

■ 研究紹介

T2K 実験 2016 年夏のハイライト

京都大学高エネルギー物理学研究室

市川 温子

ichikawa@scphys.kyoto-u.ac.jp

ロチェスター大学

岩本 康之介

kiwamoto@pas.rochester.edu

KEK 素粒子原子核研究所

坂下 健

kensh@post.kek.jp

2016 年(平成 28 年)11 月 14 日

1 イントロダクション

T2K(東海-神岡間長基線ニュートリノ振動実験)では、茨城県東海村にある J-PARC 大強度陽子加速器を用いてミュニュートリノを大量に生成し、295km 先の岐阜県飛騨市神岡にあるスーパーカミオカンデに向けて飛ばし、飛行中に起こるニュートリノ振動について研究している。これまでの高エネルギーニュースでもいくつか機会を頂き、T2K 実験の研究について紹介してきた[1, 2, 3, 4, 5]。

T2K 実験では、2013 年までにミュニュートリノから電子ニュートリノが出現することを確立し[6]、2014 年から今年(2016 年)の夏まで反ニュートリノビームを生成して実験を進めてきた。ニュートリノと反ニュートリノで(反)電子ニュートリノの出現確率が異なれば、クオークにおける小林益川モデル以外で初めて CP 対称性の破れが見つかったことになる。三世代間の振動の枠組では、CP の破れを通常 CP 位相 δ_{CP} で導入するが、この値によっては最大 27% の非対称があることがわかつている。反ニュートリノビームで蓄積した積分陽子数(Protons-On-Target, POT)は、2010 年から 2013 年のニュートリノビームデータとほぼ同等の 7.5×10^{20} 個となった。途中で大震災による運転停止期間等があったとはいえ、約 2 年間でこれだけのデータ量が蓄積できたのは、ビーム強度が上がっているためである。本記事では、2016 年前半の運転よもやま話、夏のリリースハイライト、そして T2K phase II に向けた展望を紹介する。

2 運転よもやま話

図 1 に T2K 実験が物理データを取り始めた 2010 年 1 月から 2016 年 5 月までのビーム強度と積分陽子数のプロットを示す。

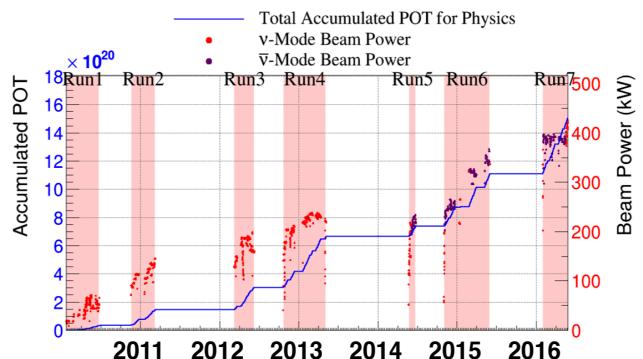


図 1: T2K 実験のこれまでのビーム強度と積分陽子数。

2015 年 5 月までの運転の終盤に、ニュートリノ生成標的を冷却するヘリウム配管から微量ながらもヘリウムのリークが観測された。曲げた配管の残留応力がビーム運動による温度上昇で解放され、セラミック接合部が損傷されたと推察された。標的を共同開発した RAL グループが急遽、デザインを変更した配管を製作し、TRIUMF のリモートメンテナンスの専門家の協力のもとマニピュレータ等を用いて損傷した配管を交換した(図 2)。できる限り早期の運転再開を目指した関係者の懸命の努力で 2016 年 1 月からの運転再開にこぎつけた。

加速器ビーム強度 300kW~350kW で運転が再開されたが、メインリング(MR)偏頭電磁石の 1 台で層間短絡が生じて急遽、地上にある同仕様の磁石と入れ替えたり

