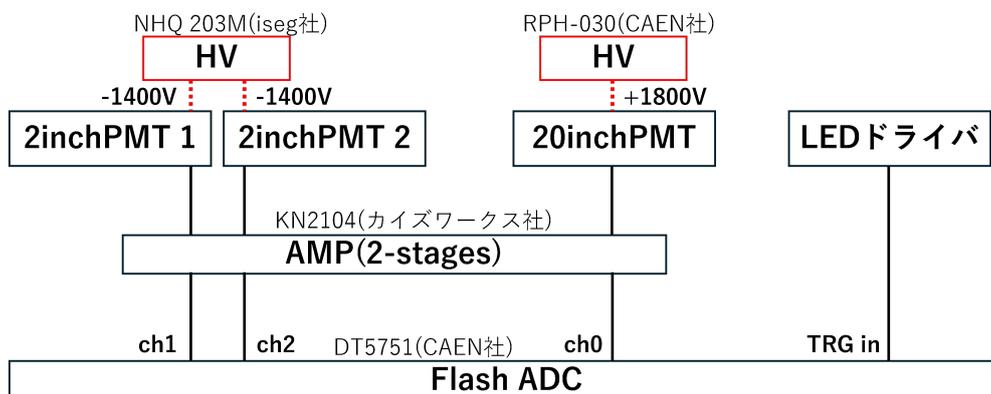


図 5.12: 集光率測定回路図

### 1. シートミラーを PET ミラーに取り付ける

まず、PET ミラーの上側リブとシートミラーの下側リブにある切れ込みを重ね、クリップで固定する。切れ込みは PET ミラー同士の接続と同様に凸形状となっており、クリップを差し込んで引っ掛けることで外れにくい構造になっている (図 5.13 参照)。しかし、シートミラー側にこの凸形状の切れ込みを直接加工することは、カット装置の精度上難しいため、あらかじめ凸形状の切れ込みを加工したアクリルプレートをシートミラーのリブへ差し込むことで、複雑な切れ込み加工なしに同じ固定機構を実現させた (図 5.14 参照)。このアクリルプレートは、シートミラーの両端の浮きを抑え、取り付け作業を容易にするという利点もある。

### 2. 集光ミラーを PMT に取り付ける

PET ミラーとシートミラーの接続が完了した後、ミラーを PMT へ取り付けた。PMT 赤道部にはバンドが巻かれており、そのバンドと接するようにミラーをはめ込んだ。ミラー取り付け口の口径は PMT より小さく、ある程度の力を加えないとはめ込めない寸法であるが、ミラーの脱落を防ぐためロープで追加固定を行う (図 5.15 参照)。固定ロープは両端にリリースタイが接合されており、接合はアルミスリーブを介して加工されている。ロープがミラーを 1 周するように巻き、リリースタイを用いてロープを締め上げて固定する。取り付け後の集光ミラーと PMT の全体像を図 5.16 に示す。

今回は 1 つの PMT に 1 つの集光ミラーを取り付けるだけでよかったが、KamLAND2 検出器へミラーを実装する際は、多数の PMT への取り付け作業が必要になる。そのため、作業効率を高めるために PMT の設置後 PET ミラーを一通りをはめ込み、その後シートミラーを PET ミラーへ取り付けるといった流れで作業を進める予定である。

## 5.3.3 解析方法

続いて、データの解析方法について説明する。



PET ミラー(上)はトップリブに、シートミラー(下)はボトムリブに切れ込みが開けられている

クリップで固定した後

図 5.13: PET ミラーとシートミラーの固定



シートミラー断面図

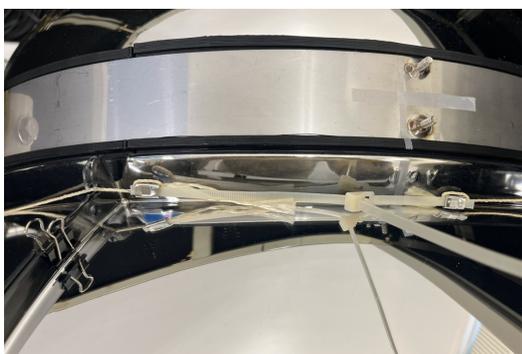
図 5.14: シートミラーのリブに差し込むアクリルプレート

### 平均光電子数の算出

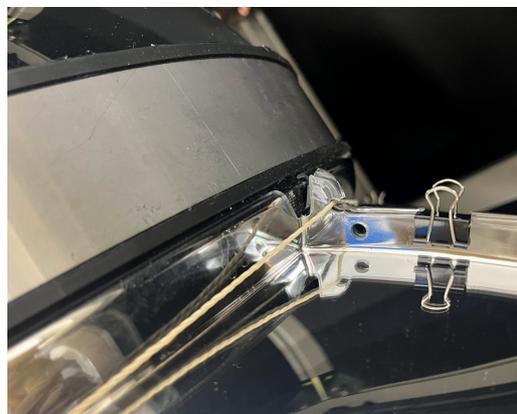
集光率測定では、20 インチ PMT でシンチレータ球の発光を検出し、PMT から放出された光電子数をカウントする手法で光量を評価する。ここで、シンチレータ球の発光は、KamLAND と同様に 1 光電子相当の光が見えてかつ、統計誤差の影響が小さくなるような大きさに調整している。本測定では、PMT から放出された光電子数の平均である平均光電子数という指標を用いて集光率を算出した。ここでは、平均光電子数  $\lambda$  の算出方法と統計誤差の考え方を述べる。

まず、PMT から放出される光電子数がポアソン分布に従うと仮定する。このとき、光電子が  $n$  個放出される確率  $P(n)$  は

$$P(n) = \frac{\lambda^n}{n!} \exp(-\lambda) \quad (5.1)$$



画像上側が PMT で、下側がミラー。



ロープを引っかけられるような構造になっている

図 5.15: ロープによるミラーの固定

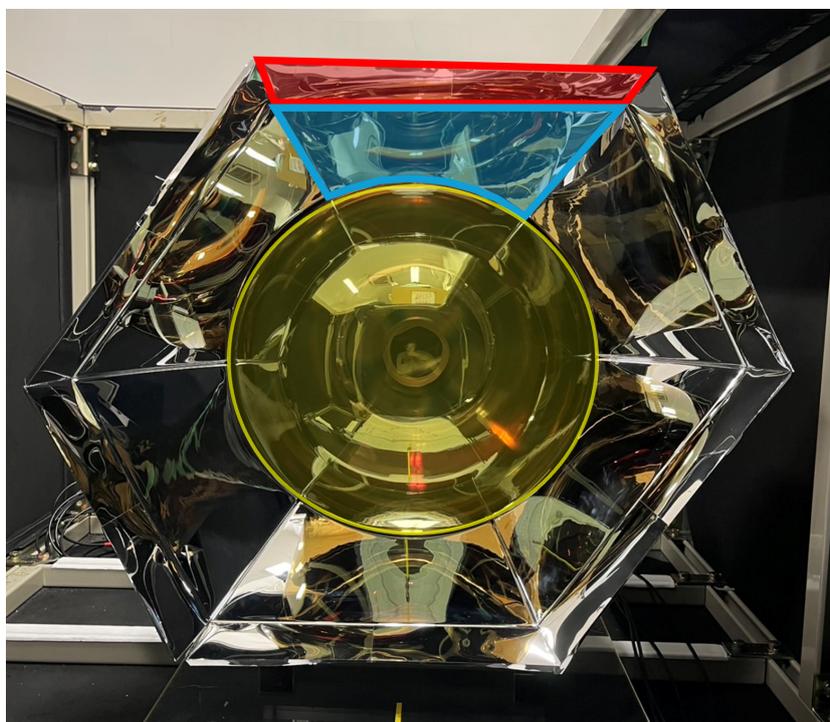


図 5.16: PMT にミラーを取り付けた図

と表せる。ここで  $\lambda$  は求めたい平均光電子数である。 $\lambda$  は  $n = 0$  の場合が扱いやすいため、式変形の出発点として  $P(0)$  を考える。

$$P(0) = \exp(-\lambda) \quad (5.2)$$

これを  $\lambda$  について解くと、

$$\lambda = -\ln(P(0)) \quad (5.3)$$

となり、光電子が 1 個も放出されない確率  $P(0)$  を求めれば  $\lambda$  を算出できることが分かる。

$P(0)$  は「光源は発光したが、20 インチ PMT では信号が検出されなかった確率」に対応する。これは

$$1 - P(\text{シンチレータ球が発光し、20 インチ PMT も信号を検出した})$$

と同義である。シンチレータ球の発光回数を  $N_2$ 、発光と同時に 20 インチ PMT で信号が得られた回数を  $N_{20}$  とすると

$$P(0) = \frac{N_2 - N_{20}}{N_2} \quad (5.4)$$

となる。したがって  $\lambda$  は

$$\begin{aligned} \lambda &= -\ln(P(0)) \\ &= -\ln\left(\frac{N_2 - N_{20}}{N_2}\right) \end{aligned} \quad (5.5)$$

と求められる。

次に誤差評価を行う。 $P(0)$  の統計誤差を二項分布の標準偏差とみなすと、

$$\delta P(0) = \sqrt{\frac{P(0)(1 - P(0))}{N}} \quad (5.6)$$

と表せる。この誤差伝播を用いて  $\lambda$  の統計誤差  $\delta\lambda$  を求めると

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial P(0)}\right)^2 (\delta P(0))^2} = \sqrt{\frac{1 - P(0)}{NP(0)}} \quad (5.7)$$

となる。二項分布の誤差は  $P(0) \sim 0.5$  のときに最も小さくなることが知られているため、本測定では、ミラーなし測定とミラーあり測定で  $P(0)$  の平均が 0.5 程度になるよう光量を調整している。

## シンチレータ球の発光イベントの選定

平均光電子数を求めるには、シンチレータ球の発光回数  $N_2$  と、シンチレータ球が発光し、かつ 20 インチ PMT で信号が検出された回数  $N_{20}$  を取得する必要がある。ここではまず、 $N_2$  を決定するための発光イベントの選定方法を述べる。測定データには外的要因による偶発的な信号も含まれるため、信号到達時間に条件を設けてイベントを絞り込んだ。

測定データには、20 インチ PMT と 2 本の 2 インチ PMT から得られた波形が電圧値として記録される (図 5.17 参照)。解析では波形の閾値を設定し、閾値を超えた信号に対して到達時間  $T$  と、波形の時間積分から得られる電荷  $Q$  を算出した。具体的な  $T$  と  $Q$  の定義式は以下のとおりである。

### 電荷 $Q$ の定義

1. 波形データが設定された閾値値を初めて超えた時刻を  $t_{\text{threshold}}$  とする。
2.  $t_{\text{threshold}}$  の前後の信号が収まる領域 (前 7ns から後ろ 35ns まで) を積分範囲とする。
3. ベースライン減算後の電圧値を用い、以下の式により電荷  $Q$  を算出する。

$$Q = \sum_{t=t_{\text{threshold}}-7\text{ns}}^{t_{\text{threshold}}+35\text{ns}} V_{\text{ADC}}(t) \quad (5.8)$$

### 時刻 $T$ の定義

1. 電圧が閾値を超えた時間と、その直前の点における時間を抽出する。
2. 抽出した 2 点を直線で結び、その直線が閾値と交差する時刻を求めるという線形補間法を用いることで、サンプリング間隔以下の精度で到達時刻  $T$  を決定できる。

