

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25105004

研究課題名(和文) 大気ニュートリノを用いた質量階層構造の研究と次世代研究フロンティアの発展

研究課題名(英文) Probing the neutrino mass hierarchy with atmospheric neutrinos and developing the next-generation research frontier

研究代表者

塩澤 真人(Shiozawa, Masato)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：70272523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 166,200,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーカミオカンデ装置による大気ニュートリノ観測データを用いて、三種類のニュートリノの質量の順番の研究を行った。加速器や原子炉、太陽ニュートリノを用いたニュートリノ振動実験結果を拘束条件として組み入れて、感度の向上を図った。結果、第三世代のニュートリノが第一と第二世代よりも重い質量を持つ仮説が大気ニュートリノデータをよりよく説明することがわかり、その有意度は91.9%から94.5%の範囲であった。

さらに次世代のニュートリノ研究を牽引するハイパーカミオカンデ実験計画のための、技術開発や物理感度研究を推進した。文科省に優先度の高いプロジェクトとして選ばれ、予算要求を検討する段階に到達した。

研究成果の概要(英文)：We probed the neutrino mass hierarchy by using atmospheric neutrino data in Super-Kamiokande. Additional constraints from reactor, accelerator, and solar neutrino oscillation experiments are added to the atmospheric neutrino fit to give enhanced constraints. Over the range of parameters allowed at 90% confidence level, the normal mass hierarchy is favored by between 91.9% and 94.5%.

The Hyper-Kamiokande or Hyper-K, as a straightforward extension of the Super-Kamiokande, will provide major new capabilities to make new discoveries in particle and astroparticle physics thanks to an order of magnitude increase in detector mass and improvements in photon-detection system. The Hyper-K is now a priority project listed in the Roadmap2017 of the Japanese Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). The principal project milestones include: Construction to start as early as in 2019, and Start data taking in 2026.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：ニュートリノ 核子崩壊 ニュートリノ天文学

### 1. 研究開始当初の背景

2012年以降、加速器・原子炉ニュートリノ実験により最後の未知ニュートリノ混合角 $\theta_{13}$ が $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.1$ と比較的大きな値である事が判明し、大気ニュートリノの精密測定により質量階層構造を決定できる可能性が出てきた。また発見された $\theta_{13}$ の値は、スーパーカミオカンデの検出器技術を基礎にした10倍規模のニュートリノ検出器と大強度加速器ニュートリノを組み合わせる事により、ニュートリノのCP対称性の破れの測定が可能であることを示しており、次世代実験計画の具体化が緊急の課題となった。

### 2. 研究の目的

本計画では、スーパーカミオカンデにおける高統計大気ニュートリノデータを用いて、ニュートリノの質量階層構造を始めとする振動研究を行い、世代間の混合や質量すなわち三代構造の理解を進展させる。

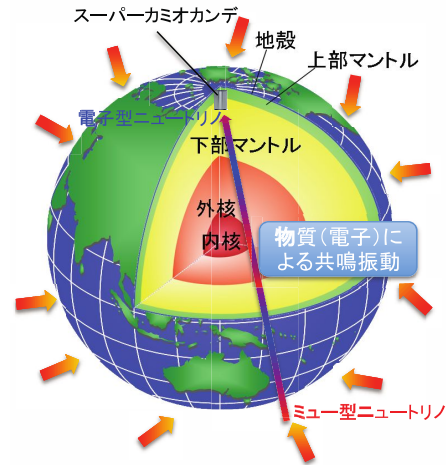
一方で牧・中川・坂田行列の最後の未知パラメータとなるCP対称性の破れの測定を主要な目的の一つとする、10倍規模の次世代実験ハイパーカミオカンデ実現に向けた包括的な要素技術開発を行う。ハイパーカミオカンデは陽子崩壊探索にも高い感度を持ち、例えば $p \rightarrow e^+ \pi^0$ の崩壊寿命に対し $10^{35}$ 年を超える感度を持つ唯一の実験提案でもある。本研究でハイパーカミオカンデ検出器の技術設計を完成させ建設開始を可能にし、本新学術研究期間後のニュートリノ研究の大きな飛躍のための布石とする。

