

近未来ニュートリノ振動実験に関連する現象論

(研究課題番号 16540260)

平成16年度～平成17年度科学研究費補助金(基盤研究C(2))

研究成果報告書

平成19年3月

研究代表者 安田修

(首都大学東京理工学研究科助教授)

研究組織:

研究代表者	安田 修	首都大学東京理工学研究科助教授
研究分担者	南方久和	首都大学東京理工学研究科教授

研究経費:

平成 16 年度	2,000 千円
平成 17 年度	1,600 千円
合計	3,600 千円

1 はしがき

1998年のスーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ問題の解決、2002年のカムランドによる太陽ニュートリノ問題の最終解決により三世代のニュートリノ振動の枠組における問題の焦点は第三の混合角である θ_{13} の決定となったが、その後、2003年に研究代表者らが柏崎刈羽原子力発電所における原子炉ニュートリノ実験(KASKA計画)を想定して θ_{13} の測定についての具体的な議論を行ない、原子炉ニュートリノ実験が世界的な関心の的となった。本研究では、主として原子炉ニュートリノ実験ならびに加速器による長基線実験の現象論的研究を行なった。KASKA計画に関しては、本研究期間終了後の2006年7月に実験計画書(Letter of Intent for KASKA)がまとめられたが、その後残念ながらKASKA計画の予算申請は不採択となり、KASKA計画が実現される見込みは当面なくなった。しかしながら、本研究の中の原子炉ニュートリノ実験の現象論的研究結果は、実現が予定されているDouble CHOOZ等の他の原子炉実験にもKASKA計画と同様に役に立つものがほとんどで、本研究の成果自体は意義のあるものとして残っている。

2 研究期間(平成16年度ー平成17年度)内の研究成果

- 炉が複数個ある場合の原子炉ニュートリノ振動実験における $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度の評価(安田)

この研究では原子炉が一般に複数個、測定器が近距離と遠距離に最低1個存在する場合に、全イベント数の情報のみを用い(レート解析)、主として解析的な手法により $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度を議論した。その結果、以下のことがわかった:

- 1) 日本で提案された柏崎刈羽原発でのニュートリノ振動実験(KASKA計画)は、その反電子ニュートリノフラックスが世界最大である一方、原子炉が複数個(7基)存在することによる付加的不定性の存在が懸念される。しかし、その不定性は測定器を複数箇所(近距離に2個、遠距離に1個)に設置することにより問題とならないことを示した。又、KASKA計画の場合に、近距離測定器・遠距離測定器をそれぞれどこに設置すると最高の感度が得られるかを、数値的に解析して感度の等高線を引くことにより議論した(図1参照)。本研究期間の終了後、残念ながらKASKA計画の予算要求が却下され、KASKA計画は当面実現されることはなくなったが、世界の他の原子炉実験でも複数個の炉が存在するために、本研究の結果は意義のあるものとなっている。又、 $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度の等高線を描く方法は、その後Double CHOOZ実験に対しても行われており、本研究の結果はさまざまな方面に影響を与えている。
- 2) 原子炉が1基の実験では、レート解析を行った場合、 $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度が、測定器固有の非相関系統誤差 σ_u でほとんど決定され、現実的な測定器の系統誤差を仮定することにより測定精度の限界値を導いた。このことから、 σ_u を0.6%以下としなければ、感度を0.02以下には出来ないことを示した。

(上記課題は素粒子原子核研究所・日本学術振興会特別研究員 杉山弘晃氏、東北大ニュートリノ科学研究センター末包文彦氏、カリフォルニア工科大(当時)G.A. Horton-Smith氏との共同研究)

- 原子炉ニュートリノ振動実験におけるスペクトル解析による $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度の評価(安田)

レート解析を行った場合の $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度に関する前述の解析的結果を、エネルギー・スペクトル解析による場合に拡張した。その結果、 $\sin^2 2\theta_{13}$ の測定精度は測定器固有の系統誤差のうち、エネルギービン間に相関するものとエネルギービン間に非相関のもの両方に依存し、エネルギービン間に非相関の系統誤差が非常に小さくならないとレート解析による限界値を大幅に改善することが難しいことがわかった。さらに、その測定精度の、主にビンに相関する系統誤差に依存する部分と、主にビンに相関しない系統誤差に依存する部分を、統計誤差が無視できる場合に、原子炉からの、近距離の測定器と遠距離の測定器のそれぞれの距離の関数として数値的に求めた(図2参照)。それによると、ビンに相関する系統誤差が非常に小さく、かつイベント数が非常に大きい場合には、近距離の測定器を、

