

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01912

研究課題名（和文）ニュートリノ振動実験の精密化を実現する前置水チェレンコフ検出器の開発

研究課題名（英文）Development of Intermediate Water Cherenkov Detector for Precise Neutrino Oscillation Experiment

研究代表者

久世 正弘（Kuze, Masahiro）

東京工業大学・理学院・教授

研究者番号：00225153

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、中間距離水チェレンコフ検出器（IWCD）の開発を行った。IWCDでは、19本の3インチPMTを並べたマルチPMTモジュールを使用する。研究期間内には、マルチPMTに使用する3インチPMTについて、地磁気による影響などの性能評価試験を行った。測定ではアフターパルスと呼ばれるノイズの存在を明らかにし、設計の変更により大幅な改善を実現した。現在は、国際協力によりマルチPMTの製作に着手している。また、シミュレーションを用いた研究により、IWCDでのニュートリノ反応の識別手法を開発した。さらに、専門家を交えてIWCDの基幹技術である水槽の上下機構を検討し、その概念設計を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、中間距離水チェレンコフ検出器（IWCD）の基幹技術である光センサー（マルチPMT）の開発と水槽上下機構を含む検出器の概念設計が進み、その実現性が高められた。IWCD研究グループでは、これらの成果をもとに、IWCDの実証試験としてCERNで行われるビームテストに向けてマルチPMTの製作を開始し、検出器の詳細な設計にも着手している。将来的には、IWCD検出器の実現により、ハイパーカミオカンデにおけるニュートリノ振動測定の精度が向上し、ニュートリノにおけるCP対称性の破れの発見が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have carried out a development of intermediate water Cherenkov detector (IWCD). IWCD will employ multi-PMT module consisting of 19 3-inch PMTs for the precision measurement. During the research period, we conducted performance evaluation tests to the PMTs used in the multi-PMT module including the effects of geomagnetic field. We have identified existence of after-pulse, which is then suppressed by the improvement of the design. Currently, fabrication of the multi PMT modules is underway by the international collaboration. We have also developed algorithm to selection neutrino interactions in IWCD by the simulation studies. Furthermore, we have established the conceptual design of the moving system of the detector, a key technology of IWCD, with the experts of mechanical design.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 水チェレンコフ検出器 ハイパーカミオカンデ J-PARC IWCD

1. 研究開始当初の背景

1998年のスーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見以降、世界各国で行われたニュートリノの観測実験により、三代目のニュートリノが混合していることが明らかになった。これにより、ニュートリノの研究における最重要課題の一つである、「レプトンにおける CP 対称性の破れの検証と精密測定」に向けた準備が整ったと言える。CP 対称性の破れは、宇宙における物質と反物質の非対称を引き起こした原因の一つと考えられており、この検証と測定は、宇宙に存在する物質の起源の解明に繋がる可能性がある。CP 対称性の破れは加速器で作られるニュートリノビームおよび反ニュートリノビームの振動確率の小さな差として検出される。このような高精度実験のために J-PARC 加速器の増強、およびはハイパーカミオカンデの建設が提案されていた（本研究が開始した直後の 2020 年から、実際に建設が開始されている）。

ハイパーカミオカンデ実験（図 1）では、現在進行中の T2K 実験に比べて 20 倍以上の統計のデータが観測され、CP 対称性の破れの測定における系統不確かさは 3%程度になる見通しである。この大統計データを最大限に活かし、前人未至の高精度での測定を実現するためには系統不確かさを同程度まで抑える必要がある。特に、ニュートリノと水分子がどのように反応し、水検出器でどのように観測されるかという物理モデルの不定性が問題になる。これを解決するためには、ハイパーカミオカンデと同じ原理の検出器により、測定データに基づく系統不確かさの評価が必要である。

