2024年度卒業論文

## 長基線ニュートリノ振動実験における 中間水チェレンコフ検出器の 外層光検出機構の設計評価および ミューオン識別性能の研究

指導教員 西村 康宏 准教授

慶應義塾大学理工学部物理学科 西村研究室 岡 明香里

2025年3月20日

# 目次

要	旨		6
1	背景	ł	7
	1.1	ニュートリノ	7
	1.2	チェレンコフ光	8
	1.3	ニュートリノ検出実験	9
		1.3.1 ハイパーカミオカンデ	10
		1.3.2 T2K 実験	10
		1.3.3 IWCD	12
	1.4	光電子増倍管の原理	12
2	中間	<b> 水チェレンコフ検出器の外層光検出機構</b>	14
	2.1	IWCD OD	15
		2.1.1 宇宙線ミューオン	15
		2.1.2 波長変換板	16
		2.1.3 反射シート	18
3	中間	水チェレンコフ検出器の外層光検出機構の光電子増倍管波形特性	19
	3.1	目的	19
	3.2	スプリッターの有無による波形変化測定	20
		3.2.1 スプリッターの有無による波形変化測定のセットアップ	20
		3.2.2 スプリッターの有無による波形変化測定の測定方法	25
		3.2.3 スプリッターの有無による波形変化測定の測定結果	26
		3.2.4 スプリッターの有無による波形変化測定の考察	30
	3.3	ダンピング抵抗の挿入	30
		3.3.1 ダンピング抵抗挿入測定のセットアップ	31
		3.3.2 ダンピング抵抗挿入測定の測定方法	31
		3.3.3 ダンピング抵抗挿入測定の測定結果	31
		3.3.4 ダンピング抵抗挿入測定の考察	33
	3.4	波長変換板の時定数の波形への影響.............................	33
		3.4.1 波長変換板の時定数の波形への影響測定のセットアップ	33
		3.4.2 波長変換板の時定数の波形への影響測定の測定方法	34
		3.4.3 波長変換板の時定数の波形への影響測定の測定結果	35
		3.4.4 波長変換板の時定数の波形への影響測定の考察	38
	3.5	水チェレンコフ光の測定................................	38
		3.5.1 水チェレンコフ光測定のセットアップ	38

		3.5.2	水チェレンコフ光測定の測定方法	42
		3.5.3	水チェレンコフ光測定の測定結果.........................	43
		3.5.4	水チェレンコフ光測定の考察.........................	44
4	中間	水チェ	レンコフ検出器の外層光検出機構の検出器シミュレーション	45
	4.1	目的.		45
	4.2	方法.		45
		4.2.1	IWCD におけるミューオンフラックスの確認	46
		4.2.2	単一のエネルギーのミューオン	48
		4.2.3	計算されたミューオンフラックスに対応するミューオンの入射	49
		4.2.4	タグ付けと検出の定義・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
	4.3	シミュ	レーションツールとシミュレーション方法	51
		4.3.1	WCSim	51
		4.3.2	MUSIC	51
	4.4	結果.		52
		4.4.1	MUSIC を用いたミューオンフラックスの計算	52
		4.4.2	単一のエネルギーのミューオンを入射	54
		4.4.3	ミューオンフラックスに従うミューオンを入射	62
	4.5	考察.		64
		4.5.1	ダークノイズの影響	64
		4.5.2	イベントディスプレイとミューオンの最低エネルギー、タンク内での飛	
			行距離	65
		4.5.3	実際の測定での OD タグ付け効率の影響	66
		4.5.4	PMT 数削減の検討	66
5	結論	と今後	の展望	68
	5.1	中間水	<チェレンコフ検出器の外層光検出機構における光電子増倍管の波形	68
	5.2	中間水	<チェレンコフ検出器の外層光検出機構の検出器シミュレーション	69

謝辞

# 図目次

1.1	標準模型 [15]	7
1.2	チェレンコフ光	8
1.3	チェレンコフ光の発光スペクトル [1]	9
1.4	ハイパーカミオカンデ [11]	10
1.5	T2K 実験概略図 [8]	10
1.6	ニュートリノビームのエネルギーの角度依存性 [4]..........	11
1.7	IWCD 実験	12
1.8	光電子増倍管の原理	13
1.9	D 型ソケットアッセンブリ [14]	13
0.1	Warを検出されていたした構実図	1.4
2.1	IWCD で快出されるイベントの模式図	14
2.2	<b>外部快出品の概要図</b> ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	15
2.3	北衣面でのミューオンノフックス	16
2.4	スーハーカミオカンテの仮長変換板の吸収、	16
2.6	8 cm PMI の重丁別平 $[13]$	17
2.5	スーハーカミオカンナの彼長変換板の重于効率 [1]	1/
2.7	ハイハーカミオカンナの仮長変換板の吸収、 充元特性 [/]	18
3.1	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ	
3.1	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20
<ul><li>3.1</li><li>3.2</li></ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21
<ul><li>3.1</li><li>3.2</li><li>3.3</li></ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22
<ul><li>3.1</li><li>3.2</li><li>3.3</li><li>3.4</li></ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 22
<ul><li>3.1</li><li>3.2</li><li>3.3</li><li>3.4</li><li>3.5</li></ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 22 23
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> </ul>	<ul> <li>レーザーダイオードを用いた2線式ソケットと1線式ソケットの波形比較のセットアップ</li></ul>	20 21 22 22 23 23
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> </ul>	<ul> <li>レーザーダイオードを用いた2線式ソケットと1線式ソケットの波形比較のセットアップ</li></ul>	20 21 22 23 23 23 24
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> </ul>	<ul> <li>レーザーダイオードを用いた2線式ソケットと1線式ソケットの波形比較のセットアップ</li></ul>	20 21 22 23 23 24 24 25
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> <li>3.10</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24 24 25 26
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> <li>3.10</li> <li>3.11</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24 25 26 26
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> <li>3.10</li> <li>3.11</li> <li>3.12</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24 24 25 26 26 27
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> <li>3.10</li> <li>3.11</li> <li>3.12</li> <li>3.13</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24 25 26 26 27 28
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> <li>3.10</li> <li>3.11</li> <li>3.12</li> <li>3.13</li> <li>3.14</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた2線式ソケットと1線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24 25 26 26 26 27 28 29
<ul> <li>3.1</li> <li>3.2</li> <li>3.3</li> <li>3.4</li> <li>3.5</li> <li>3.6</li> <li>3.7</li> <li>3.8</li> <li>3.9</li> <li>3.10</li> <li>3.11</li> <li>3.12</li> <li>3.13</li> <li>3.14</li> <li>3.15</li> </ul>	レーザーダイオードを用いた2線式ソケットと1線式ソケットの波形比較のセ ットアップ	20 21 22 23 23 24 24 25 26 26 26 27 28 29 29

3.17	ダンピング抵抗の有無による PMT に1光電子を入射した際の比較	31
3.18	ダンピング抵抗の有無と大光量を入射した際の平均波形の比較	32
3.19	ダンピング抵抗の有無と大光量を入射した際の平均波形の比較 拡大図	32
3.20	LED を用いた測定のセットアップ ...........................	33
3.21	LED パルサー	34
3.22	LED パルサーで測定された平均波形	36
3.23	波長変換の有無と半値全幅の関係	37
3.24	波長変換の有無と信号に含まれる周波数の関係	37
3.25	波長変換の有無と信号に含まれる周波数の平均値の関係	38
3.26	水チェレンコフ光測定のセットアップ..................	39
3.27	実際の水チェレンコフ光測定の様子	39
3.28	8 cm PMT の取り付け位置	40
3.30	波長変換板の吊り下げ位置	41
3.29	波長変換を用いる場合のセットアップ..........................	41
3.31	波長変換板	42
3.32	水チェレンコフ光測定においてオシロスコープで取得される波形......	43
3.33	波長変換板の有無と光電子数、半値全幅の関係	43
4.1		16
4.1	シミュレーション内のIWCD	40
4.2	それそれのシオ <b>メドリでのODPMI</b> の配直	4/
4.5	タンミュレーションでのミューオンT 射位置と角度の設定	40 50
4.4	日ン、エレーンヨンしの、エーオン八利位置と内反の設定 $\dots$	50
ч.5 Л.6	x = x = y = y = y = y = y = y = y = y =	52
4.0	マーパーカミオカンデと比較したミューオンフラックス	53
 4 8	M M M M M M M M M M M M M M M M M M M	53
4.0 4.9	IWCD 地表面でのミューオンフラックス	53
4 10	ミューオンフラックスの天頂角ごとのエネルギー依存性	54
4.11	ODの検出効率のエネルギー依存性	55
4.12	ID でのイベント検出確率のエネルギー依存性	55
4.13	OD のタグ付け効率	56
4.14	OD のタグ付け効率のフィッティング	56
4.15	ダークレートがない場合のイベントディスプレイ	57
4.16	ダークレートがある場合のイベントディスプレイ	58
4.17	OD におけるエネルギーとヒット数の関係	60
4.18	ID におけるエネルギーとヒット数の関係	61
4.19	OD タンク最上部中心点からミューオンを入射した際の天頂角依存性	62
4.20	OD タンク最上部角付近から入射した際の天頂角依存性	63
4.21	<b>OD</b> タンク最上部 <i>x</i> 軸上から入射した際の天頂角依存性	64
4.22	セットアップ 6、7 のジオメトリ	67
4.23	セットアップ6と7のODタグ付け効率	67

# 表目次

3.1	スプリッター使用の背景	19
3.2	レーザーダイオードを用いた波形比較のセットアップ詳細	20
3.3	スプリッターの有無とオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さ	28
3.4	スプリッターごとのオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さ	29
3.5	ダンピング抵抗の有無とオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さ	32
3.6	光電子数、半値全幅、オーバーシュートの高さの平均値	44
4.1	PMT 数を変化させたセットアップ 1-3 のジオメトリ	46
4.2	フィッティングパラメータ ダークノイズあり	57
4.3	フィッティングパラメータ ダークノイズなし	57

要旨

ハイパーカミオカンデでは、ニュートリノビームを遠方から打ち込みニュートリノ振動を観 測する実験が行われる。高精度な測定を実現するため、ニュートリノビームを生成直後にと らえる中間水チェレンコフ検出器 (Intermediate Water Cherenkov Detector, IWCD) が計画されて いる。IWCD は内部と外部に検出領域が分かれており、本研究では外部検出器の検出器構成 や設計を評価した。

IWCD OD 内で使われる光電子増倍管の設計や検出器回路構成を研究し、出力波形に生じるオーバーシュートや測定の不感時間などを考察した。また、IWCD OD の PMT 配置やタンク水深を変更する検出器シミュレーションを行い、宇宙線ミューオンに対する検出効率やタグ付け効率を調べた。

本研究から、IWCD の OD で検討されている光電子増倍管の波形が含むオーバーシュート とリンギング、低周波な振動成分がわかった。ダンピング抵抗と波長変換を用いることで、実 際の測定環境下ではリンギングが十分低減できることがわかった。さらに、500 ns 程度のデ ッドタイムを設け、オーバーシュートや低周波な振動成分の影響を十分抑えられることがわ かり、現在考えられている設計に使用可能であると結論できる。

さらに、シミュレーション結果から、低エネルギー領域の宇宙線ミューオンを OD がとら えられることがわかった。OD PMT の数や OD タンクの水深がタグ付け効率に影響しており、 PMT 数が増加するとタグ付け効率が向上し、水深が深くなるとタグ付け効率が悪化すること がわかった。ミューオンタグ付け効率は 98 % 程度であった。

今後は、シミュレーションの統計数を増やし、より詳細なタグ付け手法を開発し、タグ付けされないイベントの詳細を調べ、光電子増倍管の配置やタンク構成を工夫することで、よりタグ付け性能の高い IWCD OD の設計が可能と考えられる。

## 第1章 背景

### 1.1 ニュートリノ

素粒子とは、物質を構成する最小単位であり、以下の図1.1の標準模型に含まれるような粒子 が知られている。これらのうち、物質を構成する粒子としてレプトンとクォークと呼ばれる2 種類の物質粒子がそれぞれ6つずつ存在する。また、相互作用を媒介し、物質粒子を結びつ ける粒子として4種類のゲージ粒子が知られており、電磁相互作用をフォトンが、強い相互 作用をグルーオンが、弱い相互作用をWボソンとZボソンが媒介している。クォークはこれ ら3つの相互作用すべてが働くのに対し、レプトンは弱い相互作用と電磁相互作用のみが働 くことがで知られている。



Figure 1.1: 標準模型 [15]

ニュートリノとは、6 つあるレプトンのうち電荷をもたない 3 種類の粒子 (ν<sub>e</sub>、ν<sub>µ</sub>、ν<sub>τ</sub>)の ことである。レプトンであるがゆえに強い相互作用が働かず、また、電荷をもたないために 電磁相互作用も働かない。そのため、ほとんどほかの物質との相互作用をせず、観測が難し いことで知られる。一方、ごくまれに弱い相互作用によって荷電粒子を放出するため、その 現象を利用してニュートリノの観測を行うべく、水チェレンコフ検出器が使用される。

上記の標準模型の範囲内ではニュートリノは質量をもたないと考えられていた。1998年

に梶田隆章らがスーパーカミオカンデにおいて ν<sub>μ</sub> が ν<sub>τ</sub> に変化するニュートリノ振動を観測 し、ニュートリノが質量をもつことが証明された。このニュートリノの質量については、いま だ不明な点が多く、ニュートリノの質量階層性の解明はハイパーカミオカンデ実験の大きな 目的の一つとなっている。また、標準模型では崩壊しないと考えられている陽子の崩壊をも し観測することができれば、標準模型を超える新たな物理 (大統一理論)が観測されたことに なる。そのほか、スーパーカミオカンデでのニュートリノ観測から、95 % の信頼度で CP 対 称性の破れが示唆された。そのため、ハイパーカミオカンデでは、これらの現象についてよ り詳細に解明するための測定が行われる予定である。スーパーカミオカンデの約 10 倍の有効 検出体積、約 2 倍の感度を持つ光電子増倍管をより多く使用することなどによって、ニュー トリノイベントに対するより高精度な測定が行われることが期待されている。

## 1.2 チェレンコフ光

チェレンコフ光とは、荷電粒子が媒質中を光速より早く移動する際に光を放出する現象であ る。チェレンコフ光は、図1.2aのように荷電粒子の進行方向に対して円錐形に放出されること で知られる。図1.2bは図の上側から粒子が入射した際のチェレンコフ放射の様子を表してい る。



(a) チェレンコフ光のイメージ図 [12]



(b) チェレンコフ光の模式図 [5]



光が媒質中を移動するとき、媒質の屈折率 n と光速 c を用いると、媒質中での光速が  $\frac{c}{n}$  で あらわされる。一方、媒質に突入する光の速度 v が以下の式 (1.1) を満たすとき、その光は媒 質中の光速以上の速度で移動しているといえる。

$$v > \frac{c}{n} \tag{1.1}$$

このとき、粒子の速度と光速の比 $\beta = \frac{v}{c}$ を用いると、チェレンコフ光のなす角は

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \tag{1.2}$$

で表せる。

波長  $\lambda_1$  から  $\lambda_2$  の範囲の中で生成されるチェレンコフ光の光子数 N は、以下の式1.3で計算される。[5]

$$N = \alpha \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) L \tag{1.3}$$

ここで、αは微細構造定数、Lは光が伝播した距離を表す。これを波長λで微分すると、

$$\frac{dN}{d\lambda} \propto \frac{1}{\lambda^2} \tag{1.4}$$

となることから、生成される粒子数とチェレンコフ光の波長は連続スペクトルとなっている こと、短波長のほうがより多く生じることがわかる。実際の水中のチェレンコフ光のスペク トルは以下の図1.3に示される。この図においては、チェレンコフ光のスペクトルに水の透過 長がか合わさっている。



