

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：32661
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2011～2012
課題番号：23740184
研究課題名（和文） ν_τ 直接検出による $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ニュートリノ振動実験のバックグラウンド事象の詳細研究
研究課題名（英文）Detailed study of background events for a $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ neutrino oscillation experiment with ν_τ appearance.
研究代表者 福田 努（FUKUDA TSUTOMU） 東邦大学・理学部・博士研究員 研究者番号：10444390

研究成果の概要（和文）：長基線ニュートリノ振動実験 OPERA は第3例目の ν_τ 反応候補事象を検出した。本研究ではこの ν_τ 反応の信頼性を担保している $\tau \rightarrow$ ハドロン崩壊バックグラウンド(BG)推定に用いるシミュレーションの実験的検証を行い、シミュレーションが測定結果をよく再現していることを実証した。また、BGの低減を目指してハドロン反応から放出される大角度の核破砕片を検出する新技術を確認し、検出した ν_τ 反応の詳細解析に適用することで、BGの大幅な低減に成功した。さらに新技術による OPERA の新たな研究テーマを検討した。

研究成果の概要（英文）：The 3rd ν_τ candidate event has been found in the OPERA experiment. The reliability of background estimation for ν_τ events in OPERA has been confirmed by experimental data analysis of hadron interactions in OPERA-like ECC brick. A new automatic emulsion scanning system has been developed for large angle nuclear fragment detection. Then the hadronic background in OPERA has been reduced by detailed analysis of our ν_τ events with the newly developed system. Furthermore a new possible project in OPERA has also been suggested as an application with the new system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	1,300,000	390,000	1,690,000

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：ニュートリノ振動、原子核乾板、タウニュートリノ、OPERA 実験、ハドロン、核破砕片、大角度飛跡自動認識、GPU

1. 研究開始当初の背景

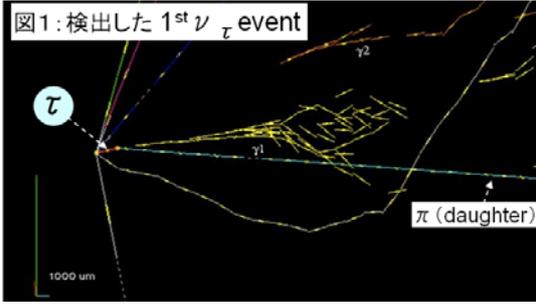
1998年のスーパーカミオカンデ実験による大気ニュートリノ欠損の観測以来、世界中の研究者によってニュートリノ振動現象の解明に向けた様々な実験が行われてきた。

OPERA 実験は、それまで「ある特定種の入射ニュートリノの消失」として捉えられていたニュートリノ振動現象を「別種のニュートリノの出現」として明快に捉え、その存否に最終決着をつけるべく計画された。実験の特色は、タウニュートリノ(ν_τ)を検出した唯一の実績を持つ原子核乾板検出器 ECC を主

検出器とした OPERA 検出器を Gran Sasso 研究所（イタリア）に設置し、CERN の加速器 SPS を用いて作ったミューニュートリノ(ν_μ)を照射、730km 飛行する間に ν_τ に化した事象を捉えようというものである。

我々は、2008年の ν_μ ビーム本格照射開始以来、ニュートリノ反応探索を進め、2010年に詳細解析を終えた約1100事象の中から1例の ν_τ 反応候補事象を検出した（図1）。この事象は ν_τ 反応から生成した τ 粒子が約1.3mm 飛行した後、ハドロンに崩壊している事象で、95%の信頼性で本物の ν_τ 反応であ

ると推定した。



2. 研究の目的

OPERA 実験によるニュートリノ振動現象存在の立証に向けて、さらなる統計的有意度向上を目指し、以下に示す2点について研究を推進する。

(1): OPERA 実験のニュートリノ反応解析を遂行し、第二、第三の ν_τ 反応を検出する。

(2): ν_τ 反応のバックグラウンド (BG) 事象を詳細に研究し、検出した ν_τ 反応の信頼性を向上させる。特に τ 粒子の崩壊様式として分岐比の最も大きい $\tau \rightarrow$ ハドロン崩壊の BG であるハドロンの2次反応に着目し、その BG 推定値の実験的検証及び低減を行う。

3. 研究の方法

(1): 東邦大学・理学部・基礎物理学教室に OPERA 実験のニュートリノ反応解析体制を立ち上げ、研究室の大学院生を主導して、反応解析を加速させる。

(2): 2001年にCERNで2, 4, 10 GeV/c ハドロン(π)ビームを照射したECCの解析を推進し、ECC中でのハドロン反応の詳細解析を行う。その測定結果を用いてOPERAのハドロンBG推定に使用しているシミュレーションを実験的に検証する。

