

T2K 実験の最新結果

東京大学宇宙線研究所

奥村 公宏

亀田 純

中山 祥英

okumura@icrr.u-tokyo.ac.jp

kameda@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp

shoei@suketto.icrr.u-tokyo.ac.jp

京都大学大学院理学研究科

大谷 将士

中家 剛

masashi.o@sphys.kyoto-u.ac.jp

t.nakaya@sphys.kyoto-u.ac.jp

2011年8月30日

1 はじめに

T2K 実験は、ニュートリノ振動を世界最高感度で測定することを目指した、加速器ニュートリノ実験である。T2K 実験では、世界一の設計ビーム強度を誇る J-PARC 加速器を使って、ニュートリノ振動確率が最大となるように調整された高強度・高品質ニュートリノビームを 295km 遠方にあるスーパーカミオカンデ(SK)に向けて発射し、スーパーカミオカンデでニュートリノ振動現象を詳細に測定する。J-PARC 内には、前置ニュートリノ測定器を含む各種のビームモニターが設置されており、ビームの性質を高精度でモニターし、ニュートリノ振動の高感度測定に必要なニュートリノビームフラックスと反応断面積の精密測定が行われている。

T2K 実験の詳細[1-5]とニュートリノ振動の物理はこれまで何度も高エネルギーニュースで紹介されているので割愛し、ここでは T2K 実験からの最初の物理結果で、2011 年夏に発表した最新結果に焦点を絞って報告する。特に、T2K 実験の物理の最重要課題の一つである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兆候をつかんだことが大きな成果である[6]。電子ニュートリノへの振動確率が測定できたことで、これまで上限値しか与えられていなかったニュートリノ振動パラメータ θ_{13} の有限値での測定に世界で初めて成功した。また、ミューオンニュートリノからタウニュートリノへの振動を、ミューオンニュートリノ消失モードを使って測定し、スーパーカミオカンデ実験と MINOS 実験と並ぶ世界最高レベルの感度で、ニュートリノ振動のパラメータ、 θ_{23} と Δm_{23}^2 を測定することにも成功した。本論文では、以上の電子ニュートリノ出現モードとミューオンニュートリノ消失モードの 2 点の結果について詳細に報告する。

2 ビームデータ解析

T2K 実験は 2010 年 1 月から 2011 年 3 月 11 日まで物理ランを行い、ビーム標的に供給された総陽子数

1.44×10^{20} POT (Protons On Target の略) のデータを取得した(図 1)。データセットは 2010 年 1 月から 6 月までを RUN-1、2010 年 10 月から 2011 年 3 月までを RUN-2 と定義し、それぞれの期間のデータ量は 0.32×10^{20} POT、 1.12×10^{20} POT である。図 1 に示されているように RUN-2 の期間に J-PARC 加速器の性能が格段に向上し、3 月 11 日に東日本大震災が起こる直前には 145 kW の強度で安定したビーム供給が実現されていた。取得したデータは、ビームクオリティカットと、SK データの品質を保證するカットを経て、物理解析に用いられる。ビームクオリティカットでは、ホーン電流のモニター値などをチェックしたあと、ミューオンモニター MUMON[3]によるビーム強度・ビーム方向の測定でビーム品質を保證する。

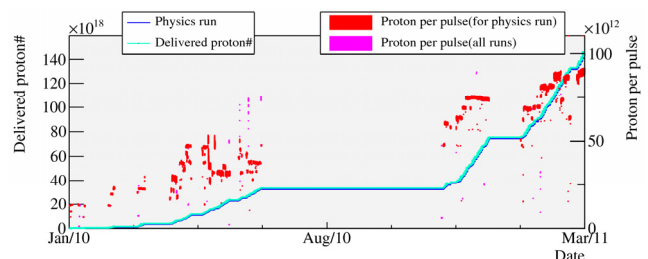


図 1 2010 年 1 月から 2011 年 3 月までの(左軸)累積 POT[線グラフ]と(右軸)パルスあたりの陽子数[赤点]。2010 年 8 月のサマーシャットダウン前が RUN-1 に、後が RUN-2 に対応している。

MUMON はビームダンプ直後に設置された測定器で、ミューオンニュートリノと共に π^\pm の崩壊から生成されるミューオンを観測することで、間接的にニュートリノビームをモニターする。図 2 に MUMON によるミューオンビームの方向の測定結果を示す。この図から、全期間にわたってビーム方向が実験の系統誤差をおさえる上での目標である 1mrad よりも十分よい精度でコントロールされていることが分かる。

ビームクオリティカットで除去されたデータは 1% 以下で、ビームラインのトラブルなどが主な理由である。

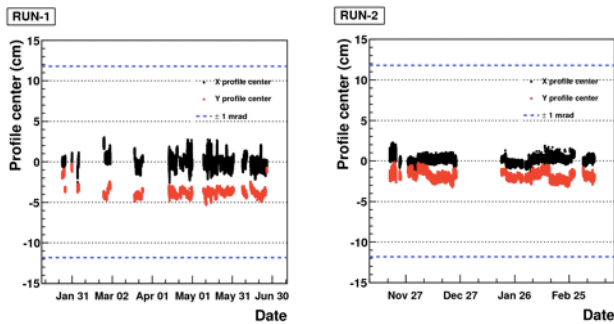


図2 MUMONで測定されたミュオンビームプロファイル中心(ビーム方向に対応)の時間推移。左図がRUN-1の期間、右図がRUN-2の期間を示している。黒点がX方向、赤点がY方向に対応しており、実験からの要請の1mradの範囲は $\sim \pm 12$ cmのところに点線で示されている。

ビームラインにおいて測定された各ビームスピル射出のタイミング情報は、直ちにSKのオンラインDAQシステムへと転送され、SKではニュートリノビーム到達時間の前後 $500 \mu\text{sec}$ (計 1msec)以内のすべてのPMTヒット情報を記録している。これは、ビームスピルの時間幅約 $4 \mu\text{sec}$ と比べて十分に広い範囲となっている。J-PARCとSKの2地点間の時刻同期にはGPSを利用しており、その精度は 150nsec 以下である。SKのソフトウェアトリガーシステムからの要請により、スピルタイミング情報は実際のスピル射出時間から2~3秒以内にSKに届けられる必要があるが、我々はSINET[7]のL2VPNを利用してこれを実現している。

振動解析に使用するスピルは、前述のビームクオリティカット後に残ったスピルに、さらにSKでのデータクオリティを保証するためのいくつかのカットをかけて選ばれる。まず当然のことながら、ビームが射出された際にSKのDAQが正常に動作している必要があるが、この条件によるinefficiencyはわずか 0.1% 程度である¹。

その他のカットとしては、「Flasher(ダイノードでの放電などにより突如PMTが高レートで光を発生する現象)などのノイズ事象により解析に使用できないデータ範囲を取り除くカット(inefficiency 約 0.5%)」、「ビーム起因ではないミュオンの崩壊による電子事象がたまたまビームタイミングに入ってくるものを避けることを主目的とした、ビームタイミングの直前 $100 \mu\text{sec}$ になんらかのactivityがあるスピルを取り除くカット(inefficiency 約 0.3%)」、「pedestalデータの取得などフロントエンドエレクトロニクスシステムの制限により使用できないスピルのカット(inefficiency 約 0.1%)」などが挙げられる。すべてのSKクオリティカットによるinefficiencyは約 1% である。

¹ SKでのトラブル発生によりビームの生成自体を止めることも数回あったため、実際のデッドタイムとしてはもう少し悪くなるが、それでもSKのDAQシステムは非常に安定しているといえる。

