

令和元年6月21日現在

機関番号：32206

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26400254

研究課題名(和文) J-PARCを用いたニュートリノ振動実験計画の物理能力評価と最適化条件の探索

研究課題名(英文) Estimation for the physics potential of neutrino oscillation experiments with J-PARC.

研究代表者

岡村 直利 (Okamura, Naotoshi)

国際医療福祉大学・保健医療学部・准教授

研究者番号：40402812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノ振動に関する物理量の中で、質量階層性とCP位相が未測定 of 物理量として残っている。これらは次世代ニュートリノ実験の主要な測定目標となっている。

本研究では、これまで申請者を含む共同研究グループが提案してきたT2K実験を拡張したTokai-to-Kamioka-and-Korea(T2KK)実験やTokai-to-Kamioka-and-Oki(T2KO)実験の物理能力について、より現実的な条件下で再解析を行った。その結果T2KK実験では3～5、T2KO実験では1～4程度で質量階層性が特定でき、CP位相も誤差20度から50度程度で測定できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究を含むこれまでの研究によって、ニュートリノ振動に関する質量階層性やCP位相の測定が、実現可能な技術で且つ多額の費用を必要とせずに測定できることを示すことができた。

本研究はT2KK実験とT2KO実験に特化しているが、両実験の物理能力が高い理由を論理的に突き詰めているため、本研究の結論は、T2KK実験やT2KO実験のみならず、次世代ニュートリノ振動実験の実験計画策定に重要な示唆を与えるものと期待できる。

本研究を含む我々の一連の研究は東アジアでのニュートリノ振動実験に一定の方向性を与え、今後T2HKK実験等の計画立案に基礎的な指針を与えるものと思っている。

研究成果の概要(英文)：Three parameters which are related to the neutrino oscillation are remained as unknown or unmeasured with enough precision. Especially, mass hierarchy pattern and CP phase in the MNS matrix are one of the main targets for the next generation neutrino experiment. In this study, we reanalyze the physics potential of Tokai-to-Kamioka-and-Korea (T2KK) and Tokai-to-Kamioka-and-Oki(T2KO) proposal, which are the ideas for the extension of the T2K experiment, with more realistic conditions. From our analysis, the mass hierarchy is determined with 3-5 sigma by the T2KK experiment and 1-4 sigma by the T2KO experiment. We also find that the CP phase can be measured with the uncertainty of 20-50 degree by both experiments. These results are depending on the mass hierarchy and the value of CP phase which are realized in nature.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ニュートリノ振動 ニュートリノ物理 素粒子理論 素粒子物理学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) ニュートリノ振動に関係する物理量測定のために、これまで多くの実験が行われてきた。これらの実験により、ニュートリノ質量の2乗差やニュートリノの相互作用の固有状態(フレーバー)と質量の固有状態の混合度合いを示す、MNS(Maki-Nakagawa-Sakata)行列の独立な4成分が測定されてきた。研究開始当初で言えば、2012年3月に中国のDayaBay実験が、同年4月には韓国のRENO実験が、最後まで未測定であったMNS行列内の最小混合角(θ_{13})を高精度で測定した。更に2013年7月には日本のT2K実験が $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 振動を捉え、初めてニュートリノフレーバー間の振動を確認した。未測定であった θ_{13} の値が測定されたことで、ニュートリノ振動に関係する独立な物理量のうち、「質量階層性(ニュートリノ質量の階層構造)」と「CP位相(CP対称性の破れに関係する位相)」だけが未測定となった。また、MNS行列の最大混合角 θ_{23} の値が45度より大きい小さいかも未決定であった。

(2) 質量階層性に関しては、研究開始時点では、アメリカのNOvA実験が2020年前後に 2σ 程度の精度で決定できるとし、また、中国で実施予定のDayaBayII実験が2025年前後に 3σ 程度の精度で決定できるとしていた。CP位相の測定は、T2K実験とNOvA実験の結果を合わせて解析することで、CP位相の値に関するヒントは得られるが、特定できる可能性は低いとされていた。

