

修士論文

水ベース液体シンチレータを用いた飛跡検出器の
開発と性能評価

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

物理学第二分野 高エネルギー物理学研究室

林 洸樹

2026年2月27日



概要

ニュートリノ振動は、現在の素粒子標準模型を超える物理現象であり、多くの未解決問題が残る素粒子物理の理解を進める契機となることが期待される。この振動確率に現れる CP 位相 δ_{CP} はレプトンセクターにおける CP 対称性の破れを表すパラメータで、宇宙の物質数と反物質数の不均衡を説明する有力な候補である。ハイパーカミオカンデ (HK) 実験は、加速器で生成したニュートリノビームを直後の前置検出器と 295 km 離れた HK 検出器で観測するニュートリノ振動実験で、CP 対称性の破れを表す $\sin \delta_{CP} \neq 0$ の発見を目指す。HK 検出器が水標的を用いてニュートリノを測定するのに対して既存の前置検出器は炭素標的を用いて測定する。この標的原子核の差から大きな系統誤差が生じることが分かっており、本研究では HK 検出器と同じ水標的を用いた新たな前置検出器、水ベース液体シンチレータ検出器を開発する。本検出器は、主成分の水に液体シンチレータを界面活性剤で溶解した水ベース液体シンチレータ (Water-based Liquid Scintillator, WbLS) をアクティブな反応標的として用いることで、水とニュートリノの反応を測定できることが最大の特徴である。WbLS 検出器はこの WbLS を光反射壁でキューブ状に区切って形成したセルが 3 次元格子状に並ぶ構造をしており、各セルでの発光は内部に通された波長変換ファイバーを用いて光子を外部に伝搬した後に MPPC で検出する。この構造から荷電粒子による発光をセル毎にほとんど独立して認識可能であり、1 cm 程度の分解能で短い飛跡を検出できて全方向に同等な検出特性を持つ飛跡検出器となっている。従来の開発では読み出し光量が目標値 20 [p.e.(photon equivalent)/fiber] の 4 分の 1 程度で、セルの飛跡検出効率が 10% 以下となることが最大の課題であった。同時に隣接セルへの光漏れの割合を表すクロストーク率が 5–10% 存在して目標値の 3% より大きいことが重大な課題であった。

本研究は光量改善のために、はじめに WbLS の発光量向上に取り組んだ。次に検出器の光収集効率の最適化に取り組み、セル壁面に反射シートを貼り付けることで光量を約 2 倍向上、波長変換ファイバーの読み出しを行わない端面に反射加工を行うことで光量を約 1.64 倍向上、用いる MPPC を最適化することで光量を約 2.01 倍向上した。また光量向上とクロストーク抑制のためにファイバーの直径を 1 mm から 2 mm に変更する方法を試行して、この時の検出器の光量の変化を測定およびシミュレーションから評価した。同時に本研究は上記の測定結果を分析することで、検出器の性能をシミュレーションする際の最大の不確定要素であったセル壁面の反射率を推定し、反射シートによる改善後の壁面反射率は 100% に近いと評価した。ここで求めた反射率を用いたシミュレーションから検出器の飛跡検出効率が目標水準にあると推定した。

光量とクロストークで改善が期待できることから、本研究は京都大学 化学研究所および高エネルギー加速器研究機構において電子ビームを用いた WbLS 検出器試作機の性能評価テストを実施した。反射シートや読み出しファイバー直径を変更した 3 種類の試作機について性能を調べて、試作機の光量は最大 35.3 [p.e./fiber] となり目標値の 1.5 倍以上の光量を達成した。クロストーク率について、読み出しに 2 mm のファイバーを用いたサンプルは約 2.9% となり目標の 3% 以下を達成した。また本テストでは光量やクロストーク率がセル内の粒子の通過位置によって変動する傾向を明らかにした。

次にビームテストの測定光量に基づき、WbLS 検出器の粒子検出性能をシミュレーションで評価して、セルの飛跡検出性能は 95% 程度で実用水準にあり、飛跡の dE/dx による陽子と π^+ の識別効率はそれぞれ 98.7%、97.1% となり十分な性能を持つことを確かめた。以上から、WbLS 検出器が飛跡検出器として実用水準の粒子検出性能を持つことを示した。

目次

第1章	ニュートリノ振動	1
1.1	ニュートリノの概要	1
1.2	ニュートリノ振動の記述	1
1.3	物質効果	3
1.4	ニュートリノ振動測定の現状と最新結果	4
1.5	ニュートリノ振動に関する未解決問題	5
第2章	ハイパーカミオカンデ実験	8
2.1	ニュートリノ振動測定の概要	8
2.2	ニュートリノビームの生成	8
2.2.1	J-PARC 加速器	8
2.2.2	Off-Axis 法	10
2.3	前置検出器	10
2.3.1	INGRID : Interactive Neutrino GRID	10
2.3.2	ND280	11
2.3.3	IWCD : Intermediate Water Cherenkov Detector	12
2.4	後置検出器ハイパーカミオカンデ	13
2.5	期待される感度	14
2.6	ニュートリノと原子核の反応	15
2.6.1	自由核子とニュートリノの反応	15
2.6.2	ニュートリノ反応における原子核の効果	17
第3章	水ベース液体シンチレータを用いた飛跡検出器	21
3.1	検出器の概要	21
3.1.1	検出器の目的	21
3.1.2	検出器の基本構造	21
3.1.3	検出器の要求	22
3.2	検出器の構成要素	24
3.2.1	水ベース液体シンチレータ	24
3.2.2	検出器のセル	25
3.2.3	波長変換ファイバー	25
3.2.4	MPPC : Multi-Pixel Photon Counter	26
3.3	従来の課題と本研究の方針	28

第4章	水ベース液体シンチレータの開発	29
4.1	水ベース液体シンチレータの開発方針	29
4.2	水ベース液体シンチレータ成分と溶解温度の評価	30
4.2.1	界面活性剤使用比率を変更したサンプルの評価	30
4.2.2	液体シンチレータの成分比率を変更したサンプルの評価	32
4.2.3	溶解温度帯理解の現状	33
4.3	液体シンチレータ成分比率の光量への影響	33
4.3.1	測定方法	33
4.3.2	測定結果	35
4.4	界面活性剤および溶媒の評価	36
4.4.1	界面活性剤の種類を変更したサンプルの評価	37
4.4.2	液体シンチレータ溶媒を変更したサンプルの評価	38
4.5	章のまとめ	39
第5章	検出器セルにおける光収集効率の向上	40
5.1	セルの光収集効率を高める方法の検討	40
5.1.1	反射シートの性能評価	40
5.2	Tyvekシートを用いたセルの光量測定	42
5.2.1	測定サンプル	42
5.2.2	測定方法	43
5.2.3	結果と考察	45
5.2.4	反射シート表面構造の分析	47
5.3	多様な反射加工を用いたセルの光量測定	47
5.3.1	測定サンプル	47
5.3.2	測定方法	52
5.3.3	結果と考察	53
5.3.4	セルの光量測定のまとめ	53
5.4	サイズ1 cmのセルにおける光量のシミュレーション	55
5.4.1	Geant4シミュレーションの構成	55
5.4.2	サイズ1 cmのセルにおける検出光量の推定	55
5.4.3	サイズ1 cmのWbLS検出器セルにおける光量増加率の見積もり	57
5.4.4	シミュレーションのまとめ	58
5.5	章のまとめ	58
第6章	波長変換ファイバーとMPPCにおける光収集効率の向上	60
6.1	ファイバー端面での光反射の効果測定	60
6.1.1	光量への影響の評価	60
6.1.2	測定のセットアップ	62
6.1.3	測定結果と考察	65
6.1.4	ファイバー先端での反射体を用いない光反射	67
6.1.5	ファイバー端面での光反射効果のまとめ	69

6.2	ファイバーごとに異なる端面加工を行う方法	69
6.2.1	両端で読み出す効果	69
6.2.2	ファイバーごとに異なる加工法を行った際の光量	69
6.3	MPPCの改善	70
6.3.1	MPPCの選定	70
6.3.2	クロストークおよびアフターパルスの影響評価	71
6.3.3	検出光子数の飽和効果	73
6.3.4	光子検出効率 (PDE) の評価	75
6.3.5	ファイバーとMPPCの光学的接続についての検討	76
6.3.6	MPPC改善のまとめ	77
6.4	直径2 mmのファイバーを用いたサンプルの光量測定	77
6.4.1	セル内での光収集効率	77
6.4.2	非読み出し端面での光反射効果の測定	80
6.4.3	吸収長の効果および輸送効率の評価	80
6.4.4	直径2 mmのファイバーを用いたサンプルの光量	82
6.5	章のまとめ	83
第7章	検出器の基本性能の評価	84
7.1	壁面反射率の評価	84
7.1.1	評価方法	84
7.1.2	反射率評価の結果	85
7.2	読み出し光量の推定	86
7.2.1	これまでの開発における光量改善	87
7.2.2	検出器光量の評価	88
7.2.3	期待される検出器性能と開発方針	89
7.3	章のまとめ	89
第8章	化研ビームラインにおける試作機の性能評価	90
8.1	ビームテストの概要	90
8.1.1	ビームテストの目標	90
8.1.2	ビームライン	90
8.2	測定方法	91
8.2.1	検出器のセットアップ	91
8.2.2	イベント選択と光量の較正	93
8.2.3	測定データの光量補正	94
8.3	測定結果と解析	95
8.3.1	試作機におけるクロストーク	95
8.3.2	試作機セルの検出光量	96
8.4	結論	98

第 9 章	KEK ビームラインにおける試作機の性能評価	100
9.1	ビームテストの概要	100
9.1.1	ビームテストの目標	100
9.1.2	ビームライン	100
9.2	測定方法	101
9.2.1	セットアップ	101
9.2.2	イベント選択	103
9.2.3	MPPC の較正と光量の補正	104
9.3	測定結果と解析	105
9.3.1	試作機の光量	105
9.3.2	セル中の粒子通過位置と光量の関係	107
9.3.3	試作機のクロストーク率	109
9.3.4	セル中の粒子通過位置とクロストーク率の関係	110
9.3.5	ファイバー中を通過する荷電粒子の発光	112
9.4	結論	112
第 10 章	粒子検出能力の評価	114
10.1	セルの飛跡検出効率の評価	114
10.1.1	飛跡検出効率の見積もり	114
10.1.2	光量と飛跡検出効率	116
10.2	エネルギー損失による粒子識別	117
10.2.1	陽子とパイオンの識別	117
10.2.2	dE/dx による飛跡中の MIP 粒子数識別	120
10.3	章のまとめ	121
第 11 章	検出器の実現に向けた検討	122
11.1	検出器構造に関する検討	122
11.1.1	3D プリンターの薄い構造の造形能力	122
11.1.2	セルに残る気泡	123
11.2	検出器の長期安定性の検討	124
11.2.1	水ベース液体シンチレータによる構造の溶解	124
11.2.2	水ベース液体シンチレータの再溶解	125
11.3	課題のまとめと展望	125
第 12 章	結論	127
	謝辞	129
	付録 A 酸素原子核と炭素原子核モデルの比較	130
	付録 B PMT (H7415) の動作安定性試験	132

付録 C 界面活性剤の評価	134
C.1 界面活性剤の溶解能力の評価測定 1	134
C.2 界面活性剤の溶解能力の評価測定 2	135
付録 D 液体シンチレータ溶媒の評価	136
D.1 用いた溶媒の詳細	136
D.2 溶解量の評価	136
付録 E 反射シートの性能評価の方法	138
付録 F セルの品質による光量変動の効果	140
付録 G S-LS-R および S-3M-SR サンプルにおける測定バイアスの検討	142
付録 H シミュレーションの補足	143
H.1 セル模型に対する WbLS 検出器セルの光量比のモデル化	143
H.2 セル壁面の反射率とセルの光収集効率のモデル化	144
H.3 直径 2 mm のファイバーによる光収集効率の増加率のモデル化	145
付録 I ファイバーでの光量の減衰	146
付録 J 飽和効果による分解能の悪化	148
付録 K ファイバーと MPPC 接続の安定性の測定	149
付録 L 多様な方法の反射率評価	152
L.1 ファイバー直径の変更による光量差のみ用いた推定	152
L.2 ファイバー端面での反射に基づく壁面反射率評価	152
付録 M シミュレーションに基づく光量推定	155
表目次	156
図目次	158
参考文献	163

第1章 ニュートリノ振動

本章では、素粒子標準模型におけるニュートリノとそのニュートリノ振動現象の概要を述べる。

1.1 ニュートリノの概要

ニュートリノは素粒子標準模型を構成する素粒子の一種であり物質粒子およびレプトンに分類される。種類は e, μ, τ の3世代について反粒子を含めた計6種類が存在する。電荷は持たず弱い相互作用によってのみ他の物質と相互作用する^{*1}。

1930年、W. E. Pauliは β 崩壊から生じる電子のエネルギーが一意に定まらないことから中性粒子の存在を予言した^[1]。やがてこの粒子はニュートリノと名付けられ、1956年F. ReinesとC. L. Cowanによる原子炉を用いた実験によりその存在を初めて確かめられた^[2]。1962年、L. M. Ledermanらにより新たにミューニュートリノ(ν_μ)の存在が示されて^[3]、2001年にはDONUT(Direct Observation of ν Tau)実験における原子核乾板を用いた観測によりタウニュートリノ(ν_τ)が発見された^[4]。ニュートリノは長年質量を持たないと考えられてきたが、1998年スーパーカミオカンデを用いた観測によりニュートリノ振動が発見されて、僅かに質量を持つことが確かめられた^[5]。

1.2 ニュートリノ振動の記述

ニュートリノ振動とは、ニュートリノが時間経過と共にその種類(e, μ, τ , フレーバー)を変える現象である。これはニュートリノが0でない質量を持つ場合に起こるが、右巻きのニュートリノ(左巻きの反ニュートリノ)が観測されていないことから標準模型においてニュートリノは他の物質粒子と同じ方法で質量を獲得することが出来ず、標準模型の不完全さを示唆する現象であった。

はじめに、真空中でのニュートリノ振動の定式化を行う。ニュートリノには荷電レプトン(e, μ, τ)と弱い相互作用で結合する際のフレーバー固有状態 $\{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau\}$ および質量固有状態 $\{\nu_1, \nu_2, \nu_3\}$ の2つが存在するが、この2つの状態の基底変換は

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

と書けて、ここで U_{PMNS} はPontecorvo-牧-中川-坂田(PMNS)行列と呼ばれる 3×3 のユニタリ行

^{*1} 重力相互作用を除く。

列である。反ニュートリノの場合はこの複素共役を用いて

$$\begin{pmatrix} \bar{\nu}_e \\ \bar{\nu}_\mu \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}}^* \begin{pmatrix} \bar{\nu}_1 \\ \bar{\nu}_2 \\ \bar{\nu}_3 \end{pmatrix}$$

と表すことができる。また U_{PMNS} は 3 世代間に定義された混合角 θ_{12} , θ_{23} , θ_{31} および複素位相 δ_{CP} を用いて以下のように表示できる。

$$\begin{aligned} U_{\text{PMNS}} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{\text{CP}}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{\text{CP}}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

ここで $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ である。ここで $\sin\delta_{\text{CP}} \neq 0$ であるとき、 U_{PMNS} は複素成分を持ち $U_{\text{PMNS}} \neq U_{\text{PMNS}}^*$ となるからニュートリノと反ニュートリノで混合行列に違いが生じるが、これが粒子と反粒子の対称性である CP 対称性を破ることから δ_{CP} はレプトン CP 位相と呼ばれる。

次にニュートリノ質量固有状態の時間発展を自然単位系で考える。ここで $\{\nu_1, \nu_2, \nu_3\}$ に対応する質量固有値を $\{m_1, m_2, m_3\}$ と定義する。平面波解を仮定すれば、運動量 \vec{p} を持つ状態 $|\nu_i\rangle$ ($i = 1, 2, 3$) の時刻 $t_0 = 0$ から t までの時間発展はそのエネルギー E を用いて、

$$|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(Et - \vec{p}\cdot\vec{x})} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.1)$$

ニュートリノの質量は小さいから相対論的極限を考える。 $E \sim |\vec{p}|$ 、 $m_i \ll |\vec{p}|$ の近似を用いると、

$$E = \sqrt{m_i^2 + \vec{p}\cdot\vec{p}} \sim |\vec{p}| + \frac{m_i^2}{2E} \quad (1.2)$$

運動量方向の進行距離を L とすると、 $L \sim t \cdot c = t$ であるから、

$$|\nu_i(L)\rangle = e^{-i\frac{m_i^2 L}{2E}} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.3)$$

と書ける。これを用いるとエネルギー E でフレーバー固有状態 ν_α ($\alpha = e, \mu, \tau$) のニュートリノが距離 L 進んだ状態は次のように書けて*2、

$$|\nu_\alpha(L, E)\rangle = \sum_{i=1,2,3} U_{\alpha i}^* e^{-i\frac{m_i^2 L}{2E}} |\nu_i(0)\rangle \quad (1.4)$$

*2 U_{PMNS} を U と略記する。

ニュートリノ振動確率 $P_{\alpha \rightarrow \beta}(L, E)$ は、

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha \rightarrow \beta}(L, E) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L, E) \rangle|^2 \\
 &= \left| \sum_{i,j} U_{\beta j} U_{\alpha i}^* e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} \langle \nu_j | \nu_i(0) \rangle \right|^2 \\
 &= \left| \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-i \frac{m_i^2 L}{2E}} \right|^2 \\
 &= \sum_{i,j} U_{\beta j}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\alpha i} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \\
 &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}[U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta i} U_{\beta j}] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) + 2 \sum_{i>j} \text{Im}[U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} U_{\beta i} U_{\beta j}] \sin \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E} \right)
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

と書ける。ここで質量二乗差 $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$ を定義した。反ニュートリノの場合は U を U^* に変換すればよく、これは第 3 項の符号反転に対応する。第 2 項と第 3 項は振動効果を記述しておりこの和が 0 のときニュートリノ振動が起こらないことを意味する。ここで全ての $i > j$ で $\Delta m_{ij}^2 = 0$ ならば、ニュートリノ振動は起こらないことが分かる。また U_{PMNS} が対角行列であれば和の中で $U_{\alpha i}^* U_{\alpha j} = 0$ であるからやはりニュートリノ振動は起こらない。

1.3 物質効果

前節では真空中におけるニュートリノ振動の定式化を行ったが、実際の振動測定では物質中を進む際のポテンシャルによる振動確率の変化を考慮する必要がある。この効果を物質効果とよび、1978 年に L. Wolfenstein により定式化され^[6]、1985 年には S.P. Mikheyev と A. Yu. Smirnov により太陽ニュートリノにおいて振動効果を強める効果がある可能性が示された^[7]。この物質効果は Z ボソンと W ボソンを媒介するものが存在するが、Z ボソンは全てのフレーバーのニュートリノと相互作用するためニュートリノ振動では無視できて、図 1.1 のような W ボソンの効果を考えれば良い。これは電子ニュートリノでのみ生じて、以下に示す追加ポテンシャル $V(x)$ と同値である。

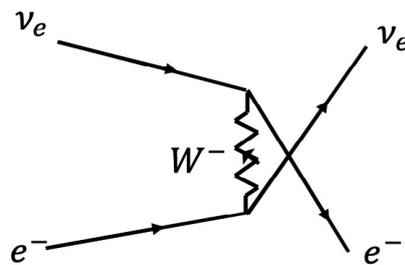


図 1.1: W ボソンを媒介する物質効果のダイアグラム

$$V(x) = \sqrt{2}G_F n_e(x)$$

ここで G_F はフェルミ結合定数、 n_e は物質中の電子数密度を表す。1.5 式に示す振動確率は第 3 項のみ Δm_{ij}^2 の正負で符号が反転するため Δm_{ij}^2 の符号情報を含む。物質効果がこの振動項を強調することで、 Δm_{ij}^2 に感度のある測定が可能となる場合がある。

1.4 ニュートリノ振動測定の実況と最新結果

ニュートリノ振動の発見以降、様々な実験でニュートリノ振動パラメータの測定が行われてきた。ここで各パラメータについて測定方法の概要および最新の結果をまとめる。

$\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ の測定

スーパーカミオカンデ実験、SNO (Sudbury Neutrino Observation) 実験による太陽ニュートリノの観測および KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector) 実験による原子炉ニュートリノの観測によって測定される。基線長が数百 km でエネルギー数 MeV のニュートリノを用いる原子炉ニュートリノ実験では、 $\bar{\nu}_e$ の生存確率 $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ は以下のように近似できる^{*3}。

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right)$$

このように振動確率のエネルギー依存性とその振幅から $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ を測定可能である。また太陽ニュートリノに現れる物質効果を利用することで、 Δm_{21}^2 の符号は正であることが分かっている [8]。

$\theta_{23}, |\Delta m_{32}^2|$ の測定

スーパーカミオカンデ実験による大気ニュートリノの観測および T2K (Tokai to Kamioka) 実験、NO ν A (NuMI Off-axis ν_e Appearance) 実験などの長基線ニュートリノ振動実験によって測定される。 ν_μ の生存確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ は以下のように近似できる^{*4}。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right)$$

このようにして同様に振動確率のエネルギー依存性とその振幅から $\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$ を測定可能である。

^{*3} ν_e から ν_τ への振動はより短い距離周期で起こるが混合角が小さいことで主要な寄与にならない。

^{*4} 混合角 θ_{23} と θ_{12} は大きさが同じ程度だが、 $\Delta m_{32}^2 \gg \Delta m_{21}^2$ であり、 ν_μ から ν_e への振動は無視できる。

θ_{13} の測定

T2K 実験や NO ν A 実験などの長基線ニュートリノ振動実験および Daya-Bay 実験による原子炉ニュートリノの観測で測定される。基線長数 km で数 MeV のニュートリノを用いる Daya-Bay 実験では、 $\bar{\nu}_e$ の生存確率 $P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e)$ は以下のように近似できる^{*5}。

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right)$$

このようにして振動確率の振幅から θ_{13} を測定可能である。

δ_{CP} の測定

振動確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ と $P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e)$ の差は以下のように表せて、

$$\begin{aligned} P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) - P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \\ 2 \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \cos \theta_{13} \sin \delta_{\text{CP}} \sin \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right) \sin \left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right) \end{aligned}$$

ここから $\sin \delta_{\text{CP}}$ を測定することができる。ただし T2K 実験など長基線ニュートリノ振動実験における δ_{CP} の測定では、物質効果の補正を考慮する必要がある。

測定の最新結果

これまでに測定されたニュートリノ振動パラメータを表 1.1 に示す。一部のパラメータは値を質量階層性ごとに示しており、ここで順階層 (Normal Hierarchy, NH) は $m_3 > m_2 > m_1$ 、逆階層 (Inverted Hierarchy, IH) は $m_2 > m_1 > m_3$ の場合を表す。また Δm_{3l}^2 は、 Δm_{31}^2 (NH), Δm_{32}^2 (IH) を表す。

1.5 ニュートリノ振動に関する未解決問題

ニュートリノ振動に関連する主要な未解決問題を述べる。

レプトン CP 対称性の破れ

前述したように $\delta_{\text{CP}} \neq 0, \pi$ であるとき、 U_{PMNS} に複素位相が現れてニュートリノと反ニュートリノの混合行列に差が生じる。これをレプトン CP 対称性の破れとよぶ。現在 T2K 実験は $\delta_{\text{CP}} \neq 0, \pi$ を有意度 90% 以上で示しているが^[12] 未だその発見には至っていない。レプトン CP 対称性の破れは宇宙の粒子・反粒子数不均衡を説明するのに必要な CP 対称性破れの有力候補であり、 δ_{CP} は現代のニュートリノ物理学における重要な測定対象である。

^{*5} $\Delta m_{31}^2 \sim 100 \times \Delta m_{21}^2$ であるため約 10 倍小さい混合角の効果打ち消して、 $e \rightarrow \tau$ 振動が主要となる。

表 1.1: ニュートリノ振動パラメータの測定値 [9][10][11]

振動パラメータ (階層)	測定値 [単位]
$\sin^2 \theta_{12}$ (NH,IH)	$3.07 \pm 0.12 [10^{-1}]$
$\sin^2 \theta_{23}$ (NH)	$4.70^{+0.17}_{-0.13} [10^{-1}]$
$\sin^2 \theta_{23}$ (IH)	$5.50^{+0.12}_{-0.15} [10^{-1}]$
$\sin^2 \theta_{13}$ (NH)	$2.23^{+0.07}_{-0.06} [10^{-2}]$
$\sin^2 \theta_{13}$ (IH)	$2.23^{+0.06}_{-0.06} [10^{-2}]$
Δm_{21}^2 (NH, IH)	$7.36^{+0.16}_{-0.15} [10^{-5} \text{ eV}]$
Δm_{3l}^2 (NH)	$2.51^{+0.021}_{-0.019} [10^{-3} \text{ eV}]$
Δm_{3l}^2 (IH)	$-2.48^{+0.02}_{-0.02} [10^{-3} \text{ eV}]$
δ_{CP} (NH)	$1.24^{+0.18}_{-0.13} [\pi]$
δ_{CP} (IH)	$1.52^{+0.14}_{-0.15} [\pi]$

ビッグバン宇宙論では宇宙のはじめに同数の粒子と反粒子が生じたとされるが、現代の宇宙は粒子数が支配的である。この違いが生じるには初期宇宙においてバリオン数を破る過程が必要だが、このためには (1) バリオン数の破れ、(2) C,CP の破れ、(3) 熱的非平衡、の 3 つの条件が必要であり、これを Sakharov の 3 条件とよぶ [13]。(2) の CP 対称性の破れについて、小林益川理論として既に知られているクォークセクターの破れは小さく現代宇宙の粒子・反粒子数不均衡を説明するには不十分と考えられており、異なる CP 破れの起源が必要である。

ここでレプトン CP 位相 δ_{CP} が重い 1 重項の右巻きニュートリノ N_R およびヒッグスとレプトンの湯川結合における CP の破れと関連する理論があるが [14]、ここで右巻きニュートリノの崩壊過程 $N_R \rightarrow \phi + l$ を考えると、宇宙温度が右巻きニュートリノの質量に近くなった段階で熱浴から脱して有限のレプトン数を生成する (レプトジェネシス)。このレプトン数がバリオン数に変換することで、粒子数が優勢な宇宙を作ることが可能とされている。

質量階層性問題

ニュートリノ質量について $m_2 > m_1$ であることは太陽ニュートリノの測定から分かっているが、その他の質量については絶対値および大小関係が定まっておらず、前述のとおり NH ($m_3 > m_2 > m_1$) と IH ($m_2 > m_1 > m_3$) となる可能性が存在している。 $|\Delta m_{32}^2|$ は測定されているが、これと Δm_{21}^2 を用いて Δm_{31}^2 を計算すると、階層性によって値が大きく異なってしまう。例えば T2K 実験におけるニュートリノ振動確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ への物質効果の補正は、この Δm_{31}^2 の値に依存することから、階層性が δ_{CP} の測定に影響を与える。そのため一般に δ_{CP} の測定値は質量階層性ごとに計算される。

Global fit によると NH が 2.5σ 程度で好まれるが [15]、未だその確定には至っていない。この階層性を決定するには DUNE 実験のように約 1300 km の超長基線ニュートリノ振動測定を行う、CMB の観測によりニュートリノ質量和に上限 m_{tot} に制限を与えるなどの方法があり、将来的な階層性の決定が期待されている。

θ_{23} のオクタント

θ_{23} の Global fit^[11] は、 $43.3_{-0.8}^{+1.0}$ [°] (NH)、 $47.9_{-0.9}^{+0.7}$ [°] (IH) と最大の混合である 45° に近いことから、レプトンの世代間における対称性の存在が示唆されている^[16]。現在最大混合 $\theta_{23} = 45^\circ$ は 1σ の範囲外だが 3σ の範囲では無矛盾であり、さらなる測定精度の向上が求められる。

第2章 ハイパーカミオカンデ実験

ハイパーカミオカンデ実験（HK 実験）は 2028 年からの稼働を目指す世界最大の地下水チェレンコフ検出器、HK 検出器を用いた実験である。本実験は大気ニュートリノの測定、超新星ニュートリノの測定、太陽ニュートリノの測定、陽子崩壊の探索など様々な物理の測定を目標としており、その主目標の1つがニュートリノ振動確率の測定である^[17]。本研究はこのニュートリノ振動測定で用いる新検出器の開発を行っており、ニュートリノ振動測定の概要を以下で述べる。

2.1 ニュートリノ振動測定の概要

HK 実験では、図 2.1 のように茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設（J-PARC）で生成した $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ ビームを生成地点から 1 km 以内の前置検出器および 295km 離れた岐阜県飛騨市の後置検出器（HK 検出器）の 2 点で測定することでニュートリノ振動確率を測定する^[17]。HK 検出器においてニュートリノビーム中の $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ 消失傾向および $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 出現傾向を捉えることで $|\Delta m_{23}^2|$, θ_{23} , θ_{13} , δ_{CP} を測定する。HK 実験は T2K 実験の後継の立ち位置にあり、ニュートリノ生成に用



図 2.1: ハイパーカミオカンデ実験の概要

いるビームラインおよび一部の前置検出器（ND280、INGRID）を引き継いで用いる。

2.2 ニュートリノビームの生成

2.2.1 J-PARC 加速器

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) 加速器は図 2.2 のように、LINAC (LINear ACcelerator)、RCS (Rapid Cycling Synchrotron)、MR (Main Ring) の 3 台で構成されており、各加速器において段階的に加速された陽子を 30 GeV のエネルギーで炭素標的へ照射することで荷電 π 中間子を生成する。ここで生成した π 中間子のフラックスを電磁ホーンによっ



図 2.2: J-PARC 加速器の概要

て収束し、2.1 式の崩壊を利用することでニュートリノビームを生成する。



ここで電磁ホーンに流す電流の正負を切り替えることで収束させる π 中間子の電荷を選択できて、高純度の ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) ビームを生成可能である。ただし図 2.3 のように^{*6}、ホーンによる選別が完全でないことから ν_μ ($\bar{\nu}_\mu$) ビームに $\bar{\nu}_\mu$ (ν_μ) が数% 程度混入して、また終状態 μ の崩壊 ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

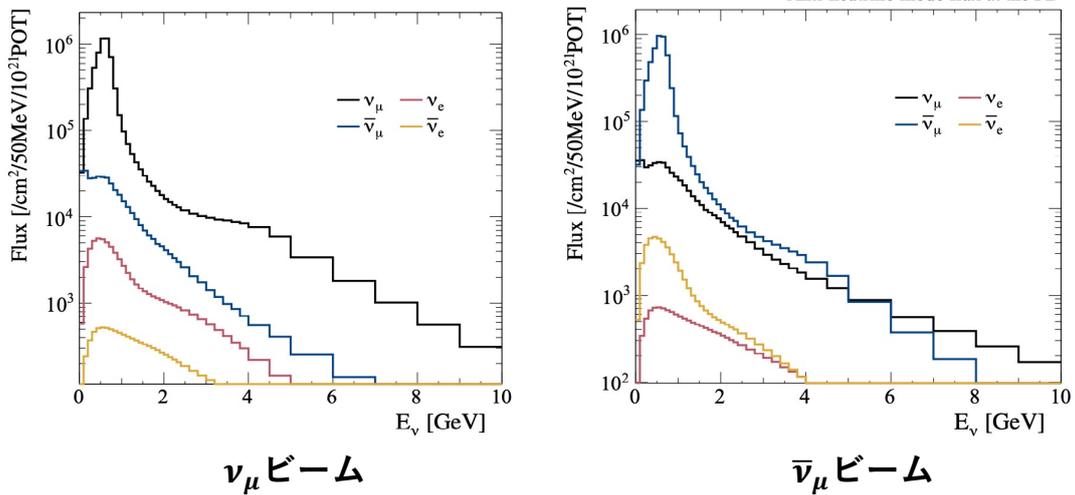


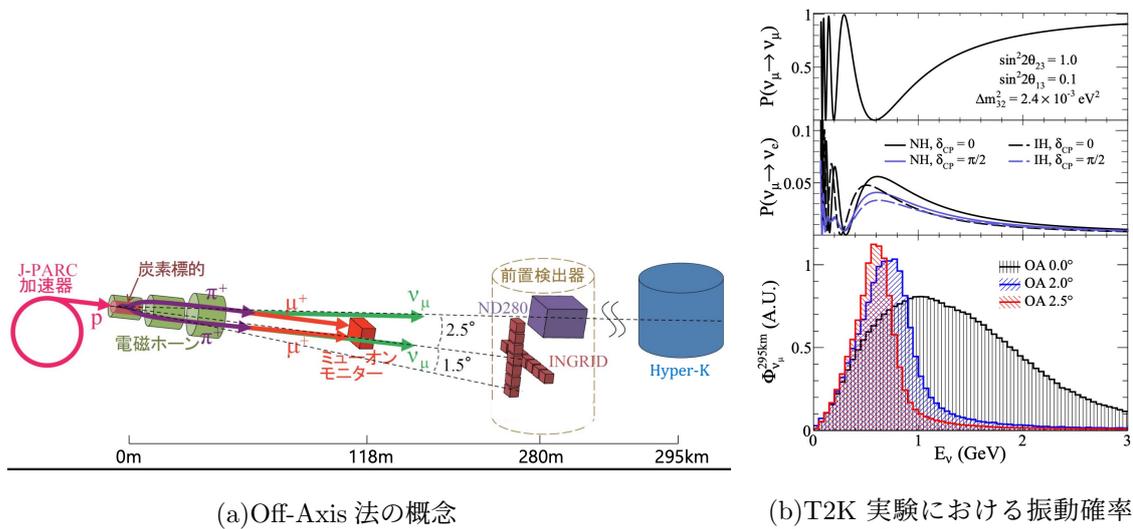
図 2.3: ニュートリノビームの内訳 [18]

、 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$) や炭素標的から生じる K 粒子の崩壊により $\nu_e, \bar{\nu}_e$ が 1% 程度混入する。測定ではこれらの識別が重要である。

^{*6} T2K 実験のニュートリノビームデータを参照した。

2.2.2 Off-Axis 法

ニュートリノ振動確率はニュートリノエネルギー E_ν に依存するため、この不定性を抑制することが重要である。HK 実験は図 2.4 のようにニュートリノビーム中心から 2.5° ずらした (Off-axis 角 2.5°) 延長線上に前置検出器^{*7}および後置検出器を設置して測定を行うことで、 $E_\nu < 1$ GeV の範囲で狭いエネルギー幅のニュートリノビームを実現する。この手法を Off-Axis 法と呼ぶ。



(a)Off-Axis 法の概念

(b)T2K 実験における振動確率 (上、中央) とニュートリノのエネルギー分布 (下) [19]

図 2.4: Off-Axis 法

2.3 前置検出器

HK 実験において、前置検出器は生成直後のニュートリノビームの性質およびニュートリノ反応断面積を測定するために設置される。主に以下に述べる 3 つの検出器で構成される。

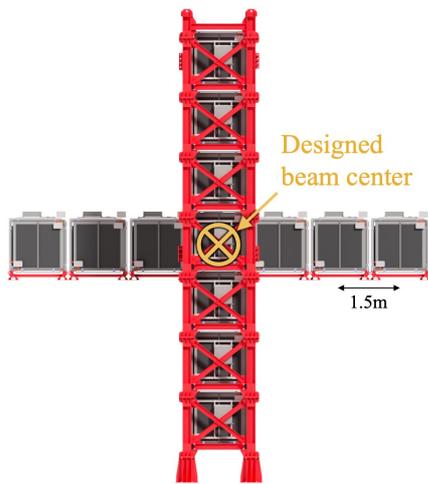
2.3.1 INGRID : Interactive Neutrino GRID

INGRID (Interactive Neutrino GRID) はニュートリノビーム中心軸 (on-axis) にある検出器であり、ニュートリノビームの安定性と方向をリアルタイムで監視する。ビーム中心から開く角度 (off-axis 角) に依存するニュートリノビームのエネルギー分布が、各検出器の存在地点で一定であることを保証する [20]。

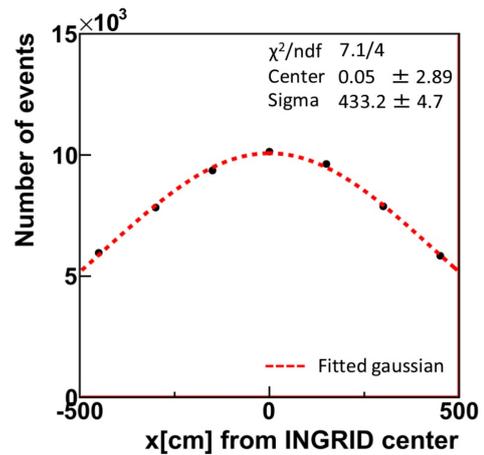
INGRID は図 2.5(a) に示すように、水平および鉛直方向に 7 台ずつ計 14 台の INGRID モジュールを設置した構造をしており、各モジュールでのニュートリノ検出数を比較することで図 2.5(b) のようにニュートリノビームの方向を測定する^{*8}。

*7 後述の INGRID を除く。

*8 データは T2K 実験における INGRID の解析データより引用した。



(a)INGRID の構造



(b)INGRID で測定したニュートリノビームプロファイル [20]

図 2.5: INGRID 検出器の概要

2.3.2 ND280

ND280 はニュートリノ生成点から約 280 m 離れた地点で Off-axis 角 2.5° の位置に設置されたニュートリノ検出器で、マグネットと複数のサブ検出機を組み合わせたニュートリノ反応の精密測定を目的とする [21]。

ND280 の構造は図 2.6 に示す通りで、外部を覆うマグネットおよび SuperFGD (Super Fine Grained Detector) [22]、TPC (Time Projection Chamber) [23]、HA-TPC (High Angle TPC) [22]、FGD (Fine Grained Detector) [24]、ECAL (Electromagnetic Calorimeter) [25]、SMRD (Side Muon Range Detector) [26]、TOF (Time Of Flight) [22] といった検出器群で構成される。約 0.2

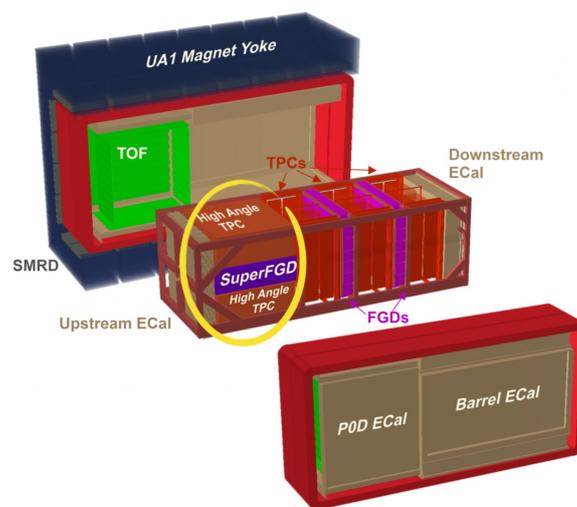


図 2.6: ND280 の概要

T の磁場を印加することで荷電レプトンの電荷から $\nu / \bar{\nu}$ の反応を区別できて、また TPC および

HA-TPCにおける荷電粒子の正確なエネルギー測定からニュートリノエネルギーを精密に再構成できる。

HK実験ではFGDやTPCsといった下流の検出器群のアップグレードが計画されており、本研究はこのために新型検出器の開発を行う。以下で本研究の目的と関わる2つの検出器FGDおよびSuperFGDの概要を見る。

FGD

FGDは図2.7のように $0.96\text{ cm} \times 0.96\text{ cm} \times 186\text{ cm}$ の直方体棒状シンレータを鉛直方向および水平方向に並べた層を組み合わせた検出器で、FGD1と中間に水の層を加えたFGD2が存在する。両者に共通して大角度に散乱する荷電粒子の検出が難しいこと、特に低エネルギーで生じる陽子飛跡の検出が難しいことが課題となる^[31]。

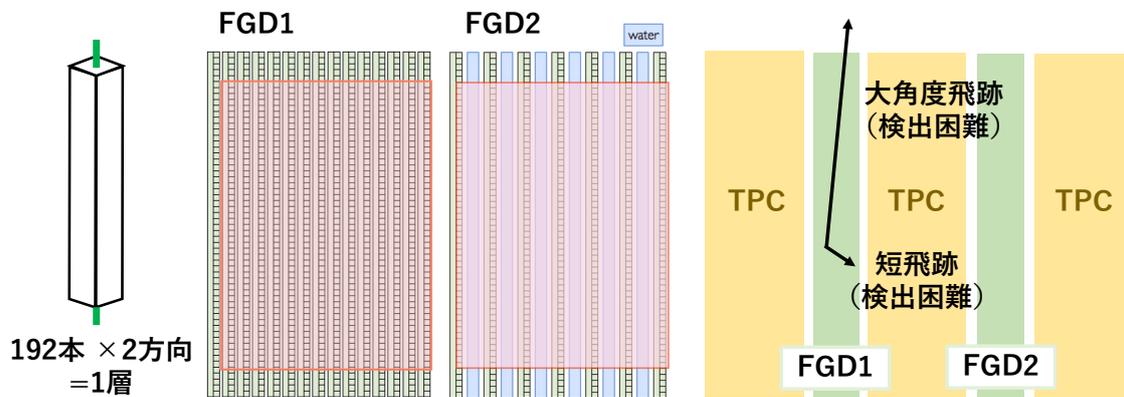


図 2.7: FGD の概要 (図を^[27]より引用)

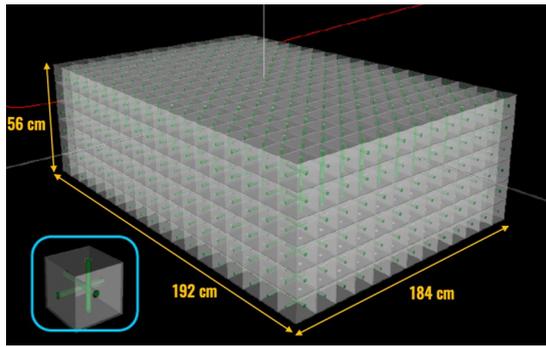
SuperFGD

SuperFGDは図2.8(a)のように $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のシンレータキューブを $56 \times 192 \times 182 \sim 200$ 万積み重ねた構造の検出器で、各シンレータキューブには3方向に光輸送ファイバー^{*9}が通されており、各ファイバーを通して検出器側面で光を読み出すことで図2.8(b)のように3方向への飛跡の射影を 1 cm 程度の分解能で得ることができる。全方位に対称な検出器構造から大角度散乱粒子へ高い検出効率を持ち、キューブ単体で飛跡位置を特定できるから従来よりも高い位置分解能となっている。本研究が開発する新型検出器の基本構造はSuperFGDをモデルとする。

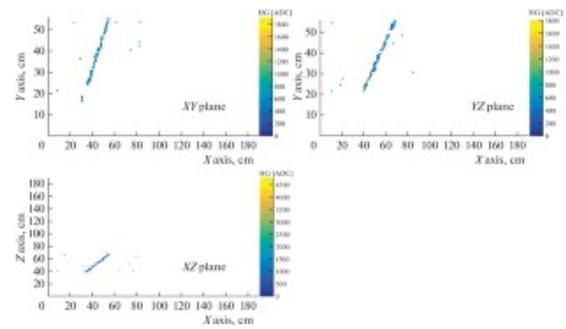
2.3.3 IWCD : Intermediate Water Cherenkov Detector

IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector) はニュートリノ生成点から約 1 km 離れた地点で、Off-axis角 $1\text{--}4^\circ$ の位置に設置された小型の水チェレンコフ検出器で、電子ニュートリノ反応断面積およびバックグラウンドの測定を目的とする^[21]。

^{*9} 後の章で説明する波長変換ファイバーと同じ。



(a) SuperFGD の構造



(b) 3 方向への飛跡の射影 [28]

図 2.8: SuperFGD の概要

IWCD 検出器は図 2.9 のように 300 トン規模の水槽の壁面に multi-PMT を 500 本程度並べた構造をしており、これは 2.4 節で後述する後置検出器ハイパーカミオカンデと同様である。ニュー

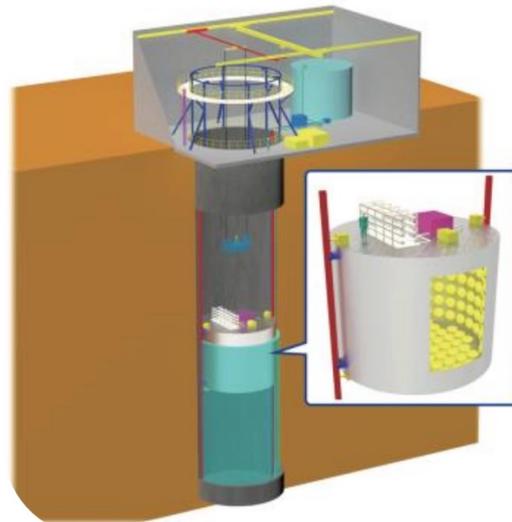


図 2.9: IWCD 検出器の構造

トリノ反応から生じる μ と e を見分けることで電子ニュートリノ反応断面積を測定できて、この IWCD 検出器が上下に移動することで Off-axis 角 $1-4^\circ$ の範囲でニュートリノビームのエネルギー分布を変更しながら、広いエネルギー範囲のニュートリノ反応を測定可能である^{*10}。

2.4 後置検出器ハイパーカミオカンデ

HK 実験では HK 検出器を後置検出器として用いるが、これはニュートリノ生成点から約 295 km 離れた地点で Off-axis 角 2.5° の位置にある。HK 検出器は図 2.10(a) のように直径 69 m、高さ 71 m の円筒形状をした水槽であり地下 650 m に位置することで宇宙線のバックグラウンドを抑制している。検出器は外水槽と内水槽の 2 重構造となっておりそれぞれの壁面に光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) が並べられており、検出器内部で荷電粒子が生じたチェレンコフ

*10 また各 Off-axis 角の測定データを差し引くことで、ニュートリノ反応断面積のエネルギー依存性を測定できる

光を検出することができる。ここで外水槽の観測情報は宇宙線など外部から侵入する荷電粒子を検出、識別するために用いられる。

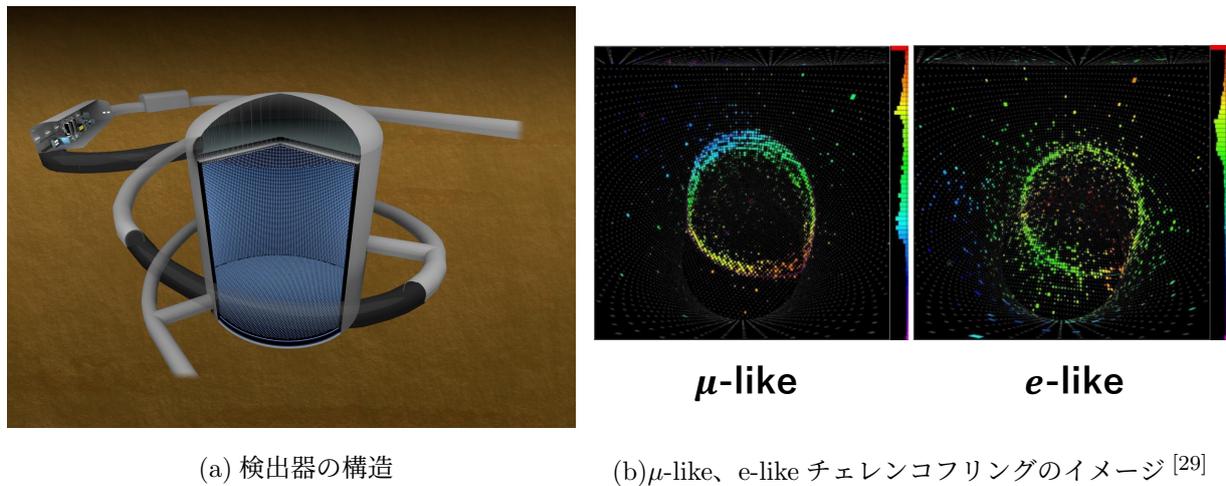


図 2.10: ハイパーカミオカンデ検出器の概要

このチェレンコフ光は図 2.10(b) に示すように^{*11}ニュートリノ反応から生じる μ と e で異なる形状を示すため、99%以上の精度で $\nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ と $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ 反応を識別可能である。中性子は水中に溶解されたガドリニウムとの2次反応により生じるガンマ線を利用することで75%程度の効率で検出できて [32]、ニュートリノ反応 ($\nu + n \rightarrow l^- + p$) と反ニュートリノ反応 ($\bar{\nu} + p \rightarrow l^+ + n$) を一定の割合で識別できる。ただし粒子反粒子の関係にある $\nu_\mu(\nu_e)$ と $\bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_e)$ の荷電カレント反応をチェレンコフ光から直接区別できない。また基本的に陽子はチェレンコフ光を発さないから検出できず^{*12}、中性子のエネルギー再構成は難しい。このような特徴からニュートリノ反応の精密測定が難しく、前置検出器における高精度な測定が重要となる。

2.5 期待される感度

HK 実験が測定する最も重要な物理パラメータの1つである δ_{CP} に期待される感度とその課題を確認する。現在 δ_{CP} に最も良い制限を与える T2K 実験と比較して、HK 実験は後置検出器として T2K 実験後置検出器 (スーパーカミオカンデ、SK) の 8.4 倍の有効体積を持つ HK 検出器を用いる。またニュートリノビームのアップグレードにより、2.6 倍の大強度ニュートリノビームを用いる計画である^{*13}[33]。こうして 20 倍以上のデータ取得量で 10 年間データ取得を行うことで統計誤差 3% 程度でニュートリノ測定が可能となる [21]。この統計の効果をも δ_{CP} に対する感度として表したものが図 2.11 であり、(a) は真の δ_{CP} が -90° または -45° である場合に、データが CP 対称性の保存 ($\sin\delta_{CP} = 0$) を排除する確らしさを示している。また (b) は 3σ および 5σ 有意度でデータにより CP 対称性の保存 ($\sin\delta_{CP} = 0$) を排除可能な δ_{CP} の真の値の比率を表している [34]。

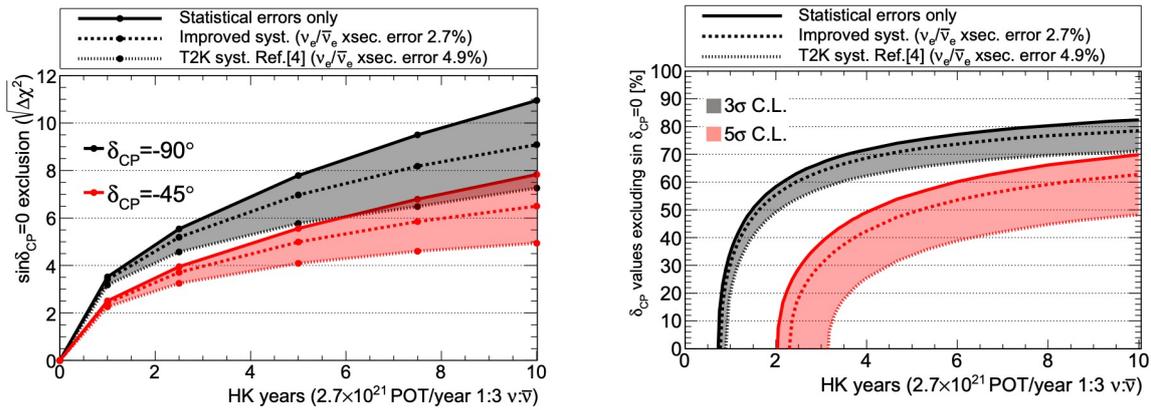
これを見ると系統誤差を T2K 実験の値 4.9%^{*14}[35] から 2.7% に改善した場合に、 $\delta_{CP} = -45^\circ$ で 5σ の発見に要する年数が 10 年から 5 年未満に短縮される。また 10 年の測定で $\delta_{CP} = 0$ を

^{*11} 既存の水チェレンコフ検出器スーパーカミオカンデのイベントを例として載せている。

^{*12} 運動量閾値は 1.4 GeV でニュートリノビームの典型的なエネルギー 1 GeV より大きい。

^{*13} 2020 年の強度への比。

^{*14} 2018 年時点の値。



(a) $\sin \delta_{CP} = 0$ の棄却能力の推定

(b) 3σ 、 5σ で $\sin \delta_{CP} = 0$ を棄却する δ_{CP} の割合

図 2.11: HK 実験における δ_{CP} の感度推定 [34]

5σ で棄却できる割合が 1.2 倍になる。このように HK 実験では系統誤差の削減が相対的に重要となり、その削減目標として 1–2% が設定されている [17]。この系統誤差の主要因として、図 2.12 に示すようにニュートリノ-原子核反応モデルの不定性が存在し、目標達成にはこの抑制が不可欠である。

後置検出器のサンプル

Sample	Uncertainty source (%)			Flux \otimes Interaction (%)	Total (%)	
	Flux	Interaction	FD + SI + PN			
1R μ	ν	2.9 (5.0)	3.1 (11.7)	2.1 (2.7)	2.2 (12.7)	3.0 (13.0)
	$\bar{\nu}$	2.8 (4.7)	3.0 (10.8)	1.9 (2.3)	3.4 (11.8)	4.0 (12.0)
1Re	ν	2.8 (4.8)	3.2 (12.6)	3.1 (3.2)	3.6 (13.5)	4.7 (13.8)
	$\bar{\nu}$	2.9 (4.7)	3.1 (11.1)	3.9 (4.2)	4.3 (12.1)	5.9 (12.7)
1Re1de	ν	2.8 (4.9)	4.2 (12.1)	13.4 (13.4)	5.0 (13.1)	14.3 (18.7)

ニュートリノ反応の不定性

トータルの不定性

図 2.12: ニュートリノ振動測定の不定性 (T2K 実験 2023 年の振動解析より [18])、前置検出器データへのフィット後 (フィット前)

2.6 ニュートリノと原子核の反応

本節ではニュートリノ反応において原子核の構造が測定に与える影響を見る。はじめに単純な自由核子とニュートリノの反応を概観して、ニュートリノ-原子核反応における原子核効果の取り扱いを見る。

2.6.1 自由核子とニュートリノの反応

素粒子模型の枠組みでニュートリノは弱い相互作用のみによって物質と反応し、その相互作用は大きく W ボソンを交換する荷電カレント反応 (CC) および Z ボソンを交換する中性カレント

反応 (NC) に分類できる。HK 実験が用いる $O(1)$ GeV のエネルギーのニュートリノについて、ニュートリノと核子の反応はさらに主要な 4 種類に分類できる。

- ・ 荷電カレント準弾性散乱 Charged current quasi-elastic scattering (CCQE)
- ・ 中性カレント弾性散乱 Neutral current elastic scattering (NCE)
- ・ 単一パイオン生成 Single pion production (CC1 π / NC π_0)
- ・ 深非弾性散乱 Deep inelastic scattering (DIS)

CCQE、CC1 π 、DIS についてニュートリノ反応断面積を図 2.13 に示す。HK 実験では、特に CCQE と CC1 π が重要である。ニュートリノエネルギー $E_\nu < 1$ GeV の領域では CCQE 反応が支配的で、 $E_\nu \sim 2$ GeV では CC1 π 反応の寄与が目立つ。 $E_\nu > 5$ GeV ではニュートリノが核子内のクォークと直接反応するようになり、DIS 反応が主要となる。

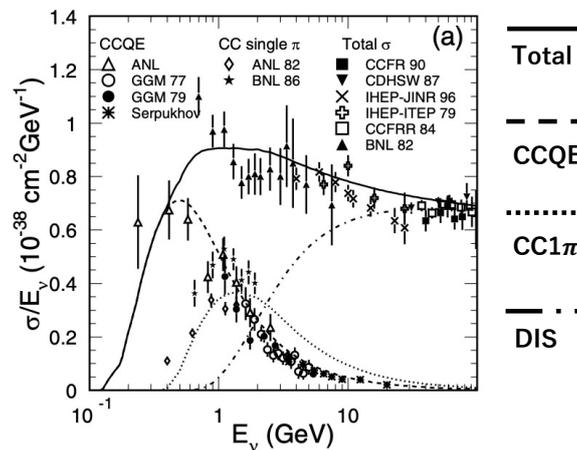


図 2.13: ニュートリノ反応断面積のエネルギー依存性 [36]

CCQE 反応

自由核子の CCQE 反応は図 2.15 のダイアグラムが表すようにニュートリノが核子と W ボソンを交換する相互作用で、終状態には μ^- 、 p (ニュートリノ反応)、 μ^+ 、 n (反ニュートリノ反応) が生じる。CCQE は 2 体反応だから荷電レプトンのエネルギーと角度からニュートリノエネルギーを再構成できる。また終状態レプトンの電荷を測定することでニュートリノ・反ニュートリノの反応を区別する事ができる。

CC1 π 反応

自由核子の CC1 π 反応は図 2.15 のダイアグラムが表すようにニュートリノが核子と W ボソンを交換した後核子が共鳴状態のバリオンを形成する相互作用である。共鳴状態のバリオンはすぐに基底状態の陽子または中性子に崩壊するが、その際にパイオンを生成する。共鳴状態の種類は様々で、代表的なものに核子の角運動量が励起した N^* 粒子や u,d クォークで構成される spin3/2

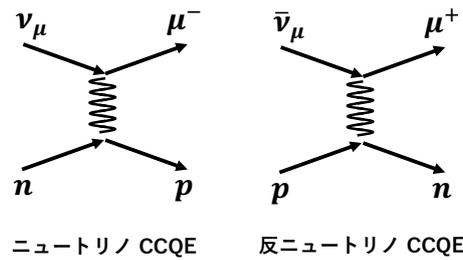
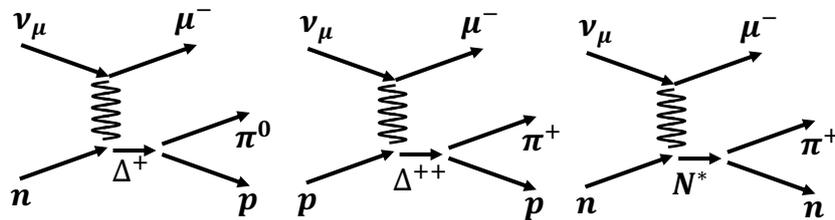


図 2.14: CCQE 反応のダイアグラム

の Δ 粒子が存在し、反応断面積にはそれぞれの共鳴過程が同時に寄与する。終状態には共通して μ^- (ニュートリノ反応)、 μ^+ (反ニュートリノ反応) が生じるが、始状態および終状態の核子およびパイオンの種類は様々である。

図 2.15: CC1 π 反応のダイアグラム例

HK や IWCD といった水チェレンコフ検出器は荷電パイオンの検出閾値が 200 MeV 程度でありそれ以下の運動量の荷電パイオンを検出できない。また π^0 は 98.8% が 2γ に崩壊するが、このとき非対称性崩壊で片方の低エネルギー γ を検出できなかつたり、2つの γ の開き角が小さく 1γ と認識されると π^0 を検出できず電子と誤認識して、電子ニュートリノ反応測定のバックグラウンドとなる。終状態のパイオンを検出できなかった場合 CC1 π 反応は CCQE 反応と区別ができなくなり、パイオンのエネルギーを見落とすことでニュートリノエネルギーを誤って低く再構成する。

2.6.2 ニュートリノ反応における原子核の効果

ニュートリノ-原子核反応ではニュートリノは原子核中で複数核子の影響を受けながら相互作用し、また反応から生じる 2 次粒子は原子核との相互作用を経た後に検出される。これら原子核の効果はよく理解されておらず測定の不定性が生じる。ここで測定に影響を与える主要な原子核効果を確認する。

A : Nucleon binding

原子核中の核子質量は原子核が作る束縛ポテンシャルに影響を受けて変化する。この効果により核子が原子核外部に脱出する際に数 10 MeV 程度のエネルギー損失が生じる。Relativistic Fermi Gas (RFG) ^[37] モデルは原子核毎に単一のエネルギー E_b を用いて有効核子質量を $M_{\text{eff}} = M - E_b$ として取り扱う一方、Spectral Function (SF) モデル ^{[38][39]} では核子質量を連続的な分布として扱う。

B : Pauli blocking

ニュートリノから核子への運動量移行が Fermi 運動量より小さい場合パウリの排他原理によりニュートリノ反応の発生が禁止される^{*15}。この現象を Pauli blocking とよび、図 2.16 に示すように特に運動量移行 q^2 が小さいニュートリノ反応の断面積を抑制する効果として現れる。結果、高運動量の荷電レプトンが相対的に減少することになる^{*16}。

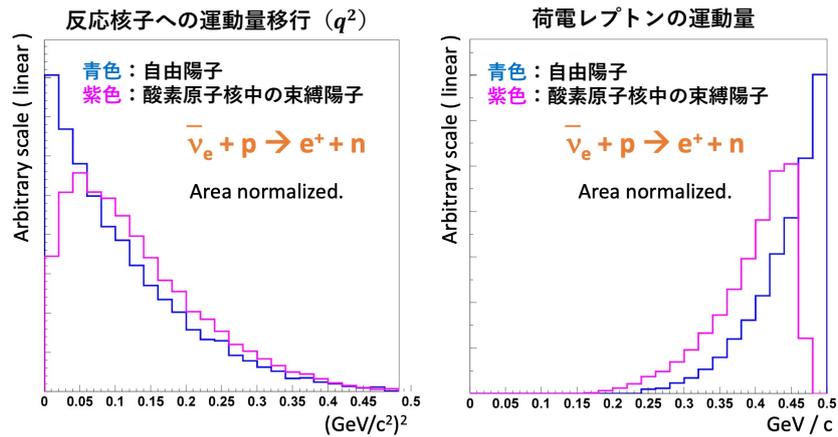


図 2.16: RFG モデルによる束縛陽子、自由陽子の反応の比較 [30]

ニュートリノ反応は運動量移行 q^2 の小さい領域で微分散乱断面積が大きいいため、図 2.17 のようにニュートリノエネルギーが高い領域でも Pauli blocking による断面積の抑制が無視できない影響として見られる。

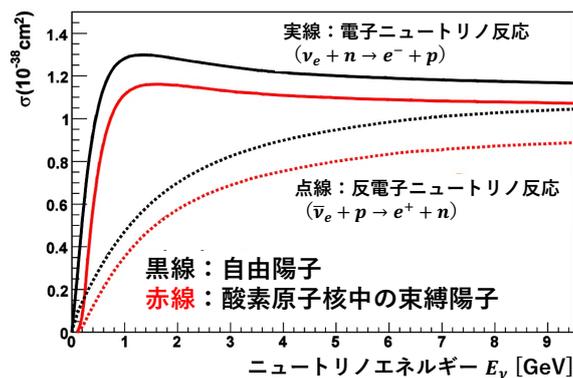


図 2.17: REG モデルによる束縛陽子、自由陽子の散乱断面積の比較 [30]

