

## T2K 実験の概要

KEK 素粒子原子核研究所

小林 隆

takashi.kobayashi@kek.jp

2009年8月20日

### はじめに

T2K<sup>1</sup>は、茨城県東海村に新たに建設された大強度陽子加速器施設 J-PARC を用いてミューオンニュートリノ ( $\nu_\mu$ ) ビームを生成し、295 km 離れたスーパーカミオカンデ (SK) で検出、ニュートリノ振動現象を検出、精密測定することにより、質量、フレーバー混合などニュートリノの未知の性質を解明することを目指す実験である[1]。5年の建設期間を終え、2009年4月、いよいよ実験が始まった。そこでこれを機に T2K 実験を紹介する。今回は実験と実験施設の概要を、次号以降で個々の機器についてより詳細に紹介する。

### 背景

ニュートリノ振動はニュートリノの種類が飛行中に振動的に変化する現象である。ニュートリノの弱い相互作用固有状態  $\nu_l (l = e, \mu, \tau)$  が質量の固有状態  $\nu_i (i = 1, 2, 3)$  の混合状態

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{MNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

であらわされ、かつ異なる質量固有値  $m_i$  を持つ場合に起こる。ここで  $U_{\text{MNS}}$  は Maki-Nakagawa-Sakata 行列と呼ばれるユニタリー行列で、四つの実パラメータを用いて以下のようであらわすことができる。

$$U_{\text{MNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ ,  $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$ ,  $\delta$  は CP 非保存を表す位相である。ニュートリノ振動現象は三つの混合角  $\theta_{ij}$ , CP 位相  $\delta$ , 三つの質量自乗差  $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$  (そのうち独立なものは二つ) であらわされる。1998年のスーパーカミオカンデ (SK) の発見

以降相次いで報告されたニュートリノ振動実験の結果をまとめると、

- $\Delta m_{23}^2 = 2.1 \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ , 90% CL [2]
- $\sin^2 2\theta_{23} > 0.92$ ,  $\theta_{23} \sim (45 \pm 8)^\circ$ , 90% CL [3]
- $\Delta m_{12}^2 = 8.0^{+0.6}_{-0.4} \times 10^{-5} \text{eV}^2$ , 68% CL [4]
- $\theta_{12} = (33.9^{+2.4}_{-2.2})^\circ$ , 68% CL [4]
- $\sin^2 2\theta_{13} < 0.14$ ,  $@\Delta m_{13}^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ , 90% CL [5]

で、 $\theta_{13}$  は上限値が与えられているのみ、 $\delta$  はまったくの未知である。レプトンにおける CP 対称性は、宇宙の物質反物質非対称性の起源のヒントを与える可能性があるため、ニュートリノ物理におけるもっとも重要な課題の一つとなっている。CP 非保存効果の測定量は  $\sin \theta_{13}$  に比例するため、将来 CP 非保存を検出するためのカギは  $\theta_{13}$  の大きさが握っている。このことから  $\theta_{13}$  の決定は緊急の課題となっており、世界的な発見競争となっている。

### T2K の目的

T2K 実験のもっとも重要な目的は、未発見の振動モードである  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動 ( $\nu_e$  出現) を検出することにより、唯一未知の混合角  $\theta_{13}$  の値を求めることである (この振動の確率は  $\sin^2 2\theta_{13}$  に比例)。ビーム積分パワー  $3.75 \text{MW} \times 10^7 \text{s}$  相当のデータを用いて、 $\sin^2 2\theta_{13}$  に対してこれまでの実験より一桁以上高い感度で探索する。T2K で  $\nu_e$  出現が観測にかかる程度に  $\theta_{13}$  が大きければ、将来、増強された J-PARC からのニュートリノビームを用いて CP 非保存を検出できる可能性が拓ける。

