

修士論文

海洋底ニュートリノ検出器 OBD の検出器構造設計

Detector structure design for the Ocean Bottom Neutrino Detector, OBD

東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻

小野 隆伸

2025 年

## 概要

地球内部の主要な熱源は、形成時から残存する原始の熱と、地球内放射性物質の崩壊に伴い発生する放射性熱であると考えられている。しかし、その熱量配分や分布は依然として不確定である。特にマントル由来の放射性熱量は地球科学分野の予想に 20 倍もの開きがあり、地球深部の構造や熱進化を理解する上で重要な問題である。そこで、地球内放射性物質の崩壊時に熱とともに放出される反ニュートリノ (地球ニュートリノ) の観測が、地球内部の情報を担う新たな観測手段として発展してきた。地球ニュートリノ観測では、地殻とマントル由来の合計という大局的な情報が得られる一方で、大陸上の実験では地殻由来が 70% を占めるため、マントル由来の知見を得にくいという問題がある。この課題を解決するため提案されたのが、海洋底ニュートリノ検出器 OBD である。

OBD では、地殻の薄い海洋底においてマントル由来を高精度に観測することで、地球の熱量モデルやマントルの放射性熱量の測定を目指している。検出器構成については、物理観測のシミュレーションを行った先行研究により、最外層のステンレスタンクと液体シンチレータを内包するアクリル容器の形状や大きさは決定されていた一方で、その厚みは最適化されていなかった。さらに、深海の低温・高圧という特殊環境や、バッファオイルと液体シンチレータの密度差に比例してアクリル容器に作用する荷重に起因するクリープ破断についても考慮されていなかった。本研究では、OBD の実現に向け、未定であったバッファオイルの選定やアクリルのクリープ特性の測定、長期安全性と集光量を考慮した検出器構造の設計を行った。

まず、バッファオイルについて複数の候補を抽出し、透過率・屈折率・密度の観点から評価を行った。その結果、ハイコール K-290 と呼ばれるパラフィン系オイルをバッファオイルとして採用することとした。さらに、アクリルに一定荷重を与えて破断寿命を測定するクリープ試験を実施し、10 年規模の運用を想定したときに許容される設計応力の上限値を 19.2 MPa と決定した。

以上の結果を考慮して、長期安全性を評価する構造解析と集光量の評価を行った。構造解析より、ステンレスタンクの必要厚みは上部で 3 cm、側面で 1 cm、下部で 10 cm であることがわかった。また、アクリル容器の厚みについては、支持を設けずアクリルを厚肉化した場合と、ステンレス支柱により支持を導入することでアクリルを薄肉化した場合の 2 通りを検討した。その結果、支持を設けない場合にはアクリル厚みとして 7 cm が必要となる一方で、ステンレスによる支持構造を導入した場合は、アクリル本体に作用する負荷の低減を実現することで、厚みは 1 cm と大幅に削減できるとの結果を得た。構造の本数や位置についても最適化を行い、直径 20 cm の支柱 8 本を赤道部分に配置する形状となった。これらの結果をもとに、支持構造の有無およびステンレス支柱の反射率を変化させ、PMT での光検出率を評価した。その結果、支柱にノイズとなる反射光低減のためブラックシートを巻き付け、反射率を 0% と仮定した場合であっても、集光量への影響は小さいことが確認された。また、検出器を地上で完成させ、船舶で設置場所まで運び沈設するため、外力の影響も考慮する必要がある。以上の理由から、ブラックシートを巻き付けたステンレス支柱による支持構造を最終案として採用した。

# 目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	ニュートリノ物理学	3
2.1	素粒子標準模型におけるニュートリノ	3
2.2	ニュートリノ振動	4
2.2.1	太陽ニュートリノ問題	5
2.2.2	大気ニュートリノ異常	5
2.2.3	真空中でのニュートリノ振動	6
2.2.4	物質効果 (MSW 効果)	9
2.3	ニュートリノ振動観測実験	11
2.3.1	Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 実験	11
2.3.2	Tokai to Kamioka (T2K) 実験	12
2.3.3	KamLAND 実験	12
2.4	ニュートリノの質量階層性問題	13
第 3 章	ニュートリノ地球科学	17
3.1	地球の内部構造	17
3.2	地球の熱源と熱量モデル	20
3.3	ニュートリノ地球科学の誕生	20
3.4	地球ニュートリノ観測の現状	22
3.4.1	KamLAND	22
3.4.2	Borexino	24
3.4.3	SNO+	26
3.4.4	JUNO	27
3.5	地球ニュートリノ観測の課題	29
3.5.1	$^{40}\text{K}$ 系列の地球ニュートリノ観測	29
3.5.2	検出器の角度分解能	29
3.5.3	地殻寄与の不定性	31
第 4 章	海洋底ニュートリノ検出器 OBD	35

4.1	OBD プロジェクト	36
4.2	大型検出器の構造	36
4.2.1	内部検出器	37
4.2.2	外部検出器	40
4.3	ニュートリノ検出原理	40
4.3.1	地球ニュートリノ検出	40
4.3.2	大気ニュートリノ検出	41
4.4	プロトタイプ検出器	42
4.4.1	目的と設置場所	42
4.4.2	構成要素	42
4.5	海洋底ニュートリノ検出器の特徴	46
4.6	本研究の目的と位置づけ	49
<b>第5章</b>	<b>バッファオイルの選定</b>	<b>51</b>
5.1	バッファオイル候補	52
5.2	透過率測定	52
5.2.1	測定原理	52
5.2.2	測定方法	53
5.2.3	測定結果	53
5.3	屈折率測定	56
5.3.1	測定原理	57
5.3.2	測定方法	57
5.3.3	測定結果	58
5.4	密度測定	60
5.4.1	測定原理	60
5.4.2	測定結果	61
<b>第6章</b>	<b>アクリルの強度試験</b>	<b>65</b>
6.1	引張試験	66
6.1.1	測定方法	66
6.1.2	測定結果	69
6.1.3	重合方法の変更	70
6.2	クリープ試験	71
6.2.1	測定方法	72
6.2.2	測定結果	73
<b>第7章</b>	<b>検出器の構造設計</b>	<b>75</b>
7.1	概要	75
7.2	ジオメトリ	77

---

7.3	応力解析の妥当性確認 . . . . .	79
7.4	工学的安全性の評価 . . . . .	81
	7.4.1 ステンレスの厚みの最適化 . . . . .	81
	7.4.2 アクリルの厚みの最適化 . . . . .	84
7.5	集光量の評価 . . . . .	92
7.6	新たな課題 . . . . .	95
<b>第 8 章</b>	<b>結論と今後の展望</b>	<b>99</b>
8.1	結論 . . . . .	99
8.2	今後の展望 . . . . .	100
<b>謝辞</b>		<b>101</b>



# 目次

2.1	素粒子標準模型	3
2.2	ライネスとコワンの用いた検出器 (左図) と遅延同時計測法 (右図)	4
2.3	太陽内部の主要な pp 連鎖反応	5
2.4	標準模型による太陽ニュートリノフラックス	6
2.5	CC 反応と NC 反応のファインマンダイアグラム	9
2.6	SNO 実験での太陽ニュートリノフラックスの観測結果	11
2.7	T2K が観測した電子ニュートリノの出現	12
2.8	KamLAND が観測した原子炉ニュートリノの振動	13
2.9	ニュートリノの質量階層性	14
3.1	地球の内部構造の模式図	17
3.2	地震波観測に基づく地球構造モデリング	18
3.3	PREM による地震波速度 (左図) と密度 (右図)	19
3.4	地球全体における LLSVP の分布	19
3.5	BSE モデルにおける地殻とマントルの熱量の割合 (上図) と地殻の熱量 (下図)	21
3.6	地球ニュートリノのエネルギースペクトル	22
3.7	KamLAND の概要図	23
3.8	KamLAND におけるエネルギースペクトル	23
3.9	KamLAND における BSE モデルの判別	24
3.10	Borexino の概要図	24
3.11	Borexino における地球ニュートリノの観測結果	25
3.12	Borexino における BSE モデルの判別	25
3.13	SNO+ の概要図	26
3.14	SNO+ における地球ニュートリノの観測結果	27
3.15	JUNO の概要図	28
3.16	JUNO における地球ニュートリノの観測結果	28
3.17	WbLS でのシンチレーション光とチェレンコフ光の分離	30
3.18	KamLAND における距離ごとの地球ニュートリノ寄与	32
3.19	各検出器での全地球ニュートリノ観測数と地殻由来の観測数の関係	33

4.1	Hanohano の概略図	35
4.2	1.5kt 検出器の予想スペクトル	36
4.3	17kt 検出器の予想スペクトル	36
4.4	大型検出器の概略図	37
4.5	20 inch PMT	38
4.6	PMT の原理	38
4.7	LAB の温度と圧力に対する密度変化	40
4.8	逆ベータ崩壊反応による反電子ニュートリノの検出	41
4.9	大気ニュートリノ検出原理	42
4.10	深海 1 km におけるミューオンのエネルギー分布	43
4.11	深海総合観測ステーション	43
4.12	プロトタイプ検出器の概要図	44
4.13	ステンレス製タンク	44
4.14	液体シンチレータタンク	45
4.15	圧力補償ホース	45
4.16	D-Egg の概要	46
4.17	反電子ニュートリノ総量への寄与	47
4.18	KamLAND における地球ニュートリノと原子炉ニュートリノスペクトル	47
4.19	地球ニュートリノフラックスの分布図	48
4.20	Hanohano 検出器	49
4.21	Hanohano のバッファオイル	50
5.1	透過率測定概念図	53
5.2	セルに入った気泡	54
5.3	室温でのバッファオイル候補の透過率	54
5.4	変換したバッファオイル候補の透過率	55
5.5	測定中の温度変化	56
5.6	オイル D の透過率の温度依存性	56
5.7	臨界角法概念図	57
5.8	2°C での屈折率	58
5.9	OBD-LS とアクリル間のフレネル反射	59
5.10	ハイコール K-290 とアクリル間のフレネル反射	60
5.11	高圧用振動式密度計の概略図	61
5.12	HOT-335 の観測地点	62
5.13	HOT-335 での圧力と温度	62
5.14	OBD-LS とハイコール K-290 の水深と密度の関係	63
5.15	OBD-LS とハイコール K-290 の密度差	64

---

6.1	典型的なクリープ曲線	65
6.2	クリープによる内部構造の変化	66
6.3	引張試験の試験片の規格	67
6.4	一括作成したアクリル試験片	67
6.5	重合接着したアクリル試験片	67
6.6	試験装置 (左図) と恒温槽内部の様子 (右図)	68
6.7	破断した試料	68
6.8	引張試験結果の一例	69
6.9	強度への液体シンチレータやバッファオイル、重合の影響	70
6.10	重合接着したアクリル試験片 (2 回目)	70
6.11	再重合したアクリルの強度	71
6.12	クリープ試験の試験片の規格	72
6.13	クリープ試験の試験片	72
6.14	試験装置 (左図) と恒温槽内部の様子 (右図)	73
6.15	クリープ試験結果	73
7.1	アクリルとバッファオイルの減衰長の比較	77
7.2	検出器ジオメトリ	78
7.3	アクリル容器の応力分布	80
7.4	ステンレスの応力分布	80
7.5	厚み 1 cm の際の深海における安全率分布	82
7.6	厚み 1 cm の際の地上における安全率分布	82
7.7	上部下部の厚みを 3 cm に変更した際の深海における安全率分布	83
7.8	上部下部の厚みを 3 cm に変更した際の地上における安全率分布	83
7.9	下部の厚みを 10 cm に変更した際の地上における安全率分布	84
7.10	アクリル厚み 5cm で支持なしの場合の応力分布	85
7.11	支持なしの場合のアクリルの厚みと最大応力の関係	85
7.12	JUNO におけるアクリル容器とステンレスの連結構造	86
7.13	JUNO におけるアクリル支持ノードの案	86
7.14	本研究におけるアクリル容器とステンレスタンクの結合構造	87
7.15	アクリル容器への支持構造の追加案	87
7.16	赤道部を支持した場合の応力分布	88
7.17	SNO+ で使用されるロープ支持構造	91
7.18	OBD-LS の発光スペクトル	93
7.19	支持なしのジオメトリ (左図) とステンレス支柱で支持したジオメトリ (右図)	93
7.20	光子数と光検出率の関係	94
7.21	Hanohano プロジェクトの検出器沈設イメージ	96



# 表目次

2.1	測定から得られたニュートリノ振動パラメータ	14
3.1	地球の各層のパラメータ	19
4.1	液体シンチレータの構成要素	37
4.2	ガラスシールド中の放射性物質質量	39
4.3	OBD-LS の構成要素	45
5.1	KamLAND バッファオイルの構成要素	51
5.2	バッファオイルの候補	52
5.3	2°C での屈折率フィットのパラメータ	59
5.4	ハイコール K-290 の密度測定結果	61
5.5	OBD-LS の密度測定結果	61
5.6	等温圧縮率と体積膨張率	63
6.1	液体シンチレータやバッファオイルへ浸漬、または重合した際の強度パラメータ	69
6.2	重合したアクリルの強度パラメータ	71
6.3	荷重と破断寿命	74
7.1	既存ニュートリノ実験における集光量	75
7.2	各検出器構造物の大きさや密度	78
7.3	仮定した光検出器モジュールの構成	79
7.4	各材質の材料特性	79
7.5	各支持位置における最大応力	88
7.6	ステンレス支柱支持における厚みと最大応力	89
7.7	支持用ステンレス支柱の本数と最大応力	89
7.8	JUNO の放射性不純物濃度	89
7.9	放射性不純物由来のバックグラウンドレート	90
7.10	支柱支持のバックグラウンドへの影響	90
7.11	放射性不純物濃度	91
7.12	紐支持のバックグラウンドへの影響	92

---

7.13 光検出率の比較 ..... 95

# 第1章

## 序論

地球の熱源は、形成時から残存する原始の熱と、地球内放射性物質の崩壊時に発生する放射性熱であると考えられている。しかし、その熱バランスや分布は未だ解明されていない。特にマンツルの放射性熱量は地球科学分野の予想に20倍もの開きがあり、地球深部や熱進化を理解する上で重要な問題である。そこで、地球内放射性物質の崩壊時に熱とともに放出される反ニュートリノ(地球ニュートリノ)の観測が、地球内部の情報を得るための新たな手段として注目され、ニュートリノ地球科学として発展してきた。地球ニュートリノの観測は2005年、岐阜県神岡鉱山内の液体シンチレータ検出器 KamLAND が世界初観測をし、放射性熱量など様々な知見を与えている。しかし、現在の地球ニュートリノ観測では、地殻とマンツル由来の合計という大局的な情報が得られる一方で、大陸上の実験では地殻由来が70%を占めるため、マンツル由来の知見を得にくいという問題がある。これは KamLAND だけでなく、Borexino や SNO+, JUNO など、現在稼働中の全ての地球ニュートリノ観測実験に共通する課題である。この課題を解決するために提案されたのが海洋底ニュートリノ検出器 OBD である。

OBD は、宇宙線ミューオンによるバックグラウンドを低減するため、検出器を深海4kmに設置する計画である。海洋地殻は大陸地殻よりも薄く、放射性物質も少ないため観測される地球ニュートリノフラックスの70%がマンツル由来のものと試算されている。OBDによる観測でマンツル放射性熱量の謎に決着をつけ、地球深部の組成理解を促進する。設置場所の候補が海底ケーブルなど、電力供給網が整っているハワイ沖であるため、現在ハワイ大学など海外の研究者とともに研究開発が行われている。

検出器を深海に沈め、マンツル由来の地球ニュートリノを観測しようとする試みは、2005年にハワイ大学で Hanohano プロジェクトとして提案された。その後、計画自体は実現には至らなかったものの、海底環境を想定したシミュレーションや海底での試験実験が実施された。OBDでは、これら Hanohano で得られた知見を基礎として設計検討を進めている。一方で、Hanohano から変更された点も存在する。特に、バッファオイルの配置方法を変更した結果、バッファオイルと液体シンチレータの密度差に比例した荷重が、両液体の間に配置されるアクリル容器に作用することになったため、アクリルのクリープを考慮する必要性が新たに生じた。しかし、先行研究では物理観測のシミュレーション結果に基づいた構造設計が中心であり、アクリルのクリープや深海の低温・高圧といった特殊環境の影響は考慮されていなかった。さらに、Hanohano では液体

シンチレータの溶媒として OBD 同様に LAB が候補になっていたものの、バッファオイルの組成については詳細な検討が行われていなかった。この点は OBD においても同様であり、バッファオイルの組成は未定であった。

以上を踏まえ、OBD ではアクリルのクリープ現象、バッファオイルと液体シンチレータの密度といった要素を新たに考慮した検出器設計が求められている。そこで本研究の目的は、これらの要素を考慮した上で、検出器に要求される工学的要求と物理学的要求を満たす検出器構造を設計することである。工学的要求とは、10 年程度の長期測定において、検出器が破損することなく安全に稼働し続けることである。工学的要求を考慮する際には、本検出器は深海で稼働するため、低温や高圧といった深海特有の環境要因が検出器に与える影響を評価しなければならない。一方、物理学的要求とは、エネルギー分解能および位置分解能に影響を与える検出器の集光量を最大化することである。この要件に基づき、本研究ではまずバッファオイルの組成を決定し、併せてアクリルの強度試験を実施した。その後、これらの結果を踏まえて工学的要求と物理学的要求を満たす最適な検出器構造を応力解析と Geant4 により決定した。

本論文では、2 章では前提知識としてニュートリノ物理と様々な実験について述べ、3 章では本研究の背景にあるニュートリノ地球科学について説明する。その後、4 章で OBD プロジェクトについて説明したのち、5 章ではバッファオイルの選定、6 章ではアクリルの強度試験の結果を述べる。最後に、7 章で検出器の構造設計を行い、8 章で本研究の結論を述べる。

## 第 2 章

# ニュートリノ物理学

### 2.1 素粒子標準模型におけるニュートリノ

図 2.1 に示す素粒子標準模型は、自然界の物質を構成する最小単位である 13 種類の素粒子を 3 種類の相互作用で記述する理論であり、ほぼ全ての素粒子実験の結果を説明することが可能である。この理論では、素粒子はスピンの値によって物質を構成するフェルミオン (1/2)、相互作用を媒介するボゾン (1)、クォークやレプトンの質量起源となるヒッグス粒子 (0) に分類される。また、自然界には電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用、重力相互作用の 4 種類が存在する。重力相互作用は他の相互作用に比べ弱く、素粒子実験で検出できるほどの影響を与えないため、標準模型では扱わない。

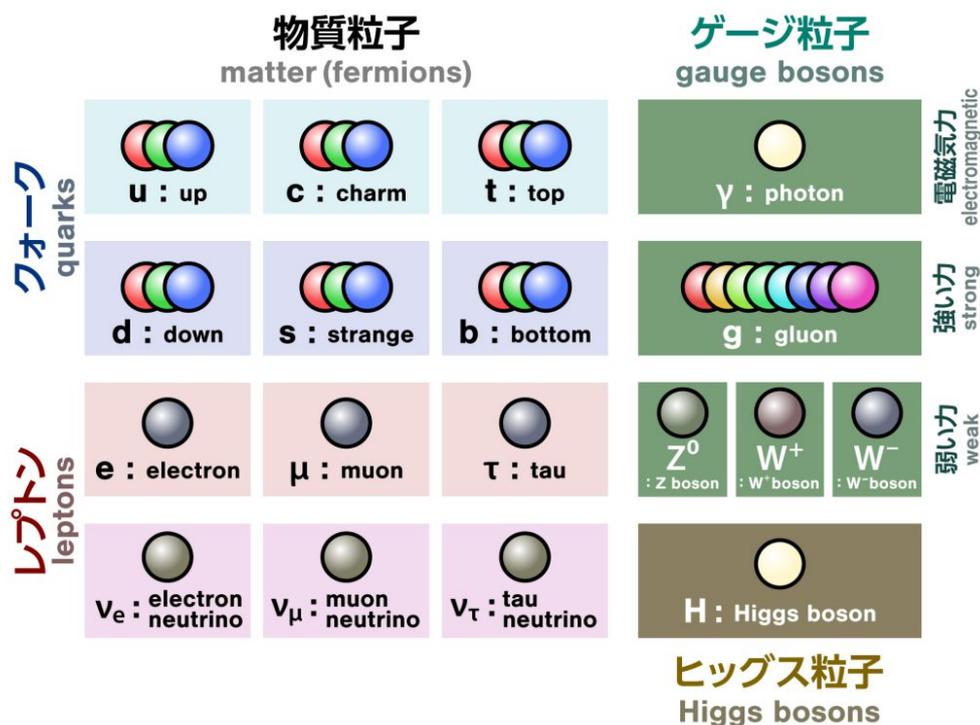


図 2.1 素粒子標準模型 [1]

フェルミオンは相互作用の種類によって3世代のクォークとレプトンに分けられる。ニュートリノは、レプトンの一種であり、スピン 1/2、電荷や質量を持たず、弱い相互作用によってのみ相互作用する。3世代あるニュートリノはそれぞれ、電子ニュートリノ  $\nu_e$ 、ミューニュートリノ  $\nu_\mu$ 、タウニュートリノ  $\nu_\tau$  と呼ばれる。

ニュートリノの存在は 1930 年スイスの物理学者パウリ (Wolfgang Ernst Pauli) によって予言された。当時、 $\beta$  崩壊は



のように、崩壊後の原子核と電子のみの2体崩壊であると考えられていた。この場合、放出される電子のエネルギーは、原子核の始状態と終状態のみで決まる一定の値を取るはずだが、観測結果は連続的な値を取っていた。そこで、パウリはエネルギー保存則を成り立たせるために、 $\beta$  崩壊が陽子、電子、そして電荷をもたず観測にかからない未知の粒子への3体崩壊だと予言した。



1956年、ライネス (Frederick Reines) とコワン (Clyde L. Cowan) は原子炉内の核燃料の核分裂反応で生成される反電子ニュートリノの検出に成功した。検出器は塩化カドミウムを含む水と液体シンチレータを交互に重ねたものであり、バックグラウンドを減らすために地下 12 m、原子炉から 11 m の距離に設置した。反電子ニュートリノが水中の陽子と反応すると陽電子と中性子が生成される。生成した陽電子は直ちに電子と対消滅して2本の  $\gamma$  線を放出する一方で、中性子はやや遅れてカドミウムに捕獲され、複数の  $\gamma$  線を放出する。このように、即時に生じるガンマ線と、遅れて生じるガンマ線の組み合わせを捉えることで粒子の識別と背景事象の除去を実現した。この遅延同時計測法と呼ばれる手法は、ニュートリノの初検出を可能にただけでなく、現在に至るまで広く用いられている優れた方法である。

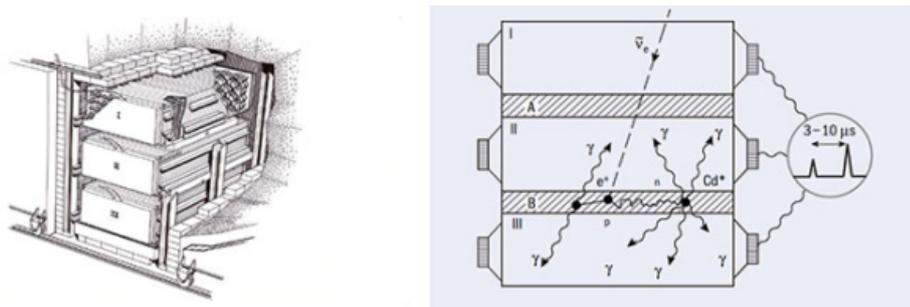


図 2.2 ライネスとコワンの用いた検出器 (左図) と遅延同時計測法 (右図) [2]

## 2.2 ニュートリノ振動

素粒子標準模型において、ニュートリノの質量は 0 とされている。それは質量を 0 と仮定しても、矛盾を示すような事実が見つからなかったためである。しかし、ニュートリノに関する実験でいくつかの問題が生じ、その原因としてニュートリノ振動が提唱された。ここでは、[2.2.1](#)、[2.2.2](#)

節においてニュートリノ観測で生じた問題について述べ、2.2.3, 2.2.4 節でニュートリノ振動の理論について述べる。

### 2.2.1 太陽ニュートリノ問題

太陽ニュートリノとは、太陽内部の核融合反応によって生成されるニュートリノのことである。太陽内部では代表的に pp 連鎖反応 (図 2.3) と呼ばれる核融合反応が起こっている。pp 連鎖反応には 3 つの分岐した反応 (ppI, ppII, ppIII) があり、まとめると以下の式で表される。

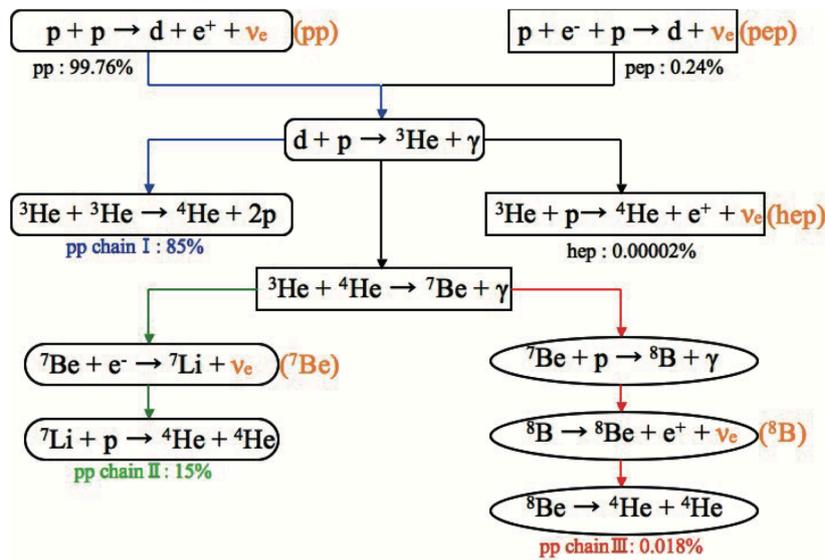


図 2.3 太陽内部の主要な pp 連鎖反応 [3]

すなわち、4 つの陽子から 1 つの  ${}^4\text{He}$  原子核が作られ、その際に電子ニュートリノである太陽ニュートリノが生成される。地表での太陽ニュートリノフラックス (図 2.4) は標準太陽モデル (SSM) [4] を用いて計算できる。

Homestake 実験 [6] では、1968 年からテトラクロロエチレンを利用し、以下の反応で生じる  ${}^{37}\text{Ar}$  の量を観測することで太陽ニュートリノの観測を行った。



約 30 年間の観測では、理論値  $8.46_{-0.88}^{+0.87}$  SNU に対し、観測値  $2.56 \pm 0.16$  SNU と理論値の 30% 程度しか観測されなかった。この理論値と観測値の不一致が太陽ニュートリノ問題と呼ばれる。

### 2.2.2 大気ニュートリノ異常

大気ニュートリノとは、陽子などの宇宙線と大気中の窒素や酸素の原子核が衝突することで生成されるニュートリノである。まず、大気上空で入射した宇宙線は原子核と相互作用を起こすこ

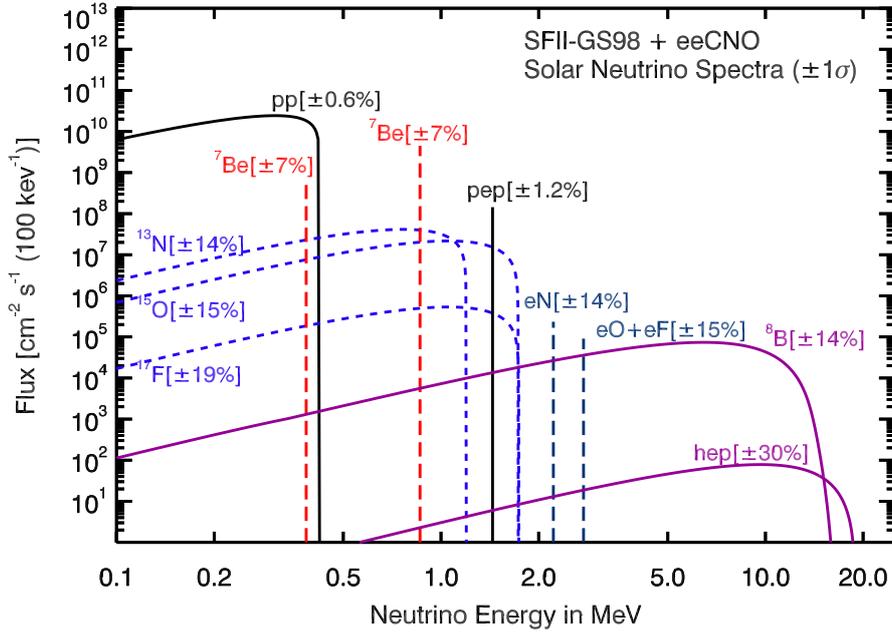


図 2.4 標準模型による太陽ニュートリノフラックス [5]

とでパイ中間子が生成される。

$$p + A \rightarrow \pi^{\pm} + X \quad (2.5)$$

この荷電パイ中間子は、以下の反応式を通して電子ニュートリノとミューニュートリノに崩壊する。

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}) \quad (2.6)$$

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu}) \quad (2.7)$$

この反応から観測される電子型ニュートリノとミュー型ニュートリノの比は 1:2 になるはずである。しかし、実際にはこれらのニュートリノはほぼ同数ずつ観測された。このような大気ニュートリノ強度の理論的予測と観測のずれは大気ニュートリノ異常と呼ばれる。

### 2.2.3 真空中でのニュートリノ振動

2.2.1 節で述べた太陽ニュートリノ問題を解決するために、牧二郎、中川昌美、坂田昌一によってニュートリノ振動は提唱された [7]。ニュートリノ振動はニュートリノのフレーバー固有状態と質量固有状態が異なることで、ある質量固有状態の重ね合わせであるフレーバーが時間経過とともに別のフレーバーへと変化する現象である。実際にフレーバーの周期的な変化と太陽ニュートリノフラックスの総量に変化しないことが実験的に確認されたことで、現在ではニュートリノの質量を 0 とする標準模型を拡張する必要が生じている。ここでは真空中でのニュートリノ振動の公式について説明する。

ニュートリノのフレーバー固有状態  $|\nu_{\alpha}\rangle$  ( $\alpha = e, \mu, \tau$ ) は質量固有状態  $|\nu_i\rangle$  ( $i = 1, 2, 3$ ) の重ね

合わせとして表現され、

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle \quad (2.8)$$

と表される。式 (2.8) で  $U_{\alpha i}^*$  は牧-中川-坂田 (MNS) 混合行列と呼ばれ、以下のようなユニタリ行列に書き下せる。

$$\begin{aligned} U_{\alpha i} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} - s_{12}c_{23} & -s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} + c_{12}c_{23} & s_{23}c_{13} \\ -c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} + s_{12}s_{23} & -s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} - c_{12}s_{23} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで質量固有値  $m_i$  および  $m_j$  をもつ状態の混合角を  $\theta_{ij}$  として、 $s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$ 、 $c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$  である。また  $\delta$  は CP 位相と呼ばれ、CP 対象性の破れを表す。質量固有状態の時間発展はシュレディンガー方程式

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_i\rangle = E_i |\nu_i\rangle \quad (2.10)$$

を解くことで以下のように得られる。

$$|\nu_i(\tau_i)\rangle = e^{-im_i\tau_i} |\nu_i(0)\rangle \quad (2.11)$$

ここで  $\tau_i$  は静止系での  $\nu_i$  の時間を表す。実験室系では式 (2.11) において

$$e^{-im_i\tau_i} = e^{-i(E_it - p_iL)} \quad (2.12)$$

と表せる。 $t$ 、 $L$  は実験室系での時間、位置を、 $E_i$ 、 $p_i$  は  $\nu_i$  のエネルギー、運動量をそれぞれ表す。ニュートリノの質量は十分小さく、相対論的に運動するため  $p_i \gg m_i$ 、 $E \simeq p_i$  として、

$$E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2E} \quad (2.13)$$

となる。自然単位系では  $t \simeq L$  であるため

$$\begin{aligned} e^{-i(E_it - p_iL)} &\simeq e^{-i(E_i - p_i)L} \\ &\simeq e^{-i(m_i^2/2E)L} \end{aligned} \quad (2.14)$$

と表され、フレーバー固有状態の時間発展は以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(L)\rangle &= \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2/2E)L} |\nu_i(0)\rangle \\ &= \sum_{i,\beta} U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2/2E)L} U_{\beta i} |\nu_\beta\rangle \end{aligned} \quad (2.15)$$

よって、フレーバー  $\alpha$  が距離  $L$  を伝播したのち  $\beta$  に変化する確率は、

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 \\ &= \left| \sum_i U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-i\frac{m_i^2}{2E}L} \right|^2 \\ &= \sum_{i,j} U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left(-i\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \end{aligned} \quad (2.16)$$

となる。ここで  $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$  は質量の二乗差である。式 (2.16) の位相要素を

$$\begin{aligned} \exp\left(-i\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) &= \cos\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) - i\sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \\ &= 1 - 2\sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E}L\right) - i\sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

と書き直すと、

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sum_{i,j} U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \left[ 1 - 2\sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E}L\right) - i\sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \right] \quad (2.18)$$

となる。式 (2.18) で  $i = j$  のときは  $\Delta m_{ij}^2 = 0$  となり、また  $i \neq j$  のときは  $i, j$  の対称性から

$$\sum_{i,j \neq i} = 2 \sum_{i>j} \quad (2.19)$$

とすることができるので、ユニタリ行列の性質も用いると

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} + \sum_{i,j \neq i} U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \left[ -2\sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E}L\right) - i\sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \right] \\ &= \delta_{\alpha\beta} + 2 \sum_{i>j} U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \left[ -2\sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E}L\right) - i\sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

となる。振動確率を実数にするため第二項を実部と虚部に分けると、振動確率は以下のようになる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E}L\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}L\right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

位相を無次元にするために  $\hbar c \simeq 197 [\text{MeV} \cdot \text{fm}]$  を用いて

$$\frac{\Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2]}{4E [\text{MeV}]} L [\text{m}] = \frac{\Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{4E [\text{MeV}] \hbar c [\text{MeV} \cdot \text{fm}]} = 1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 [\text{eV}^2]}{E [\text{MeV}]} L [\text{m}] \quad (2.22)$$

と表すと、3フレーバーのニュートリノ振動の公式が以下のように導かれる。

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2}{E} L\right) \\ &\quad \pm 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin\left(2.54 \frac{\Delta m_{ij}^2}{E} L\right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

ここで第三項の符号は + がニュートリノを、- が反ニュートリノを表す。

ニュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いは

$$\Delta P = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) - P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta) = -16J_{\alpha\beta} \sin \Delta_{12} \sin \Delta_{23} \sin \Delta_{31} \quad (2.24)$$

である。ここで、

$$\Delta_{ij} \equiv 1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2}{E} L \quad (2.25)$$

$$J_{\alpha\beta} \equiv \text{Im} (U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) = \pm J_{\text{CP}} \quad (2.26)$$

$$J_{\text{CP}} \equiv s_{12} c_{12} s_{23} c_{23} s_{13} c_{13}^2 \sin \delta \quad (2.27)$$

であり、式 (2.26) の複号は + が  $e, \mu, \tau$  の循環、- が逆循環を表す。このニュートリノ振動確率の違いを利用することで、CP 対称性の破れを測定することができる。

#### 2.2.4 物質効果 (MSW 効果)

ここでは物質内でのニュートリノ振動について説明する。ニュートリノが物質中を伝播すると、物質中との相互作用によりニュートリノ振動の振る舞いが真空中に比べて変化し、共鳴的な振動を起こす。この効果を提唱者の頭文字をとり MSW 効果 (Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein effect) と呼ぶ [8, 9]。この効果はすべてのフレーバーのニュートリノは弱い相互作用のポテンシャルによって中性カレント (Neutral Current, NC) 反応を起こすのに加え、電子型のニュートリノだけが物質中の電子と荷電カレント (Charged Current, CC) 反応を起こすことが要因となっている (図 2.5)。

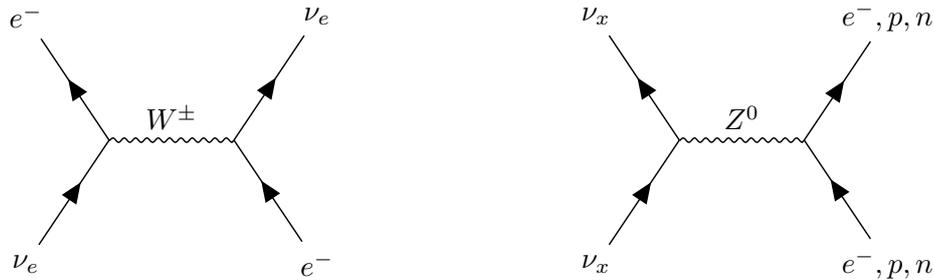


図 2.5 CC 反応 (左図) と NC 反応 (右図) のファインマンダイアグラム。添字  $x$  はニュートリノのフレーバー ( $e, \mu, \tau$ ) を表す。

CC 反応のポテンシャル  $V_{\text{CC}}$  と NC 反応のポテンシャル  $V_{\text{NC}}$  は、フェルミ結合定数  $G_{\text{F}}$ 、物質中の電子密度  $N_e$  と中性子密度  $N_n$  を用いて

$$V_{\text{CC}} = \sqrt{2} G_{\text{F}} N_e, \quad V_{\text{NC}} = -\frac{\sqrt{2}}{2} G_{\text{F}} N_n \quad (2.28)$$

と表せる。簡単のため以下では 2 フレーバー間での振動を考える。フレーバー固有状態の時間発

展は有効ハミルトニアン  $H_{\text{eff}}$  を用いて次のように記述できる。

$$\begin{aligned} i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \end{pmatrix} &= H_{\text{eff}} \begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \end{pmatrix} \\ &= \left[ U \begin{pmatrix} E_1 & 0 \\ 0 & E_2 \end{pmatrix} U^\dagger + \begin{pmatrix} V_{\text{CC}} + V_{\text{NC}} & 0 \\ 0 & V_{\text{NC}} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.29)$$

ここで

$$E_i = \sqrt{p_i^2 + m_i^2} \simeq p_i + \frac{m_i^2}{2p_i} \simeq E + \frac{m_i^2}{2E} \quad (2.30)$$

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \end{pmatrix} \quad (2.31)$$

を用いると、有効ハミルトニアンは

$$H_{\text{eff}} = \left( E + \frac{m_1^2 + m_2^2}{4E} + \frac{V_{\text{CC}}}{2} + V_{\text{NC}} \right) I + \begin{pmatrix} -\frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta_{12} + \frac{V_{\text{CC}}}{2} & \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta_{12} \\ \frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta_{12} & \frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta_{12} - \frac{V_{\text{CC}}}{2} \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

と書ける。ここで  $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$  である。式 (2.32) の第一項がフレーバーの混合に関与しないことから、中性カレント反応が物質効果に無関係であることがわかる。また、物質中での混合角  $\theta_M$  は

$$\tan 2\theta_M = \frac{\frac{\Delta m^2}{4E} \sin 2\theta_{12}}{\frac{\Delta m^2}{4E} \cos 2\theta_{12} - \frac{V_{\text{CC}}}{2}} = \frac{\sin 2\theta_{12}}{\cos 2\theta_{12} - \frac{2EV_{\text{CC}}}{\Delta m^2}} \quad (2.33)$$

で表すことができる。この混合角を用いて表現されるユニタリ行列

$$U_M = \begin{pmatrix} \cos \theta_M & \sin \theta_M \\ -\sin \theta_M & \cos \theta_M \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

で式 (2.32) の第二項を対角化すると、

$$U_M^\dagger H_{\text{eff}} U_M = \frac{\Delta m^2}{4E} \begin{pmatrix} -\sqrt{\left(\cos 2\theta_{12} - \frac{2EV_{\text{CC}}}{\Delta m^2}\right)^2 + \sin^2 2\theta_{12}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\left(\cos 2\theta_{12} - \frac{2EV_{\text{CC}}}{\Delta m^2}\right)^2 + \sin^2 2\theta_{12}} \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

となり、以下のように物質中での質量二乗差  $\Delta m_M^2$  が得られる。

$$\Delta m_M^2 = \Delta m^2 \sqrt{\left(\cos 2\theta_{12} - \frac{2EV_{\text{CC}}}{\Delta m^2}\right)^2 + \sin^2 2\theta_{12}} \quad (2.36)$$

