

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02885

研究課題名(和文) Development of the NuPRISM Detector Towards the Measurement of CP Violation

研究課題名(英文) Development of the NuPRISM Detector Towards the Measurement of CP Violation

研究代表者

HARTZ MARK (Hartz, Mark)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授

研究者番号：70721702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は前置水チェレンコフ検出器(IWCD)の実現に向けた基礎研究を進めるものである。研究期間には光センサーの候補となるPMTについて幅広い性能試験を行い、候補を選定した。また、水中でPMTを収めるケースの耐圧と化学的適合性の試験を実行して材質の選定を行い、候補となる高電圧電源の試験も行った。期間中にはIWCDの実験装置についても基本的な設計を進めた。本研究の成果として、IWCDはハイパーカミオカンデ実験の一部として採用され、技術報告書を完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究はハイパーカミオカンデ実験の測定精度を向上することを目的とした検出器の基礎研究を進めるものである。ハイパーカミオカンデはニュートリノ振動などについて世界最先端の研究を行う計画である。ニュートリノ振動の精密測定を実現するためには前置検出器により振動前のニュートリノの特性を理解することが重要な課題である。本研究では、IWCDの設計や技術面の実現性の検証を進め、その成果として、IWCDはハイパーカミオカンデ実験の前置検出器として採用されている。

研究成果の概要(英文)：This research focussed on the development and testing of photo detectors for the Intermediate Water Cherenkov Detector (IWCD) and the initial mechanical design and facility design for the IWCD. Extensive testing of 8-cm diameter photomultiplier tubes (PMTs) was carried out and the performance of different PMT models was characterized. Based on this testing, the primary candidate PMT for the IWCD was chosen. Pressure testing and materials compatibility testing of the vessel in which the PMT will be housed under water were also carried out, and the design and materials of the pressure vessel were confirmed. A candidate high voltage power circuit for the PMT was also produced and tested. The initial mechanical design of the IWCD and the design of the IWCD facility were carried out as part of this research project. Based on the results of this design work, the IWCD could be adopted as part of the Hyper-K project, and the Technical Design Report for the IWCD could be completed.

研究分野：Experimental neutrino physics

キーワード：Particle physics Photon detectors Water Cherenkov Neutrinos

1. 研究開始当初の背景

ハイパーカミオカンデ実験はニュートリノ振動の測定をはじめとする、幅広い研究を目的とした将来計画である。特に、ハイパーカミオカンデではニュートリノにおける CP 対称性の破れの測定を主目的の一つとする。これは、物質の起源との関連も指摘される重要な研究テーマである。ハイパーカミオカンデでは巨大検出器と高強度ニュートリノビームにより、数千のニュートリノ事象の観測が期待されるが、この大統計ニュートリノのデータを最大限に活かすためには、ニュートリノ反応の不定生に起因する系統不確かさの低減が必須である。この目的のため、NuPRISM 検出器の建設が提案されている。この検出器は現在では IWCD (Intermediate Water Cherenkov Detector) と呼ばれている。IWCD では振動する前のニュートリノを観測する。IWCD の特徴として、ニュートリノビーム中心から相対的に検出器を移動させて観測を行うことにより、異なるエネルギースペクトルのニュートリノを観測することができる。これらの測定を組み合わせることにより、ニュートリノ反応に対する検出器応答のエネルギー依存性を理解することができる。IWCD はビームの発生点に近い位置に設置するため、検出器の体積はハイパーカミオカンデの 1/300 程度になる。小型の水チェレンコフ検出器では壁に近い位置で発生する荷電粒子を測定する必要があるが、このような事象では測定精度が劣化してしまう。この問題に対処し、十分な測定精度を確保するため、次節で述べる新型光センサーを使用する。図 1 にハイパーカミオカンデ、ニュートリノビームを生成する加速器、前置検出器の概略図を載せる。

