

# 修士論文

## KamLAND2 - Zen 実験のための 集光ミラーの研究開発

(Development of light collecting mirror for KamLAND2 - Zen)

東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻

立花 創

平成26年

## 概要

ニュートリノ振動の観測によってニュートリノが質量を持つことが明らかとなり、標準模型を超える新たな理論の構築が必要となった。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu 2\beta$  崩壊) の観測はニュートリノのマヨラナ性を証明できる唯一現実的な実験であり、理論構築のための大きな足掛かりになると期待されている。それ故、世界各地で様々な探索実験が進められている。

KamLAND - Zen は KamLAND の極低バックグラウンド環境を利用した  $0\nu 2\beta$  崩壊探索実験である。これまでの実験で  $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu 2\beta$  崩壊に対する半減期の下限値とニュートリノの有効質量に対する上限値を得ているが、 $0\nu 2\beta$  崩壊の信号は未だ観測できていない。そこでさらなる実験精度の向上を目的に、KamLAND2 - Zen という次期実験が計画されている。

KamLAND2 - Zen では集光量を向上することでエネルギー分解能の改善を図り、 $0\nu 2\beta$  崩壊の信号を検出することが考えられている。そのために、KamLAND 内にある PMT に特製の集光ミラーを取り付けることが計画されている。本研究は集光ミラー開発のための基礎研究を行ったものである。

まずは KamLAND で使用するのに最適なミラーの形状を決定し、それを作製するのに適した素材の選定を行った。高い反射率を持つこと・液体シンチレータ中で劣化しないこと・隣のミラーとの干渉に耐えられること、という条件を考慮して選定を行い、PET にアルミニウムを蒸着した素材を用いることにした。そしてその素材で実物大の集光ミラーを作製し、集光率の評価を行った。その結果、集光ミラーを取り付けることで集光率が 1.8 倍程度に向上し、目標とする集光率向上効果が期待できることがわかった。

次に光線追跡用のシミュレーションツールを用いて、ミラーを取り付けることによる集光率向上効果のシミュレーションを行った。まずはツールに用意されているクラスを用いて光学系を再現し、シミュレーションを行ってみたが、集光率評価の実験結果を再現しないことがわかった。その結果を受けて、PMT の出力の位置依存性を組み込んだ改良版集光シミュレーションを作成した。これを用いることによって、PMT の出力特性まで考慮したより最適な形状のミラーをデザインできるようになった。

この研究によって、KamLAND に集光ミラーを導入することで目標とする集光率の向上が見込めること、それにより実験精度の向上に貢献できることを示した。

# 目次

<b>第1章 ニュートリノの物理</b>	<b>1</b>
1.1 ニュートリノとは	2
1.1.1 ニュートリノの登場	2
1.1.2 ニュートリノの発見	4
1.1.3 その後の展開	5
1.2 ニュートリノ振動とニュートリノの質量	5
1.2.1 ニュートリノ振動	6
1.2.2 ニュートリノの質量	7
1.2.3 質量階層構造	9
1.3 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊	12
1.3.1 二重ベータ崩壊とは	12
1.3.2 いろいろな二重ベータ崩壊探索実験	16
<b>第2章 KamLAND 実験</b>	<b>18</b>
2.1 KamLAND 検出器について	19
2.1.1 実験装置の概要	19
2.1.2 検出原理	25
2.2 KamLAND 実験の成果	28
2.2.1 原子炉ニュートリノ振動の観測	28
2.2.2 地球ニュートリノの観測	30
<b>第3章 KamLAND - Zen 実験</b>	<b>31</b>
3.1 実験概要	31
3.2 KamLAND - Zen 実験の成果	37
3.3 考慮すべきバックグラウンド	39
3.4 将来計画と本研究の目的	43
3.4.1 KamLAND2 - Zen の概要	44

3.4.2	本研究の目的 . . . . .	45
3.4.3	本研究以外の研究開発 . . . . .	45
<b>第4章</b>	<b>集光ミラーの開発</b>	<b>47</b>
4.1	研究目的 . . . . .	47
4.2	開発の全体像 . . . . .	47
4.3	ミラーの形状決定 . . . . .	47
4.4	素材の選定 . . . . .	50
4.4.1	反射率評価 . . . . .	52
4.4.2	化学的安定性の検証 . . . . .	56
4.5	試作品の作製 . . . . .	61
4.6	試作品の集光率評価 . . . . .	65
4.6.1	17" PMT 用ミラーの集光率評価 . . . . .	66
4.6.2	20" PMT 用ミラーの集光率評価 . . . . .	73
4.6.3	変形したミラーの集光率評価 . . . . .	83
4.7	まとめ . . . . .	85
<b>第5章</b>	<b>集光シミュレーション</b>	<b>86</b>
5.1	研究目的 . . . . .	86
5.2	シミュレーションツール ROBAST . . . . .	86
5.3	集光シミュレーション . . . . .	87
5.3.1	光学系の設計 . . . . .	87
5.3.2	集光率の評価方法 . . . . .	90
5.3.3	シミュレーション結果 . . . . .	90
5.4	改良版集光シミュレーション . . . . .	95
5.4.1	量子効率の位置補正 . . . . .	95
5.4.2	集光ミラーのジオメトリの改良 . . . . .	97
5.4.3	シミュレーション結果 . . . . .	98
5.5	まとめ . . . . .	102
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>103</b>
<b>付録A</b>	<b>LABの研究</b>	<b>108</b>
A.1	研究目的 . . . . .	108



A.2	LABについて	108
A.3	透過率の評価	109
A.4	発光量の評価	112
A.5	LABの純化と効果検証	115
A.6	まとめ	119
A.7	追加実験	120
A.7.1	発光量のPPO濃度依存性	120
A.7.2	Xe溶解度の測定と発光量の評価	121
A.7.3	シリカゲルによるLABの純化	122
<b>付録B</b>	<b>Arrheniusの式</b>	<b>125</b>
<b>付録C</b>	<b>銀蒸着集光ミラー</b>	<b>128</b>
<b>付録D</b>	<b>反射の理論式</b>	<b>130</b>
<b>付録E</b>	<b>20” PMT用集光ミラーの試作品の評価結果一覧</b>	<b>132</b>
<b>付録F</b>	<b>ROBASTの導入</b>	<b>133</b>
<b>付録G</b>	<b>実験方法のまとめ</b>	<b>134</b>
G.1	反射率測定	134
G.1.1	光学系の詳細	134
G.1.2	反射率測定の手順	135
G.1.3	反射率測定の誤差	136
G.2	透過率測定	137
G.3	ミラーの集光率評価(窒素レーザーを用いた測定)	139
G.3.1	使用機材の詳細	139
G.3.2	レーザー出力の時間安定性	140
G.3.3	集光率測定の手順	141

# 第1章 ニュートリノの物理

この世界に存在するあらゆるものは、内部構造を持たない“素粒子”によって形作られている。いわば素粒子はこの世界を構成する最小の単位であり、“フェルミオン (Fermion)”と“ボソン (Boson)”に大別される。さらに、フェルミオンは6種類の“クォーク (Quark)”と6種類の“レプトン (Lepton)”から、ボソンは5種類の“ゲージ粒子 (Gauge Boson)”と“ヒッグス粒子 (Higgs Boson)”から成る。このモデルは“標準模型”と呼ばれ、強い相互作用・弱い相互作用・電磁相互作用の3つの相互作用を説明できる理論として素粒子物理学の基礎となっている。

2012年7月、欧州原子核研究機構 (CERN) にて「新たな粒子を発見した」との発表があり、それは未発見となっていたヒッグス粒子「らしい」ものであることがさらなる検証で明らかとなった。まだヒッグス粒子だと断定されたわけではないが、これによって標準模型を成す18種類の素粒子が一応すべて確認されたこととなった。標準模型の基本粒子についてまとめたものを図1.1に示す。

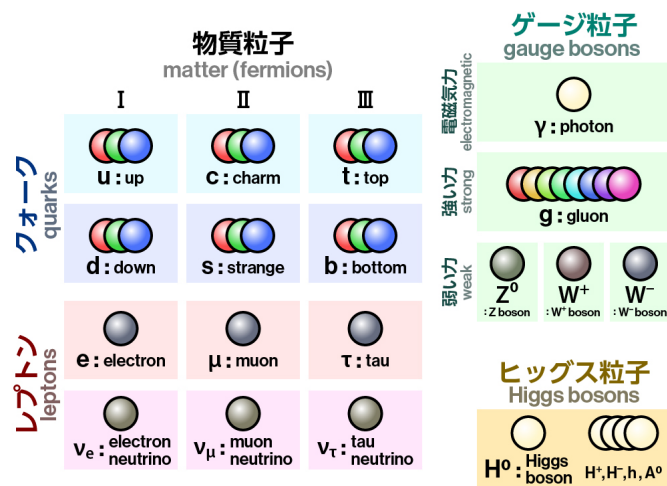


図 1.1: 標準模型の基本粒子 (<http://higgstan.com/2012/08/16/86> より引用)

図 1.1 に示されているように、ニュートリノはフェルミオンの一種であり、標準模型を構成する素粒子である。フレーバーの固有状態によって  $\nu_e$ 、 $\nu_\mu$ 、 $\nu_\tau$  の 3 種類に分類される。だがその物理的性質は他の素粒子とは大きく異なっている。まず、電氣的に中性であるため物質と電磁相互作用を起こさない。さらに他の素粒子に比べて質量が極端に小さい（標準模型におけるニュートリノの質量は 0 である）。

このような特異な性質により、ニュートリノを観測することは他の素粒子に比べて困難であり、未だ詳しい性質は謎に包まれている。加えて標準模型では説明できないような振る舞いを示すことが実験的に明らかになっており、理論的にも不確定な部分が多い。この章ではそんな不思議な存在であるニュートリノについて、その発見から現在我々が追っている最先端の物理現象までを俯瞰する。

## 1.1 ニュートリノとは

### 1.1.1 ニュートリノの登場

ニュートリノ研究の歴史は 20 世紀初頭に始まる。19 世紀末にベクレルが「原子核は崩壊して放射線を出す」ことを発見して以来、アルファ崩壊やベータ崩壊といった放射性崩壊について研究が進められていた。しかしベータ崩壊について、当時の理論では説明がつかない現象が観測された。当時ベータ崩壊は、原子核中の中性子が陽子と電子に崩壊する二体崩壊であると認識されていた。

$$n \rightarrow p + e^- \quad (1.1)$$

崩壊前後でエネルギーは保存しなければならないため、原子核の反跳を無視すると、放出される電子 ( $\beta$  線) の運動エネルギー  $K$  は崩壊前後の原子核質量  $M_Z, M_{Z+1}$  と電子質量  $m_e$  を用いて次のように書ける。

$$K = (M_Z - M_{Z+1} - m_e)c^2 \quad (1.2)$$

$M_Z, M_{Z+1}, m_e$  はすべて決まった値を持つので、 $K$  の値も一意に決まるはずである。すなわち、 $\beta$  線のスペクトルは線スペクトルになるはずである。しかし観測の結果、そのスペクトルは式 (1.2) から得られる  $K$  を最大値とする連続スペクトルであった。これはエネルギー保存則に反するものであり、当時の物理学者たちを悩ませた。

この問題に対して Niels Bohr は「量子レベルではエネルギー保存則が破れている」と提唱したが、Wolfgang Pauli はこれに反対。「検出できないような高い物質透過性を持つ中性粒子が同時に放出されている」ことを提案し、この問題を解決しようとした。この時に導入されたのが“ニュートリノ”（導入当時は“ニュートロン”という名前であった）である。その後 Enrico Fermi によってニュートリノを含んだベータ崩壊の理論が作られ、ニュートリノの存在が認められるようになった。すなわち、ベータ崩壊の反応は次のように書き換えられた。



これは三体崩壊なので、崩壊後の運動エネルギーは電子とニュートリノに二分される。そのため  $\beta$  線のスペクトルは連続スペクトルになる。かくしてベータ崩壊のエネルギー非保存問題は決着を見た。

このように、ニュートリノは実験結果を説明するための理論的な予測から導入された素粒子であった。理論予測から、ニュートリノは電荷が0でスピン1/2を持つものと考えられた。また実験データから、その質量は0か、もしくは電子質量に比べて非常に小さいと予測された。

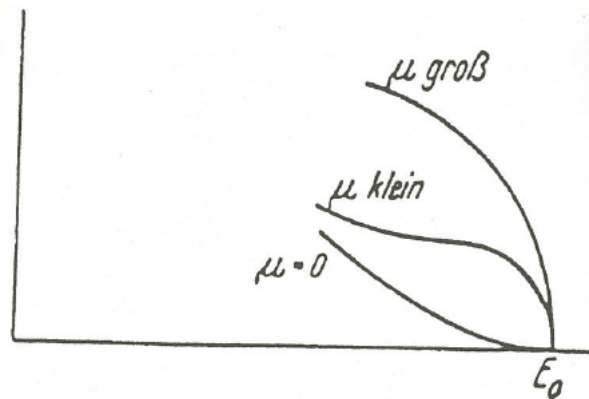


Fig. 1.

図 1.2: ニュートリノの質量を仮定した場合の電子のエネルギー分布 [18]。Fermi のベータ崩壊理論の論文に掲載されたもの。

### 1.1.2 ニュートリノの発見

Fermi がベータ崩壊に関する論文を発表したのは1934年のことである。しかしニュートリノの発見にはそれからさらに20年ほどの時間を要した。1956年、Frederick Reines と Clyde Cowan がニュートリノの世界初観測に成功した。“Poltergeist プロジェクト”と名付けられた実験で、塩化カドミウムを溶かした水と液体シンチレータを用いてサバンナ川にある原子炉から飛んでくるニュートリノを観測した。実験装置の概略図を図1.3に示す。

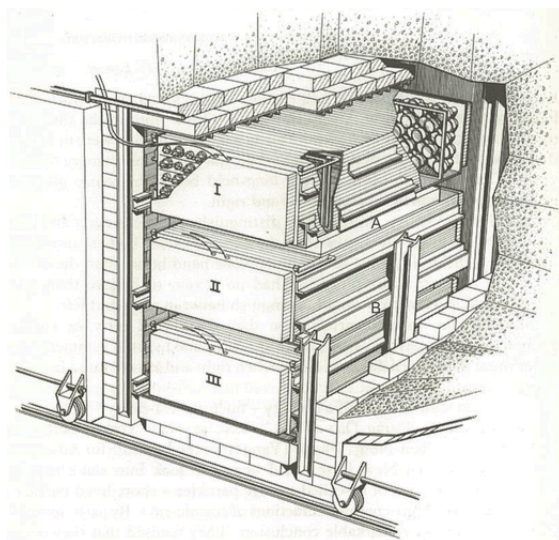


図 1.3: Poltergeist プロジェクトの実験装置 [18]。図中の I, II, III のタンクには液体シンチレータが蓄えられ、その間にある A, B 槽にカドミウムを溶かした水が入っている。もとはフィジカル・レビュー誌の1960年117号に掲載されたもの。

原子炉から飛来したニュートリノは、実験装置の中できく稀に逆ベータ崩壊を起こす。



この時に放出される陽電子は電子と対消滅を起こして $\gamma$ 線を放出する。さらに放出された中性子は水中のカドミウムに捕獲されて同じく $\gamma$ 線を放出する。この2つのイベントを検出することで、その反応がニュートリノによるものであると結論付けることに成功した。

その後、様々な実験によってニュートリノの諸性質が調べられてきた。詳しい説明は割愛するが、Yang と Lee によるパリティ非保存の提案と Wu による検証、

Goldhaber によるニュートリノヘリシティの決定実験などは、素粒子物理学に大きな進展をもたらすものであった。

ニュートリノの性質を調べることに並行して、新たな種類のニュートリノを探索する試みも行われた。そして1962年、ブルックヘブン国立研究所のAGS加速器を用いた実験で電子ニュートリノとは異なるニュートリノが発見され、ミューニュートリノの存在が示された。さらに2001年にはフェルミ研究所で行われたDONUT実験でタウニュートリノが発見され、クォークやレプトンと同様3世代のニュートリノの存在が明らかとなった。

### 1.1.3 その後の展開

タウニュートリノの発見によって、標準模型で予言されたすべてのニュートリノが観測されたこととなった。2002年にはLEPにてZボソンの崩壊分岐比の精密測定が行われ、その結果からニュートリノが3世代であることが示された。

ところがそのころ、標準模型では説明できないような現象の存在が明らかになってきた。“ニュートリノ振動”と呼ばれるその現象はニュートリノが質量を持つことを示唆するもので、「ニュートリノの質量は0」とする標準模型と矛盾する。さらにニュートリノが質量を持つとすると、マヨラナ性と呼ばれる性質の獲得や右巻きの重いニュートリノ（ステライルニュートリノ）の存在が予言される。これらの現象を理解することは標準模型を超える新たな理論の構築に必要不可欠なものと考えられており、現在精力的に研究が進められている。次節以降では、その中でも我々の実験に大きく関わる“ニュートリノ振動”と“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”について説明する。

## 1.2 ニュートリノ振動とニュートリノの質量

ニュートリノが質量を持つと仮定すると、ニュートリノ振動と呼ばれる現象が起こることが理論的に予言される。そしてその現象の発見は、ニュートリノの質量を0とする標準模型を超える新たな理論が必要であることを意味する。この節ではニュートリノ振動の理論と、現在考えられているニュートリノの質量獲得機構について簡単に述べる。

### 1.2.1 ニュートリノ振動

ニュートリノが質量を持つ場合、そのフレーバー固有状態  $|\nu_\alpha\rangle$  は質量固有状態  $|\nu_i\rangle$  の線形結合で書くことができる。

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} |\nu_i\rangle \quad (\alpha = e, \mu, \tau) \quad (1.5)$$

ここで  $U$  はレプトンの混合行列で、提案者の名前にちなんで MNS 行列 (Maki - Nakagawa - Sakata 行列) と呼ばれている。

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

なお、 $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$ ,  $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) であり、 $\theta$  は混合角、 $\delta$  は CP 位相因子と呼ばれるものである。

質量の固有状態は個別に時間発展するので、ニュートリノが伝搬している過程でその混合の割合が変わってしまう。その結果、ニュートリノのフレーバー固有状態が伝搬の途中で変化するという現象が起こる。シュレーディンガー方程式より、質量固有状態  $|\nu_i(t)\rangle$  の時間発展は次のように書ける。

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

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \simeq p + \frac{m_i^2}{2p} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.8)$$

ここで簡単のために、ニュートリノを2世代 ( $\nu_e$  と  $\nu_\mu$ ) と考えてその混合を議論する。質量固有状態を  $\nu_1$  と  $\nu_2$  とすると、それぞれのフレーバー固有状態は混合角  $\theta$  を用いて

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle \quad (1.9)$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \quad (1.10)$$

と書くことができる。初期状態 ( $t = 0$ ) において  $\nu_e$  だったニュートリノが時刻  $t$

に  $\nu_\mu$  に変化している確率  $P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(t)$  は

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(t) = |\langle \nu_e(0) | \nu_\mu(t) \rangle|^2 \quad (1.11)$$

$$\simeq \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 t}{4E}\right) \quad (1.12)$$

ここで、質量の2乗差を  $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$  と定義している。ニュートリノが光速で飛ぶと近似して式 (1.12) をSI単位系に変換すると、ニュートリノの飛距離  $L[\text{m}]$  を用いて

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L, E) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{1.27 \Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E [\text{MeV}]}\right) \quad (1.13)$$

となる。

式 (1.13) から、観測時にフレーバーが変化している確率はニュートリノのエネルギー  $E$ , 飛距離  $L$ , 質量の2乗差  $\Delta m^2$ , そして混合角  $\theta$  に依存することがわかる。また、確率が三角関数的に振る舞うことから、あるフレーバーの存在確率は飛距離に応じて振動的に変化する。このことから、この現象のことを“ニュートリノ振動”と呼ぶ。ニュートリノが質量を持たないと先の議論は成立しないため、ニュートリノ振動の観測はニュートリノが質量を持つことの直接的な証拠となる。

現在、ニュートリノ振動はスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測やKamLANDによる原子炉ニュートリノ観測など、数多くの実験によって実際に観測されている。従ってニュートリノが質量を持つことは確実であり、これは標準模型を超えた理論の構築が必要であることを意味している。

## 1.2.2 ニュートリノの質量

ニュートリノ振動の観測によってニュートリノが質量を持つことが示されたのだが、その質量をどのように獲得しているのかという理論的な枠組みは未だ明らかではない。しかし“シーソー機構”と呼ばれる理論モデルを考えるとニュートリノの軽い質量を自然に導入できることから、多くの素粒子物理学者がその理論を支持している。その概要について、ニュートリノのマヨラナ性ととも説明する。



## マヨラナ質量

フェルミオンは半整数のスピンを持ち、その振る舞いはディラック方程式に従うためディラック粒子と呼ばれる。またディラック粒子には、質量やスピンの同じで電荷の正負のみが異なる“反粒子”というペアが存在している。しかしニュートリノは中性粒子であるため、電荷による粒子反粒子の区別はできない。だが実験的に、ニュートリノは左巻き、反ニュートリノは右巻きのものしか観測されていないため、それによって粒子反粒子が区別されてきた。

ところが、ニュートリノ振動の観測によってニュートリノが質量を持つことが明らかとなり、この理屈にほころびが生じた。相対論的制限から、質量を持つ粒子は光速で運動することができない。これはニュートリノについても例外ではない。従って、理論的にはニュートリノを追い抜く系が存在しうることになる。その系からニュートリノを見た場合、スピンの向きは同じで運動量が反対に見えるため、ヘリシティが逆になる。すなわちそのニュートリノは右巻きニュートリノとして観測される。このことから、ニュートリノは左巻き成分と右巻き成分の両方を持っているはずである。しかしこれは観測されるニュートリノがすべて左巻きという実験事実と矛盾する。

ここで登場するのが“マヨラナ性”という性質である。ニュートリノと反ニュートリノの区別がスピンの向きのみであるならば、右巻きのニュートリノは通常反ニュートリノと同一であると考えることができる。このような粒子と反粒子が同一の粒子のことを“マヨラナ粒子”と呼び、“マヨラナ質量”と呼ばれる質量を持つ。マヨラナ質量項をラグランジアンに導入すると電荷保存則を破ってしまうため電荷を持つフェルミオンには導入できないのだが、ニュートリノは中性粒子なのでその問題は回避される。マヨラナ質量を導入した場合の左巻きニュートリノの質量項  $L_L$  は

$$L_L = -\frac{1}{2}m_L\overline{\psi}_L^c\psi_L + h.c. \quad (1.14)$$

と書け、右巻き質量とは独立となる。すなわち、マヨラナ質量の導入によって左巻きニュートリノと右巻きニュートリノに異なる質量を持たせることが可能となる。

## シーソー機構

マヨラナ質量項の導入によって、左巻きニュートリノと右巻きニュートリノに異なる質量を与えることが可能となった。もし右巻きニュートリノが非常に重い質量を持っているとしたら、実験的に観測できないことを説明できる。さらにそう考えることで、左巻きニュートリノの異様に軽い質量を説明することも可能となる。柳田勉博士などが提案したその理論は“シーソー機構”と呼ばれ、左巻きニュートリノの質量  $m_L$  を次のように与える。

$$m_L \sim \frac{m_D^2}{M_R} \quad (1.15)$$

$m_D$  はディラック質量、 $M_R$  は右巻きニュートリノの質量である。右巻きニュートリノの質量を重くするほど左巻きニュートリノの質量が軽くなることからシーソーという名前がつけられている。この理論が成立するためにはニュートリノがマヨラナ質量を持つことが必要なので、現在ニュートリノのマヨラナ性を検証するための実験が数多く行われている。

### 1.2.3 質量階層構造

ニュートリノの質量獲得機構はまだ明らかではないが、ニュートリノ振動の結果から各質量固有状態の2乗差は求めることができる。これまでの実験結果から、階層構造のモデルは正常階層構造 (Normal Hierarchy)、逆階層構造 (Inverted Hierarchy)、縮退構造 (Degenerated) の3パターンが考えられている (図 1.4)。

ニュートリノ質量の研究手法にはいくつか種類があるが、ここでは代表的な3つの手法について簡単に述べる。

#### ベータ崩壊を用いた研究

ニュートリノが質量を持つと、ベータ崩壊のスペクトルの終端に微妙な歪みが生じる。その歪みを高エネルギー分解能の検出器で観測し、スペクトルを再現するようにニュートリノ質量を決定するという研究手法で、CP位相の理論的不定性の影響を受けないという特徴がある。トリチウムのベータ崩壊を用いた Troitsk 実験によって、 $m_\nu < 2.2\text{eV}$  (95% C.L.) という結果が得られている [4]。

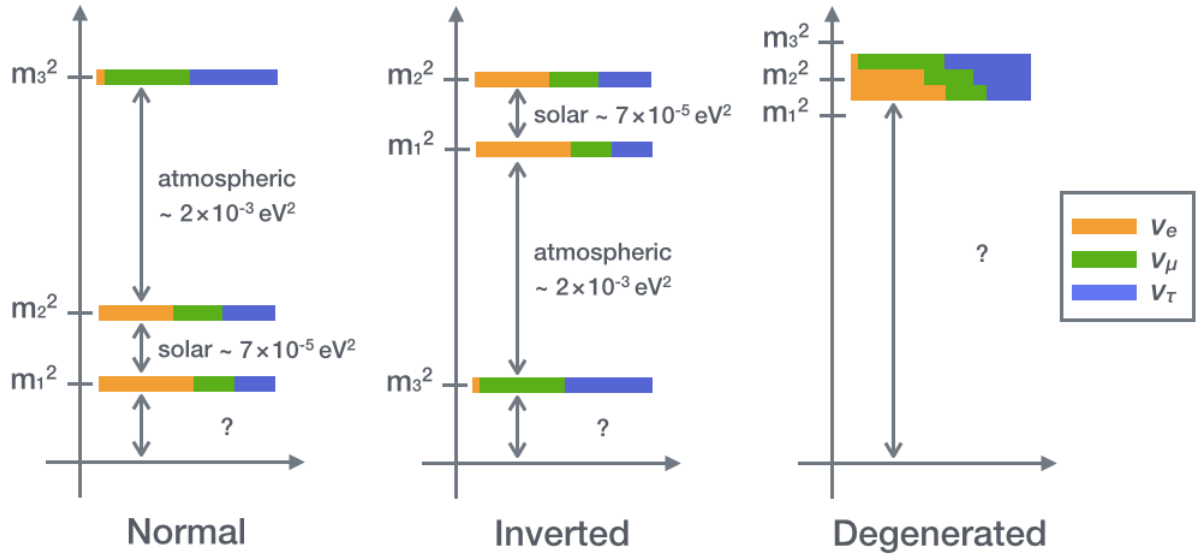


図 1.4: ニュートリノの質量階層構造

### 宇宙観測による研究

ニュートリノの質量は宇宙の密度ゆらぎに影響を与えるので、そのゆらぎを精密測定することによってニュートリノ質量を決定しようという研究手法。宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)・バリオン音響振動 (BAO)・ハッブル定数 ( $H_0$ ) の3つの観測結果と  $SPT_{CL}$  (Sunyaev - Zeldovich selected galaxy cluster abundances) を考慮すると、次のような結果が得られる [5]。

$$\sum m_\nu = 0.32 \pm 0.11 [\text{eV}] \quad (1.16)$$

一方、CMB 観測衛星である *Planck* の観測からは、未だニュートリノ質量の有限値 ( $\sum m_\nu$ ) を得ることはできていない。現在のところ、次のような上限値を得るにとどまっている [6]。

$$\sum m_\nu < 0.23 [\text{eV}] \quad (\text{Planck} + \text{WP} + \text{highL} + \text{BAO}) \quad (1.17)$$

その他にも、ニュートリノ振動の結果と宇宙観測によるデータから、ニュートリノの有効質量  $m_{\beta\beta}$  の  $1\sigma$  allowed regions として次のような制限が得られている。

$$26 \leq m_{\beta\beta} \leq 143 \text{ (Normal Hierarchy)} \quad (1.18)$$

$$28 \leq m_{\beta\beta} \leq 145 \text{ (Inverted Hierarchy)} \quad (1.19)$$

この制限から、有効質量  $20\text{meV}$  程度の領域まで探索を行うことができれば、ニュートリノの質量階層構造が解明できると期待される。KamLAND2 - Zen（詳細は後述）では5年程度の観測でこの領域までの探索を行うことを目標としており、ニュートリノ質量の各種研究の大きな助けになると思われる。

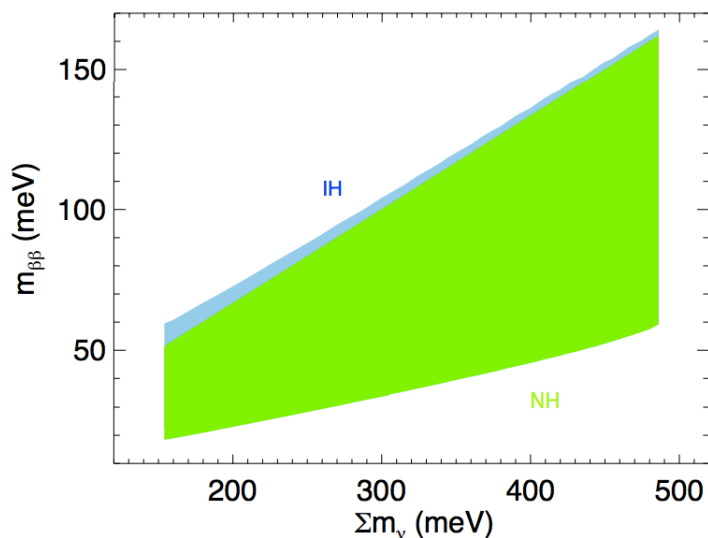


図 1.5: ニュートリノ振動の結果と宇宙観測によるデータから得られた  $1\sigma$  allowed regions ([7], p.5 より引用)。緑の領域が Normal Hierarchy の場合、水色の領域が Inverted Hierarchy の場合。

## 二重ベータ崩壊による研究

2つの中性子が同時にベータ崩壊を起こす“二重ベータ崩壊”と呼ばれる現象を用いてニュートリノの有効質量を決定しようという研究手法。1.3節で詳しく述べているのでここでは割愛する。

1.2.1節で述べたニュートリノ振動の実験では質量の2乗差しか求めることができず、ニュートリノの有効質量を直接求めることはできない。しかし“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”と呼ばれる現象の観測によって、それを直接測定することが可能となる。またニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の観測はニュートリノのマヨラナ性を証明するものでもあるため、ニュートリノの性質解明の大きな手がかりになると期待されている。次節でその詳細を述べる。

## 1.3 ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

### 1.3.1 二重ベータ崩壊とは

ベータ崩壊については1.1節で説明したが、特殊な原子核では2つの中性子が同時にベータ崩壊を起こす“二重ベータ崩壊”と呼ばれる現象が起こることがある。陽子と中性子の数がともに偶数である偶偶核では、単純なベータ崩壊を起こすとエネルギーが崩壊前よりも高くなってしまう。従ってこのような原子核では単純なベータ崩壊が禁止されている。だが二重ベータ崩壊を起こせばエネルギーが下がるため、こちらは許容されている。二重ベータ崩壊におけるエネルギー準位図の例を図1.6に示す。

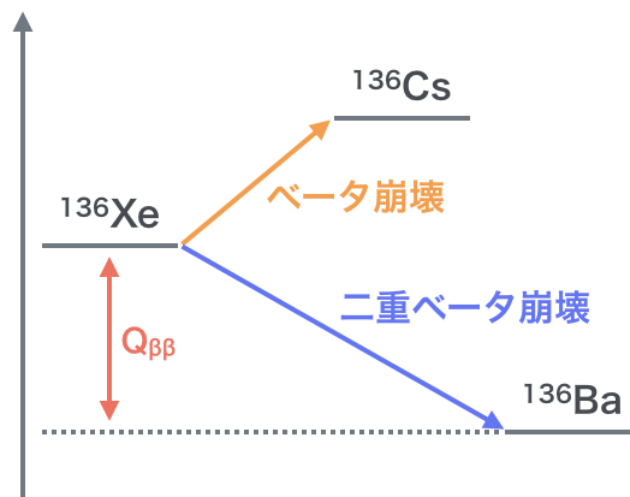


図 1.6: 二重ベータ崩壊におけるエネルギー準位図の例 ( $^{136}\text{Xe}$  の場合)

しかし二重ベータ崩壊は非常に起こりにくい現象であり、通常のベータ崩壊に比べて半減期が極端に長い。そのため観測することが大変困難である。天然に存在する原子核で、現在二重ベータ崩壊を起こすことが確認されているのは次の10種類である。

核種	プロセス	遷移	$Q_{\beta\beta}$ [keV]	$T_{1/2}^{2\nu}$ [yr]	$T_{1/2}^{0\nu+2\nu}$ [yr]
$^{48}\text{Ca}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	4273.6	$(4.3 \pm 2.3) \times 10^{19}$	-
$^{76}\text{Ge}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	2039.0	$(1.3 \pm 0.4) \times 10^{21}$	-
$^{82}\text{Se}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	2995.5	$(9.2 \pm 0.8) \times 10^{19}$	-
$^{96}\text{Zr}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	3347.7	$(2.0 \pm 0.4) \times 10^{19}$	-
$^{100}\text{Mo}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	3034.68	$(7.0 \pm 0.4) \times 10^{18}$	-
$^{100}\text{Mo}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0_1^+$	2339.6	$(5.7 \pm 1.4) \times 10^{20}$	-
$^{100}\text{Mo}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0_1^+$	2339.6	-	$(6.1 \pm 0.2) \times 10^{20}$
$^{116}\text{Cd}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	2808.7	$(3.0 \pm 0.3) \times 10^{19}$	-
$^{128}\text{Te}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	867.95	-	$(3.5 \pm 2.0) \times 10^{24}$
$^{130}\text{Te}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	2530.3	$(6.1 \pm 4.8) \times 10^{20}$	-
$^{130}\text{Ba}$	$2\epsilon$	$0^+ \rightarrow 0^+$	2620.1	-	$(2.2 \pm 0.5) \times 10^{21}$
$^{150}\text{Nd}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	3367.68	$(7.9 \pm 0.7) \times 10^{18}$	-
$^{150}\text{Nd}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0_1^+$	2692.3	-	$(1.4 \pm 0.5) \times 10^{20}$
$^{238}\text{U}$	$2\beta^-$	$0^+ \rightarrow 0^+$	1144.2	-	$(2.0 \pm 0.6) \times 10^{21}$

表 1.1: 二重ベータ崩壊を起こす核種一覧 [8]

二重ベータ崩壊は2つの中性子が同時にベータ崩壊を起こす現象であるため、崩壊によって2つの電子と2つのニュートリノが放出される。

$$2n \rightarrow 2p + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \quad (1.20)$$

しかしもしニュートリノがマヨラナ粒子であるとする、ニュートリノと反ニュートリノは同一であるため、ニュートリノ放出の過程で仮想的に対消滅を起こしうる。すなわち、次のようなニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊が起きてもよいことになる。

$$2n \rightarrow 2p + 2e^- \quad (1.21)$$

この反応は“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊”と呼ばれており、これを観測できればニュートリノがマヨラナ粒子であることの直接的な証拠となる。これ以降、通常二重ベータ崩壊を  $2\nu 2\beta$  崩壊、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を  $0\nu 2\beta$  崩壊と呼び区別する。以下でそれぞれの崩壊について簡単に説明する。

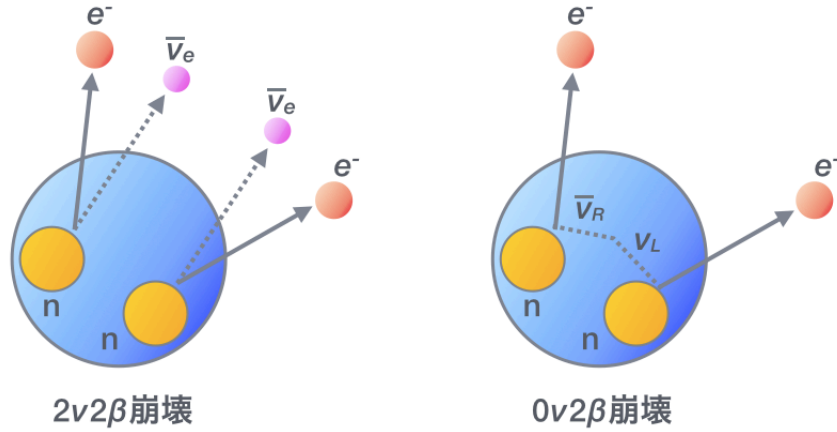


図 1.7: 二重ベータ崩壊のイメージ図

### 通常二重ベータ崩壊

$2\nu 2\beta$  崩壊では通常のベータ崩壊と同様、エネルギーが電子とニュートリノに二分される。従って放出される電子のエネルギースペクトルは連続スペクトルとなる。 $2\nu 2\beta$  崩壊の崩壊率  $(T_{1/2}^{2\nu})^{-1}$  は、位相空間因子  $G^{2\nu}$  と核行列要素  $M^{2\nu}$  を用いて次のように書ける。

$$(T_{1/2}^{2\nu})^{-1} = G^{2\nu} |M^{2\nu}|^2 \quad (1.22)$$

### ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

$0\nu 2\beta$  崩壊ではニュートリノが放出されないため、エネルギーはすべて放出される電子に与えられる。従ってそのエネルギーは  $Q$  値を持つ線スペクトルとなる。崩壊率  $(T_{1/2}^{0\nu})^{-1}$  は  $2\nu 2\beta$  崩壊と似た形で書けるが、式中にニュートリノの有効質量  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  が現れる。

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (1.23)$$

ニュートリノの有効質量  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  は3つの質量固有状態の混合として書かれる。

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \equiv \left| \sum_{i=1}^3 m_i U_{ei}^2 \right| \quad (1.24)$$

崩壊率がニュートリノの有効質量を用いて書かれることから、 $0\nu 2\beta$ 崩壊の半減期を測定することで有効質量を計算することができる。それにより、先に示したニュートリノの質量階層構造に制限をかけることができる。従って $0\nu 2\beta$ 崩壊の観測はニュートリノのマヨラナ性を示すのみならず、ニュートリノの質量構造決定に対しても有益な情報を与える。

またニュートリノがマヨラナ粒子であればシーソー機構が有力となるので、右巻きの重いニュートリノの存在が示唆される。このニュートリノは“ステライルニュートリノ”と呼ばれ、ダークマターの候補として探索が進められている。さらに、“レプトジェネシス理論”と呼ばれる理論によると、右巻きの重いニュートリノは崩壊によってバリオン数を生成することができる。これは宇宙が物質優勢となった理由を解き明かすヒントになると期待されている。

このように、 $0\nu 2\beta$ 崩壊の観測は現代物理学において謎とされている様々な問題に対して重要な示唆を与えるものである。

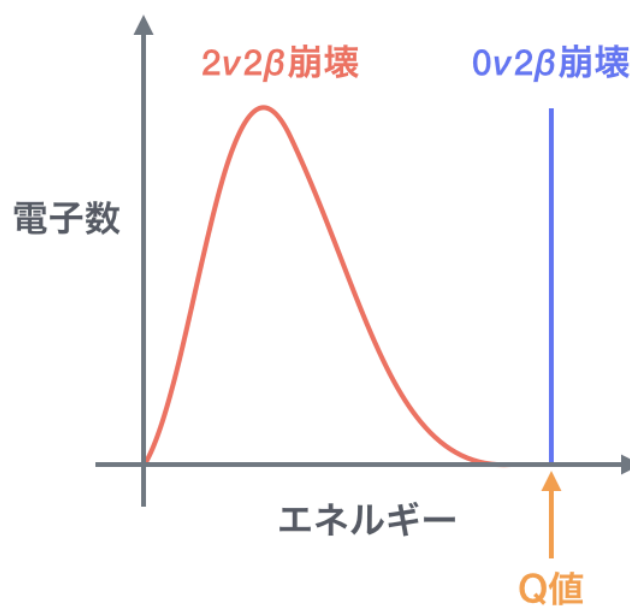


図 1.8: 二重ベータ崩壊のエネルギースペクトル



### 1.3.2 いろいろな二重ベータ崩壊探索実験

$0\nu 2\beta$  崩壊探索実験には使用する崩壊核や検出方法によって様々なタイプのものがある。ここではその中から、本論文中に登場するいくつかの実験について紹介する。

#### Heidelberg - Moscow

イタリアのグラン・サッソ国立研究所で行われていた実験で、 $^{76}\text{Ge}$  を崩壊核として使用している。この崩壊核自身が検出器の役割を果たしているため、高いエネルギー分解能をもつ。2001年には $^{76}\text{Ge}$ の $0\nu 2\beta$ 崩壊について、90% C.L. で次の結果を得ている [13]。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25} [\text{year}] \quad (1.25)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.22 \sim 0.64 [\text{eV}] \quad (1.26)$$

また2006年、この実験の一部のコラボレーターによって $0\nu 2\beta$ 崩壊を $6\sigma$ の精度で観測したとの発表があった。その際に主張された結果は次のとおり [14]。

$$T_{1/2}^{0\nu} = 2.23_{-0.31}^{+0.44} \times 10^{25} [\text{year}] \quad (1.27)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = 0.32 \pm 0.03 [\text{eV}] \quad (1.28)$$

しかしバックグラウンドの見積もりに疑問が多く、懐疑的に見る研究者が大半である。この主張は“KKDC - claim”と呼ばれており、様々な $0\nu 2\beta$ 崩壊実験で検証が進められている。

#### EXO - 200

アメリカのWIPPにて行われている実験。80.6%に濃縮した液体の $^{136}\text{Xe}$ を崩壊核として使用している。シンチレーション光と荷電粒子のトラックを両方検出できることが特徴。2012年に90% C.L. で次のような結果を発表している [15]。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.6 \times 10^{25} [\text{year}] \quad (1.29)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 140 \sim 380 [\text{meV}] \quad (1.30)$$

次期計画として、 $^{222}\text{Rn}$  除去システムの導入やデータ収集システムのアップグレードによって感度をさらに高めた nEXO (next EXO) が進められている。

#### SNO+

SNO<sup>\*1</sup> の次期計画として準備が進められている実験。800kg の  $^{130}\text{Te}$  を液体シンチレータに溶かし、 $0\nu 2\beta$  崩壊を観測する。2015 年はじめに Te を導入して実験開始予定。

他にも CANDLES ( $^{48}\text{Ca}$ )、XMASS ( $^{136}\text{Xe}$ )、GERDA ( $^{76}\text{Ge}$ ) など数多くの  $0\nu 2\beta$  崩壊探索実験がある。第 3 章では、我々が行っている KamLAND - Zen 実験について詳しく述べる。

---

<sup>\*1</sup>The Sudbury Neutrino Observatory。カナダのサドバリーにある、重水を用いたニュートリノ観測施設。

## 第2章 KamLAND実験

KamLAND 検出器 (Kamioka Liquid scintillator Anti - Neutrino Detector) は、液体シンチレータ (LS : Liquid Scintillator) を用いた反電子ニュートリノ検出器の名称である。カミオカンデの跡地を利用して建設された検出装置で、岐阜県飛騨市神岡町の神岡鉱山内 (池ノ山山頂から地下に 1,000m の地点) にある。そのような環境に検出器を設置することで宇宙線ミュオンのレートを地上の約 10 万分の 1 まで減らし、宇宙線由来のバックグラウンドを低減している。これにより、地球ニュートリノ (後述) などの低エネルギーニュートリノの観測が可能となる極低バックグラウンド環境を実現している。この章では、KamLAND 実験の概要とこれまでの研究成果について述べる。神岡鉱山内の KamLAND エリアの概略図を図 2.1 に示す。