T2K のもう一つの目的は、 $\nu_\mu$  が振動により減少する“ $\nu_\mu$  消失”の精密測定により、高精度でニュートリノ振動を検証し  $\sin^2 2\theta_{23}$ ,  $\Delta m_{23}^2$  をそれぞれ1%,  $1 \times 10^{-4} \text{eV}^2$  の精度で求めることである。 $\theta_{23}$  は  $45^\circ$  (full mixing) に近いことが分かっているが、理論的に full mixing である必然性はない。もし高い精度で  $45^\circ$  と一致すれば、未知の法則が働いていることを示しているかもしれない。

<sup>1</sup> T2K 実験は 12 カ国, 60 機関以上, 400 人以上からなる国際共同実験。国内の参加機関は KEK, ICRR, 大阪市大, 京大, 神戸大, 東大, 広島大, 宮教大。

## T2K 実験の特徴

T2K 実験のおもな特徴を以下に挙げる。

### 1. 世界最大強度を目指す J-PARC[6]

J-PARC 主リングの設計ビームパワーは 750kW で、これは KEK-PS(5kW) の 100 倍以上である。生成されるニュートリノ数はビームパワーに比例するので、K2K に比べて二桁増しという圧倒的な強度、世界の他の施設(たとえば NuMI)に比べても 2 倍と世界をリードする強度を誇るニュートリノビームとなる。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動は確率が小さいことが分かっており、発見のためにはとにかく大強度ビームの安定供給が必須である。

### 2. 世界初の off-axis 法の採用

後述するが、off-axis 法はニュートリノ生成ビームラインの軸を検出器の方向から数度ずらすことにより、シャープなニュートリノエネルギー分布をもった強いビームを作る方法である。そのピークを振動確率が最大になるエネルギーに合わせることで、高感度低バックグラウンドを実現できる。この手法がニュートリノ実験に適用されるのは世界初である。

### 3. 世界最大の高性能ニュートリノ検出器 SK

総質量 50kt、基準質量 22.5kt を誇る SK は世界最大である。かつ T2K のエネルギー領域である数百 MeV から 1GeV 前後のニュートリノ検出、運動量測定、粒子識別( $e/\mu$ )において優れた性能を有する。

これらの特徴を兼ね備えることにより、T2K は高い感度を実現することができる。

## T2K 実験のセットアップ

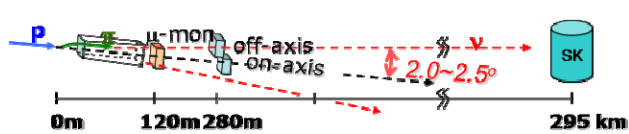


図 1: T2K 実験のセットアップ

T2K 実験のセットアップの概要を図 1 に示す。T2K のニュートリノ生成は、 $\pi$  中間子の崩壊からのミュオンニュートリノを用いるいわゆる conventional beam である。J-PARC 主リングで 30GeV まで加速された陽子ビームはキッカー磁石とセプタム磁石により、一周するうちにすべてとりだされる(速い取出し)。取出された陽子ビームは 598 ns 間隔の 8 個のバンチ<sup>2</sup>からなり全体で約 4.3  $\mu$ s の幅を持つ(スピルと呼ぶ)。設計では、スピル当たり約  $3 \times 10^{14}$  個の陽子が約 3.5 秒おきに取出される。陽子ビームは常伝導

磁石、超伝導複合磁場磁石で構成される一次陽子ビームラインを転送、神岡方向に約 80° 曲げられ標的に導かれる。超伝導複合磁場磁石は KEK の超伝導低温工学センターで開発されたもので、加速器実験で本格的に使用されるのは世界初である。

標的は直径 26mm、長さ 90cm のグラファイト棒で、He ガスで冷却される。標的で生成された  $\pi$  中間子は 320kA のパルス電流で運転される 3 台の電磁石“ホーン”で前方に収束され、崩壊領域に導かれる。崩壊領域は長さ約 110m の He ガスが封入された密閉容器で、大半の  $\pi$  中間子はそこを飛行中に  $\nu_\mu$  とミュオン粒子に崩壊する。崩壊領域の終端部にはビームダンプがあり、ニュートリノ以外の粒子を吸収する。ビームダンプの背後には、Si パッド検出器およびイオンチェンバーを二次元に並べたミュオンモニターが設置され、ビームダンプを通過したミュオン粒子の量、分布をスピルごとに測定する。ニュートリノと同時に生成されるミュオンを測定することにより間接的にニュートリノの方向、強度をモニターする。