C : Fermi motion

原子核中で核子は $O(100)$ MeV 程度の運動量を持った状態で存在しておりその影響を無視できない。このエネルギー分布は図 2.18 に示すようにモデルによって異なり、特に RFG では Fermi

^{*15} 例えば Fermi Gas Model では Fermi 運動量より小さいエネルギー準位が全て核子に占有されると考える。

^{*16} 図 2.16 では Pauli blocking の他に、Binding energy の効果も反映されている。

運動量でカットオフが入る分布となる。Local Fermi Gas (LFG) モデル^{[40][41][42]} と SF は比較的近い分布を示す。一般には陽子/中性子毎に異なる運動量分布を仮定して計算するが、核子角運動量状態によって個別に分布を考える場合もあり、例えば ^{12}C における s-状態 (角運動量 $L=0$)、p-状態 (角運動量 $L=1$) の陽子の運動量は全く異なる分布を示す。

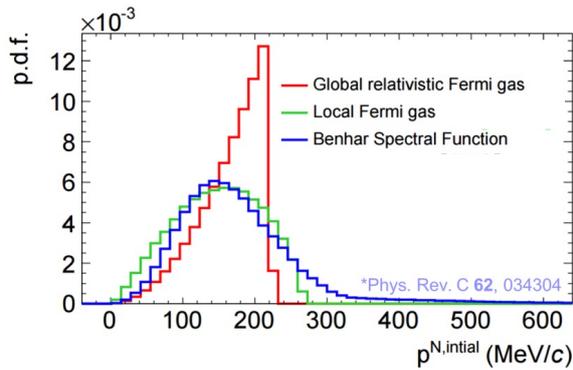


図 2.18: RFG, LFG, SF における核子の運動量分布例^[43]

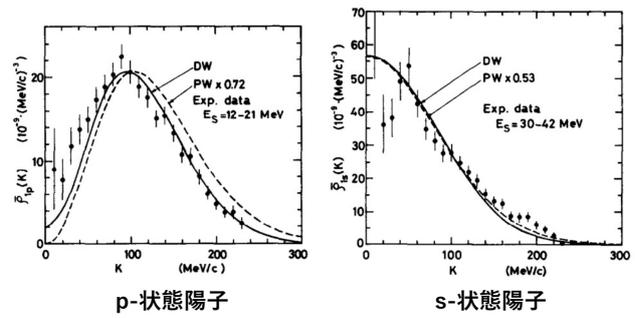


図 2.19: ^{12}C における陽子の運動量分布^[44]

D : 2p2h

原子核内では一定割合の核子が陽子-中性子のペアを形成して存在している。このような核子の一方がニュートリノと CC 反応を起こした場合、図 2.20 のようにペアを形成する両方の核子が束縛したまま共に原子核から放出されて終状態に 2つの核子が生じる可能性がある。このような反応を 2p2h 反応と呼ぶ。水チェレンコフ検出器における陽子の検出閾値は運動量 1 GeV 以上であり、HK や IWCD では基本的に陽子を検出できない。また HK, IWCD は電荷を持たない中性子のエネルギー再構成を行うことができない。この状況で荷電レプトンのエネルギーのみからニュートリノエネルギーを再構成すると図 2.21 のように誤りが生じて、ニュートリノ振動測定のバイアスとなる。

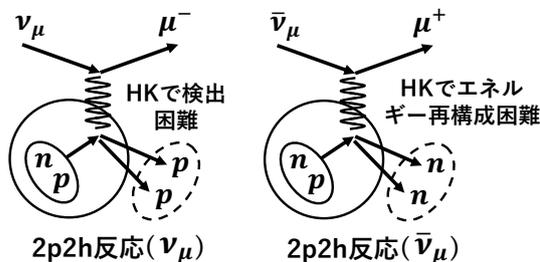


図 2.20: 2p2h 反応のダイアグラム

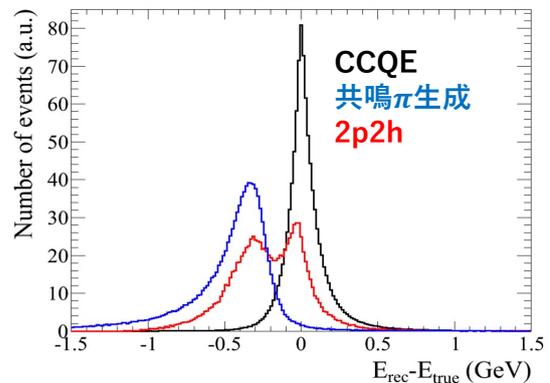


図 2.21: 荷電レプトンで再構成されたニュートリノエネルギーと真のエネルギー差^[31]

2p2h 反応について Nieves^[41]、Martini^[45] といったモデルが存在するが互いに反応断面積の予

想が最大約 2 倍異なり、これまで 2p2h 反応の測定が行われていないことで CCQE 反応への混入割合が分かっていない。ただし従来実験における軸性ベクトル質量 M_A^{QE} の測定値から混入率が 10-20% に及ぶ可能性が示唆されており、ニュートリノ振動測定の主要な系統誤差要因となっている。このような背景から現在、終状態の核子を高確率で検出することにより CCQE 反応と 2p2h 反応を区別した個別の断面積測定が求められる。

E : Final State Interaction (FSI)

ニュートリノ反応により原子核内部で発生した核子やパイオンは他の核子と散乱しながら原子核中を移動し外部に脱出する。特にパイオンは原子核内で荷電交換 ($n + \pi^+ \rightarrow p + \pi^0$) や吸収を起こし、パイオンの吸収時にはそのエネルギーを受け取った核子が原子核から放出される。これらの効果により原子核外部に出現する 2 次粒子の種類や数、エネルギー分布が変化することで、検出器が観測する終状態の分布が変化する。FSI の発生確率は原子核の密度や Fermi 運動量といったパラメータに依存するため、FSI の発生モデルは原子核の種類毎に異なる。

現在の T2K 実験で広く用いられる NEUT シミュレーション^[46] では Cascade model が利用されており、原子核内で生成した粒子を核内で少しずつ動かし各ステップで散乱するかを確認、粒子が原子核の外に出るまでステップを繰り返すという手法が取られている。

原子核毎に異なる効果

本節で見たように、ニュートリノ反応の観測可能な終状態は原子核構造から影響を受けるため、ニュートリノ反応の精密測定にはこの寄与の見積もりが不可欠である。この寄与は原子核における核子のエネルギー準位スペクトル、Fermi 運動量、原子核密度といったパラメータに依存するから、原子核種毎に異なる。HK 実験はニュートリノ反応の測定に炭素標的（プラスチック）と酸素標的（水）を用いるが、それぞれの測定で異なる原子核の影響が現れる。具体的な炭素および酸素原子核モデルの違いは付録 A に記す。

第3章 水ベース液体シンチレータを用いた飛跡検出器

本章では、本研究が開発する水ベース液体シンチレータを用いた飛跡検出器の概要を述べる。はじめに検出器の開発目的を確認し次にその構成要素を説明する。そして従来の開発における課題を整理する。

3.1 検出器の概要

3.1.1 検出器の目的

前章で見たように HK 実験では系統誤差の削減が重要で、その主要因にニュートリノ-原子核反応モデルの不定性がある。HK 検出器は水-ニュートリノ反応（酸素標的）でニュートリノを検出するが、既存の HK 前置検出器 SuperFGD はプラスチック標的（炭素標的）を用いたニュートリノ検出器であり観測データに HK 検出器とは異なる原子核効果の補正を加える。この原子核モデルの違いが重大な系統誤差要因となるため、水-ニュートリノ反応の精密測定による原子核効果の理解が重要である^{*17}。そこで本研究は水標的を用いた新型の前置検出機、水ベース液体シンチレータ検出器の開発を行う。

3.1.2 検出器の基本構造

本検出器は水と液体シンチレータを界面活性剤で混合した混合物である水ベース液体シンチレータ（Water-based Liquid Scintillator, 以降 WbLS）を反応標的として用いる飛跡検出器であり、検出器構造の概要を図 3.1 に示す。図のように WbLS 検出器は、光反射壁によって WbLS を 1 cm × 1 cm × 1 cm サイズに区切って作ったキューブ形状のセルが、3次元格子状に 200 × 200 × 50 = 200 万程度並んだ構造をしており、各セルには 3本の波長変換ファイバーが直行するように通される。

荷電粒子がセルを通過すると、セルの WbLS から光子が生じて壁面で反射しながら波長変換ファイバーに到達、検出器の側面まで伝搬して光検出器（Multi-Pixel Photon Counter, 以降 MPPC^[47]）に到達して読み出される。ここで電気信号に変換された光量を後段の電気回路でデジタル化して記録する。これを3つの側面で行うことで粒子飛跡の3方向の射影を得て、飛跡を 1 cm の分解能で再構成することが出来る。

WbLS 検出器は HK 実験の前置検出器 ND280 への搭載を目指しており、その飛跡情報を ND280 内に設置されたその他の検出器の測定情報と組み合わせることでニュートリノ反応の測定を行う。

^{*17} 炭素-ニュートリノ反応は SuperFGD で行う。

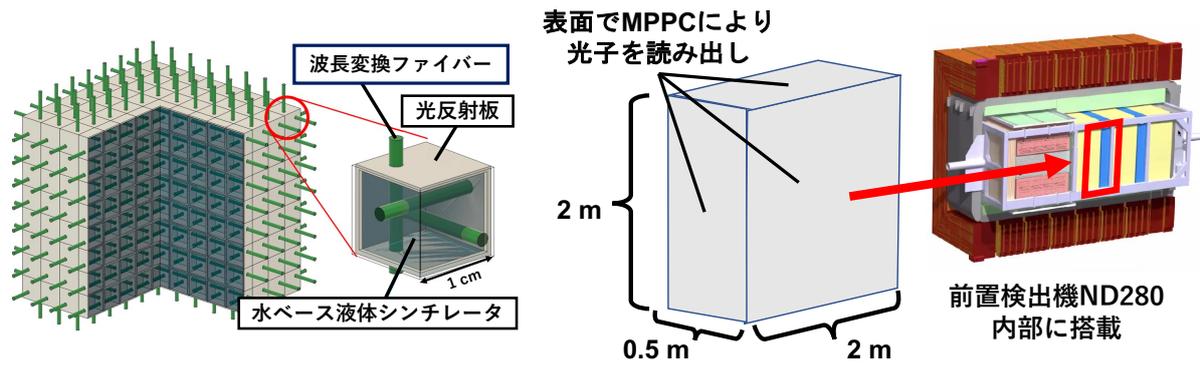


図 3.1: 水ベース液体シンチレータ検出器の概要

3.1.3 検出器の要求

検出器の水割合への要求

本検出器は WbLS 中の水を利用して水-ニュートリノ反応の測定を行うが、検出器中のその他の構造とニュートリノの反応は全て背景事象となる。よって検出器中の水割合を一定以上に確保する必要があるがその要求割合を見積もる。

本検出器における重要な測定量が酸素原子核 O (水) と炭素原子核 C (炭素) のニュートリノ微分反応断面積比 $d(\sigma_o/\sigma_c)/dE$ ^{*18} であり系統誤差 5% の精度で測定を目指す。この期待値はニュートリノビームの総フラックス $\phi(E)$ 、WbLS 検出器の総質量 T 、WbLS 検出器の水質量割合 R 、WbLS 検出器の反応検出効率 $\epsilon(E)$ ^{*19}、WbLS 検出器での検出ニュートリノ数 $N(E)$ を用いて 3.1 式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_o}{\sigma_c}(E) &= \frac{N - \phi(1 - R)T\sigma_c\epsilon}{\phi RT\epsilon} \cdot \frac{1}{\sigma_c}(E) \\ &= \frac{N}{\phi RT\sigma_c\epsilon}(E) - \frac{(1 - R)}{R} \end{aligned} \tag{3.1}$$

炭素原子核反応は SuperFGD での精密測定が可能であり、SuperFGD の反応検出効率 ϵ' を用いて $\phi\sigma_c\epsilon'$ を既知と扱える。SuperFGD と WbLS 検出器の構造はほとんど同じだから ϵ' と ϵ の違いは小さく、2 - 3% 程度の精度で $\phi RT\sigma_c\epsilon$ を予想可能と期待する。この予想の精度を x とおき十分データの統計が大きく N の不定性を無視できるとすると、3.1 式右辺の不定性は $\pm Nx/\phi RT\sigma_c\epsilon$ とできる。ここで炭素と酸素は原子番号が近く極端に反応断面積が変化しない ($N \sim \phi T\sigma_c\epsilon$) と考えると、 $d(\sigma_o/\sigma_c)/dE \sim 1 \pm x/R$ であるから測定精度は x/R となる。よって 5% の精度で測定を行うためには、WbLS 検出器は 40 - 60 % 程度の水割合を確保する必要がある。

検出器セルの飛跡検出効率と光量への要求

荷電粒子がセルを通過した際にそのセルが通過を検出できる確率を飛跡検出効率と定義する。こ

*18 単一世代のニュートリノに注目しており、また実際には断面積の終状態レプトン飛跡角度への依存性も重要である。

*19 炭素-ニュートリノ反応と酸素-ニュートリノ反応がほとんど同じ効率で検出できると期待している。

の検出効率に求める基準を明確化し、そのために必要な読み出し光量を検討する。

WbLS 検出器は図 3.2 のようにニュートリノ反応点から一列に並ぶ 3 つのセルでヒットがあれば粒子飛跡と判断出来るが、このような短距離飛跡は検出が最も難しく、これを 90% 以上の確率で検出することを目標とする。この時に必要な各セルの飛跡検出効率は $0.9^{1/3} = 96.5\%$ である。

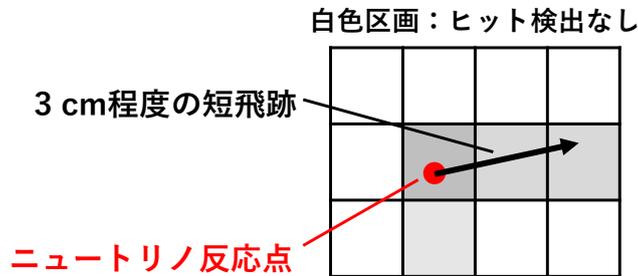


図 3.2: ニュートリノ反応点からの短距離飛跡

MPPC は偶発的に 2 光子程度のダークノイズを出すことがあるから、各セルでの飛跡検出には 3 本全てのファイバーで 3 光子以上のヒットを求める。ここでファイバーあたりの光子の観測数分布として期待値 n のポアソン分布を仮定すると、3 本のファイバー全てが 3 光子以上を検出する確率 p_{hit} は $p_{hit} = (1 - e^{-n} - e^{-n}n - e^{-n}n^2/2)^3$ と表せて、 $p_{hit} > 96.5\%$ となるにはファイバーあたりの平均光量は 8.2 [光子/ファイバー] が必要である。実際には波長変換ファイバーを伝搬する間に光量が 0.43 倍に減衰するから^{*20}、セルの直後の読み出しでは 20 [光子/ファイバー] 程度が必要である。本研究ははじめにこの光量を改善目標値とした^{*21}。

飛跡検出の位置分解能への要求

本検出器に求められる飛跡検出の位置分解能を考える。前述したように炭素-ニュートリノ反応のバックグラウンドを SuperFGD の測定データを用いて差し引くことから、SuperFGD と同等の飛跡位置分解能である 1 cm を達成することが望ましい。この位置分解能があれば運動量 300 MeV 以上の陽子を検出することができて、CCQE や 2p2h 反応から生じる大半の陽子を検出できる^[31]。

WbLS 検出器の飛跡位置分解能はほとんどセルの大きさにより決まるため、本研究は大きさ 1 cm のセルを用いることを前提とした。この位置分解能は図 3.3 のように荷電粒子が通過したセルから隣のセルへの光漏れ（クロストーク）によって悪化するが、このクロストーク率の目標値と



図 3.3: セルの光クロストーク

^{*20} 詳細は 6 章で述べる。

^{*21} はじめに行った目標光量の概算であり、以後の研究でより適切な飛跡検出効率の評価方法と目標光量値を設定したがこの詳細は 10 章で述べる

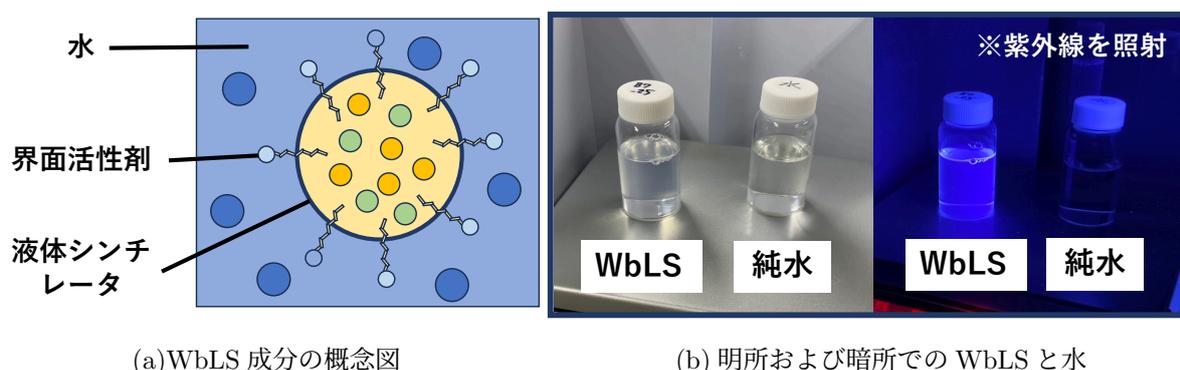
して3%以下を設定した^{*22}。SuperFGDはセル内での粒子の通過位置に依存して2.7から4.9%のクロストーク率を持つが^[48]、目標値はこれと同じ程度にしている。

3.2 検出器の構成要素

3.2.1 水ベース液体シンチレータ

水ベース液体シンチレータ (WbLS) は界面活性剤を用いて水に液体シンチレータを溶かした混合物であり、WbLS 検出器においては水-ニュートリノ反応を測定するための反応標的および荷電粒子の通過時に光を放つ発光体としての2つの役割を果たす。

液体シンチレータは図3.4(a)のように水中でミセルを形成して存在しており、このミセルは熱力学的平衡状態を形成するから時間経過により成分が分離しない。このミセルのサイズは典型的に数 nm から数 10 nm であり、可視光をほとんど散乱せず (b) のように高い透明度を保ちながら発光能力を持つことが特徴である。



(a) WbLS 成分の概念図

(b) 明所および暗所での WbLS と水

図 3.4: WbLS の概念図と実際のサンプル

本研究で用いる WbLS の概要

本研究で用いる WbLS の成分重量比は水割合 70%、界面活性剤 15%、液体シンチレータ 15% 程度であり、水は A-2 級品質の純水、液体シンチレータはプソイドクメンをベースに、蛍光材 (PPO) と波長変換剤 (Bis-MSB) を少量添加したものをを用いている。成分の詳細は 4 章で述べる。

この WbLS の発光量はほとんど液体シンチレータ割合に比例するから^[49]、純粋な液体シンチレータと比較して 15% 程度の発光量をもつ。光の減衰長は未測定だが、過去に研究された WbLS (界面活性剤 TritonXTM-100 ベース、水比率 86%) の光減衰長 (散乱+吸収) は波長 430 nm で 6.02 m 程度で^[50]、NOvA 実験の液体シンチレータ (ミネラルオイル 95%、プソイドクメン 5%) の光減衰長は波長 420 nm で 9 m 程度であるから^[51]、本研究で用いる WbLS の減衰長も 6 m 以上を想定している。先行研究^[49]によると 1 m 以上の減衰長では WbLS 検出器における減衰効果はほとんど無視できるから本研究でこの影響は基本的に考えない。

^{*22} このクロストーク率は、セルの中心を壁面に垂直に通過する粒子飛跡に対して要求する。

3.2.2 検出器のセル

WbLS 検出器は光反射壁で区切られた中空のセルが並ぶ構造をしており、荷電粒子により発生した光子をセル内に局在させることができる。内部は WbLS を満たすために中空で壁面には波長変換ファイバーを通すための穴が空いており、この複雑な形状を低コストで量産するために 3D プリンターによる造形を検討している。セルにおいてファイバーが通る位置は他のファイバーの方向に沿うようにセル中心から縦と横に 2 mm ずつ離れた位置となっている^{*23}。

3.2.3 波長変換ファイバー

波長変換ファイバーはファイバー中に侵入した一定波長の光をより長い波長に変換して放出、伝搬させる光ファイバーの 1 種である。本研究では前置検出器 SuperFGD での使用実績があるクラレ社, Y-11(200)MS^[52] を採用している^{*24}。WbLS 検出器において、図 3.5 のように WbLS から生じた光子を MPPC が高感度で検出可能な波長に変換して、検出器側面の MPPC まで伝搬させる役割を担う。

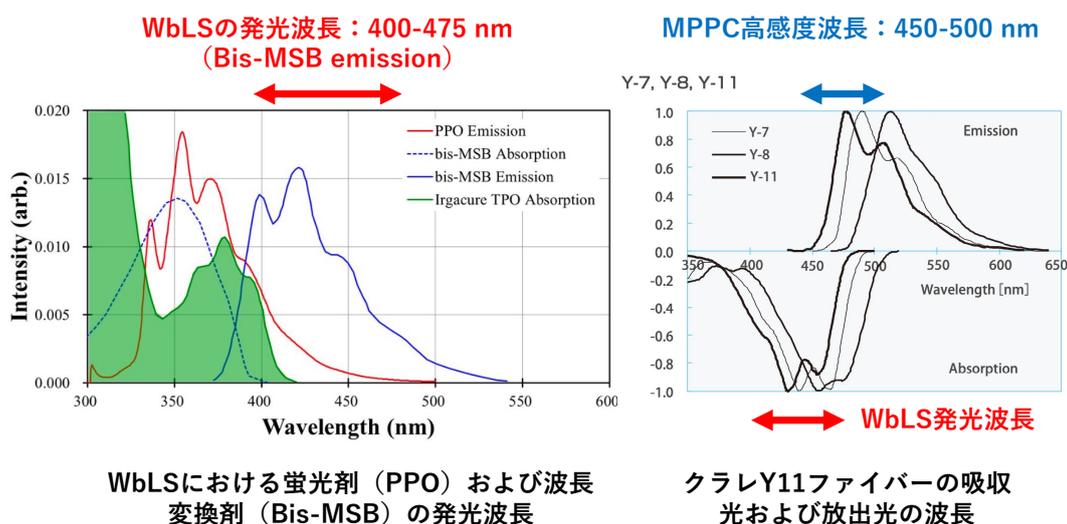


図 3.5: ファイバーによる波長変換 (グラフは^{[52][53]}より引用)

Y-11(200)MS はマルチクラッド構造が特徴で、中心分のコアとそれを覆うように接する多重クラッド^{*25}の境界面で屈折と全反射が起こることで光がファイバー内を伝搬する。図 3.6 のように全反射が発生する層境界は光子の進行角度によって異なり、伝搬の過程で進行角度は変化しないから同じ光子は基本的に同じ境界面で全反射を続ける。このように全反射条件を一度満たした光子が波長変換ファイバーを進み続けることで高効率の光伝搬が可能となっている。

^{*23} SuoerFGD と同じ。

^{*24} 様々な種類が存在して性能が調べられているが、光収集効率や減衰長を考慮すると現在用いている Y-11 が現時点で最適と考えている。

^{*25} 内側から屈折率は、1.59(コア)、1.49(内クラッド)、1.42(外クラッド)^[52]。

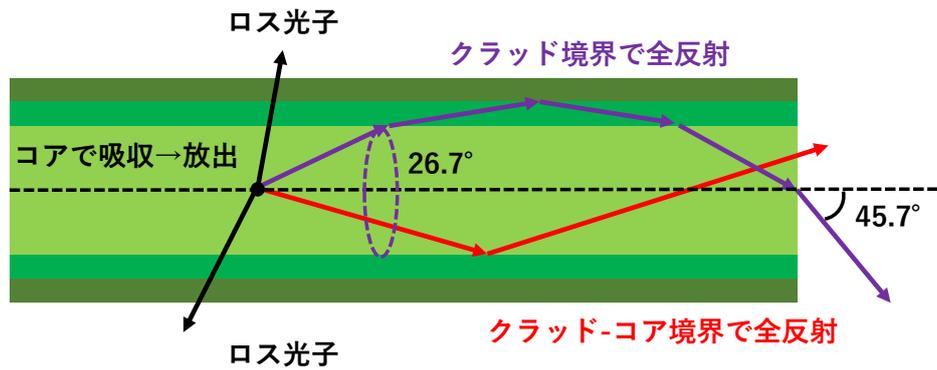


図 3.6: ファイバー中を伝搬する光子

3.2.4 MPPC : Multi-Pixel Photon Counter

Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) [47] は受光面が多数の Avalanche Photon Diode (APD) ピクセルで構成された光検出器である。1 光子程度の微弱な信号を検出可能であり同時に光子カウント能力を備えている。WbLS 検出器では波長変換ファイバーによって検出器側面に輸送された光子を読み出し電気信号に変換する役割を担う。

MPPC における光子検出の原理

MPPC 受光面の 1 ピクセル、APD が光子を検出する原理を述べる。MPPC において通常時の APD はブレークダウン電圧*26 より数 V 高い逆電圧が印加されており準安定状態となっている。ここで空乏層に光子が入射して電子を励起すると、図 3.7 のように電子が陽極に到達するまでに電子雪崩（アバランシェ増幅）が発生して大電流が流れる。全ての電子が陽極に到達すると再び初期

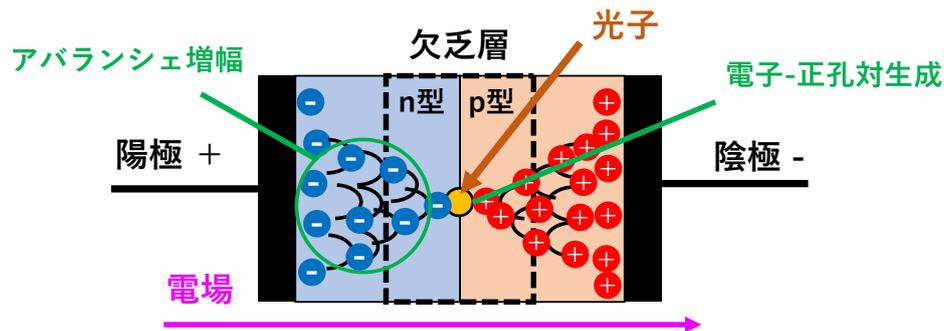


図 3.7: MPPC における光子検出の原理

状態に戻る。このような原理から 1 ピクセルは同時に 1 光子しか検出しない。

*26 アバランシェ増幅およびツェナー降伏が生じて、通常の逆方向に電流が流れ始める最小電圧。

MPPC の動作特性

MPPC を用いた測定では、以下に示す MPPC の特性を考慮する必要がある。

- 増幅率：** 素電荷に対する信号の増幅率は $O(10^6)$ 程度でこの値は MPPC への印加電圧に依存して変化する。そのため測定間で異なる印加電圧を用いると検出信号の大きさを見誤る要因となる。
- クロストーク：** 光子検出の伴うアバランシェ増幅の過程で 2 次光子が発生することがある。この光子が他のピクセルで検出されると 2 光子の信号として読み出されるため、検出光子数を過大評価する要因となる。この発生確率は数 % 程度だが MPPC への印加電圧に依存して異なり、高電圧をかけるほど高くなる。
- アフターパルス：** ピクセル内でアバランシェ増幅を起こす電子が結晶格子欠陥に捕獲され、再放出された際に再び増幅を起こす。捕獲から解放された電子は 2 度目の増幅を引き起こし検出光子数を過大評価する要因となる。2 度目の増幅が起こるタイミングは不確定で信号パルス時間より遅くなる場合がある。また 2 度目の増幅は小規模になることが多くこの時 1 光子相当未満の信号を生成する。
- ダークノイズ：** 光子が入射しない場合でも、APD の欠乏層において生じる熱的な電子の励起によりランダムなタイミングでアバランシェ増幅が発生する。ほとんど 1 光子信号として生じるが一定確率でクロストークにより 2 光子信号となるため、1 光子および 2 光子相当の信号の較正に利用することができる。

接続コネクタ (GOMI コネクタ)

MPPC と波長変換ファイバーを接続するために図 3.8 のような専用コネクタ (GOMI コネクタ^[54]) を用いる。これはファイバー側パーツ (オス型) と MPPC 側パーツ (メス型) のペアで構成される。MPPC パーツのツメがファイバー側の窪みを抑えることで MPPC とファイバーの端面を密着させることが出来る。

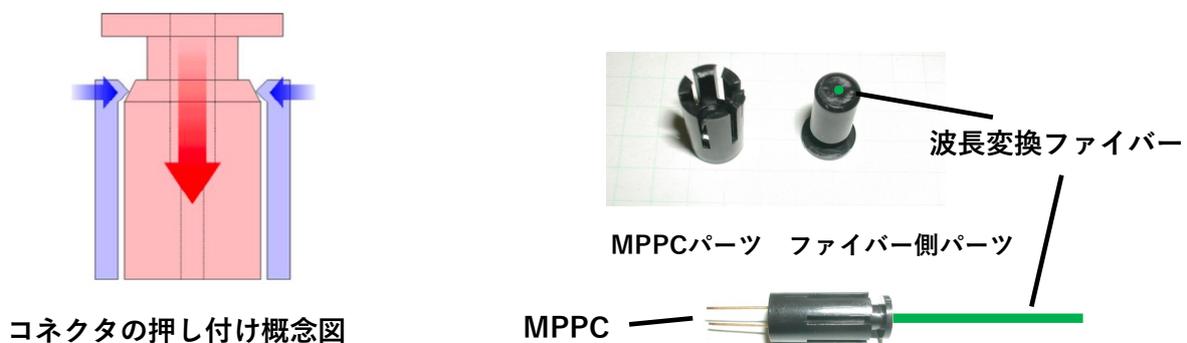


図 3.8: GOMI コネクタの原理

3.3 従来の課題と本研究の方針

従来行われてきた WbLS 検出器の開発における課題を整理し、本研究の方針を述べる。

課題 1：光量の不足とクロストーク

2022年10月、東北大学電子光理学研究センター (Research Center for *EL*ectron *PH*oton Science, ELPH、現 RARiS^[55]) において WbLS 検出器の小型試作機を用いたビームテストが行われた。

試作機のファイバーあたりの読み出し光量は最大 3.9 [photon equivalent/fiber (p.e. /fiber)] で^[49]、そこから先行研究の WbLS 界面活性剤改良により 1.28 倍光量が向上したが、依然として 4 倍以上光量が不足する。このとき合理的な飛跡検出条件^{*27}でセルの飛跡検出効率は 5% 以下であり、光量改善が最大の課題である。また試作機のクロストーク率は 5–10% と目標値より高く^[56]、この抑制が必要である。

課題 2：WbLS の温度安定性

本研究が用いる WbLS は一定の温度範囲で透明な溶解状態を維持するが、温度が高すぎたり低すぎると図 3.9 のように分離して発光量や粒子検出性能の一様性が低下する。ビームテストでも同

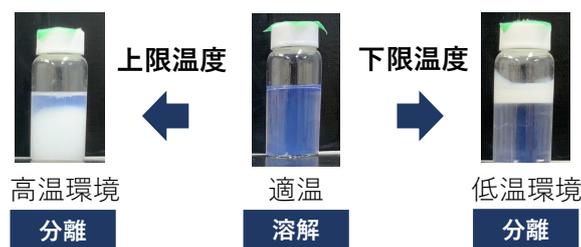


図 3.9: 温度により分離する WbLS サンプル

様の現象による光量の低下が確認されており対策が必要である。

課題 3：WbLS 検出器の長期安定性

先行研究で ABS、PMMA 樹脂をプソイドクメンに浸した際に 1 週間以内に亀裂が確認された^[49]。また WbLS に接触した波長変換ファイバーで 1, 2 ヶ月程度で折れたものがあったが、これはファイバーのクラッド層の傷が原因と考えられている^[57]。そのため数年間の観測を行うためには検出器構造の溶解対策が必要である。

本研究の方針

本研究は、第一目標として WbLS 検出器の光量改善を行う。次に第二目標としてクロストーク率の抑制を行う。また WbLS の温度安定性と検出器の長期安定性についても適宜検討する。

^{*27} 検出光量がポアソン分布に従うとして、セルを通る 3 本のファイバー全てで 3 光子以上を検出する。

第4章 水ベース液体シンチレータの開発

本章では WbLS の特性を明らかにし、より安定して高光量な WbLS の作製を目指す。

はじめに 4.1 節にて本研究における WbLS の開発方針を述べ、4.2 節で WbLS の溶解安定性について検討する。4.3 節では WbLS 中の液体シンチレータ成分割合を変更することで WbLS 発光量の最適化を試みる。4.4 節では新たな界面活性剤および液体シンチレータ溶媒を用いた WbLS を試作して、安定性および光量の観点から性能を検討する。

4.1 水ベース液体シンチレータの開発方針

本研究では初めに基準となる WbLS のサンプル組成を表 4.1 のように決定して WbLS 標準サンプルと名付けた^{*28}。界面活性剤は WbLS の安定性を高めるために 2 種類用いており詳細は後述する。液体シンチレータは溶媒、蛍光剤、波長変換剤の 3 種類の成分で構成される。本章ではこの標準サンプルの性能を基準として、WbLS の開発を行う。

表 4.1: WbLS 標準サンプルの成分組成

	使用物質	成分比率 [%] (重量比)
水	純水 (W10-A2)	70
非イオン性界面活性剤	IGEPAL CO-630	14.5
イオン性界面活性剤	ナフタレンスルホン酸ナトリウム	0.5
溶媒	Pseudocumene (PC)	13.975
蛍光剤	2,5-Diphenyloxazole (PPO)	1
波長変換剤	1,4-Bis (2-methylstyryl) benzene (Bis-MSB)	0.025

また本研究では WbLS の性能目標として以下の 2 条件を設定した。

(1) 20 ± 2 °C の温度範囲で沈殿や浮遊物を生じないこと。

3.3 節で見たように WbLS は溶解状態を維持するために一定温度範囲での維持が必要だが、WbLS 検出器が搭載を目指す HK 実験の前置検出器 ND280 の内部温度は温度 20°C に維持されており、そこに ± 2 °C の変動^{*29}を含めた温度域で WbLS が溶解することを求める。

^{*28} 本論文では成分比率はことわりのない場合重量比を表す。

^{*29} 昼夜間や季節ごとの温度変動が一定存在して、それを考慮する。

(2) 水割合を維持しながら、より高い発光量をもつこと。

WbLS 検出器の飛跡検出能力や粒子の識別能力は読み出し光量が多いほど向上する。ここで WbLS の発光量は液体シンチレータの比率にほとんど比例するが^[49]、WbLS における水以外の成分は水-ニュートリノの反応測定の背景事象の要因となるため、液体シンチレータの比率は制限される。本開発では WbLS の水割合が 70% 以上であることを課し、その他の成分の調整により WbLS の発光量の最大化を行う。ここで水を 70% 含む WbLS を厚さ 1 mm の隔壁を用いて一辺 1 cm の立方格子状セルに分割し、各セルに直径 1 mm の光輸送ファイバーを 3 本通す場合、検出器の最終的な水割合は $0.9^3 \times (1 - 0.05^2 \times \pi \times 3) \times 0.7 \simeq 49.8\%$ と概算できて、検出器全体として約 50% の水割合を確保することができる。

4.2 水ベース液体シンチレータ成分と溶解温度の評価

WbLS の溶解温度は、非イオン性界面活性剤の曇天、液体シンチレータの可溶化量の 2 要素で決まる。非イオン性界面活性剤は曇天と呼ばれる温度以上で急激に界面活性剤としての性質を失うため、WbLS はこの曇天以上の温度で分離してしまう。また WbLS はサンプル毎に可溶化温度が存在し、それ以下の温度では液体シンチレータが分離してしまう。この曇天と可溶化温度の間が WbLS が溶解状態を維持できる温度となる。先行研究において、この溶解温度帯はイオン性界面活性剤を併用して用いることで変化することが経験的に知られており、本節では WbLS に用いる界面活性剤と液体シンチレータについて成分比率を変更した際の溶解温度を維持する温度帯（溶解温度帯）の変化を調べた。

測定方法

測定のセットアップは図 4.1 の通りで、作製した WbLS サンプルをガラス容器に入れて水槽内部に下半分が浸かるように置いた。この水槽を恒温槽内部に設置して設定した温度に維持した。各設定温度について WbLS サンプルの濁り・沈殿物・溶解物を目視で確認し、水槽内部に取り付けた温度計の値とともに記録した。各測定の間では水槽全体を揺らしてでサンプルを攪拌し^{*30}、5 °C から 35 °C の範囲で各ステップ 6 時間以上の間を空けながら 2 °C ずつ設定温度を変更して溶解状態の変化を見た。ここでサンプルが透明であれば溶解状態と判断し、白濁したり成分分離したものを非溶解状態と判断した。

4.2.1 界面活性剤使用比率を変更したサンプルの評価

WbLS には 2 種類の界面活性剤、非イオン性の IGEPAL CO-630、イオン性のナフタレンスルホン酸ナトリウムを用いているが、この使用比を変更したサンプルを作製して溶解温度帯の変化を見る。今回の測定では 4.2 に示す 5 種類の WbLS サンプル、A, B, C, D, E を用意した。特に B は WbLS 標準サンプルである。

測定結果を図 4.2 に示す。測定の範囲でサンプル D は溶解温度の上限、サンプル E は溶解状態

^{*30} 本来は溶解条件に達しているサンプルが溶け残って記録されないため。

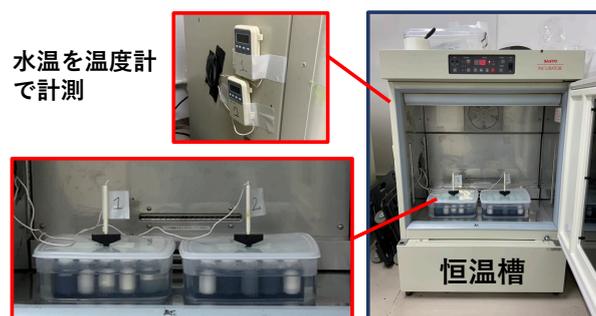


図 4.1: 温度測定の設定アップ

表 4.2: 測定に用いた WbLS サンプルの成分組成

使用成分	サンプル毎の重量比 [%]				
	A	B	C	D	E
純水	70				
非イオン性界面活性剤	15	14.5	14	13.5	13
イオン性界面活性剤	0	0.5	1	1.5	2
溶媒 (PC)	13.975				
蛍光剤 (PPO)	1				
波長変換剤 (Bis-MSB)	0.025				

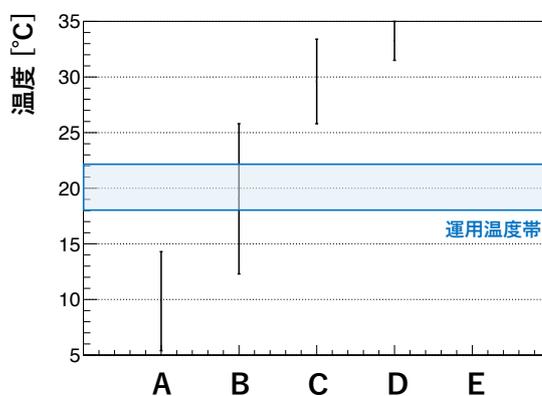


図 4.2: 各サンプルの溶解温度帯

が確認されなかった。

測定結果からイオン性界面活性剤の使用比率に対してほとんど線形に溶解状態温度の上限及び下限が上昇することが分かる。特に B のサンプルは 20 ± 2 °C の目標温度で溶解しており溶解温度帯はさらに余裕がある。またイオン性のナフタレンスルホン酸ナトリウムと非イオン性の IGEPAL CO-630 を組み合わせて用いることで 10°C から 30°C の温度帯で WbLS の溶解温度帯を自由に制御可能であることが分かる。

4.2.2 液体シンチレータの成分比率を変更したサンプルの評価

WbLS に用いる液体シンチレータは 3 種類の成分で構成されるが、液体シンチレータにおける PPO と Bis-MSB の成分比率を変更したサンプルを作製して溶解温度帯の変化を見る。今回の測定では表 4.3 に示す 5 種類の WbLS サンプル、B, F, G, H, I を用意した。B は WbLS 標準サンプルで、4.2.1 節のものと同じである。ここで B, F, G の 3 サンプルは PPO と PC の成分比のみ異なる

表 4.3: 測定に用いた WbLS サンプルの成分組成

使用成分	サンプル毎の重量比 [%]				
	B	F	G	H	I
純水	70				
非イオン性界面活性剤	14.5				
イオン性界面活性剤	0.5				
溶媒 (PC)	14.475	13.975	12.975	13.950	13.900
蛍光剤 (PPO)	0.5	1	2	1	1
波長変換剤 (Bis-MSB)	0.025	0.025	0.025	0.05	0.1

るセットで、F, H, I の 3 サンプルは Bis-MSB と PC の成分比が異なるセットである。それぞれのサンプルセット内で溶解温度帯を比較した結果を図 4.3 に示す。

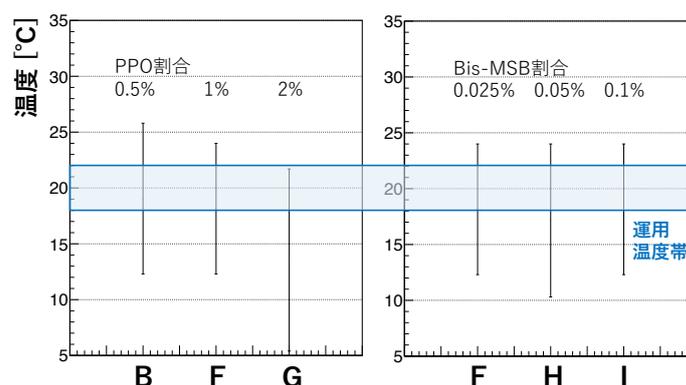


図 4.3: 各サンプルが溶解した温度帯

測定結果から溶解温度帯の違いは比較的小さく、液体シンチレータ成分の影響はほとんど無視できると分かる。ただしサンプル G は溶解温度帯がやや低温に移動した。

4.2.3 溶解温度帯理解の現状

先行研究から、図 4.4 に示すように WbLS における液体シンチレータの割合が高いほど溶解温度帯が上昇することが分かっており、WbLS の溶解温度帯が目的より低い場合にはこの方法で調整できる。この手法は同時に液体シンチレータ割合を向上できるが、溶解温度帯の幅が小さくなることで溶解維持に必要な温度制御が難しくなる。ここで代わりに界面活性剤の比率調整を行え

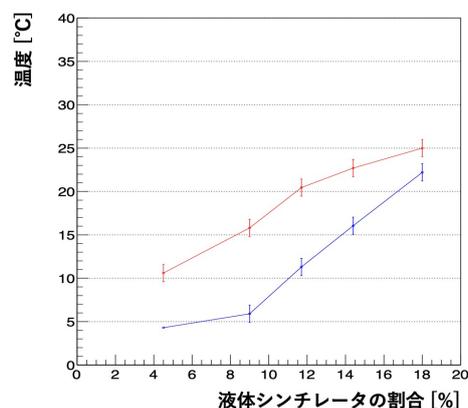


図 4.4: 水ベース液体シンチレータ割合と溶解温度帯の関係 [49]

ば、溶解温度帯の幅をほとんど変えることなく溶解状態帯を上昇できる。状況に応じてこれら手法を使い分けながら調整することが重要である。

4.3 液体シンチレータ成分比率の光量への影響

液体シンチレータ中に含まれる蛍光物質が少ないと十分にシンチレーション光が発生せず光量が不足し、波長変換剤が少ないとシンチレーション光が適切な波長に変換されず光の検出効率が悪化する。逆にこれらの成分が過剰な場合は自身の光吸収で液体シンチレータの発光量が減少する可能性がある。よって蛍光物質および波長変換剤の濃度最適化が重要である。

これまでの開発では天秤の精度が不十分で波長変換剤の濃度が上限しか分からなかったが、今回新たな天秤を購入したことで波長変換剤の濃度も管理できるようになったから本測定を行う。

本節では表 4.4 に示すように、WbLS 標準サンプルから液体シンチレータの溶媒 (PC)、蛍光剤 (PPO) または波長変換剤 (Bis-MSB) の比率のみ変更した 7 種類の WbLS サンプルを用意してその光量を測定、比較する。ここでサンプル c は WbLS 標準サンプルであり、サンプル a,b,c,d は標準サンプルとそこから蛍光剤濃度を変更したグループとなっている。またサンプル c,e,f,g は波長変換剤濃度を変更したグループである。

4.3.1 測定方法

セットアップ

WbLS は透明なガラス瓶に入れて PMT (浜松ホトニクス, H7415) の受光面に設置して光量を測定した。図 4.5 に示すように、上下に設置したプラスチックシンチレータが同時に宇宙線を検出

表 4.4: 測定に用いた WbLS サンプルの成分組成

	サンプル毎の重量比 [%]						
	a	b	c	d	e	f	g
純水	70						
IGEPAL CO-630	14.5						
ナフタレンスルホン酸ナトリウム	0.5						
溶媒 (PC)	14.725	14.475	13.975	12.975	13.99	13.95	13.925
蛍光剤 (PPO)	0.25	0.5	1	2	1	1	1
波長変換剤 (Bis-MSB)	0.025	0.025	0.025	0.025	0.01	0.05	0.075

した際に宇宙線が WbLS サンプル内を通過したと判断して PMT からの入力信号を記録した。このセットアップ全体を恒温槽の中に設置して気温を 20 °C に維持した。各サンプル毎に測定は 1 回 23 時間程度行った。

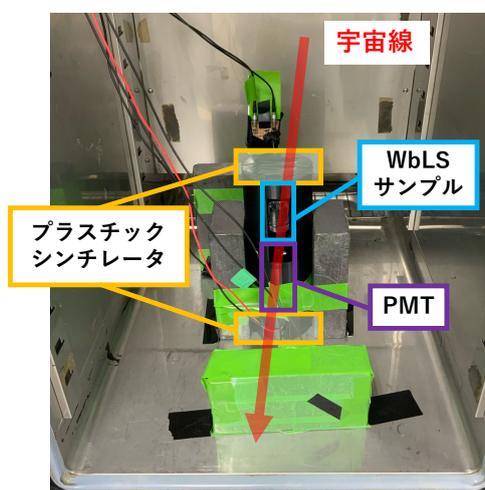


図 4.5: WbLS 光量測定のセットアップ

データ取得の回路は図 4.6 の通りで、上下のシンチレータにおける宇宙線の発光を MPPC で読み出し 10 倍のアンプを通して 2.5 光子の閾値に設定したディスクリミネータに接続した。上下のシンチレータ信号のコインシデンスを取ってトリガーとし、デジタイザ (CAEN, DT5725) に入力した。WbLS サンプルの発光は PMT で読み出した出力信号をそのままデジタイザに入力して記録した。測定にあたり、長時間断続的にデータを取得する中で PMT の光検出効率がほとんど一定であることを確認する試験を行った。この詳細は付録 B に記す^{*31}。

今回の測定では波長変換剤の濃度変化による光量の違いを見るため、PMT の感度波長を波長変換ファイバーと統一する必要がある。PMT H7415 は感度ピーク波長が 420 nm であり^[58]、これは波長変換ファイバーの光吸収ピーク約 420 nm とほとんど同じであるから、今回のセットアップは Bis-MSB による波長変換の効率を含めた光量の評価を行うことが可能である。

^{*31} 試験の結果を踏まえて、各測定のはじめ PMT に HV を印加し恒温槽を起動してから 15 分間はデータを取得せず待機した。

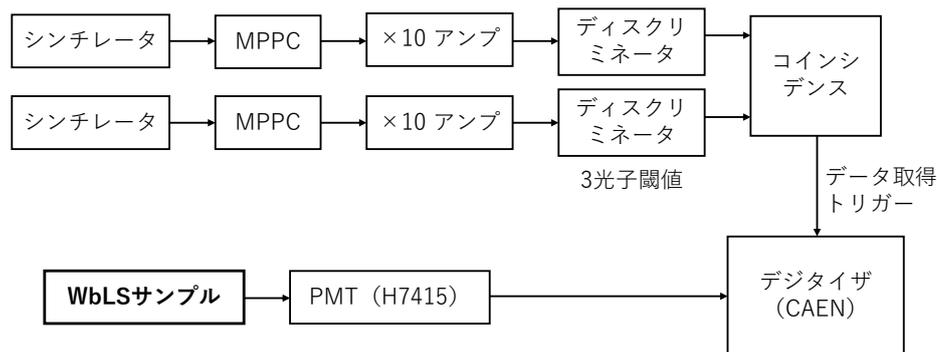


図 4.6: WbLS 光量測定回路

解析方法

データの解析方法を述べる。図 4.7 のように、デジタイザーで取得した ADC 値のベースラインからの差分を適切な時間領域で積分した ADC 積分値を各イベントの検出光量として記録した。WbLS サンプルごとに求めた ADC 積分値の分布にランダウ分布をフィッティングし、そのランダウ分布の最頻値 (MPV, Most Probable Value) を WbLS サンプルの光量と定義した。このフィッティングのエラーを測定値の不定性とした。

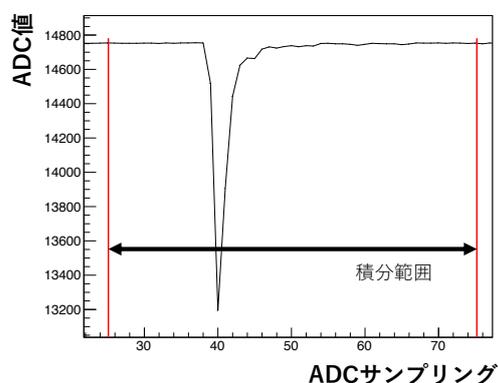


図 4.7: ADC 積分値の計算例

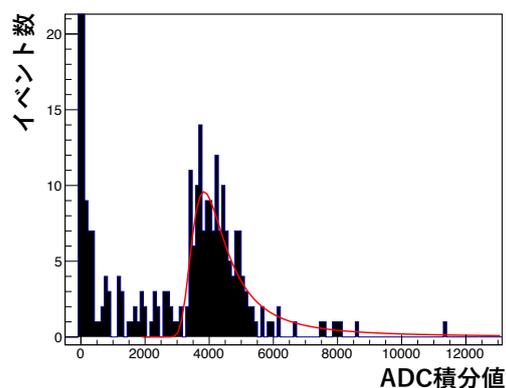


図 4.8: ランダウ分布のフィット例

4.3.2 測定結果

測定結果は図 4.9 の通りで、蛍光剤濃度および波長変換剤濃度を変更したグループ毎に光量を示している。ただしサンプル c は両方のセットに含まれて同じ測定結果を表す。

蛍光剤濃度を変更したグループについて、サンプル c が最も光量が高かったがサンプル a, b, c は光量の差が 2% 程度と小さく有意な違いは見られなかった。一方サンプル d はサンプル c と比較して 10% 程度有意に光量が低かった。波長変換剤濃度を変更したグループについて、サンプル c が最も光量が高かったが全てのサンプルで光量の差は 2% 程度と小さく有意な違いはなかった。

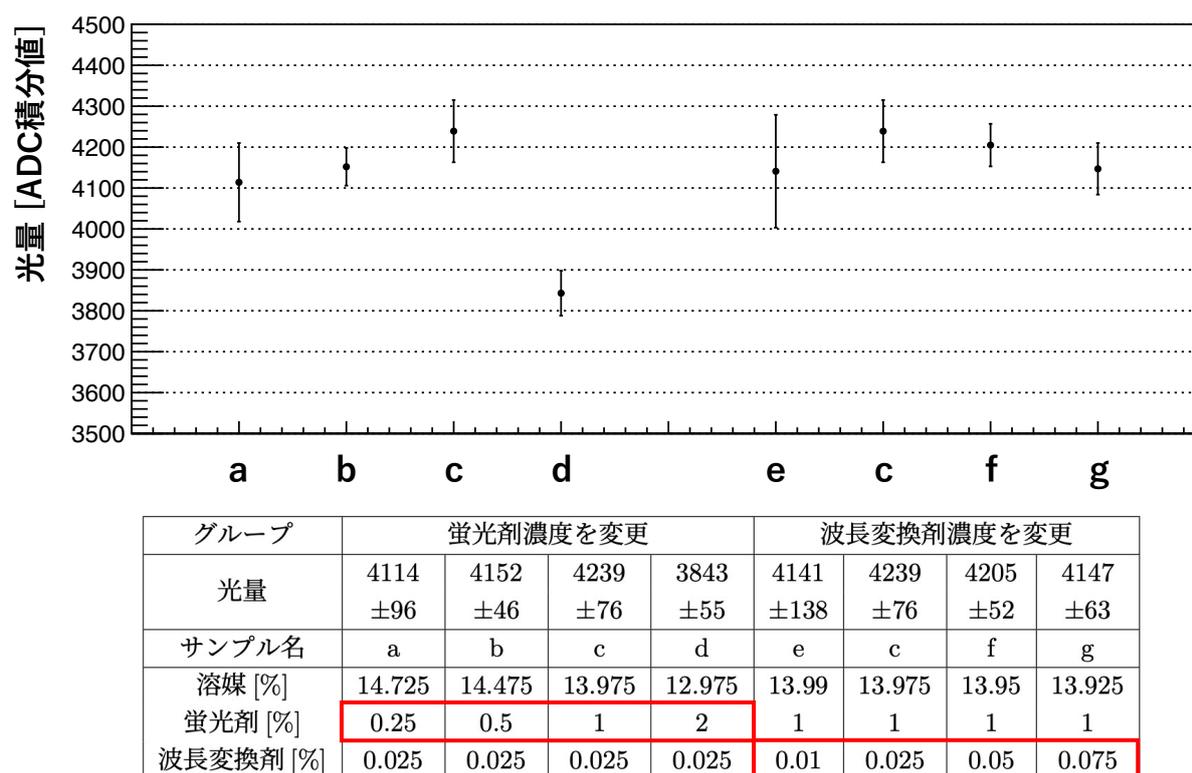


図 4.9: 光量測定の結果

まとめ

蛍光剤 PPO の濃度は重量比 0.25% 程度で発光量がほとんど飽和していて、2% 加えるとむしろ光量が低下することが分かった。特に PPO を 2% 加えたサンプル d は他のサンプルと比べて作製から溶解に時間がかかっており、安定した溶解という観点からも PPO 濃度は 1% 程度以下が良い可能性がある。また波長変換剤 Bis-MSB については、濃度が 0.01% 程度で発光量がほとんど飽和していることが分かった。測定にあたり別途 Bis-MSB を 0.1% 加えたサンプルを作製したが、Bis-MSB と同じ緑色の結晶が析出したことから安定した溶解という観点からも重量比は 0.05% 程度以下が良いと結論づける^{*32}。現時点で蛍光剤および波長変換剤の濃度最適化による光量向上の可能性は無く、異なるアプローチによる光量向上が必要である。

4.4 界面活性剤および溶媒の評価

本節では WbLS に用いる界面活性剤および溶媒の種類を変更することで光量の向上を試みる。

^{*32} 大きな違いは無かったが全サンプル中で標準サンプル c の光量が最も高く、今後の開発において断りがない場合 WbLS 標準サンプルを使用する。

4.4.1 界面活性剤の種類を変更したサンプルの評価

WbLS の発光量はほとんど液体シンチレータの割合に比例するため、少ない界面活性剤で多量の液体シンチレータを溶解することが重要である。WbLS 標準サンプルにおける界面活性剤の比率は 15% でその量を無視できない。そこで新たな非イオン性界面活性剤を用いて WbLS サンプルを作製することで、より効率的に WbLS を溶解できる界面活性剤を探索する。

界面活性剤の選定

今回用意した界面活性剤は表 4.5 に示す 6 種類で、親油性-親水性の度合いを示す Hydrophilic-lipophile balance value^{*33} (HLB 値) と曇天を共に示している^{[59][60]}。先行研究では HLB 値が

表 4.5: 用意した界面活性剤の基本性能

界面活性剤名称	HLB 値	曇天 [°C]
エマルゲン 409PV	12.0	55
エマルゲン A-60	12.8	61
エマルゲン MS-110	12.7	55
エマルゲン 108	12.1	40
エマルゲン 106	10.5	-
ナクロアティ CL-85	12.6	41

13.5、13.2、13.0 の 3 種類の界面活性剤について HLB 値が低いものほど液体シンチレータを多く溶解することが出来たことから、HLB 値が 12 台のものを中心に用意した。ここで、さらに低い HLB 値が溶解に有利な可能性を考慮して HLB 値が 10.5 の界面活性剤エマルゲン 106 を用意した。また先行研究で曇天が 23°C の界面活性剤は WbLS を作れなかったことから、曇天が 40°C 以上であることを要求した^{*34}。

溶解量の評価

新たに用意した界活性剤を用いて液体シンチレータ割合の異なる WbLS サンプルを作製して、4.2 節で行ったのと同様の手法・セットアップを用いて、3 - 30°C の範囲でそれぞれのサンプルの溶解温度帯を調べた。この測定の詳細は付録 C に記す。

WbLS の発光量を 1.2 倍以上向上するなら 18% の PC を含んだ WbLS サンプルで 20°C の溶解状態を実現する必要があるが、全ての界面活性剤で溶解状態を実現できなかった。よって界面活性剤の改良による大幅な光量向上は難しいと結論付ける。

^{*33} 非イオン性界面活性剤は種類によって HLB 値と呼ばれる固有値を持ち 0 から 20 の間の値を取る。これが 0 に近いほど親油性が高く 20 に近いほど親水性が高い。

^{*34} エマルゲン 106 の曇天は非公開であった。エマルゲンは HLB が低いほど曇天が低い傾向があり、常温で測定できない程度に低い可能性がある

4.4.2 液体シンチレータ溶媒を変更したサンプルの評価

WbLS 標準サンプルは液体シンチレータ溶媒として PC を用いるが本節ではその代替として、過去に液体シンチレータ溶媒として研究された実績がある^{[61][62]}2 種類の物質、Di-isopropylnaphtalene (DIN) および Phenyl-xylene (PXE)^{*35}を用いた WbLS を作製し、光量および液体シンチレータの溶解量を WbLS 標準サンプルと比較した^{*36}。

液体シンチレータの発光量の評価

PC, DIN, PXE の 3 種類を溶媒として用いて、WbLS 標準サンプルに用いるものと同じ組成（溶媒 93.17%、PPO 6.67%、Bis-MSB 0.17%）の液体シンチレータを作製し、4.3 節で行った宇宙線を用いた WbLS サンプルの光量測定と同様の手法・セットアップを用いて光量を測定した。測定結果を図 4.10 に示す。

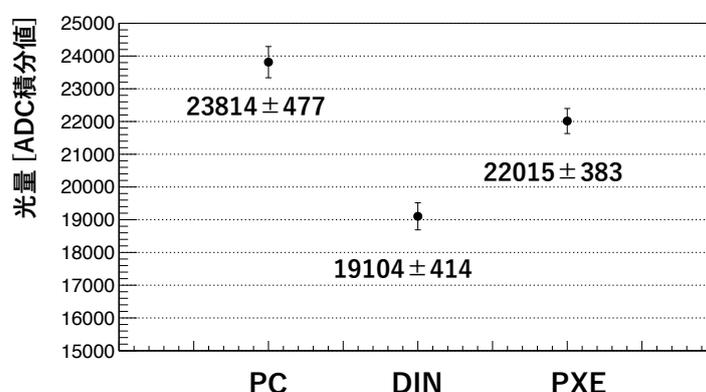


図 4.10: 液体シンチレータの光量

PC を用いた液体シンチレータの光量が一番高く、DIN および PXE をはそれぞれ PC と比べて 80%、92% 程度の光量であった。

溶解量の評価

それぞれの溶媒について液体シンチレータ割合が異なる WbLS サンプルを作製して、4.2 節で行ったのと同様の手法・セットアップを用いて、6 - 30°C の範囲でそれぞれのサンプルの溶解温度帯を調べた。この測定の詳細は付録 D に記す。

DIN と PXE を用いて透明な WbLS サンプルを作製できたが、PC を溶媒として用いた WbLS サンプルが最も良い溶解状態を示した。

*35 用いた溶媒の詳細は付録 D に記す。

*36 酒井・2014^[63]によると密度差が小さい物質は溶解時に分散安定性が向上するが、DIN と PXE の密度は 0.949 g/cm³、0.9484 g/cm³ であり PC の 0.875 g/cm³ より水に近いいため溶解量が向上することを期待している。

溶媒の改良のまとめ

WbLS に用いる液体シンチレータ溶媒として、液体シンチレータの光量および溶解量の観点から従来用いていたPCが最適であると結論付ける。

4.5 章のまとめ

本章では従来用いられてきたWbLSサンプルに比べて、より高光量で安定したWbLSを作製することを目的として開発を行った。

はじめにWbLSにおける界面活性剤や液体シンチレータの成分濃度がWbLSの溶解温度に与える影響を評価して、溶解温度帯がほとんどWbLS中の液体シンチレータ割合と用いる界面活性剤の種類により決まると結論付けた。次に液体シンチレータの成分比率を変更した複数のWbLSサンプルの発光量を測定して、蛍光剤および波長変換剤は標準サンプルの濃度で十分光量が飽和しており最適化による光量向上は期待できず、さらなる濃度増加は光量の低下や溶解状態の不安定さにつながることを確認した。また非イオン性界面活性剤や液体シンチレータ溶媒の種類変更によるWbLSの性能向上を試みたが、WbLSの光量は向上しなかった。

以上の結果からWbLSの発光量は現時点で最適に近くWbLS標準サンプルから2倍以上の大幅な光量増加は難しいと考えられる。それでも現時点から4倍程度の読み出し光量向上が必要であるから、WbLS検出器の光検出効率向上によりWbLSから生じた光子を高確率で読み出す工夫が必要と結論付ける。

第 5 章 検出器セルにおける光収集効率の向上

本章では検出器セルの内部で水ベース液体シンチレータ (WbLS) から生じた光子が、波長変換ファイバーに到達するまでの効率の向上を目指す。

はじめに 5.1 節でセルの光収集効率を改善する方法を検討する。次に 5.2 節でセルの内壁に反射シートを貼り付けたセル模型を作製し検出光量を測定する。5.3 節では多様な壁面加工法を試行したセル模型を作製し検出光量を測定する。5.4 節では測定で確認した 2 cm サイズのセル模型での光量向上が、1 cm サイズの WbLS 検出器セルでどの程度の光量増加に相当するのかをシミュレーションに基づき評価する。

5.1 セルの光収集効率を高める方法の検討

検出器のセル内で発生した光子がセル内から失われる要因として主に以下の 3 つが考えられる。

1. 壁面で透過または吸収
2. WbLS に吸収
3. 波長変換ファイバーで検出

検出器セルでの光収集効率を向上するには 1 および 2 の要因による光子ロスを抑える必要があるが、3.2.1 節で述べたように 2 の WbLS による吸収の効果は無視できるから、セルでの光収集効率向上にはセル壁面の反射率を高めることが最も重要である。

