

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月17日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21244042

研究課題名（和文） 将来の CP 非保存実験を見込んだ T2K 実験の高感度化

研究課題名（英文） Improvement of sensitivity of T2K experiment aiming for future CP violation measurement

研究代表者

小林 隆 (KOBAYASHI TAKASHI)

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・教授

研究者番号：70291317

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 の電子ニュートリノ出現事象の感度向上させ、将来のニュートリノにおける CP 非保存探索実験実現のための道筋をつけることを目的とし、前置検出器器から SK への事象数の外挿精度を改善するために、(1)ニュートリノの親粒子であるパイ中間子の生成断面積の精密測定や、(2)新しい前置ニュートリノ検出器の開発を行った。本研究成果は 2011 年に発表を行った世界初の電子ニュートリノ出現事象の兆候の測定、2012 年の有意度 3.2σ での測定に繋がった。また、新しい前置ニュートリノ検出器として小型水チェレンコフ検出器の開発を進めた。本研究の成果は、国際会議や国内の学会、また学術論文で発表した。

研究成果の概要（英文）： We aim for improving the T2K sensitivity of electron neutrino appearance and proceeding towards future experiment for CP violation measurement. For these purpose, we performed a precise measurement of production cross section of the neutrino parent particles. Based on studies in this project, we reported the indication of electron neutrino appearance in 2011, and furthermore we reported the evidence with 3.2σ significance in 2012. We also developed a new-type water Cherenkov detector in order to improve near-to-far extrapolation in T2k experiment. We have reported results of this project at international conferences, Physical Society of Japan meetings and journal articles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2010年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	22,200,000	6,660,000	28,860,000

研究分野：ニュートリノ物理

科研費の分科・細目：物理学、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, CP 対称性非保存, ハドロン生成, 水チェレンコフ検出器

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノの性質解明のための次の重要な課題は 1-3 世代間混合の測定と CP 非保存探索である。ニュートリノにおける CP 非保存は、陽子崩壊とともに物質優勢宇宙の起源を解明する鍵となる可能性が指摘されて

おり、その有無の確認が急がれており、世界の素粒子研究者が競って実験手法の提案、技術開発を進めている。また、CP 非保存現象の大きさは、研究開始当時、唯一未知の混合である 1-3 世代間の混合度に比例するため、将来の CP 非保存検出成否のカギは 1-3 混合

の大きさが握っている。このことから 1-3 混合はニュートリノ物理ひいては素粒子物理学の今後の方向に大きく影響を与えるため、その決定は緊急の課題となっている。

T2K 実験は、1-3 混合を測定することを初期の最重要課題とする長基線ニュートリノ振動実験で、大強度陽子加速器 J-PARC を用いて 700MeV 前後のミューオンニュートリノビームを生成し、295km 離れたスーパーカミオカンデ(SK)で検出する。2009 年度から実験を開始した。将来的にはビームの大強度化、検出器の高性能化をはかり CP 非保存探索に挑むことを目指している。

2. 研究の目的

本研究では、T2K 実験の電子ニュートリノ出現事象の感度向上を目指すとともに、将来のニュートリノにおける CP 非保存探索実験実現のための道筋をつける。

3. 研究の方法

SK における事象数予想精度高めることによって 1-3 混合、CP 非保存探索の感度を高めることを目的とし、研究期間内に事象数予想精度 10%以下を達成、さらに将来の CP 非保存実験の目標精度 2%を実現するための道筋を定めることを目標とする。

SK における事象数予想精度の向上ために、

(1) ニュートリノの親粒子であるパイ中間子の生成断面積の精密測定や、(2)新しい前置ニュートリノ検出器を開発して前置検出器から SK への事象数の外挿精度の改善を行う。

4. 研究成果

(1)について、CERN NA61 実験でパイ中間子、K 中間子の生成断面積の精密測定を行った(図1)。この結果を用いて T2K 実験のニュートリノビームの生成の理解を深め、SK でのニュートリノフラックスの不定性 5%以下、また前置検出器からの外挿に対する不定性を約 2%と小さく抑えた。この事により、電子ニュートリノ出現事象の感度を向上することができ、2011 年には初期の T2K 実験データを用いて世界初の電子ニュートリノ出現事象の兆候を見つけて発表した。また、2012 年夏までのデータを解析して、電子ニュートリノ出現事象を有意度 3.2σ での測定に繋がった(図2)。

