

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105002

研究課題名(和文) 加速器ニュートリノビームによるニュートリノフロンティアの展開

研究課題名(英文) Development of the Neutrino Frontier by an accelerator neutrino beam

研究代表者

中家 剛 (NAKAYA, Tsuyoshi)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：50314175

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 187,640,000円

研究成果の概要(和文)：加速器で生成するニュートリノビームを利用し、世界最高精度でニュートリノ混合行列を決定しCPの破れを探索した。ニュートリノにおけるCPの破れの兆候を95%の有意度で捉えることに成功した。

さらに、(1)電子ニュートリノ出現を発見した(有意度7.3)、(2)ニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23}$ を+6%-11%、 m_{32}^2 を3%と世界最高精度で測定した、(3)ニュートリノCP対称性のパラメータを $\delta_{CP} = -1.87$ (= -1.43) [$m^2 > 0$ (<0) の場合]と決定した。信頼度95%で $-2.99 < \delta_{CP} < -0.59$ [$m^2 > 0$ の場合]の領域に制限を課した。

研究成果の概要(英文)：Using the accelerator-produced neutrino beam, we determine the neutrino mixing matrix in the world best precision and explore CP violation in neutrinos. Finally, we find a hint of neutrino CP violation with 95% significance.

In addition, (1) we discover electron neutrino appearance with 7.3 sigma significance, (2) we measure the neutrino oscillation parameters: $\sin^2 \theta_{23}$ with +6%-11% precision and m_{32}^2 with 3% precision, (3) we determine the neutrino CP violation parameter, δ_{CP} , to be -1.87 (-1.43) radian in the case of $m^2 > 0$ (<0). With 95% confidence level, we constrain δ_{CP} between -2.99 and -0.59 in the case of $m^2 > 0$.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 加速器 素粒子 放射線測定器 原子核反応

1. 研究開始当初の背景

大気ニュートリノ、太陽ニュートリノの振動でニュートリノ振動が発見され、2011年には T2K 実験が3番目の混合角 θ_{13} によるニュートリノ振動(電子ニュートリノ出現)の証拠を捉えた。2012年に原子炉ニュートリノ実験 Daya Bay、RENO、Double Chooz により θ_{13} の値が高精度で決定され、ニュートリノ振動のすべての混合角が決まり、ニュートリノが3世代間で混合していることが分かってきた。そして、3世代混合の結果、ニュートリノ混合行列に複素位相が存在し、ニュートリノ振動で粒子と反粒子の間の対称性(CP対称性)の破れの測定が現実的な研究課題と認識された。ニュートリノでCP対称性の研究を進めるには、ニュートリノ振動パラメータの更なる精密化と反ニュートリノ振動の測定が重要であり、ニュートリノ振動研究の次の目標となった。

2. 研究の目的

ニュートリノ振動の研究の進展により、ニュートリノ質量の存在が確認され、その質量差と混合率が分かってきた。ニュートリノの混合を決める牧・中川・坂田行列の理解が進み、その構造がクォークの小林・益川行列と大きく異なることが分かった。しかし、ニュートリノに粒子・反粒子対称性(CP)の破れが存在するかは分かっておらず、ニュートリノ振動の高精度測定によるCP対称性の解明が重要な課題である。

本研究では、加速器で生成するニュートリノビームを利用し、世界最高精度で牧・中川・坂田行列を決定する。T2K 実験では、世界で最初にミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動を発見し、未知の混合角 θ_{13} の決定に成功した。この発見により、ニュートリノでのCP対称性の測定が現実的な課題となった。本研究で、ニュートリノ振動の精密測定を行い、さらにCPの破れを探索する。

3. 研究の方法

ニュートリノ振動実験 T2K で、大強度・高品質ニュートリノビームを J-PARC で生成し、J-PARC 内に設置した前置ニュートリノ測定器でニュートリノ反応を測定し、295km 離れたスーパーカミオカンデでニュートリノ振動を観測する。加速器ニュートリノビームを用いることで、ニュートリノ振動を高精度で測定でき、ニュートリノ間の質量2乗差とその混合率を世界最高の精度で決定し、CPの破れを探索することが可能となる。本研究では、ニュートリノ振動の測定を高精度化するために、次の5つの課題に挑戦した。

