

話題

J-PARC での長基線ニュートリノ振動実験の新たな展開

中平 武*

Recent Progress of Neutrino Oscillation Experiments at J-PARC

Takeshi NAKADAIRA*

Abstract

High intensity proton synchrotrons enable long-baseline neutrino experiments precisely to measure the oscillation probability of the neutrino oscillation phenomenon discovered in 1998. Furthermore, it become possible to search for the particle–antiparticle difference (CP violation) in leptons experimentally by comparing the magnitude of neutrino oscillations between neutrinos and antineutrinos. The recent results from the T2K experiment using J-PARC and Super-Kamiokande show the hints of large CP violation in neutrino oscillations, and provide the first strong limit on the CP violating complex phase. The construction of the Hyper-Kamiokande experiment that aims to detect and measure CP violation in neutrino oscillations in next decade has also started.

1. はじめに

1998年にスーパーカミオカンデ実験により宇宙線と大気との反応によって生成されたニュートリノの観測によってニュートリノ振動現象が発見された¹⁾。さらにKEK 12 GeV-PSにより人工的に生成したニュートリノをスーパーカミオカンデで観測したK2K実験²⁾は、世界初の長基線ニュートリノ振動実験であり、加速器実験によってニュートリノ振動を測定する手法を確立した。2009年からはJ-PARC主リングを用いて格段に高い強度のニュートリノビームが生成されるようになり、それを用いたT2K実験^{3,4)}は発生頻度が小さいミュー型ニュートリノが電子型ニュートリノに変化するニュートリノ振動を世界で初めて直接検出した^{5,6)}。

加速器による長基線ニュートリノ実験の最大の特徴は、ニュートリノビームと反ニュートリノビームの両方を生成可能なことである。そのためニュートリノと反ニュートリノのニュートリノ振動を比較する実験が可能である。素粒子のうちニュートリノが属するレプトンに関しては、粒子と反粒子との差 (CP 対称性の破れ) は実験的には未発見であり、CP 対称性が大きく破れている

可能性がある。レプトンにおけるCP対称性の破れを実験で定量的に測定することにより、「宇宙が誕生した時に同数生成されたと考えられる“粒子”と“反粒子”が、なぜ現在の自然界では“粒子”のみが残り“反粒子”が消滅してしまったのか？」という謎を解くためのヒントが得られると期待されている。

T2K実験は2014年から反ニュートリノビームによる測定も開始し、2020年までにCP対称性の破れを示唆する兆候を捉えている^{7–10)}。2020年には、スーパーカミオカンデのおおよそ10倍の有効体積をもつ新しい大型検出器と、約2倍に増強したJ-PARCのニュートリノビームを用いるハイパーカミオカンデ実験^{11,12)}の建設が開始した。ハイパーカミオカンデ実験では、CP対称性の破れの発見とその大きさの定量的な測定が、期待される目玉となる成果の一つで、2027年度の実験開始にむけて日本での長基線ニュートリノ振動実験は新しいフェーズに入った。

2. 長基線ニュートリノ振動実験

2.1 ニュートリノ振動

ニュートリノは弱い相互作用により生成され、弱い相互作用による反応により検出される。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(Takeshi Nakadaira E-mail: takeshi.nakadaira@kek.jp)

ニュートリノは、弱い相互作用で反応において対応する荷電レプトン（電子(e), ミュー粒子(μ), タウ粒子(τ))に応じて、電子(型)ニュートリノ(ν_e), ミュー型ニュートリノ(ν_μ), タウ型ニュートリノ(ν_τ)の三種類が存在する。また、電気的に中性なニュートリノの“粒子”と“反粒子”は、生成・検出のときの反応において対となる荷電レプトンにより区別され、電子, μ^- , τ^- と対生成されるものが反ニュートリノ($\bar{\nu}$)で、陽電子, μ^+ , τ^+ と対生成されるものがニュートリノ(ν)である[†]。

ニュートリノの質量は実験的に直接測定が未だにできていないほど小さいが、質量が縮退していなければニュートリノ振動が起きる。ニュートリノ振動とは、ニュートリノを生成したのち一定時間経過した後(すなわち、一定距離伝播した後)に観測するとき、生成時とは別の種類のニュートリノとして観測される現象である。