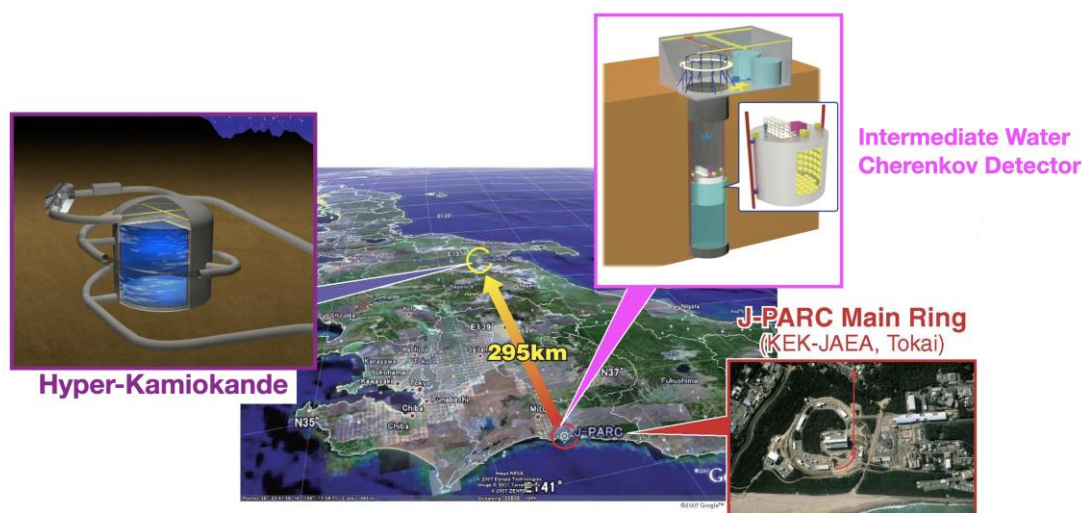


図 1: ハイパーカミオカンデ実験の概略図。ハイパーカミオカンデはニュートリノビームの発生点から 295km、IWCD はビームの発生点から約 1km 離れた位置に設置される。

2. 研究の目的

IWCD の設計を完成させるため、本研究ではその基幹技術である光センサーの開発と水槽を上下させる実験装置の検討を進めた。IWCD では要求される測定精度を満たすために、小型の光電子増倍管 (PMT) を複数組み合わせたマルチ PMT と呼ばれる新型光センサーの開発を進めている。PMT は高電圧電源や信号を読み出すための回路類と合わせてケースに収納され水中に沈められる。マルチ PMT の設計と写真を図 2 に示す。本研究ではマルチ PMT の複数の構成要素について、その基本性能を評価した。特に、PMT はその中でも最も重要な要素であり、その基本性能は要求を満たすことを確認する必要がある。本研究では、検出効率、時間応答、増幅率、磁場中での影響などの検証に必要な測定環境を構築した。また PMT を動作させるために必要な高電圧電源についても試験を行なった。さらに、マルチ PMT はケースに収納して水中に沈めて使用するため、ケースの耐水圧試験や材質の化学的適合性の試験も行なった。

IWCD 検出器はビーム中心方向から角度を変えて測定を行うため、立坑内を上下に移動させる計画である。研究期間には専門家と共同で上下移動機構の検討、純水を満たす水槽の設計、マルチ PMT を並べて設置する支持構造の設計などに取り組み、IWCD 実験装置の基本的な設計を進めた。

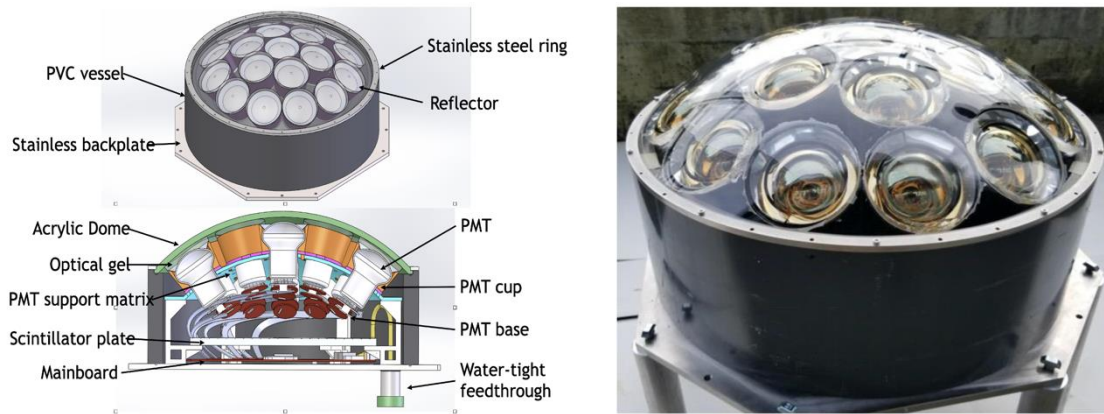


図 2: マルチ PMT の設計 (左) と試作機の写真 (右)

