

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340062

研究課題名(和文)世界に先駆けた電子ニュートリノ振動検出を可能にするための遠方検出器についての研究

研究課題名(英文) Water Cherenkov Detector Research to Enable the World's First Detection of Muon to Electron Neutrino Oscillations

研究代表者

大林 由尚 (Obayashi, Yoshihisa)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：50345055

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では長基線ニュートリノ振動実験T2Kの最も重要な検出器であるスーパーカミオカンデについて、検出器ハードウェアの安定運用による稼働率向上、ニュートリノ事象の時刻決定の安定運用、検出器の反応点再構成とエネルギー測定システムの系統誤差の低減のため、ハードウェアおよび解析ソフトウェアの改良を行った。これらの成果が大きく生かされ、T2K実験グループは2011年の震災、2013年の事故による2度の実験中断を乗り越え、世界に先駆けてニュートリノ振動による電子ニュートリノ出現を検出し、公表した。

研究成果の概要(英文)：Upgrades to the hardware and analysis software of Super-Kamiokande, the far detector and integral component of the T2K long-baseline neutrino oscillation experiment, have been performed to enable both stable operation of the detector and to reduce systematic uncertainties associated with measurements of neutrino interaction times, vertices, and energies. Using these improvements and overcoming shutdowns due to an earthquake in 2011 and an accident in 2013, T2K has made the world's first observation of oscillation-induced electron neutrino appearance. Knowledge and experience gained throughout this work will be utilized in future studies towards the realization of the next generation of neutrino experiments.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ニュートリノ振動 水チェレンコフ検出器 加速器実験 T2K

1. 研究開始当初の背景

スーパーカミオカンデ(SK)が1998年に発表したニュートリノ振動の発見以来、ニュートリノの質量と混合に関する研究が世界中で進捗しつつあった。その中でも、3世代のニュートリノの間の3つの混合角(θ_{12} , θ_{23} , θ_{13})のうち、未測定であった θ_{13} については、加速器実験であるT2KやMINOS、原子炉実験であるCHOOZ、Daya Bay、RENOなどが、世界最初の発見を目指して先を争うように実験を進めていた。

その中のひとつ、T2K実験では茨城県東海村に新しく建設した加速器J-PARCを用いて2009年4月からニュートリノビーム照射を開始した。検出器として用いているSKは2009年の時点で10年以上稼働を続けている、実績のある検出器ではあるが、多くの競争相手に先駆けて世界で最初に θ_{13} の測定を成し遂げるためには、これまで以上に精密かつ安定にニュートリノ事象を測定することが欠かせなかった。

2. 研究の目的

T2K実験で世界に先駆けた θ_{13} の測定となる電子ニュートリノ出現現象の検出を実現するため、当実験の遠方検出器であるスーパーカミオカンデを、検出器としての性能を最大限引き出すように改良し、精密な較正を行う。特に、ニュートリノビームが照射されている期間は稼働率100%を保證できるように体制を整える。また、エネルギー再構成の分解能を向上し、エネルギー測定(絶対スケール)の不定性を小さくすることで電子ニュートリノ選別の系統誤差を小さくし、信号対バックグラウンド比を向上して実験の感度を高く保つ。

3. 研究の方法

スーパーカミオカンデ検出器の稼働率100%を保證するため、ビーム情報のリアルタイム転送経路の確保、無停止キャリブレーションシステムの整備、高電圧電源の更新に伴うコントロールのためのソフトウェアの開発、更新前後の検出器の特性の変化を詳査する。また、反応点再構成精度向上のため時間幅の短いレーザーダイオードを導入して様々な較正作業を行い、検出器の時間応答性能を検出器の限界まで向上させる。さらに、エネルギー再構成の性能を向上するために、再構成のプログラムの各補正パラメータを見直して分解能を向上させ、また絶対スケールの較正を行う。最終的に、全ての較正パラメータについて経時変化をモニタし、変化若しくはその予兆が見られた場合に対処できるような警告システムを整備する。

4. 研究成果

本研究ではスーパーカミオカンデ(SK)の安定運用による稼働率向上、ニュートリノ事象の時刻決定の安定運用、レーザーダイオー

ド装置等を用いた精密較正による検出器の反応点再構成とエネルギー測定 of 系統誤差の低減を行った。これらの成果を生かし、T2K実験では2011年の震災、2013年の事故による2度の実験中断を乗り越え、以下の実験結果を世界に先駆けて公表した。

(1)2011年6月15日「世界初、電子型ニュートリノ出現現象の兆候を捉える」震災前までに取得した全データを解析し、電子型ニュートリノによると考えられる事象を6個発見した。

(2)2012年1月18日「ミューオンニュートリノ消失事象に関してオフアクシズ法による初めての測定結果」震災前の全データ中、もしニュートリノ振動がない場合ミューオンニュートリノ事象が104個観測されると期待されるのに対し、実際には31個しか観測されなかった。

(3)2013年7月19日「電子型ニュートリノ出現現象の存在を明らかに！」2013年4月までに得られた532個のニュートリノデータから、28個の電子ニュートリノ事象をとらえた。このことは、ニュートリノ振動がない場合、統計的ゆらぎでこのようなデータが偶然によって現れる確率は1兆分の1以下しかない、電子ニュートリノ出現事象の決定的証拠といえる。

(4)2015年5月19日「反ミューオンニュートリノ消失事象の初検出」2014年5月から2015年3月にかけて取得した反ニュートリノビーム事象のデータから、ニュートリノ振動がない場合には約60個の(反)ニュートリノ事象が観測されると予測されるのに対し、実際には17個しかされないことから、反ニュートリノに於いてもニュートリノ振動を検出した。この結果は、T2K実験の枠組みで反ニュートリノの観測も予定通りの性能で進められることを示し、将来、次世代の検出器を用いた物質と反物質の対称性に関する実験に向けた大きなステップであると言える。