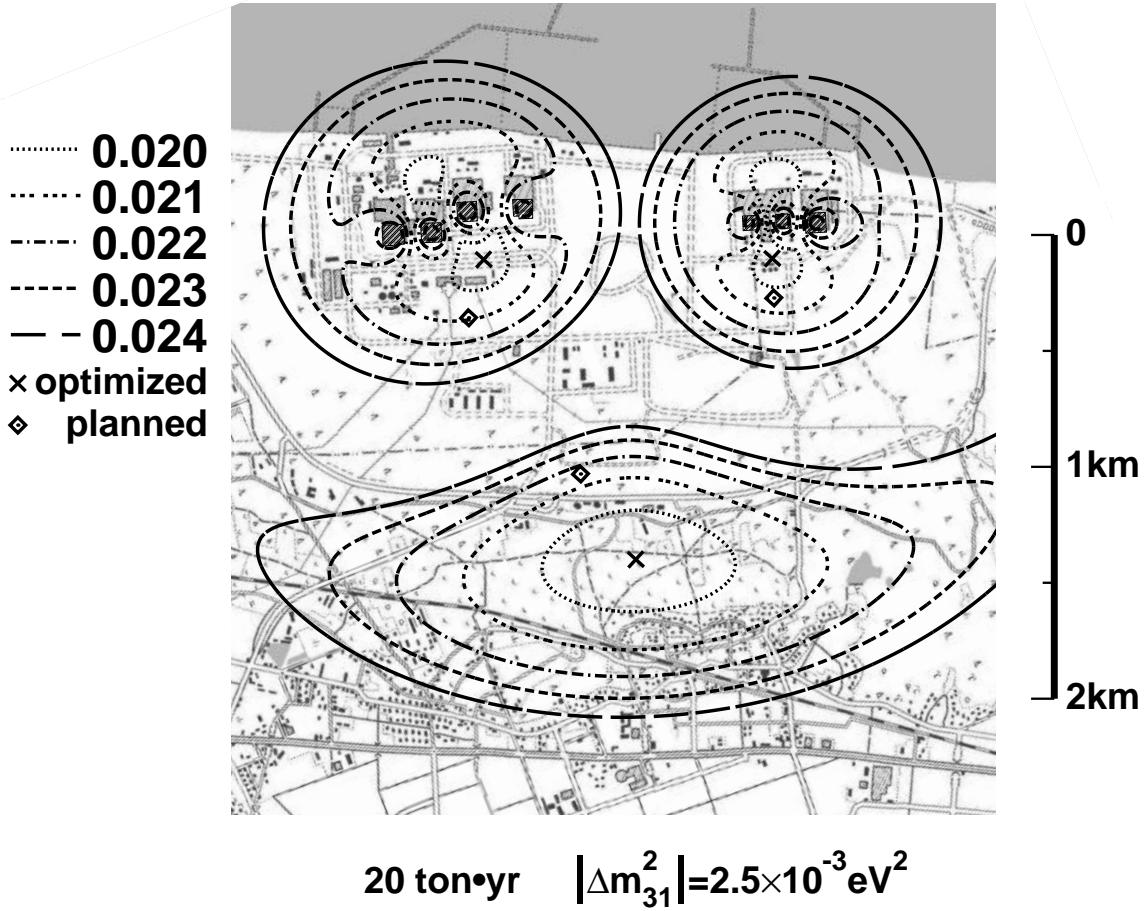


図 1: KASKA 計画の場合の $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度の等高線。実験の計画段階での測定器の位置、最適化された場合の測定器の位置も記されている。

それほど原子炉の近くに置く必要はなく、むしろエネルギースペクトルの山と谷を強調するような配置にした方が有利であることがわかった。

(上記課題は素粒子原子核研究所・日本学術振興会特別研究員 杉山弘晃氏との共同研究)

- 原子炉ニュートリノ振動実験における $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度を改善するための新しいアイデア (安田)

θ_{13} の感度は、測定器の非相関系統誤差でほぼ決まってしまう、測定精度には限界値があることが上述の研究で明らかになっている。その限界値を超えるためのアイデアとして、同一の測定器を一箇所に複数個設置することを提案した。その場合、理論的には感度は (個数) $^{-1/2}$ に比例して改善することが言える。このアイデアは、中国の Daya Bay における原子炉実験グループによっても独立に提唱されており、Daya Bay 計画の感度が非常に良いことの本質的な理由は、同一の測定器を複数個設置していることにある。

- ニュートリノ振動パラメーターの 8 重縮退に対する新しいプロット (安田)