3. 研究の方法

候補となる複数の PMT について性能評価を行うため、試験用の測定環境を構築した (図 3)。性能評価の結果は製造元にも報告し、改善の可能性について協議した。測定の設定アップを以下に説明する。

- 高速のレーザー光源の光をファイバーを通して光電面に照射し、PMT の時間応答と検出効率を測定した。また、拡散させた光を光電面の全面に一様に照射することにより、実際の測定において期待される平均的な時間応答と検出効率を測定した。
- コンピュータでステップモーターを制御し、ファイバーの位置と角度を変えるセットアップを構築した。このセットアップにより、レーザーからの光を PMT の光電面の異なる位置に照射し、時間応答や検出効率の位置依存性を測定した。
- 恒温槽を用いて、測定におけるバックグラウンドなる暗電流の温度依存性を測定した。
- 暗箱をコイルで巻いて電流を流し、磁場中の PMT の応答を測定した。
- 3 インチ PMT の実効受光面積を増やすための反射リングの形状について最適化を行い、試作品を装着して性能測定を行った。

各項目について、候補となる複数の PMT に対して測定を行い、IWCD 検出器に使用する際の要求値と比較を行い、最終的に使用する PMT の選定を進めた。

また、PMT に高電圧を供給する電源を浜松ホトニクス社と共同で製作し、測定により基本特性の検証を行なった。

研究期間には神岡宇宙素粒子研究施設の耐水圧試験容器を用い、PMT を収めるケースの対水圧試験を行なった。ケースのひずみやたわみを計測するため、Arduino により測定システムを用意し、1 気圧から 8 気圧までの水圧で 1 週間を超える期間の測定を行なった。また、マルチ PMT を水中に沈めて使用した際に、水質が変化して実験が困難になるような状況を避けるため、マルチ PMT を構成する材料の試料を神岡宇宙素粒子研究施設に持ち込み、純水やガドリニウム含有水に浸して水質の変化を調査した。一ヶ月以上に渡って試料を浸したのちに分光光度計により透過率を測定し、素材ごとに水質に対する影響を確認した。

IWCD では立坑内に検出器を設置し、上下に位置を変えて測定を行う。研究期間には、検出器を上下させる機構および付随する実験設備の検討を進めた。これらの検討を研究者のみで行うことは難しいため、専門家に依頼して諸条件を考慮しつつ現実的に建設可能な設計を実現するための検討を進めた。

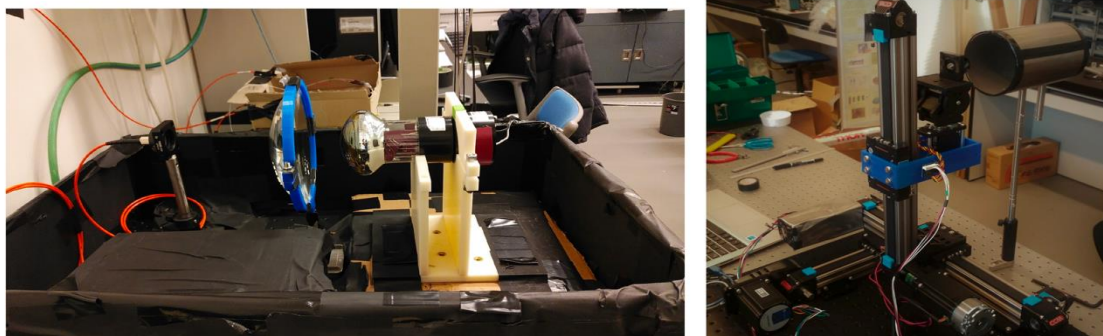


図 3: 左図: 拡散させた光を PMT の光電面に照射し、平均的な時間応答や検出効率を測定するためのセットアップ。右図: ファイバーの位置と方向を変えて光電面の異なる位置に光を照射し、時間応答や検出効率の光電面の位置依存性を測定するためのセットアップ。

