

令和 2 年 5 月 18 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2014～2018

課題番号：26247034

研究課題名（和文）ニュートリノ混合行列の究明に向けたニュートリノ 原子核反応断面積の精密測定

研究課題名（英文）Precision measurements of neutrino-nucleus interaction towards understanding of neutrino mixing matrix

研究代表者

横山 将志 (YOKOYAMA, Masashi)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授

研究者番号：90362441

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 30,900,000円

研究成果の概要（和文）：T2K長基線ニュートリノ振動実験におけるニュートリノ-原子核反応断面積の不定性による系統誤差を削減するために、ニュートリノ反応を測定する新しい検出器を設計・建設した。水標的とシンチレーター標的での反応をそれぞれ測定し、比を取ることで系統誤差を削減する手法を確立し、原子核の違いによる反応断面積の差を10%以下の精度で測定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノ振動の測定精度を向上させるために、格子状に組み合わせ薄型のプラスチックシンチレーターを水中につけ、水とニュートリノの反応を測定する新型のニュートリノ測定装置を開発した。WAGASCI検出器と名付けられたこの装置をJ-PARC加速器施設のニュートリノビームラインに設置してニュートリノ反応を測定し、水標的とシンチレーター標的での原子核の違いによる反応断面積の差を10%以下の精度で測定した。

研究成果の概要（英文）：In order to reduce systematic uncertainties in T2K long-baseline neutrino oscillation experiment, a new detector for measuring neutrino interactions is designed and built to better control the uncertainties of the neutrino-nucleus cross sections. A method to reduce systematic uncertainties by measuring interactions with water and scintillator targets and taking their ratio was established. The difference in interaction cross-sections due to different target nuclei was measured with an accuracy of better than 10%.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ニュートリノ 反応断面積 粒子検出器 ニュートリノ振動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

1998年にスーパーカミオカンデの大気ニュートリノ観測により存在が確実となった「ニュートリノ振動」は、素粒子物理の標準模型を超えるこれまで唯一の実験的事実である。このため、ニュートリノの研究は、素粒子物理の標準模型を超える新物理への道標として最も有力な候補の一つである。

我々が茨城県東海村のJ-PARC加速器施設と、岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデを用いているT2K実験では、ニュートリノ振動の測定を世界最高精度で行っている。T2K実験でのニュートリノ振動の測定において、系統誤差の最も大きな要因となるのがニュートリノと原子核の反応断面積の不定性である。

ニュートリノ反応の不定性による影響をおさえるために、T2KではJ-PARC構内に前置検出器群を設置してニュートリノ反応を実測している。前置検出器での標的は主にシンチレータ(炭素+水素)であり、後置検出器であるスーパーカミオカンデ(水)と標的原子核が異なる。本研究を開始した当初には、炭素と酸素でのニュートリノ反応の違いを比べた実験データが存在せず、ニュートリノ反応モデルの信頼性に限界があり、系統誤差を大きめに見積もる要因のひとつとなっていた。

当時、前置検出器のひとつINGRID検出器でシンチレータ標的と鉄標的の断面積比を2.8%の精度で測定することに成功していた。INGRID検出器で検出するニュートリノは、T2Kでニュートリノ振動をおこすニュートリノのエネルギー(1 GeV以下)に比べ高いエネルギー(平均2-3 GeV)を持っているため、直接ニュートリノ振動の解析に反映させることはできないが、この手法を発展させ、適切なニュートリノエネルギーで水とシンチレータの断面積比を高精度で測ることができれば、T2K実験によるニュートリノ振動測定の精度を向上させることができると考えた。

2. 研究の目的

シンチレータ/水/鉄をそれぞれ標的として荷電カレント反応の包括的断面積の比を精度よく測定することを目標に、新型のニュートリノ検出器を開発し、T2K実験前置検出器ホール地下2階に新たに設置する。特に、主な測定の対象をミューオンニュートリノによる荷電カレント反応の包括的測定に絞ることにより、シンプルな測定器で精度を高めることを狙った。

3. 研究の方法

ニュートリノ振動の測定精度を向上させるために、格子状に組み合わせた薄型のプラスチックシンチレーターを水中につけ、水とニュートリノの反応を測定する新型のニュートリノ測定装置を開発した(図1)。WAGASCI検出器と名付けられたこの装置をJ-PARC加速器施設のニュートリノビームラインに設置して(図2)ニュートリノ反応を観測し(図3)、水標的とシンチレーター標的での反応断面積を測定した。

