

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244030

研究課題名(和文) 加速器ニュートリノビームを用いたCP対称性解明に向けた実験的研究

研究課題名(英文) Experimental Study of Neutrino CP Violation by using an Accelerator Neutrino Beam

研究代表者

中家 剛 (Tsuyoshi, Nakaya)

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) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノ振動の研究を中心に、反ニュートリノを使った基礎研究、次世代大型ニュートリノ実験に向けた開発研究をおこなった。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。電子ニュートリノへの振動の確率を測定し、世界で初めてニュートリノCPの破れに制限を課した( $CP=-0.5$  が最適値)。反ニュートリノビームを生成し、反ニュートリノ振動のパラメータを世界最高精度で測定した。次世代実験ハイパーカミオカンデを使ったCPの破れの測定感度を調べた。また、高性能光センサーの開発に成功した(浜松フォトニクスと共同開発)。

研究成果の概要(英文)：We conducted research on neutrino oscillation, measurements by using an anti-neutrino beam, and development of high performance photon-sensor for a next generation large-scale neutrino experiment. In the T2K experiment, we observed the signal from the muon neutrino to the electron neutrino and found the appearance of the electron neutrino with significance of 7.3 . We measured the oscillation probability to the electron neutrino and constrained the neutrino CP violation parameter for the first time in the world ( $CP = -0.5$  was the best). An anti-neutrino beam was generated, and the parameters of anti-neutrino oscillation were measured with the highest precision.

We studied the sensitivity of neutrino CP violation with the next-generation experiment, Hyper Kamiokande. We also succeeded in developing a high performance photon-sensor (joint work with Hamamatsu Photonics).

研究分野：素粒子物理学

キーワード：素粒子 ニュートリノ 加速器 ビーム CP対称性

## 1. 研究開始当初の背景

2011年、世界で初めてニュートリノ振動による電子ニュートリノ出現の信号をT2K実験が捕らえ、ニュートリノ振動の3番目の混合角 $\theta_{13}$ の値がゼロでない証拠を見つけた。これにより、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、ニュートリノと反ニュートリノの混合が複素位相 $\delta$ の分だけ異なることが予想され、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対象と認識されるようになった。

当時 $\theta_{13}$ の値がゼロでない結果はT2K実験のみから報告されていたが、この翌年に原子炉反ニュートリノ実験Daya Bay、RENO、Double Choozによりゼロでない $\theta_{13}$ の値がより高精度で決定された。これにより、ニュートリノ振動の理解が一気に進み、次の目標がニュートリノ振動におけるCP対称性の破れとなり、次世代実験の提案が始まった時期である。

## 2. 研究の目的

T2K実験で、2011年に発見した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より確実なものとし、ニュートリノ振動における最後の混合角 $\theta_{13}$ の値を決定する。更に、この電子ニュートリノへの振動発見により、ニュートリノでのCP対称性の測定が可能となる。加速器ニュートリノ実験で、このCP測定に必要となる反ニュートリノビームを生成し、ビームフラックス、ニュートリノ反応断面積、ニュートリノ振動測定の系統誤差等を高精度で決定する。そして、ニュートリノにおけるCP対称性測定の現実的且つ確実な実験提案をする。

次期ニュートリノCP測定実験の実現は、100万トン級の大型ニュートリノ測定器ハイパーカミオカンデをいかに低コストで製作できるかにかかっている。そのために、

ハイパーカミオカンデの基幹技術となる、高性能光センサーを開発する。

## 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測定する。スーパーカミオカンデで、振動により生じた電子ニュートリノ出現を観測し、高精度でニュートリノ振動のパラメータを決定する。研究期間全体を通して、現在の10倍以上の高統計データを収集し、系統誤差を5%程度(研究提案当時は20%)にまで改善する。系統誤差改善のために、大気ニュートリノデータを使ったスーパーカミオカンデの解析、テスト実験における中間子の反応断面積の精密測定を実施する。

また、ニュートリノCP実験に必要な情報として、反ニュートリノビームの物理シミュレーションを整備し、反ニュートリノビームの生成を実証する。反ニュートリノビームフラックスをシミュレーションにより正確に見積もり、反ニュートリノの反応断面積を前置ニュートリノ測定器で測定する。これと並行して、ニュートリノCP測定実験用の超大型ニュートリノ測定器開発のために、高感度光センサー(高量子効率の光電子増倍管とAPDを使ったハイブリッド光検出器が当時の候補)の研究開発を併せて行う。

