

令和元年5月24日現在

機関番号：12501

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06560

研究課題名(和文) 高感度光電子増倍管を用いた次世代光検出器のための読み出し・制御システム開発

研究課題名(英文) Development of readout/control system for the new optical module with high QE PMT

研究代表者

永井 遼 (Nagai, Ryo)

千葉大学・大学院理学研究院・特任助教

研究者番号：00801672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、2022/23年に計画されているIceCube実験高度化に用いる新型光検出器"D-Egg"に搭載するフロントエンドシステムを開発することである。このシステムには南極深氷河という過酷な環境での長期運転のために非常に厳しい条件が課される。本研究では、高性能ADCとFPGAを用いることでデッドタイムを極限まで抑える高速デジタル化回路基板を製造し、試験用のファームウェア・ソフトウェアを一から開発してこのプロトタイプを評価した。結果として、当初要求した性能のうち基板ノイズ以外の項目において要求を満たすことを確認した。これを基に次期プロトタイプ基板を設計し、現在製作に取り掛かっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は現行システムとは異なり、継続的なデータ収集を行うことでデッドタイムを抑え、広いダイナミックレンジにより、単光子事象から数百個の光電子までの事象を高分解能で検出することを可能とするデザインである。これについて本研究においてほぼ確立してはいるが、これからの検出器インストールにより、超高エネルギーニュートリノのエネルギー分解能の改善や氷河中の光学的特性の理解に貢献することが期待される。結果として、IceCube実験全体の系統誤差の改善につながり、高エネルギーニュートリノの起源天体の解明や、宇宙線の生成過程についての高精度での知見が得られることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We are developing the new detector for IceCube Upgrade called "D-Egg," which consists of two 8" photomultiplier tubes in a glass vessel. Since it will be installed in Antarctic deep ice, the data taken by the module are digitized at the front-end continuously and sent to the surface data center. To do this, we developed the front-end board, including the high-performance ADC and FPGA, and its firmware and software. During this project period, the first prototype of the front-end board for D-Egg has been produced and been tested for its performance, e.g., the dynamic range, electrical noise, and the charge distribution. Long term operation at a low temperature has been verified. We confirmed the first prototype front-end board satisfies the requirements except for the electrical noise. We are now designing the next revision of the board based on the results of the performance tests.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：DAQシステム開発 光検出器 ニュートリノ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

南極深氷河に設置されている IceCube は、宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノを観測するための装置で現在稼働中である。IceCube 実験グループは世界初の超高エネルギーニュートリノを観測することに成功したが、ニュートリノ生成天体の特定のためにはさらなる統計量や氷河由来の系統誤差を抑えることが必要である。このため、検出感度上昇と氷河の性質の理解のために IceCube 実験の大規模なアップグレードが計画されている (IceCube-Gen2 計画)。IceCube-Gen2 により、超高エネルギーニュートリノ検出感度を $O(10)$ TeV から $O(1)$ PeV エネルギー領域について 5 倍に高めることができると推定されている。

このアップグレード計画に用いるための検出器として、千葉大学グループでは光電子増倍管を 2 台に増やした全く新しいデザインの光検出器の開発を進めている。下向き 1 台に光電子増倍管を配置した従来型に比べ、上下方向に光電子増倍管を配置することで立体角 4π に感度を持つ。しかし、光電子増倍管が 2 倍に増えるということは制御の複雑性及び消費電力の増加が見込まれ、フロントエンドでのデータ収集系、システム制御系の新規開発が必要不可欠である。研究開始当初はデータ収集系、制御系のデザインは固まっていない状況であり、現行の検出器の回路を流用した初期段階の回路があるのみであった。

2. 研究の目的

前述のように、新型光検出器デザインはほぼ固まっているものの、肝心であるデータ収集系のデザインは固まっていない。この新型検出器の特色を生かし、IceCube-Gen2 計画で超高エネルギーニュートリノに対する検出感度を最大限上昇させるためには、フロントエンドでの効率良いデータ収集系の構築は必要不可欠である。本研究はこのデータ収集系、および光検出器制御系の設計と最適化を目的とした。

さらに、本研究では以下の点に留意しなければならない。すなわち、

- ・超高エネルギーニュートリノ事象検出に最適化し、確実にニュートリノ信号を捕らえる読み出し系
- ・極低温下での長期安定性を備えた回路制御系

である。これを両立するハードウェアとそれに搭載するファームウェア、ソフトウェアを含めたシステム全体の開発、評価を達成することが目的である。

3. 研究の方法

データ収集の制御は FPGA を用いて行うが、これに搭載する予定のファームウェアは雛形があるに留まる。初年度は回路開発とともに評価テストに用いるためのテストファームウェアの開発を主軸とした。まずはフロントエンド基板に搭載予定の FPGA であるインテル社製の Cyclone V E シリーズの FPGA の評価基板を用いて、ファームウェア開発を行う。具体的には、