Figure 1.3: チェレンコフ光の発光スペクトル [1]

そのため、水チェレンコフ検出器では短波長側により高感度である必要がある。

## 1.3 ニュートリノ検出実験

先ほども述べたように、ニュートリノはまれに弱い相互作用によって荷電粒子を生じる。水 チェレンコフ光器は、生じた荷電粒子が水中で光速以上のスピードで運動する際のチェレン コフ光をとらえる。この手法はニュートリノ観測実験に用いられる。

スーパーカミオカンデやハイパーカミオカンデ、IWCD 等では、媒質として純水を使用している。ニュートリノが水分子や水中の電子と衝突した際に生じる弱い相互作用から、荷電 粒子が放出され、それがチェレンコフ光を生じることによってニュートリノを観測する。そのため、水チェレンコフ検出器では、生じたチェレンコフ光をとらえるための光センサが使 用されており、主に光電子増倍管によって光を検出している。



Figure 1.4: ハイパーカミオカンデ [11]

日本国内で現在観測を行っている水チェレンコフ検出器として、スーパーカミオカンデが知られている。その後継として建設されているのがハイパーカミオカンデである。岐阜県飛騨市地下 600 m に建設されており、直径 68 m、高さ 71 m のタンクに 26 万トンの純水を満たし、スーパーカミオカンデの約 10 倍の有効体積を持つ。図1.4はハイパーカミオカンデのタンク模式図である。[11]

使用される PMT として、内水槽では 50 cm 径 PMT のほか、19 本の 8 cm PMT から構成さ れるマルチ PMT が、外水槽では単独の 8 cm PMT が使用される予定である。50 cm 径 PMT は スーパーカミオカンデの 2 倍の感度を持っている。水槽の大きさ、高感度の PMT を用いて、 スーパーカミオカンデより大きな統計量でのニュートリノ観測を行おうとしている。また、 径の小さい 8 cmPMT を高密度に設置することで、より精密な観測も可能になると期待されて いる。

ハイパーカミオカンデでの観測を通して、ニュートリノ振動の測定やニュートリノの質量 階層性の解明、陽子崩壊の測定、レプトン CP 対称性のより詳細な測定などが行われることが 期待されている。

1.3.2 T2K 実験



Figure 1.5: T2K 実験概略図 [8]



Figure 1.6: ニュートリノビームのエネルギーの角度依存性 [4]

T2K 実験は、茨城県東海村にある J-PARC からスーパーカミオカンデに向けてニュートリノビ ームを射出し、ニュートリノ振動の探索を行う実験である。図1.5に T2K の概要図を示す。ニ ュートリノ振動はニュートリノが短い距離を移動するだけでは観測できないため、T2K のよ うにニュートリノビームを用いてニュートリノを長距離移動させ、ニュートリノ振動を起こ させる必要がある。これまでに、生成されたミューニュートリノから電子ニュートリノやタ ウニュートリノへのニュートリノ振動が観測されており、ニュートリノ振動が観測されるこ とによってニュートリノの混合角と質量固有状態間の質量差の解明が期待される。また、ニ ュートリノと反ニュートリノの振動確率の違いから CP 対称性の破れを証明することも可能 であると考えられている。将来的には、スーパーカミオカンデの後継としてハイパーカミオ カンデにニュートリノビームを入射し、観測を行う予定である。

ニュートリノビームの生成源として、J-PARC 内の陽子加速器が用いられる。加速された 陽子をグラファイト標的に衝突させ、それによって生成された π 中間子がニュートリノに崩 壊することでビームとしている。陽子ビームの方向を on axis としたとき、スーパーカミオカ ンデはその位置から約 2.5° ずれた off axis に位置している。これは、ニュートリノ振動を起こ しいやすいエネルギー帯が限られているため、ビーム内でのニュートリノ振動発生確率を上 げ、より高い感度でニュートリノ振動を観測するためである。

on axis 方向のニュートリノは幅広いエネルギースペクトルを含むが、off axis 方向ではエ ネルギーのピークを調整し、幅を狭くすることができる。パイ中間子の進行方向とニュート リノの進行方向のなす角を $\theta$ とおくと、パイ中間子のエネルギー  $E_{\pi}$  とニュートリノのエネル ギー  $E_{\nu}$  は式1.5で表される。

$$E_{\nu} = \frac{0.43E_{\pi}}{1 + \gamma^2 \theta^2} \tag{1.5}$$

 $\gamma$ はパイ中間子の質量の指標であり、 $\gamma = \frac{E_{\pi}}{m_{\pi}}$ である。[4] パイ中間子のエネルギーとニュート リノのエネルギーを  $\theta$  ごとに図示すると、図1.6のようになる。つまり、off axis 角が大きくな るほどニュートリノのエネルギーの範囲が狭くなるといえる。off axis 領域のビームを利用す ることで、ニュートリノのエネルギーを狭い範囲に絞るとともに、ノイズの低減を行ってい る。T2K では off axis 2.5 度を選ぶことで、600 MeV 程度のエネルギーのニュートリノビーム が利用され、ニュートリノ振動の確率が最も高いエネルギーに調整されている。[8]



Figure 1.8: 光電子増倍管の原理

#### 1.3.3 IWCD

IWCD 実験は、J-PARC からのニュートリノビーム下流 1 km 付近の地点で行われる事前観測 で、図1.7aのような縦 13.4 m、直径 9 m のタンクが、図1.7bのように T2K の off axis 1 度から 4 度の間を上下に移動しながら測定を行う水チェレンコフ検出器である。



Figure 1.7: IWCD 実験

IWCD では、off axis 角 1 度から 4 度の間をタンクが上下する。先ほども述べたように、パ イ中間子の進行方向とニュートリノの進行方向のなす角 θ ごとに、ピークとなるニュートリ ノのエネルギーが異なるため、異なる off axis での測定は、様々なエネルギーのニュートリノ 測定に対応する。この測定を通し、各エネルギー帯域で水中のニュートリノ断面積を測定し、 系統誤差を抑えることが IWCD 実験の目的となっている。

## 1.4 光電子増倍管の原理

水チェレンコフ光を測定するため、小さな光を増幅して検出する光電子増倍管 (photomultiplier tube, PMT) が用いられる。その構造を以下の図1.8に示す。[14] 光子が図の左側から PMT に入 射し、入射した光子によって光電面の電子が放出され、光電子となる。集束電圧によって収



Figure 1.9: D型ソケットアッセンブリ [14]

集された光電子が第一ダイノードに衝突し2次電子を放出し、それがさらに次のダイノード に衝突して増幅されることを繰り返し、増幅された電子が陽極から電流として検知される。1 つの光電子が電子に増幅される割合をゲインという。

PMT では、高圧電源を用いて高電圧を供給し、電圧分圧回路によって各ダイノードに供給される電圧を分配する。ゲインの安定性を維持するためには、供給電圧が安定していることも重要である。

一般的な電圧分圧回路として、以下の図1.9のような高電圧入力と信号出力が2つの経路に 分かれる電圧分圧回路が挙げられる。一方、ハイパーカミオカンデの外部検出器で用いられ る8 cm PMT では、高電圧入力と信号出力を1つの経路にまとめたブリーダー回路を用い、ス プリッターで高電圧入力と信号出力を分ける。その際、スプリッターに含まれるコンデンサ やスプリッターのインピーダンスが PMT の出力波形に影響を及ぼす。現状 IWCD の外部検出 器はハイパーカミオカンデの外部検出器を参考にした設計が行われているが、実際にこの設 計を採用するかどうかは未定であり、コストや検出性能が十分であるかを調べる必要がある。

#### オーバーシュートとリンギング

光電子増倍管から出力される電流はオシロスコープなどでアナログ信号として測定すること ができる。この出力信号がピークになったのち、逆極性に大きく振れてから収束する波形特 性のことをオーバーシュートと呼ぶ。また、信号が収束した状態でも高周波な振動を含んで いる状態のことをリンギングと呼ぶ。

8 cm 径の PMT をスプリッターを通して使用するとき、PMT の波形がマイナス方向にピークを迎える。その際、コンデンサを介し電荷を引き戻す際に、波形はマイナス方向にピークを作った後、一度プラス方向に振れ、その後徐々に収束していく。このため、コンデンサを含むスプリッターを使用すると、波形にオーバーシュートが含まれる特性が現れることになる。スプリッターに電気抵抗とコンデンサが含まれるため、RC 振動によって波形に細かなリンギングが発生する。

オーバーシュートが生じている場合、オーバーシュートが収束するまでの間に次の波形を 取得してしまうと測定精度が低下するため、一度イベントを取得してからのデッドタイムを 十分に確保する必要がある。これにより、不感時間が増加する可能性がある。さらに、リン ギングが生じている場合、マイナス方向にピークを持つ波形がプラス方向にも振動するため、 波形取得のウィンドウサイズに対してプラス方向にも一定のレンジを持っている必要が出て くる。それにより、マイナス方向へのレンジが相対的に減少し、よりピークの高いイベント に対して波形のサチュレーションが起こりやすくなり、ダイナミックレンジが小さくなって しまう。

## 第2章 中間水チェレンコフ検出器の外層光検出 機構

IWCD で検出されるイベントは、大きく分けて以下の4種類に分けられる。



(c) Cosmic muon with decay

(d) Cosmic muon

Figure 2.1: IWCD で検出されるイベントの模式図

内水槽では主にチェレンコフ光による円錐形の光をとらえており、外水槽では図2.1bのような Partially Contained なイベントのタグ付けと、図2.1c、2.1dのような、外部からのノイズに よるイベントのタグ付けを行っている。Partially Contained なイベントは、ニュートリノのイ ベントであるチェレンコフ光の放出が内水槽では終わらず、タンク外でもチェレンコフ光が 放出されいる場合に生じる。また、図2.1c、2.1dのようなイベントは、宇宙線ミューオンなど、 タンク外から入射してくる荷電粒子や放射線によって生じる。このイベントについてはニュ ートリノイベントに対するノイズになるため、外水槽の検出器を用いてタグ付けされている 必要がある。



(a) ハイパーカミオカンデ外部検出器の概要 [3]



(b) スーパーカミオカンデの外部検出器 [12]

Figure 2.2: 外部検出器の概要図

## **2.1 IWCD OD**

ハイパーカミオカンデにおける外部検出器 (Outer Detector, OD) は、以下の図2.2のような構造 をしている。図2.2aのように、内部検出器では 50 cm 径 PMT がタンク内側に向け取り付けら れている。一方、外部検出器では、PMT がタンク外側に向けて取り付けられる。タンク外側に 向けて設置された PMT によって、タンク外から入射する荷電粒子によるチェレンコフ光やタ ンク外に出る荷電粒子によるチェレンコフ光をとらえている。内部検出器と外部検出器の間 には、PMT の大きさによるデッドスペースが存在するほか、ブラックシートが配置されてお り、内部検出器内、外部検出器内で生じたチェレンコフ光がそれぞれ検出器外に漏れない設計 となっている。さらに外部検出器では、図2.2bのように壁面が Tyvek シートで覆われており、 PMT に入射する光量を増す。同時に、PMT に直接入射しなかった光子をとらえるために、波 長変換板を使用する。波長変換板の中心位置に PMT の光電面の大きさに合うように穴があけ られており、波長変換板を通して放出された光子がそのまま PMT に入るようになっている。

IWCD では、ID に対して 8 cm PMT を 19 本まとめたマルチ PMT を、OD に対して単体の 8 cm PMT を使用する予定であり、現状、ハイパーカミオカンデのものと同様の OD 構成が検討 されている。IWCD では、宇宙線ミューオンのほか、ニュートリノビームが周辺の岩盤と相互 作用した結果生じるミューオンなどがタンク外から入射するノイズとなる。そのため、IWCD OD はこれらのミューオンによるチェレンコフ光を識別できなければならない。

#### 2.1.1 宇宙線ミューオン

宇宙線ミューオンは、銀河や太陽などの天体を由来に生じる宇宙線 (特に陽子) が地球の大気 に衝突することで生じるミューオンのことである。ミューオンの寿命は比較的長いため、生 じたミューオンはほとんど崩壊せずに地表面に到達する。以下の図2.3は地表面に到達する宇 宙線ミューオンのエネルギースペクトルを示す。



Figure 2.3: 地表面でのミューオンフラックス

地表面に到達したミューオンは、岩盤に当たり徐々にエネルギーを失っていくため、地下 で行われるスーパーカミオカンデやハイパーカミオカンデでは、地下に到達できるほどの高 エネルギーなミューオンのみが宇宙線ミューオンとして検出される。一方、IWCD は地表近 くでも測定が行われるため、より低エネルギーな宇宙線ミューオンが入射してくることが予 想される。また、ミューオンは電子と電子ニュートリノに崩壊し、生じた電子が電子シャワ ーを生じることで IWCD タンク内で多数の荷電粒子を生じさせる可能性がある。

#### 2.1.2 波長変換板

先ほども述べたように、直接的に PMT に入射しなかった光子をとらえるために波長変換板を 使用する。波長変換板は特定の波長の光を吸収し、波長を長くして放出する性質を持ってお り、この性質を用いて PMT に直接入射しなかったチェレンコフ光を PMT の有感波長帯に変 換して収集している。

スーパーカミオカンデでは、アクリル板に 50 % の bis-MSB の波長変換板が含まれている。 図2.4は bis-MSB の吸収、蛍光曲線を、図2.5はスーパーカミオカンデの PMT の波長ごとの量 子効率を示す。



Figure 2.4: スーパーカミオカンデの波長変換板の吸収、発光特性 [1]



Figure 1: Typical spectral response

Figure 2.6: 8 cm PMT の量子効率 [13]



Figure 2.5: スーパーカミオカンデの波長変換板の量子効率 [1]

図からわかるように、Bis-MSB の吸収波長は水チェレンコフ光の波長と十分一致するとい える。さらに、量子効率は光電面の材質に依存しており、Bis-MSB が放出する波長はスーパ ーカミオカンデで使用される PMT の光電面の材質であるバイアルカリに対して親和性が高い といえる。そのため、スーパーカミオカンデでは bis-MSB の波長変換板が使用されている。

一方、ハイパーカミオカンデでは、図2.6に示された 8 cm PMT の量子効率と九州特性がよ く一致することから、ポリスチレン樹脂に Kuraray の B2 波長変換が含まれている波長変換板 の使用を検討している。この KurarayB2 の波長変換の吸収、蛍光曲線を以下の図2.7に示す。



Figure 2.7: ハイパーカミオカンデの波長変換板の吸収、発光特性 [7]

波長変換板は直接 PMT に入射しなかった光を捉えるために使用されるが、波長変換板が 光りの波長を変換して発光するまでの時定数があるため、直接 PMT に入射する光と波長変換 板を経由して PMT に入射する光では、PMT の出力波形に違いが生じる可能性がある。さら に、波長変換板の空間的な広がりから、波長変換板への入射位置によって光子が PMT に到達 するタイミングにばらつきが生じる。

#### 2.1.3 反射シート

スーパーカミオカンデやハイパーカミオカンデ、IWCDの外水槽ではチェレンコフ光を反射 し PMT に入射させることで検出効率を向上するため、反射シートとして Tyvek シートが使 用される。Tyvek シートは、Tyvek と呼ばれる高密度ポリエチレン製の不織布のことである。 1955 年にアメリカのデュポン社で開発された。透湿・防水性能が高く、耐久性も高い。