(3) 申請者を含む研究グループは、T2K実験のニュートリノビームが韓国南部まで到達することに気づいた。基線長が295kmのT2K実験に加え、基線長が1000km程度の韓国南東部に有効体積100ktonの水チェレンコフ光観測装置を設置し、T2K実験時に照射されるニュートリノを同時観測することで、質量階層性やCP位相が測定できることを示した(文献①②など)。我々の実験提案は同時期に発表された論文(文献③)と共にT2KK実験と呼ばれるようになった。また、韓国南東部ではなく、島根県隠岐の島に同様の観測装置を置く実験計画も提案されT2KO実験と呼ばれるようになった(例えば文献④)。

(4) 研究計画を申請するまでに、申請者を含む研究グループは

- ① ニュートリノビームだけを実験に使用し、反ニュートリノビームは使用しない。
- ② 日本国内、日本韓国間の詳細な地殻構造は無視し、平均密度を使う。
- ③ ニュートリノの標的となる原子核(酸素、水素)の核内での核子運動、核子多体効果、核子の共鳴効果等の影響は考慮する。
- ④ ニュートリノと原子核の中性カレント反応により生じる π^0 中間子の崩壊に由来する背景事象を解析に含める。

という条件下でT2KK実験の物理能力について解析を行い、最適な照射条件について探索を行った(文献⑤)。

これまでの我々の研究(文献①②など)から、T2KK実験の物理能力が高い原因が物質効果であることが明らかとなっていた。物質効果とは、加速器で生成されたニュートリノが観測装置に到達するまでの経路で、ニュートリノが物質(地殻)と相互作用することで、 $\delta m_{32}^2 > 0$ の通常の質量階層性(NH: Normal hierarchy)なら $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ の振動確率を増加させ、 $\delta m_{32}^2 < 0$ の逆階層性(IH: Inverted hierarchy)なら減少させる効果のことである。基線長が長いと物質効果が大きくなるので、基線長が短いT2K実験の結果と、基線長が1000km程度での結果を比較することで、階層性が特定できるようになる。これが最も簡単なT2KK実験・T2KO実験の物理能力の説明となっている。物質効果は地殻の密度に比例するため、地殻構造が物理能力評価の重要な要因となる。そこで、文献⑥では、上記条件③や④の効果を含めずに、上記条件②の代わりに、地球物理学の研究成果を用いて、日本国内や日本韓国間の地殻構造を推定し、T2KK実験やT2KO実験の物理能力が、どの程度変更されるのか解析を行った。また、反ニュートリノを含めたさいの効果についても検討を行っている。

2. 研究の目的

(1) 実験での全照射量をニュートリノと反ニュートリノとで分割することで、T2KK実験やT2KO実験の物理能力、特にCP位相の測定能力が向上することは、我々を含めた多くの研究結果より、容易に予想できる。そこで、上記背景(4)-③の原子核構造の影響や、④の背景事象を解析に加えた上で、照射量をニュートリノと反ニュートリノに分割した際に、T2KK実験やT2KO実験で質量階層性の判別能力がどの程度向上するのか、CP位相の測定能力がどの程度向上するのか、また、他の既知の測定量の精度がどの程度改善されるのか等、両実験の物理能力を最大化する最適化条件、照射時間の割合等について、その理論的理由まで含めて明らかにすることを本研究計画の目的とした。

(2) 上記目的(1)で解析を行う際には、日本国内、日本韓国間の地殻構造については、平均密度を用いることとした。これは、文献⑥等のこれまでの研究から、地殻構造を複雑化しても物理能力が大幅に変化しないと予想できるためである。そこで、研究目的(1)が達成できた後に、本研究課題の二番目の目的として、日本国内、日本韓国間の地殻構造を、最新の地球物理学の知見をもとに、より現実に即したものに修正し、T2KK実験やT2KO実験の物理能力がどの程度修