T2K では世界で初めて off-axis ビームを採用する。これはビーム軸の方向を検出器(SK)の方向から数度ずらす方法である。角度  $\theta$  ずらしたとき、ニュートリノエネルギーは  $E_\nu = (m_\pi^2 - m_\mu^2) / \{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)\}$  と表わされる。図 2 に見るように  $\theta$  が有限の場合、 $E_\nu$  が親  $\pi$  中間子エネルギーにあまり依らなくなる。広い運動量範囲の  $\pi$  中間子が狭いエネルギー領域のニュートリノに寄与するため、エネルギーの広がりが狭く、強いニュートリノビームを生成することができる。T2K のビームラインは off-axis の角度を 2.0 ~ 2.5° の範囲で選ぶことができるように設計されている。

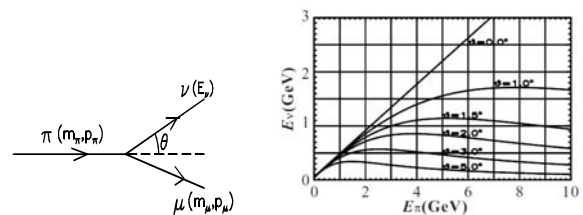


図 2: Off-axis ビームの原理

右図は  $\pi$  中間子の運動学をグラフにしたもので、横軸は親  $\pi$  中間子のエネルギー、縦軸は生成されるニュートリノのエネルギー、 $\theta$  はそれらの粒子の間の角度。

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動確率のエネルギー依存性は  $\Delta m_{13}^2$  で規定されるが、これまでの実験から  $\Delta m_{13}^2 \sim \Delta m_{23}^2 \sim (2.2 \sim 2.7) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  と分かっており、このとき振動確率が最大となるエネルギーは 600 MeV 前後となる。このあたりのエネルギー領域で感度を最適化するため 2.5° を選んで実験を行うこととした。

<sup>2</sup> 実験開始当初は 6 バンチ。

期待されるニュートリノビームフラックスを図3に示す(MC)。SKで期待される荷電カレント(CC)反応の数は $\theta = 2.5^\circ$ で積分パワー $3.75 \text{ MW} \times 10^7 \text{ s}$ の時、約7200個である(ニュートリノ振動がないとき)。OA角2, 3度でピークエネルギーはそれぞれ780 MeVと520 MeVである。 $\nu_\mu$ スペクトルのピークの位置で $\nu_e$ の割合は約0.4%である。

標的から280mの位置には生成直後で振動前のニュートリノビームの性質を測定するための前置検出器がおかれる。前置検出器はビーム軸上(on-axis)に設置される検出器INGRIDと、標的とSKを結ぶ直線状におかれるoff-axis検出器からなる。INGRIDは $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 6.5 \text{ cm}$ の鉄板1枚とシンチレーター飛跡検出器11層を交互に重ねた“モジュール”を水平方向に7台、垂直方向に7台、それぞれビーム中心から $\pm 5 \text{ m}$ の範囲をカバーするように配置したものである。鉄板の中で発生したCC反応からのミュー粒子をとらえ、計数することによって、ビーム強度、プロファイルを測定、モニターする。Off-axis検出器はCERNから寄贈されたUA1磁石の磁場中に全感知型シンチレーター飛跡検出器、TPC、電磁カロリメータなどを並べたもので、SKに向かうニュートリノの数、エネルギースペクトル、電子ニュートリノの混入率、ニュートリノ反応断面積の測定などを目的とする。