物質内でのニュートリノ混合が最大となるのは式 (2.33) の分母が 0 となる時、すなわち

$$N_e = \frac{\Delta m^2 \cos 2\theta}{2\sqrt{2}G_F E} \quad (2.37)$$

のときである。反ニュートリノの場合は  $N_e$  の符号が逆になる。そのため、ニュートリノと反ニュートリノで物質効果による振動確率が異なり、「偽の」CP 非対称性の効果が現れる。したがって、CP 非対称性の測定を行う場合はニュートリノ振動における物質効果の影響をよく理解することが不可欠である。

## 2.3 ニュートリノ振動観測実験

2.2 節で述べたニュートリノ振動は、数多くの実験によって観測されている。ここでは、それらの実験の概要と結果について述べる。

### 2.3.1 Sudbury Neutrino Observatory (SNO) 実験

SNO 実験 [10, 11] はカナダのサドバリー鉱山地下 2100 m で行われたニュートリノ観測実験である。1 kt の重水 ( $D_2O$ ) を用いて、

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- - 1.442 \text{ MeV} \quad (2.38)$$

$$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x - 2.224 \text{ MeV} \quad (2.39)$$

$$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^- \quad (2.40)$$

の 3 つの反応による太陽ニュートリノ測定を行った。この実験から総太陽ニュートリノフラックスは標準太陽モデルと一致したが、電子ニュートリノの太陽ニュートリノフラックスは減少しており、ニュートリノ振動を証明した (図 2.6)。

さらに SNO 実験の結果より、振動パラメータに対して  $\Delta m_{21}^2 = 7.46_{-0.19}^{+0.20} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\sin^2 \theta_{12} = 0.443_{-0.025}^{+0.030}$  という結果を得た [11]。

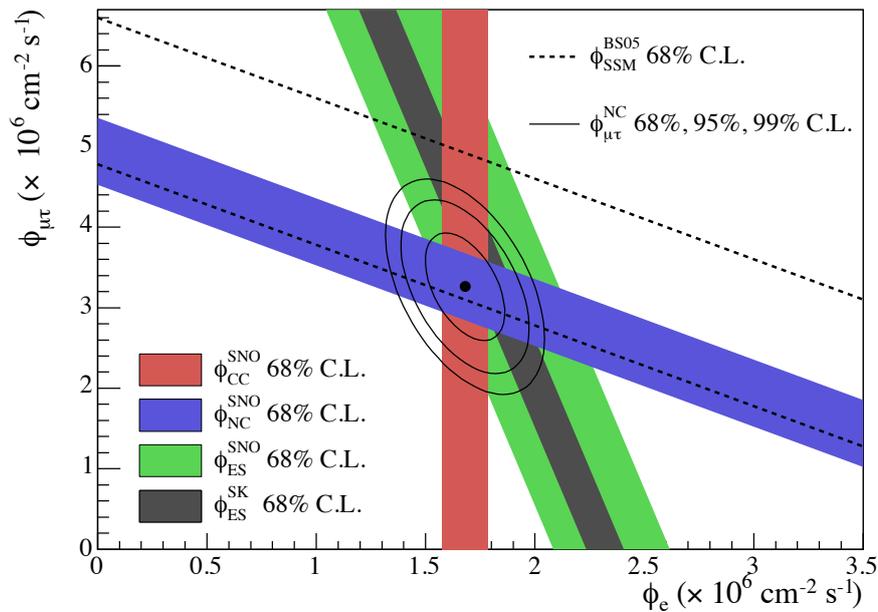


図 2.6 SNO 実験での太陽ニュートリノフラックスの観測結果 [10]。黒線で囲まれたフィット結果が黒点線の理論予測を再現していることがわかる。また、 $\phi_{\mu\tau}$  がゼロではないことからニュートリノ振動によってフレーバーが変化した証拠をとらえている。

### 2.3.2 Tokai to Kamioka (T2K) 実験

T2K 実験では、茨城県東海村にある J-PARC からのニュートリノビームを岐阜県神岡にある Super-Kamiokande で観測した。J-PARC では 30 GeV まで加速された陽子をグラファイト標的に衝突させ、主に荷電パイ中間子が生成される。T2K 実験で打ち込むのは、この荷電パイ中間子の崩壊

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu \quad (2.41)$$

で生成された 600 MeV の  $\nu_\mu$  ビームとなる。

T2K 実験ではビーム由来の  $\nu_\mu$  の消失から  $\nu_e$  の出現を  $7.3\sigma$  の確度で捉え、 $\theta_{13}$  に対して、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.14^{+0.038}_{-0.032}$  (質量順階層、図 2.7)、 $0.170^{+0.045}_{-0.037}$  (質量逆階層) という結果を得た [12]。

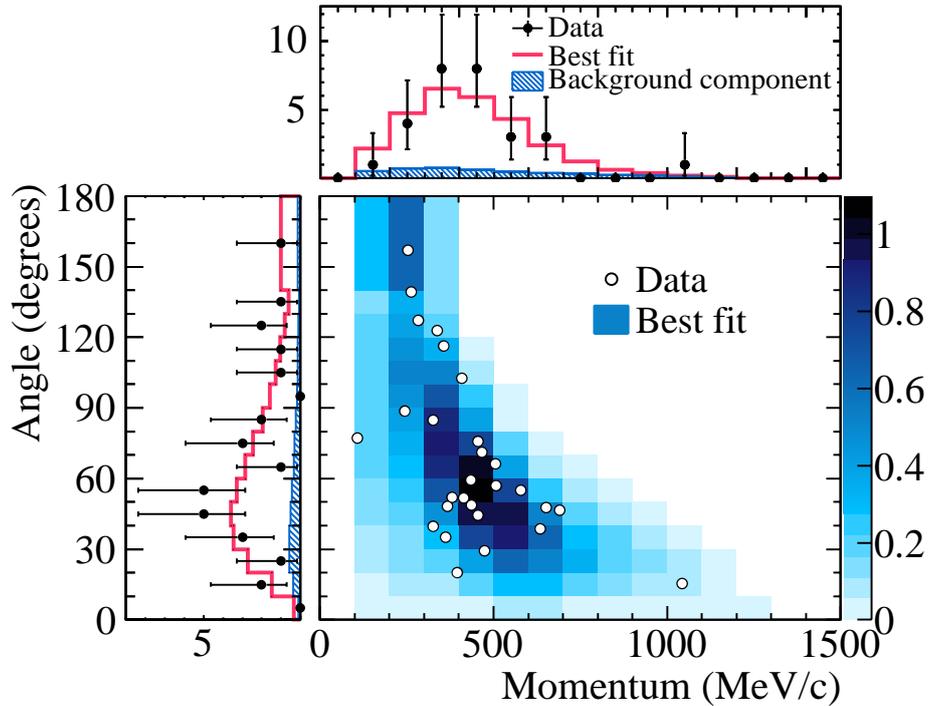


図 2.7 T2K が観測した電子ニュートリノの出現 [12]。横軸が  $e^-$  の運動量を、縦軸が  $e^-$  の天頂角分布を表す。観測された  $\nu_e$  事象数は 28 であった。

### 2.3.3 KamLAND 実験

KamLAND は Super-Kamiokande と同様の岐阜県神岡に位置し、1 kt の大型液体シンチレータを利用して原子炉ニュートリノなどの検出を行っている。原子炉ニュートリノとは、原子炉内でウランやプルトニウムの核分裂により放出する反電子ニュートリノのことである。原子炉ニュートリノの放出される数とエネルギースペクトルは精度良く求まっており、ニュートリノ振動を精密測定できる。KamLAND では岐阜県神岡を中心に半径 180 km の距離にある原子炉からの原子

炉ニュートリノを以下の逆  $\beta$  崩壊反応を利用して観測した。

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n \quad (2.42)$$

観測の結果、原子炉からの反電子ニュートリノが期待される 6 割ほどしかなく、原子炉からのニュートリノが消失していることが示された。図 2.8 は KamLAND のニュートリノ振動の観測結果である [13]。2 周期にわたりニュートリノ振動が観測されたため、質量二乗差に高い感度を持ち、 $\Delta m_{21}^2 = 7.54_{-0.18}^{+0.092} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ 、 $\tan^2 \theta_{12} = 0.481_{-0.080}^{+0.092}$  という結果になっている。

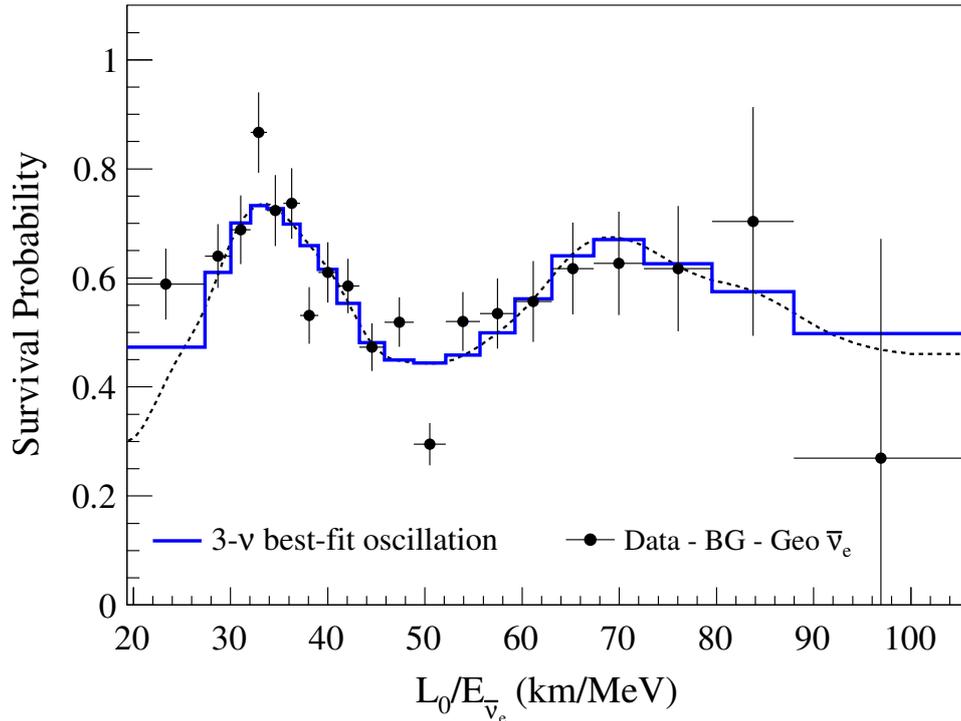


図 2.8 KamLAND が観測した原子炉ニュートリノの振動 [13]。 $\bar{\nu}_e$  の振動が 2 周期にわたって確認できる。ここで  $L_0 = 180 \text{ km}$  は、原子炉からの  $\bar{\nu}_e$  のフラックスで荷重平均をとった基線の長さである。

## 2.4 ニュートリノの質量階層性問題

ニュートリノ振動の観測より、ニュートリノが有限の質量を持つことが明らかになった。しかし、観測から分かることはフレーバー間の質量の二乗差のみである。太陽ニュートリノ観測による物質効果の測定から  $m_1 < m_2$  であることは決まったが、その他の大小関係や質量の絶対値はわかっていない。各フレーバーの質量の大小関係は質量階層構造と呼ばれ、図 2.9 に示されているように 3 つのモデルが考えられる。

質量順階層 (Normal Ordering, NO) :  $m_1 < m_2 < m_3$

質量逆階層 (Inverted Ordering, IO) :  $m_3 < m_1 < m_2$

縮退構造 :  $m_1 \approx m_2 \approx m_3$

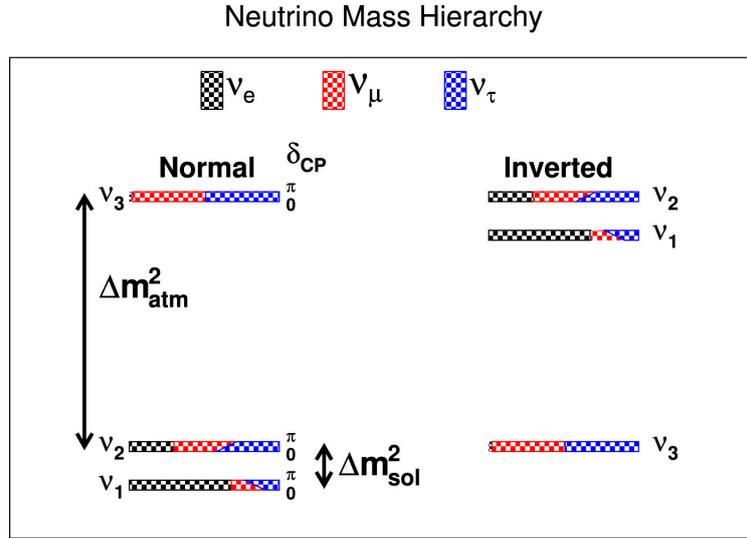


図 2.9 ニュートリノの質量階層性 [14]

この質量階層構造はニュートリノの性質に関わる重要な要素であり、ニュートリノ物理学の未解決問題の一つである。質量階層構造を決定するために、 $\beta\beta$  崩壊観測実験、大気ニュートリノの精密測定、加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験などが行われている。

2.3 節のような様々な実験より、ニュートリノ振動のパラメータの測定値は表 2.1 のようになった。 $\theta_{12}$ 、 $\theta_{13}$ 、 $\Delta m_{21}^2$ 、 $|\Delta m_{32}^2|$  は精度良く決定されており、質量階層構造の逆階層が  $3\sigma$  以上の信頼度で好まれないという結果になっている [15]。 $\theta_{23}$  に関してはほぼ最大に混合している兆候が確認されているが、未だ不定性は大きい。また、CP 位相  $\delta$  も同様に不定性が大きく  $3\sigma$  の範囲では CP 対称性が保存する  $\delta = 180^\circ$  が含まれており、これらのパラメータはより精度の良い測定が必要である。

表 2.1 測定から得られたニュートリノ振動パラメータ [15]

parameter	NO		IO	
	best-fit $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range	best-fit $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range
$(\sin^2 \theta_{12})/10^{-1}$	$3.20^{+0.20}_{-0.16}$	2.73 $\rightarrow$ 3.79	$3.20^{+0.20}_{-0.16}$	2.73 $\rightarrow$ 3.79
$(\sin^2 \theta_{23})/10^{-1}$	$5.47^{+0.20}_{-0.30}$	4.45 $\rightarrow$ 5.99	$5.51^{+0.18}_{-0.30}$	4.53 $\rightarrow$ 5.98
$(\sin^2 \theta_{13})/10^{-2}$	$2.160^{+0.083}_{-0.069}$	1.96 $\rightarrow$ 2.41	$2.220^{+0.074}_{-0.076}$	1.99 $\rightarrow$ 2.44
$\delta/^\circ$	$218^{+38}_{-27}$	157 $\rightarrow$ 349	$281^{+23}_{-27}$	202 $\rightarrow$ 349
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{ eV}^2]$	$7.55^{+0.20}_{-0.16}$	7.05 $\rightarrow$ 8.24	$7.55^{+0.20}_{-0.16}$	7.05 $\rightarrow$ 8.24
$\Delta m_{32}^2 [10^{-3} \text{ eV}^2]$	$2.424 \pm 0.03$	2.334 $\rightarrow$ 2.524	$-2.50^{+0.04}_{-0.03}$	-2.59 $\rightarrow$ -2.39

また、ニュートリノの絶対質量の直接測定を目指す実験も存在する。そのうちの 하나가  $\beta$  崩壊のエネルギースペクトルを精密に測定するというものである。ニュートリノが質量を持つ場合、 $\beta$

崩壊で放出される電子の最大運動エネルギーが変わるため、 $\beta$  崩壊のエネルギースペクトルのエンドポイントを調べれば、電子ニュートリノの質量を測定することができる。

$$m_{\nu_e} = \sqrt{\sum_i |U_{ei}|^2 m^2(\nu_i)} \quad (2.43)$$

KARTIN 実験 (Karlsruher Tritium Neutrino Experiment) は、式 (2.44) で表されるトリチウムのベータ崩壊 (Q 値 18.6 keV) のエネルギースペクトルを測定する実験である。



現在は質量に関して、

$$m_{\nu_e} < 0.8 \text{ eV}/c^2 \quad (90\% \text{ C.L.}) \quad (2.45)$$

という制限が与えられている [16]。

その他には、宇宙背景放射 (CMB) などの宇宙構造を解析することで、ニュートリノの絶対質量を測定する方法もある。現在の宇宙論では、初期宇宙が  $\sim \text{MeV}$  程度の温度に下がるまでニュートリノは他の物質と相互作用 (熱平衡状態) しており、温度低下後は相互作用の反応率が下がり宇宙空間を自由に飛ぶようになった (脱結合) と考えられている。また、ニュートリノは CMB の形成にも関わっており、ニュートリノの質量に応じて CMB のパワースペクトルが変化すると考えられている。そのため、CMB の観測によって、ニュートリノ質量に上限値を与えられる。この方法では、ニュートリノの質量和が

$$\Sigma m_\nu < 0.16 \text{ eV}/c^2 \quad (95\% \text{ C.L.}) \quad (2.46)$$

という制限が与えられている [17]。



## 第 3 章

# ニュートリノ地球科学

### 3.1 地球の内部構造

地球の内部構造については、ボーリング調査や地震波の観測など様々な方法で調査が行われてきた。その結果、現在では地球の内部構造は図 3.1 の通りで、地殻、マントル、核の 3 層から構成されていることがわかった。地殻は大陸を形成する大陸地殻と海洋を形成する海洋地殻に分けられる。大陸地殻は厚さ 30–50 km で花崗岩質岩石の上部地殻と玄武岩質岩石の下部地殻で構成される一方で、海洋地殻は厚さ 5–10 km と大陸地殻に比べて薄く、ほとんどが玄武岩質岩石で構成されている。マントルは上部マントルと下部マントルに分けられ、上部マントルはかんらん岩が多く、下部マントルは高圧で安定な結晶構造を持つ鉱物 (主成分はブリッジマナイトやフェロペリクレスといった高圧鉱物) となっている。核は主に鉄からできており、液体の外核と固体の内核に分けられる。外核の金属流体の運動が地球の磁場や地磁気を形成している。ここでは、地球の内部構造と化学組成研究の歴史について述べる。

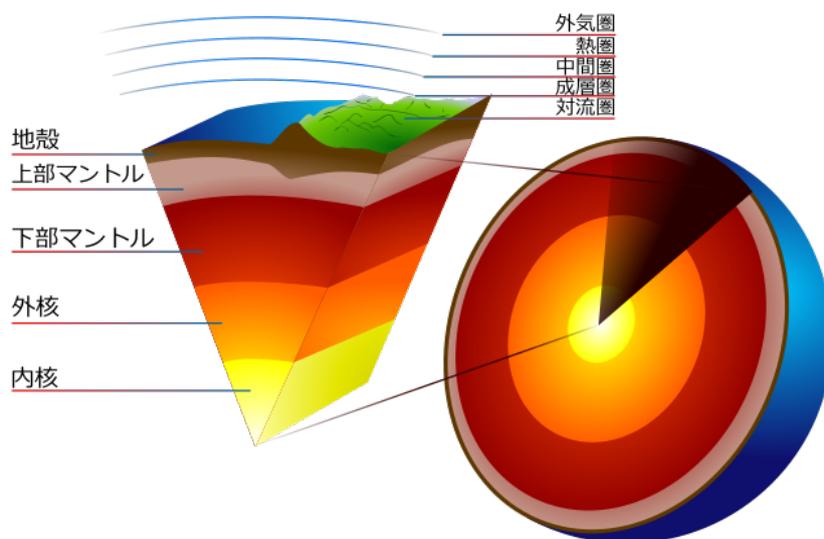
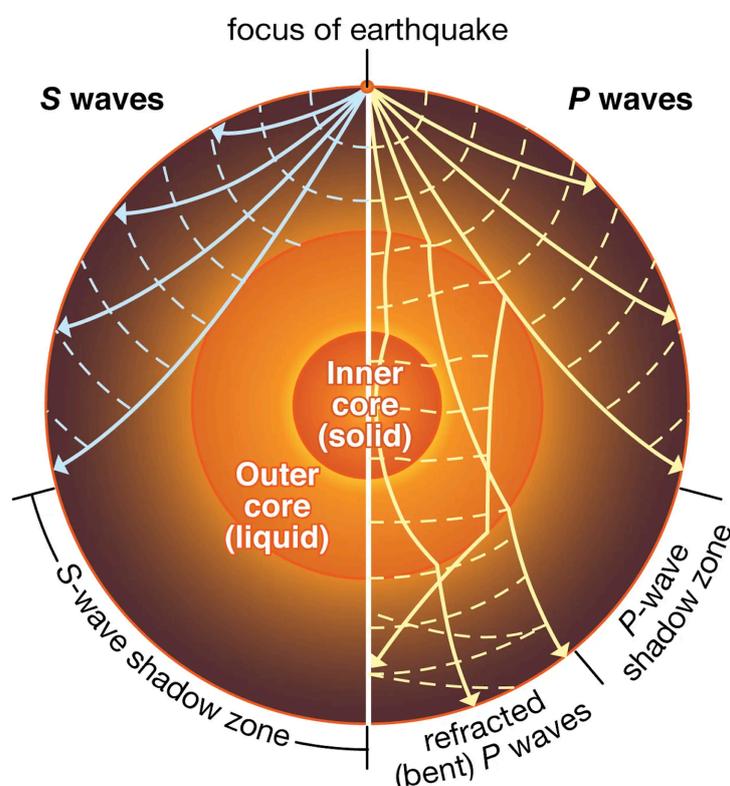


図 3.1 地球の内部構造の模式図 [18]

地球内部の直接的な調査手段としてはボーリング調査があるが、人類が掘った最も深い穴は kola Superdeep Borehole (KSDB-3) で、最終深度は 12262 m に過ぎない [19]。これは 30–50 km 程度の厚みがある大陸地殻すら貫通しておらず、さらに地球内部の高温・高圧のため、これ以上の掘削は困難である。したがって、ボーリング調査でマントルや核などの地球の深部の研究を行うことは難しい。

今日理解される地球の構造は地震学によって明らかにされてきた。地震波は地球を伝播するとき、弾性特性の異なる層の境界で反射したり曲がったりする。この反射したり曲がったりした地震波を地球上の多数の地点で観測することで、図 3.2 に示すように、地球の伝播速度やその他の弾性特性が測定される。



© Encyclopædia Britannica, Inc.

図 3.2 地震波観測に基づく地球構造モデリング [20]

1981 年、ジウォンスキー (Adam Marian Dziewonski) とアンダーソン (Don Lynn Anderson) は、地震波速度、密度分布、その他の弾性パラメータを半径の関数として記述した地球内部構造モデル (PREM) を提案した (図 3.3)。PREM は現在広く受け入れられている地球内部の構造標準モデルであり、地殻、マントル、液体外核、固体内核という地球の多層構造は、地震学によって明確に示されている。PREM によって与えられた地球上の各層のパラメータを表 3.1 に示す。

PREM では、地球全体は球対称な密度分布である。しかし、マントルの一部には周囲と性質の違う領域があることが地震波の観測によって発見された。この領域は LLSVP (Large low-shear-

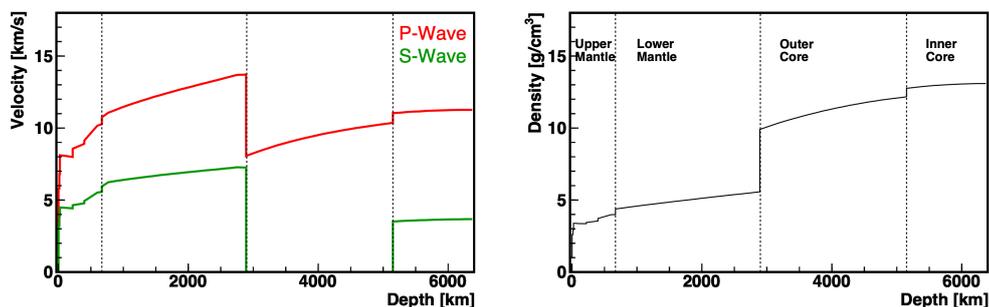


図 3.3 PREM による地震波速度 (左図) と密度 (右図) [21]。オリジナルデータは [22] より提供されている。

表 3.1 地球の各層のパラメータ [22]

	半径 [km]	密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
地殻	6346.6 – 6368	2.600 – 2.900
上部マントル	5701.0 – 6346.6	3.3595 – 3.9921
下部マントル	3480.0 – 5701.0	4.3807 – 5.5665
外核	1221.5 – 3480.0	9.9034 – 12.1663
内核	0 – 1221.5	12.7636 – 13.0885

velocity provinces) と呼ばれ、地震波が低速度な領域が南太平洋とアフリカのマントル最下部に存在するとされている。しかし、LLSVP の密度や起源など詳細については理解されていないことが多く、地球科学分野における大きな謎の一つである。

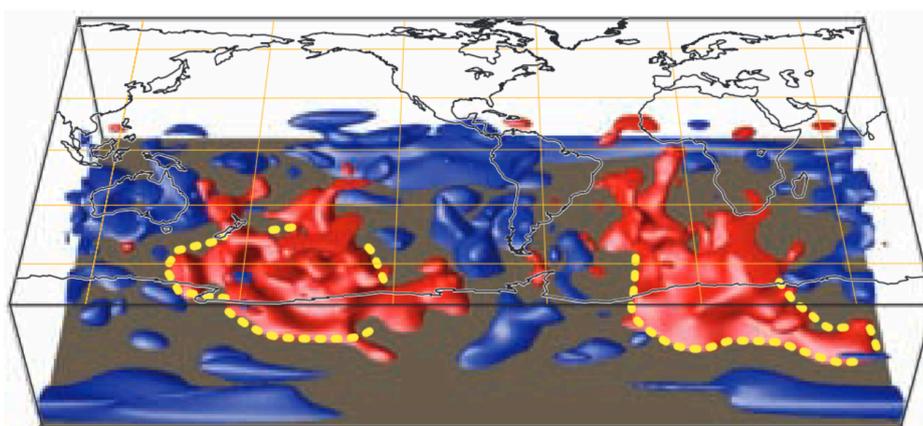


図 3.4 地球全体における LLSVP の分布 [23]。赤色が S 波の速度が遅い LLSVP 領域。

## 3.2 地球の熱源と熱量モデル

地球の歴史は基本的に冷却過程であり、地震や火山活動、プレートテクトニクスといった地球物理学的活動は、地球内部の熱によって駆動されている。そのため、地球の進化の歴史と地震のような地球物理学的活動を明らかにするためには、地球の熱収支を理解することも重要である。地球表面での熱流量は、多点ボアホール測定に基づき、約  $47 \pm 2$  TW と推定されている [24]。熱源には、地球形成時の熱の残存分と、地球内部の放射性同位元素の崩壊による熱がある。地球は宇宙の塵が集まって形成されるといった融し、鉄を主とする重い成分の沈降により核が形成された。その際、解放された重力エネルギーが地球形成時の熱である。一方で、放射性同位元素の崩壊による熱、放射性熱は地球が何十億年も活動的な惑星であり続けるために必要な熱源であり、その量に加えて放射性熱の源となる元素の分布も重要である。

これまでの地球の化学組成は、岩石学に基づく地球科学や隕石の組成分析によって明らかにされてきた。特に、地球内放射性熱量モデルである BSE (Bulk Silicate Earth) モデルは地殻とマンツルのケイ酸塩部分の化学組成を用いて計算されたモデルであり、今日の地球科学の基礎となっている。しかし、隕石の組成分析に基づく化学組成モデルは間接的な推定であり、地球内部の直接的な検証は存在しない。また、地球を形成した隕石の種類は特定されておらず、隕石の組成分析に基づく地球の化学組成には本質的な不確実性が伴う。

BSE モデルにおいて、地殻の熱量は 6.8 TW と決定されている。一方で、マンツルの熱量は決定できておらず、様々なモデルが存在する。High Q モデル [25] はマンツル内の対流によるエネルギーと観測される地球表面からの熱の放出に基づいており、地殻とマンツル合わせて 30 TW 程度の放射性熱量を予測している。Middle Q モデル [26] と Low Q モデル [27] は、それぞれ CI コンドライト隕石とエンスタタイトコンドライト隕石の組成分析に基づいたモデルであり、20 TW と 10 TW 程度の放射性熱量を予測している。

3.1 節と 3.2 節で述べたように、今日の地球の内部構造や化学組成は地震や岩石学などによって得られてきたものが多い。しかし、これらの方法にも限界があり、地球内部に関する新たな知見を得るには他の方法が必要である。新たな方法としては、放射性熱の発生の際に同時に放出されるニュートリノの観測がある。ニュートリノは他の物質とほとんど相互作用しないため、地球内部の情報を持ったまま地表に達する。実際に、ニュートリノの観測により地球のダイナミクス、地球形成を検証できるということが知られ、ニュートリノ地球科学と呼ばれている。詳細は 3.3 節以降で述べる。

## 3.3 ニュートリノ地球科学の誕生

地球ニュートリノは、地球内の放射性元素が  $\beta$  崩壊する際に生成される反電子ニュートリノである。現在の地球に豊富に存在する放射性元素は  $^{238}\text{U}$  ( $\tau_{1/2} = 4.47 \times 10^9$  年) 系列、 $^{232}\text{Th}$  ( $\tau_{1/2} = 14.0 \times 10^9$  年) 系列、 $^{40}\text{K}$  ( $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$  年) 系列であり、それぞれ以下の反応

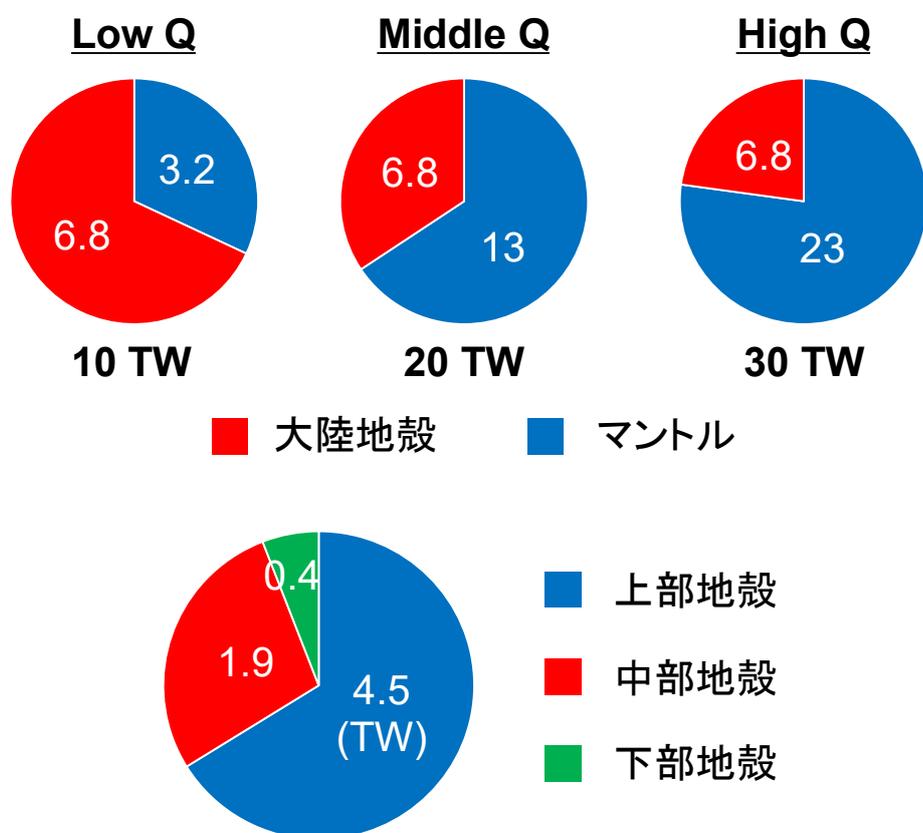
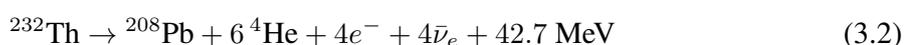


図 3.5 BSE モデルにおける地殻とマントルの熱量の割合 (上図) と地殻の熱量 (下図)

で地球ニュートリノと熱 (放射性熱) を放出する。



ゆえに、地球ニュートリノを観測することで地球の熱量や放射性元素の分布など地球深部の情報を得ることができる。実際に、KamLAND 実験では 2005 年に世界初の地球ニュートリノ観測および地球内放射性熱量の測定を行い、ニュートリノの地球科学への応用の可能性を示した。KamLAND では式 (2.42) の逆  $\beta$  崩壊反応を利用して地球ニュートリノを観測した。ただし、この反応のエネルギー閾値は 1.806 MeV であり、地球ニュートリノのエネルギースペクトル (図 3.6) から  $^{40}\text{K}$  系列の地球ニュートリノは観測することができない。KamLAND などの地球ニュートリノ観測実験の観測結果や地球科学への貢献については 3.4 節で詳しく述べる。

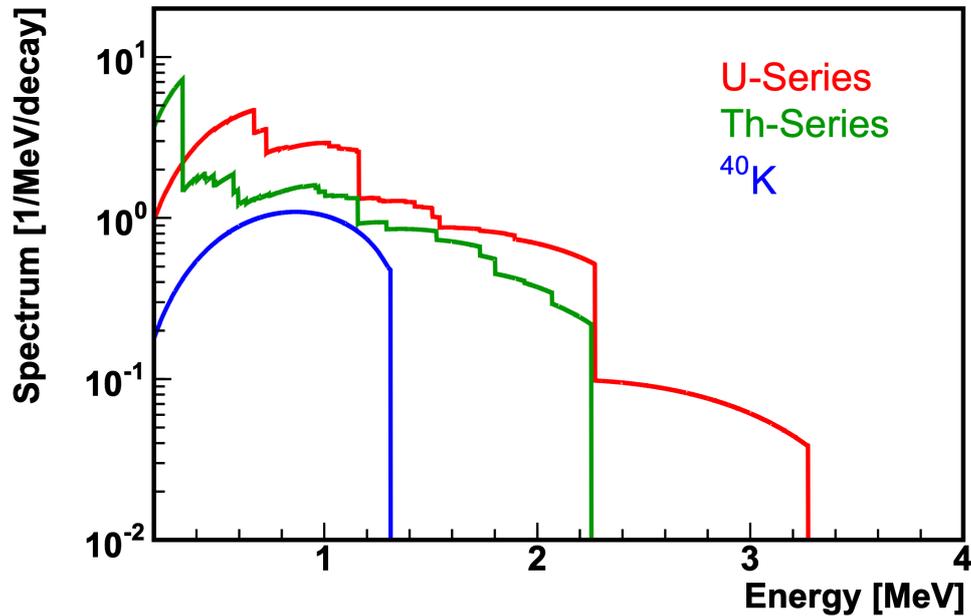


図 3.6 地球ニュートリノのエネルギースペクトル [21]

### 3.4 地球ニュートリノ観測の現状

地球ニュートリノは 2005 年の KamLAND による初観測以降、KamLAND に加えて Borexino (イタリア) によって観測されていた。Borexino は停止した一方で、KamLAND は 2024 年 8 月に 24 年のデータ取得を終了し、2027 年度の KamLAND2 実験の開始に向けて検出器の大幅なアップグレードを作業を行っている。これに加え、SNO+ (カナダ)、JUNO (中国) でも地球ニュートリノの観測結果が 2025 年に新たに報告された。ここで、それぞれの最新結果についてまとめた。

#### 3.4.1 KamLAND

図 3.8 は 2002 年から 2020 年までの KamLAND における地球ニュートリノ観測のエネルギースペクトルである。LiveTime (実質観測時間) は 4397 日で、地球ニュートリノ観測数は  $174^{+31}_{-29}$  である。図 3.9 は観測結果から各地球熱量モデルの判別を行なったものである。結果から High Q モデルは均質なマンツルの場合は 99.76%、地球の核とマンツルの境界の不均一さを考慮した場合は 97.9% で排除された。

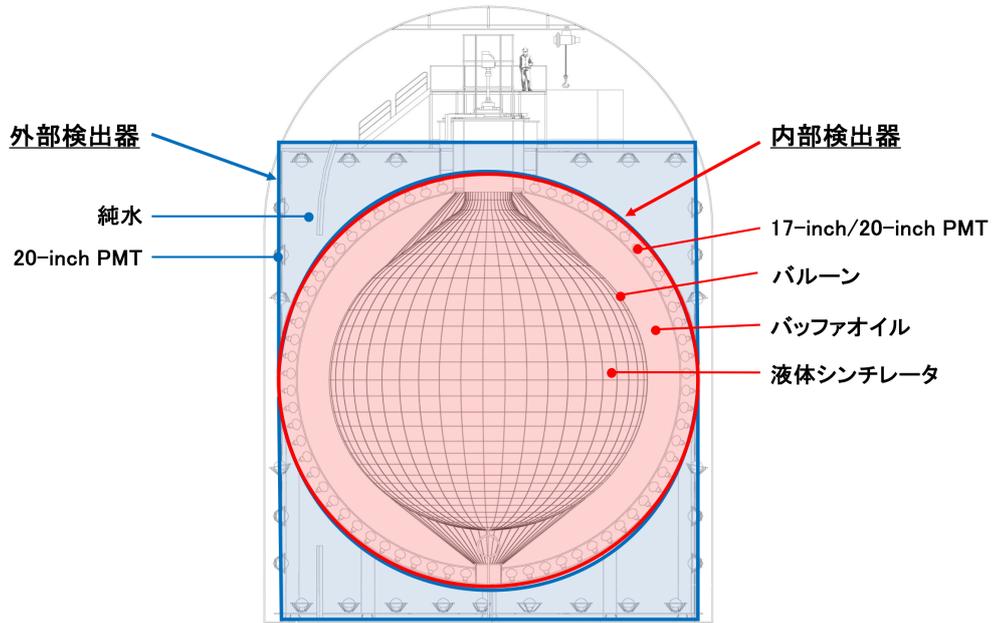


図 3.7 KamLAND の概要図

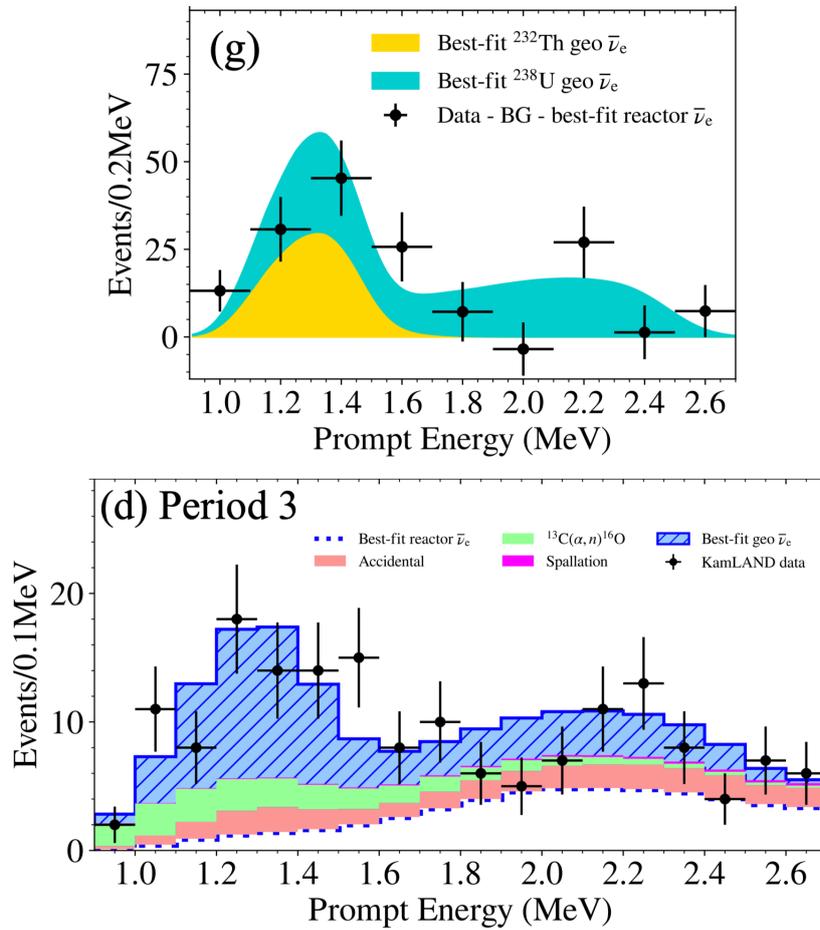


図 3.8 KamLAND におけるエネルギースペクトル [28]

