

T2K 実験の将来感度

東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

池田 一得

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

京都大学大学院理学研究科

市川 温子

ichikawa@sphys.kyoto-u.ac.jp

KEK 素粒子原子核研究所

Megan Friend

mfriender@kek.jp

2014年2月27日

1 イントロダクション

大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見以降、多くのニュートリノ実験により3世代振動(次節参照)が支持されている。現在のニュートリノ振動パラメータの測定状況を表1に示す。このうち δ_{CP} は、表1にある通り値がまったくわかっていないが、有限な値であればレプトンセクターにおけるCP対称性の破れを引き起こす重要な変数である。 Δm_{32}^2 は、符合が正(m_3 が一番重い)の場合を順階層(NH)、負(m_3 が一番軽い)の場合を逆階層(IH)と言うが、どちらであるかはまだ分かっていない。表1でもう一つ付け加えるとすると、 θ_{23} の精度が悪いということで、 $\sin^2 \theta_{23}$ で表すと、 0.5 ± 0.1 というように20%の不定性がある。 θ_{23} がなんらかの機構によりちょうど $\pi/4$ (最大混合)なのか、それよりも大きいのか小さいのか、非常に興味深い状況である。

表1 ニュートリノ振動パラメータの測定状況 [1]

Parameter	Value
$\sin^2 2\theta_{12}$	0.857 ± 0.024
$\sin^2 2\theta_{23}$	> 0.95
$\sin^2 2\theta_{13}$	0.095 ± 0.010
Δm_{21}^2	$(7.5 \pm 0.20) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$ \Delta m_{32}^2 $	$(2.32^{+0.12}_{-0.08}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
δ_{CP}	unknown

T2K 実験は、2009年にデータ取得を開始した長基線ニュートリノ振動実験で、上記の問題解決を目指す世界競争の中で最前線に立っている。最終的な統計量として、 7.8×10^{21} Protons On Target (加速器からの陽子数, POT)が承認されており、もともとは、(1) 上限値しか知られていなかった θ_{13} が有限である場合に起きる $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の探索、(2) $\sin^2 2\theta_{23}$, Δm_{32}^2 の精密測定、(3) ステライルニュー

トリノ探索、の三つが大きな目標であった。この三つの中になかったせいかどうか知らないが、CPの測定はT2Kでは無理だと思っている人も少なくない。しかしながら、近年のT2K実験、および原子炉ニュートリノ実験による θ_{13} の測定後、状況はがらりと変化した。 θ_{13} が比較的大きな値であったため、T2KによるCP測定の可能性が開けたのである。

そして、2013年、T2Kは最終統計の約8.4%にあたるデータを取得した結果、 7.3σ の有意性について $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を世界で初めて観測した[2]。本研究紹介では、T2Kの最初の大きな目標が達成された今、次の目標は具体的に何なのかをはっきりさせておきたいと思う。特に「T2Kってもうやることないんじゃないの?」という人に読んでもらいたい。

2 ニュートリノ振動

3世代ニュートリノ振動はMaki-Nakagawa-Sakata(MNS)行列と呼ばれるユニタリ行列で記述される。弱フレーバー固有状態(ν_e, ν_μ, ν_τ)と質量固有状態(ν_1, ν_2, ν_3)は、MNS行列によって次のように関係づけられる。

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

0.6 GeVにピークをもつミューオンニュートリノビームを用いて基線長295 kmで測定しているT2Kでは、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動と $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 振動が主な振動モードである。ここでは、長い式を書くことはせず、以下の章を理解する上で基本的なことだけ確認しておく。

まず、 ν_e 出現確率の主要項は、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \Phi_{31}$$

であり、それに続く項としてCP対称性を破る

$$-8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{13} S_{12} S_{23} \sin \delta_{CP} \sin \Phi_{32} \sin \Phi_{31} \sin \Phi_{21}$$

がある。ここで、 $C_{ij} = \cos \theta_{ij}$, $S_{ij} = \sin \theta_{ij}$, $\Phi_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L / E$ (L は飛行距離, E はニュートリノエネルギー) である。それぞれに適宜数字を入れると, CP 非保存の効果は, 最大で出現確率の 27%もあることになる。おおざっぱな見積りをすると, たとえば, 最終的な統計で $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動による出現事象数は (θ_{13} が大きいおかげで) $O(100)$ 事象なので, 誤差は統計誤差だけを考えると約 10%である。したがって, 運がよければ, $2 \sim 3\sigma$ の有意性で δ_{CP} の効果を見ることができると分かる。

次に, ν_μ 消失確率は,

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - (C_{13}^4 \sin^2 2\theta_{23} + S_{23}^2 \sin^2 2\theta_{13}) \sin^2 \Phi_{31}$$

で与えられるが, ここで注意するのは, 主要項で混合角が $2\theta_{23}$ の形で入っていることである。従って, たとえば θ_{23} が $\pi/4$ からずれていたときに, 消失確率のみでは $\pi/4$ より大きいのか小さいのかの区別が付きにくい。しかし, ν_e 出現確率の主要項には $\sin^2 \theta_{23}$ があるので, ν_e 出現解析と ν_μ 消失解析を組み合わせることにより, この縮退を解くことができる。

3 T2K 実験

T2K 実験は, 茨城県東海村 J-PARC の 30GeV 陽子加速器を用いて生成したミュオンニュートリノビームを, 295km 離れた岐阜県飛騨市にある 50kton の水チェレンコフ検出器, スーパーカミオカンデ(SK)で観測する, 長基線ニュートリノ振動実験である[3]。

本号の $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動解析の報告[4]にも説明されているとおり, T2K 実験のセットアップは大きく分けて(1)ニュートリノビームライン, (2)前置検出器 (ND), (3)後置検出器 (SK) の三つの施設からなる。スーパーカミオカンデでは, チェレンコフリングのパターンから, 電子ニュートリノ事象とミュオンニュートリノ事象を区別することができる。また, リングの光量, 方向によってニュートリノエネルギーを再構成することができる。