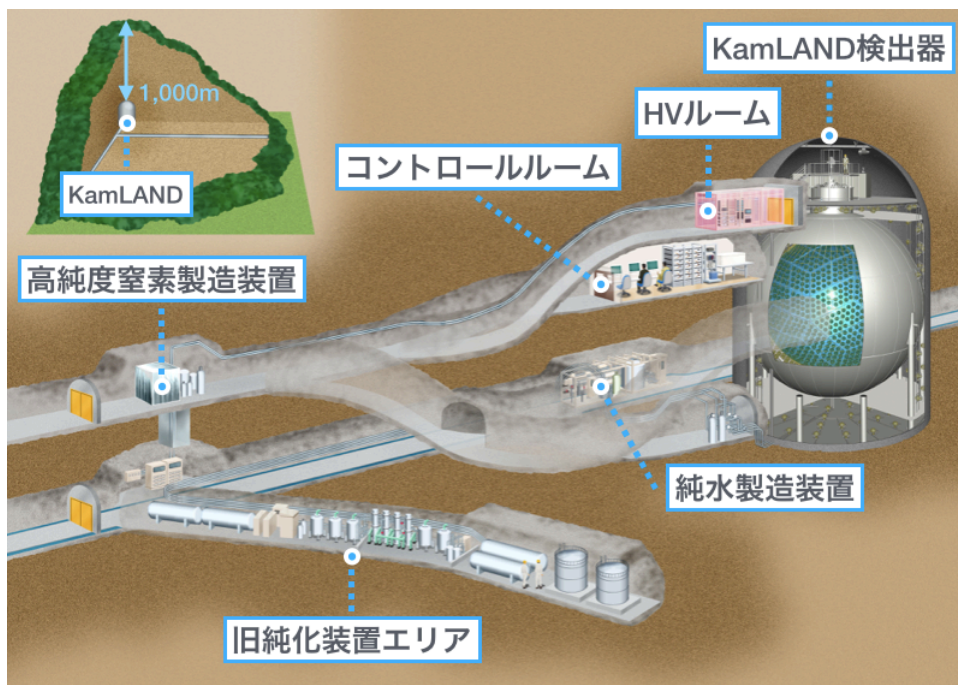


図 2.1: KamLAND エリアの概略図

## 2.1 KamLAND 検出器について

### 2.1.1 実験装置の概要

KamLAND は大まかに分けて次の 2 つの検出器から成り立っている。ニュートリノを検出するための内部検出器 (ID : Inner Detector) と、宇宙線によるバックグラウンドを除去するための外部検出器 (OD : Outer Detector) である。図 2.2 にその内訳を示す。

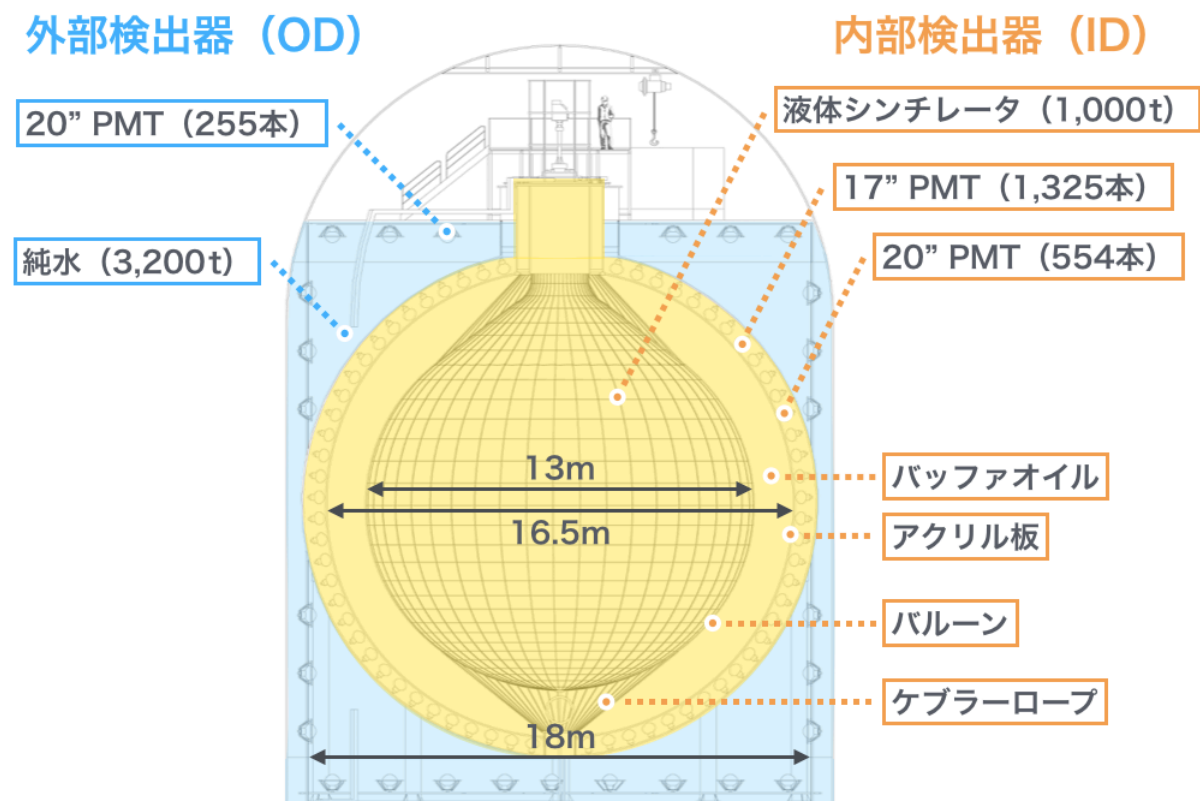


図 2.2: ID と OD の概略図。図中の黄色の部分 ID、水色の部分が OD である。

OD は宇宙線ミューオンによって発生するチェレンコフ光を 255 本の 20 インチ光電子増倍管 (略記 20" PMT) で検出し、バックグラウンドとして除去するために利用されている。また岩盤から出る環境放射線の緩衝材としての機能も持つ。

ID はニュートリノの反応信号を検出するための部分で、KamLAND 実験の根幹となる部分である。以下で各部分の役割について述べる。

## 液体シンチレータ (LS)

液体シンチレータと光電子増倍管を用いた検出器は素粒子実験ではよく用いられる。一般にシンチレータとは「放射線が当たると、そのときだけ蛍光を発生する物質（デジタル大辞泉より）」を指し、その中でも液体のものを特に“液体シンチレータ”と呼ぶ。液体シンチレータを使用するメリットとしては一般に、固体シンチレータに比べて安価であること、大光量であること、組成によって様々な波長のシンチレーション光を発生されること、などがある。

KamLAND は液体シンチレータの大光量という特徴を利用して、スーパーカミオカンデ (SK : Super - Kamiokande) など水チェレンコフ光を使用する検出器では検出できないようなエネルギーの低いニュートリノの検出を行うことができる。KamLAND で使用されている液体シンチレータは、KamLAND 実験の特性に合わせて作られたものである。大光量・高透過率・バルーンへのダメージが少ないなどの条件を考慮し、その組成が決定された。使用されている液体シンチレータの組成を図 2.3 に示す。

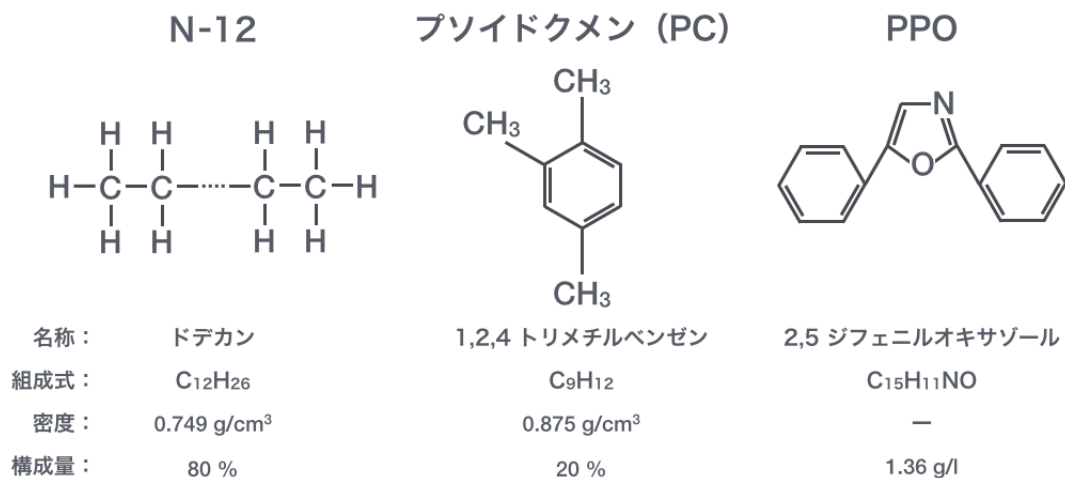


図 2.3: KamLAND で使用されている液体シンチレータ (KamLAND - LS) の組成

KamLAND - LS は 0.77721 g/cm<sup>3</sup> の密度を持ち、発光波長は 350~500nm、発光ピークは 375nm 付近である。KamLAND - LS に使用されている各物質の役割と発光ピークは図 2.4 の通り。

物質名	役割
N-12	透過率改善・密度調整
PC	発光能力の向上
PPO	発光剤

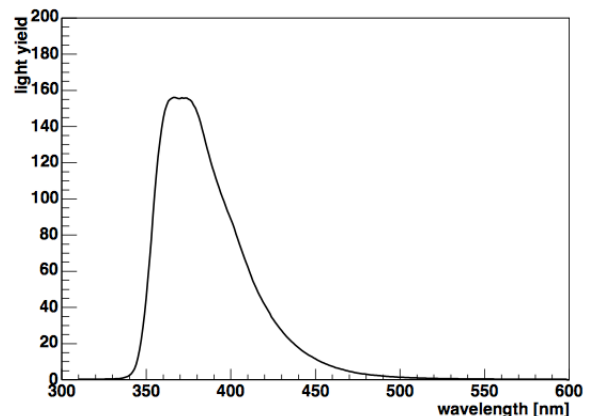


図 2.4: 各成分の役割（左表）と KamLAND - LS の発光スペクトル（右図、[34]）

液体シンチレータの発光過程は完全には解明されていないのだが、大まかには次のように考えられている。

1. 溶媒分子が放射線のエネルギーを吸収して励起する
2. 溶媒分子間でエネルギーが伝達される
3. 発光剤（溶質分子）がエネルギーを受け取り励起する
4. 発光剤が蛍光としてエネルギーを放出する

最終的に発光剤が放出する蛍光がシンチレーション光である。従って、発光剤や溶媒の種類を変えることでシンチレーション光の特性を変化させることができる。

先に示した液体シンチレータの発光過程では放射線のエネルギーがすべて光に変換されると考えた。しかし、液体シンチレータの状態によっては、そのエネルギーが光以外に変換されてしまうこともある。その場合、最終的に観測される光のエネルギーが減少し発光量が小さくなる。これをクエンチング（消光）と言う。クエンチングにはいくつかの種類があり、それぞれで原因が異なる。代表的なクエンチングを以下に列挙する。

- 化学クエンチング

エネルギーの伝達過程において起こるクエンチング。特に溶媒分子と発光剤との間でエネルギーが受け渡しされる場合の影響が大きく、その大きさは各物質の化学的特性によって異なる。

- 色クエンチング

発光剤の発光波長付近に吸収ピークを持つ物質が液体シンチレータ中に存在することで、シンチレーション光の一部が吸収されてしまうことによるクエンチング。原因物質を除去することで防止できる。

- 酸素クエンチング

液体シンチレータ中に酸素が残存していることで起こるクエンチング。酸素分子が励起された溶媒分子に作用することが原因。液体シンチレータを窒素等の不活性ガスでバブリングし、酸素を除去することで防止できる。

- 濃度クエンチング

発光剤の濃度が高すぎることで起こるクエンチングで、発光剤の自己吸収が原因と考えられている。ある程度の濃度まではエネルギーの伝達確率が高まるため発光量が大きくなるのだが、ある段階で発光量が最大に達しその後は減少する。

- 電離クエンチング

電離分子や励起分子が高密度になった結果、その周辺の蛍光効率が低下することで生じるクエンチング。電離能の大きな粒子 ( $\alpha$  線など) が液体シンチレータ中を通過することでそのような状況が発生する。 $\alpha$  線に限った場合を特にアルファクエンチングと言う。

KamLAND - LS の組成はこれらの影響も考慮した上で最適なものに設計されている。

## 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管 (PMT : Photomultiplier Tube) は高感度かつ高速応答が可能な光検出器で、ID 内には 1,325 本の 17 インチ PMT (略記 17" PMT) と 554 本の 20 インチ PMT (略記 20" PMT) の計 1,879 本が取り付けられている。その内訳は表 2.1 のとおり。

20" PMT はカミオカンデで使用されていたものに改良を施し、エネルギー分解能と時間分解能を向上させている。しかし PMT の外周付近において応答時間の悪化と光電子の収集効率低下が見られたため、さらなる改良が施されることとなった。それが KamLAND 実験用に新たに開発された 17" PMT である。問題となっ

情報	17" PMT	20" PMT	合計
本数[本]	1,325	554	1,879
光電面の面積[m <sup>2</sup> ]	0.146	0.203	306
被覆率[%]	22	12	34

表 2.1: KamLAND 内にある PMT の内訳

ていた外周付近をマスクで遮光し、さらにダイノード部分を従来のベネチアンブラインド型からラインフォーカス型に変更することで、エネルギー分解能および時間分解能の向上を図っている。そのため 17" PMT という呼び名であるが、大きさは 20" PMT と同じである。2 種類の PMT の構造図を図 2.5 に示す。

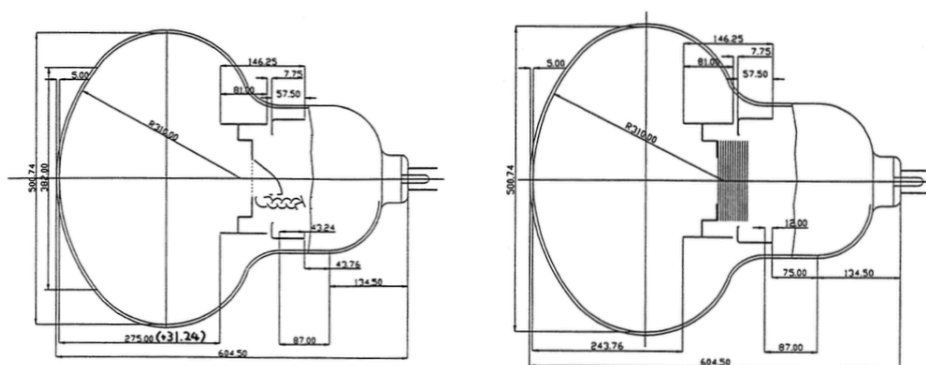


図 2.5: 17" PMT (左図) および 20" PMT (右図) の構造図 [28]

これにより、ID 内で発生したニュートリノ反応イベントによるシンチレーション光を検出している。

PMT の各種性能については参考文献 [28] に詳しいのでここでは省略するが、量子効率 (Q.E. : Quantum Efficiency) についてのみ少し言及する。光電面から出る光電子数を入射光子数で割った値で定義される量を量子効率と言ひ、PMT の性能を評価するための一つの指標として用いられる。量子効率は光電面の蒸着具合に依存するため個体差があり、さらに波長依存性もある。KamLAND - LS の発光波長付近 (350~500nm) における量子効率は約 22% である。17" PMT の量子効率の波長依存性を図 2.6 に示す。

これだけでなく、量子効率には入射光の位置による依存性や、入射角度による依存性もあることが先行研究からわかっている。それについては第 5 章で述べる。



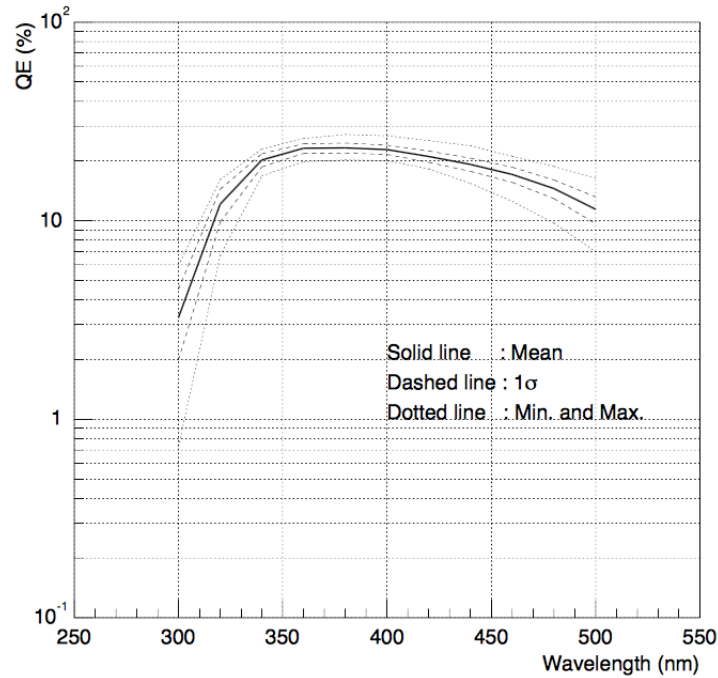


図 2.6: 17" PMT の量子効率の波長依存性。実線が平均値、点線が最大値と最小値を表す。破線は平均値から  $1\sigma$  の位置。[28]

### バッファオイル (BO)

バッファオイル (BO) はドデカン 53%とイソパラフィン 47%の混合ミネラルオイルで、次の2つの役割を担っている。

1つは緩衝材としての役割で、外部から来る放射線が液体シンチレータ内に入るのを防いでいる。特に壁側は放射線強度が高いため、そこでの発光を防ぐことで放射線によるイベントレートを低下させ、エネルギー閾値を下げることを可能にしている。さらに PMT の光電面付近にあるアクリル板によって、バッファオイルをバッファオイル内側 (BOI : Buffer Oil Inner) とバッファオイル外側 (BOO : Buffer Oil Outer) に分けている。これにより、PMT 由来の放射性不純物の影響を低減する効果も持つ。

2つ目はバルーンを定位置に保持する役割である。BO の密度は  $0.77690\text{g/cm}^3$  であり、KamLAND - LS よりも 0.04% だけ小さい。これによって KamLAND - LS を入れたバルーンが浮くことを防いでいる。バルーンの内外で密度差が大きいとバルーンに負荷がかかりバルーンが破れてしまうため、BO の密度は精密に調整されている。

## バルーン

KamLAND - LSが入っている容器であり、KamLAND 上部のチムニーからケブラーロープによって吊るされている。バルーン本体は舟型のシートを44枚溶着することで球形に作られている。素材には3層のナイロンをEVOH樹脂（エバール）で挟み込んだ5層構造のフィルムを使用しており、厚さ135 $\mu\text{m}$ でも十分な強度を保っている。さらにEVOH樹脂は極性の低い気体に対する遮蔽性が非常に高く、ニュートリノ観測のバックグラウンドとなるラドンのバルーン内への混入を防いでいる。

### 2.1.2 検出原理

前節の液体シンチレータの説明で述べた通り、液体シンチレータは放射線（荷電粒子）に反応してシンチレーション光を放出する。しかしニュートリノは中性粒子であるため、直接液体シンチレータを光らせることはできない。だがごく稀に液体シンチレータ中で弱い相互作用による反応を起こし、液体シンチレータを発光させる。その光を検出することでニュートリノを観測することができる。KamLANDで観測される反応は主に次の2種類である。

#### 逆ベータ崩壊反応

反電子ニュートリノは液体シンチレータ中にある陽子（パラフィンオイル由来の水素原子）と相互作用し、逆ベータ崩壊を起こす。



この時放出される陽電子は瞬時に周囲の電子と対消滅を起こして $\gamma$ 線を放出する（先発信号）。一方中性子は周囲の原子核と弾性散乱を繰り返しながらエネルギーを失い、最終的に熱中性子化される。この熱中性子が陽子に捕獲されることで $\gamma$ 線が放出される（後発信号）。この2つの信号を遅延同時計測（後述）することで、逆ベータ崩壊反応とバックグラウンドとなる反応とを区別することができる。逆ベータ崩壊反応の模式図を図2.7に示す。

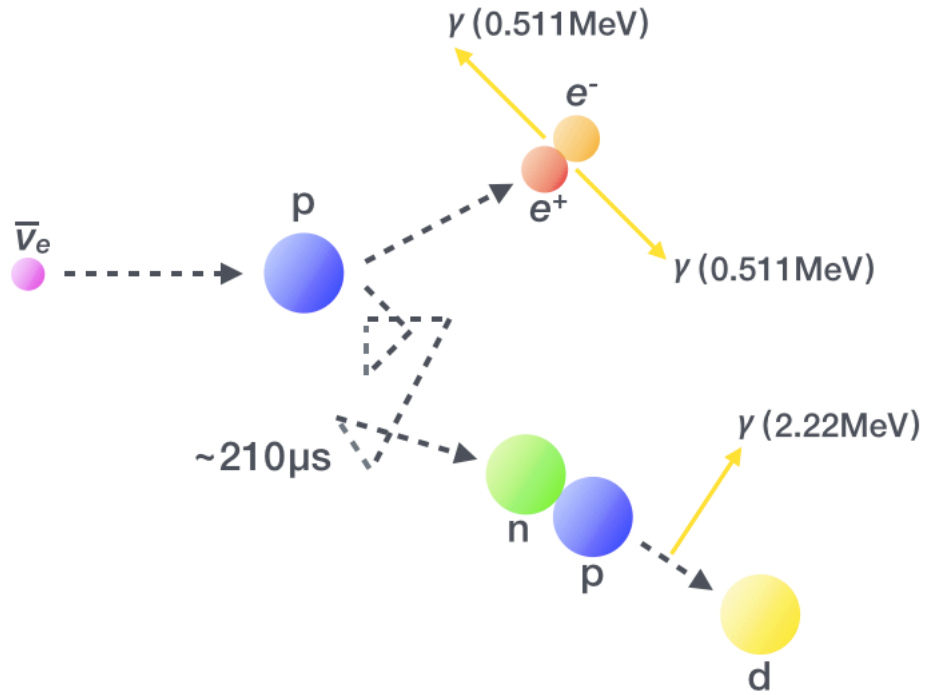


図 2.7: 逆ベータ崩壊反応の模式図

電子陽電子対消滅では  $\gamma$  線が少なくとも 2 つ放出され ( $0.511\text{MeV} \times 2$ )、これが先発信号として観測される。そのエネルギーを  $E_{prompt}$  とすると、陽電子の運動エネルギー  $T_e$  と電子質量  $m_e$  を用いて

$$E_{prompt} = T_e + 2m_e \quad (2.2)$$

また、実験室系でのエネルギー保存則より、 $E_{\bar{\nu}_e}$ 、 $m_p$ 、 $T_n$ 、 $m_n$  をそれぞれ反電子ニュートリノのエネルギー、陽子質量、中性子の運動エネルギーおよび質量として、

$$E_{\bar{\nu}_e} + m_p = (T_n + m_n) + (T_e + m_e) \quad (2.3)$$

式 (2.2) および (2.3) から、先発信号のエネルギーは

$$\begin{aligned} E_{prompt} &= E_{\bar{\nu}_e} + m_p - (T_n + m_n) + m_e \\ &= E_{\bar{\nu}_e} - T_n - 0.782[\text{MeV}] \end{aligned} \quad (2.4)$$

一方、逆ベータ崩壊で放出された中性子が熱中性子化して陽子捕獲された際に

も  $\gamma$  線を放出する。それが後発信号として検出される。そのエネルギー  $E_{delayed}$  はエネルギー保存則から、重水素の質量を  $m_d$  として

$$m_n + m_p = m_d + E_{delayed} \quad (2.5)$$

$$E_{delayed} = m_n + m_p - m_d = 2.22 [\text{MeV}] \quad (2.6)$$

ここで、熱中性の運動エネルギーは 25meV 程度なので近似的に 0 としている。

逆ベータ崩壊で中性子が放出されてから陽子に捕獲されるまでにかかる時間は約  $210\mu\text{s}$  である。従って、この程度の時間差で  $E_{prompt}$  と  $E_{delayed}$  のエネルギーを持つ 2 つの信号が観測されれば、それは逆ベータ崩壊反応によるものだと同定できる。このように、ある特定の時間差を持った 2 つ以上の信号を同時に観測する手法を“遅延同時計測法”という。これにより、様々なバックグラウンドの中から逆ベータ崩壊反応を選定することができる。

なお  $m_p < (m_n + m_e)$  なので、逆ベータ崩壊を起こすことのできる反電子ニュートリノのエネルギーには閾値が存在する。その閾値を  $E_{prompt}^{Th.}$  とすると、相対論的効果まで考慮して

$$E_{prompt}^{Th.} = \frac{(m_n + m_e)^2 - m_p^2}{2m_p} = 1.806 [\text{MeV}] \quad (2.7)$$

これ以上のエネルギーを持つ反電子ニュートリノのみ、遅延同時計測によって観測できる。

## 電子散乱

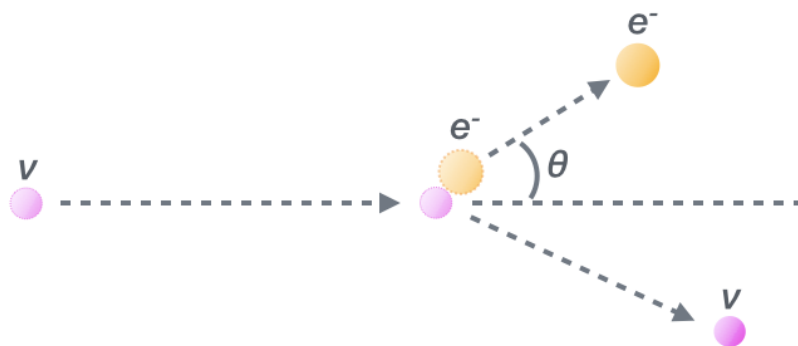


図 2.8: 電子散乱の模式図

反電子ニュートリノ以外のニュートリノは先の逆ベータ崩壊を起こさないが、液体シンチレータ中の電子と図2.8に示したような電子散乱を起こすことがある。このとき反跳電子によって液体シンチレータが発光するので、それを検出することで反電子ニュートリノ以外のニュートリノも検出することが可能となる。

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^- \quad (2.8)$$

図2.8のように反跳角 $\theta$ をとると、エネルギー保存則および運動量保存則より、反跳電子の運動エネルギー $T_e$ は電子質量 $m_e$ とニュートリノのエネルギー $E_\nu$ を用いて

$$T_e = \frac{(2E_\nu^2/m_e)\cos^2\theta}{(1 + E_\nu/m_e)^2 - (E_\nu/m_e)^2\cos^2\theta} \quad (2.9)$$

$T_e$ は $\theta = 0$ の時に最大値 $T_{max}$ をとり、

$$T_{max} = \frac{E_\nu}{1 + (m_e/2E_\nu)} \quad (2.10)$$

## 2.2 KamLAND 実験の成果

先に述べた通り、地下1,000mにあるKamLANDでは宇宙線ミューオンのレートが地上の約10万分の1である。また液体シンチレータの蒸留による不純物の除去や、アクリル板によるPMT由来の放射性不純物の影響低減などの工夫によって、世界でもトップレベルの極低バックグラウンド環境を実現している。さらに液体シンチレータによる大光量検出によって、低エネルギーのニュートリノに対して非常に高い感度を持っている。この節では、そのような実験環境だからこそ成し得た、KamLANDが挙げた2つの重要な研究成果について述べる。

### 2.2.1 原子炉ニュートリノ振動の観測

原子炉ではウランやプルトニウムが核分裂を起こす際に生じる熱を利用して蒸気を作り、その蒸気でタービンを廻して発電している。核分裂の際には大量のニュートリノが放出されるので、その意味で原子炉は巨大なニュートリノ生成装置と言う

ことができる。理論的予測物でしかなかったニュートリノが実在することを証明した Reines と Cowan の実験も、原子炉由来のニュートリノを用いたものであった。

このように、原子炉はニュートリノの発生源としてしばしば実験に用いられてきた。というのも、原子炉由来のニュートリノは原子炉の稼働状況や使用されている燃料の量から、そのエネルギーや生成量を正確に見積もることができるからである。しかし原子炉から離れるとニュートリノのフラックスが小さくなってしまいうため、数 km を超えるような長基線観測は難しかった。

だが KamLAND の周囲には出力の高い原子炉が数多く存在しており、遠方からくる原子炉由来のニュートリノを高統計で観測することができる。その環境を活かし、KamLAND では原子炉ニュートリノの精密測定を行った。その結果、原子炉由来の反電子ニュートリノの観測数が期待値の約 6 割しかないことがわかった。これにより、原子炉ニュートリノがニュートリノ振動を起こしていることを世界で初めて証明した。その際に得られた 2 周期分のニュートリノ振動の様子と、 $\theta_{12}$  および  $\theta_{13}$  の allowed region を図 2.9 に示す。

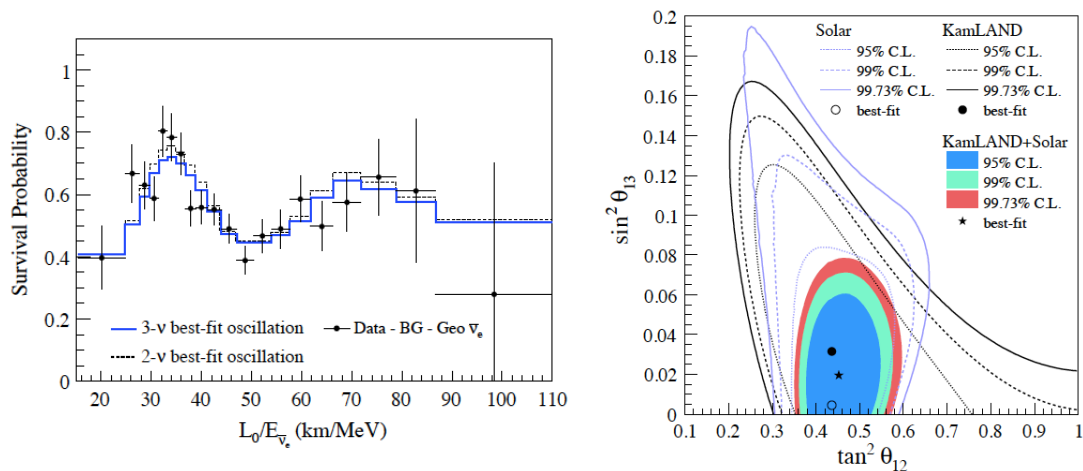


図 2.9: ニュートリノ振動の様子 (左図) と、太陽ニュートリノ観測実験の結果と合わせて得られた  $\theta_{12}$  および  $\theta_{13}$  の allowed region (右図)。[11]、p.6 および p.8 から引用。

## 2.2.2 地球ニュートリノの観測

地球内部にはUやThなどの放射性崩壊を起こす元素が存在しており、それらが崩壊する時に放出される熱が地球内部の熱源になっていると考えられてきた。そのモデルとして様々な理論が提案されてきたが、地球内部で起こる現象であるため直接観測が難しく、正確な検証がなされたことはなかった。しかし、それらを起源とする反ニュートリノの存在が予言されており、それを観測することで理論モデルの検証ができると期待されていた。

KamLANDはその極低バックグラウンド環境によって、UおよびTh由来の地球内部からのニュートリノ（地球ニュートリノ）の世界初観測に成功した。その結果、44TWという地熱の予測値に対して約半分の21TWが放射性崩壊によるものであるという結論を得た。これにより、残り半分の地熱が約46億年前に地球が形成された当時のものであることを示した。また、得られた結果は地球物理による予測値とほぼ一致しており、ニュートリノを用いて地球内部を探索する事が可能であることを証明した。この新たな研究分野はニュートリノ地球物理学（Neutrino Geoscience）と呼ばれており、今後の発展に期待がかかっている。KamLANDが得た地球ニュートリノのスペクトルを図2.10に示す。

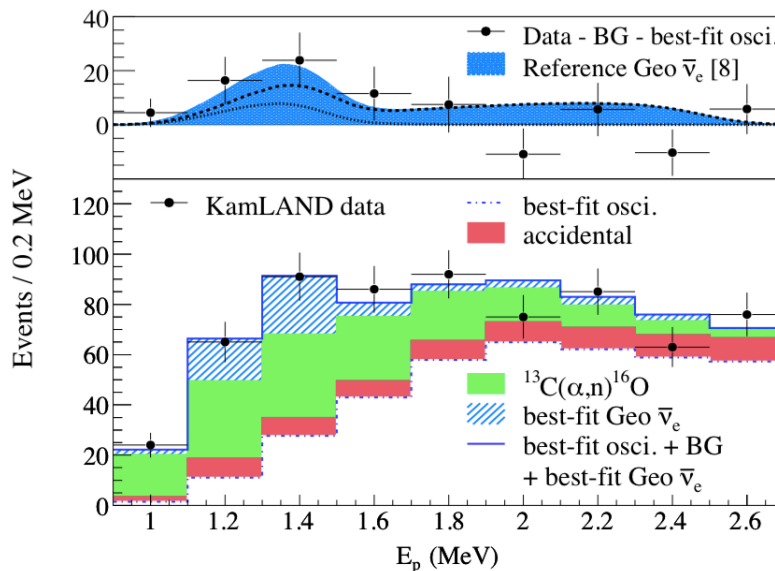


図 2.10: 地球ニュートリノのスペクトル

## 第3章 KamLAND - Zen 実験

2011年9月、KamLANDは新たなプロジェクトとして、 $0\nu 2\beta$ 崩壊を探索する実験を開始した。KamLAND - Zen (KamLAND Zero  $\nu$ neutrino double beta decay search) と名付けられたその実験は、 $^{136}\text{Xe}$ を用いて $0\nu 2\beta$ 崩壊を探索し、ニュートリノのマヨラナ性を証明しようという試みである。この実験で $0\nu 2\beta$ 崩壊を観測できれば、未だ謎に包まれている「軽いニュートリノ質量の問題 (シーソー機構)」と「宇宙の物質優勢の問題 (レプトジェネシス)」に対して、重要な示唆を与えることは間違いないだろう。この章ではその実験概要とこれまでの研究成果、および、さらなる実験精度向上に向けた将来計画について述べる。

### 3.1 実験概要

KamLAND - ZenではKamLANDの中心部にもう一つバルーンを入れ、その中に二重ベータ崩壊核の一種である $^{136}\text{Xe}$ を溶かした液体シンチレータを入れて $0\nu 2\beta$ 崩壊の探索を行っている。 $0\nu 2\beta$ 崩壊では放出される電子がある決まったエネルギーを持つため、ミニバルーン内でそのエネルギーを持つ反応が観測されれば求めるイベントの候補となる。現在は383kgの $^{136}\text{Xe}$ をKamLAND - Zen用に新たに開発された液体シンチレータ (Xe - LS、後述) に溶かし、観測を続けている。KamLAND - Zenの概略図を図3.1に示す。

KamLAND - ZenはKamLANDの内部にて行う実験であるため、それを可能にするためにいくつかのものが新たに研究開発された。ここではそのうち、ミニバルーンとXe - LSについて述べる。

#### ミニバルーン

KamLANDは液体シンチレータを用いた実験であるため、その液体シンチレータに直接Xeを溶かして二重ベータ崩壊を観測するという手法も考えられた。だが二重ベータ崩壊を観測するにあたっては、KamLAND - LSが入っているバルーン



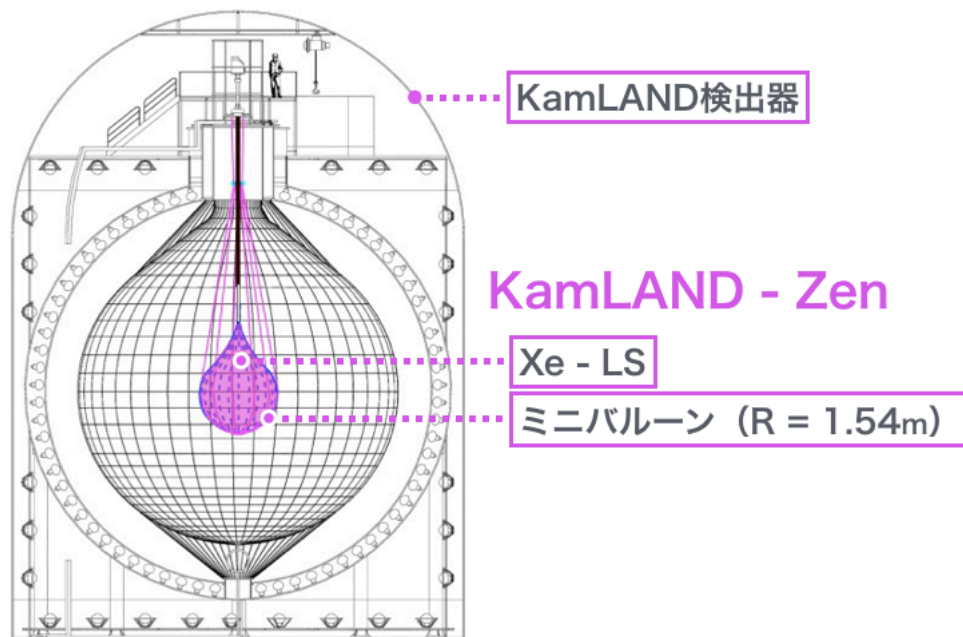


図 3.1: KamLAND - Zen の概略図 [26]

の放射性不純物量は多すぎる。そのためこの手法を使うと、有効体積が極端に小さくなってしまふことが予想された。その状況を回避し、貴重な  $^{136}\text{Xe}$  を有効活用するために考えられたのが「KamLAND の中心部に Xe 含有液体シンチレータを入れた小さなバルーンを入れる」という手法であった。そのために作られたのがミニバルーンである。

またこの手法にはもう一つ強みがある。KamLAND では解析によってイベントが発生した位置を再構築することができる。そのため、二重ベータ崩壊が起こる領域を KamLAND の中心部に限定することで、それまでに行っていた原子炉ニュートリノや地球ニュートリノの観測を継続的に行えるということである。

以上の理由から、Xe 含有液体シンチレータを入れるためのミニバルーンが開発された。ミニバルーンの基本デザインを図 3.2 に示す。

ミニバルーンも KamLAND 用のバルーンと同様、フィルムをつなぎ合わせることで作製されている。だが先にも述べた通り、放射性不純物の含有量等を考えると現在の KamLAND 用バルーンと同じ素材で作ることはできない。そこでミニバルーン用のフィルム素材が新たに調査・研究されることとなった。求められた性能は次のとおりである。

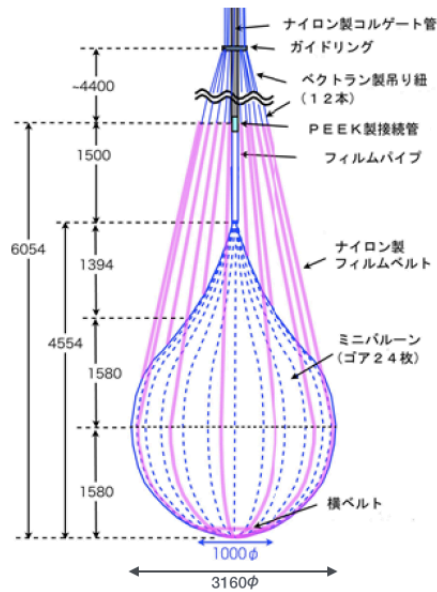


図 3.2: ミニバルーンの基本デザイン [26]

- 十分な強度を持っていること
- 透過率が95%以上であること
- Xe ガスが透過しないこと
- ウランおよびトリウム含有量が  $10^{-12}$ g/g 以下であること
- カリウム 40 の含有量が  $10^{-11}$ g/g 以下であること
- 溶着で作製できること (接着剤による放射性不純物の混入防止のため)
- $25\mu\text{m}$  以下の厚さであること

最後の項目は、万が一放射性不純物が含まれていた場合でも解析的に除去できるようにするためのものである。 $^{214}\text{Bi}$  系列の放射性不純物が含まれていた場合、崩壊過程で生じるイベントをタグ付けし、遅延同時計測することでそのイベントを解析的に除去することが可能となる。その模式図を図 3.3 に示す。

タグ付けできるイベントは2種類ある。1つ目は、 $^{214}\text{Po}$  が  $\alpha$  線を出して  $^{210}\text{Pb}$  に崩壊するイベントである。このイベントで崩壊する  $^{214}\text{Po}$  は直前に  $^{214}\text{Bi}$  から作られたものであり、その際に起こす  $\beta^-$  崩壊と  $^{214}\text{Po}$  が  $^{210}\text{Pb}$  に崩壊する際に出す  $\alpha$  線とを遅延同時計測することでタグ付けすることができる (図 3.3 中の Tag1)。ただしそのためには、後発信号の  $\alpha$  線がフィルム外まで透過し液体シンチレータ

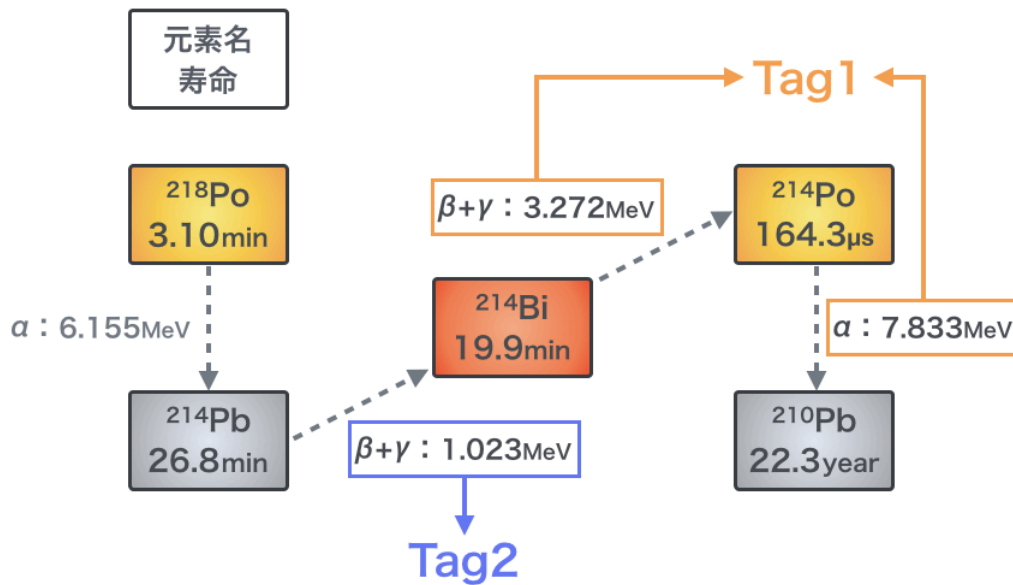


図 3.3: 放射性不純物の除去方法

を光らせる必要がある。「フィルムの厚さが  $25\mu\text{m}$  以下」という要請はそのため  
 に必要なものである。この要請により、先のイベントを 50%以上除去できることが  
 シミュレーションにより示されている。

2つ目が、先のイベントを引き起こす  $^{214}\text{Bi}$  を作る  $^{214}\text{Pb}$  の  $\beta^-$  崩壊イベントであ  
 る (図 3.3 中の Tag2)。他の放射性不純物が十分に少ない場合にこのタグ付けが可  
 能となり、データ取得の条件を調整することで Tag1 のイベントとの遅延同時計測  
 が可能となる。これにより、放射性不純物含有量とバルーンの厚さの条件を満た  
 した場合の  $^{214}\text{Bi}$  のタグ効率は 84.7%まで向上することが示されている [34]。

以上のような要求をすべて考慮し、KamLAND - Zen 用のミニバルーンが作製  
 された。ミニバルーンは現在 KamLAND 内にインストールされ、順調に実験が進  
 められている。その様子を図 3.4 に示す。

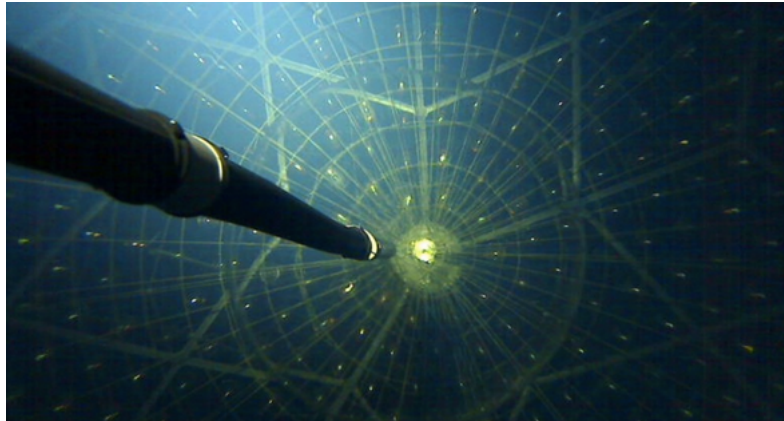


図 3.4: KamLAND 内にインストールされたミニバルーンの様子。屈折率が微妙に変わっている部分がミニバルーン表面である [26]。

### <sup>136</sup>Xe 含有液体シンチレータ (Xe - LS)

KamLAND - Zen では二重ベータ崩壊核として <sup>136</sup>Xe を使用している。<sup>136</sup>Xe を使うメリットとしては次のようなものがある。

