

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26287043

研究課題名(和文)高エネルギー長基線における電子ニュートリノ振動研究

研究課題名(英文)High energy electron neutrino oscillation study at long baseline

研究代表者

小松 雅宏 (Komatsu, Masahiro)

名古屋大学・教養教育院・准教授

研究者番号：80345842

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,900,000円

研究成果の概要(和文)：LSNDに始まり、MiniBooNE実験にても決着を見ない電子ニュートリノへの振動(LSND問題)に決着をつける事を目的とした本研究課題では、OPERA実験の全統計に対して解析を行い、その結果を2017年4月にイタリアのGran Sasso 研究所で成果発表を行った。  
約7000のニュートリノ反応を対象とした解析から、合計で32個の電子ニュートリノ反応を検出した。統計が増したことにより、エネルギー分布を考慮した shape 解析を可能とした。結果として、3+1のフレームワークにて混合角の90%信頼度での上限値を  $\sin 2\theta_{\mu e} < 0.019$  を達成した。

研究成果の概要(英文)：This project was aiming to solve so called LSND problem which is the unexplained electron neutrino appearance signal in larger mass different square region. The result we obtained was presented at INFN Gran Sasso Laboratory on April 2017.  
As a result of analysis for 7000 neutrino interaction observed in the OPERA experiment, we observed 32 electron neutrino candidate events in total. Thanks to this enlarged statistics, we could perform shape analysis rather than counting method. In the 3+1 neutrino oscillation framework, we obtained effective mixing angle on muon and electron neutrino  $\sin 2\theta_{\mu e}$  less than 0.019 at large mass difference square.

研究分野：High energy experimental physics

キーワード：neutrino oscillation long baseline electron neutrino

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の存在は広く認められるようになってきたが、知られている3世代のレプトンに属する3つのニュートリノ間の振動だけでは説明がつかない可能性のある実験結果がLSND及びMiniBooNEといった実験で示されていて、3世代以上のニュートリノが存在するの否かは現在の素粒子模型を議論する上で極めて重要なトピックスの1つとなっていた。

### 2. 研究の目的

LSNDに始まり、MiniBooNE実験にても決着を見ない電子ニュートリノへのニュートリノ振動(LSND問題)に決着をつける。近年のリアクターニュートリノ振動を初め、T2K実験による $\theta_{13}$ を介した3-flavor振動が確立されつつある一方で、未だにLSND、MiniBooNEの結果に対して決定的な肯定や否定を行うには至っていない。その大きな原因として低エネルギー領域のニュートリノ反応に対する理解が十分で無いことがあげられる。一つのアプローチとしては低エネルギー領域のニュートリノ反応の理解を深める事であるが、別のアプローチとしてより信頼性のある高エネルギー領域で同じ振動を見ることでこの問題に決着を付ける。それは高エネルギー長基線ニュートリノ振動実験OPERAにおける電子ニュートリノ振動の解析である。

近年のリアクターニュートリノ振動実験DayaBayや加速器によるT2K実験により3-flavorニュートリノ振動がいよいよ確立されようとしている。しかしながらその一方で未だに解決されずに残っている問題はLSNDにより観測された電子ニュートリノのエクセスの原因である。このLSND実験の結果を検証すべく実施されたMiniBooNE実験においても、大方の予想に反してむしろLSNDの結果を追認する結果が得られている。特に問題となるのは低エネルギー領域のデータを含めるか除くかで結果が大きく異なることである。多くの研究者は低エネルギー領域のニュートリノ反応断面積の理解が不十分ではないのかという視点を持っている。LSND、MiniBooNEでの結果を低エネルギー領域のニュートリノ反応の理解を深めるという形で検証していく方法とは一線を画す。不明確な低エネルギーニュートリノ反応断面積の影響を受けない方法として高エネルギーの長基線ニュートリノビームにおける電子ニュートリノ振動の解析からLSND、MiniBooNEの許容領域の探索を行う。

### 3. 研究の方法

LSND問題を検証するにあたり、LSNDやその検証実験であるMiniBooNE実験では短基線での実験であるが故に低エネルギーニュートリノを用いてニュートリノ振動確率を上げ

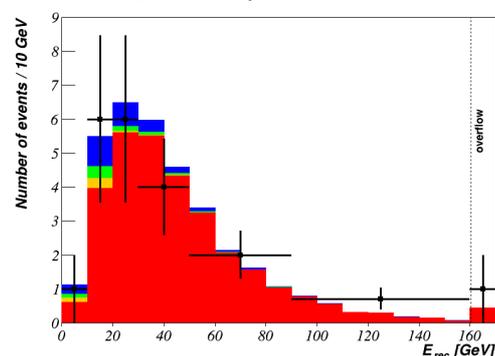
ている。しかしながら、MiniBooNE実験においても低エネルギーニュートリノ反応(断面積・プロセス)の理解が不十分な事が原因で決定的な結論を出すに至っていない。この基本的な低エネルギー領域の反応断面積に対する疑義からは完全にフリーな形でLSND問題を解決する方法は高エネルギーの長基線ニュートリノ振動観測でLSND、MiniBooNEで許容されるニュートリノ振動パラメータ領域に感度を持つ実験を行うことである。私は新たな実験を行うのではなく、長基線ニュートリノ振動実験OPERAにて、より電子ニュートリノに対する感度を高めることでこれを実現するものである。

### 4. 研究成果

タウニュートリノの出現によりニュートリノ振動を検証することを目的とした、高エネルギー長基線ニュートリノ振動実験OPERAは2008年から2012年のビーム照射を終え、その蓄積した反応の解析を行ってきた。