従来の開発では WbLS 検出器のセルとして 3D プリンターを用いて白色フィラメントで造形した容器が用いられてきた。先行研究^[49]ではフィラメントの材質を変更しても光量は大きく変化しない一方で、PTFE 反射シート (Thorlabs 社製^[64]) を内部に貼り付けて 1.5 倍程度光量が改善した。よって反射シートの貼り付けによる壁面反射率の向上は有望な手段である。ただしこの PTFE シートは 1 mm 程度の厚みがあるから実用が難しく^{*37}、代替の反射シートとしてスーパーカミオカンデ検出器において光反射シートとして使用実績があり 90% 程度の反射率を持つ^[65]デュポン社 Tyvek[®] 反射シートに注目した。

5.1.1 反射シートの性能評価

本節では Tyvek を含む複数種類の反射シートの光反射性能を評価するために、反射シートの光透過率を測定した。反射シートの透過率、反射率、吸収率は「透過率 = 1 - 反射率 - 吸収率」の関係であるから、吸収率が大きく異なる場合は反射率の高いシートほど透過率が小さくなり、

^{*37} 厚さ 1 mm の反射シートを 0.5 mm 壁の両面に貼り付けて WbLS として標準サンプルを用いた場合、検出器の水割合が 30% 以下となりシグナル-ノイズ比の低下により水-ニュートリノ反応の測定能力が大きく低下する。

光反射率の相対関係を推測できる。また、この結果から反射率に 反射率 < 1-透過率の制限を与えられて、明らかに反射率の低い反射シートを除外できる。

反射シートの透過率測定

はじめに Tyvek (フラッシングシート、FS^[66])、PTFE シート、SUPER コート MAX^[67]、スーパーエアテックス KD^[68] の 4 種類の反射シートを用意してそれぞれの光透過率を調べた。PTFE シートは先行研究で用いられたのと同じもので、新たに用意した 3 種類の反射シートの厚さは 0.34 mm (Tyvek FS)、0.19 mm (SC65MAX)、0.2 mm (TXKDR01) であり、いずれも PTFE シートの 1 mm から改善している。

測定は LED パルス光を MPPC で読み出して、中間に反射シートを設置した際の検出光量の減少率を測定することで行った。測定の詳細は付録 E に記す。結果は図 5.1 の通りであり、Tyvek

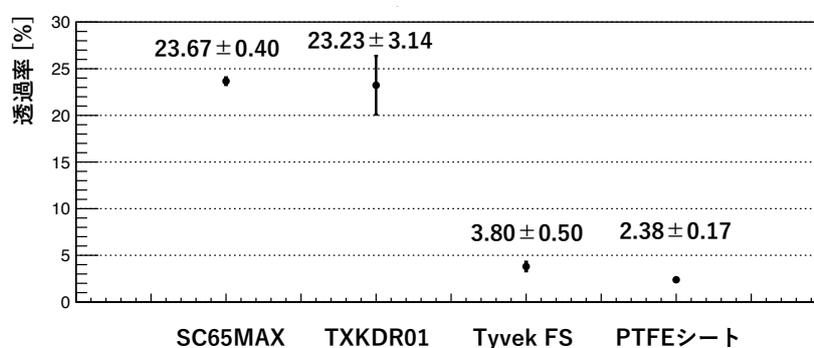


図 5.1: 透過率の測定結果

FS および PTFE シートで透過率は 5% 以下であり高反射率が期待できる。一方で残りの反射シート 2 種は透過率が 20% 以上あることから、80% 以上の反射率は期待できない。

Tyvek シートの光透過率測定

前項で Tyvek FS が低い透過率を示したから、新たに表 5.1 に示す 5 種類の新たな Tyvek 反射

表 5.1: 用意した Tyvek シートの厚さ

Tyvek 型番 (サンプル名)	厚さ [mm]	密度 [g/cm ³]	特記事項
FS	0.34	0.33	
1056D	0.17	0.32	
1073D	0.21	0.36	
1085D	0.26	0.42	
1442R	0.15	0.29	
3564M	0.18	0.33	片面にアルミ蒸着

シート^[69]について前項と同じセットアップで透過率測定を行った^{*38}。測定結果は図 5.2 の通りで

*38 1442R と 3564M については LED 側に向ける面を変更したものを別サンプル (表/裏) として測定した。1442R は比較的滑らかな側を表面、3564M ではアルミ蒸着がされていない面を表面とした。

あり、片面にアルミ蒸着が施された 3564M のサンプルで透過率は最も低く 0.4% 以下で、シートに

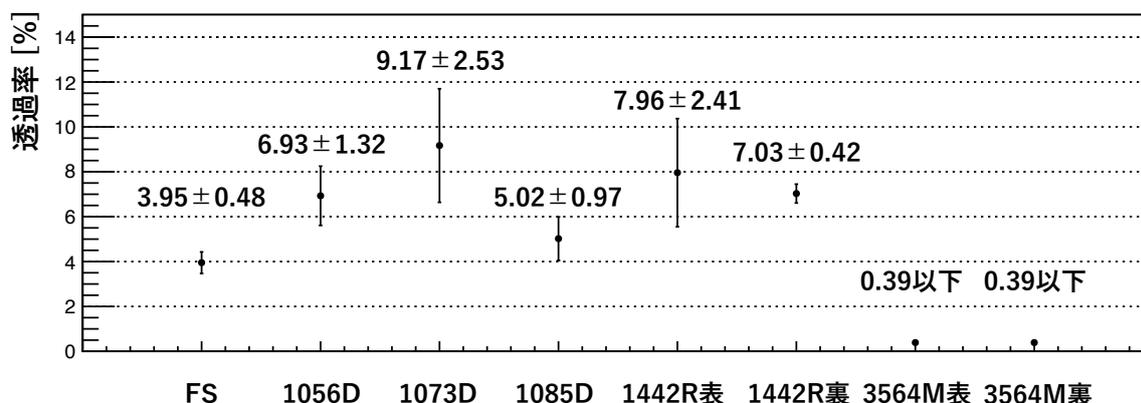


図 5.2: 透過率の測定結果

厚みがある FS や 1085D といったサンプルで透過率が低くなる傾向が見られた。Tyvek シートの透過率は数 % 程度でありセル壁面に貼り付けた際に高反射率を十分期待できると結論づける。特に 3564M が格段に低い透過率を示したことからアルミ蒸着加工が光反射に有効な可能性がある。

5.2 Tyvek シートを用いたセルの光量測定

本節では WbLS 検出器のセルを再現したセル模型を作製、内壁に Tyvek シートを貼り付けたサンプルの光量を宇宙線を用いて測定して、従来のサンプルと比較する。

5.2.1 測定サンプル

本測定では従来型のセル模型と^{*39}、そこに反射シートを追加で貼り付けた改良型を作製した。

従来型のセル模型

今回作製したセル模型は図 5.3 のように一辺が 2 cm のキューブ状で、3D プリンター（日本 3D プリンター株式会社、Raise3D Pro3^[70]）を用いて白色のポリ乳酸（PLA）フィラメント（日本 3D プリンター株式会社、RP-22-01^[71]）によって造形した。これは上部から WbLS を注入する構造となっており測定時は注入口に蓋をした。セルには 4 本のファイバーが通されており、内部で生じた光子はこのファイバーを通して MPPC (S13081-050CS) に伝搬して読み出される。ファイバーの非読み出し端面はカットされた状態で端面に接着剤が付着しないよう注意した。

測定サンプル

測定サンプルは、追加の加工を行わずそのまま用いた従来サンプルに加えて、セル模型の壁面に反射シートを貼り付けた 5 種類の合計 6 種類作製した。今回作製したセル模型の説明を表 5.2 に

*39 セルの内部構造はほとんど同一だが、本測定のためにデザインを改良したものでセルの外部形状等は異なっている。

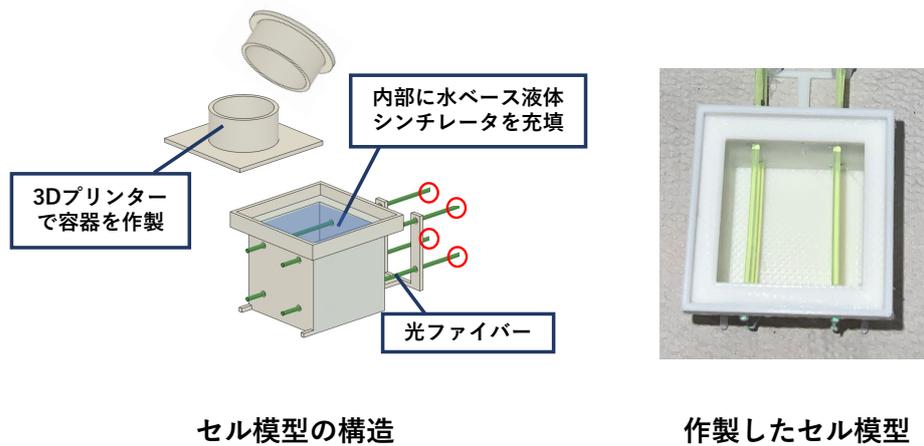


図 5.3: 光量測定に用いたセル模型

示す。光量増加の基準となる従来サンプル、また反射シートによる光量増加の再現性を見るため

表 5.2: 測定セルと加工法

サンプル名	説明
従来サンプル	3D プリンターで造形したサンプル。これまで用いてきたセル容器の作製方法で、光量増加の基準サンプル。
PTFE	従来サンプルの壁面に PTFE 反射シートを貼り付けたサンプル。先行研究で用いられたサンプル。
Tyvek FS	従来サンプルの壁面に Tyvek FS を貼り付けたサンプル。
Tyvek 1085D	従来サンプルの壁面に Tyvek 1085D を貼り付けたサンプル。
Tyvek 3564M 裏	従来サンプルの壁面に Tyvek 3564M を貼り付けたサンプル。アルミが蒸着された面を内側に向けている。
アルミ蒸着シート	従来サンプルの壁面にアルミ蒸着シートを貼り付けたサンプル。

に PTFE シートを貼り付けた 2 つのサンプルを作製した。そして透過率測定で比較的低かった 3 種類の Tyvek シート FS、1085D、3564M を用いたセルを用意した。またアルミ蒸着が光反射に優れる可能性からアルミ蒸着シート（ケニス株式会社、3-115-0800^[72]）を用いたセルを作製した。各反射シートの見た目とセル壁面への貼り付け方は図 5.4 の通りで、各加工法ごとに 2 つセルを作製した。WbLS は全てのサンプルで標準サンプルを用いた。

5.2.2 測定方法

セットアップ

測定方法とセットアップは図 5.5 に示す通りで、宇宙線が測定セルの内部を通過した際にファイバーから伝搬する光子を MPPC (S13081-050CS) を用いて読み出した。今回の測定ではセル模型の上下にプラスチックシンチレータを設置して、それらが同時に宇宙線を検出した場合に図 5.6 に示すように、読み出し信号のコインシデンスを取ってトリガーを生成しデジタイザーに入力し

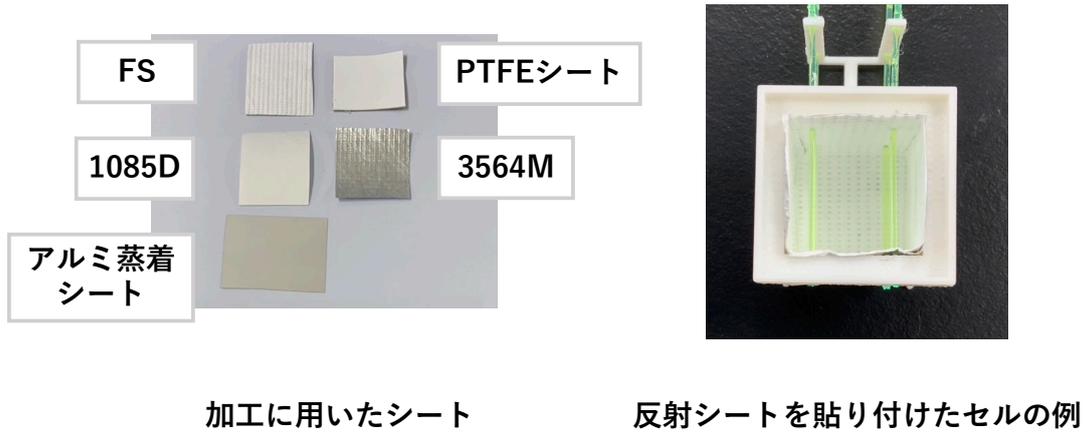


図 5.4: 加工に用いた反射シートとその貼り付け方

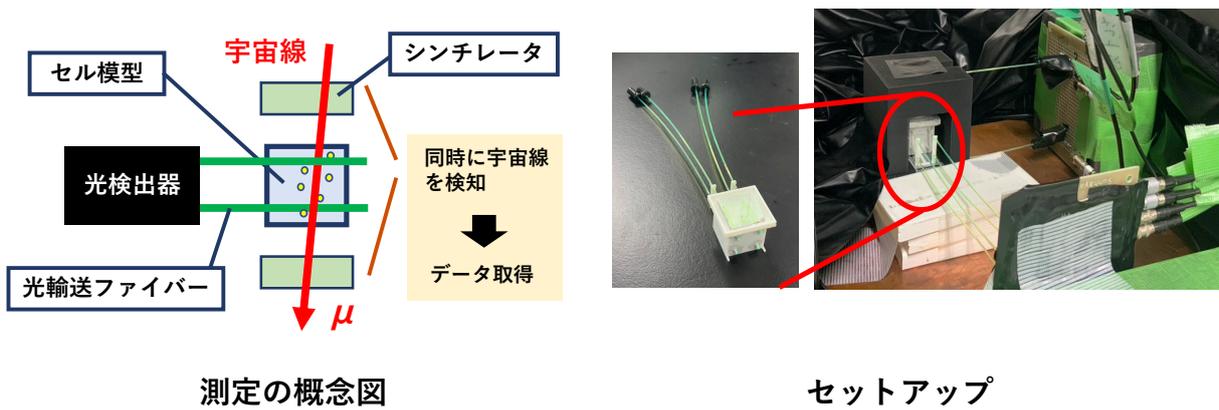


図 5.5: セル光量測定の設定アップ

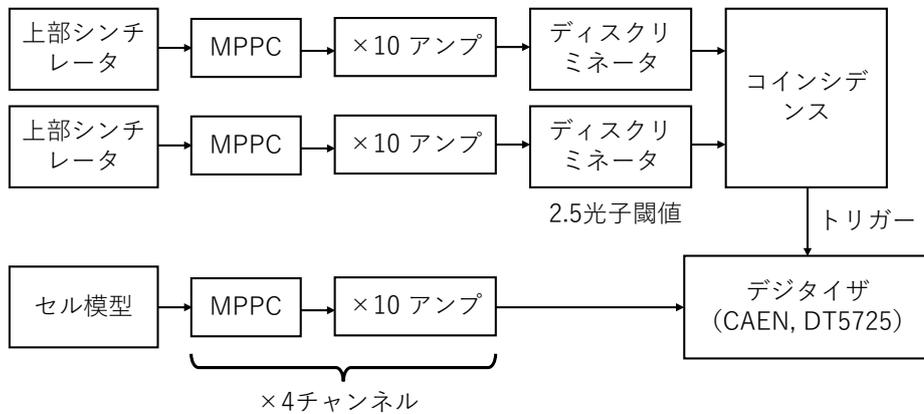


図 5.6: セル光量測定のためのデータ取得回路

た。MPPC からの信号は 10 倍アンプを通した後にデジタイザー（CAEN, DT5725）を用いて記録した。セットアップは恒温槽の内部に設置して、測定中は内部の温度を 20 °C に維持した。ここでトリガーとして 1 辺が 2.5 cm の正方形面積をカバーするプラスチックシンチレータを上下に設置したが、そのため図 5.7 のように実際はセル模型に侵入せず光量が 0 のイベントが一定数存在する。このようなイベントは低光量のサンプルで区別が難しいため今回は検出光量を全イベント

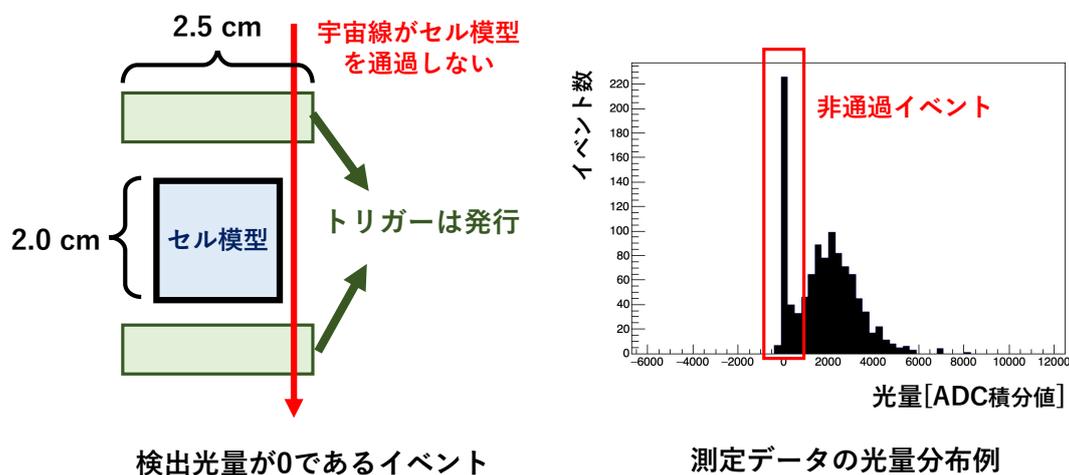


図 5.7: セルを通過しない宇宙線へのトリガー

の平均光量で定義した。これは壁面加工による光量増加率を評価する際には問題にならない。

測定方法

各測定は 23 時間程度行い、測定の開始前に毎回 MPPC の較正データを取得した。また測定終了後はセルの液面高さを確認し液漏れがないことを確かめた。

較正データは MPPC のダークノイズを 0.5 光子閾値および 1.5 光子閾値の 2 通りのセルフトリガーで取得して、図 5.8 のように ADC 値のベースラインからの差分を時間積分した ADC 積分値の分布ピークに対するガウスフィットにより、1 光子と 2 光子信号に対応する ADC 積分値を調べた。そして両者の値から光子数と ADC 積分値の対応を一次関数でモデル化した。これを 4 本の読み出しファイバーでそれぞれ行った。この較正モデルを用いることで各イベントにおいて求めた ADC 積分値を検出光子数に変換した。この検出光量は 4 本の読み出しファイバー毎に求めてその平均値を測定の検出光量とし、2 回の測定値の平均を反射加工の検出光量とした^{*40}。

5.2.3 結果と考察

測定結果は図 5.9 の通りであり、Tyvek シートを用いたいずれのサンプルも、従来サンプルと比較して光量が向上しなかった。特に光透過率が最も低い Tyvek 3564M 裏のサンプルで光量が最小となった。一方で先行研究で光量の向上が見られた PTFE のサンプルを貼り付けたセルでは光量が向上して、その増加率は 1.57 ± 0.23 であった。

*40 測定値の不定性にはファイバー毎の検出光量のばらつき、測定毎の検出光量のばらつきを考慮した。

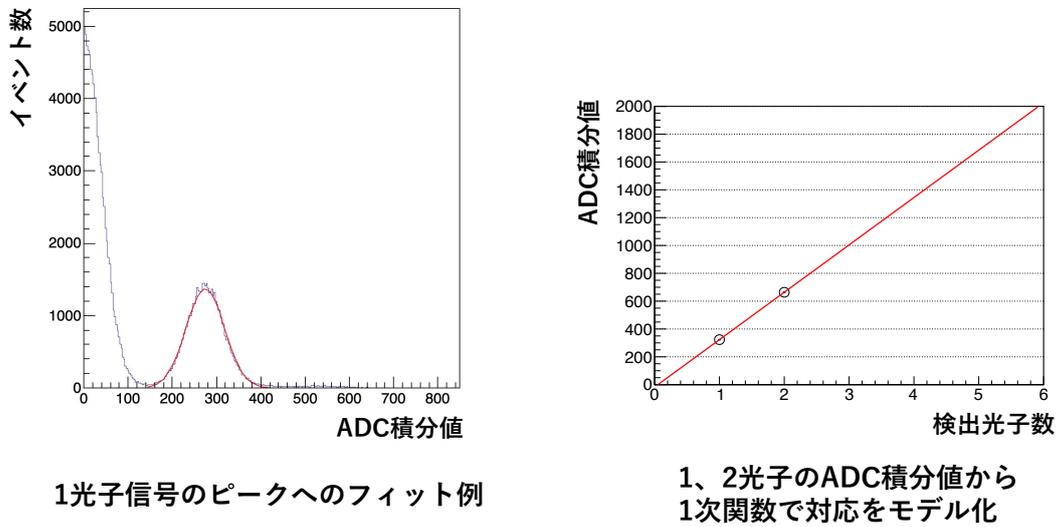
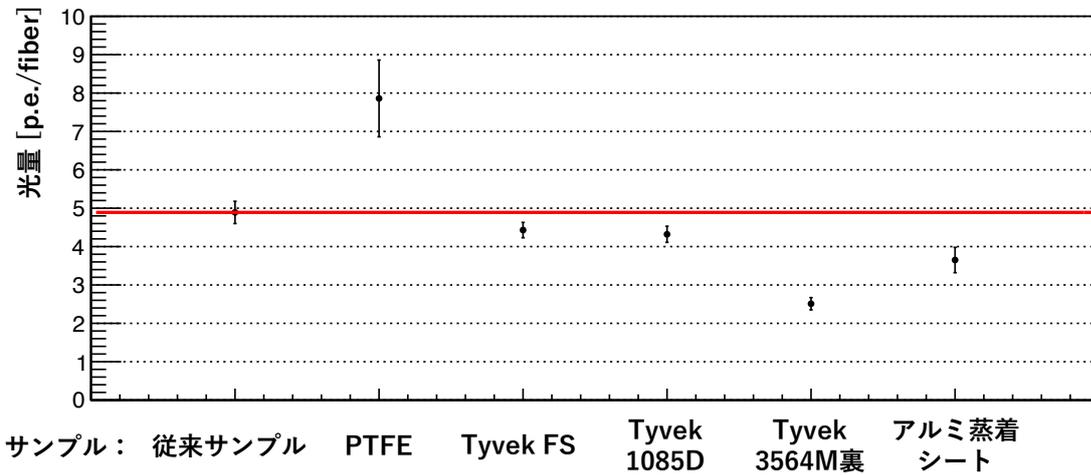


図 5.8: セル光量測定における較正方法



測定サンプル	従来サンプル	PTFE	Tyvek FS	Tyvek 1085D	Tyvek 3564M裏	アルミ蒸着シート
光量 [p.e./fiber]	4.89 ± 0.29	7.86 ± 1.00	4.43 ± 0.20	4.32 ± 0.21	2.51 ± 0.16	3.65 ± 0.33

図 5.9: セル光量の測定結果

考察

今回用いた Tyvek シートはいずれも光透過率が低かったが光量向上には至らなかった、また 5.1.1 節の測定で特に低い透過率を示した Tyvek 3564M を用いたセル模型で光量が最小となった。ここから反射シートの吸収率が透過率に影響を与える影響が大きいことで、必ずしも低い透過率が高い反射率を意味しないことが分かる。また特にアルミ蒸着を用いた 2 つのサンプル（Tyvek 3564M 裏、アルミ蒸着シート）で光量が下がったことから、アルミ蒸着加工自体が反射性能で優れない可能性がある。PTFE を用いたサンプルでは光量が増加したが、この増加率は先行研究の結果と同じ程度であり再現性があるから、測定自体は正しく行われたと考えられる。また 2 つずつ作製したサンプルの光量差からセルの品質に由来する光量変動は 10% 程度と考えられる。この推定の詳細は付録 F に記す。

5.2.4 反射シート表面構造の分析

今回のセル光量測定では PTFE シートを用いることによる反射率の向上を確認できた一方で、Tyvek を用いると光量が低下する結果となった。高い光反射率を持つ反射シートを探索するために、今回セル壁面の表面を顕微鏡（斉藤光学、SKM-Z200C-PC^[73]）で観察して反射率と表面構造の関係性を考察する。今回は光量測定を行った 6 種類のセル模型の表面について、それぞれ 1 倍と 6 倍で観察して、専用ソフトを用いて表面を撮影した。画像を図 5.10 に示す。1 倍の画像には 1 mm のスケール、6 倍の拡大画像には 0.2 mm のスケールを表示している。またサンプルの光量が高かった順番に左上から右下へ並べている。

考察

光量が高かった PTFE および従来サンプルは表面が滑らかである一方で、光量が低かった Tyvek 3564M 裏やアルミ蒸着シートのサンプルは表面が繊維質であった。中間の光量を示した Tyvek FS や Tyvek 1085D は表面がやや繊維質でありながらも、低光量のサンプルより比較的滑らかであった。このように光量が高いサンプルほど表面が滑らかな傾向が見られた。そのため滑らかな表面を持つ反射加工を中心に探索することが重要と考えた。

5.3 多様な反射加工を用いたセルの光量測定

5.2 節では Tyvek シートを用いた測定サンプルで検出光量が向上しなかったが、反射面の平坦さを考慮して反射加工を探索することで壁面反射率を向上できる可能性を見た。そこで本節ではこの方針に基づき 5.3.1 節で述べるように多様な反射加工を用いたセル模型を作製し検出光量を測定した。

5.3.1 測定サンプル

測定サンプルは 5.2.2 節で述べた従来サンプルに反射加工を追加することで作製した。ただし反射材フィラメントサンプル（RF）のみ、異なるフィラメントで造形を行なった。用いた反射加工

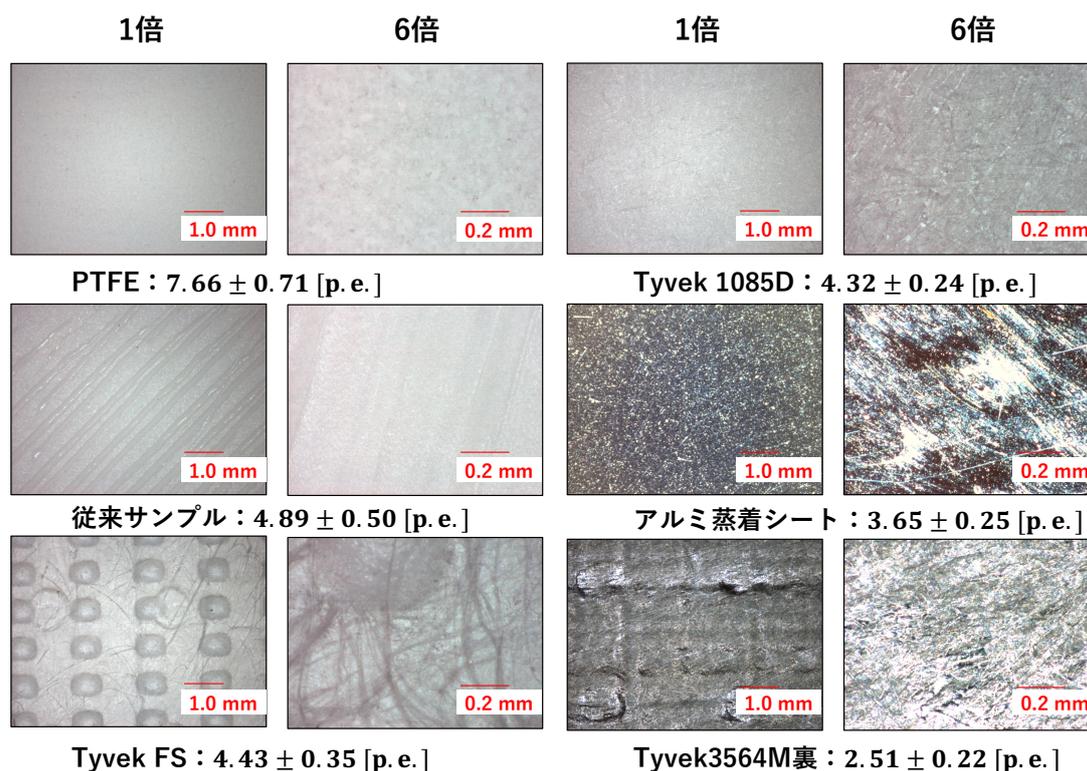


図 5.10: 反射面表面の拡大画像 (1 倍 + 1 mm スケール、6 倍 + 0.2 mm スケール)

法は、反射シートの貼り付け (S-)、反射スプレーの噴霧 (SP-)、反射塗料の塗布 (P-)、アルミ蒸着 (AD-)、反射剤フィラメントの使用 (RF) に分類できて、今回用意した 20 種類のセル模型の詳細を表 5.3 に示す。ここでサンプル名は X-Y(-Z) と表記して、X は反射加工法、Y はサンプル名または製造業者を表し、Z は製造業者や製品の種類が同じ場合にさらに区別するために用いている。また従来サンプルは 5.2 節の測定で用いたものと同じである。各反射加工法の詳細を以下の各項目で述べる。

反射シートの貼り付け (S-)

反射シートをセルの壁面に貼り付けることで作製した。サンプル LS-R、LS-W、PTFEA は接着剤で貼り付けて、他のサンプルは反射シートに付属する接着面を利用して貼り付けた。用いた反射シートとその厚さおよび反射の特徴を表 5.4 に示す。ここで用いたルミラーシート^[74]は各シリーズ (E20、E6SR) で最も薄いものである。E6SR は増反射シリーズであるが厚みがあるため、薄い E20 白色シリーズを合わせて用意した。先行研究で高い反射性能を示した PTFE シートについてアラム社製で厚さが 0.1 mm のものを用意した^{*41}。3M Specular Reflector (SR) 反射シートは高反射率を持つシートとして研究された実績があり、カタログ性能として 400 nm 以上の波長領域で 99 % 程度の反射率を持つ^[75]。その他の反射シートは市販品で図 5.11 のように見た目が類似して、表面はいずれも滑らかであり反射性能を期待している。S-TR-は 3 種類用意して反射率が 3 段階異なり (N<H<SH)、この傾向が正しく現れるかを見る。

*41 薬品耐性が高く WbLS との相性が良いことを期待しているが、目視で裏側が透ける程度の透過率があった。

表 5.3: 測定セルと加工法

	サンプル名	説明
1	従来サンプル	3D プリンターで造形したサンプル。これまで用いてきたセル容器の作製方法で、光量増加の基準サンプル。
2	S-LS-W	壁面に東レ、白色ルミラーシートを貼り付けたサンプル。
3	S-LS-R	壁面に東レ、増反射ルミラーシートを貼り付けたサンプル。
4	S-PTFEA	壁面にアラム社 PTFE シートを貼り付けたサンプル。
5	S-3M-SR	壁面に 3M SR 反射シートを貼り付けたサンプル。
6	S-TR-N	壁面に Trusco 社普通反射シートを貼り付けたサンプル。
7	S-TR-H	壁面に Trusco 社高輝度反射シートを貼り付けたサンプル。
8	S-TR-SH	壁面に Trusco 社超高輝度反射シートを貼り付けたサンプル。
9	S-3M-P	壁面に 3M プリズム高輝度反射シートを貼り付けたサンプル。
10	S-WAKI	壁面に WAKI 社高輝度反射シートを貼り付けたサンプル。
11	S-SR	壁面にセーフラン社高輝度反射シートを貼り付けたサンプル。
12	SP-A-L	壁面にアサヒペン社光反射スプレーを噴霧したサンプル。
13	SP-A-P	壁面にアサヒペン社蛍光・夜間塗料用スプレーを噴霧したサンプル。
14	SP-S	壁面に SINLOIHI 社ビームライトスプレーを噴霧したサンプル。
15	SP-AS	壁面にアクリルサンデー社ミラー調スプレーを噴霧したサンプル。
16	P-NP	壁面にニッペーホームプロダクツ社屋外シルバー塗料を塗布したサンプル。
17	P-SP	壁面にサンデーペイント社スーパーシルバー塗料を塗布したサンプル。
18	AD-N	壁面にアルミ蒸着加工を行なったサンプル。
19	AD-P	壁面にアルミ蒸着加工を行い、その上から保護膜を塗装したサンプル。
20	RF	反射剤フィラメントを用いて造形したサンプル。

表 5.4: 用いた反射シートの厚さおよび特徴

サンプル名	反射シート (型番)	厚さ [mm]	特徴
S-LS-W	白色ルミラーシート (E20#50)	0.05	拡散反射
S-LS-R	増反射ルミラーシート (E6SR#188)	0.188	拡散反射
S-PTFEA	PTFE シート (アラム社製)	0.1	拡散反射
S-3M-SR	3M SR 反射シート (DF2000MA)	0.104	鏡面反射
S-TR-N	普通反射シート (HS-2222F W)	0.3	シートに内蔵した微小ガラスで反射
S-TR-H	高輝度反射シート (HS-2222C W)	0.35	シートに内蔵した微小ガラスで反射
S-TR-SH	超高輝度反射シート (HS-2222P W)	0.465	シートに内蔵した 3 面体キューブで反射
S-3M-P	3M 反射シート (RP45 WHI)	0.5 以下	シートに内蔵したプリズムで反射
S-WAKI	高輝度反射シート (AHW012)	0.5 以下	シートに内蔵した微小ガラスで反射
S-SR	高輝度反射シート (J2695-WH)	0.35	PVC 材質のステッカー

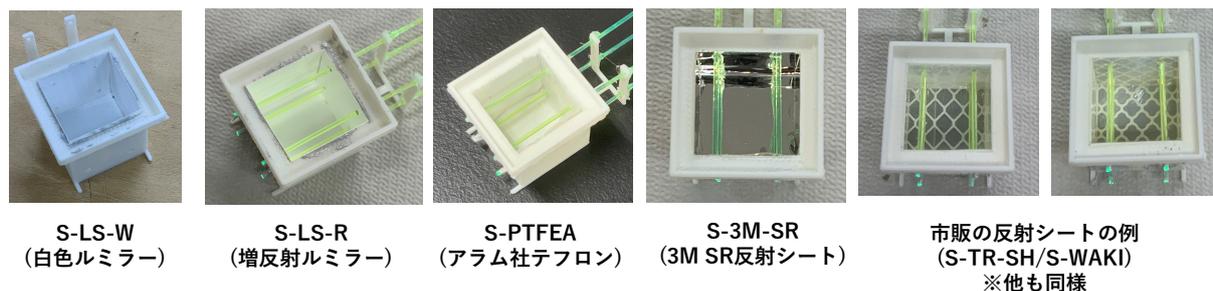


図 5.11: 反射シートを用いたセルの見た目例

反射シート LS-W、LS-R、PTFEA について 5.2.4 節と同様の方法で表面を倍率 6 で撮影した画像を図 5.12 に示す。いずれのシートも表面が平坦であり、3M-SR は鏡面反射のため照明を反射してよく見れなかったが確認できる限りでは不均一な構造なかった^{*42}。

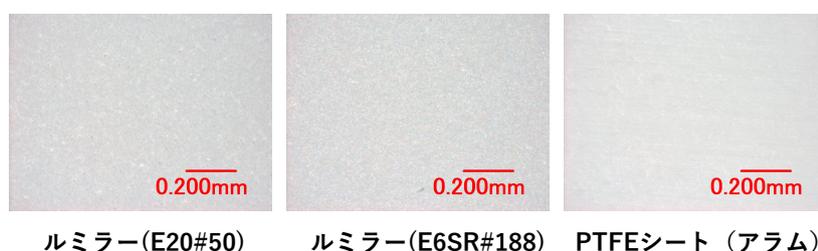


図 5.12: 反射シートの表面 (倍率 6)

反射スプレーの噴霧 (SP-)

反射スプレーをセル壁面に噴霧することで作製した。スプレーを用いることで滑らかな表面が形成できることを期待している。用いたスプレーはいずれも市販のもので、型番はアサヒペン 501493 (A-L)、507723 (A-P)、SINLOIHI 214G4 (S)、アクリルサンデー MS-80 (AS)。図 5.13 に示すように A-L、A-P、S は白色、AS はシルバーの反射スプレーである。これらのサンプルの表面

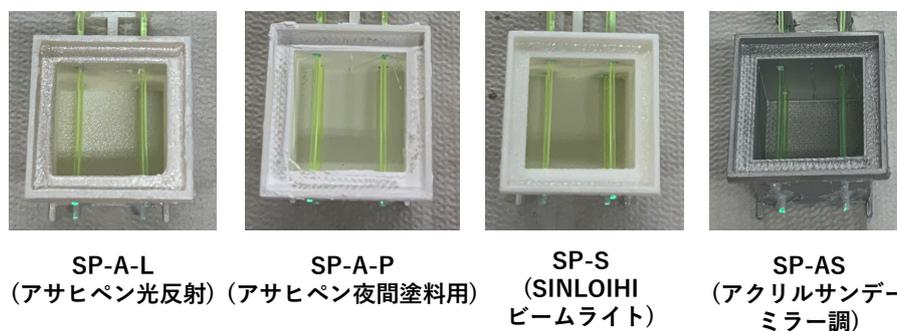


図 5.13: 反射スプレーを用いたセルの見た目

を図 5.14 に示す。

^{*42} その他のシートは表面の観察を行っていない。

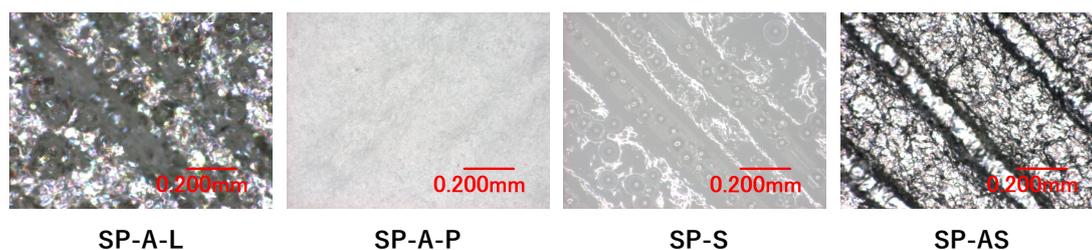


図 5.14: 反射スプレーで加工した表面 (倍率 6)

SP-A-P のサンプル表面が最も滑らかで、次に SP-S が滑らかである。SP-A-L や SP-AS の表面は凹凸が見られた。

反射塗料の塗布 (P-)

反射塗料をセル壁面に塗布することで作製した。塗料を用いることで滑らかな表面が形成できることを期待している。用いた塗料はいずれも市販のもので、製品の JAN コードは 4976124-160011 (NP) 4906754-251711 (SP)。色は共にシルバーである。P-NP、P-SP のサンプルとその表面を図 5.15 に示す。

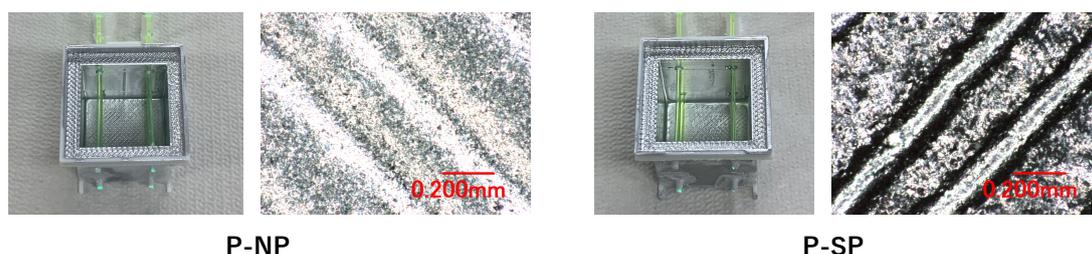


図 5.15: 反射塗料で加工したサンプルとその表面 (倍率 6)

P-NP の表面は滑らかで、P-SP は一定の凹凸が見られた。

アルミ蒸着 (AD-)

3D プリンターで印刷した状態のセル模型にアルミ蒸着を行った。蒸着は株式会社トーカイに Al 金属膜加工を依頼して行った。今回はアルミ蒸着を行ったサンプル (AD-N) とそこへさらに保護膜を追加したサンプル (AD-P) の 2 通りを用意した。WbLS による溶解を防ぐため将来的にセル内への保護膜加工を検討しており保護膜が光量へ与える影響を評価できることを期待している^{*43}。アルミ蒸着層の厚さは 380 から 500 nm で、波長 400 -700 nm の光に対し 90% 程度の反射率を持つ^[76]。AD-N、AD-P のサンプルとその表面を図 5.16 に示す。

AD-N および AD-P で見た目はほとんど変わらない。表面はどちらも凹凸が激しく蒸着時の熱で融解した可能性がある。

^{*43} 保護膜は SiO₂ 層で厚さは数十 nm 程度であり反射率にほとんど影響しないと予想される。

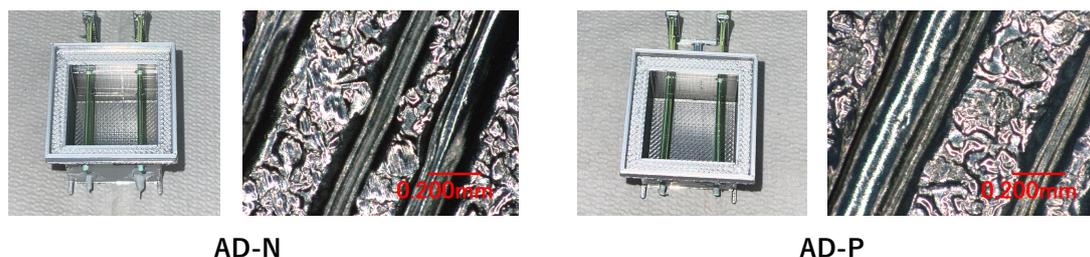


図 5.16: アルミ蒸着で加工したサンプルとその表面（倍率 6）

反射剤フィラメントの使用（RF）

反射剤フィラメントを用いてセル模型を造形した。用いるフィラメント以外は従来サンプルの作製法と同じである。この反射剤フィラメントはポリプロピレン（PP）をベースの素材としてそこに反射剤として酸化チタンを 20% 添加したものであり、東京インキ株式会社^[77] から提供いただいた試作品である。表 5.5 にその反射性能を示す^{*44}。

表 5.5: 反射フィラメントの反射性能

厚さ [mm]	反射率 [%]	拡散反射 [%]	透過率 [%]
0.4	91.50	86.21	0.003
1.0	90.62	86.35	0.0004

このように十分高い反射性能を期待できる。ただし本フィラメントでは造形の安定性がまだ不十分で、参考値として扱う。

5.3.2 測定方法

測定は 5.2 節の測定と同じセットアップおよび手法を用いて行った。ただしこのセットアップは再設置したものであり、トリガーとセルの位置関係のわずかな違いが光量のバイアスになる可能性があり、従来サンプルの光量を再測定してこちらを基準とした。

測定は各反射加工毎に 1 回行った。ただし S-LS-R および RF のサンプルは 2 回、従来サンプルおよび S-3M-SR のサンプルは 3 回測定した^{*45}。測定値の不定性は、測定回数が 1 回のサンプルについて作製品質に由来する 10% の誤差を追加で合成して評価した。すなわち、最終誤差 = $\sqrt{\text{測定誤差}^2 + (0.1 \times \text{測定値})^2}$ 。その他のサンプルは 5.2 節と同じ方法で評価した。

RF サンプルについては 2 回とも測定の途中で液漏れが発生し光量が低下したため、測定データの変動から判断して、前半の 500 イベントのみを解析に用いた。

^{*44} メーカー提供値

^{*45} 従来サンプルは基準となるから増加率の不定性を減らすために 3 回測定した。S-LS-R および S-3M-SR は光量が大きかったから追加で測定を行った。特に S-3M-SR は 1 回目と 2 回目の測定値にばらつきがあったため 3 回目を行った。RF は東京インキに測定情報を提供する目的から不定性削減のため 2 回測定を行った。

5.3.3 結果と考察

測定結果は図 5.17 の通りで、S-LS-R と S-3M-SR のサンプルは測定値にバイアスが生じた可能性があり補正值を別途赤で示している。このバイアス補正值は測定値の誤差範囲であるから誤差を考慮するかぎり結論に大きな問題はない。この詳細は付録 G に記す。

従来サンプルの光量 3.76 ± 0.24 [p.e./fiber] に対して、ルミラーシートおよび 3M 反射シートを貼り付けたサンプル (S-LS-W、S-LS-R、S-3M-SR) が最も大きな約 8 [p.e./fiber] の光量を示して^{*46}、光量の増倍率はそれぞれ順に 2.13 ± 0.28 、 2.11 ± 0.44 、 2.10 ± 0.51 であった。その次に反射剤フィラメントで作製した RF サンプルが 6.34 ± 1.33 [p.e./fiber] と大きな光量を示した。また TRUSCO 社の超高輝度反射シートを用いたセルで光量は 4.97 ± 0.61 [p.e./fiber] となり一定の改善を確認した。その他のセルサンプルは従来サンプルと同じ程度かそれ以下の光量だった。

考察

高光量を示した S-LS-W、S-LS-R について表面は平坦であった。また S-3M-SR についても、可能な観察の範囲で表面に不均一な構造は見られなかった。このように高反射率を実現するためには、平坦な表面が必要である可能性が高い。ただし、同様に平坦な表面であった S-PTFEA、SP-A-P、P-NP といったサンプルでは光量があがらず、平坦であれば必ず反射率が高くなるとは言えない。

TRUSCO 社の 3 種類の反射シートについて光量は、超高輝度 (TR-SH) > 高輝度 (TR-H) > 普通 (TR-N) となった。これは反射シートの反射率が高いほど光量が向上するとするという仮説と整合する。

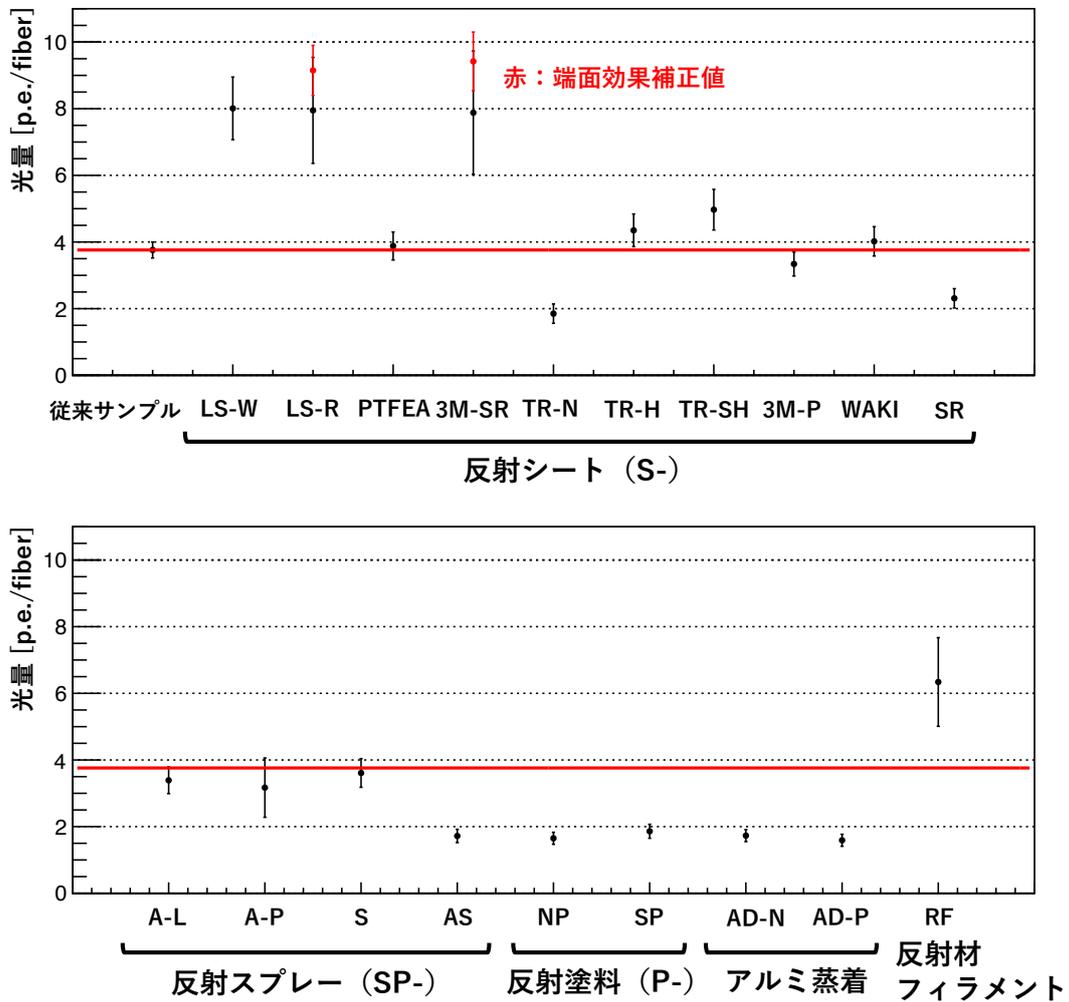
アルミ蒸着を行ったサンプル (AD-N、AD-P) は光量が 1.73、1.59 [p.e./fiber] 以下と最も低い水準だった。5.2 節の測定でもアルミ蒸着が行われた反射シートを用いたセルで光量が最低であったことから、アルミ蒸着は反射加工として優れない可能性がある。さらに反射シート以外のサンプルで光量が 2 [p.e./fiber] 以下であったものは全て見た目が銀色であった。(SP-AS：銀色スプレー、P-NP、-SP：銀色塗料、AD-N、-P：アルミ蒸着) よって、より一般に銀色の反射加工は光量を減少させる傾向があると考えられる。

保護膜を追加した AD-P サンプルの光量は、AD-N に対して 0.92 ± 0.14 倍であった。測定の不定性が大きいですが、保護膜により光量が 0.5 倍になるような極端な減少は起こらないと言える。また保護膜により光量が低下しないという予想とも不定性の範囲で矛盾しない。

5.3.4 セルの光量測定のまとめ

セル内での光収集効率を高めるために、5.2 節および 5.3 節で合計 23 種類の壁面加工法を試行してセルの光量を測定した。その結果セル壁面に反射シートを貼り付ける加工で、従来サンプルから 2.13 倍 (ルミラー、E20#50)、2.11 倍 (ルミラー、E6SR#188)、2.10 倍 (3M、DF2000MA) の光量向上を確認した。ここで測定に生じた端面効果の影響を考慮するとより高い、2.43 倍 (ルミラー、E6SR#188) および 2.51 倍 (3M、DF2000MA) の光量増加が期待できる可能性がある。

^{*46} 補正值は S-LS-R で 9.15 ± 0.75 [p.e./fiber]、S-3M-R で 9.42 ± 0.88 [p.e./fiber] となる。



サンプル毎の光量 [p.e./fiber]				
従来サンプル	S-LS-W	S-LS-R	S-PTFEA	S-3M-SR
3.76 ± 0.24	8.01 ± 0.94	7.95 ± 1.59	3.88 ± 0.42	7.88 ± 1.85
S-TR-N	S-TR-H	S-TR-SH	S-3M-P	S-WAKI
1.85 ± 0.29	4.35 ± 0.49	4.97 ± 0.61	3.34 ± 0.36	4.02 ± 0.44
S-SR	SP-A-L	SP-A-P	SP-S	SP-AS
2.31 ± 0.29	3.39 ± 0.40	3.17 ± 0.89	3.61 ± 0.43	1.72 ± 0.20
P-NP	P-SP	AD-N	AD-P	RF
1.65 ± 0.18	1.86 ± 0.21	1.73 ± 0.18	1.59 ± 0.18	6.34 ± 1.33

図 5.17: セルの光量測定の結果

5.4 サイズ 1 cm のセルにおける光量のシミュレーション

5.3 節ではサイズ 2 cm のセル模型を用いて光量を測定したが、サイズ 1 cm の WbLS 検出器セルで期待できる光量は分からない。現在の光量改善が目標に対してどの程度かを判断するために、測定器シミュレーションのソフトウェアである Geometry and Tracking 4 (Geant4) [78][79][80] を用いて、はじめに今回測定した光量値から反射加工を行った WbLS 検出器セルの検出光量を推定した。次に WbLS 検出器セルにおける反射加工による光量の増加率を見積もった。

5.4.1 Geant4 シミュレーションの構成

Geant4 シミュレーションの構成を述べる。再現した WbLS セルは図 5.18 に示す通りで、主に WbLS、セル壁面、波長変換ファイバーの 3 要素で構成されている。ここにセル壁面に垂直かつ入射位置が平坦にばらつくように MIP のミュオンを入射して、内部で発生する光量を再現する。

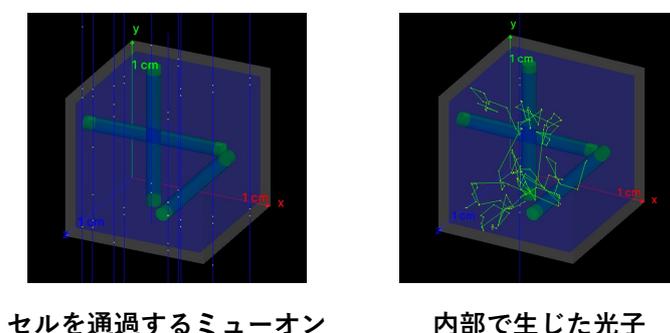


図 5.18: Geant4 によるシミュレーションの概念

光子はファイバーに接触した時点で検出判定となる。WbLS の発光量、散乱長、吸収長および壁面反射率として本節では 100 光子/MeV、5 cm、100 cm の値を用い、壁面反射率は適宜変更した^{*47}。

用いた WbLS セルデザイン

今回用いたセルのデザインは図 5.19 の通りで、それぞれセルのサイズとファイバーの本数および位置が異なっており、その他の条件は統一した。セルの検出光量は各ファイバーにおける検出光量の平均 [p.e./fiber] で定義して結果の不定性にはファイバー毎の検出光量のばらつきを考慮する。

5.4.2 サイズ 1 cm のセルにおける検出光量の推定

本節ではセル模型で測定した光量からサイズ 1 cm の WbLS 検出器セルにおける光量を推定する。シミュレーションによりセルサイズが異なることによる光量の変化比を求めて、それを測定値にかけて補正を加えて光量を見積もる。

^{*47} 今回は検出光量の比率のみ使うから WbLS の発光量は結果に影響しない。また散乱長および吸収長は設定値程度の長さであれば光量にほとんど影響せず、その不定性も無視できる。

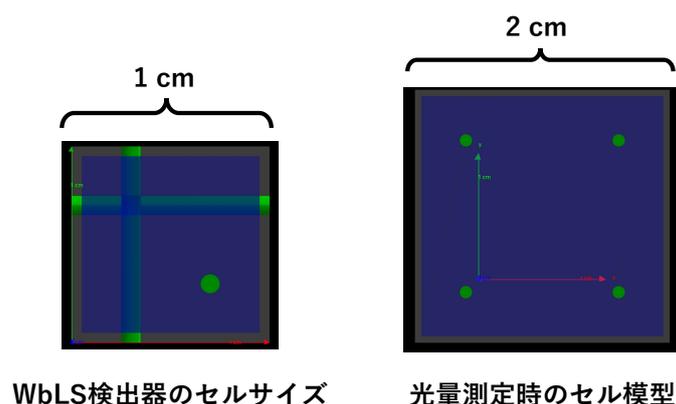


図 5.19: シミュレーションに用いたセルのデザイン

サイズの異なるセルにおける光量比の見積もり

サイズ 2 cm のセル模型に対する WbLS 検出器セルの光量比は壁面反射率によって変化し 5.1 式のように近似できる。これはシミュレーションの結果に経験的に決めた近似関数をフィッティングして求めており、具体的な導出は付録 H.1 に記す。

$$\text{光量比 } (R) = \frac{1\text{cm セルでの光量 } (R)}{2\text{cm セルでの光量 } (R)} = \frac{0.91 - 0.78 \times R}{1 - 0.778 \times R} \quad (5.1)$$

トリガーによる光量へのバイアス

5.2.2 節で述べたようにトリガーとセルの位置関係により、測定光量にはセルを通過しないイベントが一定数含まれる。上から見たトリガー面積 $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ に対するセルの存在領域は 64% であり、この比をそのまま光量の減少比と見積もる^{*48}。よって測定光量に補正係数 $C = 1.56$ をかけて補正光量とする^{*49}。

結果

測定で最も高い増加率を示したルミラー (E20) および、端面効果補正後に最も高い増加率となった 3M SR 反射シートを用いた 2 種類の加工法について WbLS 検出器セルの光量を評価する^{*50}。壁面反射率として 0.8 ± 0.1 を仮定すると、結果は表 5.6 のようになる。よってサイズ 1 cm の WbLS 検出器セルでも 10 [p.e./fiber] 程度の光量が期待できると結論づける。

^{*48} 多くの宇宙線がほとんど地面に垂直なら正しいが、実際は斜めであることを考慮すれば正確でない。実際に純粋な 0 光子イベントは全体の 20% 程度である。ただし斜めにセルに侵入するものと、斜めにセルから出ていくものの寄与の相殺を期待してこのように評価した。

^{*49} ここで補正の不定性を 10% 加えた

^{*50} 3M SR 反射シートは端面効果を補正した値を用いた。

表 5.6: WbLS セルの光量推定値

反射加工	推定光量 [p.e./fiber]
S-LS-W	9.50 ± 1.66
S-3M-SR	11.17 ± 1.78

5.4.3 サイズ 1 cm の WbLS 検出器セルにおける光量増加率の見積もり

本節では壁面への反射シート貼り付けによるサイズ 1 cm の WbLS 検出器セルでの光量増加率 I_{WbLS} を見積もる。

見積もり方法

見積もりは以下の方法で行う。

1. 2 cm のセル模型における反射シートの貼り付けによる光量増加率 $I_{\text{模型}}$ を測定して、従来セルの壁面反射率 R_{Conv} を仮定する
2. セル模型における反射率と光収集効率の関係から、反射加工後のセル壁面反射率 R_{Sheet} を決める
3. WbLS 検出器セルにおける反射率と光収集効率の関係に、 R_{Conv} と R_{Sheet} を代入して比をとることで光量増加率 I_{WbLS} を求める

ここでサイズ 1 cm および 2 cm のセルにおける反射率と光収集率は 5.2 式の関係で近似できる。これはシミュレーションの結果に近似関数をフィッティングして求めており、具体的な導出は付録 H.2 節に記す。ここで各パラメータの値は表 5.7 に示す通りである。

$$C_{\text{PDE_cell}} = \frac{1}{[0] + [1] \times (1 - R)} + [2] \quad (5.2)$$

表 5.7: モデル関数の各パラメータ

自由パラメータ	1 cm WbLS 検出器セル	2 cm セル模型
[0]	2.97 ± 0.01	4.28 ± 0.01
[1]	14.6 ± 0.1	32.8 ± 0.2
[2]	-0.0169 ± 0.0006	-0.0093 ± 0.0002

結果

測定で最も高い増加率を示したルミラー (E20) の測定値および、端面効果補正後に最も高い増加率となった 3M SR 反射シートの補正值について I_{WbLS} を見積もる。従来サンプルの壁面反射率 R_{Conv} と WbLS 検出器セルでの光量の増加率 I_{WbLS} の関係を計算した結果は図 5.20 の通りで、

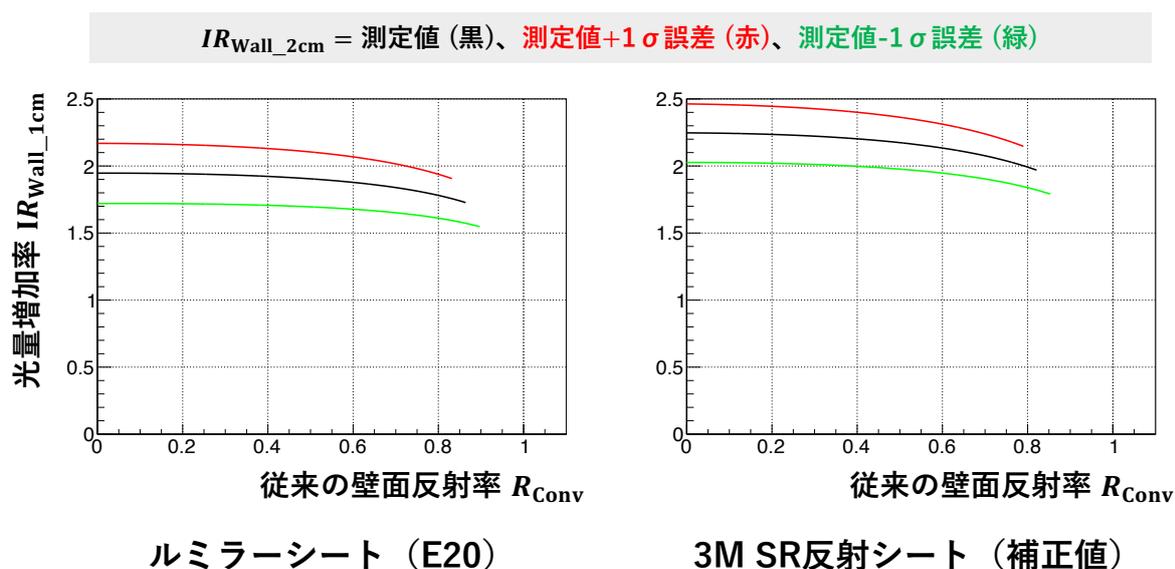


図 5.20: 従来セルの反射率 R_{Conv} についての I_{WbLS}

ここでサイズ 2 cm セルでの光量増加率 $I_{\text{模型}}$ には測定の不定性があるから、その測定値が $\pm 1\sigma$ の場合も共に示している^{*51}。 $R_{\text{Conv}} = 0.7$ を仮定すると、 I_{WbLS} はルミラー (E20) を用いた場合で 1.84 ± 0.18 、3M SR 反射シートを用いた場合で 2.08 ± 0.17 であり、2 倍程度の光量向上を達成したと言える。

5.4.4 シミュレーションのまとめ

WbLS 検出器セルの読み出し光量について、セル模型の測定光量を用いた推測から 10 [p.e./fiber] 程度が期待できる。また 2022 年のビームテストの結果に先行研究の界面活性剤の改良による光量向上と、今回のセルの壁面加工による光量向上を考慮すると、現在の WbLS 検出器セルの読み出し光量は $3.9 \times 1.28 \times 2 = 9.98$ [p.e./fiber] となる。両方の推定値はよく一致して 10 [p.e./fiber] 程度だが、これは目標値に 2 倍程度及ばずさらなる光量向上が必要である。