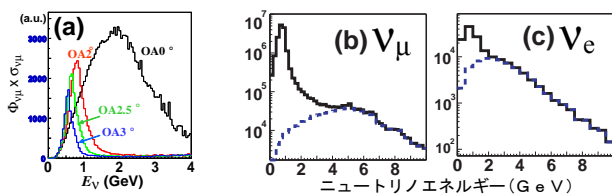


図3：期待されるニュートリノスペクトル

(a) 各OA角の $\nu_\mu$ 反応スペクトル。(b) OA角2度のときの $\nu_\mu$ フラックス(arb. unit)。実線は全 $\nu_\mu$ 、破線はK粒子崩壊からの寄与。実線から破線を引いたものが $\pi$ 崩壊からの寄与。(c) OA角2度のときの $\nu_e$ フラックス(arb. unit)。実線は全 $\nu_e$ 、破線はK崩壊の寄与、実線から破線を引いたものが $\mu$ 崩壊の寄与。

T2Kの主検出器であるSKは昨年度エレクトロニクスシステムが刷新され、安定に稼働しておりT2Kビームをいつでも受け入れ可能状態である。SKで観測されるニュートリノ反応の中からT2Kのニュートリノ反応を識別するためにはGPSを用いる。GPSでは位置情報に加え時間情報も得られる(精度100ns)。東海でビームを出射した時刻をGPSで計測し、神岡までのTOFを加えSKに到着する時間を求め、その時間近辺の事象を探す。4.3 $\mu\text{s}$ 幅のビームを3.5秒間隔で5年間( $5 \times 10^7 \text{ s}$ )送り続けたとき、偶然大気ニュートリノの反応がビームの時間窓に1事象入る確率は1%以下である。T2Kでは、ビームの時間情報をリアルタイムで神岡にネットワーク転送し、オンラインで時間窓選別を行う。

## ニュートリノ振動検出の方法

ここでは紙面の都合上 $\nu_e$ 出現についてのみ述べる。 $\nu_e$ 出現の証拠は、SKにて $\nu_e$ のCC準弾性(CCqe)反応 $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$ からの電子を検出することでとらえる。このエネルギー領域ではCCqeが主要な反応である。二体反応であり、ニュートリノの方向を知っていることから、終状態の電子の方向とエネルギーからニュートリノのエネルギーを算出できる。主なバックグラウンドは、ビームに元々含まれている $\nu_e$ (intrinsic $\nu_e$ )と、 $\nu_\mu$ 中性カレント $\pi^0$ 生成反応で $\pi^0$ 崩壊からの二つの光子が作る電磁シャワーのうち一つを見落とす場合である。Intrinsic $\nu_e$ の起源は崩壊領域中で $\pi$ 中間子から発生したミュー粒子がさらに崩壊して作るものと、標的で生成されたK中間子の崩壊とがある。

Intrinsic $\nu_e$ バックグラウンドは信号事象と事象形状がまったく同じであるため識別することはできない。エネルギー分布が信号事象に比べ広いことを利用し、信号事象付近のエネルギー領域のみ選択するカットでS/Nを高めることができる。 $\pi^0$ バックグラウンドはSKの標準的なPIDアルゴリズムで電子として選ばれた事象からさらに $\pi^0$ ライクな事象を除去するための解析アルゴリズムを開発している。SKで観測される事象数と、予想される信号+バックグラウンド期待値を比較することによりニュートリノ振動を探索する。現時点での予想値は $3.75 \text{ MW} \times 10^7 \text{ s}$ のとき、intrinsicバックグラウンドが15、 $\pi^0$ バックグラウンドが10事象、対して信号事象は $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ のとき143事象である。

信号およびバックグラウンドの期待値は前置検出器などの情報を用いて求める。その基本的な方法は、前置検出器で測定したニュートリノ反応数分布 $N_{\text{ND}}^{\text{obs}}(E_\nu)$ を反応断面積 $\sigma_{\text{ND}}(E_\nu)$ で割ることによりフラックス $\Phi_{\text{ND}}(E_\nu)$ を求める。これにフラックスの外挿ファクター $R(E_\nu)$ をかけてSKで期待されるフラックス $\Phi_{\text{SK}}(E_\nu)$ を求め、これに水での反応断面積 $\sigma_{\text{SK}}(E_\nu)$ 、検出効率 $\epsilon_{\text{SK}}(E_\nu)$ をかけることでSKで期待される反応数分布が得られる。バックグラウンド事象数の予測精度は10%を目標としている。