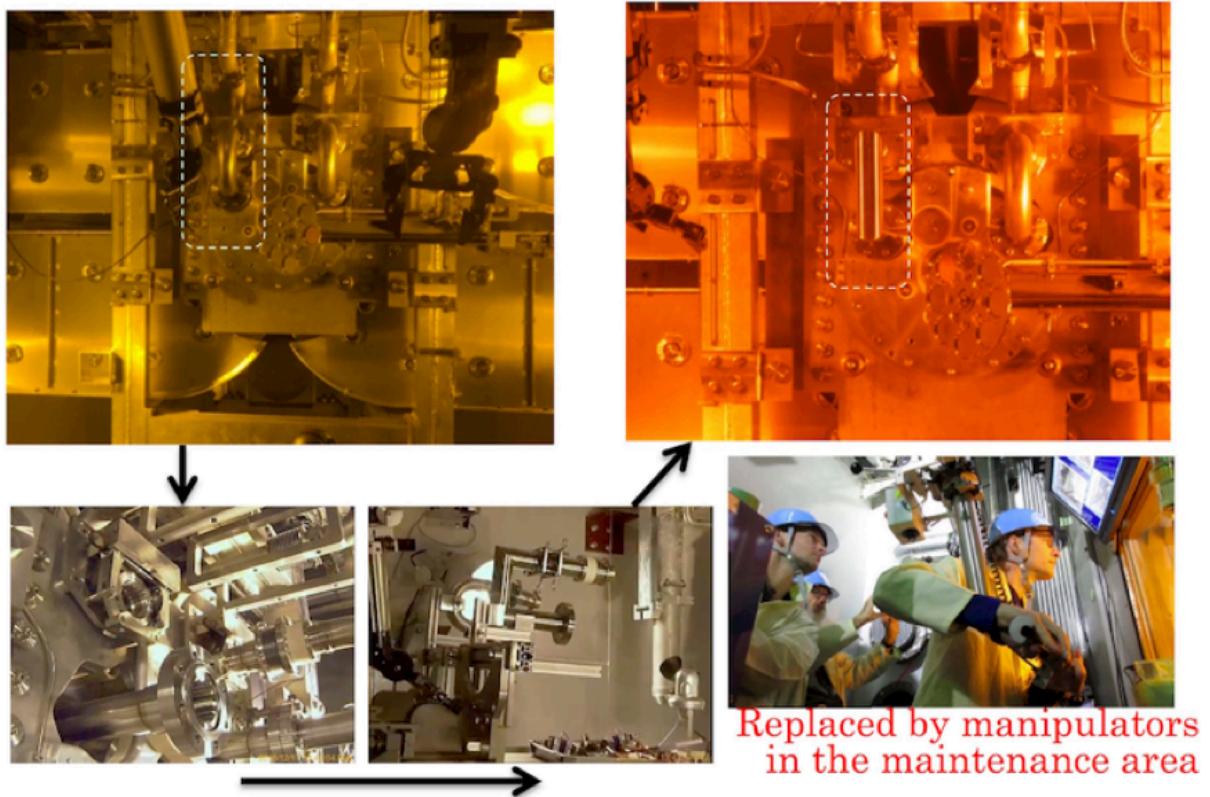


図 2: 標的冷却ヘリウム配管を交換するときの様子。

(35トンの磁石の入れ替え作業!), MR 電磁石電源のトランスに小動物が侵入して 1 次側が短絡したり、ニュートリノでは地下の高放射線環境に設置したネットワーク機器の暴走で制御ネットワークがダウンしてビーム運転できなくなったり、といろいろあった。しかし最終的にはビームパワー 425kW での運転が達成できた。このビームパワー増強は、加速器の方々の多大なる努力の結果である。

現在、J-PARC MR のビーム強度を制限しているのはビームロスである。MR のコリメーターの許容ロス容量や機器メンテナンスを考えたときの残留放射線上限から、許容できるビームロス量が決まる。そのためビーム強度を上げるために、ビームロスを十分小さく減らす調整が必要となる。今後の MR ビーム強度増強にむけてビームロスが生じている原因をひとつずつ理解することも重要であり、加速器グループでは MR 加速器のモデル構築とそのモデルシミュレーションにもとづいたビームスタディが行われている。今回の運転期間でも、そのような方法でビームロスの原因理解と低減を実現した。この取り組みについては、加速器グループと実験グループの間で何度も議論の機会を持って、わかりやすく説明していただいた。ロスの原因についての考察とシミュレーションスタディから考えられるその対策について説明を聞いたあとに加速器の方々のビームスタディを見ていると、(スタディの専門的なところまで理解できていない

が) MR 加速器の理解が深まっていく様子が分かり、楽しい経験であった。

今後も T2K 実験にとってビーム強度増強は運転時間とともに重要である。現在のビーム強度 425kW は、繰り返しあたりの陽子数では 2.2×10^{14} になる。これは陽子シンクロトロンでは世界最高値である。J-PARC MR では、2018 年度に加速器繰り返し時間を現在の 2.48 秒から 1.3 秒に、またその先には 1.1 秒まで短くする計画で、それに対応した新しい電磁石電源を現在試験中である。1.3 秒繰り返しになれば、現在の陽子数で既に MR ビーム強度の初期設計値である 750kW 以上になっているが、今後も繰り返しあたりの陽子数をビームロスを低減しながら徐々に増やしていく。現在の計画では 3.2×10^{14} まで陽子数を増やして、2025 年ごろまでに 1.3 MW のビーム強度を目指す。

3 反ニュートリノデータを加えた最新結果

ここでは、2016 年夏までに取得した 7.48×10^{20} POT のニュートリノと 7.47×10^{20} POT の反ニュートリノの全データを用いた解析の説明をする。

振動解析は、スーパーカミオカンデ (SK) で予測されるニュートリノ事象数と、それらのエネルギースペクトルや運動量・散乱角分布を、実際に SK で観測されたニュー