- ・2ch 同時読み出しのためのバッファおよびトリガーシステムの実装
- ・光電子増倍管の制御機構の実装

である。評価基板でその動作を確認した上で製作中のプロトタイプ基板に実装し、次年度はプロトタイプ基板の挙動を見ることに重点を置く。試験項目としては、

- ・擬似信号を用いた 2ch 同時読み出しの確認
- ・適切なダイナミックレンジの達成と、信号線型性の確認
- ・低温下での長期動作安定性
- ・ノイズレベルの確認

である。プロトタイプ基板においては全てが同時に達成されとは限らないため、不具合や不足があればその都度回路の改良を試み、本研究の最終年度をめどに実機用のフロントエンド基板の開発とファームウェア開発に移行する。

4. 研究成果

(1) 2017 年度 (回路不良の発見とその修正)

初年度 (8 月から 2018 年 3 月) においては、ファームウェアの開発を主軸とし、初年度中に完成するプロトタイプ基板がまず正常に動作するかどうかの確認を行った。

まずは、実験室にアナログ信号を基板に入力して FPGA から波形を取るための設備を構築した。ファームウェア開発においては既存 FPGA 評価ボードを用いて 1ch の単純なファームウェアを順調に構築し、正常動作を確かめた。しかし、9 月に製造ラインから到着した最初のプロトタイプには多数の不具合が見つかり、修正に長大な時間を要した。そのため、ファームウェアの開発に

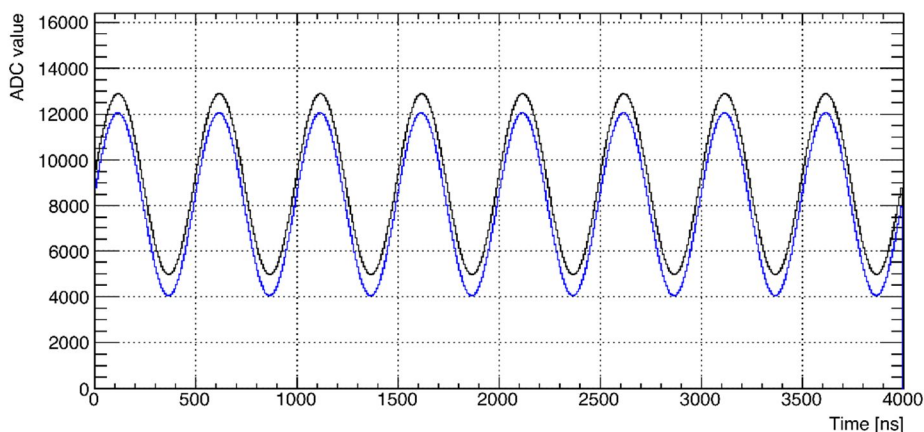


図 1: 2ch からの同時読み出し結果

ついても遅れが生じたが、最終的にはプロトタイプ基板に 1ch の擬似信号を入れて ADC からのデジタル化された信号の波形を正しく受け取ることに成功した。

基板の完成の際には IceCube グループ会議において成果を報告し、今後の方針について議論を交わし、1 度の国際会議と 2 度の国内学会でその進捗を報告した。

(2)2018 年度 (性能評価と最適化、実機用モデルの設計)

前年度において修正に時間を要したため、2ch 同時読み出し用のファームウェア開発については本年度から行った。したがって、本年度における目標は以下の通りである：

- ① FPGA に実装する実用に近い 2ch 同時読み出し可能なテストファームウェアの開発
- ② 擬似測定系を用意した性能評価(要求値を満たすか)
- ③ プロトタイプ基板の性能評価結果を考慮した、実機用回路基板の設計

(2)-① 2ch 同時読み出し可能なテストファームウェアの開発

以下に示す仕様のテストファームウェアを構築した。

- ・ 外部トリガーに対応
- ・ 2ch バッファを用意し、ソフトプロセッサを FPGA に構築することで PC 転送が可能
- ・ ベースラインコントロールのためのオフセット電圧印加用の DAC スローコントロール
- ・ ADC, FPGA ピンアサインの不具合による初期設定コマンド送信