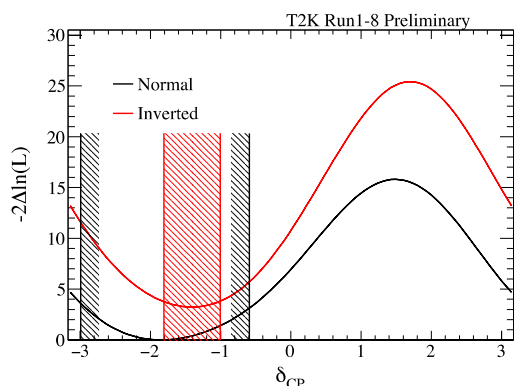
- (1) 加速器とニュートリノビームの強度向上、
- (2) ニュートリノビームフラックスの高精度測定、
- (3) 複数のニュートリノ反応モードの断面積測定によるニュートリノ原子核反応の基準模型構築、
- (4) 系統誤差改善によるニュートリノ振動解析の高度化、
- (5) 反ニュートリノビームを用いた反ニュートリノ振動の測定。

全研究期間を通して、長期間データ収集を実現し、10倍以上の高統計データを貯める。ミューオンニュートリノ消失振動の測定で θ_{23} と $|\Delta m_{32}^2|$ を、それぞれ10%と3%の精度で決定する。電子ニュートリノへの振動を100事象程度観測し(申請時点では11事象)、10%の精度で振動確率を測定する。さらに、A02班の大気ニュートリノ測定と組み合わせることで、CPが最大限に破れている($\theta_{CP} = 90^\circ$)場合には、CPの破れを95%の有意度で発見することを目指す。

4. 研究成果

T2K 実験でのニュートリノ振動の測定と、原子炉反ニュートリノによる θ_{13} の測定結果を組み合わせ、世界で初めてニュートリノで

CP 対称性が破れている可能性を 95% の有意度で発見した。 $\delta_{CP} = -1.872$ ラジアンと決定し、95% で許容される領域は下図の範囲となった。



T2K 実験で、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動の信号を 28 事象観測し、7.3 の信頼度で電子ニュートリノ出現を発見した。最終的には、電子ニュートリノを 90 事象、反電子ニュートリノを 9 事象観測した。

ミューオンニュートリノ消失モードと電子ニュートリノ出現モード、ニュートリノビームと反ニュートリノビームの 4 つの測定を組み合わせ、ニュートリノ振動パラメータを世界最高精度で決定した。特に、測定の難しい混合角 θ_{23} に関して、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.526^{+0.032}_{-0.036}$ 、 $|m_{32}^2| = (2.464 \pm 0.065) \times 10^{-3} \text{eV}^2$ [$m_{32}^2 > 0$ の場合] と世界記録を更新することに成功した。2017 年までは、この測定はアメリカのライバル実験である NO ν A と一致していなかったが、最新の NO ν A 実験の結果は T2K 実験の測定と一致するものとなった。

5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計 20 件)

“First measurement of the μ charged-current cross section on a water target without pions in the final state”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D97, 012001, 2018, 査読有.
DOI: [10.1103/PhysRevD.97.012001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.012001)
“Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K”,

A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett. 118, 151801, 2017, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.118.151801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.151801)

“Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 96, 011102(R), 2017, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.96.011102](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.96.011102)

“First measurement of the muon neutrino charged current single pion production cross section on water with the T2K near detector”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D, 査読有、95 巻、2017、012010 ; 1-11

DOI: [10.1103/PhysRevD.95.012010](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.012010)

“Measurement of double-differential muon neutrino charged-current interactions on C8H8 without pions in the final state using the T2K off-axis beam”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D93 11, 112012, 2016, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.93.112012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.112012)

“Measurement of Coherent μ Production in Low Energy Neutrino-Carbon Scattering”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett 117, 2016, 192501; 1-7, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.117.192501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.192501)

“Measurement of muon anti-neutrino oscillations with an accelerator-produced off-axis beam”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett 116, 181801, 2016, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.181801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.181801)

“Measurements of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 1-3 GeV with the T2K INGRID detector”, A.K. Ichikawa, T. Kobayashi, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya, Y. Seiya 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Physical Review D 93, 072002, 2016, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.93.072002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.072002)
“Measurement of the muon charged current quasi-elastic cross-section on carbon with the T2K on-axis neutrino beam”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 91, 112002, 2015, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.112002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.112002)
“Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with $6.6E20$ protons on target”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Physical Review D 91, 72010, 2015, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.91.072010](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.91.072010)
“Neutrino Oscillation Physics Potential of the T2K Experiment”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Prog. Theor. Exp. Phys, 2015,043C01, 2015, 査読有.