トリノ事象のものと比較することによって行われる。予測には不定性を考慮しなければいけないのだが、外部実験データをもとに構築されたニュートリノフラックスの予測、ニュートリノ原子核反応モデルに、前置検出器の測定結果を反映させることで、より正確にSKでのニュートリノの事象を予測している。前置ニュートリノ検出器の測定及びSKでのニュートリノ事象選択の詳細は過去の記事 [4] を参照していただきたい。

SKでの観測事象のうち消失現象を測定する ν_μ サンプルは混合角の関数 $\sin^2 2\theta_{23}$ と質量固有値二乗差 Δm_{32}^2 に感度がある。 ν_e サンプルは出現現象でありその出現確率は $\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$ の他に $\sin^2 2\theta_{13}$ の関数となる。それだけではなく、さらに三世代の振動の干渉項として $\sin \delta_{CP}$ に比例する項が加わり、ニュートリノと反ニュートリノで出現確率に違いが出る。

これまでの解析では、ニュートリノビームで得られたデータから ν_μ 事象、 ν_e 事象を選択し、同時にフィットすることで振動パラメータを決定してきた。今回の解析では、さらに反ニュートリノビームのデータも加えて同時にフィットを行った。表1は反ニュートリノビームでの選択現象に対する系統誤差をまとめたものである。ニュートリノビームでの誤差も、大まかには同じような大きさである。

誤差要因	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$
	$\delta N/N$	$\delta N/N$
ニュートリノフラックス × 断面積 (前置での測定後)	3.22%	3.26%
断面積 (前置で測定できないもの)	4.32%	4.13%
SK 検出器および 終状態粒子のハドロン反応	3.95%	3.90%
全体	6.19%	5.22%

表1: 反ニュートリノビームでの事象数予測に対する系統誤差。

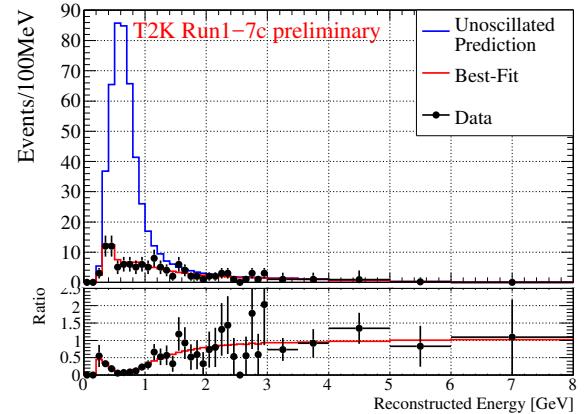
	$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu$
$\delta_{CP} = -\frac{\pi}{2}$	28.7	135.8	6.0	64.2
$\delta_{CP} = 0$	24.2	135.5	6.9	64.1
$\delta_{CP} = +\frac{\pi}{2}$	19.6	135.7	7.7	64.2
$\delta_{CP} = \pi$	24.1	136.0	6.8	64.4
観測数	32	135	4	66

表2: ニュートリノビームと反ニュートリノビームで期待される事象数と実際に観測された事象数をまとめたもの。

3.1 標準的な振動解析結果

ニュートリノのCP位相(δ_{CP})として4つの異なる値を仮定した場合にSKで期待される事象数と、実際に観測された事象数をまとめたものが表2である。期待される事象数はいずれも順階層の質量順序¹を仮定した場合のものである。 7.48×10^{20} POTのニュートリノビームのデータに対し、SKで実際に観測された ν_μ 事象数は135、 ν_e 事象数は32で、 7.47×10^{20} POTの反ニュートリノビームのデータに対し、SKで実際に観測された $\bar{\nu}_\mu$ 消失事象数は66、 $\bar{\nu}_e$ 出現事象数は4であった。それぞれの観測結果を、振動がない場合および振動の最尤推定点でのエネルギーの分布と比較したものが図3、4である。

主には $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ 消失現象で決まる $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 に対するT2Kの解析結果を、他の実験の結果と比較したのが図5である。T2Kの最尤推定点は $\sin^2 \theta_{23} = 0.532$ 、