これをプロトタイプ基板に実装し、擬似信号としてサイン波を送信した結果が図 1 である。この図のように、正しく 2ch からの信号が同時に取得できていることを確認した。

(2)-② 擬似測定系を用意した性能評価

まず、擬似パルスを用いてダイナミックレンジの評価を行った。パルスジェネレータから様々な波高をプロトタイプ基板に送信し、最大値の評価を行った。この結果、初期設計における最大値は 1.6V が限界であったが、アナログ回路の増幅回路を変更することでこれを 3.5V まで増大させることに成功した。これは光電子にして数百個に相当し、検出器較正や超高エネルギーニュートリノ検出に必要な最大光電子数とほぼ一致し、要求を満たすことに成功した。

光電子増倍管と接続し、LED の発光タイミングに合わせてトリガーを発行することにより、光電子増倍管波形の取得と単光子事象のヒストグラムの取得を試みた。その結果が図 2 に示す通りである。図 2 の単光子事象のヒストグラムを参照すると、単光子事象を表す 2 番目のピークとはじめの谷との比(P/V 比)が約 2 で取得できていることがわかる。光電子増倍管の仕様として、浜松ホトニクスから提供された資料によると、この P/V 比は 2.8 が標準値である。従って、本プロトタイプ基板を通したことにより、若干 P/V 比が悪化することが確認されたことになる。これはアナログ信号系に侵入したノイズが原因であるとみられ、3 つの方法によりこれを詳細に評価した。1 つ目は、基板を金属箱に入れることで外部電波の影響を防ぐ方法である。この方法により、裸で観測できる強い外部電波の影響は排除できたが、ノイズの総量は変わらなかった。2 つ目の方法は、電波暗室を用いる方法である。これにより、10GHz 帯までの電波を完全に遮断することができるが、結果に変化はなかった。3 つ目の方法として、この波形を FFT を用いて周波

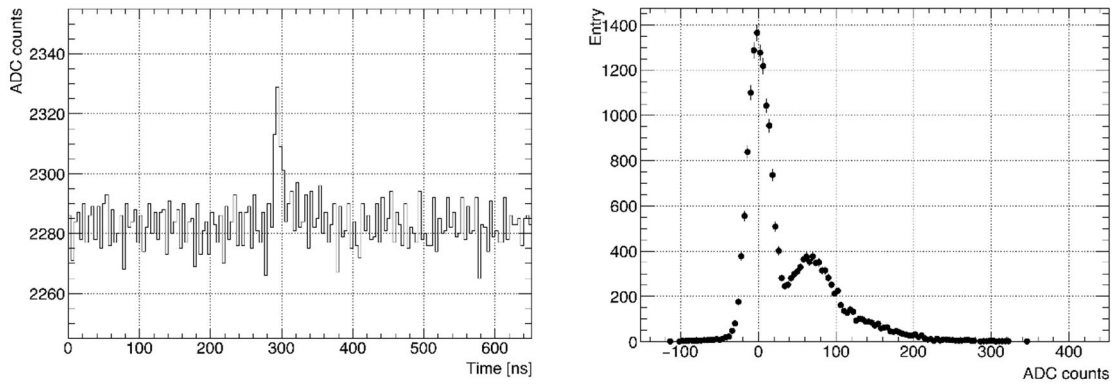


図 2: 光電子増倍管からの波形(左)。単光子事象のヒストグラム(右)。

数解析すると 20MHz を基調とする信号が混入していることがわかった。この 20MHz という周波数はプロトタイプ基板の発振器クロック周波数であり、プロトタイプ基板のレイヤー3 に配置されたクロック供給ラインが底面レイヤーに配置されたアナログ信号線に直接影響を及ぼしていると結論付けることができた。これをもとに、後述の実機用基板の設計を進めた。

また、本研究で開発するシステムにおいて重要な項目の一つが、極低温安定性である。これを確認するために、実験室内の極低温冷凍庫(-55 まで下げることが可能)を用いて、低温時継続運転の試験を実施した。これを行うために、ファームウェアの改良を要した。FPGA から PC に転送する機構をソフトプロセッサから基板に設置されているシリアル通信システム(UART)に変更した。これはソフトプロセッサと PC を直接つなぐための中間基板が低温に対応していないためである。この変更によりタイミングの正確性は失われてしまったが、十分に長い擬似パルスを送信することでプロトタイプ基板の応答に変化があるかを調査した。調査は 38 時間にわたる継続運転により行われ、室温、-15 、-23 、-23 、-32 、-37 、-38 の各点での応答を比較した。その結果、10%の不定性で各点が一致することが確かめられた。従って、少なくとも 38 時間の単位においては、低温下での運転に問題はないということが確認できた。