正されるのか、特に測定精度にどの程度影響があるのか評価することを第二の研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) ニュートリノ振動に関する物理量は、加速器などで生成されたニュートリノのエネルギースペクトルと、遠方の観測装置で測定したエネルギースペクトルを比較することで得られる。ニュートリノのエネルギーはニュートリノと標的原子核との散乱で生成される荷電レプトンのエネルギーと散乱角から再構成するので、標的となる原子核の構造等が実験の物理能力に影響する。これらの影響を評価し、解析に組み込むために、文献⑤で使用したシミュレータ (nuance) を用いて、大型計算機でシミュレーションを実行する。シミュレーションでは、原子核標的に入射するニュートリノの種別や照射エネルギーを変えながら、標的核種 (^{16}O , H) 毎に荷電弾性散乱 (CCQE) や、核子共鳴を伴う散乱が発生した際の荷電レプトンのイベント分布を生成する。生成したイベント分布に観測装置の系統誤差等を加えて、現実的な荷電レプトンのイベント分布を作成し、そこから、入射ニュートリノのエネルギーと再構成したニュートリノのエネルギー分布の対応を記述する関数を作成する。本手法は申請者を含む研究グループが文献⑤の研究を遂行する際に独自に開発した手法である。

ニュートリノの標的は酸素原子核内の中性子だけであるが、反ニュートリノの標的は酸素原子核内の陽子と水素の原子核の2種類となる。酸素原子核内の陽子は中性子とは異なるポテンシャル中にあり、中性子を標的とした時とは異なる核子運動、多体効果、共鳴効果等を考慮しなければならない。一方、水素の原子核は陽子のみとなるため、原子核内での核子運動等がない。上記イベント分布作成時には、これらビーム種と標的核子の違いによる効果を考慮に入れ、これまでの解析手法をさらに発展させた手法を用いて解析を行う。

(2) ニュートリノと標的原子核との中性カレント相互作用によって生じた π^0 中間子の崩壊によって現れる事象は $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 。事象の背景事象になるため解析に大きく影響を与える。文献⑤の研究を行う際にも背景事象を解析に組み入れたが、本研究では T2K 実験の研究グループが新たに使用している解析手法の結果や、最新の実験結果を参考に、シミュレータ (nuance) を用いて、改めて本研究用に背景事象を生成・解析し、その影響を再評価し解析に組み込む。

(3) 上記、標的原子核の影響と、背景事象の影響を取り入れて T2KK 実験や T2KO 実験の物理能力の評価や、両実験の最適化条件探索に必要なプログラムの開発を行う。作成したプログラムを用いて解析を繰り返し行い、物理能力を高めている要因を特定し、その理由を現象論的に説明する。また、ニュートリノと反ニュートリノの照射量の比や、照射ビームのエネルギースペクトル等の照射条件など、様々な実験条件を変えて T2KK 実験と T2KO 実験の両実験の物理能力を評価することで、両実験の最適化条件を決める因子について、理論的理由まで含めて明らかにする。

(4) これらの解析が全て終わり、結果をまとめた後に、日本国内、日本韓国間の地殻構造を現実的に即した構造にしたうえで、ニュートリノの経路上の物質密度を求め、上記解析プログラムに組み込み、T2KK 実験や T2KO 実験のこれまでの結論がどの程度変更されるのか再解析を行う。

4. 研究成果

(1) 質量階層性について

図 1 に T2KK 実験における質量階層性の決定能力を示した。横軸が CP 位相の値、縦軸が質量階層性の決定能力を示しており、数字が大きいほど能力が高くなる。図中の青、緑、オレンジ、赤の実線はそれぞれ、ニュートリノと反ニュートリノの照射量を 5:0、4:1、3:2、2.5:2.5 に分割した時の結果を表している。また、各色の点線はニュートリノと反ニュートリノの照射量を逆転させた場合の結果である。

図 1 において左側の二枚は自然界で Normal hierarchy (NH) が実現していると仮定した際に、Inverted hierarchy (IH) を排除できる能力を、右側の二枚は IH を仮定した際に、NH を排除できる能力を示している。