たとえばT2K実験は、加速器を用いてミュー型ニュートリノを生成し、一定距離 L 離れた位置で電子型ニュートリノとして観測される現象を発見した(図1に配置図を示す)。このニュートリノ振動で、ニュートリノの種類の変化がおきる確率は、伝播距離 L [km], エネルギー E [GeV], 関係するニュートリノの質量の自乗差 Δm^2 [eV²]に依っている。電子型ニュートリノに変化して観測される確率 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ の主要項は、 $\sin^2(1.27 \Delta m^2 L/E)$ に比例する形で表される。そのためニュートリノ振動をはっきり観測するためには、振動確率が大きくなるように $(1.27 \Delta m^2 L/E) \approx (\pi/2)$ の整数倍という条件を満たす必要がある。

この条件式のうち、大気ニュートリノの測定結果からミュー型ニュートリノのニュートリノ振動では $\Delta m^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ であることがわかっている。また、エネルギー E が小さいとミュー型ニュートリノと核子との反応断面積が小さいので、 $E \sim 200 \text{ MeV}$ くらいより上でないと検出が難しい。よってニュートリノ振動を検出するには、ニュートリノを約100 km以上伝播させてから観

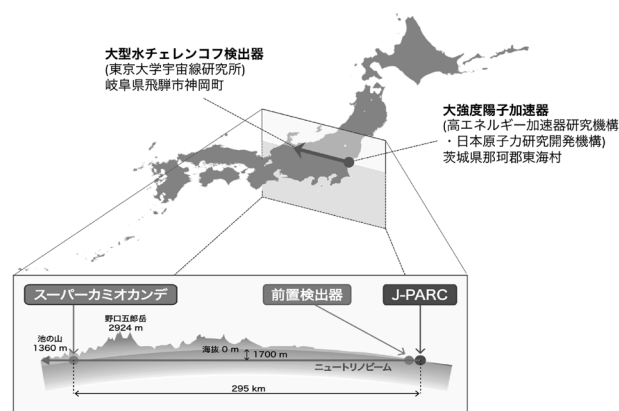


図1 現在行われている長基線ニュートリノ振動実験(T2K実験)に関わる施設。

測する必要がある。ニュートリノの質量(差)があまりに小さいために、マイクロな世界を記述する量子力学の効果であるニュートリノ振動を観測するために、都道府県をまたぐような極端にマクロな空間スケールを必要とする、という状況になっている。

2.2 加速器ニュートリノによるニュートリノ振動の測定

加速器ニュートリノ実験では、陽子ビームと標的との反応により生成した π 中間子の崩壊($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$)により生成される三次粒子のミュー型ニュートリノを実験に用いる。

ニュートリノ振動は、ニュートリノの種類が伝播距離にしたがって周期的に変化する現象であるが、長基線ニュートリノ実験で用いる加速器施設や大型ニュートリノ検出器を動かすことは非現実的で、基線長 L は固定となる。そのためニュートリノの“振動”を、ニュートリノの変化確率がエネルギーによって変化する依存性として測定する。つまり長基線ニュートリノ振動実験では、反応したニュートリノの種類と同定とエネルギースペクトラムの測定が必要となる。

T2K実験の場合、J-PARCのニュートリノ生成標的からスーパーカミオカンデまでの距離 L は295 kmで、0.6 GeVくらいのエネルギーでニュートリノ振動が最大となる。このあたり(sub-GeV領域)のエネルギーのニュートリノが起こす反応は、核子との荷電カレント準弾性散乱： $\nu_l + n \rightarrow l + p$ ($l = e, \mu, \tau$)が支配的なので、この反応を仮定して伝播後のニュートリノの種類とエネルギーを決定する。反応の終状態のレプトンを粒

[†] ニュートリノが、粒子と反粒子の区別があるディラック粒子なのか、区別がないマヨラナ粒子なのか、というのは未解決な重要な問題であり、その解明のためにニュートリノレス二重 β 崩壊の探索実験が多く行われている。