最後に、基板の機械特性を調査した。この基板は検出器のフロントエンドに配置され、交換が不可能である。南極に輸送する際の振動によって基板が破壊されると復旧は不可能であることを意味する。神奈川県相模原市にある IMV Tokyo テストラボにおいて、アSEMBルされた検出器でのプロトタイプ基板の機械特性を評価した。評価にはトラック輸送及び航空機輸送を仮定し、標準的な試験項目を用いて最大 30G の衝撃を加えて破壊されていないかを調べた。結果として、基板に電氣的、機械的な不具合は確認されず、プロトタイプ基板が機械的に安定であることが示された。

以上、(2)-②の項目をまとめると、テスト用ファームウェアの開発が順調に進められた。これを用いて 2ch 同時読み出し、ダイナミックレンジの適切な設定、光電子増倍管からの信号取得、ノイズの評価、低温安定性を確認し、機械特性に問題ないことを確認した。結果として、大きなノイズが確認されたものの、これ以外の項目について要求性能を満たしていることを確認することができた。

(2)-③プロトタイプ基板評価に基づいた、実機用回路基板の設計

前項目に基づき、実機用回路基板の設計を 2018 年度後半から開始した。(1)で確認したように、基板上には様々な問題が確認され、中でも FPGA と ADC のピンアサインの不良は解決すべき課題であった。また、検出器内にどのような向きで配置するか、ケーブルの取り回しなど、機械的な要求も改めて設計に組み込んだ。この際には、他研究機関開発中の、同時に用いる検出器との統一的な制御の観点からコミュニケーションのための新たなモジュールの設計を組み込み、FPGA の機能を整理した。本研究の期間内にこの設計がおおよそ完了し、追って製造、評価に入る運びとなっている。

(3)本研究成果の位置付けとインパクト

本研究は IceCube 実験アップグレードに際して用いる新型検出器開発の一環ではあるが、本研究が独立主導して行われたものである。厳しい要求の中で、ノイズを除くほぼ全てを満たしたシステムを開発、評価したのは初であり、これに沿ったアップグレードに関する後段システム開発が他機関により進められている。ウィスコンシン大学マディソン校とペンシルベニア州立大学と共同で設計を進め、KEK Open-It のサポートを得て、本研究は進められた。

本研究により製作、評価されたシステムは、継続的なデータ収集を行うことでデッドタイムが最小限に抑えられ、単光子から数百光子数までカバーする広いダイナミックレンジを持つものである。このシステムが検出器にインストールされることで、高エネルギーニュートリノのエネルギー分解能の改善や氷河中の光学的特性の理解に大きく貢献する。これにより、高エネルギーニュートリノや宇宙線の生成過程についての高精度での知見が期待できる。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 9 件)

- (1) 永井遼, et al., 「IceCube 実験次期計画のための読み出し回路系実機用プロトタイプ的设计・製作および評価」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019.
- (2) Ryo Nagai, "Development of the Front-end Electronics for the New Optical Module "D-Egg" for IceCube-Gen2", the 5th International Workshop on New Photon-Detectors (PD18), 2018.
- (3) Ryo Nagai, "Status of D-Egg readout electronics", Fall Collaboration Meeting 2018 (Stockholm, Sweden), 2018.
- (4) 永井遼, et al., 「IceCube-Gen2 Phase 1 に用いる新型検出器『D-Egg』のデータ読み出し回路系的设计と基本項目評価」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018.
- (5) Ryo Nagai, "Status and plans of the DAQ development for D-Egg", Spring Collaboration Meeting 2018 (Atlanta, Georgia, US), 2018.
- (6) 永井遼, et al., 「IceCube-Gen2 実験のための新型光検出器『D-Egg』に用いる読み出し・制御システム開発」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018.
- (7) Ryo Nagai, "The "Egg" Optical Module", Mediterranean Antarctic Neutrino Telescope Symposium (MANTS) 2017, 2017.
- (8) Ryo Nagai, "Status of the development of Readout/Controlling System for D-Egg", Fall Collaboration Meeting 2017 (Berlin, Germany), 2017.
- (9) 永井遼, et al., 「次世代ニュートリノ望遠鏡 IceCube-Gen2 のための新型光検出器『D-Egg』の読み出しシステム開発」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等：http://openit.kek.jp/project/DEgg_DAQ/DEgg_DAQ (作成中)

6 . 研究組織

- (1)研究分担者なし
- (2)研究協力者なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。