

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23244058

研究課題名(和文)ニュートリノ種混合現象の決着と物質優勢宇宙創成の謎への挑戦

研究課題名(英文)Conclusive measurements on neutrino oscillation and the quest for the origin of matter dominated universe

研究代表者

長谷川 琢哉 (HASEGAWA, Takuya)

大学共同利用機関法人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：40261549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,600,000円

研究成果の概要(和文)：物質優勢宇宙創成の謎に迫るべく必須の液体アルゴン三次元飛跡検出装置について、試作機を構築し特性を把握した。今回の性能評価により、同測定装置は、T2K前置ニュートリノ測定装置に必要とされる能力を有することが結論付けられた。20ktから70ktの液体アルゴン三次元飛跡検出装置を、ニュートリノ源から2300kmの超長基線長かつ大深度地下(3000m水密度相当以上)に設置して研究を行えば、ニュートリノ質量階層性、レプトンのCP対称性の研究に関して、他の計画の追隨を許さないものとなることが示された。又、大深度地下に測定装置を設置することが、陽子崩壊探索の感度向上に重要であるということが確認された。

研究成果の概要(英文)：The Liquid Ar TPC detector technology is indispensable to give an answer to the quest for the origin of matter dominated universe. With this JSPS grant in aid program, the prototype Liquid Ar TPC detector is constructed and evaluated of its performances. Based on this experience, it is concluded that this type of detector is equipped with the necessary functionality to be used as T2K near site detector. With the experimental configuration, such that the 20kt to 70kt of this type of detector is located at the distance of 2300km from the neutrino production target and at deep underground (more than 3000m water equivalent depth), it is concluded that its unprecedentedly excellent performance on neutrino mass hierarchy determination and investigation of lepton sector CP violation, is unrivaled by other similar projects. It is recognized that the deep underground site for the detector is important to reach ultimate experiment sensitivity on proton decay search.

研究分野：素粒子・高エネルギー物理学の実験的研究

キーワード：液体アルゴン三次元飛跡検出装置 物質優勢宇宙創成の謎の解明 レプトンのCP対称性の研究 陽子崩壊探索研究 ニュートリノ質量階層性の研究

1. 研究開始当初の背景

平成 21 年度に実験が開始された T2K の主研究課題はミューオンニュートリノ電子ニュートリノ転換現象の発見であった。この素粒子物理学における喫緊の課題について、日本の T2K は加速器を使用した同種の米国の実験 NOvA、又、原子炉を使用したフランスの実験 Double Chooz 及び中国の実験 Dayabay と熾烈な競争を行っていた。液体アルゴン三次元飛跡検出装置は、測定装置内を通過、或いは、測定装置内で散乱・生成されたすべての荷電粒子の飛跡の時間情報とともに空間的三次元情報を mm レベルの精度で捉え、同時に、荷電粒子のエネルギー損失の違い等から高性能の粒子種同定能力を持つ。特に T2K の主研究課題において最も必要とされる、電子、 $\mu$  識別能力は他の測定装置の追従を許さない。このことから、同装置を T2K 前置ニュートリノ測定装置として活用することにより、どの程度実験の感度を向上可能か検討することが重要であった。

実験的に裏付けられた素粒子の描像は極めて精緻なものとなり、エネルギーのスケールでは  $10^{11}$ eV、大きさでは  $10^{-17}$ m の極微のスケール、そして宇宙の進化については、ビッグバンシナリオでの宇宙の開闢から  $10^{-10}$  秒以降の領域をほぼ完全に理解しきったといえる。しかしながら未踏の領域においては人類の知的好奇心に訴える謎が未だ幾多存在する。そのひとつとして、物質優勢宇宙創成の謎、即ち、何故我々の存在をも含む宇宙において物質と反物質が同等に存在せず物質に偏っているのかという議論がある。物質優勢宇宙が実現されるためには、1)バリオ数非保存相互作用が存在すること、2)CP 対称性(粒子反粒子対称性と空間反転対称性の積)の破れをもたらし相互作用が存在すること、3)熱平衡状態からかけ離れた環境が宇宙の進化の過程で存在すること、の 3 つの条件が必須となる。3)の要件は、宇宙の急激な膨張過程において自然に満たされると考えることができるので、残りの 1)、2)の素粒子相互作用に関する素粒子実験的な立証が待たれる。2)については、インテンシティーフロンティア加速器実験によって、素粒子のメンバーであるクォークの世界においてはその存在が確立した。しかしながらこの現象を物質優勢宇宙創成に必要な CP 対称性の破れと直接関係づけるには至っておらず、他の CP 非保存の起源の更なる追求が必要となっている。然るべき状況の下、カミオカンデ、スーパーカミオカンデ、そして世界で初めて実現した加速器を使用した長基底ニュートリノ実験、K2K 等でニュートリノに有限な質量があることが確立したことにより、レプトンセクターにおいても CP 対称性が破れている可能性が生じた。レプトンセクターの CP 対称性の破れの発見の可否は T2K の主研究課題であるミューオンニュートリノ電子ニュートリノ転換現象の事象頻度によって決