(a) ニュートリノビームの結果

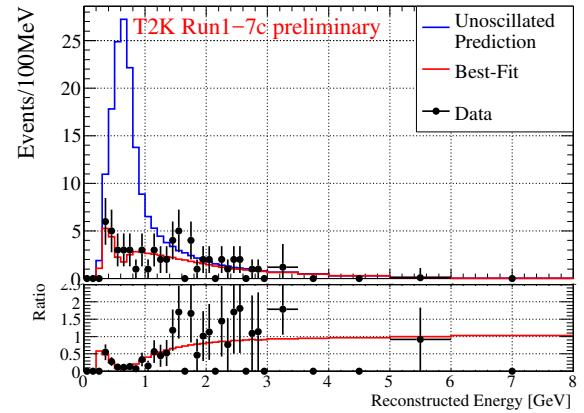
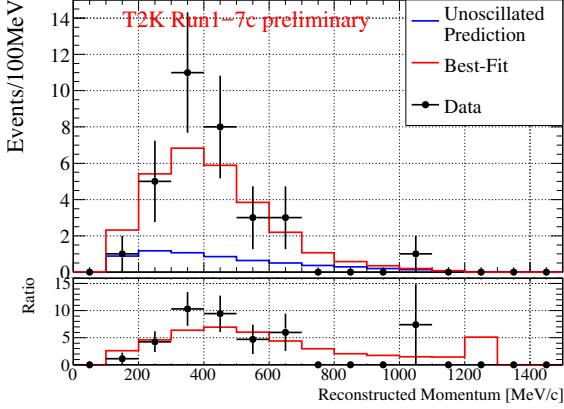
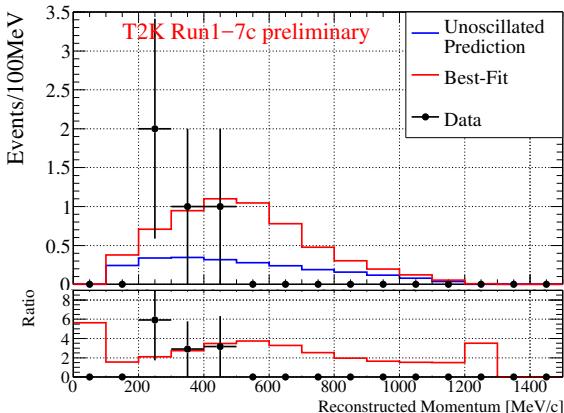


図3: SKで観測された $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ 消失事象(誤差棒つきの点)のエネルギー分布。ニュートリノ振動がない場合と振動の最尤推定点での予測が重ねられている。下の図はニュートリノ振動がない場合との比。

¹ニュートリノの3つの質量固有値が $m_1 < m_2 < m_3$ の場合を順階層、 $m_3 < m_1 < m_2$ の場合を逆階層と呼ぶ。どちらかはまだわかっていない。質量順序によって地中を飛行する間に物質から感じるポテンシャルが異なるため振動確率が影響を受ける。



(a) ニュートリノビームの結果



(b) 反ニュートリノビームの結果

図 4: SK で観測された $\nu_e/\bar{\nu}_e$ 出現事象（誤差棒つきの点）のエネルギー分布。、ニュートリノ振動がない場合とおよび振動の最尤推定点での予測が重ねられている。下の図はニュートリノ振動がない場合との比。

$\Delta m_{32}^2 = 2.545 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/\text{c}^4$ であった。図 5 には SK 大気ニュートリノ測定 [7], MINOS+実験 [8], NO ν A 実験 [9], IceCube 大気ニュートリノ測定 [10] の信頼領域も示した。いずれも 90% 信頼度で無矛盾であるが、NO ν A の最尤推定点は最大混合 45° からずれていて興味深い。今後数年、T2K と NO ν A で精度を上げていった時にどうなるのか楽しみである。

CP 位相の解析結果も見てみよう。 $\sin^2 \theta_{13}$ と δ_{CP} に対する信頼領域と最尤推定点を示したものが図 6 である。質量順序について、順階層と逆階層をそれぞれ仮定して解析を行い算出した信頼領域と最尤推定点が示してある。ニュートリノの測定だけでは、 δ_{CP} を一意的に決めることはできないが、反ニュートリノの測定を加えたことで δ_{CP} の値が緩いながらも制限されている。原子炉実験からの $\sin^2 \theta_{13}$ に対する制限 (0.085 ± 0.005 [11]) が影がつけられた領域で示されている。T2K の解析結果は原子炉実験のそれとの一貫性が見られる。

図 6 を見ても分かるように、原子炉実験による θ_{13} の測定精度が非常に高い。そのため、原子炉実験による

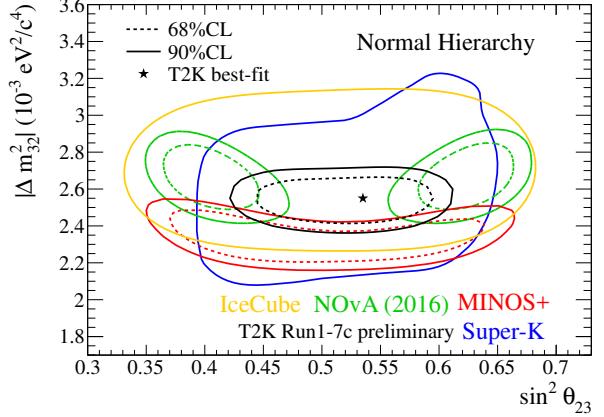


図 5: $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 に対する信頼領域と最尤推定点（黒線・点）。比較のために SK 大気ニュートリノ、MINOS+実験、NO ν A 実験、IceCube 実験の結果も示す。