- 化学的に安定で液体シンチレータによく溶ける
- 同位体の天然存在比が比較的高く、濃縮法が確立されている
- $2\nu 2\beta$  崩壊の半減期が長く、Q 値付近におけるバックグラウンドが少ない
- 比較的安価である

液体シンチレータに対する溶解度が高いため、KamLAND - Zen ではこれを液体シンチレータに溶かしてミニバルーンの中に入れていた。だが KamLAND - LS と同じ組成で液体シンチレータを作ってしまうと少々問題がある。というのも、Xe を溶かすことで液体シンチレータの密度が大きくなり、ミニバルーンの内外で密度差が生じた結果ミニバルーンが破れてしまう可能性があるからである。従って、それらを考慮した新たな液体シンチレータを開発する必要があった。開発にあたっては以下に示すような性能が求められた。

- Xe の溶解度が 2.0wt% 以上であること  
二重ベータ崩壊は非常に稀な現象であるため、観測のためには大量の二重ベータ崩壊核が必要となる。 $0\nu 2\beta$  崩壊ならばなおさらである。従って、十分な量の Xe が溶けることが重要である。

- KamLAND - LS と同程度の発光量があること  
ミニバルーンの内外で発光量が異なると見かけ上のエネルギー不一致が生じてしまう。その結果バックグラウンドイベントの見積もり等が困難になり、観測精度が落ちてしまうため、発光量をなるべく KamLAND - LS とそろえる必要がある。
- 減衰長が 3.0m 以上であること  
せっかくミニバルーン内でイベントが発生しても KamLAND で観測できなければ意味がないので、透過率がよくなければならない。
- ミニバルーン内外での密度差が 0.1%以下であること  
先に述べた通り、ミニバルーンの破壊を防ぐために必要。

これらの条件を満足するために、KamLAND - LS の組成と各成分の構成量を少し変え、Xe を溶かして使用するのに最適化された液体シンチレータが開発された。Xe - LS と呼ばれているその液体シンチレータの組成を図 3.5 に示す。

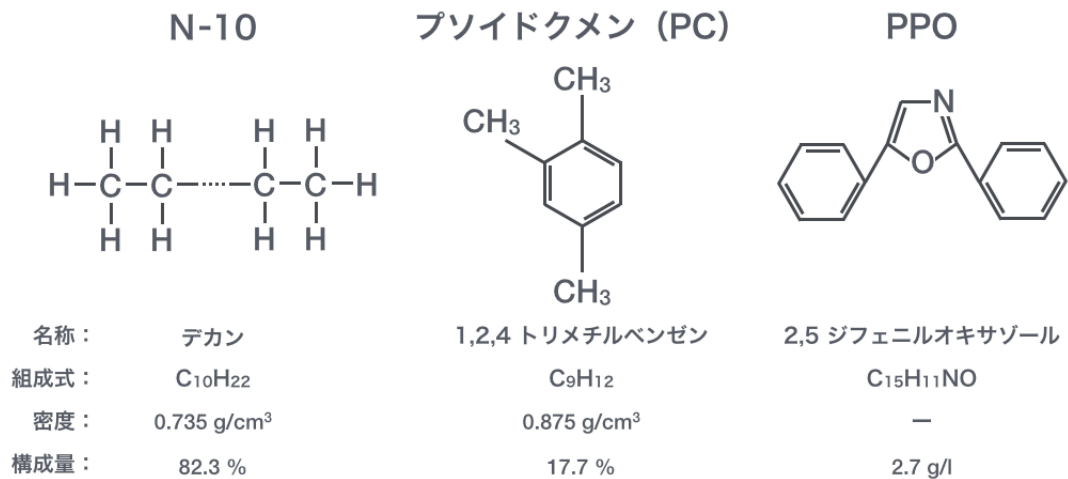


図 3.5: <sup>136</sup>Xe 含有液体シンチレータ (Xe - LS) の組成

KamLAND - LS では密度調整にドデカンが使われているが、Xe - LS ではその代わりにデカンを使用している。これは Xe を溶かすために、より密度を軽くする必要があるのである。また PPO の量を 2.7g/l と KamLAND - LS の約 2 倍としているのは、Xe の溶解によって発光量が低下することを考慮したものである (付

録 A.7.2 参照)。この組成で作られた液体シンチレータに  $^{136}\text{Xe}$  を 3.0wt%溶かすことで、密度が  $0.76068\text{g/cm}^3$  の Xe - LS が完成する。

## 3.2 KamLAND - Zen 実験の成果

KamLAND - Zen は 2011 年 9 月に始まり、現在も順調に稼働中である。この節では KamLAND - Zen のこれまでの成果について述べる。

### KamLAND - Zen First Phase

2013 年 2 月、KamLAND - Zen Collaboration は KamLAND - Zen で得られた 213.4 日分のデータを使用して、 $0\nu 2\beta$  崩壊に対する半減期の下限値とニュートリノの有効質量に対する上限値を 90%C.L. で次のように発表した。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 1.9 \times 10^{25} [\text{year}] \quad (3.1)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 160 \sim 330 [\text{meV}] \quad (3.2)$$

この結果は世界最高感度を達成するものであった。また KamLAND - Zen と同じく  $^{136}\text{Xe}$  を用いて  $0\nu 2\beta$  崩壊探索を行っている EXO - 200 の結果と合わせると、次のような制限が得られる。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 3.4 \times 10^{25} [\text{year}] \quad (3.3)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 120 \sim 250 [\text{meV}] \quad (3.4)$$

この結果と各種理論計算の結果を考慮すると、これまでで唯一  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号を得たと主張する KKDC - claim を 97.5%C.L. で排除することができる (図 3.6)。

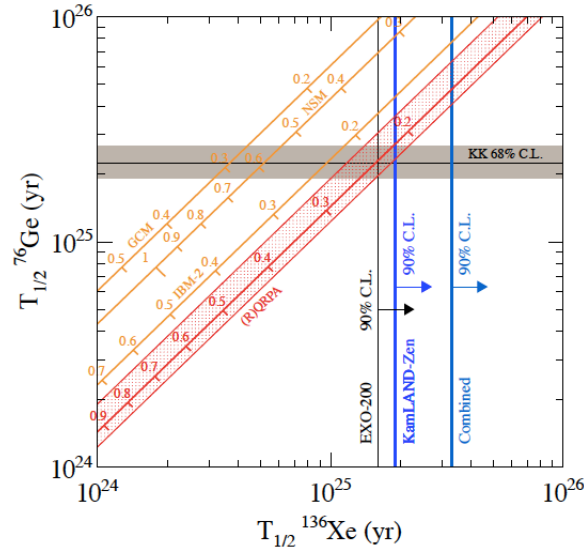


図 3.6: KamLAND - Zen + EXO - 200 による制限と KKDC - claim の排除 ([16]、p.4 より引用)。

このように、KamLAND - Zen は目覚ましい成果を挙げることに成功したのだが、肝心の  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号を発見することはできていなかった。さらに長期観測の結果、Xe - LS 中に  $^{110m}\text{Ag}$  が混入しており、 $0\nu 2\beta$  崩壊の信号が見えると期待された領域に  $^{110m}\text{Ag}$  の信号がバックグラウンドとして見えていることがわかった。

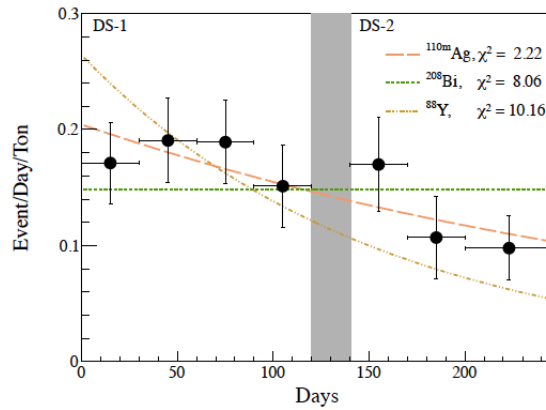


図 3.7:  $0\nu 2\beta$  崩壊のレンジにおけるイベントレートの時間変化 ([16]、p.3 より引用)。

この  $^{110m}\text{Ag}$  の混入経路は2パターン考えられている。ひとつは  $^{136}\text{Xe}$  の輸送中に宇宙線ミューオンによって原子核破砕が起こり生じた可能性。そしてもうひとつは、福島原発の事故によって生成されたものが混入してしまった可能性である。いずれにしても、この  $^{110m}\text{Ag}$  の信号は  $0\nu 2\beta$  崩壊観測の深刻なバックグラウンドになっていた。そこでこの  $^{110m}\text{Ag}$  を除去するための純化作業が行われ、 $^{110m}\text{Ag}$  の量を10分の1以下に減らすことに成功した。その際に Xe - LS は新しいものに交換され、さらに Xe の量を 320kg から 383kg に増量した後、実験が再開された。

### KamLAND - Zen Second Phase

純化作業終了後の実験期間は“KamLAND - Zen Second Phase”と呼ばれており、2015年1月現在も順調に稼働中である。そして先ごろ、Preliminary ではあるが、First Phase の結果と合わせて  $0\nu 2\beta$  崩壊に対する半減期の下限値とニュートリノの有効質量に対する上限値を 90% C.L. で次のように求めた。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.6 \times 10^{25} [\text{year}] \quad (3.5)$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 140 \sim 280 [\text{meV}] \quad (3.6)$$

この調子で統計をため、逆階層構造の領域である  $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 60 \text{meV}$  を探索することが当面の目標である。

## 3.3 考慮すべきバックグラウンド

KamLAND の極低バックグラウンド環境を維持するために様々な工夫がなされていることは前述のとおりだが、それでもある程度はバックグラウンドとなるイベントが発生してしまう。ここでは代表的なバックグラウンドとそれらに対する対策について述べる。First Phase で得られたエネルギースペクトルを図 3.8 に、各種バックグラウンドに対する見積もりを表 3.1 に示す。

$^{136}\text{Xe } 2\nu$	$^{208}\text{Tl}$	$^{214}\text{Bi}$	$^{10}\text{C}$	$^{11}\text{Be}$	$^8\text{B}$	Total	$^{136}\text{Xe } 0\nu$
8.55	$6.97 \times 10^{-3}$	8.55	1.85	0.15	0.93	19.53	4.59

表 3.1: 各種バックグラウンドに対する見積もり (events / year,  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 150 \text{meV}$ )



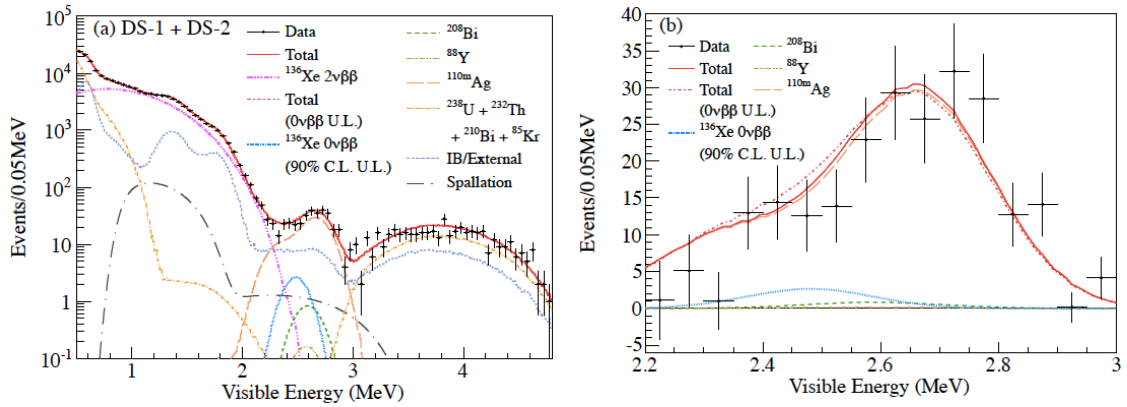


図 3.8: KamLAND - Zen First Phase で得られたエネルギースペクトル (左図: 全領域、右図:  $0\nu 2\beta$  崩壊イベント付近。[16]、p.3 より引用。)

### $^{214}\text{Bi}$ および $^{208}\text{Tl}$

これらは自然放射線である  $^{238}\text{U}$  および  $^{232}\text{Th}$  系列の不純物で、主に Xe - LS とミニバルーンに混入・付着している。Xe - LS 中のものは液体シンチレータの製造過程で、ミニバルーンに付着しているものはミニバルーンの作製時および運搬時に混入したものと考えられる。それぞれが作るイベントのエネルギーは次のとおり。

$$^{214}\text{Bi} (\beta + \gamma) : 2.2 < E < 3.0 [\text{MeV}]$$

$$^{208}\text{Tl} (\beta + \gamma) : 3.2 < E < 4.6 [\text{MeV}]$$

これらは  $0\nu 2\beta$  崩壊イベントのエネルギー領域にかかるものであり、深刻なバックグラウンドとなる。

しかし  $^{214}\text{Bi}$  のイベントについては、ミニバルーンの説明の際に述べたタグ付け方法によって解析的に除去することができる。また KamLAND - LS と Xe - LS の発光量がそろっているために、 $^{208}\text{Tl}$  のイベントは  $2.6\text{MeV} + 0.5\text{MeV}$  の信号として検出される。そのため  $0\nu 2\beta$  崩壊の領域のバックグラウンドにはならない。その他にも、ミニバルーン付近のイベントを使わない (有効体積を小さくする) ことで寄与を低減することができる。さらに、よりクリーンな環境でミニバルーンを再度作製して現在のものと交換することで、不純物そのものを除くことも検討されている。

### 原子核破碎による $^{10}\text{C}$

$^{10}\text{C}$  は液体シンチレータ中の  $^{12}\text{C}$  と宇宙線ミューオンが衝突した際、 $^{12}\text{C}$  の原子核が破碎されることによって生成される。Spallation イベントと呼ばれる現象で、1MeV 未満の領域から 3MeV より大きな領域まで広い範囲にわたって影響をおよぼしている (図 3.8 左図参照)。

しかしこの現象も、遅延同時計測によってタグ付けすることが可能である。その方法の模式図を図 3.9 に示す。

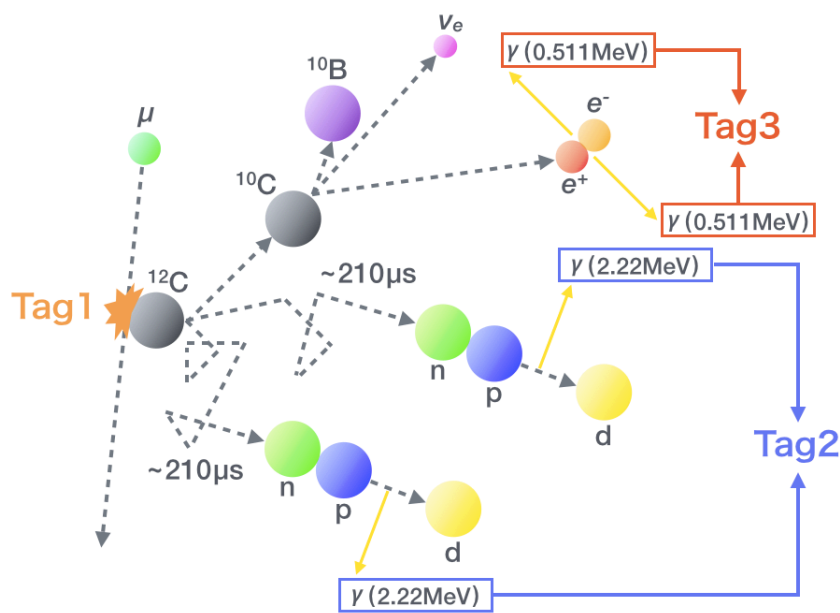


図 3.9:  $^{10}\text{C}$  のタグ付け方法

まず、宇宙線ミューオンによる発光イベントをタグ付けする (Tag1)。この時に原子核破碎が起こり  $^{10}\text{C}$  が生成されると、90%程度の確率で中性子が同時生成される。この中性子が熱中性子化して陽子捕獲されると 2.22MeV の  $\gamma$  線を出すので、それをタグ付けする (Tag2)。さらに  $^{10}\text{C}$  は  $\beta^+$  崩壊を起こし、その際に放出された陽電子が電子陽電子対消滅を起こすので、そのイベントをタグ付けする (Tag3)。以上3つのイベントを遅延同時計測することにより、このイベントを識別・除去する。中性子捕獲反応および電子陽電子対消滅反応はニュートリノの反応時に KamLAND で観測されるものと同じなので、宇宙線ミューオン通過後のイベントをすべて記録できれば、約 90%の効率でこのイベントを除去することができる。

## <sup>8</sup>B 太陽ニュートリノ

太陽の内部では pp チェーン<sup>\*1</sup> と呼ばれる反応が起こっており、その過程において <sup>8</sup>B が  $\beta^+$  崩壊を起こすとニュートリノが生じる。このニュートリノを <sup>8</sup>B 太陽ニュートリノと呼んでいる。このイベントは除去することが困難なのだが、スペクトルが広がっているため  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号に与える影響は少ない。また KamLAND が観測した <sup>8</sup>B 太陽ニュートリノの観測結果などから反応数を見積もれるため、深刻なバックグラウンドとはならない。

## Xe - LS 中の <sup>110m</sup>Ag

先にも述べたとおり偶然混入してしまったもの。Xe - LS の純化作業によって 10 分の 1 以下の量に減らすことには成功したが、まだ若干の影響が残っている。

## <sup>136</sup>Xe による通常の二重ベータ崩壊

実験の特性上必然的に生じるのがこのバックグラウンドである。<sup>136</sup>Xe は  $0\nu 2\beta$  崩壊だけでなく、 $2\nu 2\beta$  崩壊も起こす。理想的には、 $0\nu 2\beta$  崩壊の信号は  $2\nu 2\beta$  崩壊の連続スペクトルの終点にあたる位置に線スペクトルとして観測される。しかし実験装置のエネルギー分解能の影響で  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号は幅を持つため、観測では  $2\nu 2\beta$  崩壊の信号と  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号が一部被ってしまう。これにより、 $0\nu 2\beta$  崩壊の信号が  $2\nu 2\beta$  崩壊の信号によって覆い隠されてしまうということが起こる。シングルイベントである  $0\nu 2\beta$  崩壊にとって、これは深刻なバックグラウンドとなる。

このバックグラウンドを取り除くためには、エネルギー分解能を高めるほかない。エネルギー分解能  $\Delta E$  と  $2\nu 2\beta$  崩壊のイベントレート  $N_{2\nu}$  には以下のような関係がある。

$$N_{2\nu} \propto \left( \frac{\Delta E}{E} \right)^{5.8} \quad (3.7)$$

さらにエネルギー分解能と集光量  $n$  [photon] との間には次の関係が成り立つ。

$$\frac{\Delta E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3.8)$$

---

<sup>\*1</sup>太陽内部で起こっている陽子の連続核融合反応のこと。太陽エネルギーの 98.5% を占める。

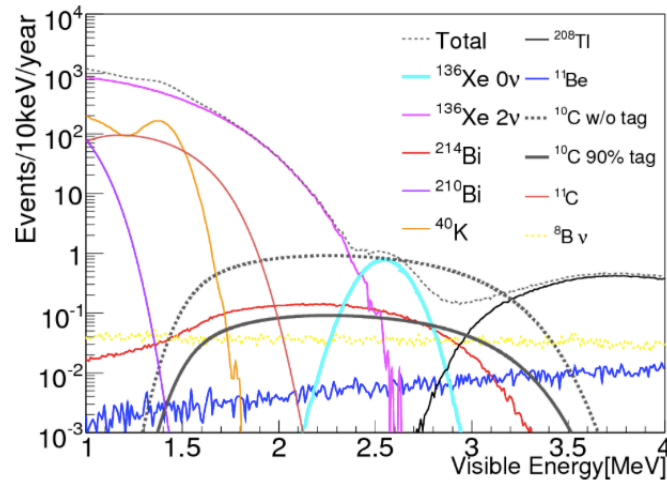


図 3.10: シミュレーションによる  $0\nu 2\beta$  崩壊領域のスペクトル。 $2\nu 2\beta$  崩壊の信号と  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号が重なっていることがわかる [34]。

以上の関係より、実験装置の集光量を高めることができればエネルギー分解能を改善することができ、それが  $2\nu 2\beta$  崩壊のイベントレート低減につながる事がわかる。本研究のモチベーションはここにある。特製の集光ミラーを PMT に取り付けることで集光率を向上し、エネルギー分解能を改善することで、 $2\nu 2\beta$  崩壊の信号と  $0\nu 2\beta$  崩壊の信号の分離を目指す。詳しくは次節で述べる。

### 3.4 将来計画と本研究の目的

KamLAND - Zen は現時点までに、3.2 節で示したような成果を挙げることに成功している。しかしバックグラウンドの除去やエネルギー分解能の改善等、実験精度向上の余地は数多く残されている。直近では、新たなミニバルーンの作製と  $^{136}\text{Xe}$  の増量 (383kg  $\rightarrow$  700kg) によって、ミニバルーン由来のバックグラウンド低減とイベントレート向上が計画されている (KamLAND - Zen 700kg Phase)。

この計画は現在の KamLAND - Zen の延長にあるもので、それほど大掛かりなものではない。しかしその後の計画として、KamLAND 検出器自体を改良することで実験精度を向上することが計画されている。この計画は KamLAND2 - Zen と呼ばれ、そのための各種研究開発が進められている。本研究もそのひとつにあたる。この節では KamLAND2 - Zen の概要と本研究の目的、および本研究以外の研究開発について紹介する。

### 3.4.1 KamLAND2 - Zen の概要

KamLAND2 - Zen は KamLAND 検出器自体に様々な改良を施すという、非常に大掛かりな計画である。現在考えられている改良点を以下に挙げる。また、それらを KamLAND に導入したイメージが図 3.11 である。

- $^{136}\text{Xe}$  の量を増やす (1,000kg)
- 大光量液体シンチレータの導入 (8,000photon/MeV  $\rightarrow$  12,000photon/MeV)
- PMT に集光ミラーを取り付ける (集光率  $\times$  1.8)
- High Q.E. PMT を使用する

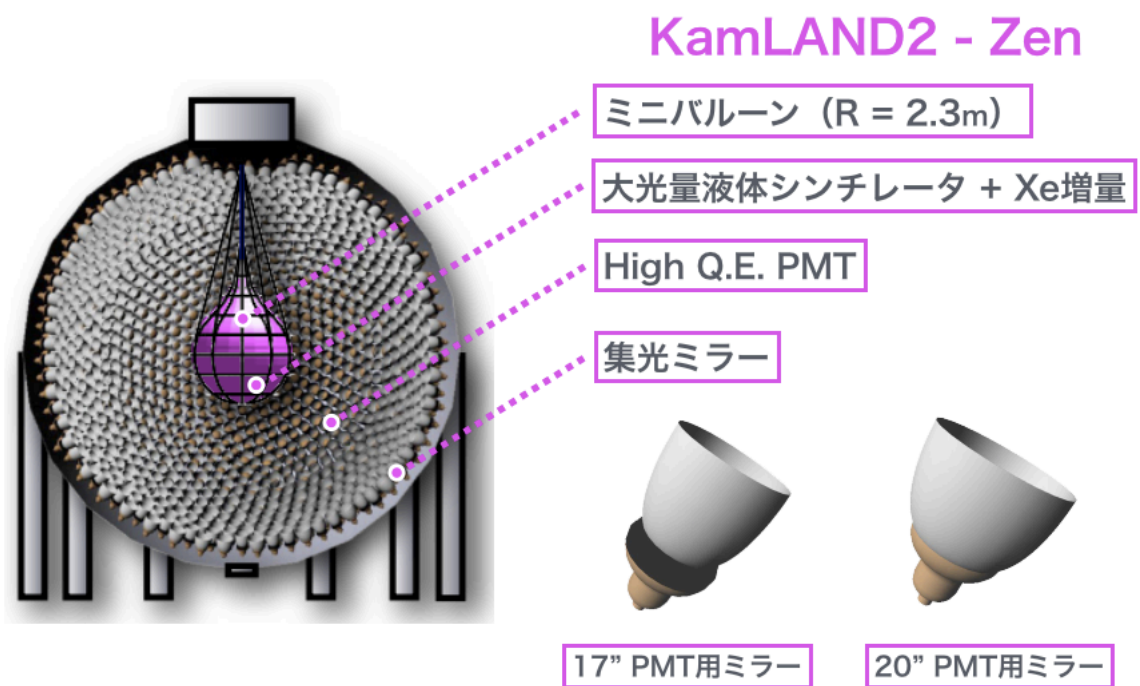


図 3.11: KamLAND2 - Zen のイメージ

$^{136}\text{Xe}$  の量を増やすことで、体積に比例するバックグラウンドを低減させることができる。また大光量液体シンチレータの導入によって発光量が1.5倍に、集光ミラーの設置によって集光率が1.8倍になると期待されている。その結果、集光量が現在の2.7倍まで向上し、エネルギー分解能は0.6倍に改善される。さらに High Q.E. PMT により観測感度が増す。これらの改善によって、観測開始から5年程度で逆階層領域をカバーできる20meVの感度達成を見込んでいる。

### 3.4.2 本研究の目的

先にも述べたとおり、KamLAND2 - Zen では集光ミラーの導入によって集光率を1.8倍に引き上げることを目指している。集光ミラーをPMTに取り付けている実験は既に幾つかあり、素粒子実験の分野ではBorexinoが有名である。しかし実験環境が異なるため、BorexinoのミラーをそのままKamLANDで使用することはできない。

そこで、KamLANDで使用するのに最適なミラーの形状および素材を研究し、独自の集光ミラーを開発することで、集光率1.8倍を達成することを考えた。本研究はそのための基礎研究にあたる。詳しい研究内容についてはこれ以降の章で順次述べていく。

### 3.4.3 本研究以外の研究開発

集光ミラーの導入以外にも、KamLAND2 - Zen では様々な部分を改良する予定であることは既に述べたとおりである。また導入時期は未定であるが、KamLANDの検出性能を高めるためのハードウェアの開発も進められている。この節では、集光ミラー以外の各種研究開発の内容について簡単に触れる。

#### 大光量液体シンチレータ (LAB - LS)

集光量向上のために集光ミラーとともに研究されているのが、KamLAND - LSよりも発光量の大きい液体シンチレータである。LAB (Linear Alkylbenzene) という油をベースにしたものが現在考えられている最有力候補であり、基礎研究が進められている。この研究については本論文付録Aで詳しく述べているので、こちらも参考にされたい。

## High Q.E. PMT

現在のPMTの量子効率(Q.E.)は、KamLAND - LSの発光波長付近において約22%である。これを約30%まで向上させたPMTをHigh Q.E. PMTと呼んでいる。KamLAND2 - ZenではこのPMTの導入が検討されており、現在はその基本性能の検証が行われている。

## 発光性バルーンフィルム

ミニバルーンの説明の際に述べた $\alpha$ 線のタグ付けを行うためには、 $\alpha$ 線がバルーンの外に出てくる必要がある。しかし $\alpha$ 線がバルーン内で止まった場合にも同様にタグ付けすることができれば、バックグラウンドの除去効率改善につながる。そこでバルーン自体が $\alpha$ 線で発光するようにすることで、そのような場合にもタグ付けできるようにしようという試みである。そのための素材選定や溶着方法の研究が行われている。

## イメージング検出器

KamLAND - LSが発光する際、 $\beta$ 線による発光と $\gamma$ 線による発光では発光点分布が異なっている。この違いを利用することで、 $\gamma$ 線が出るようなバックグラウンドを効率的に除去することができるのではないかと考えられている。その識別のためのイメージング検出器(カメラ)が研究されている。またこの検出器を用いることで、現在のKamLANDでは失われているニュートリノの飛来方向の情報を得ることが可能ではないかと期待されている。

集光ミラーと合わせてこれらをKamLANDに導入することで、検出性能の飛躍的な向上が期待される。現在どのテーマについても、導入に向けて鋭意研究が進められている。

# 第4章 集光ミラーの開発

## 4.1 研究目的

第3章で述べたとおり、KamLAND内のPMTに集光ミラーを取り付けることで集光率を向上し、エネルギー分解能を改善することが本研究のモチベーションである。そのためには、KamLANDでの使用に適した集光ミラーを新しく開発する必要がある。先行研究によりその大まかな流れは示されていたが、開発にあたって必要な基礎研究の多くはなされていなかった。そこでそれらの基礎研究を行い、開発のための地盤固めを行った。集光ミラーの製造に向けた指針を示すことが本研究の目的である。

## 4.2 開発の全体像

具体的な話に入る前に、開発の大まかな流れについて述べておく。まずはじめに、KamLANDで使用するのに最適なミラーの形状決定を行った(4.3節)。次に、KamLANDでの使用に適した素材の選定を行い、液体シンチレータ中での反射率や化学的安定性を評価した(4.4節)。それらの結果をもとに実物大の集光ミラーを作製し(4.5節)、それをPMTに取り付けることで集光率の向上が見込めるかを実験的に評価した(4.6節)。以下でそれぞれの研究内容について順次述べていく。

## 4.3 ミラーの形状決定

集光ミラーの形状には様々なものが考えられるが、本研究では既に集光ミラーを導入して実験を行っているBorexinoの論文[1]を参考に、ウィンストンコーン型という形状に着目した。ウィンストンコーンは放物面に入射した光が焦点に集まる性質を利用した代表的な集光ミラーの形状であり、天体観測用の望遠鏡などにも使用されている。この形状で作られたミラーに入射した光は、2次元では最高



で1回、3次元では最高で数回の反射をした後、光電面に導かれる。また、cutoff angle という特定の角度以上で入射した光は光電面に入らないので、PMTの周辺や背後で生じたバックグラウンドイベントを低減する効果も期待できる。

このウィンストンコーン型のデザインを応用し、“ストリングメソッド”と呼ばれる方法によって作られたコーンをストリングコーンと呼ぶ。本研究ではこのストリングコーン型を採用することにした。ストリングコーンのデザイン方法の模式図を図4.1に示す。

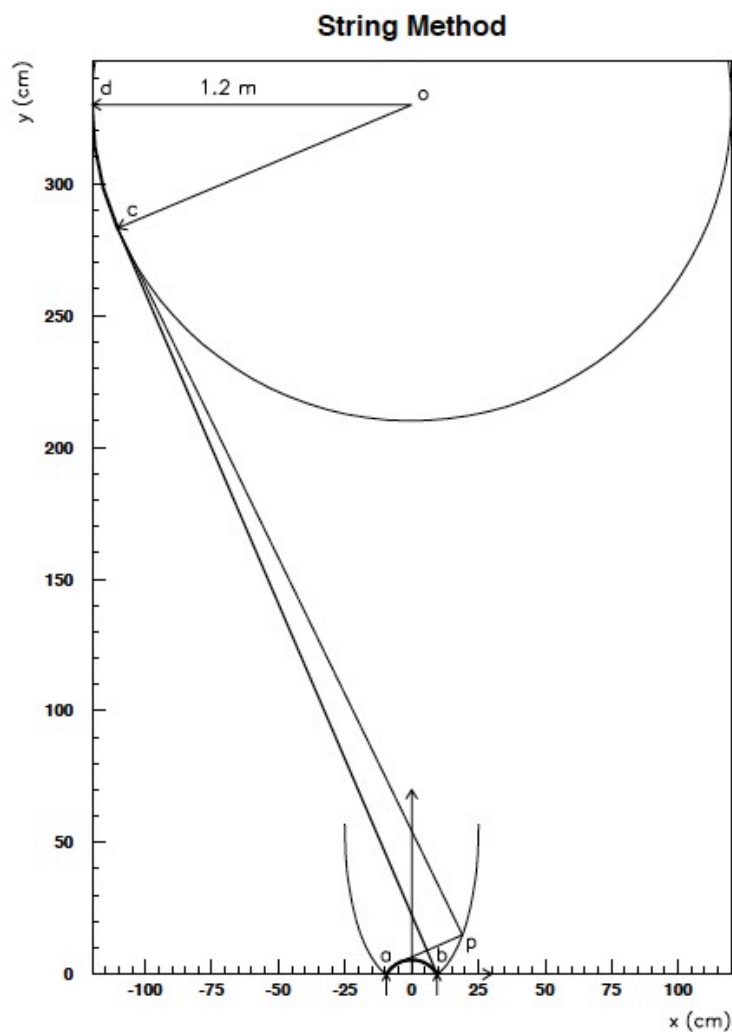


図 4.1: ストリングコーンのデザイン方法 [1]

コーンの形状決定の方法は次のとおりである。図4.1において、長さが $\widehat{ab} + \widehat{cd} + \overline{bc}$ のピンと張った糸を考える。ここで、点aはPMTの光電面を球とした場合の極値点、点dは発光が起こる有効体積を球とした場合の極値点である。点aと点dを固定し、糸がピンと張った状態を維持したままこの糸を引っ張ると、引っ張った点(図4.1中の点p)の軌跡は曲線を描く。この曲線を回転させることで、コーンの立体面が出来上がる。図4.1は有効体積の半径を1.2m、有効体積の中心からPMTの中心までを3.3mとした場合の例である。この方法を用いて、KamLAND用に最適化されたコーンの形状を決定した。設計したコーンの各種パラメータを表4.1に、設計デザインを図4.2に示す。

各種パラメータ	17" PMT 用	20" PMT 用
cutoff angle[度]	55.83	56.62
入口半径[cm]	29.77	36.23
出口半径[cm]	21.83	25.40
高さ[cm]	34.175	41.88

表 4.1: 設計したコーンのパラメータ

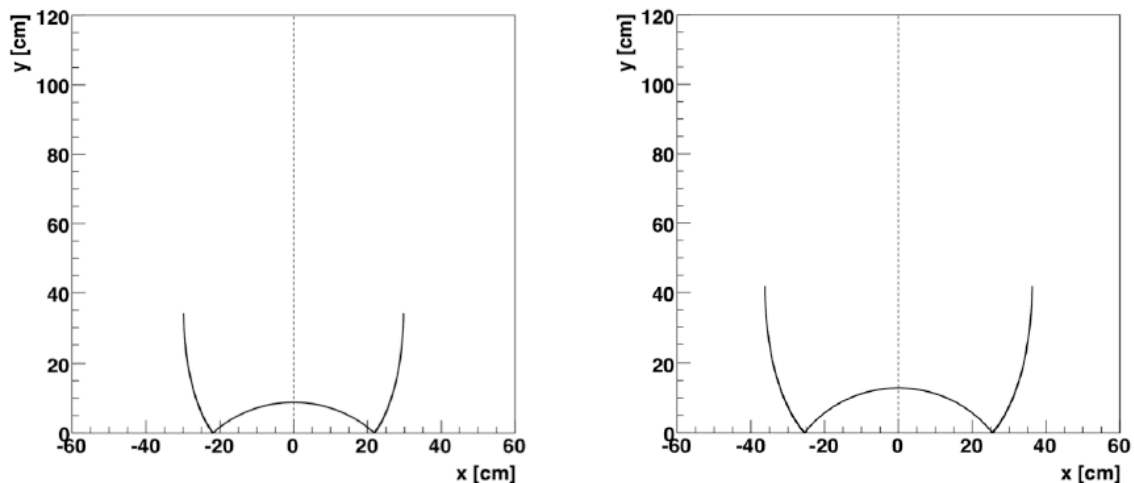


図 4.2: 17" PMT 用のコーンデザイン (左図) および 20" PMT 用のコーンデザイン (右図) [29]

コーンの出口半径はPMTの光電面の大きさから一意に決まるので、それをもとにコーンの高さを考える。コーンの高さが低すぎると光を十分に集光できない一方、高すぎても隣のコーンと干渉してしまい、やはり集光率が下がる可能性がある。表4.1の高さはそれらを考慮して設計されている。このミラーをKamLAND内のすべてのPMTに取り付けたとすると、KamLANDの中心で起こる発光イベントに対する立体角の計算から、KamLAND全体に対する光電面の被覆率は見かけ上次のようになる。

$$17'' \text{ PMT} : \left\{ \frac{\pi \times (29.77 \text{ cm})^2}{(850 \text{ cm} - 34.175 \text{ cm})^2} \times 1,325 \right\} \div 4\pi \times 100 = 44\% \quad (4.1)$$

$$20'' \text{ PMT} : \left\{ \frac{\pi \times (36.23 \text{ cm})^2}{(850 \text{ cm} - 41.88 \text{ cm})^2} \times 554 \right\} \div 4\pi \times 100 = 28\% \quad (4.2)$$

$$\text{Total} : 44\% + 28\% = 72\% \quad (4.3)$$

現在の被覆率は34%なので、ミラーを取り付けることで被覆率が約2.12倍となる。さらに液体シンチレータ中でのミラーの反射率を一律85%と仮定すれば、集光率は1.95倍程度になると予想される。

ただし、実際のミラー作製では蒸着精度のばらつきなど様々な困難があり、この予測値ほど集光率が向上する保証はない（詳細は4.5節以降）。そこで本研究では、集光率を1.8倍程度まで向上することを目標に集光ミラーの開発を行うことにした。なお本論文ではこれ以降、開発したコーンについて述べる場合はすべて“ウィンストンコーン”という表記で統一する。

## 4.4 素材の選定

ミラーに使われる素材は用途によって多種多様であるが、KamLAND内で使用するミラーの素材は以下の4つの条件を満たしていなければならない。

1. 反射率：液体シンチレータ中で85%以上
2. 化学的安定性：5～10年
3. 低放射能：現在のPMT程度
4. しなやかさ：隣のミラーとの干渉に耐えられること

条件1は目標とする集光率改善のために必要であり、条件2と条件3はKamLANDの特性上必要なものである。さらに、KamKAND内におけるPMTの配置の関係上ミラーが隣同士で干渉し、変形することが考えられるので、条件4が必要となる。これらの条件を満たす素材として、東レ(株)社製の製品であるメタルミに着目した。メタルミはPET(ポリエチレンテレフタレート)におよそ40nmのアルミ膜を蒸着したもので、各種条件を満足する。本研究ではその手法を参考に、PET板を成型してコーンの形を作り、そこにアルミニウムを蒸着することでミラーとすることを考えた。

まず前提として、使用するPETに含まれるU・Th・<sup>40</sup>Kの定量分析を行った。分析したサンプルはPETペレットおよびPETシートで、NTTアドバンステクノロジー株式会社に分析を依頼した。分析結果を表4.2に示す。参考のために、KamLANDに取り付けられているPMTのガラスに含まれている量も合わせて示してある。

元素	ペレット	シート	PMTのガラス
U	$8.0 \times 10^{-12}$	$7.0 \times 10^{-12}$	$4.8 \times 10^{-7}$
Th	$< 5.0 \times 10^{-12}$	$< 5.0 \times 10^{-12}$	$4.7 \times 10^{-7}$
<sup>40</sup> K	$< 1.0 \times 10^{-11}$	$< 1.0 \times 10^{-11}$	$8.0 \times 10^{-8}$

表 4.2: U・Th・<sup>40</sup>Kの定量分析結果 (単位: g/g)

この結果を用いて、PET + アルミニウムで作ったミラーをKamLANDに取り付けた場合に、KamLANDバルーン(KamLAND-LSが入っているバルーン)付近で想定される $\gamma$ 線のレートを概算すると表4.3のようになる。

原因	PMT由来	PET由来
U系列由来	127	$1.53 \times 10^{-3}$
Th系列由来	5.34	$5.82 \times 10^{-5}$
<sup>40</sup> K由来	82.9	$1.50 \times 10^{-2}$
合計	215	$1.66 \times 10^{-2}$

表 4.3: 想定される $\gamma$ 線のレート (単位: events/s)

以上より、PETに含まれる各種放射性不純物の量はPMTのガラスに含まれる量よりも十分少なく、ほぼ影響がないことが確認できた。そこで次に、PETにアルミを蒸着する際の最適条件を探ることにした。

#### 4.4.1 反射率評価

アルミがPET板に十分に蒸着されているかどうかは、そのサンプルの反射率を測定することで評価した。図4.3に反射率測定のために組んだ光学系の概略図を示す。サンプルをミラー台の中の治具に固定し、ミラー台をロータリーステージに乗せて回転させることで反射率の角度依存性を評価する。また、ミラー台の中に液体シンチレータを満たすことで液中での反射率も評価できるようになっている。なお、光学系の詳細および使用した機材については付録G.1に示してある。

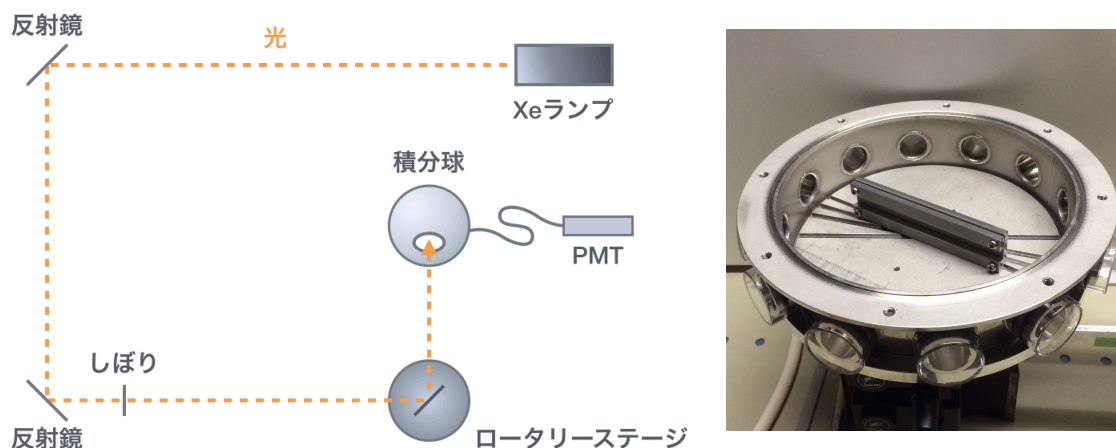


図 4.3: 光学系の概略図 (左図) および窓付きミラー台 (右図)

PCにある制御用プログラムを用いて、分光器およびロータリーステージを制御することができるようになっている。分光器を操作することで入射光の波長を変更でき、さらにロータリーステージと積分球を回転させることでサンプルへの入射角を変えることができる。これにより、反射率の波長依存性と角度依存性の測定を自動化している。反射率の評価方法は次のとおりである。

### 1. 前半のリファレンス測定

サンプルをセットしない状態で積分球に光を入れ、PMT の出力を 5 回測定する。

### 2. 反射光の測定

サンプルで反射した光（正反射した光）を積分球に入れ、PMT の出力を測定する。このとき、サンプルで乱反射した光も一緒に積分球に入ってしまうので、その寄与を評価しておく。

反射点から積分球までの距離を 135mm、積分球の穴の直径を 36mm として（付録 G.1 参照）、反射点から積分球の穴を見込む立体角  $\Omega$  を計算すると

$$\Omega = \frac{(18\text{mm})^2 \times \pi}{(135\text{mm})^2} \quad (4.4)$$

乱反射した光は反射点から半球状に（ $2\pi$  の立体角で）一様に広がると考えると、そのうち積分球に入ってくるものは

$$\frac{\Omega}{2\pi} \times 100 = \frac{(18\text{mm})^2 \times \pi}{(135\text{mm})^2} \times 100 \approx 0.89\% \quad (4.5)$$

従って、乱反射の寄与はほとんどないと考えられるので、その影響は無視する。

### 3. 後半のリファレンス測定

前半リファレンス測定と同様にして、PMT の出力を 5 回測定する。

サンプルの反射率は、反射後の出力値とリファレンス 10 回の平均値の比を取ることで計算する。すなわち、反射率を次式のように定義する。

$$\text{反射率} [\%] = \frac{\text{サンプルで反射したときの PMT の出力値 [V]}}{\text{リファレンス 10 回の PMT の平均出力値 [V]}} \times 100 \quad (4.6)$$