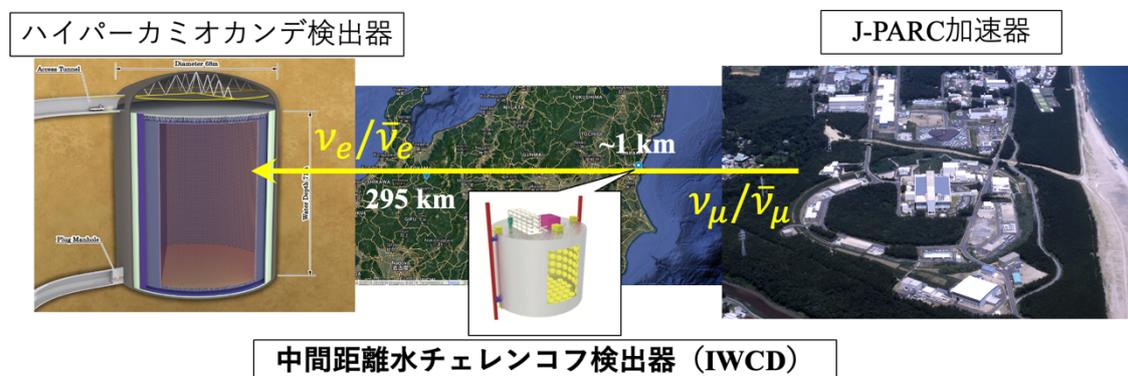


図 1 ハイパーカミオカンデ計画と中間距離水チェレンコフ検出器 (IWCD)

2. 研究の目的

前項で説明したニュートリノ反応モデルの不定性に伴う系統不確かさの問題を解決するために、本研究のメンバーを中心とする国際共同研究グループは、ビーム発生点から約 1 km の地点に約 50 m の立坑を作り、その中で小型の水チェレンコフ検出器を上下させてニュートリノ反応測定をする中間距離水チェレンコフ検出器 (IWCD) 計画を進めてきた。J-PARC 加速器で生成したニュートリノビームを IWCD とハイパーカミオカンデで測定し、その観測量の比較により CP 対称性の破れを検証する。さらに、IWCD では電子ニュートリノの水中での反応断面積を測定し、ニュートリノ振動の測定における系統不確かさを低減する。

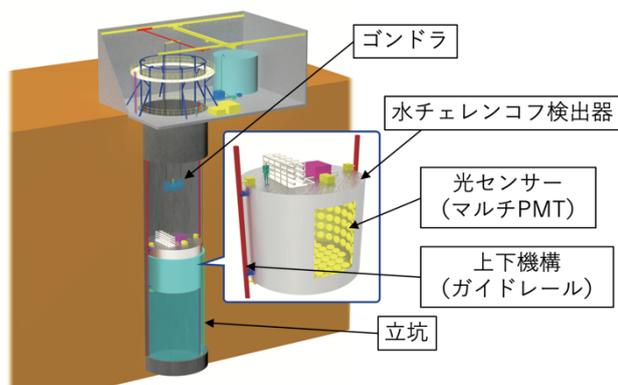


図 2 IWCD 検出器の概念図

IWCD では高精度でのチェレンコフリングの測定を実現するために、19本の8cm径PMTを並べた新しい光センサーであるマルチPMT（図3）を使用する。また、ビーム軸からのオフ軸角度に依存してニュートリノビームのフラックスが変動することを利用し、ニュートリノ反応断面積の精密測定を行うために、立坑の中を上下に移動する検出器を実現する。図2に検出器の構想を示す。本研究課題は、IWCDの基幹技術である光センサーと検出器の上下機構の原理と性能を実証し、実機の建設開始に向けた研究開発を行う。