## フラックスの外挿

フラックスの外挿ファクター $R(E_\nu)$ は、ニュートリノ源が純粋に点源であれば単純に定数(距離の二乗分の一)となるが、T2Kの場合280mの位置にある前置検出器に対して点源として見えないため、エネルギーの関数となる。このファクターを精度よく評価することが実験成功の一つのカギとなる。

このファクターはニュートリノの親粒子である $\pi$ 中間子、K中間子の生成時の運動量分布が分かれば算出できる。しかしT2Kの陽子ビームエネルギー30GeVでT2K標的物質(炭素)からの中間子生成のデータが世の中に存在しなかつ

た。ないなら実測しようということで、われわれは T2K 標的と同じグラフイトから中間子生成を測定するため、CERN の SPS 実験 NA61 を重イオン物理研究者らと共同提案し、2007 年度パイロットデータを取得、現在解析が進行中である。また 2009 年夏本格測定を行っているところである。

## 予想感度

図4に T2K の電子ニュートリノ出現に対する感度を示す。PAC で認められた  $3.75 \text{ MW} \times 10^7 \text{ s}$  相当のデータ(図中、右側の縦直線)で、90%CL 感度で  $\sin^2 2\theta_{13} > 0.008$  を探索可能、約 0.018 以上であれば  $3\sigma$  以上の有意性を持って電子ニュートリノ出現を検出することが可能である<sup>3</sup>。この到達感度は背景事象数の系統誤差 10% を仮定したときのものであるが、この統計量では 20% を仮定してもほとんど同じ感度である。言い換えれば T2K は統計量、すなわち加速器の積分ビームパワーで決まる実験ということである。

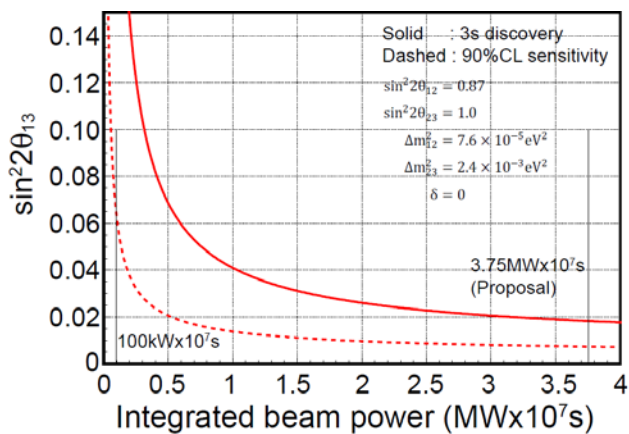


図4：期待される  $\nu_e$  出現の感度の積分ビームパワー依存性

## 国際競争

世界で有限な  $\theta_{13}$  測定を目指して建設中の実験は、原子炉からの反電子ニュートリノ消失実験の Double Chooz(仏)、Daya Bay(中)、RENO(韓)、加速器実験の NO $\nu$ A(米)がある。Double Chooz は 2010 年測定開始を目指して準備を進めている。NO $\nu$ A は 2009 年 5 月着工、2013 年中の完成を目指している。競争は激しくなっており、世界に先駆けて有限な  $\theta_{13}$  を検出するためには、J-PARC 加速器の安定な大強度運転の早期実現が必須である。

## コミッションング

T2K 実験は 2008 年度中に完成し、2009 年 4 月からいよいよ実験を開始した。4, 5 月に行われた最初のビームコミッションングでの典型的なビーム条件は、バンチ当たり陽子