$T$  の分布を図 5.18 に示す。図中の青線とピンク線で表された分布が 2 インチ PMT の到達時間分布に対応している。この分布をもとに、2 インチ PMT の信号到達時間の条件を

$$275 \leq T[\text{ns}] \leq 315$$

と定め、2 本の 2 インチ PMT がどちらもこの条件を満たすイベント数をシンチレータ球の発光回数  $N_2$  とした。

## 20 インチ PMT 反応イベントの選定

続いて、シンチレータ球が発光し、かつ 20 インチ PMT で信号が検出されたイベント数  $N_{20}$  の選別方法を述べる。2 インチ PMT の発光イベント選定と同様に閾値と到達時間  $T$  での選別も考えられるが、本測定は 20 インチ PMT の平均出力が 1 光電子程度となる光量で行っているため、信号の波高が小さく、閾値を一意に決めることが難しい。そこで、信号判定の質を保つために、電荷分布を基準に選別ラインを決定する手法を採用した。

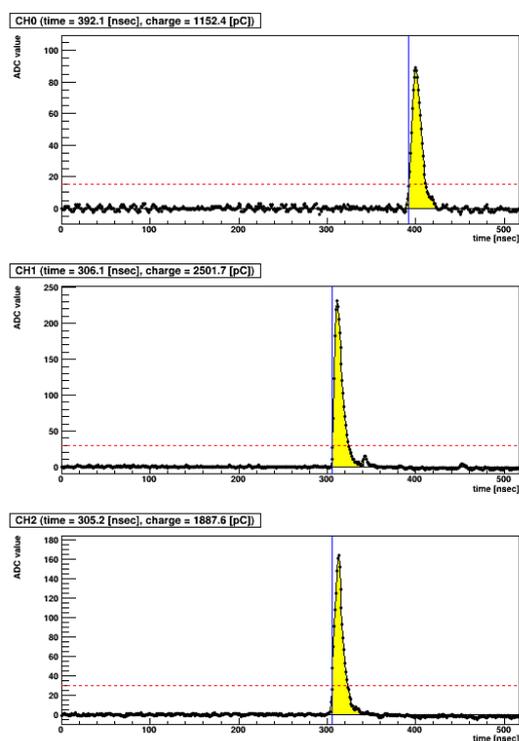


図 5.17: 生の信号データ。一番上が 20 インチ PMT の信号で、下二つが 2 インチ PMT の信号である。赤い点線が閾値のラインで、青い点線は閾値にかかった時間を表している。

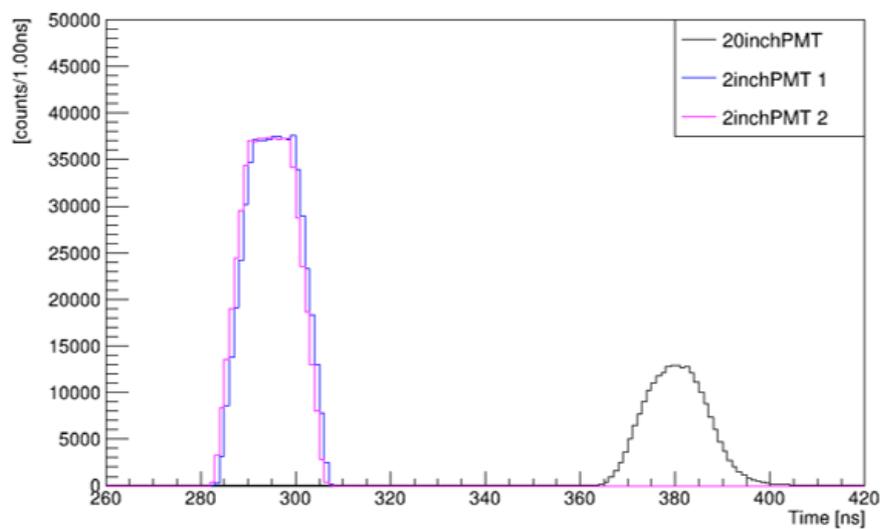


図 5.18: 20 インチ PMT および 2 インチ PMT の T 分布図

図 5.18 より、20 インチ PMT の信号到達は  $360 \leq T[\text{ns}] \leq 400$  に集中している。また図 5.17 より、信号幅は約 40ns であることから、信号領域 (オンタイム) を

$$360 \leq T[\text{ns}] \leq 440$$

と定めた。この領域の波形を時間積分して電荷  $Q$  を算出し、その分布を図 5.19 に示す。図中の  $Q \approx 0$  付近のピークは 0 光電子、 $Q \approx 1000[\text{ADC ch}]$  付近のピークは 1 光電子信号に対応する。両者の間の谷の領域は、信号と 0 光電子を分離する基準として適している。KamLAND における解析では、PMT の信号選別ラインを

$$1 \text{ 光電子の光量} \times 0.3$$

と定義している。これに従い、本測定でも図 5.19 の 1 光電子ピークをガウシアンでフィッティングし、得られた mean 値  $\times 0.3$  のライン (図中赤線) を確認すると、電荷分布の谷の位置と一致し、選別基準として妥当であることが確認できた。この結果をもとに、1 光電子光量  $\times 0.3$  以上のオンタイムイベント数を  $N_{20}^{\text{ontime}}$  とした。

ただし、この基準を満たすイベントには、光源発光とは無関係に発生したバックグラウンド信号も含まれる。そこで、バックグラウンドを見積もるために、オンタイム直前の同じ時間幅の領域

$$260 \leq T[\text{ns}] \leq 360$$

をオフタイム領域と定め、1 光電子光量  $\times 0.3$  以上のオフタイムイベント数を  $N_{20}^{\text{offtime}}$  とした。

最終的に、シンチレータ球が発光し、かつ 20 インチ PMT で反応したイベント数  $N_{20}$  は、2 インチ PMT の到達時間条件を満たすイベントに対して

$$N_{20} = N_{20}^{\text{ontime}} - N_{20}^{\text{offtime}} \quad (5.9)$$

と求められる。

## 平均光電子数の補正

ここまでの手順により、各測定の平均光電子数  $\lambda$  を算出できるようになった。次に集光率を求めてミラーの性能評価へ進むが、その前に 1 つ平均光電子数に対して補正が必要となる。

光源である LED ドライバーの設定光量はすべての測定で同一であるが、シンチレータ球の発光には揺らぎがあると考えられる。シンチレーション光の強度が変化すると、20 インチ PMT の出力もそれに比例して変動するため、測定ごとに  $\lambda$  を比較する際には、その測定時の実際の光量を考慮した補正を行う必要がある。シンチレーション光の光量と平均光電子数は比例関係にあるため、2 インチ PMT の電荷分布の mean 値を光量の指標として用いて補正する。基準とする測定の光量を  $\text{mean}_0$ 、補正したい測定の光量を  $\text{mean}$  と定義すると、光量差を補正した平均光電子数  $\lambda'$  は

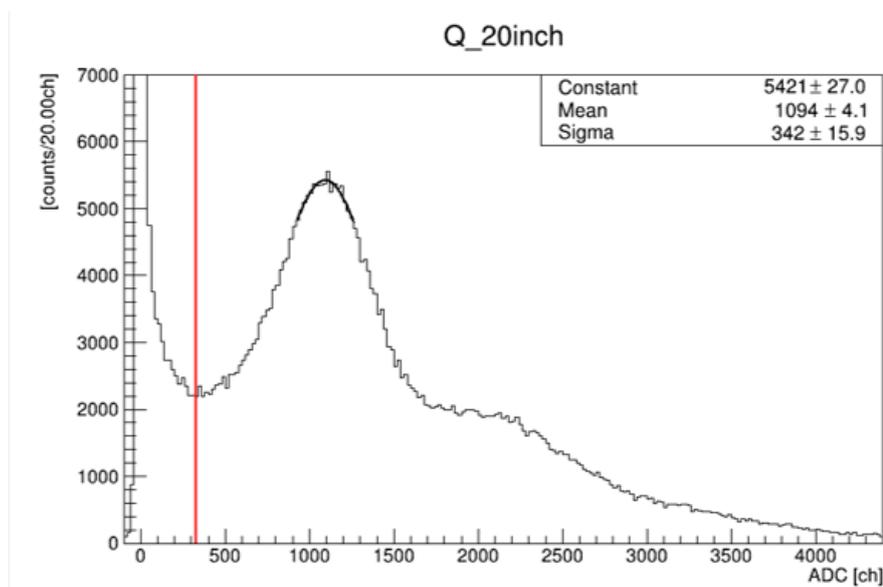


図 5.19: 20 インチ PMT の Q 分布図。1 光電子ピークをガウシアンでフィッティングし、それにより求めたイベント選定ラインを赤線で示している。

$$\lambda' = \lambda \times \left( \frac{\text{mean}}{\text{mean}_0} \right)^{-1} \quad (5.10)$$

のように求められる。

### 集光率の定義

ミラーを装着した場合の性能向上を評価するため、ミラーなしとありの測定で得られた平均光電子数を比較する。ミラーなしの 2 インチ PMT 電荷分布の mean 値を基準の光量とし、ミラーありの平均光電子数を光量補正し、その値を用いて集光率を以下のように定義した。

$$\text{集光率} = \frac{\text{ミラーありの補正した平均光電子数}}{\text{ミラーなしの平均光電子数}} \quad (5.11)$$

#### 5.3.4 誤差測定

続いて、本測定における系統誤差を説明する。統計誤差については式 (5.7) の通りだが、測定に関して、ミラーがない場合、PET ミラーを取り付けた場合、PET ミラーとシートミラーを取り付けた場合の 3 パターンで系統誤差の測定を行った。

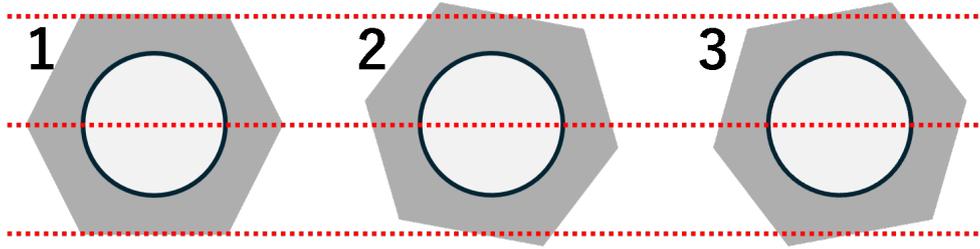


図 5.20: PET ミラーの集光率測定の測定パターン

### ミラーなしの場合

ミラーをつけない場合は、測定日による安定性を確認するために、決まった時間帯の測定を 1 日 1 回 3 日連続で行い、3 回の測定の平均光電子数の差を系統誤差とした。測定結果を表 5.1 に示す。この測定から、ミラーがない場合の系統誤差を 0.0032p.e.(0.8%) とした。

表 5.1: ミラーなしの集光率測定の系統誤差測定。平均光電子数には統計誤差も表記している。

測定ラベル	平均光電子数 [p.e.]
1	$0.3912 \pm 0.0009$
2	$0.3924 \pm 0.0009$
3	$0.3926 \pm 0.0009$

### PET ミラーのみの場合

PET ミラーのみ取り付けの場合は、測定日による安定性とミラーの取り付け位置のぶれの 2 つを考慮した。PET ミラーは毎回同じ位置に取り付けられるよう PMT とミラーに印をつけているが、手動で取り付けるため位置がずれる可能性がある。そこで、図 5.20 のように印に合わせた場合 (1) と印から左右に少し傾けた場合 (2, 3) の 3 パターンを測定し、取り付け位置による系統誤差とみなした。この測定も決まった時間帯に 1 日 1 回 3 日連続で行い、測定日安定性も考慮した。測定結果を表 5.2 に示す。この測定から、PET ミラーを取り付けた場合の系統誤差を 0.0037p.e.(0.5%) とした。