RUN-1およびRUN-2の期間に収集した物理ランのデータにビームとSKの両クオリティカットをかけて残った、振動解析に使用するビームスピルの総数は $2,474,419$ 、総陽子数は 1.43×10^{20} POTである²。

3 前置ニュートリノ測定器による測定

3.1 ニュートリノビームモニター

ビーム標的の下流280mに設置された前置ニュートリノ測定器は、ニュートリノビーム軸中心方向のオン軸検出器INGRID(Interactive Neutrino GRID)[4]とビーム軸中心からずれたSK方向のオフ軸検出器(ND280)[5]からなる。前者でニュートリノビームの強度と方向をモニターし、後者でニュートリノイベントレートを測定する。特に、ND280は、SKでのニュートリノ事象数を予測するため、SK方向に向かうニュートリノを高精度で測定する。

我々はニュートリノビーム軸方向をわざとSK方向からずらすことでニュートリノ振動確率が最大になるエネルギーにビームを調整するオフ軸ビーム法[1]を採用し、高感度を実現している。しかし、オフ軸ビーム法では、SKでのニュートリノビームのエネルギー分布とフラックスがビーム方向のずれに非常に敏感になるため、高精度でビーム方向をコントロールすることが必要となる。T2K実験の物理目標を達成するためにはビーム方向を1mradより十分よい精度でコントロールする必要がある。

INGRIDは同一構造のモジュール14台からなる検出器である[4]。ビーム中心まわりに縦横それぞれ7台ずつ設置し、各モジュールでニュートリノイベントを計数してビームプロファイルを再構成し、ビーム中心を測定する。INGRIDは物理ラン開始から安定に稼働し、振動解析に使用するデータ中、99%以上のスピルのデータを取得した。図3は全14モジュールでの、POTで規格化された一日ごとのニュートリノイベントレートである。統計誤差約の範囲内でニュートリノイベントレートは一定で、ニュートリノビーム強度は安定していることが分かる。図4は1ヵ月毎のビーム中心の推移である。この図から、ビーム方向は目標精度の1mradより十分よい精度で長期にわたってコントロールされていることが分かる。

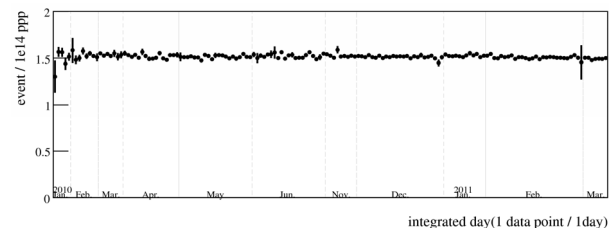


図3 全実験期間における、POTで規格化された全14 INGRIDモジュールでのニュートリノイベントレート。

² T2K実験として承認されている陽子数の約2%にあたり、実験はまだ始まったばかりである。

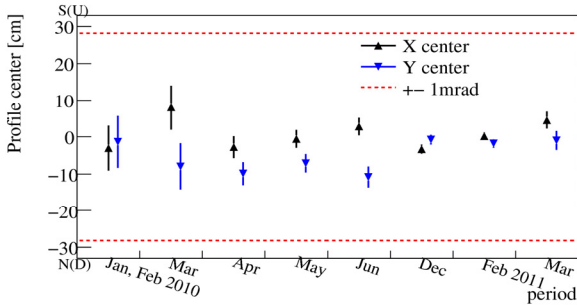


図4 全実験期間における, INGRID で測定されたビームプロファイル中心(ビーム方向に対応)の時間推移。(黒)が X 方向, (青)が Y 方向に対応しており, 実験からの要請の 1mrad の範囲は ± 28 cm のところに点線(赤)で示されている。

以上のように, INGRID はニュートリノビームが安定して生成されていることを実証した³。

3.2 ニュートリノ事象率の測定

T2K 実験では, 式(1)のように, SK でのニュートリノ事象数 (N_{SK}^{exp}) を, モンテカルロシミュレーションの予想値 (N_{SK}^{MC}) を前置ニュートリノ測定器で測定した荷電カレントミュオンニュートリノ事象反応率 ($R_{ND}^{\mu, \text{Data}}$) で規格化して, 予想する。

$$N_{SK}^{\text{exp}} = (R_{ND}^{\mu, \text{Data}} / R_{ND}^{\mu, \text{MC}}) \cdot N_{SK}^{\text{MC}} \quad (1)$$

$R_{ND}^{\mu, \text{MC}}$ はシミュレーションが予測する前置ニュートリノ測定器の荷電カレントミュオンニュートリノ事象反応率である。T2K 実験のシミュレーションプログラムは, (a)ニュートリノビームシミュレーション, (b)ニュートリノ反応シミュレーション, (c)測定器シミュレーションの3部分から構成されている。(a)ビームシミュレーションは, 陽子ビームを炭素標的に当てて, そこで生成されるハドロンから生成されるニュートリノビームを予測する。この一番の不定性は, 陽子-炭素間のハドロン反応から来るが, 過去の実験や, 現在行われている CERN の NA61 実験の測定値に基づいて反応をシミュレートしている。(b)ニュートリノ反応シミュレーションは, カミオカンデ実験の時代から開発されてきた NEUT プログラム[8]が使用されており, 前置ニュートリノ測定器, SK の T2K ビーム事象, SK 大気ニュートリノ事象をシミュレートしている。(c)測定器シミュレーションは ND280 では GEANT4 が, SK では GEANT3 が使用されている。シミュレーションの予想値には, ニュートリノビームフラックスの絶対値の不定性やニュートリノ反応断面積の不定性が直接寄与してくる。しかし, 前置ニュートリノ測定器と SK は, 原理的には同じニュートリノビームを異なった2点で観測しており, 式(1)のように比

³ RUN-2から新たにビームの非軸対称性を測定するモジュールが2台, ビーム軸中心でニュートリノエネルギーとニュートリノ反応を測定するモジュールが1台追加され, それらのデータも順次解析中である。

を取ることで, フラックスや断面積の不定性が大きくキャンセルする。この目的のために ND280 が設置されている。

ND280 では, RUN-1 のデータ (2.88×10^{19} POT) を使って⁴, ミューオンニュートリノ荷電カレント反応で生成されたミュオン事象 1529 事象が選択された。荷電カレント反応に対する efficiency は 38% で, その purity は 90% である。efficiency が低い理由は, FGD 測定器で反応し TPC に入る, 前方方向に出たミュオンのみを選択しているからである。図5に測定されたミュオンの運動量分布を示す。観測された運動量分布はシミュレーションでよく再現されていることが分かる。

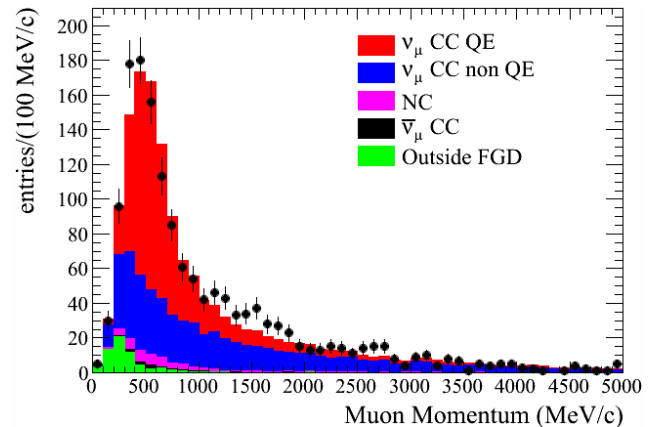


図5 ND280 で測定されたニュートリノ反応で生成されたミュオンの運動量分布。点がデータ, ヒストグラムがシミュレーションである。シミュレーションは ν_{μ} CC QE (荷電カレント準弾性散乱), ν_{μ} CC non QE (荷電カレント非準弾性散乱), NC (中性カレント反応), $\bar{\nu}_{\mu}$ CC (反ニュートリノ荷電カレント反応), Outside FGD (FGD 測定器外部からのバックグラウンド事象)に分けられて表示されている。