子識別することで、始状態のニュートリノの種類が同定できる。また終状態のレプトンの運動量と散乱角から、二体反応の運動学によって始状態のニュートリノのエネルギーを再構成できる。また sub-GeV のエネルギー領域では、質量の大きな τ を生成するにはエネルギーが足りないため、タウ型ニュートリノが荷電カレント反応を起こすことはない。したがって、電子型ニュートリノとミュー型ニュートリノのみが検出器内で反応する。スーパーカミオカンデは電子と μ を判別する能力があり、T2K 実験では生成したミュー型ニュートリノが変化せずにそのままミュー型ニュートリノとして観測される確率： $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ と、変化して電子型ニュートリノとして観測される確率： $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$ をそれぞれ測定できる。前者を ν_μ disappearance 測定、後者を ν_e appearance 測定と呼ぶ[†]。さらに、反ニュートリノに対しても $\bar{\nu}_\mu$ disappearance 測定と $\bar{\nu}_e$ appearance の測定が可能なので、計4つのニュートリノ振動確率の測定が可能である。

三世代のニュートリノを仮定した標準的なニュートリノ振動のモデルでは、ニュートリノの ν_e appearance と反ニュートリノの $\bar{\nu}_e$ appearance のちがいとして“CP 対称性の破れ”があらわれうると考えられており、それらの確率の差は最大で約 28% 程度と考えられている。もし未発見のステライルニュートリノなど標準模型を超える新しい物理があれば、もっと大きな差があらわれうる。

2.3 長基線ニュートリノ振動実験のためのニュートリノビーム生成

電磁場を感じないニュートリノのビームを生成するためには、あらかじめ狙った方向に向けて親となる荷電 π 中間子のビームを生成し、親粒子を飛行させながら崩壊させる必要がある。図2は、J-PARC のニュートリノビームラインの全体図と二次ビームラインの断面図である。J-PARC では、主リングから取り出した 30 GeV の陽子をまず神岡方向に向けてから黒鉛製の標的に衝突させる。この際、空間的な制約から陽子ビームを主リングの内側に取り出し、主リングよりも小さな曲率半径の陽子ビーム輸送路をとることになった。その

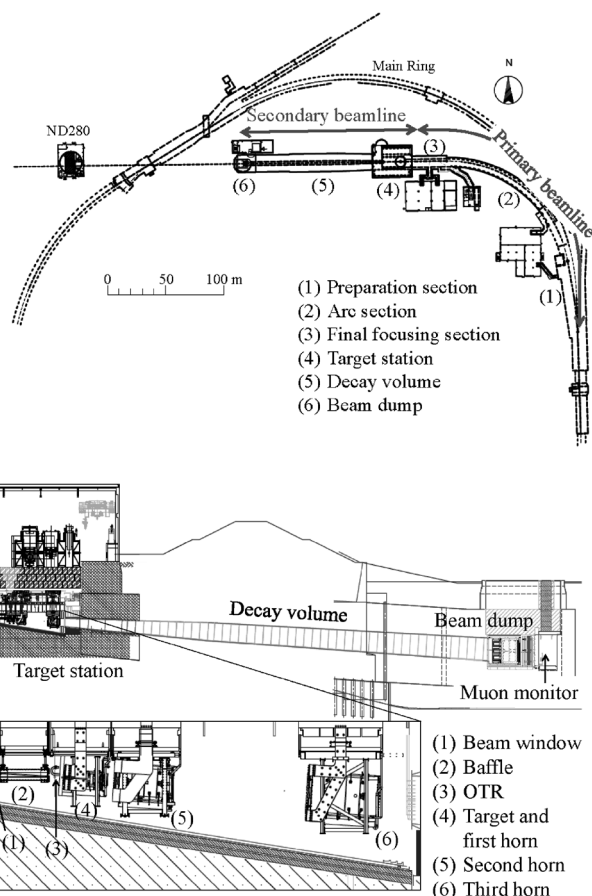


図2 J-PARC ニュートリノビームラインの全体図(上)と二次ビームライン(下)¹⁶⁾。上図の(1)~(3)が陽子ビーム輸送路で、このうち(2) Arc section 部は超伝導コンバインドファンクション磁石によって構成されている。

ため、主に常伝導の偏向電磁石 (5 台) と四重極電磁石 (9 台) に加えて、28 台の超伝導コンバインドファンクション磁石が用いられている。さらにビーム方向の微調整のための常伝導ステアリング電磁石が配置されている。