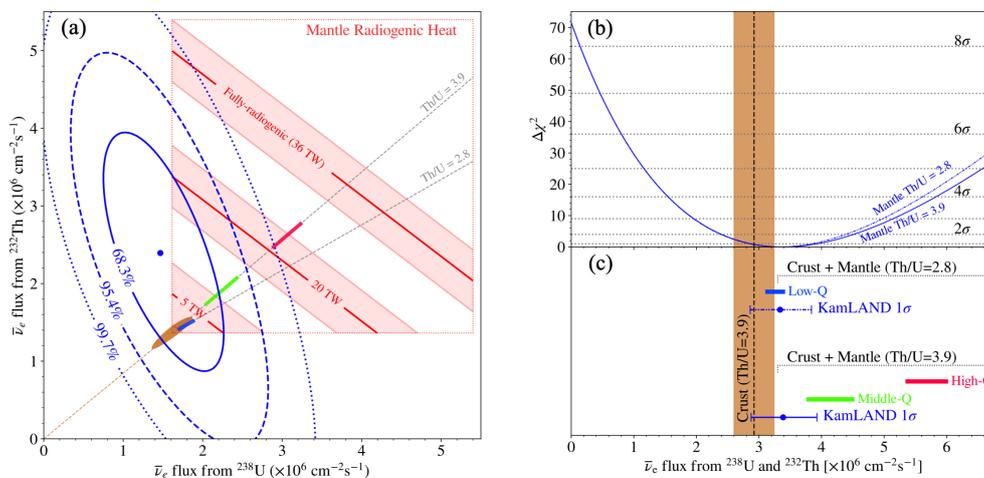


図 3.9 KamLAND における BSE モデルの判別 [28]

### 3.4.2 Borexino

Borexino 実験はイタリアで行われ、KamLAND と同様に液体シンチレータを用いた逆  $\beta$  崩壊反応 (式 (2.42)) を利用して地球ニュートリノの観測を行った。

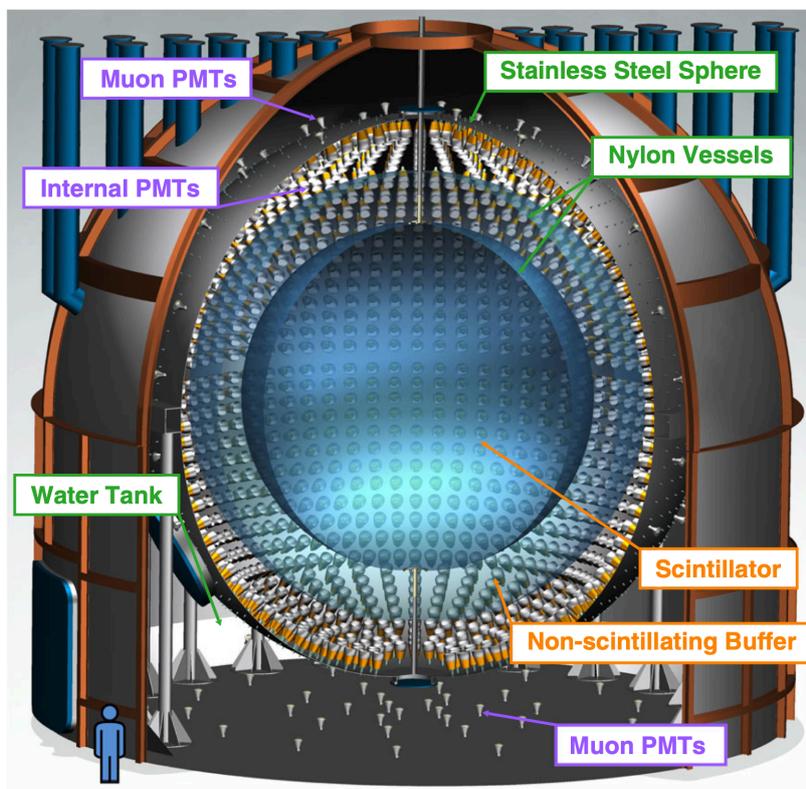


図 3.10 Borexino の概要図 [29]

2010年に地球ニュートリノを初観測し、最終的に LiveTime は 3264.74 日で地球ニュートリノ観測数は  $52.6^{+12.1}_{-10.7}$  である。Borexino による地球ニュートリノの観測結果と地球熱量モデルの判別結果が図 3.11, 3.12 である。Borexino の結果では KamLAND と異なり、High Q モデルが支持されている。この結果の違いは地殻モデルによるものである。

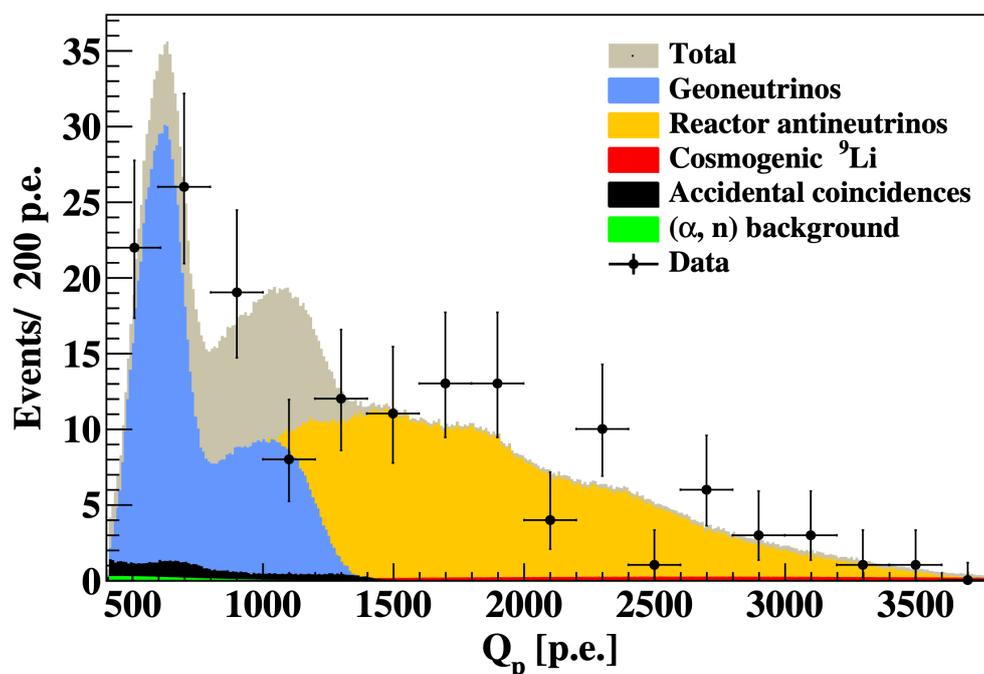


図 3.11 Borexino における地球ニュートリノの観測結果 [29]

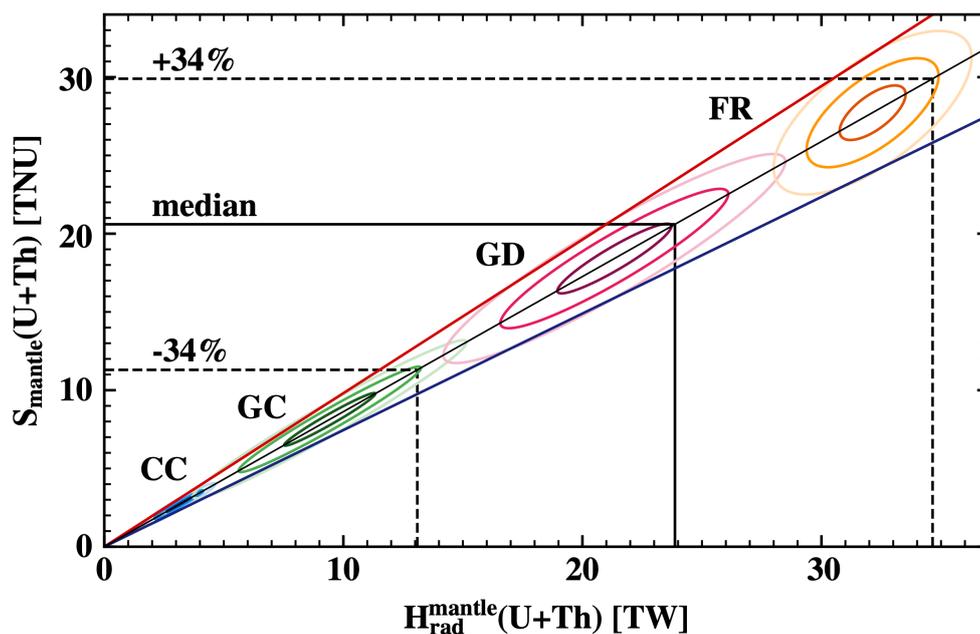


図 3.12 Borexino における BSE モデルの判別 [29]

### 3.4.3 SNO+

SNO+ 実験 [30, 31] はカナダで行われた SNO 実験の検出器を改造したものある。SNO 実験では 1kt の重水を用いて太陽ニュートリノ振動の観測を行った一方で、SNO+ 実験では液体シンチレータを用いて地球ニュートリノや原子炉ニュートリノなどの低エネルギーニュートリノ観測を行っている。KamLAND と同様に液体シンチレータを用いた逆  $\beta$  崩壊反応 (式 (2.42)) を利用して地球ニュートリノの観測を行った。

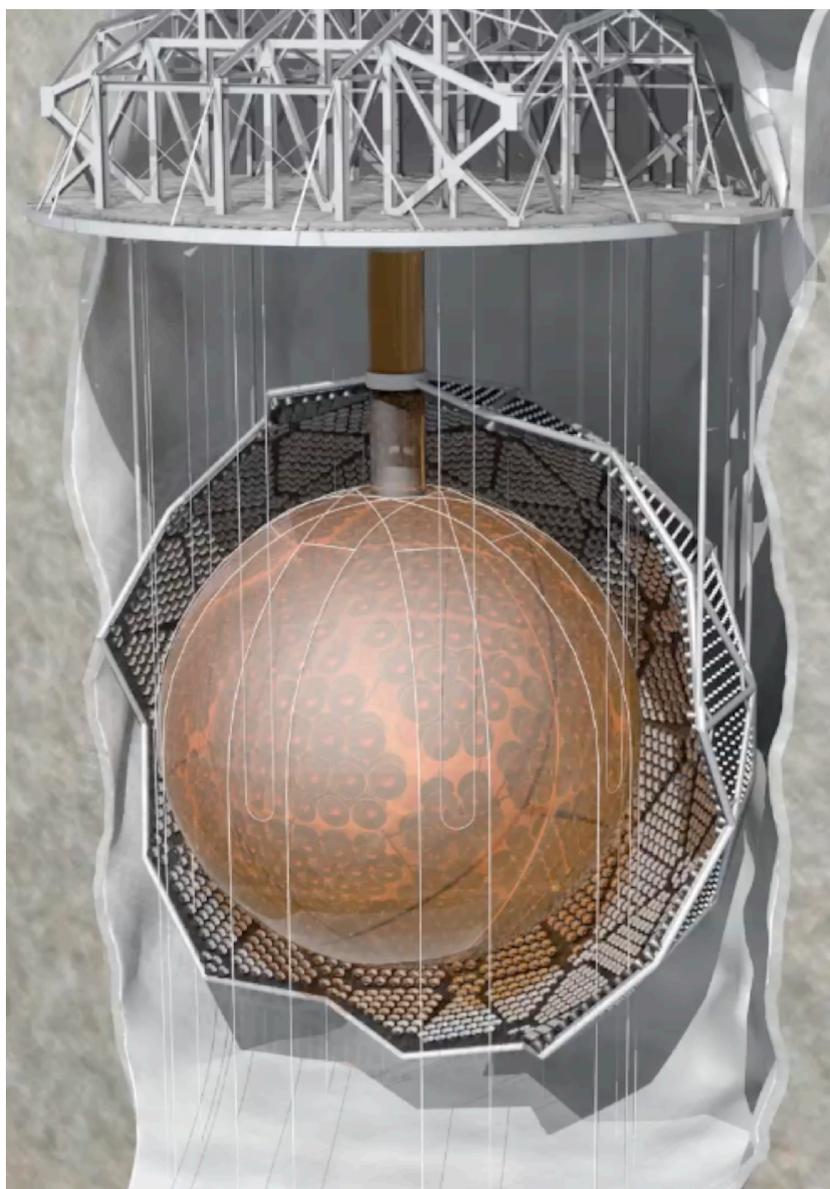


図 3.13 SNO+ の概要図 [30]

2022 年から 2025 年までの観測では、LiveTime 658.21 日で地球ニュートリノ観測数は  $35^{+10}_{-8}$  である。SNO+ による地球ニュートリノの観測結果が図 3.14 であり、フラックスは  $49^{+13}_{-12}$  TNU

となっている。これは、Middle Q モデルと High Q モデルの中間を示唆している。

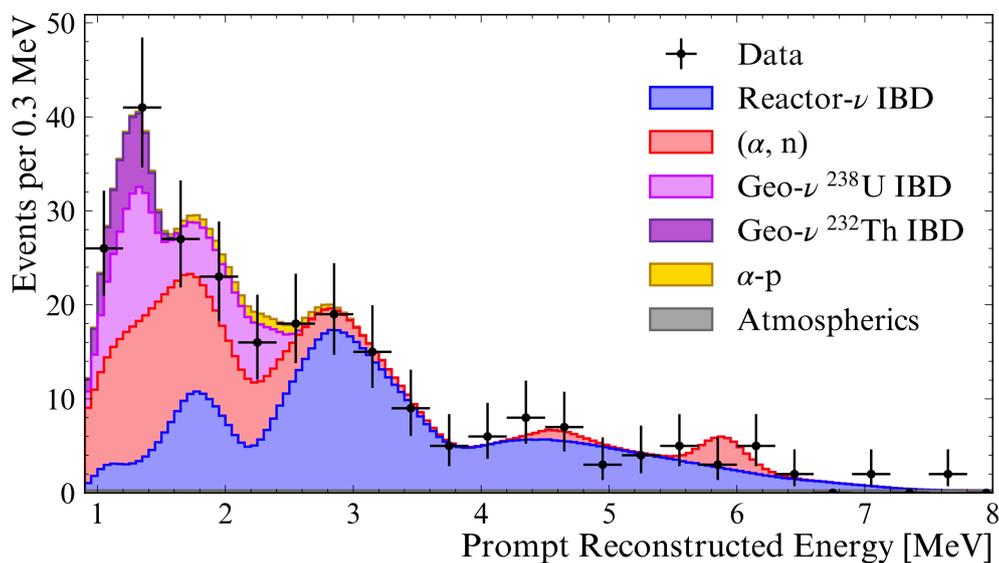


図 3.14 SNO+ における地球ニュートリノの観測結果 [31]

### 3.4.4 JUNO

JUNO 実験 [32, 33, 34] は中国で行われているニュートリノ実験で、20 kt という過去に類を見ない体積の液体シンチレータを利用して観測を行っている。観測対象は地球ニュートリノや原子炉ニュートリノなどの反ニュートリノから太陽ニュートリノのようなニュートリノまで幅広い。

2025 年 8 月 26 日から 11 月 2 日までの観測では、LiveTime 59.1 日で地球ニュートリノ観測数は  $1.4 \pm 0.4$  である。JUNO による地球ニュートリノの観測結果が図 3.16 である。まだ統計が足りておらず、熱量モデルの評価は行っていない。しかし、KamLAND の 20 倍の液体シンチレータ体積から統計が蓄積されるのも時間の問題であり、今後の結果が期待される。

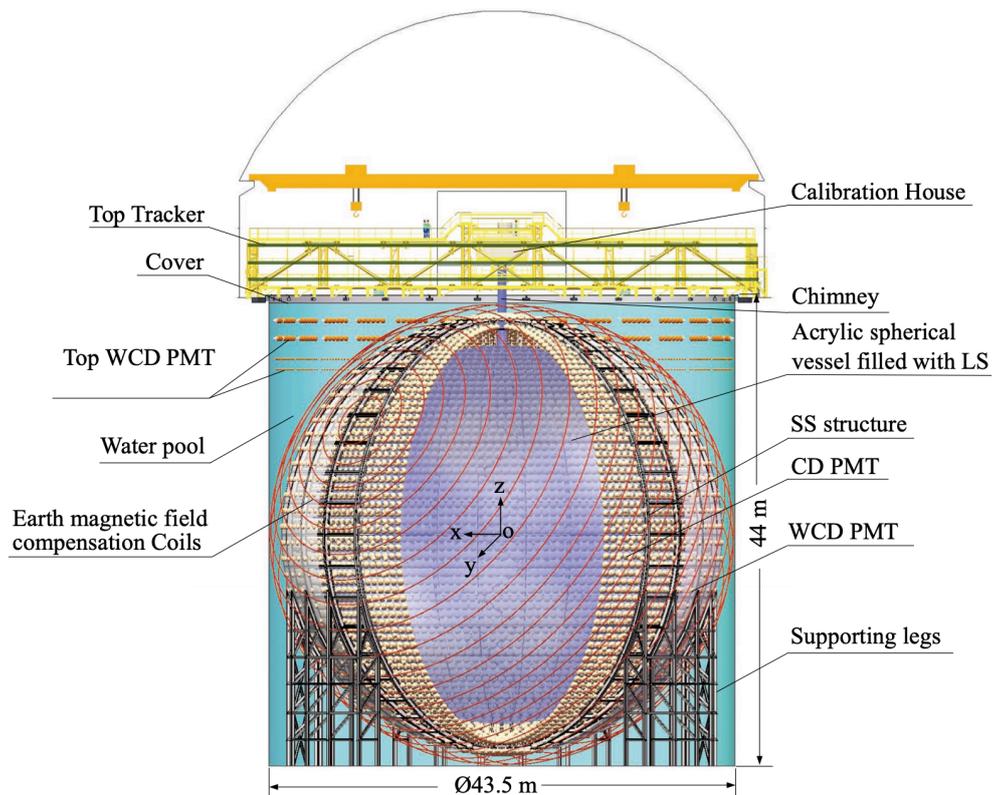


図 3.15 JUNO の概要図 [33]

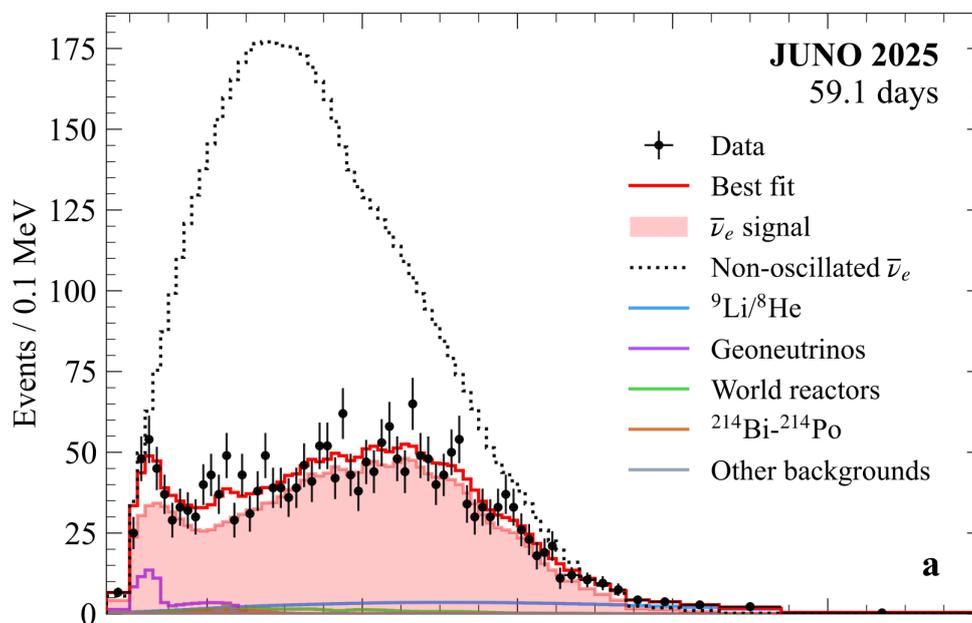


図 3.16 JUNO における地球ニュートリノの観測結果 [34]

## 3.5 地球ニュートリノ観測の課題

3.4 節で述べたように、地球ニュートリノの観測は地球熱量モデルの判別といった地球科学に対する知見を与えることができる。一方、地球ニュートリノの観測には課題も存在する。ここではいくつかの課題を挙げる。

### 3.5.1 $^{40}\text{K}$ 系列の地球ニュートリノ観測

3.3 節で述べたように、KamLAND では  $^{40}\text{K}$  系列の地球ニュートリノは観測することはできない。これは地球ニュートリノの観測に逆  $\beta$  崩壊反応を利用する Borexino や SNO+, JUNO でも同様である。しかし、地球深部の情報を詳細に得るためには  $^{238}\text{U}$  と  $^{232}\text{Th}$  系列の地球ニュートリノに加え、放射性熱の約 16% を占めると考えられる  $^{40}\text{K}$  系列の地球ニュートリノの観測も重要である。そのため、複数の方法が  $^{40}\text{K}$  系列の地球ニュートリノ観測の実現を目指している。

$^{35}\text{Cl}$  をターゲットとした LiquidO 実験では式 (3.4), (3.5), (3.6) の反応を用いている。この反応では逆  $\beta$  崩壊反応よりも低いエネルギーの地球ニュートリノを観測できる。また、発生した陽電子と電子による対消滅で発生する  $\gamma$  線と  $^{35}\text{S}$  の  $\beta$  崩壊で発生する  $\beta$  線を組み合わせて観測を行うことができる。ただし、実際には  $^{35}\text{S}$  の寿命が 87 日と遅く、リアルタイム観測には向いておらず実現には至っていない。



また、反電子ニュートリノの電子散乱を使う方法もある。この反応は閾値がなく、どんなエネルギーに対しても起こる。一方で断面積が極端に小さい、放射性雑音に埋もれやすいなどの理由から実現は難しかった。しかし、JUNO のような低バックグラウンドかつ巨大な検出器では一部感度をもつ可能性もある。



### 3.5.2 検出器の角度分解能

KamLAND をはじめとする地球ニュートリノ観測用の検出器では、液体シンチレータから放出されるシンチレーション光を利用して観測を行っている。その際、逆  $\beta$  崩壊反応を用いた遅延同時計測法が利用されている。



逆  $\beta$  崩壊反応によって生成した陽電子は、数 ns で周囲の電子と対消滅し、511 keV の 2 本の  $\gamma$  線を放出する。



これが先発信号である。一方、中性子は寿命  $210 \mu\text{s}$  で陽子に捕獲され、 $2.2 \text{ MeV}$  の  $\gamma$  線を放出する。



これが後発信号である。このように時間的、空間的に相関のある2つの信号を利用することでバックグラウンドを排除し、反電子ニュートリノを選択的に観測できる。一方で、中性子の放出される角度はニュートリノの到来方向と相関があるものの、陽子に捕獲される平均  $210 \mu\text{s}$  の間に方向情報を失うため、逆  $\beta$  崩壊反応を利用した地球ニュートリノの観測では角度分解能が不足している。角度分解能がある検出器で地球ニュートリノを観測できれば、角度ごとのフラックスから地球内部の放射性元素の分布や LLSVP といった特殊な構造を詳細に知ることができるため、様々な方法が角度分解能を有した地球ニュートリノ観測を目指している。

1つ目は Water-based Liquid Scintillator (WbLS) である。WbLS は水に少量の液体シンチレータを混ぜた溶液であり、シンチレーション光とチェレンコフ光の両方を検出することができる。明るく光るシンチレーション光と方向情報をもつチェレンコフ光を発光の立ち上がりの差で分別し観測することで、低エネルギーである地球ニュートリノを方向感度を持って観測できる可能性が検討されている。

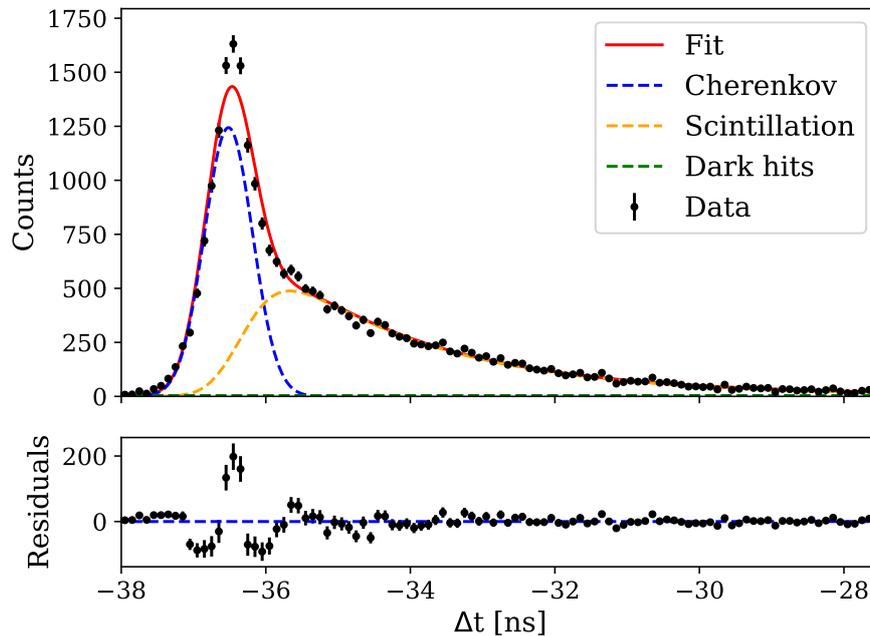


図 3.17 WbLS でのシンチレーション光とチェレンコフ光の分離 [35]

2つ目は、Gd や Li の液体シンチレータへのドーピングである。Gd は中性子の捕獲断面積が非常に大きく、中性子の寿命は  $30 \mu\text{s}$  程度と Gd をドーピングする前の  $1/7$  になる。さらに、放出される  $\gamma$  線のエネルギーが  $8 \text{ MeV}$  程度になることで、放射性雑音を排除した上で中性子の運動が制限され、地球ニュートリノの到来方向への情報はある程度保たれる。一方、Li をドーピングすると、式 (3.11) のように  $\gamma$  線とともに  $\alpha$  線とトリチウムが生成される。 $\alpha$  線とトリチウムは荷電粒子のた

め mm オーダーでエネルギーを局所的に失うため、 $\gamma$  線に比べ位置分解能が良くなる。

$$n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha + 4.78 \text{ MeV} \quad (3.11)$$

3つ目は、統計的分布の活用である。式 (3.8) で生成される陽電子の生成点と中性子捕獲点の空間的ずれの統計的分布からニュートリノの入射方向を平均的に推定できる可能性がある。原子炉ニュートリノのように、到来方向がある方向に定まったニュートリノの角度分解能が式 (3.12) のように表すことができ、数°程度の角度分解能を持つという結果 [36] も出ている。ここで、 $p$  は平均位置分解能、 $d_n$  は先発事象と後発事象の平均距離、 $N$  は方向再構築に用いられた事象数、 $\Pi$  はニュートリノを実際に検出できる有効体積と検出器の総体積の比である。そのため、将来的には 1 イベント毎の地球ニュートリノ到来方向観測にも応用できる可能性がある。

$$[\Delta\varphi]_{1\sigma} = \arctan\left(\frac{p/d_n}{\sqrt{N\Pi}}\right) \quad (3.12)$$

### 3.5.3 地殻寄与の不定性

放射性崩壊元素である  ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ 、 ${}^{40}\text{K}$  の  $\beta$  崩壊で生成される地球ニュートリノのフラックス  $\Phi_i$  は式 (3.13) で表される。

$$\Phi_i = A_i \cdot n_i \cdot P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}(E_{\nu}, |\mathbf{L}|) \cdot \int_V \frac{a_i(\mathbf{L}) \cdot \rho_i(\mathbf{L})}{4\pi|\mathbf{L}|^2} \cdot dV \quad (3.13)$$

この式は空間領域  $V$  に分布する位置  $\mathbf{L}$  の放射性核種  $i$  からの位置  $\mathbf{L}$  における反電子ニュートリノフラックスを想定している。ここで、 $A_i$  は崩壊定数、 $n_i$  は崩壊連鎖ごとの生成反ニュートリノ数、 $P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e}$  はニュートリノ振動による生存確率、 $a_i(\mathbf{L})$  は放射性同位元素の存在量、 $\rho_i(\mathbf{L})$  は岩石の密度、 $dV$  は体積である。図 3.18 は KamLAND における距離ごとの地球ニュートリノ寄与を示しており、KamLAND から半径 500 km 以内の地殻の寄与が 50% を占めていることがわかる。また、各パートの寄与は地殻 70%、マントル 27%、核 0%、堆積岩などが 3% である。マントルからの地球ニュートリノが少ない現状において、地球ニュートリノ観測では検出器周辺の地殻への理解が観測精度に影響を与えている。

観測地での地球ニュートリノフラックスの計算モデルは以下のような手順で構築されている。

1. 地震波解析で深さ方向の地質分布を推定し、地震波速度から岩石の種類に対応させる。
2. 様々な場所で得られた岩石サンプルの微量分析を行い、それぞれの岩石中の U、Th 量 ( $a_i(\mathbf{L})$ ) を決定する。
3. 1. と 2. より式 (3.13) を用いてフラックスを計算する。

現在は、放射性同位元素の存在量  $a_i(\mathbf{L})$  に大きな誤差がある。結果として、地球ニュートリノフラックスの見積もりには複数のモデルが存在し、20–60% の不定数が付いてしまっている。そのため、特に寄与の大きい検出器近くの地殻の詳細な理解が求められ、地球科学分野でも研究が継続されている。

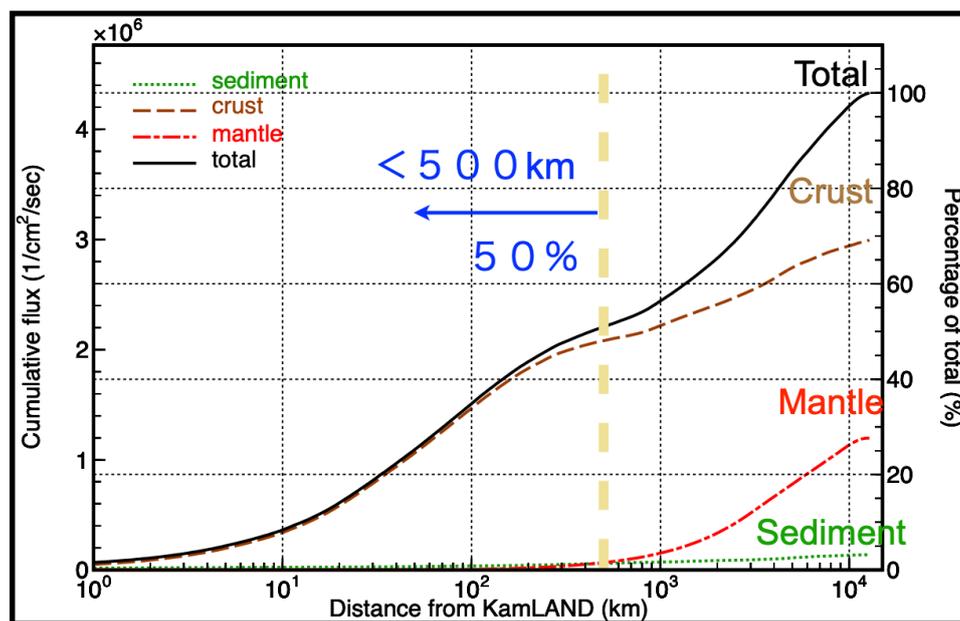


図 3.18 KamLAND における距離ごとの地球ニュートリノ寄与 [37]

各ニュートリノ検出器における BSE モデルの予測を図 3.19 に示す。TW radiogenic power in BSE は BSE モデルの熱量を表している。y 切片を知ることができれば、マントル由来の熱量を知ることができる。そのために、地殻由来の地球ニュートリノが少ない場所での観測が重要である。このような観点から提案されたのが、海洋底ニュートリノ検出器 OBD である。詳細は 4 章で述べる。

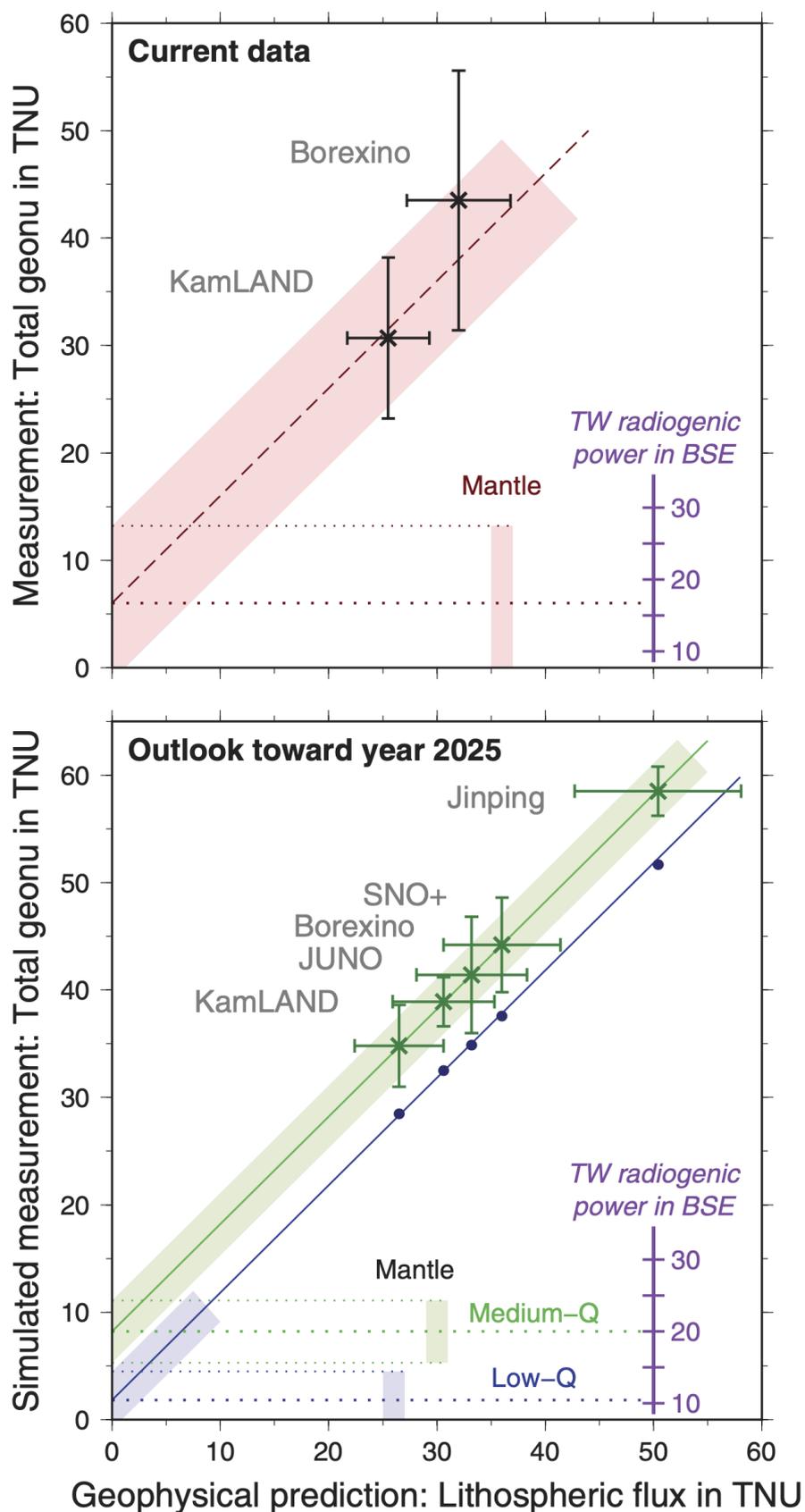


図 3.19 各検出器での全地球ニュートリノ観測数と地殻由来の観測数の関係 [38]。(観測データ(上図)と BSE モデルによる予測値(下図))横軸が地殻由来の地球ニュートリノ数、縦軸が全地球ニュートリノ数を示す。



## 第 4 章

# 海洋底ニュートリノ検出器 OBD

海洋底ニュートリノ検出器 OBD (Ocean Bottom Detector) とは、深海での反電子ニュートリノの観測を目的とした検出器である。反電子ニュートリノとは地球内部の放射性元素が崩壊した際に放出される地球ニュートリノのことを指し、特にマントル由来の地球ニュートリノの観測を目指している。設置場所はハワイ沖の深海 4km が第一候補であり、海水によって宇宙線ミュオン由来のバックグラウンドを低減することができる。検出器を深海に沈めてマントル由来の地球ニュートリノの観測をする試みは、2005 年にハワイ大学で Hanohano プロジェクトとして発案された。当時の Hanohano の検出器の概略図は図 4.1 の通りである。その後、具体的な発展はなかったが、2019 年から東北大学と JAMSTEC (海洋研究開発機構) の共同研究が始まり、2025 年からはハワイ大学、ローレンス・リバモア国立研究所など海外の研究者も加わり国際研究が進められている。

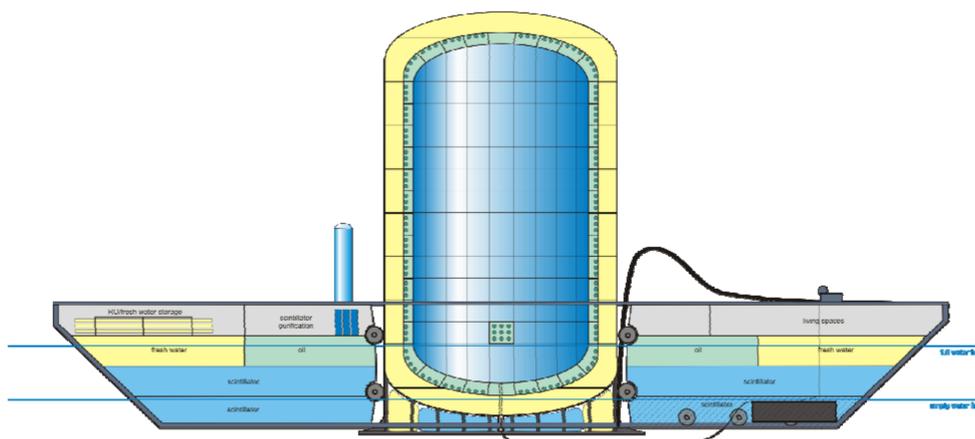


図 4.1 Hanohano の概略図 [39]。タンクのサイズは直径 26m、高さ 45m。

## 4.1 OBD プロジェクト

OBD プロジェクトでは液体シンチレータのサイズが 1.5–20 kt の大型検出器の稼働を目指している。1.5 kt 検出器は JAMSTEC の持つ船舶に乘せられる検出器の最大サイズである。液体シンチレータのサイズは観測できるニュートリノ事象数に比例しており、KamLAND (1 kt)、Borexino (800 t) よりも大型化した検出器が計画されている。

目標達成のために、20 kg (プロトタイプ) 検出器、大型検出器と段階を追っての計画が立てられている。1.5 kt 検出器と船舶サイズの制約を外した 17 kt 検出器の観測感度についてはシミュレーション済み (図 4.2, 4.3) であり、いずれも地球ニュートリノの観測が十分可能であることが示されている。しかし、統計量には大きな差があり、ランニングコストなどを踏まえてどちらの規模が最適かを検討する必要がある。検出器の設置方法については、地上で液体シンチレータを含む各構成要素をあらかじめインストールし、その後船舶で設置海域まで輸送して海中へ沈設する方式を想定している。現在は、プロトタイプ検出器や大型検出器のための技術開発が進められており、実現すれば世界で初めて海底環境で液体シンチレータ検出器を長期運用する画期的なプロジェクトとなる。

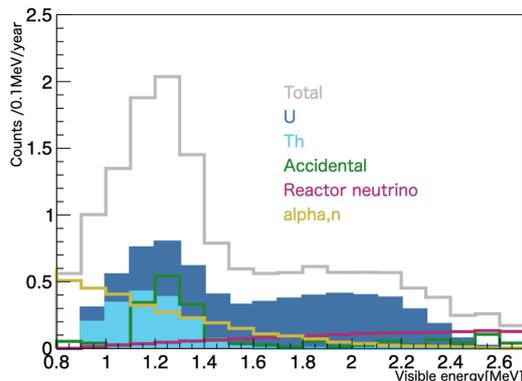


図 4.2 1.5 kt 検出器の予想スペクトル [40]

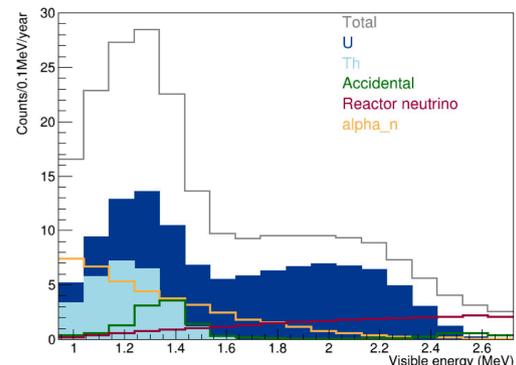


図 4.3 17 kt 検出器の予想スペクトル [41]

