

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25707016

研究課題名(和文)大型水チェレンコフ検出器実現に向けた新型ハイブリッド光検出器の実証試験

研究課題名(英文)Test of a New Large-Aperture Hybrid Photo-Detector for a Next-Generation Large Water Cherenkov Detector

研究代表者

西村 康宏(Nishimura, Yasuhiro)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：40648119

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：次世代大型水チェレンコフ検出器として提案されたハイパー・カミオカンデの性能を高めるため、新型ハイブリッド光検出器(HPD)を開発し、その実証試験を行った。長期使用に際して大きな問題がないか確認するため、まず20 cm径のHPDを開発して、8本を200トン水チェレンコフ検出器に取り付け、2年以上にわたって測定した。プリアンプ回路を開発して、HPDの50 cm大口径化にも成功し、一光電子検出が可能な非常に良い分機能を得た。

研究成果の概要(英文)：A Hybrid Photo-Detector (HPD) has a great potential to improve various physics sensitivities of Hyper-Kamiokande, which is a next generation large water Cherenkov detector. In order to demonstrate the performance for a long period, its usability was evaluated in a 200 ton water Cherenkov detector. At first, the 20 cm HPD was developed and eight of them were tested into the 200 ton water tank for two years. With a successful development of the preamplifier, the largest 50 cm aperture HPD was completed to detect a single photo-electron with high resolutions.

研究分野：素粒子・宇宙線実験

キーワード：素粒子実験 宇宙線 光検出器 ニュートリノ 半導体光検出器 チェレンコフ光検出器 ハイパーカミオカンデ スーパーカミオカンデ

1. 研究開始当初の背景

(1) 「ニュートリノ」は、物質を構成する最小単位である素粒子の一種である。岐阜県神岡鉱山の地下 1,000 m に建設された、大量の水を使った大型検出器「カムイオカンデ」と、その後継である「スーパー・カムイオカンデ」により、その性質が部分的に解き明かされてきた。

1998 年には、3 つあるニュートリノの種類が入れ替わる「ニュートリノ振動」が、スーパー・カムイオカンデにより発見された。3 つある振動の中で、最後に発見が残されていたミュー型から電子型への振動は、2011 年に T2K 実験で観測された。いまだニュートリノに残される謎を解き明かすため、近年はさらに活発な研究が世界中で推進されている。

宇宙誕生の謎を説明する鍵となりうる「ニュートリノの荷電・空間 (CP) 対称性」破れの発見や、素粒子の統一理論完成の鍵となる未発見の「陽子崩壊」探索を目指すには、より感度の高い検出器が必要になる。そこで、素粒子・宇宙物理の新たな見地を切り拓くため、スーパー・カムイオカンデより有感体積で約 20 倍になる「ハイパー・カムイオカンデ」計画(図 1)が提案された。ニュートリノ振動・超新星爆発・太陽ニュートリノ・暗黒物質探索・ γ 線バースト等、素粒子から宇宙線・宇宙物理まで幅広く、感度を大幅に向上した研究が可能となる。

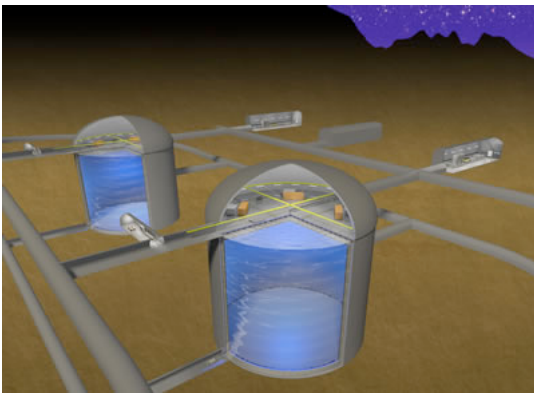


図 1：ハイパー・カムイオカンデ検出器案

(2) 感度の高いハイパー・カムイオカンデを実現し、新発見を導くには、使用される光検出器の高性能化が鍵となる。これまで、50 cm 径の大型光電子増倍管の実現によって、超新星爆発ニュートリノの観測に代表されるカムイオカンデの成功が導かれた。続いて、スーパー・カムイオカンデのために、光の検出効率と分解能が大幅に改善された。

今後さらに高い性能を実現できる「大口径ハイブリッド型光検出器 (HPD)」(図 2)は、内部の増倍に金属(ダイノード)ではなく半導体であるアバランシェダイオード(AD)を用いる。安価で高い分解能を持つ HPD の実現と実用化が、将来の素粒子・宇宙線物理革新に重要となる。