このサンプルを使って測定した荷電カレントミュオンニュートリノ事象反応率は

$$R_{ND}^{\mu, \text{Data}} / R_{ND}^{\mu, \text{MC}} = 1.036 \pm 0.028(\text{stat})_{-0.037}^{+0.033}(\text{det}) \pm 0.038(\text{phys})$$

である。1つ目の誤差が統計誤差, 2つ目が測定の系統誤差, 3つ目がニュートリノ反応モデルの系統誤差である。この測定より, SK での予想事象数は, シミュレーションの予想値を 1.036 倍して求めている。

4 SK でのビームニュートリノ事象選択

2章で述べた通り, SK ではニュートリノビームの到達時間の前後 $500 \mu\text{sec}$ (計 1msec) の範囲のすべての PMT ヒット情報を毎スピル記録している。事象の抽出は, この 1msec のデータにオフラインでソフトウェアトリガーをか

⁴ ND280 のデータは, キャリブレーションとデータプロセスが間に合わず, 前半の実験データのみを使っている。後半の部分においては, INGRID で測定したニュートリノ反応率が安定であることを保証して, 外挿している。

け、時間的に集中した PMT ヒットを探すことによって行われる。トリガーは、内水槽 (Inner Detector, ID) PMT のヒットによる ID トリガーと外水槽 (Outer Detector, OD) PMT のヒットによる OD トリガーの 2 種類であり、しきい値はそれぞれ 47 ヒット / 200 nsec、22 ヒット / 200 nsec に設定されている。これは大気ニュートリノデータのトリガーしきい値と同一である。ID トリガーのしきい値は、エネルギー約 6.5 MeV の電子に相当する。

振動解析に使用する事象は、Fully-Contained (FC) 事象、すなわち内水槽で起こった反応により生成されたすべての荷電粒子が内水槽から外に出ない事象である。FC 事象を選び出すためのデータリダクション条件もまた、大気ニュートリノデータのものと同様である。(1) まずは、外水槽へと粒子が飛び出したあるいは外水槽側から粒子が侵入してきた事象を取り除くために、各事象において OD PMT ヒットが空間的に最も集中している場所を探し、そこに含まれるヒット数を数える。このヒット数が 16 以上のものは、OD 事象として除外される。(2) 次に、主に放射線などによる低エネルギーバックグラウンド事象を取り除く目的で、300 nsec スライドウィンドウ内の ID PMT ヒットの光量総和の最大値が 200 photoelectrons 以下の事象 (LE 事象) を除外する。これは、電子のエネルギーでおよそ 20 MeV 以下のものを落としていることになる。(3) 最後に、Flasher によるノイズ事象を除去するためのカットをかけるが、Flasher 事象では類似するヒットパターンの事象が繰り返し発生する性質があるため、これを利用したカットになっている。その他にもいくつかの細かいカットが入っているが、以上が FC 事象選択のための主要な条件となっている。

図 6 は、FC 事象およびその他の事象のタイミング分布であり、1 msec のウィンドウ内のどの位置で事象が観測されたかを表している。J-PARC から SK までのニュートリノ飛行時間 (0.98 msec) 等は考慮されているため、横軸の 0 の位置がビームスピルの先頭のニュートリノが SK に到達するタイミングとなっている。

図 6 を見るとわかるように、FC 事象のほとんどが 0 のピンすなわちニュートリノビーム到達のタイミングで観測されている。今回は $-2 \sim +10 \mu\text{sec}$ の範囲をビームオンタイミングと定義し、振動解析に使用する事象はここで観測された FC 事象のなかから選び出している。オフタイミングで 2 事象が観測されているが、バックグラウンドの予測値が 1.9 事象であるので、予測とコンシステントである。主要なバックグラウンドは、大気ニュートリノ事象がたまたま 1 msec の T2K ウィンドウ内で起こったものである。

図 7 は、ビームオンタイミングで観測された 121 個の FC 事象のタイミング分布を、より細かく表したものである。RUN-1 で 6 バンチ、RUN-2 で 8 バンチを持ったビー

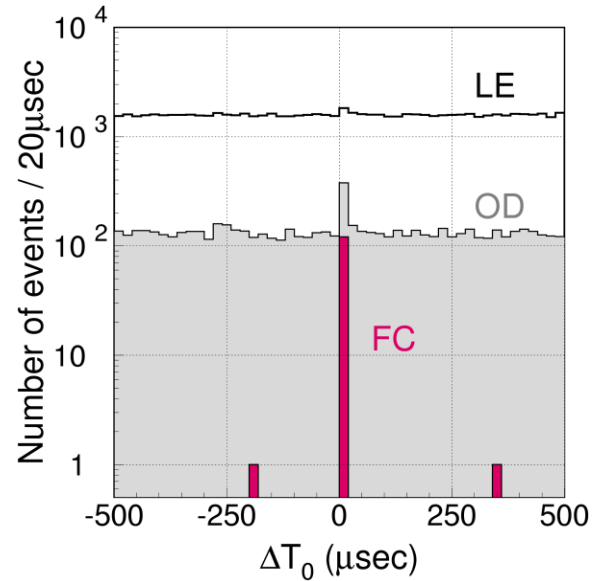


図 6 観測された事象のタイミング分布。0 がニュートリノビーム到達タイミング。スビル幅は約 $4 \mu\text{sec}$ 。

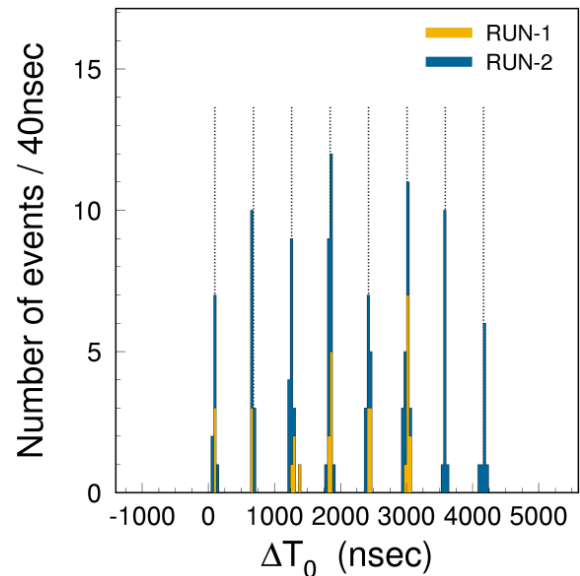


図 7 FC 事象の観測タイミング分布をビーム到達時刻付近でより細かく見たもの。

ムのスビル構造が、SK で観測された事象についてもはっきりと見えている。点線は、バンチ間隔を 581 nsec 等間隔と仮定して⁵、観測データにフィットしたものである。すべての FC 事象がちょうどビームバンチのところで観測されていることが見て取れるだろう。これは、GPS を利用した J-PARC—SK 間の時刻同期の精度が十分によいこと、そしてビーム起源でないバックグラウンドの混入が非常に少ないことを明確に表している。我々は、観測された 121 の FC 事象はすべて T2K ビームニュートリノの反応によるものであると自信を持っていうことができる。

⁵ 実際のバンチ間隔は、等間隔からは少しずれており、またビーム強度によっても違いがある

観測された FC 事象については、事象再構成プログラムにより、事象発生点・チェレンコフリング数・粒子の種類 (PID)・運動量などの情報が再構成される。この再構成プログラムは、SK 大気ニュートリノデータ解析で使用されているものとまったく同じものである。10 年以上にわたって使用されてきた実績があり、近年は T2K 実験を見据えてさらなる改良を加えてきた。