陽子-炭素衝突で生成された π 中間子を収束するため、3 台の電磁ホーンと呼ばれるパルス電磁石が使われている¹³⁾。陽子ビームと標的との衝突のタイミングに合わせて印加される 250 kA のパルス電流により、標的の周囲にトロイダル磁場が生成される。標的で散乱角を持って生成される荷電 π 中間子のうち、ホーン電流の向きによって、一方の符号の電荷をもつ π 中間子がビーム軸方向へ収束され、逆の符号の π 中間子は発散させられる。つまり電磁ホーンの電流極性を切り替えることで、 π^+ を収束してニュートリノビームを生成するか、 π^- を収束して反ニュートリノビームを生成するかを選択的に変えることができる。

[†] 観測はできないが $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動は起こりうるので、2 つの確率の和が 1 となるとは限らない。

標的から約110 m 下流までの間はトンネル（空洞）となっており、その空間（ディケイボリューム）を π 中間子が飛行しながら崩壊してニュートリノビームが生成される。ニュートリノ以外の荷電粒子のほとんどは標的から110 m 下流に設置されたビームダンプで止められるが、ニュートリノはそこから先の地中を伝播する。標的、電磁ホーン、ビームダンプ、コリメータ、および放射線遮蔽体などは、ディケイボリュームと一体となった約1500 m³の大きな容器の中に収納され、この容器の内部はほぼ大気圧のヘリウムガスで満たされる。これは π 中間子の損失を極力抑えるのと同時に、放射線により生成されるNO_x等により機器が損傷するのを防ぐためである。

ビームダンプの下流では、ニュートリノの副産物として生成される高エネルギーの μ 粒子のプロファイルをアレイ状に配置したシリコン検出器や電離箱で測定し、ビームパルスごとに生成されたビームの方向を測定している。また標的から280 m の位置には、前置検出器と呼ぶニュートリノ検出器群があり、実際にニュートリノ反応を測定してニュートリノビームの方向や強度を測定している。280 m の地点で実測されたニュートリノビームの幅はだいたい4.5 m（ガウス分布の1 σ ）である。これをスーパーカミオカンデの位置（295 km）に単に外挿すると約5 km 弱となるので、“ビーム”という言葉の意味を広く捉える必要がある。

長基線ニュートリノ実験のためには、主リングで加速された8バンチの陽子を「速い取り出し」によって1ターン（約5 μ 秒）の間に一度に取り出してニュートリノを生成するが、これには二つ理由がある。一つはスーパーカミオカンデでの事象選別のためである。J-PARCの陽子ビームの取り出しタイミングと同期したニュートリノ反応事象を選別することで、時間的に一様に発生する大気ニュートリノから区別する。スーパーカミオカンデで選別されたニュートリノ反応の時間分布は、J-PARC主リングの陽子ビームがもつ8バンチの時間構造をよく再現しており、加速器由来のニュートリノであることと、大気ニュートリノ等の混入が十分小さいことを実証している。約300 km 離れたJ-PARCとスーパーカミオカンデの時刻合わせはGPSを用いて実現されているが、J-PARCで

ビームを生成した時刻の情報をネットワーク経由でほぼリアルタイムで転送して、ビームと同期したセミオンラインでのデータ選別が行われている。

速い取り出しを用いるもう一つの理由は、大電流を印加する電磁ホーンが、膨大なジュール熱のためDC通電するのが困難なためである。一方で速い取り出しは、標的やビーム窓といった直接ビーム照射をうける機器に対しては過酷な条件となり、約5 μ 秒の間に発生する陽子ビームによる瞬間的な発熱に耐える必要がある。高融点で、比強度と熱衝撃耐性が高い材質を用いる必要があり、標的には黒鉛、ビーム窓にはチタン合金が使用されている。標的に関しては、密度の大きくない材質（ ~ 1.8 g/cm³）で十分な π 中間子収量を得るため約90 cmの長さ（相互作用長の約2倍）にする必要がある一方で、電磁ホーンの中にインストールされる必要があり空間的な制約もある¹⁴⁾。標的で発生する陽子パルスあたりの発熱は40～50 kJ程度と想定され、ヘリウムガスにより冷却される。これは標的を水冷しようとするパルスビーム照射に伴う水の瞬間圧力上昇が大きく肉厚な容器を要してしまう問題があることと、ヘリウム冷却の場合には黒鉛の温度を放射線損傷の影響が小さい600°C以上に設定可能な点やトリチウム生成量での優位性などを考慮したためである。