なお実験装置の性能上、これに 3.5% 程度の誤差が付く（付録 G.1 を参照）。

最適な蒸着条件を探るために、条件を変えながらPETの平板にアルミを蒸着して平面ミラーを作製し、空気中における反射率を評価した。作製条件を表4.4に、評価結果を図4.4に示す。反射率の目標値は90%とし、図4.4中に黒線で示した。液体シンチレータ中では反射率が若干低下することを考慮して、液体シンチレータ中での目標値である85%よりも少し高めに目標値を設定した。

サンプル#	ベースコート	トップコート	反射率[%]
# 1	なし	シリコート	75.5
# 2	なし	なし	83.6
# 3	BS421	シリコート	79.3
# 4	BS421	なし	84.0
# 5	X79NP	なし	89.4

表 4.4: ミラーサンプルの製作条件。表中の反射率は空気中、入射角 45 度、波長 375nm (KamLAND - LS の発光ピーク) での値。

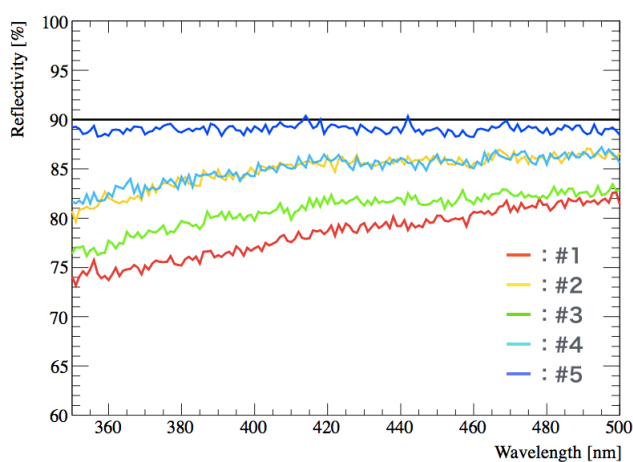


図 4.4: 反射率の測定結果 (空気中, 入射角 45 度)

表4.4中に書かれているベースコートとは、アルミを蒸着しやすくするために蒸着前のPET板に塗布する塗料である。またトップコートとは、ミラーの表面劣化を防ぐために蒸着後に塗布する塗料である。PET板に塗布した各物質の膜厚および原料を表4.5にまとめる。

塗布物質	役割	膜厚	原料
アルミニウム	ミラー	100 ~ 120nm	アルミニウム
BS421	ベースコート	8 ~ 10 $\mu$ m	ポリイソシアネート樹脂など
X79NP	ベースコート	8 ~ 10 $\mu$ m	油変性ウレタン樹脂など
シリコート	トップコート	~ 4 $\mu$ m	シリコン

表 4.5: 塗布物質一覧

反射率測定の結果より、トップコートを塗布したサンプルはそうでないものに比べて反射率が低下する傾向にあることがわかった。これはコート材による吸収や散乱の影響だと考えられる。また、X79NP というベースコートを使用したサンプルが最もよい反射率を示していたので、そのサンプルについては液体シンチレータ中での反射率も評価した。その結果を図 4.5 および表 4.6 に示す。なお、X79NP と同等の性質をもつ X80NP というトップコートをを使用したサンプルの結果も合わせて示してある（X80NP は X79NP の成分のうち入手困難なものを入れ替えたもの）。

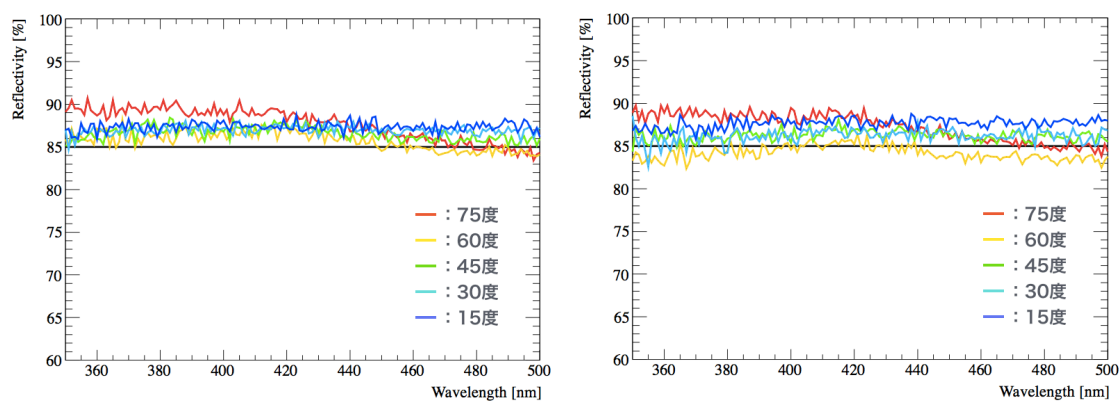


図 4.5: 反射率の測定結果（左図：X79NP, 右図：X80NP, LAB 中）

ベースコート	トップコート	75度	60度	45度	30度	15度
X79NP	なし	90.1	86.3	87.8	86.3	86.5
X80NP	なし	88.4	84.1	85.5	85.8	86.3

表 4.6: LAB 中・波長 375nm における反射率[%] の比較



この測定は新たな液体シンチレータの候補である LAB 中で行った。図 4.5 中の黒線は反射率の目標値である 85%を示す。

結果より、両サンプルとも LAB 中で反射率 85%以上をほぼ維持できることがわかった。これを受けて、実物大のミラーを試作する際のベースコートには X80NP を使用し、反射率の低下を憂慮してトップコートは施さないことに決定した。なお、X80NP のサンプルについては LAB につけて恒温槽の中で保存し、化学的安定性を検証することにした。

#### 4.4.2 化学的安定性の検証

KamLAND 内にミラーを導入すると、実験が終了する 5～10 年の間ミラーは液体シンチレータにさらされ続けることになる。その際、蒸着したアルミが剥離したり、塗布したベースコートが溶け出したりすると、KamLAND の極低バックグラウンド環境に影響を与えてしまう可能性がある。従って、そのようなことが起きないかを事前によく検証しておく必要がある。しかし KamLAND での実験と同一期間のテストを行うことは難しい。そこで、加速劣化試験という方法を用いて素材の化学的安定性を検証することにした。

加速劣化試験とは、製品を過酷な環境下に置くことで意図的に劣化を促進し、製品の寿命を見積もるための試験方法である。製品の品質保証のために行われることも多い。本研究では劣化速度が Arrhenius の式に従うという仮定のもと、経験則から温度が 10 °C 上昇すると劣化速度が 2 倍になると仮定した（詳細を付録 B で述べる）。劣化を促進するためにサンプルを入れておく恒温槽は 45 °C に保たれており、室温を 15 °C とすると 30 °C ほど温度が高い環境になっている。従って、サンプルを室内に置いておいた場合よりも  $2^3 = 8$  倍のスピードで劣化が進むと考える。サンプルの保管方法を図 4.6 に示す。

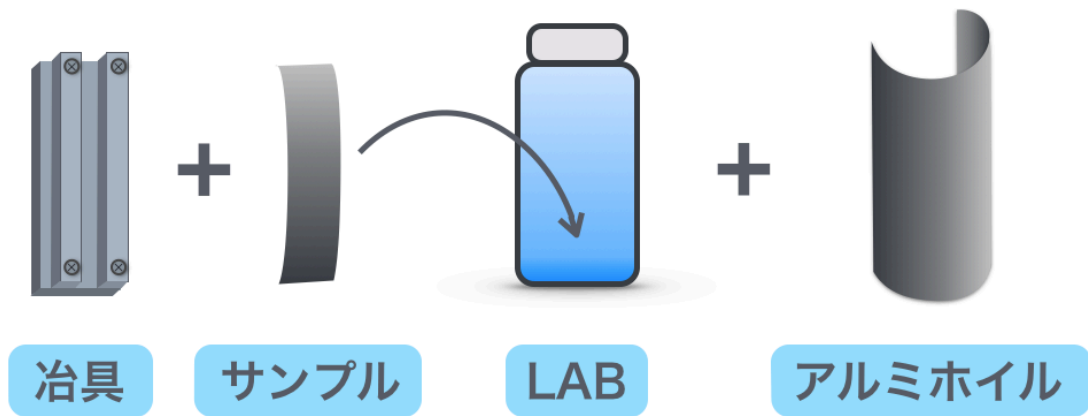


図 4.6: 加速劣化試験用サンプルの保管方法

サンプルを挟んだ治具を LAB で満たしたバイアル中に封入し、光による劣化を防ぐためにアルミホイルを巻く。それを 45 °C の恒温槽中でしばらくの間保管し、ミラーの反射率および LAB の透過率の変化からサンプルの劣化状況を評価する。この方法で、購入したメタルミおよび独自蒸着したミラー（ベースコートは X80NP）の加速劣化試験を行った。結果を図 4.7 および表 4.7 に示す。なお、透過率の測定方法については付録 G.2 を参照のこと。

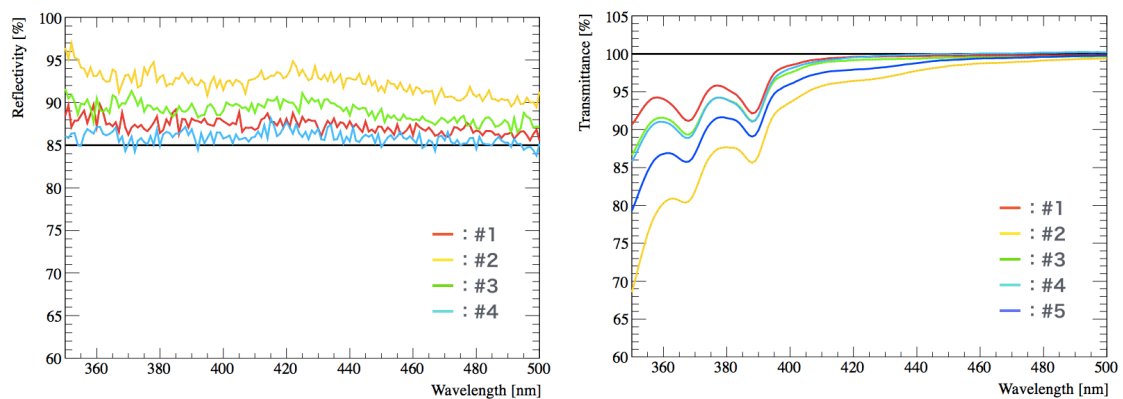


図 4.7: 加速劣化試験の結果（左図：反射率, 右図：透過率）

サンプル (実験#)	劣化試験	治具	保管期間[日]	反射率[%]	透過率[%]
試験前 (# 1)	-	-	-	86.9	95.5
メタルミ (# 2)	○	○	461	94.1	86.6
メタルミ (# 3)	-	○	461	88.9	93.8
メタルミ (# 4)	○	-	326	85.3	93.8
蒸着サンプル (# 5)	○	○	384	-	90.9

表 4.7: 加速劣化試験の結果。反射率は入射角 45 度・波長 375nm での値、透過率は 9cm・波長 375nm での値である。なお恒温槽に入れた時期にばらつきがあるため、保管期間が若干異なっている。

まず特筆すべきこととして、サンプル# 5 の表面状態が非常に悪くなっていた。表面に擦過痕のようなものが見られ、反射率を測定することができなかった。サンプル# 5 の表面状態の写真を図 4.8 に示す。

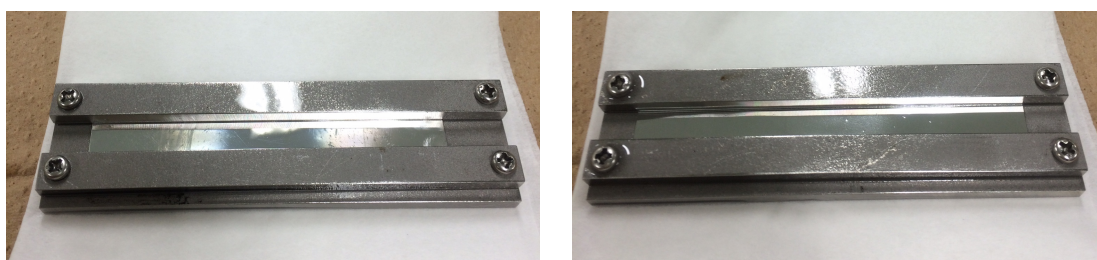


図 4.8: サンプル# 5 の表面状態の写真 (左)。アルミ表面の白く光っている部分が擦過痕。比較のため、サンプル# 2 の写真も載せてある (右)。

しかし他のサンプルの反射率に関しては、誤差の範囲内で有意差は見られなかった。サンプル# 2 の反射率が誤差範囲 ( $\pm 3.5\%$ ) よりも若干高くなっているが、これは実験装置の時間安定性によるものと思われる。測定当時、PMT の出力値が時間とともに若干減少することが確認されていた。サンプル# 2 の反射率は実験の後半で測定したため、他のサンプルと比べて反射率が相対的に高くなってしまったものと考えられる。従って、これも誤差範囲内であると考えた。

一方、LAB の透過率は試験前に比べて悪くなっていることがわかった。透過率測定の誤差は  $\pm 0.3\%$  程度であるため、明らかに透過率が低下している。特にサンプルを治具に挟んで加速劣化試験を行ったもの (サンプル# 2 とサンプル# 5) については、透過率の著しい低下が見られた。

以上の結果から、サンプルを挟んでいた治具が加速劣化試験に影響を与えてし

まったことが考えられる。使用していたステンレス製の治具が液体シンチレータによって劣化し、透過率を低下させた可能性がある。反射率に目立った変化がなかったこともこれを示唆する。さらにサンプル# 5に見られた擦過痕の原因として、封入作業の過程において治具で蒸着面を傷つけてしまい、そこから劣化が進んでしまったことが考えられる。

このことから、先に示した加速劣化試験の結果は純粹にサンプルの劣化状況を示しているとは言い難い。そこで、LABによる劣化以外の影響を最小限に抑えるために、使用する器具および保管条件を変えて同一の試験を再度行うことにした。

まず治具の劣化を防ぐために、PEEK材という耐薬品性のある樹脂で同型の治具を作りなおした。また酸素による劣化を防ぐためにLABを窒素でパージし、光による劣化を防ぐためにバイアルをアルミ製の密封パックに封入した。さらにそのパックを酸素吸着剤を入れたガラス製の密封ビンに入れたうえで、恒温槽に保管した。酸素吸着剤によって、ビン内の酸素濃度は0.1%以下に保持されている。この時の酸素の分圧と、LABと同じアルキルベンゼンの一種であるトルエンの酸素溶解度(1気圧・18℃・空気飽和状態で47.87mg/l, [17])からLAB中の溶存酸素濃度を見積もると、0.28ppm程度となる。KamLAND - LSの酸素濃度は3ppm以下[30]なので、先の方法によって十分に酸素を除去できていると考えられる。具体的な保管方法を図4.9に示す。

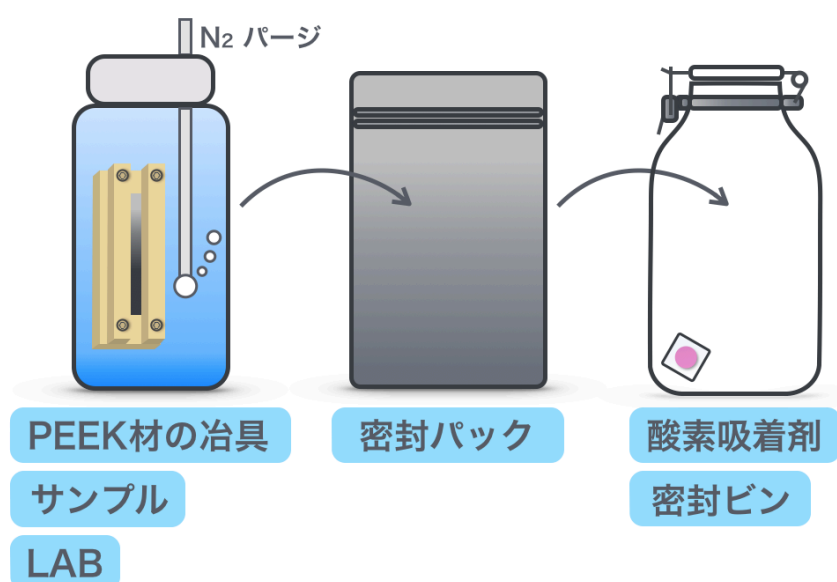


図 4.9: 加速劣化試験用サンプルの保管方法

これにより、治具・酸素・光によるサンプルの劣化を極力抑えた。時間の関係上劣化試験の期間は前回ほど長くはないが、常温環境において約3年分相当の劣化を検証できた。結果を図4.10および表4.8に示す。なお、X80NPを用いた蒸着サンプルは残っていなかったため、今回はメタルミの劣化のみを評価した。

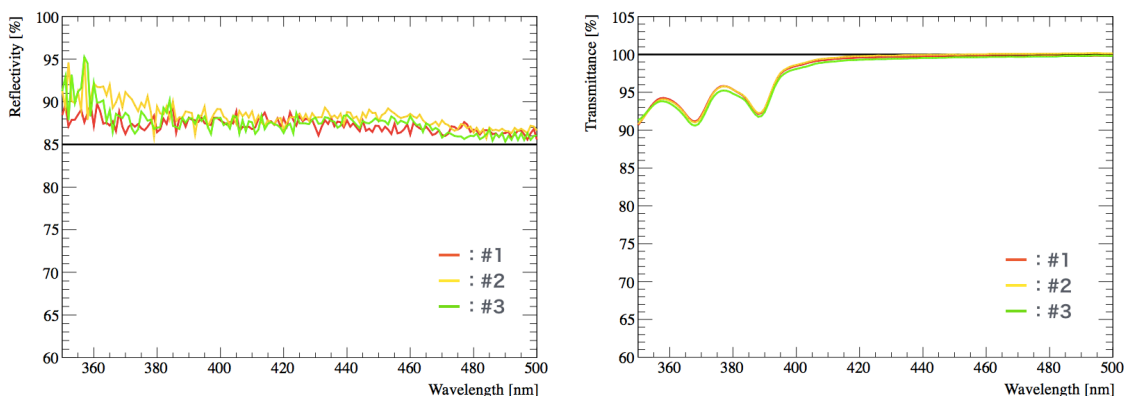


図 4.10: 加速劣化試験の結果 (左図：反射率, 右図：透過率)

サンプル (実験#)	劣化試験	N <sub>2</sub> パージ	保管期間[日]	反射率[%]	透過率[%]
試験前 (# 1)	-	-	-	86.9	95.5
メタルミ (# 2)	○	○	144	89.8	95.5
メタルミ (# 3)	○	-	144	88.8	94.9

表 4.8: 加速劣化試験の結果。反射率は入射角 45 度・波長 375nm での値、透過率は 9cm・波長 375nm での値である。

結果より、反射率・透過率ともに誤差の範囲内で有意差は見られなかった。劣化試験前の LAB の透過率 (9cm) をバッファオイルの厚みでの透過率 (200cm) に変換すると、36.0%となる (詳しい計算方法は付録 A.3 を参照)。透過率の減少がこの数値 (36.0%) の 10%以内の範囲であれば許容するとして、再度 9cm での透過率に焼きなおすと、劣化試験後の透過率 (9cm) が 95.1%以上であればよいことになる。表 4.8 より、どちらのサンプルも誤差の範囲内でこの条件を満たしていることがわかる。

従って、選定した素材 (PET + アルミニウム) は LAB 中においてほとんど劣化しないことが確認された。さらにサンプル # 1 とサンプル # 2 の透過率の比較から、LAB の安定性も確認された。

## 4.5 試作品の作製

ここまでの結果から、PET 板にアルミを蒸着して作製したミラーは求められる4つの条件をほぼ満たすことが確認された。そこでアルミ蒸着によって、実物大のミラーを試作してみることにした。作製手順は次のとおり。

### ミラー作製の手順

#### 1. 雛型を作製する

PET 板をコーンの形に成型するためのもの。整形後の PET の厚さの条件から、雛型の形状はオス型にした。

メス型で PET 板を成型すると、コーンの入口付近の PET の厚さが出口付近よりも厚くなってしまう。すると、隣のコーンと干渉した際に変形できない、変形したとしても干渉に耐えられない、などの問題が生じる可能性がある。従って、雛型はオス型である必要があった。

#### 2. PET 板を成型する

PET 板を加熱して柔らかくし、作製した雛型を用いてコーンの形に成型する。このとき、PET 板の表面にホコリが付着してミラーの状態を悪化させないように、事前に PET 板を除電しておく。

#### 3. コーンを洗浄する

成型時の切粉を洗い流すためにコーンを水で洗浄し、エアブローする。さらに保護シートの糊や離型剤<sup>\*1</sup>を除去するために IPA（イソプロピルアルコール）洗浄を行う。その後表面を乾拭きし、再度除電する。

#### 4. コーンをアルミ蒸着炉にセットする

治具を除電した後、治具にコーンを入れてテープで固定する。その後治具とコーンを再度除電する。

#### 5. ベースコート塗布する

ベースコート（X80NP）をコーンの内側に塗布し、乾燥炉（55℃）に入れて1時間30分ほど乾燥させる。

---

<sup>\*1</sup>成型したコーンを雛型から外しやすくするために使用する薬品。

## 6. アルミを蒸着する

IPA 洗浄しておいたアルミ（純度 99.99%）を蒸着炉に 4 個ずつセットし、加熱用のタングステンフィラメントを新品に交換する。その際、不純物が付かないようクリーンな手袋を使用する。

治具とコーンを再度除電し、1 時間 30 分ほど真空引きを行う。真空度が  $1.0 \times 10^{-2}$  Pa 以下になったことを確認して、4 秒程度アルミを蒸着する。蒸着時間はアルミの状態を見ながら判断する。

## 7. ミラーを梱包する

新品のナイロンでミラーを包装する。この時ナイロンが弛むようにする（そうしないと応力でミラーの形が変形してしまう）。ダンボールにミラーを入れ、四隅にクッション材を入れて完成。

PET 板成型用の雛型について、最初は木で作製したのだが、成形の過程で PET 板表面に木目が写るなどの問題が生じたため、金属で作製しなおした。詳しい経緯は 4.6 節で述べる。試作途中の写真を図 4.11 に示す。また、試作した 17" PMT 用および 20" PMT 用の集光ミラーの写真を図 4.12 に示す。

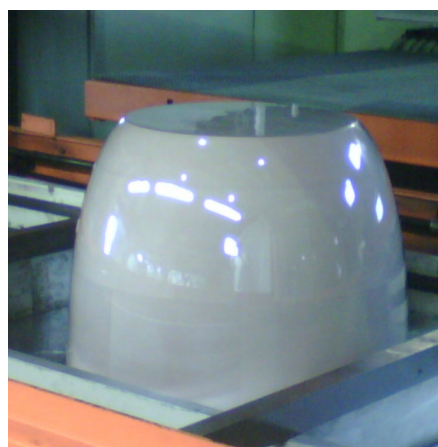
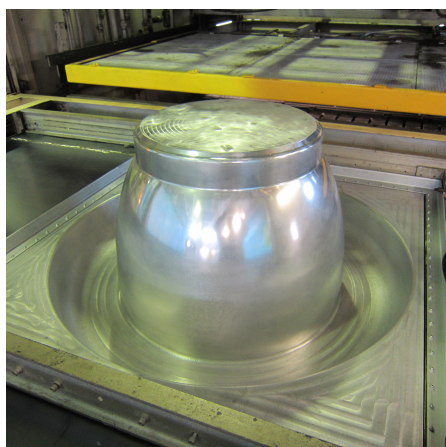


図 4.11: 作製した金属型（左図）および PET 板成型中の様子（右図）



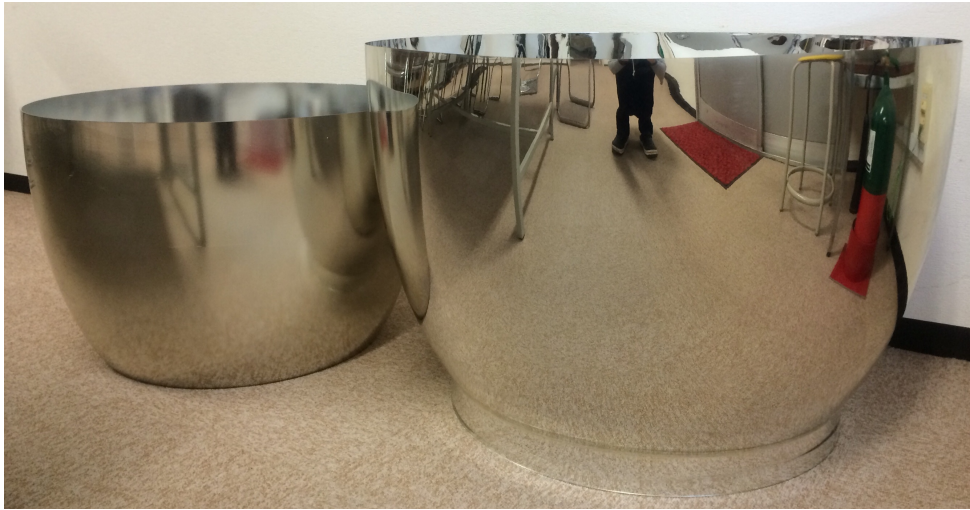


図 4.12: 試作した 17” PMT 用集光ミラー (写真左) および 20” PMT 用集光ミラー (写真右)

なお、試験的にベースコート塗布せずにアルミを蒸着したミラーも作製してみたが、アルミの「のり」が悪く表面が汚れたようになってしまったため、ベースコートは使用する必要があることがわかった。またベースコートを乾燥させる際の温度や乾燥時間の微妙な差によって表面が白くなってしまうたり（「ヤケ」と呼ばれる）、PET 板が変形してしまったりすることがあった。それぞれの場合のミラーの状態を図 4.13 に示す。量産化にあたっては、これらの課題をクリアして安定的な生産ができるようにする必要がある。



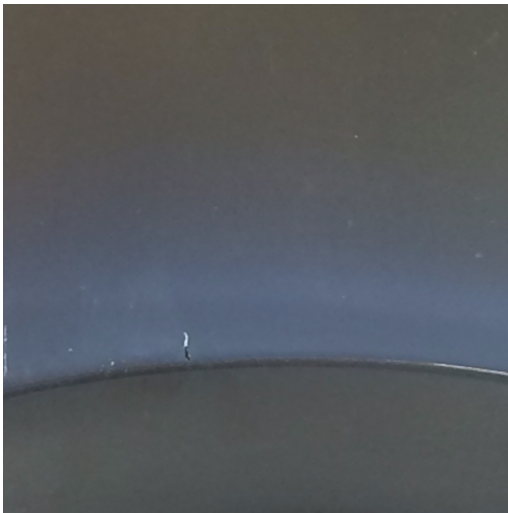
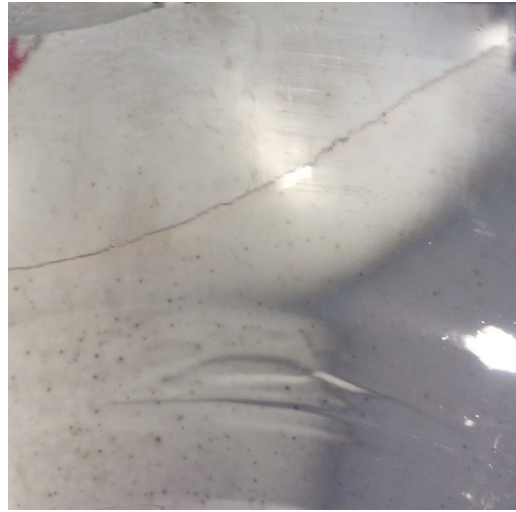


図 4.13: よい表面状態 (左上)、ベースコートなしの表面状態 (右上)、ヤケた状態 (左下)、変形した状態 (右下)

## 4.6 試作品の集光率評価

課題は残るものの、集光ミラーの試作品を作製することができた。そこで試作したミラーを実際にPMTに取り付け、どの程度集光率が向上するかを評価することにした。しかしミラーを取り付けたPMTを格納でき、なおかつ集光する光以外を遮光できるような空間を確保することは容易ではない。そこで技術職員の方々の協力のもと、専用の暗箱を作製した。その図面を図4.14に示す。

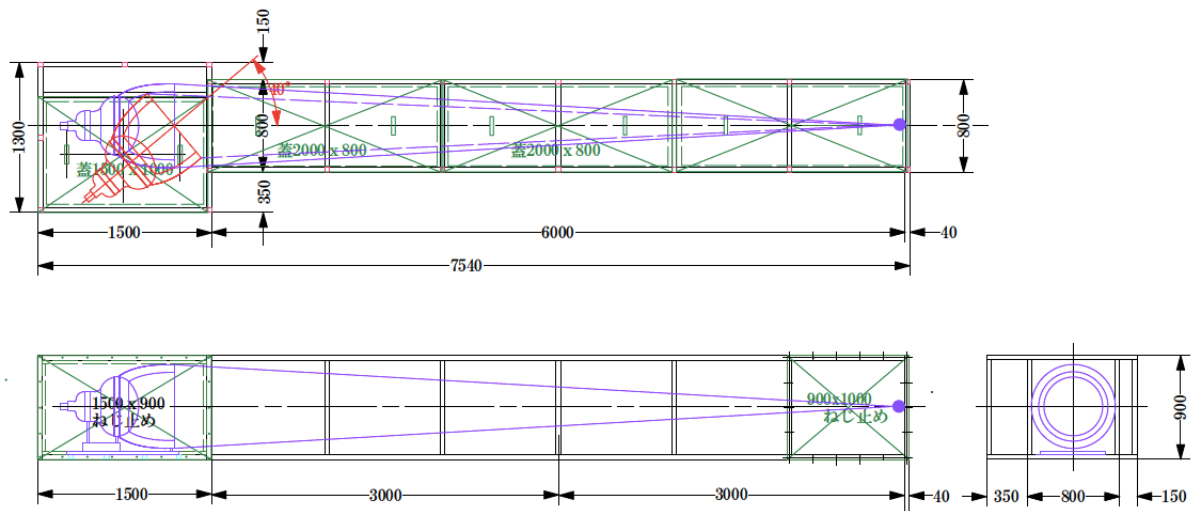


図 4.14: 集光率評価のために作製した暗箱の図面

### 暗箱の特徴

- 左端に17” PMT（あるいは20” PMT）を取り付けるスペースがあり、右端で発生させたシンチレーション光を集光する
- 蓋の裏側には返しがついており、光漏れを防止する設計になっている（ただし若干の光漏れはあるため、実験時には蓋の上におもりを乗せ、さらに遮光カーテンで暗箱全体を覆うことで遮光するようにした）
- ミニバルーン内の発光点と KamLAND に取り付けられた PMT の光電面との距離は6.5m程度であり、暗箱内でその距離をほぼ再現できる
- PMT は0度から40度の範囲内で傾きを調整でき、集光率の角度依存性を評価できるようになっている（KamLAND 内で発生する発光イベントの PMT に対する入射角は計算から40度以下と分かっているので、本研究では0度から40度までの集光率の変化を評価した）

#### 4.6.1 17” PMT 用ミラーの集光率評価

まず、宇宙線ミュオンを用いて17” PMT 用集光ミラーの性能評価を行った。ミラーを取り付けた場合の立体角 ( $\Omega_{w/}$ ) と取り付けていない場合の立体角 ( $\Omega_{w/o}$ ) の比を計算すると

$$\Omega_{w/} = \frac{(29.8\text{cm})^2 \times \pi}{(650\text{cm} - 34.2\text{cm})^2} \quad (4.7)$$

$$\Omega_{w/o} = \frac{(21.8\text{cm})^2 \times \pi}{(650\text{cm})^2} \quad (4.8)$$

$$\frac{\Omega_{w/}}{\Omega_{w/o}} = 2.08 \quad (4.9)$$

ミラーの反射率が一律90%だと仮定すると、ミラーを取り付けることによる実質の立体角の増加は

$$(2.08 - 1.0) \times 0.9 + 1.0 = 1.97 \quad (4.10)$$

従って、ミラーを取り付けることで集光率は1.97倍程度に向上すると予想される。ミラーをPMTに取り付けた様子を図4.15に示す。

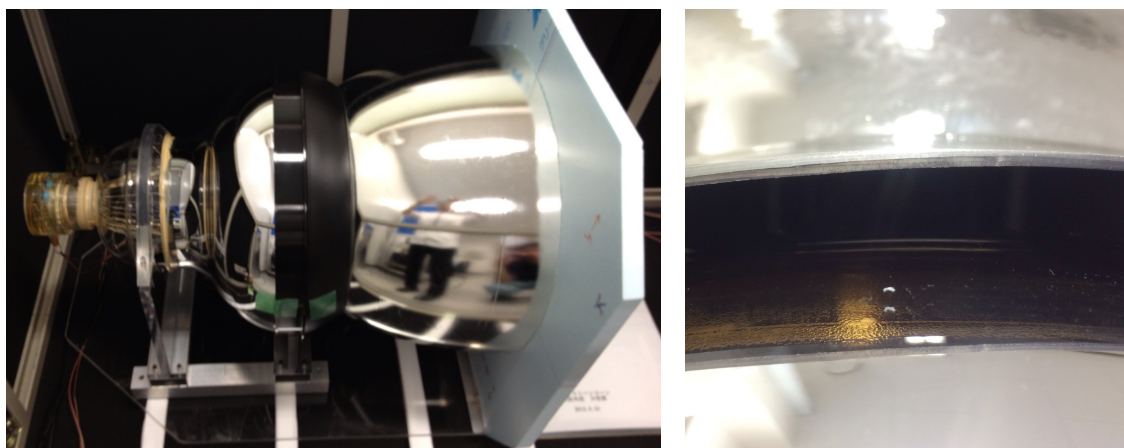


図 4.15: 17” PMT 用集光ミラーを取り付けた様子 (左図)。光電面とミラーとの間に若干の隙間ができる (右図)。

PMTの光電面の大きさには若干の個体差があるため、ミラーの出口半径はその大きさが最大であった場合を考慮して設計されている。そのためものによっては、ミラーを取り付けた場合に図4.15に示したような隙間ができることがある。従って、評価される集光率はその隙間から抜けていく光のロスを含んだものである。また、将来的にはPMTにミラーを取り付けるための固定具を作製する予定だが、今回はその代用としてポリスチレンで作った固定具をミラーにはめることで固定した(図4.15左図の水色のボード)。

以上のような方法でミラーをPMTに取り付け、そのありなしで集光率がどの程度変化するかを検証した。実験のセットアップの概略図を図4.16に、データ収集回路の回路図を図4.17に示す。

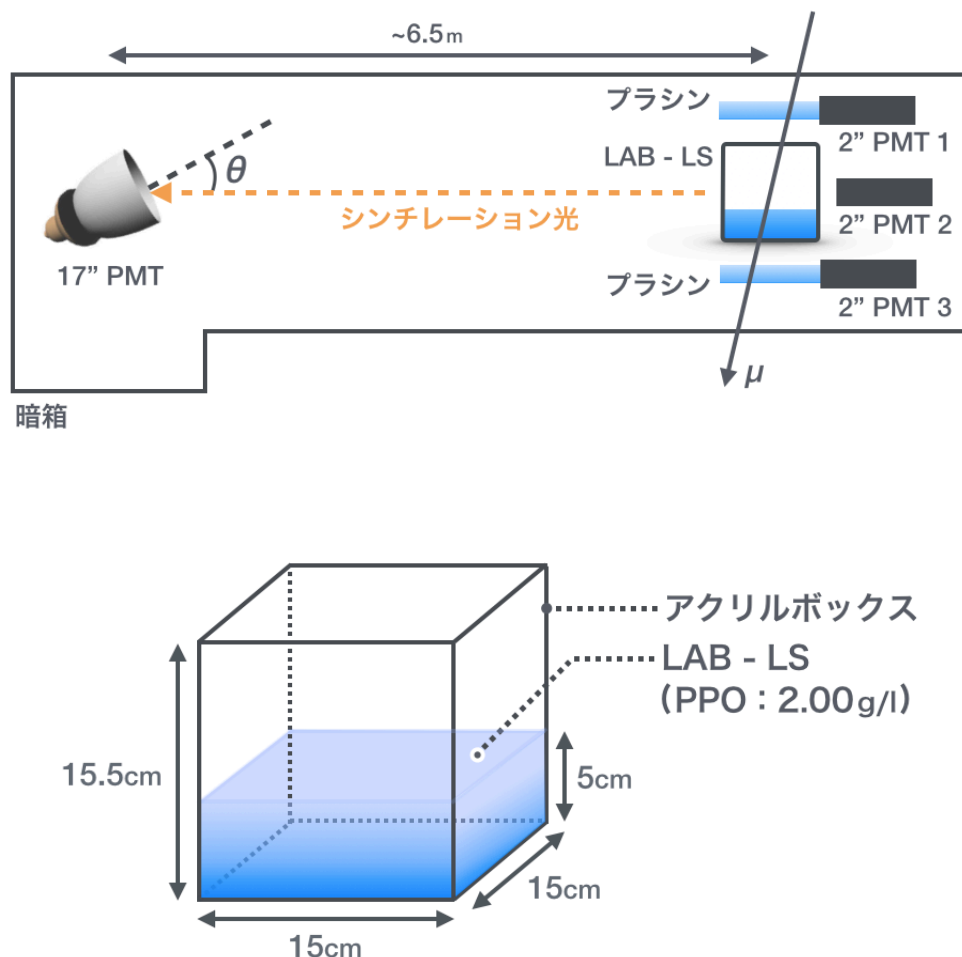


図 4.16: 実験のセットアップの概略図

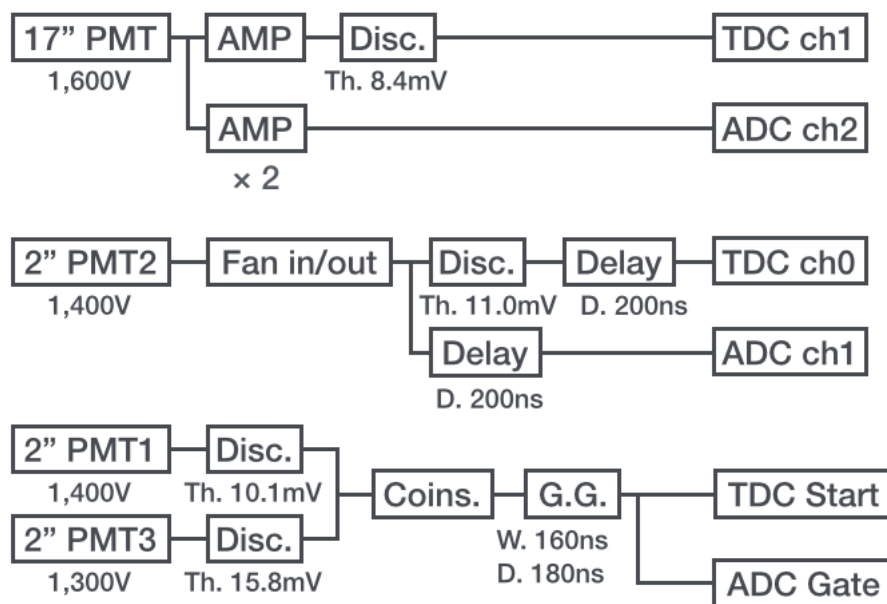


図 4.17: データ収集用回路の回路図

この実験では、LABで作った液体シンチレータ (LAB - LS, PPO : 2.00g/l) の宇宙線ミューオンによる発光イベントを用いて集光率を評価した。ミューオンの平均エネルギーを 3.5GeV、LAB - LS の発光量を現在の KamLAND - LS と同程度 (8,000photon/MeV) だと仮定して期待発光量を計算すると、27photon/event 程度だと予想される。

データ収集では遅延同時計測法を用いた。ミューオンが LAB - LS と上下に配置したプラスチックシンチレータ (プラシン) すべてを貫き、3つの 2" PMT が信号を検出した場合にデータ収集のトリガーが発行される。その後シンチレーション光が 17" PMT に到達した場合には、ADC によって電荷量が、TDC によって到達時間が記録される。到達しなかった場合はオーバーフローデータとして記録される。

収集したデータのうち、2" PMT の ADC 分布と TDC 分布で液体シンチレータの発光を確認する。また 17" PMT の ADC 分布で 1 光電子の確認を行い、TDC 分布で収集したデータが液体シンチレータの発光イベントであるかを確認する。これらのデータを用いて、集光率の解析を行う。以下に解析の方法を示す。

まず、液体シンチレータの発光を 17" PMT で検出する場合に放出される光電子数が Poisson 分布に従うと仮定する。すると、 $n$  個の光電子が放出される確率  $P(n)$  は期待光電子数を  $\lambda$  として

$$P(n) = \frac{\lambda^n}{n!} \exp(-\lambda) \quad (4.11)$$

と書ける。これより、光電子が放出されない確率、すなわち光電子が 0 個放出される確率  $P(0)$  は

$$P(0) = \exp(-\lambda) \quad (4.12)$$

となるので、これを逆に解くと期待光電子数  $\lambda$  は

$$\lambda = -\ln(P(0)) \quad (4.13)$$

で求められる。この  $\lambda$  の比によって集光率を評価する。すなわち、集光率を以下の式で定義する。

$$\text{集光率} = \frac{\text{期待光電子数}\lambda(\text{ミラーあり})}{\text{期待光電子数}\lambda(\text{ミラーなし})} \quad (4.14)$$

以上の議論より、光電子が放出されない確率、すなわち 17" PMT にシンチレーション光がヒットしなかった確率を求めることができれば、期待光電子数  $\lambda$  を計算できることがわかる。従って単純に考えれば、収集したデータのうち 17" PMT 用の TDC がオーバーフローしたデータの割合を求めればよいことになる。

しかしオーバーフローしなかったデータの中には、偶発イベント等によって偶然ストップがかかってしまったものも含まれている。そこでまず、得られたデータヒストグラムから「LAB - LS のシンチレーション光がヒットしたイベント」のみを選択し、ヒット確率を求める。それをを用いてヒットしなかった確率を求め、最終的に期待光電子数  $\lambda$  を計算することにした。実験で得られたデータヒストグラムの一例を図 4.18 に示す。なお、図 4.18 中の TDC 分布は較正曲線を用いて TDC のチャンネルを時間 (ns) に変換してある。また ADC 分布についてはペDESTAL の値を引いたものを示してある。