数が設計強度の約 1% ( $4 \times 10^{11} p$ )、バンチ数 1 である(エネルギーは 30 GeV)。二次ビームラインでは、3 台のホーンのうち最上流の第一ホーンのみ設置して調整を行った。前置検出器は INGRID が中心の 1 モジュールが稼働、off-axis 検出器は未稼働であった。4 月になり上流の加速器から順に立ち上げ、ニュートリノビームラインの調整を始めたのが 4 月 23 日。ビームは、一発(1 スピル)だけ出してはビームを止め、ビームモニターなどの情報をよく吟味し、理解し、それに基づいてビームラインを調整した後に次のスピルを出す、といういわゆるシングルショットモードで行った。最初まず超伝導磁石を励磁せず上流部の軌道調整を行った。その後超伝導磁石を励磁した直後の最初のショットでビームが一次ビームラインを通過して標的まで到達した。このショットで初めてミューオンモニターで信号が確認され、ニュートリノ生成を間接的に確認することができた。引き続きビーム調整を進め、9 ショット目でほぼ標的中心にビームを照射することができた。その後もおおむね順調に進み、4 月、5 月の 9 日間のコミッションングで予定していたコミッションングのメニューアイテムをほぼこなし、5 月 28 日には晴れて放射線に関する施設検査をパスすることができた。詳細は別途報告があると思うのでそちらを参照されたい。

## 今後

夏の加速器定期シャットダウン中に残りの第二、三ホーンを設置し<sup>4</sup>、10 月以降、完成形のビームラインでビームコミッションングを再開する。INGRID 検出器は残りのモジュールの設置が終わり 10 月には ready となる予定である。Off-axis 検出器は 9 月以降設置作業が本格化し 12 月には完成する予定である。

T2K の最初の目標は  $O(100 \text{ kW} \times 10^7 \text{ s})$  相当のデータを蓄積し、2010 年中にこれまでの上限値を凌駕する世界最高感度の探索を行うことである。100 kW  $\times$  10<sup>7</sup> s のとき(図 4 中、左側の縦線)に予想される感度は  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.06$  前後である(90%CL)。その次のマイルストーンは 1~2 MW  $\times$  10<sup>7</sup> s 辺りになると予想される。このとき図 4 に見るように最終感度の約 2 倍程度まで探索可能で、その辺りまでの測定から、その後の様子(兆候など)がかなり予想できそうだからである。最終的な目標は PAC で認められた  $3.75 \text{ MW} \times 10^7 \text{ s}$  相当のデータを蓄積し、 $\nu_e$  出現を発見すること、 $\nu_\mu$  消失測定において  $\delta(\sin^2 2\theta_{23}) \leq 1\%$ 、 $\delta(\Delta m_{23}^2) \leq 1 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$  を達成することである。

<sup>3</sup>  $\sin^2 2\theta_{13}$  の感度は  $\delta$  に依存。これらの値は  $\delta = 0$  の場合。

<sup>4</sup> 8 月 17 日現在、第二、第三ホーンとも設置済み。

## さいごに

T2K は、これまで、ここでは到底挙げきれない多くの方に、ご支援、ご協力をいただき、ようやく実験開始にこぎつけることができました。この場をお借りしてお礼申し上げます。ありがとうございました。

が、しかしながら、実験は始まったばかりで、一日も早く世界に先駆けて実験の成果を上げるためには加速器の早期大強度実現を始め、まだまだこれからも皆様の強力なご支援が必要と思います。今後もよろしく願いいたします。

## 引用文献

1. [http://j-parc.jp/NuclPart/pac\\_0606/pdf/p11-Nishikawa.pdf](http://j-parc.jp/NuclPart/pac_0606/pdf/p11-Nishikawa.pdf).
2. M. Diwan, Presentation at XIII International Workshop on “Neutrino telescopes”, Venice, Italy, March 2009.
3. SK. Collab., Phys. Rev. **D71**, 112005 (2005).
4. Review of Particle Physics (2008).
5. M. Apollonio *et al.* (Chooz collab.), Phys. Lett. **B466**, 415 (1999).
6. J-PARC 加速器の最近の状況に関しては、  
吉岡正和, 高エネルギーニュース **28-1**, 26 (2009).