## 第3章 中間水チェレンコフ検出器の外層光検出 機構の光電子増倍管波形特性

## 3.1 目的

ハイパーカミオカンデの外部検出器では、8 cm PMT の電圧分圧回路に加え、スプリッターを 用いて高電圧供給と信号出力を1本のケーブルで行うことを想定している。これは、ハイパー カミオカンデのタンクサイズの大きさからケーブル長が長くなることが想定されるため、高 電圧入力と信号出力を1本にまとめることがコスト削減につながるためである。一方、IWCD OD においては、タンクサイズが小さいため、高電圧入力と信号出力をまとめるメリットが ない可能性があり、さらにスプリッター使用によるデータ検出性能が不明である。以下の 表3.1にハイパーカミオカンデと IWCD におけるスプリッター使用の背景についてまとめた。

	ハイパーカミオカンデ	IWCD
ケーブルの仕様	水中エレキに通すため、細いケー	細いケーブルを使用する必要がな
	ブルを使用	<u>ل</u> ار
ケーブルの種類	共通の同軸ケーブルを使用	共通ケーブルを使う必要がなく、柔
		軟な選択が可能
スプリッターの必要性	コスト削減のためスプリッターを	スプリッターと短いケーブルを多
	使用	用する必要があり、スプリッター
		のコストがコードを2線にするコ
		ストより高くなる可能性もあるた
		めスプリッターを使わない選択肢
		もある
性能の懸念	ケーブルが長くなることで信号減	T2K から飛来するニュートリノビ
	衰やノイズの影響があるかもしれ	ームは1スピル内に8バンチから
	ない	なり、各バンチは 598 ns 間隔で到
		来する。[16] スプリッター使用で生
		じる波形の変化によっては OD で
		バンチの識別ができなくなる可能
		性がある。

Table 3.1: スプリッター使用の背景

本研究では、スプリッターを使用する際の特に PMT 波形への影響を調べ、波形特性を確認するとともに IWCD における測定への影響について考察した。

## 3.2 スプリッターの有無による波形変化測定

まず、スプリッターを用いた 8 cm PMT とスプリッターを用いない 2 線式の PMT の間で波形 に差があるのかを確認する測定を行った。

#### 3.2.1 スプリッターの有無による波形変化測定のセットアップ

以下の表3.2に、波形の比較の際に使用したセットアップの詳細を示す。

	ソケット	スプリッター	コード長
セットアップ1	2 線式	なし	3 m
セットアップ 2	1 線式	HK OD で検討	5 m
セットアップ3	2 線式	HK OD で検討	20 m
セットアップ4	3 線式	浜松ホトニクス社が使用	20 m

Table 3.2: レーザーダイオードを用いた波形比較のセットアップ詳細

スプリッターの有無が波形に与える影響を見るため、2線式ソケットを用いて測定した波 形と1線式ソケットを用いて測定した波形を比較した。さらに、2種類のスプリッターそれぞ れの波形の違いを確認するため、スプリッターを変えて波形を測定した。

まず、2線式のソケットを用いた場合と1線式の場合の波形を比較した。セットアップ1 とセットアップ2の出力波形の比較を行い、スプリッターを挿入することによる波形への影 響を確認した。さらに、実際のIWCD OD ではコード長が20mになることが想定されている ため、コード長を5mから20mに延長したセットアップであるセットアップ3で測定を行い、 コード長と波形の関係を確認した。また、2種類のスプリッターを用いて測定を行い、スプリ ッターの時定数が及ぼす波形への影響を確認した。異なるスプリッターに20mのBNCケー ブルが接続されているセットアップ3と4に1光電子を入射し、同一光量における波形を比 較するとともに、スプリッターの種類によるゲインに変化があるかどうかを比較した。さら に、レーザーダイオードから大光量を入射し波高をそろえて比較することで、スプリッター ごとの波形特性を調べた。実際に作成したセットアップのダイアグラムを図3.1a、3.1b、3.1c、 3.1dに示す。



Figure 3.1: レーザーダイオードを用いた 2 線式ソケットと 1 線式ソケットの波形比較のセットアップ

8 cm PMT を暗箱の中に入れ、レーザーダイオードを 8 cm PMT 表面に固定し PMT に光を 入射した。暗箱には穴をあけておき、レーザーダイオードと PMT のコードが穴から出るよう にした。なお、ノイズ防止のため暗箱内部にアルミ箔を貼り、遮光のため暗箱の上からシート をかけた。8 cm PMT を暗箱の中に入れ、レーザーダイオードを 8 cm PMT 表面に固定し PMT に光を入射した。2 線式と 1 線式のソケットをそれぞれ一つずつ暗箱に入れておき、ソケット の差し替えによって測定条件を変えられるようにした。また、スプリッターを 2 種類、コー ド長も 2 種類を使用しており、それぞれのセットアップをソケットの差し替えによって切り 替えられるようにした。実際のセットアップの写真を以下の図3.2に示す。



Figure 3.2: ソケットと PMT、レーザーの配置図

出力された波形をオシロスコープに入れ、プログラムを用いて波形を記録し、1000 個の波 形の平均を測定波形として比較を行った。

#### 8 cm PMT

今回、8 cm PMT として浜松ホトニクス製の R14374 を使用した。高電圧電源を用い、波形測 定の対象に合わせて 930-1250 V の電圧を印加した。

2線式の測定の際には、この PMT に図3.5aのようなソケットを差し測定を行った。一方、1 線式の測定の際にはソケットに図3.3bの基板を取り付けソケットを作成し(図3.5b)、そのソケ ットを用いて測定を行った。これらの電圧分圧回路の回路図を以下の図3.4に示す。 •R14374



(a) 8 cm PMT の概略図 [13]



(b)1線式のソケットの電圧分圧回路





Figure 3.4: 1 線式 (a) と 2 線式 (b) の電圧分圧回路の回路図



(a) 2 線式ソケット



(b)1線式ソケット

Figure 3.5: 使用したソケット

スプリッター

1線式ソケットを使った測定においては、PMT に入力される高電圧電源からの高電圧と、PMT からの出力である信号が1本の同軸ケーブルで共有、スプリッターで、直流成分と交流成分 が高電圧と信号に分けられる。

今回、2種類のスプリッターを使用した。スプリッター1はハイパーカミオカンデでの使 用が検討されているスプリッターであり、スプリッター2は浜松ホトニクス社が測定に使用 していたスプリッターである。スプリッター1では、先行研究から波形にオーバーシュート とリンギングが生じることがわかっている。そのため、これら2種類のスプリッターの波形 を比較し、スプリッターの構造が波形に与える影響を検討した。

本研究では、スプリッター1では100 kΩの抵抗と4.7 nFのコンデンサ、スプリッター2で は10 kΩの抵抗と4.7 nFのコンデンサをそれぞれ使用した。コンデンサについては、高圧電源 による高電圧がかかるため、耐電圧が3 kVのものを使用した。高電圧電源から供給される高 電圧は電気抵抗によって制御され、100 kΩないしは10 kΩの抵抗によって PMT 信号と高電圧 が混ざるのを防いでいる。信号のアウトプットは通常パルス波のような形状をしており、高 周波成分のみを通すコンデンサによって分離される。PMT からの出力信号は高電圧と比較し 非常に微弱であるため、PMT 信号を適切に取得するためにスプリッターの検討が必要となる。

2 種類のスプリッターの回路図を以下の図3.6a、3.6bに、実際に使用したスプリッターを以下の図3.7a、3.7bに示す。



(a) スプリッター1回路図



(b) スプリッター 2 回路図

Figure 3.6: スプリッター1と2の回路図



(a) 作成したスプリッター1



(b) 作成したスプリッター2

Figure 3.7: 作成したスプリッターの写真

スプリッターの高電圧入力はそのまま高圧電源に接続されており、信号線はオシロスコー プにつなげることで波形を測定した。

#### レーザーダイオード

PMT への光源として、図3.8のような珠電子株式会社製 LDB-100 ピコ秒 LD ドライブを使用した。本測定で使用したボードの型番は 22 であった。



Figure 3.8: レーザーダイオード

USB ケーブルを経由してパソコンから制御されており、電流値を変えることで光量を制御 し、パルス幅も変えることができる。本研究では、5000 kHz のパルスを様々な光量で入射し た。なお、実際に IWCD OD で測定されるチェレンコフ光のパルス幅より十分短い 50 ps を採 用した。なお、このレーザーダイオードからは波長 405 nm のレーザー光線が供給される。大 光量を与えて測定する際には、電流値を 200 mA と固定して測定した。

#### オシロスコープ

Teledyne LeCroy 社製多機能オシロスコープである WaveSurfer3024z を使用した。4 チャンネル を持ち、PMT の出力波形を記録することができる。このオシロスコープで得られた出力波形 をパソコンを用いて記録し、平均波形を取得した。なお、サンプリング数は 2GS/s である。



Figure 3.9: オシロスコープで測定された1線式ソケットの波形

#### 3.2.2 スプリッターの有無による波形変化測定の測定方法

図3.1のセットアップを用い、ソケットやコード長、スプリッターの種類を変更しながら波形 を測定した。

1 光電子を入射する測定においては PMT にゲインが 10<sup>6</sup> 程度になる 930 V を印加し、それ ぞれのセットアップにおけるゲインを測定した。また、大光量を入射する測定においても印 加電圧は 930 V とし、ゲインは 1 光電子の測定と同じ状態のまま、波形の関係を見た。

#### 波形の解析方法

図3.9は、1線式ソケットを用いて測定した際の実際のオシロスコープの画面である。本測定 では、オシロスコープの横軸を 500 ns/div として波形を取得した。縦軸については、入射光 量により異なる。この出力波形で最も低くなる点を波形のピークとした。このような波形を 各セットアップにつき 1000 イベントずつ取得し、その波形を解析アプリケーションである ROOT で解析が行える形に保存した。ROOT は CERN によって開発されたデータ解析プログ ラムであり、特に高エネルギー物理学分野でよく使用される。[2] 取得された 1000 イベント の波形の平均波形を各セットアップにおける波形であるとし、取得された波形を比較した。

波形の比較の際には、時間情報として、ピーク時刻がすべての波形において 0 s になるよう調整した。また、電圧については、波形が立ち下がる前の波形が平たんである部分の電圧の平均値をとり、その部分が 0 V となるよう調整した。

まず、1 光電子を入射した際の波形を比較し、同光量においてセットアップごとに波形に どのような変化があるかを確認した。1 光電子を入射した波形では、波形の積分値が電圧と等 しくなる。波形の積分値を V とおくと、オシロスコープの終端抵抗 50 Ω を用いればそのセッ トアップに流れた電流値 I を算出することができる。ゲインは 1 光電子をどれだけ増幅する かを示すため、この電流値を素電化で割った値がゲインと等しいといえる。式 (3.1) は積分値 V とゲインの関係を示す。

$$Gain = \frac{V}{50[\Omega]} \times \frac{1}{-1.602 \times 10^{-19}}$$
(3.1)

波形の始まりの時刻を積分の開始時刻とし、積分時刻の上限を大きくしていくことで積分区 間を変えながら、対応するゲインの値を導出した。この計算から、各セットアップでどのよ うにゲインが変化するか、積分幅とゲインの関係を確認した。

また、大光量を入射した波形の比較においては、波形全体の比較のため、波高を-1 にそろ えて規格化し比較した。

### 3.2.3 スプリッターの有無による波形変化測定の測定結果

#### スプリッターの有無と波形への影響

2線式ソケットを用いたセットアップであるセットアップ1と、スプリッター1を用いたセッ トアップであるセットアップ2と3の波形を比較し、スプリッターの有無が波形に及ぼす影 響を見た。また、セットアップ2と3の間ではコード長が5mから20mに延長されており、 コード長による波形の変化を見た。

1光電子を入射した際のセットアップ1と2と3の測定結果の比較を以下の図3.10に示す。



(a) セットアップ 1、2、3 に 1 光電子を入射し た際の平均波形の全形



(b) セットアップ1、2、3に1 光電子を入射し た際の平均波形の波高

#### Figure 3.10: セットアップ1、2、3 に1 光電子を入射した際の平均波形の比較

セットアップ1と2の波高の高さを比較すると、セットアップ1の波高は –596 mV であ るのに対しセットアップ2の波高は –366 mV であり、同一光量が入射しているにもかかわら ず、スプリッターの影響から、2線式と比較すると波高が約 61.4% まで下がっていることがわ かる。これは、スプリッター自身に含まれるの終端抵抗 50 Ω の影響によるものと考えられる。

また、セットアップ2と比べ3のほうがさらに波高が低くなっており、実際にセットアップ3の波高は –172 V とセットアップ2の波高の約 47.0 % となっている。これは、BNC ケーブルが延長されたことによる波形の減衰が原因であると考えられる。

それぞれのセットアップに対して波形の開始時刻から波形の終了時刻まで、積分区間を広 げてゆきながらゲインを計算し、それぞれのセットアップにおけるゲインの計算値と積分区 間の関係を求めた。その結果を以下の図3.11に示す。



Figure 3.11: セットアップ1、2、3のゲインの比較

2線式のソケット使用時には一定時間後 (0.1 ns 程度) に積分値がほぼ一定になることが読 み取れるが、スプリッターを用いた場合だと、オーバーシュートなどの影響を受けゲインが 安定しないことが読み取れる。また、スプリッターの使用やコード長の延長の影響によって 波高が低くなることで、同じ PMT に同じ印加電圧を供給しているとしても、ゲインが大きく 異なっていることがわかる。

さらに、それぞれのセットアップにレーザーダイオードから大光量を入射し、その測定結 果を比較した。図3.12はその結果を示している。



Figure 3.12: セットアップ1、2、3 に大光量を入射した際の平均波形の比較

図3.12より、波形を相対的にみると、スプリッターを用いた1線式のセットアップでは、2 線式のセットアップでは生じていないオーバーシュートが出ていることがわかる。また、そ れとともにリンギングによる高周波な波形の振動と、低周波な振動が生じていることが読み 取れる。また、セットアップ2と3の波形の比較から、ケーブルが20mに延長されることに より、リンギングの幅が小さくなることがわかる。これは、BNCケーブルによる波形の鈍化 が要因の一つと推察される。一方、オーバーシュートの高さは大きくは変わらず、低周波成 分についてはセットアップ3のほうが振動が大きくなっていることがわかる。さらに、400 ns 程度で低周波な振動成分が収束してくることがわかる。

水チェレンコフ検出器では、PMT からの信号に対して閾値を定め、閾値を超えた信号のみ を取得する。その後、取得された信号をゲートに入れる。このゲートは、時間方向、振幅方 向それぞれのウィンドウとなっており、ゲート内に入った波形を積分し、電荷を算出してい る。積分により算出された電荷がヒットの電荷として記録される。そのため、マイナスにピ ークがあるにもかかわらず、オーバーシュートやリンギングがプラスに振れすぎてしまう場 合、ウィンドウのダイナミックレンジが小さくなる危険がある。また、一つのヒット取得後、 デッドタイムを挟み次の信号を取得することとなるが、オーバーシュートの収束が遅いとデ ッドタイムが延長され不感時間が長くなる。そのうえ、本測定で生じている低周波成分がデ ッドタイム後も生じている場合、低周波成分が閾値にかかり、ヒットとして扱われてしまう 危険性がある。そのため、波高と比較したオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さを見 ることで、それらがどの程度測定に影響を及ぼすかを確認した。

それぞれのスプリッターでのオーバーシュートの高さ、低周波成分の強さを比較するため、図3.13のように規格化された波高に対するオーバーシュートの高さ、低周波成分の低さを 取得した。



Figure 3.13: 波形比較のパラメータ

以下の表3.3に、波高とオーバーシュートの最高点、低周波成分が最低点をまとめた。

セットアップ	ピーク	オーバーシュート	低周波
セットアップ1	-1	0	0
セットアップ2	-1	0.109	-0.00731
セットアップ3	-1	0.0857	-0.0142