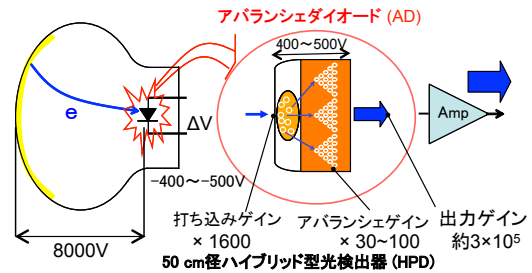


図 2：ハイブリッド型光検出器の原理

(3) これまで 20 年以上動作を続ける光電子増倍管に対して、HPD は新たな技術であり、水中で長期に安定して動くか確認されていない。ハイパー・カムイオカンデは将来 10 年以上観測を続けて結果を導くため、高価な光検出器が数万本の大量数でも低い故障率で長期に動作するか、事前に把握することが重要になる。そこで、まず 50 cm 径の HPD を実現し、その実用性を知る必要がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、HPD の開発・性能測定・実証試験を経て、ハイパー・カムイオカンデへの実用化を目指す。既に HPD の試作機で性能評価を開始し、光電子増倍管より非常に良い分解能を確認しているが、水チェレンコフ型検出器で用いるための HPD を実用化するには、以下のような問題がある。

- ① これまで開発された HPD の最大径は 33 cm で、使用したい 50 cm 径より小さい。
- ② 光電子増倍管で用いる 2,000V より高い電圧 (8,000V) を必要とし、水中での取り扱い・耐久性の確保が難しい。
- ③ プリアンプや電源回路を水中の HPD に内蔵して修理ができないため、長年故障しない回路設計が必要となる。
- ④ ノイズの特性と影響が不明。
- ⑤ 長期運転実績・検出経験がなく、信頼性に欠ける。

(2) これらを解決するため、使用される予定の 2 つの大きさ (20 cm・50 cm) で HPD を開発し、年単位の長期耐久性 (防水・耐水圧・高電圧など)・出力ゲインと性能の安定性を保証する。このため、ハイパー・カムイオカンデと同原理で比較的小さい水チェレンコフ検出器に取り付けて試験し、光検出性能を実測する。

3. 研究の方法

(1) 最初に、20 cm HPD を長期運用できる技術を開発する。その後、水中で 1 年以上の実証試験を行う。このため、スーパー・カムイオカンデと同様の内部構造を持ちデータ取得が可能で、水 200 トンを用いた実証試験タンク内に実際に取り付け、水チェレンコフ検出器内の光検出器として実用性を評価する。20 cm HPD の回路構造は 50 cm HPD と同様の原理であるため、この段階で運用技術がほぼ確立される。

(2) 続いて、高い量子効率を持つ 50 cm 径の大きな HPD を実現させる。アンプ改良とノイズ軽減に取り組み、高分解能での 1 光電子を達成し、測定性能を評価する。発光ノイズがないか、光の入射位置によらず一様な特性を示すか、使用磁気環境で問題がないかなど、実用的な観点からも性能を評価する。高電圧・浸水・高水圧・長時間使用への耐性を測定し、更に改良を施して、水中での実証試験へ移行する。

(3) 確認された性能で、ハイパー・カミオカンデに使用できるか判断する。シミュレーションに実測性能を取り込み、物理感度に対する影響を見る。

4. 研究成果

(1) ハイパー・カミオカンデの外水槽用光センサーで用いる 20 cm(8 インチ)径の光センサーとして、20 cm HPD を完成させた。回路は内水槽用光センサーとして目指す 50 cm (20 インチ) HPD と同等なので、まず 20 cm HPD で実証試験を行うための準備を始めた。故障を防ぐため、アンプ入力部に保護回路を取り付け、過大入力の抑制を確認し、高電圧や電源のスイッチで壊れないか耐性を確認した。10 本の HPD を較正し、長期や水中での使用に際して耐性試験を行った。水中で放電や漏電が起らないかどうか、1 本ずつ水タンクに入れて発光や過大放電を観測し、安全性を確認した。

(2) 平成 25 年夏に、8 本の 20 cm HPD を岐阜県飛騨市の坑内 200 トン水チェレンコフ検出器中(図 3)に取り付けた。同時にスーパー・カミオカンデで用いている光電子増倍管を 232 本取り付け、相対的に長期安定性を評価した。