東海村 神岡で行われる T2K 実験でニュートリノと反ニュートリノの測定が振動最大のエネルギーで行われた場合、さらにどのような実験を行えばパラメーター縮退の問題を解決できるかを、 $(\sin^2 2\theta_{13}, 1/s_{23}^2)$ 平面内の新しいプロットを導入することによって議論した。これまでパラメーター縮退問題の議論には見通しの良いグラフはなかったが、この新しいプロットでは、パラメーター縮退問題に現れる曲線がすべて 2 次曲線となり、交点の振る舞い等の性質が比較的簡単に議論できるようになった (図 3 参照)。その結果、T2K や米国の NO ν A 実験で振動最大よりも低エネルギーで実験することが現実的に可能であれば、種々の不定性を解決する可能性があることを示した。それ以外に $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の測定が有効であることも示した。

- 新しい物理がある場合の長基線実験の現象論 (安田)

標準模型を超える物理が存在する場合、その兆候は標準模型のエネルギースケールでは標準模型と高いエネルギースケールの比により抑制されるが、量子力学的干渉を使うニュートリノ振動では、その微小な効果が観測できる可能性がある。この研究では現象論的にフェルミオンの 4 次の有効相互作用を仮定し、その係数に関する他の実験からの制約を課してニュートリノ振動に与える新しい物理の影響を考察した。新しい物理の効果は、この設定のもとでは、ニュートリノの生成点と検出点におけるものとニュートリノの伝播中におけるものが考えられるが、後者に対する現在の制限が前者に対するものよりずっと弱く、大きい可能性があるため、後者のみを議論した。その結果、質量による標準的なニュートリノ振動では説明できないほど大きな振動確率が観測される可能性があることを、現在進行中のアメリカの MINOS 実験 ($\nu_\mu \rightarrow \nu_e$) や、将来計画されているニュートリノファクトリー ($\nu_e \rightarrow \nu_\mu$, $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$) 等の基線の長いニュートリノ振動実験に対して示した。又、一定密度の物質中でのニュートリノ振動確率の解析的表式に対して知られていた木村-高村-横枕の方法を拡張し、新しい物理の効果が伝播中にある場合に、振動確率の解析的表式を与えた。さらに、その表式と、低エネルギー・高エネルギー極限での振る舞いから、上記の結果が得られる理由について直感的な説明を試みた。

(上記課題は首都大理工学研究科 北澤敬章氏、素粒子原子核研究所・日本学術振興会特別研究員 杉山弘晃氏との共同研究)

- 高エネルギー宇宙ニュートリノ振動の現象論 (安田)

活動銀河核等からの高エネルギーニュートリノのフレーバーの比は、新しい物理を探る可能性として近年注目されている。ほとんどの場合、地球で観測される ν_e , ν_μ , ν_τ のフラックスは等しくなることが知られているが、強い磁場がニュートリノ源付近に存在してかつニュートリノに比較的大きな磁気モーメントがある場合には、 ν_e とそれ以外のフラックスに有意な差が出る状況が存在することが断熱近似の範囲内で示された。しかし、その議論には断熱近似が正当化できること、特定の磁場のプロファイルを用いていること等々、色々な仮定があり、それらの吟味についての研究を継続中である。

