

## 科学的研究費補助金研究成果報告書

平成24年5月7日現在

機関番号：82118  
 研究種目：特定領域研究  
 研究期間：2006～2011  
 課題番号：18071005  
 研究課題名（和文） 大強度ニュートリノビームを使ったニュートリノフレーバー振動の研究  
 研究課題名（英文） Study of neutrino flavor oscillation with high intensity neutrino beam  
 研究代表者  
 西川 公一郎（NISHIKAWA KOICHIRO）  
 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・所長  
 研究者番号：60198439

研究成果の概要（和文）：茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC を用いて大強度ニュートリノビームを生成、295km 離れた岐阜県のスーパーカミオカンデ検出器で測定し、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの変化が高い確度で起きていることを世界に先駆けて示した。また、ミューニュートリノが他のニュートリノへ振動することにより減少する現象の測定も行い、他の実験結果と一致する結果を得た。

研究成果の概要（英文）：Indication of the existence of muon neutrino to electron neutrino transition during flight is detected at high probability using high intensity neutrino beam from J-PARC detected at Super-Kamiokande at 295km from J-PARC. Also disappearance of muon neutrino after 295km flight is measured and obtained consistent results with the other experiments.

## 交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費        | 間接経費 | 合計          |
|--------|-------------|------|-------------|
| 2006年度 | 50,100,000  | 0    | 50,100,000  |
| 2007年度 | 127,800,000 | 0    | 127,800,000 |
| 2008年度 | 109,400,000 | 0    | 109,400,000 |
| 2009年度 | 67,300,000  | 0    | 67,300,000  |
| 2010年度 | 16,000,000  | 0    | 16,000,000  |
| 2011年度 | 13,100,000  | 0    | 13,100,000  |
| 総計     | 383,700,000 | 0    | 383,700,000 |

研究分野：素粒子実験

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、質量、フレーバー混合、振動、CP 非保存

## 1. 研究開始当初の背景

1998年、スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノの観測でミューニュートリノが消失するタイプのニュートリノ振動が発見され、その後、加速器ニュートリノ実験 K2K などで確認された。また太陽ニュートリノの観測においても、スーパーカミオカンデや

SNO 実験により電子ニュートリノが減少するニュートリノ振動が検出され、その後 KamLAND 実験による原子炉ニュートリノの測定で確認された。これらの結果から、ニュートリノ振動の存在、すなわちニュートリノが有限な質量を持つこと、観測されるニュートリノは異なる質量をもつニュートリノが混

じりあってできていることはほぼ確立されていたといえる。これらの測定により、混合の状態を表す三つの混合角のうち、 $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$ が求まっていた。しかし、第三の混合角 $\theta_{13}$ については、実験により上限値が与えられているのみで、0なのか有限な値なのか分かっていなかった。また粒子反粒子の対称性(CP 対称性)をあらわす位相 $\delta_{CP}$ についても何も分かっていなかった。

ニュートリノにおけるCP対称性の破れは、現在の宇宙がなぜ物質だけでできており反物質が存在しないかという、物質優勢宇宙の起源を解明する糸口となりうるということが指摘されている。そのため、ニュートリノにおけるCP対称性を調べることは当時から最も重要な課題の一つとなっている。

CP対称性の破れを示す観測量は $\sin(\delta_{CP})$ と三つ全ての混合角の $\sin$ の積であらわされることが分かっている。研究開始当時、すでに $\theta_{12}$ 、 $\theta_{23}$ は比較的大きな値を持っていることが分かっていた。もし、最後の混合角 $\theta_{13}$ が0もしくは極めて小さい場合、CP非対称性の観測量も小さくなってしまい将来にわたって検出不可能となる。よって、混合角 $\theta_{13}$ の大きさは将来のCP非対称性検出の可能性を左右する鍵となる極めて重要なパラメータとなっていた。