表 5.2: PET ミラーの集光率測定の系統誤差測定。平均光電子数には統計誤差も表記している。

測定ラベル	平均光電子数 [p.e.]
1	0.7232 ± 0.0013
2	0.7221 ± 0.0013
3	0.7227 ± 0.0013

### PET ミラーとシートミラーの場合

PET ミラーとシートミラーを取り付ける場合は、測定日安定性と PET ミラー取り付け位置のぶれに加え、シートミラーを PET ミラーに取り付ける際の取り付け位置のぶれを評価する。シートミラーは、5.3.2 節で述べたように、PET ミラーとシートミラーの切り込み同士を合わせて固定するが、目視で切れ込みの位置を合わせるため、取り付けごとに前後左右方向に位置がずれると考えられる。そこで、シートミラーを PET ミラーに取り付け、それを PMT に取り付けて 1 回測定する。その後シートミラーを一度外し、再度取り付けて 2 回目の測定を行う、という形で計 3 回測定を行い、系統誤差とした。測定結果を表 5.3 に示す。この結果より、PET ミラーとシートミラーを取り付けた場合の系統誤差を 0.032p.e.(3%) とした。

表 5.3: PET ミラー + シートミラーの集光率測定の系統誤差測定。平均光電子数には統計誤差も表記している。

測定ラベル	平均光電子数 [p.e.]
1	1.016 ± 0.0017
2	0.9875 ± 0.0016
3	0.9993 ± 0.0017

#### 5.3.5 測定結果

以上を踏まえ、六角形 PET ミラーのみを装着した場合および六角形 PET ミラーにシートミラーも加えて装着した場合の集光率を表 5.4 にまとめた。なお、PMT の角度は 0 度とし、光電面が光源方向を向いた配置で測定した。この結果から、PET ミラーにより集光率は約 1.9 倍へ向上し、さらにシートミラーを加えることで約 2.2 倍まで増加することが分かった。どちらの条件でも、PMT が光源正面を向いた状態では要求性能を十分に達成できていることが確認できた。

つぎに、PMT に角度を付けて測定した集光率の結果を表 5.5 に示す。なお、再現性確認のため、0 度の測定も再度行った。測定の結果、PMT 角度が 20 度までは目標値である 1.8 倍以上の

表 5.4: PET ミラーおよびシートミラー取り付け時の集光率

ミラーの種類	ミラーなしの平均光電子数 [p.e.]	ミラーありの補正した平均光電子数 [p.e.]	集光率 [倍]
PET ミラー	$0.3985 \pm 0.0033$	$0.7558 \pm 0.00404$	$1.897 \pm 0.019$
シートミラー	$0.3985 \pm 0.0033$	$0.8798 \pm 0.0315$	$2.208 \pm 0.081$

集光率を維持し、要求性能を満たしていることが確認できた。しかし 30 度以上では、図 5.21 に示すように、光源側から PMT を見ると六角形ミラーの左半分が視野に入らなくなる。このため反射面の寄与が減少し、結果として集光率が 1.8 倍を下回った。

表 5.5: 六角形集光ミラーの角度依存性

角度 [度]	ミラーなしの平均光電子数 [p.e.]	ミラーありの補正した平均光電子数 [p.e.]	集光率 [倍]
0	$0.4419 \pm 0.0033$	$0.9921 \pm 0.0323$	$2.245 \pm 0.075$
10	$0.4541 \pm 0.0033$	$0.9481 \pm 0.0320$	$2.088 \pm 0.072$
20	$0.4461 \pm 0.0033$	$0.8597 \pm 0.0318$	$1.927 \pm 0.073$
30	$0.4224 \pm 0.0033$	$0.7073 \pm 0.0322$	$1.674 \pm 0.077$
40	$0.3898 \pm 0.0033$	$0.5792 \pm 0.0319$	$1.486 \pm 0.083$

角度を変えた集光率測定は、KamLAND 検出器において発光点の位置が変化した場合の集光率の変動を評価していることに対応する。例えば、図 5.22 のように、KamLAND 検出器中の赤道付近に位置する PMT から見た場合、0 度は光源が Xe-LS 領域であるミニバルーン表面 (図中赤点) に位置し、10 度以降は KamLAND-LS 領域であるバルーン内の発光 (図中青点) であることを意味する。ただし、実際の KamLAND 検出器は、PMT からミニバルーン中心までの距離が約 8.5 m と本測定セットアップより長いため、KamLAND 検出器での集光率は次章でシミュレーションを使って考察する。

## 5.4 ミラー取り付けに関する試験

集光率評価から話は変わるが、ミラーを PMT に取り付けることに関連して行った試験を 2 つ述べる。

### 5.4.1 PMT 浮力試験

KamLAND 検出器の PMT はバッファオイル中に設置されるため、液中では浮力が生じる。特に検出器の赤道部は PMT にかかる力が最大となり、その浮力は約 50 kgf とされている [27]。浮力によって PMT が上方向へ変位すると、PMT に取り付けられた集光ミラーが、菱形状のステンレスフレームと干渉する可能性がある。このリスクを確認するため、PMT を液中に沈め、浮力による

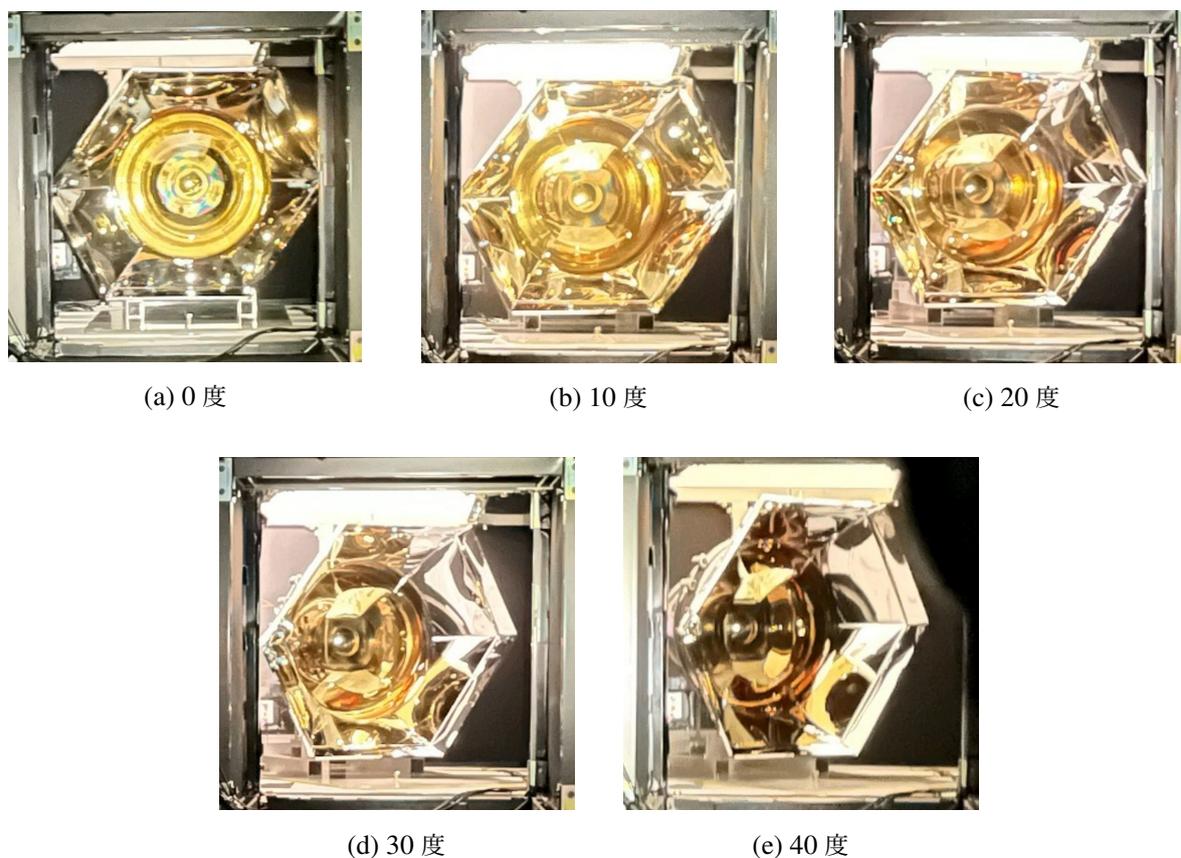


図 5.21: 集光率測定で光源から見た PMT とミラーの様子

上方向の変位量を測定する試験を行った。

試験では、KamLAND タンクへの導入時と同じく、PMT にステンレスサポートを装着した状態 (図 5.23) で水槽へ設置した。水を満たす前後で PMT 表面位置の変化を測定し、浮き上がり量を評価した。なお、PMT 単体の浮力のみを確認するために、ステンレス枠組みに PMT を固定し (図 5.24)、枠組み全体が浮力の影響を受けないよう木材の重しを載せて沈めた (図 5.24)。

試験の結果、水を満たす前後で PMT 表面が約 10 mm 浮くことが確認された (図 5.25)。この浮き上がり量を踏まえ、KamLAND タンク内でミラーとステンレスフレームが干渉しないよう、10 mm 以上のクリアランスを確保できる設計とする必要がある。

### PET ミラーおよびシートミラーの取り付け試験

続いて、KamLAND 検出器内の PMT に PET ミラーおよびシートミラーを装着した試験について述べる。本試験は、KamLAND2 建設に向けて内部検出器の PMT 取り外し作業が行われていた期間 (2025 年 7 月 27 日～2025 年 7 月 29 日) に実施し、実際にミラーを設置して適切な取り付け手順を検討することを目的とした。なお、本試験で使用した PET ミラーは実物ではなく、3D プリンタ製のミラー模型と、PET 成形済みであるが AI 蒸着されていない模型の 2 種類を用い