図 3 マルチ PMT の試作機

3. 研究の方法

研究期間には、マルチPMTに使用する候補の8cm径PMTの性能評価試験を行った。例として、

- PMTは、光電面に光が照射されていない状態でも、熱電子放出などにより、信号が検出される。これはダークノイズと呼ばれ、水チェレンコフ検出器における低エネルギー事象のバックグラウンドの要因となる。また、荷電粒子によるチェレンコフ光を測定する際の精度にも影響を及ぼす。ダークノイズの発生頻度は温度に依存することが知られている。本研究では恒温槽を用いて、PMTのダークノイズを測定し、温度依存性を検証した。
- 光電面で発生した光電子がダイノードで増幅された際に、PMT内に残存する気体のイオン化などにより、実際の信号から遅れてアフターパルスと呼ばれるノイズが発生する。本研究では、レーザーをPMTに照射し、アフターパルスの発生率を測定した(図4)。
- エネルギーの測定においては、入射光量とPMTの出力信号の線形性が重要である。本研究では、PMTにレーザーを照射し、光検出効率や応答の線形性を測定した。実際の実験では、あらかじめ測定した非線形性により補正することで、測定精度を向上する。
- PMTは光電効果による電子を電場によりダイノードに誘導し、増幅して信号として取り出すが、磁場中では電子の軌道が変化し、性能が低下することが指摘されている。そのため、スーパーカミオカンデではコイルにより地磁気をキャンセルしているが、IWCD検出器は移動式であるため、地磁気補償コイルの設置が難しい。本研究では、図5に示すセットアップを製作し、PMTの向きを変えて光検出性能を比較することで、地磁気の影響を調査した。

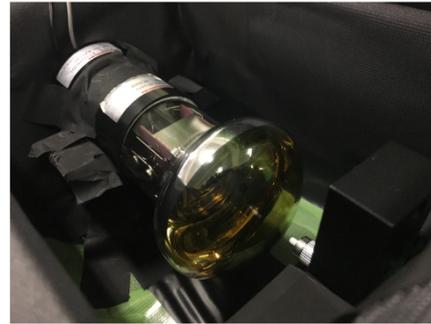


図4 レーザーを照射した測定のセットアップ

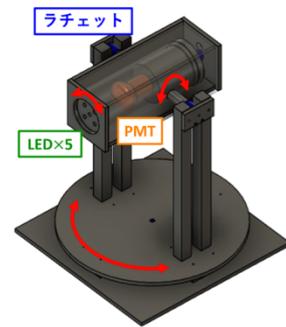
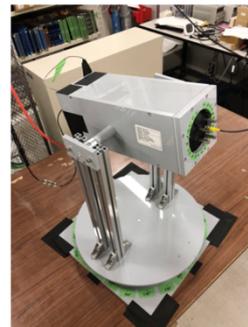


図5 地磁気によるPMTの光検出性能への影響を測定するためのセットアップ

研究期間には、解析サーバを用意し、シミュレーションにより、小型水チェレンコフ検出器によるニュートリノの測定精度を評価した。

- PMTで検出された光量から荷電粒子の発生位置、運動量、種類などを再構成するアルゴリズムにより、IWCD検出器の性能を評価した。
- 前述のアフターパルスの測定結果をシミュレーションに組み込み、ニュートリノの測定(特に、ミューオンの崩壊で発生する電子の測定)に与える影響を検証した。
- 地磁気の影響などにより、PMTの方向に依存して光検出効率や時間応答が変化する可能性を想定し、シミュレーションによりその許容範囲を設定した。
- IWCD検出器はニュートリノビームの発生点に近い場合、短い時間間隔(ビームの同一バンチ内)で複数のニュートリノ反応が発生する。これはパイルアップと呼ばれる。IWCD検出器では十分な測定精度を保つため、単一ニュートリノ反応とパイルアップ事象を識別し、単一ニュートリノ反応のみを解析に用いる方針である。本研究では、シミュレーションでパイルアップ事象を再現し(図5)、識別手法の開発を行った。