Table 3.3: スプリッターの有無とオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さ

2線式と1線式の違いとして、1線式ではゲインが約半分になり、BNC ケーブルを延長す るとさらにゲインが低くなることがわかる。さらに、オーバーシュート、リンギング、低周波 の振動成分の影響で、1線式ではゲインが安定しない。

2線式ソケットではオーバーシュートも低周波成分も生じないが、スプリッターを用いる とオーバーシュートと低周波成分が波形に生じる。さらに、セットアップ2ではコード長が5 mであったのに対し、セットアップ3では20mであり、このケーブル長の延長により、波形 が鈍化したことで、オーバーシュートは0.109から0.0857に、21.1%減少していることがわ かる。セットアップ3では波高に対して約10%分ダイナミックレンジを小さくする可能性が あった一方、ケーブル長延長によって8.6%程度に改善したといえる。

一方、低周波成分は-0.0073 から-0.0142 に 94 % 分増加している。波高に対して低周波 の高さが 0.73 % 程度から 14.2 % 程度に増加したことを意味している。IWCD OD における 波形取得の閾値が 1/3 光電子程度の波高であると仮定すると、ケーブル長が短い場合には、  $\frac{1}{3} \times \frac{1}{0.0073} = 45.6$ より 46 光電子以上の入射によって低周波成分が閾値にかかりヒットを生じ る可能性が出てくる。同様に考えると、ケーブル長を延長した場合には  $\frac{1}{3} \times \frac{1}{0.0142} = 23.5$ より 24 個以上の光電子が入射した際に偽陽性となる可能性がある。ケーブル長が長いとオーバー シュート高が低くなり、低周波の振動が大きくなることで、ダイナミックレンジは改善する ものの低周波成分が閾値にかかる可能性は上がることがわかる。

#### 2種類のスプリッターを用いた波形の比較

セットアップ4と3の比較から、異なるスプリッターを使用した際のスプリッターの時定数 が波形に及ぼす影響を確認した。まず、双方のセットアップに1光電子を入射し、先ほどと 同様に積分区間とゲインの関係を見た。その結果を以下の図3.14a、3.14bに示す。



Figure 3.14: セットアップ3と4に1光電子を入射した測定結果

どちらのセットアップについても、オーバーシュートとリンギングの影響でゲインが安定 していない。また、セットアップ4のほうがセットアップ3よりゲインが約2倍になってい ることがわかる。

さらに、それぞれのセットアップに大光量を入射し、波高をそろえて波形を比較した。その結果を図3.15に示す。



Figure 3.15: セットアップ3と4に大光量を入射した際の平均波形の比較

この図3.15から、スプリッターの種類とオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さとも に大きく変わらないことがわかる。また、スプリッターの種類にかかわらず、低周波な振動 成分は大体 500 ns 程度で収束していることがわかる。

先ほどと同様、ピークの高さとオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さを比較し、 表3.4にまとめた。

セットアップ	ピーク	オーバーシュート	低周波
セットアップ3	-1	0.101	-0.0114
セットアップ4	-1	0.0940	-0.0165

Table 3.4: スプリッターごとのオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さ

スプリッター1のほうが2と比べてゲインが約半分になっていることがわかった。また、

ハイパーカミオカンデで想定されているスプリッターのほうが 6.51 % オーバーシュート高が 高く、スプリッターを変更することでダイナミックレンジが改善していることがわかる。さ らに、低周波の高さはハイパーカミオカンデでの使用が検討されているスプリッターのほう が 31.1% 低く、浜松ホトニクス社で使用されたスプリッターの場合、20 光電子以上の入射に よって低周波成分が閾値にかかるようになることがわかる。

#### 3.2.4 スプリッターの有無による波形変化測定の考察

スプリッターを使用することによるデメリットの一つとして積分区間によってゲインが異な ってくることが挙げられる。スプリッターに含まれるコンデンサの影響で、電荷が0に収束 していくため、積分区間が長時間になるとゲインが0に収束してしまう。そのため、積分区間 はオーバーシュートによってゲインが低下する以前までとしなければならない。本測定から、 スプリッターを用いない場合は積分区間を長時間に設定しても 10<sup>6</sup> オーダーのゲインが維持 される一方、スプリッター2を用いる場合は積分区間を 100 ns 以下程度にしなければ 10<sup>6</sup> オ ーダーのゲインが得られないことがわかる。さらに、スプリッター1をコード長 20 m で使用 する場合には、スプリッターによる波高の減衰と BNC ケーブルによる波高の減衰により 10<sup>6</sup> オーダーのゲインまで届かない。PMT への印加電圧がゲインに比例するため、印加電圧を変 更によってゲインのオーダーを変えることができるが、電圧を上げることでコスト増加につ ながることから、スプリッターを用いた状態で効率よく十分なゲインを確保するためにはス プリッター2の採用が望ましいといえる。また、スプリッター2ではスプリッター1と比べ 相対的なオーバーシュート高が低く、ダイナミックレンジが比較的大きい。このこともスプ リッター2のメリットといえる。

一方、スプリッター2のデメリットとして、相対的な低周波成分の高さが挙げられる。低 周波成分の高さから、20光電子以上の入射で低周波成分が閾値電圧を超えてしまう可能性が ある。IWCD OD で一つの PMT にどの程度の光電子数が入射しうるか不明であるが、少なく ともデッドタイムを十分に取り、低周波成分が収束してから次の信号の取得に移る形を採用 することでこの問題は解決できる。

さらに、オーバーシュートが収束する以前に次のイベントを取得してしまうと、正確な波 形が取得できない。そのため、オーバーシュートと低周波成分が収束するまでの間をデッド タイムとする必要がある。2線式ソケットを用いる場合には長時間のデッドタイムは不要であ り、積分区間を確保できれば十分であるが、1線式の場合は、図3.14aの波形や図3.14bの積分 値が落ち着くまでの時間などからもわかるように、少なくともデッドタイムとして 400 から 500 ns 以上の区間を持っていることが望ましいといえるだろう。

## 3.3 ダンピング抵抗の挿入

スプリッターを用いることでオーバーシュートとリンギング、低周波な何らかの振動成分が 生じることがわかった。ここで、電圧分圧回路にダンピング抵抗を挿入して測定を行った。電 圧分圧回路に挿入されたダンピング抵抗により、PMTの出力波形に RC 時定数がかかること になるため、波形が鈍化することが期待される。それによって、オーバーシュート、リンギン グ、低周波成分にどのような影響が出るのかを確認した。

## 3.3.1 ダンピング抵抗挿入測定のセットアップ

作成された電圧分圧回路に、ダンピング抵抗を挿入する測定を行った。ダンピング抵抗を含む電圧分圧回路の回路図は以下の図3.16に示される。



Figure 3.16: ダンピング抵抗入り電圧分圧回路

本実験では、ダンピング抵抗として 100 Ω、150 Ω、300 Ω の抵抗を挿入し、それぞれ波形 を測定した。

## 3.3.2 ダンピング抵抗挿入測定の測定方法

浜松ホトニクス社によるスプリッター2を用いたセットアップであるセットアップ4に対し て 100 Ω、150 Ω、300 Ω の 3 種類のダンピング抵抗を挿入し、ダンピング抵抗による波形の鈍 化の様子を測定した。まず1光電子を入射してゲインを比較し、さらに大光量を入射して波 高をそろえることで波形を比較した。なお、この測定の際には、波形の鈍化の影響でノイズ の寄与が大きくなり、1光電子の波形の取得が難しくなったことから、印加電圧を 1250 V に あげ、ゲインを高くした状態で測定した。

### 3.3.3 ダンピング抵抗挿入測定の測定結果

ダンピング抵抗を挿入した電圧分圧回路をスプリッター2に取り付け、1光電子を入射してゲインを計算した。その結果を以下の図3.17a、3.17bに示す。



Figure 3.17: ダンピング抵抗の有無による PMT に1光電子を入射した際の比較

この図から、ダンピング抵抗の抵抗値が大きくなるほど波形が鈍化し、波高が下がってい くことがわかる。一方、波形が鈍化しているだけであるため、ゲインは大きくは変わってい ない。

同様のセットアップに大光量を入射し波形を比較した。その結果を以下の図3.18に示す。



Figure 3.18: ダンピング抵抗の有無と大光量を入射した際の平均波形の比較

この図から、抵抗値が大きくなるほど波高が下がると同時にリンギングが消えていくこと が読み取れる。さらに、波形の立ち上がりと立下りが緩やかになっていることがわかる。特 に、ピーク付近を拡大した図3.19aを見ると、立ち上がりと立下りが緩やかになることによる 半値全幅の広がりが確認できる。



(a) ダンピング抵抗の有無と平均波形の半値全 幅



(b) ダンピング抵抗の有無と平均波形のリンギ ング、オーバーシュートの様子

Figure 3.19: ダンピング抵抗の有無と大光量を入射した際の平均波形の比較 拡大図

また、オーバーシュートは波形の鈍化に関係なく消えないことも読み取れる。オーバーシ ュートの高さ、低周波成分の低さを計算した結果を以下の表3.5に示す。

抵抗值 Ω	ピーク	オーバーシュート	低周波
0	-1	0.112	-0.0214
100	-1	0.0954	-0.0270
150	-1	0.104	-0.0287
300	-1	0.122	-0.0362

Table 3.5: ダンピング抵抗の有無とオーバーシュートの高さ、低周波成分の高さ

ダンピング抵抗の挿入によって、RC 時定数がかかることで、波形の立ち上がりと立下り が緩やかになり、リンギングが低減されることがわかった。また、波形が鈍化した状態でも ゲインは大きく変わらないことがわかった。さらに、低周波成分の高さ、オーバーシュート の高さはダンピング抵抗値に寄らず 0.1 前後である。低周波成分はダンピング抵抗値を大きく するほど高くなっており、抵抗値 0 Ω に対して 300 Ω だと 69.1 % 高くなっている。それによ り、300 Ω のダンピング抵抗使用時には 10 個以上の光電子数が入射すると低周波成分が閾値 電圧にかかってしまう可能性がある。

#### 3.3.4 ダンピング抵抗挿入測定の考察

ダンピング抵抗を挿入した際に、リンギングは低減されたが低周波成分はなくならなかった。 この原因について考える。ダンピング抵抗の RC 時定数により、波形の半値全幅が広がった 影響で、細かなリンギング同士が打ち消しあった結果リンギングが低減されたと考えられる。 一方、低周波成分については打ち消しあわずに足し合わされ、ダンピング抵抗値が大きくな るほど増幅される結果となったと考えられる。ダンピング抵抗の挿入によってオーバーシュ ート高も変わらなかったことから、低周波な振動成分はオーバーシュートの一環であると推 察される。

ダンピング抵抗挿入により波形の半値全幅が広がるため、ゲインの低下時間が遅くなるこ とが想定されたが、図3.17bから読み取れるようにダンピング抵抗挿入とゲインの低下時間は 変わらず、積分区間としては 100 ns 程度が望ましいことがわかった。

ダンピング抵抗によって波高が鈍化されることにより、供給電圧を上げてゲインを高くし たとしても光量に対する分解能が低下することが予想される。さらに、ダンピング抵抗値を高 くしてもオーバーシュート高が大きく変わらないため、ダイナミックレンジの改善は見込め ない。そのうえ、ダンピング抵抗値が高くなるほど低周波成分の波高が上がっている。デッド タイムを 500 ns 程度まで確保することで測定に対する低周波成分の影響は十分低減できるが、 リンギングの低減と低周波成分の低減、同一の印加電圧に対する波高の分解能などのバラン スを考えると、100-150 Ω 程度のダンピング抵抗値のほうがより現実的であると考えられる。

## 3.4 波長変換板の時定数の波形への影響

ここでは、波長変換板の有無が波形に与える影響を調べた。ハイパーカミオカンデで使用される B2 の波長変換とスーパーカミオカンデで使用された波長変換のブロックに短波長の LED ライトを入射し、波長変換を入れない場合と入れた場合の波形を比較した。

#### 3.4.1 波長変換板の時定数の波形への影響測定のセットアップ

本測定のセットアップを図3.20に示す。



Figure 3.20: LED を用いた測定のセットアップ

本測定では、LED ライトをパルス回路に接続して LED パルサーを作成し、作成した1線

式の電圧分圧回路に 100 Ω のダンピング抵抗を付けたソケットを 8 cm PMT に取り付け、光電 面に LED ライトをつけ波形意を測定した。また、ダンピング抵抗を取り外して同様に波形を 取得した。さらに、光電面と LED ライトの間に B2 の波長変換、スーパーカミオカンデで使 用された波長変換を挿入し、波形を測定して比較した。

#### 波長変換

IWCD OD で想定されている、Kuraray B2 の波長変換と、スーパーカミオカンデで使用された 波長変換を使用した。OD における実際の水チェレンコフ光の測定と異なり、穴をあけた波長 変換ではなく 8 mm×8 mm×5 mm 角のブロックを使用して測定した。

#### LED ライト

レーザーダイオードのパルサーと同様の基板に LED ライトを接続し、LED パルサーを作成し た。使用した LED パルサーは図3.21に示される。それを用いて、110 ns の LED パルスを 3000 Hz で生成し、PMT に入射させた。PMT 波形がサチュレーションを起こさない程度の光量を 維持し、回路からの反射光が出力波形に与える影響を最小限にする必要があったため、110 ns のパルス幅を採用した。波長変換を用いない場合は基板に 6.7 mA の電流を与え、波長変換を 用いた場合は 6.8 mA の電流を与えた。LED 光が吸収され波長変換が発光する過程で光が散乱 する影響で、波長変換を用いる場合に多くの光量を入射する必要があった一方、同様の光量 を直接 PMT に入射すると波形がサチュレーションしてしまったためである。なお、使用した LED の波長は 385 nm である。Kuraray B2 の吸収発光曲線が図2.7に示されているように、385 nm は波長変換板に十分吸収されることからこの波長を採用した。



Figure 3.21: LED パルサー

#### 3.4.2 波長変換板の時定数の波形への影響測定の測定方法

図3.20のセットアップを用いて測定を行った。ダンピング抵抗を挿入したセットアップにおいては、8 cm PMT の中心に LED を密着させ、LED のパルスをトリガーに波形を 1000 回取得した。その後、スーパーカミオカンデで使用された波長変換のブロックを PMT と LED の間に挿入し、LED と波長変換、波長変換と PMT を密着させるように固定して 1000 個波形を取得した。なお、波長変換と LED が PMT の中心位置に固定されるよう調整した。その後、波長変換を Kuraray B2 に切り替え、同様の方法で 1000 回波形を取得した。その後、挿入したダン

ピング抵抗を取り外し、同様の方法で波形を取得した。この際、波形取得回数を1000回から 300回に減らした。

取得された波形の平均波形を用いて、波形同士を比較した。また、それぞれのセットアッ プについて取得された一つ一つの波形の FWHM を取得し、ヒストグラム化して FWHM を比 較した。さらに、波長変換の有無がリンギングに与える影響を見るため、取得されたそれぞ れの波形を高速フーリエ変換し、波形に含まれる周波数成分を調べ、その平均をとり、ヒス トグラムにして周波数を比較した。

## 3.4.3 波長変換板の時定数の波形への影響測定の測定結果

取得された平均波形を以下の図3.22に示す。




Figure 3.22: LED パルサーで測定された平均波形

波長変換を挿入することで、波形の半値全幅が広がっている傾向にあることが読み取れ る。さらに、オーバーシュートの高さは大きくは変わらないが、リンギングが減る傾向にあ るといえる。ここで、波長変換を挿入した場合の半値全幅がどの程度変化したかをみるため、 それぞれのセットアップに対してそれぞれの波形の半値全幅を計算し、ヒストグラム化して プロットした。その結果を図3.23に示す。