振動解析に使用される事象の条件として、まずは事象発生点が内水槽中の有効体積内にあることを要求する。有効体積は、内壁までの最短距離が 2 m 以上という定義による、22.5 kton の領域である。壁から 2 m の距離をとるのは、内水槽の外から侵入してくる粒子を除去するためであり、また壁に非常に近いところでは事象再構成プログラムの性能が若干落ちるためである。この有効体積 (fiducial volume) のカットに、電子換算エネルギーで 30 MeV 以上という条件を加えて残った事象を、我々は FCFV (Fully-Contained Fiducial Volume) 事象と呼んでおり、種々の解析のベースとなるサンプルとなっている。121 の FC 事象中、FCFV 事象に分類されたのは 88 事象であった。ビーム量に対する FCFV 事象観測レートの安定性を調べる目的で、Kolmogorov-Smirnov (KS) 検定を行った。図 8 は、各 FCFV 事象が観測された時点での累積 POT を横軸に、累積 FCFV 事象数を縦軸に表したものである。

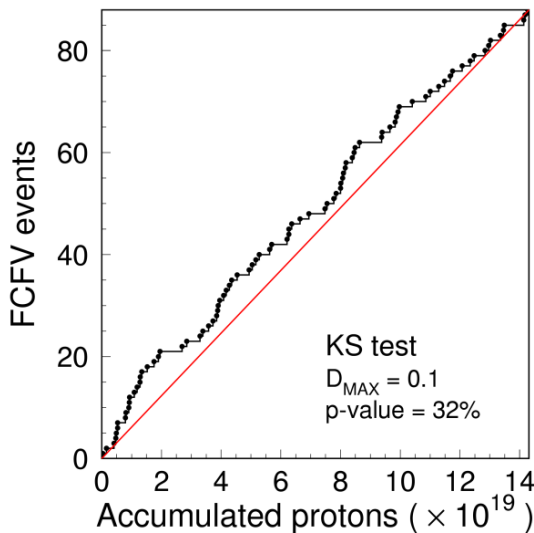


図 8 累積 POT に対する累積 FCFV 事象観測数。

ビーム量に対して事象レートが完全に一定であるという仮定が、赤の直線で表されている。KS 検定では、実際の観測結果である黒点と赤い直線との垂直方向の距離のうち最大のもの (D_{\max}) を使って評価を行う。今回、事象レートが一定であるという仮定のもとで乱数により Toy MC を大量に作って評価したところ、観測された D_{\max} と同じか大きな値を持つ確率は 32% であった。このことから、観測され

た FCFV 事象レートは、ビーム量に対して一定であるという仮定と合致するものであるといえる。

表 1 は、FCFV 事象をいくつかのカテゴリーに分けた後の事象数を、観測データおよびシミュレーションによる予測について示したものである。FCFV 事象 88 のうち、特定されたチェレンコフリング数が 1 つの事象は 41 あり、そのうち 33 事象がミュオン型リング、8 事象が電子型リングを持つ事象であった。表中のシミュレーションによる予測のうち、現時点で系統誤差を正しく評価できているのは、運動量カット付きの 1 リングサンプル (括弧の中の数字) だけであるが、観測された事象数は、誤差の範囲でニュートリノ振動がある場合の予測値と一致していることがわかる。

表 1 観測された FCFV およびそのサブサンプルの事象数とシミュレーションによる予測値。振動ありの MC では、 $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ の 2 世代間振動 ($\theta_{13} = 0$) を仮定している。誤差付きの数字は系統誤差である。

	Data	MC w/o osc.	MC w/ osc.
FCFV	88	166	74.1
1-ring μ -like ($P_{\mu} > 200 \text{ MeV}/c$)	33 (33)	112 (111 \pm 16)	32.0 (31.8 \pm 5.3)
1-ring e -like ($P_e > 100 \text{ MeV}/c$)	8 (7)	8.5 (6.8 \pm 3.0)	6.7 (5.8 \pm 2.2)
Multi-ring	47	45.3	35.4

表 1 を見て、複数リングを持つ事象の観測数が振動ありの予測とくらべて少し多いことに気づいた方もおられるであろう。我々の調査では、複数リング事象のうちでも特に、最もエネルギーの高いリングが電子型でありかつミュオン崩壊電子を表す信号が付随していない事象 (主に中性カレント反応と思われるもの) について、シミュレーションからの差が見られた。あるニュートリノ反応モードの断面積を増やすなどの単純な操作では違いのすべてを説明することはできず、現時点では理由はわかっていない (統計的なふらつきである可能性もある)。ただ、これらの事象はすべて明確な複数リング事象であり、振動解析で使用される 1 リング事象サンプルに影響を与えるものではないと我々は考えている。

5 電子ニュートリノ出現事象の探索

電子ニュートリノ出現探索では、ミュオンニュートリノから変化した電子ニュートリノが SK で反応して発生した電子のリングが 1 つだけ見える事象を探すことになる。このような事象の多くは、荷電カレント準弾性散乱 (CCQE) $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ によるものである。反応で出てくる陽子のほとんどがチェレンコフしきい値以下のエネルギーしか持

たないため、SK では電子のリング 1 つだけが見えることになる。主なバックグラウンドの 1 つは、ビームにもともと含まれる電子ニュートリノによる反応である。3 章で述べた通り、1%以下とはいえビームには電子ニュートリノ成分が含まれるため、当然これはバックグラウンドとなる。またもう 1 つのバックグラウンドとして、中性カレント反応による π^0 生成事象 (NC π^0) があげられる。発生した π^0 はただちに 2 つの γ に崩壊して 2 つの電子型リングを作るが、2 つのリングがちょうど重なってしまった場合や、一方の γ のエネルギーが低いためにリングが同定できない場合には、電子型リングが 1 つだけ見えることになるためバックグラウンドとなる。

以下に、電子ニュートリノ出現探索のための事象選択条件を順番に説明する。なお、この選択条件はデータ収集が本格的に開始される前の時点で、シミュレーション事象を使って研究し決定されたものである。今回使用したデータ量のように統計量がまだ少ないときの解析の感度がよくなるようなカットを選んでいる。

まずは当然のことながら、同定されたリング数が 1 つであること、そのリングが電子型であることを要求する。この時点で、有効体積内で起こったミュオンニュートリノによる荷電カレント反応の 98.5% は除去される。この時点で残った事象数は表 1 にあるように 8 事象である。次に、電子換算エネルギーが 100 MeV 以下の事象を除外する。これは、低エネルギーの中性カレント反応や、ミュオン崩壊電子の事象を除去するためのカットである。このカットでは 1 事象が落とされ 7 事象が残る。次に、ミュオン崩壊電子の存在を示す信号が 1 つでも付随している事象は除外する。これは、チェレンコフしきい値付近あるいはそれ以下のエネルギーしか持たないためにリングが同定されなかったミュオンや π^\pm を含む事象を除去することを目的としている。ここで 1 つの事象が落とされ 6 事象が残った。

次に、NC π^0 バックグラウンドを取り除くためのカットをかける。ここでは、すべての事象を 2 つの γ による電子型のリングによる事象であると仮定して再構成を行う特殊なプログラムを使用する。このプログラムは、通常の再構成プログラムが検出した電子型リングを 1 つめの γ リングの情報として使い、その事象のヒットパターンに最もよく合うように 2 つめの γ の方向とエネルギーを求める。図 9 は、このプログラムにより再構成された不変質量分布である。NC バックグラウンドの多くが π^0 の質量である 135 MeV/c² 付近に集まっているのに対して、信号事象ではそのようにはなっていない。我々は、この不変質量が 105 MeV/c² 以下であることを条件としている。図に示されている通り、このカットで落とされる事象はなかったため、6 事象が残る。

