

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22340055

研究課題名（和文）

低エネルギーニュートリノ反応の詳細研究

研究課題名（英文）

Detailed study of low energy neutrino interaction

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

研究成果の概要（和文）：アメリカ、フェルミ国立加速器研究所のニュートリノビームライン NuMI において、鉛・原子核乾板 E C C ターゲットを用いて、低エネルギーニュートリノ反応を蓄積し、原子核乾板でしか観測することの出来ない詳細な反応点直後の荷電粒子生成の状態を観測した。これらの反応から数 GeV エネルギー領域の深弾性散乱断面積の全断面積に対する割合を、荷電粒子生成数を元に  $0.68+0.09-0.11(\text{stat.})\pm 0.02(\text{syst.})$  との結果を得た。

研究成果の概要（英文）：The experiment was carried out at low energy neutrino beamline so called NuMI at Fermi National Accelerator Laboratory. We exposed lead-emulsion target at this beam line to accumulate neutrino interaction which only nuclear emulsion can resolve charged particle at interaction point. We have determined deep inelastic scattering fractional cross-section at few GeV energy range as  $0.68+0.09-0.11(\text{stat.})\pm 0.02(\text{syst.})$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	9,000,000	2,700,000	11,700,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子(実験)

## 1. 研究開始当初の背景

近年の低エネルギー領域におけるニュートリノ反応断面積の研究は我々に大きな混迷を与えている。MiniBooNEにより観測された低エネルギー領域の反応断面積は 2-5GeV の間で明らかな断絶が認められる。

また、MiniBooNE、SciBooNE 実験のエネルギー領域と 10GeV 以上の高エネルギー領域でのニュートリノの反応断面積に不連続が生じており、今後重要となる詳細なニュートリノ振動実験に必要な基礎データが不

足している事を意味している。不連続点のちょうど中間を埋めるエネルギーを持ったニュートリノビームが Fermilab の NuMI であり、NuMI の低エネルギーニュートリノ反応のデータ収集は不可欠である。

我々は先の T-952 実験で用いた継続利用可能な検出器をアメリカの Fermilab に所持しており、再稼働させることにより、比較的簡単に新たなデータ収集が可能となる。今まで十分なデータが得られていない 1-数 GeV 領域のニュートリノ反応のデータを得る機会

が Fermilab の NuMI であり、この機を捉えて低エネルギーニュートリノ反応の詳細研究を行う。

近年の低エネルギー領域におけるニュートリノ反応断面積の研究は我々に大きな混乱を与えている。MiniBooNE により観測された低エネルギー領域の反応断面積は 2-5GeV の間で明らかな断絶が認められる。この間隙を埋める最有力の実験は NuMI における MINERvA 実験である。Fermilab の NuMI はピークエネルギーが 3GeV であり、まさにこの断絶を埋める為に最適な実験といえる。しかしながら MINERvA 実験でも十分に検証することが不可能な反応がニュートリノエネルギーが 3.5GeV を超えると発生する。それが短寿命のチャーム粒子生成である。ニュートリノ反応におけるチャーム粒子、タウ粒子という 10<sup>-13</sup> 秒程度の寿命を持つ粒子の観測が可能な検出器は、我々が有する原子核乾板技術しか無い。LArTPC(リキッドアルゴンドリフトチェンバー)が原子核乾板に代わりうる検出器の候補と考えられているが、現在まで実績は無い。MINERvA 実験装置は当然の如くチャーム粒子の識別能力は無いに等しい。大統計での反応断面積の断絶を生める作業は MINERvA 実験の主目的の一つであるが、チャーム粒子生成が始まる 3.5GeV というエネルギーの上と下での影響を検証する上で、チャーム粒子生成反応を同時に調べる事は重要である。ニュートリノ検出器において唯一チャーム粒子生成反応を直接検出可能な我々の原子核乾板による実験装置を同時にインストールし実験を行う事は非常に意義がある。タウニュートリノ反応を唯一検出し得た我々だけが可能な実験である。