## 4. 研究成果

ニュートリノ振動の研究、反ニュートリノの研究、次世代大型ニュートリノ実験用の高性能光センサーの開発で、主要な業績を以下にあげる。

(文献[5]) 電子ニュートリノ出現の発見：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。

(文献[9])ニュートリノ振動パラメータ  $\theta_{23}$  と  $m_{32}^2$  の精密測定：ミューオンニュートリノ消失モードを測定することで、世界最高の精度で  $\sin^2 \theta_{23} = 0.514^{+0.055}_{-0.056}$  と測定した。また、 $|m_{32}^2| = (2.51 \pm 0.10) \times 10^{-3} \text{eV}^2$  [ $m_{32}^2 > 0$  の場合]、 $(2.48 \pm 0.10) \times 10^{-3} \text{eV}^2$  [ $m_{32}^2 < 0$  の場合]も世界記録(誤差  $0.09 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ )とほぼ同精度を達成した。

(文献[14])ニュートリノ CP 対称性のパラメータ  $\delta_{CP}$  の測定：電子ニュートリノへの振動の確率を測定し、原子炉反ニュートリノによる  $\theta_{13}$  の測定結果(2012 年度の測定値平均  $\sin^2 \theta_{13} = 0.098 \pm 0.013$ )と組み合わせることで、世界で初めて  $\delta_{CP}$  に制限を課した。 $\delta_{CP} = -0.5$  が最適値であり、 $0.15 < \delta_{CP} < 0.83$  の領域 [ $m_{32}^2 > 0$  の場合]、 $-0.08 < \delta_{CP} < 1.09$  の領域 [ $m_{32}^2 < 0$  の場合]を 90%の信頼度で排除することに成功した。また、電子ニュートリノ出現確率とミューオンニュートリノ消失確率を合わせて解析することで、4 つのニュートリノ振動パラメータ  $\theta_{13}$ 、 $\theta_{23}$ 、 $m_{32}^2$ 、 $\delta_{CP}$  を同時に決定することに成功した。この結果、パラメータ間の誤差を正しく評価し、さらにその精度を向上させることに成功した。

(文献[18])反ニュートリノビームを使ったニュートリノ振動の観測：反ニュートリノビームの生成に成功し、 $4 \times 10^{20}$  陽子のデータを用いて、反ニュートリノ振動のパラメータ  $\theta_{23}$  を  $\sin^2 \theta_{23} = 0.515^{+0.085}_{-0.095}$  と世界最高精度で測定することに成功した。

(文献[12])次世代実験ハイパーカミオカンデを使った CP の破れの測定感度をまとめた。また、この論文にあるハイパーカミオカンデの使用する高性能光センサーの開発に成功した(浜松フォトリクスと共同開発)。これにより、光センサーの基幹技術が確立し

た。

他にも、ニュートリノ振動、ニュートリノ反応に関して包括的な研究を進め、「5. 主な発表論文等」で示すよう、多くの成果を得た。

## 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 20 件)

KK.Abe, T. Nakaya, Et.al.(T2K collaboration)  
Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, 694 巻, 2012, 211-223  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.06.023>

P.-A. Amaudruz, T. Nakaya, et.al.(T2K-FGD group)  
The T2K fine-grained detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, 696 巻, 2012, 1-31  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.020>

N.Abgrall, T. Nakaya, et.al.(T2K-NA61 group)  
Pion emission from the T2K replica target: Method, results and application, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 査読有, 701 巻, 2013, 99-114  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2012.10.079>

K.Abe, T. Nakaya, et.al.(T2K collaboration)  
T2K neutrino flux prediction, Physical Review D, 査読有, 87 巻, 2013, 12001  
<http://dx.doi.org/10.113/PhysRevD.87.012001>, [10.1103/PhysRevD.87.019902](http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.87.019902)

K. Abe, T. Nakaya, M. Yokoyama, 他  
T2K collaboration  
Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam, Phys.Rev.Letter, 査読有, 112 巻, 2014, 061802 1-8  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.061802>

K. Abe, T. Nakaya, M. Yokoyama, 他  
T2K collaboration  
Measurement of Neutrino Oscillation

Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam, Phys. Rev. Lett、査読有、111 巻、2013、211803  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.211803>

K. Abe, T. Nakaya, M. Yokoyama, 他  
T2K collaboration  
Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam, Phys. Rev. D、査読有、88 巻、2013、32002  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.032002>