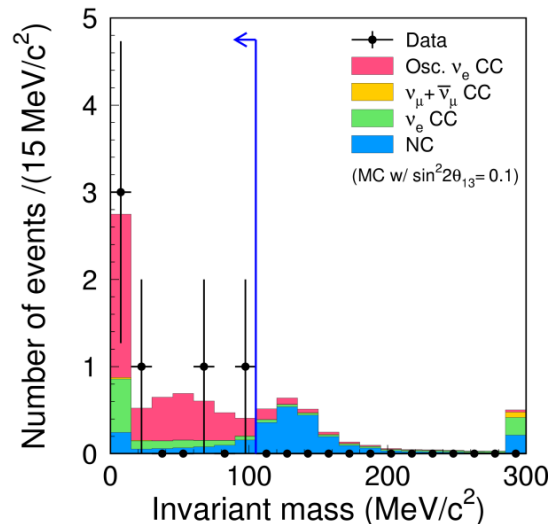


図 9 2 つの γ を仮定した再構成による不変質量分布。点がデータ、ヒストグラムがシミュレーションである。シミュレーションは、ニュートリノ振動による ν_e 信号事象、バックグラウンド事象 ($\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ CC 反応、ビーム ν_e による CC 反応、NC 反応) を分けて示してある。 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ を仮定している。

最後に、再構成されたニュートリノエネルギーが 1250 MeV 以上の事象を除外する。振動によって生成された電子ニュートリノは振動確率が大きくなる 600 MeV 付近のものが多くなるのに対して、もともとビームに含まれる電子ニュートリノは特に K 起源のものについてはより高いエネルギーを持つためである。ニュートリノエネルギーは、CCQE 反応を仮定して計算される。ニュートリノの飛来方向が分かっており、また標的となる中性子は静止していると近似できるため、発生した電子のエネルギーと進行方向がわかれば、ニュートリノのエネルギーを計算することができる。図 10 に示されている通り、この最後のカットでも落とされた事象はなく、結局すべての選択条件をかけたあとで 6 事象が残った。

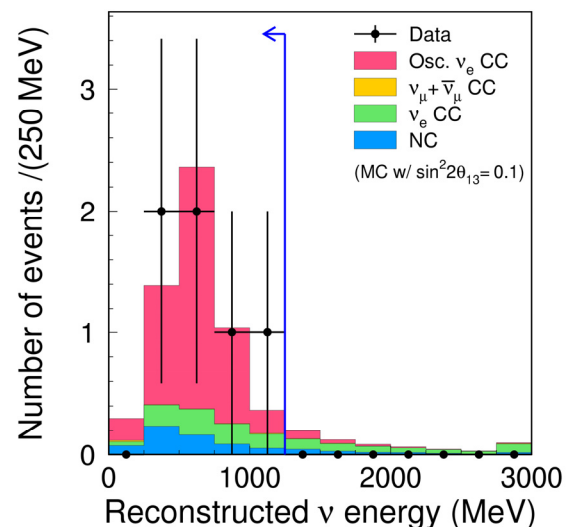


図 10 再構成されたニュートリノエネルギー分布。点、およびヒストグラムの定義は図 9 に同じ。

表2は、各選択条件ステップで残った事象数を、観測データおよびシミュレーションによる予測の両方について示したものである。全選択条件により、振動によりミューオンニュートリノから変化した電子ニュートリノが有効体積内で起こしたCC反応のうちの66%が最終サンプルに残る。一方バックグラウンドに関しては、ミューオンニュートリノのCC反応の99.9%以上、もともとビームに含まれる電子ニュートリノのCC反応の77%、全NC反応の99%を除去することができる。

表2 電子ニュートリノ出現探索のための各選択条件における事象数。 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ を仮定。

	Data	ν_μ CC	ν_e CC	NC	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ CC
Int. in FV	-	67.2	3.1	71.0	6.2
FCFV	88	52.4	2.9	18.3	6.0
1-ring	41	30.8	1.8	5.7	5.2
e-like	8	1.0	1.8	3.7	5.2
$E_{\text{vis}} > 100 \text{ MeV}$	7	0.7	1.8	3.2	5.1
No decay-e	6	0.1	1.5	2.8	4.6
Inv. mass	6	0.04	1.1	0.8	4.2
$E_\nu^{\text{rec}} < 1250 \text{ MeV}$	6	0.03	0.7	0.6	4.1

表2に示されているのは、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ の場合の予測事象数であるが、 $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ の場合すなわち θ_{13} を介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がない場合の予測事象数は、 1.5 ± 0.3 (系統誤差)となった。これは3章で述べたND280検出器によるミューオンニュートリノCC反応事象数の測定結果で規格化した後の数字である。1.5事象の内訳の大きなものとしては、もともとビームに含まれる電子ニュートリノのCC反応によるものが0.8事象、全NC反応によるものが0.6事象となっている。オフ軸法により高エネルギー成分の少ないニュートリノビームを生成することで、NC反応によるバックグラウンドを大きく低減することに成功している。

我々の観測事象数6というのは、予測事象数 1.5 ± 0.3 と比べてかなり多いことがわかる。この予測事象数の系統誤差や、振動解析の方法と結果については、後に詳しく述べる。

観測された6事象について行われた数々の検証の中で、1つ我々を悩ませることになったのが、図11に示されている事象発生点分布である。事象発生点は、有効体積内で均等にばらつくはずであるが、図を見てわかるように R (タンク中心軸からの距離)が大きい領域に事象がやや集中しているように見える。また、ビーム方向に対して上流側に事象が多いようにも見える。実際、 R 分布の他にも発生点の様々な一次元分布を作り(例としては、発生点からビー

ム上流方向への壁までの距離など)、それぞれについてシミュレーションによる予測分布との間でKS検定を行って観測データの統計的な確率を調べてみると、大きいものでは数十%のものもあったが小さいものでは0.1%程度の非常に確率の小さいものも存在した。この原因を調べるために我々はまず、予想外の事象が混入している兆候がないかどうか、有効体積の外や外水槽の事象の分布について調査を行った。結果として、これらの分布は予測通りであり何らかの事象の混入を示唆するものはなかった。次に、ビーム起因でかつ外水槽に光を出さないような反応(中性子・ $K \cdot \pi^0$ からの γ など)について、考えられるものすべてについてシミュレーションによる調査を行った。しかしこれらが有効体積内に作る事象の数は無視できるほど小さいものであった。また、SK 大気ニュートリノデータに今回の選択条件と同じ条件をかけて⁶、残った事象の発生点分布を調べたところ、シミュレーションによる予測と非常によく一致していた。

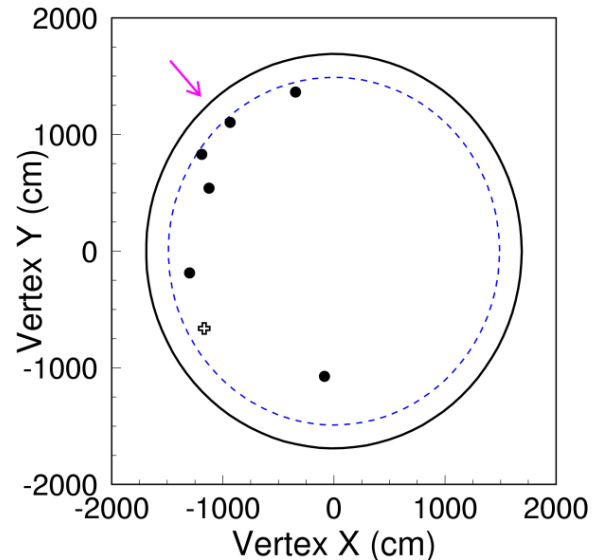


図11 電子ニュートリノ出現探索において残った事象の発生点分布(黒点)。黒い大きな丸が内水槽壁面であり、青点線が有効体積の境界を表す。十字マークは事象発生点以外の選択条件をクリアした1事象(発生点が底面に近いため除外)。ピンクの矢印はビーム方向を示している。