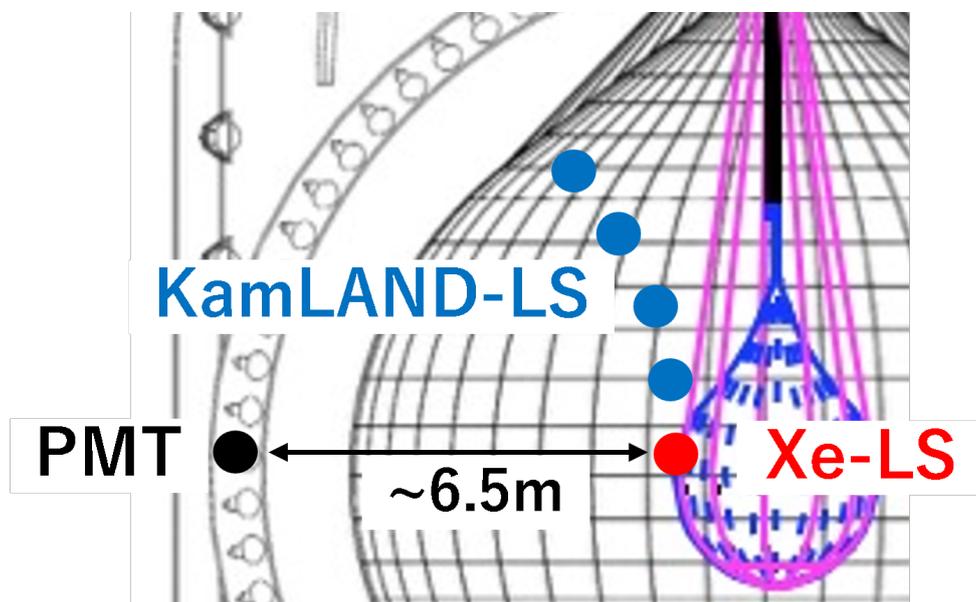


図 5.22: セットアップを KamLAND 検出器に置き換えた場合の位置関係

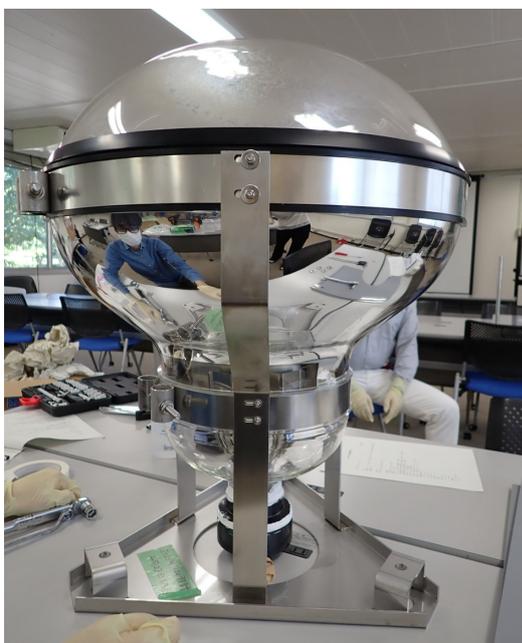


図 5.23: PMT にステンレスサポートをつけた図



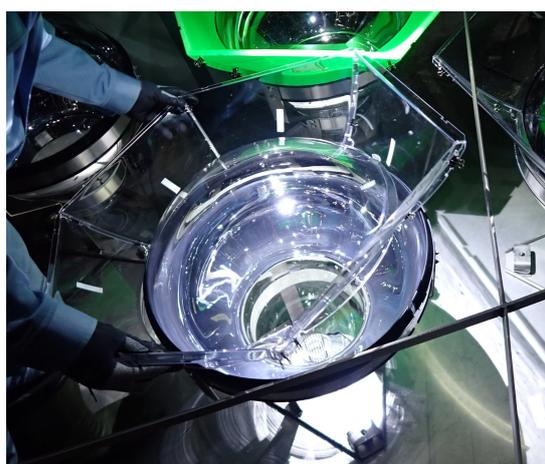
図 5.24: PMT をステンレスの枠組みに固定した図



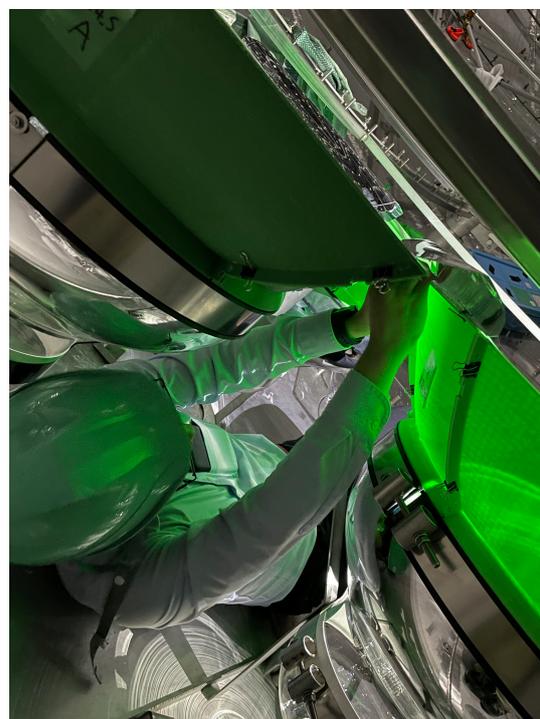
図 5.25: PMT 浮力試験の様子。左が水を張る前で、右が水で満たした後である。PMT がわずかに上方向へ移動している。

た。また、シートミラーはカッティングプロッタで切り出したものを使用した。

試験ではまず KamLAND2 で使用予定の PMT をタンク内に設置し、タンク内で PET ミラーの組み立てを行ったのち、ミラーを PMT へ装着した。その後、PET ミラーへシートミラーを取り付けた。シートミラーの設置は、図 5.26 のように、PMT 間の隙間に入って下から取り付けた。PMT に PET ミラーをすべて取り付けた写真を図 5.27 に示す。



(a) PET ミラーの取り付け



(b) シートミラーの取り付け

図 5.26: ミラーの取り付け作業の様子

この作業の結果、2つの懸念点が明らかになった。1つ目は、試験中に物理的な干渉そのもの

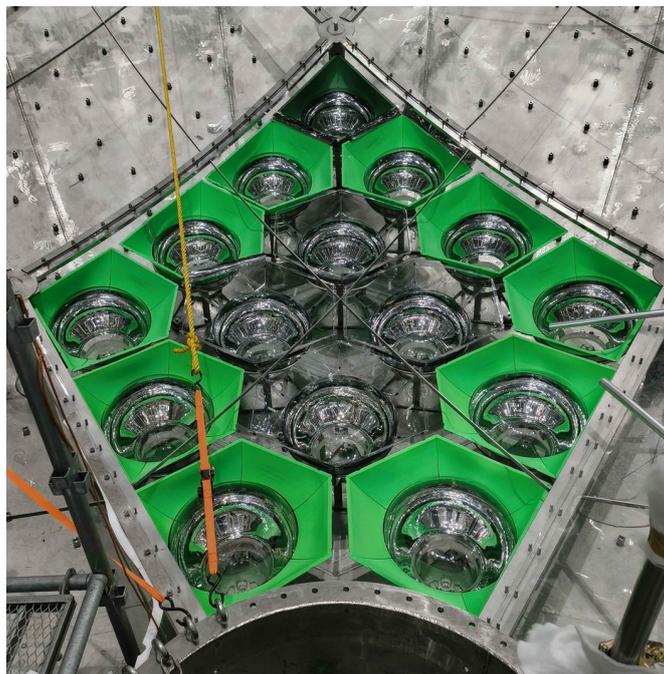


図 5.27: PET ミラーインストール試験後

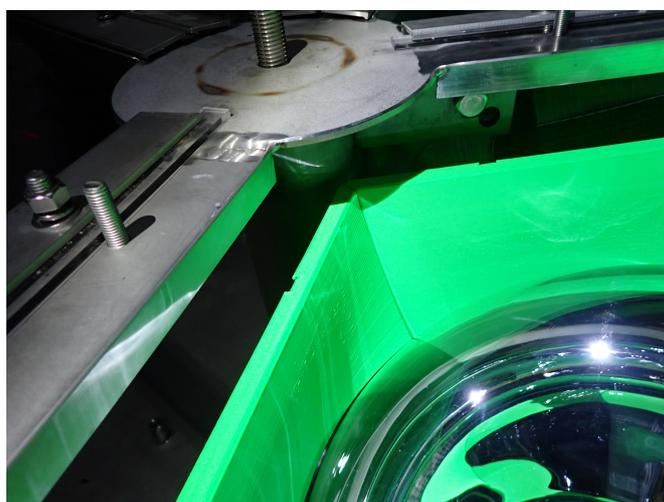


図 5.28: ステンレスフレームとの距離が近いミラー

は確認されなかったものの、一部のミラーとタンクのステンレスフレームとの距離が設計値よりも近くなった点である。その距離は約 1~2 cm であり (図 5.28 参照)、PMT の位置精度によっては、ミラーとフレームが干渉する可能性がある。干渉が発生した場合の対策としては、超音波カッター等を用いて接触部を加工する案が検討されている。

2つ目は、シートミラーの形状設計の妥当性についてである。従来の設計では、向かい合うシートミラー同士が繋がった一体型構造となっていた (図 5.29 参照)。しかし、実際のタンク内では PMT の設置位置がずれる可能性があり、それに伴って PET ミラーも変位するため、シートミラー



図 5.29: 一体となったシートミラーの取り付け



図 5.30: 改良後の繋げたシートミラーを上から見たもの。左図は、左側のシートミラーを下にずらして、右図は右側のシートミラーを下にずらしている。

同士の相対位置も変化する。その状態で取り付けると、シートミラー平面に歪みが生じ、集光率の低下につながるおそれがある。そこで、PMT および PET ミラーの位置がずれてもその影響を緩和できるような形状へシートミラー設計を変更する方針となった。具体的には、向かい合うシートミラー同士を独立した構造にし、図 5.7 のように後から一体化させることで、シートミラーが水平方向に可動な構造とした。この構造にしたことで、図 5.30 に示すように、シートミラーをずらしても反射面に影響がでない機構となった。



## 第 6 章

# シミュレーションによる集光率評価

5 章ではプロトタイプ六角形集光ミラーを用いて PMT に取り付けられた際の集光率を実測値として評価した。本章では、その集光率の値がどれだけ妥当であるかを集光率測定シミュレーションにより評価する。その後、KamLAND2 検出器におけるミラーシミュレーションを行い、どれくらい集光率が向上するか算出する。

### 6.1 集光率測定シミュレーション

まず、5 章で行った集光率測定の結果 5.5 が妥当であるかをみるために、集光率測定セットアップを再現したシミュレーションを行った。

#### 6.1.1 シミュレーションの概要

今回使用したシミュレーションソフトウェアは Geant4 である。Geant4 は言語に C++ を用いており、検出器の形状、光学特性、物質間の相互作用などを柔軟に記述できるのが特徴である。こうした汎用性の高さから、素粒子・原子核・宇宙物理分野で広く活用されている。プログラムの概要を以下に示す。

- 空気中に図 6.1 のような配置で PMT と LS 球を設置し、指定した回数 (イベント数と呼ぶ) LS 球を発光させて PMT にヒットした光電子数を計測する。LS 球は半径 10cm で、球の中心に運動エネルギー 1MeV の電子を発生させてシンチレーション光を生み出す。LS 球の  $x, z$  座標を変更することで、角度をつけた集光率測定配置を再現できる。
- PMT には六角形集光ミラーを取り付けることもできる。
- 検出器や光源を含む空間は反射率 0 のブラックシートで覆われており、外光を遮断することで暗箱環境を再現している。

このシミュレーションにより得られた PMT ヒット数から、

$$\text{平均光電子数} = \frac{\text{各イベントで PMT にヒットした光電子数の合計}}{\text{イベント数}} \quad (6.1)$$

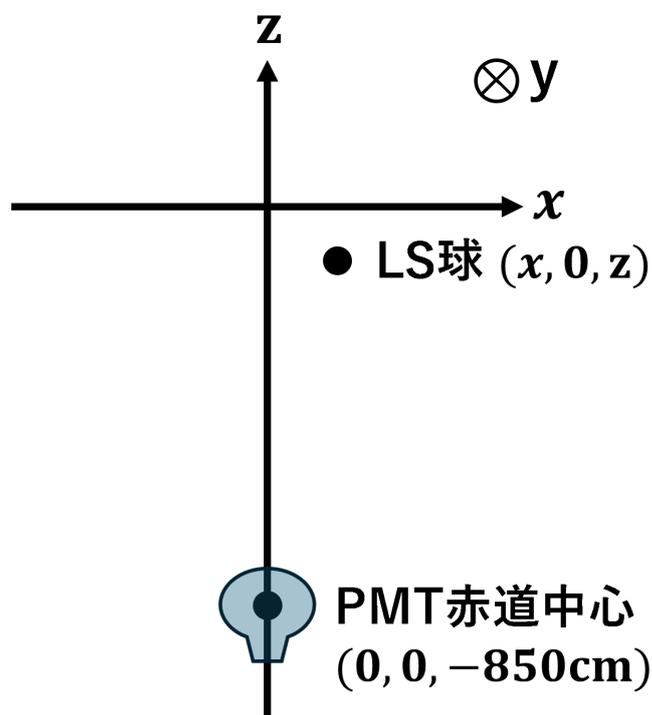


図 6.1: 集光率測定シミュレーションのセットアップ

と平均光電子数を定義し、ミラーを PMT につけない場合とつけた場合で平均光電子数の比をとることで、集光率を評価する。

### 6.1.2 LS 球の座標計算

上記で述べたように、LS 球の座標を変更することで、角度をつけた集光率測定の実験セットアップを再現したシミュレーションが可能である。角度付き測定の暗箱内の位置関係は、図 6.2a のように表せる。PMT の赤道中心と回転中心がセットアップの都合上一致しておらず、シンチレータ球から PMT 回転中心までの距離は 632 cm、PMT 回転中心から赤道中心までの距離は 26.2 cm であった。図 6.2a では、PMT 角度が 0 度のときに PMT 赤道中心の座標が図 6.1 と一致するよう、光源と回転中心の座標を調整している。