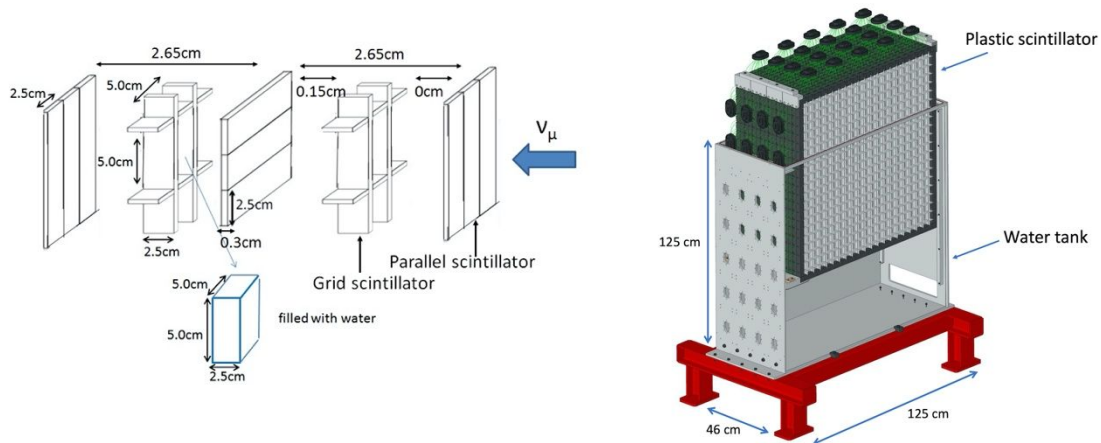


図1: WAGASCI 検出器のシンチレーター構造(左)と全体の概念図(右)。薄型のプラスチックシンチレーターを格子状に組み合わせた構造を水中に置き、ニュートリノが水と反応した際に生成される粒子をシンチレーターで捉える。シンチレーターからの光は半導体光検出器 MPPC で検出し、専用に開発した電子回路で記録される。

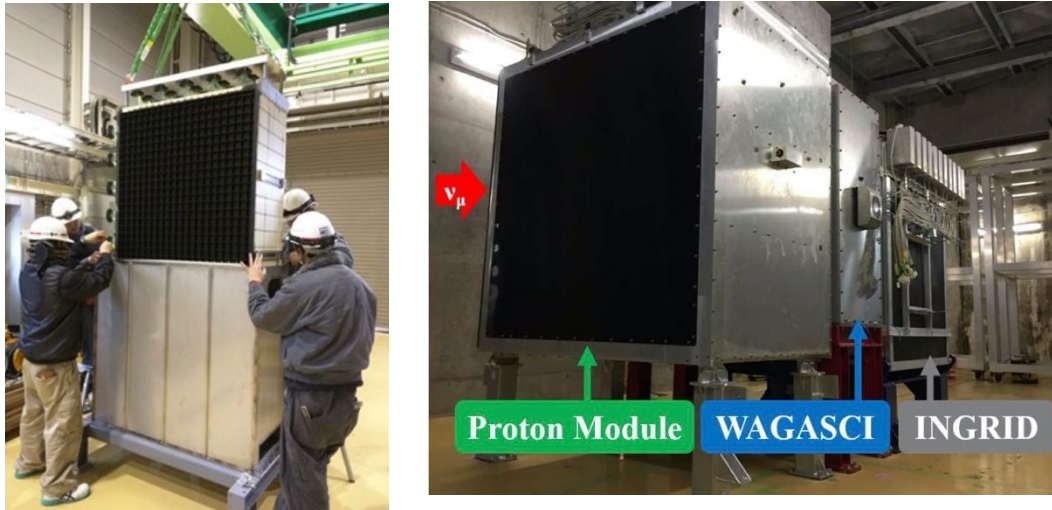


図 2 : (左) 1 台目のモジュールのシンチレーターの構造体を水槽内に設置する作業の様子。
 (右) 前置検出器ホール地下 2 階に設置された 2 台目のモジュール。既存の検出器 (Proton Module および INGRID) と組み合わせて、調整運転を行った。