反応点に関する以上の調査結果、および、その他の種々の分布がニュートリノ振動を考慮した場合の予測とよく一致していることから、我々はこの観測された6事象は想定外のバックグラウンドによるものではないと結論を下した。図12は、6事象のうちの1つのイベントディスプレイである。電子型のリングが非常にきれいに見える。

表3に事象選択後に得られた電子ニュートリノ候補事象数に対する系統誤差を示す。

⁶ ただし、大気ニュートリノの場合は飛来方向が正確には分からずニュートリノエネルギーを再構成できないため、最終カットについては電子換算エネルギーを用いた同等のカットで代用した。

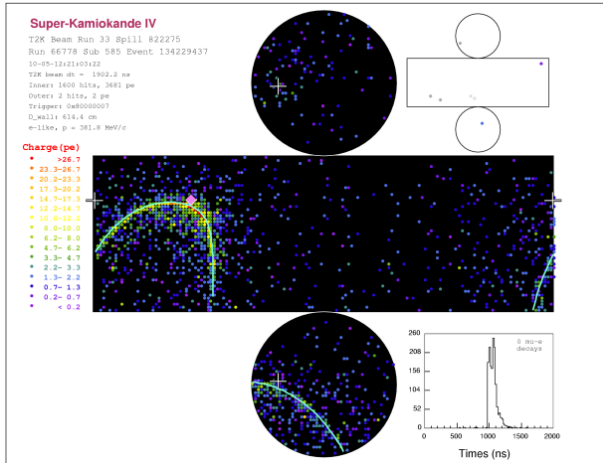


図 12 観測された電子ニュートリノ事象。

表 3 事象選択後の電子ニュートリノ事象数に対する各不定性要素からの系統誤差。 $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ と $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ のそれぞれの場合についての値を示す。

Source	$\sin^2 2\theta_{13} = 0$	$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
(1) neutrino flux	$\pm 8.5\%$	$\pm 8.5\%$
(2) near detector	$+ 5.6\%$	$+ 5.6\%$
(3) near det. statistics	$\pm 2.7\%$	$\pm 2.7\%$
(4) cross-section	$\pm 14.0\%$	$\pm 10.5\%$
(5) far detector	$\pm 14.7\%$	$\pm 9.7\%$
Total	$+22.8\%$ -22.7%	$+17.6\%$ -17.5%

(1)のニュートリノフラックスについて、ターゲットでの π 生成の系統誤差は主に NA61 実験で測定されたデータの測定誤差から来る不定性を考慮し、また K 生成の不定性は過去の断面積測定実験の測定誤差に基づいて評価した。その他ターゲット生成後の二次粒子生成、電磁ホーン、ビームプロファイル、ビーム方向測定精度などの不定要素が考慮されている。(4)の散乱断面積の系統誤差はシミュレーションで用いたニュートリノ反応モデルを MiniBooNE などの他のニュートリノ散乱断面積実験データと比較して評価された。また 3 章で触れたように、フラックスや散乱断面積の不定性に関して SK と ND280 で相関があることから期待事象数の不定性がキャンセルされる効果も含まれる。

SK 検出器における系統誤差評価においては、粒子識別によるミュオンニュートリノ CC 反応事象や NC π^0 バックグラウンド事象の除去、電子ニュートリノ事象の検出効率などが重要となる。ミュオン識別能力や電子事象検出効率の系統誤差については、宇宙線ミュオン事象や T2K ビームと似たエネルギー領域である大気ニュートリノ事象をコントロールサンプルとして評価している。 π^0 バックグラウンドについては大気ニュートリノ事象で十分な統計のコントロールサンプルを得ることが難しいこともあり電子ニュートリノ解析における大きな課題であったが、電子事

象と γ 線シミュレーションを重ね合わせたハイブリッド π^0 事象サンプルを新たに開発し、 π^0 事象の除去効率を精度よく測定することが可能となった。

観測された 6 事象の電子ニュートリノ候補事象数と期待事象数、およびその系統誤差から $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する許容領域と best-fit が求められた(図 13)。

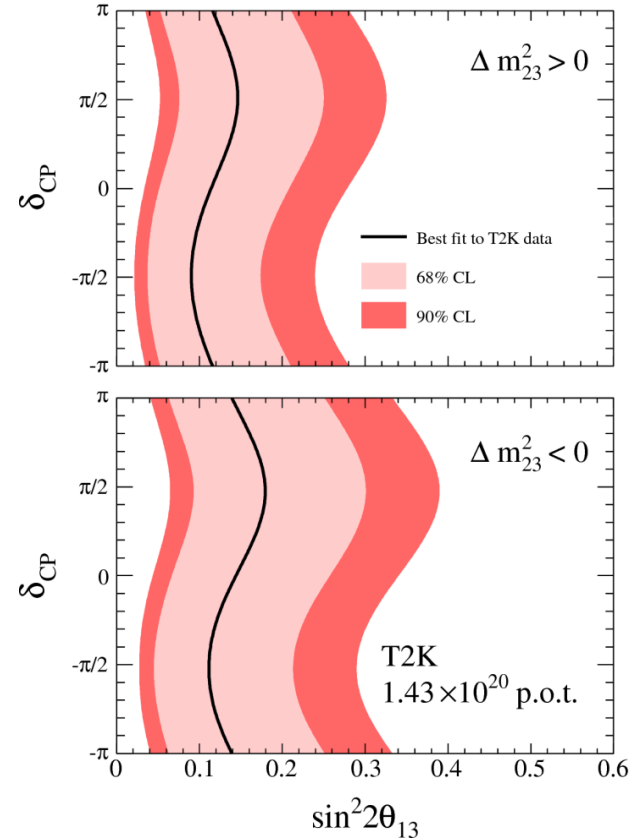


図 13 T2K 電子ニュートリノ解析から求められた、各 CP 非保存パラメータ (δ_{CP}) における $\sin^2 2\theta_{13}$ 許容領域と best-fit。上図(下図)がニュートリノ質量の正常階層(逆階層)を仮定した場合。

この図は縦軸が CP 非保存パラメータ (δ_{CP}) で、各 δ_{CP} 値を仮定した場合の $\sin^2 2\theta_{13}$ 許容領域となっている。またミュオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動確率は、三種類のニュートリノ質量が $m_1, m_2 \ll m_3$ である正常階層 ($\Delta m^2_{23} > 0$) の場合と $m_3 \ll m_1, m_2$ の逆階層 ($\Delta m^2_{23} < 0$) の場合で異なるので、それぞれの場合に分けて許容領域を示している。表 4 から 90%信頼度で $0.03 < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28$ (正常階層)の領域が許容された。また $\sin^2 2\theta_{13} = 0$ を取る確率は 0.7%、 θ_{13} による信号の有意性は 2.5σ であり、ミュオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動を示唆する結果となった。

表 4 電子ニュートリノ振動解析から求められた $\sin^2 2\theta_{13}$ の 90% 信頼度許容領域と最適値。他の振動パラメータは $\Delta m^2_{23} = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{13} = 1.0$, $\delta_{CP} = 0$ を仮定している。