J-PARCでは、オフアクシス法¹⁵⁾とよばれる方法を取り、ニュートリノビームの方向をスーパーカミオカンデに対してあえて2.5°ずらすことで、 π 中間子の二体崩壊の運動学的条件を利用してスーパーカミオカンデに対してエネルギーの幅の狭いニュートリノビームを供給している（図3）。前述のとおりニュートリノ振動解析では、エネルギー再構成可能な荷電カレント準弾性散乱が信号事象であるが、高エネルギーのニュートリノは、終状態に π 中間子の生成を伴う反応や π^0 中間子を生成する中性カレントによる反応などのバックグラウンド事象を起こす。オフアクシス法では、興味のあるsub-GeVのエネルギー領域に限ってみればニュートリノのフラックスが向上し、さらに高エネルギーのニュートリノ反応が抑制されることでS/N比も向上する。T2K実験では、ニュートリノビームのエネルギーを一定に保つためにニュートリノビームの方向を ± 1 mrad以内に保つこと

が実験的要求になっているが、これまでの実績では ± 0.2 mrad 以内に収まるように充分よく制御されている¹⁶⁾。

J-PARC のニュートリノビームラインは、スーパーカミオカンデから約8 km 南に離れた位置に建設されるハイパーカミオカンデにも同じビームを供給することが可能である。ニュートリノビームの方向や前置検出器の位置は、陽子ビーム輸送路のトンネルや約100 m のディケイボリウムなど巨大土木構造物の方向により建設時にほぼ決まってしまうが、これらは水平方向（南北方向）においてはスーパーカミオカンデとハイパーカミオカンデのちょうど中間を向いており、ビームの振り下げ角度を調節することで両者の検出器位置のオフアキス角が同じになるように設計されている。このため、T2K 実験からハイパーカミオカンデ実験に移行するにあたって、新たに J-PARC にニュートリノビームラインを一から建設する必

要はない。

J-PARC で生成されるビームの前置検出器位置とスーパーカミオカンデ位置でのニュートリノフラックスは、CERN NA61 実験¹⁷⁾ による 30 GeV 陽子と黒鉛の衝突によるハドロン生成の実測データ等に基づいたモンテカルロシミュレーションにより推定される¹⁸⁾。それにより、前置検出器でのニュートリノ反応の測定をスーパーカミオカンデに外挿することができ、実際の観測数との比較からニュートリノ振動の確率を得ることが可能となる。

3. T2K からハイパーカミオカンデへ

3.1 T2K 実験により始まった CP 対称性の破れの探索

T2K 実験は2020年4月にニュートリノ振動における CP 対称性の破れの探索結果を Nature 誌で発表した¹⁰⁾。標準的な三世代のニュートリノ振動を仮定して、ニュートリノの弱い相互作用の固有状態と質量の固有状態との関係を示す重ね合わせ行列 (PMNS 行列) の複素位相 (δ_{CP}) の値を実験的に求めた。CP 対称性の破れの大きさ (Jarlskog invariance; J_{CP}) は、この位相に対して $J_{CP} \propto \sin \delta_{CP}$ の関係にあるので、「 $\delta_{CP} = 0^\circ$ または $\delta_{CP} = 180^\circ$ ならば CP 対称性は保存」、 δ_{CP} がそれ以外であれば「そうでなければ CP 対称性は破れている」となる。T2K 実験の最新結果 (図4) の解析により、許されるパラメータ領域のうちの半分の領域 ($\sin \delta_{CP} > 0$) の大部分が有意水準 3σ 以上で棄却され^{10, 18)}、初めて δ_{CP} の値に実験的に強