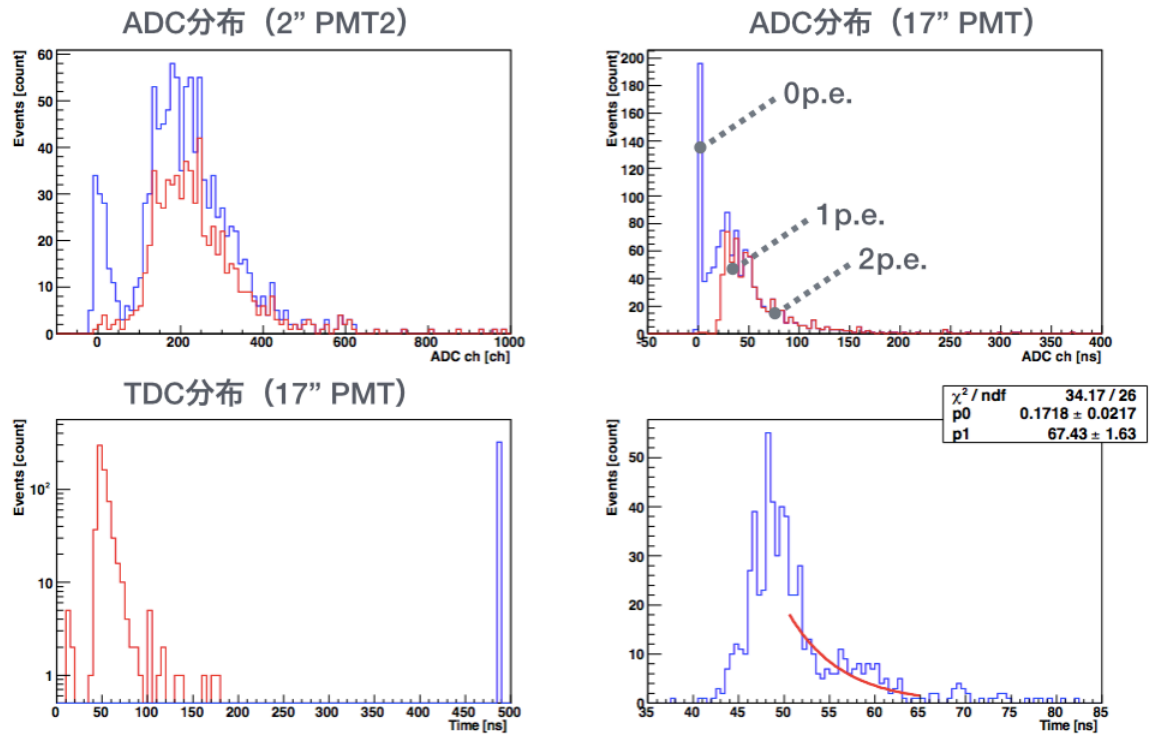


図 4.18: データヒストグラム の例

図 4.18 の右下のヒストグラムは 17" PMT の TDC 分布を 35ns ~ 85ns の範囲で描いたものである。また、ヒストグラム中の赤い曲線はヒストグラムを

$$y = \exp(-p0(x - p1)) \quad (4.15)$$

という関数でフィットした結果である。フィッティングの結果から発光時定数  $\tau$  を求めると

$$\tau = \frac{1}{p0} \doteq 5.8[ns] \quad (4.16)$$

液体シンチレータの発光時定数は 5ns ~ 6ns であるので、このピークは LAB - LS の発光によるものだと考えられる。従って、目的とするデータが取得できていることが確認できた。

条件番号	ヒストグラム	選択条件	コメント
1	2" PMT2 ADC	70 < ADC ch	ミューオンが通過したイベント
2	17" PMT TDC	35ns < TDC ch < 85ns	LAB - LS の発光イベント

表 4.9: イベント選択の条件

以上の結果から、イベント選択の条件を表 4.9 のように設定した。この選択条件を満たすイベントを用いてデータ解析を行う。まず条件 1 を満たしたイベントを、2" PMT2 がミューオンを検出したイベント数  $N$  とする。次に、条件 1 かつ条件 2 を満たしたイベントを、シンチレーション光が 17" PMT にヒットしたイベント数  $n$  とする。これより、17" PMT にシンチレーション光がヒットしなかった確率、すなわち光電子が放出されない確率  $P(0)$  は

$$P(0) = \frac{N - n}{N} \quad (4.17)$$

従って期待光電子数  $\lambda$  は

$$\lambda = -\ln(P(0)) = -\ln\left(\frac{N - n}{N}\right) = \ln\left(\frac{N}{N - n}\right) \quad (4.18)$$

なお、PMT の角度が 40 度でミラーを取り付けていない場合、PMT 側にある暗箱の出っ張り部分 (図 4.14 参照) で光電面の一部が隠れてしまうことがわかった。そこでこの場合には、上記の  $\lambda$  に補正係数をかけて光電面の損失分を補正する必要がある。概算したところロスは約 32%であったので、光電面は全体の約 68%しか見えていないことになる。従って、この時の期待光電子数を  $\lambda$  (w/o mirror, 40deg) とすると、

$$\lambda \text{ (w/o mirror, 40deg)} = \lambda \times \left(\frac{68}{100}\right)^{-1} \quad (4.19)$$

また測定誤差について、 $P(0)$  の誤差  $\delta P(0)$  が二項分布の誤差に従うと考えると

$$\delta P(0) = \frac{\sqrt{N \times P(0) \times (1 - P(0))}}{N} \quad (4.20)$$



なので、 $\lambda$ の誤差 $\delta\lambda$ は

$$\delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\partial\lambda}{\partial P(0)}\right)^2 (\delta P(0))^2} = \sqrt{\frac{1 - P(0)}{N \times P(0)}} \quad (4.21)$$

となる。

以上を踏まえて、17" PMT用ミラーの集光率評価を行った。PMTの角度を0度から40度まで10度刻みで変え、それぞれの角度でミラーを取り付けた場合と取り付けていない場合の $\lambda$ の値を比較した。なお統計をためるため、測定時間は各条件12時間である。立体角とLAB-LSの期待発光量から概算すると、0度の場合で200イベント程度収集できると期待される。評価結果を表4.10に示す。

角度[度]	$\lambda$ (ミラーなし) [p.e.]	$\lambda$ (ミラーあり) [p.e.]	集光率
0	0.42 ± 0.02	0.90 ± 0.04	2.14 ± 0.14
10	0.56 ± 0.03	0.85 ± 0.03	1.52 ± 0.10
20	0.54 ± 0.02	0.82 ± 0.03	1.52 ± 0.08
30	0.49 ± 0.02	0.59 ± 0.03	1.20 ± 0.08
40	0.56 ± 0.02	0.44 ± 0.02	0.79 ± 0.05

表 4.10: 17" PMT用ミラーの集光率評価の結果

結果より、ミラーを取り付けること最大で2.14倍程度集光率が向上することがわかった。PMTが0度の場合の立体角から予測した集光率向上効果が1.97倍程度であったので、この結果は少々高いように思われる。しかし0度の場合には、アルミ面に対して浅い角度で（すなわち、アルミ面と平行に近い角度で）入射する光が多いと考えられる。反射の理論式（付録D参照）から、アルミ面に対して浅い角度で入射する光ほど反射率がよくなることが導かれるので、実験結果は妥当なものだと考えられる。

しかし0度の場合以外の集光率は目標である1.8倍に達していなかった。しかも40度の場合には、ミラーを取り付けたことで集光率が下がるという結果になってしまった。これはミラーによって光電面が隠されてしまったうえ、反射率が悪いことで光がほとんど集光されなかったためだと考えられる。

40度の場合以外で集光率が目標値を下回った原因はいくつか考えられるが、寄与の大きなものとして乱反射と蒸着ムラが挙げられる。17" PMT用のミラーは木

型を使って成型したため、表面にその木目が写ってしまった。その凹凸が原因で入射した光が乱反射し、うまく光電面に入らなかった可能性がある。また、ミラーが曲面形状をしているためアルミを一様に蒸着するのが難しく、どうしても蒸着ムラができてしまう。そのため、アルミの「のり」が悪い部分に入射した光がミラーを透過してしまい、光電面に入らなかったことが考えられる。

以上の結果を受け、新たに作製した金属型を用いて20” PMT用のミラーを作製した。その集光率評価の結果を次節で述べる。

#### 4.6.2 20” PMT用ミラーの集光率評価

作製した20” PMT用のミラーとそれをPMTに取り付けた様子を図4.19に示す。金属型にしたことでミラーの表面状態が格段によくなった。加えて蒸着条件を改善したことで、アルミの蒸着ムラも抑えられている。なお、写真ではわかりにくいですが、20” PMT用のミラーも光電面との間には隙間ができています。

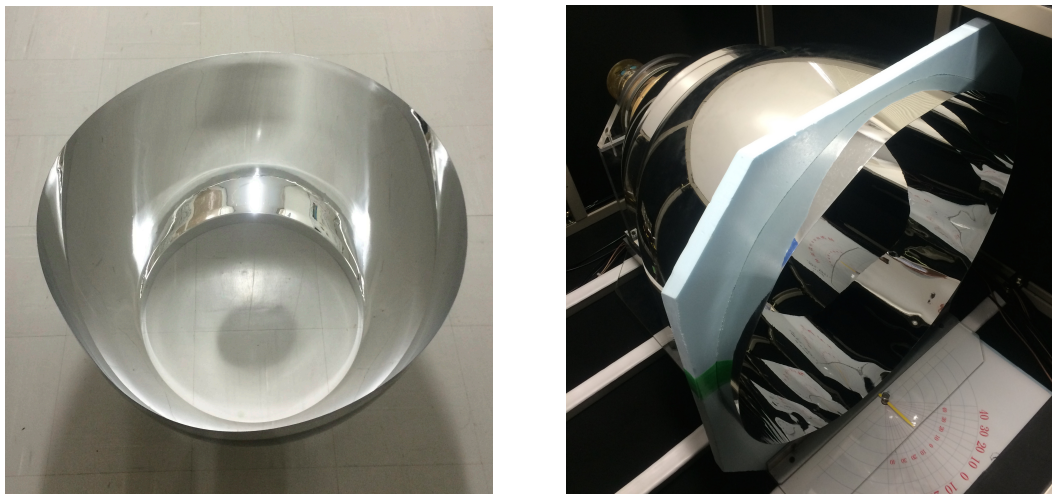


図 4.19: 20” PMT用ミラー（左図）と取り付けた様子（右図）。17” PMTのマスクを外し、20” PMTとして使用している。

17” PMT用のミラーと同じく、ミラーのありなしで集光量がどの程度変化するかを検証し、ミラーの集光率向上効果を評価した。先と同様に立体角の比を計算すると、

$$\Omega_{w/} = \frac{(36.2\text{cm})^2 \times \pi}{(650\text{cm} - 41.9\text{cm})^2} \quad (4.22)$$

$$\Omega_{w/o} = \frac{(25.4\text{cm})^2 \times \pi}{(650\text{cm})^2} \quad (4.23)$$

$$\frac{\Omega_{w/}}{\Omega_{w/o}} = 2.32 \quad (4.24)$$

ミラーの反射率が一律 90%だと仮定すると、ミラーを取り付けることによる実質の立体角の増加は

$$(2.32 - 1.0) \times 0.9 + 1.0 = 2.19 \quad (4.25)$$

従って、ミラーを取り付けることで集光率は 2.19 倍程度に向上すると予想される。

20" PMT 用のミラーは全部で 27 個試作したが、その中にはヤケたものや変形したものなど不良品も含まれている。従って、それらを除いた 16 個を選択し評価を行うことにした。ただし、先の実験と同様に宇宙線ミュオンを用いては途方もない時間がかかるので、この実験では窒素レーザーを用いることにした。そのためのセットアップを図 4.20 に、データ収集用の回路図を図 4.21 に示す。

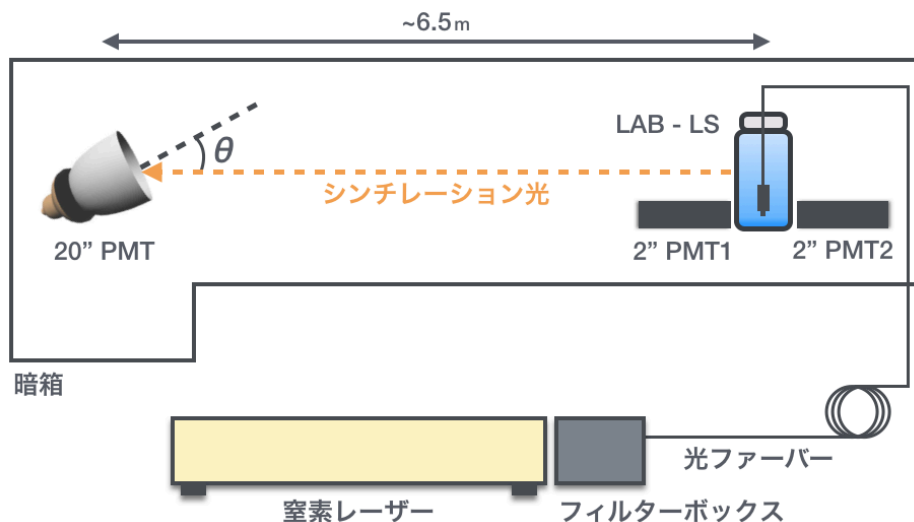
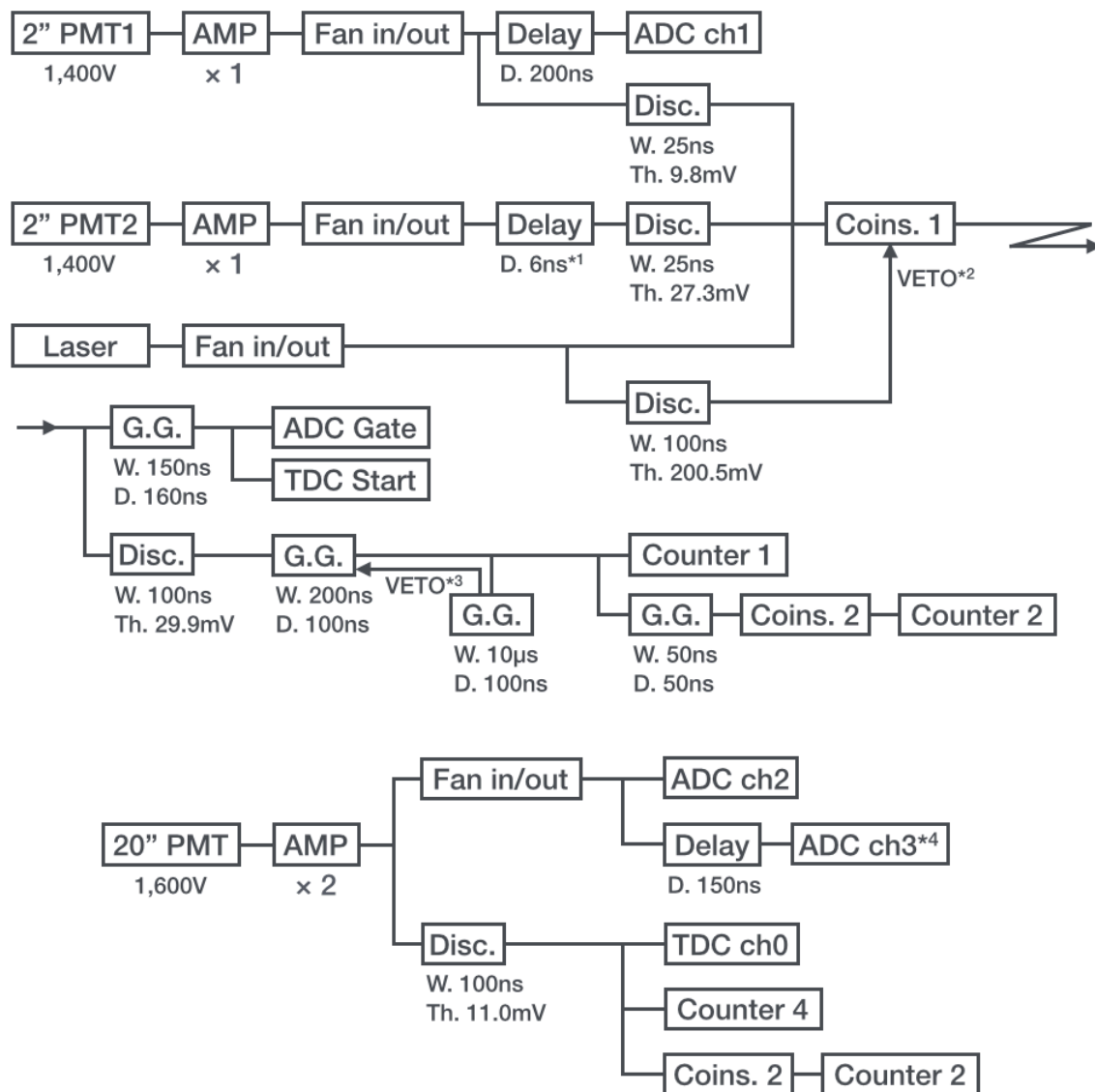


図 4.20: 実験のセットアップの概略図。使用機材の詳細情報は付録 G.3 を参照。



- \*1 : 常に2" PMT2の信号でコインシデンスを取るため
- \*2 : レーザーによるノイズを除去するため
- \*3 : セカンドパルスを除去するため
- \*4 : "event by event"によってペDESTALを引くため

図 4.21: データ収集用の回路図

ミューオンの代わりに LAB - LS にレーザー光を打ち込んで発光させ、その光を集光するように実験装置を改良した。窒素レーザーは暗箱の外に設置されており、光ファイバーを用いて LAB - LS まで導いている。ただし、レーザー光をそのまま打ち込むと光量が多すぎてすべてのイベントが 20" PMT にヒットしてしまうので、フィルターボックスの中に設置したカメラ用の減光フィルター（ND フィルター）で最適な光量に調整してある。二項分布の誤差は確率が 0.5 の時に最小となるので、なるべく統計誤差を減らすために、ミラーを取り付けた場合に 20" PMT に光子がヒットする確率が 0.5 程度になるように ND フィルターの枚数を調整した。なお、レーザーを用いることで得られるメリットには次の 3 つがある。

1. 測定時間が大幅に短縮される
2. 宇宙線ミューオンを使う場合よりも LAB - LS の発光量が安定する
3. レーザーの光量の時間変動を補正することができる

メリット 1 について、レーザーの発振周波数を調整することで、短時間で高統計のデータを得ることができる。今回は約 10Hz でレーザーを発振するように調整した。またメリット 2 について、レーザーはエネルギーが決まっているので、エネルギーがまちまちな宇宙線ミューオンを使う場合より LAB - LS の発光量が安定する。さらにメリット 3 について、2" PMT の ADC 値をモニターすることでレーザーの光量の時間的なゆらぎを補正し、測定条件をそろえることが可能である（レーザー出力の時間安定性については付録 G.3 に示してある）。それを保証するために、ND フィルターの枚数を変えてレーザーの光量と期待光電子数  $\lambda$  との関係調べた。使用した ND フィルターの組み合わせを表 4.11 に、測定結果を図 4.22 に示す。

データ点	ND2[枚]	ND4[枚]	ND8[枚]	光量
1	1	2	4	2
2	2	2	4	1
3	3	2	4	1/2
4	2	3	4	1/4

表 4.11: ND フィルターの組み合わせ

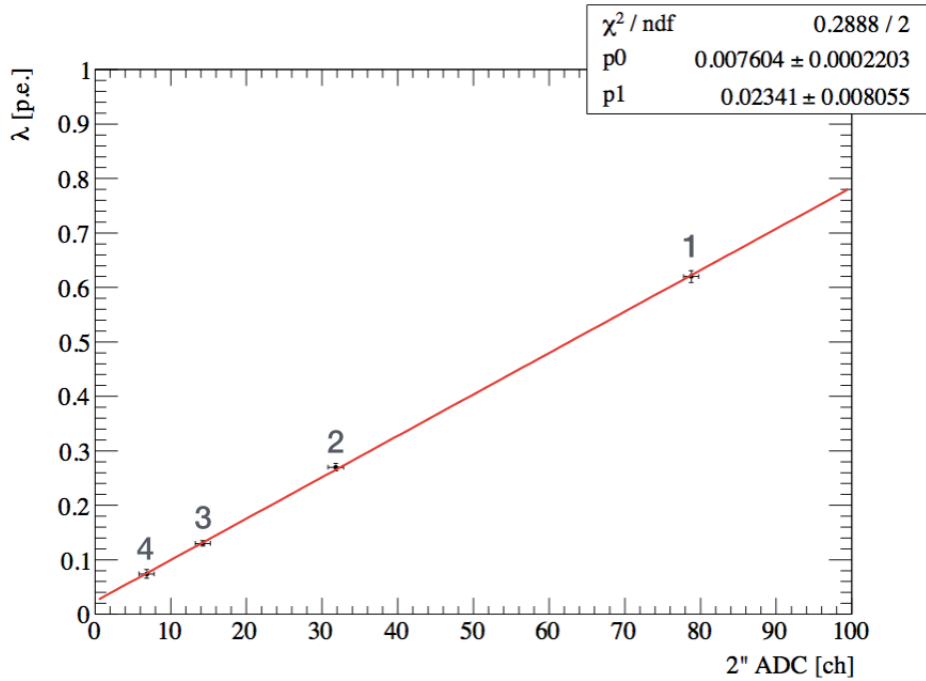


図 4.22: 2" PMT と 20" PMT との関係

なお、 $NDx$ とは透過後に光量が $1/x$ になるフィルターのことである。また、データ点2の時のレーザーの光量を1としている。

図4.22について、横軸がレーザーの光量（に対応する2" PMTのADC値）、縦軸が期待光電子数 $\lambda$ である。フィルターを調整してレーザーの光量を変化させると、それに伴って $\lambda$ が直線的に変化していることがわかる。これより、基準となるレーザー光量のADC値を $mean_0$ 、得られたADC値を $mean$ 、期待光電子数を $\lambda$ とすると、レーザーの光量補正をかけた期待光電子数 $\lambda_{comp}$ は

$$\lambda_{comp} = \lambda \times \left( \frac{mean}{mean_0} \right)^{-1} \quad (4.26)$$

となる。ただし図4.22のフィット結果を見ると、本来ならば原点を通る直線に若干のオフセットがついていることがわかる。このオフセット(0.02)は $\lambda$ の誤差として付加される。すなわち $\lambda$ には、先の実験で考えた二項分布の誤差とこのオフセットの2つの誤差をつける。

さらに、PMTの角度が40度でミラーを取り付けていない場合には、先と同様に光電面のロスの補正を行う。この時の期待光電子数を  $\lambda_{comp}(w/o \text{ mirror}, 40deg)$  とすると

$$\lambda_{comp}(w/o \text{ mirror}, 40deg) = \lambda \times \left( \frac{mean}{mean_0} \right)^{-1} \times \left( \frac{68}{100} \right)^{-1} \quad (4.27)$$

今回の測定ではPMTの角度が0度でミラーを取り付けていない場合のレーザーの光量を  $mean_0$  とし、それを基準に光量補正を行った。

以上の補正と合わせて、先の実験と同様にイベント選択を行う。得られたヒストグラムを一例を図4.23に示す。図4.18と同様TDC分布は較正曲線を用いてTDCのチャンネルを時間 (ns) に変換してある。またADC分布はペDESTALの値を引いたものである。

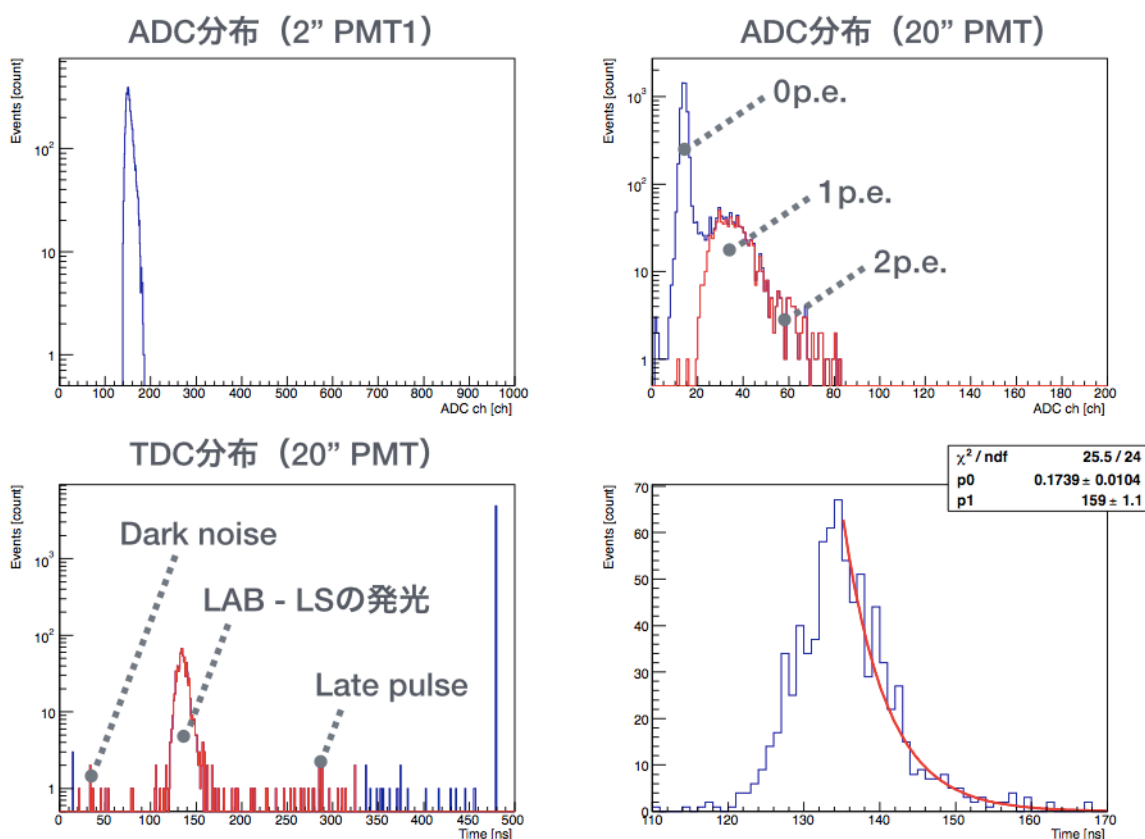


図 4.23: データヒストグラムの例

図 4.23 の右下のヒストグラムは 20” PMT の TDC 分布を 110ns ~ 170ns の範囲で描いたものである。先の実験と同様にこのヒストグラムを

$$y = \exp(-p_0(x - p_1)) \quad (4.28)$$

という関数でフィットして発光時定数  $\tau$  を求めると

$$\tau = \frac{1}{p_0} \doteq 5.8[ns] \quad (4.29)$$

これより、LAB - LS の発光イベントのデータを取得できていることが確認できた。また 2” PMT1 の ADC 分布から、測定時間内でレーザーの光量が安定していることも合わせて確認できた。

以上の結果から設定したデータの選択条件および  $\lambda$  の補正条件を表 4.12 に示す。

条件タイプ	ヒストグラム	条件	備考
イベント選択	20” PMT ADC	20 < ADC ch	-
イベント選択	20” PMT TDC	110ns < TDC ch < 170ns	-
補正	-	$\times(\text{mean}/\text{mean}_0)^{-1}$	レーザーの光量補正
補正	-	$\times(68/100)^{-1}$	40 度, ミラーなしのみ

表 4.12: イベント選択と補正の条件

データ解析の方法は先の実験と同様である。2” PTM が検出したイベント数を  $N$ 、20” PMT にシンチレーション光がヒットしたイベントで、上記の条件を満たしたものの数を  $n$  とすると

$$\lambda = -\ln(P(0)) = -\ln\left(\frac{N-n}{N}\right) = \ln\left(\frac{N}{N-n}\right) \quad (4.30)$$

この方法で求めた  $\lambda$  に補正をかけて  $\lambda_{comp}$  を求める。その後ミラーのありなしで  $\lambda_{comp}$  の比を取り、集光率を評価する。なお今回はレーザー発振の予告信号をロジック回路に組み込んでおり、2” PMT の ADC は純粋にレーザーの発光のみを記録しているため、それに対するイベント選択は行っていない。評価した 16 個のうちで最も集光率が高かった試作品（試作品番号 17 番）の評価結果を表 4.13 に示す（付録 E に評価した全 16 個の試作品の評価結果を載せてある）。



角度[度]	$\lambda$ (ミラーなし) [p.e.]	$\lambda$ (ミラーあり) [p.e.]	集光率
0	$0.29 \pm 0.02$	$0.61 \pm 0.04$	$2.10 \pm 0.20$
10	$0.30 \pm 0.02$	$0.75 \pm 0.05$	$2.50 \pm 0.24$
20	$0.32 \pm 0.02$	$0.78 \pm 0.04$	$2.44 \pm 0.20$
30	$0.28 \pm 0.02$	$0.73 \pm 0.04$	$2.61 \pm 0.23$
40	$0.32 \pm 0.02$	$0.59 \pm 0.04$	$1.84 \pm 0.17$

表 4.13: 20” PMT 用ミラーの集光率評価の結果 (試作品番号 17 番)

17” PMT 用のミラーと違い、すべての角度で目標値 1.8 倍を上回っている。また 0 度の場合の結果は立体角から予想される値 (2.19 倍) と誤差の範囲内でよく一致しているため、実験の妥当性も示された。さらに、二重ベータ崩壊のイベントは KamLAND の中心付近で起こるため、PMT に対する入射角は 10 度以下である。それを考慮すると、二重ベータ崩壊のイベントに対する集光率はミラーを取り付けることで 2 倍以上になることがわかった。

ただし上記の結果は最良のものであり、他の試作品については 1.8 倍を下回るものもあった。評価した全 16 個の試作品について、PMT が 0 度と 10 度の場合の集光率を示したヒストグラムを図 4.24 に示す。

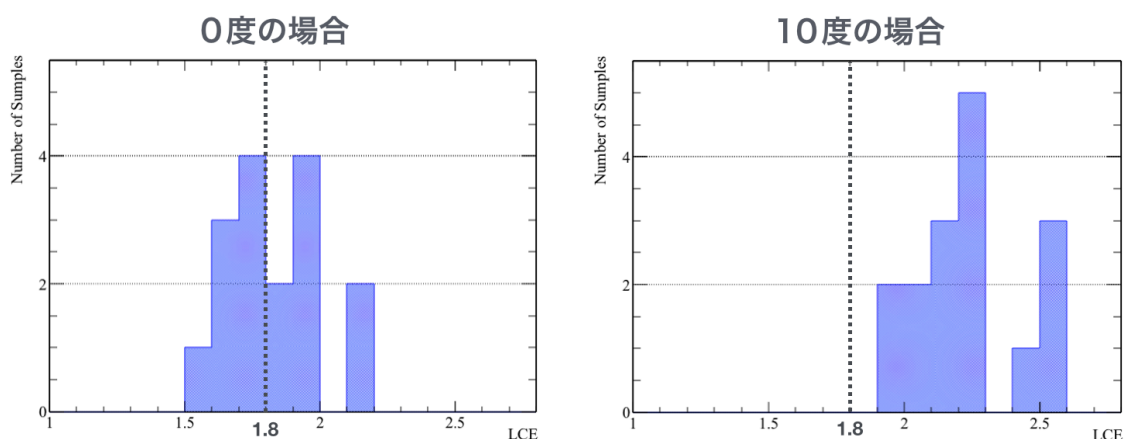


図 4.24: 0 度の場合 (左図) と 10 度の場合 (右図) の集光率。縦軸がサンプル数、横軸が集光率を表す。LCE は集光率 (Light Collecting Efficiency) の略記。

0度の場合、目標値を上回ったものは評価した試作品のうちの半分だったが、10度の場合は全ての試作品で目標値を上回っていることがわかった。

この結果を用いて、作製したミラーの集光率のばらつきを定量的に評価した。その参考として、PMTの量子効率のばらつきに着目した。図2.6より、PMTの量子効率には15%程度のばらつきがあることがわかる。これが光電面の蒸着状態によるものだと仮定すると、曲面への蒸着精度にはこの程度のばらつきがあるものと思われる。測定した集光率のばらつきはアルミ蒸着の精度によるところが大きいと考えられるので、同程度のばらつきは許容範囲内であると考えことにした。0度の場合と10度の場合の評価結果を表4.14に示す。

評価項目	0度	10度
平均値 $m$	1.82	2.21
標準偏差 $\sigma$	0.15	0.20
$m \pm 15\%$	$1.55 \leq \text{LCE} \leq 2.10$	$1.87 \leq \text{LCE} \leq 2.54$
$m \pm 2\sigma$	$1.52 \leq \text{LCE} \leq 2.12$	$1.81 \leq \text{LCE} \leq 2.60$

表 4.14: 0度と10度の場合の集光率のばらつき評価

測定結果から、いずれの場合も評価したすべてのサンプルが許容範囲内にあることが確認された。また、すべての結果が $\pm 2\sigma$ の範囲内にあるので、平均値からのばらつきもそれほど大きくはない。従って、蒸着精度は許容範囲内で安定していることが確かめられた。

ただしこれは、ヤケたものや変形したものなど、不良品を評価対象から除いて得られた結果である。そのためにより結果になったとも言えるが、逆に言えば目視確認によってある程度不良品が判別できるということである。これは量産化するにあたってのアドバンテージとなる。

以上の結果から、PMTにミラーを取り付けることで目標とする集光率の向上効果が見込めることがわかった。

なお表 4.13 の結果について、もう一つ特筆すべきことがある。PMT の角度が 10 度から 30 度の場合の集光率が、0 度の場合の集光率よりもよくなっているということである。17” PMT 用のミラーでは見られなかった傾向であり、物理的に自明なものでもない。そこで、この傾向が試作品番号 17 番に特有のものなのか一般的なものなのかを確認するために、評価した全 16 個のサンプルについて、PMT の角度と集光率との関係をプロットしてみた。その結果が図 4.25 である。

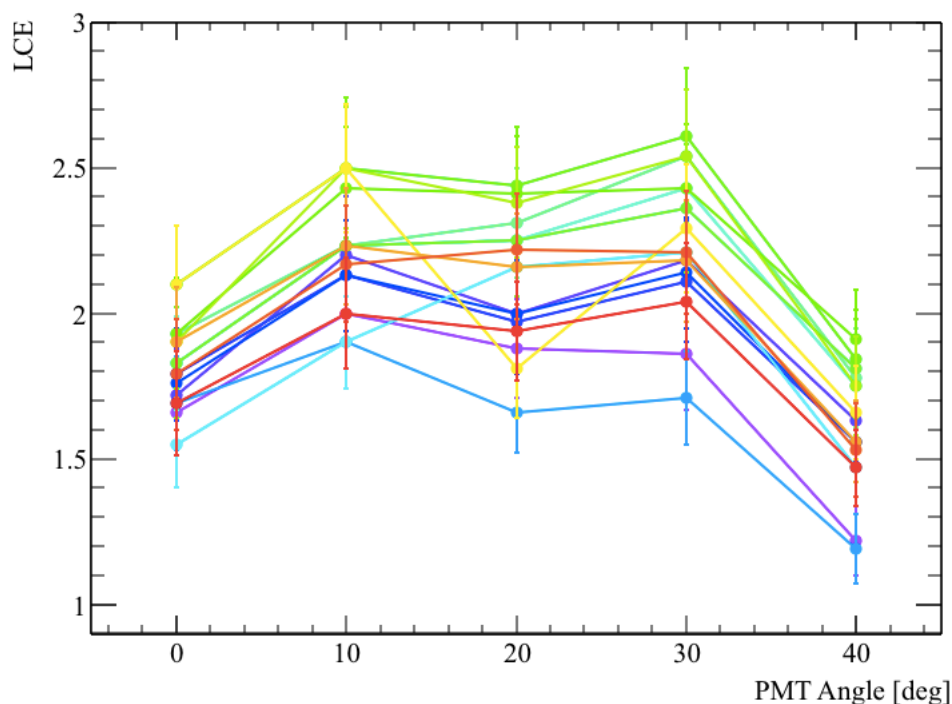


図 4.25: PMT の角度と集光率との関係

集光率の値にばらつきはあるものの、ほとんどの試作品で 0 度の場合の集光率よりも 10 度から 30 度の場合の集光率が高くなる傾向があることがわかった。これより、この傾向はミラーによるものではなく、PMT の特性によるものである可能性が示唆される。詳しくは次章で述べるが、PMT の出力には位置依存性および角度依存性があることがわかっている。ミラーを取り付けたことでその効果が顕著になり、上記のような結果が得られたものと推測される。なお、17” PMT 用のミラーでこの傾向が見られなかったのは、統計が少なかったことに加えて光の入射位置や入射角度が 20” PMT 用のものと異なるためだと考えられる。

### 4.6.3 変形したミラーの集光率評価

PMTにミラーを取り付けることで、目標とする集光率の向上効果が見込めることを前節で述べた。しかし4.4節で述べた通り、KamLAND内にミラーを取り付けた場合には隣のミラーとの干渉で形が変形する可能性がある。その場合でも変形前の集光率を維持できなければ、ミラーを取り付ける意味がなくなってしまう。そこで、それを検証するために意図的にミラーを変形させ、集光率の変化を評価した。ミラーを変形させるために用いた枠と変形後のミラーの様子を図4.26に示す。

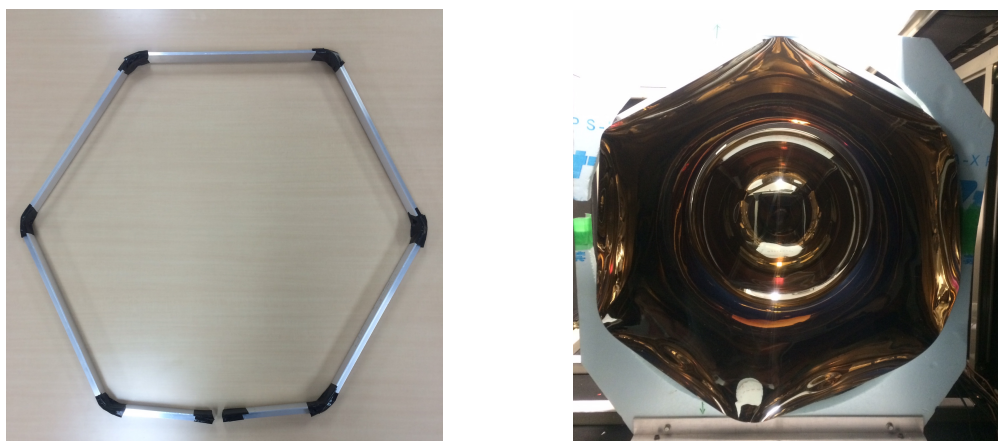


図 4.26: ミラー変形用の枠（左図）と変形後のミラーの形状（右図）。枠をミラーにはめて締め付けることで形を変形させている。

実験のセットアップおよび実験条件は4.6.2節で述べた窒素レーザーを使うものと同様である。評価には先の実験で使わなかった20” PMT用ミラー3つを用いた。そのうちの1つ（試作品番号8番）の結果を表4.15および図4.27に示す。

角度[度]	集光率（変形前）	集光率（変形後）
0	$1.64 \pm 0.10$	$1.57 \pm 0.10$
10	$2.00 \pm 0.12$	$1.95 \pm 0.12$
20	$1.97 \pm 0.11$	$2.21 \pm 0.12$
30	$1.95 \pm 0.12$	$2.10 \pm 0.12$
40	$1.32 \pm 0.06$	$1.26 \pm 0.05$

表 4.15: 変形したミラーの集光率評価の結果（試作品番号8番）

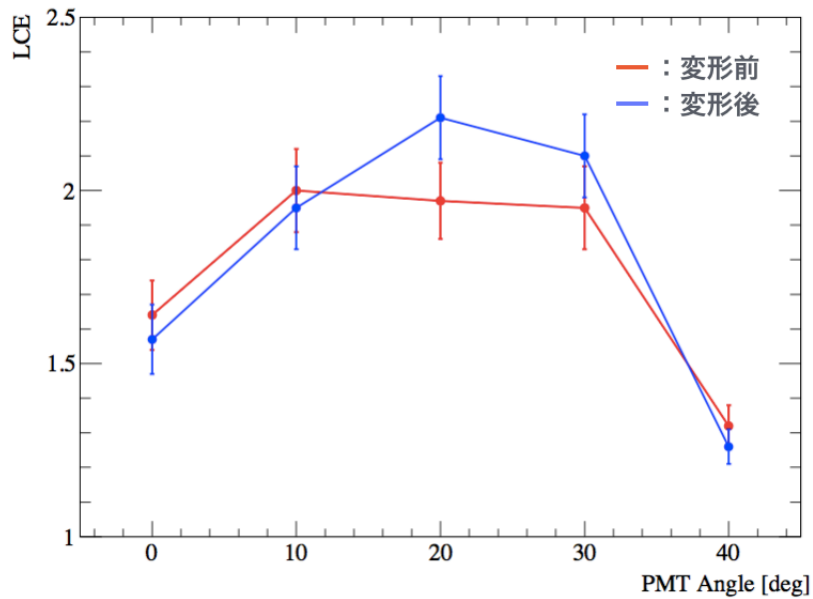


図 4.27: 変形したミラーの集光率評価の結果 (試作品番号 8 番)

PMT の角度が 20 度の場合に若干のズレがあるものの、それ以外の場合の集光率は誤差の範囲内でほぼ一致していることがわかった。集光率がほとんど変化しないという傾向は他の 2 つの試作品でも同様であった。また、変形した場合の方が集光率がよくなることがあったが、これは反射の仕方が変わったために光電面への入射位置や入射角度が変わり、PMT の出力特性が効いたためだと考えられる。

以上の検証から、ミラーの変形は集光率にさほど影響を及ぼさないことがわかった。すなわち、KamLAND 内に取り付けたミラーが互いに干渉して変形してしまったとしても、目標とする集光効果が得られることが確認できた。

## 4.7 まとめ

この章では、KamLAND用集光ミラーの開発にあたって必要な基礎研究の結果について述べた。素材選定のための各種測定から、PETにアルミを蒸着したものがミラーの素材として使用可能であることを示した。また集光率評価の結果から、集光ミラーを導入することで集光率の向上が見込めるという結論に至った。実際にKamLANDに導入するにあたって今後対応すべき課題点を以下に列挙する。

- ミラーの表面状態の改善（型磨き・コンタミの低減）
- アルミの化学的発光の有無の検証
- ミラーが変形した場合の乱反射の影響検証
- 光電面とミラーとの隙間からの集光ロス低減（ミラーデザインの再検討）
- ミラーを取り付けるための固定具の検討
- 空気穴のデザイン検討

上記の課題を解決できれば、KamLAND内に集光ミラーを導入するための準備が整う。その後は量産のための製造計画や保管場所の確保・運搬方法の検討などを行うことが必要となる。

# 第5章 集光シミュレーション

## 5.1 研究目的

集光率評価の実験結果から、集光ミラーの導入によって集光率の向上が期待できることがわかった。しかし先の評価結果だけでは、実際に KamLAND 内にミラーを導入するには不十分である。今回の評価は空気中で行ったのに対し、KamLAND で使用する際にはミラーを液体シンチレータ中に沈めることになる。また、ミラー同士が干渉した際の変形のしかたはまちまちであり、均一に変形するわけではない。従って、これらの影響に対する評価も十分に行うべきである。

だが、実験室で上記のような評価を行うことは容易ではない。実験によって評価するとなると、非常に広いスペースと大量の液体シンチレータが必要となる。またその空間を完全に遮光せねばならない。これは現実的に不可能である。

そこで、シミュレーションによって上記の影響を評価することを考えた。まずは先の実験結果を再現できるようシミュレーションツールの最適化を行い、そのツールを用いて様々な評価を行うことにした。そのために、ROBAST という集光シミュレーション用のツールを導入した。

## 5.2 シミュレーションツール ROBAST

ROBAST は奥村暁氏によって開発された光線追跡用のシミュレーションツールである。ROBAST という名称は ROot - BAsed Simulation for ray Tracing の略称であり、その名の通り ROOT<sup>\*1</sup> をベースにしたプログラムである。ROOT のジオメトリライブラリを利用して様々なジオメトリを構築し、光線追跡に利用することができる。また、ROBAST では Non - sequential Ray Tracing という方法を採用しており、Geant4 や ZEMAX のようにユーザーが反射条件等を詳細に指定する必要がない。そのため、複数回の反射が起こるような複雑な光学系でも容易に構

<sup>\*1</sup>高エネルギー物理学のデータ処理やデータ解析を主な目的として、欧州原子核研究機構 (CERN) によって開発されているソフトウェア・ライブラリ群。

築することができる。さらに ROBAST にはウインストンコーンを設計するためのクラスがあらかじめ用意されているため、目的とするシミュレーションを行うには好都合である。

以上のような理由により、ROBAST を用いて集光シミュレーションを行うことにした。ROBAST で設計した集光ミラーのジオメトリと光線追跡の様子を図 5.1 に示す。