ここでこれらの推定値は反射率の仮定に依存しており、実際の壁面反射率がよく分かっていないことによる不定性に注意する。

5.5 章のまとめ

本章では WbLS から生じた光子が波長変換ファイバーに到達すまでの光収集効率を高める工夫を行ってきた。

はじめに透過率測定で特に低い透過率を示した Tyvek 反射シートを貼り付けたセル模型を作製し光量測定を行った。その結果光量は上がり反射シート自体での光吸収の効果が無視できないことを示した。次に測定結果と反射シートの表面構造の関係を考察して滑らかな表面のセルほど光量が高くなると推測した。この推測に基づきながら、反射シートの貼り付け、反射スプレーの

^{*51} R_{Conv} は高すぎると、 $I_{\text{模型}}$ を説明できなくなるからその時点で計算を打ち止めている。

噴霧、反射塗料の塗布、アルミ蒸着、反射剤フィラメントの使用といった多様な加工を行ったセル模型を用意して光量を測定した。その結果ルミラー (E20)、ルミラー (E6SR)、3M SR 反射シートを壁面に貼り付けたセル模型について従来の 2 倍以上の光量向上を確認した。

本章の測定はサイズ 2 cm のセル模型を用いたことから、Geant4 シミュレーションを用いてサイズ 1 cm の WbLS 検出器セルの光量を評価した。その結果現時点で WbLS 検出器セルにおいて 10 [p.e./fiber] 程度の読み出し光量が期待できることを示した。

第 6 章 波長変換ファイバーと MPPC における光収集効率の向上

本章ではファイバーに到達した光子が MPPC で読み出されるまでの効率を最大化することを目指す。またファイバーの直径を 1 mm から 2 mm に変更した際の光量への影響を見る。

セル内でファイバーに到達した光子は波長変換ファイバーにより検出器側の読み出し端面で MPPC により読み出されるが、6.1 および 6.2 節では、セル内で波長変換ファイバーに到達した光子がファイバーの読み出し端面に到達するまでの効率を高めることを目指し、6.3 節ではファイバーの読み出し端面に到達した光子を MPPC で読み出す効率を高めることを目指す。6.4 節ではセル内での光子の収集効率が高まるように波長変換ファイバーの直径を 1 mm から 2 mm に変更して、その際の検出器の光収集効率の変化をシミュレーションおよび測定から検討した。

6.1 ファイバー端面での光反射の効果測定

波長変換ファイバーに吸収された光子は等方的に放出されて一部がファイバー読み出し端面に到達する。図 6.1 のように非読み出し端面で光子を反射できれば最終的な検出光量を増やすことが出来る。本節ではファイバーの非読み出し端面における様々な光反射加工を行って、検出光量の

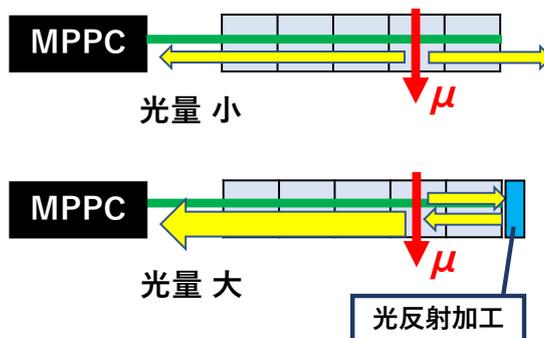


図 6.1: ファイバー端面での光反射による光量増加の概念図

向上を目指す。

6.1.1 光量への影響の評価

本節では非読み出し端面での光反射の効果が検出光量に与える影響を見積もる。

ファイバーを伝搬する光の減衰

ファイバーを進む光子は一定確率で失われる。ただし 3.2.3 節で述べたように波長変換ファイバーを伝搬する光子はその全反射の発生境界により複数成分に分類できて各成分で減衰長は異なる。コア-クラッド間で全反射を起こす光子成分は主にコア素材の光吸収で失われてその減衰長は比較的長い。一方でクラッド間あるいはクラッド-空気間で全反射を起こす光子成分は主にクラッド表面の欠陥による偶発的な散乱で失われると考えられて、その減衰長は比較的短い。この減衰効果は先行研究^[81]で測定されており、光入射位置からの距離 d [cm] を用いて 6.1 式のように書ける、

$$\text{光量}(d) = \text{Const.} \times \left(0.71 \times \exp\left(-\frac{d}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(-\frac{d}{25}\right) \right) \quad (6.1)$$

このようにファイバーを伝搬する光は 2 成分の減衰で書けて、413 cm で長距離減衰する成分が 71%、25 cm で短距離減衰する成分が 29% 程度存在する。^{*52}

この式を拡張して検出器中における光子の伝搬効率を考える。検出器の読み出しには 200 cm と 50 cm の長さのファイバーを用いるがこのファイバー長を L として、図 6.2 のような状況を考える。ファイバー読み出し端からの距離を x [cm] として、位置 x に生じた光子が検出される効率を

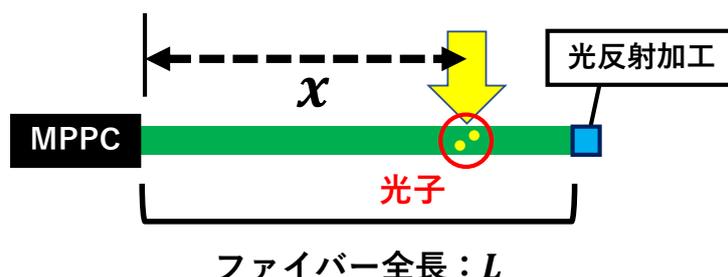


図 6.2: 全長 L のファイバーで位置 x に生じる光子

反射率 $R = 0$ 条件における $x = 0$ の値に対する相対値として表す関数 $C_{\text{Eff}}(x)$ を定義する。すなわち規格化条件は $C_{\text{Eff}}(0) \Big|_{R=0} = 1$ である。非読み出し端での反射に鏡面反射を仮定すれば反射の前後で長距離減衰成分と短距離減衰成分の割合は保存するから、これは 6.2 式のように書ける。

$$C_{\text{Eff}}(x) = 0.71 \times \exp\left(-\frac{x}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(-\frac{x}{25}\right) + R \left(0.71 \times \exp\left(-\frac{2L-x}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(-\frac{2L-x}{25}\right) \right) \quad (6.2)$$

R を向上することで検出光量を向上できる。ただし $2L - x \geq x$ であり反射光はより長距離を伝搬する過程で減衰するから光量の向上率は $1 + R$ 以下となる。アルミ蒸着により 38% 程度の光反射率を得た先行研究^[81]があるからこの水準は達成できると期待して、さらなる高反射率を目指す。

^{*52} 本測定は空気中で行われたもので、WbLS 中では最外クラッドと外界の全反射条件が変更し 6.1 式をそのまま適用できない可能性に注意する。実際には波長依存性もあるから近似となる。

検出光量への影響

反射率の値によらず光量は読み出し MPPC からの距離が最も長い条件（200 cm ファイバー、 $x=200$ cm）で最も減衰する。この条件で特に反射率が 0 の時は、光量が 0.43 倍に減少してその効果を見逃すことができない。この位置における光量を向上することが最も重要だが、非読み出し端面の光反射はこの $x = L$ の地点で最も光量向上に効果的であり、 $1 + R$ 倍の向上効果がある。

ファイバーをハサミでカットした端面は不規則で乱反射が起こるため伝搬条件を満たした光子の反射はほとんど起こらないと予想されるが、端面をダイヤモンドカッターで研磨すればフレネルの法則に基づき 8% 程度の鏡面反射率を持つと期待できるから^{*53}、この加工を WbLS 検出器に用いる方針である。よってこの研磨状態を測定の基準として、この研磨した端面に新たに反射加工を行うことによる光量の向上割合を測定する^{*54}。

6.1.2 測定のセットアップ

反射加工による光量の増加率は以下の方法で測定した。

セットアップ

測定のセットアップを図 6.3 に示す。コネクタで MPPC へ接続した波長変換ファイバーを LED の入射方向に垂直に設置し、ファイバーに強度一定の LED パルス光を照射した。ファイバーに吸収された光子は一部が直接、一部が非読み出し端面で反射した後に読み出し端面へ到達して MPPC S13081-050CS で検出される。

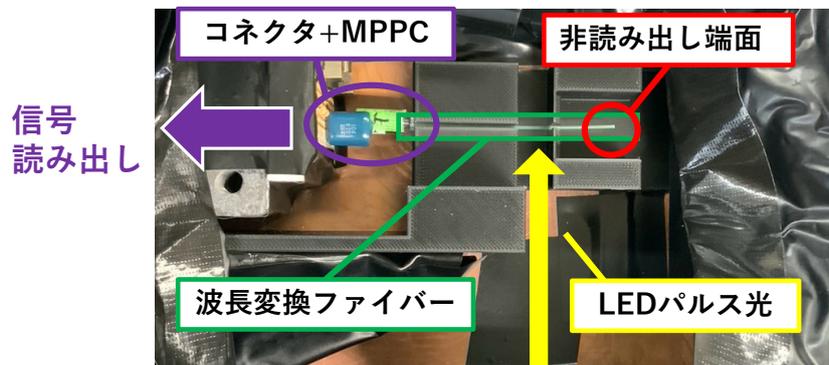


図 6.3: ファイバー端反射率測定のセットアップ

今回の測定では図 6.4 のように波形発生器（T3AFG350）を用いて LED に電圧パルス、デジタルタイマー（CAEN, DT5725）にトリガー信号を同時に送り MPPC の信号を記録して ADC 積分値を求めた。各測定では 10 万回程度 LED パルス光を生成して信号を記録し、全イベントの平均 ADC 積分値を検出光量とした。

そしてファイバーの非読み出し端面に反射加工を行った場合と行わなかった場合で測定を行い検出光量の比を取って増加率を定義した。

^{*53} 先に述べたように鏡面反射では光の伝搬条件は保持される。

^{*54} すなわち光量向上割合は反射率 R に対して、 $(1 + R)/(1 + 0.08)$ 程度になると期待される。

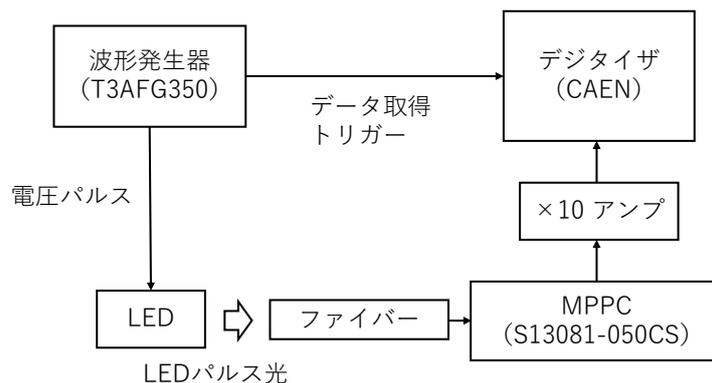
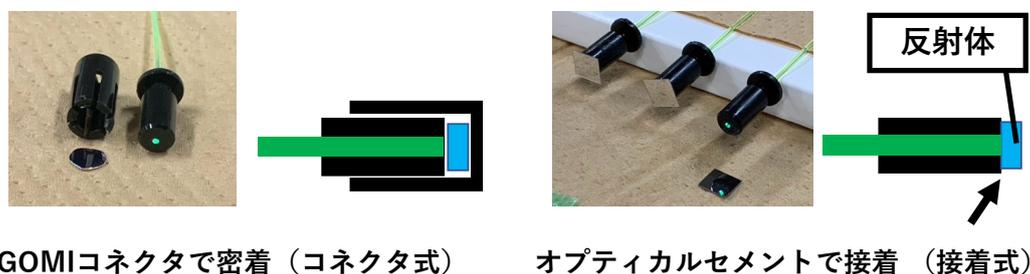


図 6.4: ファイバー端反射率測定のためのデータ取得回路

測定サンプル

今回は図 6.5 のように 3 種類の反射加工法を用意した。1 つ目は GOMI コネクタにより反射体をファイバー端面に密着させる方式（コネクタ式）で、2 つ目はオプティカルセメントを用いて反射体をファイバー端面に接着する方式（接着式）である。3 つ目はファイバーの端面に直接アルミ蒸着を行う方式だが（A-ALD, G-ALD サンプル）、今回は測定手順が同じであることから便宜上接着式に分類した。コネクタ式については反射体とファイバー端面に僅かな空気層の隙間が出来



GOMIコネクタで密着（コネクタ式）

オプティカルセメントで接着（接着式）

図 6.5: 2 種類の反射加工法

る可能性があり、その隙間が端面での反射率を向上させる効果を期待している。接着式はファイバー端面と反射面の距離が近いことで隙間から漏れる光子が少なくなることを期待して用意した。それぞれの反射加工法について反射体を変更しながらコネクタ式で 9 種類、接着式で 10 種類のサンプルを用意した。

それぞれの接着方式で、反射体は表 6.1 および表 6.2 に示すものを用意した。その例を図 6.6 に示している。C-3M、C-LS、A-3M、A-LS は 5 章の測定で高反射率を示した鏡面反射方式の 3M 反射シートと拡散反射方式のルミラーシート（E6SR#188）の 2 種類を反射体に用いたサンプルである。AL、AC、PP、PET、PVC1、PVC2 は厚さと材質が異なる複数の透明なプラスチック板にアルミ蒸着を行って作製した反射体である。AL はアルミ蒸着面をそのままファイバー端に向けて、その他は非蒸着面をファイバー端に向けて、プラスチックとアルミ蒸着の境界面で光を反射させることで滑らかな鏡面を実現した。A-ALD、A-GALD はファイバー端面に直接アルミ蒸着を行っており、蒸着時の端面の広さが異なる。コネクタ方式では白色 PLA 板を密着したサンプル

表 6.1: コネクタ式のサンプルに用いた反射体

サンプル名	説明
C-AL	厚さ 0.2 mm の透明なアクリル板にアルミ蒸着を行い、アルミ蒸着面をファイバー端面に密着する。
C-AC	厚さ 0.2 mm の透明なアクリル板にアルミ蒸着を行い、非蒸着面をファイバー端面に密着する。
C-PP	厚さ 0.2 mm の透明なポリプロピレン板にアルミ蒸着を行い、非蒸着面をファイバー端面に密着する。
C-PET	厚さ 0.5 mm の透明なポリエチレンテレフタレート板にアルミ蒸着を行い、非蒸着面をファイバー端面に密着する。
C-PVC1	厚さ 0.5 mm の透明なポリ塩化ビニル板 1 にアルミ蒸着を行い、非蒸着面をファイバー端面に密着する。
C-PVC2	厚さ 0.5 mm の透明なポリ塩化ビニル板 2 にアルミ蒸着を行い、非蒸着面をファイバー端面に密着する。
C-3M	3D プリンターで作製した PLA 製の白色部品に 3M 反射シートを貼り付けて、3M 反射面がファイバー端面に密着するように設置する。
C-LS	ルミラーシート (E6SR#188) をファイバー端面に密着するように設置する。
C-PLA	3D プリンターで作製した平坦な PLA 部品をファイバー端面に密着するように設置する。

表 6.2: 接着式のサンプルに用いた反射体

サンプル名	説明
A-AL	厚さ 0.2 mm の透明なアクリル板にアルミ蒸着を行い、アルミ蒸着面がファイバー端面に接するように接着する。
A-AC	厚さ 0.2 mm の透明なアクリル板にアルミ蒸着を行い、非蒸着面がファイバー端面に接するように接着する。
A-PP	厚さ 0.2 mm の透明なポリプロピレン板にアルミ蒸着を行い、非蒸着面がファイバー端面に接するように接着する。
A-PET	厚さ 0.5 mm の透明なポリエチレンテレフタレート板にアルミ蒸着を行い、非蒸着面がファイバー端面に接するように接着する。
A-PVC1	厚さ 0.5 mm の透明なポリ塩化ビニル板 1 にアルミ蒸着を行い、非蒸着面がファイバー端面に接するように接着する。
A-PVC2	厚さ 0.5 mm の透明なポリ塩化ビニル板 2 にアルミ蒸着を行い、非蒸着面がファイバー端面に接するように接着する。
A-3M	3M 反射シートを、3M 反射面がファイバー端面に接するように接着する。
A-LS	ルミラーシート (E6SR#188) をファイバー端面に接するように接着する。
A-ALD	研磨したファイバー端面に直接アルミ蒸着を行う。
A-GALD	GOMI コネクタを設置して研磨したファイバー端面に直接アルミ蒸着を行う。

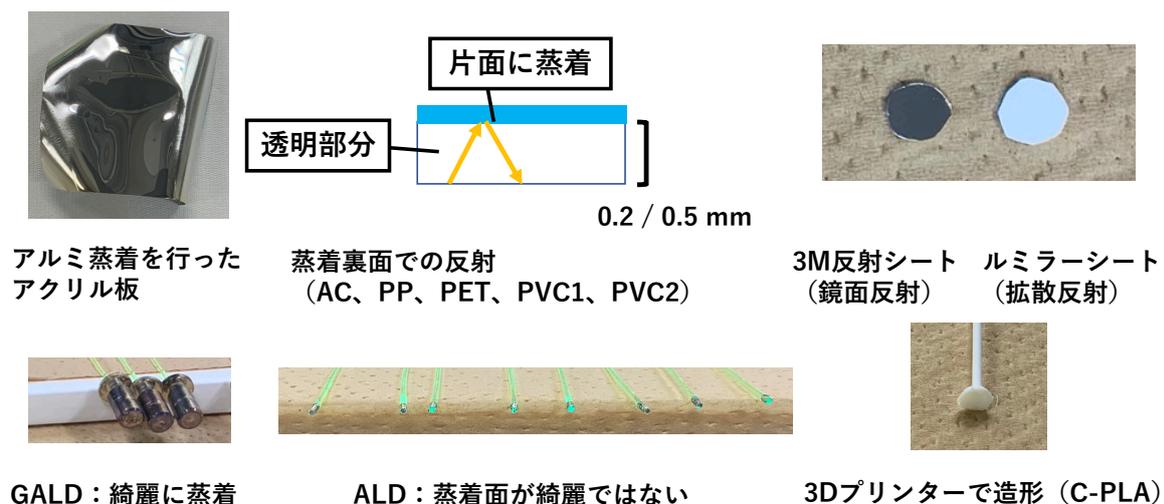


図 6.6: 測定に用いた反射体の例

(C-PLA) も作製した^{*55}。

測定手順

コネクタ式は測定の前後で反射体を付けない状態で検出光量を測定し基準サンプルの光量とした。この測定を 3 回行いそれぞれで求めた増加率の平均値をその反射体の増加率とした。

接着式は各反射体ごとに反射体を接着したファイバーを 3 本用意して、反射体を接着した状態で検出光量を測定し、次に反射体を取り付けた先端を切ってから端面をダイヤモンドカッターで研磨した。その状態での測定光量を基準サンプルの光量とした^{*56}。これを 3 つのサンプルで行い測定の平均値を反射体の増加率とした。

6.1.3 測定結果と考察

コネクタ式 (黒) および接着式 (赤) について測定結果は図 6.7 のようになった。

3M 反射シートを接着式で端面へ接着したサンプル (A-3M) で最も高い 1.64 ± 0.07 の増加率を確認して、この増加率は初めに述べた先行研究の 1.38 を大きく上回る水準である。コネクタ式についても 3M 反射シートを用いた (C-3M) サンプルで最も高い 1.53 ± 0.04 の増加率を確認し、また全ての反射加工で光量の向上を確認できた。

考察

5 章の測定で 3M 反射シートとルミラー (E6SR) は同程度の光量を実現したため近い反射率を持

^{*55} PVC1 と PVC2 に用いたポリ塩化ビニル板はアルミ蒸着時の融解を心配して複数種類を用意したもので異なるメーカー (光、アクリルサンデー) から入手したものである。蒸着依頼時に取り違いがあって両者を区別できないため 1、2 と表記して区別する。

^{*56} 基準サンプルの状態がコネクタ式と異なるが、この違いが測定のバイアスとならないことは別に測定を行って確かめている

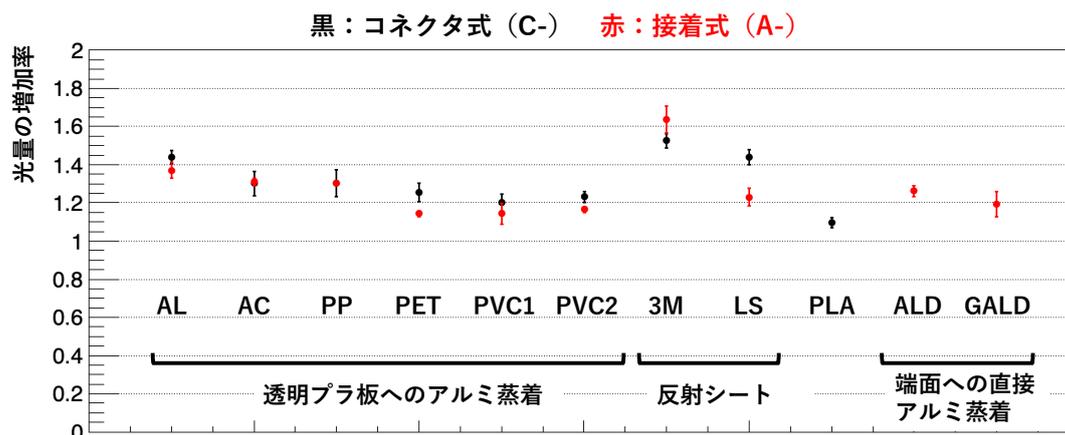


図 6.7: 反射加工毎の光量増加率 IR_{Ref}

つはずだが、鏡面反射である 3M のサンプルが拡散反射の LS サンプルより高い増加率を示したことは反射方式の違いで説明できる。

LS と PLA について、共に拡散反射の反射体であるが C-LS のサンプルが C-PLA より高い増加率を示した。これは 5 章の測定で PLA 壁面へのルミラーシートを貼り付けることで壁面反射率が向上し、セルの検出光量が向上したと整合する。

ファイバー中で光子はやや外側に局在しているが特に外側の部分ではコアとクラッド間の境界を沿うように進む光子が多く、このような光子は図 6.8 のようにファイバーから脱出した際にコアの領域から脱出してしまい反射してもファイバーに戻らない。このような脱出光子を減らすた

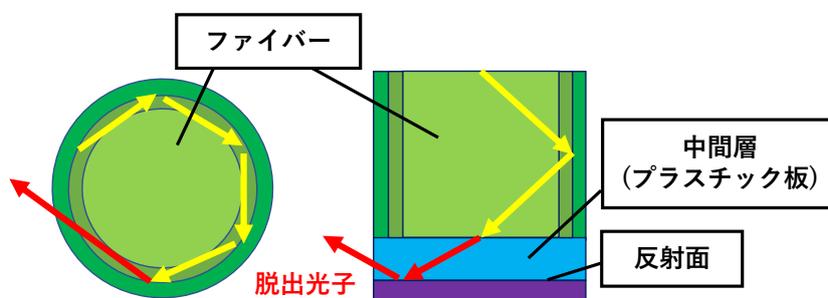


図 6.8: ファイバー端面で外部に脱出する光子

めにはファイバー端面と反射面の距離が短いほど良い。透明プラスチック板へアルミ蒸着を行った反射体のサンプルで増加率を比較すると、厚さが 0.5 mm のプラスチック板を用いたサンプル (-PET、-PVC1、-PVC2) よりも厚さが 0.2 mm のプラスチック板を用いたサンプル (-AC、-PP)、さらに蒸着面をファイバーに直接密着したサンプル (-AL) でより光量が向上する傾向が見られる。この傾向は脱出光子の減少で説明出来る。

同じ反射体を用いた時にほとんどのサンプルで両方式の増加率は近い値を示した。一方でルミラーシートを用いたサンプル (A-LS, C-LS) は増加率に違いがありこの要因を考える。ファイバーコアの屈折率 1.59 に対して、接着式のサンプルで反射体の接着に用いたオプティカルセメントの屈折率は 1.57 であり [82]、ファイバーとオプティカルセメント間の屈折は無視できる。一方コネクタ式で隙間に生じる空気層の屈折率は 1.000292 であり、ファイバーから光子が脱出する際に

屈折が起こり反射面に到達する光子の入射角が大きくなる。この空気層での屈折効果によって生じる反射率の変化を実屈折率のフレネル式で計算した結果が図 6.9 である。なお反射体は屈折率 6

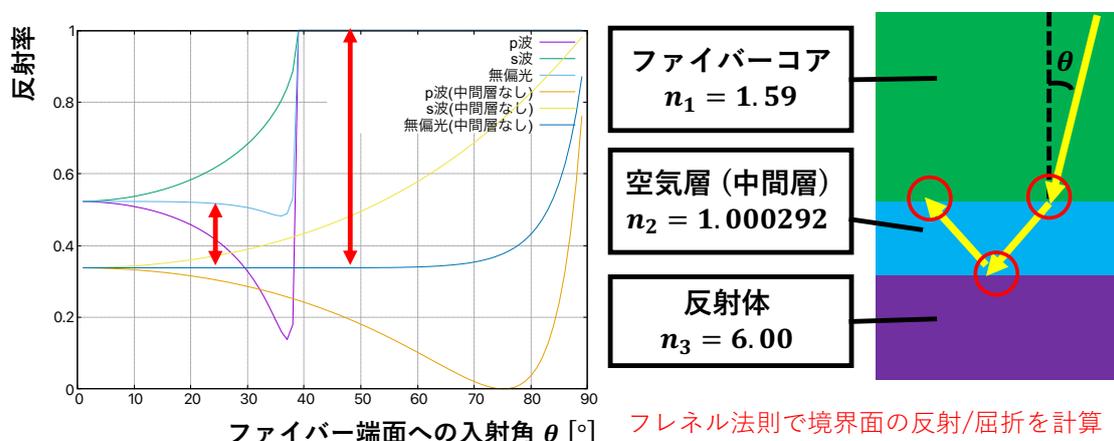


図 6.9: フレネルの法則で計算した反射率の向上効果

を仮定しておりこれはアルミニウムと同程度の値である。ファイバーを伝搬する光子はほとんど無偏光と考えることができ^{*57}、無偏光の計算結果を中間層（空気層）ありなしで比較する。図 3.6 に示すように波長変換ファイバーを伝搬する条件から光子の入射角は基本的に 26.7° 以下であり^{*58}、この入射角の範囲では空気層の影響で反射率が 20% 程度向上することが分かる。これは A-LS と C-LS の増加率の差 0.21 と同じ程度である。このように反射体 LS の増加率の違いは入射角差から生じた可能性がある。ここで用いたフレネルの法則は反射体にルミラーシートを用いた誘電体境界の反射率計算に有効だが、金属反射にはそのまま適用できない。また反射の前に再び高屈折率のプラスチックに侵入する AC、PP、PET、PVC1、PVC2 といったサンプルでは入射角の増加自体が起こらない。3M シートの詳細な反射メカニズムは明確でないが、このような要因によって反射方式による増加率差の傾向が異なると考えることができる。

ファイバー端面に直接アルミ蒸着を行った A-ALD、A-GALD サンプルについてその増加率は、アクリル板にアルミ蒸着してそれを密着/接着した C-AL、A-AL サンプルより有意に小さかった。図 6.6 に示すように比較的良い精度で端面に蒸着できた G-ALD の増加率が ALD より低かったから、アルミ付着の精度は反射率低下の大きな要因ではないと言える。この要因として蒸着時の高温でファイバー端面が融解して凹凸が生じて滑らかな鏡面が作れなかったことが考えられる。

6.1.4 ファイバー先端での反射体を用いない光反射

将来的に加工コストの観点からダイヤモンドカッターによる研磨加工のみを採用する可能性がある。本節ではハサミで切って研磨を行わないサンプル（カットサンプル）に対する端面研磨サンプル（基準サンプル）の光量増加率を測定する。

^{*57} ファイバーでの全反射臨界角が s 偏光、p 偏光でほとんど変化しないことを確かめた。

^{*58} 実際に光子は螺旋状に伝搬するから入射角はこれより大きくなりうる。

測定方法

測定は 6.1.2 節と同じセットアップを用いて行った。カットサンプルの光量を測定してから、ダイヤモンドカッターで端面を研磨して光量を測定し基準サンプルの光量とした。この測定は 9 回行い全測定値の平均を求めた。

測定結果

測定結果を表 6.3 に示す。変動率は測定値の標準偏差を測定平均値で割ったもので、値が小さいほどサンプル間での光量が安定しており光量の再現性が高い加工法であることを示す。光量は予

表 6.3: 各サンプルごとの検出光量と変動率

サンプル	平均光量	変動率 [%]
基準サンプル	4998 ± 131	6.9
カットサンプル	6426 ± 159	7.0

想に反しカットサンプルが 1.27 ± 0.03 倍と有意に大きかった。これは前節で行った多くの反射加工より高い光量である。また端面を切るだけであるから作製が最も簡単で、6 万本のファイバーへの加工が必要な本検出器へ用いるメリットは大きい。さらに表 6.3 に示す変動率は 7% 程度でこれは GOMI コネクタによる MPPC とファイバー接続効率の不定性の水準であり^{*59}、カット面の状態が不安定なことで反射率が変動する可能性も少ない。

カットサンプルで大光量が実現された要因を考察する、ファイバーコアから空気中に出る光子の反射率はフレネルの法則で図 6.10 のように計算できるが、基準サンプルでは光子の入射角は 30° 程度以下であり大半が透過する。一方で端面の角度が不規則なカットサンプルでは入射角がランダムになり、入射角が全反射臨界角を超えるような場合が生じて実効的な反射率が向上する可能性がある。

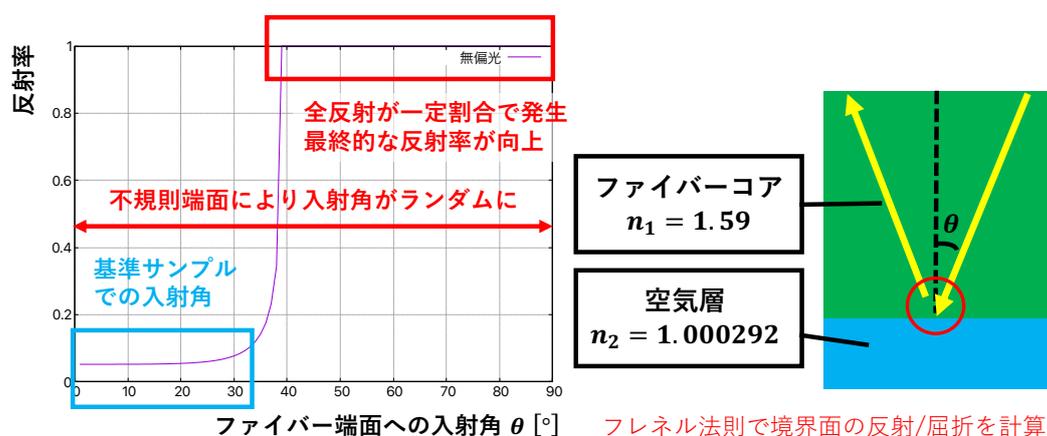


図 6.10: カットサンプルで観測された大光量の要因考察

この効果を定量的に評価するには表面構造を詳細に知る必要があり容易ではない。

*59 付録 K の測定結果を参照。

6.1.5 ファイバー端面での光反射効果のまとめ

ファイバーを伝搬する際の減衰によって最大 0.43 倍光量が低下してこの効果は無視できない。ここで特に光量が低くなる読み出しを行わないファイバー端面付近ではその端面での光反射による光量増加の方法が有効であり、本章ではこの反射加工を試作その性能を評価した。その結果 3M 反射シート (DF2000MA) を端面に接着するサンプル A-3M で最大の 1.64 ± 0.07 倍の光量増加が可能であることを示した。

また従来反射率が低いと考えられていたファイバーをカットした状態の端面が高い光反射効果を持つことを発見し、この最も単純な加工で 1.27 ± 0.03 倍光量が増加することを見た。これは本節の測定で準備した多くの反射方法より高い増加率であった。また変動率の測定から、この加工法を用いた際のサンプル間の光量変動はほとんどなく十分実用化可能な手法であることを示した。

6.2 ファイバーごとに異なる端面加工を行う方法

本節ではファイバーの両端面で読み出しを行う方式を述べてから、検出器に用いる 2 種類の長さのファイバーごとに異なる加工を行った際の効果を整理する。

6.2.1 両端で読み出す効果

ファイバーの両端で光子を読み出す場合、 $L = 200$ cm の条件で検出効率の最小値 (最小検出効率) は、片面読み出しで反射率 $R = 0$ の場合と比較して 2.57 倍の大幅な光量改善となる。より一般に読み出し端面からの距離に依存した光収集効率の計算式およびそのグラフは付録 I に記した。この方法は読み出しチャンネルに冗長性があり故障に強い、ただし検出器スペースの増加やコスト面でデメリットがある。

6.2.2 ファイバーごとに異なる加工法を行った際の光量

長さが 50 cm のファイバーは減衰が少なく比較的光量を確保しやすい^{*60}、そのため 200 cm のファイバーにのみ高効果の反射加工を行えば良い。そこで様々な加工の組み合わせについて最小検出効率を計算して比較した、その結果を表 6.4 に示す。ここで最小検出効率の増加率は全ファイバーが片側読み出しで反射率 $R=0$ の場合の最小検出効率 0.44 を基準とした値である。またカッ

表 6.4: ファイバーの加工組み合わせと最小検出効率

200 cm の加工法	50 cm の加工法	最小検出効率の地点	最小検出効率 (増加率)
両端読み出し	両端読み出し	200 cm - 中間	1.13 (2.57)
両端読み出し	3M 反射シート	50 cm - 非読み出し端	1.09 (2.48)
両端読み出し	カット加工	50 cm - 非読み出し端	0.85 (1.98)
3M 反射シート	カット加工	200 cm - 非読み出し端	0.72 (1.64)
カット加工	カット加工	200 cm - 非読み出し端	0.56 (1.27)

*60 各長さのファイバーにおける距離に応じた光量減衰のグラフは付録 I に記した。

ト加工、3M 反射シート貼り付け、両端読み出しの順に加工が簡単であるとして、最小検出効率が変わらない場合は最も加工が容易な組み合わせのみ示した。現在の検出器デザインは 200 cm ファイバーは 2 万本、50 cm ファイバーは 4 万本使用するが、ここで加工コストに倍の違いが生じることに注意しながら、コストおよび光量の観点で最適な組み合わせを選ぶことが重要である。

6.3 MPPC の改善

波長変換ファイバーにより検出器側面へ伝搬した光子は MPPC により読み出されるが、ここで光子が検出される確率は主に MPPC 受光面の光子検出効率 (Photo Detection Efficiency, PDE) およびファイバーと MPPC 受光面の光学的接続の 2 要素で決まる。そこで本節は、はじめに MPPC の変更による光量改善を行う。次にファイバーと MPPC 受光面の光学的接続による光量向上の可能性をシミュレーションから検討する。

6.3.1 MPPC の選定

今回 3 種類の MPPC、S13081-050CS (以下 050CS)、S13360-1350CS-01 (1350CS-01)、S13360-3075CS (3075CS) を用意した。050CS は従来用いた MPPC で、他の 2 種類は新しく用意したものである。これらのカタログ性能を表 6.5 に示す。受光面積は MPPC のピクセルが配置された領

表 6.5: 用いた MPPC のカタログ性能

MPPC 型番	受光面積 [mm]	最大感度波長 λ_p [nm]	PDE [%] ($\lambda = \lambda_p$)	ピクセルピッチ [μm]	クロストーク 確率 [%]
S13081-050CS	1.3×1.3	450	35	50	1
S13360-1350CS-01	1.3×1.3	450	40	50	3
S13360-3075CS	3.0×3.0	450	50	75	7

域の面積で、全ての MPPC は現在用いている直径 1 mm の波長変換ファイバー端面を覆うのに十分である。特に 3075CS は受光面積が 3 mm×3 mm と広く、例えば直径 2 mm のファイバーを用いた場合でも全ての端面を覆うことができる。最大感度波長 λ_p ^{*61} はいずれも同じ 450 nm であり、感度の波長依存性も図 6.11 に例を示すように同様で、Y11 波長変換ファイバーの主要発光波長である 450-550 nm に対して高感度である。波長 λ_p における PDE のカタログ値は、新たに用意した 2 種類が従来品より高く光量向上が期待できる。特に 3075CS はピクセルの配置間隔であるピクセルピッチが 75 μm と他より大きく開口率が高いが、MPPC ピクセル間の隔壁に吸収される光子が少ないことからカタログ PDE が最も高くなっている。同時に、このピッチが大きいくことでアバランシェ増幅による 2 次光子が発生しやすく、MPPC のクロストーク確率が高くなる。これらの MPPC は全てセラミックパッケージタイプで、読み出しピンを基板上のピンソケットに差し込むことで信号を読み出す。窓材の屈折率は全て 1.41 で波長変換ファイバーコアの屈折率 1.59 と近く、接続面での反射を抑えながら光子を伝搬できる。

*61 PDE が最も高くなる波長

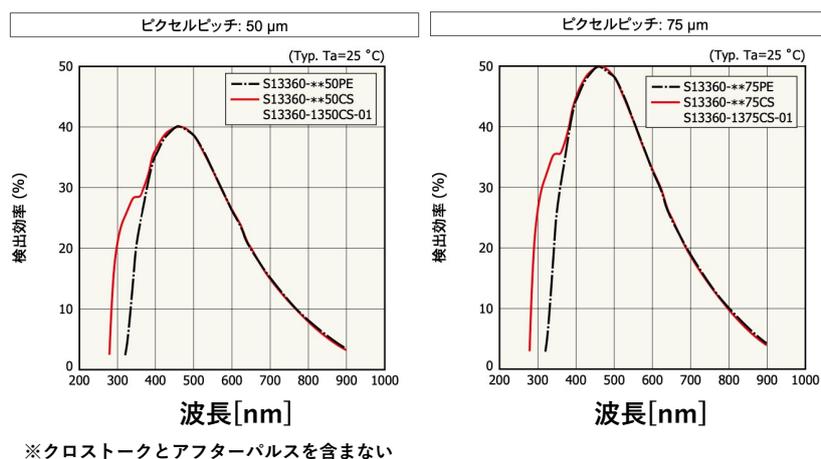


図 6.11: S13360 シリーズ MPPC の PDE 波長依存性

MPPC の性能評価の方針

クロストークとアフターパルスにより見かけの測定光量は増加して、また MPPC ピクセル数が有限であることにより検出光量が減少して光量の分解能が低下する。これらの効果は用いる MPPC の種類によって異なり測定のバイアスとなるから、今回用意した 3 つの MPPC について以下の 3 観点を評価する。

- ・ クロストークおよびアフターパルスの光量への影響
- ・ 検出光子数の飽和効果
- ・ 光子検出効率 (PDE)

ここで PDE として、実際の検出器で用いる状況下における検出効率 (有効 PDE) を評価する。MPPC とファイバーを繋ぐコネクタの形状は種類によって異なるが、それぞれの接続方法における光量の変動が安定していることを別途測定で確認しており、この測定の詳細は付録 K に記した。

6.3.2 クロストークおよびアフターパルスの影響評価

MPPC ピクセルでクロストークが発生すると複数光子の検出イベントと区別ができない。アフターパルスが発生すると 1 光子より大きな信号が生じる。これらの現象は検出光子数を過剰に見積もる要因となるが、その発生頻度はピクセルの材質やピッチに依存するから MPPC の型番毎に異なり、それぞれの MPPC について個別の評価が必要である。またクロストークおよびアフターパルスの発生率は MPPC に印加する電圧に依存して変化するため、今回の測定は他の測定と同じ 54 V を印加した状態で行う。これら効果の光量への影響を評価、同時にクロストーク確率を測定、結果がカタログ値と大きく矛盾しないことから本節の評価方法が妥当であることを確認する。

測定方法

測定は暗所に設置した MPPC から生じるダークノイズを用いて行った。ダークノイズを 10 倍アンプで増幅した後に 0.3 光子閾値でデジタイザーで記録、ADC 値のベースラインからの差分を時間で積分した ADC 積分値を信号値とした。ここで ADC 積分値は図 6.12 のように複数のピークを持つ分布となる。

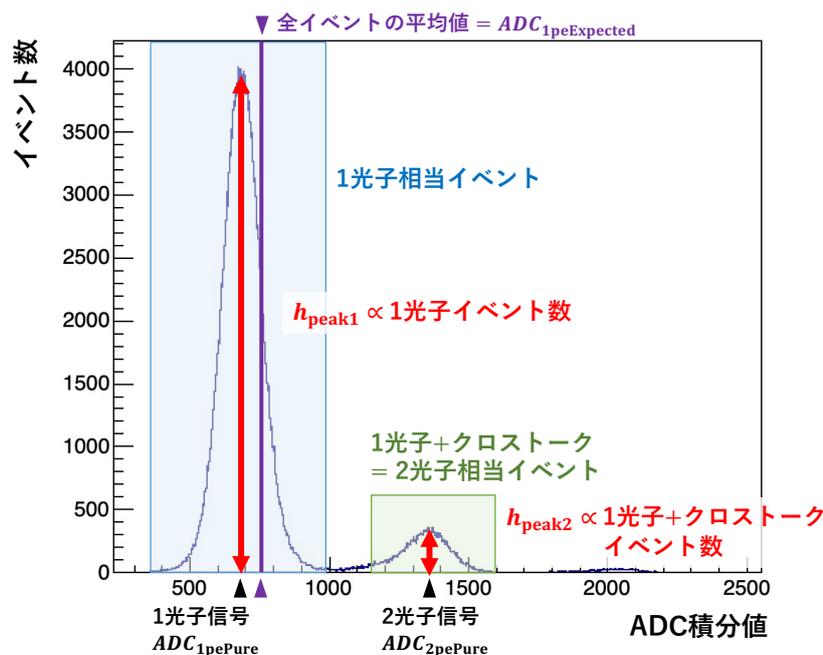


図 6.12: 典型的なダークノイズの ADC 積分値分布

初めにクロストーク率の測定方法を述べる。左の最も大きなピークはダークノイズによる 1 光子相当の信号に対応し、2 つ目のピークはダークノイズがクロストークを起こすことで生じた 2 光子相当の信号に対応する。これらの分布には少数のアフターパルスによる信号が含まれる。ここで、2 光子相当のイベント数と 1 光子相当のイベント数の比は、それぞれのピークにフィットしたガウス分布の高さの比 $h_{\text{peak2}}/h_{\text{peak1}}$ で求まるが、この比は全観測イベント数 N およびクロストークの発生率 p を用いて式 6.3 のように書けるため、ここからクロストーク率を評価する。

$$\frac{\text{2 光子相当イベント数}}{\text{1 光子相当イベント数}} = \frac{h_{\text{peak2}}}{h_{\text{peak1}}} = \frac{Np \times (1-p)}{N(1-p)} = p \quad (6.3)$$

次にクロストークやアフターパルスの影響により、検出光量がどの程度バイアスを受けるかを表す増加係数の定義と測定方法を述べる。はじめに 1 光子相当信号のピークにガウス分布をフィットしてその平均値を $ADC_{1\text{pePure}}$ と定義する。これは MPPC がクロストークやアフターパルスを起こさずに 1 光子を検出した際の ADC 積分値の期待値に対応する。次に全取得イベントの ADC 積分値の平均 $ADC_{1\text{peExpected}}$ を得る。これは MPPC が 1 光子を検出した際の、クロストークやアフターパルスにより信号が見かけ上大きく見える効果を含めた ADC 積分値の期待値である。測定では $ADC_{1\text{pePure}}$ および $ADC_{2\text{pePure}}$ の値を用いて MPPC を較正するが、実際にデータ取得で 1 光子

を検出した際の信号期待値は $ADC_{1peExpected}$ であるから、データは $ADC_{1peExpected}/ADC_{1pePure}$ 倍だけ光量が多く見積もられる。この係数 $C_{Increase}$ を増加係数と定義し、各型番毎に求めた。

測定は型番ごとに 2 つの MPPC を用意して行った。2 つの MPPC で得た測定値の平均をその型番の測定値と定義し、MPPC 毎の測定値のばらつきを測定値の不定性として評価した。

測定結果

各 MPPC について測定したクロストーク確率と増加係数を表 6.6 に示す。クロストーク率につ

表 6.6: MPPC 毎のクロストーク率と増加係数の測定結果

MPPC 型番	クロストーク率 [%]	増加係数
S13081-050CS	2.14 ± 0.28	1.038 ± 0.005
S13360-1350-CS-01	1.88 ± 0.13	1.025 ± 0.003
S13360-3075-CS	8.59 ± 0.16	1.115 ± 0.001

いて表 6.5 に示したカタログ値と 1~2% の範囲で一致して、この差は測定時の印加電圧の違いで説明できる程度であるから本節の測定方法は妥当と結論づける。次に増加係数は、特に 3075-CS で大きく補正を行わない場合約 12% 過剰に光量を見積もることが分かる。さらに増加係数は種類毎に大きく異なることから測定光量を比較する際に無視できないバイアス要因になることが分かる。いずれの MPPC も増加係数は 1 + クロストーク率 より有意に大きい、これは複数回クロストークが起こるイベントやアフターパルスによる光量への影響が原因である。ここで本研究は、全章において断りがない場合ここで求めた係数を用いて適宜測定光量を補正するものとする。

6.3.3 検出光子数の飽和効果

MPPC の同一ピクセルに同時に 2 つの光子が到達した場合そのイベントは 1 光子として検出される。MPPC のピクセル数に対して無視できない数の光子が受光面に到達する場合、この効果が頻繁に発生することで観測光子数が少なくなり信号の線形性が悪化する。この観測光子数 N_{obs} と実際の到達光子数 N_{true} の関係は MPPC 受光面の有効ピクセル数 N_{pixel} を用いて以下のように書ける。ただし受光面への平坦な光子到達分布を仮定する。

$$\begin{aligned}
 N_{obs} &= N_{pixel} \left(1 - \exp \left(-\frac{N_{true}}{N_{pixel}} \right) \right) \\
 &= N_{true} - \frac{N_{true}}{2} \left(\frac{N_{true}}{N_{pixel}} \right)^2 + O \left(N_{true} \left(\frac{N_{true}}{N_{pixel}} \right)^3 \right)
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

逆に解けば 6.5 式のように N_{obs} から N_{true} を計算できるが、必要に応じてこの飽和補正を用いる。

$$N_{true} = -N_{pixel} \log_e \left(1 - \frac{N_{obs}}{N_{pixel}} \right) \tag{6.5}$$

実際にはファイバー端面で光子は端にやや偏った分布で到達するから、平坦な光量分布を仮定したこの補正はあくまで近似である。ここで MPPC 受光面の有効ピクセル数 N_{pixel} は用いる MPPC のピクセルピッチとファイバー直径の組み合わせで決まる。今回準備した MPPC のピクセルピッチは、 $50 \mu\text{m}$ (050CS、1350CS-01)、 $75 \mu\text{m}$ (3075CS) の 2 通りであり、本研究で扱う主な組み合わせについて N_{pixel} を表 6.7 に示す。^{*62}

飽和効果による光量へのバイアス

表 6.7: 組み合わせ毎の N_{pixel}

ファイバー直径 [mm]	MPPC ピクセルピッチ [μm] (受光面サイズ)	N_{pixel}
1	50 (1.3 mm×1.3 mm)	314
1	75 (3.0 mm×3.0 mm)	140
2	50 (1.3 mm×1.3 mm)	667
2	75 (3.0 mm×3.0 mm)	559

表 6.7 で示した 4 通りの N_{pixel} の場合に発生する飽和効果を、6.4 式に基づき実光子数と観測光子数の関係および両者の比の 2 通りで表したものが図 6.13 である。この結果から、 N_{pixel} が 140

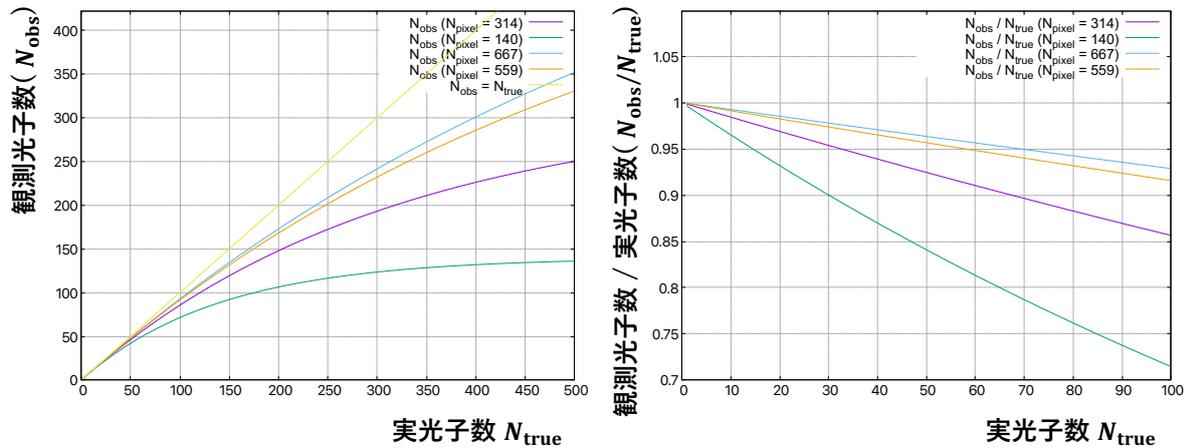


図 6.13: 実光子数と観測光子数の関係 (左)、実光子数に対する観測光子数の比 (右)

の場合には検出光量が 15 光子を超えるあたりから光量へ 5% の無視できないバイアスが生じるため補正が必要であることが分かった。この光量閾値は $N_{\text{pixel}} = 314$ で 30 光子、 $N_{\text{pixel}} \sim 600$ で 60 光子程度である。

飽和効果による分解能の悪化

飽和効果の起こり方が毎回異なることにより光子の検出分解能を悪化させる効果がある。そこでこの効果の影響をモンテカルロシミュレーション (MC) で評価した。この具体的な方法は付録

^{*62} ファイバー直径 2 mm と $50 \mu\text{m}$ ピッチ MPPC の組み合わせでは MPPC 受光面が全て覆われるため MPPC の全ピクセル数を N_{pixel} とした。 $(1.3 \text{ mm}/50 \mu\text{m})^2 = 676$ とは一致しない。

J に記す。4 通りの N_{pixel} について検出分解能をシミュレーションした結果が図 6.14 である。ここで紫線は統計のみで飽和効果がない場合 ($N_{\text{pixel}} \rightarrow \infty$) の検出分解能である^{*63}。

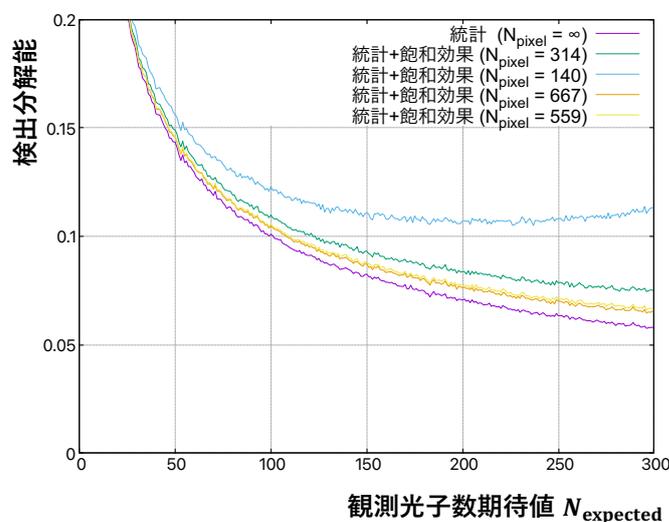


図 6.14: MC に基づく観測光子数期待値と検出分解能

$N_{\text{pixel}} = 140$ のとき、検出光子数 > 150 で飽和効果による分解能の低下が無視できなくなる。 $N_{\text{pixel}} > 300$ のとき、検出光子数 300 あたりで飽和効果により検出分解能が 1 – 2% 悪化する。一方観測光子数が 50 以下の領域では飽和効果の分解能悪化 ($< 1\%$) は無視できる。

最小電離電子 (Minimum Ionizing Particle, MIP) 飛跡を検出する際の想定光量は 30 [p.e./fiber] 程度であり、飽和による分解能悪化は無視できる。一方で陽子が検出器内で停止する場合に Bragg peak により大光量が発生して、この光量を粒子識別に用いることがあるが、そのような限定的な条件下では飽和による分解能悪化が影響を与える。

6.3.4 光子検出効率 (PDE) の評価

MPPC の PDE は到達光子の波長分布、受光面への侵入角度分布、光子の偏光状態といった要素に影響を受ける。そのため今回は LED 光を照射したファイバーから伝搬する光子を用いることで、実際の検出器の測定状況における各 MPPC の有効 PDE 比率を測定する。

測定方法

測定は 6.1 と同じセットアップ・手法を用いて行った。それぞれの MPPC 型番で MPPC を 2 つ用いて各 4 回の合計 8 回測定を行い、同じ MPPC を用いた前半 2 回と後半 2 回の測定では異なるファイバーを用いた。また毎回 MPPC とファイバーの繋ぎ直しを行った。8 回の測定値の平均を光量として、エラーは各測定値のばらつきを考慮した。ファイバーの非読み出し端面は毎回ダイヤモンドカッターで研磨しており、検出光量比に増加係数および飽和効果の補正を行えば、そのまま MPPC の有効 PDE 比として扱うことができる。

^{*63} これは十分 MC の精度が良ければ $(N_{\text{expected}})^{-0.5}$ に一致する。

測定結果

測定結果を表 6.8 に示す。比較のためカタログ上の PDE 典型値を同時に示している。検出光量

表 6.8: MPPC 型番毎の検出光量と PDE 典型値

MPPC 型番	検出光量 [p.e.]	PDE 典型値 [%] ($\lambda=450$ nm)
S13081-050CS	9.21 ± 0.69	35
S13360-1350CS-01	11.24 ± 0.53	40
S13360-3075CS	18.50 ± 0.26	50

の比較から、MPPC 3075CS が最も高い PDE を持つことが分かる。特に従来用いた MPPC 050CS に対する PDE 比は 2.01 ± 0.08 であり、MPPC の変更で 2 倍以上の光量改善が可能である。この PDE 比はカタログ上の PDE 典型値の比 $1.43 (=50/35)$ より有意に大きい一方で、050CS に対する 1350CS-01 の PDE 比は 1.22 ± 0.11 で PDE 典型値の比 $1.14 (=40/35)$ と一致することに注意が必要である。この理由として PDE 典型値以外の要素である、受光面の広さが光量向上に影響した可能性がある。例えば受光面が広い 3075CS ほど MPPC とファイバーの間の隙間から斜めに脱出した光子を高効率で検出できる。

6.3.5 ファイバーと MPPC の光学的接続についての検討

MPPC 受光面とファイバー端に空気層の隙間がある場合、ファイバーコアと空気層の間で反射が起こり MPPC に到達する光子が減少する。本節ではこの光量の減少効果をシミュレーションで見積もり、この接続を改善する手法とその利点を検討する。

シミュレーションによる接続効果の見積もり

今回 Geant4 を用いて、図 6.15 の光学シミュレーションを作成し MPPC とファイバー間に 0.1 mm の空気層がある場合とない場合で光量の違いを見積もった。このシミュレーションは実際の

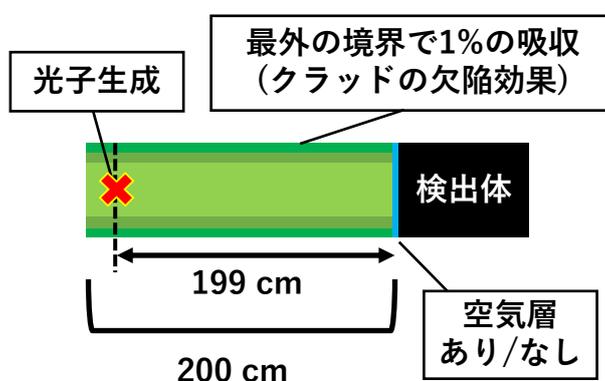


図 6.15: シミュレーションの概要

検出器の状態を再現して199 cm先のファイバー端で発生した光子の収集効率を MPPC-ファ

イパー間に空気層ありと無しの状況で比べている。その結果空気層が無い密着した接続で光量が 1.21 倍増加した。

光学的接続の改善方法の検討

はじめに、光学的接続の最適化により見込める光量増加率を検討する。既存のコネクタを用いた場合 MPPC とファイバーを接続し直した際の光量変動が 6% 程度あるが^{*64}、これは接続面に存在する空気層の状態変動が原因と考えられる。そのため、従来のコネクタを用いた場合、全面に空気層が存在する状態に対して少なくとも 6% 程度光量が増加した接続状態にあると期待できる^{*65}。ここで光学的接続の最適化を行うと、1.14 倍程度の光量増加が期待できる。

この光学的接続を改善する手法としてオプティカルセメントを用いたファイバー端面と MPPC 受光面の接着が考えられるが、1.14 倍の光量増加に対して検出器の全 6 万チャンネルにオプティカルセメントを塗装するコストや、MPPC を固定することで故障した際に交換できなくなる欠点を考慮すると、この方法を行う利点はあまりない。

6.3.6 MPPC 改善のまとめ

検出光量の向上には MPPC の PDE を高めることが重要であり、3 種類の MPPC について性能を調べた。この性能評価の中でクロストーク、アフターパルスや MPPC の飽和効果が光量を測定する上での重大なバイアスになることを確認して、この補正方法を確立してからそれぞれの MPPC の PDE を評価した。そして 3075CS が最も高い PDE を示してこれを検出器へ用いることで従来に比べて 2.01 ± 0.08 倍光量が向上することを示した。

6.4 直径 2 mm のファイバーを用いたサンプルの光量測定

これまで光子の読み出しに直径 1 mm の Y11 ファイバーを用いてきたが、本節では直径 2 mm のクラレ社製 Y11 ファイバーを用いた読み出しを試みる。ファイバー直径が 2 倍になることでセル内で光子がファイバーを通過する頻度が 2 倍程度向上し、光収集効率が高くなると同時にクロストークの抑制が期待できる。本節ではファイバー直径の変更による読み出し光量の変化を、セル内での光収集効率、非読み出し端面での光反射の効果、光輸送効率の 3 つの観点で検討する。

6.4.1 セル内での光収集効率

ファイバー直径を 2 mm に変更するとセル内で光子がファイバーに接触する確率が高くなり光収集効率の向上が期待できるが、壁面の反射率が 100% の場合は、光子は反射を繰り返して結局ファイバーに吸収されるため光収集効率はほとんど向上しない。そのためファイバー直径を 1 mm から 2 mm に変更した場合の光収集効率の増加率 (IR 、Increase Ratio) は壁面反射率 R に依存する関数、 $IR_{\text{FiberD}}(R)$ となる^{*66}。はじめにシミュレーションを用いてこの向上効果を見積もる。

^{*64} 付録 K の測定結果を参照。

^{*65} より光量が高い場合には、さらに接着加工を行う意味がなくなる。

^{*66} ここで $WbLS$ 吸収長への増加率の依存性は小さく無視した。

ファイバー直径の変更による光量増加のシミュレーション

サイズ 1 cm の検出器セルと大型セル模型の 2 通りで、ファイバー直径を 2 mm に変更した際の光量の増加率をシミュレーションで求めて、その値に近似関数をフィッティングした。結果は図 6.16 に示す通りである。ここで近似関数の具体形や導出は付録 H.3 に記す。ここで壁面反射率が

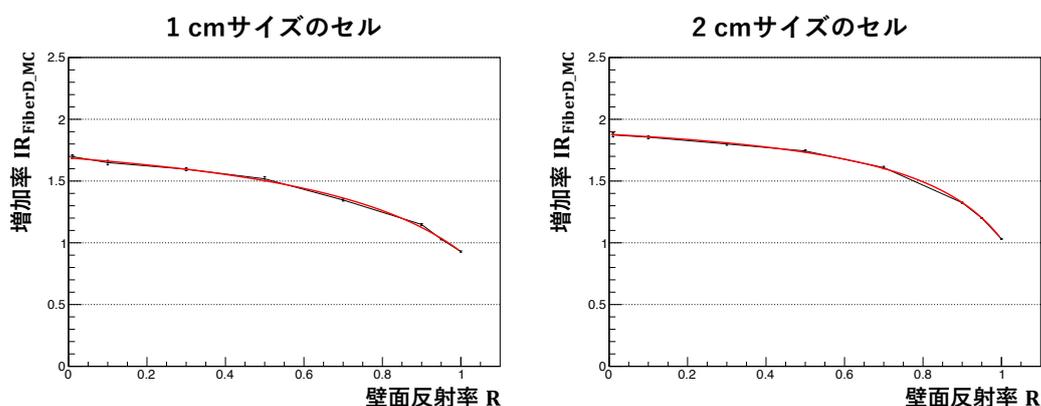


図 6.16: MC で計算した $IR_{\text{FiberD_MC}}(R)$

高くなるほど増加率が単調に減少することがわかる。1 cm サイズのセルは 2 cm サイズのものに比べて全体的に増加率が低く、特に壁面反射率が 100% に近い領域では増加率は 1 以下（光量減少）となった。これはファイバーが占める体積が増えることで WbLS の体積割合が低下し、その影響が 1 cm サイズのサンプルでより強く現れるためである。

このように増加率は壁面反射率への依存性が大きく、実際の模型を使った測定が必要である。

直径 2 mm のファイバーを用いたセルの光量測定

測定サンプルとして、図 6.17 のように 3D プリンターを利用して白色 PLA で壁面を形成した従来方式のものと、3M 反射シートを内部に貼り付けた高壁面反射率の 2 通りの大型セル模型をそれぞれ 2 個作製した。両者の光子読み出しには直径 2 mm のファイバーを用いた。5 章で行なった大型セル模型の光量測定と同じセットアップ・手法を用いて光量を測定し、すでに測定した直径 1 mm のファイバーを用いたサンプルの光量と比較した。

直径 2 mm のファイバー端面を全て覆うために、光量の読み出しに受光面が 3 mm×3 mm の MPPC 3075CS を用いており、MPPC の PDE の違いが測定結果に反映されている。そのため、ファイバー直径変更と MPPC の PDE 向上の効果を合わせた光量増加率 $IR_{\text{FiberD+PDE}}$ と共に、そこから PDE 向上の効果を差し引いたファイバーの変更による光量増加率 IR_{FiberD} を評価した。

測定結果は表 6.9 の通りで、MPPC の効果を差し引いた光量増加率 IR_{FiberD} は従来サンプルで 1.5、3M 反射シートを用いたセルでは 1 程度であり、ファイバー直径の増加によるセル内部での収集光量の変化はほとんど無いことが分かる^{*67}。ここで従来サンプルより 3M シートを貼り付けたサンプルで増加率が小さいことは、3M 反射シートの貼り付けで反射率が向上したという推測と