DOI: [10.1093/ptep/ptv031](https://doi.org/10.1093/ptep/ptv031)
“Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett, 112 P 61802, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.112.061802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.061802)
“Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter θ_{23} from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett, 112, 181801, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.211803](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.211803)
“Measurement of Neutrino Oscillation parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett 111, 211803, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.211803](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.211803)
“Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current interaction cross section by observing nuclear deexcitation γ rays”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K

Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 90, 72012, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD90.072012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD90.072012)
“Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett 113, 241803, 2014, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.113.241803](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.241803)
“Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 88, 32002, 2013, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.88.032002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.032002)
“T2K neutrino flux prediction”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 87, 12001, 2013, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.87.012001](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.012001)
“Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. Lett. 111, 211803, 2013, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.111.211803](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.211803)
“Measurement of the Inclusive NuMu Charged Current Cross Section on Carbon in the Near Detector of the T2K Experiment”, [A.K.Ichikawa](#), [T.Kobayashi](#), [A.Minamino](#), [T.Nakadaira](#), [T.Nakaya](#), [Y.Seiya](#) 他 (T2K Collaboration 約 300 名), Phys. Rev. D 87, 92003, 2013, 査読有.

DOI: [10.1103/PhysRevD.87.92003](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.92003)

[学会発表](計 8 件)
“A Status Report of J-PARC/T2HK/T2HKK”, [T.Nakaya](#), The International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies (Lepton Photon 2017), 2017/8/7-12, Guangzhou, China.
“Neutrino Physics from Particle Beam and Decay Experiments”, [T.Nakaya](#), EPS Conference on High Energy Physics, 2017/7/5-12, Venice, Italy.
“Accelerator-based neutrino program in Japan”, [T.Koseki](#), American Physical Society April Meeting 2017,

2017/1/28-31, Washington, USA.
“ Next Generation Neutrino Facility for Long Baseline Oscillation Experiments by Multi-MW Proton SC Accelerators ”, T.Koseki, 18th International Conference on RF Superconductivity (SRF 2017), 2017/7/17-21, Lanzhou, China.
“ Status and Prospect of Recent Neutrino Experiments ”, T.Nakaya, Invisibles 16 Workshop, 2016/9/12-16, Padova, Italy.
“ The Neutrino Experimental Program in the Years 2020-2040 ”, T.Nakaya, NuFact2016, 2017/8/21-27, ICISE, Quy Nhon, Vietnam.
“ Program of accelerator- based experiments in Japan ”, T.Nakaya, The Third International Meeting for Large Neutrino Infrastructures, 2016/5/30-6/1, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan.
“ Neutrino Program in Japan ”, T.Nakaya, ICFA Neutrino Panel, Asian Neutrino Community Meeting, 2013/11/13, Kashiwa, Japan.

〔図書〕(計 2件)

鈴木厚人 監修(中家 剛 共著)「カミオカンデとニュートリノ」、丸善出版、1-178、2016年、ISBN:4621300490。
中家 剛、「ニュートリノ物理：ニュートリノで探る素粒子と宇宙(基本法則から読み解く物理学最前線)」、共立出版、1-85、2016年、ISBN:4320035291。

〔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

<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nuferontier/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

中家 剛 (NAKAYA, Tsuyoshi)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：50314175

(2)研究分担者

市川 温子 (ICHIKAWA, Atsuko)
京都大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：50353371

小関 忠 (KOSEKI, TADASHI)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究

施設・教授

研究者番号：70225449

小林 隆 (KOBAYASHI, Takashi) H25のみ
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

中平 武 (NAKADAIRA, Takeshi) H26から
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

清矢 良浩 (SEIYA, Yoshihiro) H27.8月
大阪市立大学・理学系研究科・教授

研究者番号：80251031

南野 彰宏 (MINAMINO, Akihiro) H29年から

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：70511674

(3)連携研究者

横山 将志 (YOKOYAMA, Masashi)

東京大学・大学院理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90362441

(4)研究協力者

ブロナー クリストフ (Bronner Christophe)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：50746013

ハーツ マーク (Hartz Mark)

東京大学・国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構・助教

研究者番号：70721702

フレンド メーガン (Friend Megan)

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：50649332