Figure 3.23: 波長変換の有無と半値全幅の関係

この結果からわかるように、波長変換の挿入によって半値全幅は広くなっている。また、 波長変換がない場合、ダンピング抵抗がない際の半値全幅は 6 ns 程度であるのに対し、ダン ピング抵抗が挿入されている場合には 7.5 ns 程度とダンピング抵抗の影響による半値全幅の 増加も読み取れる。一方、波長変換を用いる場合、ダンピング抵抗の有無によらず半値全幅 のピークが 11 ns 程度となっており、波長変換の有無が半値全幅に与える影響はダンピング抵 抗の有無よりも大きいことがわかる。

さらに、波長変換によるリンギングへの影響を見るために高速フーリエ変換し、周波数成 分を足し上げて取得された周波数成分を比較した。その結果を以下の図3.24に示す。



Figure 3.24: 波長変換の有無と信号に含まれる周波数の関係

この結果から、ダンピング抵抗がなく波長変換がない場合の 50-70 MHz 付近に多く周波数 下検出されていることがわかる。これがリンギングの影響と推察される。図3.22でも波長変換 が挿入されている場合のほうがリンギングが少なくなっているように見受けられたが、LED の光量のばらつきなどによって波形を平均した際にリンギングがかき消されたなどの理由で はなく、波長変換の有無そのものが原因でリンギングが減少していると考えられる。同様に、 ダンピング抵抗が挿入されている場合も、40-60 MHZ 付近に波長変換を用いない場合多くの 周波数が検出されており、これがリンギングの影響と考えられる。このことから、ダンピン グ抵抗を用いることでリンギングが低減されたことが読み取れる。一方、ダンピング抵抗が 挿入されていない場合、スーパーカミオカンデの波長変換を用いた場合が最も低周波の周波 数帯が検出されていたが、ダンピング抵抗を用いると Kuraray B2 のほうがより低周波な波長 帯が検出されていることがわかる。

また、取得された周波数の平均をとり比較した。その結果を以下の図3.25に示す。



Figure 3.25: 波長変換の有無と信号に含まれる周波数の平均値の関係

この結果から、波長変換を用いた場合のほうが周波数の平均が低くなっていることが読み 取れる。この平均周波数の減少は、高周波なリンギングの減少によるもの考えられる。また、 実際の周波数分布と異なり、ダンピング抵抗の有無によらず、スーパーカミオカンデの波長 変換のほうが Kuraray B2 の波長変換よりもより平均周波数が大きい。

## 3.4.4 波長変換板の時定数の波形への影響測定の考察

波長変換板の影響により、波形の半値全幅が広くなり、リンギングが減少する傾向にあるこ とがわかる。波長変換板は固有の崩壊時間を持っており、この時間に従い波長を変換して光 を発する。そのため、波長変換を用いることで、発光する際に時間遅延が生まれ、PMT に入 射する複数の光子のタイミングに若干のずれが生じる。その結果、複数の光子による波形が 短時間の間に重ね合わさり、半値全幅が広がると同時にリンギングが見えなくなったと考え られる。そのため、波長変換板を用いる IWCD OD の実際の測定では、細かなリンギングの影 響はほとんど出なくなると推察される。オーバーシュートの影響は減少しないため、デッド タイムの確保は必須であり、同時に PMT が大光量をとらえた際にはオーバーシュートがウィ ンドウからあふれてしまう可能性があり、それによって光電子数が正確に測定されない危険 が残る。

## 3.5 水チェレンコフ光の測定

ここまで、レーザーパルスを用いて測定してきたが、ここでは実際に水チェレンコフ光を測 定し波形を見た。

## 3.5.1 水チェレンコフ光測定のセットアップ

本測定でのセットアップを以下の図3.26に示す。



Figure 3.26: 水チェレンコフ光測定のセットアップ

浜松ホトニクス製の 8 cm PMT を実際の IWCD OD に使用する場合、細かなリンギングを ある程度防ぐと同時に感度を確保する必要があるため、電圧分圧回路に 100 Ω 程度のダンピ ング抵抗が挿入される可能性が高い。そのため、本実験においては 100 Ω のダンピング抵抗 を挿入した状態で測定した。

本測定では、水槽に水を張り、作成した1線式の電圧分圧回路に100 Ω のダンピング抵抗 を付けたソケットを8 cm PMT に取り付け、それを水槽上部から吊り下げることで水チェレン コフ光を測定した。光量を確保するため水槽の底に Tyvek シートを張っている。また、水槽 上部には図3.27aのようにプラスチックシンチレータが交差するように2本取り付けられてお り、図3.27bのようにこの交差する点の真下に8 cmPMT が吊り下げられている。それぞれのシ ンチレータに取り付けられた PMT の信号がディスクリミネーターに入っており、ディスクリ ミネータのアウトプット信号をコインシデンスユニットの or ゲートに入れ、2本の PMT どち らも、ないしはどちらか片方の信号が検知された場合に限りアウトプット信号が出力される ようにした。この信号をトリガーとし、8 cmPMT での水チェレンコフ光の測定を行った。



(a) セットアップ



(b) 8 cm PMT の吊り下げ

Figure 3.27: 実際の水チェレンコフ光測定の様子

8 cm PMT は、図3.28のように光電面が水面に完全に沈む位置に固定した。

## プラスチックシンチレータ

8 cm PMT での測定のトリガーとするため、プラスチックシンチレータを用いた。本測定では、 高さ 2 cm、幅 10 cm、長さ 1 m のプラスチックシンチレータを用い、水槽上で 2 本のシンチレ ータが交差するように設置した。プラスチックシンチレータでは、荷電粒子が通過した際に



(a) 模式図

(b) 取り付けの様子

Figure 3.28:8 cm PMT の取り付け位置

プラスチック内の電子が励起され、基底状態に戻る際に光を出すことで荷電粒子の通過を検知することができる。2枚のシンチレータ双方に信号が検出されたイベントを宇宙線ミューオンによるイベントであると定義し、浜松ホトニクス社製H3178-51の光電子増倍管に1500Vを供給し、シンチレータ発光による信号を取得した。

## ディスクリミネータ

それぞれのシンチレータのアウトプットは大体 400 mV 前後であった。このアウトプット波形 を二つに分岐し、一つをディスクリミネータ、もう一つをオシロスコープに入力した。分岐 された波形の波高は半分程度になるため、ディスクリミネータでの閾値電圧は 150 mV に設定 した。

## 水槽

1 m×1 m×70 cm の大きさの水槽を使用した。水漏れ防止のため、内側にビニール袋で作成した同じサイズのプールを入れて使用した。この底面の大きさに合うよう Tyvek シート 1m×1m の大きさになるよう切って貼り付けた。浮力で浮いてきてしまうため、ステンレス製のおもりに Tyvek シートを巻き付けたものを用いて水槽の底に沈めた。

## 波長変換板

実際の IWCD OD では OD PMT の横に波長変換板が取り付けられており、ダイレクトに OD PMT に入射した光でなくとも波長変換板を通して PMT で検知できるようになっている。本 測定では、HK OD に使用される予定の波長変換板と SK OD で使用されていた波長変換板を 使用し、波長変換板がない場合、それぞれの波長変換板を使用した場合の 3 種類の測定を行った。波長変換板を使用した場合のセットアップは以下の図3.29に示される。



(a) 模式図

(b) 取り付けの様子





Figure 3.29: 波長変換を用いる場合のセットアップ

波長変換板を用いる場合は、図3.30のように波長変換板の穴に PMT をはめ込み、波長変換 板の上面が 8 cmPMT の光電面の外側と等しくなるようにし、波長変換板の上面が水面の位置 と等しくなるように固定した。SK OD では、20 cm 径 PMT が用いられ、60 cm×60 cm の波長 変換板に直径 20 cm の穴が開いている板を用いる。一方、本測定では 8 cm PMT を用いるため SK OD 用の波長変換板から、図3.31aのような 18 cm×14.5 cm の大きさの板を切り出し、その 中心に 8 cm の穴をあけて使用した。なお、この波長変換板の厚みは約 1 cm であった。HK OD 用の波長変換板は、実際に HK OD で使用予定のものを使用した。図3.31bのように、30 cm×30 cm の板に直径 8 cm の穴が開いており、そこに PMT の光電面の位置が合うように PMT と波 長変換板を取り付けた。



(a) スーパーカミオカンデの波長変換板



(b) ハイパーカミオカンデで使用予定の波長変 換板 (Kuraray B2)

Figure 3.31: 波長変換板

## 3.5.2 水チェレンコフ光測定の測定方法

2本のシンチレータからの出力信号をゲートに入れ、その出力信号をトリガーとして用い、8 cmPMT の出力波形を取得した。この測定ではミューオンの角度や生じたチェレンコフ光の光 量によって出力波形のタイミングにばらつきが生じる。そのため、本測定では平均波形を取 得せず、10000 個の波形を取得したうち、2本のシンチレータからの信号どちらもがヒットを 持っている場合に限り、8 cmPMT の波形から計算される光電子数、FWHM を計算してヒスト グラムを作成し、それを比較した。これにより、それぞれのセットアップでの波形の傾向を つかんだ。

測定では、プールの水深 70 cm に対して PMT の大きさが約 20 cm であったため、実現可能 な最長水深が約 50 cm 程度であったことから、光電面を沈める分まで含めて水深を 53 cm に 設定した。波長変換板がない場合、スーパーカミオカンデの波長変換板がある場合、ハイパ ーカミオカンデで使用予定の波長変換板がある場合それぞれの条件で波形を取得し、取得さ れた波形を選別し、光電子数、オーバーシュートの高さと波高の比、半値全幅をそれぞれの 波形に対して計算し、ヒストグラム化して比較した。

## 波形の選別条件

波形の選別条件について述べる。オシロスコープでは、トリガー信号、シンチレータからの 2 つの PMT の信号、8 cmPMT からの信号を図3.32のように取得した。横軸を 500 ns/div とし、 チャンネル1にトリガーとなるコインシデンス信号、チャンネル2に8 cm PMT からの信号を 入力した。また、解析でのトリガーとするため、チャンネル3、4 にはシンチレータからの波 形を入力した。チャンネル1は1 V/div、チャンネル2 は様々な光量のイベントを取得するた めに 200 mV/div、チャンネル3、4 は 500 mV/div で波形を取得した。

宇宙線ミューオンは透過性が高いため、チェレンコフ光を生じるミューオンは2つのシン チレータどちらもにヒットをもっている可能性が高いことから、2つのシンチレータどちらも にヒットがあった場合が宇宙線ミューオンによる信号であると条件付け、まず、シンチレー タからの信号に 100 mV の閾値をかけ、シンチレータ 2 つどちらもに信号が来ていた場合の 8 cm PMT の波形のみを選別した。さらに、そのような波形に限り、8 cmPMT の信号に 2 光電 子程度 (= このセットアップでは 25 mV 程度程度) の波高の閾値を設けた。同時に、波高の閾



Figure 3.32: 水チェレンコフ光測定においてオシロスコープで取得される波形

値として、ピークが 700 mV 以下であるという条件を採用した。これは、オシロスコープの設 定から、波高 700 mV 以上の場合、正極、負極双方のピークがオーバーフローしてしまい、光 電子数が正確に計算できないためである。さらに、その条件を満たした波形に対して光電子 数を計算し、光電子数が1より大きいという条件で波形を選別した。これは、チェレンコフ 光は円錐形に伝播するため、チェレンコフ光が8 cm PMT に入射している場合は少なくとも1 光電子以上の光が入射することが予想されるためである。選別された波形に対して光電子数、 オーバーシュートの高さと波高の比、半値全幅を計算してヒストグラム化した。なお、ヒス トグラム化する際には、比較のため総イベント数が1になるよう規格化した。

光電子数は、ピーク位置から見て±100 ns の範囲で波形を積分し、ゲインの計算と同様の 方法で積分値から電流値を計算し、それをゲインで割ることで計算した。図3.17bからわかる ように、抵抗値 100 Ω に対するゲインは波形の立ち上がりまでは一定であり、100 ns までの間 に大体 6×10<sup>6</sup> 程度に落ち着く。そのため、本測定では PMT のゲインとして 6×10<sup>6</sup> を採用し た。波高はレーザーダイオードを用いた測定と同様、波形のベースとなるラインから最も電 圧が下がった点までの高さを計算した。また、この値を持ちて半値全幅を計算した。

## 3.5.3 水チェレンコフ光測定の測定結果

#### 光量、波高とオーバーシュートの比率、半値全幅

各セットアップごとの光量と半値全幅をヒストグラム化して比較した。その結果を以下の 図3.33に示す。



Figure 3.33: 波長変換板の有無と光電子数、半値全幅の関係

目視で結果が明確にわからなかったため、ヒストグラムの平均値を算出して比較を行った。その結果を以下の表3.6に示す。

	イベント数	光電子数	誤差	半値全幅 ns	誤差
波長変換なし	160	2.50	0.06	$7.16 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-11}$
SK の波長変換	158	1.76	0.05	$7.20 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-11}$
Kuraray B2	227	1.87	0.07	$7.69 \times 10^{-9}$	$6 \times 10^{-11}$

Table 3.6: 光電子数、半値全幅、オーバーシュートの高さの平均値

光電子数について、波長変換板がない場合最も光電子数が多く、波長変換板があると光電 子数が少なくなっていることが読み取れる。さらに、FWHM については波長変換がない場合 が最も半値全幅が狭く、波長変換があると半値全幅が広くなっていることが読み取れる。一 方、Kuraray B2 の波長変換板を使用した際には、取得された 10000 個の波形のうちイベント としてカウントされた波形が最も多く、波長変換がない場合、SK の波長変換を用いた場合は 大きく変わらなかった。

## 3.5.4 水チェレンコフ光測定の考察

イベント数について、波長変換がない場合には PMT に直接入射したチェレンコフ光のみを捉 えるのに対し、波長変換板を用いることで PMT に入射しなかった光が波長変換板に入った場 合は PMT でとらえることが可能になる。その結果、イベント取得回数が増加したと考えられ る。スーパーカミオカンデの波長変換は Kuraray B2 と比べ小さかったため、イベント取得回 数の向上が見られなかったが、波長変換板が大きくなると取得回数が向上することが予想さ れる。実際の OD で波長変換が使用されるメリットと合致している。

光量については、波長変換板を用いた場合のほうが平均光量が低くなっている。この原因 として、波長変換板を経由して PMT に光が入射するイベントでは、波長変換板内での散乱の 影響で光量が低いことが考えられる。

また、半値全幅については、波長変換板がある場合のほうがない場合より広くなる傾向が 読み取れる。波長変換板に光が吸収された後発光する際に、波長変換自体の発光の遅延の影 響のほか、波長変換がの空間的な広がりの影響から、光子が PMT に入射するタイミングにば らつきが生じ、半値全幅が広くなっていると予想される。

LED を用いた測定では、スーパーカミオカンデで使用された波長変換板が最も波形の半値 全幅を広げていたが、水チェレンコフ光測定では Kuraray B2 の波長変換板のほうが半値全幅 が広いという結果が出た。LED を用いた測定では、波長変換の時定数の影響が半値全幅の広 がりに影響したと考えられるが、波長変換の時定数の関係は水チェレンコフ光測定と LED で の測定で不変であるため、波形には空間的な広がりのほうがより強い影響を及ぼすことがわ かる。

44

# 第4章 中間水チェレンコフ検出器の外層光検出 機構の検出器シミュレーション

## 4.1 目的

IWCD OD では外部から入射するノイズのミューオンの信号を検知し、ノイズ除去を行う。 IWCD では、ハイパーカミオカンデやスーパーカミオカンデと異なり、低エネルギーの宇宙 線ミューオンや、ニュートリノビームが岩盤と相互作用することによるノイズのミューオン が飛来するため、外部からの荷電粒子への高い検出効率が必要となる。現状、IWCD の詳細な 設計は確定しておらず、PMT の数、タンクのサイズ、PMT の配置等は未決定である。PMT 設 置数をできる限り少なく最適化することで、IWCD 建設及び運用へのコストを削減すること が可能になる。また、タンクサイズと PMT の配置を最適化し、ノイズであるバックグラウン ド現象を十分に識別しながらも、測定対象であるニュートリノビームによる信号を減らしす ぎない識別性能を実現したい。このように、IWCD OD の設計を最適化するためには OD の宇 宙線への検出効率を調べる必要がある。