### 3. 研究の方法

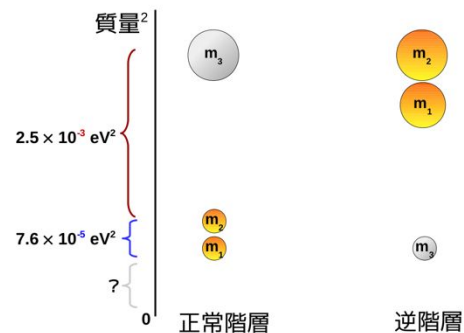
本計画では、スーパーカミオカンデにおける高統計大気ニュートリノデータを用いて、質量階層構造研究を究極化する。この作業は、加速器ニュートリノ実験を用いたニュートリノ相互作用の精度向上、太陽・加速器・原子炉ニュートリノ実験で得られるニュートリノ振動パラメータを用いる事による大気ニュートリノの共鳴振動の計算精度向上を含む。さらに電子ニュートリノ反応と反電子ニュートリノ反応を、観測量から統計的に分別することにより、感度向上を行う。以上により、特に質量階層構造を世界最高感度で決定することを目指す。またミュー型ニュートリノ消失の行き先を確定すべく、タウ型ニュートリノ出現現象を確立する。

ハイパーカミオカンデ検出器の基礎開発においては、超大型地下空洞の設計や実現性の検証および高感度光検出器の新規開発を行う。同時に、水槽構造、純水製造・循環装置、電子回路、検出器較正系等、包括的に技術要素開発を展開し、確立した測定器技術を基に本実験の技術設計を完成させる。またハイパーカミオカンデ実験による豊富な発見能力を含む、実験感度やそれらの科学的意義の研究も行う。

### 4. 研究成果



大気ニュートリノ研究における質量階層構造の決定のためには、図に示すような、地球物質効果による数 GeV の上向き電子（または反電子）ニュートリノの出現を、精度よく測定する必要がある。そのため、原子炉実験による $\theta_{13}$ の許容範囲と共に T2K 実験でのミューオンニュートリノ消失データと電子ニュートリノ発見データを解析に導入し、質量階層構造決定感度の向上を図った。同時に T2K 実験と協力して開発した最新の相互作用モデルの導入、検出器エラーの更新、これまで未使用のデータサンプルの導入も行った。さらに電子ニュートリノ反応と反電子ニュートリノ反応を分別するためのアルゴリズムを、新規に開発した。このアルゴリズムでは、反応で発生した粒子数や粒子種類（電子型かミュー型か）、ミューオン崩壊電子数など用いることが有効であることがわかった。

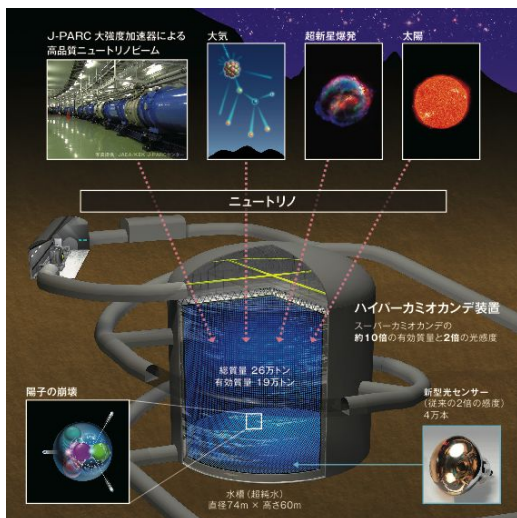


以上の改善を施した解析手法を、スーパーカミオカンデの観測データに適用し、世界最高感度でのニュートリノ質量階層構造の検証を行った。その結果、観測データは順階層（正常階層）構造により、より良く説明されることがわかった。これは図に示すように、第三世代ニュートリノ質量値 $m_3$ が、他のニュートリノ質量値に比べて最も重いというシナリオである。さらに逆階層構造の棄却優位度は91.9%から94.5%の範囲であることがわかった。また大気ニュートリノデータのみでも $\theta_{13}$ がゼロである事を2 $\sigma$ で排除することがわかった。以上の結果を論文として発表し

た[文献1]。

大気ニュートリノのミュー型ニュートリノの消失の行き先となるタウ型ニュートリノの確認は、ニュートリノ振動による三世代構造の検証となる。大気ニュートリノの最新の観測データによる検証を行い、タウ型ニュートリノが発現していないとする仮定とは4.6シグマという有意度で矛盾することがわかった。1980年代からの大気ニュートリノ欠損問題に対し、ミュー型ニュートリノがタウ型へ変身した、という答えを実験的に検証し決着をつけた。

加えて三世代ニュートリノ構造からのずれの検証研究として、第四のニュートリノの混合に対し $|U_{\mu 4}|^2 < 0.041$ ,  $|U_{\tau 4}|^2 < 0.18$ と制限をつけ[文献4]、ローレンツ不変性を破るニュートリノ振動パラメータに対しこれまでの7けた強い制限を含む結果を得て[文献5]、論文として発表した。