実験のセットアップは光源位置を固定し PMT を回転させる構造であるのに対し、シミュレーションでは、PMT 位置を固定し光源を移動させる構造となっている。そこで、PMT 赤道中心を固定したまま光源の座標を再定義すると、位置関係は図 6.2b のように書き換えられる。このとき、角度  $\theta$  を変化させた場合の光源座標  $(x', y', z')$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} x' &= 632 \sin \theta \quad [\text{cm}] \\ y' &= 0 \quad [\text{cm}] \\ z' &= -850 + 632 \cos \theta \quad [\text{cm}] \end{aligned} \tag{6.2}$$

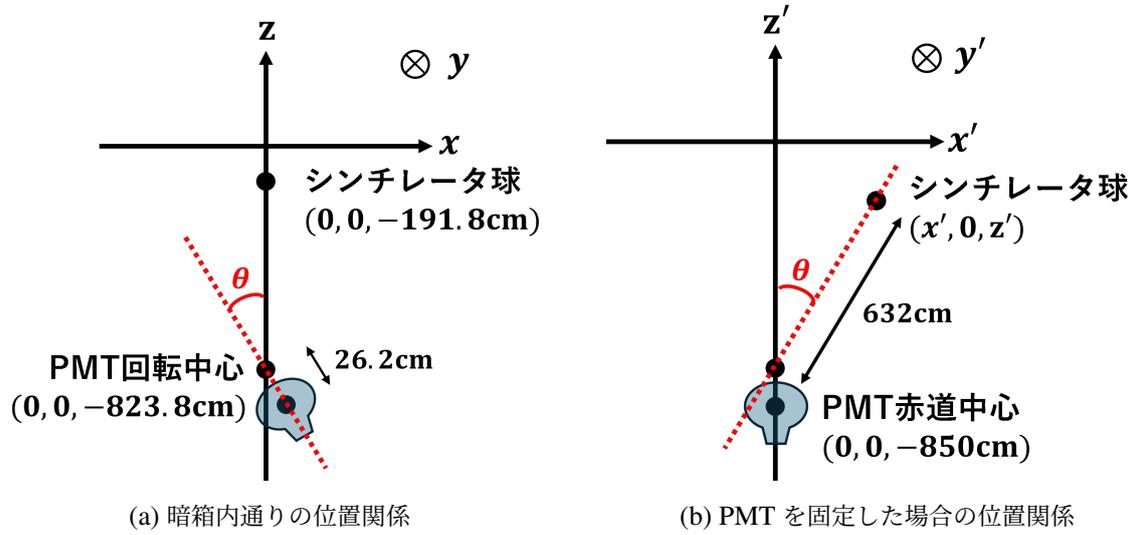


図 6.2: 角度をつけた集光率測定シミュレーションの暗箱内の位置関係

$\theta$  を 0 度 から 40 度 まで 10 度 ずつ変化させたときの光源座標を表 6.1 に示す。

角度 [度]	光源の位置 [cm]
0	(0, 0, -191.8)
10	(109.7, 0, -201.4)
20	(216.2, 0, -229.9)
30	(316, 0, -276.5)
40	(406.2, 0, -339.7)

表 6.1: 集光率測定シミュレーションにおける角度ごとの光源の位置

### 6.1.3 ミラーの反射率計算

集光ミラーの反射率は、金属反射モデルを用いた理論的な反射率計算をもとに決定している。反射面には 3 層からなる金属反射モデルを適用し、中間層の膜厚、および入射波長ごとの各層の複素屈折率を設定することで反射率を算出する。図 6.3 のように、各境界面における反射係数  $r_{ij}$  および透過係数  $t_{ij}$  を定義すると、s 偏光および p 偏光の反射率はそれぞれ以下の式で与えられる。

$$\rho_s = r_{12}^s + \frac{t_{12}^s t_{21}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}}{1 + r_{12}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}} \quad (6.3)$$

$$\rho_p = r_{12}^p + \frac{t_{12}^p t_{21}^p r_{23}^p e^{-i2\delta}}{1 + r_{12}^p r_{23}^p e^{-i2\delta}} \quad (6.4)$$

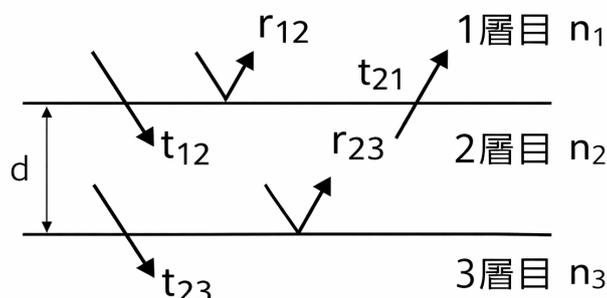


図 6.3: 金属反射モデルの反射率計算

ここで  $\delta$  は、中間層 (2 層目) 内部を往復した光と表面反射光との位相差を表す。得られた  $\rho_s$ 、 $\rho_p$  および入射光子の偏光ベクトルの成分  $E_{\perp}$ 、 $E_{\parallel}$  を用いて、全体の反射率  $R$  は次式で求められる。

$$R = \rho_s \rho_s^* E_{\perp}^2 + \rho_p \rho_p^* E_{\parallel}^2 \quad (6.5)$$

光子の統計数が十分にある場合、式 (6.5) は無偏光入射の場合の反射率

$$R = \frac{\rho_s \rho_s^* + \rho_p \rho_p^*}{2} \quad (6.6)$$

と一致する。

先行研究では、反射面を 2mm 厚のアルミニウム (Al) のみで構成されるものとし、図 6.4a に示すモデルが用いられていた。しかし本研究で、PET ミラーの反射部は増反射コーティング層である  $\text{SiO}_2$  と Al 蒸着層の 2 層構造であり、シートミラーは Al 単層であることが確定した。この結果を踏まえ、従来の Al モデルから、 $\text{SiO}_2$  + Al モデルへと更新した (図 6.4b)。まずは、 $\text{SiO}_2$  層の追加により反射率がどう変わるかを評価した。

Al モデルおよび  $\text{SiO}_2$  + Al モデルの反射率について、入射角依存性の計算結果を図 6.5 に示す。入射波長は、Xe-LS の発光スペクトルのピーク位置である 430 nm とし、中間層の厚さは 200 nm と仮定した。計算に用いた Al および  $\text{SiO}_2$  の屈折率は、フィルメトリクス社が公開しているデータを使用した [31]。

図の結果から、BO 中での反射率は、 $\text{SiO}_2$  層を追加しても Al モデルとほとんど変化しないことが確認された。これは、430 nm における BO の屈折率 ( $n = 1.45$ ) と  $\text{SiO}_2$  の屈折率 ( $n = 1.47$ ) が極めて近く、境界面での光学的なインピーダンス差が小さいことに起因している。

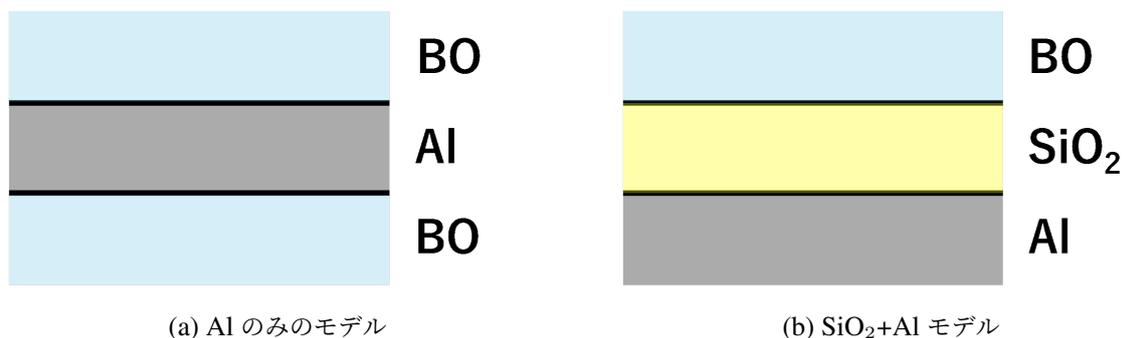


図 6.4: 金属反射モデルの構造

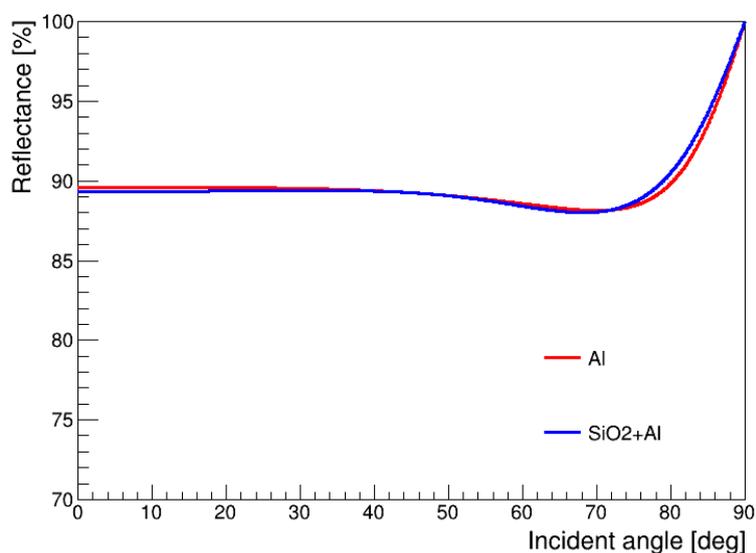


図 6.5: 金属反射モデルによる反射率計算の入射角依存性

#### 6.1.4 反射モデルのスケール化

シミュレーションで用いるミラー反射率は、前述の通り、各層の屈折率と中間層の膜厚から求めた理論計算値を基に与えている。一方で、実際のミラーの反射率は、たとえ同一構造をもつ場合でも理論値と完全に一致するとは限らない。そこで、測定されたミラー性能をシミュレーションに反映することを目的に、反射率モデルのスケール化を行った。

具体的には、誤差付きの測定値に対して、式 6.6 の理論反射率にスケールファクター  $a$  を掛けた関数

$$R_{\text{scale}} = a \times R$$

を用いてフィッティングを行う。反射率測定で使用したキセノンランプは熱光源であるため、無

偏光の場合の理論式を用いる。このフィットは、誤差で重みづけをした最小二乗法によりにより実施した。フィッティングに使用した測定データは、3.3.4節で示した、入射角を15度から75度まで15度間隔で取得した値である。また、各測定値につけた誤差は、反射率測定における系統誤差とした。ここで、モデル適用を簡便にするために行った操作を3つ述べる。