(3): 新たに提案した、核破砕片をプローブにしたハドロンBG低減法を確立し、BG低減率を導出する。核破砕片はほぼ等方的に放出されるため(図2)、大角度飛跡を高速自動検出できる新型の原子核乾板自動飛跡読み取り装置を開発し、この解析を効果的に遂行する。

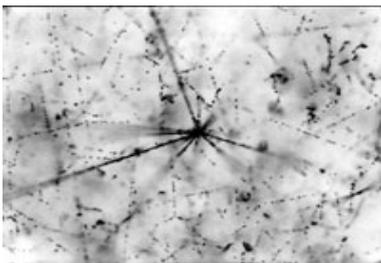


図2: 反応点から放出する核破砕片

4. 研究成果

(1): 第二、第三の ν_τ 反応候補事象の検出
我々は OPERA 実験のニュートリノ反応解析を精力的に進め、2012年6月に第二例目、2013年3月に第三例目の ν_τ 反応候補事象を検出した(図3)。これにより、ニュートリノ振動現象の存在がより確実なものとなった。

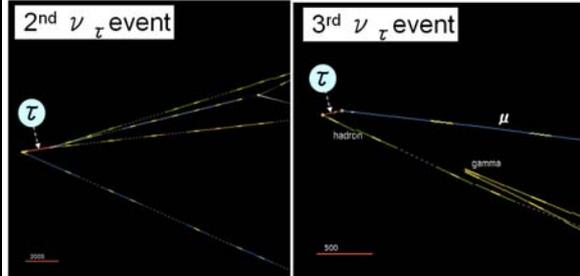


図3: 検出した2nd, 3rd ν_τ 反応候補事象

	τ flight length	Decay daughter
2 nd ν_τ event	~1.5mm	3 hadron
3 rd ν_τ event	~370 μ m	μ

(2): ハドロン反応の詳細解析

本番実験における τ 粒子崩壊探索長の約9倍相当(約3600事象)の π 粒子を個別に解析、検出したハドロン反応から生成した荷電粒子の運動量を測定し、反応毎の幾何学的・運動学的振る舞いを詳細に分析した。そして得られた実験データと OPERA 実験で使用しているシミュレーションの比較検証を行った結果、シミュレーションが実際の測定結果をよく再現していることが分かった(図4, 図5)。これにより OPERA 実験でハドロンBG推定に使用しているシミュレーションの信頼性を実験的に保証することができた。OPERA 実験ではこの結果に基づいて ν_τ 反応のハドロンBGにつく系統誤差を30%と見積もっている。

図4: ハドロン反応による生成粒子の多重度分布 (Data vs. MC Simulation)

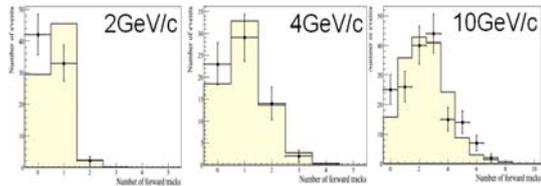
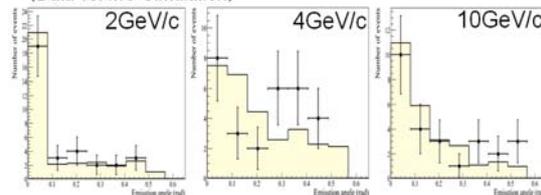


図5: ハドロン反応による生成粒子の放出角度分布(1-prong event) (Data vs. MC Simulation)



(3-1): 大角度飛跡自動検出技術の開発

系統的な大角度飛跡解析を実現するために、新しい原子核乾板自動飛跡読み取り装置を開発した。新装置は撮像素子に1280×1024画素のCMOSセンサを使用し、光学倍率50倍の光学系にて1 pixelあたり0.275 μm、視野のサイズは、352×282 μm²に設定した。これにより立体角にして従来の5倍に渡る大角度(|tan θ|=3.5)まで効率的な自動飛跡認識を行える。また、角度測定範囲の増大に伴う大量の飛跡認識処理を高速に行うためにGPU(Graphics Processing Unit)による超並列画像処理を導入し、初めて実用化した。以上の技術開発によって、原子核乾板における系統的な大角度飛跡解析が可能となった。(図6~図8)