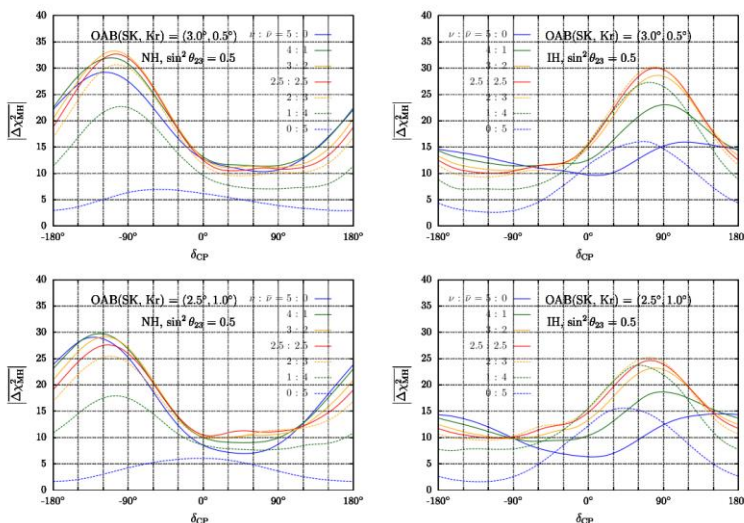


図 1 T2KK 実験における質量階層性の測定能力

また、上段二枚は、文献⑤に代表される、これまでの我々の研究から質量階層性の決定能力が最も高いとしているビーム照射条件、韓国にエネルギースペクトルの幅がより広いニュートリノビームを J-PARC から照射した際の能力を示し、下段二枚は現在の T2K 実験で用いられているニュートリノビームを J-PARC から照射した際の階層性の決定能力を示している。

図 1 より、一般的に照射量の一部を反ニュートリノにすることで、質量階層性の決定能力が向上することが分かった。特にニュートリノビームだけでも決定能力が高い CP 位相の領域でその違いが顕著となった。しかしながら、質量階層性の決定能力が低い CP 位相の領域では、照射量の一部を反ニュートリノに割くことで、決定能力がやや減少する場合があることも分かった。全体的にみて、ニュートリノと反ニュートリノの照射量を 4:1~2.5:2.5 の割合にすると、どの CP 位相の場合でも効果的に質量階層性が特定できることが分かる。

照射量の比を 1:1 にするよりもニュートリノの照射量を少し多くした方が、物理能力が上昇する原因として、イベント数があげられる。照射量と同じであれば、ニュートリノビームを用いた時の方が、反ニュートリノビームを用いた時より、より多くの遷移イベント ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) が発生する。基線長の違いによる物質効果の差が質量階層性決定の主要因であるため、より多くのイベント、特に基線長が長い方の観測装置でのイベント数を多くする、ニュートリノビームの照射が多いほど、質量階層性が決定しやすくなったと思われる。一方で、物質効果によって生じた遷移イベント数の差を CP 位相が変化することで補填できるパラメータ領域がある。反ニュートリノをある程度照射することで、未測定である CP 位相の値が制限され、物質効果によって生じた差を CP 位相の変化で補填できなくなり、質量階層性の決定能力が向上する理解できる。つまり、質量階層性決定に必要なイベント数になるまでは、ニュートリノを照射し、CP 位相の不定性を制限するために反ニュートリノを照射するのが良いという結論になった。これはニュートリノと反ニュートリノを同程度照射すると能力が上昇するだろうという、従来の予想とは異なる結果となった。

図 2 に T2K0 実験での質量階層性の決定能力を示す。T2K0 実験では、ニュートリノと反ニュートリノの照射量を 3:2~2:3 に分割すると、質量階層性の決定能力が高まることがわかる。隠岐の島は韓国よりも近いため、イベント数的に十分な量となる。そのため、CP 位相の不定性を

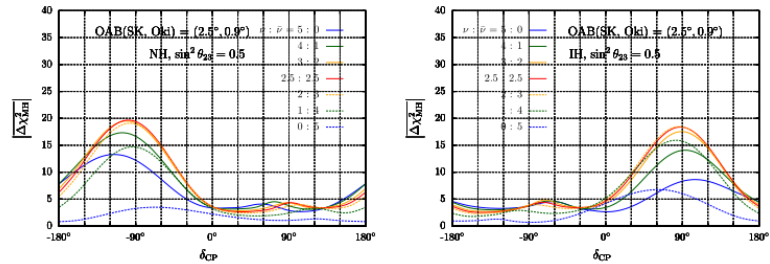


図 2 T2K0 実験における質量階層性の測定能力

排除すべく、ニュートリノと反ニュートリノの照射量が同程度の方が、質量階層性の決定能力が高くなったと結論できる。しかし、どの場合においても、T2K0 実験の質量階層性の決定能力は T2KK 実験のそれよりも低くなっている。これは、T2K0 実験の基線長が T2KK 実験の基線長よりも短いため、十分な物質効果を得ることができなかったためと結論できる。

