

## 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 5 月 30 日現在

機関番号： 14301  
 研究種目： 若手研究 (S)  
 研究期間： 2008 ~ 2011  
 課題番号： 20674004  
 研究課題名 (和文) 加速器ニュートリノビームを用いたニュートリノ混合の究明  
 研究課題名 (英文) Study of Neutrino Mixing by using accelerator neutrino beams  
 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

研究成果の概要 (和文)： 素粒子ニュートリノの混合現象を究明しニュートリノ質量の起源を探るため、加速器ニュートリノビームを使ってニュートリノ散乱実験 (Fermilab E954 SciBooNE) と長期線ニュートリノ振動実験 (J-PARC E11 T2K) を実施した。SciBooNE 実験では世界最高精度でニュートリノ反応断面積を測定した。T2K 実験では、新しいニュートリノ振動モードであるミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの転換を発見した。これにより、ニュートリノに対する理解を飛躍的に進展させた。

研究成果の概要 (英文)： To understand the neutrino mixing phenomena and to study the origin of neutrino mass, the neutrino scattering experiment (Fermilab E954 SciBooNE) and the long baseline neutrino oscillation experiment (J-PARC E11 T2K) were conducted by using the accelerator neutrino beams. In SciBooNE, we measure the neutrino cross sections with the world best precision. In T2K, we discover the new oscillation channel from a muon neutrino to an electron neutrino. In consequence, we greatly advance the knowledge of neutrinos.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	15,600,000	4,680,000	20,280,000
2009 年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2010 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2011 年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
年度			
総計	52,600,000	15,780	68,380,000

研究分野： 数物系科学

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： 素粒子 (実験)、ニュートリノ

### 1. 研究開始当初の背景

21 世紀初頭、ニュートリノ振動現象の発見とその後の追試により、ニュートリノ質量の存在とニュートリノ間の大きな混合が確認された。この発見により、ニュートリノを使って素粒子の「質量と相互作用」という、基本物理量の関係を究明することが可能となった。本研究では世界に先駆け、高強度加速

器ニュートリノビームを使いニュートリノ振動現象を高精度で研究することにより、ニュートリノ混合の全貌解明を目指す。

### 2. 研究の目的

ニュートリノの諸性質を決定していくことは、素粒子物理学の最重要課題であり、更には原子核物理や宇宙物理にも強烈なイン

パクトを与える。特に、ニュートリノ振動現象に現れる混合角と位相を決定する事は、相互作用と質量という基本的な物理量の間の関係を精査することである。

本研究ではフェルミ研 E954 実験 SciBooNE でニュートリノと原子核の反応の精密データを解析し、その結果を活用し、大強度陽子加速器施設 J-PARC でのニュートリノ振動実験 T2K でニュートリノ振動を高感度で測定する。特に、T2K 実験では、ニュートリノ振動パラメータの世界最高精度の決定と、未発見の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発見を目指す。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は、未知の振動パラメータ  $\theta_{13}$  の大きさに依存している。 $\theta_{13}$  を発見することにより、将来ニュートリノにおける粒子反粒子対称性 (CP 対称性) の研究可能性が拓かれる。CP 対称性の破れの機構が理解できれば、宇宙が反粒子ではなく粒子で出来ていることを理解する重要な一歩となる。

### 3. 研究の方法

研究期間前半は SciBooNE 実験でデータ収集、物理解析を行ないながら、平行して T2K 実験の実験準備、測定器製作を行なう。

SciBooNE 実験は米国フェルミ研の 8GeV 陽子加速器で生成されたニュートリノと反ニュートリノビームを用い、我々が開発した高感度ニュートリノ測定器 SciBar で測定する。SciBar 測定器はニュートリノと原子核の反応で生成される全荷電粒子を捕らえることができ、世界最高精度でニュートリノ反応断面積の測定が可能である。ニュートリノ反応断面積の測定は、原子核模型を構築する上で重要な情報であることに加え、ニュートリノ振動の精密測定において必要不可欠な情報となっている。