^{*67} これはセル中の WbLS 体積減少が要因で光子の検出効率は向上していると考えられる。そのため依然クロストーク率の抑制は期待できる。

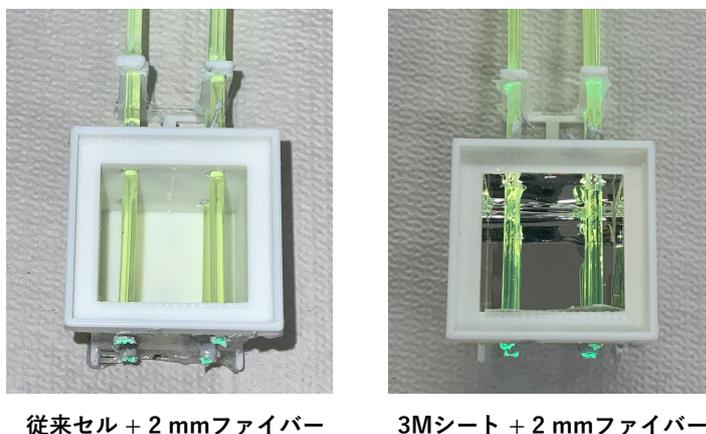


図 6.17: 今回の測定に用いたセルサンプル

表 6.9: 各サンプルの光量および光量増加率 IR_{FiberD}

サンプル	光量 [p.e.]	光量増加率 $IR_{\text{FiberD+PDE}}$ (Fiber 直径+PDE の効果)	光量増加率 IR_{FiberD} (Fiber 直径の効果のみ)
従来サンプル +2 mm ファイバー +MPPC 3075CS	11.56 ± 0.41	3.07 ± 0.26	1.53 ± 0.13
3M 反射シート +2 mm ファイバー +MPPC 3075CS	15.76 ± 1.31	2.00 ± 0.50	0.99 ± 0.25

整合するもので、特に 3M シートを貼り付けたサンプルの IR_{FiberD} をシミュレーションと比較すると、現時点で 3M 反射シートを用いた壁面反射率は 100% に近いと考えられる。

また 3M 反射シート+2 mm ファイバー+MPPC 3075CS を用いたサンプルについて、光量は 15.76 [p.e./fiber] とこれまでの測定で最大で、従来サンプル(シートなし+1 mm ファイバー+MPPC 050CS) と比べて 4.19 倍であり、これまで行った改善を組み合わせることで光量が大幅に向上することを示唆している。

ここで見たようにセル内部におけるファイバーへの到達光子数の向上は期待できないが、その他の過程における光子の伝搬に直径 2 mm のファイバーが有利である可能性がある。また依然クロストークの抑制には有効であると思われる。よって残りの 2 観点について光量への影響を調べる。

6.4.2 非読み出し端面での光反射効果の測定

非読み出しファイバー端面の反射加工により光量が向上することを 6.1 節で見たが、ファイバーの直径が異なるとファイバー中で波長変換される光子の位置分布が外周に集中することで、端面に到達する光子の入射角分布、すなわち端面での反射特性が変化しうる。そのため直径 1 mm のファイバーを用いた測定で最も高い光量向上を示した 3M 反射シートの接着法を、直径 2 mm のファイバー端面に行って光量の増加率を実測する。

測定は 6.3.4 節と同じセットアップ・手法で行い^{*68}、6.6 式に示す増加率 $IR_{\text{Ref.2mm}}$ を求めた。

$$IR_{\text{Ref.2mm}} = \frac{\text{3M 反射シートを端面に貼り付けたサンプルの光量}}{\text{端面を研磨したサンプルの光量}} \quad (6.6)$$

同じ MPPC を用いた測定結果で検出光量比を取り、その平均と標準偏差から増加率と不定性を評価した。

測定結果

増加率 $IR_{\text{Ref.2mm}}$ は 1.89 ± 0.02 となり、これは直径 1 mm の場合の増加率 ($IR_{\text{Ref.1mm}}$) 1.64 ± 0.07 より有意に大きかった。この要因として、ファイバー端面に到達する光子の入射角分布が大きい成分が増加して有効反射率が向上した^{*69}、ファイバー直径が大きいくことで反射体を接着する前の端面研磨が綺麗に行えた、反射体を精度よく垂直に接着できたといった可能性が考えられる。

6.4.3 吸収長の効果および輸送効率の評価

光子は波長変換ファイバー中で吸収されて再放出されることでファイバー中を伝搬する。一般にこの吸収長 λ は十分短いと考えられるが、ファイバー直径 d に対して無視できない場合、2 mm のファイバーを用いることでファイバーに到達した光子の吸収効率が向上することで光量が向上

^{*68} この測定は 6.3.4 節の測定と連続して行っており、非読み出し端面の反射加工なしの測定値として同節の表 6.8 に示した 3075CS サンプルの光量を用いる。

^{*69} 直径 2 mm のファイバーでは、相対的にファイバーの表面付近で多く光子の波長変換が行われると考えられるが、この場合螺旋状にファイバーを伝搬する成分によりファイバー端面の光子入射角分布が大きくなりうる。

する。また放出後に MPPC に到達する効率（輸送効率）が 1 mm のファイバーと異なる可能性がある。この効率の違いに由来するファイバー直径変更による光量増加率 IR_{FiberEff} を 6.7 式のように定義して、これを測定する^{*70}。

$$IR_{\text{FiberEff}} = \frac{\text{2mm ファイバーへ接触した光子が読み出される効率}}{\text{1mm ファイバーへ接触した光子が読み出される効率}} \quad (6.7)$$

セルの光量シミュレーションは光子がファイバーに接触した時点で検出とみなすから、6.4 節で求めた $IR_{\text{FiberD_MC}}(R)$ と測定で求めた $IR_{\text{FiberD}}(R)$ の間には厳密には 6.8 式の関係が成り立つ。

$$IR_{\text{FiberD}}(R) = IR_{\text{FiberEff}} \times IR_{\text{FiberD_MC}}(R) \quad (6.8)$$

IR_{FiberEff} が 1 でない値を持つ場合シミュレーションと測定値を比較する際のバイアスとなる。この値は吸収長 λ やファイバーの境界面における反射特性など様々な未知パラメータに影響を受けるから正確なシミュレーションが難しく、実測による確認が重要である。

測定方法

測定は 6.3.4 節と同じセットアップ・手法を用いて行い^{*71}、図 6.18 のようにファイバー直径の変化に伴う光量の変化を測定した。今回の測定では増加率 IR_{FiberEff} を 6.9 式により求めた。

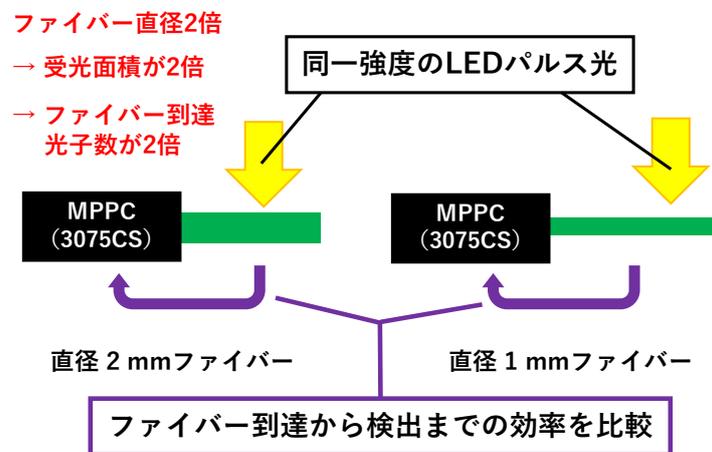


図 6.18: 測定の概念図

$$IR_{\text{FiberEff}} = \frac{\text{直径 2mm ファイバーサンプルの光量}}{\text{直径 1mm ファイバーサンプルの光量}} \times \frac{1}{2} \quad (6.9)$$

ここで係数 1/2 はファイバーに到達する光子数がファイバー直径に比例することを反映している。ここで増加率の測定値および不定性は、同じ MPPC を用いた測定同士で検出光量比を取り増加率

^{*70} MPPC 読み出し端 - 非読み出し端距離が 8 cm、MPPC の読み出し端 - 光照射点距離が 5 cm、非読み出し端を研磨した状態での測定であり、これら条件が変わることで IR_{FiberEff} が変化しうる。

^{*71} この測定は 6.3.4 節の測定と連続して行っており、非読み出し端面の反射加工なしの測定値として同節の表 6.8 に示した 3075CS サンプルの光量を用いる。

測定値をそれぞれで求めてその平均と標準偏差により評価した。^{*72}

測定結果

測定の結果 IR_{FiberEff} の値は 1.15 ± 0.03 であり、1 より有意に大きかった。15% の光量変動は無視できず、ファイバー直径の異なるサンプルで光量を比較する際に考慮する必要がある。

6.4.4 直径 2 mm のファイバーを用いたサンプルの光量

ファイバー直径を 2 mm に変更した場合の検出器の読み出し光量を、1 mm の場合を基準として推測する。6.4.1 節で行った測定とシミュレーションの比較から 3M シートの壁面反射率は 100% を仮定する。検出器セルにおける収集光量の変化率をシミュレーションで計算すると 0.93 であり光量が下がる。一方で、ファイバーに到達してからの光収集効率の比 (2 mm ファイバー + 3M シート反射 / 1 mm ファイバー + 3M シート反射) は、ファイバーを用いた 3 つの測定結果 ($IR_{\text{Ref.1mm}}$, $IR_{\text{Ref.2mm}}$, IR_{FiberEff}) から求まり^{*73}、1.33 となるから光量が向上する。この 2 つをかければトータルの光量変化率が得られて、 1.23 ± 0.06 倍の光量向上となる。

検出器の水割合を統一した場合の光量

ファイバー直径が 2 mm になった場合その体積分だけ水割合が低下する。これを WbLS の水比率増加で補った場合に検出光量が低下するがこの影響を見積もる。WbLS が検出器中に占める重量比は直径 1 mm のファイバーを用いる場合 $0.9^3 \times (1 - 0.05^2 \times \pi \times 3) \sim 0.71$ 、2 mm の場合 $0.9^3 \times (1 - 0.1^2 \times \pi \times 3) \sim 0.66$ と概算できるが^{*74}、ここで検出器の水割合を変更前と同等に維持するには WbLS の水割合を標準サンプルから $0.71/0.66$ 倍向上させる必要がある。水割合が 75.3% の WbLS の光量は 0.83 倍程度に減少するが^{*75}、これを考慮した光量増加率は $1.23 \times 0.83 \sim 1.02$ となり 1 mm の場合とほとんど変わらない。

2 mm のファイバーはその太さからセル内で発生した光子の影となり、セルを通過する粒子位置に対する検出光量の一様性が低下することで、1 mm のファイバーが飛跡検出性能として優れる可能性がある。一方で 2 mm ファイバーを用いることで従来問題であったクロストークを抑制できると考えられる。このように両者の方式に異なるメリットが考えられるが、それぞれの光量比は反射率に依存したシミュレーション結果であり、クロストークが現状どの程度問題になるかは未測定で結論できない。そのため実際にサイズ 1 cm の検出器セルを用いた測定による、光量とクロストークの比較が重要である。

^{*72} 主要な不定性である MPPC の個体差由来の誤差を除くためこの評価方法を用いた。

^{*73} $IR_{\text{Ref.2mm}}/IR_{\text{Ref.1mm}} \times IR_{\text{FiberEff}}$ となる。

^{*74} 1 cm サイズのセル間に 1 mm の隔壁を設置し各セルに波長変換ファイバーを 3 本通す構造を仮定

^{*75} WbLS 標準サンプルを基準として、WbLS 中の界面活性剤と液体シンチレータの割合が標準サンプルと同じで等しく、WbLS の光量が液体シンチレータ割合に比例すると考える

6.5 章のまとめ

本章ではセル中で波長変換ファイバーに到達した光子が MPPC で読み出されるまでの効率を高める工夫を行い、直径 2 mm のファイバーを用いることによる光量への影響を見た。

WbLS 検出器ではファイバーを伝搬する間の光量減衰の影響で MPPC での読み出しから最も遠い地点で 0.43 倍光量が低下するが、この領域での光量を向上することが課題となる。読み出しを行わないファイバー端面での光反射はその領域の光量を向上するために有効であることから、今回端面の反射加工を複数試作して光量の増加性能を評価した。そして 3M 反射シート (DF2000MA) をファイバー端面へ接着する加工により WbLS 検出器の光量を 1.64 ± 0.07 倍向上させることができた。また、従来ほとんど反射率を持たないと考えられていたファイバーをカットした状態の端面が高い光反射効果を持つことを発見し、この加工により 1.27 ± 0.03 倍光量が向上することを確かめた。またサンプル毎の光量変動率が十分小さく反射効果は再現性があるから、3M 反射シートの貼り付けにおける加工コストが問題になる場合でもこの方法は用いることができる。また WbLS 検出器に用いる 50 cm のファイバーについては、200 cm のファイバーと比べて伝搬中の光量減衰効果が小さいことから、このカット加工を行うだけで十分な光量が得られることが分かった。

つぎに MPPC の改善のために 3 種類の MPPC のクロストーク、アフターパルス、飽和効果の影響といった項目を調べて比較した。これらの効果は測定で無視できない光量のバイアスを生じるから補正が必須であり今回その方法を確立した。そして MPPC の光検出効率を測定して、WbLS 検出器に新たに MPPC S13360 3075CS を用いることで 2.01 ± 0.08 倍の光量向上が可能であることを示した。

最後に波長変換ファイバーの直径を 1 mm から 2 mm に変更することで検出光量に生じる影響を調べた。その結果水割合の補正も含めると最終的な光量はほとんど変わらなかったが、セルを通過する粒子位置に対する光量の一様性を考慮すると 1 mm のファイバーが優れて、セル同士のクロストークを考慮すると 2 mm ファイバーが優れる可能性がある。また、これらの結果はシミュレーションに依存しているから実際に 1 cm サイズの WbLS 検出器セルを用いた測定を行う必要があると結論づけた。

本章で行った非読み出しファイバー端面での光反射加工、MPPC の改善による光量増加は 3.30 倍であり、WbLS 検出器として十分な検出光量を達成した可能性がある。よって次章では WbLS 検出器の基本性能を見積もり今後の開発方針を議論する。

第7章 検出器の基本性能の評価

本章ではこれまで行った測定の結果から壁面反射率を評価し、反射率を用いたシミュレーションから現時点の WbLS 検出器の光量および飛跡検出効率を評価する。

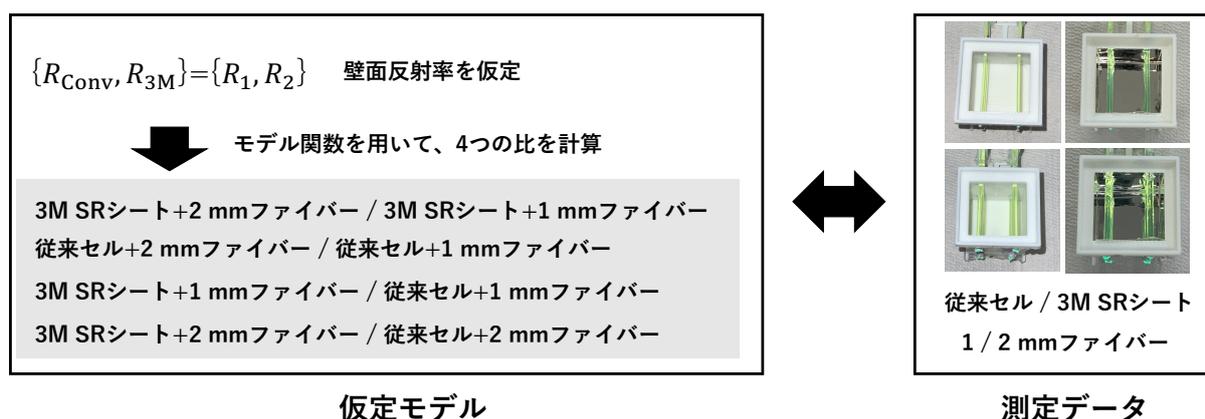
7.1 壁面反射率の評価

5章および6章で見たように、検出器セルのシミュレーション結果はセル壁面の反射率に大きく依存する。またクロストークの抑制には反射率の向上が重要である。2度の先行研究 [49][57] でそれぞれ白色 PMMA 樹脂で形成したセル容器の壁面反射率が評価されたが、結果はそれぞれ $79.5 \pm 1.7\%$ 、 90% と一致せず、正確な反射率はよく分かっていない。そこで本節では、従来セルの反射率および 3M 反射シートを貼り付けた改良後の反射率を推定、シミュレーションの精度を向上すると同時にクロストークの改善状況を予想する。

7.1.1 評価方法

5章で行った大型セルの光量測定および、6章で行った 2 mm ファイバーを用いた大型セルの光量測定の結果から壁面反射率を推定する。6.4.1 節で見たようにファイバー直径が 1 mm と 2 mm の測定光量比は壁面反射率に大きく依存するから、この情報量を利用して壁面反射率を推定できる。

具体的な方法は図 7.1 に示す通りで、はじめに従来セルの壁面反射率 R_{Conv} と 3M SR 反射シ-



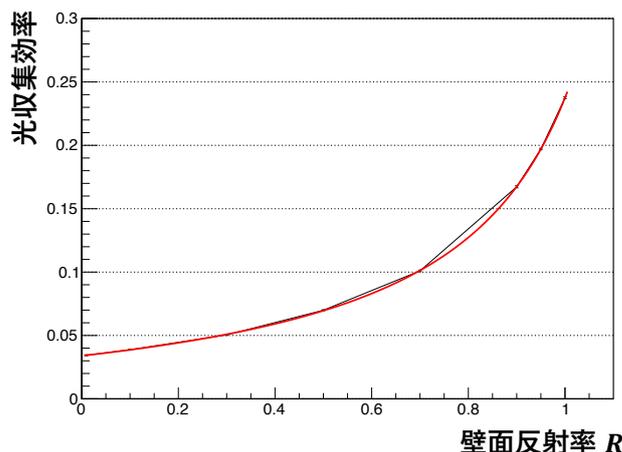
モデルの適合度をカイ二乗検定で判断

図 7.1: 複数の測定データを用いることによる反射率の同時決定

トの反射率 R_{3M} を仮定して、その値をモデル関数に代入することで壁面の状態及びファイバー直径を変更した際の 4 通りの光量比を計算し仮定モデルを作成する。この比を実際の測定データと

比較して、測定値の不定性をもとに χ^2 値を計算、自由度 1 の χ^2 検定で適合度の p 値を算出する。 R_{Conv} および R_{3M} をそれぞれ 0 から 1 の範囲で動かしてそれぞれの組み合わせでモデルの適合度を検定し、p 値が最も小さくなるような反射率の組み合わせを探索する。

ここで 3M SR シート+2 mm ファイバー/従来セル+ 2 mm ファイバーの比を計算するために、2 cm のセル模型で 2 mm ファイバーを用いた場合の光収集効率の関数モデルが必要だが、これをシミュレーションから図 7.2 のように求めた。



$$\text{光収集効率} (R) = \frac{1}{3.87 + 14.4 \times (1 - R)} - 0.0207$$

図 7.2: 2 mm ファイバーを用いたセル模型における光収集効率のモデル化

7.1.2 反射率評価の結果

検定から求めた p 値の分布を図 7.3 に示す^{*76}。反射率の最適値は $R_{Conv} = 0.909$ と $R_{3M} = 0.999$ の組み合わせで、これは p 値が 0.256 であるから測定データと矛盾しない。

反射率の不定性

反射率の不定性をベイズ統計で求める。ここで事前分布は全反射率の組み合わせに対して平坦を仮定して、尤度にはモデル毎に求めた p 値における $dp/d\chi^2$ を用いる。こうして R_{Conv} および R_{3M} について求めた、68.3% 信用区間 (1σ) と 95% 信用区間を表 7.1 に示す。

表 7.1: R_{Conv} および R_{3M} の信用区間

	従来セル反射率 R_{Conv} [%]	3M 反射シート反射率 R_{3M} [%]
68.3% 信用区間	90.9 $^{+1.6}_{-5.4}$	99.9 $^{+0}_{-4.2}$
95% 信用区間	90.9 $^{+2.6}_{-11.2}$	99.9 $^{+0}_{-8.8}$

^{*76} ここで白色領域は p 値が計算できないほど小さいことを示す。

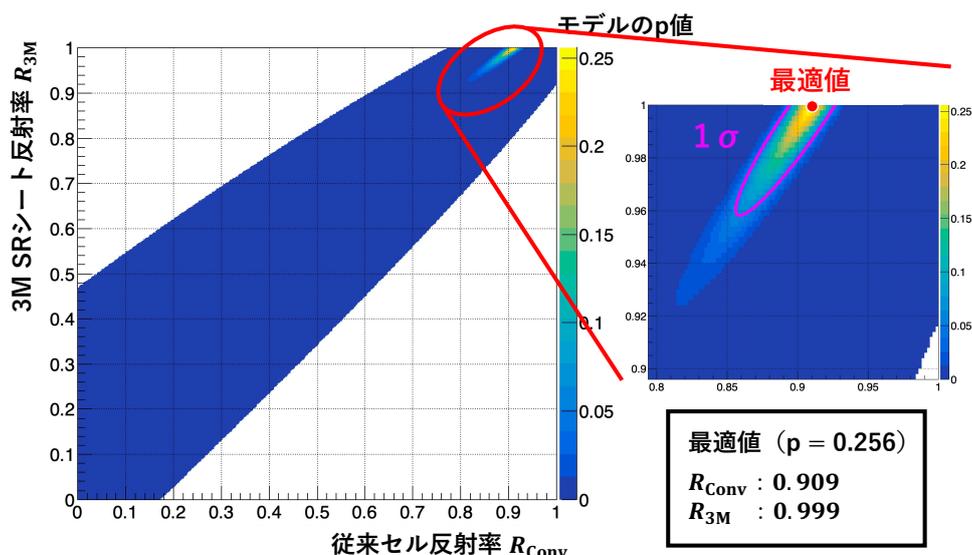


図 7.3: 反射率の組み合わせ毎の測定値との適合度 (p 値)

反射率の検討

反射シートを貼り付けた改良後の壁面反射率はほとんど 100% に近い結果となり、反射率の大幅な向上すなわちクロストークの改善が期待できる。

今回評価した白色 PLA 容器の壁面反射率 R_{Conv} は先行研究^[57]における白色 PMMA 容器の反射率推定値と誤差範囲で同じで、3M 反射シートの反射率はカタログ値 99% と一致する^[75]。この最適値を用いた際の各光量比のシミュレーション値と測定値の適合状況は表 7.2 の通りで^{*77}、各

表 7.2: 最適値における各光量比のシミュレーション値と測定値の適合状況

光量比	シミュレーション値	測定値	差分 (有意度)
従来+2 mm/従来+1 mm	1.32	1.33 ± 0.12	0.01 (0.12σ)
3M SR+2 mm/3M SR+1 mm	1.05	0.86 ± 0.22	0.19 (0.87σ)
3M SR+1 mm/従来+1 mm	1.73	2.10 ± 0.53	0.36 (0.68σ)
3M SR+2 mm/従来+2 mm	1.37	1.36 ± 0.05	0.01 (0.23σ)

光量比がそれぞれ良い精度で一致する。ここから反射率推定値は妥当と判断する。反射率推定についてはさらに検討を行ったが、その詳細は付録 L に記す。

7.2 読み出し光量の推定

これまでの開発では WbLS 検出器の光量を改善してきた。本節では現在の WbLS 検出器の光量を推定し、飛跡検出器として十分な水準にあるかを検討する。前節で求めた WbLS セルの壁面反射率値を参照しながら、光量改善の状況を整理して検出器の読み出し光量を推定する。求めた光量から検出器の飛跡検出能力を評価して今後の開発方針を述べる。

^{*77} ここで差分の有意度はシミュレーション値と測定値の差分を測定値の誤差で割ったものである。四捨五入のため表の値の割り算とは一致しない。

7.2.1 これまでの開発における光量改善

これまでに行った光量改善は、1. セル壁面の反射率向上、2. ファイバー非読み出し端面の反射加工、3. MPPC の改善、4. ファイバー直径の変更である。これらの改善の効果は3つの独立した段階に分けることができる。本節ではそれぞれの段階ごとに光収集効率の向上を整理する。ただし従来のセルに直径 1 mm のファイバーを用いて、非読み出し端での反射を行わずに従来の MPPC S13081-050CS を用いて読み出す場合の収集効率を基準値 1 と定義する。また従来セルの壁面反射率を 90.9%、3M SR 反射シートの反射率を 99.9% として各種効率を計算する。

段階 A：WbLS で発生した光子がセル内でファイバーに到達するまでの効率

この段階ではファイバー直径とセル壁面の反射率が光収集効率に影響する。従来の状況を 1 とした時の相対的な光収集効率を表 7.3 に示す。これらの値はシミュレーションに基づき計算した。

表 7.3: 段階 A における相対的な検出効率

	従来セル	3M SR 反射シートセル
直径 1 mm ファイバー	1	1.47
直径 2 mm ファイバー	1.12	1.39

段階 B：ファイバーに到達した光子が MPPC 受光面に到達する確率

この段階ではファイバー直径とファイバー端面の反射率が光収集効率に影響する。従来の状況を 1 とした時の相対的な光収集効率を表 7.4 に示す。

表 7.4: 段階 B における相対的な検出効率

	端面を研磨	3M SR 反射シートの接着
直径 1 mm ファイバー	1	1.64
直径 2 mm ファイバー	1.15	2.17

段階 C：MPPC 受光面に到達した光子が検出される確率

この段階では MPPC の光子検出効率 (PDE) が重要である。従来の状況を 1 とした時の相対的な PDE を表 7.5 に示す。

表 7.5: 段階 C における相対的な検出効率

MPPC	相対検出効率
S13081-050CS	1
S13360-1350CS-01	1.22
S13360-3075CS	2.01

段階 A + B + C：検出器の光子検出効率

段階 A、B、C は独立に扱うことができるから、これらの検出効率をかけることで最終的な光子の相対検出効率が定まる。各手法毎に計算した相対検出効率を表 7.6 にまとめる。このように直径

表 7.6: 光子の最終的な相対検出効率

手法	ファイバー直径	
	1 mm	2 mm
従来セル	1	1.29
3M SR シートセル	1.47	1.60
3M SR シートセル +ファイバー端面への 3M SR シート接着	2.41	3.02
3M SR シートセル +ファイバー端面への 3M SR シート接着 +新 MPPC (S13360-3075CS)	4.85	6.08

1 mm のファイバーを用いる場合で 4.85 倍、2 mm を用いる場合で 6.08 倍の光量向上が期待できるといった結果になった。

7.2.2 検出器光量の評価

本節では、光量増加率に基づく方式とセル模型の光量測定値を利用する方式の 2 通りで現在の WbLS 検出器の光量を見積もる。

光量増加率に基づく光量評価

WbLS の発光期待値を用いたシミュレーションは実際の測定値と 3 倍程度一致しない。そのため本節において WbLS 検出器の光量は測定値をベースにした方法で評価した。この詳細は付録 M で述べる。はじめに前回の WbLS 試作機を用いた性能テストの光量測定値に、以降行ってきた光量の増加率をかけることで現在の光量进行评估する。前回のビームテストの光量は 3.9 ± 0.2 [p.e./fiber] であり、先行研究^[49]で行われた界面活性剤の改良による光量増加率 1.28 ± 0.04 および表 7.6 に示す光量増加率を考慮すると最終的な光量の予想値は、

$$24.3 \pm 5.0 [\text{p.e./fiber}] \text{ (直径 1mm ファイバー)}$$

$$30.2 \pm 4.2 [\text{p.e./fiber}] \text{ (直径 2mm ファイバー)}$$

となる。この光量は光量分布が作るランダウ分布の最頻値 (MPV) に対応する。

セル模型の測定光量を利用した光量評価

次に 3M 反射シートを貼り付けたセル模型の光量測定の結果から現在の WbLS 検出器の光量进行评估する。測定結果に対して、セルのサイズ、非読み出し端面での反射、MPPC の改善、トリガーによる光量のバイアスを考慮した補正を加えると WbLS 検出器の光量評価値は、

18.6 ± 4.9[p.e./fiber] (直径 1mm ファイバー)

24.4 ± 3.2[p.e./fiber] (直径 2mm ファイバー)

となる。この光量は平均観測光子数である。

7.2.3 期待される検出器性能と開発方針

前節で2通りの方法で光量を求めたが両者は誤差の範囲で一致しているからその平均値を期待光量とする。WbLS 検出器でセルのヒットを認識するには通された3本のファイバー全てが2.5光子の閾値で光子を検出する必要があり、光子の観測数分布として期待値 n のポアソン分布を仮定すると、3本のファイバー全てが3光子以上を検出する確率 p_{hit} は $p_{\text{hit}} = (1 - e^{-n} - e^{-n}n - e^{-n}n^2/2)^3$ と表せて、これを前述の期待光量について計算した結果が表 7.7 である。ここでファイバー 2 m 中を伝搬する間の 0.43 倍の光量減衰を考慮した確率 (減衰後) を同時に示した。このように飛跡検

表 7.7: 期待光量と飛跡検出確率

ファイバー 直径 [mm]	期待光量 [p.e./fiber]	飛跡検出効率 [%]	飛跡検出効率 (減衰後) [%]
1	21.5	>99.9	98.5
2	27.3	>99.9	99.8
以前の試作機	3.9	41.7	1.3

出確率はそれぞれのファイバー直径で 99% 以上で、減衰後も高い飛跡検出効率を期待できる。このように現段階で WbLS 検出器は主要な問題であった光量不足による飛跡検出効率の低下を克服した見込みがあり、開発の次段階として WbLS 検出器試作機を用いた性能検証が必要である。

7.3 章のまとめ

本章では WbLS 検出器の光量および飛跡検出効率を評価した。

はじめにこれまでの測定結果から壁面の反射率を評価して、従来セルの壁面反射率が 90.9% に対し 3M SR 反射シートの反射率が 99.9% 程度まで改善したと評価した。この評価値は先行研究や製品のカタログ値と一致することから妥当と考えられる。また反射率が 100% 近くまで向上したことで、クロストークの抑制が期待できる状況となっている。

次に求めた反射率を用いたシミュレーションを行い、現在の検出器セルについて直径 1 mm のファイバーを用いるセルで 21.5 [p.e./fiber]、2 mm を用いるセルで 27.3 [p.e./fiber] 程度の光量が期待できると評価した。この光量から計算した検出器セルの飛跡検出効率は 99% 程度であり、飛跡検出器としての実用が期待できる水準である。

このように光量およびクロストークで十分な改善が期待できることから、次章ではビームラインを用いた WbLS 検出器試作機の性能評価を行う。

第 8 章 化研ビームラインにおける試作機の性能評価

2025 年 10 月 8 日から 10 日にかけて、京都大学化学研究所において電子線形加速器（KAKEN Electron Linac, KEL）ビームライン^[83]において、WbLS 検出器小型試作機の性能評価テストを行った。

8.1 ビームテストの概要

7 章で見たように、WbLS 検出器の推定光量は実用水準にあることが期待される。またセル壁面への反射シート貼り付けにより反射率が 100% 近くまで改善して、また直径 2 mm のファイバーを用いて読み出すことでクロストークの改善が期待できる。これまでの光量測定はサイズ 2 cm の大型セル模型を用いたものであり、サイズ 1 cm の WbLS 検出器セルでの光量はシミュレーションを用いて間接的に推測していた。そのため実サイズのセルを用いた光量測定が重要だが、サイズが 1 cm のセルは宇宙線の通過頻度が低くて十分な統計で光量を測定することが難しく、クロストークは発生確率が低いからその確率評価にはさらに統計が不足する。そこで今回、特定範囲に荷電粒子を多数、一方向に照射可能な電子ビームを用いて WbLS 検出器セルの光量を評価する。

8.1.1 ビームテストの目標

ビームテストの第 1 目標は、試作機の読み出し光量を評価することである。試作機は 3M SR 反射シートをセル壁面に貼り付けて、読み出しに直径 1 mm と直径 2 mm のファイバーを用いる 2 種類を用意する。ここでサンプル間の測定値を比較してファイバー直径を変更することによる光量変化を評価できる。第 2 目標は試作機におけるクロストーク率を評価することである。

今回用いる電子ビームは事前のシミュレーションから試作機内部での散乱効果が大きいと分かっていた。ここでクロストークと散乱イベントの区別が難しいことから、クロストーク率は参考値として評価する。

8.1.2 ビームライン

今回用いたビームラインの構造を図 8.1 に示す。KEL で生成・加速された電子はベンディングマグネットにより 90° 曲げられて、図中の 90° ビームラインへ到達する。本測定において WbLS 検出器試作機はこのビームラインに設置した。電子ビームのエネルギーはベンディングマグネットの磁場に依存して決まるため、ほとんど同一エネルギーの電子ビームを利用することができる。



図 8.1: 化学研究所ビームラインの概要 [84]

今回用いたビームのエネルギーは約 54 MeV でビーム幅は水平方向に約 13 mm 鉛直方向に約 10 mm、照射レートは 20 Hz であった^{*78}。

8.2 測定方法

測定セットアップ、イベント選択、測定データの較正は以下のように行った。

8.2.1 検出器のセットアップ

ビームテストにおける測定のセットアップを図 8.2 に示す。ビームの上流から、ビーム位置検出器（ホドスコープ）、試作機を並べた構造になっており、ホドスコープを用いて同時に複数粒子が到達するマルチイベントを除外した。各検出器からの光子読み出しは MPPC を用いて行って EASIROC モジュール（Extended Analogue Si-pm Integrated ReadOut Chip^[85]）で信号を記録した。

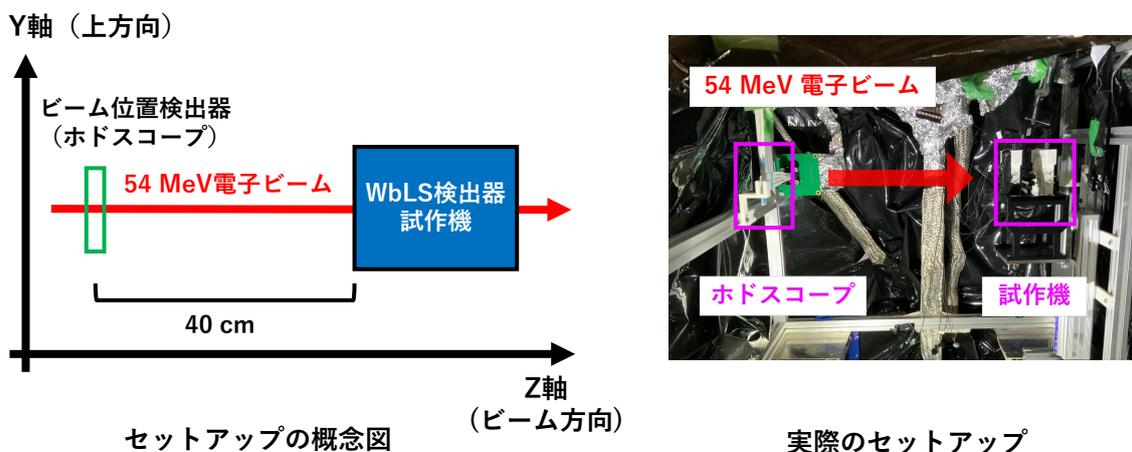


図 8.2: 検出器のセットアップ

^{*78} このうち同時に 1 電子が到達するシングルイベントの割合は 37% 程度でこれを解析に用いた。

WbLS 検出器試作機

今回のビームテストで用いた WbLS 検出器試作機として 3M SR 反射シートを壁面に貼り付けてから直径 1 mm と 2 mm のファイバーで読み出すサンプル（1 mm サンプル、2 mm サンプル）をそれぞれ作製した。試作機の構造は図 8.3 の通りであり、3D プリンター（Raise3D Pro3）によ

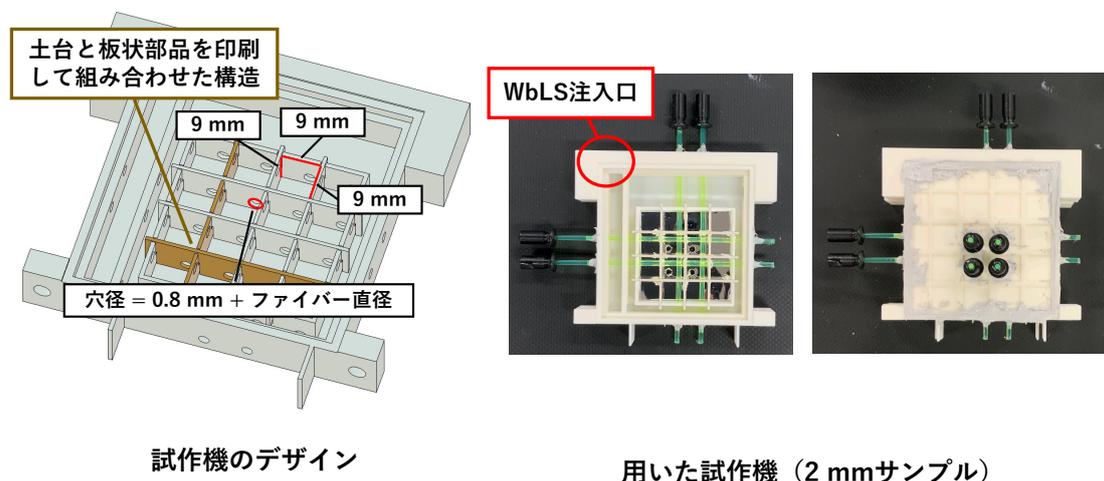


図 8.3: WbLS 検出器試作機

り白色 PLA フィラメントを用いて外枠と板状部品を印刷してから、そこへ 3M SR 反射シートを貼り付けて組み合わせることで作製した。セルを仕切る壁面の厚さは 0.8 mm の PLA 層に、0.10 mm の 3M SR 反射シートを各面へ貼り付けた合計 1.0 mm であり、各セルは $0.9 \times 0.9 \times 0.9 \text{ cm}^3$ の立方体空間となっている。測定は中心に位置する $2 \times 2 = 4$ つのセルを用いて行い、この測定セルにはファイバーを 3 方向に通してからビーム方向に垂直な X 軸および Y 軸のファイバーで読み出しを行った。特に 2 mm サンプルでは Z 軸のファイバーからも読み出しが出来るようにして、X 軸および Y 軸方向のファイバーとの光量の相関を見た。光子の読み出しを行う全てのファイバーについて、読み出しを行わない側の端面はすべてダイヤモンドカッターで研磨した。

こうして試作機の枠を作製してから、表 8.1 に示す組成の WbLS を測定セルの下側から満たされるように注入した。本サンプルは界面活性剤ナフタレンスルホン酸ナトリウムの分量を標準サ

表 8.1: ビームテストで用いた WbLS サンプル

	使用物質	重量比 [%]
水	純水 (W10-A2)	70
非イオン性界面活性剤	IGEPAL CO-630	14.0
イオン性界面活性剤	ナフタレンスルホン酸ナトリウム	1.0
溶媒	Pseudocumene	13.975
蛍光剤	2,5-Diphenyloxazole	1
波長変換剤	1,4-Bis (2-methylstyryl) benzene	0.025

ンプルより 5% 増やしており、ビームテストを行った 25 °C の環境で安定して溶解するように調整している。測定は試作機を上流から 2 mm、1 mm サンプルと並べた状態（A 方式）と 1 mm、2 mm サンプルと並べた状態（B 方式）の 2 通りで行った。

ホドスコープ

試作機の上流に設置されたホドスコープは厚さ 1.7 mm のシンチレーションファイバーが 16 本 1 列に並べられた構造をしており、 $1.7 \text{ mm} \times 16 = 27.2 \text{ mm}$ の幅を通過したビーム位置を 1.7 mm の分解能で検出することができる。これを縦横にそれぞれ設置することで、 $27.2 \text{ mm} \times 27.2 \text{ mm}$ の領域を通過した粒子の位置を 16×16 通りの区画に分けて特定できる。各ホドスコープの読み出しは $4 \times 4 = 16 \text{ ch}$ が並んだ MPPC アレイ (S13361-3050AE-04^[86]) を用いて行う。

データ取得

検出器および MPPC の読み出し信号は図 8.4 に示すように EASIROC モジュールを接続して行った。EASIROC は 1 台で 64 ch の MPPC に電圧を印加、信号読み出しを行えるモジュールで、MPPC の波高を記録するタイミングを決める HOLD 信号と TDC の原点時間を決める TSTOP 信号、次のデータ取得を始めるタイミングを決定する ADC 信号の 3 つを順に入力することでデータを取得する。EASIROC は読み出した信号値からトリガーを発行することができて、今回はこの機能を用いた。ビームテストでは試作機の 11 ch^{*79} とホドスコープからの 32 ch について読み出

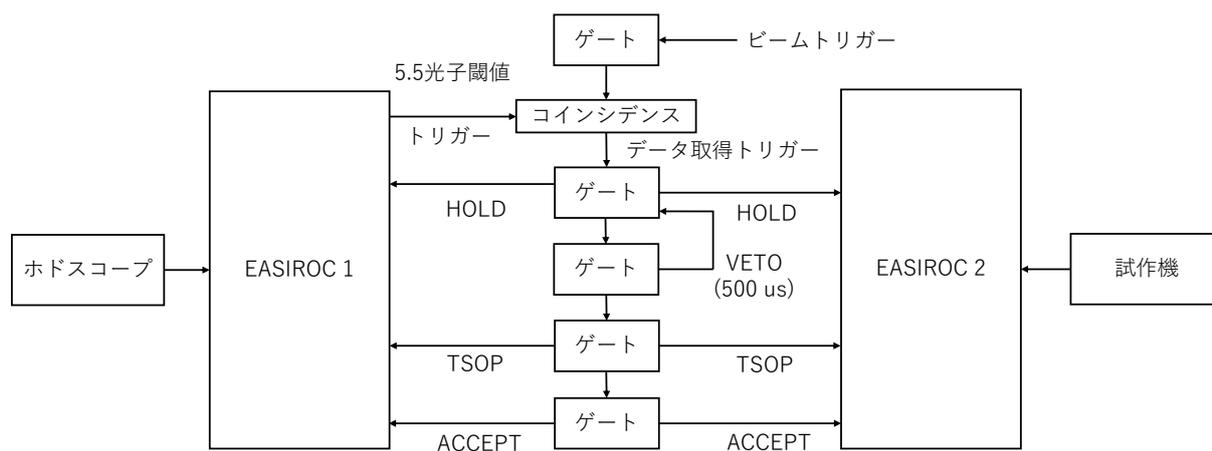


図 8.4: データ取得回路

しを行い、ホドスコープの 32 ch には 5.5 光子閾値の 32OR トリガーを設定して、このトリガーとビームトリガーのコインシデンスを取ることでデータ取得のトリガーを発行した。また 500 μs の VETO 信号を生成して、データ取得の VETO を行っている。

8.2.2 イベント選択と光量の較正

今回のビームテストでは複数の電子が同時に到達するマルチイベントが無視できない割合で含まれる。マルチイベントでは粒子がセルに同時に入射して光量が 2 倍以上に見えて、またクロストークと複数粒子の通過が区別できなくなるため測定の重大なバイアスとなる。本測定では、ホドスコープが作る 16×16 の区画について縦横で共に 3 p.e. 以上の光量を検出したものをヒット

*79 直径 1 mm のファイバーを用いたサンプルにおいて読み出しファイバーが 1 つ破損したため今回用いなかった

区画と定義して、このヒット区画が1つだけ存在するイベントを選択した。このようにして図 8.5 に示すマルチイベントを除外して、単一の粒子が通過したシングルイベントのみを解析に用いた。

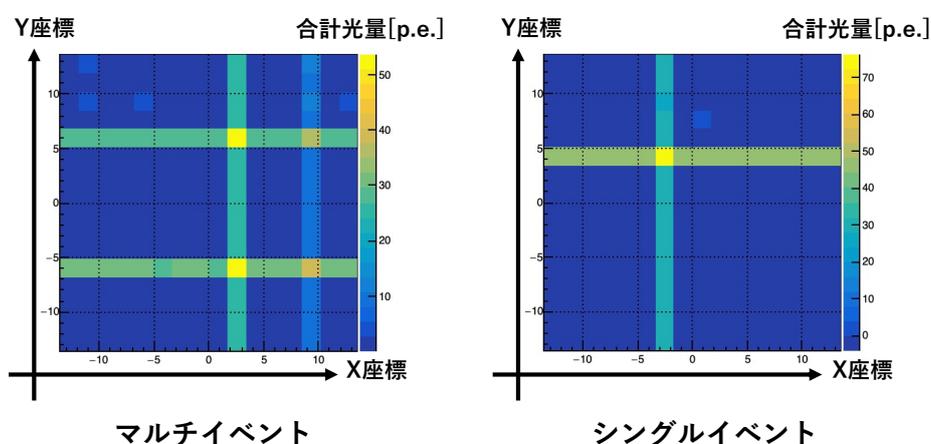


図 8.5: ホドスコープにおけるマルチイベントとシングルイベント

MPPC の較正は、各読み出しチャンネルについて 1 光子および 2 光子信号の ADC 値を調べて、それぞれで光量と ADC 値の関係を一次関数で対応づけて行った。

8.2.3 測定データの光量補正

ビームテストは読み出しに最大 PDE が 40% の MPPC S13360-1350CS-01 (1350CS) を用いており、ファイバーの非読み出し端面はダイヤモンドカッターで研磨した状態で行った^{*80}。高い読み出し光量を達成するには最大 PDE が 50% がより高い MPPC S13360-3075CS (3075CS) を用いて、ファイバーの非読み出し端面を研磨してから 3M SR 反射シートを接着すればよいが、これらの変更を試作機に行った際の光子収集効率の増加割合を 8.1 式のように補正係数 C_{Test} として、これを求める測定を個別に実施した。測定は 6.1 節の測定と同じセットアップを用いて行い、ビームテストの読み出し状況と最適な PDE の状況を再現したファイバーにそれぞれ LED パルス光を照射して、その検出光量比を補正係数とした。ファイバー直径が 1 mm と 2 mm の場合で求めて、各サンプルは 8 回測定を行った。

$$C_{\text{Test}} = \frac{\text{理想的な収集効率}}{\text{ビームテストの収集効率}} = \frac{\text{ファイバー端面を研磨して 3MSR シートを接着} + 3075\text{CS で読み出した時の光量}}{\text{ファイバー端面を研磨} + 1350\text{CS で読み出した時の光量}} \quad (8.1)$$

この結果から 1 mm サンプルへの補正係数は 2.61 ± 0.13 、2 mm サンプルへの補正係数は 4.82 ± 0.29 となって、これを測定値にかけることで理想状態の検出光量を別途求める。2 mm の場合で特に補正係数が大きいのは、MPPC 1350CS の受光面が直径 2 mm のファイバー端面を全て覆わないことによる光子ロスが多く発生するためである。

^{*80} MPPC S13360-3075CS は 12ch 分を購入する納期の関係で用いず、非読み出し端面の反射加工は増加率変動による光量測定の系統誤差を懸念して行わなかった。

8.3 測定結果と解析

ホドスコープにおける電子散乱の効果が大きいいため、ビームの入射位置情報を用いない方法で解析を行った。はじめにクロストークの発生状況を見てから、各サンプルの光量を評価する。

8.3.1 試作機におけるクロストーク

クロストークの傾向

はじめに 2 mm サンプルのクロストークの状況を調べた。図 8.6 のように、隣り合うセル 0 とセル 1、および対角の位置関係にあるセル 0 とセル 3 について、Z 軸ファイバー読み出し光量の相関を示す。ここで 1 方のセルで大きな光量を観測し、もう一方で 1,2 光子相当を検出したイベント

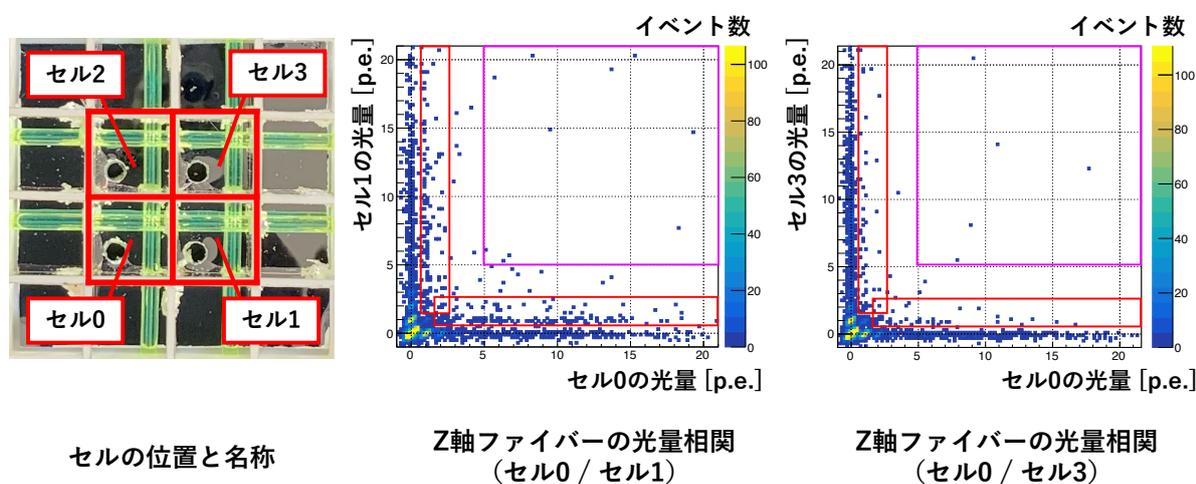


図 8.6: 各セルの名称

群を赤枠に示している。このイベント群は隣り合うセル 0 と 1 で多く見られるが、対角に位置するセル 0 と 3 で少ないことからクロストークイベントと考えられる。また 2 つのセルで同時に 5 光子以上検出したイベントを紫枠に示しているが、これは両方に一定数存在しているからセル内で散乱した電子ビームが隣接セルへ侵入した散乱イベントと考えられる。この中間領域は両者が混在して明確に区別できない。

光量の相関を見るとクロストーク先の光子検出数はほとんど 1 光子で、クロストーク確率が小さいことから 3 光子以上の検出は稀と分かる。よって本解析では Z 軸ファイバーで 2.5 p.e. 以上の信号を検出した場合に、そのセルを荷電粒子が通過した（ヒット）と判断する。

クロストーク率の推定

クロストーク率の発生状況は図 8.7 に示すように、クロストーク先の Z 軸ファイバーが境界壁面に近い場合（Near 条件）と遠い場合（Far 条件）に分類できて、Far 条件では手前のファイバーが光子を遮ることでクロストーク率が低くなる可能性がある。よってそれぞれの条件毎にクロストーク率を求める。各条件についてイベント毎のクロストーク率の分布は図 8.8 のようになった、

ほとんどのイベントで 0 となるが、大きなクロストーク率を示すイベントが一定数存在する。こ

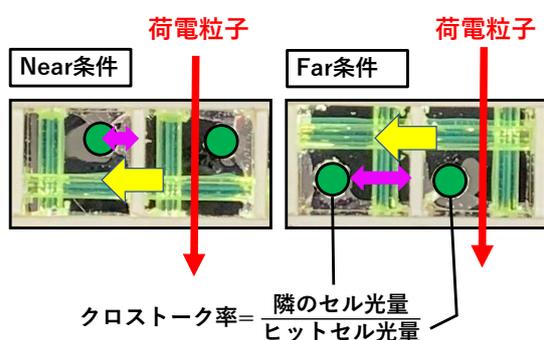


図 8.7: ファイバーの位置関係とクロストーク

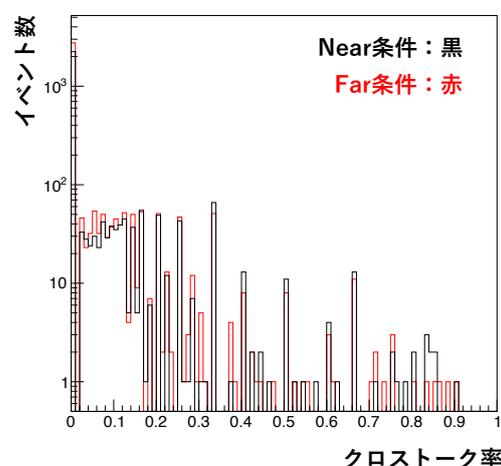


図 8.8: クロストーク率の分布

のようなイベントの要因としてセル中におけるビーム電子の散乱、ビーム電子により生じたデルタ線が考えられる。次にクロストーク率の平均値を表 8.2 に示す。この値に含まれるビーム散乱の寄与は MC から 0.79% 程度と見積もった。それを差し引いた値を補正值として共に示す^{*81}。補正前の平均クロストーク率は Near 条件で 4.48%、Far 条件で 3.79% となり Far 条件でクロス

表 8.2: 各条件における平均クロストーク率

条件	平均クロストーク率 (補正值) [%]
Near 条件	4.48 (3.70)
Far 条件	3.79 (3.01)

トーク率が低くなった。2022 年のビームテストで用いた試作機のクロストーク率は 5.1% であったから、反射シートの貼り付けにより改善していることが分かる。ただしイベント選択で Z 軸の光量を用いるため、クロストーク率が高い / 低いイベントが選択された可能性があり測定値のバイアスに注意が必要である。

8.3.2 試作機セルの検出光量

前節では Z 軸の光量でセルのヒットを判定してクロストーク率を評価したが、本節ではこれを利用して X、Y 軸光量の評価を 2つのサンプルでそれぞれ行い、両者の値を比較する。

^{*81} この見積もりは隣接セルでのエネルギー損失 (~ 発光量) の比を求めたもので、セル内のファイバーの構造を反映しておらず概算である。Near 条件と Far 条件で同一の値を差し引いている。

2 mm サンプルにおける X,Y 軸ファイバーの光量

2 mm サンプルにおいて、X 軸および Y 軸方向に通したファイバーの検出光量を求めた。本解析では A 方式の測定データから図 8.9 のように、Z 軸で 2.5 光子以上の光量を検出したイベントをヒットと判断して解析に用いた。ここで、Z 軸と他軸ファイバーの光量に大きな相関がないことから、イベント選択が光量に与えるバイアスは小さいと考えられる。

こうして得た光量分布に、図 8.10 に示すようにランダウ分布をガウシアンで畳み込んだ関数（ランダウ・ガウス関数）をフィッティングし、そのランダウ分布最頻値（MPV）を各ファイバーの検出光量と定義した。ここでランダウ・ガウス関数は荷電粒子のエネルギー損失と検出器での分解能による広がりを考慮して用いている。

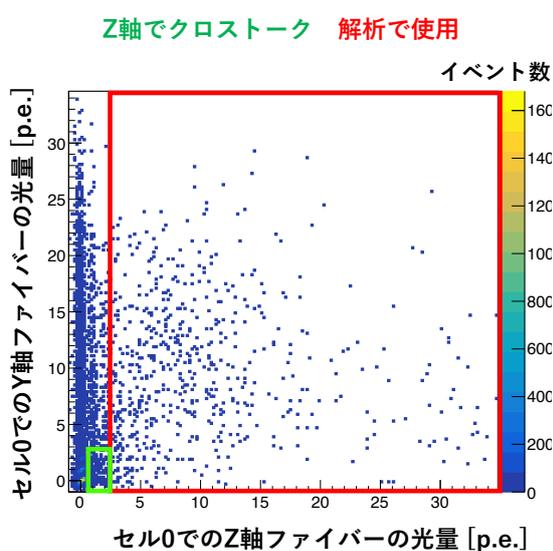


図 8.9: イベント選択の例

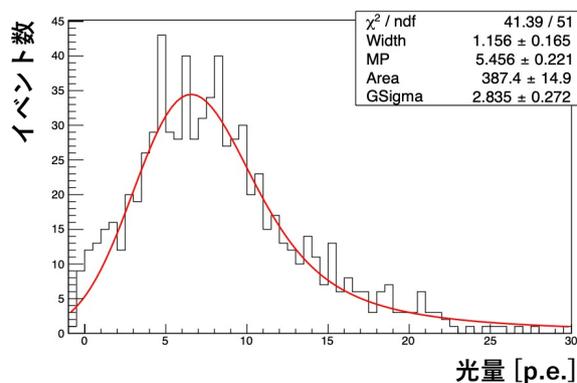


図 8.10: 光量分布へのフィッティング例

このように各セルのヒットについて X, Y 軸ファイバーの光量をそれぞれ求めて、その平均光量は 5.63 ± 0.45 [p.e./fiber] であった。ここに 8.2.3 節で求めた補正係数を用いると、最終的な検出光量は 27.2 ± 2.7 [p.e./fiber] となった。

1 mm サンプルにおける X,Y 軸ファイバーの光量

1 mm サンプルにおいて、X 軸および Y 軸方向に通したファイバーの検出光量を求めた。本解析では B 方式のデータから図 8.11 のように、後方に設置した 2 mm サンプルの対応する位置のセルでヒット（Z 軸で 2.5 光子以上の光量を検出）したイベントを選択して解析に用いた。ここで図に示すように 1 層目の他セルで散乱し後方のセルでヒット判定となるイベントが一定数混入するがこのような散乱イベントは光量が 0 となる。そのため光量分布には、0 光子とセルの平均光量の位置に合わせて 2 つのピークが現れる。

こうして得た測定光量分布を図 8.10 の (a) に、MC で測定データを再現した結果を (b) に示す。両者はピーク構造がよく一致し、ここで赤枠で囲った部分が散乱イベントに対応する。そこでラ

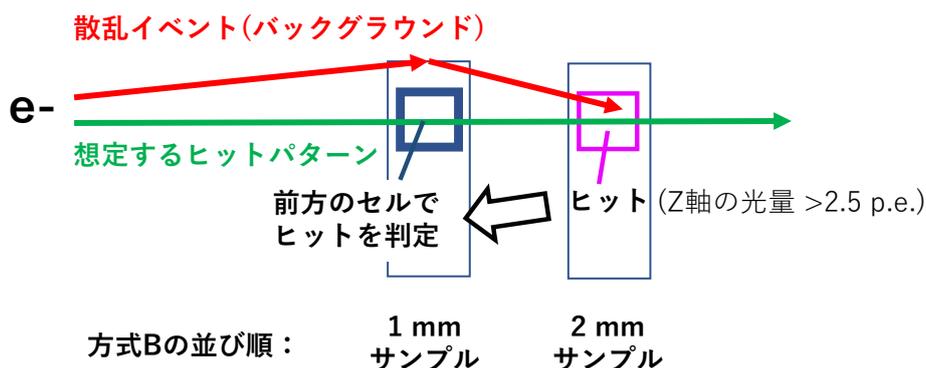
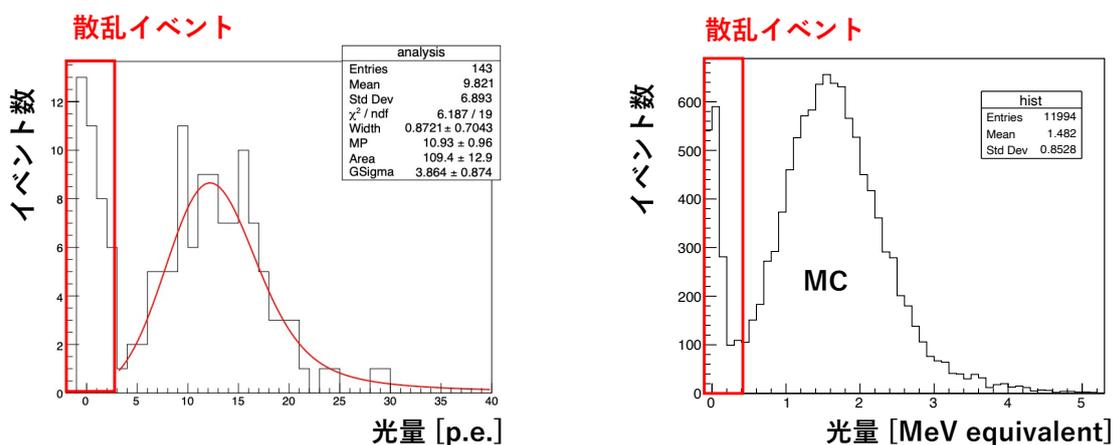


図 8.11: イベント選択の方法と散乱イベント

ランダウ分布をガウシアンで畳み込んだ関数（ランダウ・ガウス関数）を測定光量分布の第 2 ピークにフィッティングし、そのランダウ分布最頻値（MPV）を各ファイバーの検出光量と定義した。このように各セルのヒットについて X, Y 軸ファイバーの光量をそれぞれ求めて、その平均光量は



(a) 光量分布へのフィット例

(b) MC で計算した光量分布

図 8.12: 測定データと MC の比較

8.32 ± 0.64 [p.e./fiber] であった。ここに 8.2.3 節で求めた補正係数を用いると、最終的な検出光量は 21.7 ± 1.9 [p.e./fiber] となった。

8.4 結論

今回のビームテストでは 3M SR シートを壁面に用いて直径 1 mm と 2 mm のファイバーで読み出すサンプルを作製し、50 MeV、20 Hz の電子ビームを用いた性能評価を実施した。その結果から 2 mm サンプル Z 軸ファイバーのクロストーク率およびそれぞれのサンプルの光量を評価することができた。以下で飛跡検出器としての使用可能性、測定の課題、今後の開発方針を述べる。

飛跡検出器としての使用可能性

はじめに今回の測定光量から飛跡検出効率を見積もる。2 m ファイバーを伝搬する間の 0.43 倍の光量減衰を考慮するとサンプルの光量は 9.33 [p.e./fiber] (1 mm サンプル)、11.7 [p.e./fiber] (2 mm サンプル) となる。光量分布としてこの値を平均値とするポアソン分布を仮定、セルのヒット判定条件として 3 本全てのファイバーにおける 3 光子以上の検出を課すと、飛跡検出効率は 98.6% (1 mm サンプル)、99.8% (2 mm サンプル) となり目標以上の水準である。次にクロストーク率は Near と Far 条件の平均が 4.1% で、電子散乱の効果を差し引くと 3.4% となる。この値は解析方法やシミュレーション補正の不確かさを含んだ推定値だが、目標値の 3% に近い値である。このように WbLS 検出器試作機の読み出し光量およびクロストーク率は実用水準にあると期待できる。

測定課題

今回の解析は 2 mm サンプルの Z 軸ファイバーの光量によりヒットを判定して行っており、この方法ではビーム粒子が Z 軸で光子が検出されやすい位置を通過したイベントがヒットと判定されやすく、セル内を通過した全てのイベントが均等な確率で選別されないことで測定値のバイアスとなる。また今回用いた電子ビームのエネルギーはベンディングマグネットの電流値から推定していて、ビームのエネルギーは 20 MeV 程度の幅を持つが^[84] これを実測していないからビームのエネルギー分布に不定性がある。電子はエネルギーが低いほど散乱が起りやすくなるため MC の精度が低下して、クロストーク率の補正値が実際と異なる可能性がある。特に今回クロストーク率における散乱寄与の推定では 53.6 MeV の単一エネルギービームを仮定したが、実際にはより低エネルギーに広がった分布が予想されて、正確な補正後の平均クロストーク率はより低い値になる可能性がある。またデータ量が少ないことで測定における統計誤差が無視できない程度存在することも課題である。