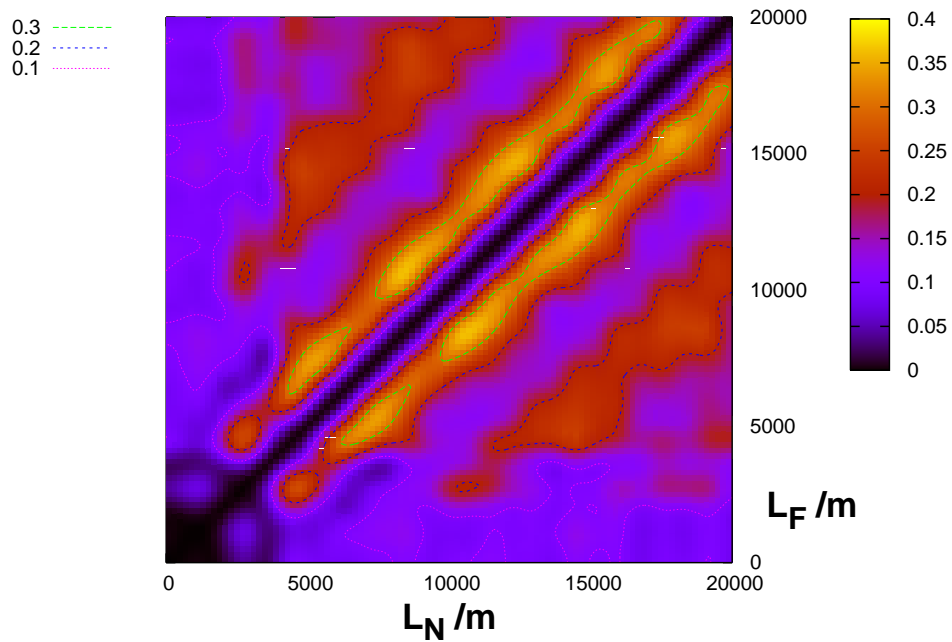
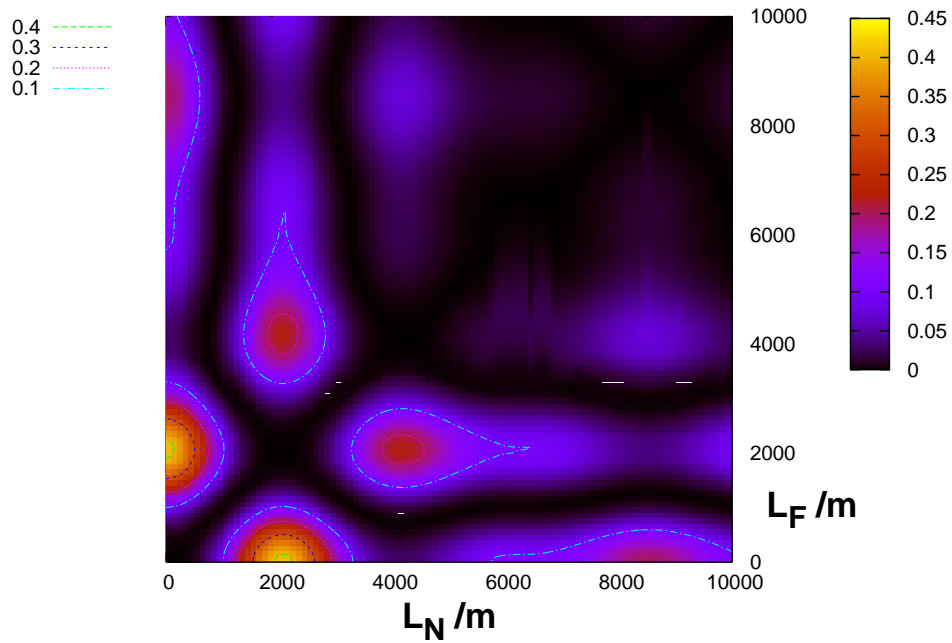


図 2: スペクトル解析による $\sin^2 2\theta_{13}$ の感度の、原子炉から近距離の測定器までの距離 L_N と遠距離の測定器までの距離 L_F に関する依存性。(上図): 主にピンに相関しない系統誤差 σ_{dB} に依存する寄与、(下図): 主にピンに相関する系統誤差 σ_{db} に依存する寄与で、感度は (上図の値) / [$\sigma_d^2 b / (\# \text{ bin})$] + (下図の値) / [$\sigma_d^2 b / (\# \text{ bin}) + 0.5\sigma_d^2 B$] に反比例する。

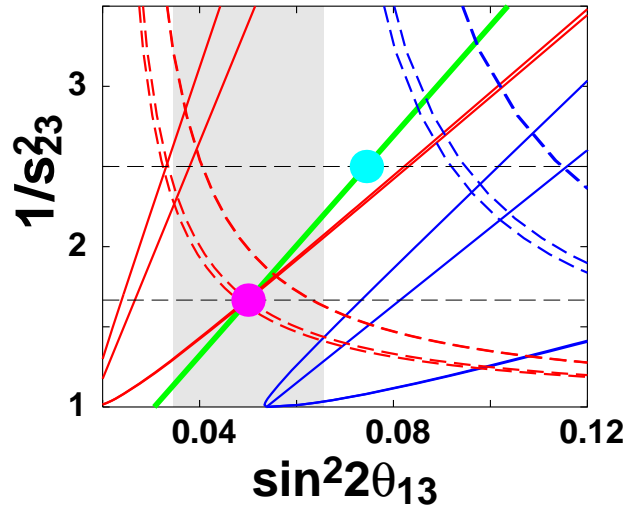


図 3: 新しいプロットによるパラメーター縮退解決の様子。実線の直線は JPARC のニュートリノと反ニュートリノ双方の出現確率により決定されるもので、ニュートリノの消失確率から求まる $\sin^2 2\theta_{23}$ の値と組み合わせると 2 つの点が解として残る。実線の曲線は異なる E/L を持つ実験のニュートリノの出現確率によって与えられるもの、灰色の帯領域は原子炉実験から得られるもの、破線の曲線はベータビームによる $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ の出現確率によって得られるもので、後二者が θ_{23} のパラメーター縮退を解くのに有効であることがわかる。

- 神岡・韓国 2 検出器系によるニュートリノ質量パターンと CP 位相の同時決定 (南方)