K. Abe, T. Nakaya, M. Yokoyama, 他  
T2K collaboration  
Measurement of the Inclusive NuMu Charged Current Cross Section on Carbon in the Near Detector of the T2K Experiment, Phys. Rev. D、査読有、87 巻、2013、92003  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.87.92003>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter  $\theta_{13}$  from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam, Phys. Rev. Lett、査読有、112 巻、2014、181801  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.181801>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector, Phys. Rev. Lett、査読有、2014、241803  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.241803>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current interaction cross section by observing nuclear deexcitation  $\gamma$  rays, Phys. Rev. D、査読有、D90 巻、2014、72012  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.90.072012>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Physics Potential of a long-baseline neutrino oscillation experiment using a J-PARC neutrino beam and Hyper-Kamiokande Prog. Theor. Exp. Phys、査読有、2015 巻、053C02  
<http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptv061>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K

Collaboration  
Neutrino Oscillation Physics Potential of the T2K Experiment  
Prog. Theor. Exp. Phys、査読有、2015 巻、043C01  
<http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptv031>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurements of neutrino oscillation in appearance and disappearance channels by the T2K experiment with  $6.6E20$  protons on target, Physical Review D、査読有、91 巻、2015、72010  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.91.072010>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurements of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 1-3 GeV with the T2K INGRID detector, Physical Review D、査読有、93 巻、2016、72002  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.072002>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillation at T2K, Phys. Rev. Lett、査読有、118 巻、2017、151801  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.151801>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurement of double-differential muon neutrino charged-current interactions on C8H8 without pions in the final state using the T2K off-axis beam, Phys. Rev. D、査読有、93 巻、2016、112012 ; 1-25  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.93.112012>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurement of Muon Antineutrino Oscillations with an Accelerator-Produced Off-Axis Beam, Phys. Rev. Lett、査読有、116 巻、2016、181801 ; 1-8  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.181801>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
First measurement of the muon neutrino charged current single pion production cross section on water with the T2K near detector, Phys. Rev. D、査読有、95 巻、2017、

012010 ; 1-11

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.95.012010>

T. Nakaya, M. Yokoyama and the T2K Collaboration  
Measurement of Coherent  $\nu$ e Production in Low Energy Neutrino-Carbon Scattering, Phys. Rev. Lett、査読有、117 巻、2016、192501 ; 1-7  
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.192501>

〔学会発表〕(計 7 件)

T. Nakaya, New Results from T2K, The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2012), 2012.6.3 -6.9, Kyoto, Japan

T. Nakaya, Hyper-Kamiokande (Neutrino Physics and Proton Decay), The 13<sup>th</sup> international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors(NNN12), 2012.10.4 -10.6, Batavia, IL, USA.

T. Nakaya, Hyper-Kamiokande, XV International Workshop on Neutrino Telescopes, 2013.3.11 -3.15, Venice, Italy

T. Nakaya, Hyper-Kamiokande Exploring Neutrino CP violation, Second International Meeting for Large Neutrino Infrastructures, 2015.4.20 -4.21, Illinois, USA.

T. Nakaya, Status and Prospect of Recent Neutrino Experiments- Exploring CP violation -, Invisibles 16 Workshop, 2016.9.12 -9.16, Padova, Italy

T. Nakaya, The Neutrino Experimental Program in the Years 2020-2040, NuFact2016, ICISE, Quy Nhon, Vietnam

T. Nakaya, Program of accelerator-based experiments in Japan, The Third International Meeting for Large Neutrino Infrastructures, 2016.5.30 -6.1, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

〔図書〕(計 2 件)

中家 剛、共立出版、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、2016、85

鈴木厚人 監修(中家 剛 共著) 丸善出版、カミオカンデとニュートリノ、2016、178

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年月日 :  
国内外の別 :

取得状況(計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
京都大学ニュートリノグループ HP:  
<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/index.html>  
T2K 実験 HP: <http://t2k-experiment.org>  
ハイパーカミオカンデ HP :  
<http://www.hyper-k.org>

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

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

(3)連携研究者

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

(4)連携研究者

南野 彰宏 (MINAMINO, Akihiro)  
横浜国立大学・理学研究科・准教授  
研究者番号 : 70511674

(5)連携研究者

塩澤 真人 (SHIOZAWA, Masato)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号 : 70272523

(6)研究協力者

( )