これらの結果から、物質効果が質量階層性の決定に重要な役割を果たしているという文献①から指摘してきた内容が、再度確認された。また CP 位相の不定性を制限するほどに質量階層性の決定能力が上がるということが分かった。

(2) CP 位相について

図 3 に質量階層性として NH を仮定した場合の各実験の CP 位相の測定能力を、同様に、図 4 に IH を仮定した時の測定能力を示す。

図 3、図 4 の上段左 (a) と右 (b) はそれぞれ、T2KK 実験における測定能力を示しているが、(a) は文献⑤等で、我々が結論してきた、最も質量階層性の決定能力が高い、エネルギースペクトルの幅が広いニュートリノビームが韓国に到達する場合の測定能力であり、(b) は T2K 実験で用いられているビームを用いた場合の測定能力である。また、左下 (c) は T2K0 実験、右下 (d) は韓国や隠岐の島に新たな観測装置を設置する代わりに、SK の有効体積を 122.5kton まで増強した際の測定能力となる。

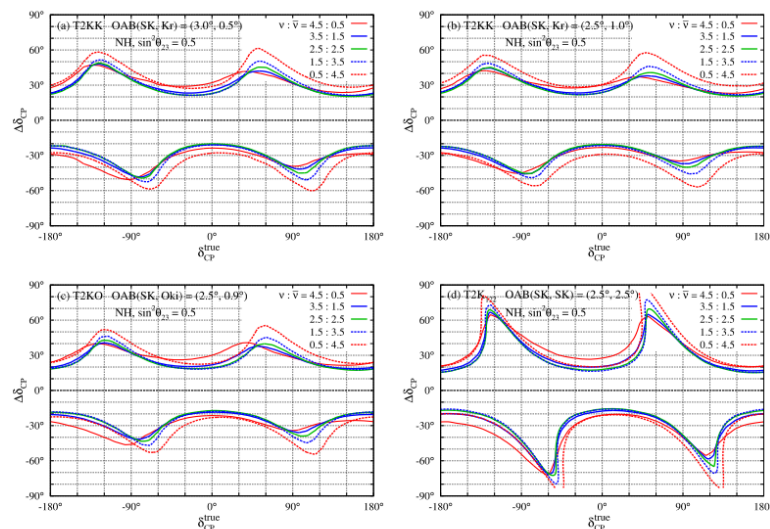


図 3 NH を仮定した際の各実験の CP 位相の誤差

各図において、横軸はイベント数を計算する際に入力した CP 位相の値 (δ^{true}) であり、縦軸は δ^{true} からの差を示している。図中の赤、青、緑の各実線は、ニュートリノと反ニュートリノの照射量を 4.5:0.5、3.5:1.5、2.5:2.5 に分割した時の 1σ の領域を示している。横軸の入力値 δ^{true} に対して縦軸方向をみたとき、各線に挟まれた領域の幅が入力した δ^{true} に対する、各照射条件での不定性となっている。同様に、青と赤の破線はそれぞれニュートリノと反ニュートリノの照射量を

1.5:3.5 と 0.5:4.5 と反ニュートリノの照射量を多くした場合である。図 3 と図 4 より、 δ^{true} が 0 度や 180 度の周辺で、CP 位相の不定性が小さくなっていることがわかる。これは、CP 位相が $\sin \delta$ の形で主に振動確率に寄与しているためである。 $\sin \delta$ の項はニュートリノの振動確率と、反ニュートリノの振動確率では、逆符号で寄与するため、CP の破れを強く反映する。0 度や 180 度近辺ではその値が小さいことから、不定性が大きくなるように思えるが、不定性は δ の変化に対する、振動確率の変化を見ているため、0 度や 180 度近辺が最も不定性は小さくなっている。