## 2. 研究の目的

低エネルギー領域 (スレッシュホールド付近) でのチャーム生成断面積測定。将来の CP Violation 研究に用いられる事になる超強力なニュートリノビームソースはミューオンストレージリングにより生成されるニュートリノビームであり、T2K 実験の為にニュートリノビームよりも格段にエネルギーが高く、チャーム粒子生成を伴うエネルギー領域となる。現在、チャーム粒子生成スレッシュホールド以上のエネルギーを持つ利用可能なニュートリノビームラインはアメリカ Fermilab の NuMI ビームラインのみである。これまでに作成されたサンプルに加え、さらに統計を上げ、チャーム粒子生成断面積のデータを揃える。チャーム粒子を個別に検出しうるニュートリノ反応検出器は原子核乾板において他に無い。他の検出器ではチャーム生成反応に特異的な di-lepton 反応 (電子やミュー粒子を 2 個伴う反応) を持つし

てチャーム粒子が生成された証拠とする等の手法を取るが、生成されるチャーム粒子の種別により本来の生成断面積に焼きなおす為には理論やモデルを持ち込まなければならない。原子核乾板ではその類希な空間分解能により短寿命の粒子を直接検出が可能である。タウニュートリノの発見 (直接検出) もチャーム粒子と同様の寿命や質量を持ったタウ粒子の検出が可能な我々の原子核乾板技術を用いて初めて為しえたものである。原子核乾板を用いたチャーム粒子の直接検出を前提にしたチャーム粒子生成断面積研究はモデルに因らないユニークな結果となる。また、荷電チャーム粒子、中性チャーム粒子を識別可能である。崩壊の 2 次粒子しか検出出来ない原子核乾板以外の検出器では荷電、中性チャーム粒子の識別は困難である。

低エネルギーニュートリノ反応での粒子生成分布の測定。原子核乾板の分解能、読み出し頻度 (MINOS の 2.54cm 毎に比べて 0.5mm 毎) ならではの情報として、ニュートリノ反応から出てくる 1 次粒子と 2 次粒子を明確に識別できる。また粒子の角分布やエネルギー分布を反応単位で捉える事が可能であり、ニュートリノ反応ジェネレーターへのインプットとしてユニークなデータを提供する。

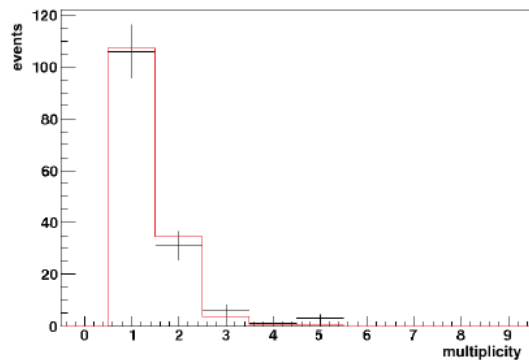
## 3. 研究の方法

低エネルギーニュートリノ反応研究の必要性は広く認識されており、Fermilab において SciBooNE に引き続き MINERvA 実験が実施されようとしている。いずれの実験も高統計での詳細研究となるが、極めて断面積の小さいニュートリノ研究では質量を稼ぐ為にグラナリティは常に犠牲になっており、ニュートリノ反応直後の詳細は見えない。この見えない部分を我々の原子核原子核乾板技術で補完する。タウニュートリノ反応の検出に唯一実績を持つ我々の ECC 技術により、ニュートリノ反応の直下でしか観測することの出来ないチャーム粒子生成を捕らえる事が出来る。MINERvA 実験装置の前方にニュートリノビームで串刺しする形で検出器を設置し、チャーム粒子生成断面積の測定及び、荷電粒子の角分布等の MINERvA 実験では見ることの出来ない高精細な実験を行う。