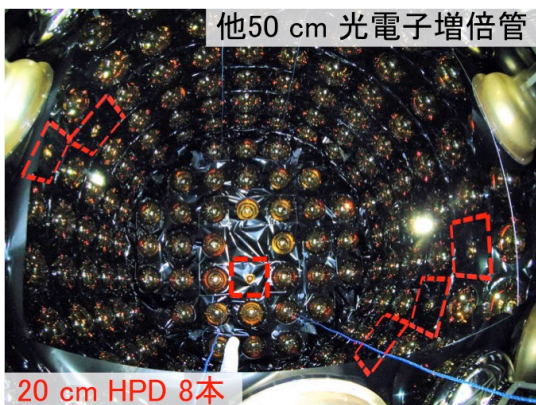


図 3 : 200 トン水チェレンコフ検出器内部

図 4 は、1 ヶ月の 1 光電子出力ゲイン安定性を示している。8 本の HPD で光源を測定し、1 光電子ピークの推移を追った。水温の変動で不安定な箇所もあるが、ほぼ安定している。

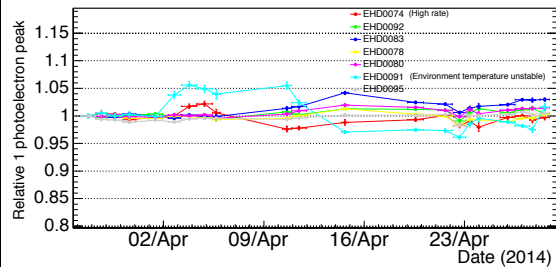


図 4 : HPD 8 本のゲイン安定性(2014 年 4 月)

測定開始後すぐに、8 本中の 1 本で、内蔵している高電圧電源に不具合が生じた。製造業者の調査で、内部絶縁の不良設計が明らかになり、改良した高電圧電源を開発した。また、他 1 本は暗中のノイズ計数レートが時間とともに増大した。これら 2 本を、開始 1 年後の 2014 年夏に、改良した高電圧電源を搭載したものに置き替えた。

図 5 に、再開後 2014 年から 2015 年の 10 ヶ月間で測定した、8 本 HPD の暗中心ノイズ計数レート安定性を示した。1 光電子を取得できる波高に閾値を設定してある。1 本 (EHD0104) は増大しており、他で不安定なものはアバランシェダイオードに印加する電圧が高すぎたため、電圧値を調整して正常値に戻した。正常に動作を続けたものは、低いレートを安定に保った。

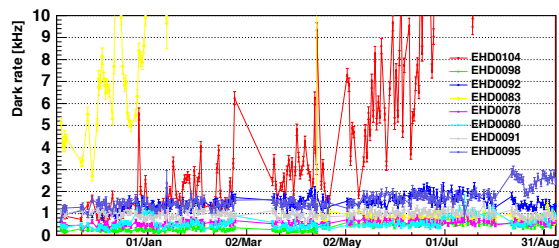


図 5 : HPD 8 本のノイズ計数レート安定性 (2014 年秋~2015 年夏)

(3) 50 cm HPD には、20 mm 直径の大面積アバランシェダイオードを用いる。そのため、800 pF の大きな接合容量を伴い、アンプのノイズが大きくなる問題があった。改善策として、容量を 400 pF へ半減したプロセス・低ノイズのプリアンプ開発・2 から 5 分割までの多チャンネル化・トランス結合等による容量性ノイズの軽減を試みた。結果、閾値を 1 光電子波高の半分以下に下げ、1 光電子の検出が可能となった。また、量子効率は従来の 50 cm 光電子増倍管の 22% から 35% 程度まで上がり、光電子の収集効率も向上したため、合わせて倍の検出効率を達成した。

(4) 図 6 に 50 cm HPD の 1~4 光電子検出波形と、光電子ピーク分布を示した。ピークが分離できる高い分解能が得られた。

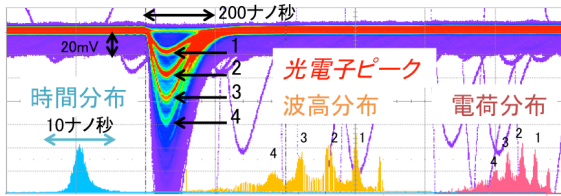


図6：50 cm HPD の光電子数検出波形
(5分割中1チャンネル)

暗中のノイズ計数レートは、常温で完全に安定化する前でも 9 kHz 程度で、他の高量子効率を持つ光電子増倍管より低い。よりレートを低く作り込み、水中の低温で安定化すれば、さらに低いノイズレートを実現できる可能性がある。50 cm HPD のプロトタイプ評価で得られた、レートの温度依存相関では、室温から使用する水温まで下げると、半分以上に下がっていた。自身で発光していないかどうかとも調査した。