定づけられる。ミューオンニュートリノ電子ニュートリノ転換現象が確認されたあかつきには、J-PARC 大強度ニュートリノ源のさらなる強度増強と、T2K 主測定装置であるスーパーカミオカンデを、素粒子標的質量の上でも、粒子測定性能でも上回る、100kt 規模の大質量液体アルゴン三次元飛跡検出装置の組み合わせにより、レプトンセクターの CP 対称性の破れをユニークな手法で探索することが可能となる。1)については、所謂、素粒子標準モデルを超え、かつ、これまでの素粒子理論構築の上で一つのガイドラインであった相互作用の統一という道のりの究極の姿である大統一理論において自然に期待される陽子崩壊というユニークな現象が正にこれに対応する。日本において、カミオカンデ、スーパーカミオカンデによりこの過程を探究する試みが行われ、陽子の寿命が  $10^{33}$  年以上であることまではわかってきた。100kt 規模の液体アルゴン三次元飛跡検出装置は、スーパーカミオカンデを凌駕する巨大質量の陽子崩壊探索装置でもあり、その統計的優位性から、さらなる長寿命領域を探索可能であり、かつ、他の測定装置技術の追従を許さない粒子測定能力により、測定装置内で起こるあらゆる陽子崩壊のパターンを高効率で同定することが可能であるため、陽子崩壊現象の詳細に渉る情報の把握が可能となる。高い粒子測定能力は大気ニュートリノ等によるバックグラウンド事象から陽子崩壊シグナル事象を確度高く弁別可能とし、このことも実験結果の質を高めることに繋がる。探索可能領域は、全ての崩壊モードに関して  $10^{35}$  年以上に至ると期待される。 $10^{11}$ eV レベルまでのエネルギーフロンティア加速器実験の測定結果から、現実的な大統一理論は、超対称性を持つべきであると結論されている。超対称性とは、大統一と共にその実在性が期待されている、標準理論を超えるためのガイドラインであり、全ての素粒子に対して、そのスピンの  $1/2$  だけ違うパートナーが存在するということを予言する体系である。この超対称性を持つ大統一理論においては、多くのモデルで、陽子がニュートリノと荷電 K 粒子に崩壊する過程の部分寿命が  $10^{35}$  年以下であると主張されており、これが事実であれば、100kt 規模の大質量液体アルゴン三次元飛跡検出装置で確実に信号事象を捉える事ができる。大統一理論の検証は、エネルギーのスケールでは  $10^{24}$ eV、大きさでは  $10^{-30}$ m のスケール、そして宇宙の開始から  $10^{-36}$  秒の領域を一気に垣間見ることを意味する。

以上より、まずは 1t 規模の質量の液体アルゴン三次元飛跡検出装置を実際に構築し、その挙動、特性を十分に把握すること。そして、同種測定装置を T2K 前置ニュートリノ測定装置として活用する可能性を模索すると同時に、物質優勢宇宙創成の謎に迫るために必要となる、100kt 規模の大質量液体アルゴン三次元飛跡検出装置の実現性確認およ

び、同測定装置を用いた際の、ニュートリノ測定精度、陽子崩壊探索の感度に関する評価を行うこととした。

## 2. 研究の目的

本研究では 1) 1t 規模の質量の液体アルゴン三次元飛跡検出装置を実際に構築し、その挙動、特性を十分に把握すること。2) 同種測定装置を T2K 前置ニュートリノ測定装置として活用する可能性を模索すること 3) “物質優勢宇宙創成の謎”に迫るべく即座に取り組むべき、“レプトンセクターの CP 対称性の破れと陽子崩壊の探索研究”に必要な 100kt 規模の大質量液体アルゴン三次元飛跡検出装置の実現性確認および、同測定装置を用いた際の、ニュートリノ測定精度、陽子崩壊探索の感度に関する評価を行うことを目的とした。