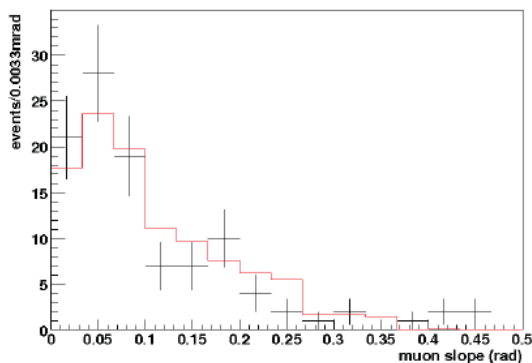
## 4. 研究成果

NuMI ビームラインでのニュートリノビーム照射によって得られた原子核乾板標的におけるニュートリノ反応による荷電粒子生成数と、支援検出器であるファイバーとラッカーの情報を用いて荷電粒子生成数分布を得た。その結果を深弾性散乱及び準弾性散乱、共鳴から予想される分布と比較する

ことにより、深弾性散乱の占める割合を算出した。



Multiplicity bin	Yield
1	$0.352 \pm 0.052$
2	$0.210 \pm 0.043$
3	$0.156 \pm 0.065$
4	$0.033 \pm 0.036$
$\geq 5$	$0.249 \pm 0.145$



Muon slope bin (mrad)	Yield
0-67	$0.225 \pm 0.033$
67-134	$0.126 \pm 0.025$
134-200	$0.162 \pm 0.040$
200-267	$0.119 \pm 0.052$
267-334	$0.081 \pm 0.048$
334-400	$0.054 \pm 0.054$
$\geq 400$	$0.233 \pm 0.118$

この結果から数 GeV エネルギー領域の深弾性散乱断面積の全断面積に対する割合を、荷電粒子生成数を元に  $0.68+0.09-0.11(\text{stat.}) \pm 0.02(\text{syst.})$  との結果を得た。

また、この低エネルギーニュートリノ反応の詳細研究の大きなモチベーションである MiniBooNE 実験の主目的である L SND アノマリーの検証を別の方向から検証した。L

SND アノマリーや MiniBooNE 実験による結果を低エネルギーニュートリノ反応断面積の理解不足から来るものあると考えた場合に、より高エネルギーの領域で同じ現象を検証することが重要である。その目的で長基線ニュートリノ振動実験である OPERA 実験にて電子ニュートリノのニュートリノ振動による出現反応を調べ論文をサブミットした。

## 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)

① S. Aoki et.al., Measurement of low-energy neutrino cross-sections with the PEANUT experiment., 査読有, New J. Phys. 12 (2010), 113028, DOI: 10.1088 /1367-2630 /12 /11 /113028

② A. Kayis-Topaksu et.al, Measurement of charm production in neutrino charged-current interactions., 査読有, New J. Phys. 14 (2012) 93002, DOI: 10.1088 /1367-2630 /13 /9 /093002

③ T. Fukuda et.al., The analysis of interface emulsion detector for the OPERA experiment in JAPAN scanning facility., 査読有, JINST 5, 2010,4009, DOI: 10.1088 /1748-0221 /5 /04 /P04009

④ N. Agafonova et.al, Observation of a first  $\nu \tau$  candidate in the OPERA experiment in the CNGS beam., 査読有, Phys. Lett. B 691,(2010), 138-145

⑤ OPERA Collaboration, Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target., 査読有, New J. Phys. 14 (2012) 13026, DOI: 10.1088/1367-2630/14/1/013026

⑥ OPERA Collaboration, Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment., 査読有, New J. Phys. 13 (2011) 53051, DOI: 10.1088 /1367-2630 /13 /5 /053051

⑦ T. Adam et al., Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data, 査読有, JHEP, 1301, (2012) 150, DOI: 10.1007 /JHEP01(2013)153

⑧N. Agafonova et al., Search for  $\nu/\mu \rightarrow \nu/\tau$  oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam、査読有、New J.Phys. 14 (2012) 33017、DOI: 10.1088 /1367-2630 /14 /3 /033017

⑨N. Agafonova et al., Momentum measurement by the Multiple Coulomb Scattering method in the OPERA lead emulsion target、査読有、New J.Phys. 14 (2012) 13026、DOI: 10.1088 /1367-2630/14/1/013026

〔学会発表〕(計1件)

①小松雅宏、OPERA実験におけるニュートリノ速度測定、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 11~14 日、京都産業大学

〔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

## 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：