振動解析では, 二つのサンプルを用いる。一つ目は, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動からの ν_e が水と反応して放出される電子を捕えた 1 リング・電子事象を選んだサンプルで, ν_e 出現サン

プル(または, 出現サンプル)と呼ぶことにする。二つ目は, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 振動で残った ν_μ が反応して放出されたミュオンを捕えた 1 リング・ミュオン事象を選んだサンプルで, ν_μ 消失サンプル(または, 消失サンプル)と呼ぶことにする。

T2K ではこれまでのところニュートリノビームのみを用いている(ニュートリノモード)。今後必要に応じて, 反ニュートリノビームの測定(反ニュートリノモード)を行うが, それぞれのモードで, この二つのサンプルができるので, 将来的には, 合計四つのサンプルを用いて解析を行うことになる。今回はモンテカルロシミュレーションでその四つのサンプルを生成し, 感度を求めた。

4 T2K 実験の将来感度予想

ニュートリノモードと反ニュートリノモードにおける, 出現サンプルと消失サンプルの再構成エネルギースペクトル(計四つの分布)を用いて, 統計誤差と系統誤差を考慮し, 予想感度を求めた。信号選択効率やバックグラウンド量は, 2012 年の T2K における振動解析[5][6]をもとにしている。また, 最終的な統計量としては, 承認されている, 7.8×10^{21} POT を用いた。系統誤差については, 将来的に現在よりも削減されることが予想されるが, 2012 年の解析で見積もられた系統誤差をもとに, それを削減した場合に感度がどうなるかについても調べた。

4.1 エネルギースペクトル・系統誤差

図 1 および図 2 に, 7.8×10^{21} を 100%ニュートリノモード, または 100%反ニュートリノモードで実験を行った場合のエネルギースペクトルを示す。これらのスペクトルは, 標準的な振動パラメータと $\delta_{CP} = 0$ を仮定して計算した。表 2, 3 には, 予想される事象数をまとめた。

反ニュートリノモードでは, 原子核標的との反応断面積がニュートリノモードに比べて約三分の一になるために, 同じ POT に対するイベントレートが約四分の一になる。従って, 反ニュートリノモードでのデータ取得をどれくらいの割合で行うのが得策かは, 自明ではない。さまざまな割合での感度を評価した結果, 大体, 半々(50%:50%)でデー

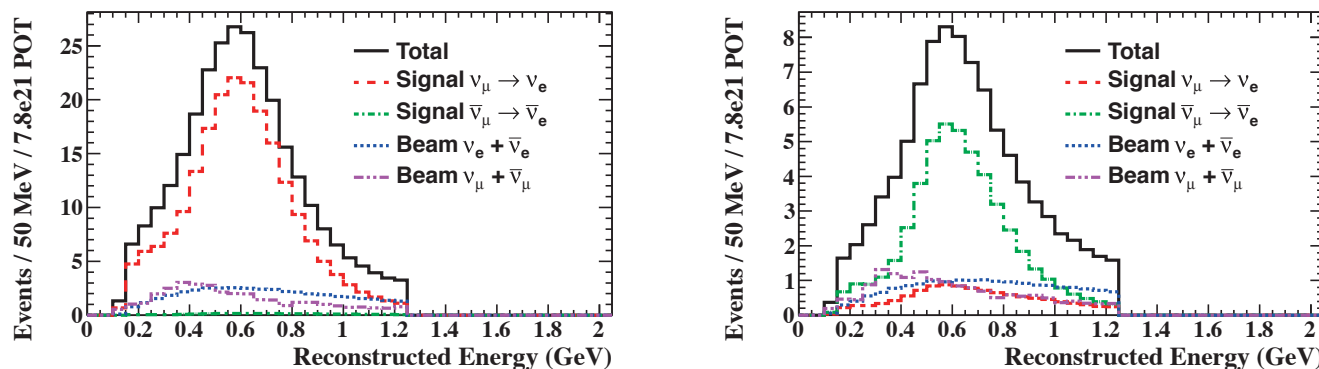


図1 ニュートリノモード(左)と反ニュートリノモード(右)の電子ニュートリノ出現サンプルの再構成エネルギー分布

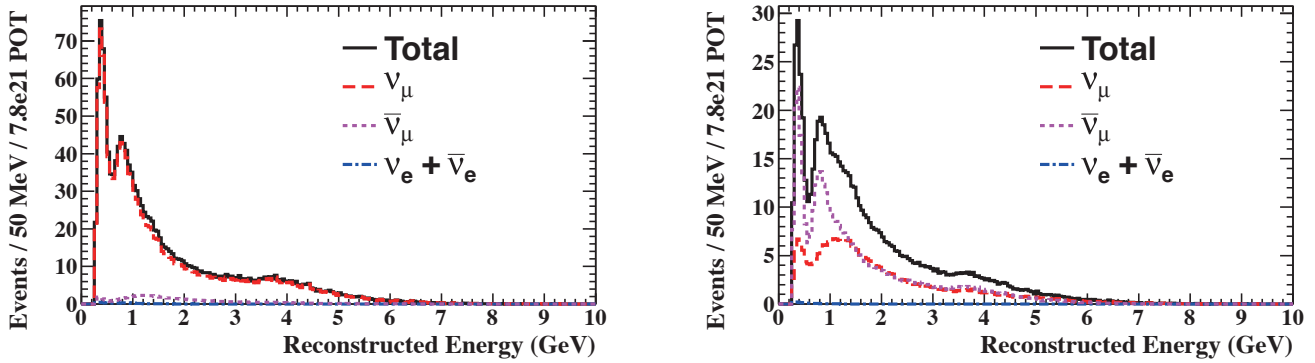


図2 ニュートリノモード (左) と反ニュートリノモード (右) のミュオンニュートリノ消失サンプルの再構成エネルギー分布

表2 最終的な統計量での出現サンプルの事象数。

$\nu_e + \bar{\nu}_e$ (CC)は、ビーム中に混入している電子ニュートリノ成分の荷電カレント(CC)反応数、
 $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ (CC)はビームのミュオンニュートリノの CC 反応数、NC は中性カレント反応による事象である。