光量やクロストーク率はセル内のビーム通過位置で変化して、この傾向を知ることが飛跡の正確な再構成に重要だが、今回のビームテストでは試作機内での電子散乱が高頻度で起り試作機の前で電子ビームの位置が変わるからビームの通過位置を特定できず、通過位置と光量およびクロストークの関係性を評価しなかった。

今後の開発方針

今回の測定から WbLS 検出器の光量およびクロストークが十分改善された可能性を示した。同時に検出器の実用を検証する上でさらなる性能評価が望ましいことを述べた。

十分高エネルギーな電子ビームを用いれば試作機中での散乱を抑制できて、さらにホドスコープのヒット情報を用いてセルのヒットを判断できるから、イベント選択のバイアスなく測定ができる。さらにビームの通過位置と光量およびクロストークの関係性を測定するには、ホドスコープの 1.7 mm×1.7 mm の 1 区画を通過するイベント数が必要だから、統計データ量が重要である。そのため次章では、エネルギー 4 GeV、照射レート 1.3 kHz の高エネルギー高統計電子ビームを用いたビームテストを行い、試作機の性能評価を行う。

第 9 章 KEK ビームラインにおける試作機の性能評価

2025 年 12 月 10 日から 13 日にかけて、高エネルギー加速器研究機構（KEK）において測定器開発テストビームライン^[87]を用いた WbLS 検出器小型試作機の性能評価テストを行った。

9.1 ビームテストの概要

化研で行ったビームテストの結果から WbLS 検出器の光量およびクロストーク率が実用水準に近いことを確認した。ただし用いたビームのエネルギーが低いことで散乱の影響が大きく、データ量が不十分で統計誤差が無視できなかった。そのため測定値には不確定性があり、セル内のビーム通過位置に依存した光量の変動を確認しなかった。そのため今回、エネルギー 4 GeV、入射周期 1.3 kHz の高エネルギー高強度電子ビームを用いた試作機の性能評価を行った。高エネルギーの電子ビームにより試作機内での散乱イベントを抑制、化研のビームテストから約 100 倍の大統計データを用いることで検出器の詳細な性能評価を実現した。

9.1.1 ビームテストの目標

今回のビームテストを行うにあたり次の目標を設定した。

1. 読み出し光量の測定
2. クロストーク率の測定
3. ビーム通過位置に依存した光量とクロストーク率の変動の確認

本測定の第一目標は試作機の読み出し光量の測定で、第二目標はクロストーク率の測定である。今回のビームテストのために反射シートの種類とファイバー直径を変更した試作機を 3 種類用意するが、反射シートの厚さや読み出しファイバーの直径が変化した際の読み出し光量やクロストーク率の違いをみる。第三目標は上記の測定値について、セル内のビームの通過位置へ依存した変動の効果を確認することである。ファイバー直径が異なることによる変動傾向の違いを確認する。

9.1.2 ビームライン

今回用いたテストビームラインの構造を図 9.1 に示す。ビームラインでは KEK の PF-AR リングを 796kHz で周回する 6 GeV 電子ビームの軌道周辺にワイヤー標的を入れて、電磁相互作用でガンマ線を生成、銅製コンバータに入射させて電子・陽電子対を生成する。四極電磁石で収束、偏

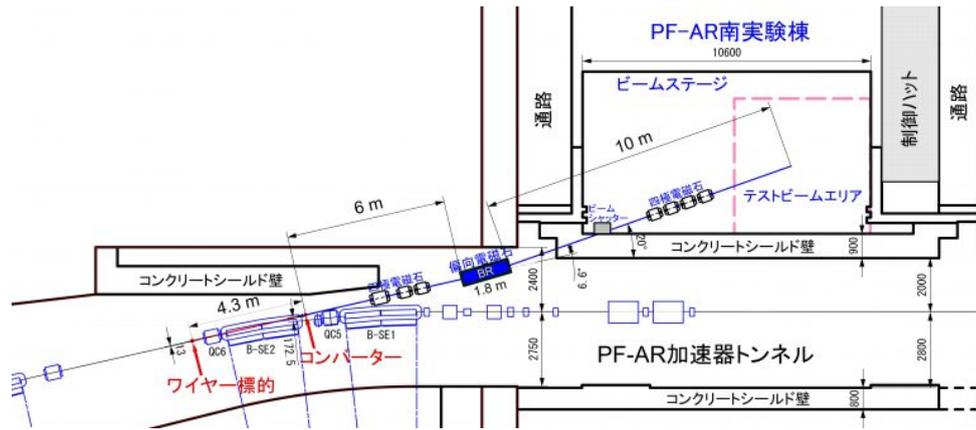


図 9.1: テストビームラインの構造 [88]

向電磁石で特定の運動量を持つ電子を取り出して測定に用いる。今回用いたビームのエネルギーは約 4 GeV でビーム幅は水平方向に約 10 mm 鉛直方向に約 13 mm、照射レートは 1.3 kHz 程度であった。

9.2 測定方法

測定セットアップ、イベント選択、測定データの較正は以下のように行った。

9.2.1 セットアップ

ビームテストにおける測定のセットアップを図 9.2 に示す。ビームの上流から、上流ホドスコープ、試作機、下流ホドスコープ、トリガー用シンチレータを順番に並べており、ホドスコープを用いて試作機の前後で粒子の通過位置を測定することで、試作機内においてビームが通過した位置を特定することが出来る。また最下流にプラスチックシンチレータを設置して電子ビームの通過を判定して通過トリガーを発行している。これらの検出器の光信号は全て MPPC を用いて読み出した。

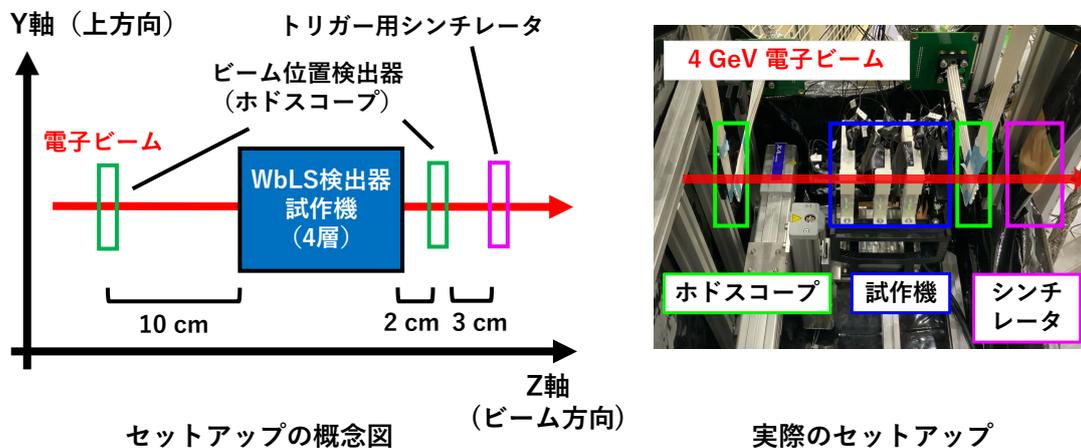


図 9.2: 検出器のセットアップ

WbLS 検出器試作機

今回のビームテストでは WbLS 検出器試作機として、図 9.3 のように壁面に 3M SR 反射シートを貼り付けて直径 1 mm のファイバーで読み出すサンプル (3M-1 mm)、壁面に 3M SR 反射シートを貼り付けて直径 2 mm のファイバーで読み出すサンプル (3M-2 mm)、壁面にルミラーシート (E6SR#188) を貼り付けて直径 2 mm のファイバーで読み出すサンプル (ルミラー 2 mm) の 3 種類を作製した。また試作機の 4 層目には SuperFGD のシンチレータキューブを用いたサンプルを設置して、データが正常に取得できていることを確認すると同時に、SuperFGD 検出器と光量およびクロストークを同じ条件で比較できるようにした。

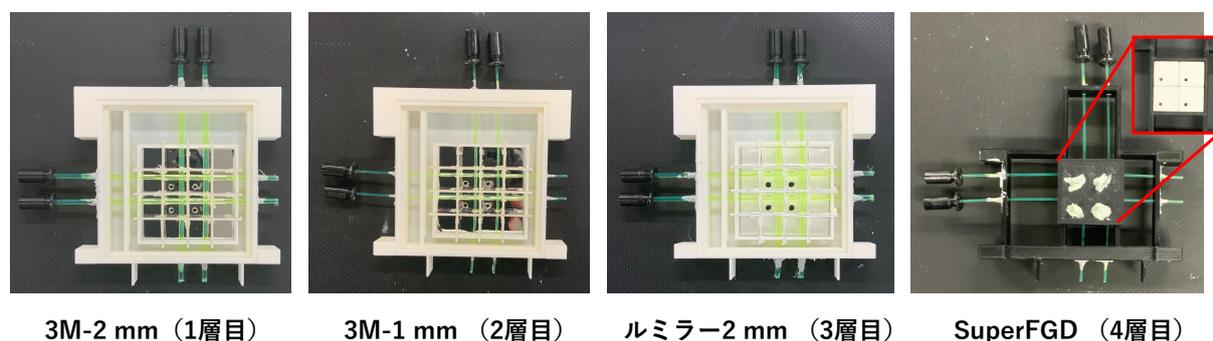


図 9.3: 各層の試作機

試作機、3M-2 mm と 3M-1 mm サンプルのデザインは化研のビームテストで用いたものと同様である。ルミラー 2 mm サンプルはセルを仕切る壁面は 0.5 mm の PLA 層に厚さ 0.2 mm のルミラーシートを接着剤 (セメダイン、CA-175) で各面へ貼り付けて作製し、全体で約 1.0 mm の厚さを持つ。全てのサンプルで測定は中心に位置する $2 \times 2 = 4$ つのセルを用いて行い、これらのセルはファイバーを 3 本通してからビーム方向 (Z 方向) に垂直な X 軸 (横方向) と Y 軸 (縦方向) の 2 本のファイバーで読み出しを行い、3M-2 mm サンプルのみ Z 軸のファイバーからも読み出しを行った。このサンプルでは Z 軸に通した 2 mm のファイバーが光を吸収することで、X、Y 軸ファイバーの光子読み出しについて、セル内に影が生じる効果が観測できることを期待している。全ての読み出しファイバーについて、読み出しを行わない端面はダイヤモンドカッターで研磨した状態に揃えた。また WbLS は化研のビームテストと同じ組成のものを測定セルの下側から満たされるように注入した。これら 3 つのサンプルは上流から 3M-2 mm、3M-1 mm、ルミラー 2 mm サンプルの順に並べた。

データ取得

試作機およびトリガー用シンチレータの信号は MPPC (S13360-1350CS-01) を用いて、ホドスコープからの信号は MPPC アレイ (S13361-3050AE-04) を 4 つ用いて読み出した。それぞれの読み出し信号は、図 9.4 に示すように EASIROC モジュールを用いて行った。試作機の 20ch およびトリガー用シンチレータの 1ch、ホドスコープの 64ch をそれぞれ読み出すために 2 台の EASIROC を用いた。最下流に設置したシンチレータから 5.5 p.e. 以上の信号を検知した場合に EASIROC 2

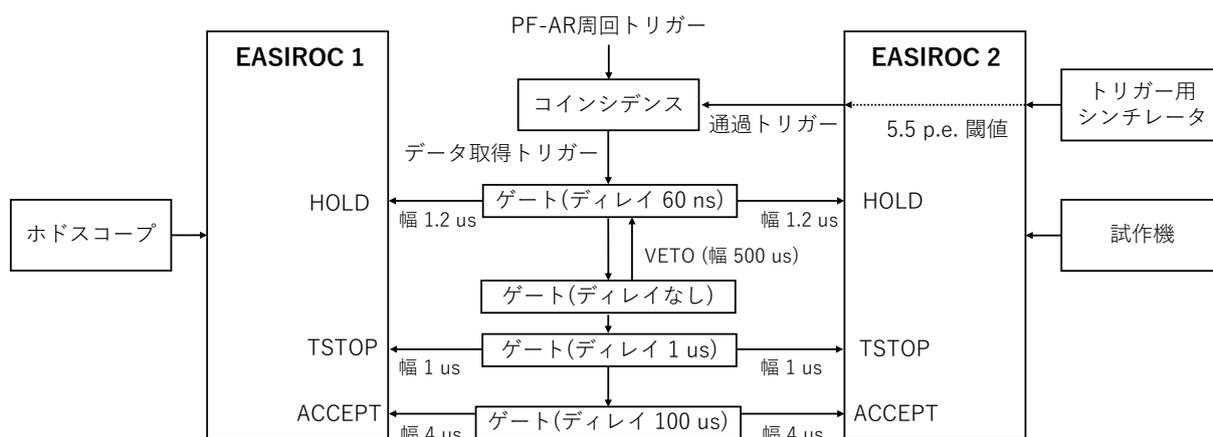


図 9.4: データ取得回路

から通過トリガーを発行して、これと PF-AR の周回トリガーのコインシデンスを取ってデータ取得のトリガーとした。このトリガーを 60 ns 遅らせたものを HOLD 信号として 2 台の EASIROC に入力して、このタイミングでの MPPC からの信号波高を ADC 値として記録した。ADC 値はハイゲイン (HG) およびローゲイン (LG) の両方の形式で記録した。HG および LG の詳細は後述する。

また 2 台の EASIROC が正確に同期してデータを取得できるように、TSTOP および ACCEPT 信号の前段階には VETO 信号を設置してデータの取得レートを 2 kHz 以下に制限している^{*82}。

9.2.2 イベント選択

取得したイベントはホドスコープのヒット情報にのみ基づき選別した。以下で選別条件を述べる。

ホドスコープのヒット情報についてそれぞれヒット数とヒット位置を調べた。はじめにホドスコープの 1 区画 (1.7 mm × 1.7 mm の領域) において、縦と横のホドスコープが共に 3.5 p.e. 以上の信号を検出した場合にその区画をヒット区画と定義した。上流および下流のホドスコープ組について、全ての区画でヒットの有無を調べてヒット区画の総数をヒット数として、特にヒット数が 1 の場合は唯一のヒット区画の位置をヒット位置とした。このヒット数とヒット位置について、

1. 上流ホドスコープのヒット数が 1
2. 下流ホドスコープのヒット数が 1
3. 上流と下流ホドスコープのヒット位置が一致

の 3 条件を満たしたイベントを有効イベントと定義して解析に用いた。ここで 1 の条件はマルチイベントを除外するために設定した^{*83}。2 の条件は電子ビームが試作機内部で他の電子を弾いて後方に 2 つ電子が生じる散乱イベントを除外するために設定した。3 の条件は電子ビームが試作機内部で散乱して軌跡が折れ曲がるイベントを除外するために設定した。

^{*82} そのため、実際のデータ取得レートは 0.7 kHz ($\sim 1.3 \text{ kHz} \times e^{-1.3/2}$) 程度となる。

^{*83} マルチイベントの割合は 0.16% ($\sim 1 - e^{-1.3 \text{ kHz} / 796 \text{ kHz}}$) 程度と少ないものの一定数存在する。

9.2.3 MPPC の較正と光量の補正

試作機について、WbLS 検出器試作機サンプルは HG、SuperFGD サンプルは LG を用いてデータを処理した。図 9.5 に示すように、HG は高い ADC 分解能で Input charge (\leftrightarrow 検出光子数) を記録するが 35 p.e. 程度で ADC 値が飽和する、一方 LG は ADC 分解能は低いものの ADC 値が飽和しにくく高光量の測定に有利である。^[89] ここで HG と LG は異なる方法で較正している。また

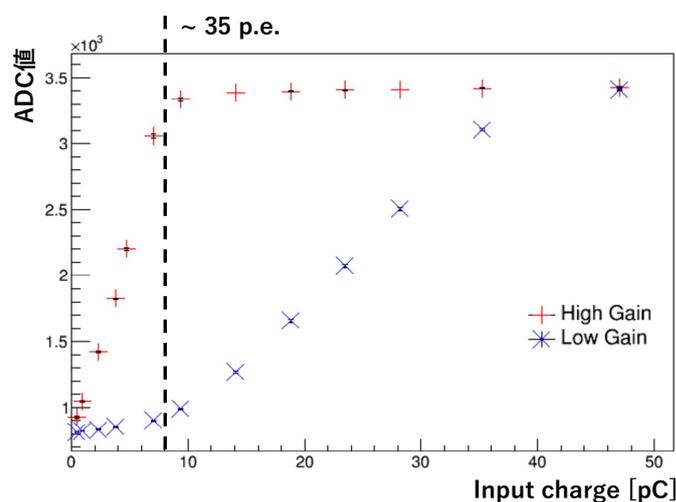


図 9.5: HG および LG における Input charge と ADC 値 ^[89]

較正で求めた光量に補正を行っており詳細を以下で述べる。

HG の較正法

較正は測定データの有効イベントを用いて行った。較正は化研のビームテストと同様の方法で、MPPC の 1 光子信号と 2 光子信号に対応する ADC 値を得てから、信号値 p.e. と ADC 値の対応を 1 次関数でモデル化してその切片とゲインを求めた。これを各チャンネルで行い、それぞれの光量変換時に適用した。

LG の較正法

LG のゲインは、図 9.5 に示すように 35 p.e. までほとんど一定であり、この領域では HG の ADC 値を参照しながら LG ADC 値と信号値 p.e. の関係を 1 次関数でモデル化した。ここから信号値 p.e. と Input charge pC の関係を求めて、35 p.e. 以降の領域は図のデータを参考にして外挿した。この較正を各チャンネルで行った。

光量の補正

光量に対して 6 章で求めた増加係数と飽和効果の補正を加える。また 8 章で求めた補正係数 C_{Test} を用いて、ファイバー端面での光反射および MPPC の PDE 向上を含めた理想状態の光量（補正光量）を算出する。

9.3 測定結果と解析

本ビームテストでは、ホドスコープのヒット情報のみをイベント選択に用いることで、選択バイアスなく試作機の性能評価を行うことができた。

9.3.1 試作機の光量

解析方法

各セルの大きさは $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ であり、図 9.6 のようにホドスコープの 1 区画 $1.7\text{ mm} \times 1.7\text{ mm}$ が 16 区画 ($10.2\text{ mm} \times 10.2\text{ mm}$) 収まる程度である。ここでさらに中心の 2×2 の区画をビームが通過したイベントを選択しその光量分布を X 軸、Y 軸 (Z 軸) のファイバー毎に求める。ここにランダウ・ガウス関数をフィットして、ランダウ分布の MPV を光量と定義する^{*84}。

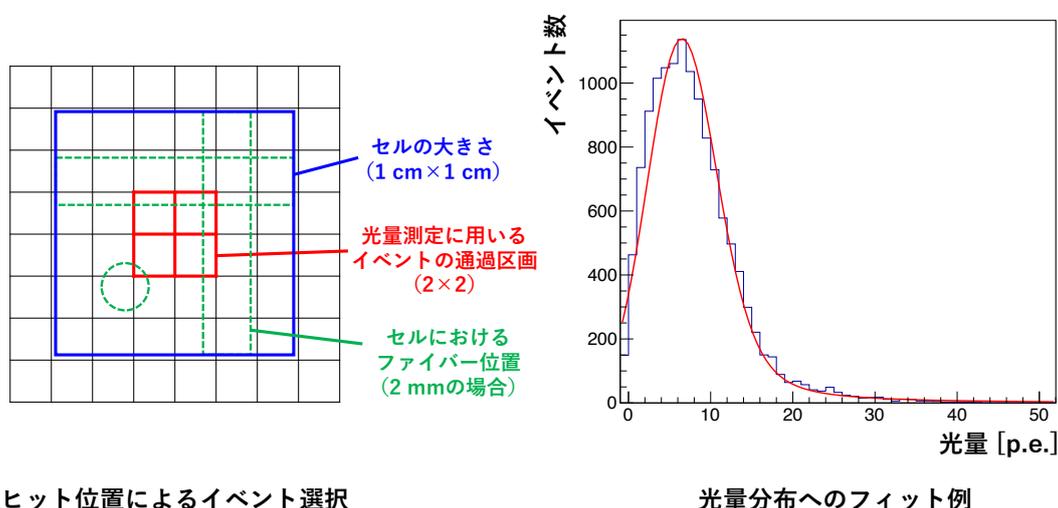


図 9.6: イベント選択と光量分布のフィッティング

測定結果

X 軸、Y 軸、Z 軸のファイバーについて、WbLS 検出器試作機の 4 つのセルそれぞれの検出光量を図 9.7、9.8、9.9 に示す^{*85}。

ここで示した各ファイバー方向、各サンプルについて平均光量を表 9.1 にまとめた。ただし補正係数を用いた光量を期待光量として括弧内に示している。また比較のために SuperFGD サンプルの光量を合わせて載せている^{*86}。各サンプルについて全読み出し軸の補正光量の平均を取ると、 29.7 ± 2.9 [p.e./fiber] (3M-2 mm サンプル)、 26.7 ± 1.0 [p.e./fiber] (3M-1 mm サンプル)、 35.3 ± 1.9 [p.e./fiber] (ルミラー 2 mm サンプル) となった。2 mm サンプルについて水割合の補填に伴う 0.83 倍の光量減を考慮しても 29.3 [p.e./fiber] でルミラー 2 mm サンプルが最大となった。

^{*84} 2022 年に行われた WbLS 検出器試作機のビームテストと同じ光量の定義である。

^{*85} フィッティングの不定性を統計誤差として共に示している。

^{*86} 実際の SuperFGD 検出器で用いられている MPPC の PDE に合わせるため、光量に 0.82 倍の補正を加えている。

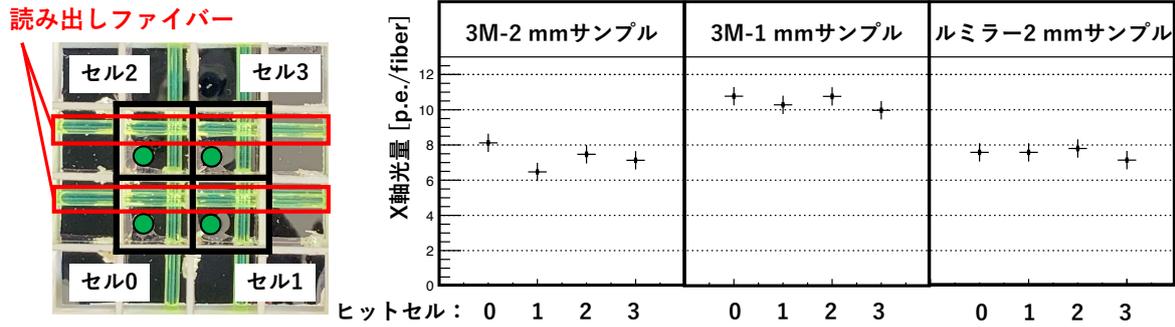


図 9.7: 各サンプルにおける X 軸の光量

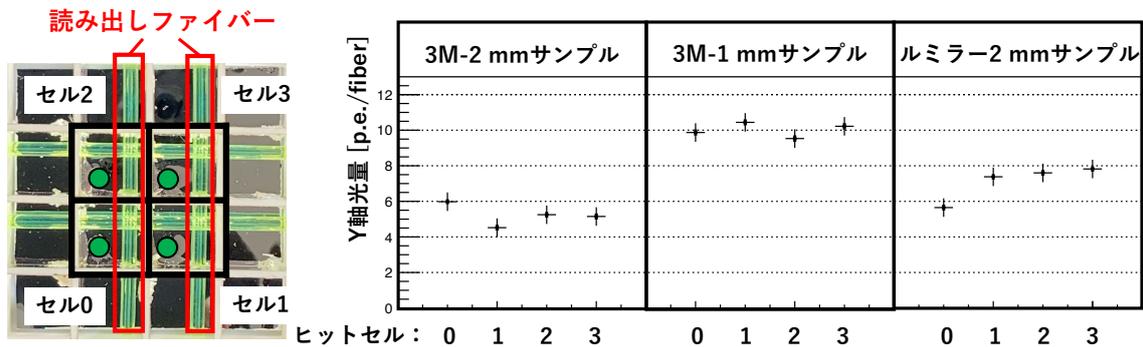


図 9.8: 各サンプルにおける Y 軸の光量

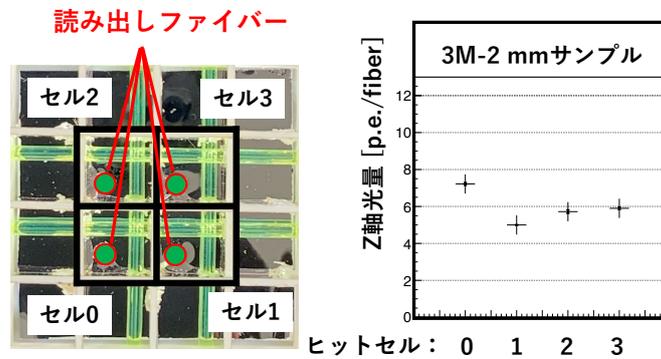


図 9.9: 3M-2 mm サンプルにおける Z 軸の光量

表 9.1: 各サンプルにおける X 軸、Y 軸、Z 軸ファイバーの光量 (補正值)

	3M-2 mm	3M-1 mm	ルミラー 2 mm	SuperFGD
X 軸光量 [p.e.]	7.30 ± 0.34 (35.2 ± 2.7)	10.44 ± 0.19 (27.3 ± 1.4)	7.52 ± 0.14 (36.3 ± 2.3)	32.3 ± 4.0
Y 軸光量 [p.e.]	5.34 ± 0.22 (25.2 ± 2.1)	10.02 ± 0.20 (26.1 ± 1.4)	7.11 ± 0.50 (34.3 ± 3.2)	31.6 ± 5.2
Z 軸光量 [p.e.]	5.96 ± 0.46 (28.7 ± 2.8)	-	-	-
平均光量 [p.e.]	6.16 ± 0.61 (29.7 ± 2.9)	10.2 ± 0.2 (26.7 ± 1.0)	7.32 ± 0.26 (35.3 ± 1.9)	31.9 ± 3.5

これは今回測定した SuperFGD 検出器の光量と同等の水準であった。

ここで得た光量は、3M-2 mm サンプルの予想値^{*87} 30.2 [p.e./fiber] および 3M-1 mm サンプルの予想値 24.3 [p.e./fiber] と誤差の範囲で一致した^{*88}。また化研のビームテストで得た測定値とも一貫する結果であった^{*89}。また SuperFGD サンプルの光量についても過去の測定^[48] と一貫する結果であった。そのため光量は正しく測定されたと判断する。

セルの中心付近を通過するビーム飛跡に対して、X 軸ファイバーと Y 軸ファイバーの位置関係は対称的だから両者の光量は誤差の範囲で一致すると期待している。3M-1 mm サンプルおよびルミラー 2 mm サンプルで両者はよく一致したが、3M-2 mm サンプルでは Y 軸ファイバーの光量が低くなる傾向があった。これは全てのセルで 2 p.e. 程度の光量低下で共通だから、検出器全体の位置が 0.1–0.2 mm 程度想定 X 軸方向で移動した可能性がある^{*90}。

9.3.2 セル中の粒子通過位置と光量の関係

セルの中心を通過する荷電粒子と壁面近くを通過する粒子では読み出し光量が異なる可能性がある。またセル中でファイバー付近を通過した荷電粒子について読み出し光量が高くなる可能性がある。本節ではホドスコープのヒット位置からセル中での荷電粒子の通過位置を特定することによって、位置に依存した読み出し光量の傾向を見る。本節では読み出し光子数の平均値を光量と定義する。

シミュレーションによる見積もり

はじめに Geant4 を用いて WbLS 検出器セルにおける粒子通過位置と光量の関係をシミュレーションした。読み出しファイバーが 1 mm と 2 mm の場合で計算して、X 軸ファイバーおよび Z 軸ファイバーについてセル全体の平均光量に対する局所的な光量の比を図 9.10 に示す。ここで WbLS 以外の構造は光子を出さないものとして、WbLS セルの壁面反射率は 0.99 を仮定している。

シミュレーションの結果から、荷電粒子がファイバー付近を通過した際にそのファイバーの読み出し光量が増加することが分かる。また荷電粒子がファイバー自体を通過する際は、その分 WbLS の発光量が小さくなることで光量が低下することが分かる。また読み出しファイバーとの間に Z 軸ファイバーが存在する場合、ファイバーが光子の影となって相対光量が低くなる。このようなセル内での非一様な光量の傾向はファイバーがセル内に存在することで生じており、直径 2 mm のファイバーを読み出しに用いる場合に強くなることが分かる。次に測定結果を見る。

測定結果

それぞれの WbLS 検出器試作機サンプルについて、セル 0 での粒子通過位置と光量の関係を図 9.11 に示す。シミュレーションの場合と異なり、複数のサンプルについてセルの上部に光量が低い領域が存在するがこれは WbLS を注入する際にセルに残った気泡の効果と考えられる。WbLS

^{*87} 光量の定義が同じになるように、前回のビームテストおよび開発での光量増加率を用いた予想値と比較した。

^{*88} 予想値の誤差も考慮している。

^{*89} イベント選択の方法および光量への補正を統一して解析してから比較した

^{*90} 検出器が想定より右に移動していれば光量の位置依存性により、光量低下が全セルで共通して起こりうる。

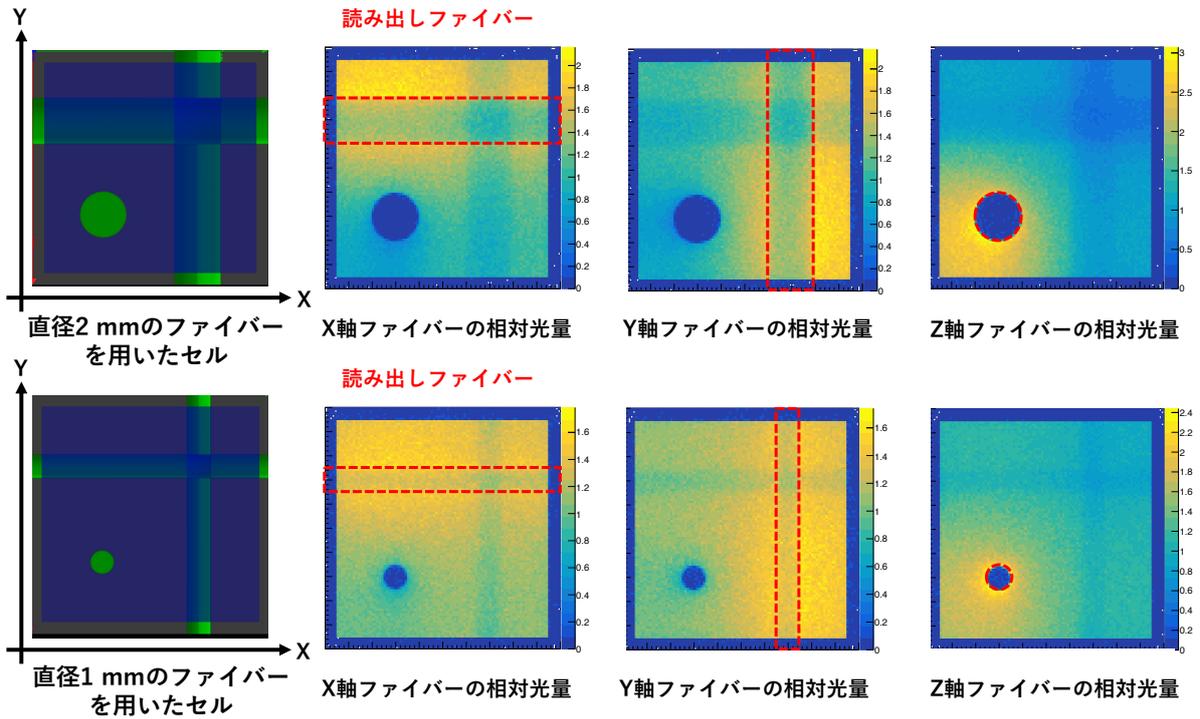


図 9.10: 粒子の入射位置に応じたセルの相対光量

値は光量 [p.e. /fiber]を表す

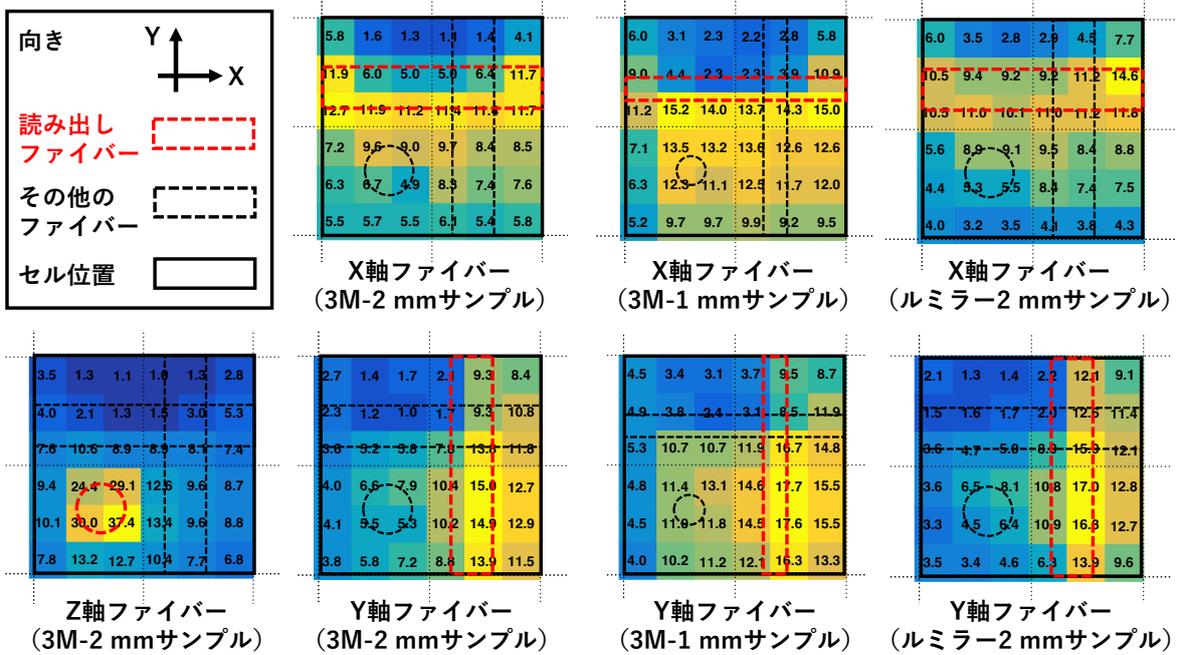


図 9.11: 各サンプルのセル0における粒子通過位置ごとの光量

の成分分離でも同様にセルの上下 (Y 軸) で光量の変化が生じるが、この低光量領域は上部の特に中央付近に分布することから気泡と判断した。そこで気泡のない X 軸ファイバーの高さより下側の領域に注目すると、全ての軸について荷電粒子の通過位置がファイバーに近いほど光量が増加する傾向が見える。また 3M 反射シートを用いた 2 サンプルを比較すると、ファイバー直径が 1 mm のサンプルは 2 mm のサンプルよりも光量の一様性が良いことが分かる。これはシミュレーションでも同様の傾向が見られる。

3M-2mm とルミラー 2mm サンプルの Y 軸ファイバーについて、読み出しファイバーに重なる領域に注目する^{*91}。シミュレーションではファイバー上でやや光量が低下するが、測定データではその傾向が見られずむしろ周辺より若干光量が大きく比較して 4–6 光子程度の過剰がある。この要因としてビームがファイバー中を通過した際にファイバー自体が発光して光量が増加した可能性があり^{*92}、この効果は後の 9.3.5 節で検証する。

ここで見たように、読み出し光量はセル内のビーム通過位置に依存して変化するがその変動は無視できないほど大きく、セルの飛跡検出効率を見積もる際にはこの変動を考慮する必要がある。また測定データとシミュレーションで得られた変動の傾向について、ほとんど整合しているがファイバー上を通過するビームについては測定値の光量が若干多いことに注意が必要である。

9.3.3 試作機のクロストーク率

次に各サンプルの各軸方向のファイバーについて、クロストーク先のファイバーが壁面に近い Near 条件と、遠い Far 条件のそれぞれでクロストーク率を見る。Far 条件はクロストークする光子がファイバーで遮られるから、Near 条件に比べてクロストーク率が低くなると考えられる。

解析方法

解析にはセルの中央に位置するホドスコープの $2 \times 2 = 4$ 区画 (3.4 mm \times 3.4 mm) を通過したイベントのうち、通過セルの光量が 0.5 p.e. 以上のものを用いる。選択されたそれぞれのイベントで隣のセルの光量を通過セルの光量で割ることでクロストーク率を計算して、その平均値を求める。ただし 0.5 p.e. 以下の信号はすべて 0 p.e. として扱い^{*93}、それ以上の信号値はそのまま用いる。

測定結果

各試作機サンプルにおける X 軸、Y 軸、Z 軸のファイバーのクロストーク率を Near 条件および Far 条件で求めた結果を図 9.12 に示す。全条件の平均は、3M-2 mm サンプルで $2.92 \pm 0.35\%$ 、ルミラー 2 mm で $2.85 \pm 0.43\%$ となり目標値 3% を上回る性能であった。ただし全サンプル中では SuperFGD の測定値 $2.30 \pm 0.19\%$ が最小であった。一方で 3M-1 mm サンプルはクロストーク率

^{*91} ここで述べる現象は X 軸でも同様に発生するはずだが、気泡の効果と縮退して不鮮明であるため Y 軸に注目する。また今回ファイバー直径がホドスコープの分解能より大きい 2 mm の場合を見た。

^{*92} この効果はシミュレーションには入っていない

^{*93} 隣のセルで 0 光子の場合半数のイベントでクロストーク率が負になるから 0 に丸める。0 光子位置の見積もりが僅かに異なる場合に生じるクロストーク率の変動を防いでいる。測定のバイアスにはならない。

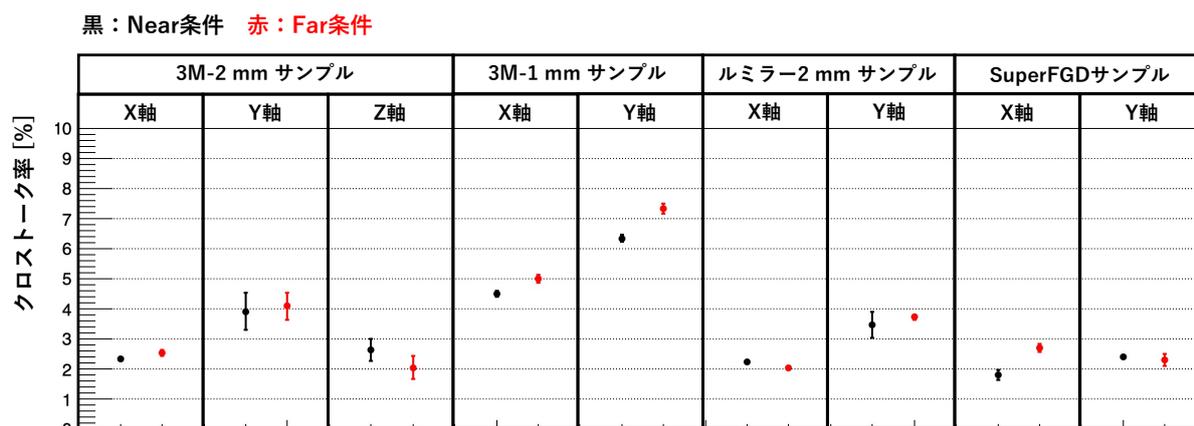


図 9.12: 各サンプルにおける各軸ファイバーのクロストーク率

が $5.80 \pm 0.65\%$ と比較的高くなり、これは 2022 年のビームテストにおける試作機の評価値である $5.1\text{--}10\%$ ^[56] と同等の水準であった。ここで測定値に不定性が大きいことから改善の有無を明確には結論づけられない。この 3M-1 mm サンプルは期待光量 27 [p.e./fiber] クロストーク率 5.6% であるから、平均 $27 \times 0.056 = 1.5$ [p.e.] のポアソン分布を仮定すれば、クロストーク先ファイバーのヒット確率は 3 光子閾値で 19% となる。これが X,Z(Y,Z) 軸ファイバーで同時に起これば Hit が検出されるが^{*94}、その確率は 3.6% で 1% 以上あるから無視できず^{*95}クロストーク率の改善が必要と言える。一方 3M-2 mm はこの確率は 0.3% で許容できると結論づける。またルミラー 2 mm も同じく許容可能である。

同じ 3M 反射シートを壁面に用いる 3M-2mm、3M-1mm のサンプルを比べると、読み出しに 2 mm のファイバーを用いる場合でクロストーク率が 1.99 ± 0.33 倍向上しているが、これは 6.4 節で述べたようにセル中で光子がファイバーを通過する確率が約 2 倍向上して壁面での反射回数が減少するからで、この解釈とクロストーク率の向上率は整合している。

Near 条件と Far 条件についてクロストーク率に明確な違いは見られなかった。ここでクロストーク率は 2 本のファイバーで検出した光量を比較して求めるが、それぞれのファイバーと MPPC の接続における光子伝搬効率には 5-7% 程度の不定性があるから、この不確かさによって予想した傾向が見えなかった可能性がある。またクロストークが主にファイバーの通し穴や壁面内を伝搬する光子で生じている場合、ファイバーの遮蔽によるクロストークの減少効果が弱まると考えられて、Near 条件と Far 条件でクロストーク率は同じ程度となりうる。

9.3.4 セル中の粒子通過位置とクロストーク率の関係

前節では荷電粒子がセルの中央付近を通過する場合についてクロストーク率を評価、比較した。ここで荷電粒子がセルの異なる場所を通過する場合にはクロストーク率が低く、または高くなって問題となる可能性がある。そこで本節では 9.3.2 節と同様に、ホドスコープのヒットからセル中の荷電粒子の通過位置を特定し、粒子の通過位置ごとにクロストーク率を見る。ここでセル間の光量比を見るから気泡による光量減少の効果は無視できる。

*94 クロストーク壁を貫く Y(X) ファイバーは既に 3 光子を検出したものとする。

*95 基準値の 1% については検討の余地がある。

測定結果

各サンプルにおいてセル 0 を荷電粒子が通過してセル 1 へクロストークする場合を調べた。その結果を図 9.13 に示す。ここでセルにおけるファイバーの位置とセルの境界を同時に示している。また WbLS が充填された空間は黒線の境界より小さく 1 辺が 9 mm の立方体であることに注意する必要がある。

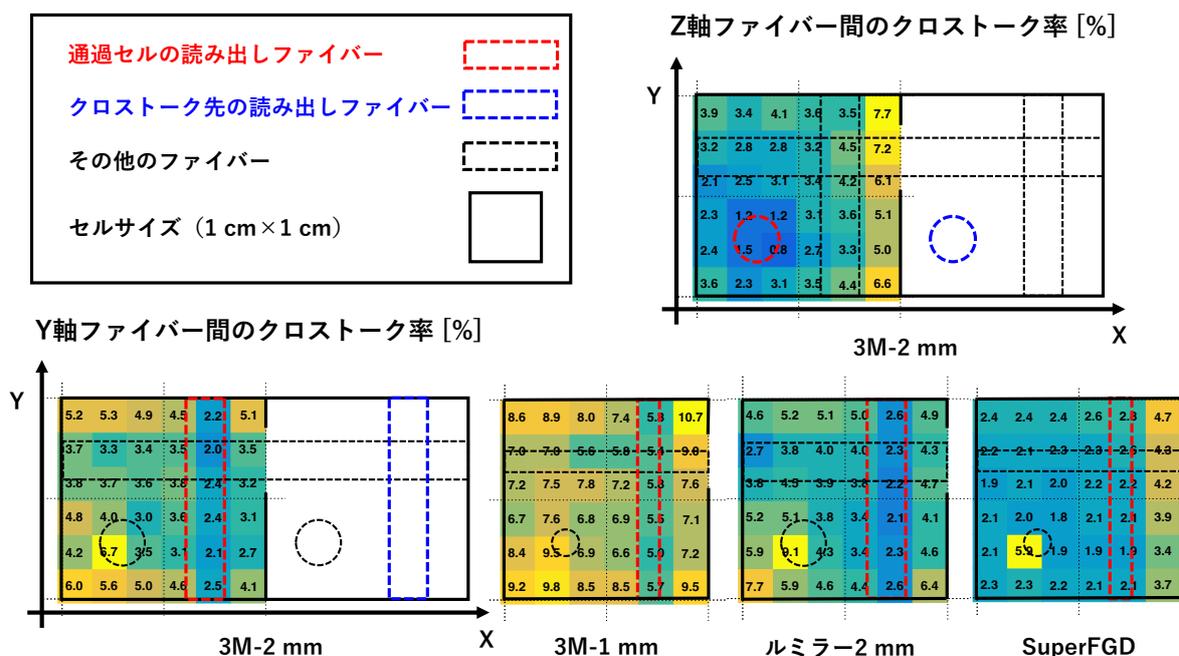


図 9.13: 各サンプルにおける粒子通過位置とクロストーク率

結果を見るとクロストーク率は位置によって 2 倍程度の変動があることが分かる。特にクロストークが起こる壁面 (クロストーク壁面) 付近を粒子が通過した場合にクロストーク率が高くなる現象が見られた。ただしこの状況ではクロストークにより隣のセルがヒットしても、そのセルは真の飛跡と近いから飛跡再構成の観点で大きな問題はない。この現象の要因として、クロストーク壁面に入射する光子の絶対数が多いことに加えてビームが壁面内を通過するイベントでクロストーク率が大きくなることが考えられる。特に Z 軸ファイバー間のクロストークについては、Y 軸ファイバーが Z 軸ファイバーへ光子が到達する光子を遮って Z 軸ファイバーの検出光量が低下することでクロストーク率の分母が小さくなってクロストーク率が大きくなると考えられる。

ルミラー 2 mm のサンプルの Y 軸ファイバーのクロストーク率について Z 軸ファイバーの付近で 9% を超える区画があり考慮が必要だが、SuperFGD サンプルでも同様の傾向が見られるから大きな問題にならないと思われる^{*96}。これは通過セルにおいて Z 軸ファイバーが光子の影になって Y 軸読み出し光量が少なくなることで、クロストーク率の分母が小さくなることが要因である^{*97}。

全体の傾向として、荷電粒子が通過セルの読み出しファイバー付近を通る場合にクロストーク率が低くなっている。これは通過セルのファイバーの検出光量が増加することで、クロストーク

^{*96} 現時点で SuperFGD の解析において大きな問題として指摘されておらず、炭素反応のバックグラウンドを差し引く際に共通の特徴は不定性とならないことを期待している

^{*97} この検出光量の低下の効果はシミュレーションで確認した通りであり、測定データでもややその傾向がある。

率の分母が増加するためだと考えられる。

各サンプルのクロストーク壁面に沿う最右列の位置に注目する。X軸ファイバーの通し穴付近でクロストーク率がわずかに高いが、これは通し穴を直接通過する光子による影響と思われる。ただしこの傾向は軽微でありクロストークの主要因にはならないと考えられる。また隅の位置でクロストーク率が高くなる傾向が見られるが、ここで WbLS 検出器試作機は板状部品を組み合わせるため、この組み合わせ時の隙間がクロストークに影響した可能性がある。

9.3.5 ファイバー中を通過する荷電粒子の発光

9.3.2節で見たように、波長変換ファイバーを荷電粒子が通過した際にファイバー自体が発光して光量が向上する可能性がある。そのため、ビームテストのデータを用いてこの発光量を評価する。

測定には SuperFGD サンプルを利用する。SuperFGD サンプルは図 9.14 のようにファイバーのみ存在する区画 A と何もない区画 B があって、光量分布は図 9.15 に示すように、A 区画（赤）のみファイバーの発光に由来する分布が見られる^{*98}。両者の差を取った分布（黒）にランダウ・ガウス関数をフィットしてその MPV をファイバーの光量とした^{*99}。ここで光量分布はランダウ・ガウス分布でよく再現できたから、これはシンチレーション光と考えられる。

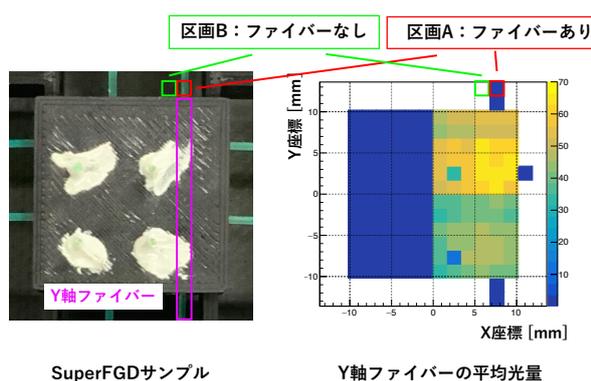


図 9.14: ファイバーの発光量評価の概念

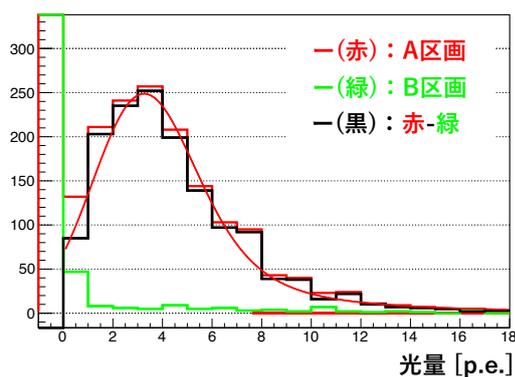


図 9.15: ファイバーの発光量に対するフィット例

2箇所で評価した光量の平均は 2.4 ± 0.2 [p.e.] (補正光量 6.3 p.e.) であり一定の影響がある。特にファイバー直径が 2 mm の場合は光量も 2 倍になると考えて、補正前で 4.8 [p.e.] 程度の寄与を期待できるが、これは 2 mm のファイバーを通過するイベントで 4–6 [p.e.] 程度の過剰な光量があることと整合している。

9.4 結論

本章では、反射シートの種類と読み出しファイバーの直径を変更した 3 種類の WbLS 検出器試作機を作製、KEK のテストビームラインにおいて 4 GeV、1.3 kHz 電子ビームを用いた性能評価試験を行った。今回高エネルギー電子ビームを用いることで散乱効果を抑制、前後に設置したホ

^{*98} ファイバーの直径はホドスコープのサイズ以下だから、ファイバーを通過しないイベントが一定数含まれて 0 p.e. 付近のピークに対応する。

^{*99} ここで発光量は小さいから HG を用いて光量を計算した。

ドスコープのヒット情報から電子ビームの通過位置を特定、十分なデータ量により統計誤差をほとんど無視して試作機の詳細な性能評価を実現した。読み出し光量について2022年のビームテストから9.1 - 6.8倍の大幅な改善を実証、また直径2 mmのファイバーを読み出しに用いる場合にクロストーク率が目標値3%を下回ることを示した。以下で検出器としての使用可能性と今後の開発方針を述べる。

検出器としての使用可能性

はじめに検出器の飛跡検出効率を検討する。試作機の補正光量は29.7 [p.e./fiber] (3M-2 mm)、26.7 [p.e./fiber] (3M-1 mm)、35.3 [p.e./fiber] (ルミラー2 mm) となり、いずれも目標値の20 [p.e./fiber] を超えており十分な飛跡検出効率を期待できる。ただしセル内でのビームの通過位置に依存した光量の変動が無視できない程度存在して、特に2 mmのファイバーを用いたサンプルで光量の非一様性が大きかったから、飛跡検出効率を正しく評価、比較するには粒子の通過位置による光量の変化を反映した新手法での飛跡検出効率推定が必要である。

次にクロストーク率について、直径2 mmのファイバーを用いたサンプルは2.9% (3M-2 mm) 2.9% (ルミラー2 mm) となり目標値以下となり、2.5光子閾値の条件における隣接セルの誤ヒット確率を見積もった結果、1%未満であり飛跡検出器として実用可能な水準である。一方3m-1 mmサンプルは5.8%となり改善が必要である。ここでSuperFGDサンプルのクロストーク率は2.3%であり、系統誤差の観点から^{*100}WbLS検出器も同等の水準を目指すことが望ましい。またビームの通過位置に依存したクロストーク率の変動は2倍程度で、局所的に高いクロストーク率を示す領域があったが、SuperFGDサンプルでも同様の傾向が見られるから問題ないと結論づける。

今回のテストではビームの通過位置に依存した光量を調べた際にセル内で気泡の痕跡が見られたが、その領域は極端に光量が低くなり飛跡検出ができないデッドスペースとなる。さらに、気泡が残ることで検出器の反応標的質量が変わりニュートリノ反応断面積の測定にバイアスが生じるから対策が必要である。

今後の開発方針

今回のビームテストからWbLS検出器試作機が目標値以上の光量を持ちクロストークを十分抑制可能であることを示した。ただし飛跡検出効率について、ビームの通過位置に応じた光量変動を考慮した推定が必要であり、これを次章で行う。この光量変動の傾向は測定とシミュレーションで整合しているから、本研究ではシミュレーションの情報を用いて推定を行う。クロストークについて3M-1 mmのファイバーを用いた場合は依然高かったが、7章で見たように既にセルの壁面反射率は100%に近くほとんど最適化されているから、さらなるクロストークの抑制には壁面内部での光吸収が必要と考えられる。現在は白色のプラスチックでサポート構造を形成しているが、これを黒色に変更することで光吸収率の向上すなわちクロストークの抑制ができると期待している。

セル内に残留した気泡は対策が必要だがWbLSの注入方法で改善できる可能性があり、この方法を11章で検討する。

^{*100} 3で見たように検出効率が同じである方が良く、クロストーク率は粒子の検出効率に影響しうる。

第 10 章 粒子検出能力の評価

本章では KEK で行ったビームテストで測定した光量値に基づき、検出器の粒子検出能力を飛跡検出効率、エネルギー損失による粒子識別性能の 2 つの観点で評価する。

10.1 セルの飛跡検出効率の評価

KEK のビームテストから、光量は粒子の通過位置に応じて変動して、飛跡検出効率の推定にはこの効果の考慮が必要であることを見た。この光量の変動による非一様性は直径 2 mm のファイバーを用いた場合に強くなることを、測定およびシミュレーションから確認した。ここで飛跡検出効率は光量が大きく一様であるほど高くなると考えられるが、現状 2 mm ファイバー読み出しは光量で優れて、1 mm ファイバーは一様性で優れるから、どちらが高効率か結論できない。そこで本節ではシミュレーションを用いて光量の変動効果を考慮した方法で飛跡検出効率を見積もる。

10.1.1 飛跡検出効率の見積もり

飛跡検出効率を Geant4 を用いて見積もる。ファイバーの直径が 1 mm と 2 mm の場合で調べて、検出光量はそれぞれ KEK のビームテストにおける 3M-1 mm とルミラー 2 mm のサンプルの補正光量に、ファイバー伝搬の 0.43 倍減衰、2 mm ファイバーを用いる際に減少した水割合を WbLS で補う際の 0.83 倍の光量減少を考慮した値と 1% 以内で合わせた。また壁面反射率は 99.9%、WbLS の散乱長および吸収長は 6 m に設定した。ここに 500 MeV のミュオンを照射した。

シミュレーションは粒子が壁面へ垂直に平坦な分布で入射する状況（状況 A）と、セルに等方的に粒子が入射する状況（状況 B）の 2 通りで行った。状況 A はビームテストと同じであり、状況 B は斜めに入射する飛跡に対する検出効率を見積もるために設定した。飛跡検出の条件として、セルを通る 3 本のファイバー全てにおける 3 光子以上の検出を設定した。これは最も保守的かつ合理的な条件である。

状況 A：壁面へ垂直に平坦に入射する状況

セルを 40×40 の区画に分けてそれぞれの位置を粒子が通過する場合の飛跡検出効率を求めた。結果は図 10.1 の通りであり、ここでカラースケールが [0:100] と [90:100] の 2 通りを示している。

壁面を含まないセル中を通過した飛跡の検出効率は直径 2 mm のファイバー読み出しで 94.8%、1 mm で 98.6% となり、いずれの読み出しの場合も目標値の 96.5% と同等の水準で、特に 1 mm の読み出しは目標値以上であった。この検出効率差の主な要因は荷電粒子が Z 軸ファイバー中を通過するイベントであり、2 mm のファイバーを用いる場合で 3.1%、1 mm の場合で 0.8% 程度存

カラースケールの数値は飛跡検出効率 [%]

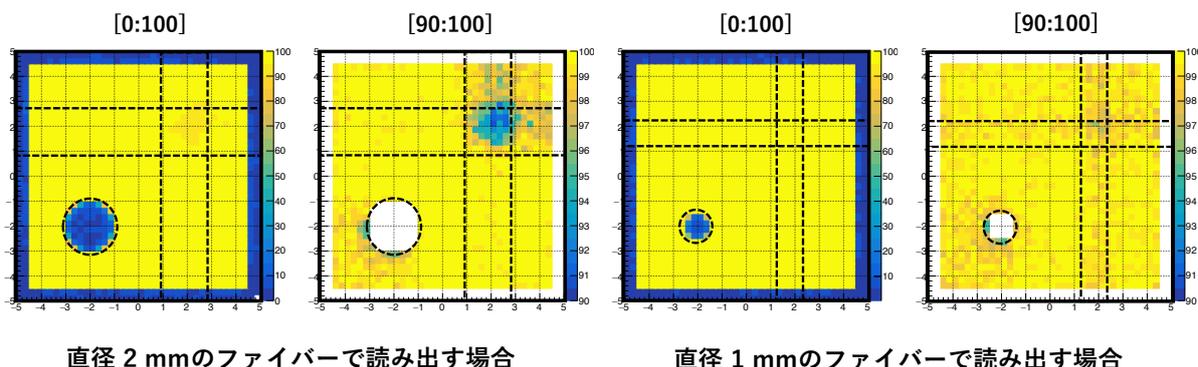


図 10.1: 飛跡検出効率をシミュレーションした 2 通りの状況。

在する。この差を考慮しても 2 mm の場合で飛跡検出効率はさらに 0.4% 程低い、これは図に示すように X 軸, Y 軸ファイバーが交差する地点で光量が低くなり検出効率が低下するためである。また Z 軸ファイバーの左下を荷電粒子が通過した際に、Z 軸ファイバーが光子の影となることで他のファイバーへ光子が届きにくくなること、飛跡検出効率低下に影響する。

状況 B：セルの中心に当方的に粒子が入射する状況

状況 B は粒子の入射角度を等方的に設定して、飛跡とセル中心の最短距離が 5 mm 以下となるようにランダムな位置から粒子を照射した。結果はファイバー直径 2 mm を用いて読み出す場合で飛跡検出効率は 95.3%、1 mm の場合は 96.7% となった。どちらの方式も目標値の 96.5% と同水準であり、特に 1 mm の読み出しは目標値以上の性能であった。

直径 1 mm の場合で A の状況より飛跡検出効率が低下したのは図 10.2 のように端を通過したイベントのためであり、直径 2 mm の場合で A の状況より改善したのはファイバーに重なって見え

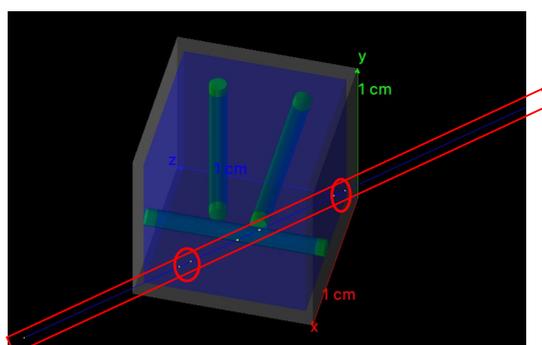


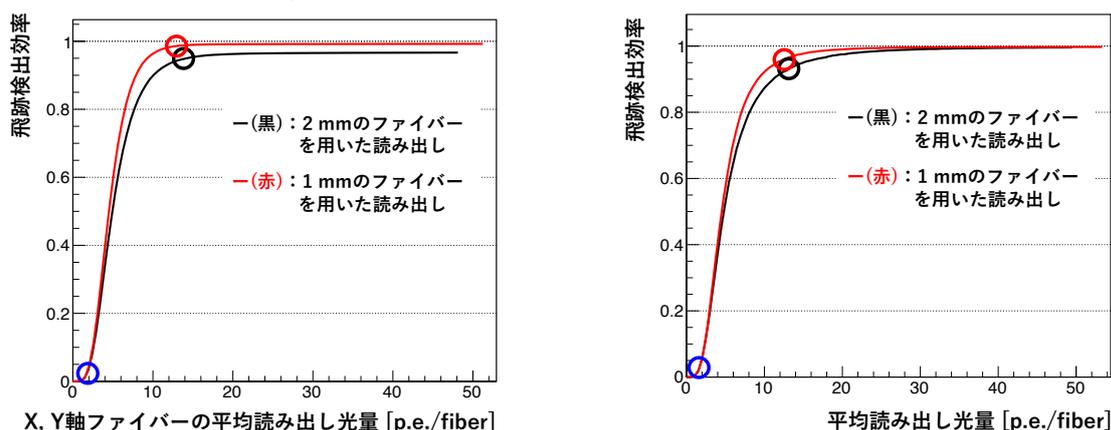
図 10.2: セル内をかすって通過するイベント

ない飛跡が減少したからである。

10.1.2 光量と飛跡検出効率

本節では光量と飛跡検出効率の関係を求める。ファイバー直径が 1 mm、2 mm の両方の場合で調べて、現在の光量から増加あるいは減少した場合の飛跡検出効率を検討する。

はじめに光量と飛跡検出効率の関係をシミュレーションで求めた結果を図 10.3 に示す。(a) は状況 A の効率を示していて、横軸は X 軸と Y 軸の平均検出光量である。また (b) は状況 B の効率を表していて、横軸はファイバーの平均読み出し光量である。



(a) 状況 A における光量と飛跡検出効率の関係 (b) 状況 B における光量と飛跡検出効率の関係

図 10.3: 光量と飛跡検出効率の関係

ここで KEK の測定光量に対応する飛跡検出効率を赤円 (1 mm) および黒円 (2 mm) で示している。また比較のために 2022 年のビームテストにおける光量から計算した飛跡検出効率を青円で示している。これは状況 A で 3.3%、状況 B で 3.7% であるから、本研究は最も合理的な飛跡検出条件の元で飛跡検出効率が 25–30 倍改善して実用水準に達したことを示した。

光量の増減による飛跡検出効率への影響

次に光量が現在の値から 10% 増減した場合の飛跡検出効率の変化を計算する。結果は表 10.1 の通りであり、多くの場合で 10% の光量変動に対する効率の変化は 1% 程度と小さく問題にならない。

表 10.1: 光量の状況と飛跡検出効率 [%]