本研究では、WCSim を用いて IWCD OD に宇宙線ミューオンを入射するシミュレーショ ンを行った。IWCD でのニュートリノ観測にあたり、ノイズとなる低エネルギー領域の宇宙 線ミューオンを IWCD に入射し、IWCD OD の宇宙線ミューオンの検出効率とタグ付け効率を 調べた。

## 4.2 方法

IWCD は図1.7aのような構造をしており、WCSim 内では ID タンクの中心の座標が直交座標系 で (0,0,0) と表現される。y 軸が上下方向に対応しており、座標系の単位は cm である。本研究 では、図4.1aを基本的な IWCD のセットアップであるとし、OD のタンク最上部でミューオン を生成し、OD と ID のヒットの有無を確認した。また、基本的なセットアップから PMT の数 を増やしたセットアップと OD の水深を深くしたセットアップを計 5 通り新たに構築し、そ れぞれのセットアップでの OD、ID のヒットの様子を見た。それぞれのセットアップの詳細 とジオメトリの図は図4.2と表4.1に示す。セットアップ2と3では、OD 内の PMT の数をセッ トアップ1 から増やしており、セットアップ4と5では、壁面方向、上底面方向の OD の水深 を深くしている。

セットアップ	PMT の配置図		DD PMT の数	OD の水深		
		側面	上底面	合計	横	縦
セットアップ1	図4.2a	264 本	52 本ずつ	368本	70 cm	70 cm
セットアップ2	図4.2b	528本	52 本ずつ	632本	70 cm	70 cm
セットアップ3	図4.2c	528本	96 本ずつ	720本	70 cm	70 cm
セットアップ4	図4.2a	264 本	52 本ずつ	368本	170 cm	70 cm
セットアップ5	図4.2a	264 本	52 本ずつ	368本	170 cm	120cm

Table 4.1: PMT 数を変化させたセットアップ 1-3 のジオメトリ



(a) シミュレーションで使用したセットアップ



Figure 4.1: シミュレーション内の IWCD

## 4.2.1 IWCD におけるミューオンフラックスの確認

まず、IWCD に到達する宇宙線ミューオンのフラックスをシミュレーションし、IWCD におけ る宇宙線ミューオンのフラックスを計算した。MUSIC を用いて、IWCD での地表面、IWCD が最上部にある際のタンク中心、IWCD が最下部にある際のタンク中心の3地点で、ミューオ ンフラックスの天頂角、方位角依存性を計算し、ミューオンフラックスのエネルギー分布を 計算した。IWCD におけるシミュレーション地点を図4.3a、天頂角と方位角の定義を図4.3bに 示す。



(a) Caption

(b) Caption



(c) Caption

Figure 4.2: それぞれのジオメトリでの OD PMT の配置



Figure 4.3: シミュレーション内の IWCD

フラックスの計算結果から宇宙線ミューオンの IWCD タンクへのエネルギーごとの到達 頻度の確率分布を算出した。また、今回のシミュレーションでは IWCD が最上部にある際の 上方向から飛来する宇宙線ミューオンについて扱ったため、IWCD が最上面にある際のタン ク最上部のミューオンフラックスが IWCD の地表面地点と等しいと仮定し、IWCD の地表面 において、ミューオンフラックスの天頂角ごとのエネルギー依存性を調べた。

## 4.2.2 単一のエネルギーのミューオン

次に、図4.4aのように OD タンク上面の中心から真下の方向に単一のエネルギーを持つミュー オンを入射させ、ID PMT と OD PMT のヒットの有無を調べた。セットアップ 1、2、3 について は、OD タンクの中心から最上面までの長さが約 5 m となるため、(0,500,0)の点から真下に入 射させた。また、セットアップ 4 と 5 では OD の水深が 1 m 深くなることに対応し、(0,600,0) の点から入射させた。シミュレーションに用いたミューオンのエネルギーは、MUSIC で計算 されたミューオンのフラックスを参考に、105 MeV から 355 MeV までのミューオンを各 10 MeV ずつ計 100000 イベント生成してシミュレーションした。

シミュレーション結果から、外部検出器の検出効率を検討した。このシミュレーションに おいてはすべてのミューオンが外部検出器に入射している状態であるため、外部検出器での ヒットの有無をカウントし、100000 イベントのうちいくつのイベントが外部検出器で確認さ れたのかを確認し、外部検出器の検出効率のエネルギー依存性を調べた。外部検出器の検出 効率は、式4.1で定義した。

また、内部検出器では 100000 イベントのうちどの程度のイベントが検知されたかを確認し、 内部検出器の検出確率を調べた。内部検出器の検出確率は式4.2で定義した。

ID の検出確率 [%] = 
$$\frac{\text{ID} ヒットのあるイベント数}{総イベント数 (=100000)} \times 100$$
 (4.2)

さらに、外部検出器での宇宙線ミューオンのタグ付け効率を調べるため、内部検出器でヒットがあったにも関わらず、外部検出器でヒットがなかったイベントの数を調べ、内部検出器 でヒットがあったイベントの数との比をとった。内部検出器でヒットがあったすべてのイベ ントに対して外部検出器でヒットがあった場合をタグ付け効率 100 % であるとし、以下の式 (4.3) で外部検出器のタグ付け効率を定義した。

タグ付け効率 [%] =  $100 - \frac{ID ヒットがあったにもかかわらず OD ヒットがないイベント数}{ID ヒットがあるイベント数} \times 100$ (4.3)

PMT には、光が入射していないにもかかわらず信号が検知されるダークノイズが存在する。 ダークノイズの発生頻度をダークレートと呼ぶ。シミュレーション上でのダークノイズの扱 いを確認するため、このシミュレーションはダークノイズを含む場合と含まない場合の2通 りで行い、結果を比較した。WCSim 内では、IWCD OD の PMT として設定されている8 cm PMT 1 本のダークレートは1 kHz と定義されている。イベント生成により8 cm PMT に光が入 射しトリガーとなるタイミングに合わせ、ダークノイズを挿入するウィンドウを設定し、シ ミュレーションにダークノイズによるヒットを含めることができる。今回はダークノイズ挿 入のウィンドウをトリガーのタイミングから±4000 ns と設定した。

## 4.2.3 計算されたミューオンフラックスに対応するミューオンの入射

MUSIC を用いて計算したミューオンフラックスに対応した確率分布でミューオンを生成した。天頂角ごとにミューオンの確率分布を計算したため、それぞれの天頂角ごとにミューオンを生成し、生成されたミューオンを図4.4bのように OD タンクの最上部中心点から対応する天頂角の方向に入射した。エネルギー帯域として 105-300 MeV のミューオンに限定しシミュレーションした。なお、MUSIC のシミュレーション結果から、ミューオンフラックスの方位角依存性がないことがわかったため、方位角  $\phi$  は 90 度に限定して入射した。本研究では、天頂角 0 度、30 度、60 度の 3 つの角度でそれぞれ 100000 個のイベントに対してシミュレーションを行った。シミュレーション結果を用いて、単一のエネルギーのミューオンを入射した際と同様に外部検出器の検出効率、内部検出器のヒット率、外部検出器のタグ付け効率を計算し、それぞれの天頂角依存性を確認した。

さらに、図4.4cのように同様のシミュレーションを OD タンクの最上部中心点ではなく最 上部の角付近で行った。本研究では、OD タンクの右上端から 30 cm 内側の点から天頂角 0、 30、60 度、方位角 90 度の方向にミューオンを入射した。セットアップ 1、2、3 に対しては (0, 500,420) の点から、セットアップ 4 に対しては (0,600,420) の点から、セットアップ 5 に対し ては (0,600,470) の点に対応する。シミュレーション結果を用いて、外部検出器の検出効率、 内部検出器のヒット率、外部検出器のタグ付け効率を計算し、それぞれに対する位置依存性 を見た。

同様に、図4.4dのように OD タンクの最上部 *x* 軸上のランダムな点から天頂角分布に従う ミューオンを入射し、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を用いて、外部検 出器の検出効率、内部検出器のヒット率、外部検出器のタグ付け効率を計算し、OD タンク全 体で見たときの OD の検出効率、OD のタグ付け効率の平均を概算した。

## 4.2.4 タグ付けと検出の定義

T2K 実験で行われているイベント検出では、イベント取得のトリガーとして T2K のビームの時間情報を用いる。GPS(lobal Positioning System)を用いてビーム位置を正確に把握し、ビーム



(a) タンク最上部中心点から真下に入射した際 のミューオンの入射位置と方向



(b) タンク最上部中心点から天頂角分布に従っ て入射した際のミューオンの入射位置と方向



(c) タンク最上部角付近から天頂角分布に従っ(d) タンク最上部 x 軸上から天頂角分布に従っ て入射した際のミューオンの入射位置と方向 て入射した際のミューオンの入射位置と方向

Figure 4.4: 各シミュレーションでのミューオン入射位置と角度の設定

到来予想時間 ±600 μs をウィンドウとしてデータを取得する。一方、今回のシミュレーショ ンでは、ビームによるトリガーを無視し、宇宙線ミューオンの入射によって生じた PMT ヒッ トのみに注目した。

通常、イベント選択として、ID の PMT のヒット数や光電子数に閾値を設けたり、OD の PMT ヒット数やヒット時間の分布に閾値を設けたりすることでノイズの低減を行っている。 しかし、今回は IWCD でビーム由来のニュートリノ現象によっていくつの PMT にどのよう な時間分布でヒットが生じるか不明であった。そのため、OD、ID ともに1つ以上の PMT に ヒットが生まれればそれぞれの検出器でイベントが検出されたと判断し、最低限の検出効率、 タグ付け効率を確認した。

## 4.3 シミュレーションツールとシミュレーション方法

#### 4.3.1 WCSim

WCSim は、ROOT と Geant4 を組み合わせ、水チェレンコフ検出器における荷電粒子の運動 をシミュレーションするプログラムである。[9]Geant4 をもちいると、粒子や放射線が物質 中を移動する際の現象と運動をシミュレーションすることができる。これらを組み合わせ、 WCSim では、様々な水チェレンコフ検出器のジオメトリ内でのニュートリノイベントをシミ ュレーションすることができる。また、タンク外からミューオンを入射する設定を作成する ことで、宇宙線ミューオンが入射された場合のイベントについてシミュレーションすること も可能である。この方法で宇宙線ミューオンイベントをシミュレーションした。

WCSim では、水チェレンコフ検出器のタンクの大きさ、PMT の数、種類、ダークレート、 大きさ、Tyvek シート、波長変換板の有無や厚さ等様々なパラメータを自ら定めて水チェレン コフ検出器を構成することができる。本研究では、WCSim 内ですでに作成されていた IWCD のジオメトリの PMT の数や外水槽の水深を変えていくことで複数種類のジオメトリでの宇宙 線ミューオンのシミュレーションを行った。

#### 4.3.2 MUSIC

MUSIC は、Fortran をベースに Geant4 を用いて岩盤中を伝播する宇宙線ミューオンのシミュ レーションを行うプログラムである。[6] 地表面のミューオンフラックスを用いて、地下にか けて岩盤でどれだけエネルギーを失うかをシミュレーションする。制動放射や電子陽電子対 生成、イオン化等のプロセスからエネルギーを失ったミューオンが、シミュレーションした い位置でどのようなエネルギーになったかを知ることができる。

本研究では、まず IWCD 周辺の標高データを国土地理院地図から取得した。座標と対応す る標高データ MUSIC に読み込み、それらのデータが正しく読み込まれていることを標高の地 図を作成することで確認した。さらに、IWCD の建設予定地の座標を指定し、その地点での地 中のミューオンフラックスを計算した。本研究では、図4.3aのような位置関係でフラックスを 計算した。まず、IWCD 建設予定地の標高をそのまま入力し地表面のミューオンフラックス を導出したのち、そこから 5 m 下の IWCD が最上部にある際の IWCD タンクのミューオンフ ラックス、その地点からさらに 50 m 下の IWCD が最下部にある際のミューオンフラックスを 計算した。また、比較のため、同様の方法でスーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデ でのミューオンフラックスも計算し、実際に測定が行われているスーパーカミオカンデと比 較してどの程度 IWCD のミューオンフラックスが高いかを見積もった。さらに、計算された ミューオンフラックスの天頂角と方位角の依存性を調べた。

## 4.4 結果

## 4.4.1 MUSIC を用いたミューオンフラックスの計算

まず、位置情報と標高情報が再構成されていることを確認した。右図4.5aは国土地理院地図、 左図4.5bは国土地理院地図から取得したデータをもとに再構成した地図である。



(a) 取得した地図 [10]





Figure 4.5: ミューオンフラックス計算に使用した IWCD 周辺の地図

図4.5からわかるように、取得された地形情報はシミュレーション上でよく再構成されて いる。この標高情報を用いて、IWCDの座標を用いてミューオンフラックスを計算した。計算 された各地点のフラックスをスーパーカミオカンデのフラックス、ハイパーカミオカンデで のフラックスと比較した図が4.6aである。また、フラックスにエネルギーの 2.7 乗をかけるこ とで、そのエネルギーをもつ粒子の到達頻度を求めることができる。これを用いて、粒子の 到達頻度を計算したものが図4.6bである。



Figure 4.6: IWCD のミューオンフラックス

この図からもわかるように、IWCD ではスーパーカミオカンデと比較して低エネルギー領 域でのミューオンの飛来確率が高いといえる。それぞれの到達頻度をスーパーカミオカンデ での到達頻度で割り算し、比を求めた。その結果を以下の図4.7に示す。この結果から、IWCD では、100 MeV から 1 GeV 程度の低エネルギーなミューオンがスーパーカミオカンデと比較 して 10<sup>6</sup> から 10<sup>4</sup> のオーダーで多く飛来することがわかる。10<sup>3</sup> から 10<sup>5</sup> GeV の高エネルギー 領域であっても 10<sup>2</sup> 程多く飛来している。なお、10<sup>5</sup> GeV 以降の比率が大きく見えるのは、ス ーパーカミオカンデではほとんどそのエネルギー帯のミューオンが飛来せず、比率が無限大 に発散してしまったためである。



Figure 4.7: スーパーカミオカンデと比較したミューオンフラックス

この結果から、IWCD では低エネルギーミューオンもノイズとして飛来していることがわ かる。そのため、WCSim での単一のエネルギーのミューオンを入射するシミュレーションで は、105 MeV から 355 MeV にかけてのミューオンを 10 MeV ごとに 100000 イベントずつ生成 し、シミュレーションを行った。また、計算されたミューオンフラックスを用いてイベント を生成するシミュレーションにおいては、簡単のため 105 MeV から 300 MeV までのエネルギ ー帯を採用した。

さらに、IWCD 地表面でのミューオンフラックスの天頂角依存性、方位各依存性を計算した。その結果を以下の図4.8a、4.8bに示す。また、これらの図を2次元平面上にプロットしたものが図4.9である。



(a) 方位各依存性

(b) 天頂角依存性

Figure 4.8: IWCD 地表面でのミューオンフラックス



Figure 4.9: IWCD 地表面でのミューオンフラックス

この結果から、IWCDではミューオンフラックスの方位角への依存性がほとんどないこと が読み取れる。さらに、天頂角依存性として、天頂角が小さいほどミューオンフラックスが 大きく、天頂角が大きいほどフラックスが小さいことがわかる。これは、ミューオンが真上 の方向からより多く飛来していることを示している。さらに、ミューオンフラックスの天頂 角ごとのエネルギー依存性を計算し、地表への到来確率を天頂角ごとに算出した。その結果 を以下の図4.10に示す。