	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	$\nu_e + \bar{\nu}_e$ (CC)	$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ (CC)	NC	合計
100% ν モード	211	2.3	41.2	1.6	33.2	290
100% $\bar{\nu}$ モード	11.1	48.7	17.4	0.5	0.5	15.8

表3 最終的な統計量での消失サンプルの事象数。CCQEは、荷電カレント準弾性散乱事象である。

	CCQE $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$	CC(QE 以外) $\nu_\mu (\bar{\nu}_\mu)$	Other	合計
100% ν モード	782 (48)	544(40)	79	1493
100% $\bar{\nu}$ モード	130 (263)	151(138)	33.5	715

表4 2012年解析[5][6]における、SKでの各サンプルの事象数に対する系統誤差。

エラー源	出現サンプル	消失サンプル
フラックス×断面積(ND測定で制限)	5.0%	4.2%
ND測定で制限できない断面積の誤差	7.4%	6.2%
SK検出器と終状態反応	3.9%	11.0%
合計	9.7%	13.3%

タを取得した場合に、振動パラメータの広い範囲で高い感度を維持することができることがわかった。

本記事では、ニュートリノモードのみでデータを取得した場合と、半々でデータを取得した場合の感度を示す。系統誤差は、事象数とエネルギースペクトラムの形の両方を考慮している。表4に各系統誤差の事象数に対する寄与をまとめた。解析は、上記の4種類のサンプルの再構成ニュートリノエネルギースペクトルから binned likelihood を作り、各振動パラメータの値を仮定した時の $-\ln L$ (以降ではこ

れを単に χ^2 と呼ぶこととする) を計算することで行った。また感度としては、期待される平均信頼度を用いている。

4.2 振動パラメータに対する許容領域

T2Kの最終的な統計量で予想される、ニュートリノ振動パラメータに対する90%信頼度許容領域(線の内側が許容領域)を、いくつかの場合について紹介する。ここで、許容領域は、 χ^2 の最小値からの差 $\Delta\chi^2$ を計算して求めた。

図3は、 δ_{CP} と $\sin^2 2\theta_{13}$ について、ニュートリノモードと

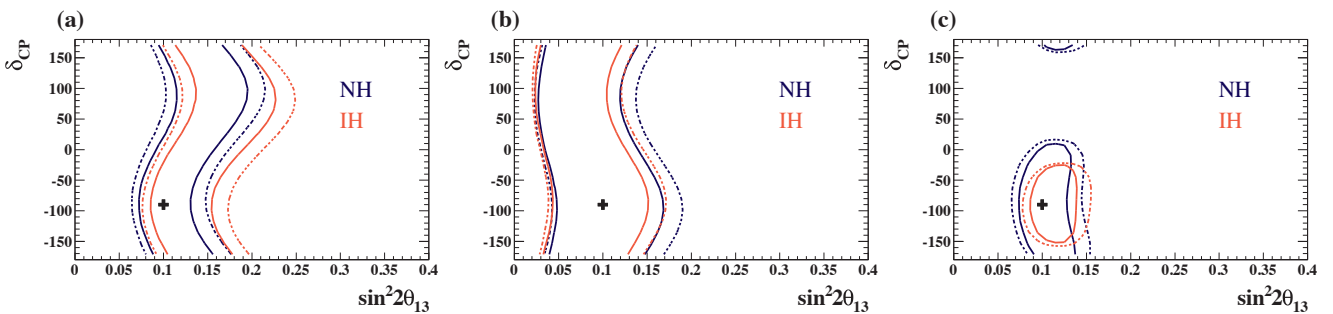


図3 真の値が $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$, $\delta_{CP} = -90^\circ$ の場合の、 $\sin^2 2\theta_{13} - \delta_{CP}$ の90%信頼度許容領域。

- (a) ニュートリノモードのみ、最終的な統計量の50%
- (b) 反ニュートリノモードのみ、最終的な統計量の50%
- (c) 両方のモードを組み合わせた場合。実線は統計誤差のみ、点線は系統誤差も考慮した場合の許容領域