	状況 A		状況 B	
	1	2	1	2
ファイバー直径 [mm]	1	2	1	2
測定光量+10%	98.8	95.4	97.6	95.4
測定光量	98.6	94.8	96.7	95.3
測定光量-10%	98.0	93.7	95.5	92.5

い。ただし状況 A で 1 mm、状況 B で 2 mm ファイバーを用いる場合は光量を増やしてもほとんど飛跡検出効率が向上せず、飽和していると分かる。さらに後者については-10% の光量減少で 2.8% 効率が低下するから、測定値の不定性による実際の光量の低下や、MPPC とファイバーの接続によるチャンネル毎の光量変動が飛跡検出効率を減少させる可能性がある。

10.2 エネルギー損失による粒子識別

ニュートリノ反応点からは様々な二次粒子（陽子、パイオン等）が生じるが、これらは種類によって図 10.4 のように距離あたりのエネルギー損失（ dE/dx ）が異なることを利用して識別できる。WbLS 検出器の設置目標である ND280 検出器には TPC が搭載されており、WbLS 検出器か

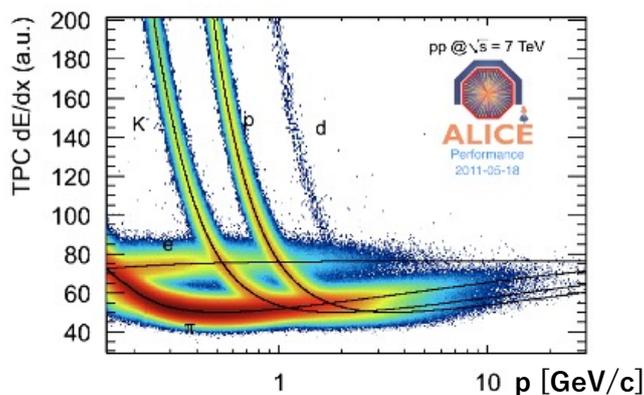


図 10.4: ALICE 実験の TPC における粒子毎の dE/dx ^[90]

ら外部に抜ける粒子は TPC において高精度な粒子識別が可能である。そこで本節では WbLS 検出器の内部で停止するような低エネルギーの陽子とパイオンの識別性能、および検出器内を重なって進む 2 つの MIP (Minimum Ionizing Particle) 粒子の識別性能を検討する^{*101}。

10.2.1 陽子とパイオンの識別

WbLS 検出器は粒子の飛跡長をセルのサイズである 1 cm 程度の分解能で測定できて、また検出器中で粒子が損失したエネルギーを光量として測定できる。本節ではこの 2 つの測定量から両者の識別可能性を検討する。ここでパイオンは π^+ を意味するものとする。

検出器中での飛跡長とエネルギー損失

はじめに WbLS 検出器を模した水ブロックにエネルギーが 0 から 1 GeV の範囲を平坦にとる陽子とパイオンを照射、水中での飛跡長とエネルギー損失を調べた^{*102}。その結果を図 10.5 の (a) に示す。

ここで WbLS 検出器における実際の測定状況を再現したのが (b) である。(b) の計算法は次の通りで、WbLS セルを通過する MIP 粒子のエネルギー損失は MPV 約 1.46 MeV のランダウ分布で、そこにビームテストで測定した光量 26.7 p.e./fiber (3M-1 mm)、35.5 p.e./fiber (ルミラー 2 mm) が対応するから、WbLS 検出器は 20 p.e./fiber/MeV 程度の光量を期待できる。粒子の向きが 1 つのファイバー軸と縮退する場合は 2 本のファイバーの合計検出光量を計算して、総観測光量は 40 p.e./MeV となる。これを用いて総観測光量 N を計算して^{*103}、標準偏差 \sqrt{N} の変動、飛

*101 本節で行うシミュレーションはファイバーの直径が 1 mm のモデルを用いる

*102 WbLS 検出器は WbLS と壁面構造から成るが、両者の密度はほとんど同じで水に近似できる。

*103 別途セルの壁面やファイバーを通過することで発光しない効果も考慮している。

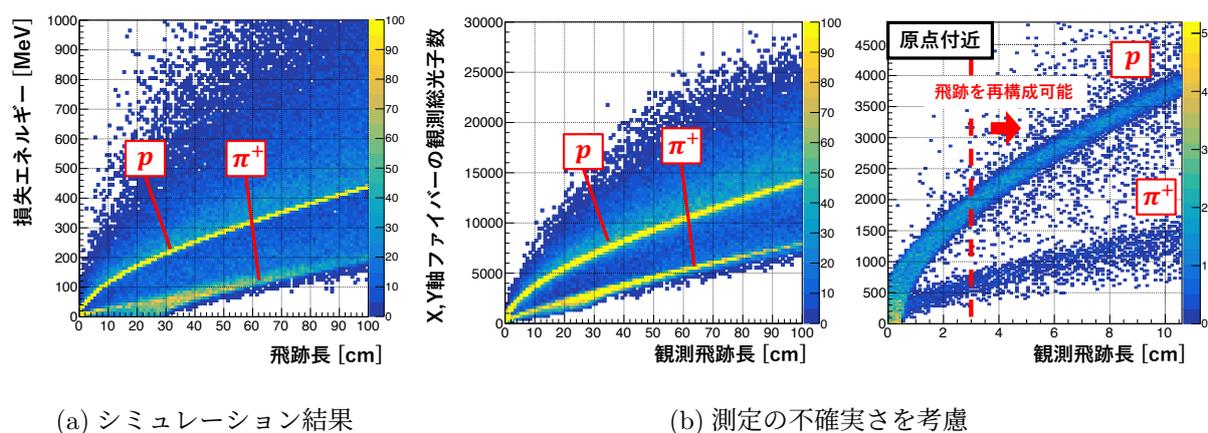


図 10.5: 水中におけるパイオンと陽子のエネルギー損失および飛跡長

跡長にはセルの分解能に由来する ± 0.5 cm の変動を加えた。WbLS 検出器は 3 cm 以上の長さの飛跡を再構成できるが、この領域で総観測光量の分布が分離しており陽子とパイオンを識別可能である。

飛跡が短い陽子とパイオンの識別性能の評価

前項で見たように飛跡が短いほど検出光量や飛跡長の不定性が増大し、損失エネルギーの差が小さくなることから識別が難しいと考える。本項では WbLS 検出器が検出できる最も短い 3 セルのヒットで検出される飛跡への粒子識別能力を評価する。ここで粒子識別は以下の方法で行う。

1. ニュートリノ反応点以外のセルの合計光量 N_{Track} を求める。
2. セルのヒットから飛跡の長さ L_{recon} を再構成する。
3. L_{recon} について適切に設定した光量閾値を N_{Track} が上回る場合は陽子、下回る場合はパイオンと判断する。

ニュートリノ反応点ではミュオンなど他の粒子が同時に生成されるから光量の判定から除外する。この手法の識別性能を評価するために 3 セルのヒット飛跡を形成する陽子およびパイオンの N_{Track} 分布を考える。図 10.6 に示すように、 N_{Track} は検出器での全検出光量 N_{Total} から反応点での光量 N_{Vertex} を引くことで求まる。はじめに全検出光量 N_{Total} の分布を考える。1 列に並ぶ 3 つのセルにヒットして $L_{\text{recon}} = 2$ cm となるような飛跡の真の長さはおよそ 1~3 cm だから、前述の MC でこの飛跡長のイベントをランダムに選択することで N_{Total} の分布とする。 N_{Vertex} の分布はシミュレーションで求める。WbLS 検出器セルの内部に、平均的に 2 cm の飛跡を作る運動量 300 MeV の陽子と 59 MeV のパイオンを中心からランダムな運動方向で生成して、このうち 3 方向のファイバーに 3 光子以上のヒットがあったイベントについて^{*104}、全ファイバーの合計検出光量を

*104 ニュートリノ反応点が検出される条件を再現しようとしている。実際には荷電レプトンの光量も加わるため近似である。

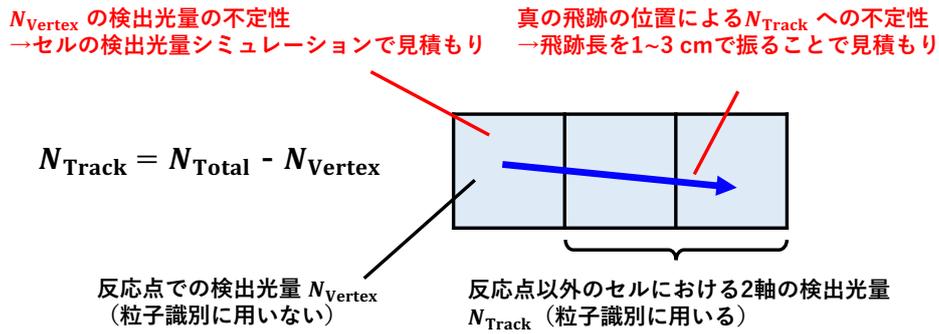


図 10.6: 本項で用いる粒子識別手法

N_{Vertex} として分布を求めた。これら分布から $N_{\text{Total}} - N_{\text{Vertex}}$ をランダムな組み合わせで計算して N_{Track} の分布を求めた。

陽子とパイオンについて N_{Track} の分布を図 10.7 に示す。ここで N_{Track} が負のイベントがあるが、これは N_{Vertex} と N_{Total} の相関を無視しているからで、これを考慮すれば N_{Track} はより狭い分布になるから実際はより高い識別性能を期待できる。また、ここで様々な閾値で陽子の識別効率（陽子と識別された陽子イベント/全ての陽子イベント）およびパイオンの識別効率を求めることで描いた ROC(Receiver Operating Characteristic) 曲線を共に示している。ROC 曲線は閾値による識別精度の変化を表しており、識別手法の性能を評価するのに適している。

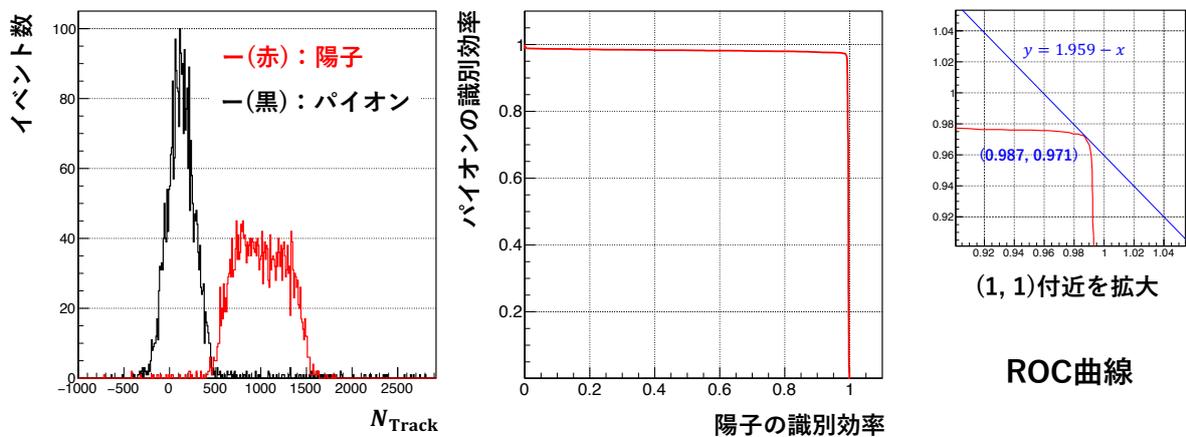


図 10.7: 陽子とパイオンの N_{Track} 分布およびその識別の ROC 曲線

陽子とパイオンの N_{Track} 分布は分離しており、陽子の識別効率+パイオンの識別効率を最大化するように閾値を選ぶと、それぞれの識別効率は 98.7%、97.1% となった。SuperFGD では両者が 98% 程度の効率で識別するから、WbLS 検出器はそれと同水準の識別が可能と結論づける。

ここでパイオンはエネルギーに対して短距離で停止するものが一定数あり、それを陽子と区別することが難しく識別効率を制限している。

10.2.2 dE/dx による飛跡中の MIP 粒子数識別

本節では2つの MIP 粒子が重なる飛跡を1粒子飛跡と識別する性能を検討する。例えば図 10.8 のように電子ニュートリノ反応から生じる電子と、ガンマ線から生じる電子陽電子対生成飛跡を区別できれば電子ニュートリノ反応を識別することが可能である^{*105}。飛跡として MIP の電子、

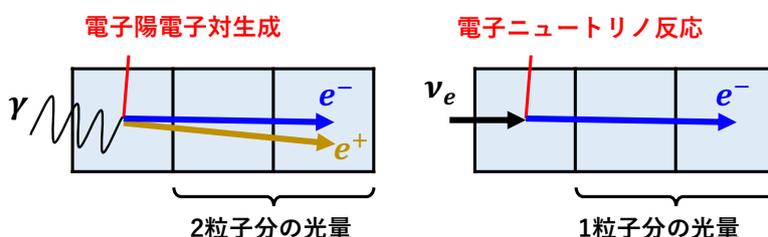


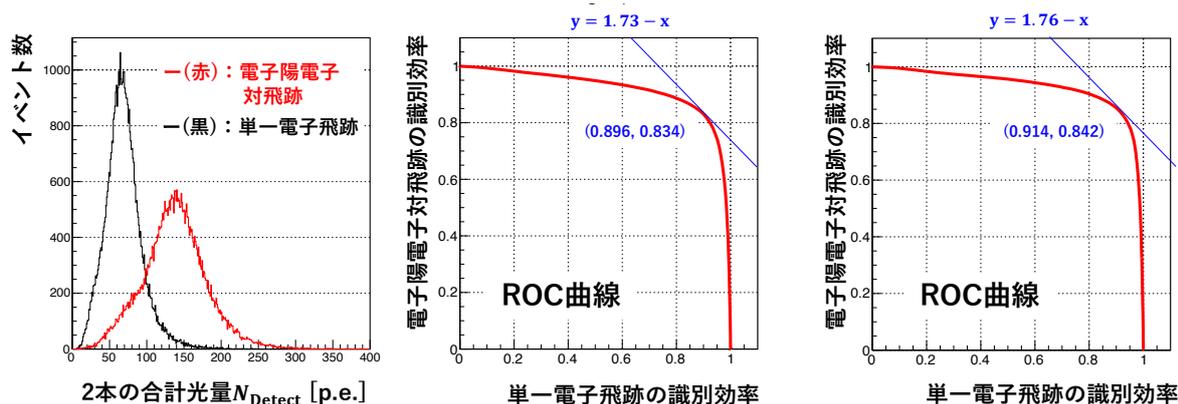
図 10.8: dE/dx の測定による反応識別

電子陽電子対を想定してこの識別を目指す。ここで電子陽電子対飛跡（2粒子飛跡）は約2倍の dE/dx を持つからこれを用いて区別する。今回は最小の1セルで識別する効率を考える。

識別性能の評価

識別性能は次のように評価する。光量を 20 [p.e./MeV/fiber] に調整した WbLS セルへ等方的かつセルの中心からの距離が 5 mm になるように MIP 電子（MIP 電子陽電子対）を打ち込む。そして2本のファイバー^{*106}における合計検出光子数 N_{Detect} ($\sim dE/dx$) を識別の指標とする。

こうして求めた N_{Detect} の分布を表したのが図 10.9 の (a) である。また識別性能の ROC 曲線を同時に示している。ここで (b) はエネルギー損失の真の値で識別を行った場合の ROC 曲線であり、検出器の光量が無限大の理想的な状況に対応する。



(a) 2本のファイバーの検出光量による識別

(b) 損失エネルギーによる識別

図 10.9: dE/dx による電子飛跡の識別性能

2つの識別効率の和を最大化するように閾値を選ぶと、電子飛跡および電子陽電子対飛跡の識

^{*105} 実際にはより複雑で飛跡の形状を用いた機械学習などが行われる。

^{*106} 1方向のファイバーが飛跡方向と縮退して使えない場合を仮定する。

別効率はそれぞれ 89.6% と 83.4% となる。ここで (b) に示す真のエネルギー損失による識別効率 (91.4%、84.2%) から 1–2% 以下の低下であり、WbLS 検出器の光量はこの識別に必要な水準を満たしたと結論付ける。

また、この効率は図 10.10 のように判定に 2 つのセルを用いたり (図中の A)、飛跡位置を正確に特定できる場合 (図中の B) は改善して両者で 90% 以上を実現可能である^{*107}。

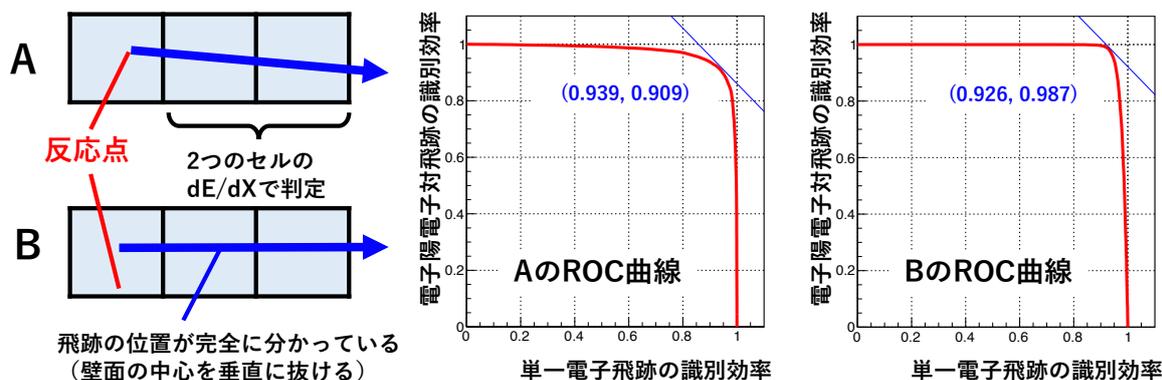


図 10.10: 多様な条件における電子飛跡の識別性能

10.3 章のまとめ

本章では KEK で行ったビームテストの光量測定値に基づき、WbLS 検出器の飛跡検出効率および粒子識別性能を評価した。

飛跡検出効率についてセル壁面に垂直に粒子が入射する場合とセルに向かって等方的に粒子が入射する場合の 2 つの状況でシミュレーションを行った。直径 1 mm ファイバーを読み出しに用いる場合、それぞれの状況で検出効率は 98.6%、96.7% となり、目標値の 96.5% を上回る十分な性能を発揮できることを示した。直径 2 mm の場合についても、それぞれの状況で検出効率が 94.8%、95.3% となり、目標値の水準と同等の性能を発揮できることを確認した。この飛跡検出効率は 10% の光量減少で、3% 近く低下する場合があり、WbLS 検出器の実用化にはこれまで行ったセル内の反射シート貼り付け加工、ファイバー端面の反射加工、MPPC の改善の全てを用いる必要がある。

粒子識別性能について、はじめに飛跡の dE/dx を用いた陽子とパイオンの識別性能を評価、特に検出可能な最も短い水準の飛跡について陽子の識別効率 98.7%、パイオンの除去率 97.1% を実現できて、WbLS 検出器が十分な陽子-パイオン識別性能を持つことを確認した。次に飛跡中に含まれる MIP 粒子数を dE/dx で見分ける方法の精度を評価、MIP の電子および電子陽電子対飛跡の識別をシミュレーションで検証した。その結果、真のエネルギー損失を用いた理想的な方法と 2% 以下の差で識別できて、WbLS 検出器が飛跡中の MIP 粒子数識別に必要な光量を達成したことを確認した。

以上から、WbLS 検出器が飛跡検出器として実用水準の粒子検出性能を持つことを示した。

^{*107} 識別にはそれぞれのセルの 2 本のファイバーの合計光量を用いている。また 2 つの識別効率の和を最大化するように閾値を選んでいる。

第 11 章 検出器の実現に向けた検討

本章では検出器の実現に向けた諸課題を整理し、今後の開発における課題と展望を述べる。

11.1 検出器構造に関する検討

11.1.1 3D プリンターの薄い構造の造形能力

本検出器は 3D プリンターを用いて検出器の枠組みを作製するが、検出器の水割合を高めるためには壁面を薄くすることが重要である。一方で壁面が薄いほど強度が低下し、3D プリンターでの造形が困難になるため両者のバランスをとる必要がある。本研究では先行研究で用いたものより高性能な 3D プリンター (Raise3D Pro3) を使用可能となったため、その造形能力を検証する。

今回 5 種類のフィラメント、PLA (Raise3D、RP-22-02)、PET (BASF、Pet 白色)、ABS (Raise3D、RP-21-02)、PC (Raise3D、51101040A01)、PC-FR (Polymaker、PM70250) を用意してそれぞれで図 11.3(a) のように 1 mm 程度の構造を持つ物体を印刷層高さ 0.1 mm の設定で造形した。

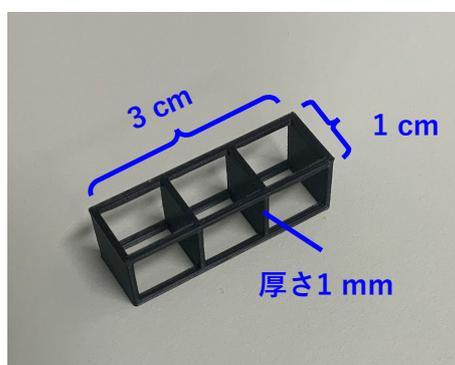


図 11.1: (a) 細部構造の造形能力テストのサンプル



左から厚さ、1, 0.75, 0.5, 0.25, 0.01 mm

図 11.2: (b) 平面構造の造形能力テストのサンプル

図 11.3: WbLS の概念図と実際のサンプル

PLA、PC および ABS フィラメントは綺麗に造形できた一方で、PET および PC-FR は不安定であり^{*108}、印刷に用いるフィラメントの選択は重要である。

つぎに PLA について図 11.3(b) のように薄い平面構造の造形性能を検証し、強度と平坦さの精度から 0.5 mm が実用的な薄さの限度と判断した^{*109}。これに 0.1 mm の薄さのシートを両面に貼り付けた場合、検出器の水質量割合は約 55% となって水-炭素ニュートリノ反応断面積比測定の実験誤差を厚さ 1 mm の壁を用いる場合から 11% 程度削減できる。

*108 PET は印刷層高さ 0.2 mm で造形すると正常に造形できた

*109 0.25 mm の薄い層について、造形自体は成功した。

11.1.2 セルに残る気泡

KEK で行ったビームテストの測定データにはセル中に気泡の痕跡が確認されたが、気泡の存在領域は飛跡検出ができないデッドスペースとなる上にニュートリノ反応標的の質量を過大評価することで、ニュートリノ反応の断面積を誤って評価することになる。例えば水比率 50% の WbLS 検出器に 3% の気泡があれば、全体の反応数は 97% に減ってそこから炭素原子核の反応数を本来の 50% と思って差し引くから^{*110}実際の水の反応数が 47% となる、これを気泡がない場合の 50% と判断すると、水-ニュートリノ反応の断面積として 6% 程度の過小評価を起す。これは炭素-酸素ニュートリノ反応断面積比の測定で目指す系統誤差の 5% より大きいから、少なくとも気泡の割合を 1% 以下に抑える必要がある。

そこで試作機のモックアップを用いた WbLS 注入試験から気泡が残留する仕組みを考察する。注入の過程は動画で撮影して分析した。図 11.6(a) のように上部から WbLS を注入する方式と (b) のように下部から WbLS を注入する方法を試した。(b) はビームテストで用いた方法である^{*111}。

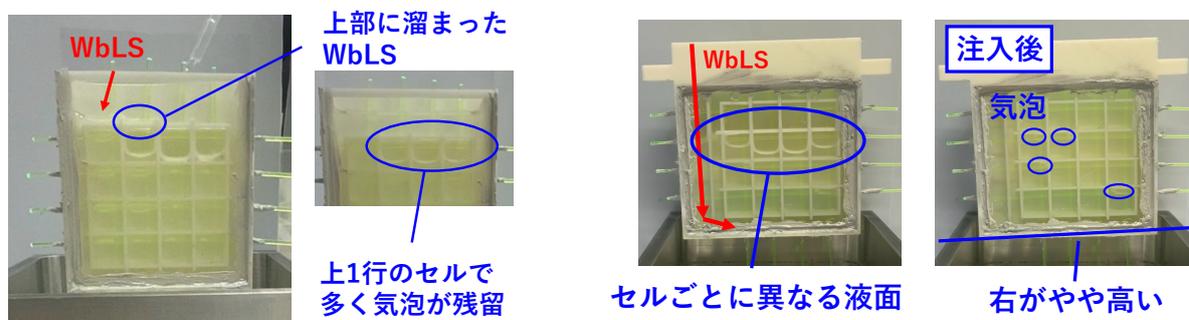


図 11.4: (a) 上部から WbLS を注入する方式

図 11.5: (b) 下部から WbLS を注入する方式

図 11.6: WbLS の注入法

(a) では上部から注がれた WbLS が空気の逃げ道となるファイバー穴に液だまりを作り塞ぐことで、特に上部のセルで大きな気泡が残った。そのため下側から WbLS を注入して事前の液だまりを防ぐことが必要である。ただし (b) のように下部から WbLS を注入する方法でも (a) より大幅に気泡を防げているが目視で 1.5% 程度気泡が残った。これは内部のセルほど WbLS の水位が上がりやすく、先に水面が高くなった隣のセルから WbLS が流入しファイバーの穴を塞ぐからであった。(b) は一部のセルで気泡が残るが、多くのセルで気泡があったビームテストの状況より残留状態が良い。これは試験時のサンプルが左にやや傾きファイバー穴がある右側に気泡が誘導されて上部に抜けやすくなったからだと考えられる。これらを踏まえると、気泡対策としてセル同士で極端な水位差ができない遅い速度で WbLS を注入し^{*112}、試作機を傾けて気泡を上面のファイバー穴がある側に誘導するといった工夫が有効と思われる。以上の点を考慮して模型を用いたさらなる検証が必要である。

^{*110} ここで簡単に水と炭素の断面積が等しいこと ($\sigma_e = \sigma_c$) を仮定した。

^{*111} ただしビームテストの状況と反射シートの有無、傾き（こちらは右側がやや高い）の状況が異なっている。

^{*112} ただしあまりに遅すぎると液が壁面を伝い空気穴を塞ぐ効果が目立つ可能性もある。

11.2 検出器の長期安定性の検討

本検出器は3年から5年程度の稼働を想定しており、本節ではこの稼働年数において生じうる諸問題を検討する。

11.2.1 水ベース液体シンチレータによる構造の溶解

水ベース液体シンチレータ中に含まれる界面活性剤および液体シンチレータにより、検出器を構成するプラスチックや反射シートの溶解が生じうる。そのため複数種類のプラスチックと波長変換ファイバー^{*113}、本開発で用いた接着剤について WbLS 中に 2025 年 2 月 22 日より 1 年程度保管して溶解耐性を検証した。これらサンプルは常温で保管した。

2026 年 1 月 16 日時点での各サンプルの溶解状況は表 11.1 の通りであり、プラスチックは ABS

表 11.1: 用意した Tyvek シートの厚さ

サンプル名	サンプルの説明	溶解の状況
PLA	PLA フィラメント (Raise3D、RP-22-02) で造形した構造物	溶解なし
PET	PET フィラメント (BASF、Pet 白色) で造形した構造物	溶解なし
ABS	ABS フィラメント (Raise3D、RP-21-02) で造形した構造物	3 日目で溶解
PC	PC フィラメント (Raise3D、51101040A01) で造形した構造物	溶解なし
PC-FR	難燃性 PC フィラメント (Polymaker、PM70250) で造形した構造物	溶解なし
Fiber	直径 1 mm、クラレ Y11 波長変換ファイバー ×3 本	300 日程度で折れ曲がりあり
Fiber-S	Fiber+紙やすりで 3 回表面を削る	100 日程度で折れ曲がる、300 日程度で溶解
Fiber-B	Fiber+60° 折り曲げて折損	100 程度で折れる
Glue	接着剤 (セメダイン、CA-175) のかたまり	溶解なし

が 3 日で溶解した他は特に変化が見られなかった。ただし検出器の運用想定年数である約 5 年にはまだ及ばないから、加速試験を含めたさらなる長期の観察が必要である。波長変換ファイバーについては削りや折りを加えたサンプルが早く溶解したことから、ファイバーコアが WbLS に触れることで溶解が起こると考えられる。ただし破損加工を行わないサンプルも 1 年以内に溶解したことから表面に保護層を追加コーティングするなどの処置が必要になる可能性がある。ここで本研究が 5.3 節で行った測定でサンプル AD-P に用いた SiO₂ 保護膜加工は厚さが数 10 nm で光学的な影響が少なく、検出器の水割合にも影響を与えないから活用を期待している^{*114}。

*113 端面をオプティカルセメントと接着剤で保護した。

*114 株式会社トーカイにアルミ蒸着と共に依頼したもので、保護膜単体の加工も可能であることを確認している。

11.2.2 水ベース液体シンチレータの再溶解

一度溶解温度帯を離れて成分分離した WbLS が再び溶解温度帯に戻ることで再溶解するかを検証した。WbLS 標準サンプルは $20 \pm 5^\circ\text{C}$ の範囲で溶解するが、これを一度分離させて 20°C に設定した恒温槽で 20 日間保管した。20 日目のサンプルは図 11.7 に示すように、底面に半透明な

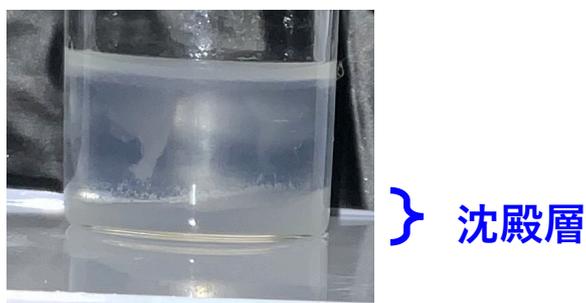


図 11.7: 20 日目のサンプル

沈殿が生じておりこれを攪拌して再度 20°C に保持すると 1 日程度で溶解して透明になった。このように一度分離したサンプルは再び温度を溶解温度帯に戻しても自然には溶解しない可能性がある。この場合対策として溶解温度帯を十分広くしておく、年に 1 度のメンテナンスで WbLS を交換するなどの対応が必要となる。今回は 20°C で維持して溶解しなかったが、一時的に温度を上げることで再溶解する可能性もあり今後の検証が必要である。

11.3 課題のまとめと展望

本検出器を実用化する上で考慮すべき課題とその展望を述べる。そのまとめを表 11.2 に示す。

表 11.2: 用意した Tyvek シートの厚さ

課題	要求	対策の展望または考察
クロストーク	少なくとも 4% 以下に抑える	セルを黒色の 3D プリンターフィラメントで形成する。
ファイバー端面の反射加工の実装	1 mm のファイバーで増加率 1.9 を実現、量産性を確保	反射面とファイバー端面の距離が原因の可能性はある。
セル内の気泡	体積 1% 以下が必要	WbLS の注入速度を変更、検出器を傾けるなどの工夫を試す。
WbLS の温度安定性	分離しても再溶解する方法を確立するか、分離しない安定した WbLS または温度環境を保証	一度温度を上げる（下げる）ことで溶解状態に戻る可能性がある。
WbLS による溶解への耐性	5 年以上の耐性	加速試験での長期検証が必要、 SiO_2 保護膜でコーティングする。
検出器のデザイン	40-60% の水割合、SuperFGD と同じ検出原理	上記の課題の状況を見ながら考える。

クロストーク率は 4% 程度であれば隣のセルのヒット発生が 1% 以下になると概算しているが、SuperFGD のクロストーク率と同じ程度を目指せば 2.5–3.5% 程度まで抑制したい^{*115}。これはセルを黒色のフィラメントで形成し、光吸収を利用する。反射シートを複数枚貼り付けるなどの工夫で改善する可能性がある。

ファイバー端面に 3M SR シートを貼り付けた場合、直径が 2 mm のファイバーでは 1.9 倍程度光量が増加したが、1 mm のファイバーでは 1.64 倍だった。そのため 1 mm ファイバーを用いた読み出しではさらに光量を改善できる可能性がある。また 2–6 万本のファイバーに低コストで加工する方法を考案することも重要である。ファイバー端面に反射キャップを取り付ける方法や、複数のファイバーを反射シートを貼り付けた板に同時に密着させる方法が考えられる。

セル内の気泡対策は重要であり、実際にはほとんど 0 を目指したい。これはモデルを用いた WbLS 注入試験で検証する必要がある。またファイバーの通し穴は現状クロストークの主要な要因ではないと考えられるから、もう少し広くして気泡が抜けやすくする余地もあると考えられる。

WbLS の溶解温度帯（温度安定性）は現状 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 程度で目標よりはゆとりがあるため、運用期間を通して維持し続ける方針も可能性はある。ただし、一度分離した WbLS を再溶解させる方法を見つけることがまずは重要と考えられる。現状では容器の攪拌で戻るが検出器中では難しい。

WbLS への溶解耐性は 5 年程度を保証する必要がある、加速試験による検証が必須である。特に波長変換ファイバーは現時点で代替がなく、この保護方法を確立することが重要である。

検出器デザインを確定するために、まず上記の課題を解決して検出器構造への要求を明確化することが重要である。

*115 検出効率比較の不定性に効きうる。

第 12 章 結論

ハイパーカミオカンデ実験はニュートリノ振動確率を測定することでレプトン CP 対称性の発見を目指す。本実験の系統誤差削減には前置検出器における水標的を用いたニュートリノ反応の精密測定が重要であり、これを実現するために本研究は水ベース液体シンチレータ検出器の開発に取り組んだ。本検出器は、水に界面活性剤で液体シンチレータを溶かした水ベース液体シンチレータ (WbLS) を反応標的に用いる飛跡検出器で、1 cm×1 cm×1 cm のキューブ状セルが 3 次元格子状に並ぶ構造をしており、1 cm 程度の分解能で短距離飛跡を検出可能で全方向に同等の検出特性を持つことが強みである。従来の開発では読み出し光量が少なく飛跡検出能力が不足することが最大の課題であり、隣接セルへの光クロストークも抑制が必要であった。

本研究ははじめに水ベース液体シンチレータの発光量向上を目指して、液体シンチレータ中の蛍光剤および波長変換剤の濃度最適化、界面活性剤および液体シンチレータ溶媒の種類最適化に取り組んだ。ここで光量は改善せず、検出器の光収集効率の向上が不可欠であることを示した。

次に検出器のセル壁面に反射加工を行って光を閉じ込める工夫を行い、大型のセル模型と宇宙線を用いた光量測定から 3 種類の反射シート (ルミラー E20#50、ルミラー E6SR#188、3M, DF2000MA) を壁面に貼り付ける加工で従来から約 2 倍読み出し光量が向上することを示した。

次に検出器に用いる光ファイバーについて、読み出しを行わない側の端面に反射シート (3M, DF2000MA) を接着する光反射加工を行うことで光量を 1.64 倍向上した。また従来ほとんど光反射が起これないとされていたファイバーのカット端面が 1.27 倍光量を増加させる反射効果を持つことを発見して、これがサンプル毎に変動のない実用可能な手法であることを確認、前述の 3M の加工と組み合わせることで安価に検出器の光量を増加できることを示した。

次に WbLS 検出器で光読み出しに用いる MPPC について 3 種類の性能測定を行い、種類毎に異なる測定へのバイアスを評価、その補正法を確立して光検出効率を比較した。既存の MPPC S13360-3075CS を用いることで、既存の S13081-050CS を用いる場合と比較して WbLS 検出器の光量が 2.01 倍向上することを示した。

また、光量向上とクロストークの抑制を目指して検出器に用いるファイバー直径を 1 mm から 2 mm に変更する方法を検討した。測定とシミュレーションから光量と水割合をほとんど変えずに維持できることを確認し、クロストーク抑制の手法として期待できることを示した。

そしてこれまでの測定結果をシミュレーションと比較することで、反射シート (3M, DF2000MA) による反射率向上後のセル壁面反射率が 100% に近いことを示した。この反射率を用いたシミュレーションにより WbLS 検出器の光量が実用水準にあると推定した。

上記の開発結果から検出器の光量とクロストーク改善が期待される状況であったから、京都大学化学研究所および高エネルギー加速器研究機構において電子ビームを用いた WbLS 検出器試作機の性能評価テストを行った。反射シートや読み出しファイバー直径を変更した 3 種類の試作機について性能を調べて、その結果全ての試作機で光量が目標値の 20 [p.e./fiber] を超えることを確

かめた。特に最も高いサンプルの光量は 35.3 [p.e./fiber] となり、目標値の 1.5 倍以上の光量を達成した。また読み出しに 2 mm のファイバーを用いたサンプルではクロストーク率が約 2.9% 以下となり、目標の 3% 以下を達成した。ここで 1 mm のファイバーを読み出しに用いるサンプルはクロストーク率が 5.8% と高くて、すでに壁面の反射率は 100% 近いことからセル壁面内部での光吸収が重要と結論付けた。またサンプル間のクロストーク率を比較することで、ファイバー直径が大きい場合にクロストークが抑制されるという仮説を確かめた。また本テストでは光量やクロストーク率がセル内の粒子の通過位置によって変動する傾向を明らかにした。

このビームテストで測定した光量に基づき、現在の WbLS 検出器性能をセルの飛跡検出効率および粒子識別能力の 2 観点で評価した。飛跡検出効率は読み出しファイバーが 1 mm と 2 mm のそれぞれの場合で、最も保守的で合理的な条件で推定を行い目標値と同等水準の性能を発揮することを示した。粒子識別について陽子と π^+ 粒子をそれぞれの識別効率（除去率）98.7%、97.1% で認識できると評価して、十分な性能であることを示した。また dE/dx による飛跡中の MIP 粒子数識別を行う上で、本検出器の光量は十分であることを確かめた。

上記の結果から現在の WbLS 検出器は水-ニュートリノ反応の検出器として十分な光量および基礎性能を有しており、検出器のデザイン確定を経た後の実用化が期待される。

謝辞

修士論文の執筆にあたりお世話になった皆様に、この場を借りて御礼申し上げます。

指導教員の中家剛教授には、研究の相談から研究室生活に至るまで広い範囲で大変お世話になりました。私が研究で迷った時には方向を示していただきました。KEK のビームテストの際には、予定を変更して助力をいただきました。常に優しさと共に厳しさをもって研究とは何かを教えてくださいました。

副指導教員の木河達也助教には、研究に関して多くの相談をさせていただきました。自由に研究ができる貴重な環境を用意していただき、その中で彷徨う私が修士論文を書けたのは、木河助教のご指導があったおかげです。時に優しく支えてくださり、大変頼りになる存在でした。

2025 年 10 月の化学研究所におけるビームテストの際には、京都大学 化学研究所 附属先端ビームナノ化学センターの塚田暁准教授、同技術職員の頓宮拓さんを始めとして、中家教授、木河助教、そして同じ研究室の印藤さん、長谷川さんに実験をサポートして頂きました。初めてのビームテストでしたが、測定を行えたのは皆様のご協力のおかげです。ありがとうございました。

2025 年 12 月の高エネルギー加速器研究機構におけるビームテストの際には、ランコーディネータとして携わっていただきました高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所の江成祐二准教授、同 中村勇講師を始めとして、中家教授、木河助教、東北大学 素粒子実験研究室の熊野さん、安土さんに実験をサポートしていただきました。また実験開始にあたり多くの方にお世話になりました。私の体調が万全でない中、多くのお気遣いと課題メンバーのおかげで無事測定を行うことが出来ました。ありがとうございました。

東京インキ株式会社には、反射材フィラメントのサンプルを提供いただきました。また造形や性能に関する多くの助言をいただきました。ありがとうございました。

研究室では、中家教授、木河助教を始めとして、多くの先生方に支えられる研究生活であったと感じています。研究から生活まで多くの助言をいただき、充実した研究室生活の中で本研究を行えたことをありがたく思います。秘書の蘆田さんには出張から物品購入まで多岐に渡る事務手続きでお世話になりました。また T2K グループの川上さん、吉村さん、恩田さん、大谷さんを始めとして、多くの先輩方に研究から生活面まで助けていただきました。恩田さんはこの研究の前任として度々質問に行かせていただいております、大変心強い存在でした。化研ビームテストの際には EASIROC の使い方を教えて頂き、お忙しい中ありがとうございました。大谷さんは研究から行事にいたるまで多くの助言をいただき、大変助かりました。

また研究室同期の、奥本さん、鴛原君、佐々木君、溝添君、は授業から研究生活まで多くの場面で協力して、お世話になりました。

そして最後に私を支えてくれた家族に感謝します。

付録 A 酸素原子核と炭素原子核モデルの比較

原子核密度の記述には Woods-Saxon 分布が用いられて、酸素原子核密度は 2-parameter Fermi model、炭素原子核密度は 3-parameter Fermi model で記述される^[30]。

$$\rho_{\text{oxygen}}(r) = \rho_0 \left(\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{r-c}{a}\right)} \right) \quad \rho_{\text{carbon}}(r) = \rho_0 \left(\frac{1 + w \left(\frac{r}{c}\right)^2}{1 + \exp\left(\frac{r-c}{a}\right)} \right)$$

c [fm] = 2.69, 2.355 (oxygen/carbon)

a [fm] = 0.4096, 0.5224 (oxygen/carbon)

$w = -0.149$ (carbon)^[91]

この密度分布を ρ/ρ_0 で表したのが図 A.1 である。例えば LFG モデルでは密度の違いはそのまま $p_F = (3\pi\rho(Z/A)^{1/3})$ で表される Fermi 運動量に影響する。

酸素原子核および炭素原子核について、SF で計算された核子運動量分布を表したのが図 A.2 である。縦軸がログスケールであることに注意すれば酸素/炭素原子核の分布に一定の違いを確認できる。ただし図中に示された Simple RFG と SF モデルの差異に比べれば、核種による分布の違いは比較的小さい事がわかる。

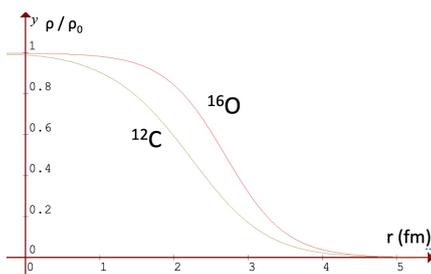


図 A.1: 酸素、炭素原子核の密度分布^[30]

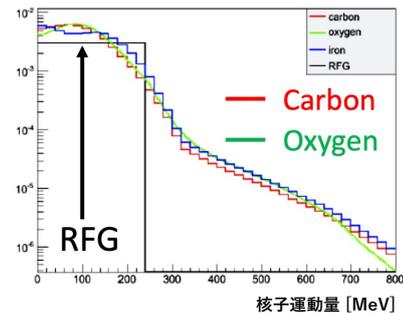


図 A.2: 酸素、炭素原子核の核子運動量分布^[30]

次に図 A.3 にて SF モデルにおける炭素原子核および酸素原子核の Removal energy 分布を見る。ここには原子核の Binding energy の構造が反映されており炭素、酸素原子核間で分布が大きく異なる。ただし同じ原子核種内での陽子/中性子間での差異はほとんど無い。

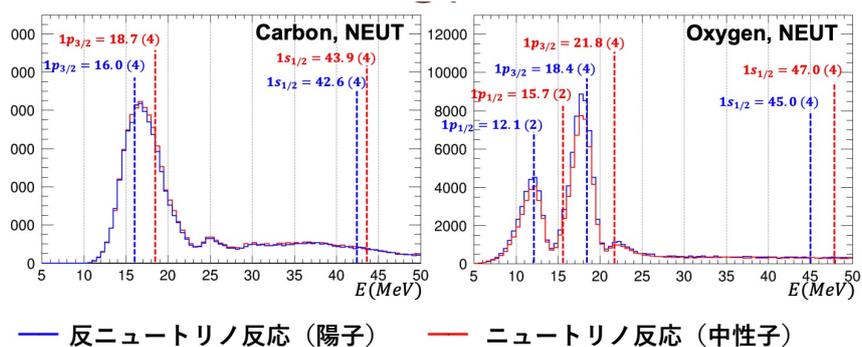


図 A.3: SF モデルにおける炭素、酸素原子核の Removal Energy 分布 [43]

付録 B PMT (H7415) の動作安定性試験

4.3 節の測定を行うにあたり、長時間連続の動作で PMT の光検出効率が一定であることを確認する試験を行った。

測定方法

12 時間 PMT を起動し一定時間毎に同一強度の LED 光を PMT に照射、デジタルサイザー (CAEN, DT5725) を用いて PMT からの出力信号を記録した。12 時間の計測終了後は PMT の印加電圧を切って 12 時間待機、翌日に同時刻から同じ計測を再開しこれを 3 日間連続で行った。データ取得の方法は図 B.1 に示す通りで、波形発生器 (T3AFG350) を用いて LED に電圧パルス、デジタルサイザーにトリガー信号を同時に送り、PMT からの出力信号は 10 倍アンプを一度通したのちにデジタルサイザーに接続して記録した。PMT の検出光量はデジタルサイザーで記録した ADC 値の変化を時間で積分した ADC 積分値で定義し、その平均値を各測定の観測光量と定義した。

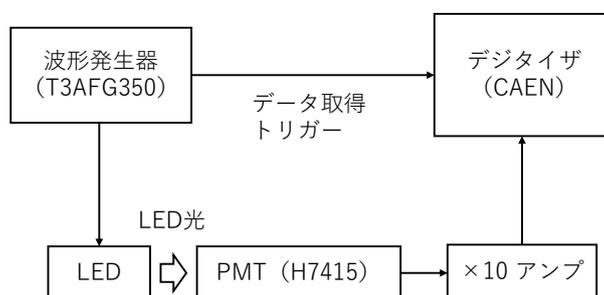


図 B.1: PMT 動作安定性試験の測定回路

測定結果

結果を図 B.2 に示す。PMT 起動直後 10 分程度は観測光量が大きく変動するものの、その後は 2% 程度の範囲で安定した値が得られた。さらに 3 日間の各測定で結果は 2% 程度の変動範囲で一貫しており、日数が経つ毎に PMT の光検出効率が有意に低下するような傾向も見られなかった。よって今回行う WbLS サンプルの光量測定において検出器由来のバイアスなく WbLS の発光量を測定可能だと結論付ける。

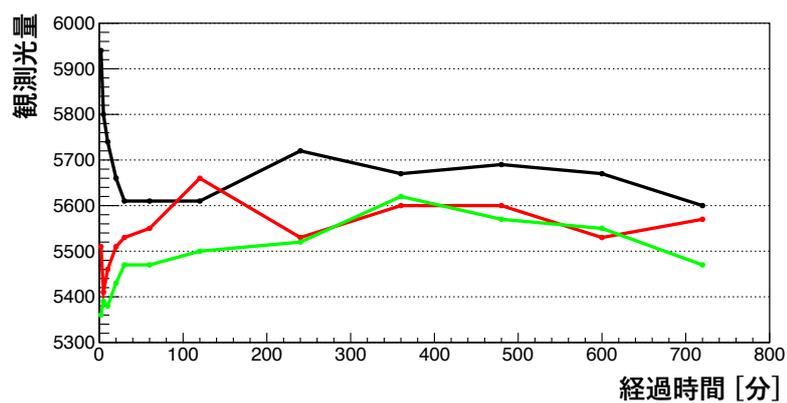


図 B.2: PMT 動作安定性試験の結果

付録 C 界面活性剤の評価

C.1 界面活性剤の溶解能力の評価測定 1

今回新たに入手した界面活性剤および従来用いた IGEPAL CO-630 の計 7 種類の界面活性剤をそれぞれ用いて、表 C.1 に示すように A タイプおよび B タイプの 2 通りの組成で、界面活性剤の種類を変更しながら合計 14 種類の WbLS を模した液体を作製した。そして 4.2 節で行ったのと同様の手法・セットアップを用いて、3 - 30°C の範囲でそれぞれのサンプルが溶解する温度を調べた。

表 C.1: 各界面活性剤を用いて作製したサンプルの組成

	A タイプサンプル成分比 [%]	B タイプサンプル成分比 [%]
純水	70	70
界面活性剤	15	10
溶媒 (PC)	15	20

A タイプサンプルは PC の溶解量が標準サンプルと同一であり、これが 20°C 以下で溶解する場合は 4.2.3 節で示した手法を用いることで、運用温度の 20°C で溶解しながら標準サンプルより高い液体シンチレータ割合を持つ高光量の WbLS を作製できる可能性がある。逆に A タイプサンプルが 20°C 以上の温度でのみ溶解するような場合は、その界面活性剤で従来の発光量を上回る WbLS を作製できる可能性は低い。新たに用意した界面活性剤が PC を強力に溶解できる状況を期待して PC 割合を 20% に増加した B タイプのサンプルを同時に用意し測定を行った。

結果と考察

表 C.2 に示す界面活性剤を用いて作製したタイプ A サンプルについて 20°C 以下で溶解状態を確認できた。タイプ B のサンプルは全て溶解状態を確認できなかった。

表 C.2: 溶解が見られたタイプ A サンプル

使用界面活性剤	溶解上限温度 [°C]	溶解下限温度 [°C]
エマルゲン 409PV	8.2	(2.7 以下)
エマルゲン 108	6.9	(2.7 以下)
IGEPAL CO-630	16.3	7.6

エマルゲン 409PV および、エマルゲン 108 は最も冷却された状態で溶解しており溶解下限温度を測定していない。IGEPAL を除き溶解状態を確認できた 2 種類の界面活性剤は HLB 値が 12.0, 12.1 であり、近い値を持つという共通点がある。これらの界面活性剤を用いて作製したタイプ B

のサンプルで溶解状態が見られなかった原因として、PCの割合が増加したことにより可溶化温度が曇天を上回り溶解温度そのものが消滅した可能性が考えられる。

エマルゲン 409PV およびエマルゲン 108 は 10°C 以下の低温で溶解状態が見られたため、WbLS 新界面活性剤の候補である。ただし溶解温度の下限を測定できていないため溶解温度領域（溶解上限温度 - 溶解下限温度）が狭い可能性があり、それを確認する追加の測定が必要である。他の界面活性剤についてもさらに低温では溶解状態が現れる可能性があり、イオン性界面活性剤を加えて溶解温度を上昇させた状態で界面活性剤の溶解特性を評価する 2 回目の測定を行う。

C.2 界面活性剤の溶解能力の評価測定 2

前節に引き続いて新たに入手した界面活性剤および従来用いた IGEPAL CO-630 の計 7 種類の界面活性剤をそれぞれ用いて、表 C.3 に示すように C タイプおよび D タイプの 2 通りの組成で、界面活性剤の種類を変更しながら新たに合計 14 種類の WbLS を模した液体を作製した。溶解温度を上昇させるために両方のサンプルにイオン性界面活性剤であるナフタレンスルホン酸ナトリウムを 1% 加えている。これらのサンプルについて同様の手法・セットアップにより、5 - 30°C の範囲で溶解する温度を調べた。

表 C.3: 各界面活性剤を用いて作製したサンプルの組成

	C タイプサンプル成分比 [%]	D タイプサンプル成分比 [%]
純水	70	70
界面活性剤	14	11
ナフタレンスルホン酸ナトリウム	1	1
溶媒 (PC)	15	18

結果と考察

表 C.4 に示す界面活性剤を用いて作製したタイプ C サンプルについて溶解状態を確認できた。タイプ D のサンプルは全て溶解状態を確認できなかった。

表 C.4: 溶解が見られたタイプ C サンプル

使用界面活性剤	溶解上限温度 [°C]	溶解下限温度 [°C]
エマルゲン 108	18.0	10.9
IGEPAL CO-630	(30 以上)	23.2

エマルゲン 108 を用いた C タイプサンプルで溶解状態を確認できたが、その溶解温度領域は WbLS 標準サンプル以下であり新界面活性剤として用いる利点は特にない。18% の PC を含んだタイプ D の組成では、既存の IGEPAL を含む全ての界面活性剤で溶解状態を実現できなかった。

付録 D 液体シンチレータ溶媒の評価

D.1 用いた溶媒の詳細

DIN は東京化成工業株式会社から購入して純度 95% 以上 (CAS : 2027-17-09)。PXE は朝日石油化学株式会社からサンプル提供いただいたもので、成分は 1-フェニル-1-キシリルエタン又はジメチル (1-フェニルエチル) ベンゼンが 67 から 92%、エチル (1-フェニルエチル) ベンゼンを含め合計 95% 以上の混合物 (CAS : 1029912-90-0) となっている。

D.2 溶解量の評価

溶媒を変更した 3 種類の液体シンチレータについて WbLS として水への溶解のしやすさを調べた。前節で作製したものと同一成分比で溶媒の異なる 3 種類の液体シンチレータを作製。それぞれの液体シンチレータを用いて表 D.1 のように液体シンチレータ割合を変更した 4 種類のサンプルを作製し、合計 12 種類のサンプルについて溶解温度を調べた。界面活性剤としては非イオン性の IGEPAL CO-630 を用いた。

表 D.1: 作製した WbLS サンプルの組成

	サンプル 1	サンプル 2	サンプル 3	サンプル 4
純水 [%]	70	70	70	70
IGEPAL CO-630 [%]	15	13	11	9
液体シンチレータ [%]	15	17	19	21

4.2 節で行ったのと同様の手法・セットアップを用いて、6 - 30°C の範囲でそれぞれのサンプルが溶解する温度を調べた。用いた溶媒ごとに以下で結果をまとめる。

PC を溶媒に用いた WbLS サンプル

液体シンチレータを 15% 含むサンプル 1 について 14 °C 以下で、液体シンチレータを 17% 含むサンプル 2 について 9.2 - 15.1 °C の範囲で透明な溶解状態を確認できた。サンプル 1 について測定範囲内で溶解温度の下限は見られなかった。液体シンチレータを 19% 含むサンプル 3 について、透明な溶解状態は確認できなかったが 16.3 - 23.3 °C の範囲で半透明状態を維持した。サンプル 4 で透明な溶解状態は確認できなかった。

DIN を溶媒に用いた WbLS サンプル

液体シンチレータを 15% 含むサンプル 1 について 12.9 °C 以下で透明な溶解状態を確認できた。測定範囲内で溶解温度の下限は見られなかった。液体シンチレータを 17% 含むサンプル 2 について、透明な溶解状態は確認できなかったが 12.9 - 18.1 °C の範囲で半透明状態を維持した。サンプル 3,4 では透明な溶解状態は確認できなかった。

PXE を溶媒に用いた WbLS サンプル

液体シンチレータを 15% 含むサンプル 1 について 26.0 °C 以上で透明な溶解状態を確認できた。測定範囲内で溶解温度の上限は見られなかった。サンプル 2, 3, 4 では溶解状態を確認できなかった。

まとめと考察

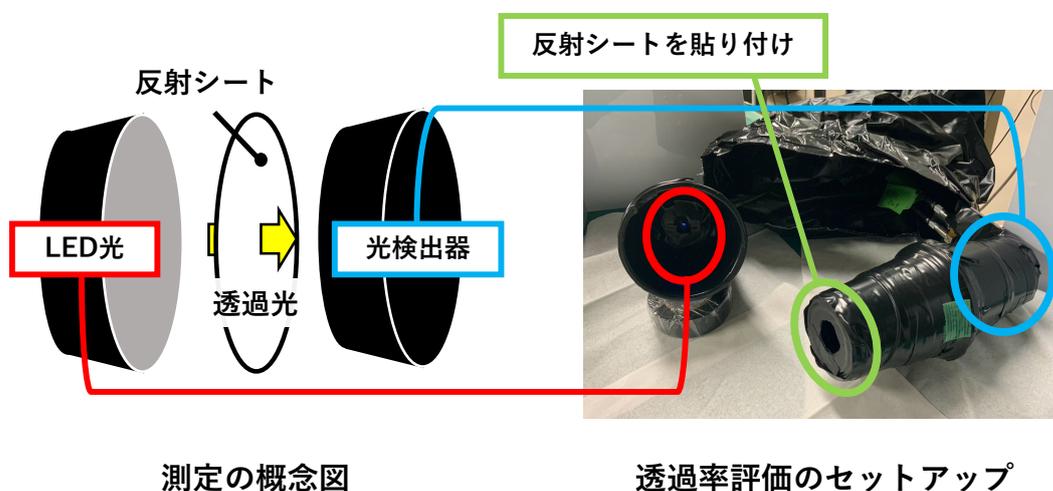
DIN を溶媒に用いた WbLS サンプル 1 で透明な溶解状態を確認した。4.2.3 で述べた手法により溶解温度を上昇させることで、液体シンチレータ割合 15% 程度のサンプルを作製できる可能性が高い。PXE を溶媒に用いた WbLS については溶解温度の下限が 26.0 °C であり、20 °C 付近で溶解し液体シンチレータ割合が 15% 以上のサンプルは作製が難しいと思われる。PC を溶媒として用いた WbLS サンプルはサンプル 1 および 2 で透明な溶解状態を確認できて、最も安定した溶解状態を示したと言える。

PC を用いたサンプル 3 と DIN を用いたサンプル 2 について、半透明で安定した状態を維持する温度帯があった。ここで不透明さが生じた要因は WbLS 中で液体シンチレータが形成したミセルによるレイリー散乱であると思われる。レイリー散乱断面積はミセルサイズの 6 乗に比例するため、液体シンチレータ割合を数 % 増加させることで WbLS の散乱長は急激に短くなりうる。先行研究より WbLS の散乱長は $O(0.1)$ cm 程度以上であれば検出器の光収集効率にほとんど影響しないため、液体シンチレータ割合が高めであるこれらのサンプルを用いることで検出光量を向上できる可能性がある。光量が液体シンチレータ割合に完全に比例すると考えれば、標準サンプルから 1.27 (~ 19/15) 倍光量が向上する可能性がある。

付 録 E 反射シートの性能評価の方法

5.1.1 節で行った反射シートの透過率測定は以下に示す手法で行った。

図 E.1 のように LED パルス光を MPPC (S13081-050CS) で読み出して、中間に反射シートを設置した際の検出光量の減少量を測定することで光透過率を評価する。ここで Bis-MSB による波長変換後の波長領域 (400 - 450 nm) における反射性能を評価するために、青色の LED (波長 ~450 nm) を用いている。今回の測定では図 E.2 のように波形発生器 (T3AFG350) を用いて LED に電



測定の概念図

透過率評価のセットアップ

図 E.1: 透過率測定の設定アップ

圧パルスを送り、MPPC からの信号は 10 倍アンプを通した後にデジタイザー (CAEN, DT5725) を用いて記録した。デジタイザーはセルフトリガーを用いてデータ取得し、トリガー閾値を 1.5 光

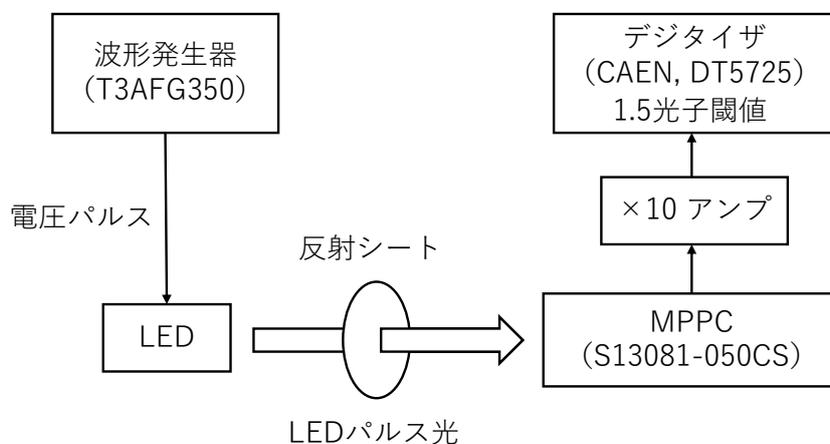


図 E.2: 透過率測定のためのデータ取得回路

子に設定することで同時に2光子のダークノイズ信号を記録した。各イベントの検出光量はADC値のベースラインからの差分を時間積分したADC積分値で定義した。各測定 of ADC積分値の分布には図E.3のようにLEDパルス光に対応する光量ピークと2光子信号に対応する光量ピークが存在するが、両者にガウス分布をフィティングして測定光量と2光子信号値を得てからその比を取ることによって測定光量を検出光子数に変換した。ここで検出光子数にはMPPC飽和効果の補正を行っ

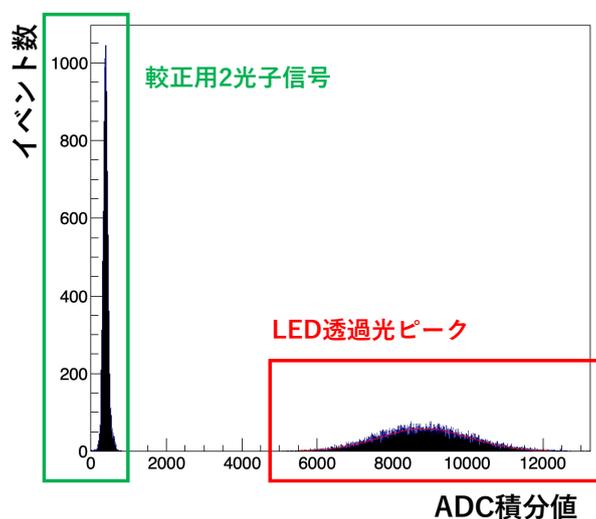


図 E.3: 取得データのADC積分値分布の例

た。反射シートの透過率測定では2回、Tyvekシートの光透過率測定ではシートを用いない基準光量は4回、各反射シートは3回ずつ測定して、各シートサンプルについて透過率を求めて、その平均を透過率の測定値とした。またサンプル毎の透過率のばらつきを測定値の不定性として評価した。

付録 F セルの品質による光量変動の効果

5.2 節の測定では各反射加工について 2 つずつセルを作製したが、作製時に反射シートの間隙が生じたり微量の接着剤が反射シート表面に付着するなどの要因でセルの品質が異なり光量に変動した可能性がある。このような変動は実際の検出器を作製する際に問題になりうるのでこの効果を考察する。

ある反射加工のサンプルについて測定 1 における各ファイバーの検出光量を n_1, n_2, n_3, n_4 、測定 2 における各ファイバーの検出光量を m_1, m_2, m_3, m_4 とする。また各測定におけるファイバー検出光量の平均を \bar{n}, \bar{m} と表す。本測定では校正の不定性、統計誤差は無視できるほど小さくこの時各測定の検出光量の測定誤差 $\sigma(\bar{n}), \sigma(\bar{m})$ は標本分散とファイバー本数を考慮すれば F.1 式のように評価できる。

$$\sigma(\bar{n}) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (n_i - \bar{n})^2}, \quad \sigma(\bar{m}) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (m_i - \bar{m})^2} \quad (\text{F.1})$$