## 3. 研究の方法

1t 規模の質量の液体アルゴン三次元飛跡検出装置を実際に構築し、その挙動、特性を十分に把握する。検出装置の構築については、液体アルゴン三次元飛跡検出装置の低温容器、液体アルゴン純化装置、電荷シグナル読み出し装置、シンチレーション光読み出し光検出装置の製作を含む。作成された液体アルゴン三次元飛跡検出装置を実際に運転し、宇宙線を用いて、特性把握、性能評価を行う。上記、性能評価を踏まえて、同種測定装置を T2K 前置ニュートリノ測定装置として活用する可能性を模索し、同時に、“物質優勢宇宙創成の謎”に迫るべく即座に取り組むべき、“レプトンセクターの CP 対称性の破れと陽子崩壊の探索研究”に必要な 100kt 規模の大質量液体アルゴン三次元飛跡検出装置の実現性確認および、同測定装置を用いた際の、ニュートリノ測定精度、陽子崩壊探索の感度に関する評価を行った。

## 4. 研究成果

“物質優勢宇宙創成の謎”に迫るべく取り組む“レプトンセクターの CP 対称性の破れと陽子崩壊の探索研究”への活用が重要視されている液体アルゴン三次元飛跡検出装置について、その試作機を構築し、宇宙線による性能評価を行い、その挙動、特性を把握することに成功した。検出装置の構築にあたっては、液体アルゴン三次元飛跡検出装置の低温容器、純化装置、電荷シグナル読み出し装置、シンチレーション光読み出し光検出装置等について、測定装置の動作品質を保証するための必要要件を把握した。作成された液体アルゴン三次元飛跡検出装置は、想定されたシグナル強度で、宇宙線の飛跡を捉えることを確認した。電荷シグナル読み出し装置は宇宙線飛跡の三次元情報をとらえ、また、シンチレーション光読み出し光検出装置は、宇宙線のシグナルをとらえて、電荷シグナル読み出しに必要な同期シグナルおよび時間情報を

供給した。今回の性能評価により、測定装置の応答を模擬する計算機疑似事象は高い精度で実際の測定装置応答を再現していることが保障された。計算機疑似事象を活用した研究により、同種測定装置は、T2K 前置ニュートリノ測定装置に必要な<sup>0</sup>識別能力を有することが結論付けられた。これから必要となる、巨大質量(20kt 以上)の測定装置の実現に向けた測定装置デザイン作業、巨大検出装置を用いたニュートリノ測定の精度、陽子崩壊探索の感度に関する評価を行い、基本計画書を作成し、研究計画提案書をまとめた。20kt および 50kt の液体アルゴン三次元飛跡検出装置の技術設計を行い、20kt から 70kt (20kt + 50kt) の液体アルゴン三次元飛跡検出装置を、ニュートリノ源から 2300km の超長基線長かつ大深度地下(3000m 水密度相当以上)に設置した際、ニュートリノ質量階層性、レプトンの CP 対称性の研究に関して、他の計画の追従を許さないものであることを示した。又、大深度地下に測定装置を設置することが、陽子崩壊探索の感度向上に重要であるということが確認された。得られた成果は、学術専門誌へ投稿し、国内外の学会、研究会で発表された。

## 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 20 件)

1. "Search for short baseline  $\nu_e$  disappearance with the T2K near detector" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 91, 051102 (2015) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.91.051102

2. "Neutrino Oscillation Physics Potential of the T2K Experiment" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) PTEP 2015-4, 043C01 (2015) 査読有 DOI: 10.1093/ptep/ptv031

3. "Measurement of the Inclusive Electron Neutrino Charged Current Cross Section on Carbon with the T2K Near Detector" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. Lett. 113, 241803 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.241803

4. "Measurement of the inclusive  $\mu$  charged current cross section on iron and hydrocarbon in the T2K on-axis neutrino beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 90, 052010 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.90.052010

5. "Measurement of the neutrino-oxygen

neutral-current interaction cross section by observing nuclear deexcitation  $\mu$  rays" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 90, 0702012 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.90.072012