質量階層性	90%信頼度許容領域	Best-fit
正常階層	0.03 – 0.28	0.11
逆階層	0.04 – 0.34	0.14

T2K の電子ニュートリノ解析結果発表の9日後、MINOS 実験グループからデータおよび解析方法をアップデートした結果が公表された[9]。彼らのデータは NC バックグラウンドが多く信号の有意性は少ないものの、T2K と同じく電子ニュートリノ事象の超過を報告している。彼らの振動解析結果は T2K とコンシステントで、90% 信頼度で $\sin^2 2\theta_{13} < 0.12$ (正常階層) と θ_{13} がより小さい領域を示唆している。

今後の目標はビームデータの統計を増やして有限の θ_{13} を確立することであるが、同時に現在約 20% と評価されている系統誤差を縮小する必要がある。今回のデータ解析では統計誤差が主な不定性であったが、すぐに系統誤差によって感度がリミットされる。最終的には系統誤差を 5% まで縮小できれば実験のポテンシャルを最大に引き出せると見積もられている。

6 ミューオンニュートリノ消失事象測定

次に T2K 実験におけるミューオンニュートリノ消失事象 (ν_μ disappearance) 測定について説明する。 ν_μ disappearance 測定の目的はニュートリノ混合パラメータである θ_{23} および Δm_{23}^2 を精密に測定することである。また、T2K 実験で用いられるニュートリノビームはほぼ純粋なミューオンニュートリノビームであり、ミューオンニュートリノの測定は後置検出器におけるニュートリノビームの実験的理解という意味で ν_e appearance 測定にとっても重要である。大気ニュートリノ、および加速器ニュートリノを用いた ν_μ disappearance の測定は現在までに複数の実験で行われている。図 14 に現在までに得られたニュートリノ振動パラメータに対する許容領域と本研究で目指す測定精度を示す。本実験が目指す最終的な測定精度は Δm_{23}^2 を 10^{-4} eV^2 、 $\sin^2 2\theta_{23}$ に対しては 1% のレベルである。(以後 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 二世世代ニュートリノ振動を考え、ニュートリノ振動パラメータを単に $\sin^2 2\theta$ 、 Δm^2 と記す。)

今回の解析に用いた POT は最終目標の約 2% 程度であるが、すでに他実験に迫る精度での測定が期待される。この一つの大きな要因はオフ軸ビームを用いたことによるものであり、T2K 実験の持つ大きなアドバンテージの一つである。

ミューオンニュートリノ消失測定では、ミューオンニュートリノの CCQE 反応事象をエンリッチしたサンプルを使用する。表 1 の 1 リングミューオン型の 33 事象に、ミューオンの運動量が $200 \text{ MeV}/c$ 以上であるという条件と、付随する崩壊電子信号の数が 0 か 1 であるという条件を加えたものである。前者は主には NC 反応のバックグラウンドを減らすためであり、後者は π^\pm を伴うような非弾性反応事象を除くためである。前者のカットで落ちる事象はなかつ

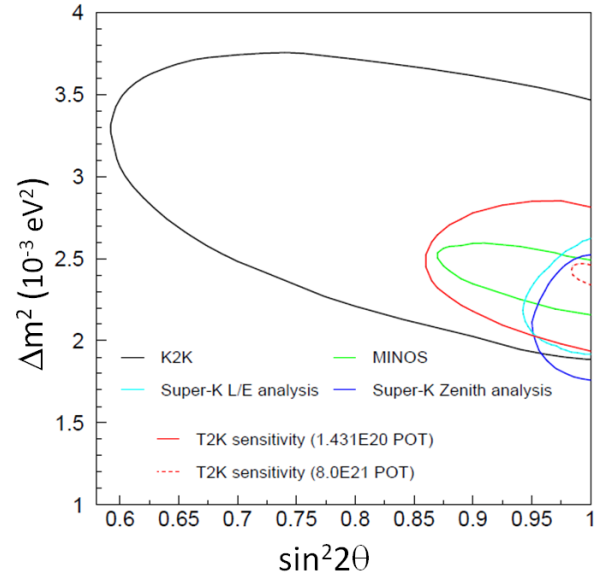


図 14 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 二世世代ニュートリノ振動を仮定した場合の、 ν_μ disappearance 測定から得られた 90% 信頼度でのニュートリノ振動パラメータへの実験的制限と T2K 実験で期待される測定精度 (赤実線: 今回の POT を用いた解析, 赤点線: 最終的な POT を用いた解析。それぞれ真のニュートリノ振動パラメータが $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.0, 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ の場合に対して)。

たものの、後者のカットで 2 事象が除外されるため、最終サンプルには 31 事象が残った。シミュレーションによる予測では、 $\Delta m_{23}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ 、 $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ の 2 世代振動を仮定した場合、最終サンプルのうちの 61% がミューオンニュートリノの CCQE 反応、32% がミューオンニュートリノの CC 非 QE 反応、6% が NC 反応、0.05% が電子ニュートリノの CC 反応となっている。

解析は事象数の減少とエネルギースペクトラムの歪みの二つの情報を用いて行う。解析には最尤法を用いる。

Likelihood を

$$L(\sin^2 2\theta, \Delta m^2, f) = L_{\text{norm}}(\sin^2 2\theta, \Delta m^2, f) \times L_{\text{shape}}(\sin^2 2\theta, \Delta m^2, f) \times L_{\text{sys}}(\sin^2 2\theta, \Delta m^2, f)$$

と定義し、ニュートリノ振動パラメータを推定する。ここで L_{norm} 、 L_{shape} 、 L_{sys} はそれぞれ事象数、エネルギースペクトラムの shape、systematic error に対する likelihood である。 f は systematic error を表すパラメータであり、 L の計算において f は fitting パラメータとして扱われ、 f を最適化することで L は最大化される。

ν_μ disappearance 解析において事象数の期待値は 3 章の説明のとおり ND280 の測定によって規格化する。エネルギースペクトラムの期待値は今回の解析においては MC シミュレーションの予言値を用い、ND280 の測定結果は使っていない。事象数の系統誤差は、ニュートリノ振動がある場合に約 13%、ない場合は約 15% と見積もられている (表 5)。エネルギースペクトラム shape のエラーは約 10%、

表 5 事象数の系統誤差のまとめ。ニュートリノ振動ありの場合では, $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (1.0, 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ を仮定。

Source	ニュートリノ	
	振動なし	振動あり
(1) neutrino flux	$\pm 6.9\%$	$\pm 4.8\%$
(2) near detector	$+6.2\%$	$+6.2\%$
(3) cross-section	$+7.8\%$	$+8.3\%$
(4) far detector	$\pm 5.1\%$	$\pm 10.3\%$
Total $\delta N_{SK}^{\text{exp}} / N_{SK}^{\text{exp}}$	$+13.2\%$	$+15.4\%$
	-12.7%	-15.2%

低エネルギー領域 ($E_\nu < 500 \text{ MeV}$) では約 30% と見積もられている。解析の結果, best fit のニュートリノ振動パラメータは $(\sin^2 2\theta, \Delta m^2) = (0.99, 2.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ と得られた。90% 信頼度で得られたニュートリノ振動パラメータの許容領域を図 15 に示す。これは他実験 (スーパーカミオカンデ, MINOS) の結果とコンシステントなものであった。また, パラメータ f の fitting を行わない場合の結果も同時に示している (この場合, best fit は $(0.98, 2.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$ であった)。