2 回の測定の検出光量差 $\Delta = (\bar{n} - \bar{m})$ が期待値 0、標準偏差 σ_Δ のガウス分布に従うとする。ここで $\sqrt{\sigma^2(\bar{n}) + \sigma^2(\bar{m})}$ を σ_{Fiber} その期待値を $\overline{\sigma_{\text{Fiber}}}$ 、セルの品質による測定光量のばらつきを σ_{Quality} と書くと、F.2 式の関係が成り立つ。ただし $\sigma(\bar{n})$ と $\sigma(\bar{m})$ は相関がないことを仮定している^{*116}。

$$|\Delta| \sim \sigma_\Delta = \sqrt{\sigma_{\text{Quality}}^2 + \overline{\sigma_{\text{Fiber}}^2}} \geq \overline{\sigma_{\text{Fiber}}} \sim \sigma_{\text{Fiber}} \quad (\text{F.2})$$

セルの品質による測定光量のばらつきがなければ ($\sigma_{\text{Quality}} = 0$) $\sigma_\Delta = \overline{\sigma_{\text{Fiber}}}$ となって $|\Delta| \sim \sigma_{\text{Fiber}}$ を期待できる。そのため $|\Delta|$ と σ_{Fiber} の値の比 $|\Delta|/\sigma_{\text{Fiber}}$ はセル品質の安定を判断する指標となる。そこで各反射加工について $|\Delta|$ と σ_{Fiber} を求めて $|\Delta|/\sigma_{\text{Fiber}}$ と共に表 F.1 にまとめた。確率

表 F.1: 反射加工毎の $|\Delta|$ と σ_{Fiber}

サンプル名	$ \Delta $	σ_{Fiber}	$ \Delta /\sigma_{\text{Fiber}}$
従来サンプル	0.152	0.599	0.254
PTFE	2.080	0.866	2.402
Tyvek FS	0.008	0.419	0.020
Tyvek 1085D	0.429	0.288	1.489
Tyvek 3564M 裏	0.329	0.260	1.265
アルミ蒸着シート	0.683	0.301	2.678

$\text{Prob.}(|\Delta| > \sigma_\Delta) \sim 0.32$ であるが、反射シートを用いた 5 サンプル中 4 サンプルで $|\Delta| > \sigma_{\text{Fiber}}$ と

^{*116} 測定で用いる MPPC は同じで、MPPC の光検出効率の個体差によるばらつきが両方に含まれるから近似である。

なっているからセル品質による光量変動の効果が現れている可能性が高い*¹¹⁷。一方で 3D 反射シートで造形しただけの従来サンプルは $|\Delta|/\sigma_{\text{Fiber}} = 0.25$ であり、セルの品質は比較的安定していると推測できる。

反射シートを用いた 5 サンプルについて $|\Delta|/\sigma_{\text{Fiber}}$ の平均は 1.57 であり、品質による光量の不定性は $\sigma_{\text{Quality}} \sim 1.21\sigma_{\text{Fiber}}$ と評価できる。これは具体的に 11.3% 程度の光量変動である。ただし $\sigma(\bar{n})$ と $\sigma(\bar{m})$ の誤差相関項の寄与を含んでいるからそれを差し引いて、 σ_{Quality} を光量の 10% と見積もる。このように不均一なセル品質による光量の変動は無視できず注意が必要である。ただしこの議論は反射シートを用いた全てのセルで同程度の品質の変動を仮定しており、またサンプル数の少なさから推測の域を出ないことに注意する。

*¹¹⁷ 例えば確率 0.32 の事象が 5 回中 4 回以上起こる確率は 3.9% である。

付録 G S-LS-R および S-3M-SR サンプルにおける測定バイアスの検討

5.3 節の測定結果において、S-LS-R および S-3M-SR サンプルの光量には測定バイアスが存在する可能性があり、そのために測定値の不定性が増加している。今回はその要因を考察する。はじめに S-LS-R と S-3M-SR サンプルについて行った全測定の値と最終サンプル光量を表 G.1 に示す。

表 G.1: S-LS-R と S-3M-SR サンプルについて各測定の値と最終的なサンプルの光量

サンプル	測定 1	測定 2	測定 3	サンプルの光量 [p.e.]
S-LS-R	9.90 ± 0.19	6.61 ± 0.27	-	8.26 ± 1.65
S-3M-SR	10.85 ± 0.57	6.15 ± 0.31	7.55 ± 0.22	8.18 ± 1.92

いずれのサンプルでも測定 1 とそれ以降の測定で大きく光量が異なっている。セル品質に由来する 10% の不定性を考慮すれば、S-LS-R について測定 1 と 2 の差は 2.7σ 、S-3M-SR について測定 1 と 2 の差は 3.3σ 、測定 1 と 3 の差は 2.3σ の変動であり有意である。この変動要因は測定 1 ではいずれもファイバーをカットしたまま用いたが、2 回目以降の測定では WbLS の漏れを防ぐためファイバーの非読み出し端面にオプティカルセメントを付着したため^{*118}、6.1.4 節の測定で見られるようにファイバーの先端と空気の境界が滑らかになることで測定 2 以降は光量が 0.79 倍程度低くなると予想される。この端面効果を考慮すれば、S-LS-R について測定 1 と 2 の差は 0.9σ 、S-3M-SR について測定 1 と 2 の差は 2.0σ 、測定 1 と 3 の差は 0.8σ の変動であり許容できる。

測定 2 以降のデータに 1.27 倍の補正を加えれば、S-LS-R の光量は正しくは 9.15 ± 0.75 [p.e./fiber] (増加率: 2.43 ± 0.25)、S-3M-SR の光量は正しくは 9.42 ± 0.88 [p.e./fiber] (増加率: 2.51 ± 0.28) と実際の測定値より向上する。なお基準サンプルはファイバー端面をカットした状態で作製しており増加率もそれに合わせて計算した。

この補正値は端面での光量増加率を仮定しているから参考値として扱い、補正なしの測定値を正式に用いることにする。ここで今回の測定値は誤差の範囲でこの補正値を含んでいるから、誤差を考慮するかぎり今後の結論に大きな問題は生じない。

*118 測定が行われた段階でこの変動効果は知られていなかった。

付録 H シミュレーションの補足

シミュレーションの方法について本付録で補足する。

H.1 セル模型に対する WbLS 検出器セルの光量比のモデル化

サイズ 2 cm のセル模型と 1 cm の WbLS 検出器セルのそれぞれで壁面反射率が 0.01、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、0.95、1 の 8 通りの場合で検出光量をシミュレーションしてその比を取った。結果は図 H.1 の通りであり、ここで壁面反射率 R を変数とする自由パラメータ 3 の関数を経験的に定義してフィットした。

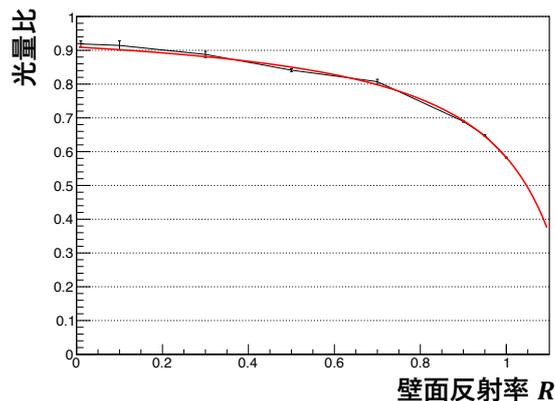


図 H.1: MC で計算した光量比と反射率の関係およびその近似関数

$$\text{光量比}(R) = \frac{1\text{cm セルでの光量}(R)}{2\text{cm セルでの光量}(R)} = \frac{[0] + [1] \times R}{1 + [2] \times R} \quad (\text{H.1})$$

ここで各パラメータの値は、 $[0]=0.910 \pm 0.005$ 、 $[1]=-0.780 \pm 0.004$ 、 $[2]=-0.778 \pm 0.009$ である。この近似関数はすべての反射率で MC の結果との違いが 1.4% 以下であり、これは MC の不定性の水準である。

この近似関数は R が大きくなるほど光量比が小さくなる傾向が見られるが、これは反射率が大きい場合と小さい場合での光子検出の仕組みの違いから生じていると考えられる。反射率が小さい時に検出される光子は一度も壁面で反射せずファイバーに直接到達するものが主であり、飛跡とファイバーの距離が相対的に近い 1 cm サイズのセルで光量が大きくなる。一方反射率が大きい時はほとんど全ての光子がファイバーに検出されるから、荷電粒子のセル内の通過長 (\sim 光量)

が2倍でファイバー本数が4/3倍のセル模型で光量が大きくなる。このようなメカニズムの違いが徐々に移行することで、光量比は R に対して単調に減少する形になる。

H.2 セル壁面の反射率とセルの光収集効率のモデル化

この光収集効率 $C_{\text{PDE.cell}}$ は、ファイバーでの検出光子数/セル内で発生した光子数で定義されて基本的に H.2 式に従うと考えられる。

$$C_{\text{PDE.cell}} = \frac{\text{ファイバーでの検出確率}}{\text{ファイバーでの検出確率} + \text{WbLS での吸収確率} + \text{壁面での損失確率}} + \text{補正項} \quad (\text{H.2})$$

ここで壁面での損失確率は (1-壁面反射率) に比例するから、 $C_{\text{PDE.cell}}$ を壁面反射率 R を用いて H.3 式のように3つの自由パラメータでモデル化する。

$$C_{\text{PDE.cell}} = \frac{1}{[0] + [1] \times (1 - R)} + [2] \quad (\text{H.3})$$

各サイズのセルについて、壁面反射率が 0.01、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、0.95、1 の8通りの場合で光収集効率を計算して、その値に近似関数をフィットした結果を図 H.2 に示す。ここで近似

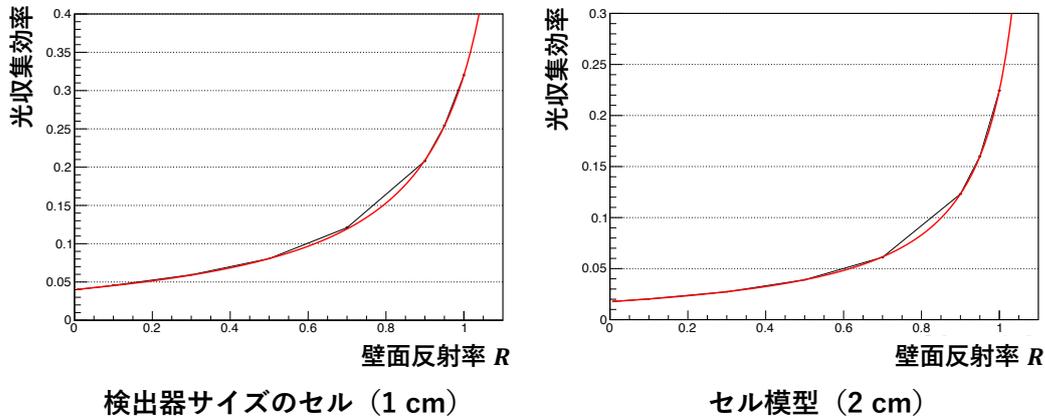


図 H.2: MC で計算した光収集効率と反射率の関係およびその近似関数

関数はすべての反射率で誤差 0.6% 以下でシミュレーションと一致しており、極めて高い精度で光収集効率を表現していると言える^{*119}。各自由パラメータの値は表 H.1 に示す通りである。

表 H.1: モデル関数の各パラメータ

自由パラメータ	1 cm サイズセル	2 cm サイズセル
[0]	2.97 ± 0.01	4.28 ± 0.01
[1]	14.6 ± 0.1	32.8 ± 0.2
[2]	-0.0169 ± 0.0006	-0.0093 ± 0.0002

*119 これは MC の不定性の水準であり、実際には精度はより高いと思われる

H.3 直径 2 mm のファイバーによる光収集効率の増加率のモデル化

サイズ 1 cm の WbLS 検出器セルと測定に用いたセル模型の 2 通りのセルについて、ファイバー直径を 2 mm に変更したものを Geant4 内で再現して壁面反射率が 0.01、0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、0.95、1 の 8 通りの場合について $IR_{\text{FiberD_MC}}(R)$ をシミュレーションした。

近似関数は H.4 式のように経験的に決定した自由パラメータ 3 の関数を用いた。フィッティングの結果は、全ての反射率で 1.7% 以下の精度でシミュレーション結果と一致した。

$$IR_{\text{FiberD_MC}}(R) = \frac{\text{2mm ファイバーを用いた光量}}{\text{1mm ファイバーを用いた光量}} = \frac{([0] + [1] \times R)}{1 + [2] \times R} \quad (\text{H.4})$$

ここで各自由パラメータの値は以下の表の通りである。

表 H.2: セル形状ごとのモデル関数パラメータの値

モデル関数パラメータ	WbLS 検出器セル	セル模型
[0]	1.69 ± 0.01	1.88 ± 0.01
[1]	-1.39 ± 0.01	-1.66 ± 0.01
[2]	-0.68 ± 0.02	-0.79 ± 0.01

付 録 I ファイバーでの光量の減衰

片面での読み出し

ファイバーの片面で光を反射した時の読み出し端からの距離 x と相対検出効率 $C_{\text{Eff}}(x)$ の関係 (I.1 式) を $L = 50, 200$ の両方の場合で計算した結果が図 I.1 である。反射率 R の値は、0, 0.38, 0.50, 0.80 の 4 通りを用いた。両者の規格化条件は同じであり結果をそのまま比べられる。

$$C_{\text{Eff}}(x) = 0.71 \times \exp\left(\frac{x}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(\frac{x}{25}\right) + R \left(0.71 \times \exp\left(\frac{2L-x}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(\frac{2L-x}{25}\right) \right) \quad (\text{I.1})$$

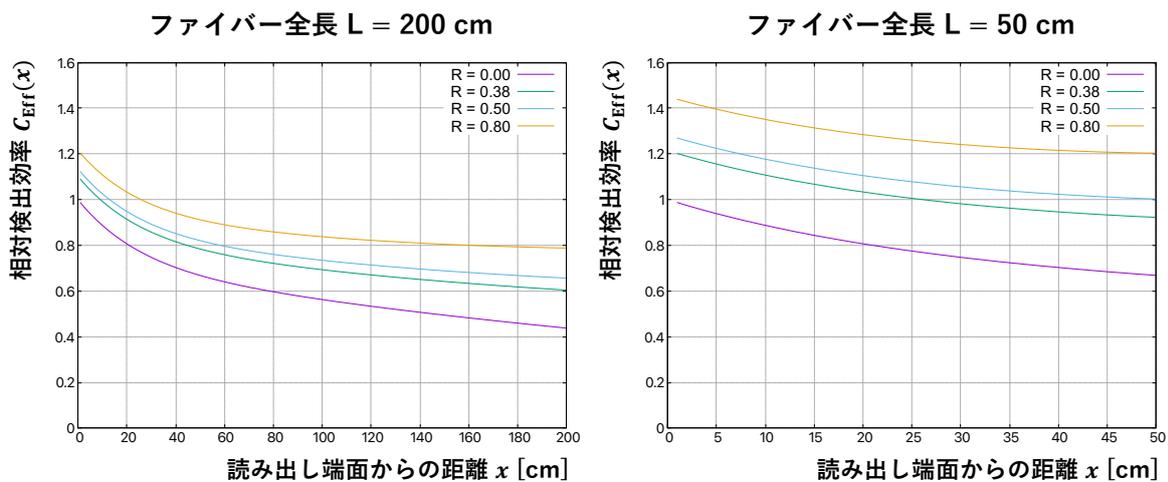


図 I.1: 読み出し端からの距離 x と相対検出効率 $C_{\text{Eff}}(x)$

このように比較的 $L = 50$ cm のファイバーでは光量が確保しやすい。

両面での読み出し

両端で光子を読み出す場合の相対検出光量はファイバー端面からの距離 x を用いて I.2 式のように書ける。ただし規格化条件は $C_{\text{Eff}}(x)$ と同様である。

$$C_{\text{Eff,both}}(x) = 0.71 \times \exp\left(\frac{x}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(\frac{x}{25}\right) + 0.71 \times \exp\left(\frac{L-x}{413.4}\right) + 0.29 \times \exp\left(\frac{L-x}{25}\right) \quad (\text{I.2})$$

$L = 200, 50$ [cm] の場合について、この $C_{\text{Eff_both}}(x)$ を $R = 0.64, 0.27, 0$ の条件で計算した $C_{\text{Eff}}(x)$ と共に示したのが図 I.2 である。

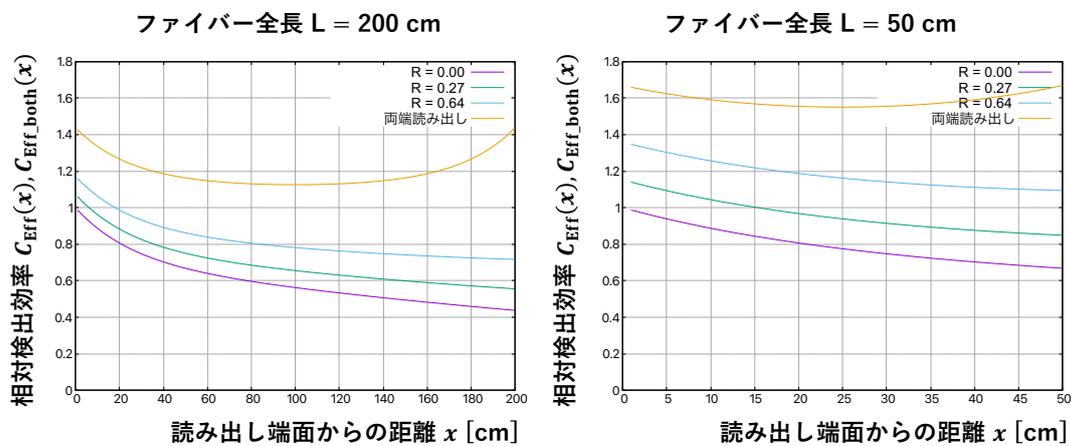


図 I.2: 両端で読み出した場合の光量比較

反射加工に比べて大幅な光量増加を達成していることが分かる。

付録 J 飽和効果による分解能の悪化

6.3.3 節で述べた飽和効果による分解能は次のように計算した。

期待値として N 個の光子を検出する状況で実際に検出する光子数は、光量分布にポアソン分布を仮定した場合、統計的に \sqrt{N} のばらつき（標準偏差）を持つ。実際の MPPC は有限のピクセル数を持つため、飽和効果の起こり方が毎回異なることによりさらに分解能が悪化する。高光量領域では飽和効果により (d 飽和効果補正後の光量/ d 検出光量 >1) となるため、偶発的な検出光量のズレが強調されて補正光量に影響し、分解能悪化の追加要因となる。本項ではこれら飽和効果が与える影響を含めて光量の検出分解能をモンテカルロシミュレーション (MC) で評価した。MC の具体的な方法は

設定したある観測光子数期待値 N_{expected} を標準偏差 $\sqrt{N_{\text{expected}}}$ のガウス分布に従いランダムに変動させることで受光面への到達光子数 N_{true} を得た。この到達光子を N_{pixel} 個のピクセルへランダムに割り振り、同ピクセルに到達した光子は 1 つとしてカウントして MPPC の読み出し光子数 N_{obs} を求めた、ここに 6.5 式の補正を加えることで補正後の光量 $N_{\text{correction}}$ を得た。 N_{expected} の値ごとに 10000 回 $N_{\text{correction}}$ を計算して、観測光子数期待値 N_{expected} に対する、実際の観測光子数の標準偏差を飽和効果を含めた検出分解能と定義した。4 通りの N_{pixel} についてシミュレーションした結果を図 J.1 に示す。ここで紫線は統計のみで飽和効果がない場合 ($N_{\text{pixel}} \rightarrow \infty$) の検出分解能である^{*120}。

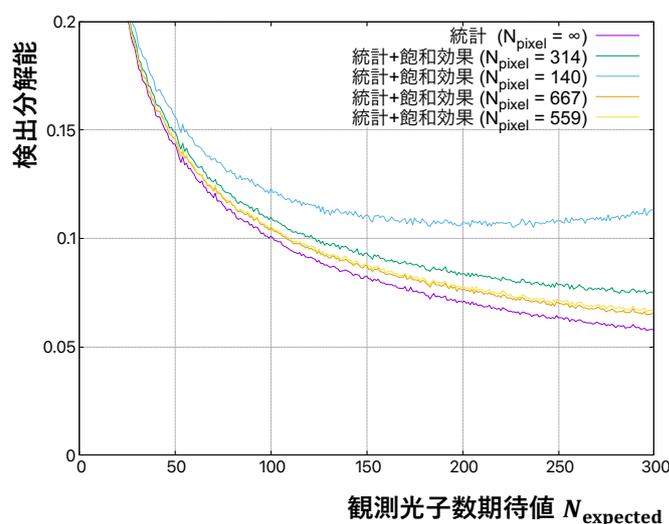


図 J.1: MC に基づく観測光子数期待値と検出分解能

*120 これは十分 MC の精度が良ければ $(N_{\text{expected}})^{-0.5}$ に一致する。

付録 K ファイバーと MPPC 接続の安定性の測定

波長変換ファイバー端面と MPPC はコネクタで接続されて密着する構造になっている。ここに空気層の隙間が生じた場合、図 K.1 のようにファイバーコアと空気層の間で反射が起こってしまい、読み出し光量が減少する。同じ MPPC とコネクタを用いた場合でも付け直す度に隙間の状態が変化することで数 % 程度検出光量が変動する。ファイバー MPPC 間の接続で検出光量が極端にばらつく場合、平均的に高い読み出し光量を達成しても多くのチャンネルで光量が不足して検出器全体として十分な飛跡検出性能を発揮できなくなると考えられる。そのためこの接続の不定性を定量的に理解しておくことが必要である。

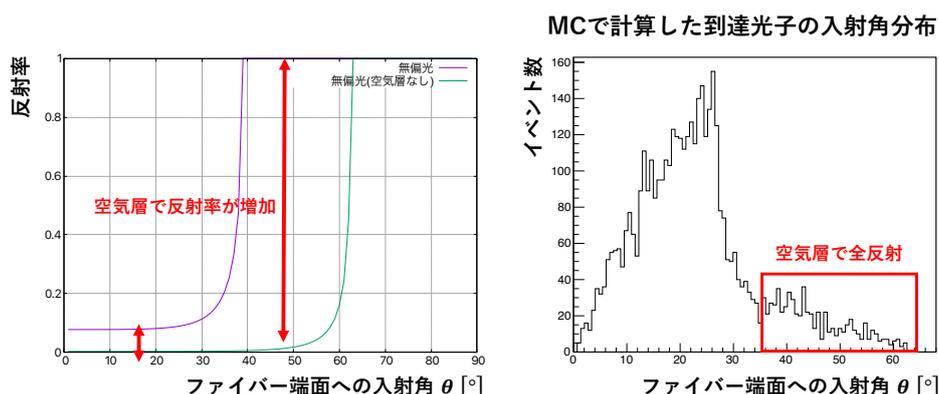


図 K.1: 空気層が存在することによる反射効果

今回新たに用意した MPPC 1350CS-01 は図 K.2 のようにサイズが従来のコネクタ内径より 0.3 mm 小さく、その分だけコネクタ内の MPPC 位置に不定性が生じることで一定確率でファイバー端面が受光面からはみ出し光量が大きく変動する懸念があった^{*121}。また図 K.3 のように MPPC の読み出しピン長さが従来より短いことで MPPC と読み出し用 PCB 基板を安定して接続できない懸念があった。MPPC 3075CS については GOMI コネクタと異なる接続コネクタを用いることから、今回同時にその接続安定性を評価した。

測定方法

測定は 6.1 節と同じセットアップを用いて行った。ファイバーへ同一強度の LED パルス光を照射してファイバーを通して伝搬した光子を MPPC で読み出し、ADC 積分値を求めてその平均を

^{*121} MPPC ファイバーの相対位置に 0.3 mm の不定性があるが、受光面の広さに同じ 0.3 mm の余分があるため問題にならない可能性もあった。

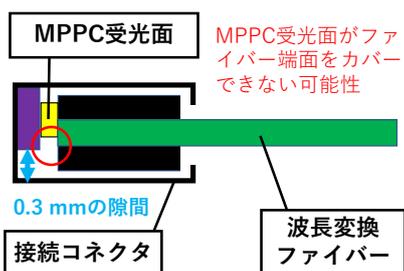


図 K.2: MPPC 位置の不定性による検出光量の変動



図 K.3: 短い読み出しピン

検出光量として記録した。測定は各接続方式で MPPC とファイバーを繋ぎ直しながら 7 回行い、測定値の標準偏差を平均で割ったものを変動率と定義した。この変動率が小さいほどファイバーと MPPC の接続面における光子の伝搬効率が安定していることを意味する。

$$\text{変動率} = \frac{\text{7回の測定の標準偏差}}{\text{平均測定光量}} \tag{K.1}$$

今回は図 K.4 のように MPPC 050CS を GOMI コネクタでファイバーに接続し基板のピンソケットを用いて読み出したもの (050CS+GOMI コネクタ)、MPPC 1350CS-01 を GOMI コネクタでファイバーに接続し基板のピンソケットを用いて読み出したもの (1350CS-01+GOMI コネクタ)、MPPC 1350CS-01 を GOMI コネクタでファイバーに接続し PCB 基板を用いて読み出しを行ったもの (1350CS+GOMI コネクタ+PCB 基板)、MPPC 3075CS を専用コネクタでファイバーに接続し基板のピンソケットを用いて読み出したもの (3075CS+3075CS コネクタ) の 4 パターンの接続方法で測定を行った。

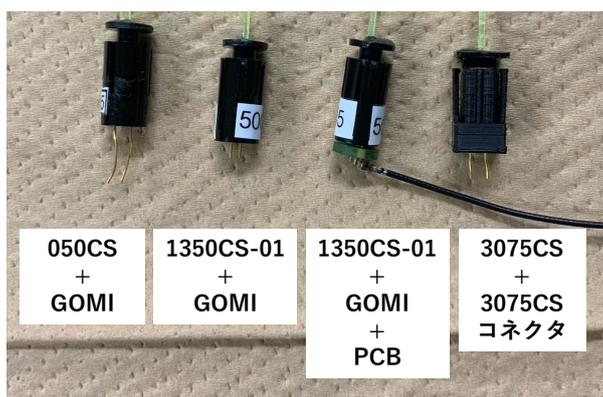


図 K.4: 測定した 4 つの接続パターン

測定結果

変動率の測定結果を表 K.1 に示す。

表 K.1: 接続方式毎の変動率

接続方式	変動率 [%]
050CS+GOMI コネクタ	9.8
1350CS-01+GOMI コネクタ	8.2
1350CS-01+GOMI コネクタ+PCB 基板	7.7
3075CS+3075CS コネクタ	4.2

従来の MPPC 050CS+GOMI コネクタの接続で変動値が最も大きく 9.8 % となった。新たに入手した MPPC について接続の不定性は従来を下回る水準で問題にはならないと結論できる。特に 1350CS-01+GOMI コネクタ+PCB 基板の接続における変動率が 1350CS-01+GOMI コネクタの接続のものを下回ることから、PCB 基板と MPPC ピンの接続由来の不定性はほとんど無視できることが分かる。

付 録 L 多様な方法の反射率評価

本付録では 7 章で行った反射率推定について、異なる方法での推定を検討する。

L.1 ファイバー直径の変更による光量差のみ用いた推定

セル模型においてファイバー直径を変更した際の光量変化は壁面反射率だけで決まるから、最も安全な見積もりと思われる。ただし不定性が大きいから本編ではさらに測定情報を加えて同時に推定する方法で行った。本節ではこの方法で求めた反射率が、7 章の推定値と矛盾しないことを見る。

6.8 式より壁面反射率 R は、

$$R = IR_{\text{FiberD-MC}}^{-1} \left(\frac{IR_{\text{FiberD}}}{IR_{\text{FiberEff}}} \right) \quad (\text{L.1})$$

L.1 式と書けて、ここで IR_{FiberD} および IR_{FiberEff} の測定値と不定性を考慮すれば従来セルの壁面反射率 R_{Conv} と 3M SR 反射シートの壁面反射率 R_{3M} は表 L.1 のようになる。

表 L.1: 壁面反射率の評価値

壁面	反射率 [%]
従来 (PLA フィラメント)	90.2 $\begin{smallmatrix} +4.8 \\ -6.6 \end{smallmatrix}$
3M SR 反射シート	104.0 $\begin{smallmatrix} (+3.4) \\ -4.8 \end{smallmatrix}$

これは 7 章の測定値と一致する。特に 3M SR 反射シートについて、評価値はカタログ記載値の反射率である 99% と一貫する。

L.2 ファイバー端面での反射に基づく壁面反射率評価

本節では 6 章で行ったファイバー端面への反射加工と光収集効率の測定結果から壁面反射率の評価を目指す。ここでファイバー端面での反射形式（拡散反射 / 鏡面反射）が光収集効率に影響するが、拡散反射はそのモデル化に必要なパラメータが多いことから再現が難しく、鏡面反射の 3M SR シートのみ反射率を評価する。

評価方法

今回、図 M.1 に示すようにファイバー端面の反射加工による光量の増加を再現するシミュレーションを作成した。生成した光子はファイバー内を伝搬し一部は反射体で反射してから MPPC に

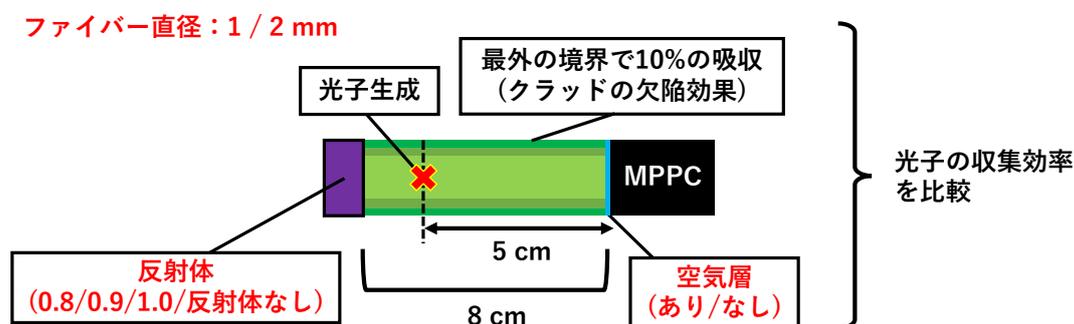


図 L.1: 複数の測定データを用いることによる反射率の同時決定

到達するが、生成した光子が MPPC へ到達する確率を収集効率としてシミュレーションのセットアップ毎に調べた。このセットアップは反射体の反射率、MPPC ファイバー間の空気層の有無、ファイバーの直径といったパラメータを変えながら複数用意してそれぞれで評価した。反射体がない場合には空気とファイバーの境界面におけるフレネル反射の確率を適用した。

ファイバーの非読み出し端面に反射体がない場合、ある場合で反射率 0.8、0.9、1.0 のときの光収集効率を調べて、反射体が無い状態に対する増加率を計算した。これをファイバーと MPPC 間に空気層がある状況と無い状況で調べて、その平均値を増加率と定義した。これをファイバー直径が 1 mm と 2 mm の場合でそれぞれ調べた。

結果

それぞれのセットアップについて調べた光収集効率およびその増加率を表 L.2 に示す。同じ反射

表 L.2: シミュレーションセットアップ毎の光収集効率

ファイバー直径 [mm]	空気層	光収集効率 (増加率)			
		反射体なし	反射率 0.8	反射率 0.9	反射率 1.0
1	あり	0.0706 (-)	0.1215 (1.721)	0.1219 (1.830)	0.1368 (1.938)
	なし	0.087 (-)	0.1347 (1.548)	0.1415 (1.626)	0.1492 (1.715)
	増加率	-	1.63 ± 0.09	1.73 ± 0.10	1.83 ± 0.11
2	あり	0.0757 (-)	0.1290 (1.704)	0.1364 (1.802)	0.1445 (1.909)
	なし	0.1035 (-)	0.1534 (1.482)	0.1605 (1.551)	0.1679 (1.622)
	増加率	-	1.59 ± 0.11	1.68 ± 0.13	1.77 ± 0.14

体を用いた場合でも空気層の有無により増加率が 20% 程度異なることが分かる。3M 反射シートの貼り付けによる光量の増加率は、 1.64 ± 0.07 (ファイバー直径 1 mm)、 1.89 ± 0.02 (ファイバー

直径 2 mm) であり、これを表の値と比べて内挿または外挿により空気層の有無毎に反射率を求めた。結果を表 L.3 に示す。ここで有+無の反射率は両者の平均で定義しており、増加率測定値の不

表 L.3: 各状況で計算した反射率 R_{3M}

ファイバー 直径 [mm]	空気層	反射率 R_{3M} [%]
1	有	72.6 ± 6.4
	無	91.5 ± 7.9
	有+無	82.1 ± 7.0
2	有	98.2 ± 1.8
	無	100.0
	有+無	99.1 ± 1.0

定性、空気層の有無による反射率推定値の不定性を考慮した。また外挿による反射率の推定値が 100% を超える場合は 100 に丸めた。

このように直径 1 mm のファイバーを用いた測定値は 82% 程度の反射率を好む一方で、直径 2 mm のファイバーを用いた測定値は反射率が 100% 付近を示した。両者がよく一致しないから合わせて結論を出すことはできない。この要因は明確でないが反射体の接着品質が影響した可能性があり、その場合は反射率が 100% 近くあれば説明がつく。いずれにせよ、3M SR 反射シートについて 80% 程度以上の反射率を期待できると言える。

付 録 M シミュレーションに基づく光量推定

本付録では WbLS の発光量およびシミュレーションの結果を用いて WbLS 検出器の光量を推定する。3M 反射シートをセルに用いて直径 2 mm のファイバーを用いて読み出し、非読み出し端面に 3M 反射シートを貼り付けて MPPC S13360-3075CS を用いて読み出す場合を考える。ここでは 3M SR 反射シートの反射率として 1 を仮定する。

飯田・2018^[92]によると、PC ベースの液体シンチレータは発光量が 13920 [光子/MeV] 程度であり WbLS の発光量はおよそ液体シンチレータの割合に一致するから、WbLS 標準サンプルの光量としては、 $13920 \times 0.15 \sim 2088$ [光子/MeV] 程度を期待する。図 M.1 のように WbLS 中における荷電粒子のエネルギー損失は約 1.46 MeV であり、直径 2 mm で壁面反射率 1 の WbLS 検出器

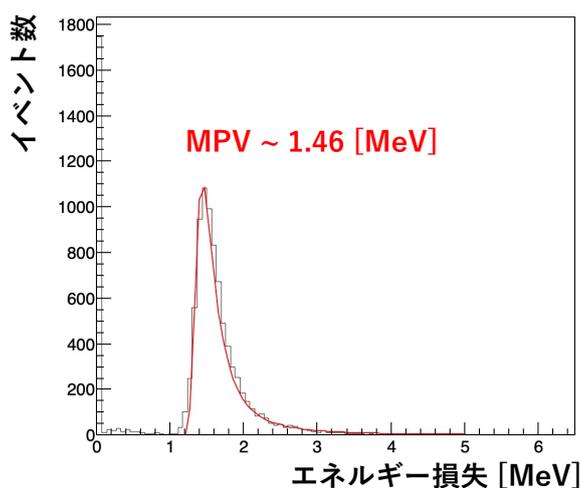


図 M.1: WbLS セル中における荷電粒子のエネルギー損失

セルにおける光収集効率は 0.329、そこからファイバー読み出し端面への到達確率は表 L.2 から、空気層がありとなしの平均値を取って 0.1547 を仮定する。MPPC の PDE はカタログ値の 0.5 を用いる。その結果光量期待値は M.1 式のように計算できて、

$$2088[\text{光子/MeV}] \times 1.46[\text{MeV}] \times 0.329[1/\text{fiber}] \times 0.1547 \times 0.5 = 77.6[\text{光子/fiber}] \quad (\text{M.1})$$

となる。これは 7.2.2 節で計算した 2 mm ファイバーの光量予想と比べて 3.2 から 2.6 倍大きく、WbLS 検出器においてまだ未解明な光子のロスが 3 倍程度存在する可能性を示している。

表目次

1.1	ニュートリノ振動パラメータの測定値 ^{[9][10][11]}	6
4.1	WbLS 標準サンプルの成分組成	29
4.2	測定に用いた WbLS サンプルの成分組成	31
4.3	測定に用いた WbLS サンプルの成分組成	32
4.4	測定に用いた WbLS サンプルの成分組成	34
4.5	用意した界面活性剤の基本性能	37
5.1	用意した Tyvek シートの厚さ	41
5.2	測定セルと加工法	43
5.3	測定セルと加工法	49
5.4	用いた反射シートの厚さおよび特徴	49
5.5	反射フィラメントの反射性能	52
5.6	WbLS セルの光量推定値	57
5.7	モデル関数の各パラメータ	57
6.1	コネクタ式のサンプルに用いた反射体	64
6.2	接着式のサンプルに用いた反射体	64
6.3	各サンプルごとの検出光量と変動率	68
6.4	ファイバーの加工組み合わせと最小検出効率	69
6.5	用いた MPPC のカタログ性能	70
6.6	MPPC 毎のクロストーク率と増加係数の測定結果	73
6.7	組み合わせ毎の N_{pixel}	74
6.8	MPPC 型番毎の検出光量と PDE 典型値	76
6.9	各サンプルの光量および光量増加率 IR_{FiberD}	79
7.1	R_{Conv} および R_{3M} の信用区間	85
7.2	最適値における各光量比のシミュレーション値と測定値の適合状況	86
7.3	段階 A における相対的な検出効率	87
7.4	段階 B における相対的な検出効率	87
7.5	段階 C における相対的な検出効率	87
7.6	光子の最終的な相対検出効率	88
7.7	期待光量と飛跡検出確率	89
8.1	ビームテストで用いた WbLS サンプル	92

8.2	各条件における平均クロストーク率	96
9.1	各サンプルにおける X 軸、Y 軸、Z 軸ファイバーの光量（補正值）	106
10.1	光量の状況と飛跡検出効率 [%]	116
11.1	用意した Tyvek シートの厚さ	124
11.2	用意した Tyvek シートの厚さ	125
C.1	各界面活性剤を用いて作製したサンプルの組成	134
C.2	溶解が見られたタイプ A サンプル	134
C.3	各界面活性剤を用いて作製したサンプルの組成	135
C.4	溶解が見られたタイプ C サンプル	135
D.1	作製した WbLS サンプルの組成	136
F.1	反射加工毎の $ \Delta $ と σ_{Fiber}	140
G.1	S-LS-R と S-3M-LS サンプルについて各測定の数値と最終的なサンプルの光量	142
H.1	モデル関数の各パラメータ	144
H.2	セル形状ごとのモデル関数パラメータの数値	145
K.1	接続方式毎の変動率	151
L.1	壁面反射率の評価値	152
L.2	シミュレーションセットアップ毎の光収集効率	153
L.3	各状況で計算した反射率 R_{3M}	154

図目次

1.1	W ボソンを媒介する物質効果のダイアグラム	3
2.1	ハイパーカミオカンデ実験の概要	8
2.2	J-PARC 加速器の概要	9
2.3	ニュートリノビームの内訳 ^[18]	9
2.4	Off-Axis 法	10
2.5	INGRID 検出器の概要	11
2.6	ND280 の概要	11
2.7	FGD の概要 (図を ^[27] より引用)	12
2.8	SuperFGD の概要	13
2.9	IWCD 検出器の構造	13
2.10	ハイパーカミオカンデ検出器の概要	14
2.11	HK 実験における δ_{CP} の感度推定 ^[34]	15
2.12	ニュートリノ振動測定の不定性 (T2K 実験 2023 年の振動解析より ^[18])、前置検出器データへのフィット後 (フィット前)	15
2.13	ニュートリノ反応断面積のエネルギー依存性 ^[36]	16
2.14	CCQE 反応のダイアグラム	17
2.15	CC1 π 反応のダイアグラム例	17
2.16	RFG モデルによる束縛陽子、自由陽子の反応の比較 ^[30]	18
2.17	REG モデルによる束縛陽子、自由陽子の散乱断面積の比較 ^[30]	18
2.18	RFG, LFG, SF における核子の運動量分布例 ^[43]	19
2.19	¹² C における陽子の運動量分布 ^[44]	19
2.20	2p2h 反応のダイアグラム	19
2.21	荷電レプトンで再構成されたニュートリノエネルギーと真のエネルギー差 ^[31]	19
3.1	水ベース液体シンチレータ検出器の概要	22
3.2	ニュートリノ反応点からの短距離飛跡	23
3.3	セルの光クロストーク	23
3.4	WbLS の概念図と実際のサンプル	24
3.5	ファイバーによる波長変換 (グラフは ^{[52][53]} より引用)	25
3.6	ファイバー中を伝搬する光子	26
3.7	MPPC における光子検出の原理	26
3.8	GOMI コネクタの原理	27
3.9	温度により分離する WbLS サンプル	28

4.1	温度測定の設定アップ	31
4.2	各サンプルの溶解温度帯	31
4.3	各サンプルが溶解した温度帯	32
4.4	水ベース液体シンチレータ割合と溶解温度帯の関係 ^[49]	33
4.5	WbLS 光量測定の設定アップ	34
4.6	WbLS 光量測定の回路	35
4.7	ADC 積分値の計算例	35
4.8	ランダウ分布のフィット例	35
4.9	光量測定の結果	36
4.10	液体シンチレータの光量	38
5.1	透過率の測定結果	41
5.2	透過率の測定結果	42
5.3	光量測定に用いたセル模型	43
5.4	加工に用いた反射シートとその貼り付け方	44
5.5	セル光量測定の設定アップ	44
5.6	セル光量測定のデータ取得回路	44
5.7	セルを通過しない宇宙線へのトリガー	45
5.8	セル光量測定における較正方法	46
5.9	セル光量の測定結果	46
5.10	反射面表面の拡大画像 (1 倍 + 1 mm スケール、6 倍 + 0.2 mm スケール)	48
5.11	反射シートを用いたセルの見た目例	50
5.12	反射シートの表面 (倍率 6)	50
5.13	反射スプレーを用いたセルの見た目	50
5.14	反射スプレーで加工した表面 (倍率 6)	51
5.15	反射塗料で加工したサンプルとその表面 (倍率 6)	51
5.16	アルミ蒸着で加工したサンプルとその表面 (倍率 6)	52
5.17	セルの光量測定の結果	54
5.18	Geant4 によるシミュレーションの概念	55
5.19	シミュレーションに用いたセルのデザイン	56
5.20	従来セルの反射率 R_{Conv} についての I_{WbLS}	58
6.1	ファイバー端面での光反射による光量増加の概念図	60
6.2	全長 L のファイバーで位置 x に生じる光子	61
6.3	ファイバー端反射率測定の設定アップ	62
6.4	ファイバー端反射率測定の設定アップ	63
6.5	2 種類の反射加工法	63
6.6	測定に用いた反射体の例	65
6.7	反射加工毎の光量増加率 IR_{Ref}	66
6.8	ファイバー端面で外部に脱出する光子	66
6.9	フレネルの法則で計算した反射率の向上効果	67

6.10	カットサンプルで観測された大光量の要因考察	68
6.11	S13360 シリーズ MPPC の PDE 波長依存性	71
6.12	典型的なダークノイズの ADC 積分値分布	72
6.13	実光子数と観測光子数の関係 (左)、実光子数に対する観測光子数の比 (右)	74
6.14	MC に基づく観測光子数期待値と検出分解能	75
6.15	シミュレーションの概要	76
6.16	MC で計算した $IR_{\text{FiberD_MC}}(R)$	78
6.17	今回の測定に用いたセルサンプル	79
6.18	測定のご概念図	81
7.1	複数の測定データを用いることによる反射率の同時決定	84
7.2	2 mm ファイバーを用いたセル模型における光収集効率のモデル化	85
7.3	反射率の組み合わせ毎の測定値との適合度 (p 値)	86
8.1	化学研究所ビームラインの概要 ^[84]	91
8.2	検出器のセットアップ	91
8.3	WbLS 検出器試作機	92
8.4	データ取得回路	93
8.5	ホドスコープにおけるマルチイベントとシングルイベント	94
8.6	各セルの名称	95
8.7	ファイバーの位置関係とクロストーク	96
8.8	クロストーク率の分布	96
8.9	イベント選択の例	97
8.10	光量分布へのフィッティング例	97
8.11	イベント選択の方法と散乱イベント	98
8.12	測定データと MC の比較	98
9.1	テストビームラインの構造 ^[88]	101
9.2	検出器のセットアップ	101
9.3	各層の試作機	102
9.4	データ取得回路	103
9.5	HG および LG における Input charge と ADC 値 ^[89]	104
9.6	イベント選択と光量分布のフィッティング	105
9.7	各サンプルにおける X 軸の光量	106
9.8	各サンプルにおける Y 軸の光量	106
9.9	3M-2 mm サンプルにおける Z 軸の光量	106
9.10	粒子の入射位置に応じたセルの相対光量	108
9.11	各サンプルのセル 0 における粒子通過位置ごとの光量	108
9.12	各サンプルにおける各軸ファイバーのクロストーク率	110
9.13	各サンプルにおける粒子通過位置とクロストーク率	111
9.14	ファイバーの発光量評価のご概念	112

9.15	ファイバーの発光量に対するフィット例	112
10.1	飛跡検出効率をシミュレーションした2通りの状況。	115
10.2	セル内をかすって通過するイベント	115
10.3	光量と飛跡検出効率の関係	116
10.4	ALICE 実験の TPC における粒子毎の dE/dx ^[90]	117
10.5	水中におけるパイオンと陽子のエネルギー損失および飛跡長	118
10.6	本項で用いる粒子識別手法	119
10.7	陽子とパイオンの N_{Track} 分布およびその識別の ROC 曲線	119
10.8	dE/dx の測定による反応識別	120
10.9	dE/dX による電子飛跡の識別性能	120
10.10	多様な条件における電子飛跡の識別性能	121
11.1	(a) 細部構造の造形能力テストのサンプル	122
11.2	(b) 平面構造の造形能力テストのサンプル	122
11.3	WbLS の概念図と実際のサンプル	122
11.4	(a) 上部から WbLS を注入する方式	123
11.5	(b) 下部から WbLS を注入する方式	123
11.6	WbLS の注入法	123
11.7	20 日目のサンプル	125
A.1	酸素、炭素原子核の密度分布 ^[30]	130
A.2	酸素、炭素原子核の核子運動量分布 ^[30]	130
A.3	SF モデルにおける炭素、酸素原子核の Removal Energy 分布 ^[43]	131
B.1	PMT 動作安定性試験の測定回路	132
B.2	PMT 動作安定性試験の結果	133
E.1	透過率測定の設定アップ	138
E.2	透過率測定の実験取得回路	138
E.3	取得データの ADC 積分値分布の例	139
H.1	MC で計算した光量比と反射率の関係およびその近似関数	143
H.2	MC で計算した光収集効率と反射率の関係およびその近似関数	144
I.1	読み出し端からの距離 x と相対検出効率 $C_{Eff}(x)$	146
I.2	両端で読み出した場合の光量比較	147
J.1	MC に基づく観測光子数期待値と検出分解能	148
K.1	空気層が存在することによる反射効果	149
K.2	MPPC 位置の不定性による検出光量の変動	150
K.3	短い読み出しピン	150
K.4	測定した4つの接続パターン	150

L.1	複数の測定データを用いることによる反射率の同時決定	153
M.1	WbLS セル中における荷電粒子のエネルギー損失	155

参考文献

- [1] W. Pauli. Dear radioactive ladies and gentlemen. *Phys. Today*, 31N9:27, 1978.
- [2] C. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison, H. Kruse, and A. D. McGuire. Detection of the free neutrino: a confirmation. *Science*, 124 3212:103 – 4, 1956.
- [3] G. Danby, J. M. Gaillard, Konstantin A. Goulianos, L. M. Lederman, Nari B. Mistry, M. Schwartz, and J. Steinberger. Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos. *Phys. Rev. Lett.*, 9:36 – 44, 1962.
- [4] K. Kodama et al. Observation of tau neutrino interactions. *Phys. Lett. B*, 504:218 – 224, 2001.
- [5] Y. Fukuda et al., ” Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos” , *Phys. Rev. Lett.*, 81, 1562 (1998).
- [6] L. Wolfenstein, ” Neutrino oscillations in matter” , *Phys. Rev. D*, 17, 2369 (1978).
- [7] S.P. Mikheyev and A. Yu. Smirnov, ” Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos” , *Sov. J. Nucl. Phys.*, 42, 913-917 (1985).
- [8] Particle Data Group, Neutrino Masses, Mixing, and Oscillations <https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2023-rev-neutrino-mixing.pdf>
- [9] Particle Data Group, Neutrino Mixing. <https://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S067&home=>
- [10] F. Capozzi et al., “Unfinished Fabric of the Three Neutrino Paradigm” , *Phys. Rev. D* 104, 083031 (2021).
- [11] NuFit-6.0: Updated global analysis of three-flavor neutrino oscillations <https://arxiv.org/2410.05380>
- [12] K. Abe et al. (The T2K Collaboration), “Measurements of Neutrino Oscillation Parameters from the T2K Experiment using 3.6×10^{21} protons on target” , *Eur. Phys. J. C* 83, 782 (2023).
- [13] A.D. Sakharov., ” Violation of CP Invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the uni- verse.” , *Pisma XZh. Eksp. Teor. Fiz.*, 5, 32-35 (1967).

- [14] S. Pascoli, S. T. Petcov, and Antonio Riotto. Connecting low energy leptonic CP violation to leptogenesis. *Physical Review D*, 75(8), Apr 2007.
- [15] P. F. de Salas et al., “2020 Global Reassessment of the Neutrino Oscillation Picture”, *J. High Energ. Phys.* 02, 071 (2021).
- [16] ZZ. Xing, ZH. Zhao, “A Review of $\mu - \tau$ Flavor Symmetry in Neutrino Physics”, *Rep Prog Phys.* 79(7), 076201 (2016).
- [17] K. Abe et al. (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration). Hyper-Kamiokande Design Report. arXiv:1805.04163 (2018)
- [18] T2K Collaboration, “Measurements of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using 3.6×10^{21} protons on target,” *Eur. Phys. J. C* **83**, 782 (2023). doi:10.1140/epjc/s10052-023-11819-x.
- [19] K. Abe et al. (The T2K Collaboration), “Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam”, *Phys. Rev. D* 88, 032002 (2013).
- [20] K. Abe et al. (The T2K Collaboration), “Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector”, *Nucl. Instrum. Meth. A* 694, 211 (2012).
- [21] ハイパーカミオカンデ 石塚正基 学術会議 素粒子物理学・原子核物理学分科会 シンポジウム <https://conference-indico.kek.jp/event/193/contributions/3533/attachments/2388/3066/Neutrino-HyperKamiokande-2022Sep24.pdf>
- [22] K. Abe et al., “T2K ND280 Upgrade - Technical Design Report”, <https://arxiv.org/abs/1901.03750>
- [23] N. Abgrall et al., “Time Projection Chambers for the T2K Near Detectors”, *Nucl. Instrum. Meth. A* 637.1 25 (2011).
- [24] P. A. Amaudruz et al., “The T2K Fine-Grained Detectors”, *Nucl. Instrum. Meth. A* 696, 1 (2012).
- [25] D. Allan et al., “The Electromagnetic calorimeter for the T2K Near Detector ND280”, *JINST* 8, 10019 (2013).
- [26] S. Aoki et al., “The T2K Side Muon Range Detector (SMRD)”, *Nucl. Instrum. Meth. A* 698, 135 (2013).
- [27] K. Abe et al. (T2K Collaboration), “Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K,” *Phys. Rev. D* 101, 112004 (2020).
- [28] A. E. Dergacheva et al., “The Near Neutrino SuperFGD Detector for the T2K Experiment,” *Phys. Part. Nuclei* **56**, 855–860 (2025). doi:10.1134/S106377962470240X. <https://link.springer.com/article/10.1134/S106377962470240X>

- [29] A. Bernstein et al., “Report on the Depth Requirements for a Massive Detector at Home-stake,” arXiv:0907.4183 [hep-ex] (2009). doi:10.48550/arXiv.0907.4183. <https://arxiv.org/abs/0907.4183>
- [30] Y. Hayato, “ニュートリノ反応のお話”, (講演資料)(2014). <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nuf Frontier/files/hayato-20140111.pdf>
- [31] ニュートリノ反応の物理とニュートリノ振動実験の現状と将来 , 木河達也 (京都大学), 新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」キックオフミーティング (2018). https://indico-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/event/3811/contributions/8304/attachments/8739/9975/Kikawa_nucosmos_a02.pdf
- [32] 兼村侑希, 東京大学, Neural Network を用いた SK-Gd における中性子捕獲効率の評価. https://www.lowbg.org/ugap/ws/yr2022/Data/Prog/S27_Kanemura.pdf
- [33] T2K 実験公式ページ, T2K and beyond. <https://t2k-experiment.org/ja/t2k-and-beyond/>
- [34] Hyper-Kamiokande Collaboration, “Sensitivity of the Hyper-Kamiokande experiment to neutrino oscillation parameters using accelerator neutrinos,” arXiv:2505.15019 (2025). doi:10.48550/arXiv.2505.15019. <https://arxiv.org/abs/2505.15019>
- [35] K. Abe, et al., Eur. Phys. J. C 83(9), 782 (2023). DOI 10.1140/epjc/s10052-023-11819-x
- [36] Y. Ashie, J. Hosaka, K. Ishihara, Y. Itow, J. Kameda, Y. Koshio et al., ” Measurement of atmospheric neutrino oscillation parameters by Super-Kamiokande I” , Phys. Rev. D 71, 112005 (2005).
- [37] R. A. Smith and E. J. Moniz, “Neutrino Reactions on Nuclear Targets” , Nucl. Phys. B 43, 605 (1972).
- [38] O. Benhar, A. Fabrocini, S. Fantoni, and I. Sick, “Spectral Function of Fine Nuclei and Scattering of GeV Electrons” , Nucl. Phys. A 579, 493 (1994).
- [39] O. Benhar and A. Fabrocini, “Two Nucleon Spectral Function in Infinite Nuclear Matter” , Phys. Rev. C 62, 034304 (2000).
- [40] J. Nieves, E. Oset, and C. Garcia-Recio, “A Theoretical Approach to Pionix Atoms and the Problem of Anomalies” , Nucl. Phys. A 554, 509 (1993).
- [41] J. Nieves, I. Ruiz Simo, and M. J. Vicente Vacas, “Inclusive Charged-Current Neutrino-Nucleus Reactions” , Phys. Rev. C 83, 045501 (2011).
- [42] M. Valverde, J. E. Amaro, and J. Nieves, “Theoretical Uncertainties on Quasielastic Charged-Current Neutrino-Nucleus Cross Sections” , Phys. Lett. B 638, 325 (2006).
- [43] Stephen Dolan, Removal energy uncertainty in the spectral function. https://www.t2k.org/asg/meeting/2020/2020-02-13/ebinSF/at_download/file

- [44] K. Nakamura et al., “The reaction $12\text{c}(e, e' p)$ at 700 MeV and DWIA analysis”, Nuclear Physics A 268, 381 – 407 (1976).
- [45] M. Martini, M. Efcson, G. Chanfray, and J. Marteau, “Unified Approach for Nucleon Knock-Out and Coherent and incoherent Pion Production in Neutrino Interactions with Nuclei”, Phys. Rev. C 80, 065501 (2009).
- [46] Y. Hayato and L. Pickering, “The NEUT neutrino interaction simulation program library,” Eur. Phys. J. Special Topics **230**, 4469–4481 (2021). doi:10.1140/epjs/s11734-021-00287-7. arXiv:2106.15809. Program Library. <https://arxiv.org/pdf/2106.15809>
- [47] 浜松ホトニクス MPPC 製品情報.https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html
- [48] “Characterization of the optical model of the T2K 3D segmented plastic scintillator detector,” arXiv:2410.24099 (2024). doi:10.48550/arXiv.2410.24099. <https://arxiv.org/abs/2410.24099>
- [49] 恩田直人, 水-ニュートリノ反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発, 京都大学 修士論文 (2024).
- [50] H. Hans et al., “Development, Characterization and Production of a novel Water-based Liquid Scintillator based on the Surfactant TRITON X-100,” arXiv:2405.05743 (2024). doi:10.48550/arXiv.2405.05743. <https://arxiv.org/abs/2405.05743>
- [51] S. Mufson et al., “Liquid scintillator production for the NOvA experiment,” Nucl. Instrum. Meth. A **799**, 28–35 (2015). doi:10.1016/j.nima.2015.07.026. <https://arxiv.org/abs/1504.04035>
- [52] 株式会社クラレ PSF 製品情報. <http://kuraraypsf.jp/psf/>
- [53] T. Kin, “Development of a method to create a plastic scintillator with 3D printer,” 科学研究費助成事業 研究成果報告書 (課題番号 26630485), 2016. <https://kaken.nii.ac.jp/ja/file/KAKENHI-PROJECT-26630485/26630485seika.pdf>
- [54] 五味慎一, 半導体光検出器 MPPC の性能評価システムの構築, 京都大学, 修士論文, (2008).
- [55] 東北大学 先端量子ビーム科学研究センター ホームページ.<https://www.raris.tohoku.ac.jp/>
- [56] N. Onda et al., “Development and performance evaluation of a water-based liquid scintillator tracking detector with wavelength-shifting fiber readout,” Prog. Theor. Exp. Phys. **2025**, 123H02 (2025). doi:10.1093/ptep/ptaf164. <https://arxiv.org/abs/2507.18893>
- [57] 浅野有香, ニュートリノと水の反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータの開発, 京都大学, 修士論文 (2023).

- [58] 浜松ホトニクス 光電子増倍管アセンブリ H7415 <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/pmt-assembly/head-on-type/H7415.html>
- [59] KAO 界面活性剤カタログ https://chemical.kao.com/jpja/search/result.html?q=%E3%82%A8%E3%83%9E%E3%83%AB%E3%82%B2%E3%83%B3&start=20&ms.ps=page_mode%3APATTERN_B®ion=jp
- [60] 三洋化成 ノニオン界面活性剤カタログ https://solutions.sanyo-chemical.co.jp/products/nonion_surfactants/#:~:text=%E3%83%8A%E3%83%AD%E3%82%A2%E3%82%AF%E3%83%86%E3%82%A3%E3%83%BC%20CL,8
- [61] KamLAND Collaboration, “KamLAND: a Liquid Scintillator AntiNeutrino Detector at the Kamioka site,” (KamLAND Design Report) (1998). https://web.stanford.edu/group/grattalab/kamland_design_report.pdf
- [62] H. O. Back et al. (Borexino Collaboration), “Study of phenylxylylethane (PXE) as scintillator for low energy neutrino experiments,” Nucl. Instrum. Meth. A **585**(1–2), 48–60 (2008). doi:10.1016/j.nima.2007.10.045.<https://arxiv.org/abs/physics/0408032v2>
- [63] 酒井俊郎, “乳化剤フリー油中水滴型 (W/O) エマルションの分散安定化機構の解明と分散安定化技術の開発 (Mechanism on Colloidal Stabilization of Emulsifier-free Water-in-Oil Emulsions),” コスメトロジー研究報告 **22**, 26–31 (2014).https://www.kose-cosmetology.or.jp/research_report/archives/2014/fullVersion/Cosmetology%20Vol122%202014%20p26-31%20Sakai_T.pdf
- [64] THORLABS 社 PTFE 拡散反射シート <https://www.thorlabs.co.jp/item/PMR10R3>
- [65] A. Chavarria, A study on the reflective properties of Tyvek in air and underwater, Duke University (2007).
- [66] Tyvek フラッシングシート <https://www.tyvek.co.jp/construction/product/flushing/>
- [67] SUPER コート MAX https://www.ichimura.co.jp/products/pro_006.html
- [68] スーパーエアテックス KD <https://www.fukuvi.co.jp/product/4/03/37>
- [69] Tyvek 総合カタログ https://www.tyvek.co.jp/request/2023_catalog.pdf
- [70] 日本 3D プリンター株式会社 Raise3D Pro3 <https://www.raise3d.jp/3dprinter/pro3>
- [71] Raise3D — PLA <https://www.raise3d.jp/ofp/premium-pla>
- [72] ケニス株式会社 アルミシート 3-115-0800 https://kenis.meclib.jp/library/books/S4100/book/#target/page_no=1334
- [73] 齊藤光学 顕微鏡 SKM-Z200C-PC <https://saitohk.com/pc/SKM-Z200C-PC.html>

- [74] 東レ株式会社 ルミラーシート <https://www.films.toray/products/lumirror/>
- [75] 3M SR シート DF2000MA カタログ <https://multimedia.3m.com/mws/media/9824490/3mtm-specular-film-df2000ma-technical-data-sheet.pdf>
- [76] 株式会社 トーカイ 金属膜ミラー <https://www.tokai-inc.jp/item-list/item-list-251/>
- [77] 東京インキ株式会社 <https://www.tokyoink.co.jp/>
- [78] J.Allison et al., "Recent Developments in Geant4", Nucl. Instrum. Meth. A, 835, 186-225 (2016).
- [79] J. Allison et al., "Geant4 Developments and Applications", IEEE Trans. Nucl. Sci., 53, 270-278 (2006).
- [80] S. Agostinelli et al., "Geant4 - A Simulation Toolkit", Nucl. Instrum. Meth. A, 506, 250-303 (2003).
- [81] Y11 fiber attenuation tests, Oleg Mineev, INR RAS, Moscow, Nov. 13, 2018 <https://t2k.org/ndup/superfgd/meeting/2018/superfgd-november-13-2018/Y11%20fiber/>
- [82] Optical Cement EJ-500 <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-500>
- [83] 京都大学 化学研究所 電子線形加速器 KEL <https://pbs.kuicr.kyoto-u.ac.jp/research-equipments-ja/electron-linac-ja/>
- [84] KEL ビームライン提供資料 加速器研究施設
- [85] Open-It, 汎用 MPPC 読み出しモジュール, <https://openit.kek.jp/project/MPPC-Readout-Module/public>
- [86] 浜松ホトニクス社, S13361-3050 シリーズ データシート, https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s13361-3050_series_kapd1054e.pdf
- [87] 高エネルギー加速器研究機構 PF-AR 測定器開発テストビームライン <https://itdc.kek.jp/testBeamLine/index.html>
- [88] 高エネルギー加速器研究機構, PF-AR 測定器開発テストビームラインで初ビーム (2022). <https://www.kek.jp/ja/topics/20220311-2>
- [89] Naruhiro Chikuma, Firmware Update for NIM EASIROC Module (2015).
- [90] Hadronic resonances from ALICE in pp collisions https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2012/18/epjconf_aust2012_00009/epjconf_aust2012_00009.html

-
- [91] C. W. de Jager, H. de Vries, and C. de Vries, “Nuclear Charge- and Magnetization-Density-Distribution Parameters from Elastic Electron Scattering,” *At. Data Nucl. Data Tables* **14**, 479–508 (1974). https://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~gunji/tmp/tmp2/AtomicData_NuclearData_14_485.pdf
- [92] 飯田崇史, シンチレータの原理と応用例, 超新星ニュートリノ研究会 (チュートリアル講演資料) (2018).