Figure 4.10: ミューオンフラックスの天頂角ごとのエネルギー依存性

ここで、シミュレーションに採用した範囲の 105-300 MeV の低エネルギーミューオンの飛 来頻度をフラックスを用いて計算する。フラックス  $\phi$  は、単位時間に単位面積を通過する粒 子の総数を表すため、飛来する粒子の数 N、面積 A、時間 t を用いて式 (4.4) のように定義さ れる。単位エネルギー当たりのフラックスについては、エネルギー E を用いて式 (4.5) によっ て計算される。

$$\phi = \frac{dN}{dAdt} \tag{4.4}$$

$$\phi = \frac{dN}{dAdtdE} \tag{4.5}$$

単位時間当たりの粒子の飛来頻度  $\frac{dN}{dt}$ を求めるには、フラックスに面積とエネルギー範囲  $\Delta E$ をかけ合わせればよい。105-300 MeV の低エネルギーミューオンのフラックスは図4.6aから約  $10^{-3}$  cm<sup>-2</sup>sec<sup>-1</sup>GeV<sup>-1</sup> と読み取れる。IWCD OD の上面の面積はセットアップ 1-4 に対しては タンク半径 4.4 m を用いて計算すると約 60.8 m<sup>2</sup>、セットアップ 5 に対してはタンク半径が 4.9 m になるため約 75.4 m<sup>2</sup> と計算できる。 $\Delta E = 295$  MeV であることを用いて計算すると、セットアップ 1-4 の場合には、タンク上面から飛来するミューオンは約 179 個 sec<sup>-1</sup>、セットアップ 5 の場合には約 222 個 sec<sup>-1</sup> と計算できる。つまり、低エネルギー領域のミューオンは大体 0.18-0.2 kHz の頻度で IWCD に飛来しているといえる。

## 4.4.2 単一のエネルギーのミューオンを入射

#### OD の検出効率

各セットアップでのタンクの最上部の中心位置から真下の方向に、各エネルギーのミューオ ンを入射しシミュレーションを行った。タンク最上部から真下に向かって入射させた場合、 すべてのミューオンが外部検出器に入射していることになる。そのため、まず外部検出器で イベントが検出された確率をプロットし、外部検出器の検出効率のエネルギー依存性を確認 した。その結果を以下の図4.11a、4.11bに示す。



Figure 4.11: OD の検出効率のエネルギー依存性

## ID のイベント検出確率

100 100 Setup1 Data Setup2 Data Setup3 Data Setup4 Data Setup5 Setup1 Data Setup2 Data Setup3 Data Setup4 Data Setup5 Data 80 80 60 60

内部検出器でのイベント検出確率を計算した。その結果を以下の図4.12a、4.12bに示す。



Figure 4.12: ID でのイベント検出確率のエネルギー依存性

## OD のタグ付け効率

ODでのタグ付け効率を計算し、各エネルギーごとにプロットした。その結果を以下の図4.13に 示す。



Figure 4.13: OD のタグ付け効率

この結果から、ダークノイズの有無や PMT の数、外部検出器の水深かかわらず、一定の エネルギーまでは OD のタグ付け効率は 90 % 前後で安定しており、一定のエネルギーを超え ると OD のタグ付け効率が向上してゆき、さらにある閾値のエネルギー以上では 100 % のタ グ付け効率となることがわかる。

外部検出器によるタグ付けのエネルギー閾値を求めるため、180 MeV 近辺までのタグ付け できていない確率がほとんど変わらない範囲を水平線で、閾値までのタグ付け効率が上がっ ていく範囲を線形にフィッティングを行った。フィッティング関数は式 (4.6)、(4.7) を用いた。

$$y = A \tag{4.6}$$

$$x = B \times x + C \tag{4.7}$$

閾値は、式4.7より、

$$x = -\frac{C}{B}$$

から計算される。誤差伝播の法則を用いると、閾値に対する誤差は

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{C\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{B}\right)^2}$$

から算出できる。この計算から閾値を導出した。

フィッティング結果と求められた閾値を以下の図4.14と表4.2、4.3にまとめた。



Figure 4.14: OD のタグ付け効率のフィッティング

パラメータ	Α	誤差	В	誤差	C	誤差	閾値 MeV	誤差
セットアップ1	92.5	0.412	0.297	0.049	39.1	9.6	206	21.7
セットアップ2	96.4	0.306	0.364	0	32.1	0	197	0
セットアップ3	94.5	0.0596	0.566	0	-5.30	0	186	0
セットアップ4	92.5	1.30	0.432	0.120	32.9	9.58	213	44.3
セットアップ 5	90.0	0.731	0.305	34.4	8.74	24	214	76.9

Table 4.2: フィッティングパラメータ ダークノイズあり

パラメータ	A	誤差	В	誤差	C	誤差	閾値 MeV	誤差
セットアップ1	91.4	0.451	0.457	0.0349	6.03	6.83	205	21.7
セットアップ 2	93.3	0.312	0.391	0	23.1	0	196	0
セットアップ3	94.5	0.0596	0.566	0	-5.31	0	186	0
セットアップ4	90.7	0.721	0.315	0.0477	32.8	9.58	213	44.3
セットアップ 5	90.4	0.563	0.451	0.117	3.51	24	214	76.9

Table 4.3: フィッティングパラメータ ダークノイズなし

フィッティング結果から、PMT 本数が多いほど OD によるタグ付け可能エネルギーの閾値 が下がっていることがわかる。また、水深が深くなると OD のタグ付け可能エネルギーの閾 値が高くなり、タグ付け効率が下がることがわかる。パラメータ A の値を見ると、OD でのタ グ付けが 100 % 行えない範囲に関しても、PMT が多いほうがタグ付け効率が高く、OD の水 深が深いほどタグ付け効率が低いことがわかる。

## イベントディスプレイ

さらに、OD でタグ付けされなかったイベントに関して、ID のイベントディスプレイを確認 した。その結果を以下の図4.15、4.16に示す。



h2 Entries 23 Mean x 432.4 Mean y 1345 Std Dev x 577.3 Std Dev y 176.4 1.6 21 1.4 1.2 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0

(a) チェレンコフリングが確認できるイベ ントディスプレイ

(b) 少数のヒットを持つイベントディスプ レイ

Figure 4.15: ダークレートがない場合のイベントディスプレイ



 h2

 Entries

 Mean x

 Mean y

 Std Dev x

 Std Dev x

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 11.5

 <td

(a) チェレンコフリングが確認できるイベ ントディスプレイ

(b) 複数のヒットを持つイベントディスプ レイ



(c) 少数のヒットを持つイベントディスプ レイ

Figure 4.16: ダークレートがある場合のイベントディスプレイ

これらの図からわかるように、内水槽で多数のヒットを生成する場合とごく少数のヒット を生成する場合が存在する。ごく少数のヒットを生じる場合、チェレンコフ光によるリング は確認できないが、多数のヒットを生じる場合、図4.16bのような多数のリングが確認できる 場合と図4.16aのような大きなリングが確認できる場合が存在する。ごく少数のヒットを生じ る場合、ダークレートが含まれるシミュレーション上では単にダークレートが検出されてい るだけである可能性を排除できない。一方、ダークレートを考慮しないシミュレーション上 でも図4.15bのように少数のヒットのみのイベントが存在しているため、ダークレートを考慮 している場合においても単にダークノイズが検出されているだけでなく何らかの光によるヒ ットが生じている可能性が高いと考えらえる。これらのシミュレーションから、IWCD のシ ミュレーションにおいてはダークレートの考慮の有無によって大きく結果が変わらないと考 えられる。

#### ヒット数

エネルギーと ID、OD でのヒット数や取得された光電子数の相関を見ることで、PMT のヒット数から入射したミューオンのエネルギーを知ることができる。そのため、エネルギーとヒット数、電荷の情報を確認し、統計的にどの程度のヒット数ならばどの程度のエネルギーが入射したのかを知ることは実際の観測において重要である。本研究では、OD のタグ付け効率を主に見ているが、単一のエネルギーを入射した場合には PMT のヒット数とエネルギーの関係を見ることができるため、ここではそれを確認した。

各エネルギーにつき 5000 イベントを用いてそれぞれ OD でヒットがあるとされたイベン トでいくつのヒットが生じたかを数え、ヒストグラムにした。エネルギーごとのヒット数分 布を図4.17に示す。

この結果から、タグ付け効率が 100% となる 200 MeV 以降はヒット数がほぼ比例する形で 上昇していることが読み取れる。この関係を用いることで OD のヒット数から外部からのミ ューオンのエネルギーを知ることができると考えられる。一方、200 MeV 以下では明確な相 関がみられず、セットアップ1においては大体 80 Hit 程度にピークを持つことがわかる。こ のエネルギー帯では入射してきたミューオンがチェレンコフ閾値を下回るため、OD では主に 崩壊電子が観測されていると考察できる。このエネルギー帯の電子がヒット数に大きな変化 を生まないことがこの現象の要因と考えられる。



Figure 4.17: OD におけるエネルギーとヒット数の関係

同様に、IDでのヒット数の分布を確認した。その結果を以下の図4.18に示す。



Figure 4.18: ID におけるエネルギーとヒット数の関係

## 4.4.3 ミューオンフラックスに従うミューオンを入射

## タンク最上部中心点から

OD タンク最上部の中心点からミューオンフラックスの角度分布に従うミューオンを入射した。計算された外部検出器の検出効率の角度依存性、内部検出器の検出確率、外部検出器の タグ付け効率を以下の図4.19に示す。



(c) 外部検出器のタグ付け効率

Figure 4.19: OD タンク最上部中心点からミューオンを入射した際の天頂角依存性

内部検出器の検出確率の角度依存性として、天頂角が大きいほど内部検出器の検出確率が 下がっていることがわかる。一方、外部検出器の検出効率の角度依存性は見られない。定点 から単一のエネルギーのミューオンを入射した際と同様に、PMT 数が多いほど検出効率が高 く、水深が深いほど検出効率が低い傾向がみられる。外部検出器でのタグ付け効率は内部検 出器の検出確率と同様天頂角が大きいほど効率が下がっている。

## タンク最上部角付近から

OD タンク最上部の角付近からミューオンフラックスの角度分布に従うミューオンを入射した。計算された外部検出器の検出効率の角度依存性、内部検出器の検出確率、外部検出器の タグ付け効率を以下の図4.20に示す。



(c) 外部検出器のタグ付け効率

Figure 4.20: OD タンク最上部角付近から入射した際の天頂角依存性

IDでの検出確率とODのタグ付け効率については、IDでの検出確率自体が低く、ODでの タグ付け効率の角度依存性を議論できるほどサンプルが集まらなかった。統計数を増やして 再度解析を行う必要がある。傾向として、PMT 数増加に伴いタグ付け効率が向上し、水深増 加に伴いタグ付け効率が低下している。ODの検出効率については、角度依存性はほとんど見 られず、これまでと同様にPMT 数の増加に伴い検出効率が向上し、ODの水深の増加に伴い 検出効率が悪化している。

## OD タンク最上部直線状から入射

OD タンク最上部の角付近からミューオンフラックスの角度分布に従うミューオンを入射した。計算された外部検出器の検出効率の角度依存性、内部検出器の検出確率、外部検出器の タグ付け効率を以下の図4.21に示す。



(c) 外部検出器のタグ付け効率

Figure 4.21: OD タンク最上部 x 軸上から入射した際の天頂角依存性

OD の検出効率については先ほどまでと同様の傾向が見て取れる。また、ID での検出確率 自体が低く、OD でのタグ付け効率の点聴覚依存性が議論できるほどの統計量がなかった。一 方、傾向として PMT 数が多いほどタグ付け効率が上昇することがわかった。さらに、水深が 深いとタグ付け効率が低下することがわかった。

## 4.5 考察

## 4.5.1 ダークノイズの影響

定点から単一のエネルギーのミューオンを入射するシミュレーションにおいて、ダークノイ ズの考慮の有無はシミュレーション結果に大きな影響を与えないと述べた。その原因につい て考察する。

WCSim 内では、IWCD に設置されている 8 cm PMT1 本のダークレートが 1 kHz であると 定義している。ID には PMT が約 7000 本、OD ではセットアップ 1、4、5 に対しては約 400 本、 2 に対しては約 600 本、3 に対しては約 700 本の PMT が設置されている。さらに、一つのヒ ットに対するウィンドウサイズが 200 ns であるため、ダークノイズとして検出されるヒット の期待値は ID で約 1.4 個、OD では 0.08-0.16 個程度であると見積もられる。今回のシミュレ ーションでは、最低限 ID、OD ともに 1 個以上のヒットがあることを条件にイベントとして カウントしていた。ダークノイズによるヒットの数がポアソン分布に従うと仮定すると、ダ ークノイズが1個のヒットを生じて偽陽性となる確率は、ID では

$$P = 1 - \frac{1.4^0 e^{-1.4}}{0!} = 0.4082$$

ODでは

$$P = 1 - \frac{0.08^0 e^{-0.08}}{0!} = 0.0769$$

となり、ID では 40 % 程度、OD では 7 % 程度となる。

ここで、シミュレーションされた OD のヒット数に着目する。タンク最上部中心点から 単一のエネルギーのミューオンを真下に入射する際の OD のヒット数のエネルギー依存性は 図4.17のような分布になっている。今回のシミュレーションでは、最低限 OD で 1 個のヒット がある場合には OD でタグ付けされたものとして扱ったが、実際のヒット数の分布をみると、 OD にヒットが一切ない場合を除けば常に 20 個以上のヒットが出ていたことがわかる。この 20 個すべてが偽陽性である確率は限りなく 0 に近い。

さらに、ID のヒット数について着目する。図4.18を見ると、OD と同様に、ID のヒット数 が 0 である場合を除くと、ID でも常に最低限 20 個程度のヒットが生じていたことがわかる。 この場合も、ヒットのすべてが偽陽性である確率は限りなく 0 に近い。そのため、ダークノ イズの影響によって偽陽性のヒットが生じ、タグ付けされてしまったイベントはほぼなかっ たと考えられる。このことから、ダークノイズの有無がシミュレーション結果に大きく影響 を与えないことは妥当であるといえる。

## 4.5.2 イベントディスプレイとミューオンの最低エネルギー、タンク内での飛行距離

ミューオンが式1.1を満たす際、ミューオンの実際の速度は

$$v = c\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

から計算される。ローレンツ因子 γ は

$$\gamma = \frac{E_{total}}{m_{\mu}c^2}$$

である。水中の屈折率 n が 1.33 程度であることを用いると、ミューオンがチェレンコフ光を 生じる最低エネルギーは 175 MeV 程度であると計算される。実際、OD のヒット数のエネル ギー依存性の分布をみると、180 MeV 付近から右肩上がりにヒット数が増加している成分が あることが読み取れる。これは、入射してきたミューオン自身のチェレンコフ光が検出され るようになったためと考えられる。

一方、それ以下のエネルギーでもヒットが生じており、それらのヒットがすべてダークレ ートに由来しているとは考えづらいことから、入射したミューオンが由来の別の光が生じて いることがうかがえる。この光の由来は、ミューオン崩壊時に生じる電子であると推測され る。同様の方法で電子のチェレンコフ光を生じる最低エネルギーを計算すると約 0.67 MeV と なり、実際のシミュレーション上でもこれ以上のエネルギーを持つ電子が多数発生している。 そのため、特に OD でタグ付けされずに ID 内でヒットを生じる荷電粒子はミューオンではな く電子である可能性が高い。