## 4.2 大型検出器の構造

大型検出器の構造を図 4.4 に示す。最外層のステンレスタンク内には内部検出器 (Inner Detector) として液体シンチレータと光電子増倍管 (Photomultiplier, PMT)、バッファオイルが内包されている。バッファオイルは液体シンチレータが収納されたアクリル容器と PMT の間を満たしている。図 4.4 には含まれていないが、液体シンチレータとバッファオイル用の圧力補償機構も必要である。また、ステンレスタンク外側には外部検出器 (Outer Detector) として PMT が取り付けられている。海底での高圧に耐えるため、PMT はガラス製のシールドで囲い保護する必要がある。

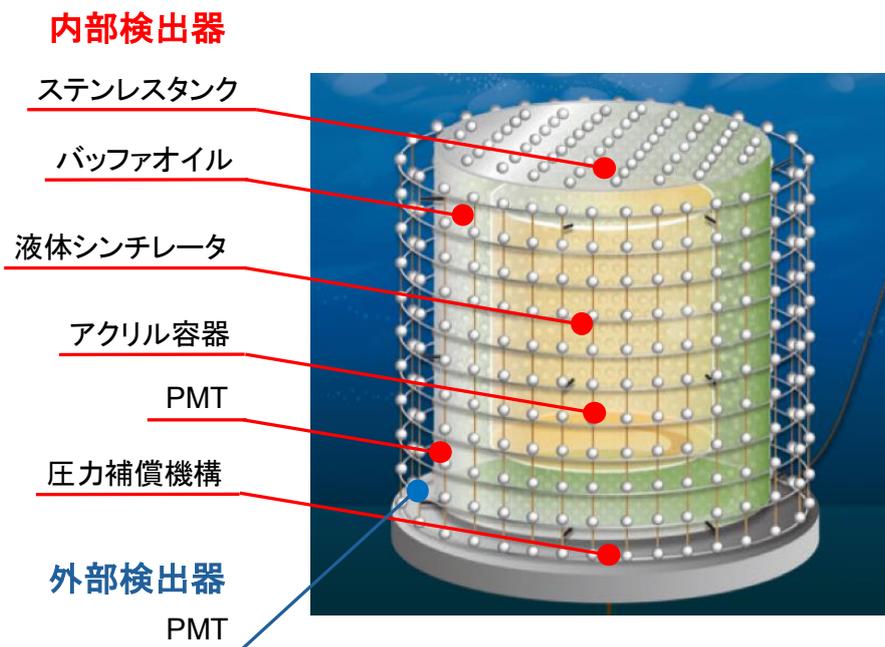


図 4.4 大型検出器の概略図

### 4.2.1 内部検出器

#### 液体シンチレータ

液体シンチレータ中では荷電粒子がエネルギーを付与することで、シンチレータ中の物質が励起され、その後脱励起によってシンチレーション光が等方的に放出される。そのため、地球ニュートリノが通過した際に発生するシンチレーション光を利用して観測を行う。低エネルギーである地球ニュートリノを検出するため、高発光量、高透過率、低放射能が要求される。現在は液体シンチレータの有機溶媒として LAB、発光物質として PPO が候補になっている。それぞれの組成について、表 4.1 にまとめる。

表 4.1 液体シンチレータの構成要素

物質名	分子式	密度	引火点
リニアアルキルベンゼン (LAB)	$C_mH_{2m-6}$	$0.86 \text{ g/cm}^3$	$150^\circ\text{C}$
2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO)	$C_{15}H_{11}NO$	—	—

## 光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT)

光電子増倍管とは、高い時間分解能を持ち、微弱な光を増幅した上で電気信号に変換する装置である。この機器でシンチレーション光を検出する。PMTの光電面にシンチレーション光が当たると光電効果によって光電子が放出される。この電子は、収束電極で加速されてダイノードへ導かれる。ダイノードで衝突し二次電子が放出されるという過程を繰り返して、 $10^7$ 程度まで増幅させることで微弱な光の検出を可能にしている。内部検出器では KamLAND2 で使用予定の 20 inch PMT が 1.5 kt 検出器では約 3000 本、17 kt 検出器では約 12000 本設置する予定である。

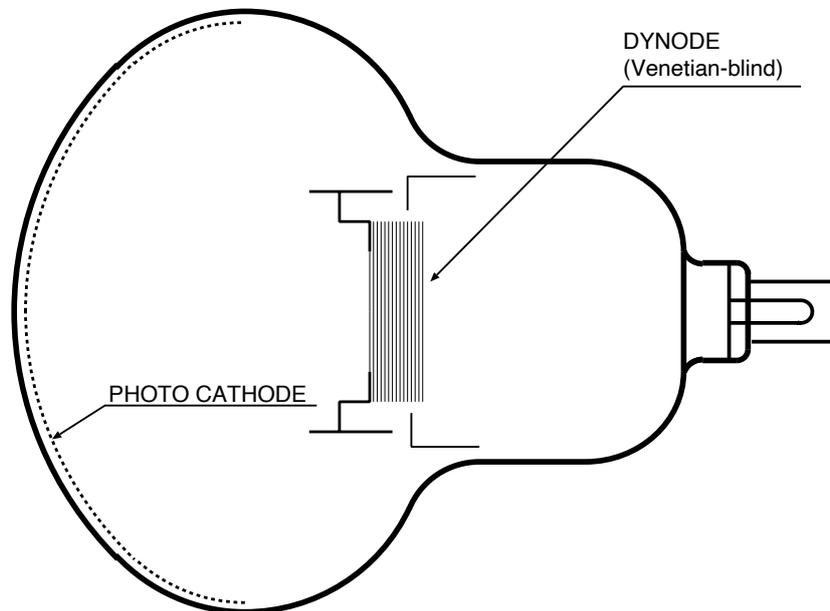


図 4.5 20 inch PMT

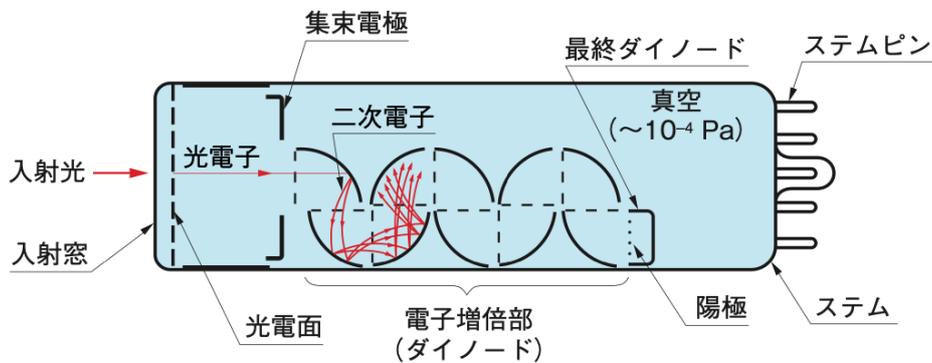


図 4.6 PMT の原理 [42]

## PMT シールド

観測は 4 km の深海で行うため、検出器には約 40 MPa の圧力がかかってしまう。PMT は圧力に弱く破裂してしまうことを防ぐためにシールドを PMT に装着させる予定である。このシールドは、海底の高圧に対する耐圧性と、ニュートリノ観測のバックグラウンドとなる放射性物質が少ないことが要求される。PMT シールドの開発は既に行われ、岡本硝子のガラスシールドが採用された。放射性物質量は表 4.2 の通りである。

表 4.2 ガラスシールド中の放射性物質量

	$^{238}\text{U}$ [ppb]	$^{232}\text{Th}$ [ppb]	$^{40}\text{K}$ [ppb]
目標値	10	10	10
測定値	14	< 5	3.4

## バッファオイル

PMT や PMT シールドなど、外部からの放射線を液体シンチレータに侵入させない役割がある。本研究ではバッファオイルの構成要素の決定や性能評価を行った。詳細は 5 章で述べる。

## ステンレスタンク

円柱型のステンレスタンクを使用する予定である。ステンレスは鉄を主成分とし、放射性物質の含有量が非常に少なく耐久性に優れている。

## アクリル容器

円柱型のアクリル容器を使用する予定である。アクリルは高透過率と放射性物質の含有量が少ないという特徴を持っている。また、20 kt 液体シンチレータ検出器 JUNO でもアクリルの球体容器が使用され、実績も十分である。アクリル容器の内部には液体シンチレータ、外部にはバッファオイルと密度の異なる液体が充填されるため、密度差による荷重を受ける。そのため、本研究ではアクリルの強度試験を行った。詳細は 6 章で述べる。

## 圧力補償機構

圧力および温度変化に対する LAB の密度測定結果を図 4.7 に示す。4 km 深海環境では高圧・低温の影響により LAB の密度が増加し、地上に比べて体積が減少する。同様の現象はバッファオイルでも生じるため、両液体の体積減少を補償するには、地上であらかじめ補填用の液体を収容したホースあるいはバッグなどの圧力補償機構を設けておく必要がある。また、圧力補償機構を導入することで、可変容積のホースやバッグが外部圧力を受け流し、装置内部の圧力が外部水圧

に追従する。これにより、タンク内外の圧力差を小さくでき、壁厚を薄くすることが可能となる。結果として、検出器の軽量化や製作の容易化にもつながる。

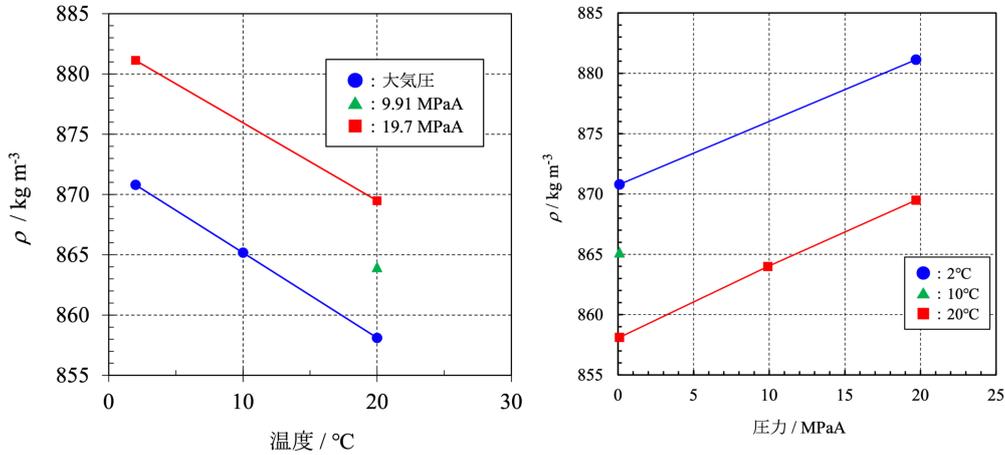


図 4.7 LAB の温度と圧力に対する密度変化 [43]

## 4.2.2 外部検出器

ステンレスタンクの外側は外部検出器として利用される。主な目的は、検出器内に入る宇宙線ミュオンを検出である。海中を通るミュオンはチェレンコフ光を放出するため、その光をステンレスタンク外側の PMT で検出することで veto として用いる。また、チェレンコフ光を用いて、高エネルギーの大気ニュートリノの観測も行うことができる。PMT は 1.5kt 検出器で 160 本、17kt 検出器で 3850 本使用予定である。

## 4.3 ニュートリノ検出原理

OBD では反ニュートリノである地球ニュートリノ以外にも電子ニュートリノやミューニュートリノである大気ニュートリノの観測を行う。地球ニュートリノの観測は 3 章で述べたように、地球のダイナミクス、地球形成を検証できるが、大気ニュートリノの観測でも地球内部の知見を得ることができる。大気ニュートリノは地球内部を通る際に地球の電子密度に依存してニュートリノ振動が行われる。そのため、ニュートリノ振動を観測・比較することで地球内部の組成を調べる。ここでは地球ニュートリノと大気ニュートリノの検出原理について述べる。

### 4.3.1 地球ニュートリノ検出

地球ニュートリノのような反ニュートリノは、低エネルギー領域であり、内部検出器中で発生するシンチレーション光を用いて検出する。その際、逆  $\beta$  崩壊反応を用いた遅延同時計測が利用されている。



逆 $\beta$ 崩壊反応によって生成した陽電子は、数 ns で周囲の電子と対消滅し、511 keV の 2 本の  $\gamma$  線を放出する。



これが先発信号である。一方、中性子は寿命 210  $\mu$ s で陽子に捕獲され、2.2 MeV の  $\gamma$  線を放出する。



これが後発信号である。このように時間的、空間的に相関のある 2 つの信号を利用することでバックグラウンドを排除し、反電子ニュートリノを選択的に観測できる。

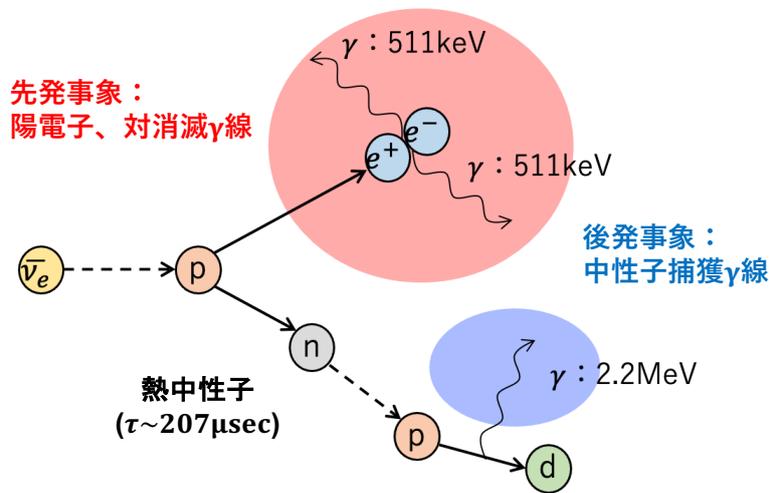
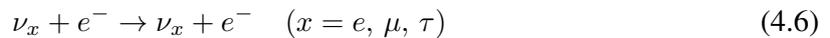


図 4.8 逆ベータ崩壊反応による反電子ニュートリノの検出 [44]

### 4.3.2 大気ニュートリノ検出

電子ニュートリノやミューニュートリノである大気ニュートリノは高エネルギー領域であり、海水中で生じるチェレンコフ光を用いて検出する。チェレンコフ光はニュートリノが原子核や電子と荷電カレント (CC) 相互作用や中性カレント (NC) 相互作用をした際に発生する。チェレンコフ光は図 4.9 に示すようにリング状に発生するため、大気ニュートリノの方向情報を得ることができるという利点がある。



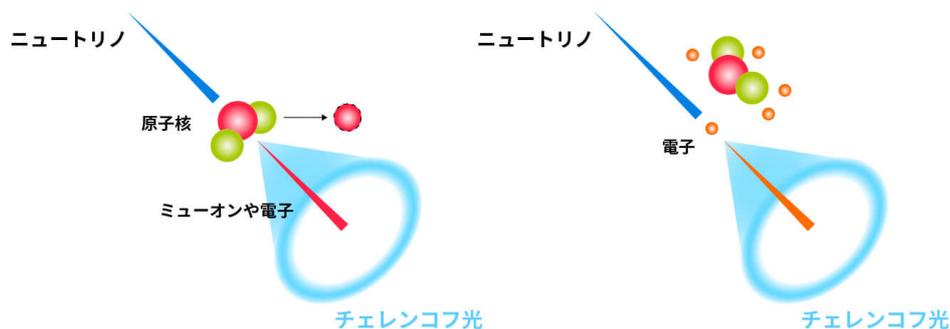


図 4.9 大気ニュートリノ検出原理 [45]

## 4.4 プロトタイプ検出器

### 4.4.1 目的と設置場所

プロトタイプ検出器の目的を以下に示す。

- 深海検出器開発の知見の獲得
- 深海と地上間でのデータ取得の開発
- 深海環境における液体シンチレータの特性変化の測定
- 深海設置の手順の確立
- 長期間観測における検出器の安定性の確認
- その他、大型化に向けた課題の洗い出し

観測対象としては、さまざま候補が挙げられている。例えば、放射線源を検出器と一緒に深海に沈めることによる検出器性能の時間変化の観測、深海中の放射性物質、深海でのミューオンレートなどを計画している。深海でのミューオンレートについてはシミュレーション済みであり、宇宙線ミューオンのフラックスは  $2.11 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、平均エネルギーは 186 GeV となった。これは 1 ヶ月の観測で 2748 個のミューオンを観測するということになる。

設置場所は、1 km の深海を予定している。深海 1 km は約 10 MPa の高圧、1 年を通して 2–4°C の低温と、OBD 大型検出器の設置環境と酷似している。具体的な設置候補は 2 つある。一つは、相模湾初島沖に JAMSTEC が設置した深海総合観測ステーション (図 4.11) である。こちらは電力、通信、モニター設備などが完備されている。もう一つはハワイ大学の知見が深いハワイ沖 1 km 深海である。

### 4.4.2 構成要素

プロトタイプ検出器の構造を図 4.12 に示す。ステンレス製タンク内部に 2 つの光検出器モジュールと液体シンチレータ、圧力補償ホースが内包されている。ここでは、それぞれの構成要

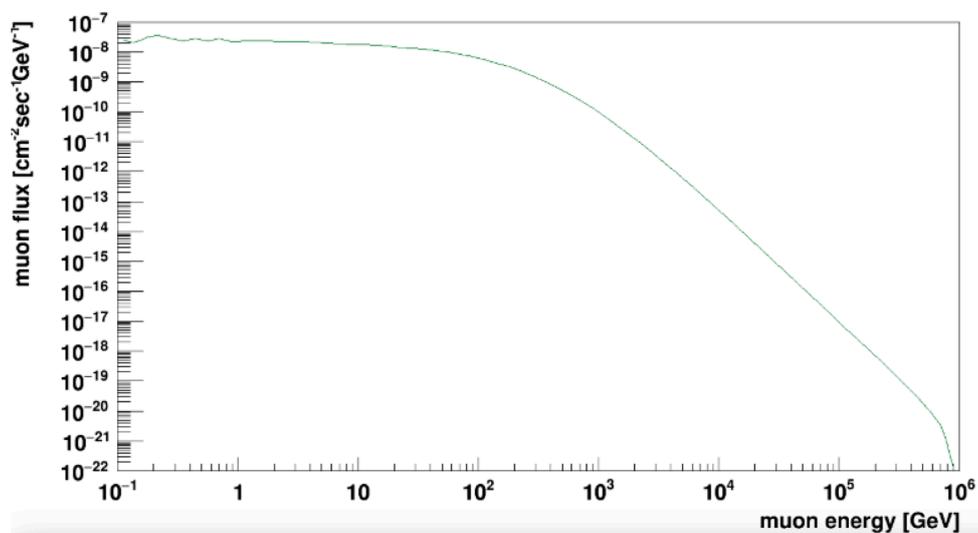


図 4.10 深海 1 km におけるミューオンのエネルギー分布 [43]

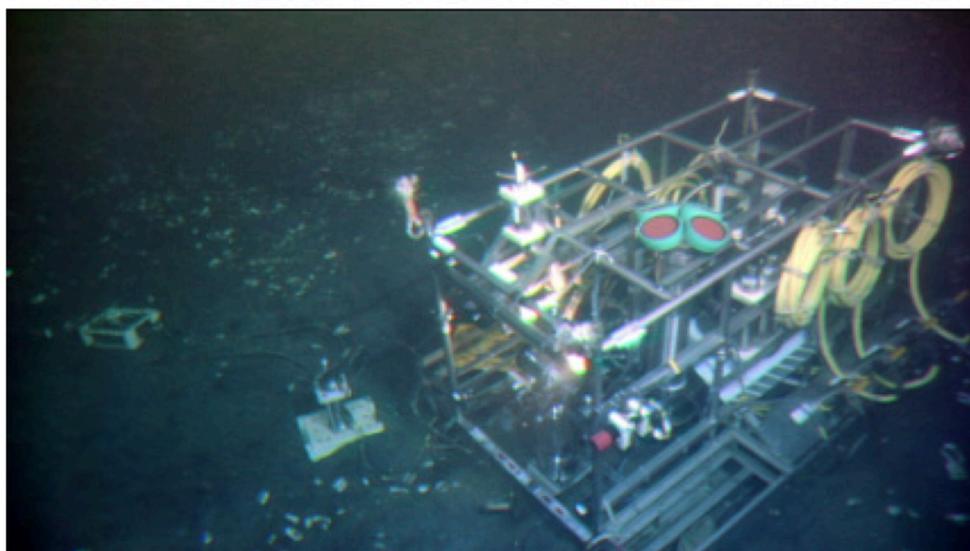


図 4.11 深海総合観測ステーション

素について説明する。

### ステンレス製タンク

プロトタイプ検出器の最外装を担う、平面寸法  $1.28\text{ m} \times 0.62\text{ m}$ 、高さ  $0.63\text{ m}$  のステンレス製の容器である。万が一に内部の液体シンチレータが漏れた時に、海に流出するのを防ぐ。内部圧力の保持のため、内部は海水で満たされる。

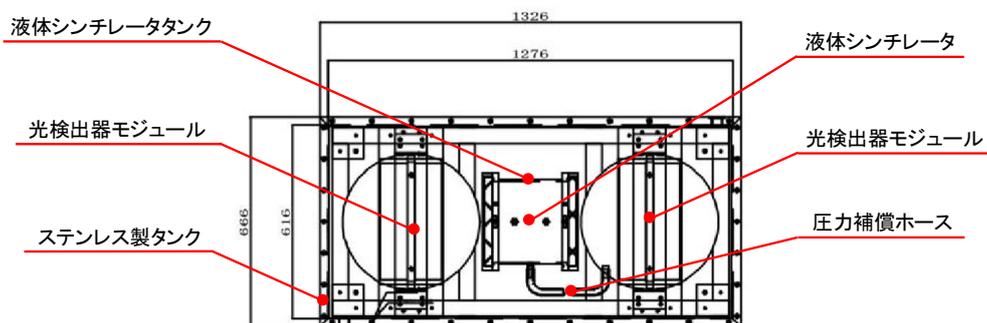


図 4.12 プロトタイプ検出器の概要図

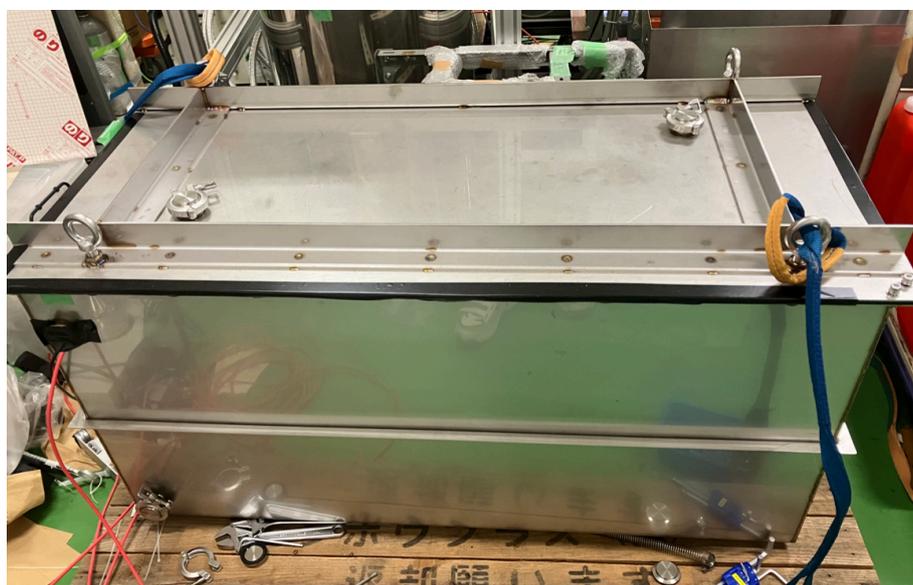


図 4.13 ステンレス製タンク

## 液体シンチレータと容器

プロトタイプ検出器では表 4.3 に示す組成の液体シンチレータを使用する予定であり、今後は OBD-LS と呼ぶことにする。また、液体シンチレータは両側にアクリルの円板を挟み込んでビューポートとしたステンレス管の容器に入れられる。ステンレス管とアクリル板の間はゴムの O リングでシールを形成している。ステンレス管側面には、窒素バブリング用ポート、排気用ポート、圧力補償機構の接続ポートがついている。

## 圧力補償機構

プロトタイプ検出器では圧力補償機構としてホースを使用する。バッグ型は大容量にも対応できるが、接続部の強度や接続のしやすさなどの点から排除された。ホースの素材としては LAB に

表 4.3 OBD-LS の構成要素

物質名	分子式	密度	比率
リニアアルキルベンゼン (LAB)	$C_mH_{2m-6}$	0.86 g/cm <sup>3</sup>	100%
2,5-ジフェニルオキサゾール (PPO)	$C_{15}H_{11}NO$	—	3.0 g/l
OBD-LS	—	0.863 g/cm <sup>3</sup>	—



図 4.14 液体シンチレータタンク

対する薬品耐性や圧力が加わった際の潰れ方などから PFA が採用された。深海 1 km 対応の耐圧試験をクリアし、完成したホースの構造が図 4.15 である。継手付近のチューブ形状を維持し機能的耐圧性を十分に持たせるために、樹脂インサートが挿入されている。



図 4.15 圧力補償ホース

## 光検出器モジュール

光検出器モジュールは液体シンチレータの発光を捉える PMT と PMT で得られたシグナルを読み出すデータ取得回路、PMT に電圧を印加する電源供給用回路基盤などが耐圧性の高いガラスに内包されたものである。IceCube 実験で使用予定の D-Egg を参考に千葉大学ハドロン宇宙国際研究センターとの共同研究が進められている。

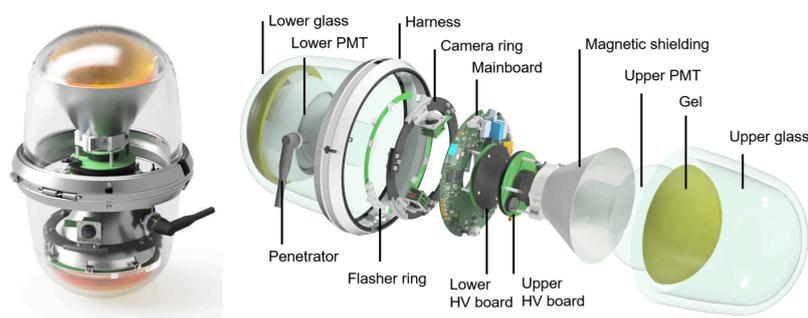


図 4.16 D-Egg の概要 [46]

## 4.5 海洋底ニュートリノ検出器の特徴

### マントル由来の地球ニュートリノ直接観測

KamLAND のような既存のニュートリノ検出器の大半は大陸上に設置されている。大陸上での地球ニュートリノ観測では、図 4.17 に示すように大陸地殻由来のニュートリノフラックスが大きくなってしまい、マントル由来の地球ニュートリノフラックスの割合は 20% にも満たない。一方、OBD の場合は地殻の薄い海洋底に検出器を設置することでマントル由来の地球ニュートリノフラックスの割合は約 70% である。

現在の地球ニュートリノ観測では全地球ニュートリノフラックスから地殻の寄与を引くことでマントルの寄与を計算している。しかし、地殻モデルから計算された地殻の寄与は大きな不定性を持っており、地殻の寄与とマントルの寄与を正確に分別できていない。そのため、OBD でマントルの寄与を正確に測定することは地球の熱量モデルの特定にも重要な意味を持つ。

### 低バックグラウンドでの観測

地球ニュートリノ観測において、原子炉ニュートリノは重要なバックグラウンドである。原子炉ニュートリノは、地球ニュートリノと同様の反電子ニュートリノであり、同様に逆  $\beta$  崩壊反応を用いた同時遅延計測法で観測を行っているためデータから排除するのが簡単ではない。しかし、OBD 検出器は海底に設置され、大陸上の原子炉から離れることで原子炉ニュートリノのバックグラウンドを低減することができる。

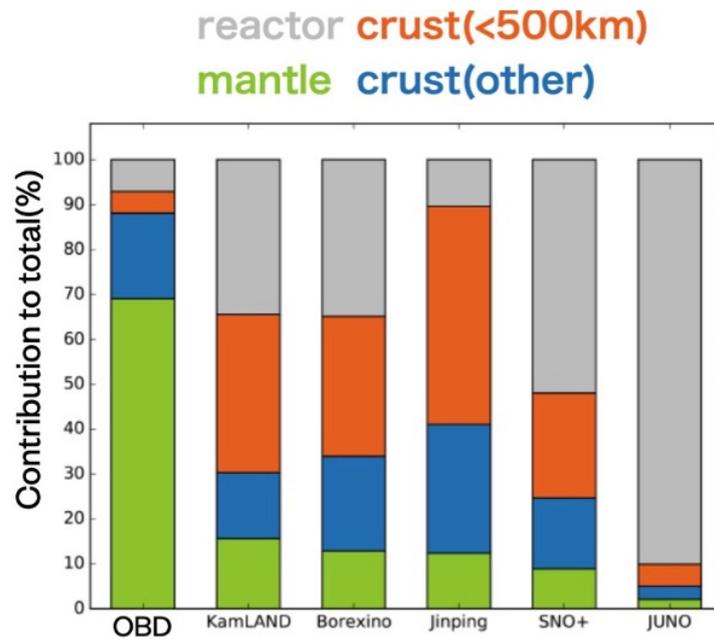


図 4.17 反電子ニュートリノ総量への寄与 (Šrámek, O. 氏より) [47]

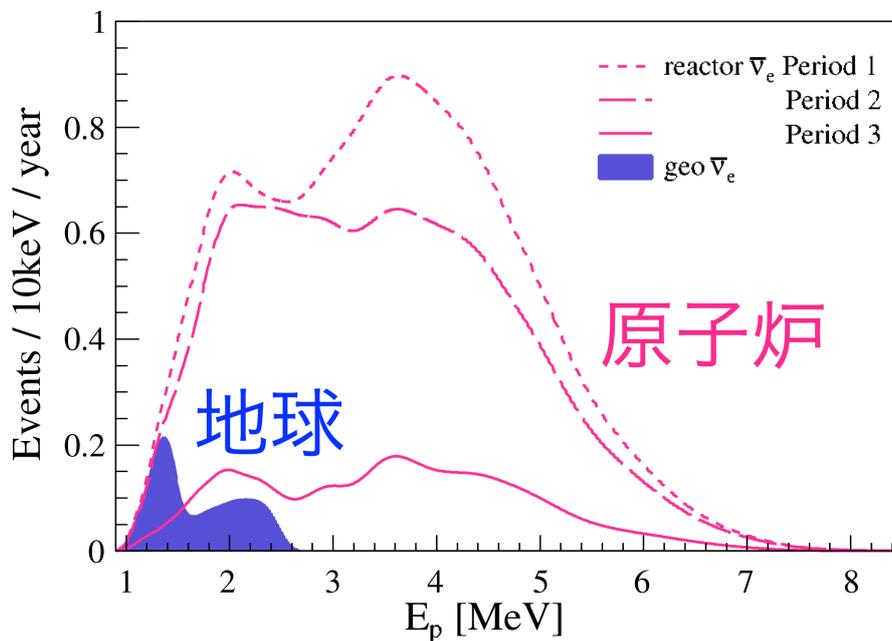


図 4.18 KamLAND における地球ニュートリノと原子炉ニュートリノスペクトル

## 複数地点観測

OBD では検出器を船で運び、海底に沈めるため移動しながら複数地点での観測が容易に行える。図 4.19 に示すように予想されるニュートリノフラックスやマントル寄与の割合は観測場所に

よって大きく異なるため、複数地点での観測から地球内部の知見を詳細に得ることが期待できる。

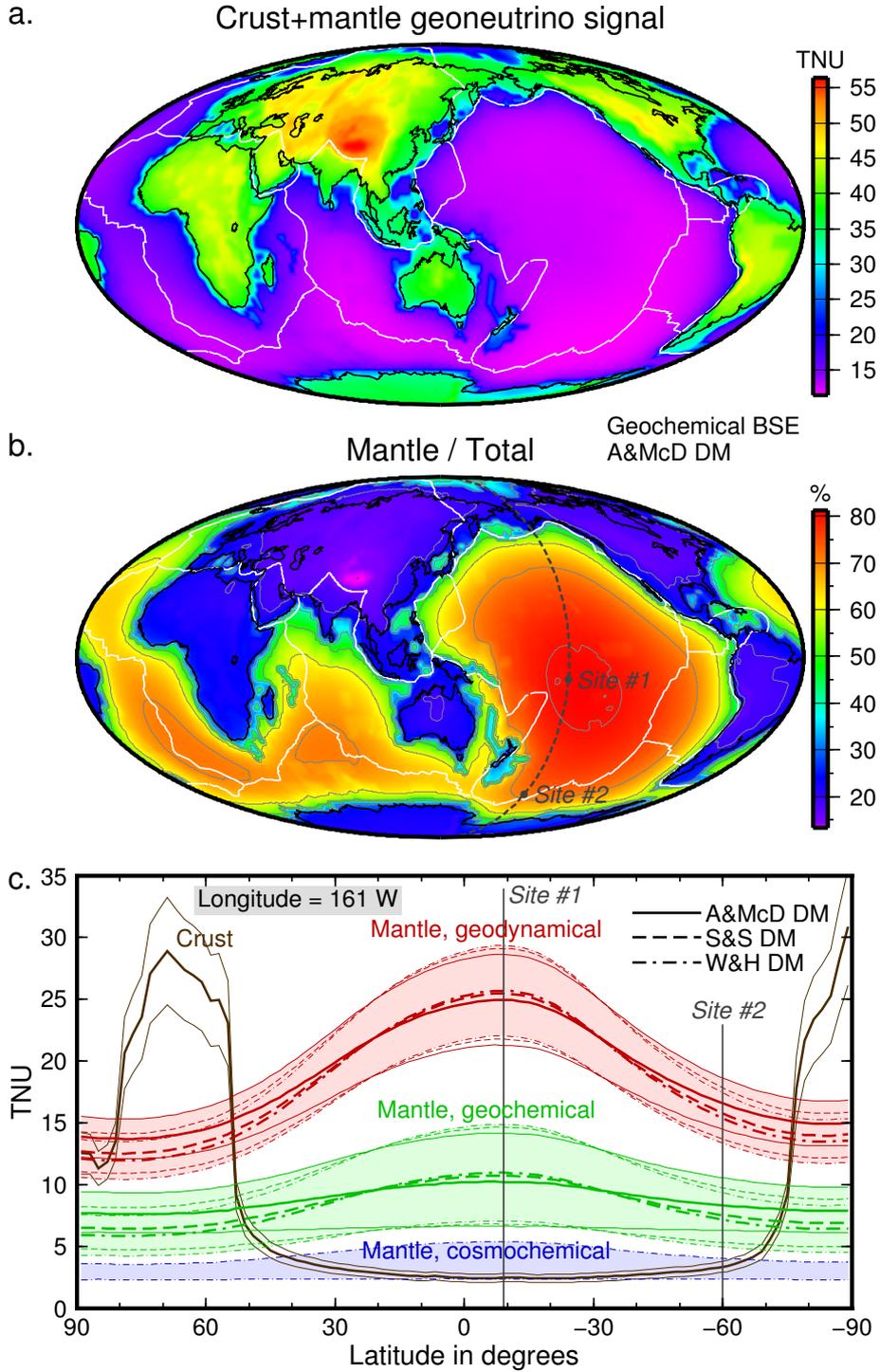


図 4.19 地球ニュートリノフラックスの分布図 [47]

## 4.6 本研究の目的と位置づけ

本章では、OBD の概要や状況について述べてきた。ここでは、OBD プロジェクト全体における本研究の位置づけと目的について説明する。

既に述べたように、OBD はハワイ大学で提案された Hanohano プロジェクトを前身としている。そのため、OBD では Hanohano プロジェクトで得られた知見を活用できるという利点がある。一方で、Hanohano プロジェクトからの変更点も存在しており、それらに伴う設計や評価の見直しが求められている。ここでは、Hanohano プロジェクトからの主な変更点を二つ挙げる。

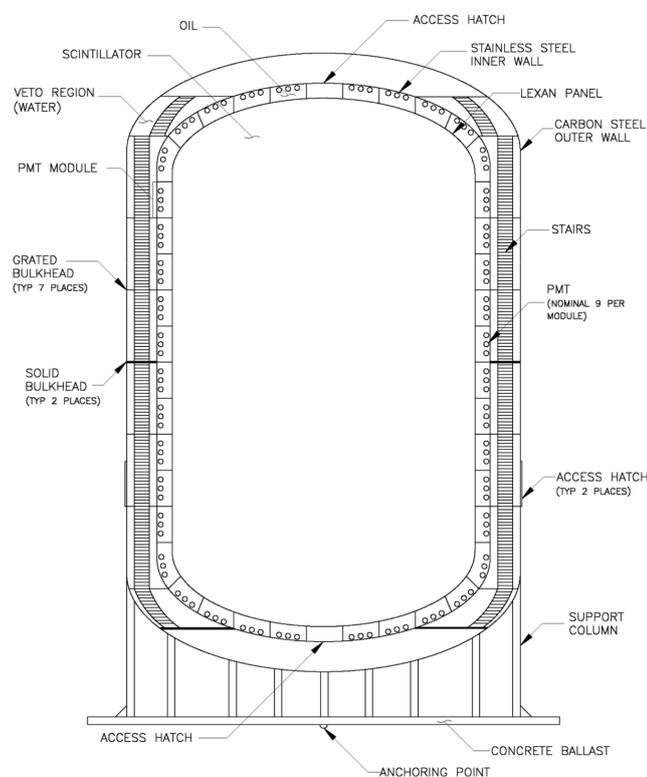


図 4.20 Hanohano 検出器

一つ目は、veto として用いる外部検出器に海水を利用する点である。Hanohano プロジェクトでは、検出器内部に純水層を設け、これを veto として利用する計画であった。一方、OBD では検出器内部に純水層を設けず、外部の海水を利用することで、検出器コストの削減および構造の単純化を図っている。

二つ目は、バッファオイルの配置方法である。Hanohano プロジェクトでは、図 4.21 に示すように、レキサンを 9 つに分割し、各区画内に PMT とバッファオイルを封入したものを、液体シンチレータの周囲に多数配置する構造が想定されていた。一方、OBD では液体シンチレータ層とバッファオイル層の間を一つのアクリル容器によって分離する構造を採用しており、バッファオイル領域は分割されない。また、PMT はステンレスタンクの内壁に設置される。この構造では、

液体シンチレータとバッファオイルの密度差に起因する荷重がアクリル容器に作用するため、アクリルのクリープ現象を考慮した工学的安全性評価が必要となる。しかし、Hanohano プロジェクトにおいては、液体シンチレータの溶媒として LAB が候補とされていたものの、バッファオイルの組成や密度、ならびにアクリルのクリープ現象については、詳細な議論がなされていなかった。

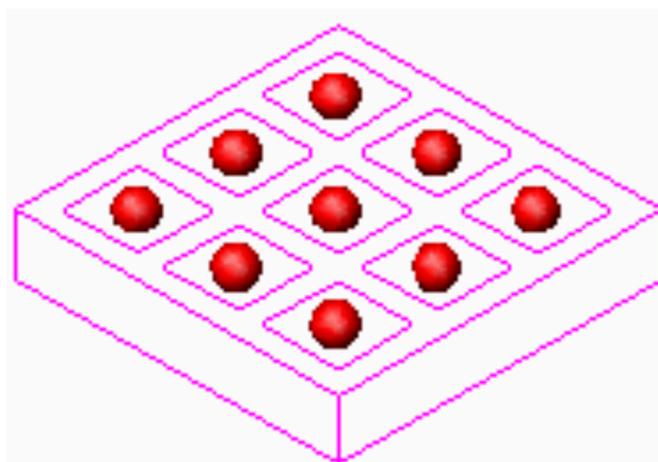


図 4.21 Hanohano のバッファオイル構造。ピンクがレキサン、赤丸が PMT を表す。

以上の変更を踏まえ、OBD ではアクリルのクリープ現象やバッファオイルの密度といった要素を新たに考慮した検出器設計が求められている。そこで本研究の目的は、これらの要素を考慮した上で、工学的要求を満たす検出器構造を設計することである。さらに、ニュートリノ実験として必要な物理学的要求を満たしているかについても評価を行う。これらの目的を達成するため、検出器設計に先立ち、組成が未確定であるバッファオイルの選定およびアクリルの強度試験を実施した上で、検出器設計を行った。加えて、本研究で行なった検出器設計より、新たに想定される課題についても整理した。

## 第 5 章

# バッファオイルの選定

OBD 検出器では検出器中心に半径 6 m、高さ 14 m の円柱型アクリル容器が設置されており、その周囲 3 m がバッファオイルで満たされる予定である。バッファオイルはアクリル容器を支えるとともに、ID を構成するステンレスタंकや PMT からの  $\gamma$  線を遮蔽する働きを持つ。

