

著者	ふりがな 氏名	はやし こうき 林 洸樹
表題	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	

本論文の内容に捏造・改ざん・盗用はない（チェックをお願いします）

論文概要（全体で4ページに収まるようにページを増やして構いません）

研究の背景（1章-3章）

ニュートリノ振動は、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。この振動確率に表れる **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磁場型の前置検出器は炭素標的を用いる。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、本研究は HK 検出器と同じ水標的を用いた前置検出器、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混合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-ニュートリノ反応を測定できることが最大の特徴である。WbLS 検出器は、図 1 に示すように 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、各セルの発光を、内部に通し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光検出器 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。

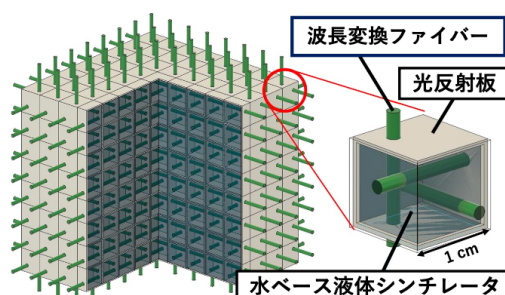


図 1. 水ベース液体シンチレータ検出器の基本構造

はじめ WbLS 検出器は要求性能が不明確であったが、本研究は 3.1.3 節にて検出器の水割合、セルの飛跡検出効率、隣接セルへの光漏れの割合（クロストーク率）の要求基準を定量的に設定した。この要求値等に基づき WbLS の要求性能を決定した。こうして開発の指針を明確化した。

従来の開発では読み出し光量が目標値の 20 [p.e.(photon equivalent) /fiber] より 4 倍程度少なく、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。そこで本研究は検出器の光量の改善とクロストークの抑制を主目標として開発を行った。

検出器の開発（4章-7章）

【4章】水ベース液体シンチレータの開発

4章では、主に WbLS の発光量向上に取り組んだ。これまでの開発では、WbLS を作製する上で用いる重量計は測定精度が不十分であったため、今回新型の電子天秤を導入し 4.3 節で微量の波長変換剤濃度までコントロールした初めての WbLS 光量測定を行った。ここから液体シンチレータの成分が

光量に与える影響を評価した。4.4 節では WbLS の発光量増大のために、液体シンチレータ溶媒を既存のプロトドクメンから変更する方法を考案しその効果を検証した。溶媒の密度が WbLS の溶解に影響を与えるという仮説は独自のもので今回これを確かめた。同時に先行研究で効果のあった界面活性剤の改良による光量向上を試みた。結果は光量の向上には繋がらなかったものの、今後の開発における検出器の光収集効率向上という方針を決定する重要な動機となった。

【5章】検出器セルにおける光収集効率の向上

5 章では、セルの壁面に反射加工を行い光子をセル内に局在化させることで光収集効率の向上を目指した。5.2 節では大型のセル模型内部に様々な反射シートを貼り付けて宇宙線通過時の読み出し光量を測定したが、ここでセル表面を顕微鏡で観察することで、滑らかな表面構造が高反射率につながるという仮説を提案した。この仮説に基づき 5.3 節では 19 種類の反射加工を考案して、これを大型セル模型に行うことで約 2 倍の光量向上を確認した。5.4 節ではシミュレーションの結果に基づき、セルの壁面反射率による光収集効率の変化が妥当な近似関数で高精度で再現できることを示し、これを用いた検討から実サイズの検出器セルにおいても約 2 倍の光量向上が可能であることを示した。

【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

6 章では、波長変換ファイバーおよび MPPC における検出器の光収集効率向上に取り組んだ。6.1 節ではファイバーの非読み出し端面での反射加工による光量向上の効果を測定で評価した。ここで図 2 のように LED パルス光を用いて短時間で反射効果を測定するセットアップを考案し、遮光からサンプルの交換と再測定を容易に行える構造により、19 種類の反射加工で 3 サンプルを行う測定量の高い再現性で実現した。その結果、ファイバーの端面に反射シートを貼り付ける加工により光量が 1.64 倍向上することを示した (直径 1 mm のファイバーを用いた場合)。また