ミューオンの飛行距離について考える。ミューオンの水中での移動距離に対するエネルギー損失の期待値は、 <u>4</u> <u>4</u> (1.99 MeV/cm であることが知られている。これを用いると、例えば OD の入射点から ID までの長さが約 1 m であったセットアップ 1 に対しては、約 200 MeV 以 上のミューオンでなければ ID にミューオンが入射しない。そのため、図4.16のようなイベントに対して ID でとらえられているのはほとんどすべてが電子に由来するチェレンコフ光といえる。逆に言えば、宇宙線ミューオンによるイベントでありながら電子ニュートリノ由来の電子がヒットを生んでいるように誤認されるイベントが生じていることがわかる。

## 4.5.3 実際の測定での OD タグ付け効率の影響

今回のシミュレーションでは、105 MeV-300 MeV の間のエネルギーのミューオンを見た。これ は全体のミューオンの飛来確率のうち 2.81×10<sup>-10</sup>% に対応する。また、MUSIC によってしみ ゅっレーションされたミューオンフラックスは 0.0064 cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> であった。IWCD OD のタンク 直径を 9 m 程度とすると、ミューオンは約 4 kHz で IWCD に入射し、そのうち 2.81×10<sup>-10</sup>% が今回のシミュレーション範囲のイベントとなる。この範囲において、実際の観測の際に OD のタグ付け効率がどの程度影響を及ぼすかを考察する。

シミュレーションにおいて、セットアップ4が最も IWCD の想定セットアップに近かった。また、直ミューオンフラックスの方位各依存性がなかったことから、線上からランダムな方向に入射させたシミュレーションが IWCD OD におけるタグ付け効率の平均値を概算していると仮定すると、105-300 MeV の範囲では大体 98% のイベントがタグ付けされていないことがわかる。そのため、ミューオンフラックス全体でみると、全体の宇宙線ミューオンイベントのうち 2.25 × 10<sup>-12</sup>% のイベントがタグ付けされていないことがわかる。ミューオンフラックスとタンク面積を考慮すると、2.25 × 10<sup>-10</sup> Hz のミューオンがタグ付けされない。

IWCD のデータ取得では、J-PARC からのビームタイミングに応じてトリガーをオンにし、 ±600 µs のウィンドウの間でデータが取得される。ウィンドウ内で 2.25 × 10<sup>-10</sup> Hz のミュー オンがタグ付けされないことから、一つのウィンドウ内でタグ付けされないイベント数の期 待値は 1.69 × 10<sup>-13</sup> となる。宇宙線ミューオン由来の崩壊電子によるノイズはほぼ 0 であり、 現状のセットアップにおいてはほとんど無視できると考察される。

#### 4.5.4 PMT 数削減の検討

IWCD OD 最適化に向け、PMT 数を削減してシミュレーションを行い、PMT 数を減らすこと ができるかどうかを検討した。セットアップ1と同様の水深で、PMT 数を半分にしたセット アップ6と、上下の PMT 数はそのまま壁面の PMT 数を半分にしたセットアップ7を構築し た。それぞれのジオメトリを以下の図4.22に示す。



(a) セットアップ6上底面 PMT 数 48 個、壁面 (b) セットアップ7上底面 PMT 数 104 個、壁PMT 数 132 個面 PMT 数 132 個

Figure 4.22: セットアップ6、7のジオメトリ

このセットアップに 105-300 MeV の単一のエネルギーを持つミューオンを入射し、これま でと同様に各エネルギーごとに OD のタグ付け効率を確認した。その結果を以下の図4.23に示 す。



Figure 4.23: セットアップ6と7の OD タグ付け効率

この結果から、PMT 数を半分にしてしまうとタグ付け効率が大幅に低下し、特に低エネル ギー領域では 30% 近く低下していることがわかる。一方で、上下の PMT 数を変えない場合 はタグ付け効率はさほど変化していない。これは、タンク上部から飛来する宇宙線ミューオ ンのタグ付けは主にタンク上面で行われているためと考えられる。このことから、少なくと も宇宙線ミューオンのタグ付けにおいては、タンク上下面の PMT 数が最低限確保されていれ ばよく、壁面 PMT の数は減らすことができる可能性があるといえる。一方、IWCD ではニュ ートリノビームによるミューオンもノイズとなるため、スーパーカミオカンデ、ハイパーカ ミオカンデと比較して壁面の PMT も重要になる可能性があり、ビーム方向から飛来するミュ ーオンについてもシミュレーションすることで最終的な最適化を行うことができる。

# 第5章 結論と今後の展望

## 5.1 中間水チェレンコフ検出器の外層光検出機構における光電子増倍 管の波形

スプリッターを使用することで、2線式とは異なり PMT 波形にオーバーシュート、リンギン グ、低周波成分が生じる。リンギングはダイナミックレンジを小さくするため、低減される 必要がある。本測定から、リンギングはダンピング抵抗を用いて低減することができ、また 波長変換を経由して PMT に入射した場合もリンギングが低減されることがわかった。IWCD OD でスプリッターを用いたセットアップを採用する場合には、PMT に直接入射するチェレ ンコフ光、波長変換板経由で入射する光子双方においてリンギングが低減される必要がある ため、ダンピング抵抗を挿入したソケットの使用が望ましい。

ダンピング抵抗は波形を鈍化させるため、抵抗値が高いと波高が下がり、電圧閾値の設定 が難しくなる。そのため、本研究で確認した 100, 150, 300 Ω のダンピング抵抗の中では、リン ギングを低減させながらも波高も出ていた 100 Ω の抵抗が最も IWCD OD での測定に向いて いるように思われた。

スプリッターを使用する際に生じるオーバーシュートについては、ダンピング抵抗の使用 や波長変換板の挿入など、セットアップを変更しても低減することができなかった。そのた め、オーバーシュートがダイナミックレンジに及ぼす影響を排除することができない。また、 オーバーシュートがマイナス方向にも振動しており、例えば 100 Ω のダンピング抵抗を用い るセットアップの場合、波高に対する低周波成分の高さが 2.7 % 程度であった。この場合、12 個以上の光電子が入射する場合、閾値電圧にかかり偽陽性のヒットを生む可能性がある。OD PMT は大光量が入射する場合があるため、偽陽性を防ぐためにはオーバーシュートが収束す るまでの 500 ns 程度までの間をデッドタイムとすることが望ましい。T2K からのビームのバ ンチ間隔が約 600 ns であるため、不感時間が 500 ns 存在すると、OD でのバンチ識別が困難 になる可能性がある。一方、IWCD OD においてはノイズ検出が最重要であるため、バンチ識 別が必須でないとすれば、不感時間の長さは問題にはならない。スーパーカミオカンデの OD のデッドタイムが 1 μs であることを考えると、500 ns のデッドタイムは問題でないと考えら れる。

デッドタイムの短さ、ダイナミックレンジ、ゲイン等の性能が2線式ソケットのほうが 優れている。一方、ダイナミックレンジの減少の問題が残るものの、スプリッターにダンピ ング抵抗を挿入することでリンギングの影響を低減し、波長変換板を用いて水チェレンコフ 光を検出することは十分可能である。なお、スプリッターの構成によってゲインが変化する。 BNC ケーブル長が伸びるとゲインが低下するため、現在想定されている 20 m のケーブル長 の場合、十分なゲインを確保するためにはゲインを下げづらいスプリッターを用いたほうが よい。本研究においては、より高いゲインを持っていた浜松ホトニクス社のスプリッターの ほうがより IWCD OD での使用に向いていると考えられる。

## 5.2 中間水チェレンコフ検出器の外層光検出機構の検出器シミュレー ション

地表面近くで測定を行う IWCD 実験において、OD での宇宙線ミューオンの検出は必要不可 欠であり、特に低エネルギー領域のミューオンへの十分な検出性能を持っていることが求め られる。本研究では、宇宙線ミューオンのフラックスをシミュレーションし、IWCD に入射し うる宇宙線ミューオンのエネルギー帯を調べ、IWCD OD の性能を確認した。

シミュレーションにおいて、検出器構造上の死角等を一切考えず、PMT 数やタンクサイズ の最適化前の性能を確認した。また、PMT 数やタンク水深を変更したシミュレーションを行 うことで、最適化に向け PMT 数と検出性能、タンク水深と検出性能にどのような相関がある かを確認した。また、本シミュレーションではミューオンの入射位置や入射方向を単一に限 定し、簡単な場合での検出性能のみを見た。

様々なジオメトリでのシミュレーションから、少なくとも IWCD OD のミューオンタグ付 け効率が 90 % 以上であり、低エネルギーっ領域においても 9 割以上の宇宙線を排除できるこ とがわかった。一方で、本シミュレーションでは OD にヒットがなくタグ付けできないイベ ントが生成されており、このようなイベントが生まれないよう IWCD OD の構造を最適化し なければならない。なお、排除されないイベントはミューオンが崩壊することで生じる電子 由来のものがほとんどである。IWCD OD の最適化に向け、PMT 数を増やすことでタグ付け効 率を向上させる傾向にあり、水深を深くすることでタグ付け効率を悪化させる傾向にあるこ とが読み取れた。そのため、IWCD OD の最適化に向け、タグ付け効率が最適になる PMT 数 と水深を定める必要がある。

また、計算されたミューオンフラックスを考慮し、ミューオンエネルギーに天頂角依存性 を持たせたシミュレーションから、平均すると低エネルギー領域だけでも 98% 程度のタグ付 け効率があることがわかった。このことから、IWCD でのデータ取得の一つのウィンドウ内 でタグ付けされないイベントの期待値が 1.69 × 10<sup>-13</sup> であり、ほとんど無視できるほど小さ いことがわかった。

本研究では、ID のヒットが全体の数% 程度しかない中、その中でさらに 1-2 % 程度発生す る OD でタグ付けされていないイベントを取り扱ったため、統計数が少ないという問題点が あった。そのため、今後の展望として、さらにシミュレーションを行い統計数を増加させる ことでより詳細な議論が可能になると考えらえる。また、OD ヒットが一切生じないイベント について詳細に解析を行うことで、OD のジオメトリの改良についてより議論できるだろう。

さらに、今回は宇宙線ミューオンの識別を行ったが、本来 IWCD OD ではニュートリノビ ーム由来のミューオンの識別も行われなければならない。そのため、ニュートリノビームが 岩盤と相互作用して生じるノイズのイベントの識別性能についても議論していく必要がある。 さらに、本研究では最低限の識別性能として OD、ID ともに1つのヒットがあればイベント としてカウントしたが、実際の T2K からニュートリノイベントの状況と比較することで、検 出されたエネルギーや PMT のヒット数、PMT のヒット位置等の閾値を設定していくことが 可能となると考えらえる。それらのシミュレーションを通して、より高い OD での宇宙線ミ ューオンタグ付け性能を実現した、最適化された IWCD の構成を決定していくことができる だろう。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝の意 を表します。

まず、研究の指導教員である西村康宏准教授には、研究の方向性のご助言から解析手法に 至るまで、細やかなご指導をいただきました。特に、研究が思うように進まないときにも親身 に相談に乗ってくださり、貴重なアドバイスをいただいたことに深く感謝申し上げます。先 生のご指導なくして、本研究を遂行することはできませんでした。

IWCD OD に関するそれぞれの研究では、様々な先生方にもお世話になりました。光電子 増倍管の波形測定においては、スプリッターの設計を考えるにあたり東京大学地震研究所の 武多昭道助教に大変お世話になりました。ハイパーカミオカンデで検討されているスプリッ ターと浜松ホトニクスで設計されたスプリッターの比較を行うことで、より深く PMT 波形の 研究を行うことができました。ありがとうございました。

また、東京科学大学の松本遼助教には、WCSim でのシミュレーションに関するサポート をいただき、大変お世話になりました。シミュレーション上で分からない点やうまくいかな い点を多数質問させていただき、夜遅くになってしまっても毎回丁寧に対応していただきま した。シミュレーションがうまく動かせるようになるまでにたくさんのサポートをいただい たおかげでスムーズに研究を進めることができました。ありがとうございました。

さらに、研究室の先輩方にも大変お世話になりました。前川雄音さんには、シミュレーシ ョンコードについてや私自身の理解ができていない実験データの解析や解釈についてのヒン トをいただきました。Yu-Ming Liu さんは、研究室にいらっしゃる間にお話をさせていただき、 楽しく研究活動に励むことができました。また、小林美咲さんには、共通に使用する実験機 材の使用方法などをたくさん教えていただき、スムーズに研究を行うことができました。堀 内昇悟さんは、研究中にわからないことがあると一緒に考えてくださり、研究がスムーズに 進みました。皆様に心より感謝しております。

また、研究室同期の舘岡佳蓮さん、深澤雅光君らのおかげで、留学から帰国後の短期間の 間に楽しく卒業研究に取り組むことができました。ありがとうございました。

本研究を支えてくださった家族や友人にも感謝いたします。研究に没頭することができた のは、皆様の支えがあったからこそです。この場を借りて感謝申し上げます。

- [1] R. CLAUS et al. "A WAVESHIFTER LIGHT COLLECTOR FORA WATER CHERENKOV DE-TECTOR". In: *Nuclear Instruments and Methods m Physics Research A261* (1987), pp. 540–542.
- [2] Cern. "root Data analysis framework". In: (2025). Accessed: 2025-01-01. URL: https://root. cern.ch/.
- [3] Hyper Kamiokande Collaboration. "Hyper Kamiokande desigh report". In: (2018). URL: https://arxiv.org/pdf/1805.04163.
- [4] The NOvA Collaboration and D. Ayres. "NOvA Proposal to Build a 30 Kiloton Off-Axis Detector to Study Neutrino Oscillations in the Fermilab NuMI Beamline". In: (2005). DOI: https:// arxiv.org/abs/hep-ex/0503053.
- [5] J.Jelley. "Cerenkov Radiation and Its Application". In: Pergamon Press (1958), pp. 5–21.
- [6] V.A. Kudryavtsev. "Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics". In: *Computer Physics Communications* (2009), pp. 339–346.
- [7] kuraray. "Plastic Scintillating Fibers 製品カタログ". In: (2025).
- [8] T2K. "about T2K". In: (2025). Accessed: 2025-01-01. URL: https://t2k-experiment.org/ ja/about-t2k/.
- [9] WCSim. "WCSim". In: (2025). Accessed: 2025-01-01. URL: https://github.com/WCSim/ WCSim.
- [10] 国土地理院. "基盤地図情報ダウンロードサービス". In: (2025). Accessed: 2025-01-28. URL: https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php.
- [11] 東京大学宇宙線研究所付属神岡宇宙素粒子研究施設. "ハイパーカミオカンデ概要".
  In: ハイパーカミオカンデ (2025). Accessed: 2025-01-01. URL: https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/hk/about/outline/.
- [12] 東京大学宇宙線研究所付属神岡宇宙素粒子研究施設. "検出器について". In: スーパーカ ミオカンデ (2025). Accessed: 2025-01-01. URL: https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/ sk/about/detector/.
- [13] 浜松ホトニクス. "Photomultiplier Tubes R14374, R14689 datasheet". In: (2025).
- [14] 浜松ホトニクス株式会社編集委員会. "光電子増倍管-その基礎と応用-第4版". In: 浜松 ホトニクス株式会社 (2017), p. 337. URL: https://www.hamamatsu.com/content/dam/ hamamatsu-photonics/sites/documents/99\_SALES\_LIBRARY/etd/PMT\_handbook\_v4J. pdf.
- [15] 秋本祐希. "標準模型の素粒子". In: HIGGSTAN (2025). Accessed: 2024-12-30. URL: https/ /higgstan.com/standerd-model.
- [16] 小林隆. "T2K 実験の概要". In: KEK 素粒子原子核研究所研究紹介 (2009). URL: https: //www.jahep.org/hepnews/2009/Vol28No2-2009.7.8.9Kobayashi.pdf.