入射位置を 25 度ずつずらして測定することで、受光場所によって大きく特性が変化しないことも確認した。中心から入射する場合に、ハイパー・カミオカンデ内の残留地磁気(100 mGauss 以内)による影響が少ないことも確認した。

また、高圧水タンク内に 50 cm HPD を入れ、試験した 3 本は水深 140 m 相当の圧力まで割れなかった。ハイパー・カミオカンデの水深より 2 倍以上の安全率で、安全に使用できる強度があることを確認できた。

(5) ハイパー・カミオカンデとしての性能を見積もるため、HPD の 1 光電子電荷・時間分布がシミュレーションに実装された。物理感度の見積もりは、現状の HPD と似た高い検出効率と時間分解能を持つ新型光電子増倍管を仮定して行った。陽子崩壊などのバックグラウンドを低減し、実際に到達感度を高められることが分かった。これに HPD のダークレートと高い電荷分解能を合わせれば、さらに物理感度を向上できる可能性がある。

(6) 本研究によって、20 cm HPD の実証試験と 50 cm HPD 開発を遂げ、ハイパー・カミオカンデの物理感度をより向上できる可能性が広がった。プリアンプ開発に時間を要し、50 cm HPD は水中実証試験が予定より遅れたが、回路設計はほぼ固まったため、今後取り付けて長期間の運用を試す段階にある。ここで判明する細かな改良点を反映し、より確実な長期運用信頼性が確立できる。

(7) 今後の課題として、アンプの時間応答を速める、出力ダイナミックレンジを高めるなど、細かなアンプ設計の改善事項が残されている。HPD はガラスバルブの微調整や、製造

面での作り込み・品質管理の確立を経て、実際にハイパー・カミオカンデで実用可能な高性能光検出器になりうると見込まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Yasuhiro Nishimura 他、Development and measurement of new large-aperture photodetectors for Hyper-Kamiokande、2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC)、査読有、2013、1-5
DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829483
- ② Seiko Hirota, Yasuhiro Nishimura 他、The development of a hybrid photo-detector (HPD) for the Hyper-Kamiokande project、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A、査読有、732、2013、303-305
DOI: 10.1016/j.nima.2013.05.122
- ③ Seiko Hirota, Yasuhiro Nishimura 他、Development of Hybrid Photo-detectors for the Hyper-Kamiokande Experiment、Nuclear Physics B - Proceedings Supplements、査読有、253-255、2014、208-209
DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.052

[学会発表] (計 9 件)

- ① 西村 康宏、Development and Measurement of New Large-Aperture Photodetectors for Hyper-Kamiokande、The 2013 IEEE Nuclear Science Symposium、2013 年 10 月 30 日、ソウル (韓国)
- ② 西村 康宏、Development and proof-test of new large-aperture photo-detectors for a gigantic Cherenkov detector、The 14th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13)、2013 年 11 月 11 日、東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 (千葉県・柏市)
- ③ 西村 康宏、Viability Test of 20-cm Hybrid Photodetector in a Water Cherenkov Detector、XXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2014)、2014 年 6 月 6 日、ボストン (アメリカ合衆国)
- ④ 西村 康宏、Development of the Hyper-Kamiokande detector、The 2nd

International Symposium on Science at J-PARC、2014年7月14日、高エネルギー加速器研究機構（茨城県・つくば市）

- ⑤ 西村 康宏、ハイパーカミオカンデ用新型大口径光検出器の水チェレンコフ光検出器における実証試験、日本物理学会2014年秋季大会、2014年9月14日、佐賀大学（佐賀県・佐賀市）
- ⑥ 西村 康宏、Photodetector Development for Hyper-Kamiokande、The Advances in Neutrino Technology (ANT2014)、2014年9月22日、Los Angeles（アメリカ合衆国）
- ⑦ 西村 康宏、A Test of New Large Aperture Photodetectors in a Water Cherenkov Detector、International Conference on New Photo-Detectors (PD15)、2015年7月7日、モスクワ（ロシア）
- ⑧ 西村 康宏、ハイパーカミオカンデに向けた新型高性能光検出器の水中実証試験、日本物理学会 2015年秋季大会、2015年9月26日、大阪市立大学（大阪府・大阪市）
- ⑨ 西村 康宏、ハイパーカミオカンデ新型光検出器の安全性評価、2016年3月21日、東北学院大学（宮城県・仙台市）

〔図書〕（計 0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hyper-k.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 康宏（NISHIMURA, Yasuhiro）

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：40648119