値を用いて、 δ_{CP} にさらに制限をかけることができる。正確には、CP 位相の項は三世代振動の干渉項として現れるので、太陽ニュートリノおよび原子炉ニュートリノ（カムランド）測定で決められた $\theta_{12}, \Delta m_{21}^2$ 、短距離原子炉ニュートリノの測定で決められた θ_{13} 、そして T2K の ν_μ 消失で主に決まる $\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$ のすべての情報を使って、 ν_e 出現を解析することで、残る δ_{CP} に制限がかかる。そうして得られた δ_{CP} の解析結果が図 7 である。図 7 には 90% の信頼度の領域に相当する $\Delta\chi^2$ の値が示されており、その領域は質量順序が順階層と逆階層の場合それぞれ $[-179^\circ, -22^\circ], [-120^\circ, -42^\circ]$ であった。つまりこの結果は、CP 対称性の破れを 90% の信頼度で示唆している。

今回の、 $\nu_e/\bar{\nu}_e$ 出現がニュートリノで多めに、反ニュートリノで少なめにでているという結果は質量順序について順階層を好んでいることを示しているが、事後確率としては順階層が 75%，逆階層が 25% という結果であった。

3.2 ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ 消失現象の解析

反ニュートリノモードの統計的向上に伴い、 ν_μ と $\bar{\nu}_\mu$ 消失現象の独立解析を更新した。 $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 をニュートリノビームと反ニュートリノビームで独立に扱い消失現象の解析結果を比較する。CPT 定理により消失事象はニュートリノと反ニュートリノで厳密に同じでなければならず、違いが見つかれば CPT の破れないし、地中の物質との標準理論を超えた相互作用があることを示す。

図 8 はニュートリノビームおよび反ニュートリノビームそれぞれのデータで求めた $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 に対する信頼領域と最尤推定点を示す。SK 大気ニュートリノ測定 [13] と MINOS 実験 [14] の反ニュートリノに対する信

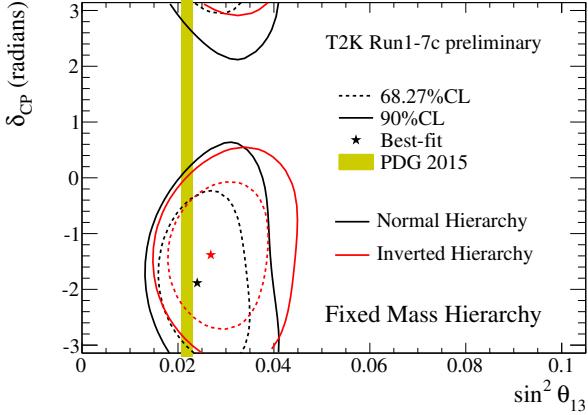


図 6: $\sin^2 \theta_{13}$ と δ_{CP} に対する信頼領域（線）と最尤推定点（点）。質量順序の順階層（黒）と逆階層（赤）のそれぞれの場合について表示している。原子炉実験からの $\sin^2 \theta_{13}$ に対する制限 (0.085 ± 0.005 [11]) が影がつけられた領域で示されている。

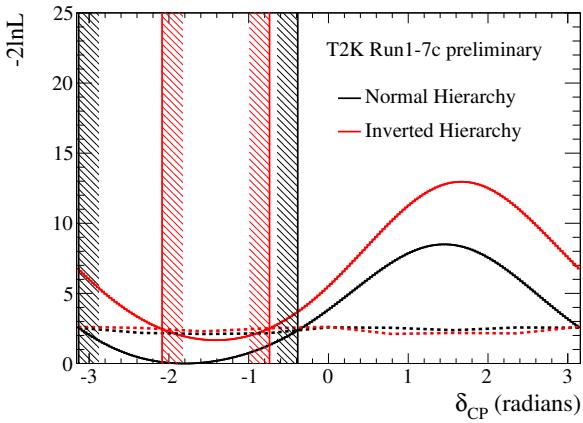


図 7: 太陽ニュートリノおよび原子炉ニュートリノの測定結果も用いて T2K 実験で得られた δ_{CP} の $\Delta\chi^2$ 分布。順階層（黒）と逆階層（赤）の質量順序それぞれを仮定した結果を載せている。Feldman-Cousins の方法 [12] を用いて得られた δ_{CP} の 90% 信頼領域（垂直線内の領域）を示す。

頼領域も示してある。前回の解析結果 [1] と同様、ニュートリノと反ニュートリノで振動パラメータの有意な違いは観測されなかった。

4 CP 対称性の破れの 3σ 発見を目指して

長基線加速器ニュートリノ振動実験によって、レプトン・セクターの CP の破れを測定する可能性が真面目に議論され始めたのは 1999 年頃である。その時点では、この記事の著者は全員学生（小学生を含む）であった。当