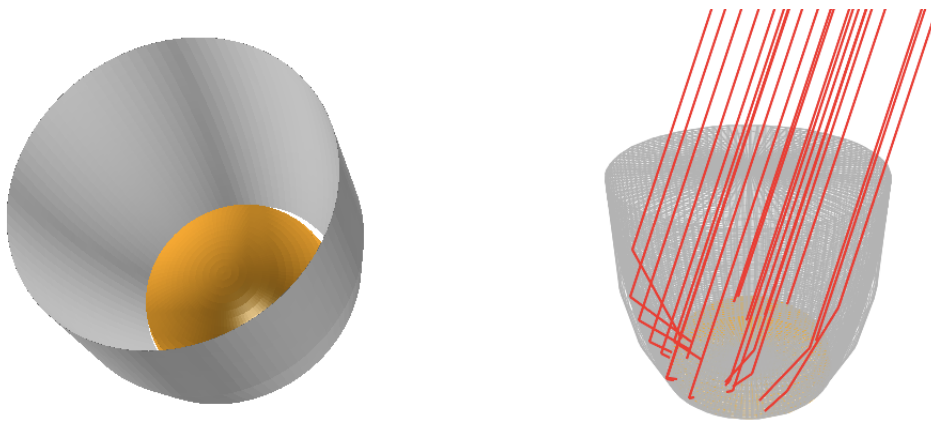


図 5.1: 集光ミラーのジオメトリ（左図）と光線追跡の様子（右図）

## 5.3 集光シミュレーション

### 5.3.1 光学系の設計

はじめに、ROBAST で使用可能なジオメトリライブラリを用いて集光ミラーおよび PMT の光電面を設計した。設計思想は以下の通りである。

#### 集光ミラー

ROBAST には、ウインストンコーンの設計に適したクラスがあらかじめ用意されているので、それを用いてジオメトリを構築する。具体的な設計手順を図 5.2 に示す（図は 20" PMT 用集光ミラーの場合）。



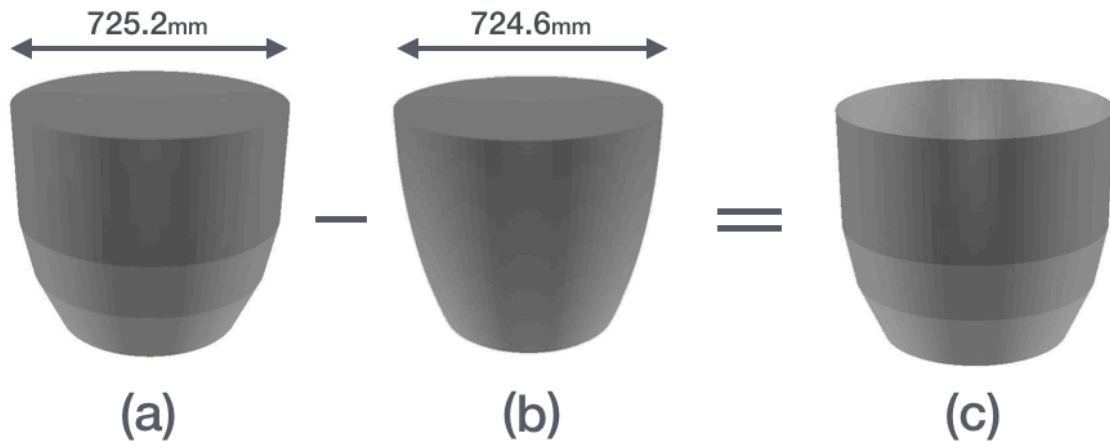


図 5.2: 集光ミラー設計の手順

まず、AGeoWinstonCone2D というクラスを用いて、4つの節を持つ中身の詰まった円錐台を作成する（図 5.2 (a)）。次に、AGeoWinstonConePoly というクラスを用いて、同じく中身の詰まった節のない円錐台を作成する（図 5.2 (b)）。この円錐台の外側の曲面がウィンストンコーンの曲面となっている。最後に、先ほど作った (a) から (b) を引くことによって、目当ての集光ミラーを設計する（図 5.2 (c)）。

### PMT の光電面

PMT の光電面は単純な球面ではなく、曲率半径の異なる 2つの曲面が組み合わさった形をしている。具体的には、R315 の球面と R150 のドーナツ状の曲面が合わさったような形である。例として 17" PMT の仕様書を図 5.3 に示す。

シミュレーションで重要なのは PMT の光電面なので、ジオメトリの設計はその部分のみ行った。また簡単のためにドーナツ状の曲面部分は球の一部で近似し、曲率半径の異なる 2つの球を組み合わせて光電面を設計した。具体的な設計手順を図 5.4 に示す。

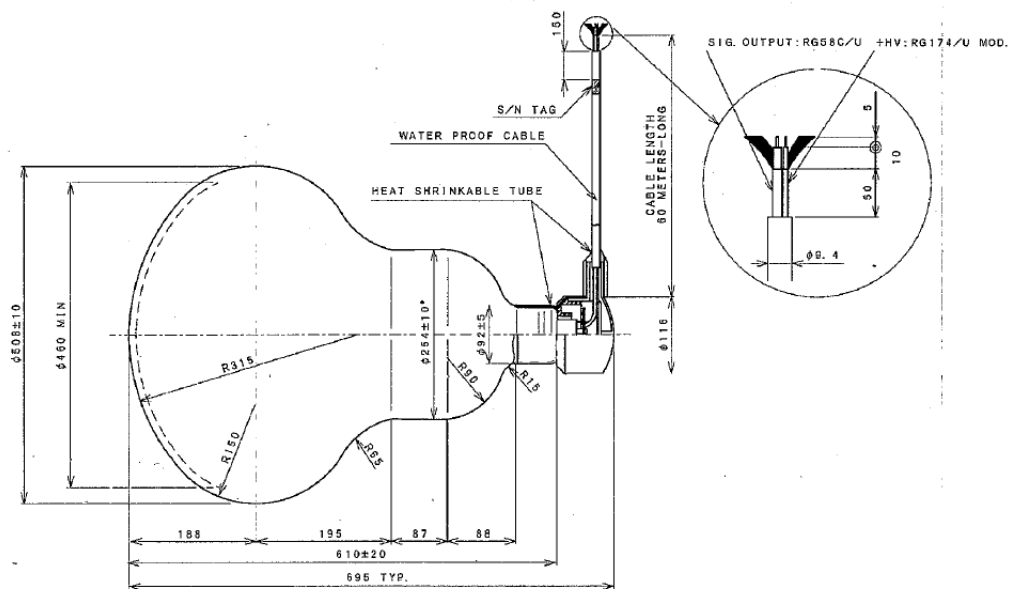


図 5.3: 17" PMT の仕様書

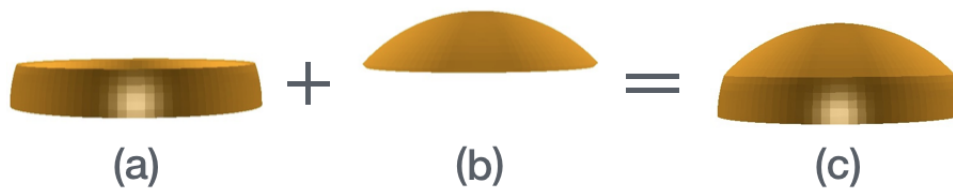


図 5.4: PMT の光電面設計の手順

## 光学系

集光率評価の実験を再現するよう、光電面から 6.5m 離れた点から等方的に光子を放射する。しかし今は 1つの PMT しか考えていないので、等方的に光子を放射しても大半は光電面にヒットせず、処理時間が無駄になる。そこで今回はシミュレーション時間の短縮のために、PMT のある範囲に円錐状に光子を放射することで近似した。また実験では PMT の角度を変えて集光率の変化を測定したが、シミュレーションでは設計の容易さから、光子の放射位置を変えることでこれを再現した。さらに、ミラーを PMT に取り付けた際にできた隙間を考慮して、ミラーの位置調整を行った。設計した光学系のセットアップおよびミラーを PMT に取り付けた様子を図 5.5 に示す。

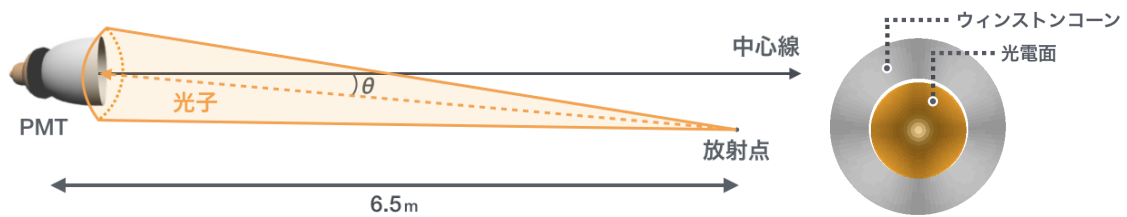


図 5.5: 光学系のセットアップ (左図) およびミラー設置図 (右図)

### 5.3.2 集光率の評価方法

集光率は、ミラーを取り付けた時に光電面にヒットした光子の数と、取り付けていない時に光電面にヒットした光子の数の比を取ることによって評価する。すなわち、集光率を次式で定義する。

$$\text{集光率} = \frac{\text{光電面にヒットした光子の数 (ミラーあり)}}{\text{光電面にヒットした光子の数 (ミラーなし)}} \quad (5.1)$$

ROBAST には、受光面を定義するための AFocalSurface というクラスが用意されている。先ほど設計した PMT の光電面はこのクラスで定義されており、光電面にヒットした光子数をカウントできるようになっている。また、光電面のどの位置にヒットしたかという位置情報を取得することも可能である。これらの機能を利用して、集光率の計算および光子のヒット分布の作成ができるようにした。

### 5.3.3 シミュレーション結果

シミュレーションで設定した各種条件を表 5.1 にまとめた。

設定項目	設定内容
ミラー	20" PMT 用集光ミラー
発光波長	375nm
ミラーの反射率	90%
放射光子数	100,000 光子
放射範囲	高さ 6.5m・底面半径 35cm の円錐状
放射角度 (図 5.5 の $\theta$ )	0, 10, 20, 30, 40, 50 度

表 5.1: シミュレーション条件

シミュレーション結果と集光率評価の実験結果を比較するために、今回は実験データの豊富な 20" PMT 用のミラーを用いた。またミラーの反射率は、4.4.1 節で行った空気中での反射率測定の結果を受けて 90% に設定した。

この条件でシミュレーションを行って得られた集光率の計算結果を図 5.6 に示す。また、光子のヒット分布を図 5.7 に、全ヒットイベントに対する PMT 各部の寄与をヒストグラム化したものを図 5.8 に示す。

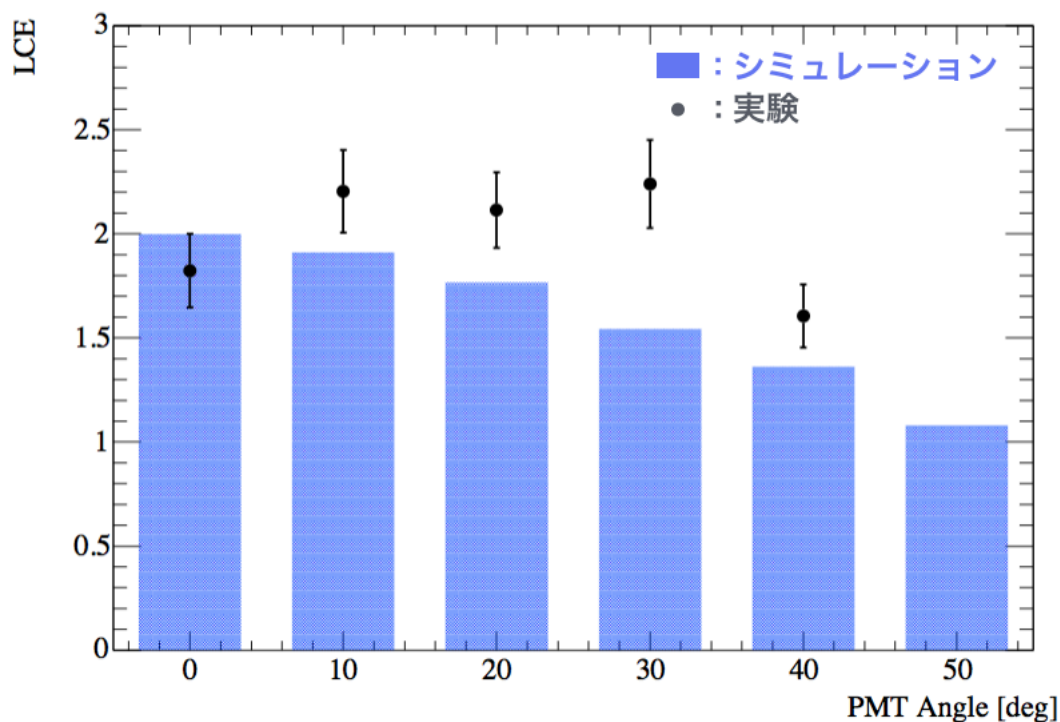


図 5.6: 集光率のシミュレーション結果。実験結果は集光率評価を行った 16 個の試作品の平均値である。また、縦軸の LCE は集光率 (Light Collecting Efficiency) の略記である。

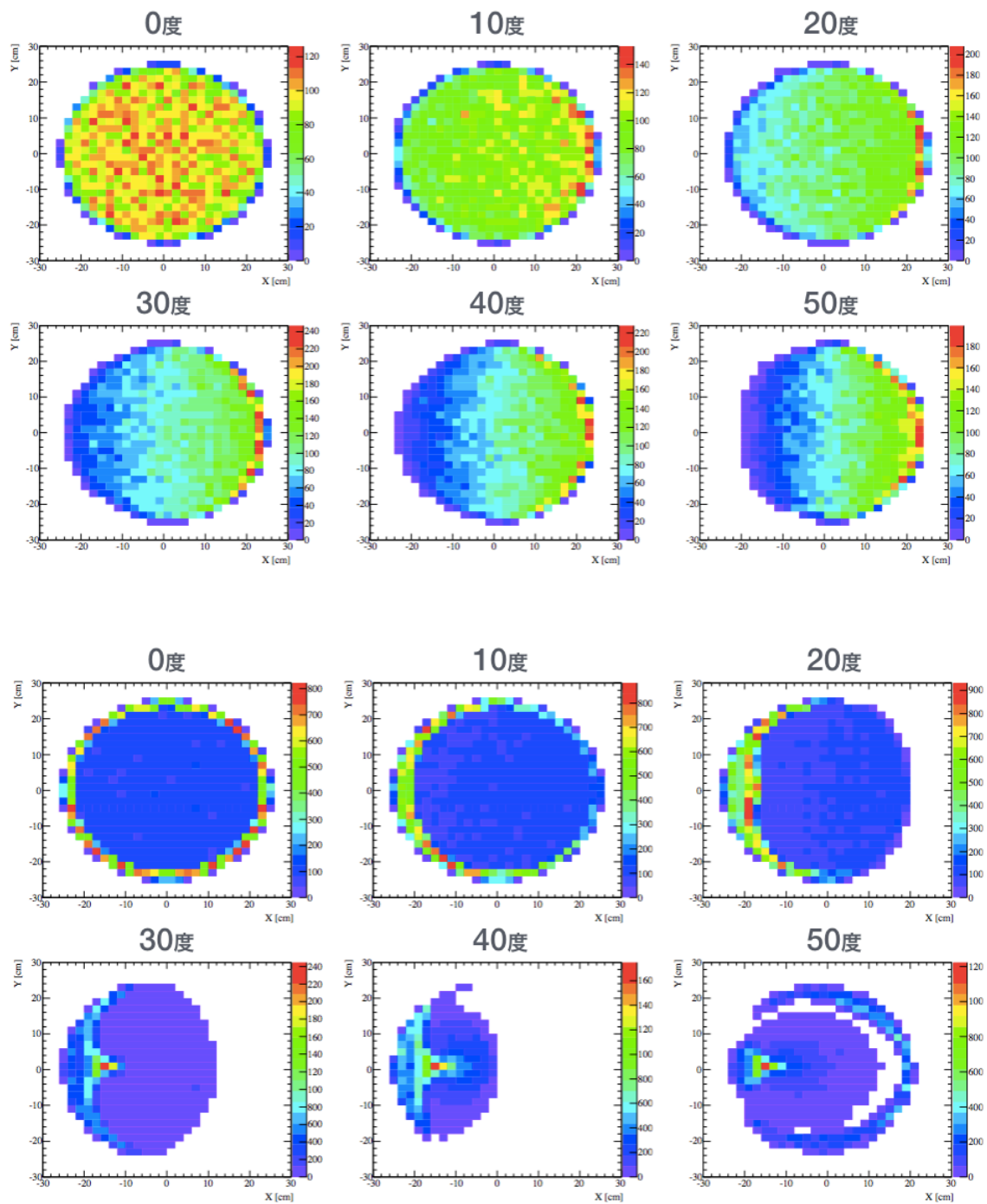


図 5.7: 光子のヒット分布 (上図：ミラーなし、下図：ミラーあり)

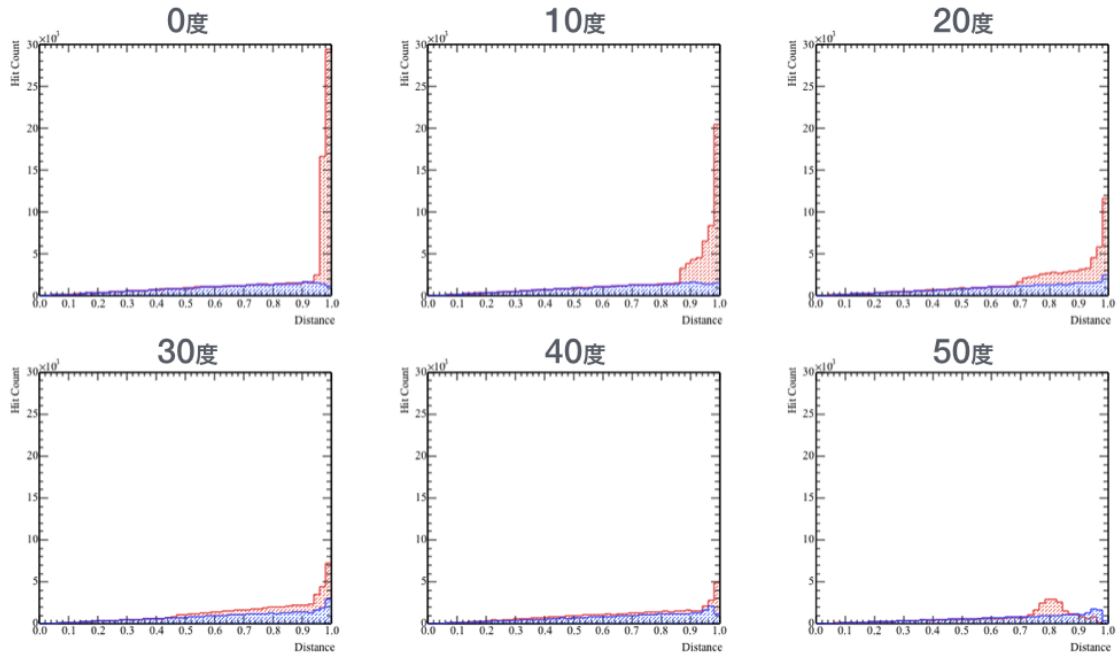


図 5.8: 全ヒットイベントに対する PMT 各部の寄与。横軸が PMT 中心からの距離 (端までの距離を 1 に規格化してある)、縦軸が各部にヒットしたイベント数を表す。青がミラーなしの場合、赤がミラーありの場合。

図 5.6 より、シミュレーション結果と集光率評価の実験結果は一致していないことがわかる。特に、PMT の角度が 10 度から 30 度の場合に 0 度の場合よりも集光率が良くなるという傾向を再現できていない。このことから、シミュレーションの条件にはなんらかの不備があるものと思われる。

一方図 5.7 と図 5.8 から、PMT にミラーを取り付けることで光子のヒット位置が光電面の外周付近に集中するようになることがわかった。図 5.8 から、特に 0 度と 10 度の場合には外周部の寄与が非常に大きいことがわかる。この結果は、光がミラー表面に対して浅い角度で (すなわち、ミラー表面と平行に近い角度で) 入射する割合が多いことを示している。これは集光率評価の実験結果から得られた予測と一致しており、アルミの反射率特性によって集光率が立体角からの予測よりもよくなることを示唆するものでもある。このように、光子のヒット分布から実験結果を説明できるので、シミュレーションの方法自体は比較的妥当であったと思われる。なお、50 度の場合に右側外周付近にヒットしている光子は、ミラーで 2 回反射したものだと考えられる。

シミュレーションで実験結果を再現できなかった主な理由として、PMT の出力の位置依存性及び角度依存性を考慮しなかったことが考えられる。PMT の出力にそのような依存性があることは、先行研究で実際に確認されている。その理由としては、光電面に対する光の入射角度によって光電面の見かけの厚さが異なることや（見かけの量子効率の変化）、放出された光電子の収集効率が場所によって異なることなどが挙げられる。20” PMT の出力値の位置および角度依存性を示したグラフを図 5.9 に示す。

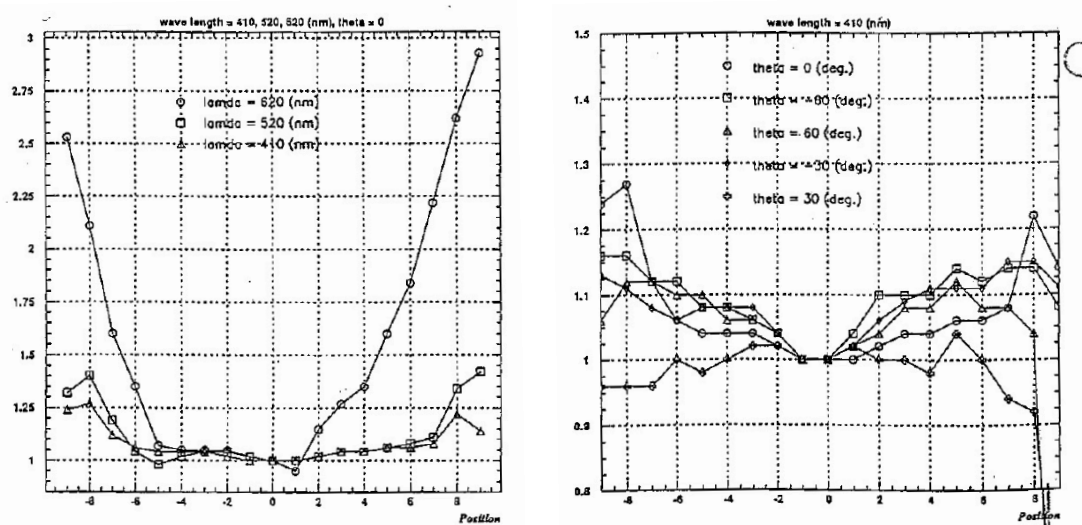


図 5.9: 光電面に光が垂直入射した場合の出力値の波長依存性（左図）および、光電面に対する光の入射角度の違いによる出力値の変化（右図、波長 410nm）。横軸の 0 が光電面の中心で、数字の絶対値が大きいほど外周に近づく [25]。

この結果をシミュレーションに組み込むことができれば実験結果を再現できるのではないかと考え、シミュレーションの改良を行った。

## 5.4 改良版集光シミュレーション

### 5.4.1 量子効率の位置補正

PMT の出力の位置依存性および角度依存性をシミュレーションに組み込むためには、光子が光電面にヒットした時の位置および入射角度の情報を取得する必要がある。しかし時間の関係上、今回は角度依存性をシミュレーションに組み込むことはできなかった。一方、位置情報は光子のヒット分布を作成するために既に取得しているので、それを用いてシミュレーションに出力の位置補正を組み込んだ。今回は簡単のために、出力の変化が全て見かけの量子効率の変化によるものと仮定して補正を行った。

まず、以下に示す方法で位置補正のための補正テーブルを作成する。そのために用いた光電面の模式図を図 5.10 に示す。

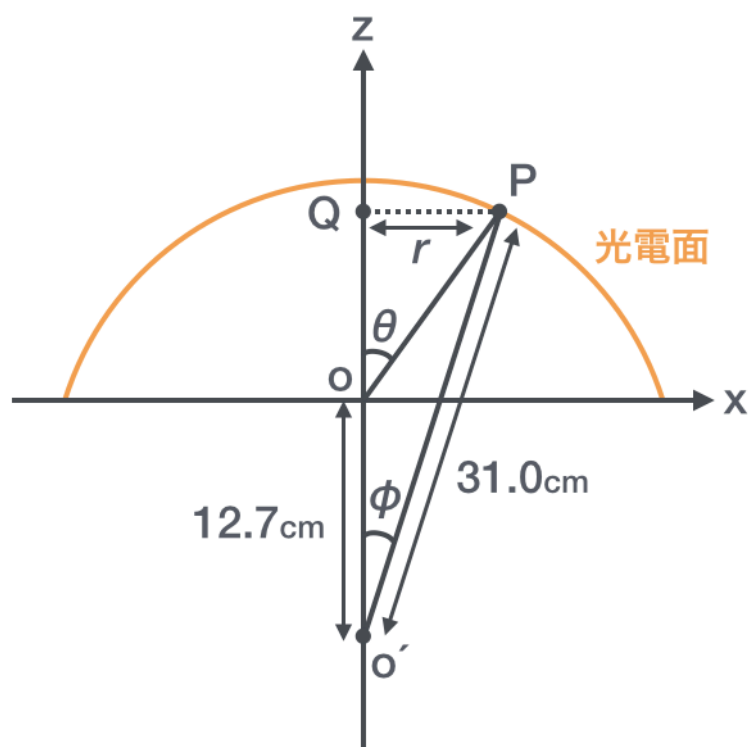


図 5.10: 位置補正のための模式図

簡単のために、光電面を点  $o'$  を中心とする半径 31.0cm の球面の一部だと仮定する。次に、それを中心からの角度  $\theta$  が 10 度ごとに 9 つの領域に分割する。各領域



の範囲を中心線（z 軸）からの距離  $r$  の範囲に変換し、それぞれの領域に対して図 5.9 左図から読み取った補正係数を割り当てる。図 5.9 左図における波長 410nm のデータで、左右の位置の絶対値が等しい点の平均値を補正係数とした。以上の方法で作成した補正テーブルを表 5.2 に示す。

角度 $\theta$ [度]	角度 $\phi$ [度]	位置 $r$ [cm]	補正係数 $C$
$0 \leq \theta \leq 10$	$0 \leq \phi \leq 5.92$	$0 \leq r \leq 3.20$	1.00
$10 < \theta \leq 20$	$5.92 < \phi \leq 11.95$	$3.20 < r \leq 6.42$	1.00
$20 < \theta \leq 30$	$11.95 < \phi \leq 18.18$	$6.42 < r \leq 9.67$	1.05
$30 < \theta \leq 40$	$18.18 < \phi \leq 24.73$	$9.67 < r \leq 12.97$	1.05
$40 < \theta \leq 50$	$24.73 < \phi \leq 31.71$	$12.97 < r \leq 16.29$	1.06
$50 < \theta \leq 60$	$31.71 < \phi \leq 39.22$	$16.29 < r \leq 19.60$	1.06
$60 < \theta \leq 70$	$39.22 < \phi \leq 47.36$	$19.60 < r \leq 22.80$	1.10
$70 < \theta \leq 80$	$47.36 < \phi \leq 56.21$	$22.80 < r \leq 25.76$	1.25
$80 < \theta$	$56.21 < \phi$	$25.76 < r$	1.19

表 5.2: 補正テーブル

次にこの補正テーブルを用いて、光子が光電面に入射した場合に光電子が 1 個以上放出される確率を考える。集光率評価実験の場合と同様に、放出される光電子数が Poisson 分布に従うと仮定すると、 $n$  個の光電子が放出される確率  $P(n)$  は期待光電子数を  $\lambda$  として

$$P(n) = \frac{\lambda^n}{n!} \exp(-\lambda) \quad (5.2)$$

と書ける。これより、光電子が放出されない確率、すなわち光電子が 0 個放出される確率  $P(0)$  は

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

一方、PMT の量子効率 (Q.E.) を 22% とすると、光子が光電面に入射した際に光電子が放出される確率は 0.22 である。これに位置  $r$  での補正係数  $C$  をかけることで、位置  $r$  に光子が入射した際に光電子が放出される確率を計算することがで

きる。すなわち、位置  $r$  において光電子が1個以上放出される確率  $P_r(n \geq 1)$  は

$$P_r(n \geq 1) = \text{Q.E.} \times C = 0.22 \times C \quad (5.4)$$

である。これより、光電子が放出されない確率  $P_r(0)$  は

$$P_r(0) = 1 - P_r(n \geq 1) = 1 - (0.22 \times C) \quad (5.5)$$

式 (5.3) と式 (5.5) より位置  $r$  における期待光電子数  $\lambda_r$  を計算すると

$$\lambda_r = -\ln(P_r(0)) = -\ln(1 - (0.22 \times C)) \quad (5.6)$$

となる。これをすべてのヒットイベントについてたし合わせることで、放出された光電子の合計数を計算する。そして、ミラーを取り付けた場合と取り付けていない場合の放出光電子数の比を取ることで集光率を評価する。すなわち式 (5.1) で定義した集光率は次のように変更される。

$$\text{集光率} = \frac{\sum \lambda_r (\text{ミラーあり})}{\sum \lambda_r (\text{ミラーなし})} \quad (5.7)$$

#### 5.4.2 集光ミラーのジオメトリの改良

先のシミュレーションでは、集光ミラーの形状を通常のウィンストンコーンで近似した。ウィンストンコーンの曲面はストリングメソッドで設計された曲面よりも曲率が小さいので、同じ出口半径のコーンを考えると、ウィンストンコーンの方が縦長になる。従って、ストリングメソッドで設計した KamLAND 用のミラーとは若干形状が異なる。この形状の違いが、光子のヒット分布に影響を与えてしまった可能性がある。すると前節で考えた位置補正の意味が薄れてしまうので、集光ミラーのジオメトリの改良を合わせて行った。

設計方法は 5.3.1 節の場合と同様だが、AGeoWinstonCone2D クラスで作る円錐台の高さを調整し、20" PMT 用のミラーの高さと同じにした。それに伴って、AGeoWinstonConePoly クラスで作る円錐台の大きさも調整した。すなわち、ミ

ラー曲面の形状は通常のウィンストンコーンだが、高さを調整することでストリングメソッドで作られるコーンに近づけたということである。改良したジオメトリを図 5.11 に示す。比較のため、もとのジオメトリも合わせて載せてある。

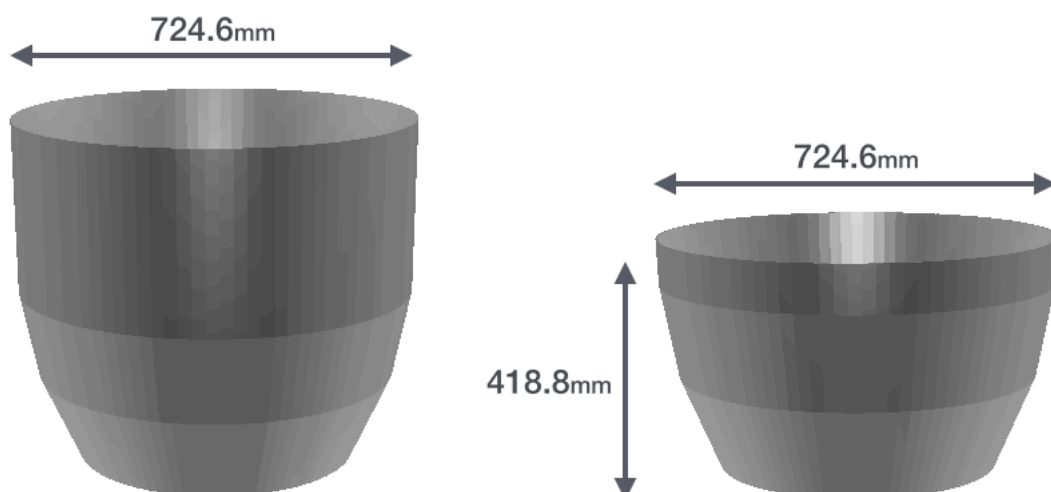


図 5.11: 改良前のジオメトリ (左図) と改良後のジオメトリ (右図)

### 5.4.3 シミュレーション結果

5.4.1 節で考えた量子効率の位置補正と、5.4.2 節で作った集光ミラーのジオメトリを先のシミュレーションに組み込み、再度集光シミュレーションを行った。シミュレーション条件は改良前と同じである。改良前後の集光率のシミュレーション結果を図 5.12 に示す。また、光子のヒット分布を図 5.13 に、全ヒットイベントに対する PMT 各部の寄与をヒストグラム化したものを図 5.14 に示す。

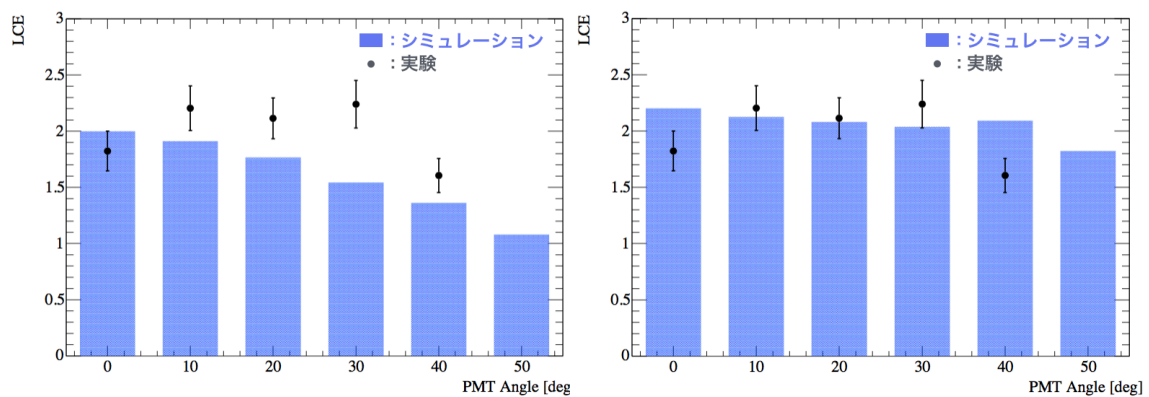


図 5.12: シミュレーション結果 (左図：改良前、右図：改良後)

図 5.12 より、全ての角度で集光率が向上し、実験結果の再現に近づいたことがわかる。また光子のヒット分布および各部の寄与の比較から、特に PMT の傾きが大きい場合に光子が広範囲にヒットするようになったことがわかる。しかしミラーの入口半径は変わっていないので、光子のヒット数が増えたわけではなく単に分布範囲が広がっただけである。

このことから、集光率の向上は PMT の出力特性を組み込んだことによるものだと考えられる。それによって実験結果の再現に近づいたということは、実測においても PMT の出力特性が集光率に影響を及ぼしているということである。このことから、PMT の出力特性を考慮することで、今以上に高い集光率を持つより最適な形状のミラーをデザインできる可能性が示唆された。

以上の考察から、厳密なシミュレーションを行うためには、詳細な PMT の出力特性をシミュレーションに組み込む必要があることが示される。本来 PMT の出力は光電面の量子効率だけでなく、ガラス面での反射や放出された光電子の収集効率など、様々な要因が組み合わさって決まるものである。本シミュレーションではそれらをすべて量子効率に押し付けてしまったため、シミュレーション結果と実験結果にズレが生じたものと考えられる。PMT の出力特性を正確に測定し、その情報を本シミュレーションに組み込むことで、出力特性を考慮したミラーデザインの再検討が可能となる。

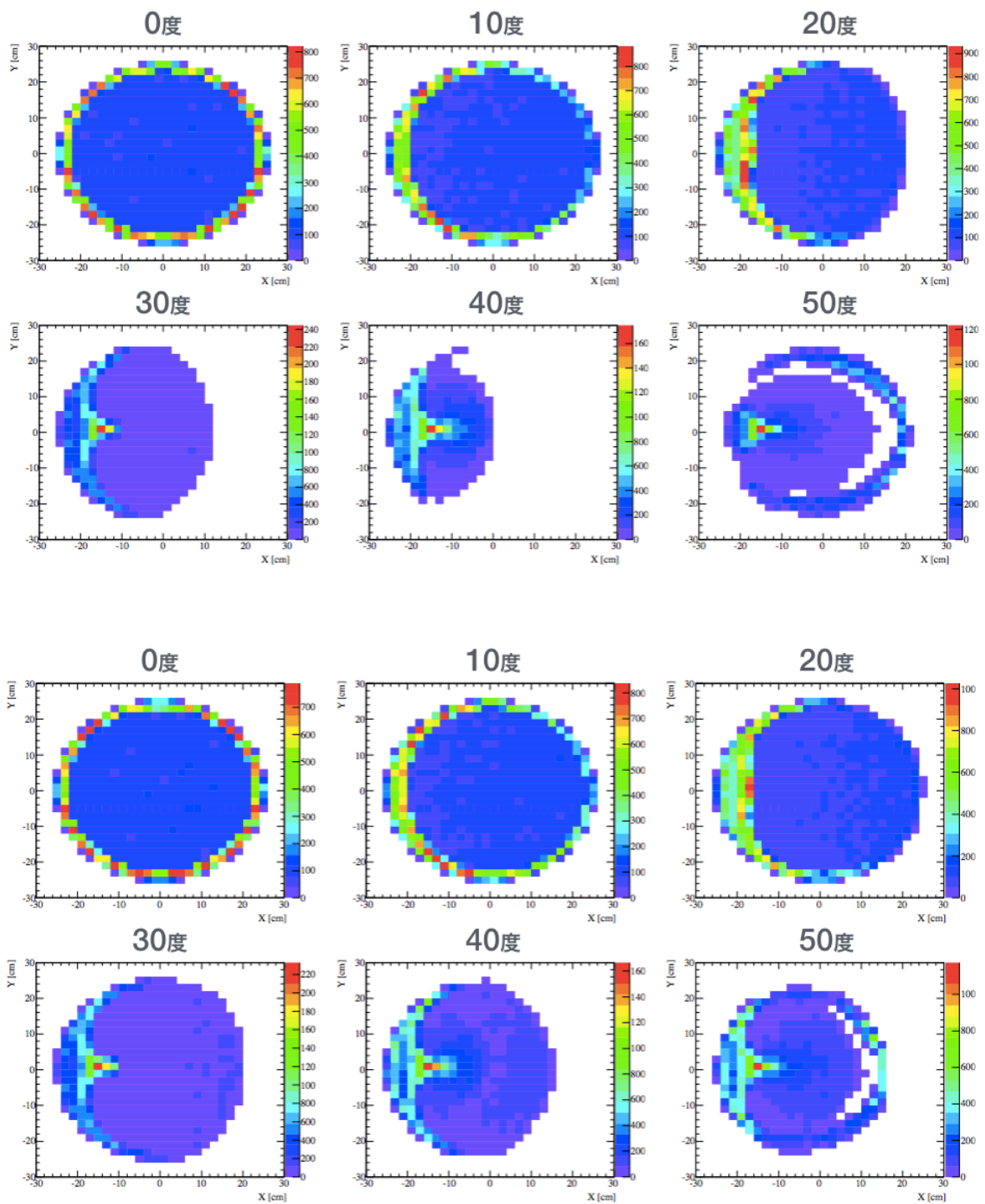


図 5.13: ミラーをつけた場合の光子のヒット分布 (上図: 改良前、下図: 改良後)

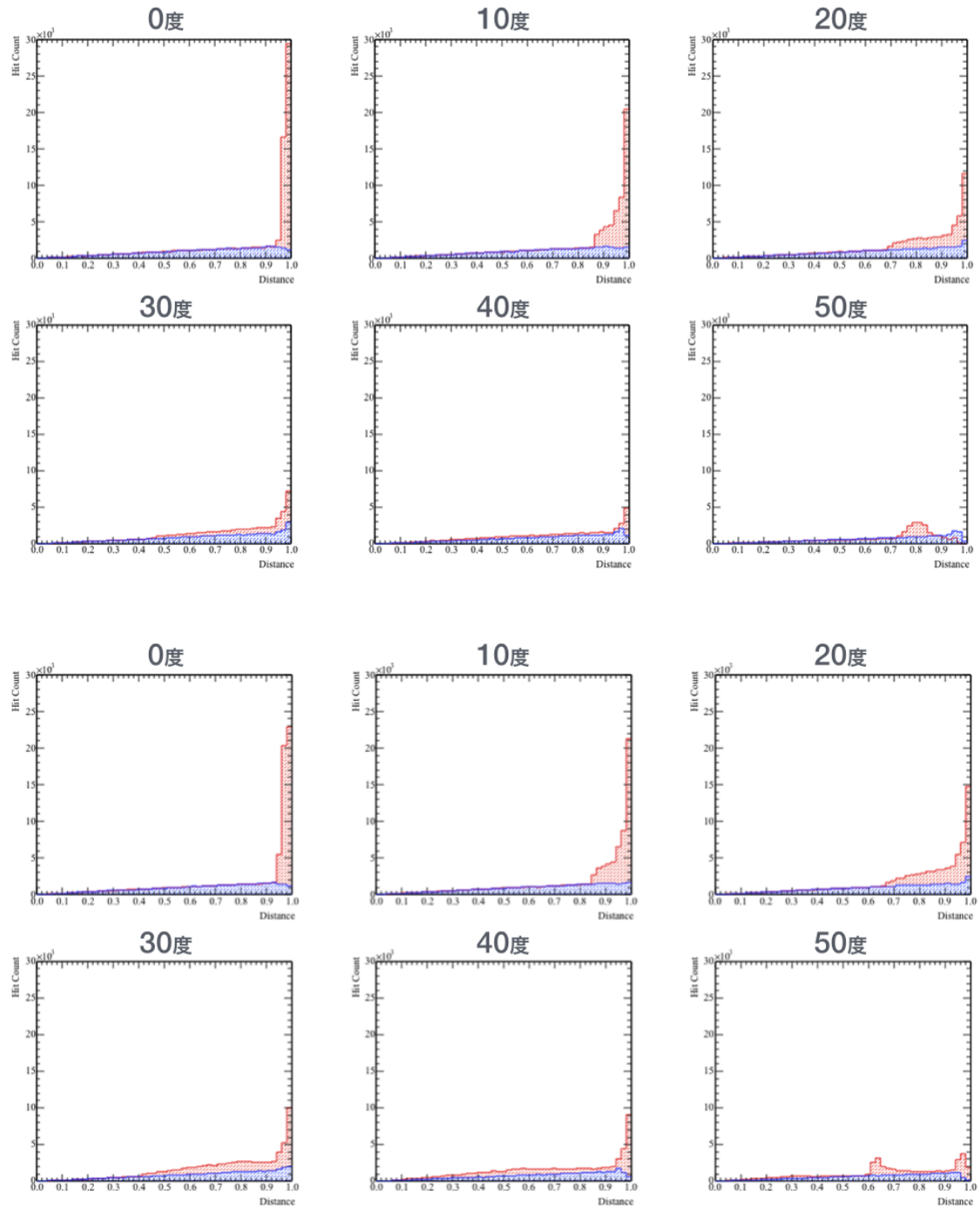


図 5.14: 全ヒットイベントに対する PMT 各部の寄与 (上図: 改良前、下図: 改良後)。横軸が PMT 中心からの距離 (端までの距離を 1 に規格化してある)、縦軸が各部にヒットしたイベント数を表す。青がミラーなしの場合、赤がミラーありの場合。

## 5.5 まとめ

この章では、集光ミラーを用いた集光シミュレーションの設計とそのシミュレーション結果、およびシミュレーションの改良について述べた。これにより、実験的に評価することが困難な集光ミラーの特性をシミュレートするための準備がある程度整った。より実用的なシミュレーションを行うために必要なことを以下に列挙する。

- PMT の出力の角度依存性を組み込む
- ミラーの反射率の角度依存性を組み込む
- ミラーが変形した場合のシミュレーションを行えるようにする
- 反射率や屈折率を調整して、液体シンチレータ中での集光条件を再現する
- 多数のミラーを取り付けた環境を作る

これらを導入して集光ミラーの各種特性をシミュレートし、必要に応じてさらなる改良を行うことで、KamLAND 内に集光ミラーを導入する際の指針とすることができると期待される。また、集光ミラーと同時に導入予定である High Q.E. PMT の出力の各種依存性を組み込んだシミュレーションを行えば、PMT の出力特性まで考慮したより最適な形状のミラーをデザインすることが可能となる。

## 第6章 結論

本論文では、集光ミラーの開発に必要な基礎研究の成果と、集光率向上効果を検証するための集光シミュレーションの構築について述べてきた。以下で再度、本研究で行った内容およびその結論をまとめる。