(d) の SK を増強した実験計画では、CP 位相の不定性が大きな領域があるが、T2KK 実験や T2KO 実験では、その領域の不定性が緩和されている。この不定性の大きな領域は、CP 位相が振動確率に、主に $\sin \delta$ の形で寄与するため、 δ と $180 - \delta$ の識別能力が低下することが、その原因となっている。この縮退は $\cos \delta$ が振動確率に寄与するエネルギー領域、つまり、遷移確率がピークとなる領域の両端のスロープ部分でのイベント数を測定することで、 $\cos \delta$ の寄与を測定し、 δ と $180 - \delta$ の縮退を解くことができる。基線長の長い T2KK 実験や T2KO 実験では、T2K 実験に比較して使用するニュートリノのエネルギースペクトルの幅が広くなり、より広いエネルギー領域のイベント数が測定できる。そのため、 $\cos \delta$ が遷移確率に寄与する領域のイベント数を評価しやすくなり、結果、 δ と $\delta - 180$ の縮退を解きやすくなる。T2KK 実験や T2KO 実験では CP 位相の測定能力が低い δ^{true} の領域でも、CP 位相の不定性が悪化しなかったのはこの為である。 $\cos \delta$ の項はニュートリノでも反ニュートリノでも同じように振動確率に寄与するため、図 4 でも図 3 と同様に結果になっている。

図 3 と図 4 より、多くの δ^{true} の領域で、ニュートリノと反ニュートリノの照射量の比が 3.5:1.5 ~ 1.5:3.5 の時に CP 位相の不定性が小さくなることが分かる。これは従来言われていたことの追認となる。しかし、CP 位相の測定能力が低い領域では照射量の比が 4.5:0.5 でも同じ結果になっている。これはニュートリノの照射量を多くすることで、 $\cos \delta$ の寄与がより鮮明になり、結果的に不定性が小さくなったものと思われる。図 3 と図 4 が同じ傾向であることから、CP 位相の測定に質量階層性の違いからくる差異が大きく影響しないことが分かる。

反ニュートリノに照射量の一部を割り振ると CP 位相の不定性が下がる理由であるが、詳しく解析を行うと、CP 位相の差異を吸収し、同じような遷移確率を実現するために、MNS 行列の最小混合角 (θ_{13}) と最大混合角 (θ_{23}) が協調して変化していることが分かった。そして、ニュートリノを照射した時と、反ニュートリノを照射した時とでは、CP 位相の差異を相殺するために混合角が変化する方向が逆になっていることが分かった。そこで、二つのビームの照射量を同程度にすることで、混合角の変化を強く制限でき、結果的に CP 位相の不定性がより小さくなっていることが分かった。しかし、CP 位相の不定性が大きな領域、例えば $\delta^{\text{true}} \sim 60$ 度では、この 2 つの混合角が大きく変化しなくても、CP 位相の差異を吸収できていた。そのため、ニュートリノと反ニュートリノの双方を用いても、混合角の変化量が少ないため、CP 位相を制限しきれていなかった。しかし、この領域でも、ニュートリノを照射した場合、混合角の変化量は乏しいとはいえず反ニュートリノを照射した時よりも変化がみられるので、ニュートリノの照射量を多めにすることで、状況が改善することが分かった。T2KK 実験、T2KO 実験において、これら、CP 位相の決定能力と他のパラメータの関係を現象論的に示したのは本研究が初めてと思われる。

(3) 研究の波及効果

① 上記 2 点の結果をまとめた論文を学術雑誌に投稿し受理されている (主な発表論文の項参照)。発表した論文は、発表後、これまでに他の研究者による 5 編の論文にて引用されている。

② 本研究を含む申請者を含む研究グループが提案した T2KK 実験全体の現在の評価について言及しておく。SK の隣接地区に建設予定の大型水チェレンコフ光観測装置 Hyper-Kamiokande (HK) にニュートリノを照射する実験 T2HK 実験が計画されている。現在、T2KK 実験は T2HK 実験