最終的に約7000個のニュートリノ反応の解析を行い、その中から35個の電子ニュートリノ反応候補を見つけ出した。電子ニュートリノは元々のニュートリノビームにも約0.8%含まれていることから、ミューニュートリノから電子ニュートリノへの振動を検出はタウニュートリノの出現反応の解析とは大きく異なり、バックグラウンドドミナントな状況での解析となる。電子ニュートリノは他にも $\theta_{13}$ を介した3 flavorモデルで期待される成分や、 $\pi^0$ 起源のガンマ線を誤認識してしまう事象もあるが、最も大きな成分は元々ビームに含まれる電子ニュートリノである。しかしながら、この電子ニュートリノのエネルギー分布は、振動により出現してくる電子ニュートリノのエネルギー分布とは異なる。よって、エネルギー分布を考慮した振動解析を行う事で、最も良い結果を得る事が可能であり、本研究ではその方法を採用した。下に電子ニュートリノ反応の期待値と観測値の分布を示す。

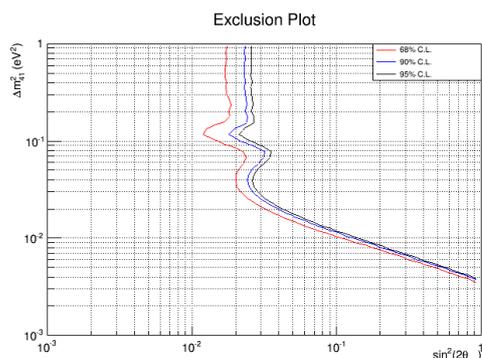
Energy spectrum of  $\nu_e$  candidates (2008-2012 data)



エラーバー付の点は観測データで、塗りつぶしたヒストグラムは期待される分布である。赤で示された成分が元々ビームに含まれる電子ニュートリノの予想値。青は3 flavor modelで期待されるニュートリノ振動から

くる電子ニュートリノ反応の成分である。他にも小さな成分としては、ガンマ線の誤認と、タウニュートリノ反応を誤認してしまう事象からくるものが示されている。

この期待値と観測値の分布から 3+1flavor model における 4 番目のニュートリノ質量差と混合角の空間に制限を加える事が出来る。下に混合角と質量差の exclusion plot を示す。



図の横軸は effective mixing angle, 縦軸は 4 番目のニュートリノと電子ニュートリノの質量差の 2 乗である。

質量差の大きな領域で、90%CL での mixing angle  $\sin^2(2\theta_{\mu e}) < 0.019$  を得る事に成功した。

## 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 9 件)

OPERA Collaboration (Masahiro Komatsu (Nagoya U.) for the collaboration), Latest results on  $\mu$  oscillations from the OPERA experiment、査読無、Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 1865-1869

DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.301

Nobuko Kitagawa, Masahiro Komatsu, Electron Identification and Energy Measurement with Emulsion Cloud Chamber、査読無、Phys.Procedia 80 (2015) 87-89  
DOI: 10.1016/j.phpro.2015.11.099

OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al. Masahiro Komatsu 他), Discovery of Neutrino Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment、査読有、Phys.Rev.Lett. 115 (2015) no.12, 121802

DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.121802

OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al. Masahiro Komatsu 他), Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino

state obtained by OPERA at the CNGS beam、査読有、JHEP 1506 (2015) 069  
DOI: 10.1007/JHEP06(2015)069

Hirokazu Ishida (Toho U.) et al., Study of hadron interactions in a lead-emulsion target、査読有、PTEP 2014 (2014) no.9, 093C01  
DOI: 10.1093/ptep/ptu119

OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al. Masahiro Komatsu 他), Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment、査読有、PTEP 2014 (2014) no.10, 101C01  
DOI: 10.1093/ptep/ptu132

OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al. Masahiro Komatsu 他), Procedure for short-lived particle detection in the OPERA experiment and its application to charm decays、査読有、Eur.Phys.J. C74 (2014) no.8, 2986  
DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2986-0

OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al. Masahiro Komatsu 他), Measurement of the TeV atmospheric muon charge ratio with the complete OPERA data set、査読有、Eur.Phys.J. C74 (2014) 2933  
DOI: 10.1140/epjc/s10052-014-2933-0

OPERA Collaboration (N. Agafonova (Moscow, INR) et al. Masahiro Komatsu 他), Evidence for  $\mu$  appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment、査読有、Phys.Rev. D89 (2014) no.5, 051102  
DOI: 10.1103/PhysRevD.89.051102

[学会発表](計 6 件)

小松雅宏他、SHiP 実験計画におけるニュートリノ物理、日本物理学会第 72 回年次大会、大阪大学豊中キャンパス、20170319

Masahiro Komatsu, SHiP: a new facility with a dedicated detector for studying tau neutrino properties、The 14th International Workshop on Tau Lepton Physics (Tau2016)、中国北京 IHEP、20160922

小松雅宏他、SHiP 実験計画におけるニュートリノ物理、日本物理学会 2016 年春季大会、東北学院大学、20160321

小松雅宏他、SHiP 実験計画におけるニュートリノ物理、日本物理学会 2015 年秋季大会、大阪市立大学、20150925

Masahiro Komatsu, Emulsions and scanning technologies, 1st SHiP workshop, Zurich, Swiss, 20140612

Masahiro Komatsu, Latest results on

nu\_mu -> nu\_tau oscillations from the OPERA experiment、37th International Conference on High Energy Physics、Valencia, Spain、20140703

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 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 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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小松 雅宏 (KOMATSU, Masahiro)  
名古屋大学・教養教育院・准教授  
研究者番号：80345842

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：

### (4) 研究協力者

( )