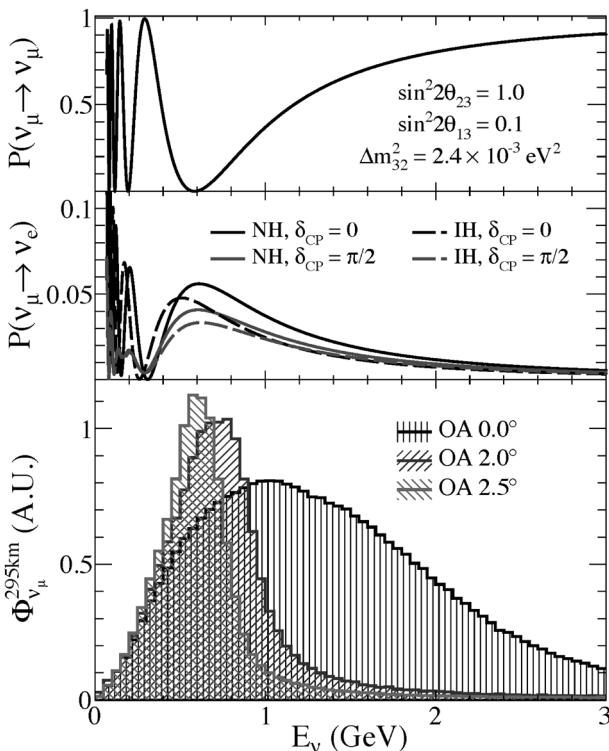


図3 標準的な三世代ニュートリノ振動で予想されるニュートリノ振動の確率 (上段: ν_μ disappearance, 中段: ν_e appearance) と、ビーム軸に対するニュートリノの運動方向 (オフアキス角度: OA) ごとのニュートリノのエネルギー分布図 (下段)⁵⁾。振動確率が大きいエネルギー領域に関しては、T2K 実験で採用する OA = 2.5° の場合のフラックスは、ビーム方向をスーパーカミオカンデに向けた場合 (OA 0.0°) のフラックスより高い。

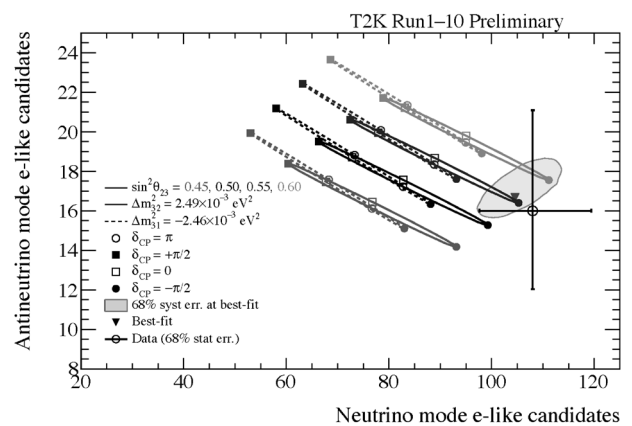


図4 T2K 実験の最新結果¹⁸⁾ における ν_e appearance 候補事象数 (横軸) と $\bar{\nu}_e$ appearance 候補事象数 (縦軸)。図中の楕円は、振動のパラメータ標準的な三世代ニュートリノ振動のモデルからの予想値のニュートリノの混合角ごとの δ_{CP} に対する依存性を示す。

い制約が得られた。

T2K 実験は、2021 年度に前置検出器の一部をアップグレードする¹⁹⁾ことで実験感度を向上させ、当初計画よりも多くの実験データを取得して、「CP 対称性が破れているか?」(すなわち $\sin \delta_{CP}$ はゼロかどうか?) という謎に対して 3σ の感度⁸⁾で迫ることを提案した²⁰⁾。これまでの累積陽子数 3.6×10^{21} POT から 2×10^{22} POT に増やすことで、468~559 の ν_e appearance 候補事象と、116~134 の $\bar{\nu}_e$ appearance の候補事象が得られると期待される**。

3.2 ハイパーカミオカンデの幕開け

2020 年から、スーパーカミオカンデの約10倍に相当する有効体積をもつ直径68 m、深さ71 mの巨大水チェレンコフ検出器を新設するハイパーカミオカンデ実験¹¹⁾の建設が始まった。この計画での長基線ニュートリノ振動実験では、ハイパーカミオカンデと同じ検出原理による前置検出器(新設)を用いることで実験感度を高めることを目指している。2027 年度から実験を開始する計画で、J-PARC のニュートリノビームを約10年間観測することで、それぞれ約2000 事象の ν_e appearance 候補と $\bar{\nu}_e$ appearance の候補を検出し、 δ_{CP} のパラメータ領域の約半分の領域に対して、有意水準 5σ 以上の感度で CP 対称性の破れを探索できると期待されている。もし T2K 実験の最新結果が示唆するように CP 対称性の破れの大きさが最大に近い場合、実験開始後の数年で CP 対称性の破れが発見できると期待されている。