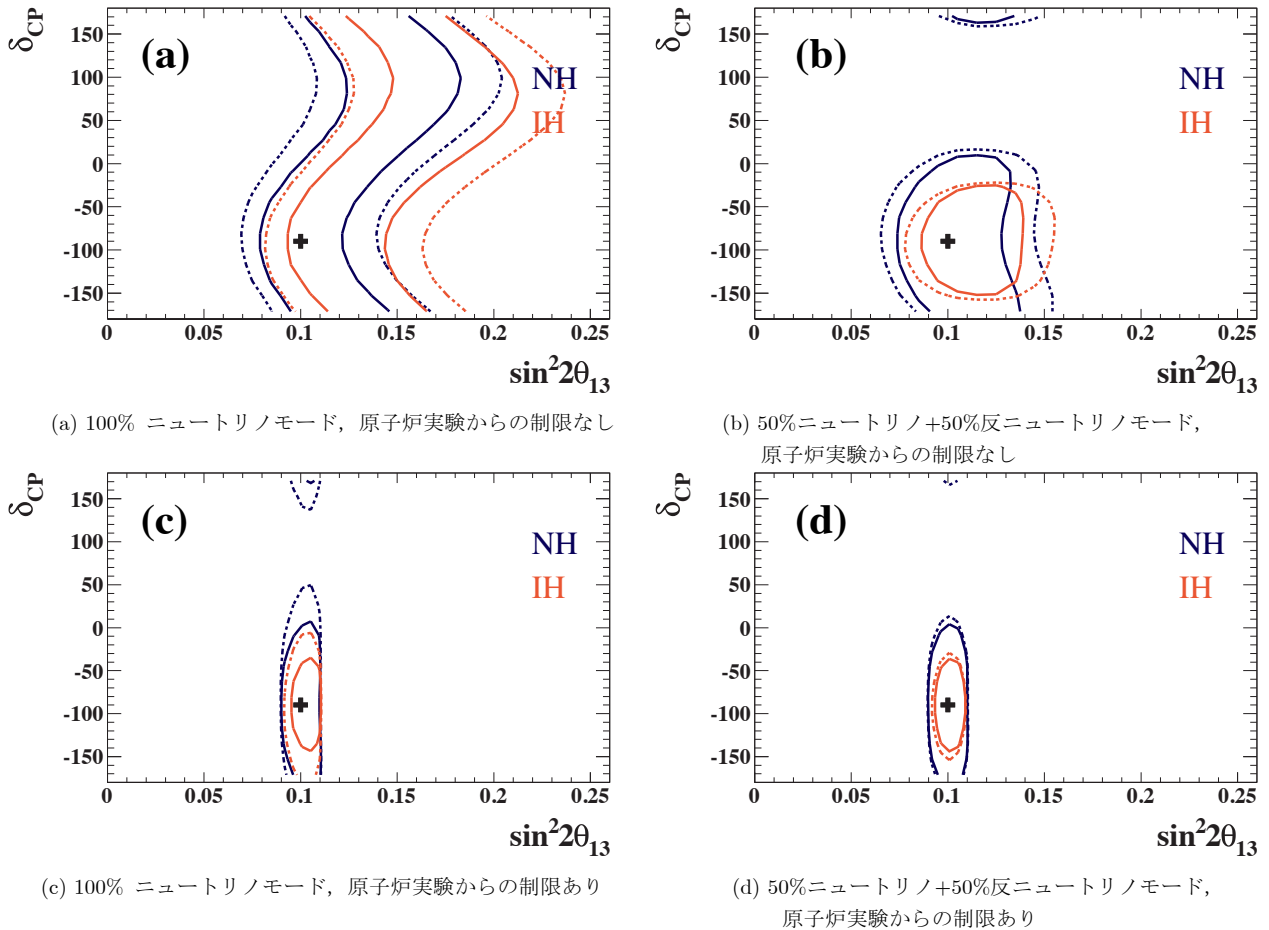


図4 ニュートリノモードのみ(左), ニュートリノモードと反ニュートリノモードが50%ずつの場合(右)で, 原子炉ニュートリノからの制限がある場合(上)とない場合(下)の $\sin^2 2\theta_{13}$ と δ_{CP} に対する90%信頼度許容領域の比較。振動パラメータの真の値は図3と同じ。実線は統計誤差のみ, 点線は系統誤差も考慮にいた場合の許容領域。

反ニュートリノモードを POT で 50%ずつデータ取得した場合に予想される許容領域と, それらを合わせたときの許容領域を示す。ここでは, 真の値として, $\delta_{CP} = -90^\circ$, 質量階層は順階層を仮定した。実際には, 質量階層はあらかじめわかっているわけではないので, それぞれの質量階層 (NH と IH) を仮定した場合について χ^2 を求め最小 χ^2 からの差で二つの許容領域が示されている。図より, ニュートリノモードと反ニュートリノモードを合わせることで, 感度が向上していることが分かる。

図4では100%ニュートリノモードでデータを取得した場合と, 半分は反ニュートリノモードでデータを取得した場合の予想される許容領域を, それぞれ原子炉ニュートリノ実験から得られた θ_{13} に対する制限があるときとないときで比較している。ここで, 原子炉ニュートリノ実験からの制限は, 2012年の DayaBay 実験の系統誤差をもとに $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する不定性が5%であるとした。ここでも反ニュートリノモードを合わせることで感度の向上が顕著であることがわかる。また図4で分かるように, δ_{CP} の真の値が -90° の場合には T2K だけでも縮退解なく δ_{CP} に制限を与

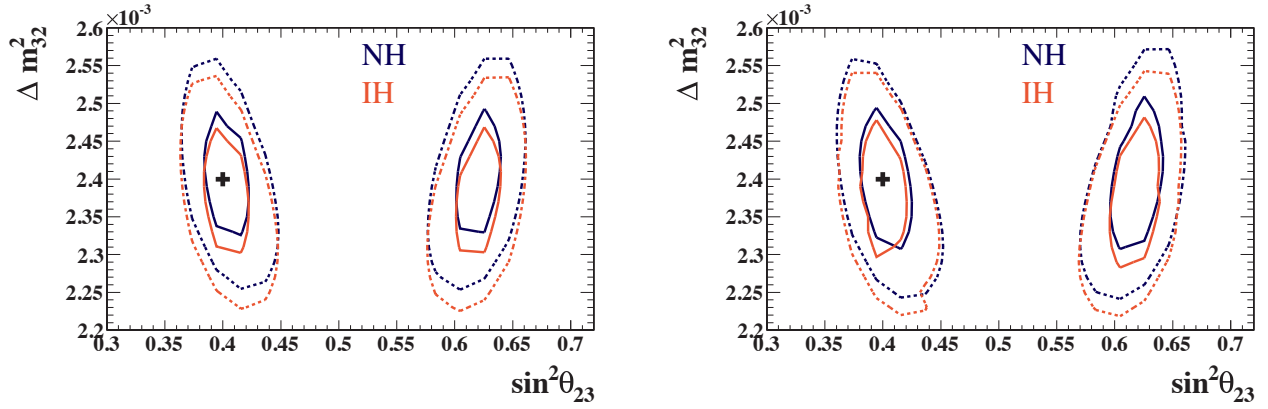
えることができる (最新の T2K の結果は, この兆候を示している)。

図5には, Δm_{32}^2 と $\sin^2 2\theta_{23}$ に対する2次元の許容領域を示す。ここでは現在の下限値付近である $\sin^2 \theta_{23} = 0.4$ を真の値とした。先と同様に, ニュートリノモードと反ニュートリノモードを合わせることで原子炉ニュートリノ実験からの制限により, 感度がよくなっていることがわかる。