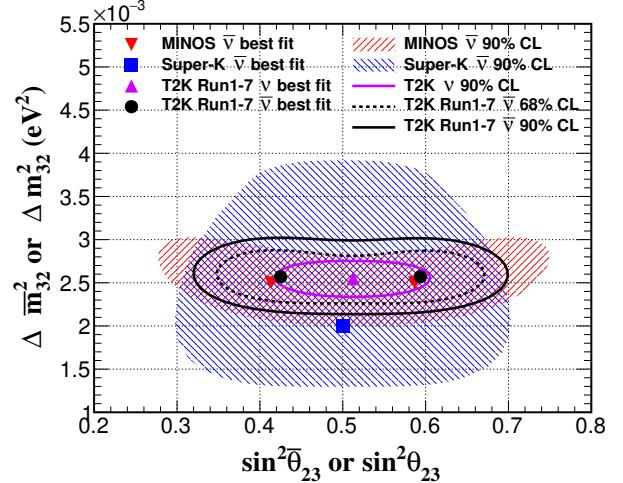


図 8: $\sin^2 \theta_{23}/\sin^2 \bar{\theta}_{23}$ と $\Delta m_3^2/\Delta \bar{m}_3^2$ に対する信頼領域と最尤推定点（紫/黒 線・点）。比較のために SK 大気ニュートリノ、MINOS 実験の反ニュートリノに対する結果も示す。

時、T2K 実験初代実験代表者の西川公一郎氏から“電子ニュートリノの出現を捉えることができたら、ハイパーカミオカンデを作つて CP の破れを測ろう！”と言われたことを著者の一人は覚えている。当時の予想では、CP の破れを “discover” するにはハイパーカミオカンデが必須と考えられていた。これは今でも正しいが、もしかすると、その前に、 “evidence” が見える可能性が出てきた、というものが最近の T2K 実験の示す所である。

ここまでセクションにあるように、CP 位相、質量の順序ともに、自然是 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ を好み、 $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ を抑制しているように見える。まだまだ統計が足りずぬか喜びの可能性はあるが、もしその通りに CP 対称性が最大に破れていて、T2K 実験を数年延長することで CP 対称性の破れの “evidence” が見えるのであれば、見ない手があろうか、いやあるまい。次世代長基線加速器ニュートリノ振動実験であるハイパーカミオカンデ計画や米国の DUNE 計画が走り始めるのは、早くても 2026 年頃である。T2K 実験をその頃までに延長して、“evidence=3 σ での発見” に手を届かせるためにはどうすればいいであろうか、というような議論が 2015 年にグループ内で始まった。日本のニュートリノ振動実験の戦略としても、ハイパーカミオカンデが稼働する頃に速やかに J-PARC 加速器を大強度化するには、空白期間を設けずに加速器を運転、向上しつづけることが重要である。

4.1 何が必要か？

CP が最大限に破れていて ($\delta_{\text{CP}} = -\pi/2$) 質量順序が順階層という幸運な場合に、CP の破れを 3σ で測定す

るには、単に T2K 実験をハイパーカミオカンデが完成する 2026 年まで延長すればよい、というものではなく、かなり野心的な“向上”が必要なことがすぐにわかった。そこで、T2K phase II として、我々が提案するのは、以下の通り [15]。

- 現状 425 kW の J-PARC MR 強度を段階的に 1.3 MW まで増強する！
- 電磁ホーンの電流を現在の 250 kA から 320 kA! に増強してニュートリノの収量を 10% 増やす。
- スーパーカミオカンデの事象選択のアルゴリズムを改良し、使える事象数を 40% 増やす！
- 系統誤差を現在の 2/3 に削減する！(6%程度を 4%程度に減らす)

どれも、やれるならさっさとやってるでしょ、今やれていないのはできないからでしょう、と突っ込まれそうな項目である。が、これらは現在の制限が何で決まっているのかを綿密に吟味して立てた目標である。

加速器の強度に関しては、加速器グループと実験グループで議論を重ね、加速器グループから『これならば努力目標として一緒にがんばります』という線で作られたシナリオが図 9 である。現在進んでいる主電源や RF 空洞の更新、ビームロスの低減を見込んでいる。

J-PARC MR Expected Performance

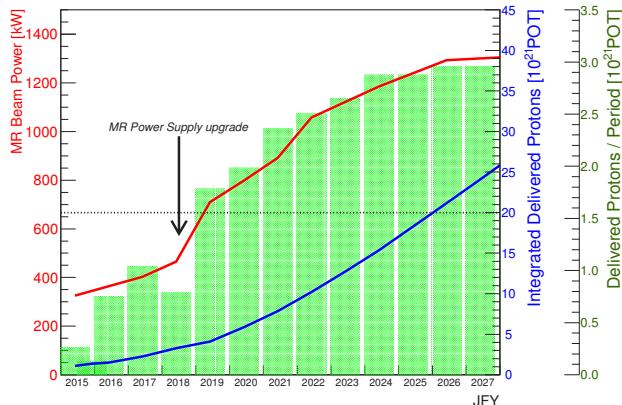


図 9: 想定している J-PARC MR のビーム強度とデータ取得のシナリオ。積算取得データ量を POT(標的に入射する陽子の数) で表している。

ニュートリノビームラインでは、ビームパワーの増強に対応するため、データ収集系やモニターのアップグレード、冷却能力の増強などに加えて、電磁ホーンの電流を 250 kA から 320 kA に増やすことを検討している。そのために主には電源周りを増強する。ローレンツ力によって電磁ホーンにかかるストレスは電流の 2 乗に比例するため装置が耐えられるかどうかを見極めながらあげることになる。ニュートリノの収量の増加は 10% 程度