4. 研究成果

前節で説明したセットアップにより、PMTの基本特性の測定を行なった。測定の結果は実験グループによる文書にまとめられている。例として、ファイバーを移動させてPMTの光電面の異なる位置に光を照射し、時間分解能の位置依存性を測定した結果を図4に示す。図から光電面の端の方で時間分解能が悪くなっていることが読み取れる。矢印はPMTの内部構造（ダイノードの向き）を示しており、内部構造との相関も確認された。この測定結果を踏まえ、測定性能の場所依存性も考慮した上でマルチPMTの構造が最適化されている。

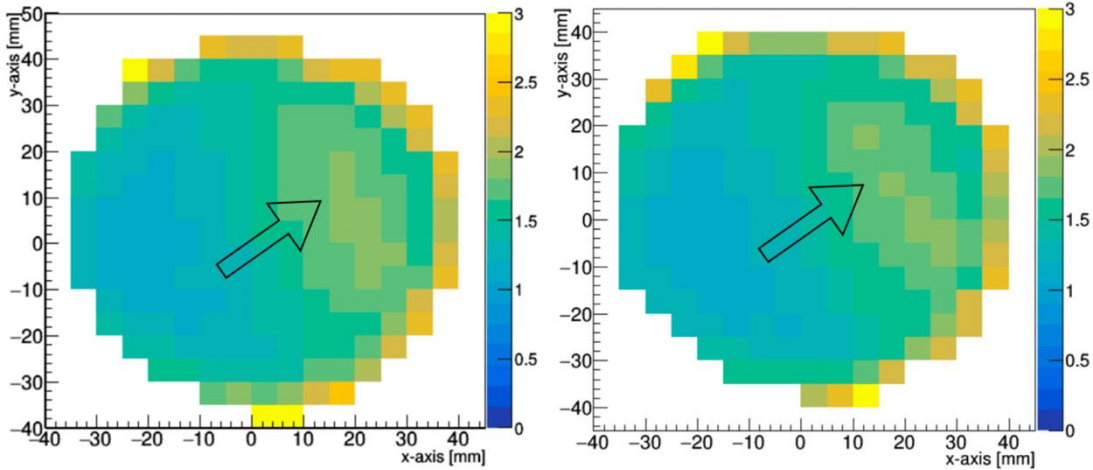


図 4 : PMT の時間分解能の位置依存性。矢印は内部構造の向きを示す。

暗電流の温度依存性と検出効率の磁場依存性の測定結果を図5に示す。候補となる複数のPMTについて測定を行った結果、暗電流の改善がされたPMTでは温度依存性も抑えられていることが確認された。PMTはその原理から磁場による影響を受けやすいため、スーパーカミオカンデでは地磁気をキャンセルするためのコイルが検出器全体に設置されている。マルチPMTに使用する小型のPMTでは磁場による影響は小さいと考えられているが、測定により検出効率の変動が小さいことが確認された。