(2)については、SK と同じ水チェレンコフ検出器で全方向の事象を測定することのできる検出器として、小型の水チェレンコフ検出器の開発を行った。同じ水とニュートリノの反応を SK と似たアクセプタンスで測定することで、外挿の不定性を小さくすることができる。研究では、2重の水槽構造を持ち、内

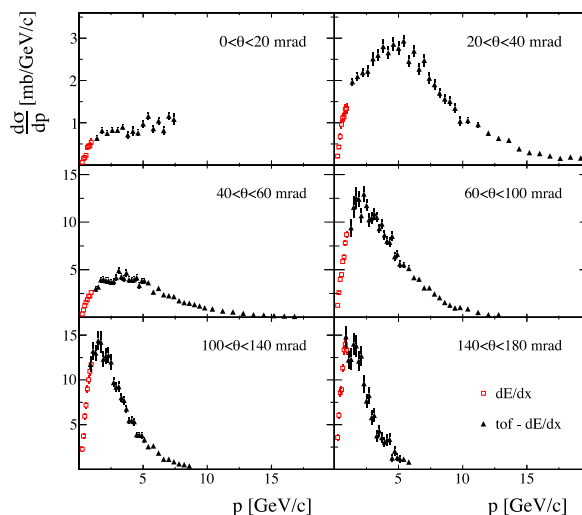


図1：測定したパイ中間子の運動量分布。各生成角度毎にまとめている。(学術論文より引用)

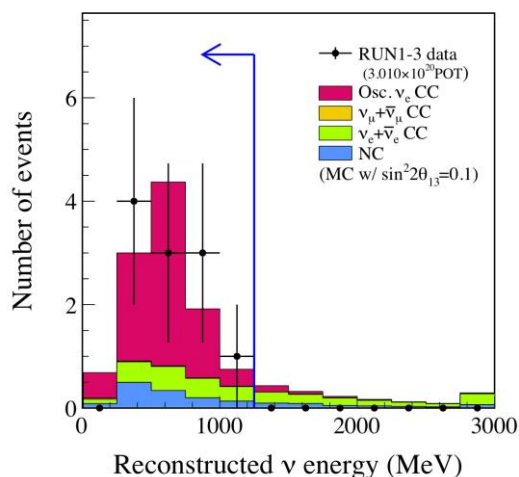


図2：2012年夏までに収集したデータを解析して、11事象の電子ニュートリノ出現事象を測定した(予想背景事象数3.22事象)。この結果から、1-3混合がないとする仮定を 3.2σ の有為度で棄却した。国際会議ICHEP2012にて発表。

側の水槽(アクリル水槽)の内部の水を出し入れすることで、この内部の水で起こった事象数を精度よく測定することを目指した。検出器として内部水槽容量0.5トン、総容量2.5トンの水チェレンコフ検出器を建設した。宇宙線や校正用光源を用いた検出器の理解を進めたあと、T2K 実験の前置検出器ホールにてビーム事象の測定を進めた。収集したビ

ームデータを用いて、ニュートリノ以外の背景事象の理解を進めている。

本研究の成果は、国際会議や国内の学会、また学術論文で発表した。

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 7 件)