JUNO や SNO+ では超純水をバッファオイルとして用いており、低コストや高透過率といったメリットがある。一方で、超純水を長期利用する場合、循環をさせないと透過率の低下が懸念されるが、海底で超純水を循環させることは簡単ではない。また、純水の密度が 20 °C で約 1.0 g/cm<sup>3</sup> であるのに対し、JUNO や SNO+ で液体シンチレータに使われる LAB の密度は 0.858 g/cm<sup>3</sup> と密度差が大きい。そのため、JUNO や SNO+ では液体シンチレータが入れられたアクリル容器の周囲に支持用のステンレスや紐が存在し、集光量への影響が懸念される。

以上の理由から、OBD では密度が LAB と同程度のパラフィン系オイルをバッファオイルとして使用する。パラフィン系オイルは、炭化水素の混合物であり、化学的に安定で経時劣化が少ないのが特徴である。バッファオイルには液体シンチレータと同程度の密度以外にも、液体シンチレータの発光をロスが少なく、PMT まで到達するように、アクリルや液体シンチレータと同程度の屈折率、高透過率を持つことが要求される。ここでは、表 5.1 に KamLAND で使われているバッファオイルの構成要素についてまとめる。

表 5.1 KamLAND バッファオイルの構成要素

物質名	分子式	密度	比率
ドデカン	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	0.749 g/cm <sup>3</sup>	53 %
イソパラフィン	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	0.795 g/cm <sup>3</sup>	47 %
バッファオイル	—	0.77690 g/cm <sup>3</sup>	—

このバッファオイルは KamLAND 実験で使われていることからアクリルと同程度の屈折率、高透過率を持つが、LAB とは密度差が大きく使用することは難しい。そのため、ここでは LAB と同程度の密度、無色透明を条件にパラフィン系オイルを探し、透過率、屈折率、密度を測定した。その際、密度は海底の低温、高圧により地上の値から変化するため、密度の変化率も LAB と同程

度であるかも考慮した。

## 5.1 バッファオイル候補

バッファオイルの候補には表 5.2 に示すような特性を持つ 4 種類のパラフィン系オイルがある。密度が大きい油は黄色みがかっており、透過率が悪そうであったり、粘度が大きく扱いづらいようなものが多く、候補として挙げられるものは少なかった。そのため、候補となり得るパラフィン系オイルを虱潰しに評価することにした。

表 5.2 バッファオイルの候補

物質名	密度 (15 °C)	動粘度 (40 °C)
オイル A	0.828 g/cm <sup>3</sup>	8.7 mm <sup>2</sup> /s
オイル B	0.866 g/cm <sup>3</sup>	68.0 mm <sup>2</sup> /s
オイル C	0.862 g/cm <sup>3</sup>	31.5 mm <sup>2</sup> /s
オイル D	0.860 g/cm <sup>3</sup>	35.3 mm <sup>2</sup> /s

## 5.2 透過率測定

ここではバッファオイルの候補に対して透過率測定を行った。液体シンチレータから出た光が PMT へと効率よく届くために透過率は重要なパラメータである。

### 5.2.1 測定原理

透過率測定には分光光度計 U-3900 (日立ハイテクサイエンス製) を用いた。光源として、可視領域ではハロゲンランプ、紫外領域では重水素ランプを使用し、回折光子を用いたモノクロメーターで単色光として取り出している。この単色光を回転ミラーが切り替わることで、試料が入った 10 cm、1 cm の石英セルに入射させ、透過した光を PMT で検出することで光強度を測定する (図 5.1)。長さの異なる 2 つのセルを使用することで、セル表面での反射等の影響を無視することができる。

10 cm と 1 cm のセルの透過光強度をそれぞれ  $I_{10\text{cm}}$ 、 $I_{1\text{cm}}$  とすると、光路差 9 cm を透過する間に減衰した光量の相対的な値は式 (5.1) のように表される。

$$T_{9\text{cm, relative}} = \frac{I_{10\text{cm}}}{I_{1\text{cm}}} \quad (5.1)$$

ここで、短距離での透過率がほぼ 100 % であり、試料と屈折率が近い物質を試料と同じ条件で測定し、ベースラインとした。本研究では試料と屈折率が比較的近い、シクロヘキサン ( $n = 1.42$ ) をベースラインとして用いることで、試料の絶対的な透過率を求めた。このとき、9 cm 透過率

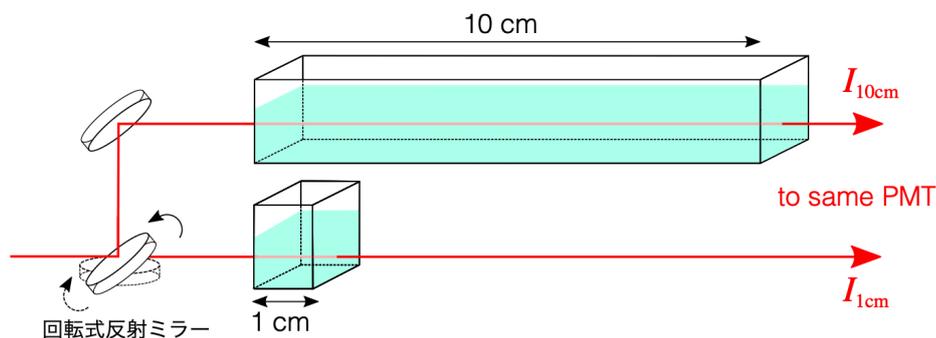


図 5.1 透過率測定のご概念図

$T_{9cm}$  は式 (5.3) のように求まる。

$$T_{9cm} = \frac{T_{9cm, \text{relative}}(\text{sample})}{T_{9cm, \text{relative}}(\text{baseline})} \quad (5.2)$$

$$= \frac{I_{10cm}(\text{sample})/I_{1cm}(\text{sample})}{I_{10cm}(\text{baseline})/I_{1cm}(\text{baseline})} \quad (5.3)$$

### 5.2.2 測定方法

1. 分光光度計と PC の電源を入れ、測定プログラムを起動する。
2. 1 時間待機し、光源を安定させる。
3. アセトンを用いてセルを洗浄後、1 cm セルと 10 cm セルにシクロヘキサンを入れて、基準値を測定する。
4. 再びアセトンで洗浄する。
5. 測りたい試料をセルに入れ、恒温器で温度を管理した後測定する。
6. 3 回の測定の平均値を、透過率測定の結果とする。

先行研究 [48] より、1 回の測定で 0.6% の測定誤差が生じるため、3 回の測定を行うことで測定誤差は 0.3% と求められている。また、測定の際にはセル内の試料に含まれる気泡や試料の波打ちの影響を無くすため、5 分間放置してから測定をした。

### 5.2.3 測定結果

初めに、バッファオイルの候補 4 つと KamLAND のバッファオイルを合わせた 5 つのオイルの 9 cm 透過率を室温で測定した。室温とは恒温槽で液体の温度を全く制御せず、バイアルに入れ保管していたものをそのまま測定することを指す。

測定時に生じた問題として、サンプルをセルに注入する際に、図 5.2 に示すように気泡が混入してしまうことがあった。気泡の混入は透過率の低下につながるため、可能な限り避ける必要がある。本研究では、一定時間放置することで気泡が消失したことを確認したうえで測定を行った。しかし、実際の検出器では大量のバッファオイルをインストールする必要があり、いったん気泡

が発生すると除去することは容易ではない。そのため、気泡の発生を抑制するための工夫が不可欠である。さらに、バッファオイルはポンプを用いて検出器ヘインストールするが、粘度が高い場合にはポンプでの移送が困難となる可能性があり、この点についても考慮する必要がある。



図 5.2 セルに入った気泡

測定結果を図 5.3 に示す。OBD-LS の発光波長は 350–490 nm で、ピークは 360–390 nm (橙色領域) である。これを踏まえると、オイル D が 4 つの候補の中で最も優れた透過率を持ち、KamLAND のバッファオイルの透過率を上回っていることがわかる。

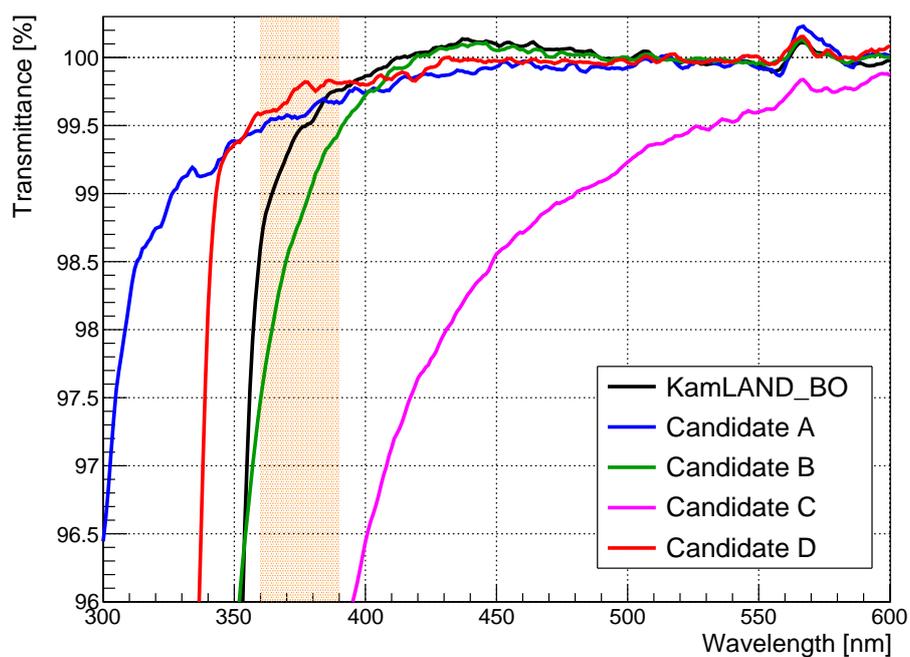


図 5.3 室温でのバッファオイル候補の透過率

さらに、実際のバッファオイル層の長さに変換率を変換し、評価する。バッファオイル層の長さは OBD では 3 m、KamLAND では 2 m であるためそれぞれの長さの透過率に変換した。例として、9 cm 透過率  $t$  を 3 m 透過率  $T$  へ変換するには式 (5.4) を用いた。

$$T = t \frac{300}{9} \quad (5.4)$$

ただし、9 cm 透過率の測定誤差  $\delta t$  を用いて、式 (5.5) で表される 3 m 透過率の誤差  $\delta T$  は最大で 10% 程度の誤差を含んでいることに注意が必要である。

$$\delta T = \frac{300}{9} \times \frac{T}{t} \times \delta t \quad (5.5)$$

このようにして、実際のバッファオイル層の長さに変換したそれぞれの透過率が図 5.4 である。OBD-LS の発光波長において、オイル D は KamLAND のバッファオイルよりも透過率が優れており、光のロスが少なくなる。

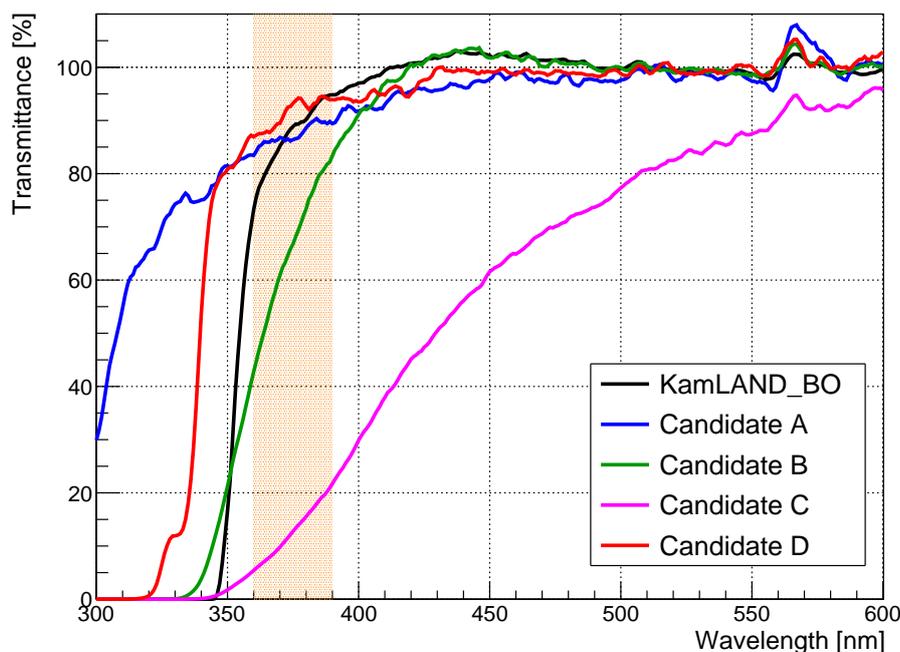


図 5.4 変換したバッファオイル候補の透過率

次に、実際に使用する深海の温度 (4°C) および室温で、オイル D の透過率に影響があるかを確認した。この際、測定中の温度変化を把握するため、オイル D を入れたセルを 2 セット用意した。両方のセルを同じ条件で恒温槽に入れ、片方は透過率測定用、もう片方は温度測定用として用いた。測定中のオイル温度の変化を、温度計で測定した結果を図 5.5 に示す。測定時間は約 1 分であり、この間のオイル D の温度変化は十分小さいことが確認された。

オイル D の 4°C および室温での測定結果の比較を図 5.6 に示す。透過率は両温度で誤差範囲内で一致しており、温度変化による影響は確認されなかった。以上より、今後の屈折率および密度の測定はオイル D のみを対象として行うこととした。なお、オイル D と呼称しているパラフィン系オイルの製品名はハイコール K-290[49] である。

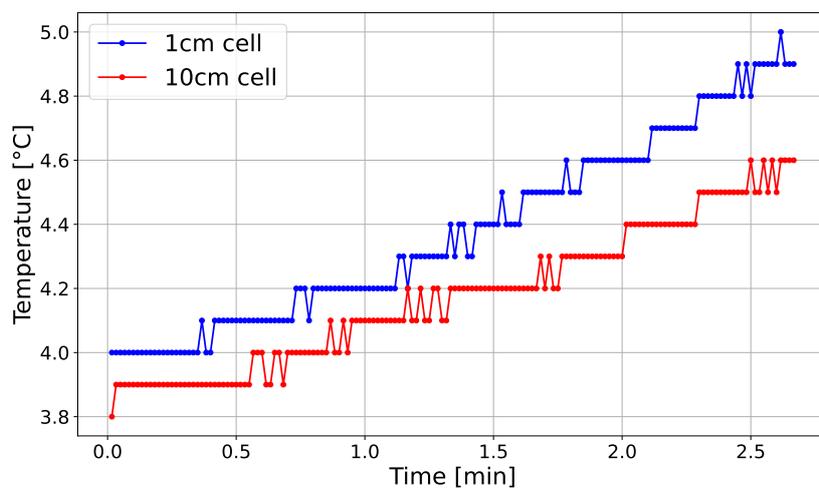


図 5.5 測定中の温度変化

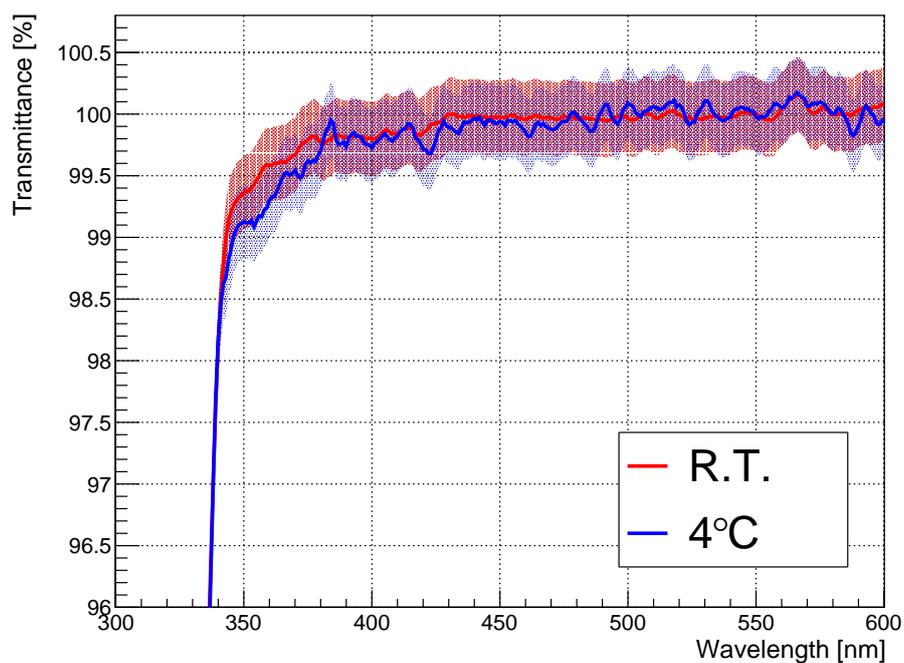


図 5.6 オイル D の透過率の温度依存性

### 5.3 屈折率測定

ここでは OBD-LS とハイコール K-290 に対して屈折率測定を行った。光は屈折率の異なる物質の境界でフレネル反射を起こし、光をロスしてしまう。そのため、PMT にロス少なく、光が到達するために屈折率は重要なパラメータである。

### 5.3.1 測定原理

屈折率測定にはアッペ屈折計 NAR-1T LIQUID (アタゴ製) を用いた。アッペ屈折計では臨界角法 (図 5.7) を用いて、サンプルの屈折率を測定する。屈折率  $N$  のプリズムの上に屈折率  $n$  のサンプルを乗せる ( $N > n$ )。サンプル側から点  $O$  に向けて様々な入射角の光を入射させると、臨界角  $\beta$  以上に屈折することはできない。観測者は明暗の境界を観測することで  $\beta$  を求める。これをもとに式 (5.6) からサンプルの屈折率を計算することができる。

$$n = N \times \sin \beta \quad (5.6)$$

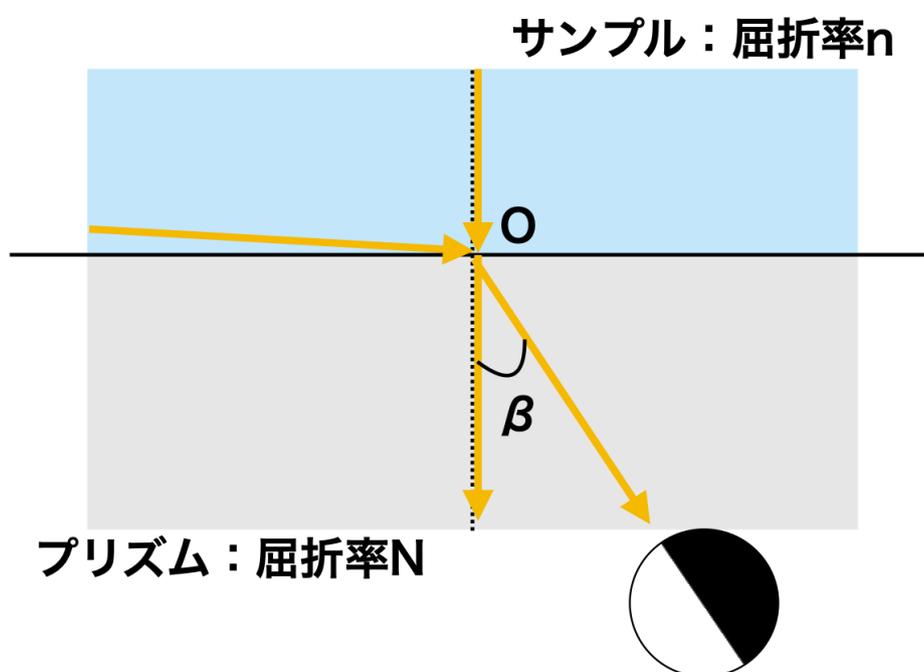


図 5.7 臨界角法の概念図

### 5.3.2 測定方法

1. 恒温水槽の電源を入れ、測定温度まで冷やす。並びに蛍光光度計の電源を入れ、光ファイバーを固定する。
2. アッペ屈折計のプリズムをアセトンで拭き取った後に、プリズムが浸るようにサンプルを 2, 3 滴垂らす。
3. 分光蛍光光度計での発光波長を変えながら測定する。
4. 1 サンプルにつき 3 回測定する。測定の際にプリズムの拭き取り、サンプルの入れ替えを行う。
5. 3 回の測定の平均値を、屈折率測定の結果とする。

アッペ屈折計は測定者本人が目視で測定を行うため、可視光領域しか測定することができない。そのため、測定波長領域は 420–600 nm である。しかし、液体シンチレータの発光波長は可視光よりも短波長領域にピークを持っている。そのため、コーシーの拡散方程式 [50] より、式 (5.7) でフィッティングをすることで、測定点以外のデータを補間した。先行研究 [51] より、測定誤差は 0.001 と求められている。

$$n(\lambda [\text{nm}]) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \quad (5.7)$$

### 5.3.3 測定結果

試料にはハイコール K-290 および OBD-LS を用い、測定は 2°C の環境下で実施した。2°C はハワイ沖の深海 4 km における海水温に相当する。測定結果を図 5.8 に、フィットのパラメータを表 5.3 に示す。アクリルの屈折率は三菱ケミカルグループのアクリルライトのデータ [52] を利用した。ただし、データは 12°C のものであるため、全波長に対してナトリウム D 線 (589 nm) での温度変化の式 (5.8) より 2°C での屈折率の値に補正した。

$$n(t [^\circ\text{C}]) = 1.4933 - 1.1 \times 10^{-4}t - 2.1 \times 10^{-7}t^2 \quad (5.8)$$

屈折率は密度に関係しており、密度が大きいほど屈折率は大きくなる。そのため、ハイコール K-290 よりも OBD-LS の方が屈折率は大きくなっている。

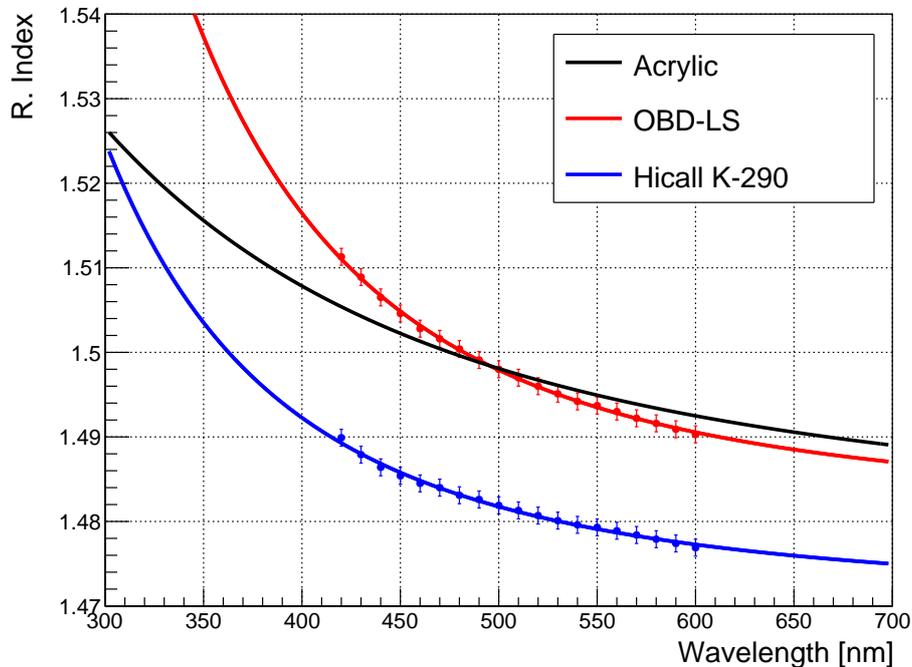


図 5.8 2°C での屈折率

屈折率の測定結果より、OBD-LS とアクリルの間、ハイコール K-290 とアクリルの間でのフレネル反射の影響を評価する。液体シンチレータの発光ピークである 380 nm における OBD-LS と

表 5.3 2°C での屈折率フィットのパラメータ

サンプル	a	b	c
OBD-LS	1.481 ± 0.0056	1696 ± 2762	(6.382 ± 3.311) × 10 <sup>8</sup>
ハイコール K-290	1.470 ± 0.0049	1714 ± 2444	(2.886 ± 2.926) × 10 <sup>8</sup>
アクリライト	1.479	5050	-6.949 × 10 <sup>7</sup>

ハイコール K-290、アクリルの屈折率はそれぞれ 1.523, 1.496, 1.511 である。そして、入射側の物質の屈折率を  $n_1$ 、屈折側の物質の屈折率を  $n_2$  としたとき、入射角  $\theta = 0^\circ$  のフレネル反射の反射率は式 (5.9) で表される。また、入射角  $\theta \neq 0^\circ$  のフレネル反射の反射率は S 波と P 波でそれぞれ式 (5.10), (5.11) で表される。

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (5.9)$$

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2 \quad (5.10)$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 \quad (5.11)$$

これらの式より、380 nm における OBD-LS とアクリル間、ハイコール K-290 とアクリル間のフレネル反射の反射率を図 5.9, 5.10 に示す。入射角  $\theta = 0^\circ$  のとき、OBD-LS とアクリル間では反射率 0.0016 %、ハイコール K-290 とアクリル間では反射率が 0.0025 % であることからわかるように、フレネル反射はほとんど影響しない。

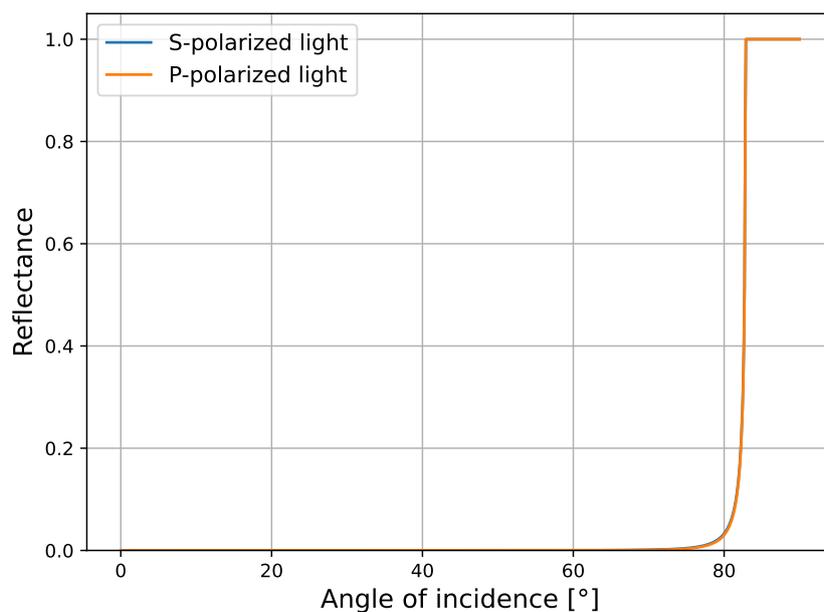


図 5.9 OBD-LS とアクリル間のフレネル反射

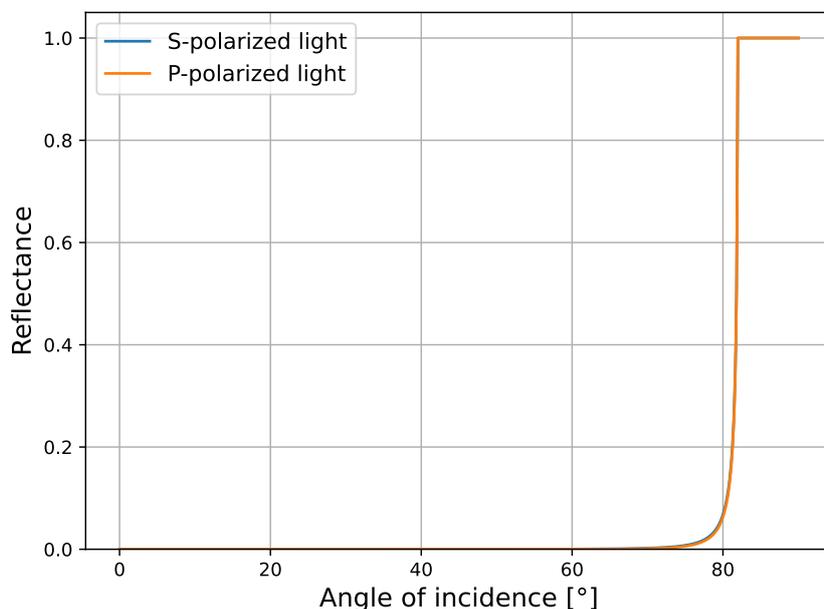


図 5.10 ハイコール K-290 とアクリル間のフレネル反射

## 5.4 密度測定

ここでは OBD-LS とハイコール K-290 に対して密度測定を行った。液体シンチレータとバッファオイルの密度差はアクリルへの圧力に関係し、密度は地上と海底では変化するため、重要なパラメータである。

### 5.4.1 測定原理

本測定は株式会社東レリサーチセンターに委託した。測定には高圧用振動式密度計を使用した振動式密度計法を用いており、測定誤差は 0.05% である。振動式密度計法とはガラスまたは SUS 製の U 字管に試料を入れ、その固有振動数が質量に依存することから密度を求める方法である。図 5.11 に高圧用振動式密度計 (AntonPaar 社製) の装置構成を示す。試料セル部はジャケット内に保持されたステンレス製 (Hastelloy C-276) の U 字管 (内径 2.4 mm、厚さ 0.3 mm、内容積約 2.5 cm<sup>3</sup>) で構成されており、ペルティエ素子によって温調されている。U 字管に試料を入れ、その先端にある発振コイルによって振動させる。このとき、セルは密度に応じた固有振動を生じ、この振動周期を測定する。試料への加圧および圧力の計測には (株) 長野計器製作所製重錘型圧力計を用いている。

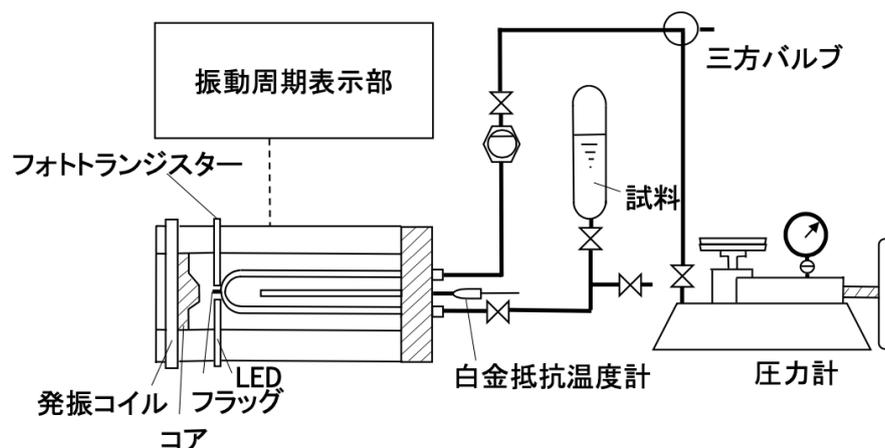


図 5.11 高圧用振動式密度計の概略図

### 5.4.2 測定結果

試料はハイコール K-290 と OBD-LS で、測定は温度と圧力を変えながらそれぞれ 4 点で測定した。その結果を表 5.4, 5.5 に示す。本来の実験環境である海底 4 km の圧力は 40 MPa だが、装置の都合上 19.7 MPa までしか加圧することができなかった。20 °C・大気圧から 2 °C・19.7 MPa までの密度変化率は OBD-LS で +2.68 %、ハイコール K-290 で +2.49 % と大きな差はなく、海底環境でも密度差に問題はなさそうであった。

表 5.4 ハイコール K-290 の密度測定結果

温度 [°C]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	
	大気圧	19.7 MPa
2	867.93	877.50
20	856.22	866.65

表 5.5 OBD-LS の密度測定結果

温度 [°C]	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	
	大気圧	19.7 MPa
2	870.80	881.12
20	858.11	869.48

次にこれらの結果から、ハワイ沖での OBD-LS とハイコール K-290 の水深と密度の関係を評価する。ハワイ沖での水深と水温、海水圧の関係については Hawaii Ocean Time-series Program のデータを参考にした。Hawaii Ocean Time-series Program とはハワイ沖の海洋環境を長期間にわたって継続的に観測するプロジェクトである。今回は、HOT-335 と呼ばれる 2022 年に測定されたデータ [53] を利用した。観測地点は図 5.12 に示す星の地点であり、オアフ島から北に 100 km ほど離れた地点である。HOT-335 で測定された水温と水圧の関係を図 5.13 に示す。

各水深での密度の計算には等温圧縮率  $\kappa_T$  と体積膨張率  $\alpha$  を用いた式 (5.12) を用いた。

$$\rho(p, T) \approx \rho_0 [1 + \kappa_T(p - p_0) - \alpha(T - T_0)] \quad (5.12)$$

ただし、表 5.6 のように等温圧縮率は 2 °C と 20 °C、体積膨張率は大気圧と 19.7 MPa でのみの

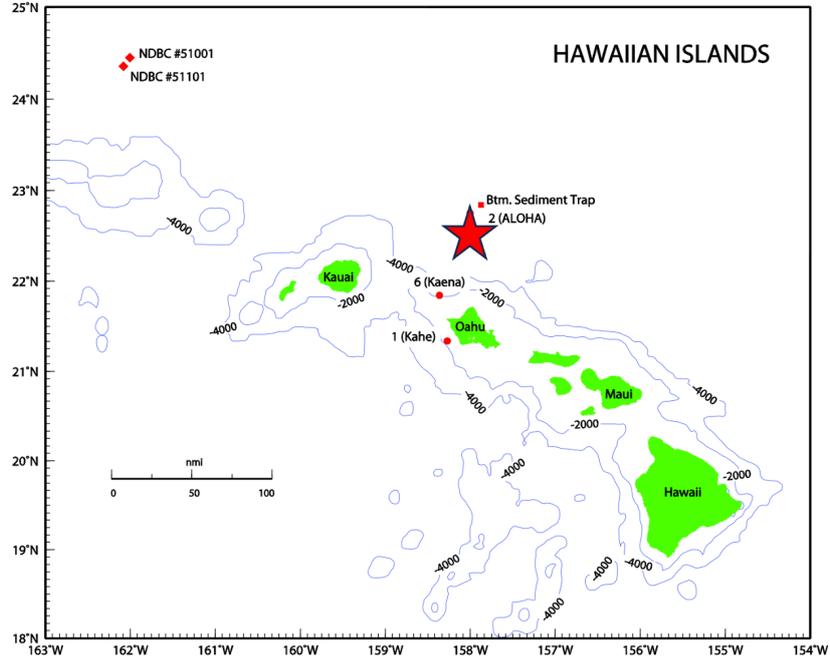


図 5.12 HOT-335 の観測地点 [53]

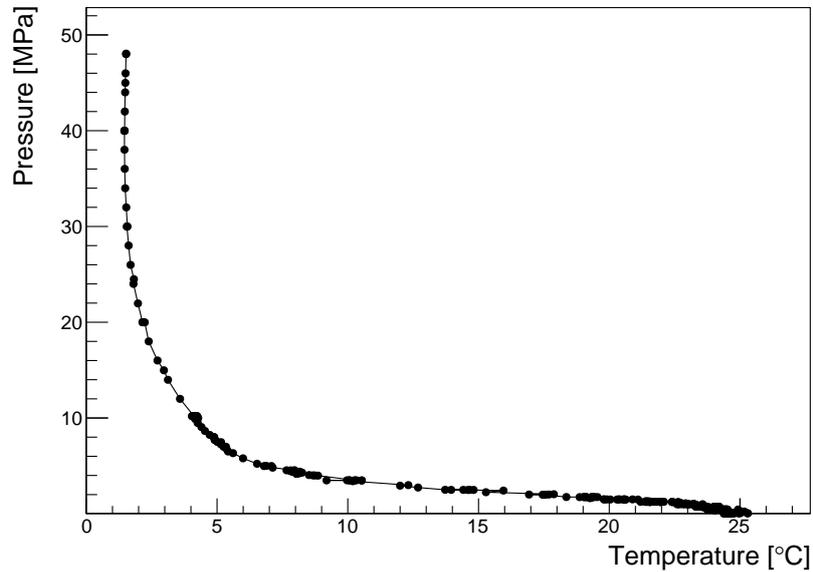


図 5.13 HOT-335 での圧力と温度。データは [53] から利用した。

データしかない。そのため、それ以外の温度や圧力での等温圧縮率と体積膨張率はそれぞれ線形で変化すると仮定し、2 点のデータの変化量から各温度、圧力での値を見積った。この際、誤差伝搬を考慮し、計算した密度の誤差は 0.07% である。

以上の計算によって得られた OBD-LS とハイコール K-290 の水深と密度の関係を図 5.14 に示す。図 5.13 より、水深 500 m までは水温および圧力変化が密度変化に寄与する一方で、水深

表 5.6 等温圧縮率と体積膨張率

	条件	OBD-LS	ハイコール K-290
等温圧縮率 [ $\text{MPa}^{-1}$ ]	2°C	$6.05 \times 10^{-4}$	$5.63 \times 10^{-4}$
等温圧縮率 [ $\text{MPa}^{-1}$ ]	20°C	$6.76 \times 10^{-4}$	$6.22 \times 10^{-4}$
体積膨張率 [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	大気圧	$8.22 \times 10^{-4}$	$7.60 \times 10^{-4}$
体積膨張率 [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	19.7MPa	$7.44 \times 10^{-4}$	$6.96 \times 10^{-4}$

500 m 以降では圧力変化の影響が支配的となる。その結果、密度変化は水深 500 m 付近を境として変化する。実際に検出器が稼働する予定の深海 4 km における OBD-LS とハイコール K-290 の密度はそれぞれ  $892.48 \pm 0.62 \text{ kg/m}^3$ 、 $888.17 \pm 0.62 \text{ kg/m}^3$  となっている。また、アクリルへの荷重に影響する OBD-LS とハイコール K-290 の各水深での密度差を図 5.15 に示す。密度差は水深が深くなればなるほど大きくなり、深海 4 km で最大  $4.3 \text{ kg/m}^3$  程度になる。7 章ではこの密度差  $4.3 \text{ kg/m}^3$  がアクリル容器に与える影響について評価する。

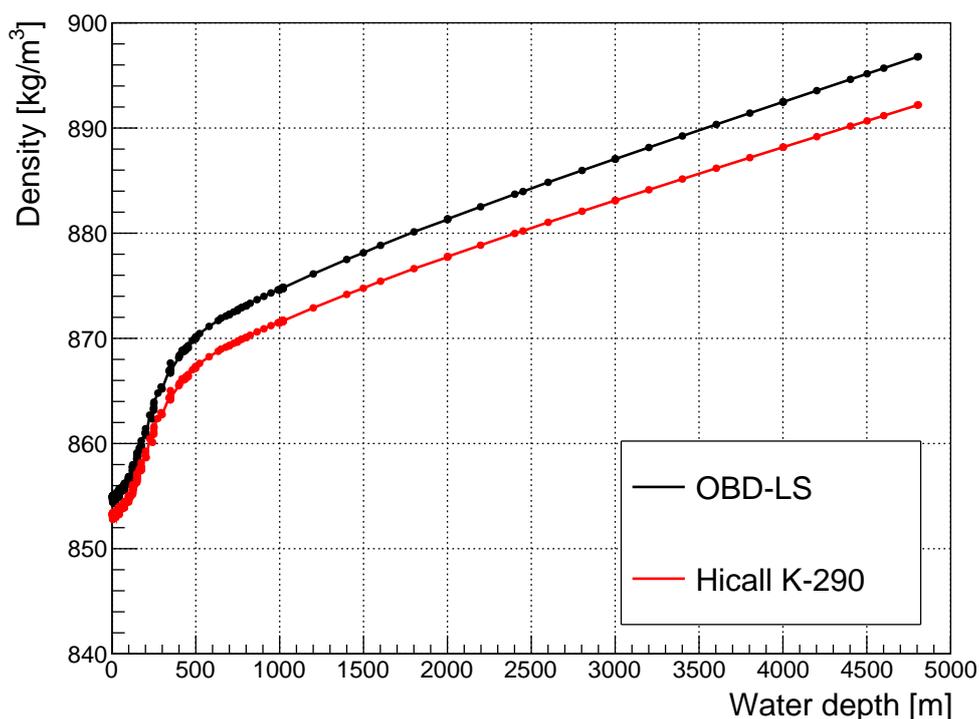


図 5.14 OBD-LS とハイコール K-290 の水深と密度の関係

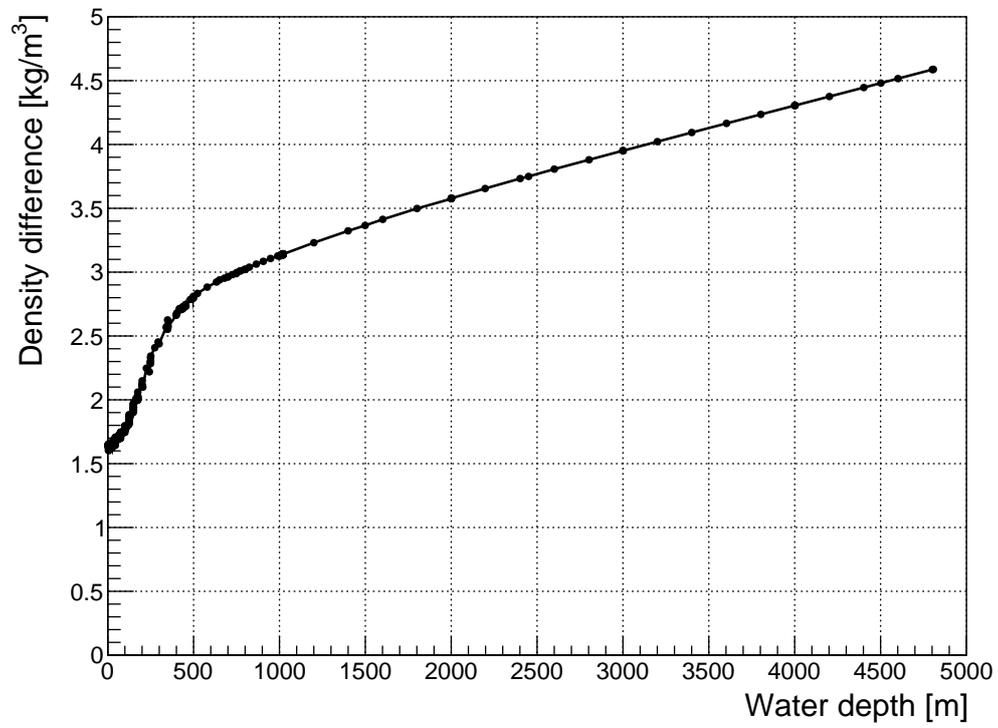


図 5.15 OBD-LS とハイコール K-290 の密度差

## 第 6 章

# アクリルの強度試験

OBD 検出器ではアクリル容器内部に液体シンチレータ、外部にバッファオイルが存在する。そのため、液体シンチレータとバッファオイルに密度差がある場合、密度差に比例した荷重がアクリル容器に作用する。アクリルのような高分子材料は、本来の強度より十分に弱い荷重であっても、長期間にわたり荷重が作用し続けることで徐々に変形が進行し、最終的に破損に至る場合がある。このような時間依存的な変形現象はクリープと呼ばれる。一般的なクリープにおける時間と歪みの関係を図 6.1 に示す。変形初期に相当する一次クリープでは、ポリマー鎖の局所的な可