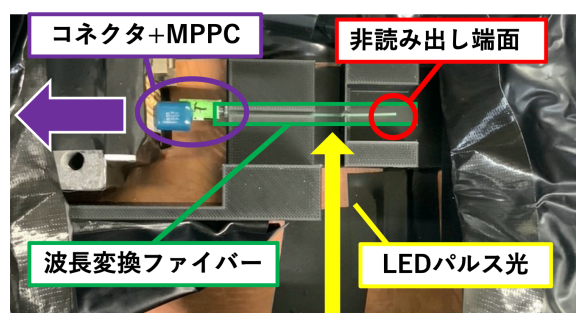


図 2. ファイバー端面の反射加工による光量向上効果測定の設定アップ

6.4.2 節では、この加工法が直径 2 mm のファイバーを用いる場合は 1.89 倍とより大幅に光量を向上することを示した。

6.1.4 節ではファイバー端面をダイヤモンドカッターで研磨した状態とハサミでカットした状態で生じる光量の違いを測定してカット加工の方が光量が高くなることを発見した。本研究はさらにこのカット状態による光量の増加が偶発的なものではなく安定して実現可能なものであることを示し、自身が作成したフレネル反射の計算コードに基づきこの現象が空気層とファイバーコア間での全反射によって説明できる可能性を考察した。そして 6.2 節では検出器に用いる 6 万本のファイバーについて全長が 50 cm と 200 cm の 2 通りあることに注目し、特に 50 cm の長さを持つ 4 万本のファイバーについて端面をハサミでカットするだけで十分な光量を確保できることを数値計算で示した。

6.3 節では MPPC の改善による光検出効率の向上を評価した。この評価を行うにあたり、6.3.2 節で MPPC のピクセルクロストークによる光量の増加バイアスを、ダークノイズの測定から求めた補正係数で補正する方法を考案した。6.3.3 節では MPPC のピクセル数が不足することによる光量の飽和効果に注目し、特にこの効果による検出光量の分解能悪化をモンテカルロ計算で再現、大光量を測定する特定の条件下で影響することを示した。そして光検出効率の評価から、用いる MPPC の最適化により光量を約 2 倍向上できることを示した。

6.4 節では光量向上とクロストーク抑制のために、ファイバー直径を 1 mm から 2 mm に変更する方法を試行した。ファイバー直径の変更が検出器の光量に与える影響を測定およびシミュレーションで評価して、特に 6.4.3 節では直径が 1 mm と 2 mm のファイバーに接触した光子が検出される効率の比に約 1.15 倍の有意な差があることを発見した。この結果等から、ファイバー直径を変更した場合でも検出器の光量および水割合を維持可能であることを示した。

【7章】検出器の基本性能の評価

7 章では、これまで行った開発の結果から WbLS 検出器に期待される性能を検討した。

セルの壁面反射率について、先行研究における 2 度の推定値に差があり、また本研究における改良

後の反射率も分からなかった。検出器性能のシミュレーションを精度よく行い、クロストークの抑制状況を予想するにはこの推定が必要であり、7.1 節では大型セル模型のファイバー直径や反射加工の有無を変更した際の光量比を同時にフィッティングする反射率評価方法を考案し改良前後の壁面反射率を評価した。この結果から反射シートによる改善後の壁面反射率が 100%に近いことを示した。この結果は反射率最適値と測定データの適合度 (p 値) を確認、過去の反射率評価値、反射シートのカタログ値と比較を行った他、他の推定方法も併用して検証した。ここで求めた反射率を用いたシミュレーションにより、7.2 節では検出器の飛跡検出効率が目標水準にあると推定した。