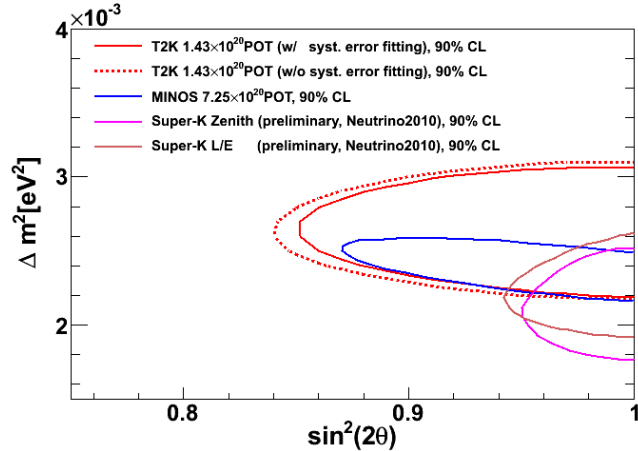


図 15 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 二世世代ニュートリノ振動を仮定しての ν_μ disappearance 解析より得られたニュートリノ振動パラメータの 90% 信頼度での許容領域。赤実線が今回得られた結果, 赤点線は f の fitting を行わない結果である。MINOS 実験, スーパーカミオカンデ実験より与えられた許容領域を同時に示す。

図 16 上図には best fit のパラメータより得られたエネルギースペクトラムとデータの比較を示す。観測されたエネルギースペクトラムは $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動によってよく再現される。また, best fit パラメータから予想される事象数は 29.1 であり, 測定された 31 事象とコンシステントであった。ニュートリノ振動がない場合の事象数の期待値は 104 であり, 事象数の比較からだけでもニュートリノ振動がないという仮定は 4.5σ で disfavor される。

Best fit のヒストグラムおよびデータのヒストグラムをそれぞれニュートリノ振動がない場合のヒストグラムで割ったものを図 16 下図に示す。高いエネルギーの領域では事象数が減っておらず, $\Delta m^2 = 2.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ に対応するエネルギー ($E_\nu \sim 800 \text{ MeV}$) 付近で最も事象数が減り, さらに低エネルギー領域では再び事象数は減っていないように見える。ミューオンニュートリノがミューオンニュートリノである確率 (survival probability) の振動的な振る舞いが見え始めているようである。また, Δm^2 の決定精度はエネルギースペクトラムの dip の位置の決定精度で大きく決まるため, 今回のデータでも dip が見えはじめていることは T2K 実験の今後の精度の高い測定を期待させるものである。

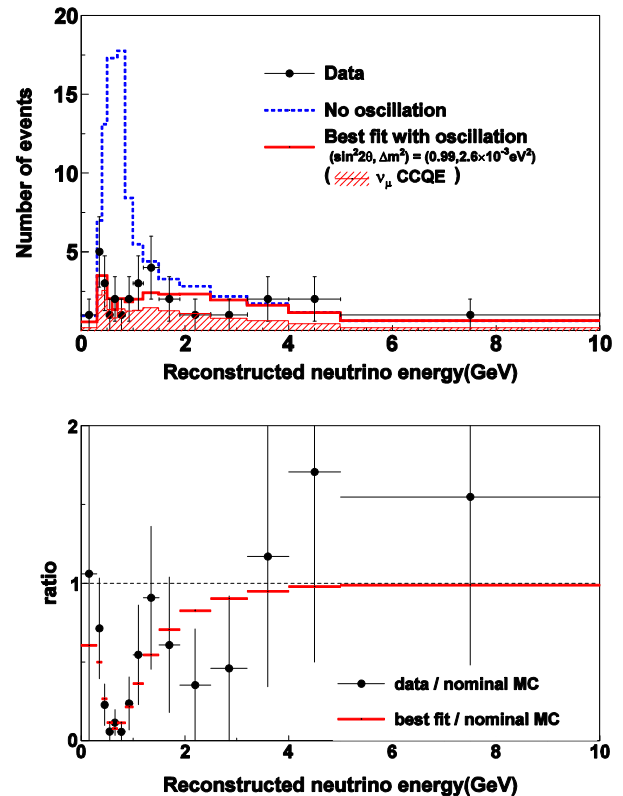


図 16 (上図)再構成されたニュートリノエネルギー分布。点は実データ, 青いヒストグラムはニュートリノ振動がない場合の MC 期待値, 赤い中抜きヒストグラムは $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 二世世代ニュートリノ振動を仮定して解析した場合の best fit の MC 期待値, 赤いハッチされたヒストグラムは best fit MC の ν_μ CCQE 反応のみを表す。(下図) best-fit MC とデータをニュートリノ振動なしの場合のヒストグラムで割ったもの。点はデータ, 赤いヒストグラムは MC を表す。

7 まとめと今後

今回の結果は, 東日本大震災で実験が中断された 2011 年 3 月 11 日までの約 1 年強分のデータを T2K 実験グループが一丸となって超特急で解析することによって得られたものである。5 月 20 日の週に開催した T2K コラボレーションミーティングで, 電子ニュートリノ出現の兆候が見えていること, またミューオンニュートリノ消失モードで他実

験より得られているリミットに迫る精度での測定に成功していること、が分かった。電子ニュートリノ出現を捕えたのは世界初であり、ミーティング後約3週間で、物理解析を完了させ、論文を執筆し、6月13日に論文をPRLに投稿した⁷。T2K実験の物理解析は、多数の検出器(各種ビームモニター、前置ニュートリノ測定器、SK)の解析を合わせて初めて完成する。そのため、今回の結果は、T2K実験グループ全員で成し遂げた成果であることを、特に強調したい。今回使ったデータ量 1.43×10^{20} POTは、T2K実験が目指すデータ総量の2%に過ぎず、この少量で世界最高感度の測定が可能であることが、T2K実験のポテンシャルの高さを裏付けている。今後、震災から復旧し、実験を早期に再開し、現在捕えている電子ニュートリノ出現の兆候を確立することが、ニュートリノコミュニティにとって非常に重要である。T2K実験グループ一丸となって、実験の復旧に全力を尽くしている。

T2K実験の目指す先には、ニュートリノ振動におけるCPの破れの探索がある。そのためには、近い将来に反ニュートリノビームを用いたニュートリノ振動の測定も重要な課題になる。T2K実験のニュートリノビームでのさらなるデータ収集と並行して、反ニュートリノビームを使った実験提案も準備していく予定である。また、将来のCP実験に向けた、次期超大型ニュートリノ測定器建設に向けた準備も精力的に進めている。

参考文献

- [1] 小林隆「T2K実験の概要」,高エネルギーニューズ 28-2, 62 (2009).
- [2] 柴田政宏, Nicholas C. Hastings, 石井孝信, 角野秀一, 「T2K実験の陽子ビームモニター」,高エネルギーニューズ 28-4, 239 (2010).
- [3] 松岡広大, 久保一, 横山将志, 「T2K実験ミューオンモニターの開発」,高エネルギーニューズ 29-1, 1 (2010).
- [4] 南野彰宏, 大谷将士, 「T2K実験ニュートリノビームモニター(INGRID)」, 高エネルギーニューズ 29-1, 10 (2010).
- [5] 青木茂樹, 中家剛, 塚本敏文, 「T2K実験前置ニュートリノ測定器(ND280 Off-Axis)」, 高エネルギーニューズ 29-2, 57 (2010).
- [6] K. Abe *et al.*, (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **107**, 041801 (2011).
- [7] <http://www.sinet.ad.jp/>
- [8] Y. Hayato, Nucl. Phys. B, Proc. Suppl. **112**, 171 (2002).
- [9] http://theory.fnal.gov/jetp/talks/MINOSNue_2011.June24.pdf, arXiv:1108.0015

⁷ 多数のT2K共同研究者が不眠不休で研究活動に従事したことで、短期間で論文投稿が可能となった。