T2K 実験は、大強度陽子加速器 J-PARC を用いて大強度ミューニュートリノビームを生成し、295 km 離れたスーパーカミオカンデで検出し、飛行中にニュートリノの種類が変化するニュートリノ振動現象を研究する。電子ニュートリノ出現探索では、電子ニュートリノの反応で生成される電子が起こすシャワー事象を捉える。ミューニュートリノ消失測定は、ミュー粒子を観測し、ニュートリノエネルギーを再構成し、エネルギー分布の歪み、反応数の減少から振動パラメータの測定を行う。出現探索、消失測定いずれにおいても、振動が起こらない場合にスーパーカミオカンデで期待される反応数を、実測に基づいたビーム生成のシミュレーションおよび前置検出器の測定から見積もり、測定結果と比較することによりニュートリノ振動を精密に測定する。

SciBooNE の実験結果は、T2K 実験開始当初

に必要なので、データ収集は平成 20 年秋までの 1 年を予定しており、平成 22 年度までに全ての物理結果を出すことを目標とした。T2K 実験は平成 21 年 4 月に初のニュートリノビームを発生し、22 年から前置ニュートリノ測定器が始動しニュートリノビーム計測が始まる。その後、本格的に実験を開始する。T2K 実験で、本研究の終了時まで蓄積予定の  $\sim 1 \times 10^{21}$  陽子/標的のビームデータを使って、現在よりも 10 倍近く感度を向上させ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探索する。(注：東日本大震災による影響で、この  $\sim 1 \times 10^{21}$  陽子/標的のビームデータの蓄積は遅延することとなった。) ニュートリノ振動の基本パラメータに関して、それぞれ世界最高精度で測定する。電子ニュートリノ出現の信号を発見した場合は、ニュートリノ振動での CP 対称性の破れの探索が重要な目標となる。そのため、発見がおこった場合は、CP を測る実験計画の検討を進める。

### 4. 研究成果

ニュートリノ振動現象の全貌を究明する為に、世界最高感度でニュートリノ振動の研究を行い、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の信号を観測することに成功した。これにより、ニュートリノ振動の第 3 の混合角  $\theta_{13}$  を発見した。また、T2K 実験と並行して、フェルミ研 SciBooNE 実験で加速器ニュートリノ振動実験に必要な『ニュートリノ反応断面積の精密測定』を行い、T2K 実験の測定感度を向上させることにも成功した。SciBooNE 実験の測定は、T2K 実験の物理解析で、「ニュートリノ反応断面積の不定性」改善に大きく貢献している。

(1) SciBooNE 実験では、荷電カレントコヒーレント  $\pi$  生成反応の探索 (論文⑨)、中性カレント  $\pi^0$  生成反応断面積の測定 (論文⑧)、中性カレントコヒーレント  $\pi^0$  生成反応断面積の測定 (論文⑦)、荷電カレント全断面積の測定 (論文⑥) を行った。また、SciBooNE 実験でフェルミ研ブースターニュートリノビームのフラックスを精密におさえ、MiniBooNE 実験と共同して、短基線でのミューオンニュートリノ消失事象の探索を行った。ミューオンニュートリノ消失の信号は発見されず、世界最高感度で上限値を設定した。(論文③)

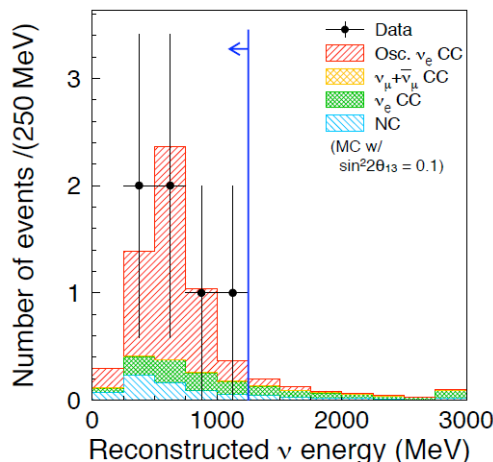
(2) T2K 実験は、平成 20 年に前置ニュートリノ測定器建設を中心に実験準備を進め、平成 22 年 2 月に前置ニュートリノ測定器を完成させた。平成 21 年 4 月に初ニュートリノビームがミューオンモニターで観測された。その後、ミューオンモニターを使いビームを調整し、設計方向にビームを向け、電磁ホー