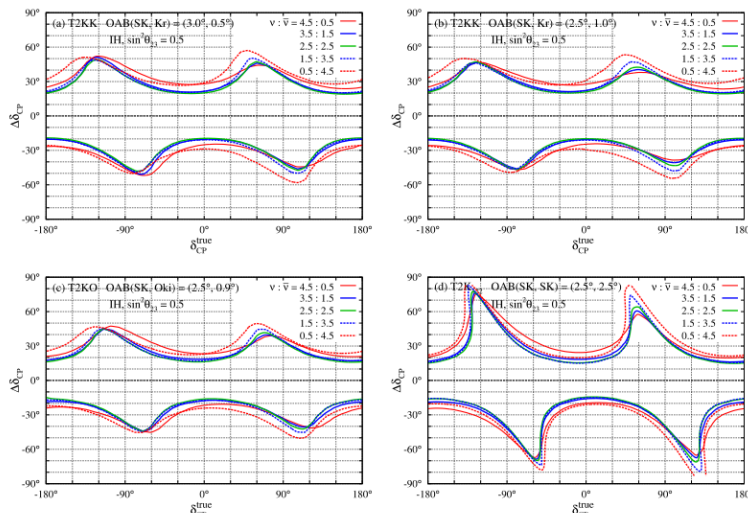


図 4 IH を仮定した際の各実験の CP 位相の誤差

の拡張実験の1つとして T2HKK 実験と呼ばれている。文献⑦や⑧内で、本研究計画の成果として発表された論文ではないが、T2KK 実験に関する我々の研究が引用されている。この事実より、本研究が示した結果は、将来的に T2HKK 実験の遂行に対し、基礎的な研究として、その結果が波及していくと思われる。

(4) 今後の展望

本研究は T2HKK 実験が実施される際には、その基盤となる研究であると思っている。今後、HK 建設などに伴い、更に注目を集める実験計画であると思われる。

T2KK 実験、T2KO 実験に対する、日本国内、日本韓国間の地殻構造を考慮にいたした時に生じる密度変化の不連続性や物質効果の不定性が、これら実験の物理能力にどの程度の影響があるか評価するという、本研究計画の第二の目的がまだ実施途中である。例えば、文献⑨にあるように、既に他の研究者グループも興味をもって、解析を始めているので、今後継続的に研究を実施していく必要があると思われる。

<引用文献>

- ① “Solving the neutrino parameter degeneracy by measuring the T2K off-axis beam in Korea”, K.Hagiwara, N.Okamura, K.Senda, Phys. Lett. **B637**, 266–273 (2006).
- ② “Physics potential of T2KK: An extension of the T2K neutrino oscillation experiment with a far detector in Korea”, K.Hagiwara, N.Okamura, K.Senda, Phys. Rev. **D76**, 093002 (2007).
- ③ “Resolving neutrino mass hierarchy and CP degeneracy by two identical detectors with different baselines”, M.Ishitsuka, et.al., Phys. Rev. **D72**, 033003 (2005).
- ④ “Physics potential of a far detector in Oki Island along the T2K baseline”, K.Hagiwara, T.Kiwanami, N.Okamura, K.Senda, JHEP1306 036 (2013).
- ⑤ “Re-evaluation of the T2KK physics potential with simulations including backgrounds”, K.Hagiwara, N.Okamura, JHEP07 031 (2009).
- ⑥ “The earth matter effects in neutrino oscillation experiments from Tokai to Kamioka and Korea”, K.Hagiwara, N.Okamura, K.Senda, JHEP09 082 (2011).
- ⑦ “Physics Potentials with the Second Hyper-Kamiokande Detector in Korea”, Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration, arXiv:1611.06118 [hep-ex].
- ⑧ “Hyper-Kamiokande Design Report”, Hyper-Kamiokande Collaboration, arXiv:1805.04163 [physics.ins-det].
- ⑨ “Matter density profile effects on neutrino oscillations at T2HK and T2HKK”, S.M.Sedgwick, S.F.King, S.J.Parke, N.W.Prouse, arXiv:1904.10232[hep-ph].

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

1. Revisiting T2KK and T2KO physics potential and ν_μ -anti- ν_μ beam ratio.
K.Hagiwara, P.Ko, N.Okamura, Y.Takaesu
Eur.Phys.J.C77 (2017) no.3, 138. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4684-1
(査読あり)

[学会発表] (計2件)

1. Revisiting T2KK and T2KO physics potential and ν_μ - anti- ν_μ beam ratio.
Y.Takaesu(登壇者), K.Hagiwara, P.Ko, N.Okamura
NuFact15, XVII International Workshop on Neutrino Factories and Future Neutrino Facilities (Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, Brazil) Aug.10-15, 2015
2. T2KK および T2KO 実験での質量階層性、CP 位相測定の可能性。
高江洲義太郎(登壇者), 岡村直利, 萩原薫, Pyungwon Ko
2014 年 日本物理学科秋季大会(佐賀大学)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。