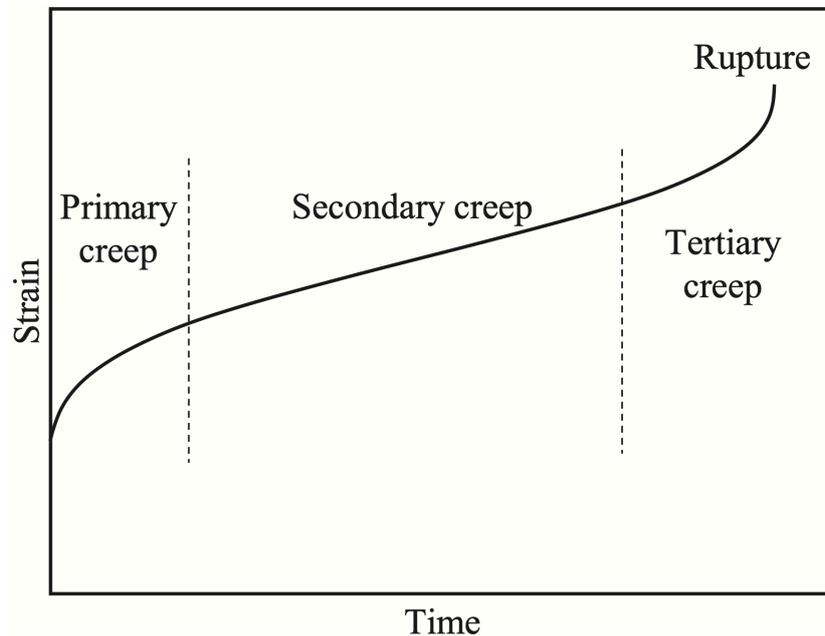


図 6.1 典型的なクリープ曲線 [54]

動性および緩和過程が主に変形を支配する。この段階では、歪みは初期に急激に増加し、時間の経過とともに歪み速度が減少する。続く二次クリープでは、動的共有結合の交換反応により高分子ネットワークが再配置され、一定のひずみ速度で定常的な変形が進行する。そして三次クリープでは、結合交換による応力緩和が維持できなくなり、空孔や亀裂の発生により変形が急激に加

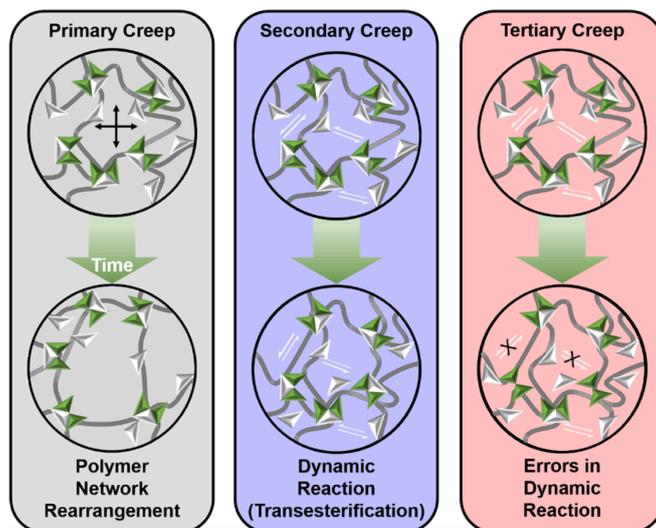


図 6.2 クリープによる内部構造の変化 [55]

速し、破断に至る。アクリルのような高分子材料では、数 % 程度の歪みで破断に至ることが知られている。そのため、ここでは検出器の想定運用年数とアクリルのクリープ特性を基に、アクリル容器に要求される許容応力の上限値を評価した。

## 6.1 引張試験

アクリルのクリープ寿命を測定する前に、単純な引張試験でアクリルの強度を確認した。これは、液体シンチレータやバッファオイルへの浸漬がアクリルの強度にどれほど影響を与えるか確認するためである。また、実際のアクリル容器は巨大であり、一括で作成することは難しい。そのため、分割して作成し、それを結合して完成させることが予想される。したがって、重合結合させたアクリルに対して引張試験を行うことで、重合の強度への影響を調べた。ここでの実験は宮城県産業技術総合センター [56] の装置をお借りして行った。

### 6.1.1 測定方法

試験には図 6.3 に示す JIS K7161-2 1A 形試験片を用いた。これはプラスチック材料の引張特性を評価するための規格であり、日本の産業製品に関する規格や測定法などを定めた日本の国家規格である。実際に使用した一括で作成したアクリル試験片と重合結合させたアクリル試験片を図 6.4, 6.5 に示す。重合接着したアクリル試験片は中央に接合部があるのが見える。また、一括で作成したアクリルの一部は OBD-LS とハイコール K-290 に浸漬した状態で 45 °C に設定した恒温槽に 2 週間入れた。ここで、ある温度  $T$  における化学反応の速度  $k$  は 1 粒子あたりの活性化エネルギー  $E_a$  と定数  $A$  を用いて、アレニウスの式 (6.1) によって表される。

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6.1)$$

そのため、温度が  $T_1, T_2$  の場合の反応速度をそれぞれ  $k_1, k_2$  とすると、

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp\left[\frac{E_a}{RT_1T_2}(T_1 - T_2)\right] \quad (6.2)$$

となる。ここで経験的に、

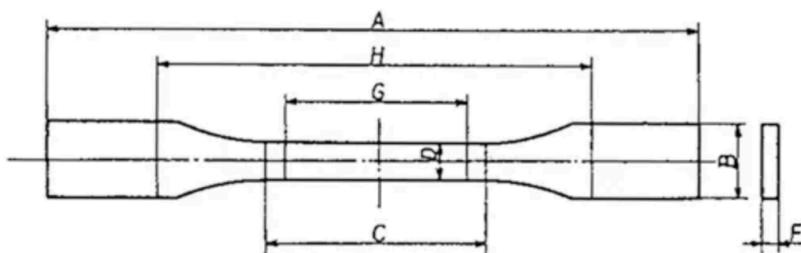
$$\frac{E_a}{RT_1T_2} \approx \frac{\ln 2}{10} = 0.069 \quad (6.3)$$

となる物質が多いことから、

$$\frac{k_1}{k_2} = 2^{\frac{T_1 - T_2}{10}} \quad (6.4)$$

以上より、化学反応は温度が  $10^\circ\text{C}$  上がると 2 倍のスピードで進行すると言われている。したがって、恒温槽では 2 週間の浸漬でも  $2^\circ\text{C}$  の深海では半年ほどの浸漬に対応している。

JIS K 7161-2 (ISO 527-2) 1A 形試験片



A: 全長	170	E: 肩の丸みの最小半径	$24 \pm 1$
B: 両端の幅	$20 \pm 0.2$	F: 厚さ	$4 \pm 0.2$
C: 平行部分の長さ	$80 \pm 2$	G: 標線間距離	75もしくは $50 \pm 0.5$
D: 平行部分の幅	$10 \pm 0.2$	H: つかみ具間距離	$115 \pm 1$

図 6.3 引張試験の試験片の規格 [57]



図 6.4 一括作成したアクリル試験片



図 6.5 重合接着したアクリル試験片

試験には図 6.6 に示す 10 kN 引張圧縮試験機と恒温槽を用いた。試験機内部は恒温槽によって特定の温度にコントロールすることができる。試験片を固定した後、温度が測定したい温度で十分に安定していることを確認した上で、2 mm/min の速度で試験片を破断するまで引っ張った。試験は 3 回行い、それぞれ最大引張荷重とヤング率、0.2% 耐力を測定した。試験結果の一例を図 6.8 に示す。試験中に試験片にかかる最も大きな荷重が最大引張荷重である。また、JIS K7161-2 の記述から歪みが 0.05% と 0.25%、変位だと 0.06 mm と 0.29 mm に相当する 2 点を結んだ直線 (赤点線) の傾きがヤング率であり、物質の変形のしにくさに対応している。0.2% 耐力とは、歪み 0.2%、変位だと 0.23 mm に対応する点からヤング率の傾きを持った直線 (青点線) を引き、その直線と測定データの交点の荷重のことである。0.2% 耐力は、アクリルのように降伏点が見えない材料に対し、降伏強度の代わりとして用いられる。降伏強度を超える大きさの荷重がかかってしまうと、荷重がなくなっても元の形に戻ることができないので設計の際には注意が必要である。それぞれ測定値には 3 回測定した平均値、測定誤差は標準偏差を使用した。



図 6.6 試験装置 (左図) と恒温槽内部の様子 (右図)

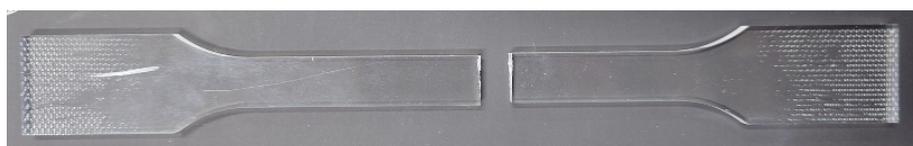


図 6.7 破断した試料

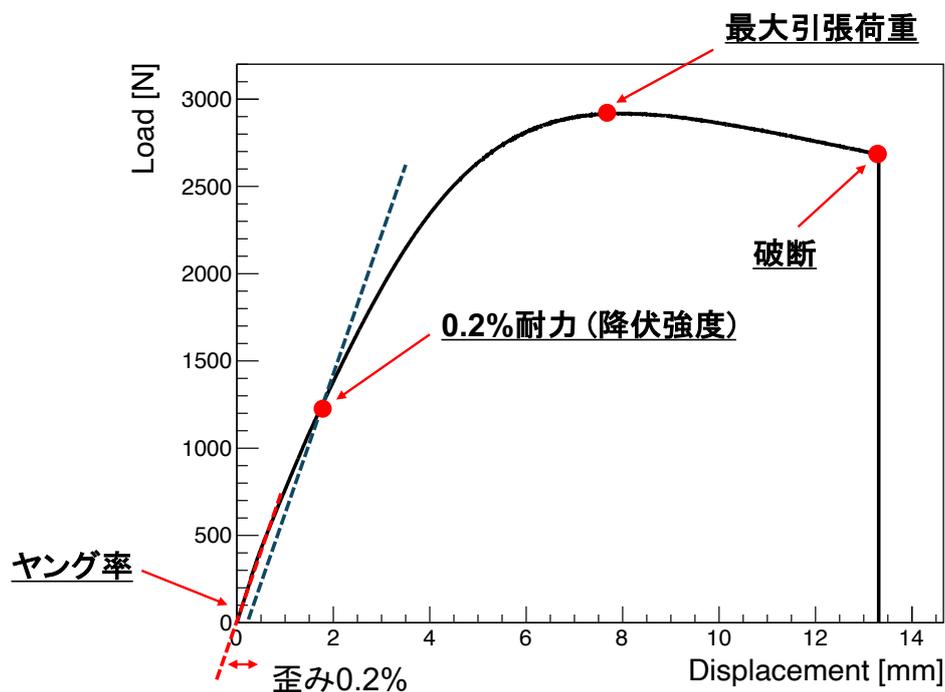


図 6.8 引張試験結果の一例

### 6.1.2 測定結果

液体シンチレータやバッファオイルへの浸漬、重合接着の強度への影響を確認するために、OBD-LS やハイコール K-290 に浸漬した試験片と重合接着した試験片について、2°C で引張試験を行った。結果を表 6.1 と図 6.9 に示す。OBD-LS およびハイコール K-290 への浸漬による影響は認められず、アクリルの最大引張荷重、ヤング率、ならびに 0.2% 耐力はいずれも誤差の範囲内で一致した。一方で、重合接着については、本来一枚板から切り出した材料の 6-7 割程度の強度を有するとされているにもかかわらず、最大引張荷重が大きく低下した。得られた強度のままでは、重合部が 10 年程度の長期実験に耐え得るとは考えにくく、重合方法の再検討が必要である。また、重合したアクリルはすぐに破断してしまったため、0.2% 耐力を測定できなかった。

表 6.1 液体シンチレータやバッファオイルへ浸漬または重合した際の強度パラメータ

名称	0.2% 耐力	最大引張荷重	ヤング率
通常	35.0 ± 4.5 MPa	91.2 ± 0.2 MPa	2.8 ± 0.4 GPa
OBD-LS に浸漬	36.5 ± 3.2 MPa	91.7 ± 0.7 MPa	2.8 ± 0.2 GPa
ハイコール K-290 に浸漬	38.2 ± 3.6 MPa	91.4 ± 0.1 MPa	2.6 ± 0.2 GPa
重合接着	—	12.5 ± 2.4 MPa	2.4 ± 0.4 GPa

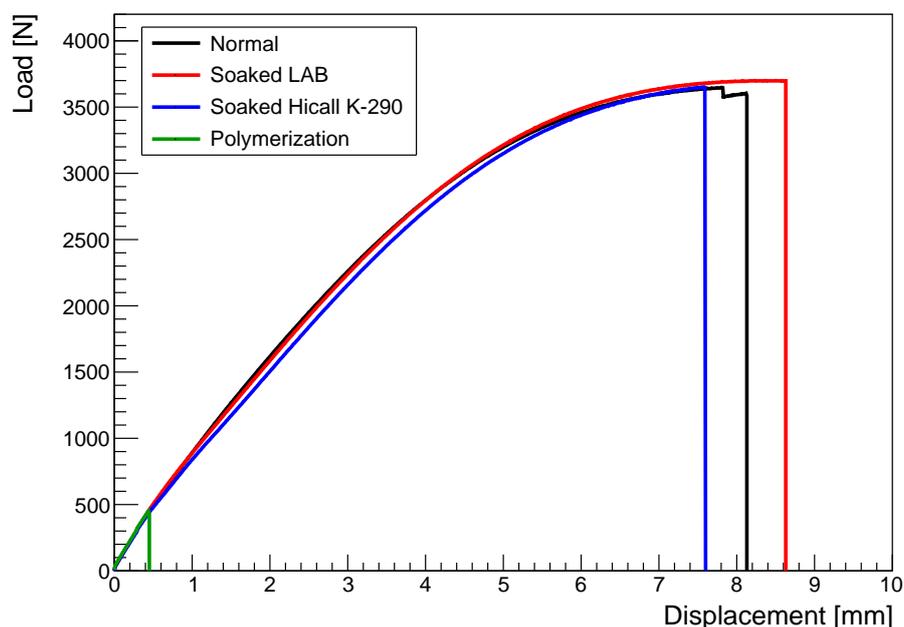


図 6.9 強度への液体シンチレータやバッファオイル、重合の影響

### 6.1.3 重合方法の変更

強度低下の原因としては、接着の際に固体の結合面にアクリサンデーと呼ばれる接着剤を塗ってそのまま接着してしまっていたことが挙げられる。重合する際には、接着面をあらかじめ加熱し、液体にした上で重合剤を塗り接着させるなど様々な工夫がある。そのため、アクリルの重合に実績のある別の企業に依頼し、再度重合した際の強度への影響を調べることにした。新たに作成した重合アクリルが図 6.10 である。シラップ状のアクリルモノマーの半重合品を用い、コントロールされた室温下で重合反応を促進させることで、両側の母材と一体化させて作製した。最初に作成した重合アクリル(図 6.5)と比べて、中央の結合部分が確認できないほど綺麗に重合されている。実際に、結合部分は目視でわずかに確認できる程度である。

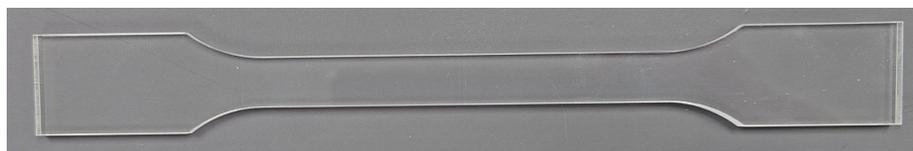


図 6.10 重合接着したアクリル試験片 (2 回目)

この新たに作成した重合アクリルについて、 $2^{\circ}\text{C}$  で引張試験を行った。その結果を一枚板から切り出したアクリル、最初の重合アクリルの結果と比較したものを表 6.2 と図 6.11 に示す。2 回目に重合したアクリルの強度は、一枚板から切り出したアクリル強度の 75% 以上を維持している。この結果より、アクリルの強度低下を抑制できる重合方法を見いだすことができたといえる。今後は、実際の検出器で用いるような巨大なアクリルに対しても、同様に強度を維持した重合が

可能かどうかを検証する必要がある。また、一枚板の強度を可能な限り維持できる重合条件の最適化も今後の課題である。

表 6.2 重合したアクリルの強度パラメータ

名称	0.2% 耐力	最大引張荷重	ヤング率
通常	35.0 ± 4.5 MPa	91.2 ± 0.2 MPa	2.8 ± 0.4 GPa
重合接着 (1 回目)	—	12.5 ± 2.4 MPa	2.4 ± 0.4 GPa
重合接着 (2 回目)	39.3 ± 4.0 MPa	69.8 ± 0.8 MPa	3.0 ± 0.1 GPa

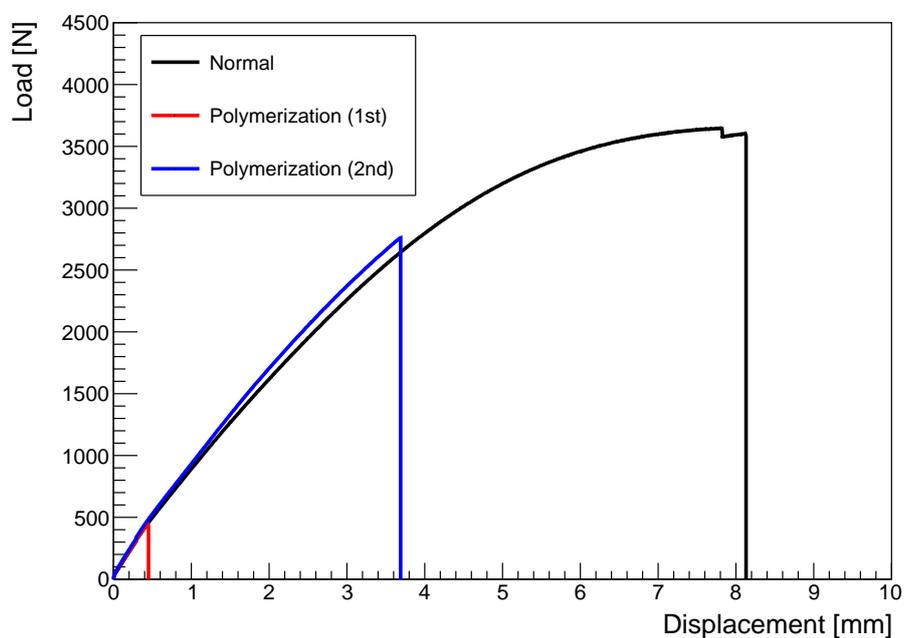


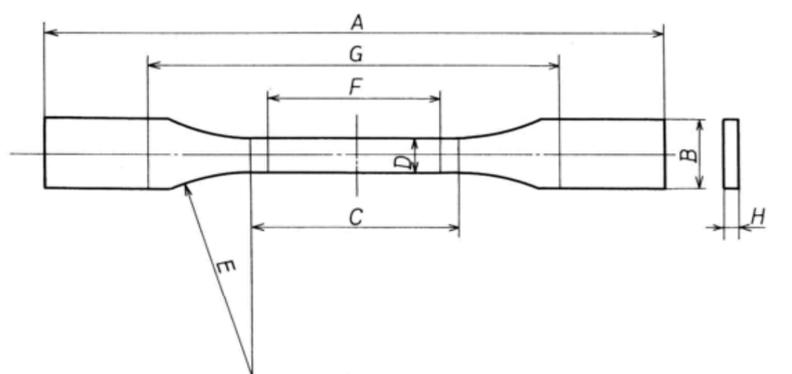
図 6.11 再重合したアクリルの強度

## 6.2 クリープ試験

ここではアクリルに一定の荷重を一定の温度下でかけることにより、クリープ試験を行なった。クリープ試験において、10 年などの耐久性を評価するために、10 年試験し続けることは現実的ではない。そのため、想定される環境よりも高圧にすることで短時間の試験を行い、その結果を補正することで長期間のクリープ寿命に対応する荷重を得た。本実験は株式会社クリアライズに委託している。

### 6.2.1 測定方法

試験には図 6.12 に示す厚み 4 mm の JIS K7115 1 号形試験片を用いた。これはプラスチック材料の引張クリープ特性を評価するための規格であり、日本の産業製品に関する規格や測定法などを定めた日本の国家規格である。実際に使用した一枚板のアクリルから切り出した試験片を図 6.13 に示す。6.1 節で OBD-LS やハイコール K-290 への浸漬がアクリル強度に影響を与えないことを確認したので、試験前に OBD-LS やハイコール K-290 への浸漬は行なっていない。一方で、重合はアクリルの強度を 25% 程度減少させてしまうため、クリープ試験は一枚板から切り出したアクリルと重合したアクリルのそれぞれで行うべきであるが、時間の都合上重合したアクリルについては行うことができなかった。



単位 mm

A : 全長(最小)	175	E : 肩の丸みの半径(最小)	60
B : 両端の幅	20±0.5	F : 標線間距離	50±0.5
C : 平行部分の長さ	60±0.5	G : つかみ具間距離	115±5
D : 平行部分の幅	10±0.5	H : 厚さ	1~10

図 6.12 クリープ試験の試験片の規格 [58]



図 6.13 クリープ試験の試験片

試験には、図 6.14 に示す万能試験機および恒温槽を使用した。まず試験片を治具に固定し、恒温槽内の温度が 2°C で十分に安定していることを確認した。その後、試験片に引張荷重を加え、所定の荷重に達した時点で固定し、クリープ破断に至るまでの時間を測定した。本試験は、荷重条件を変更して計 6 回実施した。



図 6.14 試験装置 (左図) と恒温槽内部の様子 (右図)

### 6.2.2 測定結果

荷重  $\sigma_f$  と破断寿命  $t_f$  の測定結果を図 6.15 に示す。試験片は歪みが 2.8–5.7% に達した時点で破断し、破断までの歪みと荷重の大きさとの間に有意な相関は確認されなかった。

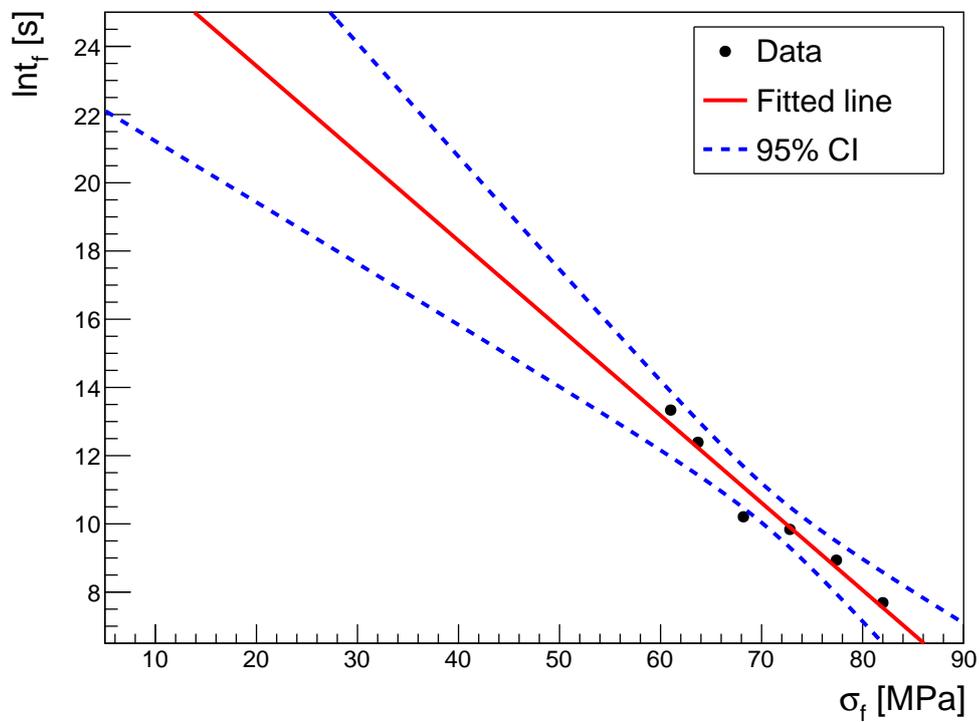


図 6.15 クリープ試験結果

破断寿命  $t_f$  については、自然対数をとった値を縦軸にプロットした。高応力ではなく、ひずみ

が大きい高弾性状態におけるクリープ破壊については、式 (6.5) が提案されている [59]。

$$\ln t_f = A + B \ln \sigma_f \quad (6.5)$$

しかし、式 (6.5) は  $\sigma_f \rightarrow 0$  の極限において  $t_f$  が無限大に発散するため、低荷重領域において破断寿命を過大評価する可能性がある。そこで本研究では、材料の強度と破壊を原子レベルの熱運動と応力の観点から記述するジュルコフ (Zhurkov) モデルを用いる。ジュルコフモデルでは、温度一定の条件下におけるクリープ破壊寿命が式 (6.6) で与えられることが知られている [60]。

$$\ln t_f = A + B \sigma_f \quad (6.6)$$

これは、図 6.15 に示したデータに対して一次関数で近似できることを示している。一次関数でフィッティングした結果に基づき、破断寿命の予測式は式 (6.7) となる。

$$\ln t_f = -0.2562 \sigma_f + 28.55 \quad (6.7)$$

ただし、この回帰結果には試験片間のばらつきおよび測定誤差が含まれており、統計的不確かさが存在する。そこで本研究では、工学的安全性評価において寿命を過大評価することを避けるため、回帰直線に対する 95% 信頼区間の下限値を寿命予測値として採用した。この 95% 信頼区間下限値から算出した各主要荷重条件における破断寿命を、表 6.3 に示す。ここで、1.5 kt 検出器については、先行研究 [40] により 10 年間の観測で 3 種類の放射性熱量モデルを 99.5% の信頼度で分離可能であることが示されている。したがって、本研究では検出器の稼働期間を 10 年と想定する。この条件の下では、アクリルに要求される応力上限値は 19.2 MPa となる。

7 章では、この応力をアクリル容器設計の基準として解析を行った。ただし、重合による最大引張荷重の低下はクリープ破断寿命にも影響すると考えられる。したがって、今後は重合したアクリルについてもクリープ試験を実施することが望ましい。

表 6.3 荷重と破断寿命

荷重 [MPa]	破断寿命
15.3	20 年
19.2	10 年
23.1	5 年
32.0	1 年

## 第7章

# 検出器の構造設計

5章では、使用する液体シンチレータおよびバッファオイルの密度を測定した。また、6章では、想定する実験期間とアクリルのクリープ特性に基づき、アクリルに要求される応力の上限值を決定した。ここでは、これらの実測結果を基に、実際の大型検出器構造をCADにより設計する。検出器の設計および応力解析には、オートデスク社が開発した3DCADソフトウェアAutodesk Fusion[61]を使用した。

### 7.1 概要

検出器設計には、工学的要求と物理学的要求が存在する。工学的要求とは、長期測定において検出器が破損することなく安全に稼働し続けることである。特に、OBD実験では検出器が従来の地下ではなく海底環境に設置されるため、海底特有の低温や高圧によるアクリルの収縮・応力変化などを十分に考慮する必要がある。一方、物理学的要求とは、液体シンチレータの発光をPMTがどれだけ効率よく検出できるかを表す、単位エネルギー当たりの光電子数(集光量)を最大化することである。集光量が大きいくほど、エネルギー分解能と位置分解能が向上し、様々な物理イベントをより高精度に測定できる。ここで、これまでに行われた主なニュートリノ実験における集光量を表7.1に示す。既に行われたKamLANDの位置分解能とエネルギー分解能を仮定したシミュレーションにより、マントル由来の地球ニュートリノ観測や放射性熱量モデルの識別が十分に可能であることが示されている。以上を踏まえ、本研究における検出器設計の目標は、海底環境において長期間安定して運用できる十分な構造的安全性を確保するとともに、集光量がKamLANDの450 p.e./MeVと同等以上となる検出性能を実現することである。

表 7.1 既存ニュートリノ実験における集光量 [29, 32, 62]

	集光量 [p.e./MeV]
KamLAND	450
Borexino	500
JUNO	1345

本研究では、図 4.4 に示す 1.5 kt 検出器の構造を検討する。これは、想定される大型検出器の中で最小規模のものであり、海底での運用という特殊性から、まずは比較的小型の構造から検討を始めることが妥当であると判断したためである。大型検出器の構造に関しては、主に 2 点が既に確定している。第 1 に、ステンレスタンクおよびアクリル容器の形状を KamLAND や SNO+ の球形と異なる円柱型とする設計である。これは、検出器を船舶で輸送する際に、船に積載可能な最大表面積が制約として存在するため、その条件の下で液体シンチレータ体積を最大化できる形状として円柱型が適していると判断されたためである。第 2 に、アクリル容器の外側に配置されるバッファオイル層の厚さを 3 m とする点である。PMT や PMT に取り付けられるガラスシールドには放射性不純物が多く含まれており、バッファオイル層が薄すぎる場合にはアクシデンタルバックグラウンドが増加してしまう。一方で、バッファオイル層を厚くしすぎると光が減衰し、PMT に到達する光量が不足する。先行研究 [40] では、アクシデンタルバックグラウンドの観測数が地球ニュートリノの観測数を上回らないことを条件として最適化を行い、結果としてバッファオイル層の厚さは 3 m に設定されている。以上より 1.5 kt 検出器の構造を検討する際、アクリル容器 (半径 6 m、高さ 14 m) およびステンレスタンク (半径 9 m、高さ 20 m) の円柱型形状は既に確定している。一方で、アクリルおよびステンレスの厚みに関しては、いまだ最適化が行われていない。先行研究 [40] では、ステンレス厚を 1.6 cm、アクリル厚を 5 cm と仮定しているが、これらの値はそれぞれ KamLAND および SNO+ の値を参考にしたものである。しかし、これらの実験とは異なり、OBD 検出器は海底環境下に設置されるため、海水圧の影響を考慮する必要がある。さらに、検出器形状も球形ではなく円柱型であることから、応力分布や構造的特性も大きく異なると考えられる。このように、ステンレスやアクリルの厚みは、製作コストや集光量、構造的安全性に大きく影響する重要な設計パラメータであり、最適化の余地は十分に残されている。実際、図 7.1 に示すように、液体シンチレータの発光ピーク波長 (橙色領域) において、アクリルの減衰長はハイコール K-290 と比較して平均で約 1 桁短く、アクリル厚の増加は集光量の低下を招く可能性がある。

本研究の設計手順は以下の流れで進める。まず、ステンレスタンクおよびアクリル容器に加え、圧力補償機構、海底設置を考慮した支柱および土台を含む検出器ジオメトリを構築する。本来であれば、液体シンチレータ、バッファオイル、光検出器モジュールも併せてモデル化すべきである。しかし、液体を含む応力解析が困難であること、ならびに解析精度の観点から、本研究ではこれらの詳細構造はジオメトリに含めないこととした。その代わりに、応力解析においては液体シンチレータ、バッファオイルおよび海水の静水圧、光検出器モジュールの自重および浮力を荷重として与え、実際の環境を近似的に再現した。次に、アクリルおよびステンレスの厚みをパラメータとして変化させながら応力解析を繰り返し、各厚みに対する構造的安全性を評価する。この際、地上と深海では荷重条件が大きく異なるため、検出器が両環境を経由する運用形態を踏まえ、それぞれの環境下で応力解析を行った。得られたジオメトリに対して応力解析を実施した結果、ステンレスについては安全率が 2 以上である場合に、工学的観点から構造上問題がないと判断した。ここで安全率とは、材料が耐えうる限界値に対して、実際に作用する値がどの程度余裕を有しているかを表す指標であり、本研究では降伏強度を作用した荷重で除した値として定義した。一方、アクリルについては、最大応力が 9.6 MPa 以下である場合に、工学的観点から構造上問題がない

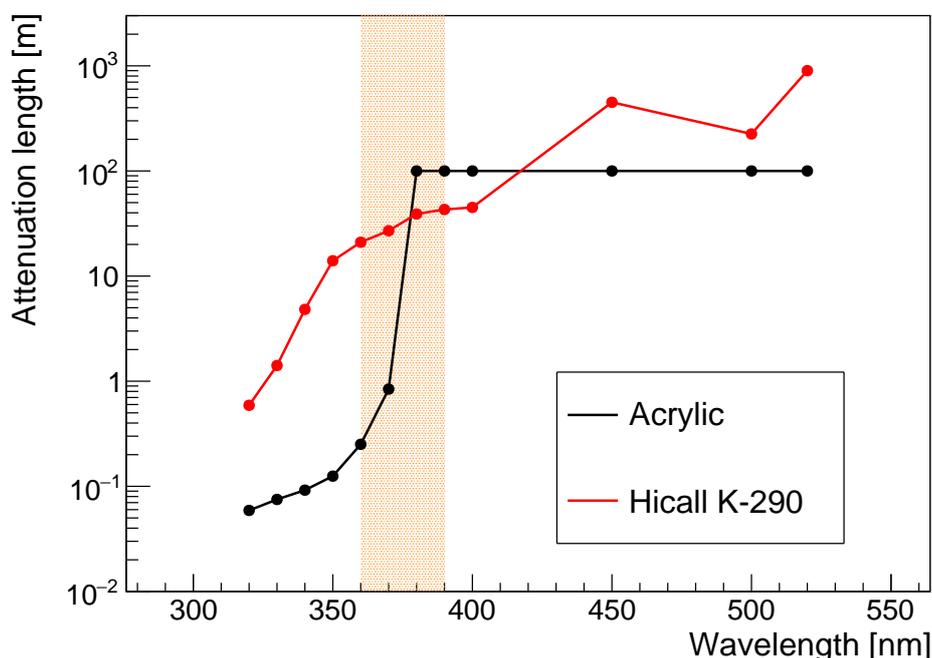


図 7.1 アクリルとバッファオイルの減衰長の比較

と判断した。アクリルの応力上限は、海底環境における約 10 年間の長期運用を想定し、6 章に示したクリープ試験結果を基に、安全率 2 を確保することで設定している。この制限値は、アクリルの降伏強度に対して単純に安全率 2 を設定した場合よりも厳しい条件であり、この条件下におけるクリープ寿命は約 56 年である。本研究で採用した安全率の目標値は、JAMSTEC における深海機器設計を参考にした。一般的な構造物では安全率 3 以上が推奨されるが、深海探査機では 1.2–1.5 程度が基準とされている。これは、深海環境では荷重条件が主に静水圧であり、地上のように風や人為荷重といった不確定要素が少ないこと、さらにコスト削減、材料特性および製造精度への信頼性などを考慮した結果である。OBD においても主たる荷重は静水圧であり、想定を超える急激な荷重変動は生じにくい。そのため本研究では安全率 2 以上を評価基準とした。最後に、これらの工学的要求を満たす構造の中から、集光量が最大となる設計を最終的な検出器構造として採用した。

## 7.2 ジオメトリ

基本となる解析対象を図 7.2 に示す。実際の OBD 検出器のように中心にアクリル容器、その外部にステンレスタンクがある。アクリル容器とステンレスタンクの厚みは決定しておらず、本研究で最適化を行う。ステンレスタンクは支柱で支えられおり、ステンレスタンクの土台の上には液体シンチレータ用 1 個とバッファオイル用 2 個の圧力補償バッグが置かれている。圧力補償機構として内径 1.5 cm のホースを利用する場合、液体シンチレータ用だけで長さが 200 km を超える必要があり、実用的でないことからホースの採用は断念された。アクリル容器は上面と底面

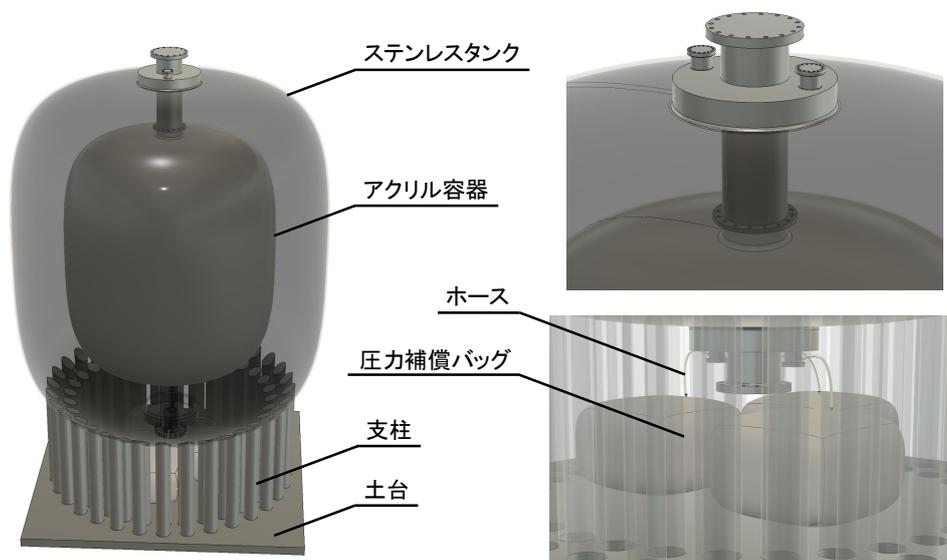


図7.2 検出器ジオメトリ

がチムニー構造になっており、ステンレスタンクに接続されている。ステンレスタンク、アクリル容器、圧力補償バッグ、圧力補償バッグと中央検出器を接続するホースのサイズや材質について表7.2に示す。圧力補償バッグとホースについてはまだ開発途中であるため、材料は変更される可能性がある。

表7.2 各検出器構造物の大きさと密度

	形	サイズ [m]	厚み [cm]	材質
ステンレスタンク	円柱	半径：9 高さ：20	?	ステンレス
アクリル容器	円柱	半径：6 高さ：14	?	アクリル
圧力補償バッグ	直方体	4 × 4 × 2.5	10	PVC
ホース	円柱	半径：0.01	0.01	PTFE
支柱	円柱	半径：0.4 高さ：5.5, 6.5	—	ステンレス
土台	直方体	16 × 16 × 0.5	—	ステンレス