ンによるビーム増幅を確認した。平成 21 年 11 月には、初ニュートリノ事象がニュートリノモニターで観測され、平成 22 年 1 月より物理ランをスタートし、同年 2 月にスーパーカミオカンデ測定器で初ニュートリノ事象を観測した。データ収集は、夏のシャットダウン時を除き、東日本大震災が起こる平成 23 年 3 月 11 日まで行った。この間、 $1.46 \times 10^{20}$  陽子/標的のデータを取得することに成功した。この全てのデータを用いて電子ニュートリノ出現を探索した。また、それと平行してミューニュートリノ消失を測定した。震災による研究への影響は、平成 22 年に行われた「研究進捗評価」で「災害による前置ニュートリノ測定器への影響は記されていないが、無傷であったとは考えられない。勿論加速器の全面的な復旧が心配だが、T2K 実験の中での本研究が占める部分の復旧の見通しが気になる」危惧されていたが、関係者が一致団結して復旧に取り組むことで、2012 年 3 月に実験を再開させることに成功した。

以下、T2K 実験の物理結果のハイライトについて詳しく説明する。ニュートリノ振動解析は、(1)ニュートリノビームの方向をミューオンモニターで確認し、解析に使うビームスピルの選択、(2)ビームシミュレーションを使って、前置ニュートリノ測定器とスーパーカミオカンデ測定器間でのフラックス比とその系統誤差の計算、(3)前置ニュートリノ測定器でニュートリノ事象を測定しスーパーカミオカンデでの事象数を見積もる、(4)予想した事象数と観測した事象数を比較し、ニュートリノ振動を測定する。

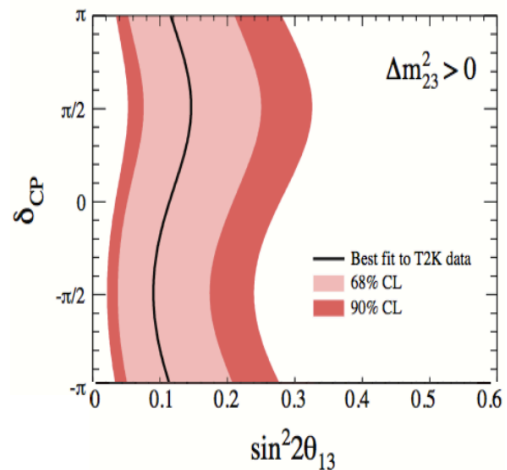
① 電子ニュートリノ出現探索の結果

2010 年 1 月から 2011 年 3 月 11 日までに取得した  $1.46 \times 10^{20}$  陽子/標的の全データを解析し、スーパーカミオカンデで検出された反応の内、電子ニュートリノによる反応と一致する 6 事象を観測した。電子ニュートリノ事象のエネルギー分布を下図に示す。



誤差棒つき点がデータ、ヒストグラムがモン

テカルロシミュレーションによる予想である。赤いエリアは、電子ニュートリノ信号として期待される分布、その他の色はバックグラウンド事象の予想である。観測されたニュートリノエネルギーは、電子ニュートリノ出現から期待される領域とよく一致する。バックグラウンドは  $1.5 \pm 0.3$  事象と見積もられた。電子ニュートリノ出現が起こっていないにもかかわらず、バックグラウンド事象の確率的な揺らぎで 6 事象が観測される確率は 0.7% と見積もられた。言いかえると、99.3% の確率で電子ニュートリノへの転換が起こっていると断言できる。電子ニュートリノ出現の確率は、未発見の第三の混合角  $\theta_{13}$  と CP 対称性を表わす位相  $\delta_{CP}$  で表わせる。観測された電子ニュートリノ事象数から、 $\theta_{13}$  と  $\delta_{CP}$  に制限を与え、世界で初めて  $\theta_{13}$  が 0 ではないことを強く示す結果を得た(下図)。また、実験結果を再現する  $\theta_{13}$  の最適値は、 $\delta_{CP}=0$  で、 $\sin^2 2\theta_{13}=0.11$  と測定された。この  $\theta_{13}$  の値は、過去の実験で得られていた上限値付近で、多くの研究者の予想より遥かに大きな値であり、本結果は驚きを持って受け入れられた。