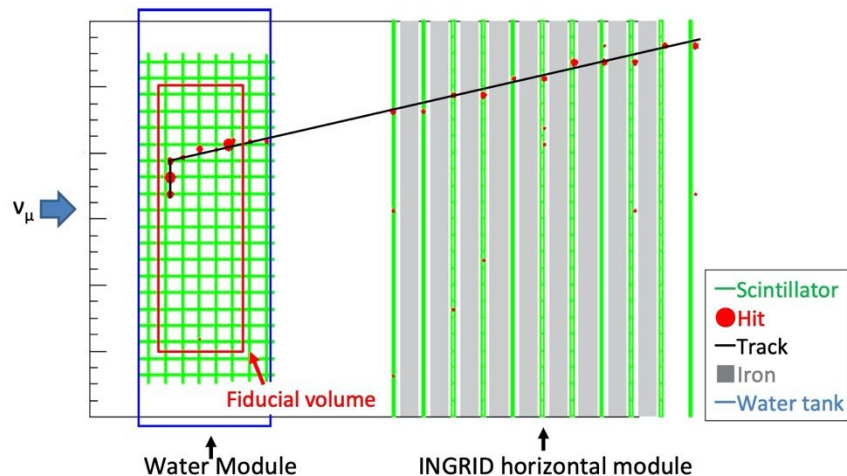


図 3 : 1 台目の WAGASCI 検出器モジュールで観測されたニュートリノ反応の例。ニュートリノビームが図の左から入射し、Water Module と書かれた WAGASCI モジュール内で反応したもの。反応で生成された荷電粒子がシンチレーターを通過した際に発生した光を信号として記録し (赤丸)、飛跡を再構成する (黒線)。下流には INGRID という鉄板とシンチレーターのサンドイッチ型の既存の検出器が設置されている。透過力の高いミュオンは鉄板を通過することで識別される。