また、本研究で得た大型水チェレンコフ検出器の性能向上と安定運用に関する知見と経験を、現在議論が大きく進みつつある、ハイパーカミオカンデを始めとする次世代の超大型の水チェレンコフ検出器の設計に生かす事ができた。

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5件、総件数46件)

1) K. Abe, Y. Koshio(105番目), H. Tanaka(219番目), T. Tomura(225番目), et

- al.(計 249 名), “Physics potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande”, Prog. Theor. Exp. Phys. 053C02 (2015), 査読有, DOI: 10.1093/ptep/ptv061
- 2) K. Abe, Y. Koshio(7 番目), Y. Obayashi (14 番目), H. Tanaka(20 番目), T. Tomura(21 番目), et al.(計 133 名), “Calibration of the Super-Kamiokande detector”, Nucl. Inst. Meth. A 737, 253-272 (2014), 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2013.11.081 <http://arxiv.org/abs/1307.0162>
- 3) K. Abe, Y. Koshio(157 番目), Y. Obayashi (234 番目), T. Tomura(321 番目), et al.(計 358 名), “Evidence of electron neutrino appearance in a muon neutrino beam”, Phys. Rev. D 88, 032002 (2013), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.032002 <http://arxiv.org/abs/1304.0841>
- 4) K. Abe, Y. Koshio(188 番目), Y. Obayashi (286 番目), et al.(計 442 名), “First Muon-Neutrino Disappearance Study with an Off-Axis Beam”, Phys. Rev. D 85, 031103(R) (2012), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.85.031103 <http://arxiv.org/abs/1201.1386>
- 5) K. Abe, Y. Koshio(174 番目), Y. Obayashi (262 番目), et al.(計 411 名), “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011), 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.041801 <http://arxiv.org/abs/1106.2822>
- [学会発表](計 13 件, 総件数 29 件)
- 1) 田中秀和, 「T2K 実験の電子反ニュートリノ出現事象探索」, 日本物理学会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学早稲田キャンパス(東京都・新宿区)
- 2) Yusuke Koshio, “The observation of gamma rays via neutral current interaction at Super-Kamiokande using the T2K neutrino beam”, NuFact2014:XVIth International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (招待講演), 2014 年 8 月 25 日, グラスゴー(英国)
- 3) Yusuke Koshio, “Future long baseline neutrino experiment by J-PARC and Hyper-Kamiokande”, The 2nd International Symposium on Science at J-PARC (招待講演), 2014 年 7 月 12 日, つくば国際会議場(茨城県・つくば市)
- 4) 田中秀和, 「ハイパーカミオカンデ計画とその検出器設計」, 日本物理学会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
- 5) Lluís Marti Magro, Masato Shiozawa, Tomonobu Tomura, Euan Neil Richard, Nao Okazaki, Yoshihisa Obayashi, Hidekazu Tanaka, Yue Yang, “Cross comparison analyses for the new HV system at Super-Kamiokande”, 日本物理学会, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
- 6) 戸村友宣, 塩澤真人, Lluís Marti Magro, Euan Neil Richard, 岡崎奈緒, 大林由尚, 田中秀和, 楊月, 「Super-Kamiokande における内水槽光電子増倍管用高電圧電源装置の入れ替え」, 日本物理学会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)
- 7) 田中秀和, 「T2K 実験ニュートリノ振動解析のための Super-Kamiokande 検出器系統誤差の評価」, 日本物理学会, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学朝倉キャンパス(高知県・高知市)
- 8) Hidekazu Tanaka, “Hyper-Kamiokande Project”, European Physical Society Conference (招待講演), 2013 年 6 月 19 日, スtockホルム(スウェーデン)
- 9) 岡崎奈緒, 早戸良成, 戸村友宣, Lluís Marti Magro, 森俊彰, Euan Neil Richard, 塩澤真人, 大林由尚, 「スーパーカミオカンデ実験における新しい高圧電源システムの導入状況の報告」, 日本物理学会, 2013 年 3 月 26 日, 広島大学(広島県・広島市)
- 10) 戸村友宣, 「Super-Kamiokande での新エレクトロニクス開発と HV 入れ替え」, 計測システム研究会 2012, 2012 年 11 月 5 日, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)
- 11) Yoshihisa Obayashi, “Nucleon Decay Search at Hyper-Kamiokande”, Fundamental Physics at the Intensity Frontier Workshop (招待講演), Rockville, USA, 2011 年 11 月 30 日, ロックビル(米国)
- 12) Yoshihisa Obayashi, “Next Generation Water Cherenkov Detector Hyper-Kamiokande”, 15th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics (招待講演), 2011 年 8 月 19 日, モスクワ(ロシア)
- 13) Yoshihisa Obayashi, “Instrumentation and Calibration of a Water Cherenkov Detector Super-Kamiokande”, Technology and Instrumentation in Particle Physics (TAUP) 2011, 2011 年 7

月 9 日, シカゴ(米国)

〔その他〕

ホームページ等

T2K Experiment

<http://t2k-experiment.org/ja>

スーパーカミオカンデ公式ホームページ

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk>

ハイパーカミオカンデホームページ

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

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大林 由尚 (OBAYASHI, Yoshihisa)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・

特任准教授

研究者番号：5 0 3 4 5 0 5 5

(2)研究分担者

小汐 由介 (KOSHIO, Yusuke)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：8 0 2 9 2 9 6 0

戸村 友宣 (TOMURA, Tomonobu)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：6 0 3 6 1 3 1 7

田中 秀和 (TANAKA, Hidekazu)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：0 0 4 0 2 7 6 9