東海村に建設中の Japan Accelerator Research Complex (J-PARC) からニュートリノビームを神岡に向けて発射し、これをスーパーカミオカンデで検出する Tokai-to-Kamioka (T2K) 実験が 2009 年度に稼働予定である。この実験はレプトンフレーバー混合で唯一残された未知の混合角 θ_{13} を測定することを主目的としている。 θ_{13} がこの実験で測定可能なほど大きかった場合には小林・益川型のレプトン CP 位相の測定に進むことが可能で、このため陽子ビーム強度を 4MW に増強し、検出器として 1 メガトンの体積を持つハイパーカミオカンデの建設を伴う T2K の第 2 期実験が計画されている。ところが、T2K は基線長が約 300 km と短いために現在まで未決定のニュートリノ質量パターンを分解できず、このため、質量パターンの不定性が CP 位相の効果とからんで CP 対称性が破れているのかどうか曖昧になってしまうことが知られている。

平成 16-17 年度の研究において、1 メガトンの体積を持つハイパーカミオカンデを二分割し、一つを神岡に、他の一つを J-PARC から約 1000 km 離れた韓国内の適当な場所に設置するという新しい可能性を提起した。両検出器をビーム軸から 2.5 度の同一角度に設置することによって、(ニュートリノ振動がなければ) 全く同一のエネルギー分布をもつビームを受けることが可能になる。神岡検出器が第 1 振動極大に、韓国検出器が第 2 振動極大に近い距離に設置されていることにより、両検出器におけるニュートリノ振動によりエネルギースペクトルの変形の度合いが大きく異なる。この性質を使って両検出器のデータを比較することにより CP 位相の効果と質量パターンの不定性に関係した物質効果を高感度で分解できることを示した。この韓国に設置する第 2 検出器のアイデアは国際的な注目を集めることになり、提案から半年を経た時点 (2005 年 11 月 18-19 日) でソウルのコリア高等研究所 (KIAS) において国際ワークショップが、さらに引き続いて 2006 年 7 月 13-14 日の両日ソウル国立大学において第 2 回 T2KK 国際ワークショップが開催されるに到った。

(上記課題は東大宇宙線研 梶田隆章氏、米国・インディアナ大学 石塚正基氏、およびブラジル・リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志氏との共同研究)

- 超新星ニュートリノを使う CPT 非保存の探索 (南方)

超新星からのニュートリノはニュートリノ・反ニュートリノの混成ビームであり、このため、電子型、

反電子型、ミュー・タウ型の3種類のニュートリノのエネルギースペクトルの分解・決定によってCPT非保存の探索が可能になる。今年度の研究では初めて32種類のCPT保存・非保存パターンの分類を行い、この方法を実行する場合に必要な各ニュートリノスペクトルの基本的公式を導いた。この結果を使いどのスペクトルのどの性質の決定がCPT非保存の発見にとって最も重要であるか、さらには、 θ_{13} の測定が行われた場合にどれだけニュートリノスペクトルのパターンの絞り込みが可能であるかを明らかにした。

(上記課題は博士前期課程大学院生 内波生一氏との共同研究)

- クォーク・レプトン相補性(南方)

素粒子の標準模型において、クォークとレプトンは互いに互いを支え合う構成要素として存在する(アノマリー相殺機構)。また、大統一理論は強い力、弱い力、電磁気力の3力の統一されるエネルギースケールでクォークとレプトンが区別できず、互いに移り変わる世界が出現すると教えている。最近、このクォークとレプトン間の関係を新たな角度から捉え直そうという試み、「クォーク・レプトン相補性」が提唱され注目を集めている(Minakata-Smirnov, Raidal)。これはクォークセクターの θ_{12} (カビボ角)とレプトンセクターの θ_{12} (太陽角)との間に存在するカビボ角+太陽角=45度という近似的な経験的関係式を大統一の立場から解釈を与えようというアプローチである。これはクォーク・レプトンの1-2セクター間に非自明な関係が存在し、ここに最大角が潜んでいることを意味しており、大気2-3セクターにある最大角と合わせて、新しい双極大角仮説を強く示唆している。この仮説の意味するものやこのクォーク・レプトン相補性が埋め込まれた統一模型の構築などの様々の方向に向かって活発な研究が始まっている。

(上記課題はトリエステ・理論物理学国際センターのAlexei Smirnov氏との共同研究)

- 原子炉ニュートリノ実験による θ_{12} の精密測定法(南方)