6. "Measurement of the intrinsic electron neutrino component in the T2K neutrino beam with the ND280 detector" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 89, 092003 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.89.092003

7. "Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter  $\theta_{23}$  from Muon Neutrino Disappearance in an Off-Axis Beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. Lett. 112, 181801 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.181801

8. "The mass-hierarchy and CP-violation discovery reach of the LBNO long-baseline neutrino experiment" T.Hasegawa, A.Rubbia(他 215 名 82 番目) JHEP 1405, 94 (2014) 査読有 DOI: 10.1007/JHEP05(2014)094

9. "Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. Lett. 112, 061802 (2014) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.061802

10. "Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. Lett. 111, 211803 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.211803

11. "Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 88, 032002 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.88.032002

12. "Future long-baseline neutrino facilities and detectors" Milind Diwan, Rob Edgecock, Takuya Hasegawa, Thomas Patzak, Masato Shiozawa, and Jim Strait, Adv. High Energy Phys. 460123(2013) 査読有 DOI: 10.1155/2013/460123

13. "Measurement of the inclusive  $\mu$  charged current cross section on carbon in the near detector of the T2K experiment" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200

番目) Phys. Rev. D 87, 092003 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.092003

14. "T2K neutrino flux prediction" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 87, 012001 (2013) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.012001

15. "First muon-neutrino disappearance study with an off-axis beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. D 85, 031103(R) (2012) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevD.85.031103

16. "Measurements of the T2K neutrino beam properties using the INGRID on-axis near detector" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A 694, 211-223 (2012) 査読有 DOI: 10.1016/j.nima.2012.03.023

17. "Introductory remark on the First International Workshop towards the Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment (GLA2010)" T.Hasegawa, J. Phys. Conf. Ser. 308, 012001 (2011) 査読有 DOI: 10.1088/1742-6596/308/1/012001

18. "Okinoshima site study" T.Hasegawa, M.Yoshioka(他 11 名 2 番目) J. Phys. Conf. Ser. 308, 012028 (2011) 査読有 DOI: 10.1088/1742-6596/308/1/012028

19. "Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Phys. Rev. Lett. 107, 041801 (2011) 査読有 DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.041801

20. "The T2K experiment" T.Hasegawa, K.Nishikawa(他 326 名 85、200 番目) Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res., Sect. A 659, 106-135 (2011) 査読有 DOI: 10.1016/j.nima.2011.06.067

[学会発表](計 7 件)

1. "WA105 toward the final physics achievements with huge double phase Liquid Ar TPC at deep underground" T.Hasegawa, WA105 general meeting, 2015 年 3 月 26 日, ジュネーブ (スイス)

2. "WA105 Science Board associated organization structure and work plan" T.Hasegawa, WA105 general meeting, 2015 年 1 月 23 日, ジュネーブ (スイス)

3. "Liquid Ar TPC for Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors" T.Hasegawa, International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, 2014年11月6日, パリ (フランス)

4. "Status and plans at KEK" T.Hasegawa, WA105 general meeting, 2014年10月16日, ジュネーブ (スイス)

5. "The importance of neutrino physics in particle physics" T.Hasegawa, LAGUNA-LBNO Open meeting, 2014年8月27日, ハンナサリ (フィンランド)

6. "Analysis of LAr TPC test beam data T32@JPARC" T.Hasegawa, LAGUNA-LBNO meeting, 2012年3月12日, パリ (フランス)

7. "Concluding remark on GLA2011" T.Hasegawa, Second International Workshop towards the Giant Liquid Argon Charge Imaging Experiment, 2011年6月10日, ジュバスキラ (フィンランド)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

長谷川 琢哉 (HASEGAWA, Takuya)

大学共同利用機関法人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：40261549

### (2) 研究分担者

西川 公一郎 (NISHIKAWA, Koichiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・名誉教授  
研究者番号：60198439

### (3) 連携研究者

小林 隆 (KOBAYASHI, Takashi)

大学共同利用機関法人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：70291317

丸山 和純 (MARUYAMA, Takasumi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号：80375401

石井 孝信 (ISHII, Takanobu)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号：90134650

中平 武 (NAKADAIRA, Takeshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号：30378575

坂下 健 (SAKASHITA, Ken)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教  
研究者番号：50435616

荻津 透 (OGITSU, Toru)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授  
研究者番号：30185524

木村 誠宏 (KIMURA, Nobuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授  
研究者番号：10249899