検出器の性能評価 (8 章-10 章)

ここまでの結果から、WbLS 検出器について光量とクロストークの改善が見込めるため、本研究は電子ビームを用いた試作機の性能評価を実施した。

【8 章】 化研ビームラインにおける試作機の性能評価

京都大学 化学研究所 (化研) において、エネルギー 50 MeV、20Hz 電子ビームを用いた試作機の性能評価を行った。セル壁面に反射シートを用いて読み出しファイバーが 1 mm と 2 mm の 2 通りの試作機を作製して読み出し光量を評価した。結果はそれぞれの試作機で 21.7 [p.e./fiber]、27.2 [p.e./fiber] となり、目標値以上の光量を期待できることを確認した。ただし比較的低エネルギーの電子ビームを用いることで、電子の散乱効果から測定値のバイアスが懸念されることを踏まえて、詳細な追加測定が望ましいことを示した。

【9 章】 KEK ビームラインにおける試作機の性能評価

前章の結果を受けて、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) においてエネルギー 4 GeV、1.3 kHz の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。図 3 のデザインの試作機を反射シートや読み出しファイバー直径を変更した複数タイプ用意して性能を調べた。その結果、全ての試作機で光量は全て目標値の 20 [p.e./fiber] を上回り、最大のものは 35.3 [p.e./fiber] で 1.5 倍以上の光量を達成した。試作機のクロストーク率は、読み出しに直径 2 mm のファイバーを用いたサンプルで約 2.9% となり目標値の 3% を達成した。この値は 1 mm ファイバーのサンプルと比較して約 2 倍低く、ファイバー直径を増やすことでクロストークが抑制されることを確認した。

9.3.2 節ではセル内におけるビーム通過位置に依存した光量の変動傾向を調べて、ファイバー付近をビームが通過した際に光量が増加すること、直径 1 mm のファイバーで読み出す場合は 2 mm の場合と比べて光量の様性が向上することを示した。この結果はシミュレーションと比較して検討し、ファイバーに重なる領域をビームが通過した際に測定データの光量が過剰であることから、9.3.5 節でビームによるファイバー自体の発光量を評価して、この過剰がファイバー発光で説明できることを示した。またセル上部に気泡由来の低光量領域が存在することを指摘して、対策を 11 章で検討した。

【10 章】 粒子検出能力の評価

10 章では、ビームテストの結果から WbLS 検出器の粒子検出能力をシミュレーションで評価した。10.1 節ではセルの飛跡検出効率を、セルを通過するビーム位置に応じた光量変動を考慮する新たな手法で評価して、直径 1 mm と 2 mm のファイバーを用いた読み出しの両方について 95% 程度であり、実用水準にあることを示した。10.2.1 節では飛跡の距離あたりエネルギー損失 (dE/dx) を利用した陽子と π^+ の識別能力を検討、飛跡の初期運動量方向に依存しない方法を考案して、シミュレーションにより 97% 以上の精度で識別可能であることを確かめた。また 10.2.2 節では、電子ニュートリノ反応断面積の測定に重要な、電子陽電子対飛跡および電子飛跡の識別をシミュレーションして、真のエネルギー損失を用いた理想的な識別と 2% 以内で同じ精度で識別できることを確認した。ここから WbLS 検出器は十分な粒子検出能力を持つと結論付けた。

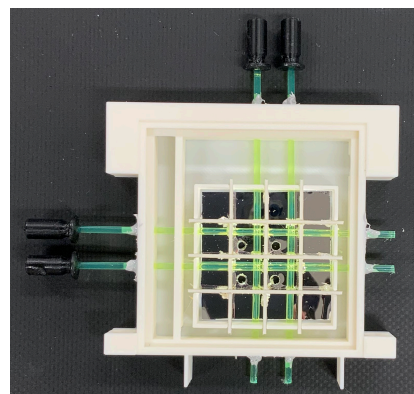


図 3. 化研および KEK のビームテストで用いた試作機のデザイン

検出器の実現に向けた展望 (11章-12章)