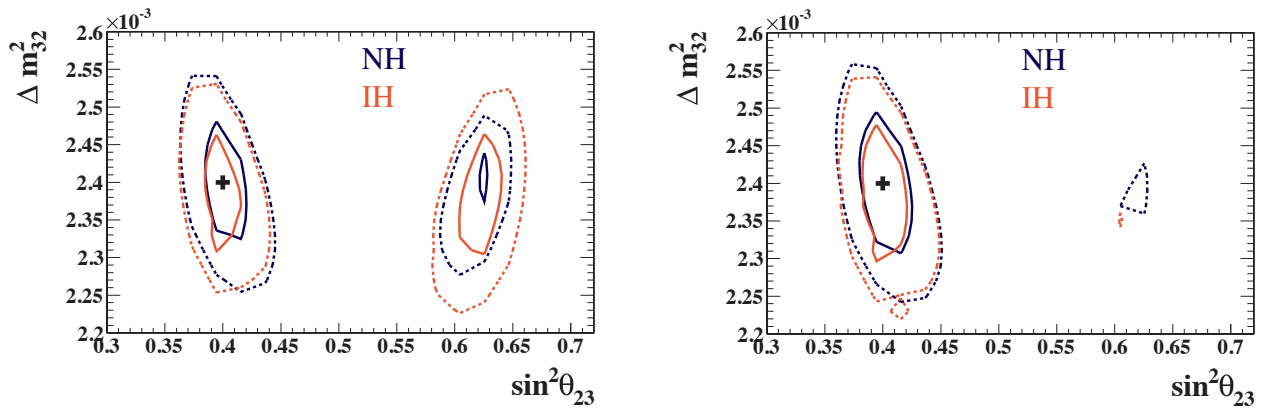
4.3 CPの破れに対する感度

前節では, 例として真の値が $\delta_{CP} = -90^\circ$ や $\sin^2 \theta_{23} = 0.4$ の場合の許容領域を示したが, 感度は振動パラメータの真の値によって異なる。ここでは, 感度が真の値によってどのようになるかを示す。

図6に, $\sin \delta_{CP}$ すなわち CP 非保存項に対する感度を示す。縦軸は, δ_{CP} のそれぞれの真の値に関して, $\sin \delta_{CP} = 0$ を仮定すると χ^2 がどれだけ悪くなるか, すなわちどれだけの有意度で $\sin \delta_{CP} = 0$ を排除し CP が破れていることを検出できるか, を表している。90%信頼度で CP の破れが見つかる可能性がある。また, ここでも反ニュートリノモードを加えることで感度が向上することが確認できる。



(a) 100% ニュートリノモード，原子炉実験からの制限なし (b) 50%ニュートリノ+50%反ニュートリノモード，原子炉実験からの制限なし



(c) 100% ニュートリノモード，原子炉実験からの制限あり (d) 50%ニュートリノ+50%反ニュートリノモード，原子炉実験からの制限あり

図5 $\theta_{23} - \Delta m^2_{32}$ 平面の90%信頼度の許容領域。ここでは真の値が， $\delta_{CP} = 0$ ， $\sin^2 \theta_{23} = 0.4$ ， $\Delta m^2_{32} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ ，質量階層は順階層の場合を示す。実線は統計誤差のみ，点線は系統誤差を考慮にいたした場合の許容領域。

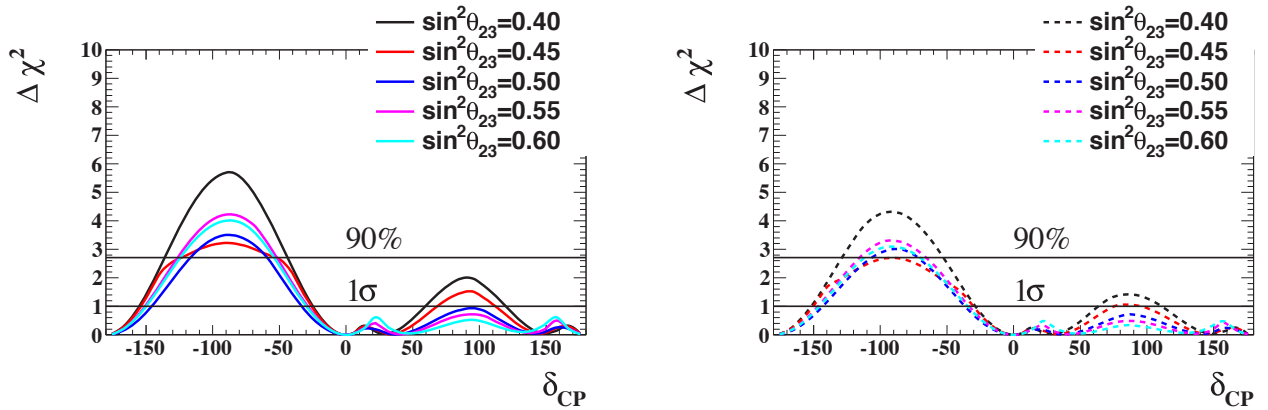


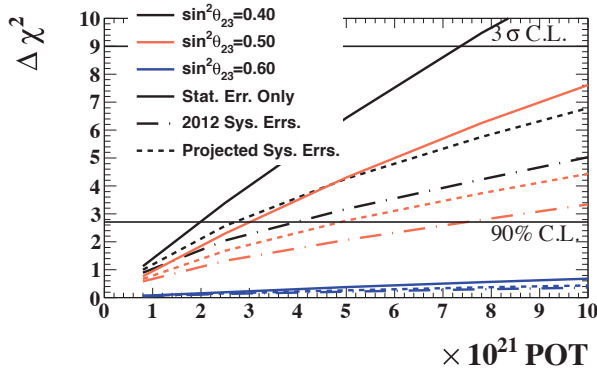
図6 いろいろな δ_{CP} の値に対する， $\sin \delta_{CP} = 0$ を排除できる感度。左は統計誤差のみ，右は2012年のT2Kの系統誤差を考慮した場合。 δ_{CP} ， θ_{23} 以外は標準的な振動パラメータを仮定。真の質量階層は順階層で，それが分かっていないものとして解析している。ニュートリノモード，反ニュートリノモードそれぞれ50%で，原子炉ニュートリノ実験からの制限が入っている。