### 集光ミラーの開発

KamLAND で使用するのに最適なミラーの形状を決定し、反射率と化学的安定性の評価からミラーの作製に最適な素材を「PET + アルミニウム」に決定した。それをもとに実物大の集光ミラーを作製し、集光率の評価を行った。その結果、集光ミラーを導入することで目標とする集光率の向上効果が見込めることがわかった。

### 集光シミュレーション

実験的に評価することが困難な集光ミラーの特性を評価するために、光線追跡用のシミュレーションツールの導入と最適化を行い、集光シミュレーションを行った。またその結果を受けて、より高精度なものになるようシミュレーションを改良した。これにより、実験困難な特性をシミュレートするための準備がある程度整った。さらにシミュレーションの結果から、PMT の出力特性を考慮したより最適な形状のミラーがデザインできる可能性があることを示した。

以上の研究成果より、KamLAND 内に集光ミラーを導入することで集光率の改善が見込めること、および、簡単なシミュレーションによって集光率の評価やミラーデザインの再検討が可能であることを示した。研究が進み、液体シンチレータの発光量を現在の 1.5 倍にすることができたと仮定すれば、エネルギー分解能  $\Delta E$  および  $2\nu 2\beta$  崩壊のイベントレート  $N_{2\nu}$  は



$$\frac{\Delta E}{E} : \frac{1}{\sqrt{n}} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{1.8 \times 1.5 \times n}} \quad (6.1)$$

$$N_{2\nu} : \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^{5.8} \rightarrow \left(\frac{\Delta E}{E} \times \frac{1}{\sqrt{1.8 \times 1.5 \times n}}\right)^{5.8} \quad (6.2)$$

これにより、 $N_{2\nu}$  は現在の約 1/20 となり、5 年程度の観測で目標とする感度である  $\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20 \text{ meV}$  の達成が見込まれる。これは逆階層領域をカバーしており、もし  $0\nu 2\beta$  崩壊が発見されればニュートリノのマヨラナ性の証明や質量階層構造の解明など多くの成果が期待される。一方  $0\nu 2\beta$  崩壊が発見されなくても、質量階層構造に強い制限を与える重要な情報が得られる。また同時に、エネルギーによるセレクションが必要な地球ニュートリノ探索の感度向上にもつながると期待される。

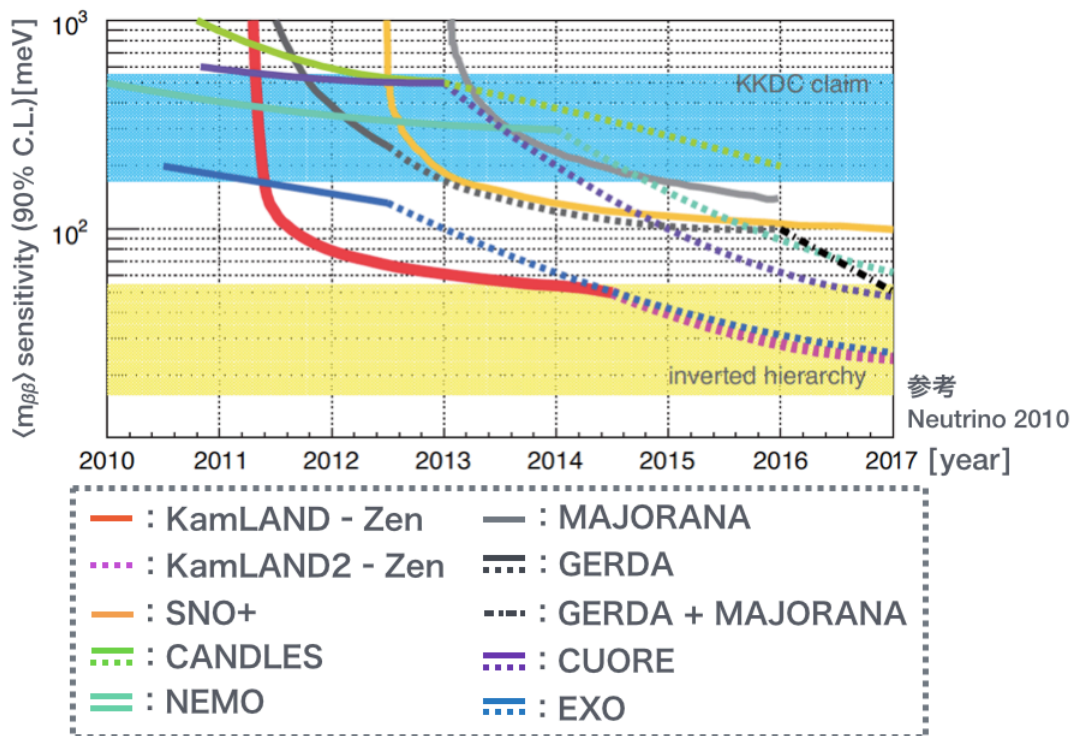


図 6.1: KamLAND - Zen 実験の感度予測

本研究によって、集光ミラー製造のために必要な基礎研究がほぼ完了したと言える。残された課題を解決し、KamLAND内に集光ミラーを導入することができれば、ニュートリノの性質解明につながる重要な手がかりを得られることは間違いないだろう。

# 謝辞

本論文の執筆にあたって、多くの方々より多大なるお力添えを賜りました。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

まず、本研究を進めるにあたり特にお世話になった清水格先生、小畑旭さん、林歩美さんに特別の感謝を申し上げます。

清水先生には実験における技術的な指導から発表資料のチェックまで、あらゆる面でサポートをしていただきました。私が自由に研究を進められたのは、清水先生が私を信頼して多くを任せてくださっていたからに他なりません。本当にお世話になりました。

小畑さんからは実験のノウハウについて多くのことを教えていただきました。不器用な私になんとか実験を進められるようになったのは、小畑さんの丁寧なご指導のおかげです。

林さんには私の研究の大部分を引き継いでいただきました。私の下手な説明に頑張っついてきていただき、本当にありがとうございました。林さんのおかげで私は本論文の執筆に専念することができました。

井上邦雄先生をはじめとするニュートリノ科学研究センターの先生方・研究員の方々には、時に厳しく時に優しく、多くのご指導・ご講義を賜りました。ミーティングにて成果を発表した際、不勉強ゆえにいただいたご質問・ご指摘に対する答えに窮することが多々ありましたが、そのたびに的確なアドバイスをいただきました。私の研究が人前に出しても恥ずかしくないものに仕上がったのは、皆様の厳しいご指導のおかげです。ありがとうございました。

技術管理スタッフ・事務職員の方々には、研究生活において多くの面でサポートをしていただきました。特に技術管理スタッフの根本憲一さんと高山知明さんには、集光ミラーの開発・性能評価に際して多大なるご尽力を賜りました。ありがとうございました。

そして、私とともに研究生活を送ってくださった先輩・同期・後輩の皆様。頼りになる先輩方、個性的な同期たち、そして優秀な後輩たちのおかげで、とても

楽しい研究生活を送ることができました。研究室の和気あいあいとした雰囲気は、研究を進める活力になりました。

最後に、今まで私を支えてくださった家族と友人に、深く感謝いたします。私が無事にここまでやってこれたのは、ひとえに皆様の支えがあったからこそです。本当にありがとうございました。

私に関わってくださったすべての方々の、より一層のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

# 付録A LABの研究

## A.1 研究目的

KamLAND2 - Zen では、集光ミラー以外にも様々なものが改良・新規導入される予定である。そのうちの 하나가、現在開発が進められている大光量の液体シンチレータである。集光ミラーと合わせて導入することでエネルギー分解能のさらなる改善を目指している。しかしその液体シンチレータの性質が集光ミラーに対して悪影響をおよぼすものであると、せっかくミラーを導入しても意味を成さない。それどころか、かえってKamLANDの検出感度を低下させてしまう恐れもある。従ってその性質を研究しておくことは、新たな液体シンチレータの開発のみならず集光ミラーの開発にも大きく貢献する。そこで、集光ミラー開発の予備研究として、新たな液体シンチレータの候補であるLAB (Linear Alkylbenzene) についての基礎研究を行うことにした。

## A.2 LABについて

液体シンチレータとして使用されている物質には様々なものがあるが、光量や透過率の制限を考えると、KamLAND内で使用できるものはかなり限られてくる。新たな液体シンチレータを開発するにあたって求められている条件を以下に列挙する。

1. 光量：大光量であること (KamLAND - LS の 1.5 倍以上が目標)
2. 減衰長：400nm 付近で 10m 以上
3. コスト：比較的安価であること
4. 引火点：十分高いこと (50 °C 以上)
5. 放射能：低放射能
6. 密度：高密度であること (0.85g/cm<sup>3</sup> 以上)

- 7. Xe 溶解度：溶解度が高いこと（3wt%以上）
- 8. 攻撃性：バルーンへのダメージが小さいこと

これらの条件を満たす候補として注目されているのが、本論第4章でも少し述べた LAB (Linear Alkylbenzene) である。SNO+の研究では、現在 KamLAND で使われている KamLAND - LS の 1.5 倍程度の発光量を持つという結果が得られている。LAB の構造式と SNO+ が示した発光量測定の結果を図 A.1 に示す。

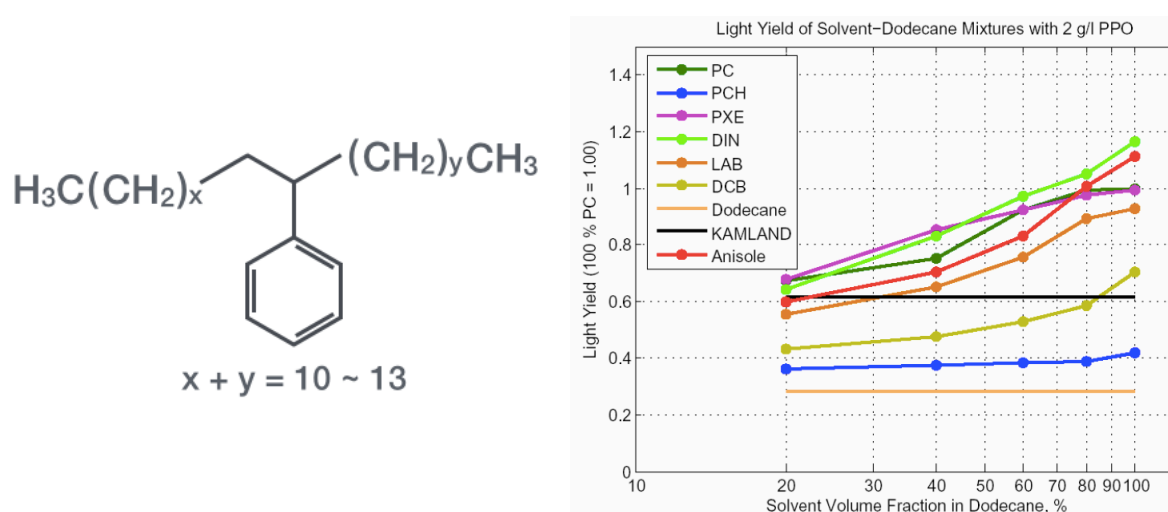


図 A.1: LAB の構造式 (左図) と様々な液体シンチレータの発光量 (右図、SNO+ による [3])

この結果を受けて、発光量を KamLAND - LS の 1.5 倍にすることを目標に、LAB をベースにした新たな液体シンチレータの開発を行うことにした。本研究ではそのために必要な基礎評価を行った。

### A.3 透過率の評価

液体シンチレータを開発するにあたってまず重要になるのは透過率である。いかに発光量が高い液体シンチレータであっても、透過率が悪ければそのシンチレーション光を検出できないので無意味である。そこでまず、LAB の透過率を評価することにした。透過率測定に使用した装置と測定原理を図 A.2 に示す。

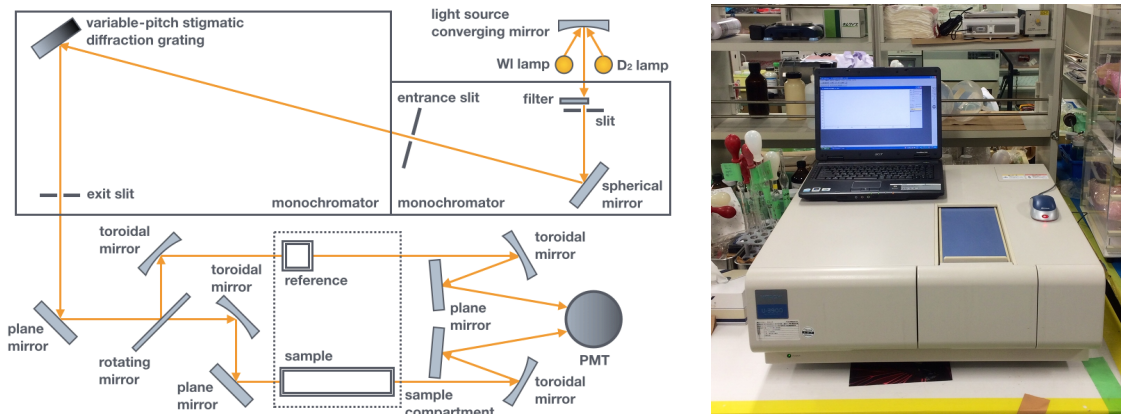


図 A.2: 測定装置の測定原理 (左図) と写真 (右図)

透過率の測定には HITACHI 製 U-3900 Spectrometer を用いた。図 A.2 に示したように、ビームを分割してリファレンス用のセル (1cm セル) とサンプル用のセル (10cm セル) それぞれの透過率を測定している。これにより、セルとサンプルやセルと空気との間で起こる反射等の影響をキャンセルすることができ、実質 9cm の透過率を測定できる仕組みになっている。ただし測定時には透過率の基準となるベースラインを設定する必要があるので、得られる透過率はその物質に対する相対的なものである。従って透過率が 100% に近い物質をベースラインに選ぶことで、絶対透過率に近い値を得ることができる。本研究ではシクロヘキサンをベースラインに用いた。詳しい測定手順は付録 G.2 に譲り、ここでは測定結果のみを示す。今回は製造元の異なる 3 種類の LAB と、参考のために KamLAND - LS の透過率を測定した。その結果を図 A.3 に、サンプルの情報を表 A.1 に示す。

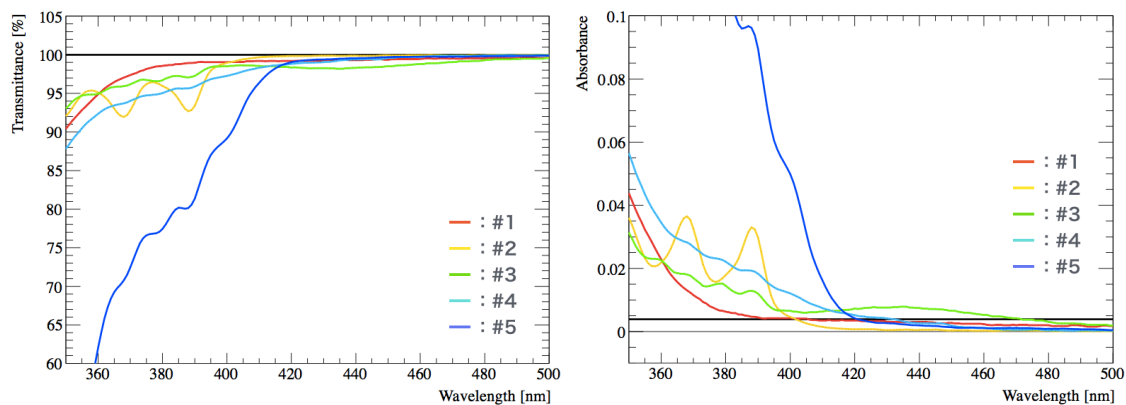


図 A.3: 各種サンプルの透過率 (左図) とそこから求めた吸光度 (右図)。右図の黒線は減衰長が 10m の場合の吸光度を表す。

製造元 (実験#)	商品名	特記事項	透過率 [%]	吸光度
KamLAND (# 1)	KamLAND - LS	-	98.2	$8.04 \times 10^{-3}$
JX (# 2)	アルケン L	-	96.2	$1.68 \times 10^{-2}$
Sasol (# 3)	HYBLENE 113	-	96.7	$1.44 \times 10^{-2}$
CEPSA (# 4)	-	SNO+より譲渡	94.7	$2.35 \times 10^{-2}$
CEPSA (# 5)	-	独自に購入	76.6	$1.16 \times 10^{-1}$

表 A.1: 測定サンプルの情報 (透過率および吸光度は 9cm・375nm での値)

ここで、入射前の光の強度を  $I_0$ 、入射位置からの距離が  $x$  の地点での光の強度を  $I(x)$  とすると、透過率  $T(x)$  と吸光度  $A(x)$  の間には

$$T(x) = \frac{I(x)}{I_0} \quad (\text{A.1})$$

$$A(x) = -\log_{10}(T(x)) \quad (\text{A.2})$$

という関係が成り立つ。図 A.3 ではこれを使って透過率を吸光度に変換している。また減衰長は「透過率がもとの  $1/e$  になる時の長さ」と定義されるので、透過率  $T(x)$  を減衰長  $\lambda$  を用いて表すと

$$T(x) = \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (\text{A.3})$$

これより、減衰長が目標である 10m 以上になるためには、透過率測定用のセルの長さ (実質 9cm) における透過率は

$$T(9) = \exp\left(-\frac{9}{10 \times 100}\right) \times 100 \doteq 99.1[\%] \quad (\text{A.4})$$

以上でなければならない。すなわち吸光度は

$$A(9) = -\log_{10}\left(e^{-\frac{9}{10 \times 100}}\right) \doteq 3.91 \times 10^{-3} \quad (\text{A.5})$$

以下である必要がある。

表 A.1 を見ると、この条件を満たしているサンプルはないことがわかる。これは、購入した LAB 中に含まれる不純物の影響であると考えられる。また製造元によって透過率の波長依存性が異なるのは、製法によって混入する不純物の種類が異なるためだと考えられる。なお、同じ CEPSA 製のものでも透過率の波長依存



性が異なっている。これは輸送時の容器が異なっていたことが影響しているものと思われる（SNO+からいただいたものはガラス瓶に、独自に購入したものはドラム缶に入っていた）。

以上の結果から、LABを使用するためには純化作業を行い、LAB中の不純物を取り除く必要があることがわかった。だがその前に、LABをベースにした液体シンチレータがきちんと発光するかどうかを確認しておく必要がある。次節ではその結果について述べる。

## A.4 発光量の評価

発光量の評価には遅延同時計測法を用いた。実験系の概略図とデータ収集用の回路図を図A.4に示す。

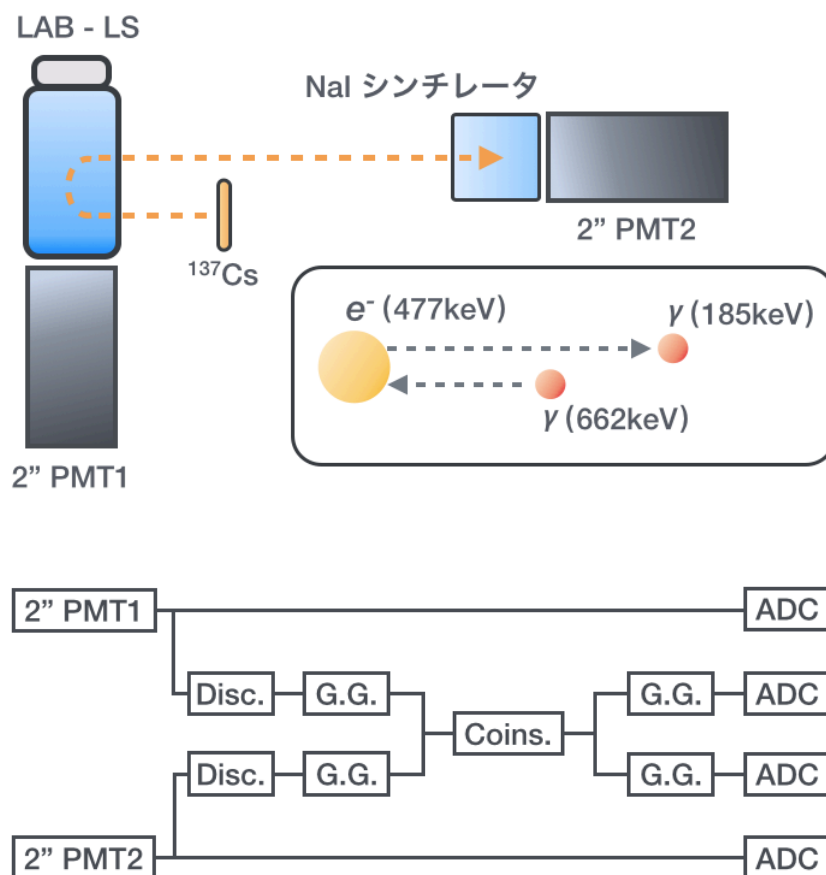


図 A.4: 実験のセットアップの概略図（上図）とデータ収集用回路の回路図（下図）

遅延同時計測法は KamLAND でも使われている測定方法で、決まった時間差のある信号のコインシデンスを取ることで偶発的なバックグラウンドイベントを大幅に軽減することができる。この実験の場合、662keV の  $\gamma$  線によって作られる反跳電子 (477keV) による LAB - LS の発光イベント (先発信号) と、反跳後の  $\gamma$  線 (185keV) による NaI シンチレータの発光イベント (後発信号) のコインシデンスを取る。それによって、LAB - LS が発光したイベントのみを選択的に測定することが可能である。この測定によって得られるデータヒストグラムを図 A.5 に示す。

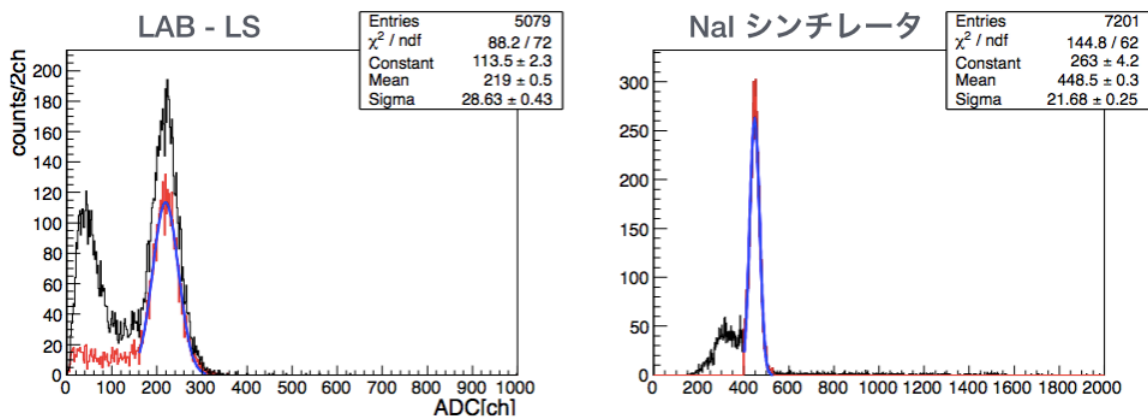


図 A.5: 実験で得られるデータヒストグラム

発光量の大きさは ADC のチャンネルに対応するので、得られたピークをガウシアンでフィットし、基準となる液体シンチレータのピーク位置と比較することで発光量の大小関係を見積もる。この実験では PC100% の液体シンチレータを基準とし、発光量を比較した。測定したサンプルは透過率測定で使用したものと同じである。測定条件を表 A.2 に、測定結果を図 A.6 と表 A.3 に示す。

項目	条件
測定時間	7,200 秒
サンプル量	100 cc
PPO の量	2.00 g/l
窒素パーセント	550l/min, 3分

表 A.2: 発光量測定条件。なお、KamLAND - LS のみ PPO の量は 1.36 g/l。

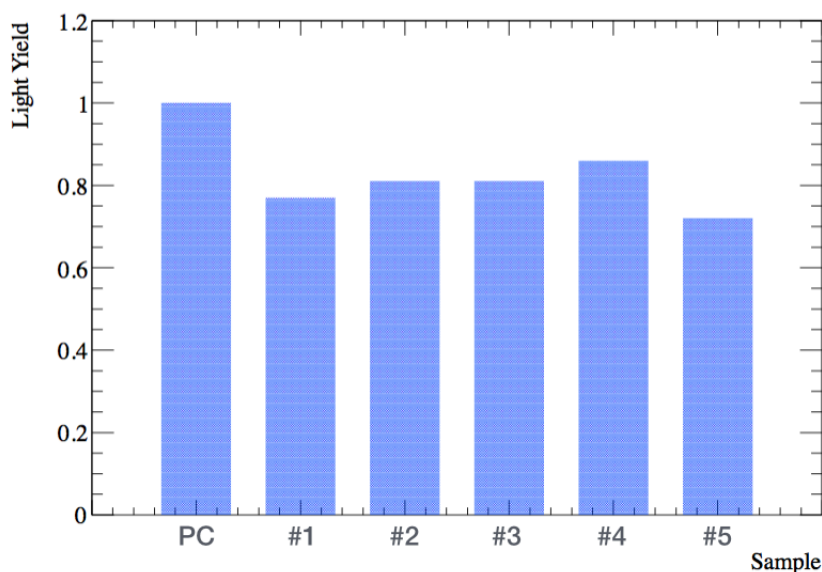


図 A.6: 発光量測定の結果

製造元 (実験#)	商品名	特記事項	PC - LS の発光量との比
KamLAND (# 1)	KamLAND - LS	-	0.77 ± 0.01
JX (# 2)	アルケン L	-	0.81 ± 0.01
Sasol (# 3)	HYBLENE 113	-	0.81 ± 0.01
CEPSA (# 4)	-	SNO+より譲渡	0.86 ± 0.02
CEPSA (# 5)	-	独自に購入	0.72 ± 0.01

表 A.3: 発光量測定の結果

実験条件について、測定前に窒素パージを行ったのは酸素クエンチングを防止するためである (2.1.1 節参照)。またパージを3分以上行っても発光量が変わらないことが先行研究よりわかっているため、本実験でもパージ時間は3分とした。

測定結果より、SNO+が示した「KamLAND - LS の 1.5 倍の発光量を持つ」という結果は再現できなかった。これは前節でも述べたように、LAB 中の不純物が影響しているものと考えられる。しかし、独自に購入した CEPSA 社の LAB 以外は、わずかながら KamLAND - LS よりもよい発光量を持つことがわかった。このことから、LAB をベースにすることで KamLAND - LS よりも光量の大きな液体シンチレータを作れる可能性が示唆された。そこで、LAB 中の不純物の除去による透過率の改善と発光量の増加を目的に、LAB の純化を行った。

## A.5 LABの純化と効果検証

純化の方法はいくつか考えられるが、今回は活性アルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) を用いて純化を行うことにした。方法は単純で、活性アルミナを詰めたカラムの中に LAB を通すだけである。実験方法の概略図を図 A.7 に示す。

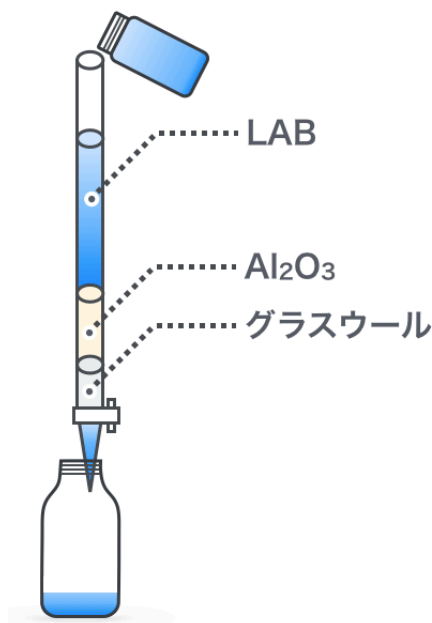


図 A.7: 活性アルミナを用いた LAB の純化方法

この方法を用いて LAB を純化し、再度透過率と発光量を評価する。だがその前に、不純物が本当に除去されたかを知るための目安として、ガスクロマトグラフィーによる LAB の成分分析を行うことにした。

ガスクロマトグラフィーは気化しやすい化合物の成分分析を行うためによく用いられる装置である。分析対象の物質を加熱して気化し、キャリアガスとともにカラム内を流す。すると質量や電荷などの違いによって物質内に含まれる各成分が分離される。カラム内を通過する時間はそれらの特徴によって異なるので、保持時間と検出した際の電気信号の強さから成分を同定したりその含有量を調べたりすることができる。本実験ではジーエルサイエンス株式会社製の GC353B というガスクロマトグラフィーを用いた。装置の写真と得られるデータの例を図 A.8 に示す。

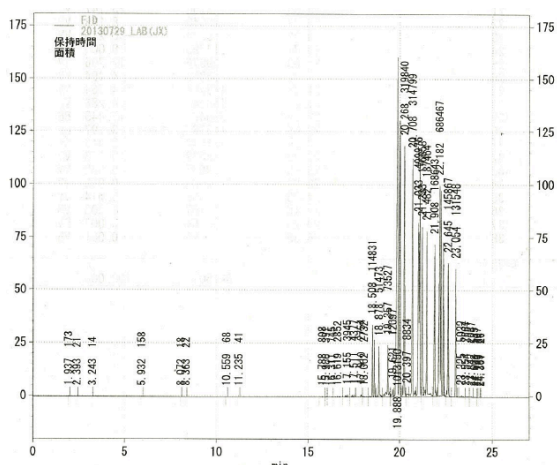
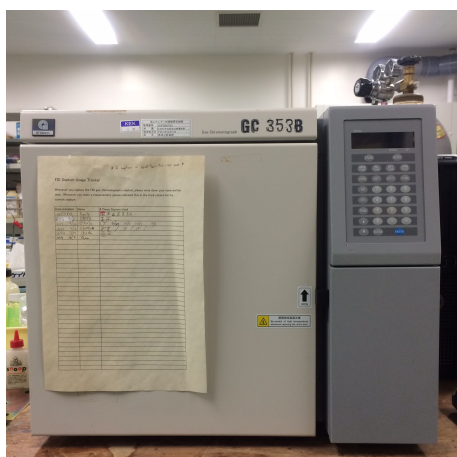


図 A.8: 使用したガスクロマトグラフィー（左図）と取得データ（右図）

このガスクロマトグラフィーを用いて各社の LAB の成分分析を行った。図 A.8 に示したデータは JX 製の LAB（アルケン L）の純化前のものである。サンプルを投入してから約 18 分後以降に大きなピークが何本も見られた。LAB 中にはアルキル基の数が異なる成分が含まれているため（図 A.1 左図参照）、それらが分離して検出されたためだと考えられる。また、直鎖のどの部分にベンゼン環が結合するかによっても構造が変わるため、数多くの異性体が存在することも影響しているものと思われる。

同じ測定を他の 2 社の LAB についても行って見たが、ともに JX のものと同じ傾向が見られた。また純化後にも同様の分析を行い結果を比較してみたが、有意差は見られなかった。このことから、次の 2 つの可能性が示唆される。1 つは、活性アルミナによる純化はほぼ効果がないということ。そしてもう 1 つは、メインピークに比べて非常に小さいピークを作るような不純物、すなわち LAB 中にごく微量に含まれる不純物を除去した可能性である。いずれにしても、ガスクロマトグラフィーでは純化の効果を検証できなかったため、再度透過率と発光量を評価した。これで純化前よりも結果が改善していれば、純化の効果があったということになる。透過率評価の結果を表 A.4 と図 A.9 に、発光量測定の結果を表 A.5 と図 A.10 に示す。なお、CEPSA 製のものは SNO+ からいただいた方のみを用いた。

製造元 (実験#)	透過率 (前) [%]	透過率 (後) [%]	吸光度 (前)	吸光度 (後)
KamLAND (# 1)	98.2	-	$8.04 \times 10^{-3}$	-
JX (# 2)	96.2	96.9	$1.68 \times 10^{-2}$	$1.37 \times 10^{-2}$
Sasol (# 3)	96.7	99.4	$1.44 \times 10^{-2}$	$2.76 \times 10^{-3}$
CEPSA (# 4)	94.7	98.4	$2.35 \times 10^{-2}$	$8.14 \times 10^{-3}$

表 A.4: 測定サンプルの情報 (透過率および吸光度は 375nm での値)。(前) が純化前、(後) が純化後の結果である。

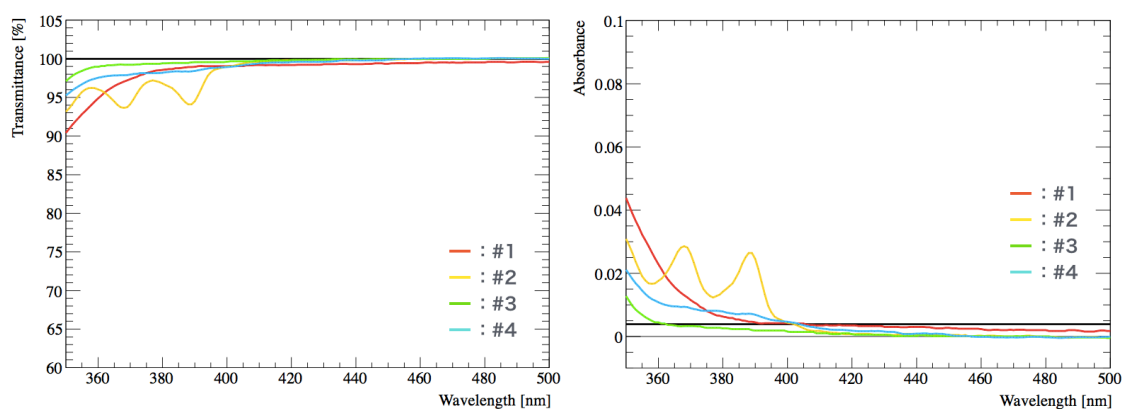


図 A.9: 純化後の透過率 (左図) と吸光度 (右図)

製造元 (実験#)	PC - LS の発光量との比 (前)	PC - LS の発光量との比 (後)
KamLAND (# 1)	$0.77 \pm 0.01$	-
JX (# 2)	$0.81 \pm 0.01$	$0.81 \pm 0.01$
Sasol (# 3)	$0.81 \pm 0.01$	$0.81 \pm 0.01$
CEPSA (# 4)	$0.86 \pm 0.02$	$0.94 \pm 0.02$

表 A.5: 発光量測定の結果。(前) が純化前、(後) が純化後の発光量。



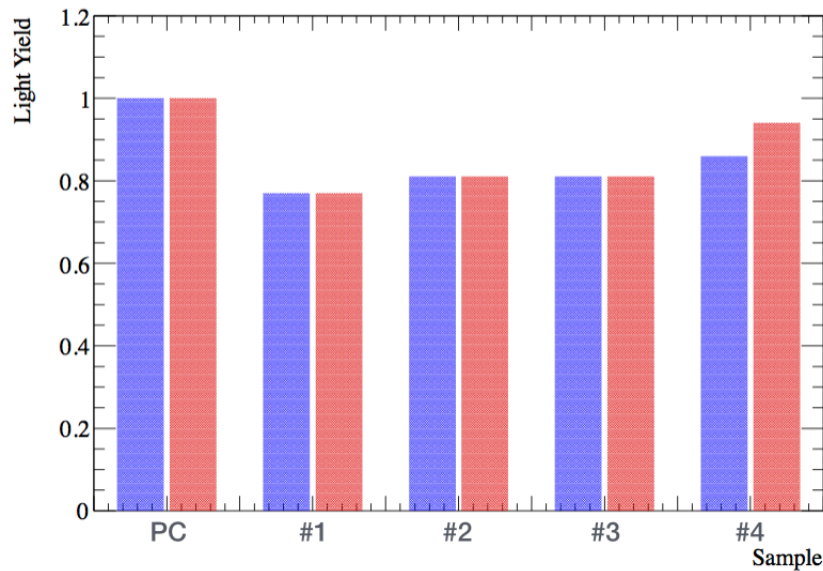


図 A.10: 純化前後での発光量測定の結果。青が純化前、赤が純化後を示すが、サンプル# 4 以外は純化前後で発光量に変化はない。

表 A.4 より、純化によってすべてのサンプルで透過率および吸光度が改善したことがわかった。JX 製のサンプルではわずかに改善した程度だが、Sasol 製のサンプルについては減衰長 10m の目安である吸光度 ( $3.91 \times 10^{-3}$ ) を下回っている。一方表 A.5 より、発光量が改善したサンプルは CEPSA 製のサンプルのみであった。

以上の結果より、活性アルミナによる LAB の純化には、ある程度不純物を除去する効果があることがわかった。また、透過率の改善と発光量の改善に相関がないことから、透過率に影響を与える不純物と発光量に影響を与える不純物とは別物の可能性がある。

Sasol 製のサンプルのように、純化によって透過率が改善し、かつ発光量が変わらないのであれば、結果的に集光量の向上につながる。このことから、活性アルミナによる純化には一定の効果があると考えられる。

だがこの方法で KamLAND に導入する LAB を全量純化しようとする、途方もない時間がかかってしまう。というのも、LAB は粘性が強いため、活性アルミナ中を通過するのに時間がかかる。今回は透過率と発光量を測定するために 150cc 程度の純化サンプルを用意したが、純化するのに 1 サンプルあたり 24 時間程度の時間がかかった。従って、活性アルミナを使った純化を行うためには、KamLAND に導入する量の LAB を効率よく純化する方法の確立が必要である。

## A.6 まとめ

ここでは新たな液体シンチレータの候補である LAB の基礎研究の結果について述べた。発光量の改善方法の研究や純化方法の改良などまだまだ課題は多いものの、KamLAND - LS に比べて有利な点もあることが本研究でわかった。また第 4 章で述べた加速劣化試験の結果から、LAB は集光ミラーに対する影響も少なく、化学的にも安定していることがわかった。今後十分な研究と改良を行っていけば、新たな液体シンチレータとして使用できるものになると思われる。今後の研究に期待したい。



## A.7 追加実験

ここでは、前節までで述べられなかった LAB の各種性質について述べる。実験量が少なく十分な仮説検証ができていないが、ご容赦願いたい。

### A.7.1 発光量の PPO 濃度依存性

液体シンチレータを発光させているのは PPO なので、PPO の濃度を上げれば発光量も増えると考えられる。しかし量が多すぎても発光量が頭打ちになる（サチュレーション）ことがわかっているので、本研究では LAB の発光量がどの程度の PPO 濃度で上限に達するのかを調べた。サンプルには Sasol 製の LAB（活性アルミナで純化済）を使用し、PPO の濃度を 1.5g/l から 3.0g/l まで変化させて発光量の変化を調べた。測定条件は A.4 節で述べた LAB の発光量測定の時と同様で、発光量は PC - LS との比である。測定結果を図 A.11 に示す。

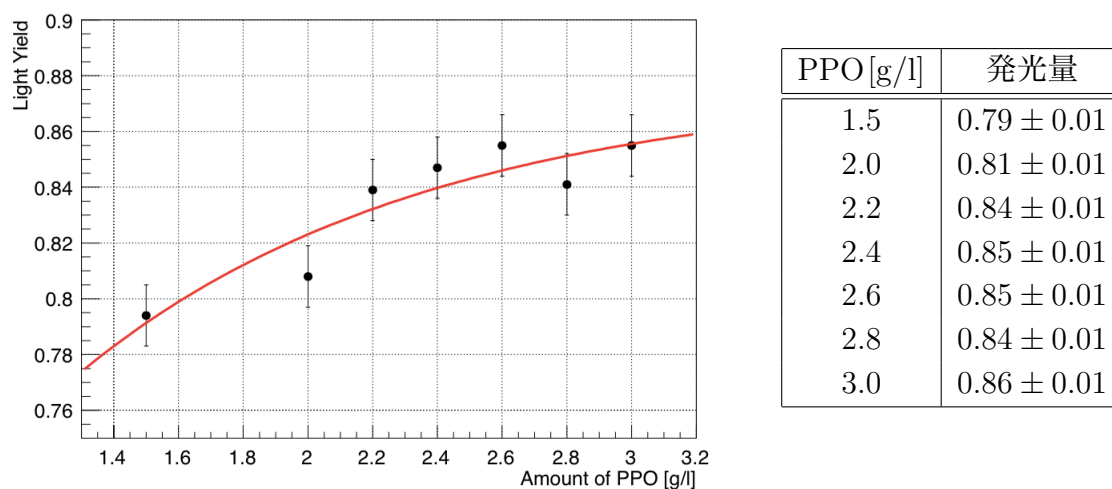


図 A.11: 発光量の PPO 濃度依存性

この結果より、PPO の濃度が 3.0g/l で既に発光量が飽和しかかっていることがわかる。従って、これ以上 PPO の量を増やしても発光量の改善は見込めないと思われる。またミニバルーンの内外的における密度制限があるため、あまり大量の PPO を溶かすこともできない。

以上のことから、発光量の改善には悪影響をおよぼす不純物の特定と、純化による除去が最適であると考えられる。

## A.7.2 Xe 溶解度の測定と発光量の評価

LAB を新しい液体シンチレータとして使用する場合、ミニバルーン内に入れるものについては Xe を溶解させなければならない。そこで、LAB に対する Xe の溶解度を測定し、A.2 節で示した要件 (3wt%以上) を満たすかどうかを確認した。また先行研究において、Xe を液体シンチレータに溶解させると発光量が減少することが示されているので、それも合わせて確認した。実験方法は参考文献 [32] を参考にした。ここでは実験方法に関する説明は割愛し、実験結果のみを示す。図 A.12 が発光量測定で得られた結果である。

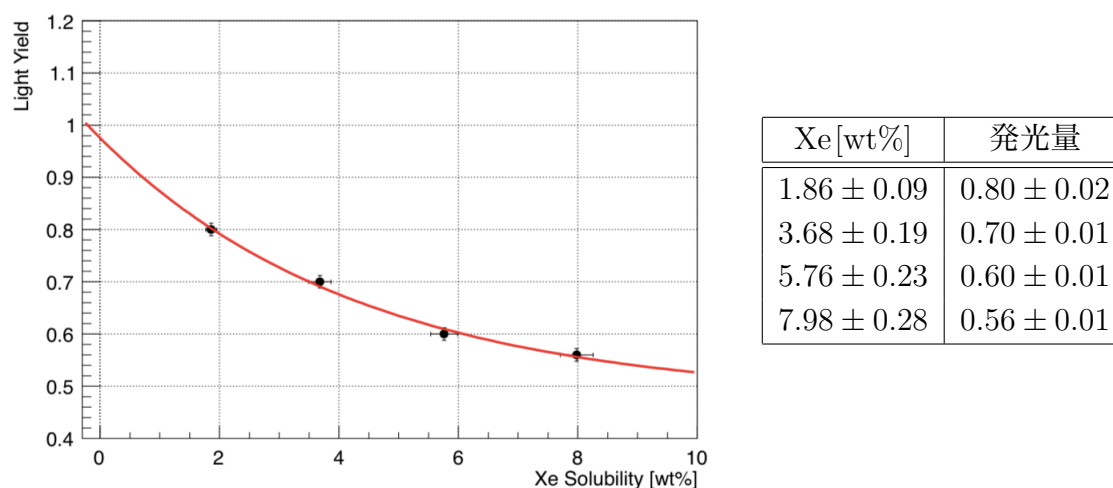


図 A.12: 発光量の Xe 濃度依存性

結果より、Xe を約 8wt% 溶かした段階で発光量が 30% 程度減少することが確認できた。だが Xe の量を増やすに従って発光量の減少傾向が緩やかになっていることから、発光量の減少には下限があるものと推測される。

一方溶解度についてだが、Xe を約 8wt% 溶かした段階での Xe の容器内圧はおおよそ 4 気圧であった。Xe の溶解度がヘンリーの法則<sup>\*1</sup>に従うと仮定すると、1 気圧あたりの溶解度は約 2wt% であり、必要な要件を満たしていないことがわかった。しかし Xe の溶解度は誤差が大きい上、実験装置からのリーク等もあった可能性があるため、実験の精度は保証できない。この結果についてはより高精度な再検討が必要である。

<sup>\*1</sup>1803 年にイギリスのヘンリーが発見した法則で「溶解度が小さい気体の場合、一定温度で、一定量の溶媒に溶ける気体の物質質量 (質量) は、その気体の圧力 (分圧) に比例する」というもの [22]。