### スケールファクターの誤差

1つ目は、スケールファクターに付与する誤差の扱いである。前述のフィッティングでは、測定点ごとの誤差を重みとして最小二乗法を適用しており、フィットに起因する誤差を算出できる。しかし実際には、測定値に付与した系統誤差は各入射角で相関をもつ誤差であり、測定点間で独立ではない。一方、現在のフィッティング手法では各点の誤差を独立に扱うため、測定点数が増えるほどスケールファクターの誤差が小さくなってしまいう問題が生じる。本来、相関を含むフィット誤差の評価を行うべきであるが、複雑な計算になってしまうことを踏まえ、簡単のため、系統誤差の寄与をフィット誤差とは別に付与する補正を導入した。具体的には、スケールファクターの誤差をフィット由来の  $\Delta a_{fit}$  に加え、「± 系統誤差 [%] を再現するスケールファクターの変動分」として定義した誤差  $\Delta a_{sys}$  を追加し、スケールファクターを

$$\text{scale factor} = a \pm \Delta a_{fit} \pm \Delta a_{sys}$$

と表す。このとき、 $\Delta a_{sys}$  は、理論反射率に対しスケールを変動させた差分が系統誤差に一致するよう、

$$(a + \Delta a_{sys}) R[\%] - a R[\%] = \text{系統誤差} [\%]$$

の条件式から求めた。また、測定では入射角ごとに異なる系統誤差をつけているため、代表値として系統誤差の平均値を右辺へ代入し、 $\Delta a_{sys}$  を算出した。

### PET ミラーの反射モデル

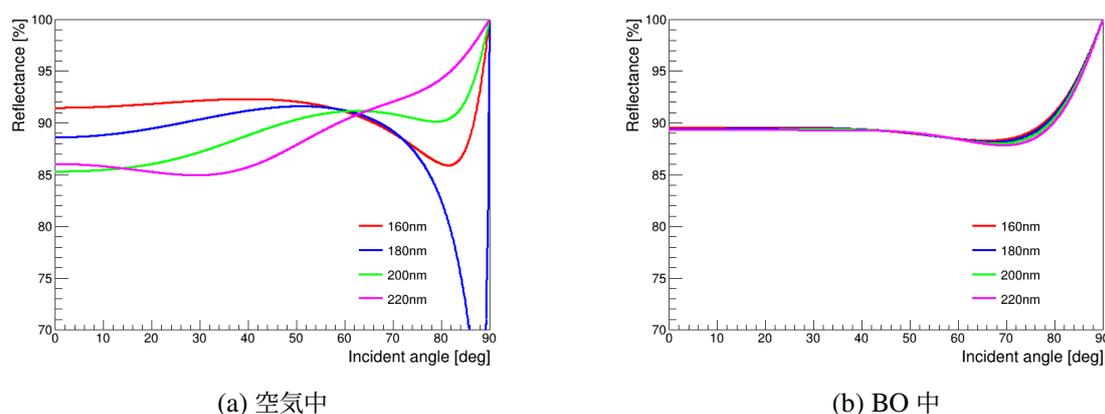
2つ目は、PET ミラーの反射モデルの選択についてである。PET ミラーは  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  構造をもつため、測定値へのスケール化には  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  モデルを用いることが正確な取り扱いである。しかし、図 6.5 で示した計算結果より、2つのモデルの反射率差は十分に小さく、集光率評価に対する影響は小さいと考えられる。また、シミュレーションのジオメトリに新しく  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  構造を組み込むのは実装コストが大きいことも踏まえ、実装の容易さを優先して PET ミラーもシートミラーと同様に Al モデルでスケール化を行うこととした。ただし、実際の構造と異なるモデルを使っていることを考慮して、Al モデルと  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  モデルの反射率差

$$\Delta R_{\text{model}} = |R_{\text{Al}} - R_{\text{SiO}_2 + \text{Al}}|$$

を、測定点の誤差に含めてフィッティングを実施した。

## BO 中のデータを用いたスケール化

3つ目は、PET ミラーのスケール化に用いるデータの種類についてである。集光率測定は空气中で実施しているため、本来は空气中で取得した反射率測定データに対し、空气中の反射モデルを適用してスケール化を行うべきである。しかし、PET ミラーについては、図 6.6 に示すように、 $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  モデルは空气中では BO 中と比較して反射率の膜厚依存性が大きく変動することがわかった。中間層の膜厚に関する詳細情報が得られておらず、測定で使用した膜厚を仮定するしかない現状では、空气中の  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  モデルを扱う議論は困難であるといえる。そのため、PET ミラーのスケール化には、BO 中の測定データに対し BO 中の Al モデルでフィッティングを行って得られたスケールファクターを採用した。

図 6.6:  $\text{SiO}_2 + \text{Al}$  モデルの反射率の膜厚依存性

まとめると、反射モデルのスケールファクターは表 6.2 に示す条件のもとで決定する。

表 6.2: 金属反射モデルのスケールファクター決めの条件

ミラー	フィットに使う測定値	測定値につける誤差	フィットモデル
PET ミラー	BO 中の値	測定の系統誤差 (BO 中) + モデル差	BO 中の Al モデル
シートミラー	空气中の値	測定の系統誤差 (空气中)	空气中の Al モデル

反射モデルを測定値にフィッティングした結果を図 6.7 に示す。スケールファクターは、

$$\begin{aligned}
 a_{\text{PET ミラー}} &= 0.9872 \pm 0.0306 \\
 a_{\text{シートミラー}} &= 0.9699 \pm 0.0306
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

と求まった。

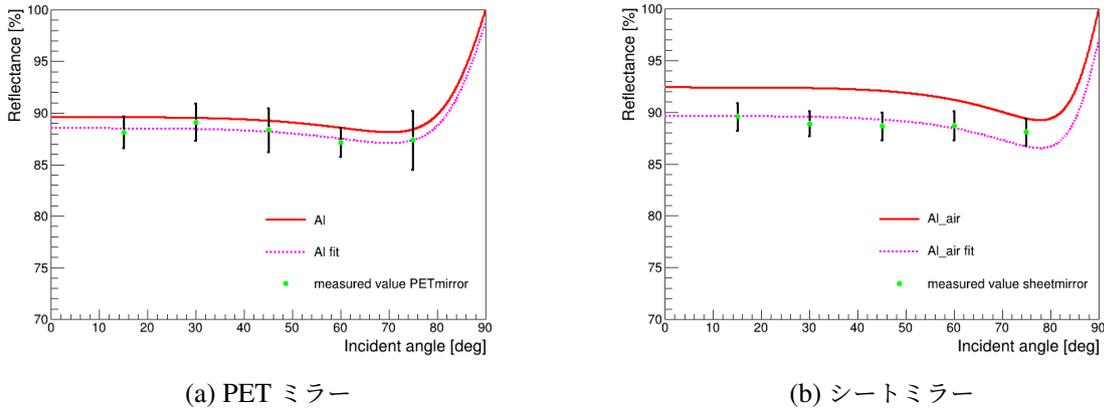


図 6.7: 金属反射モデルのフィッティング

### 6.1.5 誤差評価

シミュレーションから求まる平均光電子数（式 6.1 参照）には、以下のように誤差を付与する。

- ミラーなしの場合：統計誤差  $\Delta\lambda_{stat}$
- ミラーありの場合：統計誤差  $\Delta\lambda_{stat}$  およびスケールファクターに起因する誤差  $\Delta\lambda_{factor}$

まず統計誤差については、イベント回数に基づいて、

$$\Delta\lambda_{stat} = \frac{1}{\sqrt{\text{平均光電子数} \times \text{イベント数}}} \quad (6.8)$$

と定めた。また、スケールファクターによる誤差は、ミラー面から反射して PMT にヒットした光電子にのみ寄与するため、

$$\Delta\lambda_{factor} = \Delta a \times (\text{ミラーありの平均光電子数} - \text{ミラーなしの平均光電子数}) \quad (6.9)$$

と算出した。

### 6.1.6 シミュレーション結果

以上を踏まえて行った集光率測定シミュレーション結果を表 6.3 に示す。なお、1 条件あたりのイベント数は 10000 とした。また、集光率のシミュレーション値と実測値の比較を図 6.8 に示す。図 6.8 より、シミュレーションで得られた集光率は実測値と誤差の範囲内で一致しており、測定結果の妥当性が示される。これは、実際のミラーの性能がシミュレーション上に適切に反映されており、金属反射モデルのスケール化が有効であったともいえる。

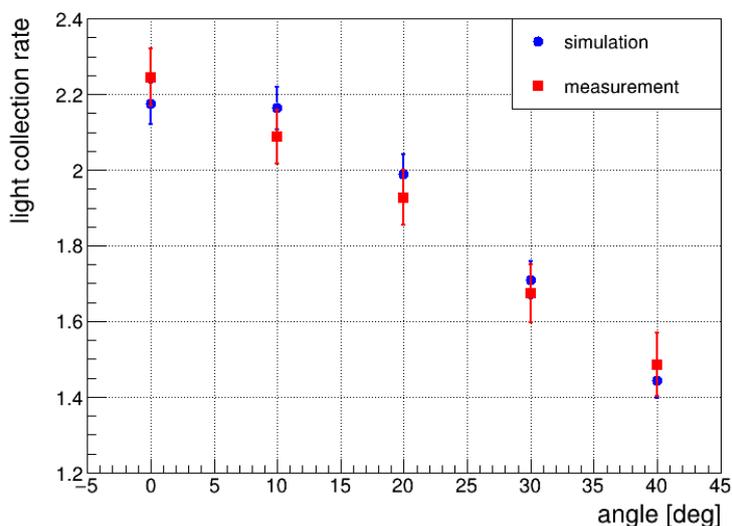


図 6.8: 集光率測定のスミュレーション値と実測値の比較

表 6.3: シミュレーションによる六角形ミラーの集光率の角度依存性

角度 [度]	ミラーなしの平均光電子数 [p.e.]	ミラーありの補正した平均光電子数 [p.e.]	集光率	集光率 (測定値)
0	0.7088 ± 0.012	1.542 ± 0.030	2.176 ± 0.055	2.245 ± 0.075
10	0.6917 ± 0.012	1.497 ± 0.029	2.164 ± 0.056	2.088 ± 0.072
20	0.6653 ± 0.012	1.323 ± 0.026	1.989 ± 0.053	1.927 ± 0.073
30	0.6159 ± 0.013	1.043 ± 0.021	1.693 ± 0.049	1.674 ± 0.077
40	0.5696 ± 0.013	0.822 ± 0.018	1.443 ± 0.046	1.486 ± 0.083

## 6.2 KamLAND2-Zen 検出器でのシミュレーション

前節の結果から、シミュレーションに導入したミラーの反射モデルは、実際のミラーの集光性能を再現できていることが確認された。そこで、この反射モデルを KamLAND2-Zen 検出器に搭載されるすべての集光ミラーに適用し、ミラーの有無によって集光性能がどの程度変化するかを評価した。

### 6.2.1 シミュレーションの概要

今回使用したシミュレーションは先行研究で構築されたもので、KamLAND-Zen 検出器 (図 2.13 参照) を再現したシミュレーション "KLG4" に対し、KamLAND2-Zen 実験に向けた改良案である集光ミラーを導入したものである。内部検出器のジオメトリには、KamLAND-LS を封入したバルーン、バッファオイル (BO) 層、PMT、集光ミラー (四角形ミラー、五角形ミラー、六