4.4 測定感度と統計量の関係

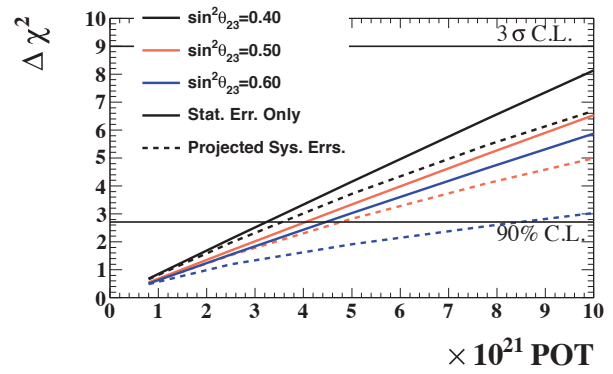
これまで、T2Kの最終的な統計のみを考えていたが、ここでは、 δ_{CP} や θ_{23} の感度を POT の関数にして、感度がどのように向上していくかを示す。系統誤差については、2012年の系統誤差をもとに、今後の改善を考慮して予想さ

れる“未来の系統誤差”の場合についても評価した。未来の系統誤差についての説明は次節を参照されたい。

図7にCPの破れに対する感度をPOTの関数として示す。真の値として $\delta_{CP} = 90^\circ$ ，逆階層を仮定した。これは、CP対称性の破れが最も見えやすい条件に対応する。反ニュー



(a) 100% ニュートリノモード



(b) 50%ニュートリノ+50%反ニュートリノモード

図7 $\delta_{CP} = +90^\circ$ の場合の $\sin \delta_{CP} \neq 0$ 感度 vs. POT。色は θ_{23} の違いを示し、線の種類は考慮した誤差の違いを示す。実線は統計誤差のみ、点線は未来の系統誤差、一点破線は2012年の系統誤差を仮定した場合。

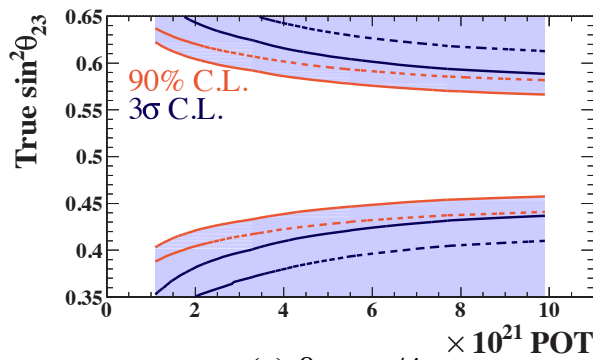
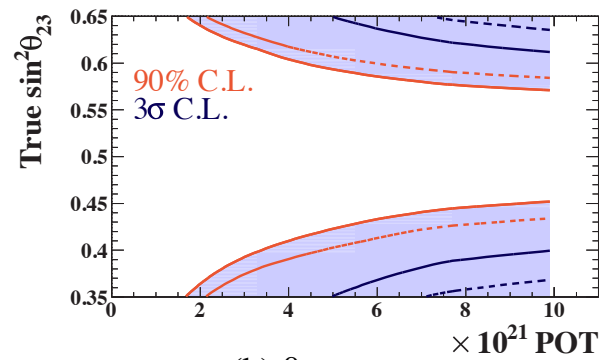
(a) $\theta_{23} \neq \pi/4$ (b) θ_{23} octant

図8 θ_{23} の感度 vs. POT。塗りつぶされた領域が $\theta_{23} \neq \pi/4$ (左)または $\pi/4$ 以上か以下か(右)を決められる領域。線の種類は考慮した誤差の違いを表し、実線は統計誤差のみ、点線は2012年の系統誤差を示す。

トリノモードを取得することで、広い範囲の振動パラメータに対し高い感度が得られることが分かる。図8には、(a) θ_{23} が最大混合かどうか、また(b)最大混合より大きい小さいか、が分かる θ_{23} の領域を POT の関数で示した。

ここで重要なのは、図7, 8で POT に対して、感度が上がり続けているということである。つまり、最終的な統計量であってもなお、系統誤差が支配的ではなく、できるだけ多くの統計量が必要であることがわかる（ということを強調しておかないと、T2Kはもうデータを増やす必要がないのではないかとよく聞かれる）。

4.5 系統誤差削減による感度の向上

系統誤差の影響について、いくつかの場合についてケーススタディを行った。ここでは、その一つ一つを紹介することはせず、大まかな区分ごとでまとめることにする。表4に示した通り、2012年の ν_e 出現サンプルの事象数に対する系統誤差は9.7%で、 ν_μ 消滅サンプルの事象数に対する系統誤差は13%であったが、2013年の解析[2][4]では、それぞれ8.8%, 8.1%に改善した。将来、 δ_{CP} に対する最大限の感度を達成するために、これらの数字をさらに

- ニュートリノモード出現サンプルに対して5~8%
- 反ニュートリノモード出現サンプルに対して~10%

まで削減するのが目標である。 δ_{CP} については消失事象に対する系統誤差の影響はあまり大きくないが、少なくとも、反 ν_μ 消失サンプルに対する系統誤差を現在の ν_μ 消失サンプル程度に抑えられなければならない。 θ_{23} , Δm_{23}^2 の感度には、消失サンプルの系統誤差の影響が大きいので、目標を5%くらいに設定するのが妥当であろう。ちなみに、前節で示した精度・感度の予想で使用した“未来の系統誤差”は、控えめな見積りで、