3.3 J-PARC ニュートリノビームの増強

T2K 実験の継続提案²⁰⁾とハイパーカミオカンデ実験のいずれにも、J-PARC のニュートリノビームの増強²¹⁾が含まれている。J-PARC の主リングは、ニュートリノビーム生成のための早い取り出しでの運転で、これまでにビーム強度約515 kWでの安定的な連続ビーム供給を達成している。2021 年度には主リングの主電磁石電源が改修され、繰り返し周期を2.5 秒から1.3 秒周期に短縮することでビーム強度が当初の設計値

750 kW に到達すると見込まれている。さらに加速器の RF 増強、コリメータ増強によるビームロス対策などを順次実施することで、ビーム強度は1.3 MW 程度に増強される計画となっている²²⁾。

加速器の高繰り返し化による陽子ビーム強度増強に対応して、ニュートリノビームラインも機器の国際協力によるアップグレードが予定されている²¹⁾。大強度陽子加速器の強度増強においては、しばしば「そのビームを用いる実験施設の標的が耐えられるか?」が問題となる。J-PARC 主リングの出力増強は“高繰り返し化”によるため、パルスあたりの陽子数は建設時の当初想定とほぼ同じであり、ニュートリノ生成標的に対する熱衝撃の最大想定も変わらない。そのため、標的の基本的な設計に変更はないが、標的での発熱量は増大するので、ヘリウムガスによる冷却系を更新して冷却能力を強化する。また、電磁ホーンの電源や給電システムを改修して、増強後の主リング加速器の繰り返し周期とおなじ約1 秒周期でのパルス励磁を可能にし、さらに印加電流を現在の250 kA から320 kA に増強して π 中間子の収率向上をねらう。また、電磁ホーン本体も冷却系を強化した改良型で更新する。陽子ビーム輸送系のうち最下流の部分には、二次ビームラインからの放射線の影響を受けて残留放射能が高くなると予想されるので、改修して機器のメンテナンス性を高める。そのほか、二次ビームラインの放射線対策や冷却能力の強化、陽子ビームモニター、三次ミューオンのプロファイル測定によるビームモニタおよびそれらのデータ収集系、インターロック系の改良を予定している。

長基線ニュートリノ振動実験は国際的に見ても関心が高く、米国でも FNAL 120 GeV Main Injector によるニュートリノビーム (NuMI²³⁾) を用いる NOvA 実験²⁴⁾ が2014 年からデータ収集を行っている。また次期計画としては、FNAL Main injector の出力ビーム強度を増強し²⁵⁾、新しいニュートリノビームラインと大型液体アルゴン TPC 検出器を用いる DUNE 実験²⁶⁾ が建設を開始しており、ハイパーカミオカンデとほぼ同時期の実験開始が見込まれている。

ニュートリノ振動の精密測定や CP 対称性の破れの探索において NOvA 実験と DUNE 実験は、それぞれ T2K 実験やハイパーカミオカンデ実験

⁸⁾ CP 対称性の破れの大きさが標準的な三世代ニュートリノ振動で想定される最大値の場合を想定した実験感度。標準理論を超える新物理があれば、より大きな破れを検出する可能性もありうる。

** 候補事象数は、 δ_{CP} の値に依る。

と国際競争の状況にある。しかしながら、NOvA 実験の基線長 L は 810 km, DUNE 実験の基線長 L は 1300 km で, J-PARC の実験 (295 km) よりも長く, ニュートリノビームのエネルギーも異なる。これらの実験条件の差は, ニュートリノと経路上の物質との反応の効果などの物理の効果を検討すると, ニュートリノ振動の振る舞いの違いを生み, ニュートリノ振動によるエネルギー Spektrum 変化のパターンも異なる。日米の実験は, 検出原理の異なる実験によるクロスチェックという意義にとどまらず, 条件の異なる実験の組み合わせで解明される成果も期待される相補的な関係にある。そのため日米科学技術協力事業 (高エネルギー物理分野) では, 日米の実験データの統合解析への取り組みや加速器開発も含めた技術的な協力も行われている。