はあるが、wrong sign 背景事象(反ニュートリノビームに混じっているニュートリノ)の混入を低減できる。

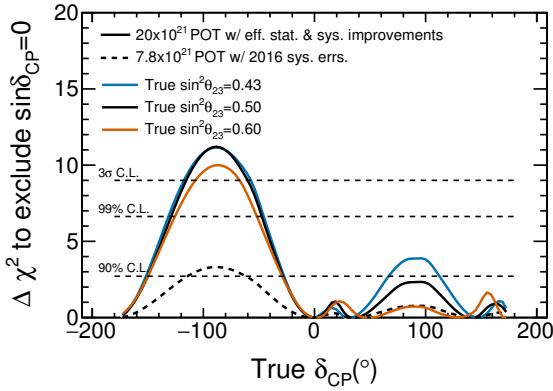
現在の SK の事象選択では、事象再構成の精度を保つために反応点の位置が PMT 壁から 2 メートル以上としている。これで、PMT 内側の体積のうち 31% が標的質量から除外されてしまう。壁近くで反応した場合でも、出てくる粒子が壁から遠ざかる方向であれば、再構成の質はそれほど落ちないだろうと期待されるため、反応点の位置のカットをリングの方向によって変えることが検討されている。また、再構成されたチェレンコフリングが 1 個であることを要求しているし、電子ニュートリノ事象選択ではさらに、遅れてでてくるミューオン崩壊からの電子の検出数を 0 個としている。この場合、電子ニュートリノ事象だとしても荷電カレント反応で π 粒子を出すような事象が除外される。事象の再構成アルゴリズムを改良することで、このような事象も、背景事象から区別して選び出せれば、検出効率を最大 35% 向上することができる。合計で 40% の統計増を見越しているが、これらが可能かどうかは、これから解析の腕の見せ所である。

系統誤差に関しては、現状、SK の検出効率の系統誤差、 π 粒子のハドロニックな反応の不定性、前置で測定後も残るニュートリノフラックスとニュートリノ反応の不定性、前置で測定できていないニュートリノ反応の不定性が、ほぼ同じくらいの割合で寄与していて、多面的に攻めていく必要がある。ニュートリノフラックスや π のハドロニックな反応については、外部データを使って(あるいは必要があれば外部データを新たに取る!) 低減を目指す。SK や前置での測定についても、キャリブレーション法を改良するなどして不定性を減らす。さらに前置検出器を大々的にアップグレードしよう、という議論も始まっている。

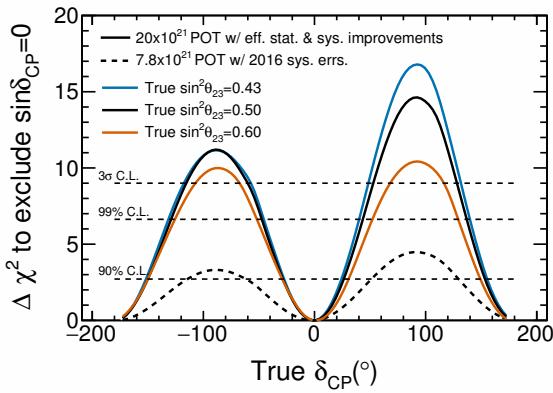
4.2 期待される感度

4.1 に述べた努力をして得られる感度が図 10 である。これは、質量順序が順階層の場合の図で、逆階層の場合には、 $\delta_{CP} = 0$ で反転したような図になる。2026 年頃には、質量順序が他の実験で決められている可能性が高い。その場合、例えば $\sin^2 \theta_{23} = 0.5$ の場合で、 δ_{CP} の 36% の領域で CP 対称性の破れを 3σ で観測することが期待される。

また、混合角 θ_{23} に関しては、現在の測定結果は $46 \pm 3^\circ$ [16] と最大混合に近く、そこからのずれが見えるかどうかが焦点となっている。図 11 は、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.6$ すなわち $\theta_{23} = 51^\circ$ の場合に期待される 90% C.L. 領域で、最大混合からのずれが見える可能性がある。 θ_{23} の測定精度としては $0.5^\circ \sim 1.7^\circ$ 、 Δm_{32}^2 に関しては 1% 程度が



(a) 質量順序が不明の場合の感度。



(b) 質量順序がわかっている場合の感度。

図 10: T2K Phase II の CP 対称性の破れに対する感度。横軸は、CP 位相の値。質量順序として順階層の場合の図。図 (a) は質量順序がどちらかわかっていない場合の感度。図 (b) は、他の実験等で質量順序が決められた場合の感度。