2003年に原子炉ニュートリノ実験による θ_{13} の測定についての新しいアイデアとその意義についての指摘がなされ(南方・杉山・安田・井上・末包)、世界的な原子炉ニュートリノ実験計画ブームの発端となった。今年度はこれに引き続き、原子炉ニュートリノ実験による θ_{12} の精密測定法に関する研究を行った。例えば、上記のクォーク・レプトン相補性仮説の検証はこのような θ_{12} の精密測定を必要とする。クォークセクターのカビボ角($\sin^2\theta_C$)が約1%の精度で測定されているのに対して、レプトンセクターの θ_{12} の測定精度はこの10-20倍程度の大きな誤差をもっている。将来構築されるであろうクォーク・レプトンの統一理論の検証にもこの両セクターの θ_{12} の同程度の測定精度が必要である。この研究ではニュートリノ振動の第1振動極大を与える距離である柏崎刈羽原発から約60kmの地点にカムランド級の測定器(この設定をSADOと略称)を置いて6年間測定すれば、($\sin^2\theta_{12}$)を約2%の精度で測定可能であることを見いだした。これは図に示されているように、世界最高の感度を達成すると思われていた低エネルギー太陽ニュートリノ測定による方法を凌駕するものである。

(上記課題はブラジル・リオデジャネイロカトリック大学 布川弘志、およびサンパウロ大学 R. Zukanovich-Funchal, W. J. C. Teves 両氏との共同研究)

- 長基線加速器実験による θ_{23} 測定(南方)

レプトンフレーバー混合行列の θ_{23} 、特にその最大角からのずれは θ_{13} の小ささと関連して対称性の存在を暗示していて興味もたれている。これを視野において長基線加速器実験による θ_{23} 決定の問題に関する研究を行った。JPARC-SK長基線加速器実験においてミューニュートリノの消失モードの測定実験によって $\sin^2 2\theta_{23}$ は1%の精度で決定可能であると信じられている。にもかかわらず、 $\sin^2\theta_{23}$ の決定精度は10-20%程度にとどまる。この理由を分析し、二つの主要原因を特定した。(1) $\sin^2 2\theta_{23}$ から $\sin^2\theta_{23}$ への変換におけるJacobianが最大角付近で大きな値をとること、(2) θ_{23} にまつわるパラメータ縮退が最大角付近で両octantsの解を混同させ、精度悪化を招く。この後者の問題を解決するためには θ_{23} パラメータ縮退を分解する必要があるが、これについては上述のその後の研究において二つの具体的解決方法を提案した。

(上記課題は素粒子原子核研究所・日本学術振興会特別研究員 杉山弘晃氏、当時の博士前期課程大学院生 園山正志氏との共同研究)

- ニュートリノ振動における CP・T 非保存の統一像 (南方)

2002 年度の研究で「双確率空間における統一 CP・T ダイアグラム」を導入した。同時にこのダイアグラムのベースボールダイヤモンド型構造を説明する関係式として CP-CP、および T-CP 関係式を導いた。今年度の研究ではこの CP-CP、および T-CP 関係式が等価であることを証明し、ニュートリノ振動における CP・T 非保存の統一的記述を打ち立てた。CP-CP、および T-CP 関係式からの高次補正によるずれの計算も行われた。

(上記課題はスエーデンの AlbaNova University Center, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Physics, Division of Mathematical Physics から派遣されてきた留学生 Martin Blom 氏との共同研究)

3 公表論文リスト

1. O. Yasuda:

“Reactor measurements of θ_{13} ”, AIP Conf. Proc. **721** (2004) pp 190-193 [hep-ph/0309333].

2. M. Chiba, T. Kamijo, O. Yasuda, Y. Chikashige, T. Kon, Y. Takeoka and R. Yoshida, “Salt neutrino detector for ultrahigh-energy neutrinos”, Phys. Atom. Nucl. **67** (2004) 2050.

3. O. Yasuda:

“Measurement of $\sin^2 2\theta_{13}$ by reactor experiments and its sensitivity”, Proceedings of the 32nd Coral Gables Conference (World Scientific, Singapore, 2005, eds T. Curtright, A. Perlmutter and S. Mintz) (2005) pp 273-280 [hep-ph/0403162].

4. O. Yasuda:

New plots and parameter degeneracies in neutrino oscillations, New Journal of Physics, 6 (2004) 83-1-27 [hep-ph/0405005].

5. O. Yasuda:

“Towards exploring U_{e3} ”, Proceedings of 5th Workshop on Neutrino Oscillations And Their Origin (World Scientific, Singapore, 2005, eds Y. Suzuki, M. Nakahata, S. Moriyama, and Y. Koshio) pp 212-219 [hep-ph/0405222].

6. H. Sugiyama, O. Yasuda, F. Suekane, G.A. Horton-Smith:

Systematic limits on $\sin^2 2\theta_{13}$ in neutrino oscillation experiments with multi-reactors, Physical Review D **73** (2006) 053008-1-13 [hep-ph/0409109].