角形ミラー) が設定されている。液体シンチレータおよび BO のパラメータは KamLAND-Zen 実験と同様の値を採用している。そのため、KamLAND2 で予定している「液体シンチレータの純化による集光量増加」の効果は、本シミュレーションには含まれていない。また、PMT には KamLAND2-Zen で使用予定の高量子効率 20 インチ PMT(図 2.14 参照) を登録している。発光源には 1MeV の電子を用い、発光位置は任意に設定できる。なお、発光量について議論しないため、KamLAND-Zen 検出器中のミニバルーンおよび Xe-LS 機構は除いた。

### 6.2.2 反射モデルのスケール化

KamLAND2-Zen 検出器の集光ミラーにも、6.1.4 節で行った手法と同様に、実際のミラーの反射性能へスケール化した反射モデルを適用する。ここで、6.1.4 節では空気中で取得した測定値に対してスケール化を行っていたが、KamLAND2-Zen 検出器では集光ミラーが BO 中に配置されるため、BO 中で測定された反射率データと BO 中の反射モデルを用いて、スケール化を再度実施する。ただし、PET ミラーのスケール化はすでに 6.1.4 節で完了しているため、ここではシートミラーに対してのみスケール化を行った結果、BO 中のシートミラーのスケールファクターは、

$$a_{\text{シートミラー}} = 0.9629 \pm 0.0306 \quad (6.10)$$

と求まった。

### 6.2.3 シミュレーション結果

スケールファクターを用いて実施したシミュレーションの結果を表 6.4 に、得られた集光率をグラフ化したものを図 6.9 に示す。イベント回数は 10000 回とし、発光位置を図 6.10 に示すように  $z = -600\text{cm}$  から  $+600\text{cm}$  までと、 $x = +100\text{cm}$  から  $+600\text{cm}$  まで 100cm 間隔で変化させた。

表 6.4: KamLAND2-Zen 検出器における集光率シミュレーションの発光位置依存性

(x, z) [cm]	ミラーなしの平均光電子数 [p.e.]	ミラーありの平均光電子数 [p.e.]	集光率
(0, 600)	469.0 ± 0.1	717.5 ± 7.6	1.530 ± 0.016
(0, 500)	506.6 ± 0.1	842.6 ± 10.3	1.663 ± 0.020
(0, 400)	518.6 ± 0.1	900.5 ± 11.7	1.736 ± 0.023
(0, 300)	520.2 ± 0.1	932.2 ± 12.6	1.792 ± 0.024
(0, 200)	522.7 ± 0.1	953.0 ± 13.2	1.823 ± 0.025
(0, 100)	524.3 ± 0.1	963.7 ± 13.4	1.838 ± 0.026
(0, 0)	523.6 ± 0.1	970.0 ± 13.7	1.853 ± 0.026
(0, -100)	526.4 ± 0.1	969.3 ± 13.5	1.841 ± 0.026
(0, -200)	530.8 ± 0.1	966.2 ± 13.3	1.820 ± 0.025
(0, -300)	535.9 ± 0.1	957.4 ± 12.9	1.787 ± 0.024
(0, -400)	541.3 ± 0.1	944.9 ± 12.3	1.746 ± 0.023
(0, -500)	545.2 ± 0.1	921.0 ± 11.5	1.689 ± 0.021
(0, -600)	521.8 ± 0.1	812.5 ± 8.9	1.557 ± 0.017
(100, 0)	523.2 ± 0.1	963.2 ± 13.5	1.841 ± 0.026
(200, 0)	529.6 ± 0.1	965.0 ± 13.3	1.822 ± 0.026
(300, 0)	539.5 ± 0.1	968.7 ± 13.1	1.796 ± 0.024
(400, 0)	556.6 ± 0.1	971.7 ± 12.7	1.746 ± 0.023
(500, 0)	582.6 ± 0.1	974.8 ± 12.0	1.673 ± 0.021
(600, 0)	620.7 ± 0.1	981.1 ± 11.0	1.581 ± 0.018

図 6.9 より、検出器中心から 200cm の範囲では、集光率が目標値である 1.8 倍を上回っていることがわかる。ミニバルーンの半径は約 2m であるため、200cm はミニバルーンの境界に相当する。このことから、 $0\nu\beta\beta$  探索領域であるミニバルーン内部での発光は、集光ミラーにより 1.8 倍以上の集光率で検出されることが確認できた。

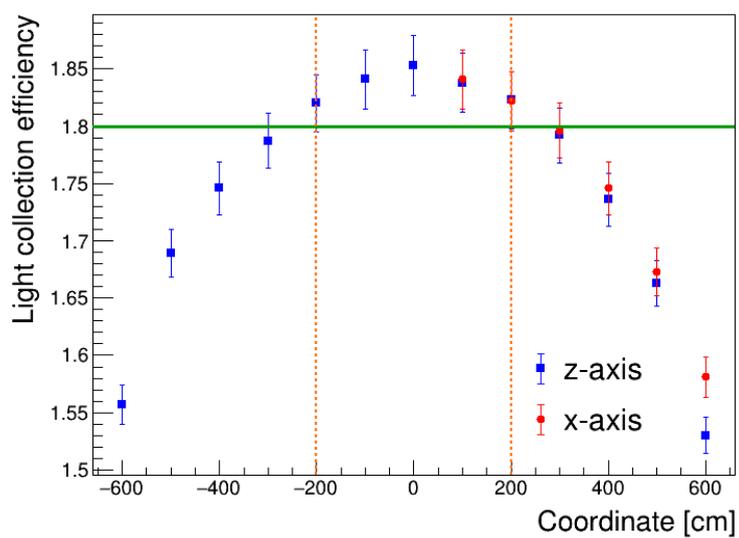


図 6.9: KL2 シミュレーションで得られた集光率のプロット。 $\pm 200\text{cm}$  以内は Xe-LS 領域であり、それ以外は KamLAND-LS 領域である。

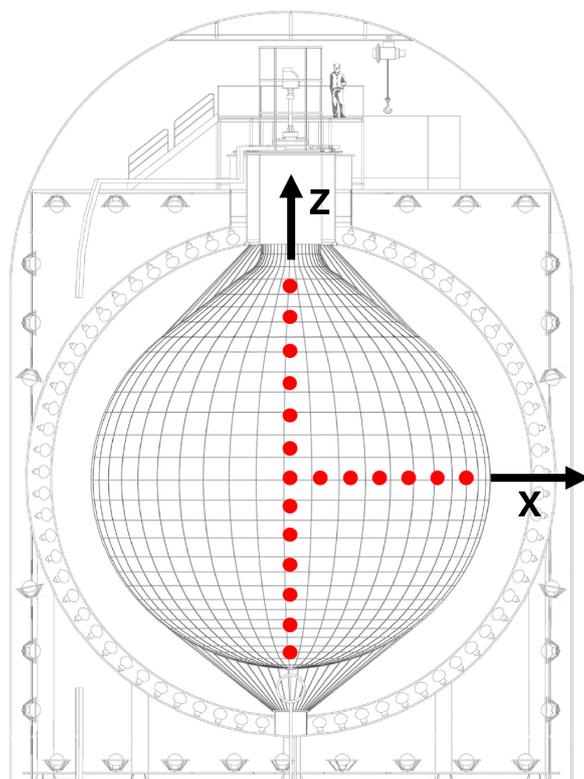


図 6.10: KL2 シミュレーションの発光位置

## 第7章

# 結論

現在 KamLAND グループでは、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の発見に向け、KamLAND-Zen 検出器のエネルギー分解能向上と背景事象の削減を目指した KamLAND2-Zen 実験計画を推進している。本計画における主要なアップデートの1つに「PMT への集光ミラーの設置」があり、これにより集光量を増加させ、エネルギー分解能を向上させることが期待されている。本研究では、集光率 1.8 倍の達成を目標に掲げ、集光ミラーの性能評価を実施した。

まず、要求される反射率を満たすミラー素材の選定を行った。候補となる PET ミラー 4 種およびシートミラー 3 種のサンプルの反射率を比較した結果、空気中およびバッファオイル (BO) 中において、入射角によらず高い反射率を示したものは、PET ミラーでは P\_C および P\_D、シートミラーでは S\_A であることが明らかとなった。

次に、選定した 3 種類のサンプルの耐油試験を行った。集光ミラーは長期間 BO 中に設置されるため、加速劣化試験により油中での長期性能安定性を見積もった。評価項目はミラーの反射率と BO の光透過率の 2 点とした。KamLAND 環境換算で P\_C および S\_A は約 4 年、P\_D は約 1.2 年経過後に測定した結果、全てのサンプルで有意な劣化は見られないことが確認された。

性能安定性の確認を受け、六角形 PET ミラーおよびシートミラーを試作し、PMT に実装して集光率の評価を行った。PET ミラー素材は候補が 2 種類あったが、試作過程で P\_C を用いたミラーの方が表面状態に優れていたこと、および P\_D は現時点で量産体制が未確立であったことを考慮し、最終的に P\_C を採用した。集光率の評価は、PMT に 1 光電子相当の光を照射し、光子数をカウントする手法で行った。その結果、PMT が光源を向いた状態では、PET ミラーの装着により集光率が約 1.9 倍、シートミラーの追加により約 2.2 倍に向上した。また、PMT に角度をつけた測定においても、角度 20 度までの範囲では、目標値である 1.8 倍を達成できることが示された。

最後に、シミュレーションによる集光率評価を行った。まず、前述の測定結果の妥当性を検証するため、実験系を再現したシミュレーションを実施した。シミュレーションには、実測の反射率を反映させるために理論モデルをスケール化して適用した。その結果、シミュレーション値と測定値が誤差範囲内で一致し、測定の妥当性と反射モデルの有効性が確認された。このモデルを用いて KamLAND2-Zen 検出器全体でのシミュレーションを行ったところ、ミニバルーン内の発光点において集光率 1.8 倍以上を達成できることがわかった。

今後の展望としては、第一に六角形以外の多角形ミラーの性能評価が挙げられる。本研究では六角形ミラーのみの集光率を測定したため、他の形状についても期待通りの性能が得られるか検証する余地がある。また、本研究では空気中で集光率測定を行ったが、実際の運用環境を考えるとBO中での集光率測定へ拡張する必要がある。さらに、KamLAND2-Zen 検出器でのシミュレーションに関しては、シートミラーの設置位置の不確かさを考慮したモデルへとアップデートし、より現実的な条件下での集光率評価を行うことも挙げられる。

## 付録 A

# ミラー開発の諸々

### A.1 3D データ変換方法

ミラーの形状は、Geant4 シミュレーションで使う用の、STL 形式のポリゴンデータとして定義されていた。そのため、実際に製作できるようにするため、CAD の形式である STEP 形式に変換する作業が必要である。具体的な変換作業は以下のとおりである。

1. 「NURBS-Python」というツールを使用して NURBS 曲面を生成し、JSON ファイルを出力する。  
NURBS-Python とは、CAD で扱われる曲面を Python で計算できるものである [32]。例えば、六角形ミラーは 6 つの自由曲面から構成されており、 $52 \times 101 = 5252$  個の制御点により定義されている。
2. 「RW3DM」というツールを使用して、JSON ファイルを 3DM ファイルに変換する [33]。  
この 3DM ファイルは、Autodesk Fusion で自由曲面として読み込むことができる。

STL 形式から STEP 形式へのデータ変換による形状差は 0.1mm より小さく、変換精度に問題がないと確認されている。

### A.2 PET ミラーの成型および蒸着

PET ミラーの成型や蒸着は企業に依頼する。P\_C を使った PET ミラーの製作過程は以下の通りである。

1. 金型を製作する。
2. PET 樹脂 (2mm) の真空成型を行う。この際、金型側 (蒸着面と反対側) の保護シートのみ外す。
3. NC 加工機を使用してトリミングする。
4. 蒸着面側の保護シートを外し、純水による超音波洗浄を行う。
5. 真空容器中で Al 蒸着を行う。
6. 真空容器中で  $\text{SiO}_2$  蒸着を行う。