次世代大型ニュートリノ実験装置ハイパーカミオカンデでは、実験実現に向けた要素開発と設計最適化を進めた。より安価かつ高性能の大口径光検出器の実現は実験装置の高性能化または建設費低減のために必須であり、量子効率と構造設計を改良した50cm径高感度光電子増倍管の開発を進めた。新たにボックスライン型ダイノードを採用し、高量子効率光電面を作成し、現行実験スーパーカミオカンデで用いている光センサーに比較して、当初の期待以上の約2倍の高感度を達成していることが確認された。更に時間測定精度が現行の2.1nsecから1.1nsecに、1光電子測定精度が53%から35%と改善された。ハイパーカミオカンデ水槽で使用可能とするために耐水圧性能の試験も行い、約2倍となる耐水圧性能の向上を確認した。以上の様に光検出器開発は大きな進展を達成し、ハイパーカミオカンデ実験の高性能化または低価格化を可能とする見通しとなった。今年度の100個レベルの試作と性能試験に向けて、更なる開発と性能向上を行っていく。

検出器較正系については、光源や放射線源をあらかじめ決められた場所に自動的に配

置させる自動較正系の開発も進められ、装置の試作品を製作した。この装置のスーパーカミオカンデを用いた実証試験と改良を今後進める。他にも安価な水密構造と漏れ検知を併せ持つ水槽構造設計を進めた。純水循環系では検出器水槽内で超高純度でかつ一様な水質を実現する給水・排水配管や流速の研究を行ってきた。ハイパーカミオカンデ実験の物理研究感度の研究も精力的に行ってきた。特にJ-PARC加速器を用いた長期線ニュートリノ振動研究の感度研究は論文として出版した[文献3]。そこでは、ニュートリノのCPの破れパラメータが19度以下の不定性で決定できる見込みである事や、3(5)以上の有意性でCPの破れが発見できるCPパラメータの割合が76%(58%)である事が示された。更に $\sin^2 \theta_{23}$ の決定精度が $\sin^2 \theta_{23} = 0.5(0.6)$ の時に0.015(0.006)である事がわかった。陽子崩壊探索感度は、スーパーカミオカンデも活用した感度向上研究を行い、目標とする $10^{35}$ 年を超える感度が期待できることを確認した[文献2、3]。

作成したハイパーカミオカンデ実験計画は、日本学術会議によるマスタープランにおいて、重点大型計画に選ばれ、さらに文科省による大型計画のロードマップ2017の一プロジェクトとして、予算措置がされれば建設をすみやかに開始できる状態に到達した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計26件)

1. “Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, \*M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 97, 072001 (2018). 査読有
2. “Search for nucleon decay into charged antilepton plus meson in 0.316 megaton · years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, \*M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 96, 012003 (2017). 査読有
3. “Physics Potential of a Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment Using J-PARC Neutrino Beam and Hyper-Kamiokande”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, \*M. Yokoyama et al. (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration), Prog. Theor.

- Exp. Phys. 2015, 053C02(2015). 査読有
4. “Limits on sterile neutrino mixing using atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052019(2015). 査読有
  5. “Test of Lorentz Invariance with atmospheric neutrinos”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052003(2015). 査読有

〔学会発表〕(計 263 件)

1. “Hyper-Kamiokande”, S. Nakayama, The 26<sup>th</sup> International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2017), June, 2017, California, USA. 招待講演
2. “Super-Kamiokande”, M. Shiozawa, XVII International Workshop on Neutrino Telescope, Mar. 13-17, 2017, Venice, Italy. 招待講演
3. “Atmospheric Results from Super-Kamiokande”, R. Wendell, XXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), June 2-7, 2014, Boston, USA. 招待講演

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.hyper-k.org>

<http://www.hyperk.org>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩澤 真人 (SHIOZAWA, Masato)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号：70272523

(2) 研究分担者

鈴木 州 (SUZUKI, Atsumu)  
神戸大学・理学研究科・助教  
研究者番号：20243298

早戸 良成 (HAYATO, Yoshinari)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：60321535

横山 将志 (YOKOYAMA, Masashi)  
東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授  
研究者番号：90362441

(3) 連携研究者

竹内 康雄 (TAKEUCHI, Yasuo)  
神戸大学・理学研究科・教授  
研究者番号：60272522

田中 真伸 (TANAKA, Manobu)  
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号：00222117

中山 祥栄 (NAKAYAMA, Shohei)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：70401289

関谷 洋之 (SEKIYA, Hiroyuki)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：90402768

ウェンデル ロジャー (WENDELL, Roger)  
京都大学・理学部・准教授  
研究者番号：20647656

伊藤 好孝 (ITOW, Yoshitaka)  
名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授  
研究者番号：50272521

三浦 真 (MIURA, Makoto)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：10272519

亀田 純 (KAMEDA, Jun)  
東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：70376648

田中 秀和 (TANAKA, Hidekazu)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：00402769

他48名

(4)研究協力者

山富 二郎 (YAMATOMI, Jiro)