7. O. Yasuda:

“Parameter degeneracies and new plots in neutrino oscillations”, Nuclear Physics Proceedings Supplement **143** (2005) 528 [hep-ph/0412404]

8. O. Yasuda:

“Degeneracy and strategies of long baseline and reactor experiments”, Nuclear Physics Proceedings Supplement **149** (2005) 170 [hep-ph/0412405].

9. H. Sugiyama and O. Yasuda:

“A formula for the sensitivity to $\sin^2 2\theta_{13}$ in reactor experiments with a spectral analysis”, arXiv:hep-ph/0508090.

10. K. Long, M.D. Messier, O. Yasuda, “Summary of the neutrino oscillations working group at NuFact05”, Nuclear Physics Proceedings Supplement **155** (2006) 102-110
11. T. Ota, O. Yasuda:
“Solving the degeneracy by a neutrino factory with polarized muon beam” Nuclear Physics Proceedings Supplement **155** (2006) 174-175.
12. H. Minakata:
“Toward Exploring Unknowns in the Lepton Flavor Mixing”, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **137** (2004) 74.
13. H. Minakata:
“Overview of Degeneracies”, AIP Conf. Proc. **721** (2004) 206-210.
14. H. Minakata:
“New views on the problem of CP violation”, Proceedings of the 2nd International Workshop on Neutrino Oscillations in Venice (NO-VE 2003), 303-320 [hep-ph/0402197].
15. M. Blom and H. Minakata:
“Unity of CP and T Violation in Neutrino Oscillations”, New Journal of Physics 6 (2004) 130-1-12 [hep-ph/0404142].
16. H. Minakata and A. Yu Smirnov:
“Neutrino Mixing and Quark-Lepton Complementarity”, Physical Review D70 (2004) 073009-1-12 [hep-ph/0405088].
17. H. Minakata, M. Sonoyama, and H. Sugiyama:
“Determination of θ_{23} in Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiments with Three-Flavor Mixing Effects”, Physical Review D70 (2004) 113012-1-13 [hep-ph/0406073].
18. H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal:
“Reactor Measurement of θ_{12} ; Principles, Accuracies and Physics Potentials”, Physical Review D71 (2005) 013005-1-17 [hep-ph/0407326].
19. H. Minakata, H. Nunokawa, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal:
“Reactor Measurement of θ_{12} ; Secret of the Power”, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **145** (2005) 45-48 [hep-ph/0501250].
20. M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata, and H. Nunokawa:
Resolving Neutrino Mass Hierarchy and CP Degeneracy by Two Identical Detectors with Different Baselines, Physical Review D72 (2005) 033003-1-14 [hep-ph/0504026].
21. H. Minakata and S. Uchinami:
Testing CPT Symmetry with Supernova Neutrinos, Physical Review D72 (2005) 105007-1-14 [hep-ph/0505133].
22. H. Minakata:
“Quark-Lepton Complementarity; a Review”, Proceedings of the 11th International Workshop on Neutrino Telescopes, 83-97 [hep-ph/0505262].
23. M. Ishitsuka, T. Kajita, H. Minakata and H. Nunokawa, :
“Establishing neutrino mass hierarchy and CP violation by two identical detectors with different baselines using the J-PARC nu beam”, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **155**, 168 (2006) [hep-ph/0510166].

24. H. Minakata:
“Resolving Degeneracy in Neutrino Oscillation Parameters”, *Physica Scripta T* 127 (2006) 73-77.
25. H. Minakata, . Nunokawa, S. J. Parke, and R. Zukanovich Funchal:
“Determining ν Mass Hierarchy by Precise Measurements of two Δm^2 in ν_e and ν_μ Disappearance Experiments”, *Physica Scripta T* 127 (2006) 33-34.
26. T. Kajita, M. Ishitsuka, H. Minakata and H. Nunokawa:
“Resolving mass hierarchy and CP degeneracy by two identical detectors in Kamioka and Korea”, *Journal of Physics Conference Series* **39** (2006) 332-334.
27. K. Hiraide, H. Minakata, T. Nakaya, H. Nunokawa, H. Sugiyama, W. J. C. Teves and R. Zukanovich Funchal:
Resolving θ_{23} Degeneracy by Accelerator and Reactor Neutrino Oscillation Experiments, *Physical Review D* 73 (2006) 093008-1-13 [hep-ph/0601258].
28. H. Minakata and S. Uchinami:
“Recoilless Resonant Absorption of Monochromatic Neutrino Beam for Measuring Δm_{31}^2 and θ_{13} ”, *New Journal of Physics*, 8 (2006) 143-1-23 [hep-ph/0602046].
29. M. Aoki *et al.*:
“Letter of intent for KASKA: High accuracy neutrino oscillation measurements with anti- ν_e s from Kashiwazaki-Kariwa nuclear power station”, arXiv:hep-ex/0607013.
30. 田村詔生、末包文彦、安田修：
“原子炉を用いたニュートリノ混合角 θ_{13} の精密測定”，*日本物理学会誌* 61 (2006) pp 799-806.
31. 南方久和：
“ニュートリノ振動とニュートリノ質量”，*パリティ 特集「物理科学、この20年」* Vol. 20, No. 11 (2005) pp 24-25.