ミラー制作の様子を図に A.1 示す。



(a) PET 基板の真空成型



(b) 成形した PET 基板のカット

図 A.1: PET ミラー制作風景

## 付録 B

# 理論反射モデル

### B.1 反射率計算

図 6.3 のように 3 層の構造の反射率を計算する。i 層のある入射波長における屈折率を  $n_i$ 、i 層から j 層に入射するときの入射角を  $\theta_i$ 、屈折角を  $\theta_j$ 、中間層の厚さを  $d$  とすると、境界面における s 偏光の反射係数および透過係数は、

$$r_{12}^s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{B.1})$$

$$r_{23}^s = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (\text{B.2})$$

$$t_{12}^s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{B.3})$$

$$t_{21}^s = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_1 \cos \theta_1} \quad (\text{B.4})$$

$$t_{23}^s = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (\text{B.5})$$

とかける。

観測される反射率は、1 層目で反射した光 +1 層目を透過して 2 層目を 1 往復して表面に透過した光 +2 層目を 2 往復して表面に透過した光 +... というように、無限和で表せる。2 層目を 1 往復すごとに位相は、

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta_2 \quad (\text{B.6})$$

と変化していくため、表面における反射率の合計は、

$$\rho = r_{12}^s + t_{12}^s t_{21}^s r_{23}^s e^{-i2\delta} + t_{12}^s t_{21}^s (r_{23}^s r_{21}^s e^{-i2\delta}) r_{23}^s e^{-i2\delta} + t_{12}^s t_{21}^s (r_{23}^s r_{21}^s e^{-i2\delta})^2 r_{23}^s e^{-i2\delta} \dots \quad (\text{B.7})$$

と表せる。これは、 $r_{12}^s$  の項を除くと、初項  $t_{12}^s t_{21}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}$ 、公比  $r_{23}^s r_{21}^s e^{-i2\delta}$  の等比級列であることがわかる。そのため、等比級列の和の公式を使うと、

$$\rho_s = r_{12}^s + \frac{t_{12}^s t_{21}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}}{1 - r_{21}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}} \quad (\text{B.8})$$

と求まる。  $r_{21} = -r_{12}$  と書き換えると、反射率は、

$$\rho_s = r_{12}^s + \frac{t_{12}^s t_{21}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}}{1 + r_{12}^s r_{23}^s e^{-i2\delta}} \quad (\text{B.9})$$

と得られる。

これを p 偏光

$$r_{12}^p = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{B.10})$$

$$r_{23}^p = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (\text{B.11})$$

$$t_{12}^p = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad (\text{B.12})$$

$$t_{21}^p = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_1 \cos \theta_1} \quad (\text{B.13})$$

$$t_{23}^p = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \quad (\text{B.14})$$

についても同様に計算し、 $\rho_s$  を以下のように得る。

$$\rho_p = r_{12}^p + \frac{t_{12}^p t_{21}^p r_{23}^p e^{-i2\delta}}{1 + r_{12}^p r_{23}^p e^{-i2\delta}} \quad (\text{B.15})$$

最終的に、偏光がある場合の反射率は、偏光ベクトルの成分  $E_{\perp}$ ,  $E_{\parallel}$  を用いて、

$$R = \rho_s \rho_s^* E_{\perp}^2 + \rho_p \rho_p^* E_{\parallel}^2 \quad (\text{B.16})$$

のようにあらわすことができ、式 (6.5) が得られる。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、約2年半にわたる研究活動の中で多くの方から多大なるご支援とご協力をいただきました。この場を借りて深く感謝申し上げます。

はじめに、指導教員である清水先生には、研究方針の決定から内容の細部に至るまで、多岐にわたるご指導をいただきました。実験や解析手法、結果に対する考察など、未熟な私に対し一から丁寧に教えてくださいました。研究内容で迷ったことに対しても適切なアドバイスをいただき、本研究を完遂できたのは、ひとえに清水先生のご指導のおかげです。本当にありがとうございます。

センター長の井上先生には、ミーティング等の場において専門的な知見からご指導いただきました。自分では気づけなかった視点も多く、本研究の方針を深める上で貴重なご意見となりました。研究室への配属を含め、このような恵まれた環境で研究を進める機会を与えてくださったことに感謝いたします。

岸本先生には、毎週のミーティングを通じて、研究内容に対し真摯にご指導いただきました。自身が考慮していなかった点について疑問を提示していただくことで、研究内容をより強固なものへとブラッシュアップできたと感じています。

川田先生には、研究内容や現場での作業面に関してお世話になりました。些細な疑問に対しても迅速にアドバイスいただき、特に発表資料の構成やまとめ方については、非常に参考になりました。

また、技術職員の方にも大変お世話になりました。実験器具の設計やセットアップの準備など、実験を遂行する上で不可欠な数々の工程において多大なるサポートをいただきました。

加えて、同期や先輩・後輩の皆さんには、研究活動を行う日々でお世話になりました。皆さんのおかげで、過ごしやすい環境で研究を進めることができたと思っています。

最後になりますが、ニュートリノ科学研究センターに関わる全ての皆様に、改めて深く感謝の意を表します。



## 参考文献

- [1] W. Pauli, *Letter to L. Meitner and her colleagues (letter open to the participants of the conference in Tübingen)* (1930) .
- [2] F. Reines and C. L. Cowan, “The neutrino”, *Nature* **178**, 446–449 (1956) , DOI: [10.1038/178446a0](https://doi.org/10.1038/178446a0).
- [3] 公益社団法人日本天文学会, “天文学辞典”,.
- [4] Bruce T. Cleveland, Timothy Daily, Raymond Davis, Jr., James R. Distel, Kenneth Lande, C. K. Lee, Paul S. Wildenhain, and Jack Ullman, “Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector”, *The Astrophysical Journal* **496**, 505 (1998) , DOI: [10.1086/305343](https://doi.org/10.1086/305343).
- [5] K.S. Hirata et al., “Observation of a small atmospheric  $\nu_\mu/\nu_e$  ratio in Kamiokande”, *Physics Letters B* **280**, 146-152 (1992) , DOI: [10.1016/0370-2693\(92\)90788-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(92)90788-6).
- [6] Y.Fukuda and et al.(Super Kamiokande Collaboration), “Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos”, *Phys.Rev.Lett.* **81**, 1562-1567 (1998) , DOI: [10.48550/arXiv.hep-ex/9807003](https://doi.org/10.48550/arXiv.hep-ex/9807003).
- [7] Q. R. A. et al.(SNO Collaboration), “Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory”, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 011301 (2002) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.89.011301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.011301).
- [8] A.Gando and et al.(KamLAND Collaboration), “Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND”, *Phys. Rev. D* **88**, 033001 (2013) , DOI: [10.1103/PhysRevD.88.033001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.033001).
- [9] Aker, M. and et al.(KATRIN Collaboration), “Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data”, *Science* **388**, 180-185 (2025) , DOI: [10.1126/science.adq9592](https://doi.org/10.1126/science.adq9592).
- [10] Aghanim, N. and et al., “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters”, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020) , DOI: [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910).
- [11] M. Agostini and et al.(Gerda Collaboration), “Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double-Decay”, *Physical Review Letters* **125**, 252502 (2020) , DOI: [10.48550/arXiv.2009.06079](https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.06079).
- [12] C.Romo-Luque and et al.(LEGEND Collaboration), “Results of the LEGEND-200 experiment in the search for neutrinoless double beta decay”, (2025) , DOI: [10.48550/arxiv.2508.18573](https://doi.org/10.48550/arxiv.2508.18573).

- [13] D. Q. Adams and et al.(CUORE Collaboration), “Search for Majorana neutrinos exploiting millikelvin cryogenics with CUORE”, *Nature* **604**, 53–58 (2022) , DOI: [10.1038/s41586-022-04497-4](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04497-4).
- [14] K. Eguchi and et al.(KamLAND Collaboration), “First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance”, *Physical Review Letters* **90**, 021802 (2003) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.90.021802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.021802).
- [15] A. Gando and et al.(KamLAND Collaboration), “Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements”, *Nature Geoscience* **4**, 647-651 (2011) , DOI: [10.1038/ngeo1205](https://doi.org/10.1038/ngeo1205).
- [16] 三宅春彦, “[Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in KamLAND-Zen Applying Improved Long-lived Spallation Background Reduction](#)”, 博士論文, 東北大学 (2023) .
- [17] A. Gando and et al.(KamLAND Collaboration), “Measurement of the double- $\beta$  decay half-life of  $^{136}\text{Xe}$  with the KamLAND-Zen experiment”, *Physical Review C* **85**, 045504 (2012) , DOI: [10.1103/PhysRevC.85.045504](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.85.045504).
- [18] A. Gando and et al.(KamLAND Collaboration), “Search for Majorana Neutrinos Near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, *Phys. Rev. Lett.* **117**, 082503 (2016) , DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.082503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.082503).
- [19] S. Abe and et al.(KamLAND Collaboration), “Search for Majorana Neutrinos with the Complete KamLAND-Zen Dataset”, *Phys. Rev. Lett.* (2024) , DOI: [10.48550/arXiv.2406.11438](https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.11438).
- [20] 三本杉洸斗, “[KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーの形状最適化](#)”, 修士論文, 東北大学 (2021) .
- [21] 後藤杏奈, “[KamLAND2-Zen 実験の液体シンチレータに導入する最適な波長変換剤の選定と濃度決定](#)”, 修士論文, 東北大学 (2022) .
- [22] S. Obara, Y. Gando, and K. Ishidoshiro, “Article Navigation Journal Article Scintillation balloon for neutrinoless double-beta decay search with liquid scintillator detectors”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2019**, 073H01 (2019) , DOI: [10.1093/ptep/ptz064](https://doi.org/10.1093/ptep/ptz064).
- [23] 渡部一步, “[KamLAND2-Zen 実験で使用するキセノン含有液体シンチレータの特性研究および組成決定](#)”, 修士論文, 東北大学 (2024) .
- [24] 中根淳, “[KamLAND2 プロトタイプ検出器における較正手法の開発と性能評価](#)”, 修士論文, 東北大学 (2024) .
- [25] 中島梨花, “[KamLAND2-Zen 実験へ向けた集光ミラーの研究と液体シンチレータの性能評価](#)”, 修士論文, 東北大学 (2024) .
- [26] 太田直輝, “[KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーを用いた高光収率検出器の開発](#)”, 修士論文, 東北大学 (2019) .
- [27] I. Shimizu, “[Plan of Light Collecting Mirror](#)”, in *KamLAND Collaboration Meeting* (2025) .

- 
- [28] I. Shimizu, “[Plan of Light Collecting Mirror](#)”, in *KamLAND Collaboration Meeting* (2024).
- [29] 大浦智也, “[KamLAND2-Zen 実験に向けた新液体シンチレータの純化](#)”, 修士論文, 東北大学 (2016).
- [30] 和田佳樹, “[KamLAND2-Zen 実験における発光性バルーンのための高発光液体シンチレータの開発](#)”, 修士論文, 東北大学 (2020).
- [31] I. Filmetrics, “[屈折率一覧表](#)”,.
- [32] O. R. Bingol, “[NURBS-Python v5.x Documentation](#)”.
- [33] O. R. Bingol, “[GitHub orbingol/rw3dm](#)”.