4 . 研究成果

本研究で製作した 2 台の新型ニュートリノ検出器 (WAGASCI 検出器) を既存の検出器と組み合わせた予備的なセットアップでの測定データの解析を進め、ニュートリノ-原子核反応の測定を行った。その最初の結果として、オン軸スでの荷電カレントニュートリノ反応断面積の測定を行い、水標的とシンチレーター標的での断面積の比を 5% の精度で測定し、PTEP 誌にて出版した (PTEP2019, 093C02)。また、反ニュートリノビームでの水標的とシンチレーター標的での断面積比をオフ軸スで測定し、9% の精度で求め、国際会議で公表した。最終的には、前置ニュートリノ検出器ホール地下 2 階において、WAGASCI 検出器とともに新規に製作したミュオンレンジ検出器を組み合わせた、最終的な検出器の配置でニュートリノデータの測定を行った。異なる場所での測定データを合わせて解析することで、ニュートリノ反応に関するより多くの情報を得る手法の開発を進めた。また、将来のニュートリノ反応測定器に向けた開発として、キューブ型のプラスチックシンチレータと光検出器 MPPC を組み合わせた測定器の性能評価を行なった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 K.Abe et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 121
2. 論文標題 Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 171802
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.171802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K.Abe et al. (T2K Collaboration)	4. 巻 2019
2. 論文標題 Measurement of the muon neutrino charged-current cross sections on water, hydrocarbon and iron, and their ratios, with the T2K on-axis detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093C02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K.Abe et al. (T2K collaboration)	4. 巻 118
2. 論文標題 Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 151801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.118.151801	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 K.Abe et al. (T2K collaboration)	4. 巻 96
2. 論文標題 Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 11102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.011102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 K.Abe et al. (T2K collaboration)	4. 巻 93
2. 論文標題 Measurement of the muon neutrino inclusive charged-current cross section in the energy range of 1-3GeV with the T2K INGRID detector	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.93.072002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Koga, N. Chikuma, F. Hosomi, M. Yokoyama et al.	4. 巻 8
2. 論文標題 Water/CH Neutrino Cross Section Measurement at J-PARC (WAGASCI Experiment)	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 JPS Conf.Proc.	6. 最初と最後の頁 23003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSCP.8.023003	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 横山将志
2. 発表標題 T2Kニュートリノ振動実験による反電子ニュートリノ出現とCP対称性の破れの探索の最新結果
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 水標的格子型検出器WAGASCIを用いた反ニュートリノビーム測定の現状
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松下昂平
2. 発表標題 ニュートリノ検出器WAGASCIにおける時間情報取得システムの改善
3. 学会等名 日本物理学会 2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山将志
2. 発表標題 Long-baseline neutrino experiments
3. 学会等名 The 39th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鞠谷温士
2. 発表標題 ニュートリノ検出器WAGASCI用エレクトロニクスの性能試験
3. 学会等名 第9回高エネルギー物理春の学校
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田村 陸
2. 発表標題 多チャンネルの MPPC の制御読み取りに向けた SPIROC2D を用いたエレクトロニクスの開発状況及び性能評価試験
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 J-PARCT59実験:新検出器WAGASCI における反ニュートリノビーム測定の現状
3. 学会等名 第 72 回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 Off-axis 角が異なる 2 つの T2K 前置検出器を用いたニュートリノ-原子核反応の測定と比較
3. 学会等名 第 72 回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山将志
2. 発表標題 T2K ND280 Upgrade
3. 学会等名 11th International Workshop on Neutrino-Nucleus Scattering in the Few-GeV Region (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村陸
2. 発表標題 Development of new electronics for a new detector WAGASCI
3. 学会等名 International work- shop on future potential of high intensity accelera- tors for particle and nuclear physics (HINT2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 横山将志
2. 発表標題 The T2K Near Detector Upgrade
3. 学会等名 Workshop on Neutrino Near Detectors based on gas TPCs (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 J-PARC T59 WAGASCI 実験における 信号読出しシステムの開発
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノフロンティア」研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 細見郁直
2. 発表標題 Construction of new water module for the WAGASCI experiment
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノフロンティア」研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 新ニュートリノ検出器INGRIDWater Module で取得した宇宙線データと MC シミュレーションとの比較結果
3. 学会等名 日本物理学会 2016 年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 WAGASCI 実験の信号読み出しシステム の開発
3. 学会等名 計測システム研究会 2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 細見郁直
2. 発表標題 水とプラスチックにおけるニュートリノ 反応断面積測定のための WAGASCI 実験
3. 学会等名 第 23 回 素粒子物理国際研究センターシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 ニュートリノ検出器 WAGASCI におけるデータ収集システムの開発
3. 学会等名 第 72 回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 田村陸
2. 発表標題 ニュートリノ検出器 WAGASCI に向けた SPIROC2D を用いた新エレクトロニクス の性能評価試験
3. 学会等名 第 72 回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 格子型ニュートリノ検出器 INGRID Water Module を用いた ニュートリノ・水原子核反応断面積の測定
3. 学会等名 第 72 回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 細見郁直
2. 発表標題 WAGASCI 実験のための新たな水モジュール検出器の建設
3. 学会等名 第 72 回 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 A new experiment at J-PARC to measure the neutrino cross section ratio between water and plastic
3. 学会等名 Flavor Physics and CP Violation 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 New Water/Plastic Muon Neutrino Cross Section Ratio Measurement at J-PARC
3. 学会等名 10th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV Region (NuInt15) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 Precision neutrino cross section measurements and modeling for long-baseline oscillation experiments
3. 学会等名 4th Joint workshop of the France-Japan and France-Korea International Associated Particle Physics Laboratories
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 細見郁直
2. 発表標題 Performance test of new MPPC for a new neutrino detector WAGASCI
3. 学会等名 4th International Conference on New Photo-Detectors (PhotoDet 2015) (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 ニュートリノビームを用いた水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積測定のための新検出器 INGRIDWaterModuleの建設
3. 学会等名 日本物理学会 第71回年次大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 Detector design and R&D for Water/CH Neutrino Cross Section Measurement
3. 学会等名 XXVI Conference on Neutrino Physics and Astro- physics (Neutrino 2014) (国際学会)
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 Water/CH Neutrino Cross Section Measurement at J-PARC
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2014 (国際学会)
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 ニュートリノ振動高精度測定のための H ₂ O/CH ニュートリノ反応断面積比測定
3. 学会等名 高エネルギー物理 春の学校 2014
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 T2K 実験ニュートリノビームを用いた水とプラスチックにおけるニュートリノ荷電カレント反応断面積比測定のための新検出器WAGASCIの設計
3. 学会等名 日本物理学会 2014 年秋季大会
4. 発表年 2014年

1. 発表者名 細見郁直
2. 発表標題 新ニュートリノ検出器WAGASCIのための新型MPPCの性能評価
3. 学会等名 第21回素粒子物理国際研究センターシンポジウム
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 竹馬匠泰
2. 発表標題 新ニュートリノ検出器WAGASCIのための薄型プラスチックシンチレータの陽電子ビームを用いた性能評価
3. 学会等名 第21回素粒子物理国際研究センターシンポジウム
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 古賀太一朗
2. 発表標題 新ニュートリノ検出器 WAGASCI: J-PARCニュートリノビームを用いた水とプラスチックにおけるニュートリノ反応断面積比測定実験
3. 学会等名 日本物理学会 第 70 回年次大会
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	南野 彰宏 (Minamino Akihiro) (70511674)	横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授 (12701)	