4 口頭発表リスト

4.1 国際研究会

1. O. Yasuda:
“Parameter degeneracies and new plots in neutrino oscillations”, Poster presentation given at 21st International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2004), College de France, Paris, June 13-19, 2004.
2. O. Yasuda:
“Degeneracy and strategies of long baseline and reactor experiments”, Invited talk given at 6th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams (NuFact 04), Osaka University, Osaka, July 26-August 1, 2004.
3. O. Yasuda:
“Parameter degeneracy and strategies of future long baseline”, Invited talk given at A topical conference on elementary particle physics and cosmology Wednesday - Sunday, 15 - 19 December 2004 Coral Gables and Key Biscayne, Florida.

4. O. Yasuda:
 “Experimental lower bound of the sensitivity to $\sin^2 2\theta_{13}$ in reactor neutrino experiments”, Brief Comment given at IFT MiniWorkshop on Neutrino Physics 2005, Universidad Auto’noma de Madrid, May 18-20, 2005, Madrid, Spain.
5. O. Yasuda:
 “Summary of WG1 –Phenomenological issues–” Invited talk given at 7th International Workshop on Neutrino Factories and Superbeams (NuFact 05), Laboratori Nazionali di Frascati, Italy, June 21-26, 2005.
6. O. Yasuda:
 “Introduction to sub-groups –Personal view on phenomenology–”, Invited talk given at 1st International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility, CERN, Geneva, September 22-24, 2005.
7. O. Yasuda:
 “Exact formula of three flavor neutrino oscillation probability and its application to high energy astrophysical neutrinos”, Invited talk given at A topical conference on elementary particle physics and cosmology, Sonesta Beach Resort Key Biscayne, Florida, USA, December 14-18, 2005.
8. H. Minakata:
 “Phenomenology of Long Baseline Experiments”, Invited Lecture given at Third International School on the Neutrino Factories and Superbeams, Tokyo Metropolitan University, Japan, July 16-24, 2004.
9. H. Minakata:
 “Accurate measurement of large mixing angles”, Talk at Neutrino Oscillation Workshop (NOW2004), Conca Specchiulla, Otranto, Italy, September 11-17, 2004.
10. H. Minakata:
 “Quark-Lepton Complementarity; a Review”, Invited Talk at Eleventh International Workshop on “Neutrino Telescopes”, Venice, February 22-25, 2005.
11. H. Minakata:
 “Long Baseline Oscillation Physics”, Talk at 20th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN05), Delphi, Greece, June 6-11, 2005.
12. H. Minakata:
 “Neutrino Masses and Mixing Constrained by Double Beta Decay”, Invited Talk at Japan-US Seminar on Double Beta Decay and Neutrino Mass, Maui, Hawaii, September 16-20, 2005.
13. H. Minakata:
 “Kamioka-Korea Two-Detector Complex; Its Power and Ideas Behind”, Invited Talk at An International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam, Seoul, Korea 18-19 November, 2005.
14. H. Minakata:
 “Quark-Lepton Complementarity; a review”, Invited Talk at The 2nd International Scoping Study Meeting of Neutrino Factory and Super-beam Facility, KEK, Japan, 23-25, January 2006.
15. H. Minakata:
 “Do Neutrinos Violate CP?”, Invited Talk given at Second International Workshop on Neutrino

4.2 国内研究会

1. 安田修 :

“ニュートリノ振動研究の現在と未来” (招待講演), 2005 年度第 18 回理論懇シンポジウム, 2005 年 12 月 25 日-27 日, 京都大学基礎物理学研究所.

4.3 学会講演

1. 安田修 :

“新しいプロットによるニュートリノ振動におけるパラメーター縮退の議論”, 日本物理学会秋季大会, 2004 年 9 月 27 日-9 月 30 日, 高知大学.

2. 安田修, 杉山弘晃 :

“レート解析とスペクトル解析による原子炉ニュートリノの $\sin^2 2\theta_{13}$ に対する実験的下限”, 日本物理学会第 60 回年次大会, 2005 年 3 月 24 日-3 月 27 日, 東京理科大学.