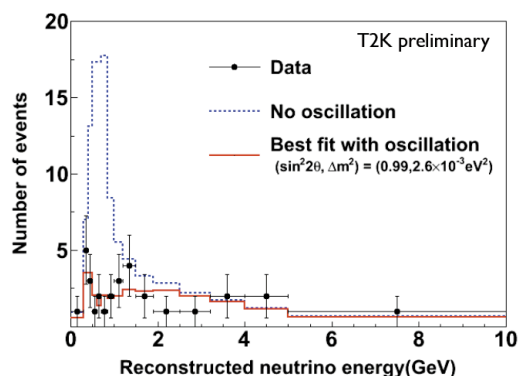


この結果は、Physical Review Letters 紙に掲載され(論文④)、2013 年 5 月 30 日現在 581 件引用されている。また、英国物理学会(IoP)により、2011 年の全ての物理分野のなかで Top 10 のブレイクスルーの一つに選ばれた。

② ミューニュートリノ消失測定の結果

ミュー粒子がスーパーカミオカンデで検出されたニュートリノ反応を選ぶ。さらにミュー粒子以外の粒子が検出されていないことを要求し、精度よくニュートリノエネルギー算出が可能な荷電カレント準弾性散乱反応 ( $\nu_\mu + n \rightarrow \mu + p$ ) を選別する。その結果、31 事象のミューオンニュートリノ反応を観測した。ニュートリノエネルギー分布を下図に示す(誤差棒付き黒点)。ニュートリノ振動が起こってない場合の見積もりは  $104 \pm 14$  事象で、エネルギー分布は下図の点線のようにになる。その違いから、信号数の有意な減少

とエネルギー分布の変形を確認し、ニュートリノが大きく振動していることを確かめた。そして、ニュートリノ振動の存在を仮定して、 $\sin^2 \theta_{23} > 0.86$ 、 $2.1 \times 10^{-3} < \Delta m^2_{32} (\text{eV}^2) < 3.1 \times 10^{-3}$  (90%信頼度)と測定した。データを再現する振動パラメータの値は、他の実験で測定されてきたものともよく一致する。



### (3) 今後の展望

研究期間は終了したが、T2K 実験はまだ最終目標の 2%のデータしか取っておらず、今後引き続きビームパワーを増強し実験を継続していく。 $\theta_{13}$  が大きいことが分かったので、実験精度を高めることによって、粒子反粒子対称性の測定の道が拓けた。これを受けて、新しい研究「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」(基盤 A : 平成 24~28) を進めている。

### (4) 学位

本研究により、京都大学・大学院理学研究科で 6 名が博士号を取得、8 名が修士号を取得した。

## 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 17 件)

(\*) 論文の著者はアルファベット順につき、順番を省略する。

① “Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector”, M. Otani, T. Nakaya 他 430人, Nucl. Instrum. Meth. A694 (2012) 211-223.

DOI: [10.1016/j.nima.2012.03.023](https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.03.023)

② “Near detectors for long baseline neutrino experiments”, T. Nakaya, J. Phys. Conf. Ser. 308 (2011) 012004.

DOI: [10.1088/1742-6596/308/1/012004](https://doi.org/10.1088/1742-6596/308/1/012004)

③ “Dual baseline search for muon neutrino disappearance at  $0.5 \text{ eV}^2 < \Delta m^2 < 40 \text{ eV}^2$ ”, Y. Nakajima, T. Nakaya 他125名, Phys. Rev. D85 (2012) 032007.

DOI: [10.1103/PhysRevD.85.032007](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.032007)

④ “Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam”, T. Nakaya 他410名, Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 041801

DOI: [10.1103/PhysRevLett.107.041801](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.041801)

⑤ “The T2K Experiment”, T. Nakaya 他 522人, Nucl. Instrum. Meth. A659 (2011) 106-135.

DOI: [10.1016/j.nima.2011.06.067](https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.06.067)

⑥ “Measurement of inclusive charged current interactions on carbon in a few-GeV neutrino beam”, Y. Nakajima, T. Nakaya 他61名, Phys. Rev. D83 (2011) 012005.