そこで混合角 $\theta_{13}$ の測定を目指して、本研究の実験(T2K実験)が提案され、その後加速器を用いた実験(米NOvA実験)やいくつもの原子炉ニュートリノ実験提案が続き、世界的に熾烈な発見競争となっていた。

また混合角 $\theta_{23}$ の精度も悪く、CP非対称な観測量の予想に大きな不定性を与えていた。将来、CP非保存探索実験の設計を最適化するためにはこの混合角の高精度化も強く望まれていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、

- (1)未発見のミューニュートリノからの電子ニュートリノへの転換(電子ニュートリノ出現)現象を探索することによって、未知である第三の混合角を探索測定
- (2)ミューニュートリノが他のニュートリノへ変化(振動)することにより減少するミューニュートリノ消失現象を精密に測定し、ミューとタウニュートリノの間の混合を精密測定

である。ニュートリノの3つの混合角と1つの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を探求することである。本研究により、第三の角が測定可能な大きさあるということが分かれば、粒子-反粒子対称性の破れを探求する可能性が開き、宇宙が反粒子ではなく粒子で出来ていることを超高エネルギーでの物理学で説明

する第一歩となる。

## 3. 研究の方法

茨城県東海村において日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構が共同で建設、運転する大強度陽子加速器施設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離れた世界最大の検出器スーパーカミオカンデで検出、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の詳細な研究を行う。

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、期待されるバックグラウンドからの超過を探す。ミューニュートリノ消失測定は、ミューニュートリノ反応からのミュー粒子を捕らえ、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振動現象を捉える。

本研究では世界初の「非軸ニュートリノビーム」を採用する。非軸ニュートリノビームではニュートリノの親粒子であるパイ中間子ビームを測定器からずらした方向に向ける。これによりニュートリノ振動確率が最大となることが期待されるエネルギー領域のニュートリノ数を最大にし、しかもそれ以外のエネルギーのニュートリノを少なくすることができ、測定精度を向上させることができる。

実験の成功は、主に次の三点にかかっている。①大強度陽子ビームの制御、輸送、およびターゲット等の長期間大強度に耐えられる機器の設計・開発による大強度の早期達成と安定な運転、②パイ中間子生成、ビーム方向や強度などのモニターによるニュートリノビームの理解、③ニュートリノ源近傍に測定器を置き、高統計ニュートリノ反応による反応の詳細な理解、がとりわけ重要である。

## 4. 研究成果

研究期間における本研究の重要なマイルストーンは、

- (1)5年間の建設の後、計画通り2008年度中にJ-PARCにおけるニュートリノ生成施設の建設を完了
- (2)ビームを用いた装置の入念な調整の後、2010年1月から本格的にニュートリノビーム送出を開始、2011年3月11日震災で中断されるまで $1.43 \times 10^{20}$ 個の陽子を用いてニュートリノを生成しデータを収集
- (3)2011年6月、震災までの全てのデータを

用いて電子ニュートリノ出現探索の結果を公表

(4) 2011 年夏、同様にミューニュートリノ消失測定の結果も公表

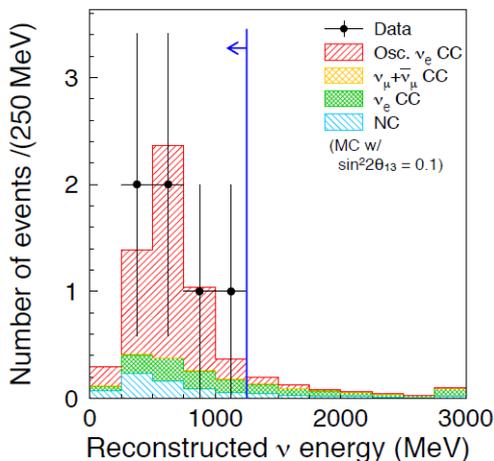
(5) 震災復旧作業の後、2012 年 3 月には測定を再開

である。

本研究では、研究目的である電子ニュートリノ出現探索、ミューニュートリノ消失測定双方において、最初の物理成果を上げることができた。特に電子ニュートリノ出現においては、世界で初めて変化した先のニュートリノの種類(電子ニュートリノ)を同定することにより、高い確度で振動が起きていることを世界に先駆けて示す、という大きな成果を得た。以下にそれぞれの成果について述べる。