- ニュートリノモード出現・消失サンプル ~7%
 - 反ニュートリノモード出現・消失サンプル ~14%
- としている。

5 NOvA 実験との関係

米国では、フェルミ国立研究所で生成したミューオンニュートリノを810km離れたミネソタ州で観測するNOvA実験が始まった。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動確率は、物質効果により質量階層が順階層の場合には増え、逆階層の場合には減る(反ニュートリノの場合はその逆)。T2Kではこの増減の大きさは10%程度である。これに対して、NOvAでは基線長が長く、高いエネルギーのニュートリノを用いているため、物質効果の影響が30%近くにもなる。そのためNOvA実験

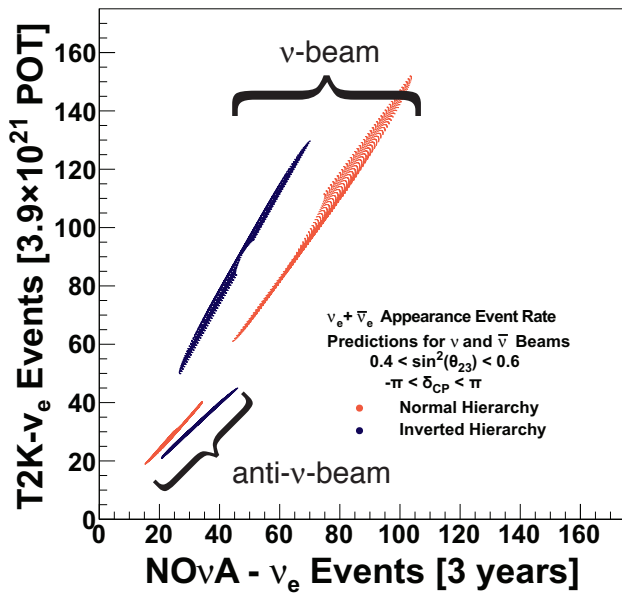


図 9 振動パラメータや質量階層をさまざま値で仮定した時の、T2K と NOvA で予想される電子ニュートリノ出現の事象数。ニュートリノモードと反ニュートリノモードを半分ずつと仮定。

は、質量階層の決定については、T2K よりも高い感度を持っている。ところが、T2K にせよ、NOvA にせよ、単独では δ_{CP} の効果と物質効果の区別がつかない(質量階層がわからないため) 場合がある。しかし、二つの実験で測定される振動確率を比較することで、この縮退が解ける可能性が高くなる。図 9 は、さまざまな振動パラメータに対して T2K と NOvA の ν_e 事象数がどうなるかを示したものである。二つの実験を比べることで質量階層による縮退が解けることがわかる。

そこで、T2K 自体および NOvA 実験の報告している事象数頻度と感度[7][8][9]を再現するように調整した振動解析コード GloBES[10]を用いて、二つの実験の結果を組み合わせた場合に期待される感度を評価した。図 10 に、いろいろな δ_{CP} の値に対して、CP の破れ($\sin \delta_{CP} \neq 0$)、および質量階層性の区別の感度を T2K, NOvA それぞれ単独の場合と、二つの実験の結果を組み合わせた場合について示す。図 10 において、質量階層性区別の感度としては、二つの階層性を仮定して計算した χ^2 の差を示している。図 11 には、90%

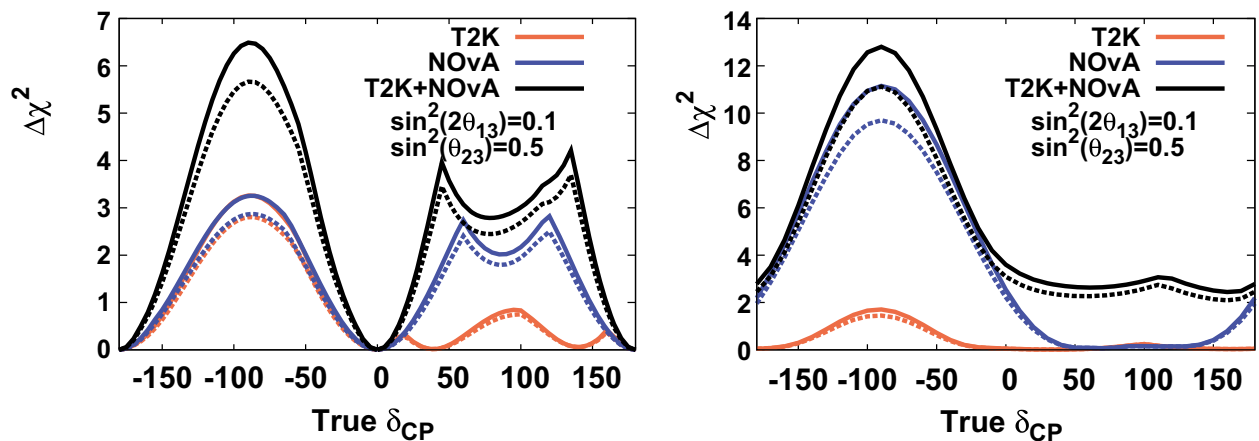


図 10 いろいろな δ_{CP} における、 $\sin \delta_{CP} \neq 0$ (左)と質量階層性(右)に対する感度(感度の定義についてはそれぞれ 4.3, 5 章を参照)。ここでは、T2K, NOvA の両方で、最終的な POT に対し、50%がニュートリノモード、50%反ニュートリノモードの場合を想定。また、真の質量階層は順階層を仮定。実線は統計誤差のみ、点線は系統誤差も考慮している。