- ① K. Abe, T. Kobayashi, T. Hasegawa, T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "The T2K Neutrino Flux Prediction", *Physical Review*, 査読有り, D87, 2013, 12001. DOI: 10.1103/PhysRevD.87.012001, 10.1103/PhysRevD.87.019902.
- ② K. Abe, T. Kobayashi, T. Hasegawa, T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "Measurement of the Inclusive NuMu Charged Current Cross Section on Carbon in the Near Detector of the T2K Experiment", *Physical Review*, 査読有り, D87, 2013, 092003. DOI: [10.1103/PhysRevD.87.092003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.092003)
- ③ N. Abgrall, T. Kobayashi, T. Hasegawa, T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "Pion emission from the T2K replica target: method, results and application", *Nucl. Instrum. Meth.*, 査読有り, A701, 2013, 99. DOI: 10.1016/j.nima.2012.10.079
- ④ N. Abgrall, T. Kobayashi, T. Hasegawa, T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "Measurement of Production Properties of Positively Charged Kaons in Proton-Carbon Interactions at 31 GeV/c", *Physical Review*, 査読有り, C85, 2012, 035210. DOI: [10.1103/PhysRevC.85.035210](https://doi.org/10.1103/PhysRevC.85.035210)
- ⑤ K. Abe, T. Kobayashi, T. Hasegawa, T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "First Muon-Neutrino Disappearance Study with an Off-Axis Beam.", *Physical Review D*, 査読有り, 85, 2012, 031103. DOI: [10.1103/PhysRevD.85.031103](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.031103)
- ⑥ K. Abe, T. Kobayashi, T. Hasegawa, T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam.", *Physical Review Letters*, 査読有り, 107, 2011, 041801. DOI: [10.1103/PhysRevLett.107.041801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.041801)
- ⑦ N. Abgrall, T. Kobayashi, T. Hasegawa,

T. Nakadaira, K. Sakashita, M. Shibata 他, "Measurements of Cross Sections and Charged Pion Spectra in Proton-Carbon Interactions at 31 GeV/c", *Physical Review*, 査読有り, C84, 2011, 034604. DOI: 10.1103/PhysRevC.84.034604

[学会発表] (計 13 件)

- ① 黄坤賢, "小型水チェレンコフ検出器 Mizuche を使った T2K 前置検出器実験室でのニュートリノ反応測定", 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013/3/27, 広島
- ② 黄坤賢, "小型水チェレンコフ検出器 Mizuche を使った T2K 前置検出器部分でのニュートリノ反応数の測定 (2)", 日本物理学会秋季大会, 2012/9/14, 京都.
- ③ 高橋将太, "小型水チェレンコフ検出器 Mizuche を使った T2K 前置検出器部分でのニュートリノ反応数の測定 (1)", 日本物理学会秋季大会, 2012/9/14, 京都.
- ④ 小林隆, "Long baseline neutrino experiment", 国際会議 ICHEP2012, 2012 年 7 月 5 日, オーストラリアメルボルン
- ⑤ 坂下健, "Results from T2K", 国際会議 ICHEP2012, 2012 年 7 月 5 日, オーストラリアメルボルン
- ⑥ 高橋将太, "Development of Small Water Cherenkov Detector "Mizuche" at T2K Near Detector Hall", 国際会議 Neutrino2012, 2012 年 6 月 3 日, 京都
- ⑦ 高橋将太, "小型水チェレンコフ検出器 "Mizuche" を使ったニュートリノ反応数測定の実状", 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012/3/25, 兵庫.
- ⑧ 坂下健, "Present and future neutrino beam at J-PARC", 国際会議 NNN2011, 2011 年 11 月 9 日, スイス・チューリッヒ
- ⑨ 高橋将太, "小型水チェレンコフ検出器 "Mizuche" 宇宙線を用いた性能評価の報告", 日本物理学会秋季大会, 2011/9/18, 青森
- ⑩ 小林隆, "Status of T2K", 国際会議 Neutrino 2010, 2010 年 6 月 14 日, ギリシャ・アテネ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 隆 (KOBAYASHI TAKASHI)

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・教授
研究者番号: 70291317

(2) 研究分担者

なし

(3)連携研究者

長谷川 琢哉 (HASEGAWA TAKUYA)

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・教授
研究者番号：40261549

中平 武 (NAKADAIRA TAKESHI)

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・准教授
研究者番号：30378575

坂下 健 (SAKASHITA KEN)

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・助教
研究者番号：50435616

丸山 和純 (MARUYAMA TAKASUMI)

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・准教授
研究者番号：80375401

柴田 政宏 (SHIBATA MASAHIRO)

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・博士研究員

研究者番号：40391974

(H21のみ)