### (1) 電子ニュートリノ出現探索の結果

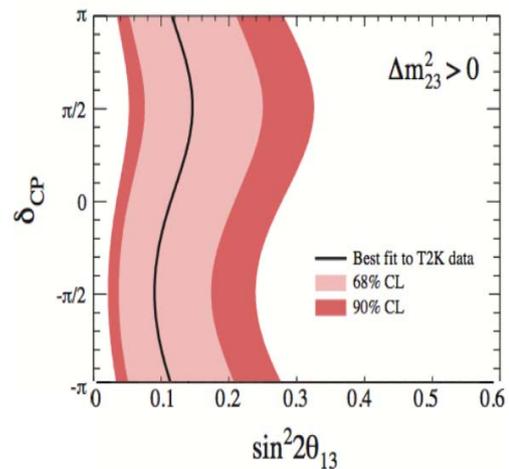
2010 年 1 月から 2011 年 3 月 11 日までの全てのデータを解析、スーパーカミオカンデで検出された反応の内、電子ニュートリノによる反応の特徴と一致する反応が 6 事象捉えられた。その 6 事象のニュートリノエネルギー分布を下図に示す。



誤差棒つき黒点がデータ点、ヒストグラムが実測に基づくシミュレーションによる予想分布。赤いエリアは、データを最もよく説明できるように電子ニュートリノ出現の確率を調整したときの出現による電子ニュートリノ反応の分布、それ以外の色は電子ニュートリノ出現が無い場合でも検出されてしまうバックグラウンドの予想である。検出された反応のニュートリノエネルギーは、電子ニュートリノ出現で期待されるエネルギー領域に一致することが分かった。バックグラウンドの予想反応数は  $1.5 \pm 0.3$  事象と見積もられた。電子ニュートリノ出現は実際には起こってないにもかかわらず確率的な揺らぎにより、バックグラウンドが 6 事象現れる確率は 0.7% と見積もられた。言い換えれば 99.3% の

確率で電子ニュートリノへの転換が起きていることになる。

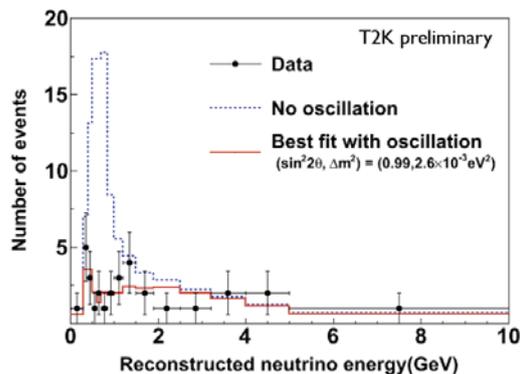
電子ニュートリノ出現の確率は、未知の量である第三の混合角  $\theta_{13}$  と物質反物質の非対称性を表わす位相  $\delta_{CP}$  で表わすことができる。検出された電子ニュートリノ反応の数から、この関係を用いて、 $\theta_{13}$  と  $\delta_{CP}$  に制限を与え、世界で初めて  $\theta_{13}$  が 0 ではないことを強く示す結果を得た(下図)。また最も実験結果をよく再現する  $\theta_{13}$  の最適値は、 $\delta_{CP}$  が 0 の時、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.11$  と得られ、過去の実験で得られていた上限値付近という大きな値であることが分かった。



この結果は、Physical Review Letters 紙に掲載され(下記 [雑誌論文] ①)、2012 年 5 月現在 300 件以上引用されており、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