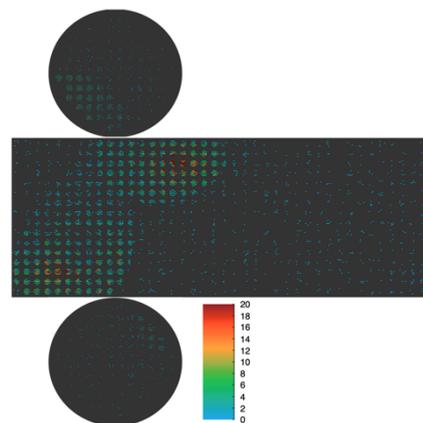


図6 シミュレーションで作成したパイルアップ事象

さらに、専門家を交えて上下に移動する水チェレンコフ検出器を実現するための設計を検討した。実験においては、立坑内に水を注水して水チェレンコフ検出器を浮かべ、水位を変えることにより検出器を上下に移動させる計画である。研究期間内には、立坑内のケーブルの巻き取り、立坑内の水を汲み上げるためのポンプ、水槽の位置制御機構、水位のモニターなどを検討した。

4. 研究成果

前項で示した測定により、マルチ PMT に使用する候補の PMT でアフターパルスが発生していることが明らかになったが、製造元との協議により構造を見直すことで、大幅な改善に成功した。また、測定されたアフターパルスをもとにシミュレーションを作成して水チェレンコフ検出器によるニュートリノの測定に対する影響を評価し、要求される性能を満たすことを確認した。

レーザーを使った入射光量と PMT の出力信号の線形性の測定では 200 光電子付近まで線形性が保たれていることを確認した (図 6)。また、高電圧電源による違いは確認されなかった。200 光電子以上では非線形性が見られるが、ニュートリノの観測においては、補正により対応する。

地磁気の影響の測定では、図 7 に示すように、ゲインと呼ばれる電子の増幅率には、予測通り方向依存性が存在することが確認されたが、時間分解能や光検出効率の変動は小さく、水チェレンコフ検出器の測定性能による要求をことが確認された。ゲインの変動は、あらかじめキャリブレーションで把握しておくことで対応が可能である。この結果を踏まえ、地磁気補償コイルを設置しない方針で検出器の設計を進めている。

マルチ PMT の開発は国際共同研究で進めているが、その基幹要素である PM の性能評価および選定においては、本科研費による研究成果が重要な役割を果たしている。この結果をもとに、現在では、マルチ PMT の設計を完了し、量産の準備を進めている。2024 年にはマルチ PMT を用いた水チェレンコフ検出器の測定性能を実証するために、小型の水チェレンコフ検出器を用いたビームテスト実験が予定されている。

研究課題では、専門家を交えて中間距離水チェレンコフ検出器の基幹技術である水槽の上下機構を検討し、概念設計を完成させた。これらの検討結果は実験グループ内部での報告書にまとめられている。現在は諮問機関による意見を伺いながら、実現に向けて検出器および実験施設のより詳細な設計、および建設手順とスケジュールの策定を進めている。