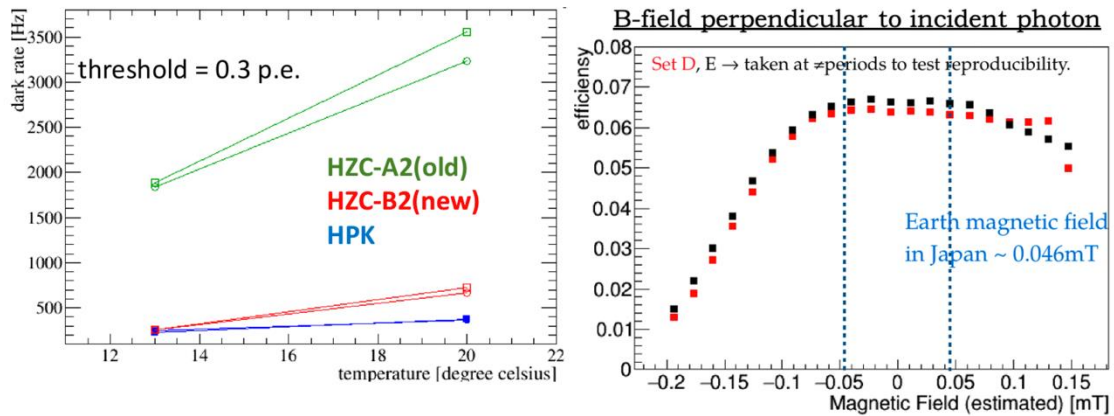


図 5 : 左図 : 暗電流の温度依存性の測定結果。右図 : 検出効率の磁場依存性の測定結果。

マルチPMTに使用するアクリルケースの耐水圧試験の結果、水深80mまで耐えることが確認された。これはIWCDの深さの5倍以上に相当する。さらに、アクリルケースのたわみの測定結果はシミュレーションの解析により予測される値と一致していることが確認された。マルチPMTの材質の化学的適合性の試験、Oリングに使用する潤滑油の一部が純水の水質に影響するが、シリコンゲルを使用した潤滑油は問題ないことが確認された。また、マルチPMTケースの側面に使用する筒状のPVCは紫外線領域の透過率に僅かな影響を与えるが、IWCDでは許容される範囲であることが確認された。

本研究では、マルチPMTと実験装置の設計も進め、その結果をIWCDの技術報告書にまとめた。マルチPMTに使用するPMTの様々な測定結果も同じ報告書にまとめられている。この報告書は建設の前段階として、ハイパーカミオカンデ共同研究者による内部調査の参考資料として使用されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Charged Particle Beam Best with multi-PMT
3. 学会等名 New and Enhanced Photosensor Technologies for Underwater Neutrino Experiments Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshida Tomoyo
2. 発表標題 Development of Detector Simulation and Event Reconstruction for J-PARC E61 Experiment
3. 学会等名 New and Enhanced Photosensor Technologies for Underwater Neutrino Experiments Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Benjamin Quilain, Mark Hartz, Yasuhiro Nishimura, Akira Konaka, Masahiro Kuze, Tomoyo Yoshida, Masaki Ishitsuka
2. 発表標題 Performances of Multi-PMT for the Hyper-Kamiokande and E61 experiments
3. 学会等名 JPS meeting September 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Ishitsuka, Hartz Mark, Taku Ishida, Hidekazu Kakuno, Akira Konaka, Masahiro Kuze, Yasuhiro Nishimura, Tetsuro Sekiguchi, Quilain Benjamin, Tomoyo Yoshida
2. 発表標題 J-PARCニュートリノビームラインにおけるE61前置水チェレンコフ検出器計画の現状
3. 学会等名 JPS meeting September 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Hadron production requirements for E61
3. 学会等名 NA61/SHINE Beyond 2020 Workshop (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoyo Yoshida
2. 発表標題 J-PARC E61 experiment
3. 学会等名 Lake Louise Winter Institute 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Status of the J-PARC E61 Water Cherenkov Neutrino Detector Experiment
3. 学会等名 JPS Spring Meeting, The Physical Society of Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tomoyo Yoshida
2. 発表標題 Development of an event reconstruction algorithm for E61 detector equipped with multi-PMT modules
3. 学会等名 JPS Spring Meeting, The Physical Society of Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Status of the NuPRISM Water Cherenkov Neutrino Detector Experiment
3. 学会等名 JPS Autumn Meeting, The Physical Society of Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Near Detectors for the Hyper-K Experiment
3. 学会等名 International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Near Detectors for the Hyper-K Experiment
3. 学会等名 Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mark Hartz
2. 発表標題 Systematics Uncertainties in Future Neutrino Oscillation Experiments
3. 学会等名 International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

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

1. 発表者名 Yuto Maekawa
2. 発表標題 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 Michitaka Inomoto
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 Japan Physical Society Meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsushi Kinoshita
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 Japan Physical Society Meeting
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	久世 正弘 (Masahiro Kuze) (00225153)	東京工業大学・理学院・教授 (12608)	
研究分担者	石塚 正基 (Masaki Ishitsuka) (40533196)	東京理科大学・理工学部物理学科・准教授 (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・研究機関講師 (82118)	
研究分担者	角野 秀一 (Kakuno Hidekazu) (70376698)	首都大学東京・理学研究科・教授 (22604)	

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0件

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	University of Regina	York University	
ポーランド	Warsaw University of Technology	Inst. of Radioelectronics and Multimedia		
イタリア	INFN Sezione di Napoli	INFN Sezione di Bari		
米国	Stony Brook University	Michigan State University		
フランス	Laboratoire Leprince-Ringuet			
英国	Imperial College London			