この測定においては、スーパーカミオカンデで検出された反応のうち、ミュー粒子が検出された反応を選ぶことでミューニュートリノ反応を抽出した。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課すことにより、精度よくニュートリノエネルギー算出が可能な反応を選別した。その結果、31 事象のミューオンニュートリノ反応が捉えられた。その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)。一方、ニュートリノ振動が起こってないと仮定したとき期待される測定値を見積もったところ、反応数は  $104 \pm 14$  事象、エネルギー分布は下図の点線のようになり、有意な減少とエネルギー分布の変形が認められた。さらにニュートリノ振動の存在を仮定して、測定結果を最もよく再現するようニュートリノの性質を調整した時の予想は赤線のようになり、ニュートリノ振動はデータをよく説明することが分かった。



このデータを最もよく再現する振動のパラメータの値は、これまで他の実験で測定されてきたものともよく一致することが分かった。(下記〔雑誌論文〕②)

#### 4-1 今後の研究

本研究課題の研究期間は終了したが、これまで蓄積されたデータは実験の最終的な目標の2%であり、今後引き続きビームパワーを増強しつつ測定を継続し、精度の向上を図っていく。 $\theta_{13}$ が比較的大きいことが明らかになったことで、実験の精度を高めることによって、未知である粒子反粒子対称性の破れや三つのニュートリノ質量の大きさの順番にヒントを得られる可能性がある。

#### 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12件)

- ① K. Abe. et.al (研究代表者、分担者、連携研究者全員著者。全445名ABC順)、  
” First Muon-Neutrino Disappearance Study with an Off-Axis Beam”, Phys. Rev. D 85, 031103 (2012), 査読有
- ② K. Abe. et.al (研究代表者、分担者、連携研究者全員著者。全411名ABC順)、  
” Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-produced Off-axis Muon Neutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. 107:041801, 2011, 査読有
- ③ K. Abe. et.al (研究代表者、分担者、連携研究者全員著者。全521名ABC順)、  
” The T2K Experiment”, Nucl. Instrum. and Meth. A 659 (2011) 106, 査読有

〔学会発表〕(計288件)

- ① T2K 実験の現状(大震災から現在に至るまで) 関口哲郎 日本物理学会年次大会 2012年3月27日 関西学院大学

② T2K 実験の最新結果 角野秀一 日本物理学会秋季大会 2011年9月16日 弘前大学

③ T2K 実験の最近結果 市川温子 日本物理学会秋季大会 2010年9月12日 九州工業大学

④ いよいよ始まった T2K 実験 柴田政宏 日本物理学会秋季大会 2009年9月11日 甲南大学

⑤ Accelerator based Neutrino Experiments in Japan 小林隆 日本物理学会第63回年次大会 2008年3月23日 近畿大学

⑥ T2K 長基線ニュートリノ振動実験 関口哲郎 日本物理学会春季大会 2007年3月26日 首都大学

〔その他〕

ホームページ等

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

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

西川 公一郎 (NISHIKAWA KOICHIRO)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・所長  
研究者番号：60198439

##### (2) 研究分担者

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

横山 将志 (YOKOYAMA MASASHI)  
東京大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号：90362441  
(H19→H20：連携研究者)

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

藤井 芳昭 (FUJII YOSHIAKI)  
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：70190006  
(H20→H21：連携研究者)

石井 孝信 (ISHII TAKANOBU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・講師  
研究者番号：90134650  
(H20→H21：連携研究者)

(3)連携研究者

丸山 和純 (MARUYAMA TAKASUMI)  
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  
(H21～)

山田 善一 (YAMADA YOSHIKAZU)  
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：00200759  
(H22～)

多田 将 (TADA MASARU)  
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：00391706  
(H22～)

関口 哲郎 (SEKIGUCHI TETSURO)  
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：20450356  
(H22～)

坂下 健 (SAKASHITA KEN)  
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  
(H22～)

中平 武 (NAKADAIRA TAKESHI)  
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  
(H22～)

長谷川 琢哉 (HASEGAWA TAKUYA)  
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  
(H22～)

田中 雅史 (TANAKA MASASHI)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子  
核研究所・研究員  
研究者番号：30545497  
(H23)