ジオメトリへの荷重はジオメトリの自重、液体シンチレータ、バッファオイルおよび海水の静水圧、光検出器モジュールの自重と浮力を設定した。静水圧の算出には、液体シンチレータとバッファオイルについては5章で得られた密度値(海底4kmにおける $892.48 \text{ kg/m}^3$ および $888.17 \text{ kg/m}^3$ 、ならびに $2^\circ\text{C}$ ・大気圧における $870.80 \text{ kg/m}^3$ および $867.93 \text{ kg/m}^3$ )を使用し、海水の密度は $1025 \text{ kg/m}^3$ とした。圧力の基準面はステンレスタンク最上部に設定している。地上環境での解析には $2^\circ\text{C}$ ・大気圧での密度を用いた。これは、検出器のインストール時に液体シンチレータとバッファオイルをあらかじめ $2^\circ\text{C}$ まで冷却しておくことで、温度低下に伴う体積減

少の影響を無視する運用を想定しているためである。光検出器モジュールの自重と浮力については、表 7.3 に示す光検出器モジュールが 3232 個ステンレスタンク内壁に設置されることを想定した。また、各材質の材料特性は表 7.4 の通りである。

表 7.3 仮定した光検出器モジュールの構成

	質量 [kg]	備考
PMT	13.0	20 inch
ガラスシールド	53.1	内径 67 cm、外径 70 cm の球形
その他	3.2	データ取得回路や電源供給用回路基盤など
光検出器モジュール	69.3	体積 0.18 m <sup>3</sup>

表 7.4 各材質の材料特性

	ヤング率 [GPa]	降伏強度 [MPa]	ポアソン比	密度 [kg/m <sup>3</sup> ]
ステンレス	193.00	250.00	0.30	8000
アクリル	2.74	48.90	0.36	1188
PVC	0.71	11.00	0.41	1290
PTFE	0.50	12.00	0.40	2200

### 7.3 応力解析の妥当性確認

ここでは、図 7.2 に示すジオメトリに対し、地上を想定した応力解析を実施し、解析結果の妥当性を検証する。ステンレスの厚みを 10 cm、アクリルの厚みを 5 cm として行った応力解析の結果を図 7.3, 7.4 に示す。アクリル容器にはチムニーとの結合部分に最大で 14 MPa 程度、ステンレスには下部フランジ周辺に最大で 128 MPa 程度の応力がかかっている。そこで、この応力解析の結果が現実に即した値となっているのかについて、応力のメッシュ依存性と概算から検討することとする。

まず、応力のメッシュ依存性について評価する。有限要素法による応力解析では、構造物を複数の要素(メッシュ)に分割し、各要素ごとに応力を計算する。そのため、メッシュサイズを細かくするほど計算精度は向上するが、計算時間の増加や応力集中部での応力値の不安定化が生じることがある。したがって、応力を正確に評価できる適切なメッシュサイズを設定することが重要である。本解析では、メッシュサイズを構造物のサイズに応じて自動設定した。さらに、設定されたメッシュで応力を計算した後、より細かいメッシュで再計算を行い、その結果の差が設定した収束許容差以下になるまでメッシュを細分化するメッシュリファインメントを適用した。収束許容差は 1% 以下に設定している。この手順により、応力解析におけるメッシュ依存性の影響は無視できると判断した。

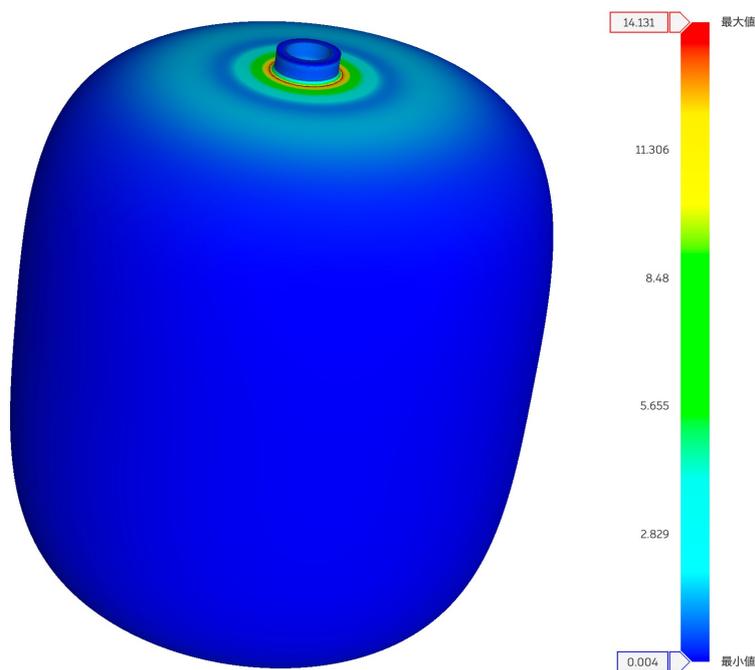


図 7.3 アクリル容器の応力分布

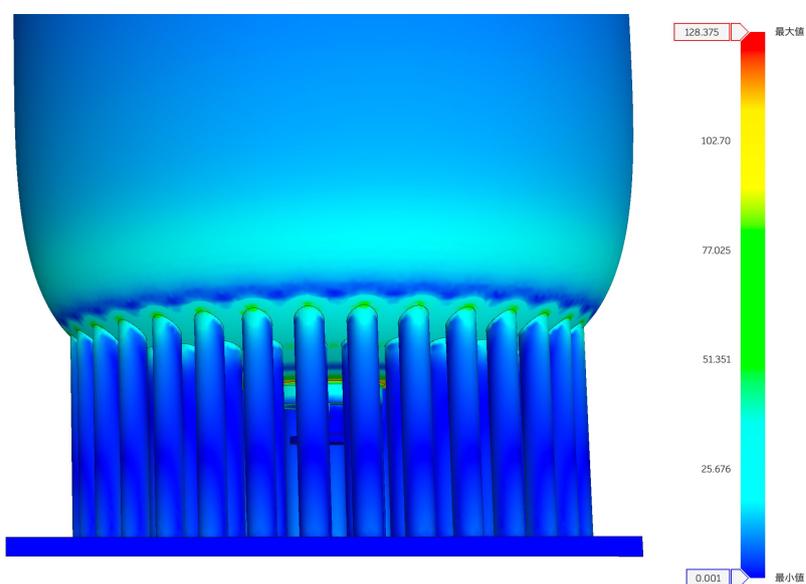


図 7.4 ステンレスの応力分布

続いて、応力値の概算を行う。ここでは、構造が単純なアクリル容器のみを対象とする。この際、密度差による最大圧力差

$$P = (\rho_{LS} - \rho_{BO})gh = 718 \text{ Pa} \quad (7.1)$$

をアクリル容器にかかる圧力とする。OBD-LS とハイコール K-290 の密度はそれぞれ地上での値、静水圧の基準はステンレスタンクの最上部とした。

まず、アクリル容器の側面部分は円筒容器の側面と仮定し、フープ応力 [63] で考える。円筒の外径を  $D$ 、厚みを  $t$  とすると、周方向の応力は

$$\sigma_{\theta} = \frac{PD}{2t} = 86 \text{ kPa} \quad (7.2)$$

続いて、軸方向の応力は

$$\sigma_z = \frac{PD}{4t} = 43 \text{ kPa} \quad (7.3)$$

となる。この2つの応力を、複数の方向から複合的に加わる応力状態を1つの値で表現する相当応力であるフォン・ミーゼス応力で表現すると、

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_z^2} = 0.075 \text{ MPa} \quad (7.4)$$

となる。この値はアクリル容器側面の応力値と概ね一致している。

次に、アクリル容器上下面の応力を概算する。上下面は中空円盤にかかる応力 [63] として考える。このとき、円盤にかかる曲げモーメントの最大値は円盤の半径  $R$  を用いて、

$$M_{max} = K_M PR^2 = 1.0 \times 10^4 \text{ N} \quad (7.5)$$

ただし、 $K_M$  は円盤の外径と内径の比によって決まる値であり、今回の場合は 0.3965 とした。よって、円盤の厚み  $t$  を用いて、応力の最大値は

$$\sigma_{max} = \frac{6M_{max}}{t^2} = 24.6 \text{ MPa} \quad (7.6)$$

である。この値はアクリル容器のチムニー接合部分に働く最大応力 14 MPa とオーダーで一致している。

以上のメッシュ依存性の評価および概算値との比較から、本応力解析の妥当性が十分に支持されることが確認できる。

## 7.4 工学的安全性の評価

### 7.4.1 ステンレスの厚みの最適化

ここでは、図 7.2 に示すジオメトリを対象として、ステンレスの厚みの最適化を行う。ステンレスの厚みは薄いほどコストを抑えられるが、同時に構造的安全性が損なわれてしまう。そのため、構造的安全性に問題がない範囲で、最小の厚みを決定する必要がある。ここでは、アクリルの厚みを SNO+ を参考に 5 cm と固定した上で応力解析を行った。

まず、ステンレスタンクの厚みを 1 cm とし、地上および深海における荷重条件を設定して構造解析を行い、応力分布の傾向を確認した。解析結果を図 7.5, 7.6 に示す。ここで示す解析結果は安全率の分布であり、安全率が 0-1 を赤、1-2 を緑、2 以上を青で表示している。深海条件では、上下フランジ周辺において安全率が 2 以下となる領域が確認された。最大応力は上部フランジ周辺で発生し、その値は 275.6 MPa、対応する安全率は 0.907 であった。一方、地上条件においても、上下フランジ周辺で安全率が 2 以下となる傾向が見られたが、最大応力は下部フランジ

および支柱周辺で発生し、その値は 1450.6 MPa、安全率は 0.172 と深海条件よりも著しく大きな応力が生じた。これは、深海条件ではタンク全体が外部の海水圧によって支持されているのに対し、地上条件ではその支持が失われるため、タンク下部に応力が集中したことが主な要因であると考えられる。以上の結果より、地上および深海のいずれの条件においても最小安全率が 2 を下回ることが確認されたため、厚み 1 cm の設計は十分な強度を有していないと判断される。ただし、側面部に関しては安全率が十分に確保されていることから、タンク全体を均一に厚くするのではなく、上部および下部のみの厚みを増加させる設計について検討する。

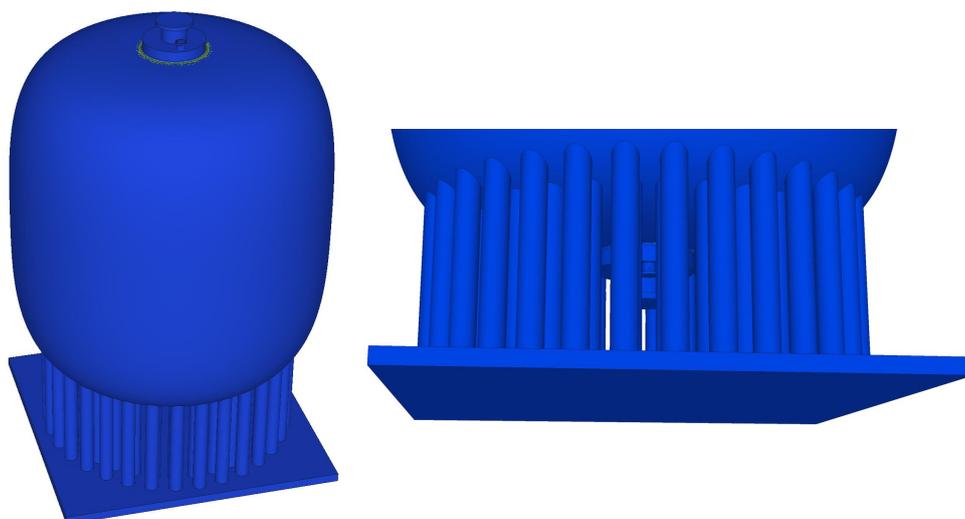


図 7.5 厚み 1 cm の際の深海における安全率分布

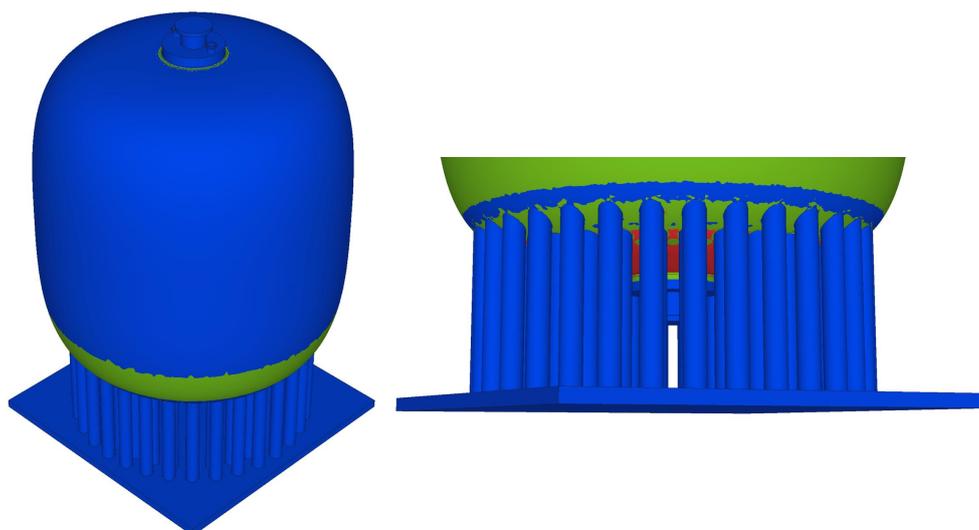


図 7.6 厚み 1 cm の際の地上における安全率分布

側面の厚みを 1 cm のままとし、上部および下部の厚みを 3 cm に変更したモデルについて、地上および深海における荷重条件を設定して構造解析を行った。解析結果を図 7.7, 7.8 に示す。深

海条件では、安全率が2以下となる領域は確認されなかった。最大応力は上部フランジ周辺で発生し、その値は100.0MPa、対応する安全率は2.501であった。一方、地上条件においては、下部において安全率が2以下となる領域が確認された。最大応力は下部フランジ周辺で発生し、その値は486.1MPa、安全率は0.514であった。以上の結果より、深海条件のみを考慮する場合、必要な厚みは側面1cm、上部および下部3cmであることが分かった。しかし、本検出器は地上で完成させた後に深海へ設置する計画であるため、地上条件についても十分に考慮する必要がある、さらなる厚みの増加が求められる。ただし、地上条件において安全率が2以下となったのは下部のみであったことから、側面は1cm、上部は3cmの厚みで十分であり、下部の厚みをさらに増加させた場合の検討を行う。

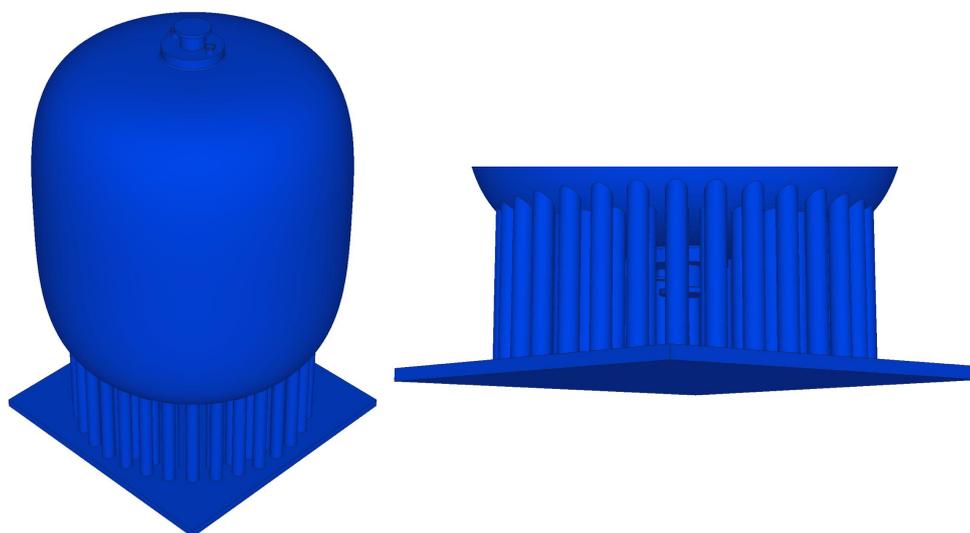


図 7.7 上部下部の厚みを 3 cm に変更した際の深海における安全率分布

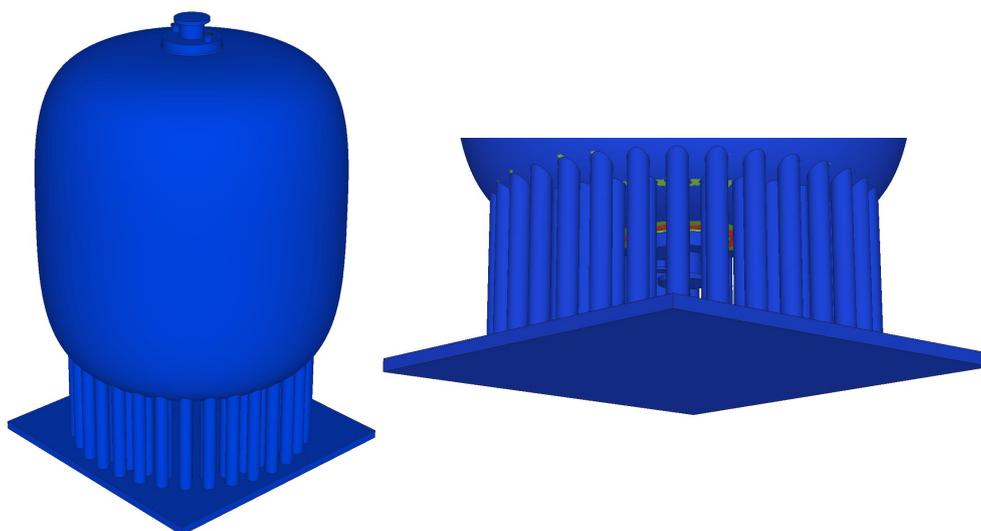


図 7.8 上部下部の厚みを 3 cm に変更した際の地上における安全率分布

側面の厚みを 1 cm、上部の厚みを 3 cm のままとし、下部の厚みを 10 cm に変更したモデルについて、地上における荷重条件を設定して構造解析を行った。解析結果を図 7.9 に示す。安全率が 2 以下となる領域は確認されず、上部フランジ周辺で発生した最大応力は 122.1 MPa、対応する安全率は 2.047 であった。以上の結果より、地上条件および深海条件の双方を考慮した場合に必要なステンレスタンクの厚みは、側面 1 cm、上部 3 cm、下部 10 cm であると結論づけられる。

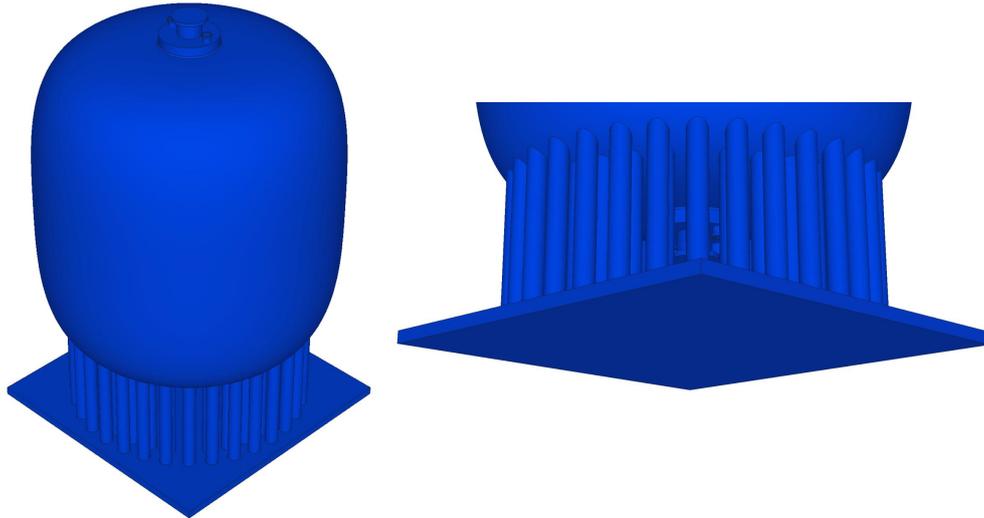


図 7.9 下部の厚みを 10 cm に変更した際の地上における安全率分布

## 7.4.2 アクリルの厚みの最適化

7.4.1 節においてステンレスタンクの厚みは最適化されたため、ここではアクリル容器の厚みの最適化を行う。アクリル容器には、クリープ破断を防止するために一定以上の厚みが必要である一方、厚みを増加させることでシンチレーション光のロスが増大するというトレードオフが存在する。そのため、クリープ破断が生じない範囲で、可能な限り薄い厚みを決定する必要がある。既存の大型ニュートリノ検出器において、JUNO ではステンレス製の支柱、SNO+ では紐を用いてアクリル容器を支持することで、アクリルに作用する荷重を低減させている。これらの構造は、アクリル容器の必要厚みに大きく影響すると考えられる。そこでここでは、支持なし、ステンレス支柱による支持、紐による支持の 3 つの条件について解析を行い、それぞれの場合におけるアクリル容器の厚みの最適化を行う。なお、支持構造を追加することによるシンチレーション光のロスについてはここでは考慮せず、7.5 節において評価する。

まず、支持なしの場合について、アクリル容器の厚みの最適化を行う。アクリル容器に作用する主な応力は、液体シンチレータとバッファオイルの密度差による圧力および自重であり、これらは地上条件と深海条件の間で大きな差はない。ただし、液体の密度差は深海条件の方が大きいため、深海条件を設定して解析を行うこととした。はじめに、SNO+ を参考に、アクリル容器の厚みを 5 cm とし、応力解析を行い、応力分布の傾向を確認した。解析結果を図 7.10 に示す。その結果、応力はアクリル容器と上下部フランジを結ぶチムニー構造の結合部付近に集中しており、

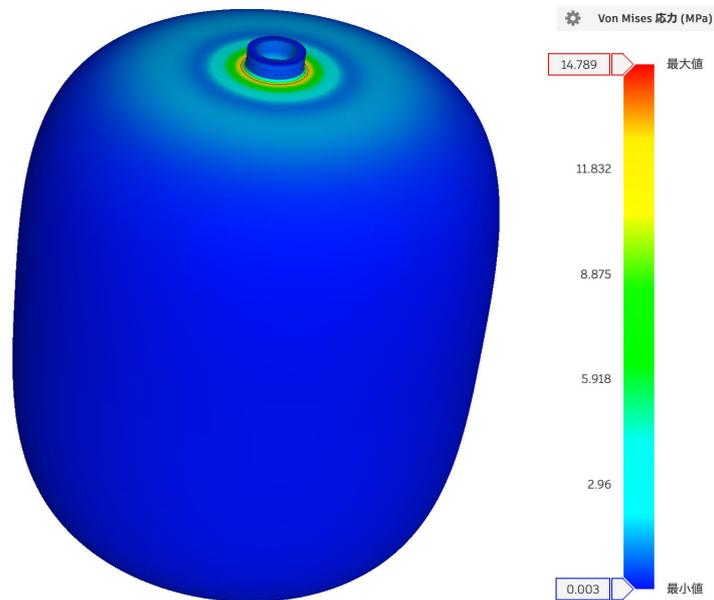


図 7.10 アクリル厚み 5cm で支持なしの場合の応力分布

最大応力は 14.8 MPa であった。これにより、応力集中部位および分布の傾向を確認することができた。次に、アクリル容器の厚みを 1 cm 刻みで変化させながら解析を行い、厚みと最大応力の関係性を評価した。その解析結果を図 7.11 に示す。その結果、最大応力を要求値である 9.6 MPa 以下に抑えるためには、アクリル容器の厚みが 7 cm 必要であることが分かった。

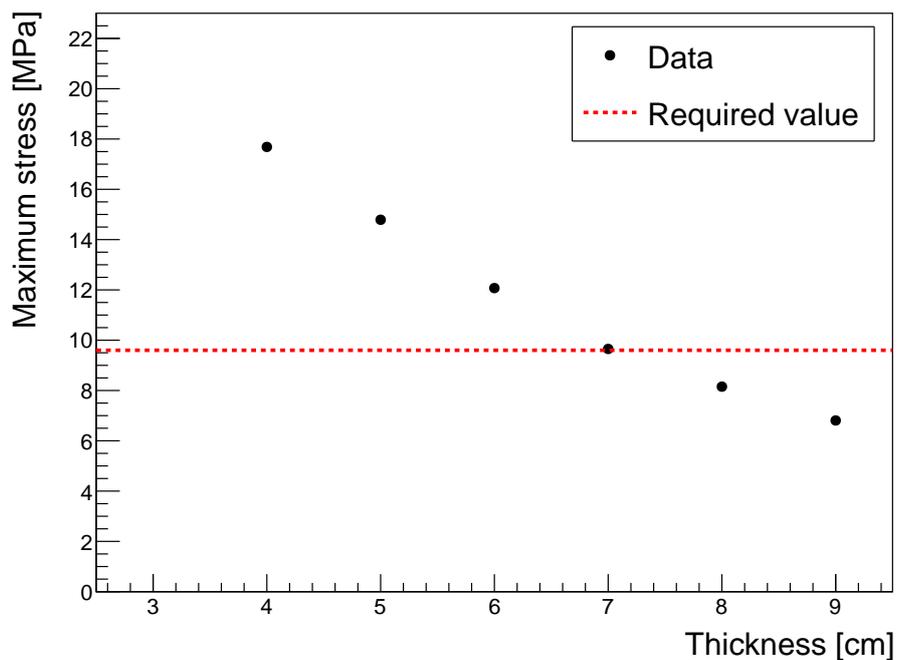


図 7.11 支持なしの場合のアクリルの厚みと最大応力の関係

次に、JUNO のようにステンレス製の支柱を用いてアクリル容器を支持する場合について、アクリル容器の厚みの最適化を行う。JUNO では、図 7.12 に示す構造により、アクリル容器をステンレスに固定している。この支持構造では、アクリル側にアクリルノードが設けられており、アクリルノードにステンレス支柱を埋め込むことで、アクリル容器とステンレスが固定されている。アクリルノードが用いられる理由は、アクリル容器そのものにステンレス支柱を直接埋め込むと、埋め込んだ部分でアクリル容器の強度低下を招くおそれがあるためである。さらに、アクリルノード周辺の構造については、図 7.13 に示すように複数の設計案が検討され、最終的に B の構造が採用された。以上を踏まえ、本研究では、アクリル容器とステンレスタンクの結合構造として、アクリルノードおよびステンレス支柱を用いる。解析の簡略化のため、切頭円錐型のアクリルノードに直径 0.2m の円柱形状のステンレス支柱が埋め込まれた単純なモデル (図 7.14) を採用した。

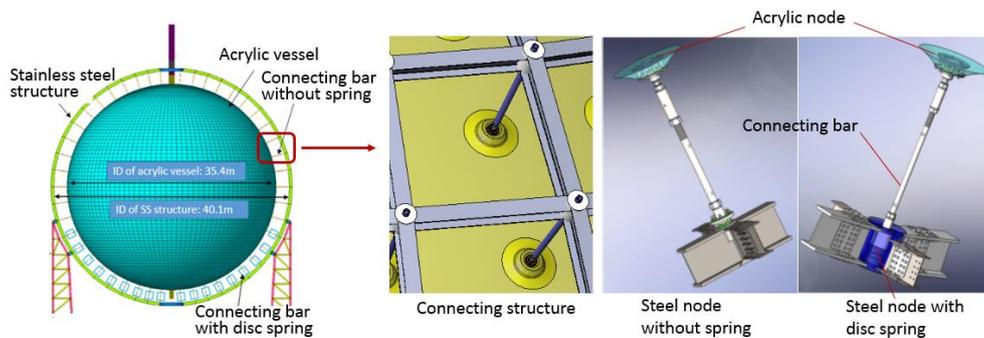


図 7.12 JUNO におけるアクリル容器とステンレスの連結構造 [64]

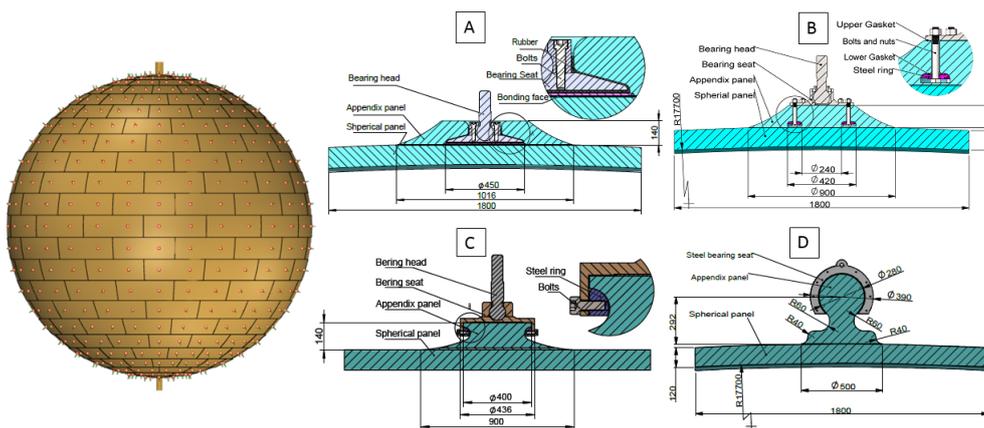


図 7.13 JUNO におけるアクリル支持ノードの案 [64]

続いて、アクリルノードおよびステンレス支柱による支持を、どの位置に追加することが有効であるかを評価した。JUNO では、アクリル容器の内外に LAB と純水が配置されており、その密度差が大きいいため、球面全体を固定する構造が採用されている。一方、OBD では、液体シンチレータとバッファオイルの組み合わせを工夫することで、アクリル容器内外の密度差が小さくな

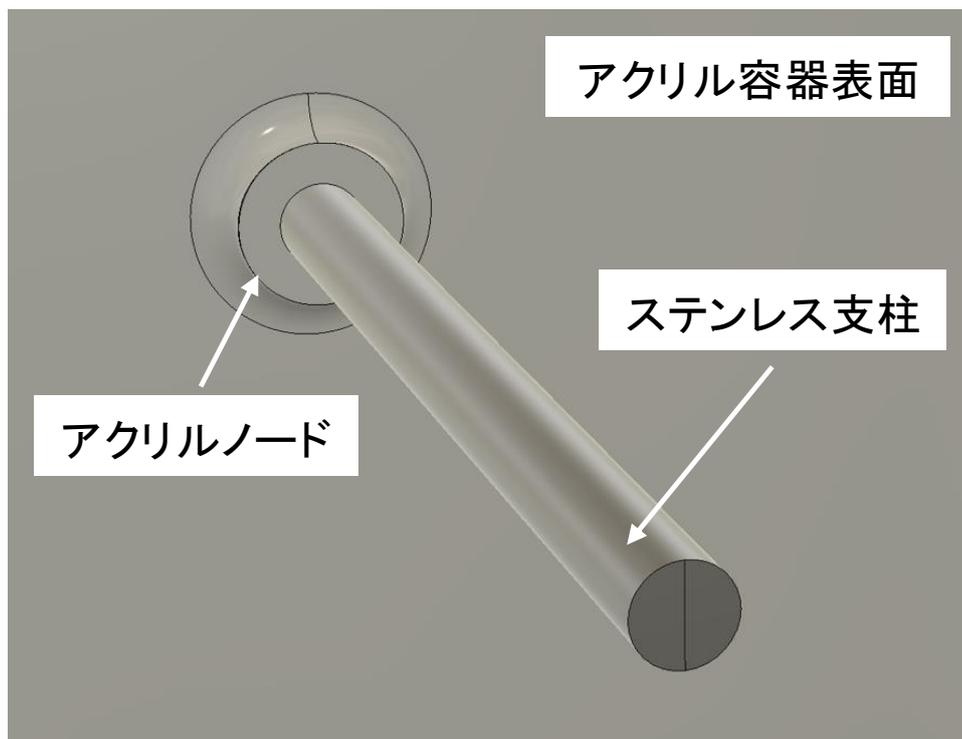


図 7.14 本研究におけるアクリル容器とステンレスタンクの結合構造

るよう設計されている。このため、支持構造は必要最小限にとどめることで、シンチレーション光のロスを抑制できると考えられる。そこで、アクリル容器の厚みを 5 cm としたモデルに対し、図 7.15 に示すように、アクリル容器の赤道部、側面端部、および上下部フランジ周辺に支持構造を追加し、それぞれの場合について応力解析を行った。各支持位置におけるアクリル容器とノード、



図 7.15 アクリル容器への支持構造の追加案

ステンレス支柱、ステンレスタンクの最大応力を表 7.5 に示す。その結果、アクリル容器に生じる最大応力を低減するには、赤道部または側面端部を支持することが有効であることが分かった。

表 7.5 各支持位置における最大応力

	アクリル容器とノード [MPa]	支柱 [MPa]	ステンスタンク [MPa]
支持なし	14.789	—	25.934
赤道部を支持	1.912	66.695	29.249
側面端部を支持	2.076	95.532	23.430
上下面を支持	6.762	16.005	27.198

一方、支持用ステンレス支柱に生じる応力は、側面端部を固定した場合よりも、赤道部を固定した場合の方が低い。また、赤道部支持では必要なステンレス支柱の本数を側面端部固定の場合の約半分に抑えることができ、シンチレーション光への影響も小さいと考えられる。以上の理由から、本研究では赤道部支持構造を採用する。赤道部を支持した場合の応力分布を図 7.16 に示す。アク

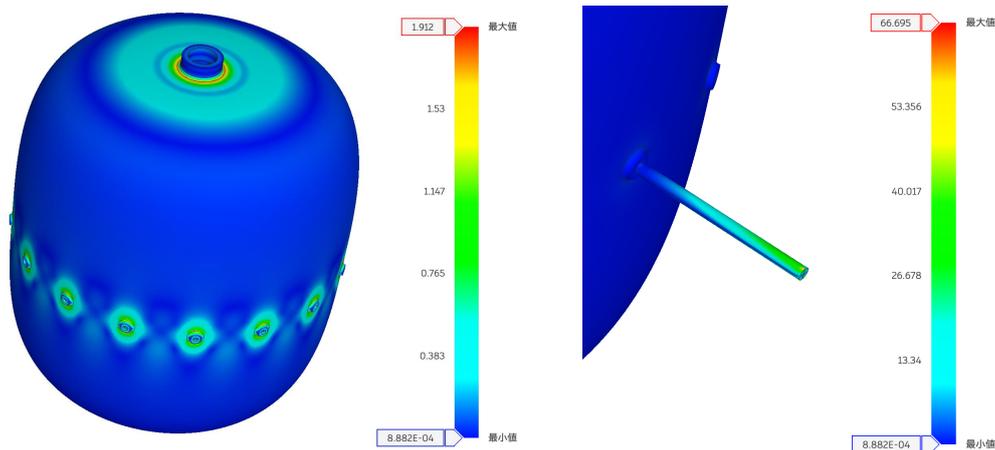


図 7.16 赤道部を支持した場合の応力分布

リル容器における最大応力の発生位置は、アクリル容器と上下部フランジを結ぶチムニー構造の結合部付近であり、支持構造を追加した場合でも大きな変化は見られなかった。一方で、アクリルノード周辺にも応力集中が確認された。また、固定用ステンレス支柱における最大応力は、ステンスタンクとの結合部付近で発生していた。次に、赤道部を支持した構造に対して、アクリル容器の厚みを 1 cm 刻みで変化させながら解析を行い、厚みと最大応力の関係性を評価した。その解析結果を表 7.6 に示す。その結果、アクリルの厚みが 1 cm の場合でも、アクリルに生じる最大応力は 2.308 MPa であり、要求値である 9.6 MPa に対して十分な余裕があることが確認された。また、ステンレス支柱およびステンスタンクに生じる応力についても、ステンレスの降伏強度を 250 MPa とすると、いずれもこれを大きく下回っており、構造的な余裕がある。以上の結果を踏まえ、アクリル容器の厚みを 1 cm に固定した上で、支柱の本数を変化させた解析を行った。その解析結果を表 7.7 に示す。支柱本数が 4 本の場合においても、アクリル容器に生じる最大応力は 5.224 MPa 程度であり、要求値である 9.6 MPa に対して十分な余裕が確認された。一方で、こ

表 7.6 ステンレス支柱支持における厚みと最大応力

厚み [cm]	アクリル容器とノード [MPa]	支柱 [MPa]	ステンレスタンク [MPa]
5	1.912	66.695	29.249
4	1.996	63.433	28.962
3	2.015	48.275	28.562
2	2.209	43.491	24.123
1	2.308	35.756	22.414

の条件ではステンレス支柱に生じる最大応力が 160.573 MPa に達し、安全率が 2 を下回る結果となった。このため、ステンレス支柱自体の強度余裕を考慮すると、支柱本数を 8 本とする構成が最適であると判断した。以上より、ステンレス支柱でアクリル容器を支持する場合、アクリル容器の厚みを 1 cm とし、赤道部に直径 20 cm のステンレス支柱を 8 本配置することで、十分な安全性が確保できることが示された。

表 7.7 支持用ステンレス支柱の本数と最大応力

支柱本数	アクリル容器とノード [MPa]	支柱 [MPa]	ステンレスタンク [MPa]
16	2.308	35.756	22.414
8	3.214	80.271	22.339
4	5.224	160.573	28.087

ここで、ステンレス支柱を追加することによるバックグラウンドへの影響を評価する。ステンレスは表 7.8 に示すようにアクリルに比べ放射性不純物濃度が約 2 桁高い。さらに、アクリル容

表 7.8 JUNO の放射性不純物濃度 [32]

	$^{238}\text{U}$ [ppb]	$^{232}\text{Th}$ [ppb]	$^{40}\text{K}$ [ppb]
アクリル	0.001	0.001	0.001
ステンレス支柱	0.2	0.6	0.02

器を支持するため液体シンチレータ近傍に設置されることから、放射性不純物由来のバックグラウンドへの影響が懸念される。バックグラウンドの評価には液体シンチレータ表面におけるガンマ線フラックス  $f$  [ $\text{Bq}/\text{m}^2$ ] を用い、式 (7.7) により導出した。

$$f = \int \frac{C\rho A}{4\pi(x+0.01)^2} e^{-\mu x} dV \quad (7.7)$$

ここで、 $C$  [ppb] は放射性不純物濃度、 $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] は構造物の密度、 $A$  [ $\text{Bq}/\text{kg}/\text{ppb}$ ] は単位質量・単位濃度あたりの放射能、 $x$  [m] は構造物から液体シンチレータまでの距離、 $\mu$  [ $\text{m}^{-1}$ ] は線減衰係

数を表す。積分は構造物の体積について実施した。つまり、積分値が大きいほど、液体シンチレータに与えるバックグラウンドの影響が大きいことを意味する。本解析では、放射線フラックスが距離の二乗に反比例する幾何学的減衰を仮定した。しかし、液体シンチレータ近傍では点源近似や遠方場近似が成立せず、この仮定は厳密には成り立たない。そこで、その影響を緩和するため、液体シンチレータ近傍における代表的幾何学スケールとして 0.01 m を導入した。なお、表 7.9 に示すように、液体シンチレータ中での反応レートはアクリル由来の放射性不純物が支配的である。したがって、バックグラウンド評価ではアクリルとステンレス支柱のみを考慮し、支持なしの場合

表 7.9 放射性不純物由来のバックグラウンドレート [40]

	反応レート [Hz]
アクリル容器	7.08
液体シンチレータ	$3.39 \times 10^{-4}$
PMT	$4.77 \times 10^{-1}$
ガラスシールド	$1.71 \times 10^{-1}$
計	7.73

合とステンレス支柱で支持した場合の影響を比較した。放射性不純物濃度には表 7.8 の値を用いた。概算結果を表 7.10 に示す。ステンレス支柱による支持を導入した場合においても、支持構造を設けない場合と比較してバックグラウンドは低く抑えられている。このため、本研究で採用したジオメトリはバックグラウンドの観点から問題ないと判断できる。

表 7.10 支柱支持のバックグラウンドへの影響

	$f_U$	$f_{Th}$	$f_K$
支持なし	$2.15 \times 10^1$	7.05	$4.59 \times 10^2$
ステンレス支柱で支持	$1.31 \times 10^1$	4.42	$2.76 \times 10^2$