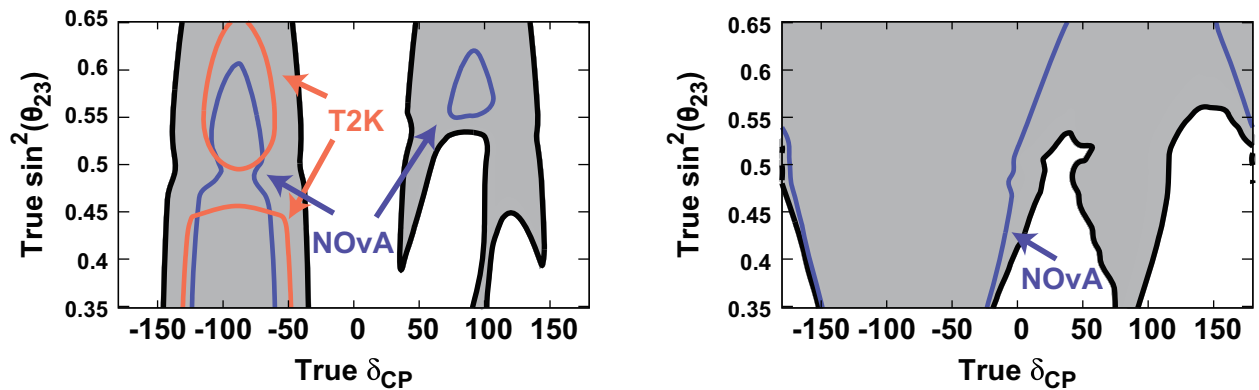


図 11 いろいろな δ_{CP} と θ_{23} における、 $\sin \delta_{CP} \neq 0$ (右)と質量階層性(左)を 90%信頼度で区別できる領域(線の内側)。灰色の領域は T2K と NOvA を組み合わせた場合の領域を示す。ここでは、T2K, NOvA の両方で、最終的な POT に対し、50%がニュートリノモード、50%反ニュートリノモードの場合を想定している。真の質量階層は順階層を仮定。

信頼度で CP の破れないし質量階層性の区別ができると期待される $\sin^2 2\theta_{23}$ と δ_{CP} の領域を示している。このように、基線長の異なる二つの実験を組み合わせることで、広い領域で、かつより高い感度で CP の破れの探索および質量階層性の区別ができる。同じような感度の実験が同時期に二つ走るとは、無駄ではないのである！ T2K 実験と NOvA 実験は、今後、健全に競争しつつも、協力して δ_{CP} の測定と質量階層性の区別という目標を目指していくと期待される。

6 まとめ

T2K が ν_e 出現の観測という最初の目標を達成した今、新たな目標をきちんと見据えて、それに向かって突き進むべく、今回ここで報告したような将来感度のまとめを行った。現在承認されている統計量 (7.8×10^{21}) のデータを収集したときに予想される感度は以下の通りである。

- ・CP の破れ (図 6, 7) : 順階層 (逆階層) の場合 -90° ($+90^\circ$) で感度が良くなり、 $\sin^2 \theta_{23}$ の値によっては 2σ 以上の有意性で $\sin \delta_{CP} = 0$ (CP を保存するケース) との区別ができる。
- ・ θ_{23} の精密測定 (図 8) : $\sin^2 \theta_{23}$ が 0.45-0.57 の外側であれば、90%信頼度で、 θ_{23} が $\pi/4$ より大きい小さいか区別ができる。

また、NOvA との組み合わせにより、CP の破れ (図 10, 11 左)、質量階層性の区別 (図 10, 11 右) の両方で、感度が向上することを示すことができた。

上記測定のためには、系統誤差を

- ・ニュートリノモード出現サンプルに対して 5~8%
- ・反ニュートリノモード出現サンプルに対して ~10%
- ・消失サンプル(ニュートリノモード, 反ニュートリノモードの両方で) 5%

とするのが目標である。

最後に

ともすれば、T2K では δ_{CP} の測定は無理と思われがちだが、この報告で可能性が 0 ではないことは示せた。ただし運がよくて 2σ そこそである。しかしながら、たとえ 2σ であっても、T2K による δ_{CP} 測定がさらに将来の“CP 発見”につながる極めて重要なものであることは間違いない。ある意味、最も面白い時期であるともいえる。質量階層性についても NOvA の測定と組み合わせることで、かなりの確率で、90%信頼度で答えを出すことが可能である。質量階層性は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索にとって、非常に重要な問題であり、ニュートリノがマヨラナ粒子かどうかを知るためにもできるだけ早く解決すべき問題である。

我々 T2K が今回掲げた新しい目標を達成するには、ビーム強度の増強、系統誤差の削減等々、いうまでもなく今以上の努力が必要である。 ν_e 出現観測に喜んだのはもう昔。

新しい勝負はすでに始まっていて、少しも気が抜けない状況である。「運がよくて」と書いたが、有名な言葉で、運は準備の行き届いた実験にのみ舞い降りるといふものがある。また、運の様子は T2K だけでなく NOvA にも微笑むかもしれない。勝って兜の緒を締めろ T2K。

外向けに書きはじめたつもりだったのに、自分を鼓舞する形で終わってしまいました。それはいいとして、とにかくそういうつもりでまだまだ頑張っていくので、今後とも T2K をよろしくお願いします。また、課題はまだまだたくさんあるので、新しい (特に若い) 共同研究者の参加を歓迎します。一緒に CP の破れの一番面白い時期を楽しみましょう。

参考文献

- [1] J. Beringer et al., (Particle Data Group), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012) 2013 partial update.
- [2] K. Abe et al., (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **112**, 061802 (2014).
- [3] K. Abe et al., (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. **A659**, 106 (2011).
- [4] 亀田純, 南野彰宏, 「T2K 実験 ν_μ 消失モードの最新解析結果」, 高エネルギーニューズ **32-4** (2014).
- [5] K. Abe et al., (T2K Collaboration), Phys. Rev. **D88** 032002 (2013).
- [6] K. Abe et al., (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. **111**, 211803 (2012).
- [7] http://www-nova.fnal.gov/plots_and_figures/plot_and_figures.html
- [8] <http://nova-docdb.fnal.gov/cgi-bin/ShowDocument?docid=7546>
- [9] <http://nova-docdb.fnal.gov/cgi-bin/ShowDocument?docid=7552>
- [10] <http://www.mpi-hd.mpg.de/personalhomes/globes/>