期待される。

ここまで紹介した感度は、標準理論に新しく加わるのが三世代間のニュートリノ振動のみであると仮定した場合である。実際、CP の破れの測定も、厳密にいうと太陽ニュートリノおよび原子炉ニュートリノによる θ_{12} , Δm_{21}^2 , θ_{13} の値を用いた上で、T2K の観測値から θ_{23} , Δm_{32}^2 , δ_{CP} をフィットし、 δ_{CP} の値の 0 ないし π からのずれという形で導出している。しかし、加速器ニュートリノ振動による（反）ミューオンニュートリノ消失、（反）電子ニュートリノ出現の測定の精度が上がれば、三世代振動の枠組を超えた冗長な測定が可能となる。例えば、原子炉の測定により決められた θ_{13} とは独立に、加速器ニュートリノの測定で θ_{13} を決定し比べることで三世代振動のテストが可能となる。つまりクオークにおけるユニタリーのテストに相当するようなテストが可能となる。また、ミューオンニュートリノの消失をニュートリノと反ニュートリノで比較し、違いが見つかれば、

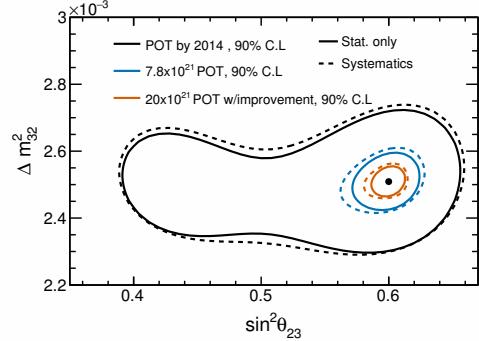


図 11: $\sin^2 \theta_{23} = 0.6$ の場合に期待される 90% C.L. 領域。

CPT の破れ、ないし（反）ニュートリノと（通過中の地球の）物質との標準理論では説明できない相互作用があることを示す。T2K の phase II の感度は限られており、高精度の測定はハイパーカミオカンデを待たなければならぬが、ニュートリノでは、びっくりするほど大きな新現象があることが過去にはあったので、案外、T2K で見つかったり、ということもあるかもしれない。

5 まとめ

多くの人の多大な努力で J-PARC MR は 425 kW のビーム強度を達成した。ここまで長い道のりであったし、20 年に渡ってスーパーカミオカンデの超高性能を維持するのも大変であったと思う。2016 年夏の結果は CP の破れが見え始めてきたことを示しているのかもしれないが、それを確認するには、まだまだ長い期間と努力が必要である。長く続けている人間にとっては、装置の高い性能を維持する努力をしつづけるということが一番、難しいのかもしれない。さらに、750 kW を超えて 1.3 MW を達成し、また 50% の解析効率の向上をするには多くの課題を解決せねばならず、腕試ししてやろうという若い人の参入も必要だと思う。CP の破れの発見には着実に近づきつつあり、また未だ冗長で精密な測定がなされていないニュートリノについては、標準理論を超えていたるニュートリノ振動現象をさらに超えた現象が手の届く所にあるかもしれない。ぜひ、一緒にやりませんか？

参考文献

- [1] 平木貴宏, 田中秀和, Christophe Bronner, 高エネルギーニュース **34-2**, 89 (2015).
- [2] 池田一得, 市川温子, Megan Friend, 高エネルギーニュース **32-4**, 260 (2014).

- [3] 亀田純, 南野彰宏, 高エネルギーニュース **32-4**, 255 (2014).
- [4] 西村康宏, Mark Hartz, 家城佳, 高エネルギーニュース **32-2**, 59 (2013).
- [5] 奥村公宏, 亀田純, 中山祥英, 大谷将士, 中家剛, 高エネルギーニュース **30-2**, 89 (2011).
- [6] K. Abe *et al.* [T2K Collaboration], Phys. Rev. Lett. **112**, 061802 (2014) doi:10.1103/PhysRevLett.112.061802 [arXiv:1311.4750 [hep-ex]].
- [7] R. Wendell, PoS ICRC2015 (2015) 1062.
- [8] Alexandre Sousa, arXiv:1502.07715 [hep-ex].
- [9] P. Adamson *et al.*, Phys. Rev. D **93** (2016) 051104.
- [10] M. G. Aartsen *et al.*, Phys. Rev. D **91** (2015) 072004.
- [11] Particle Data Group 2015.
- [12] G.J. Feldman and R.D. Cousins, Phys. Rev. D **57**, 3873 (1998).
- [13] K. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 241801 (2011).
- [14] P. Adamson *et al.*, Phys. Rev. Lett. **108**, 191801 (2012).
- [15] K. Abe *et al.*, arXiv:1609.04111 [hep-ex].
- [16] C. Patrignani, Chin. Phys. C **40**, no. 10, 100001 (2016). doi:10.1088/1674-1137/40/10/100001