最後に、SNO+ のように紐を用いてアクリル容器を支持する場合について、アクリル容器の厚みの最適化を行う。SNO+ では、図 7.17 に示す構造により、アクリル容器をステンレスタンクに固定している。この支持構造では、ステンレスタンク下部に固定した紐をアクリル容器上部に掛けることで、アクリル容器とステンレスタンクを連結している。SNO+ で用いられている紐の材料はテンシロン (超高分子量ポリエチレン) であるが、表 7.11 に示すように、テンシロン中の  $^{40}\text{K}$  濃度は、JUNO で使用されているアクリルと比較して約 5 桁高いことが分かる。同様の傾向は、KamLAND においてバルーン支持用として使用されているケブラー (パラ系アラミド繊維) についても確認されており、こちらもアクリルと比べて約 3 桁高い。このため、まずは放射性不純物由来のバックグラウンドの影響について、式 (7.7) と表 7.11 の放射性不純物濃度を用いて概算評価を行った。バックグラウンド評価ではアクリルと紐のみを考慮し、支持なしの場合と紐で支持した場合のバックグラウンドを比較した。ここで、SNO+ ではアクリル球に作用する力  $1.25 \times 10^6 \text{ N}$

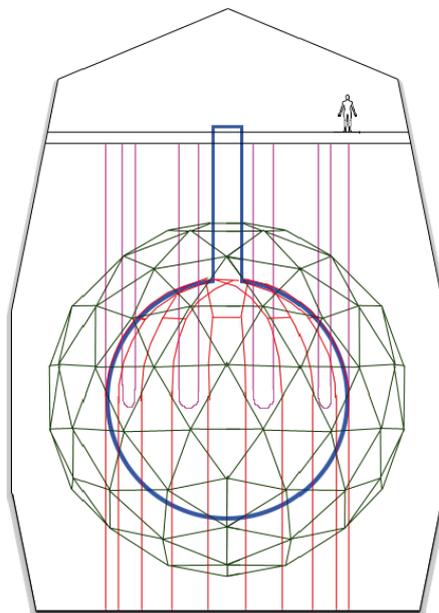


図 7.17 SNO+ で使用されるロープ支持構造 [65]。青がアクリル容器、赤が支持に使われる紐を表している。

表 7.11 放射性不純物濃度 [32, 66]

	$^{238}\text{U}$ [ppb]	$^{232}\text{Th}$ [ppb]	$^{40}\text{K}$ [ppb]
アクリル	0.001	0.001	0.001
テンシロン	$0.05 \pm 0.03$	$0.23 \pm 0.11$	$(8.7 \pm 2.0) \times 10^2$
ケブラー	0.08	0.8	1.2

を 20 本の紐で支持しており、1 本あたりの荷重は  $6.25 \times 10^4 \text{ N}$  である。一方、OBD では内外液体の密度差を小さく抑えた設計としており、アクリル厚さを 1 cm とした場合にアクリル容器へ作用する力は  $8.83 \times 10^4 \text{ N}$  となる。このため、支持に用いる紐の直径は SNO+ の 3.96 cm より小さく設定できる。紐が支持できる最大荷重は断面積に比例するため、直径を SNO+ の  $1/\sqrt{2}$  倍に相当する 2.80 cm とした場合、最大荷重は元の紐の 1/2 に相当する  $3.13 \times 10^4 \text{ N}$  となる。以上より、テンシロン紐による支持の検討では、ステンレス支柱で支持する場合と同様にアクリル厚さを 1 cm とし、直径 2.80 cm の紐 4 本で支持する条件を仮定した。その際、アクリル容器を上部から吊り下げる構造とし、容器下半分において合計 70 m の紐がアクリルに隣接して配置されていると仮定した。同様に、ケブラー紐による支持については、直径 1.90 cm の紐の耐荷重が  $3.92 \times 10^4 \text{ N}$  であること、および安全率 4 を設定し、直径 1.90 cm の紐 8 本で支持する条件を仮定した。この場合も、テンシロン紐の場合と同様の議論より、合計 140 m のケブラー紐がアクリルに隣接して配置されていると仮定した。概算結果を表 7.12 に示す。 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  に起因するバックグラウンドは紐による支持構造を採用した場合の方が、支持構造を設けない場合よりも小さいことが分

かった。一方、 $^{40}\text{K}$  に起因するバックグラウンドは、テンシロンによる支持構造を採用した場合、支持構造を設けない場合と比較して約 280 倍と極めて大きくなることが確認された。また、ケブラーによる支持構造を用いた場合においても、支持構造なしの場合の約 2 倍のバックグラウンドが見込まれる。さらに、本検討で想定した紐の長さはアクリルに作用する荷重から概算した値であり、実際には紐同士を結ぶ横紐の追加や水平方向の外力への対応を考慮すると、必要長さが 2 倍程度となる可能性も否定できない。以上の結果より、紐を用いた支持構造はバックグラウンドを著しく増加させる要因となることが明らかになったため、採用しないこととした。

表 7.12 紐支持のバックグラウンドへの影響

	$f_U$	$f_{Th}$	$f_K$
支持なし	$2.15 \times 10^1$	7.05	$4.59 \times 10^2$
テンシロン紐で支持	$1.32 \times 10^1$	4.76	$1.29 \times 10^5$
ケブラー紐で支持	$1.33 \times 10^1$	5.48	$7.96 \times 10^2$

## 7.5 集光量の評価

ここでは、7.4.2 節で工学的要求から提案された支持なしとステンレス支柱で支持した検出器に対して、Geant4[67] を用いて集光量の評価を行った。Geant4 とは、素粒子が物質中で起こす相互作用を詳細にシミュレーションできるソフトウェアであり、素粒子・原子核物理学や宇宙線物理学の分野で広く用いられている。Geant4 を用いるメリットとして、使用言語に C++ を採用しているため、ジオメトリ設計、物質定義、物理プロセス定義などを設定する際に有用なクラスが多数用意されていることが挙げられる。さらに、光学フォトンの追跡機能が実装されており、吸収・散乱・屈折・反射などの物理プロセスを含めた光輸送を詳細に取り扱うことが可能であるため、本研究では Geant4 を採用した。本研究における Geant4 を用いた集光量の評価は、以下の手順で行った。

1. 各検出器構造を再現したジオメトリを作成する。
2. 使用する物質の光学特性を設定し、物質中や境界面における物理プロセスを定義する。
3. 液体シンチレータ内部のランダムな位置および方向に、液体シンチレータの発光スペクトルに従い、様々なエネルギーを持つ光子を多数発生させる。
4. 発生させた光子のうち、PMT によって検出された割合 (光検出率) を評価する。

作成した検出器のジオメトリを図 7.19 に示す。解析を簡略化するため、検出器全体の構造は円柱形状とした。検出器は、外側から順にステンレスタンク、バッファオイル、ステンレス支柱、アクリル容器、液体シンチレータで構成されている。7.4.2 節の結果より、支持なしの場合はアクリルの厚みが 7 cm、ステンレス支柱で支持する場合はアクリルの厚みが 1 cm、直径 0.2 m の支柱を 8 本配置した。また、ステンレスタンク内壁にはブラックシート (反射率 0%) の取り付けを想定し、その内側に PMT およびガラスシールドを含む検出器構造を実装している。

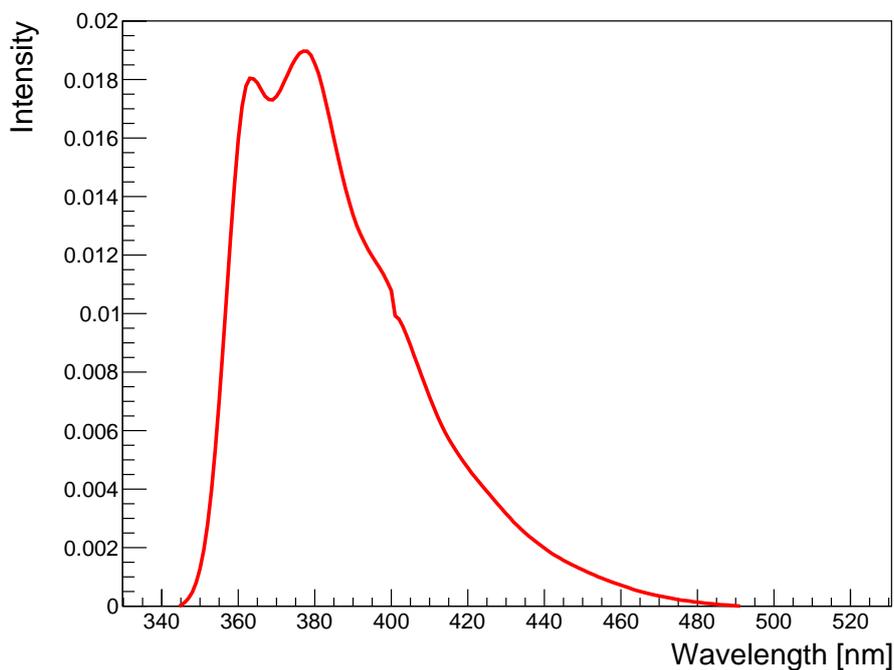


図 7.18 OBD-LS の発光スペクトル

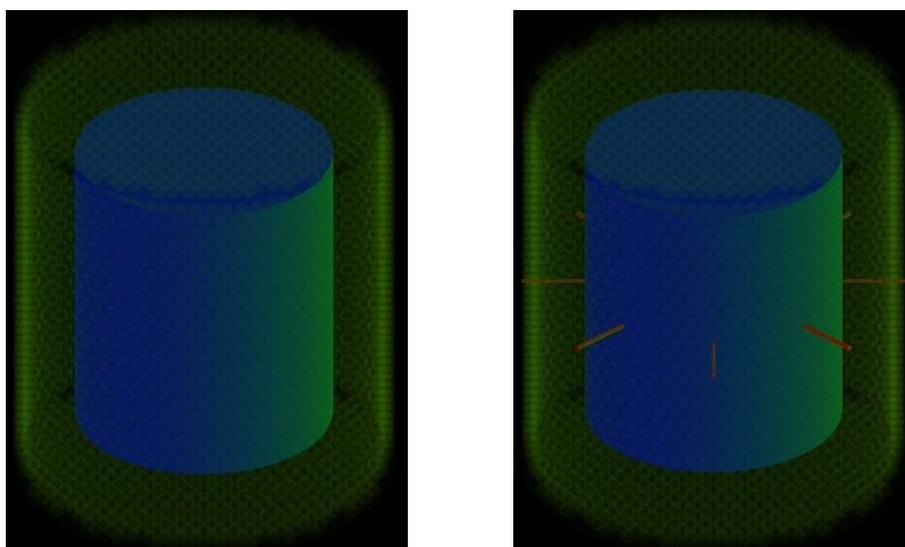


図 7.19 支持なしのジオメトリ (左図) とステンレス支柱で支持したジオメトリ (右図)

本研究では、PMT において検出された光子の割合を指標として集光量の評価を行う。そのため、光子の発生位置や放出方向による影響を受けず、検出効率を統計的に安定して評価するために必要な光子数を検討した。具体的には、支持構造を含まない条件下で、アクリル厚を 5 cm としたジオメトリを用い、生成する光子数を変化させながら PMT における光検出率を算出した。その結果を図 7.20 に示す。光子数が  $10^8$  個を超えると、PMT の光検出率はほぼ一定となり、統計的に十分安定していることが確認された。以上の結果を踏まえ、本研究における集光量の評価

では、光子を  $10^8$  個発生させる条件を採用する。なお、光子を  $10^8$  個発生させる同一条件下のシミュレーションを 10 回独立に実行し、各試行で得られた PMT の光検出率から算出した標準偏差は 0.002% であった。本研究では、この標準偏差を集光量評価における誤差として扱う。

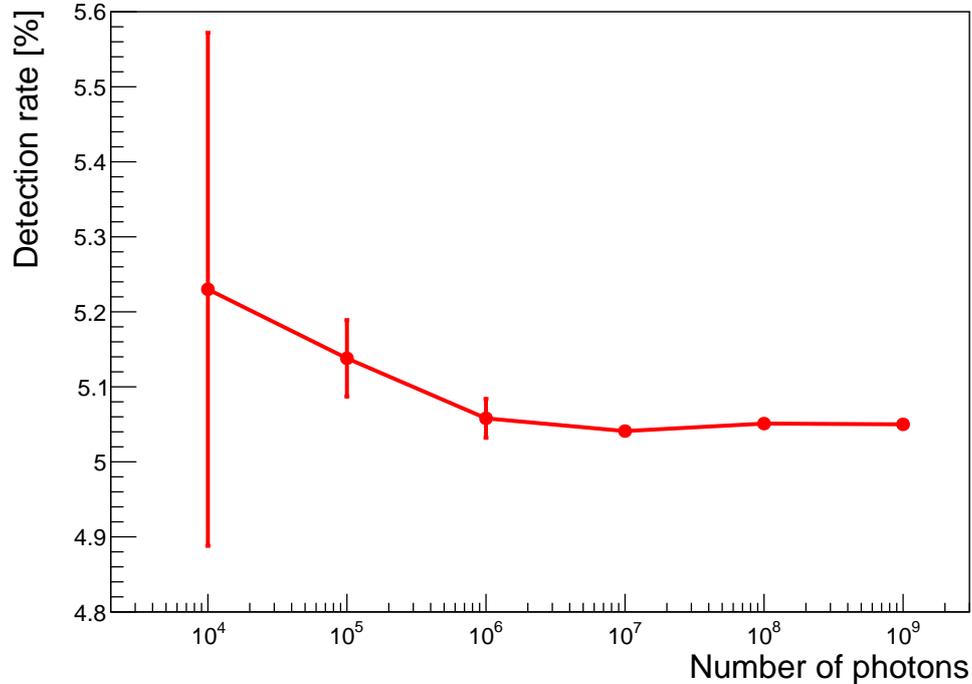


図 7.20 光子数と光検出率の関係

図 7.19 に示す 2 種類のジオメトリに対する光検出率を表 7.13 に示す。本評価では、ステンレス支柱の反射率を 90%、40% および 0% の 3 条件として検討を行った。反射率 90% は、KamLAND 実験において使用実績のあるタイベック (高密度ポリエチレン製の特殊不織布) を支柱表面に巻き付けた場合を想定している。一方、反射率 40% はステンレス本来の反射率、0% はステンレス支柱にブラックシートを巻き付けた場合の値である。なお、KamLAND では、解析時のノイズとなる反射光を低減する目的で検出器内壁にブラックシートが用いられている。ステンレス支柱によってアクリル容器を支持する構造では、アクリルの厚みを薄くすることが可能となるため、ステンレス支柱の反射率が十分に高い場合には、支持構造を用いない場合と比較して光検出率が向上する結果が得られた。一方、反射光を低減する目的でブラックシートを使用した場合には、光検出率は支持構造を用いない場合よりも低下した。ここで、OBD-LS の発光量は約 10000 photons/MeV であり、表 7.13 に示す光検出率を乗じて得られる集光量はいずれの条件においても約 500 p.e./MeV となる。これは、本研究で設定した目標値である 450 p.e./MeV を十分に満たしており、設定した条件間において集光量に関する顕著な差は見られない。以上より、集光量の観点ではいずれの条件も目標を満たしていることから、最終的な構造の選定は集光量以外の要素を基に行った。検出器は地上で建設された後、海洋の設置地点まで船舶によって運搬される。この運搬過程では、波浪や船体動揺に起因する加速度、振動、衝撃などの外力が検出器に作用する可能性がある。さらに、設置後も地震や津波などの自然外力の影響を受けることが想定さ

れる。この際、支持構造を用いない場合には、アクリル容器は上面および底面のみで固定されるため、水平方向の揺れに対する懸念がある。以上を踏まえ、本研究では安全性および反射光によるノイズ低減の観点から、ブラックシートを巻き付けたステンレス支柱によってアクリル容器を支持する構造を最終的な検出器構造として採用する。

表 7.13 光検出率の比較

	支持構造の反射率 [%]	光検出率 [%]
支持なし	—	5.047 ± 0.002
ステンレス支柱で支持	90	5.056 ± 0.002
ステンレス支柱で支持	40	5.043 ± 0.002
ステンレス支柱で支持	0	5.035 ± 0.002

## 7.6 新たな課題

本研究により、新たな課題がいくつか明らかとなった。既に述べたように、5章では、バッファオイルの高粘度に起因する気泡混入の問題およびポンプを用いた検出器へのインストールの可否が課題となった。また、6章では、アクリルの強度を維持するための重合方法の最適化が今後の課題である。さらに、本章の検出器構造設計の検討からも複数の課題が見出されたため、ここでまとめる。

### 支持構造の開発

本研究により、ステンレス支柱によってアクリル容器を支持する構造が提案された。しかし、ステンレス支柱をアクリル容器に直接接続すると、アクリル容器の強度が低下する可能性が高い。そのため、アクリル容器表面にアクリルノードを取り付けて支柱を接続する必要がある。したがって、アクリルノードの構造設計およびアクリルノードとステンレス支柱の結合方法の開発が今後の課題である。

### ケーブルの配置

光検出器モジュールからは、信号伝送や PMT への高電圧印加など、さまざまな目的で地上までケーブルを延伸する必要がある。この際、ケーブルに高い耐圧性を付与する技術と、密閉容器内部から外部へケーブルを導出して気密性を保持する技術は、数多くの海底観測システムが実用化されていることから分かるように、既に確立されている。前者は、外装被覆や多層シース構造、金属補強層の適用によりケーブル自体の機械的強度および耐圧性能を向上させるものである。後者は、密閉容器の壁面に設けた貫通部に圧力貫通コネクタ等を設置し、金属シールまたは樹脂シールを用いてケーブル外装との界面を加圧密封することにより、外部環境からの浸水を防止し

つつ電氣的導通を確保する技術である。

一方で、ケーブルをステンレスタンクのどの位置から外部へ導出するか、またステンレスタンク規模の巨大構造物においてその周囲を密閉し十分な耐圧性を確保できるかについては、詳細な検討が必要である。さらに、設置予定の光検出器モジュールは3232個と多数であり、それぞれのケーブルをいかに集約し、効率的に配索するかも今後の重要な設計課題である。

## 液体の温度制御

液体シンチレータとバッファオイルは、温度・圧力変化による体積減少量を抑制するため、地上において2°Cまで冷却してインストールされる予定である。インストール前にはステンレスタンクおよびアクリル容器も予冷しておくが、バッファオイルは液体シンチレータよりも外側に配置されているため、外気温の影響をより受けやすい。その結果、温度制御によっては想定以上の密度差が生じ、アクリル容器に加わる荷重が増大する可能性がある。したがって、適切な温度制御方法について検討する必要がある。

## 検出器の沈設

本研究で採用した検出器構造では、検出器全体の密度は地上で最小1281 kg/m<sup>3</sup>、深海4 kmで最大1309 kg/m<sup>3</sup>となり、いずれの場合も海水密度である1025 kg/m<sup>3</sup>を上回る見込みである。一方、Hanohanoプロジェクトでは検出器密度が海水密度より小さいことが想定されていたため、図7.21に示すようにアンカーを検出器下部に取り付け、付加重量により沈降させる方式が計画されていた。これに対し、OBD検出器は密度が海水より大きいため、アンカーを用いなくても自重により沈降する。このため、OBD検出器では、沈降をいかに制御するかが設計課題となる。

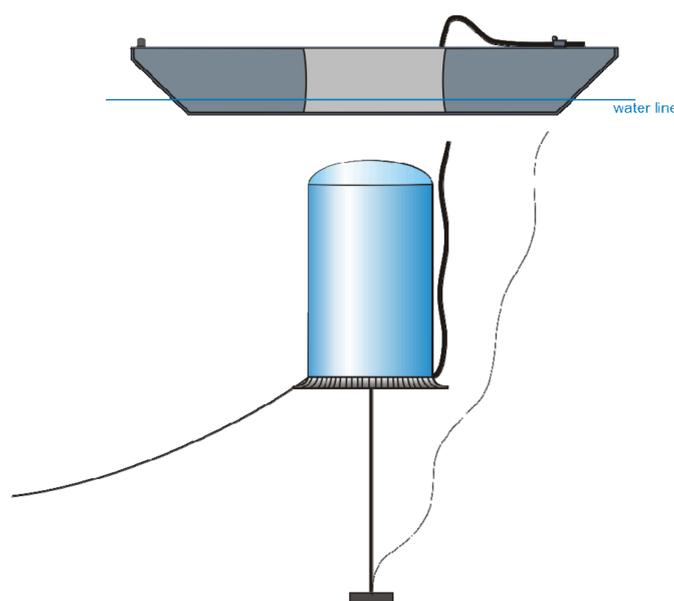


図 7.21 Hanohano プロジェクトの検出器沈設イメージ

また、本研究で採用した検出器構造において、検出器の重心位置はステンレスタンク底面から上方 5.10–5.28 m の範囲に存在することが明らかとなった。沈設時には、水深方向で海流速度が異なる場合、転倒の危険性が生じる可能性がある。このため、沈設時の安全性を評価するためには、海流速度分布を考慮した力学的検討が今後の課題である。



## 第 8 章

# 結論と今後の展望

### 8.1 結論

本研究では、検出器に要求される工学的要求および物理学的要求の双方を満たす検出器構造の設計を行った。また、工学的要件を評価するための基礎的検討として、バッファオイルの選定およびアクリルの強度試験を実施した。

バッファオイルの選定においては、複数の候補の光学特性を比較した結果、ハイコール K-290 と呼ばれるパラフィンオイルが最も高い光透過率を示し、KamLAND のバッファオイルよりも優れていた。さらに、ハイコール K-290 は LAB やアクリルとの屈折率差が小さく、屈折率差に起因するフレネル反射率は入射角  $70^\circ$  以下で  $0.1\%$  以下と影響が十分に小さいことが確認された。また、地上での LAB の密度  $858.11 \text{ kg/m}^3$  に対し、ハイコール K-290 と LAB との密度差は地上条件において約  $1.9 \text{ kg/m}^3$  ( $0.22\%$ )、水深  $4 \text{ km}$  の深海条件においても約  $4.3 \text{ kg/m}^3$  ( $0.50\%$ ) と小さい。以上のことから、ハイコール K-290 をバッファオイルとして採用した。

アクリルの強度試験では、LAB およびハイコール K-290 への浸漬、ならびに重合が強度に与える影響を引張試験により評価した。その結果、LAB およびハイコール K-290 への浸漬は、アクリルの最大引張荷重、ヤング率および  $0.2\%$  耐力に影響を及ぼさないことが明らかになった。一方で、重合を施したアクリルでは、最大引張荷重が本来の約  $75\%$  まで低下することが確認された。さらに、アクリルの長期使用を想定し、クリープ試験を実施した。その結果、10 年間の連続観測を想定した場合、アクリルに作用する応力は  $19.2 \text{ MPa}$  以下に抑える必要があることが示された。

検出器の構造設計では、ステンレスタンクとアクリル容器の厚みの最適化を行った。その結果、ステンレスタンク (半径  $9 \text{ m}$ 、高さ  $20 \text{ m}$ ) の厚みが側面で  $1 \text{ cm}$ 、上部で  $3 \text{ cm}$ 、下部で  $10 \text{ cm}$  必要であった。ただし、これらの値は地上および深海の両条件での運用を想定した結果であり、深海での運用のみに限定した場合には、下部の厚みも  $3 \text{ cm}$  で十分であることが示された。また、アクリル容器 (半径  $6 \text{ m}$ 、高さ  $14 \text{ m}$ ) の厚みについては、支持構造を設けない場合には  $7 \text{ cm}$  必要だが、直径  $20 \text{ cm}$  のステンレス支柱 8 本によって支持する場合には  $1 \text{ cm}$  で十分であることがわかった。一方、紐による支持構造案については、放射性バックグラウンドの寄与が深刻となることが示されたため、採用しないこととした。最終的に、ステンレス支柱による支持構造では、ステンレスの反射率が十分に高い場合、支持構造を用いない場合と比較して光検出率が向上する結果が得ら

れた。しかし、反射率や支持構造の有無にかかわらず光検出率の差は小さく、集光量への大きな影響は認められなかった。以上を踏まえ、外力に対する安定性および解析時のノイズ要因となる反射光の低減を考慮し、ブラックシートを巻き付けたステンレス支柱による支持構造を最終設計として採用した。

## 8.2 今後の展望

今後の課題として、OBD プロジェクト全体に関わるものとしては、既に述べたとおり、バッファオイルの高粘度への対処、アクリルの重合方法の最適化、検出器の沈設方法の確立などが挙げられる。ここでは、これらに加えて本研究に直接関係する課題として、シミュレーション精度の向上について述べる。本研究では、その実現に向けた方策として、以下の二点が重要であると考えられる。

一つ目は、圧力補償機構、光検出器モジュールおよびアクリルノードやステンレス支柱からなる支持構造の開発である。本研究では、これらの構造が未確定であったため、解析において多くの仮定を導入せざるを得なかった。今後は、圧力補償機構、光検出器モジュールおよび支持構造の設計・開発を進めるとともに、それらを反映したシミュレーションによる性能評価を並行して実施することで、より高精度な評価が可能になると期待される。

二つ目は、非線形動的解析の導入である。本研究では静的応力解析を用いたため、波や地震など、時間とともに変動する外力の影響を評価することができなかった。また、静的応力解析では、構造変形に伴って生じる荷重変化が考慮されていない。実際の深海環境では、静水圧により構造物に一定の変形が生じることが予想されるため、今後は幾何学的非線形性を考慮した非線形動的解析を導入することで、より現実的な工学的安全性評価が可能になると考えられる。

## 謝辞

本研究は、多くの方々のご指導とご協力のもと行うことができました。この場をお借りして、深く感謝申し上げます。

指導教員の渡辺先生には、約2年半にわたり大変お世話になりました。ご多忙の中でも、研究の進め方や論文のまとめ方について親身にご指導いただき、心より感謝しております。国際的な研究へと発展していくOBDに関わることで、自身の価値観を広げる貴重な経験を得ることができました。この経験を、今後の次のステージでも活かしていきたいと考えております。本当にありがとうございました。

センター長の井上先生には、中間発表などの機会を通じて、鋭い視点から多くのご指導をいただきました。物理にとどまらず幅広い知識に基づくご助言により、自身では気づくことのできなかった多くの点を学ぶことができ、研究を進める上で大変貴重な経験となりました。また、世界最高峰の実験に参加する機会を与えていただいたことに、深く感謝申し上げます。ありがとうございました。

宮城県産業技術総合センターの佐藤様、ならびにクリアライズの皆様には、アクリルの強度試験において大変お世話になりました。難しい要求や度重なる相談にも快くご対応いただき、心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

その他にも、ニュートリノセンターの教員の皆様、技術職員の皆様、同期、先輩、後輩の皆様の支えのおかげで、本論文を完成させることができました。ニュートリノセンターを選んで本当に良かったです。ありがとうございました。



## 参考文献

- [1] “Higgs tan 標準粒子の基本粒子”, URL : <https://higgstan.com/standerd-model/>.
- [2] “CERN COURIER”, URL: <https://cerncourier.com/a/ghosts-in-the-machine/>.
- [3] 竹本康浩, “CNO サイクル太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路の開発”, (2008).
- [4] A. M. Serenelli, W. C. Haxton, and C. Peña-Garay, “SOLAR MODELS WITH ACCRETION. I. APPLICATION TO THE SOLAR ABUNDANCE PROBLEM”, *The Astrophysical Journal* **743**, 24 (2011), DOI: [10.1088/0004-637x/743/1/24](https://doi.org/10.1088/0004-637x/743/1/24).
- [5] A. Serenelli, “Alive and well: A short review about standard solar models”, *The European Physical Journal A* **52**, 78 (2016), DOI: [10.1140/epja/i2016-16078-1](https://doi.org/10.1140/epja/i2016-16078-1).
- [6] B. T. Cleveland, T. Daily, R. Davis, Jr., J. R. Distel, K. Lande, C. K. Lee, P. S. Wildenhain, and J. Ullman, “Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector”, *The Astrophysical Journal* **496**, 505–526 (1998), DOI: [10.1086/305343](https://doi.org/10.1086/305343).
- [7] Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata, “Remarks on the Unified Model of Elementary Particles”, *Progress of Theoretical Physics* **28**, 870–880 (1962), DOI: [10.1143/PTP.28.870](https://doi.org/10.1143/PTP.28.870).
- [8] L. Wolfenstein, “Neutrino oscillations in matter”, *Phys. Rev. D* **17**, 2369–2374 (1978), DOI: [10.1103/PhysRevD.17.2369](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.17.2369).
- [9] S. P. Mikheyev and A. Y. Smirnov, “Resonant amplification of oscillations in matter and solar-neutrino spectroscopy”, *Il Nuovo Cimento C* **9**, 17–26 (1986), DOI: [10.1007/BF02508049](https://doi.org/10.1007/BF02508049).
- [10] B. Aharmim, S. N. Ahmed, A. E. Anthony et al., “Electron energy spectra, fluxes, and day-night asymmetries of  $^8\text{B}$  solar neutrinos from measurements with NaCl dissolved in the heavy-water detector at the Sudbury Neutrino Observatory”, *Phys. Rev. C* **72**, 055502 (2005), DOI: [10.1103/PhysRevC.72.055502](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.72.055502).
- [11] B. Aharmim, S. N. Ahmed, A. E. Anthony et al., “Combined analysis of all three phases of solar neutrino data from the Sudbury Neutrino Observatory”, *Phys. Rev. C* **88**, 025501 (2013), DOI: [10.1103/PhysRevC.88.025501](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.025501).

- [12] K. Abe, J. Adam, H. Aihara et al., “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 061802 (2014), DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.061802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.061802).
- [13] A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago et al., “Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND”, *Phys. Rev. D* **88**, 033001 (2013), DOI: [10.1103/PhysRevD.88.033001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.033001).
- [14] X. Qian and P. Vogel, “Neutrino mass hierarchy”, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **83**, 1-30 (2015), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnnp.2015.05.002>.
- [15] P. de Salas, D. Forero, C. Ternes, M. Tórtola, and J. Valle, “Status of neutrino oscillations 2018: 3 hint for normal mass ordering and improved CP sensitivity”, *Physics Letters B* **782**, 633-640 (2018), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2018.06.019>.
- [16] M. Aker, A. Beglarian, J. Behrens et al., “First direct neutrino-mass measurement with sub-eV sensitivity”, (2021), DOI: [10.1038/s41567-021-01463-1](https://doi.org/10.1038/s41567-021-01463-1).
- [17] M. M. Ivanov, M. Simonović, and M. Zaldarriaga, “Cosmological parameters and neutrino masses from the final *Planck* and full-shape BOSS data”, *Phys. Rev. D* **101**, 083504 (2020), DOI: [10.1103/PhysRevD.101.083504](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.083504).
- [18] “身の回りの地学現象がわかる！ 「地学」の総合ポータルサイト 板村地質研究所 地球の層構造-地殻・マントル・核”, URL: [https://geo.w-human.com/e\\_science/e\\_layer.html](https://geo.w-human.com/e_science/e_layer.html).
- [19] J. Trčková, R. Živor, and R. Přikryl, “Physical and mechanical properties of selected amphibolite core samples from the Kola Superdeep Borehole KSDB-3”, *Terra Nova* **14**, 379-387 (2002), DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00427.x>.
- [20] “Encyclopedia Britannica. Primary Wave.”, URL: <https://www.britannica.com/science/primary-wave>.
- [21] 榎本三四郎, “Neutrino Geophysics and Observation of Geo-Neutrinos at KamLAND”, 博士論文, 東北大学 (2005).
- [22] A. M. Dziewonski and D. L. Anderson, “Preliminary reference Earth model”, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **25**, 297-356 (1981), DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(81\)90046-7](https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7).
- [23] E. J. Garnero and A. K. McNamara, “Structure and Dynamics of Earth’s Lower Mantle”, *Science* **320**, 626-628 (2008), DOI: [10.1126/science.1148028](https://doi.org/10.1126/science.1148028).
- [24] J. H. Davies and D. R. Davies, “Earth’s surface heat flux”, *Solid Earth* **1**, 5-24 (2010), DOI: [10.5194/se-1-5-2010](https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010).
- [25] D. L. Turcotte and G. Schubert, *Geodynamics*: Cambridge University Press, 2nd edition (2002).
- [26] W. McDonough and S. s. Sun, “The composition of the Earth”, *Chemical Geology* **120**, 223-253 (1995), DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4), Chemical Evolution of the Mantle.
- [27] M. Javoy, E. Kaminski, F. Guyot et al., “The chemical composition of the Earth: Enstatite

- chondrite models”, *Earth and Planetary Science Letters* **293**, 259-268 (2010) , DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.033>.
- [28] S. Abe, S. Asami, M. Eizuka et al., “Abundances of Uranium and Thorium Elements in Earth Estimated by Geoneutrino Spectroscopy”, *Geophysical Research Letters* **49**, e2022GL099566 (2022) , DOI: <https://doi.org/10.1029/2022GL099566>, e2022GL099566 2022GL099566.
- [29] M. Agostini, K. Altenmüller, S. Appel et al., “Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino”, *Phys. Rev. D* **101**, 012009 (2020) , DOI: [10.1103/PhysRevD.101.012009](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.012009).
- [30] V. Albanese, R. Alves, M. Anderson et al., “The SNO+ experiment”, *Journal of Instrumentation* **16**, P08059 (2021) , DOI: [10.1088/1748-0221/16/08/p08059](https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/08/p08059).
- [31] M. Abreu, A. Allega, M. R. Anderson et al., “Measurement of reactor antineutrino oscillations with 1.46 ktonne-years of data at SNO+”, (2025) , DOI: [10.1103/gypt-lc9v](https://doi.org/10.1103/gypt-lc9v).
- [32] “JUNO Physics and Detector”, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **123**, 103927 (2022) , DOI: [10.1016/j.pnpnp.2021.103927](https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2021.103927).
- [33] A. Abusleme, T. Adam, K. Adamowicz et al., “Initial performance results of the JUNO detector”, (2025a) , DOI: [10.48550/arXiv.2511.14590](https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.14590).
- [34] A. Abusleme, T. Adam, K. Adamowicz et al., “First measurement of reactor neutrino oscillations at JUNO”, (2025b) , DOI: [10.48550/arXiv.2511.14593](https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.14593).
- [35] T. Kaptanoglu, E. J. Callaghan, M. Yeh, and G. D. Orebi Gann, “Cherenkov and scintillation separation in water-based liquid scintillator using an LAPPDTM”, *The European Physical Journal C* **82** (2022) , DOI: [10.1140/epjc/s10052-022-10087-5](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-022-10087-5).
- [36] M. J. Duvall, B. C. Crow, M. A. Dornfest, J. G. Learned, M. F. Bergevin, S. A. Dazeley, and V. A. Li, “Directional response of several geometries for reactor-neutrino detectors”, *Physical Review Applied* **22** (2024) , DOI: [10.1103/physrevapplied.22.054030](https://doi.org/10.1103/physrevapplied.22.054030).
- [37] S. Enomoto, E. Ohtani, K. Inoue, and A. Suzuki, “Neutrino geophysics with KamLAND and future prospects”, *Earth and Planetary Science Letters* **258**, 147-159 (2007) , DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.038>.
- [38] O. Šrámek, B. Roskovec, S. A. Wipperfurth, Y. Xi, and W. F. McDonough, “Revealing the Earth’s mantle from the tallest mountains using the Jinping Neutrino Experiment”, *Scientific Reports* **6**, 33034 (2016) , DOI: [10.1038/srep33034](https://doi.org/10.1038/srep33034).
- [39] J. G. Learned, S. T. Dye, and S. Pakvasa, “Hanohano: A Deep Ocean Anti-Neutrino Detector for Unique Neutrino Physics and Geophysics Studies”, (2008) , DOI: [10.48550/arXiv.0810.4975](https://doi.org/10.48550/arXiv.0810.4975).
- [40] 酒井汰一, “海洋底反ニュートリノ観測装置 OBD に向けた低温高圧環境用検出器要素の開発とシミュレーションによる性能評価”, 修士論文, 東北大学 (2022) .
- [41] 大野建, “大型海洋底ニュートリノ検出器 OBD に向けたシミュレーションによる観測感度の包括的評価”, 修士論文, 東北大学 (2025) .
- [42] “浜松ホトニクス株式会社 編集委員会 (2017) 「光電子増倍管-その基礎と応用-」, 浜松ホト

- ニクス株式会社.”.
- [43] 荒木拓登, “海洋底ニュートリノ検出器 OBD 実現に向けた小型プロトタイプ検出器の開発研究”, 修士論文, 東北大学 (2025) .
- [44] 永塚穂里, “KamLAND における超新星ニュートリノの探索”, 修士論文, 東北大学 (2023) .
- [45] “Super-Kamiokande web page 検出器について”, URL : <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/detector/>.
- [46] R. Abbasi, M. Ackermann, J. Adams et al., “D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube”, *Journal of Instrumentation* **18**, P04014 (2023) , DOI: [10.1088/1748-0221/18/04/p04014](https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/04/p04014).
- [47] O. Šrámek, W. F. McDonough, E. S. Kite, V. Lekić, S. T. Dye, and S. Zhong, “Geophysical and geochemical constraints on geoneutrino fluxes from Earth’s mantle”, *Earth and Planetary Science Letters* **361**, 356-366 (2013) , DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.11.001>.
- [48] 大浦智也, “KamLAND2-Zen 実験に向けた新液体シンチレータの純化”, 修士論文, 東北大学 (2016) .
- [49] “ハイコール K-290 製品規格及び代表性状”, URL : [https://www.kaneda.co.jp/jigyuu/whitemineraloil/images/k\\_290.pdf](https://www.kaneda.co.jp/jigyuu/whitemineraloil/images/k_290.pdf).
- [50] J. W. Gooch, “Cauchy’s Dispersion Formula”, in J. W. Gooch ed. *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, 167–167, New York, NY: Springer New York (2007) .
- [51] 太田直輝, “KamLAND2-Zen 実験のための集光ミラーを用いた高光収率検出器の開発”, 修士論文, 東北大学 (2019) .
- [52] “アクリライトの屈折率について知りたい”, URL : <https://acrylite-help.m-chemical.co.jp/アクリライトの屈折率について知りたい-662b51716041b70024757029>.
- [53] “Hawaii Ocean Time-series Program DATA REPORT 34 2022”, URL: [https://hahana.soest.hawaii.edu/hot/reports/rep\\_y34.pdf](https://hahana.soest.hawaii.edu/hot/reports/rep_y34.pdf).
- [54] X. Duan, H. Yuan, W. Tang, J. He, and X. Guan, “A Phenomenological Primary–Secondary–Tertiary Creep Model for Polymer-Bonded Composite Materials”, *Polymers* **13** (2021) , DOI: [10.3390/polym13142353](https://doi.org/10.3390/polym13142353).
- [55] A. M. Hubbard, Y. Ren, C. R. Picu, A. Sarvestani, D. Konkolewicz, A. K. Roy, V. Varshney, and D. Nepal, “Creep Mechanics of Epoxy Vitrimer Materials”, *ACS Applied Polymer Materials* **4** (2022) , DOI: [10.1021/acsapm.2c00230](https://doi.org/10.1021/acsapm.2c00230).
- [56] “宮城県産業技術総合センター webpage”, URL : <https://www.mit.pref.miyagi.jp>.
- [57] “住ベリサーチ株式会社 引張試験”, URL : [https://www.sb-r.co.jp/services/analysis/material\\_property/01\\_01/](https://www.sb-r.co.jp/services/analysis/material_property/01_01/).
- [58] “プラスチッククリープ特性の試験方法 第 1 部：引張クリープ”, URL : <https://kikakurui.com/k7/K7115-1999-01.html>.
- [59] M. S. Song, G. X. Hu, and L. J. Hu, “Prediction of long-term mechanical behaviour and

- lifetime of polymeric materials”, *Polymer Testing* **17**, 311–332 (1998) , DOI: [10.1016/S0142-9418\(97\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(97)00060-3).
- [60] S. N. Zhurkov, “Kinetic concept of the strength of solids”, *International Journal of Fracture* **26**, 295–307 (1984) , DOI: [10.1007/BF00962961](https://doi.org/10.1007/BF00962961).
- [61] “Autodesk Fusion webpage”, URL: <https://www.autodesk.com/jp/solutions/what-is-fusion-360>.
- [62] 竹本康浩, “[Observation of 7Be Solar Neutrinos with KamLAND](#)”, 博士論文, 東北大学 (2014) .
- [63] W. C. Young and R. G. Budynas, *Roark’s Formulas for Stress and Strain*, New York, NY: McGraw-Hill Education, 7th edition (1989) .
- [64] T. J. Collaboration, “The Design and Technology Development of the JUNO Central Detector”, (2024) , DOI: [10.48550/arXiv.2311.17314](https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.17314).
- [65] S. Andringa, E. Arushanova, S. Asahi et al., “Current Status and Future Prospects of the SNO+ Experiment”, *Advances in High Energy Physics* (2016) , DOI: [10.1155/2016/6194250](https://doi.org/10.1155/2016/6194250).
- [66] A. Bialek, M. Chen, B. Cleveland et al., “A rope-net support system for the liquid scintillator detector for the SNO+ experiment”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **827**, 152–160 (2016) , DOI: [10.1016/j.nima.2016.04.114](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.04.114).
- [67] “Geant4 webpage”, URL: <https://geant4.web.cern.ch>.