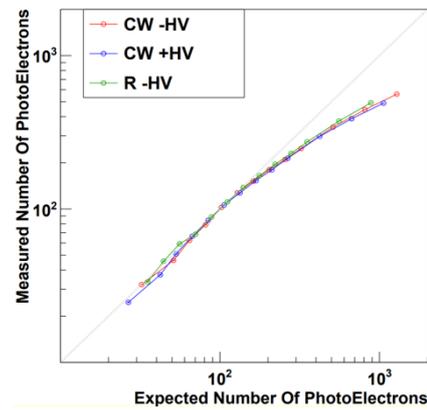


図 6 PMT への入射光量と出力信号の関係

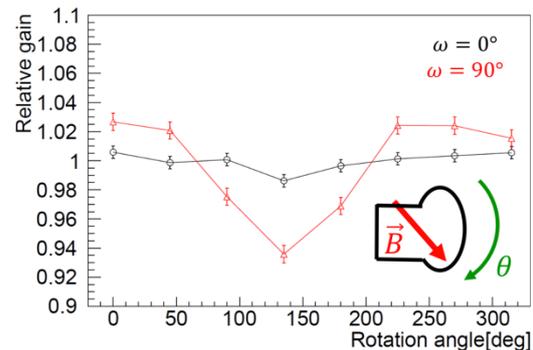


図 7 PMT 内の地磁気の向きによるゲインの変動の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T. Kinoshita	4. 巻 2156
2. 論文標題 Performance evaluation of 3 inch PMT for Hyper-Kamiokande	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 12191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2156/1/012191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Yamauchi	4. 巻 2156
2. 論文標題 Evaluation of event reconstruction with small-scale water Cherenkov detectors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 12199
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2156/1/012199	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 佐々木 鳳杜
2. 発表標題 ハイパーカミオカンデ光検出精度向上のための8 cm径光電子増倍管の評価
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Hartz
2. 発表標題 A 50 ton Water Cherenkov Light Test Platform in a Charged Particle Test Beam
3. 学会等名 Snowmass IF9 Test and Calibration Beams and Irradiation Facilities Workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Hartz
2. 発表標題 An Intermediate Water Cherenkov Detector for Hyper-Kamiokande Using the NuPRISM Concept
3. 学会等名 The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Kinoshita
2. 発表標題 Performance evaluation of 3-inch PMT for Hyper-Kamiokande (Poster)
3. 学会等名 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山内航輝
2. 発表標題 小型水チェレンコフ検出器における事象再構成の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下達志
2. 発表標題 マルチPMTに使用する3インチPMTの性能評価および水チェレンコフ検出器における測定性能への影響
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Ishitsuka
2. 発表標題 Hyper-Kamiokande
3. 学会等名 The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Hartz
2. 発表標題 Near Detectors for the Hyper-K Experiment
3. 学会等名 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Hartz
2. 発表標題 Neutrino Oscillations at the T2K and Hyper-Kamiokande Experiments
3. 学会等名 Canadian Association of Physicists Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石塚正基
2. 発表標題 ニュートリノビームの精密測定
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下達志
2. 発表標題 ハイパーカミオカンデ前置水チェレンコフ検出器に用いる3インチ光電子増倍管の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井元道貴
2. 発表標題 ハイパーカミオカンデ前置水チェレンコフ検出器で用いる3インチ光電子増倍管の磁場中における特性の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐島伊紗雄
2. 発表標題 ハイパーカミオカンデのための新型光検出器の光学リフレクタの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下達志
2. 発表標題 ポスター発表: Performance evaluation of 3-inch photomultiplier tube used for Hyper-Kamiokande intermediate water Cherenkov detector
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山内航輝
2. 発表標題 ポスター発表: Evaluation of event reconstruction with 100 ton to 1,000 ton scale water Cherenkov detectors
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前川雄音
2. 発表標題 ポスター発表: Electric-field dependence of dark noise in a photomultiplier tube
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Nakanishi
2. 発表標題 Evaluation of the effect of a geomagnetic field on the performance of photomultiplier tube for multi-PMT (poster)
3. 学会等名 The 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西俊輔
2. 発表標題 ポスター発表: Evaluation of the effect of a geomagnetic field on the performance of photomultiplier tube for multi-PMT
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中西俊輔
2. 発表標題 マルチPMTに使用する光電子増倍管の磁場中での性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡崎玲大
2. 発表標題 ハイパーカミオカンデに向けた3インチ光電子増倍管と読出回路の検出性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>WCTE proposal (CERN Document Server) https://cds.cern.ch/record/2712416?ln=ja 修士論文：5件（慶應義塾大学、東京工業大学、東京理科大学）</p>

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	鈴木 州 (Suzuki Atsumu) (20243298)	神戸大学・理学研究科・助教 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石塚 正基 (Ishitsuka Masaki) (40533196)	東京理科大学・理工学部物理学科・教授 (32660)	
研究分担者	西村 康宏 (Nishimura Yasuhiro) (40648119)	慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授 (32612)	
研究分担者	石田 卓 (Ishida Taku) (70290856)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・講師 (82118)	
研究分担者	角野 秀一 (Kakuno Hidekazu) (70376698)	東京都立大学・理学研究科・教授 (22604)	
研究分担者	HARTZ MARK (Hartz Mark) (70721702)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Water Cherenkov Test Experiment Workshop	開催年 2020年～2020年
--	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
カナダ	TRIUMF			
イタリア	INFN Napoli			