### A.7.3 シリカゲルによる LAB の純化

A.5 節で述べた活性アルミナ以外の純化方法を探していたところ、参考文献 [10] に「シリカカラムで LAB を純化すると 410nm における吸光度が 0.011 から 0.001 まで改善した」という記述を見つけた。そこで実験室にあった吸湿用のシリカゲル ( $\text{SiO}_2$ ) を用いて LAB を純化し、純化効果を検証してみることにした。

純化方法は基本的に活性アルミナを用いた場合と同様で、シリカゲルを詰めたカラム内に LAB を通す。しかしシリカゲルは活性アルミナに比べて非常に粒が大きいいため、LAB がすぐに透過してしまう。これだけでは純化効果がほとんどないと考え、カラムを通した後の LAB 中にシリカゲルを入れて 7 日間放置した。その後、使用したシリカゲルと LAB 中に浮遊しているシリカゲルの破片を除去するために濾過を行った。実験方法の概略図を図 A.13 に示す。

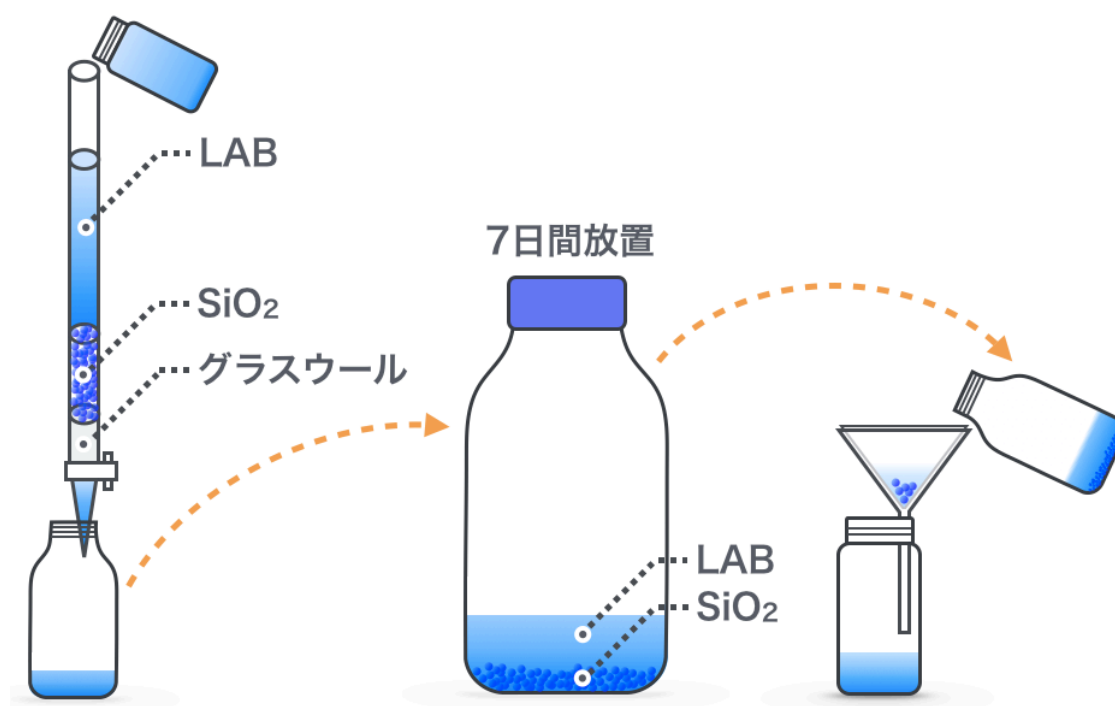


図 A.13: シリカゲル ( $\text{SiO}_2$ ) による LAB の純化

本実験では JX 製の LAB を使用した。また先の実験と同様に、透過率と発光量を測定して純化効果の検証を行った。透過率測定の結果を図 A.14 と表 A.6 に、発光量測定の結果を図 A.15 に示す。

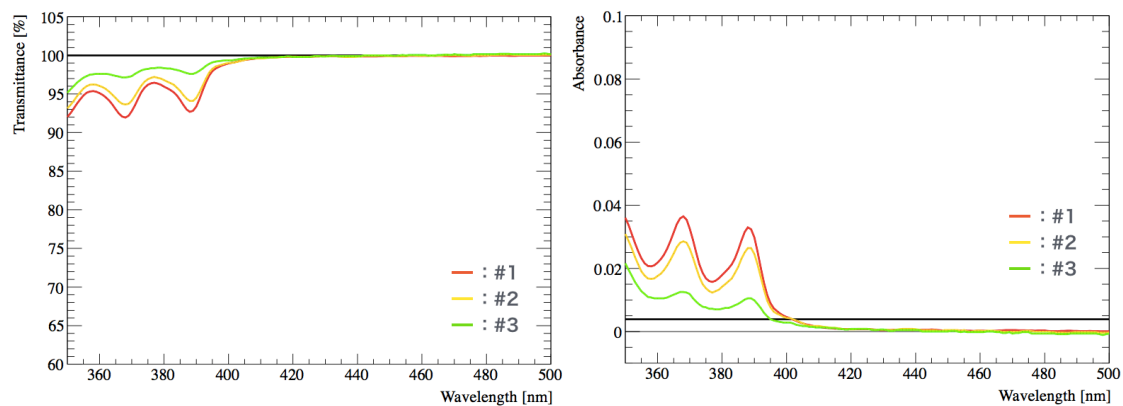
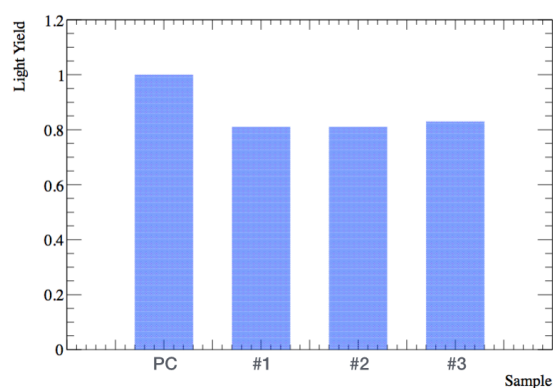


図 A.14: シリカゲルによる純化効果の検証 (左図：透過率、右図：吸光度)

実験#	サンプル情報	透過率 [%]	吸光度
# 1	純化前	96.2	$1.68 \times 10^{-2}$
# 2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> で純化	96.9	$1.37 \times 10^{-2}$
# 3	SiO <sub>2</sub> で純化	98.3	$7.67 \times 10^{-3}$

表 A.6: 測定サンプルの情報



実験#	サンプル情報	発光量
# 1	純化前	0.81 ± 0.01
# 2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> で純化	0.81 ± 0.01
# 3	SiO <sub>2</sub> で純化	0.83 ± 0.01

図 A.15: シリカゲルによる純化後の発光量 (PC - LS に対する比)

結果より、シリカゲルによる純化によって透過率および発光量が改善することがわかった。吸光度について、減衰長 10m の目安である  $3.91 \times 10^{-3}$  には至らなかったが、JX 製のサンプルに特徴的な 2 つの吸収ピークの山が小さくなっていることがわかる。このことから、PPO の発光波長付近で光を吸収する何らかの不純物がシリカゲルによって除去されたものと考えられる。また同時に、発光量に影響をおよぼす不純物も除去されたと思われる。

シリカゲルはヒドロキシ基 (-OH) を持ち、極性が非常に高いことから極性物質を強く引きつける性質がある。このことから、除去されたのは LAB を構成する物質のうち極性をもつものであると推測される。除去された物質が一種類なのか複数種類なのかは判断できないが、A.5 節で示した「透過率に影響を与える不純物と発光量に影響を与える不純物とは別物の可能性がある」という考察が正しいとするなら、シリカゲルによって LAB 中の複数の極性物質が除去された可能性が高い。

いずれにしても、本研究では透過率および発光量に影響を与えている不純物の特定には至らなかった。LAB の効率的な純化のためには、GC - MS 分析等の詳細な成分分析を行って影響の大きな不純物を調べ、それに対する効果的な除去方法を検討すべきであると思われる。

## 付録B Arrheniusの式

ある温度における化学反応の速度  $k$  は、以下に示す Arrhenius の式によって予測される。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \quad (\text{B.1})$$

ここで、 $E_a$  は1粒子あたりの活性化エネルギー、 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度、 $A$  は温度に依存しない定数である。両辺の対数を取って整理すると、B.1式は次のようにも書ける。

$$\ln(k) = a - \frac{b}{T} \quad (\text{B.2})$$

$$a \equiv \ln(A) \quad , \quad b \equiv \frac{E_a}{k_B} \quad (\text{B.3})$$

すなわち、 $\ln(k)$  は  $T^{-1}$  に比例して直線的に変化する。

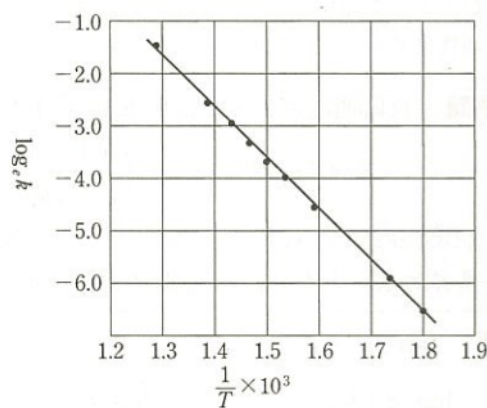


図 B.1: アレニウス・プロット ([22], p.201 より引用)

この関係から、ある反応の温度  $T$  と反応速度  $k$  の関係を実測してリニアフィットすることで、 $E_a$  と  $A$  を求めることができる。

また B.1 式から、ある温度差の時に劣化速度が何倍になるかを見積もることができる。温度が  $T_1$  および  $T_2$  の場合の反応速度をそれぞれ  $k_1, k_2$  として B.1 式に代入し、両辺の比を取って整理すると、

$$\frac{k_2}{k_1} = \exp\left(\frac{E_a}{k_B T_1} - \frac{E_a}{k_B T_2}\right) \quad (\text{B.4})$$

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{E_a}{k_B T_1 T_2} (T_2 - T_1) \quad (\text{B.5})$$

これより、対象とする物質の活性化エネルギー  $E_a$  が分かれば劣化速度が計算できる。

ここで、本研究で加速劣化試験を行ったアルミニウムの劣化速度について議論する。加速劣化試験の際には、温度が  $10^\circ\text{C}$  上昇すると劣化速度が 2 倍になると仮定した。これは経験的に、式 B.5 中の係数について

$$\frac{E_a}{k_B T_1 T_2} \simeq \frac{\ln(2)}{10} = 0.069 \quad (\text{B.6})$$

となる物質が多いことに由来する。この関係を用いて式 B.5 を整理すると、

$$\frac{k_2}{k_1} = 2^{\frac{T_2 - T_1}{10}} \quad (\text{B.7})$$

となる。これより、温度が  $10^\circ\text{C}$  上昇すると劣化速度が 2 倍になることが導かれた。

一方、アルミニウムの活性化エネルギーは  $0.5 \sim 1.0\text{eV}$  程度と報告されている。活性化エネルギーを  $0.5\text{eV}$  として、温度が  $15^\circ\text{C}$  の時と  $45^\circ\text{C}$  の時の式 B.5 中の係数を計算すると、

$$\frac{E_a}{k_B T_1 T_2} = \frac{0.5 \times 1.602 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times (273 + 15) \times (273 + 45)} = 0.063 \quad (\text{B.8})$$

この結果は B.6 式の値とよく一致しており、温度が 10 °C 上昇すると劣化速度が 2 倍になるという仮定は妥当なものであると考えられる。

しかし正確な劣化速度を調べるには、恒温槽とは別に常温、あるいはより高温の環境で同様の劣化試験を行い、それらを比較することが必要である。



## 付録C 銀蒸着集光ミラー

本研究では、成型したPETにアルミニウムを蒸着して集光ミラーを作製した。一方、ミラーの素材としてアルミと同様によく利用される銀は、KamLANDで使用されている液体シンチレータの発光波長（375nm付近）でアルミと同等かそれ以上の反射率を持つ。代表的な金属の反射率を図C.1に示す。

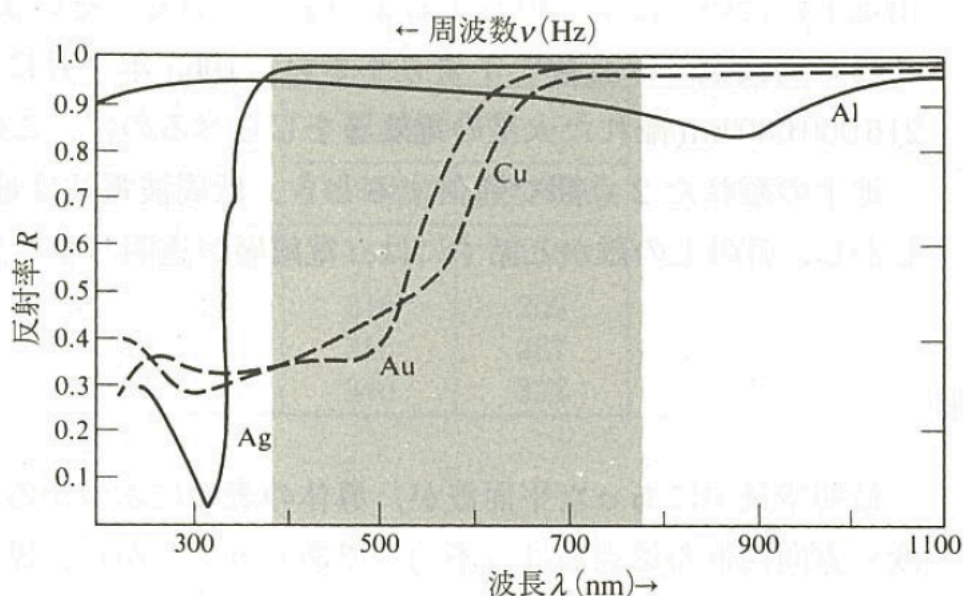


図 C.1: 代表的な金属の反射率 [20]

コスト的にはアルミの方が有利だが、反射率で大きく得をするならば銀の使用も検討する価値がある。そこで、アルミの代わりに銀を蒸着した17" PMT用のミラーを試作し、集光率の評価を行うことにした。試作したミラーを図C.2に示す。比較のために、アルミを蒸着したミラーも一緒に載せてある。

アルミを蒸着したミラーに比べて、銀を蒸着したミラーは若干黄色みを帯びていることがわかる。これは蒸着した銀が徐々に酸化してきているからである。ミラーの作製から運搬・管理までをすべて無酸素状態で行うことは不可能なので、酸



図 C.2: 銀蒸着ミラー（左図）とアルミ蒸着ミラー（右図）

化は必然的に起こる。このことから、銀蒸着ミラーの管理は非常に困難であると思われる。また表面が透けてミラーの内側がうっすらと見えていることから、銀の「のり」がアルミに比べて悪いこともわかる。このように、あまり蒸着状態がよいとは言えないが、性能を評価すべくアルミ蒸着のものと同様の手法で集光率評価を行った。評価方法は4.6.1節に示した宇宙線ミュオンを用いたものであり、実験条件もアルミ蒸着のものと同様である。評価結果を表 C.1 に示す。比較のために、アルミ蒸着ミラーの結果も一緒に載せてある。

角度[度]	集光率 (Ag)	集光率 (Al)
0	1.64 ± 0.11	2.14 ± 0.14
10	1.40 ± 0.09	1.52 ± 0.10
20	1.28 ± 0.07	1.52 ± 0.08
30	1.04 ± 0.06	1.20 ± 0.08
40	0.54 ± 0.04	0.79 ± 0.05

表 C.1: 17” PMT 用ミラー（銀蒸着）の集光率評価の結果

蒸着状態から予想した通り、アルミ蒸着のミラーと比べて集光率が劣るという結果が得られた。またアルミ蒸着のミラーと同様、40度の場合には集光率が低下するという結果になった。

以上の結果と銀蒸着の難しさやコストを考慮すると、集光ミラーに銀を用いることは現実的ではないと思われる。

## 付録D 反射の理論式

ある物質に角度 $\theta$ で光が入射した場合の反射率 $R$ は次のような式で表される（参考文献 [20]、p.196 ~ 202）。

$$R_s = \frac{(a - \cos\theta)^2 + b^2}{(a + \cos\theta)^2 + b^2} \quad (\text{D.1})$$

$$R_p = \frac{(a - \sin\theta \tan\theta)^2 + b^2}{(a + \sin\theta \tan\theta)^2 + b^2} \times R_s \quad (\text{D.2})$$

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (\text{D.3})$$

なお、上式中の $a, b$ は媒質の屈折率 $n_0$ と反射素材の複素屈折率 $\tilde{n}$ を用いて以下のように定義される。

$$a^2 = \frac{1}{2} \left[ \left\{ \gamma^2 + 4 \left( \frac{nk}{n_0^2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} + \gamma \right] \quad (\text{D.4})$$

$$b^2 = \frac{1}{2} \left[ \left\{ \gamma^2 + 4 \left( \frac{nk}{n_0^2} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \gamma \right] \quad (\text{D.5})$$

$$\gamma = \left( \frac{n}{n_0} \right)^2 - \left( \frac{k}{n_0} \right)^2 - \sin^2\theta \quad (\text{D.6})$$

$$\tilde{n} = n - ki \quad (\text{D.7})$$

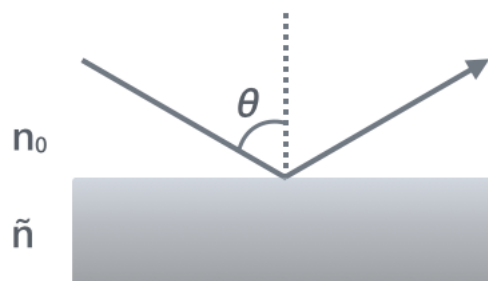


図 D.1: 反射のイメージ

この理論式を用いて、空気中およびLAB中におけるアルミニウムの反射率の角度依存性を計算した。空気の屈折率を  $n_0 = 1.00$ 、LABの屈折率を  $n_0 = 1.51$  とし、入射光の波長はPPOの発光波長である375nmとした。またアルミニウムの  $n$  と  $k$  の値はどちらの場合も  $n = 0.400$ ,  $k = 4.41$  とした。結果をプロットしたグラフを図D.2に示す。

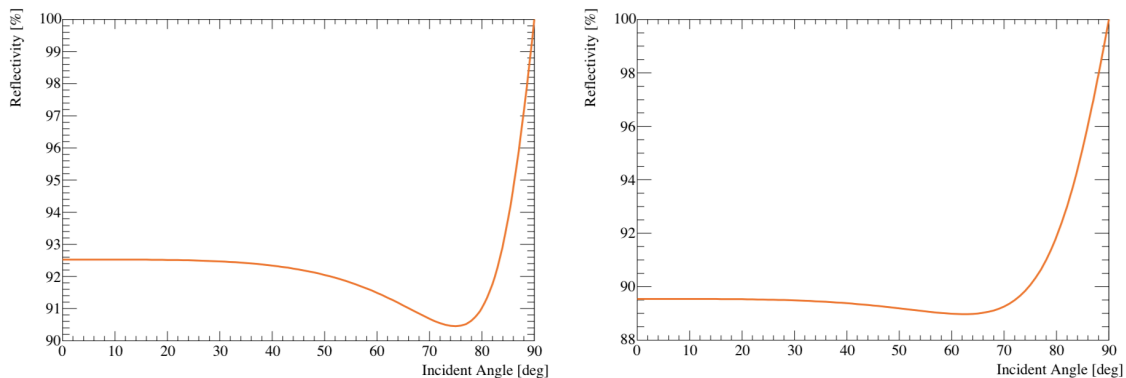


図 D.2: アルミニウムの反射率の角度依存性 (左図：空気中, 右図：LAB 中)

グラフより、空気中・LAB中どちらにおいても、アルミニウムの反射率には角度依存性があることが示された。反射率が最小となる入射角は Brewster 角と呼ばれ、p 偏光 (理論式中の  $R_p$ ) の反射率が0となる。計算結果より、空気中の Brewster 角は 75 度付近、LAB 中の Brewster 角は 62 度付近であることがわかった。

第4章の集光率評価の実験において実験結果が立体角からの予測値よりも高くなったのは、Brewster 角よりも大きい角度でミラーに入射した光が多かったためだと考えられる。

## 付録E 20” PMT用集光ミラーの 試作品の評価結果一覧

試作品番号	集光率				
	0度	10度	20度	30度	40度
4	1.66	2.00	1.88	1.86	1.22
5	1.72	2.20	2.00	2.18	1.63
7	1.79	2.13	1.97	2.11	1.56
10	1.76	2.13	2.00	2.14	1.56
11	1.69	1.90	1.66	1.71	1.19
12	1.55	1.90	2.16	2.21	1.47
13	1.83	2.23	2.25	2.43	1.75
15	1.93	2.23	2.31	2.54	1.78
16	1.83	2.23	2.25	2.36	1.81
17	2.10	2.50	2.44	2.61	1.84
19	1.93	2.43	2.41	2.43	1.91
21	1.90	2.50	2.38	2.54	1.75
23	2.10	2.50	1.81	2.29	1.66
25	1.90	2.23	2.16	2.18	1.56
26	1.79	2.17	2.22	2.21	1.53
27	1.69	2.00	1.94	2.04	1.47

表 E.1: 集光率評価を行った16個の試作品の結果一覧

## 付録F ROBASTの導入

ここでは、既にROOTを使える環境が整っているものとして話を進める。ROOT環境の構築方法については公式ホームページ (<http://root.cern.ch/drupal/>) や各種文献を参考にされたい。

### 1. ROBAST のインストール

ダウンロード用のホームページ (<http://sourceforge.net/projects/robast/>) の Download をクリックし、ROBAST をダウンロードする。2015年1月5日現在、最新バージョンは `robast_v2.2` である。ダウンロードしたファイルを解凍し、適当なディレクトリに置く（ここでは仮に “`/home/username/local/`” の下に置いたとする）。

### 2. ROBAST の環境構築

解凍してできたファイルに移動し (`cd /home/username/local/robast_v2.2/`)、ターミナルで `make` コマンドを実行する。すると “`libROBAST.rootmap`” と “`libROBAST.so`” というファイルが作成され、ROBAST を使用できる環境が構築される。

### 3. パスの設定

自身のホームディレクトリにある “`.bashrc`” に以下の1行を追加する。

```
export LD_LIBRARY_PATH=${LD_LIBRARY_PATH}:/home/username/local/robast_v2.2:${HOME}
```

変更を保存し、ターミナルで以下のコマンドを実行する。

```
source .bashrc
```

これで先程の変更が反映され、ROBAST が使用できるようなる。

# 付録G 実験方法のまとめ

## G.1 反射率測定

### G.1.1 光学系の詳細

#### 使用機材一覧

- ・ 島津ステッピングモータ&コントローラ (AT-100PCC)
- ・ 島津小形分光器スペクトロメイト ホトマルホルダ (AT-120PM)
- ・ 島津小形分光器スペクトロメイト チョッパユニット (AT-120CH)
- ・ 島津小形分光器スペクトロメイト キセノンランプ単色光源セット
- ・ 島津小形分光器スペクトロメイト (SPG-120UV)
- ・ 分光器用コントロールアンプ (AT-120AP)
- ・ 光ファイバーつき積分球

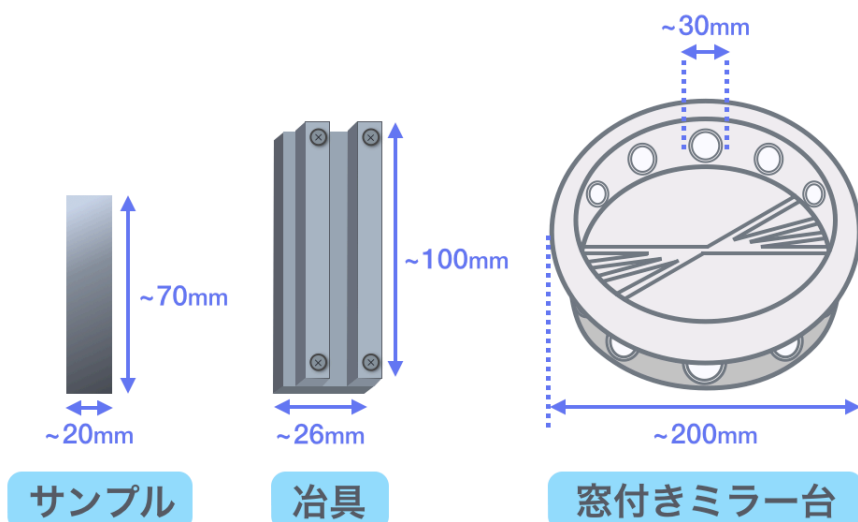


図 G.1: 反射率測定で使用する道具

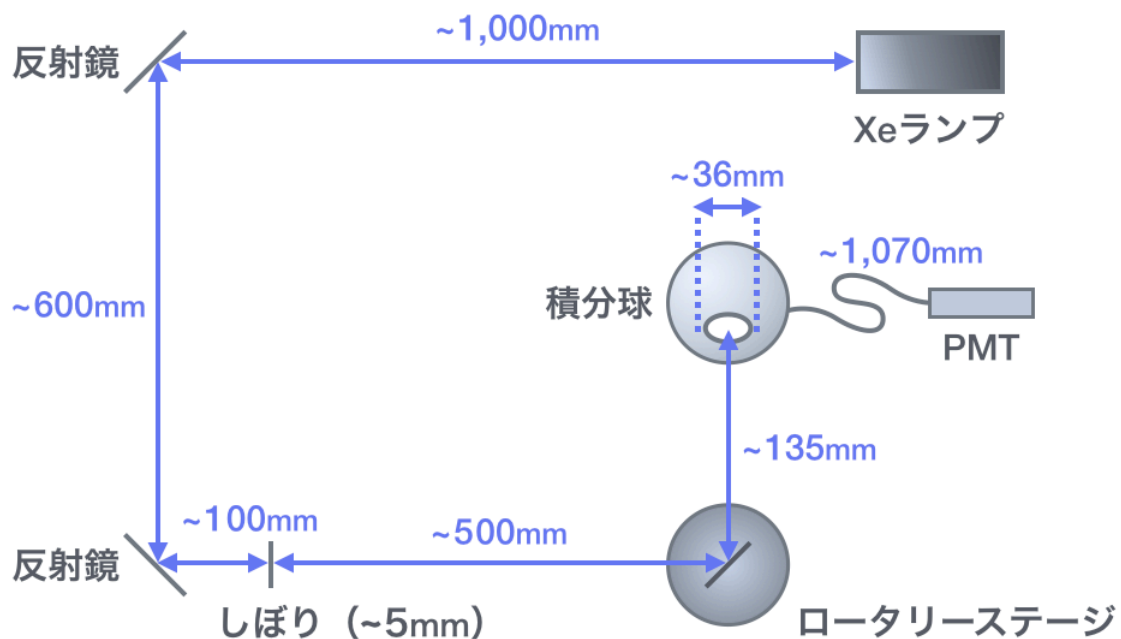


図 G.2: 光学系の詳細図

### G.1.2 反射率測定の手順

1. 温度管理用クーラー・光源・ステッピングモータの電源を ON にする。
2. 制御用 PC で WaveLengthScan (version 2).xls を起動し、Initialize する。うまく通信ができるとステータスがともに「通信終了」となる。
3. HV を 450V, Gain を 20 に設定して、安定化のために 1 時間待つ。
4. 波長を 500nm ぐらいに設定し、光が積分球に入っていることを確認した後、リファレンスを 5 回測定する。
5. 評価するサンプルの反射率を測定する。
6. 前半と同様リファレンスを 5 回測定する。
7. HV と Gain を 0 にし、すべての装置の電源を切って終了。



### G.1.3 反射率測定誤差

反射率測定の前で5回ずつ測定するリファレンスの値は、本来ならばすべて同じになるはずである。しかし測定装置の系統誤差や時間安定性の影響で、その値が若干変化してしてしまう。そこで、反射率測定の前半で測定したリファレンス5回の平均値と、後半で測定したリファレンス5回の平均値の比を取って、どの程度値がふらつくかを評価した。その結果が図 G.3 である。縦軸の Ratio は

$$\text{Ratio}[\%] = \frac{\text{前半5回のリファレンスの平均値}}{\text{後半5回のリファレンスの平均値}} \times 100 \quad (\text{G.1})$$

である。

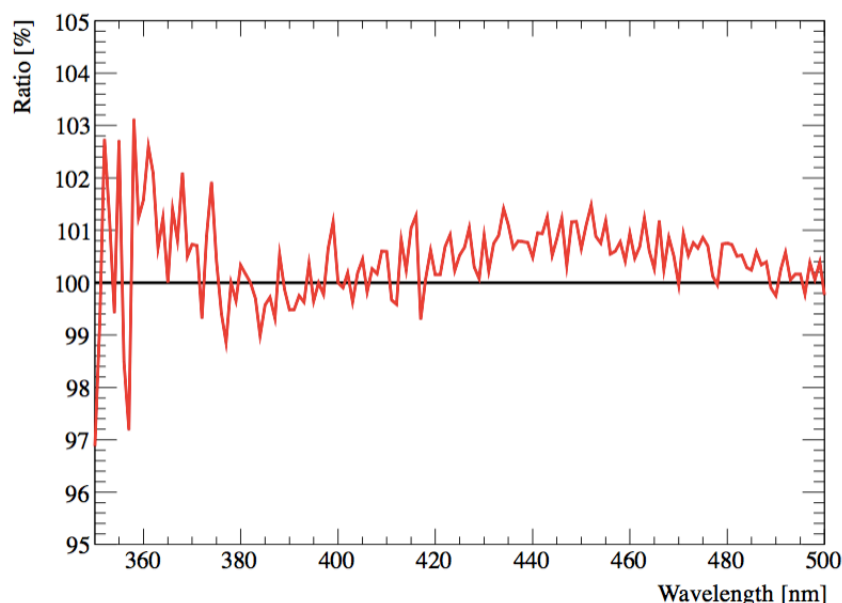


図 G.3: 反射率測定装置の安定性

結果から分かるように、測定値にはかなりのふらつきがあることがわかった。特に 380nm 以下の領域では、ふらつきが 3% 以上もあることが判明した。

そこで反射率測定の結果には、このふらつきを考慮して  $\pm 3.5\%$  のエラーをつけることにした。このように測定値が大きくふらつく原因はわかっていないが、この実験以外の実験で実験室の電源を使用することによる電気ノイズが影響している可能性が考えられる。正確な測定のために、原因の調査と改善が求められている。

## G.2 透過率測定

1. 測定装置本体と PC の電源を入れ、測定用プログラム（UV Solutions3.0 for U-3900）を起動する。
2. 光源安定化のために 30 分待つ。
3. セルを洗浄する。
  - 3.1. ケイドライを 2 つ折にして折れ目側から約 2cm 四方の布巾を切り取る
  - 3.2. それを 4 つ折りにし、アセトンを染みこませる
  - 3.3. 布巾をピンセットでつまみ、汚れがとれるまで丁寧にセルを拭く

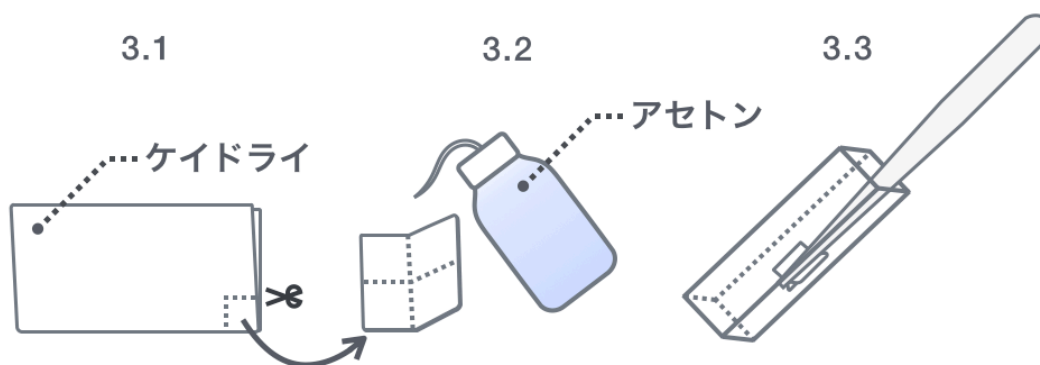


図 G.4: セル洗浄の手順

4. セルを装置にセットし、両セルにベースライン用シクロヘキサンを入れてベースラインを設定する。
5. セルを洗浄してセットし、両セルに測定サンプルを入れて測定を行う。なお、サンプルを入れる際に混入したホコリが沈むまで待つために、測定はサンプルをセルに入れてから 5 分程度待つて行う。
6. 1 サンプルにつき 3 回の測定を行い、その平均値をそのサンプルの透過率とする。なお装置の特性とヒューマンエラーの関係上、測定値には 0.3% 程度の誤差が付く。
7. プログラムを終了し、測定装置と PC の電源を切って終了。

ホコリ 1 つでも透過率の値が変わってしまうことがあるので、セルの汚れに関しては特に注意する。透過率  $T$  は

$$\text{透過率 } T [\%] = \frac{10 \text{ cm (Sample)} / 10 \text{ cm (Baseline)}}{1 \text{ cm (Sample)} / 1 \text{ cm (Baseline)}} \times 100 \quad (\text{G.2})$$

で与えられるので、おおまかな目安として 1 cm セルが汚れている場合は透過率が高くなり、10 cm セルが汚れている場合は低くなる傾向がある。測定用アプリケーションに表示される値を見ながら、汚れの有無を判断するとよい。

## G.3 ミラーの集光率評価（窒素レーザーを用いた測定）

### G.3.1 使用機材の詳細

#### 使用機材一覧

- Laser Photonics 社製窒素レーザー LN203C
  - 入射光波長 :  $337.1 \pm 0.1$  [nm]
  - エネルギー :  $100$  [ $\mu$ J / Pulse]
  - パルス幅 :  $600$  [ps FWHM]
- FUJIKURA 光ファイバー SC200 / 250
  - コア径 :  $200$  [ $\mu$ m]
  - クラッド径 :  $250$  [ $\mu$ m]
  - 長さ :  $\sim 130$  [m]
- Kenko Filter PRO
  - ND2 :  $2$  [枚]
  - ND4 :  $2$  [枚]
  - ND8 :  $4$  [枚]
- 浜松ホトニクス PMT
  - 2" PMT :  $2$  [本]
  - 20" PMT :  $1$  [本]
- LAB - LS
  - 液量 :  $100$  [ml]
  - PPO :  $2.00$  [g/l]

LAB - LS に窒素レーザーを打ち込むことでPPOに吸収再発光を起こさせ、その時に放出されるシンチレーション光を2" PMT および 20" PMT で検出する。

### G.3.2 レーザー出力の時間安定性

レーザーの光量補正の方法については4.6.2節で述べたとおりだが、あまりに出力が変動するようでは実験精度に疑問が生じる。そこで、同一条件のもとで繰り返し集光率の測定を行い、レーザー出力の時間安定性を評価することにした。

測定条件は角度0度・ミラーなしとし、レーザーの電源を入れた直後から105分後までの出力の変化を測定した。結果を図G.5に示す。

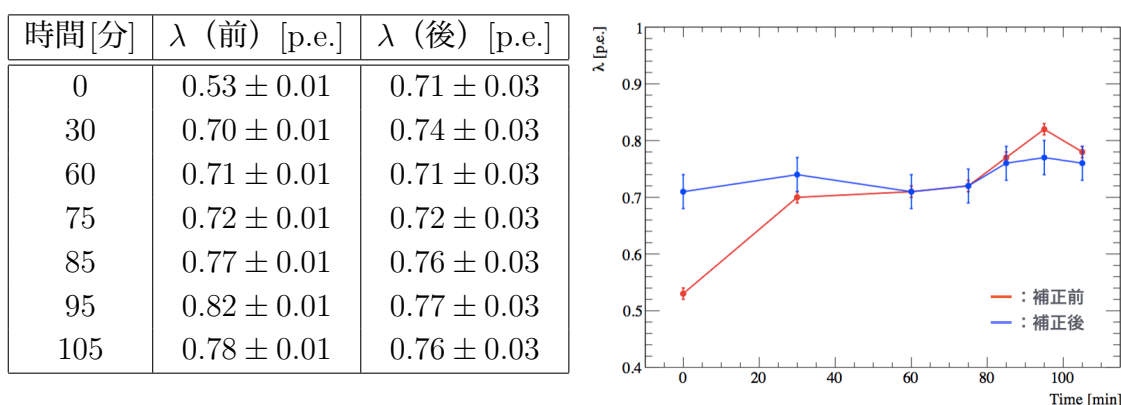


図 G.5: レーザー出力の時間安定性。(前)が補正前、(後)が補正後の $\lambda$ の値。

結果より、レーザーの電源を入れた直後は出力が弱いこと、時間経過に伴って出力が高くなることがわかった。しかし4.6.2節で考えた補正をかけると、 $\lambda$ の値は誤差の範囲内でほぼ一致している(60分後の $\lambda$ の値を基準に補正をかけた)。

これにより、時間経過によるレーザー出力の変動に対して先の補正が有効であることが示された。出力の安定性に関しては若干の不安があるものの、補正によってそれを解消することができる。ただし、あまりにも出力が弱いと十分な統計をためられなくなる可能性があるため、レーザーの安定化のために電源を入れてから測定開始まで1時間待つことにした。

### G.3.3 集光率測定の手順

1. 窒素レーザーの電源を入れ、発振周波数に合わせて窒素流量を調整する（詳しくは窒素レーザーのマニュアルを参照）。
2. レーザーの出力安定のために1時間待つ。
3. 暗箱を開けてミラーをセットし、PMTの角度を調整する。暗箱の蓋を閉めた後、PMTにHVをかける。20” PMT用のHVは電源を入れたときに自動的にREMOTEモードになるが、そのままだと突然高電圧がかかることがあり非常に危険なので、すぐにMANUALモードに切り替える。
4. データ収集用PCでsmallkinokoを起動し、データを収集する。なお、測定中は光漏れの可能性を考慮し、部屋の電気を消しておいたほうがよい。
5. 測定条件を変える際はHVがOFFになっていることを確認してから暗箱の蓋を開ける。
6. 測定後はHVを落とし、窒素レーザーの電源を切ったのち窒素の供給を止めて終了。

## 参考文献

- [1] "Light Concentrators for Borexino and CTF", L. Oberauer et al, Nucl.Instrum.Meth. A530 (2004) 453-462,2003
- [2] "Light Collectors for Borexino", I.Manno, June 3,1997
- [3] "Scintillation and Light Sensitive Detector - I", Mark Chen, Queen's University
- [4] "An upper limit on electron antineutrino mass from Troitsk experiment", V.N. Aseev et al, Phys.Rev., Vol. D84, p.112003,2011
- [5] "CONSTRAINTS ON COSMOLOGY FROM THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND POWER SPECTRUM OF THE 2500 deg<sup>2</sup> SPT-SZ SURVEY", Z. Hou et al, arXiv:1212.6267v2
- [6] "Planck 2013 result. XXI. Cosmological parameters", Planck Collaboration, arXiv:1303.5076v3
- [7] "Discovery potential of xenon-based neutrinoless double beta decay experiments in light of small angular scale CMB observations", J.J. Gómez-Cadenas et al, arXiv:1301.2901
- [8] B.Pritychenko, BNL-91299-2010 (2010)
- [9] "Development of Non-sequential Ray-tracing Software for Cosmic-ray Telescopes", AKIRA OKUMURA et al
- [10] "PHYSICAL PROPERTIES OF LIQUID SCINTILLATORS", Peter D.Grach, MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS, UNIVERSITY OF HAWAII LIBRARY, DECEMBER 2006

- [11] "Constraints on  $\theta_{13}$  from A Three-Flavor Oscillation Analysis of Reactor Antineutrinos at KamLAND", A. Gando et al. (The KamLAND Collaboration) ,Phys. Rev. D83 (2011) 052002
- [12] "Partial radioigentic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements", A. Gando et al. (The KamLAND Collaboration) ,Neutrino Geoscience 4, 647-651 (2011)
- [13] "Latest results from the heidelberg-moscow double beta decay experiment", H.V. et al: Klapdor-Kleingrothaus.,European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei, Vol. 12, pp.147154,2001.
- [14] "THE EVIDENCE FOR THE OBSERVATION OF  $0\nu\beta\beta$  DECAY:THE IDENTIFICATION OF  $0\nu\beta\beta$  EVENTS FROM THE FULL SPECTRA", H. V. KLAPDOR-KLEINGROTHAUS and I. V. KRIVOSHEINA,Modern Physics Letters A Vol. 21, No. 20 (2006) 15471566
- [15] "Search for Neutrinoless Double-Beta Decay in  $^{136}\text{Xe}$  with EXO-200" M. Auger et al. (EXO Collaboration) ,Phys. Rev. Lett. 109, 032505 Published 19 July 2012
- [16] "Limit on Neutrinoless  $\beta\beta$  Decay of  $^{136}\text{Xe}$  from the First Phase of KamLAND - Zen and Comparison with the Positive Claim in  $^{76}\text{Ge}$ ", A. Gando et al. (KamLAND Collaboration) ,Phys. Rev. Lett. 110, 062502,7 February 2013
- [17] "Taschenbuch für Chemiker und Physiker" Dns J., Lax E. S.1220 - 1223
- [18] 「ニュートリノでめぐる素粒子・宇宙の旅」,C.サットン 著, 鈴木 厚人 訳, シュプリンガー・ジャパン株式会社
- [19] 「光電子増倍管 その基礎と応用 第3a版」,HAMAMATSU
- [20] 「ヘクト光学 I —基礎と幾何光学—」,Eugene Hecht 著, 尾崎義治・朝倉利光 訳, 丸善株式会社
- [21] 「基礎化学コース 光化学 I」,井上晴夫 他著, 丸善株式会社
- [22] 「化学 I・II の新研究」,ト部吉庸 著, 三省堂



- [23] 田中 駿也, 修士論文, 「次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡用ライトガイドの量産化に向けた基礎開発」, 茨城大学, 平成 25 年度
- [24] 黒田 和典, 「PMT 応答測定実験とライトガイド試作」, 茨城大学, 平成 24 年
- [25] S.Hatakeyama et al, TOHOKU-HEP-NOTE-95-05, 1995
- [26] 丸藤 祐仁・井上 邦雄, 実験紹介, 「KamLAND - Zen 実験」, 東北大学ニュートリノ科学研究センター, 2011 年
- [27] 「KamLAND - Zen 実験」, 丸藤 祐仁, 東北大学ニュートリノ科学研究センター, 2014 年 1 月 20 日第 27 回宇宙ニュートリノ研究会@東京大学宇宙線研究所
- [28] 田頭 健司, 修士論文, 「高精度 17" 光電子増倍管の性能計測研究」, 東北大学, 平成 11 年度
- [29] 小畑 旭, 修士論文, 「Xe を用いた二重ベータ崩壊実験のための集光ミラーと大光量液体シンチレータの開発」, 東北大学, 平成 24 年度
- [30] 海老原 高士, 修士論文, 「太陽ニュートリノ検出を目指す超高純度カムランド液体シンチレーターの性能維持の研究」, 東北大学, 平成 18 年度
- [31] 渡辺 寛子, 修士論文, 「電子型反ニュートリノの方向検出に向けたリチウム含有液体シンチレータの開発」, 東北大学, 平成 20 年度
- [32] 加藤 領, 「ニュートリノレス 2 重ベータ崩壊観測のための液体シンチレータ開発」, 平成二十四年度
- [33] 松田 涼太, 修士論文, 「加圧環境下におけるニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の高感度化に向けた研究開発」, 東北大学, 平成 25 年度
- [34] 吉田 学立, 修士論文, 「液体シンチレータでの粒子識別による  $\alpha$  線バックグラウンド除去の研究」, 東北大学, 平成 22 年度
- [35] 大和田 憲太郎, 修士論文, 「水を主成分とする液体シンチレータの開発」, 東北大学, 平成 15 年
- [36] 松田 さゆり, 修士論文, 「第一期 KamLAND-Zen 実験における  $^{136}\text{Xe}$  のニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊に対する制限」, 東北大学, 平成 24 年