【1.1章】 検出器の実現に向けた検討

11章では、検出器の構造の工夫と長期安定性を検証した。WbLS 検出器はセル内に気泡が残らないことが重要で、11.1.2 節では WbLS の注入方法を工夫して気泡の残留を防ぐ方法を 2 回の WbLS 注入試験から考察した。ここで上部に溜まった液面がファイバー穴を塞ぐことが問題であり、下部から WbLS を注入する方法が有効であることを示した。11.2.1 節では WbLS に対するファイバーの溶解耐性を検証して、1 年程度で溶解の兆候が見られたことから表面への保護加工が必要であることを示した。11.2.2 節では一度成分が分離した WbLS が適切な温度帯で維持した場合でも元の状態に戻らない場合があることを発見し、この対策を検討した。

【1.2章】 結論

本研究はセル壁面への反射シート貼り付け、ファイバー端面での反射加工、MPPC の変更、ファイバー直径の改善により読み出し光量を向上、クロストークの抑制を行った。そして電子ビームを用いた試作機の性能評価を行い、光量およびクロストークが目標値を達成したことを確認した。次に検出器の粒子検出能力をシミュレーションで検証し、WbLS 検出器が実用水準の飛跡検出効率と粒子識別性能を持つことを示した。

検出器開発の次の段階として、気泡の残留防止、長期的な安定動作の保証が重要であり、検出器のデザイン確定を経た後の実用化が期待される。

アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で 4 ページ以内に収まる範囲でページを増やして構いません。)

本研究は検出器の光量向上とクロストーク改善に力を入れて取り組んだ。そのために、はじめに 5 章で反射シートをセル壁面に用いることで反射率が高くなり光量が向上することを示した。本研究はこれを試作機で実現するために、3D プリンターで形成した板状部品に反射シートを貼り付けてから組み合わせてセルを形成するデザインを考案したが、これは独自のアイデアである。6.1 節ではファイバー端面に反射シートを貼り付けることで光量が 1.64 倍 (直径 1 mm)、1.89 倍 (直径 2 mm) 向上することを示したが、これは本研究独自の手法である。ここで従来の検出器で実際にファイバー端面へ行われた反射加工として端面へのアルミ蒸着があるが、この光量向上率は先行研究で 1.4 倍程度以下であり本研究の測定では約 1.24 倍であった。そのため、今回先行研究より効果的な反射加工法を開発できた。また 6.4 節で行った、ファイバー直径を 1 mm から 2 mm に変更して光量を改善し同時にクロストークを抑制するという工夫は、セル型の飛跡検出器として本研究独自の試みである。

これら改善の効果を実証するために行った 2 度のビームテストは、ビームライン利用申請書の作成、実施計画から事前の測定環境シミュレーション、セットアップの準備、当日の測定、データの解析および考察まで自ら行ったものである。この測定から試作機の読み出し光量が最大で 35.3 [p.e./fiber] となることを示し、目標値の 1.5 倍の光量を達成した。これは本研究の工夫で約 7.1 倍光量が向上したことを示している。また、この光量はスイスグループの類似研究と比べて 5 倍以上である。クロストーク率について、2 mm のファイバーを用いた試作機サンプルで目標値の 3%以下を達成した。これは 1 mm のファイバーを用いたサンプルから約 2 倍改善した値であり、直径が大きいファイバーがクロストーク抑制に有効であるという本研究の仮説を確認した。

このビームテストにおいて、セル内のビーム通過位置に応じた光量変動が大きくシミュレーションと測定の傾向が整合することを確認したため、本研究はセルの飛跡検出効率をこの光量変動を考慮する手法で初めて評価した。この結果から、最も保守的で合理的な飛跡検出条件の元で、本研究により飛跡検出効率が 10 倍以上向上したことを示した。