4. ま と め

メガワット級の出力ビーム強度をもつ陽子シンクロトロンは, 弱い相互作用しかしないニュートリノを数百 km 以上離れた位置で観測することが必要なニュートリノ振動現象を, 高精度で測定することを可能にした。これにより, 長基線ニュートリノ振動実験は, レプトンにおける“粒子”と“反粒子”の違いに迫れるようになった。これまでの T2K 実験の結果は, レプトンでの CP 対称性の大きな破れのヒントと考えられており, J-PARC MR の高繰り返し化改修後の大強度ビームによる今後のデータ蓄積が期待されている。また J-PARC の加速器およびニュートリノビームの大強度化を含むハイパーカミオカンデ計画が開始され, 2020 年代の後半にレプトンでの CP 対称性の破れが発見されると期待されている。

これまでに T2K 実験で電子ニュートリノ出現の発見などの成果が得られ, また今後の T2K 実験やハイパーカミオカンデで“CP 対称性の破れ”の発見に向けた展望が拓けたことは, ビーム出力強度向上のため日々尽力されている J-PARC 加速器のたくさんの方々や, J-PARC ニュートリノ実験施設の建設・運転に協力していただいた多くの方々のおかげです。この場をお借りして感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Y. Fukuda et al.: Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).
- 2) M. H. Ahn et al.: Phys. Rev. D Part. Fields Gravit. Cosmol. **74**, 072003 (2006).
- 3) K. Abe et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **659**, 106 (2011).
- 4) <https://t2k-experiment.org/>.
- 5) K. Abe et al.: Phys. Rev. D Part. Fields Gravit. Cosmol. **88**, 032002 (2013).
- 6) K. Abe et al.; T2K Collaboration: Phys. Rev. Lett. **112**, 061802 (2014).
- 7) K. Abe et al.: Phys. Rev. Lett. **118**, 151801 (2017).
- 8) K. Abe et al.: Phys. Rev. Lett. **121**, 171802 (2018).
- 9) K. Abe et al.: Phys. Rev. D **96**, 092006 (2018).
- 10) The T2K Collaboration: Nature **580**, (2020).
- 11) K. Abe et al.: “Hyper-Kamiokande Design Report,” arXiv: 1805.04163 [physics.ins-det], <https://arxiv.org/abs/1805.04163>.
- 12) <http://www.hyper-k.org/>.
- 13) T. Sekiguchi et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **624**, 591 (2010).
- 14) T. Nakadaira: J. Radioanal. Nucl. Chem. **305**, 777 (2015).
- 15) D. Beavis et al.: “Physics Design Report,” BNL 52459 (1995).
- 16) K. Abe et al.: Phys. Rev. D Part. Fields Gravit. Cosmol. **87**, 012001 (2013).
- 17) M. Gazdzicki et al.: “Study of Hadron Production in Hadron–Nucleus and Nucleus–Nucleus Collisions at the CERN SPS,” CERN-SPSC-2006-034; SPSC-P-330.
- 18) P. Dunne: “Latest Neutrino Oscillation Results from T2K,” the XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics was an entirely online conference (NEUTRINO2020), <https://conferences.fnal.gov/nu2020/>.
- 19) K. Abe et al.: “T2K ND280 Upgrade—Technical Design Report,” CERN-SPSC-2019-001 (SPSC-TDR-006), arXiv: 1901.03750 [physics.ins-det], <https://arxiv.org/abs/1901.03750>.
- 20) K. Abe et al.: “Proposal for an Extended Run of T2K to 20×10^{21} POT,” arXiv: 1609.04111 [hep-ex], <https://arxiv.org/abs/1609.04111>.
- 21) K. Abe et al.: “J-PARC Neutrino Beamline Upgrade Technical Design Report,” arXiv: 1908.05141 [physics.ins-det], <https://arxiv.org/abs/1908.05141>.
- 22) K. Hasegawa: “Accelerator: Progress and Prospects,” The International Advisory Committee on the J-PARC Project, 4–5 March, 2019.
- 23) P. Adamson et al.: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **806**, 279 (2016).
- 24) D. S. Ayres et al.: The NOvA Technical Design Report, Report No. FERMILAB-DESIGN-2007-01, <https://doi.org/>.
- 25) <https://pip2.fnal.gov/>.
- 26) <https://www.dunescience.org/>.