DOI: [10.1103/PhysRevD.83.012005](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.012005)

⑦ “Improved measurement of neutral current coherent  $\pi^0$  production on carbon in a few-GeV neutrino beam”, Y. Kurimoto, T. Nakaya 他62名, Phys. Rev. D81 (2010) 111102.

DOI: [10.1103/PhysRevD.81.111102](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.111102)

⑧ “Measurement of Inclusive Neutral Current Neutral  $\pi^0$  Production on Carbon in a Few-GeV Neutrino Beam”, Y. Kurimoto, T. Nakaya 他62名, Phys. Rev. D81 (2010) 033004.

DOI: [10.1103/PhysRevD.81.033004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.033004)

⑨ “Search for Charged Current Coherent Pion Production on Carbon in a Few-GeV Neutrino Beam”, K. Hiraide, T. Nakaya 他62名, Phys. Rev. D78 (2008) 112004.

DOI: [10.1103/PhysRevD.78.112004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.78.112004)

[学会発表] (計 20 件)

① “An experimental outlook for the discovery of Proton decay and CP violation in leptonic sector”, T. Nakaya, 12th International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN11), November 7-9, 2011, Zurich, Switzerland.

② “Results and Prospects of the T2K neutrino experiment”, T. Nakaya, KMI Inauguration Conference on “Quest for the Origin of Particles and the Universe” (KMIIN), October 24-26, 2011, Nagoya, Japan.

③ “10年先を俯瞰した\_J-PARC における素粒子実験の展望”(招待講演), 中家 剛, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月16-19日, 弘前大学.

- ④ “Beyond the standard model - Search for New Physics-”, 中家 剛, 日独先端科学シンポジウム (JGFoS2011), 2011年10月28-30日, ホテルニューオータニ (東京都千代田区).
- ⑤ “Long-baseline neutrino experiments” (invited talk), T. Nakaya, The 35th International Conference on High Energy Physics, July 22-28, 2010, Paris, France.
- ⑥ “New results from the FNAL SciBooNE neutrino experiment” (invited talk), T. Nakaya, FOURTEENTH LOMONOSOV CONFERENCE ON ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS, Aug 19-25, 2009, Moscow.
- ⑦ “Photodetectors R&D for cost effective PMs, MPPC”, T. Nakaya, European Strategy for Future Neutrino Physics, Oct 1-3, 2009, CERN.
- ⑧ “Multi-Pixel Photon Detectors”, T. Nakaya, Pixel 2008 International Workshop, 23-26 September 2008, Fermilab, Batavia, IL, USA.
- ⑨ “Experimental status of neutrino scattering physics and needed measurements”, T. Nakaya, 10th International Workshop on Neutrino Factories, Super beams and Beta beams (NuFact08), June 30 - July 5 2008, Valencia-Spain.

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 二宮正夫編 (中家 剛が一部執筆)、講談社、「基礎物理学シリーズ 1 1 現代物理学の世界」(2010) 192 ページ
- ② 山田作衛他編 (中家 剛が一部執筆)、朝倉書店、「素粒子物理学ハンドブック」(2010)、679 ページ

〔その他〕

- ① ホームページ
1. <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp>
  2. <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/index.html>
  3. <http://t2k-experiment.org/ja>
- ② 新聞発表、メディア等
1. “ニュートリノ新変身観測” 朝日新聞、2011年6月16日.
  2. “対談 日本を横断するニュートリノ”, 日経サイエンス 2010年10月号.
  3. “ニュートリノ初検出 J-PARC 実験施設”, 茨木新聞本誌朝刊、2009年11月25日.
  4. “ニュートリノを飛ばす 岐阜←茨城 300キロ”, 東京新聞 Web 版、2009年8月11日.
  5. “サイエンス「宇宙の誕生の謎に迫る」—ニュートリノの大規模実験進む—” 日本

経済新聞、2009年5月24日.

## 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

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

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

南野 彰宏 (MINAMINO Akihiro)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：70511674

横山 将志 (YOKOAYAMA Masashi)  
東京大学・大学院理学系研究科・准教授  
研究者番号：90362441

小林 隆 (KOBAYASHI Takashi)  
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

早戸 良成 (HAYATO Yoshinari)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：60321535