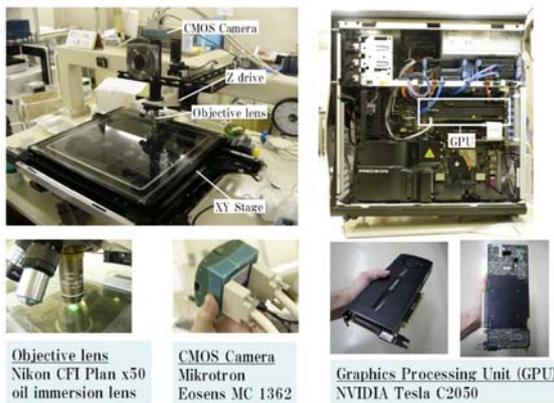


図6: 新装置のハードウェア概要

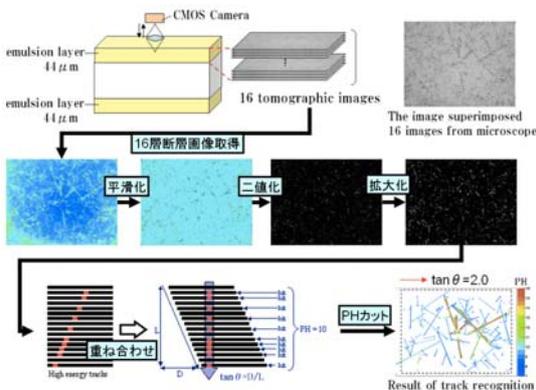


図7: 実装した自動飛跡認識アルゴリズム

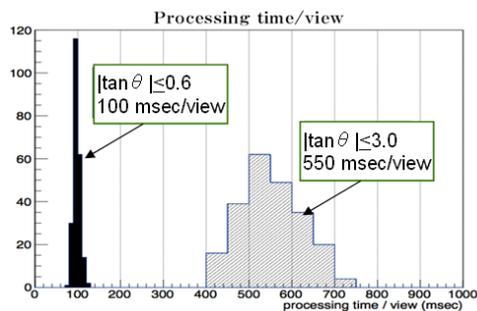


図8: 自動飛跡認識処理速度

(3-2): 核破砕片検出によるハドロンBG低減法の確立と検出したν_τ反応の詳細解析

新装置を用いて(2)で検出したハドロン反応から放出される核破砕片の系統的な探索を行った。|tan θ|=3.0までの大角度に渡る核破砕片探索の結果、2, 4, 10 GeV/cのハドロン反応に対する核破砕片付随率は、31%, 58%, 64% (IP<100 μm for 2,4GeV/c, IP<50 μm for 10GeV/c)という測定結果を得た(図9)。また、前方放出率の方が後方放出率よりも高くなる異方性も見えている(図10)。この研究を通して新たに提案した核破砕片検出によるハドロンBG低減法が確立した。

また、得られた測定結果とシミュレーションとの比較を行うことで、この手法のOPERA実験での適用によりハドロンBGの40%を低減できることが分かった。そこで、実際に検出したν_τ反応に対してハドロンBG低減法を実施し、崩壊点に核破砕片が付随していないかどうか検証した。その結果、核破砕片は見つからず、我々が検出したν_τ反応の信頼性向上に大きく貢献した。

図9: ハドロン反応による核破砕片の多重度分布 (Data vs. MC Simulation)

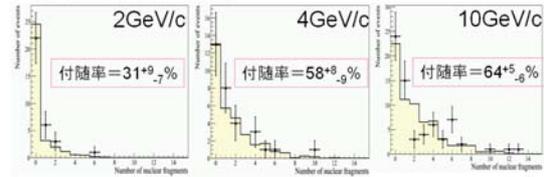
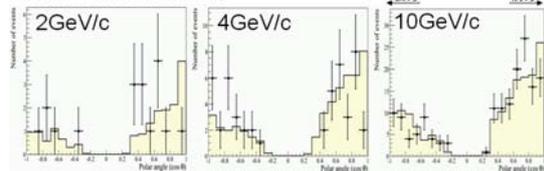


図10: ハドロン反応による核破砕片の放出角度分布 (Data vs. MC Simulation)



(4-1): 大角度最小電離粒子飛跡の検出

研究計画時当初は電離損失量の大きな核破砕片飛跡のみを測定対象と考えていたが、新装置による解析を進める中で、大角度の最小電離粒子飛跡に対しても高い検出効率が見込めることを見出した。これは予期していなかった副産物であった。

大角度最小電離粒子飛跡の自動認識は過去に行われたことがなく、我々の掴んだ結果が正しければ原子核乾板解析の可能性が大きく広がることから、これを検証すべく、大角度最小電離粒子飛跡に対する系統的な検出効率を調べる目的で2012年8月にCERNでビーム照射実験を行った。ビーム照射実験ではOPERA実験で使用している原子核乾板OPERAフィルムに高エネルギービームを大角度に渡る様々な角度で照射し、検出効率測定用サンプルを製作した。

このサンプルを用いて我々が開発した新装置にて $|\tan \theta| = 3.5$ までの最小電離粒子飛跡の検出効率を系統的に調べ、大角度でも高い検出効率で自動飛跡測定が可能であることを実証した (図 11)。

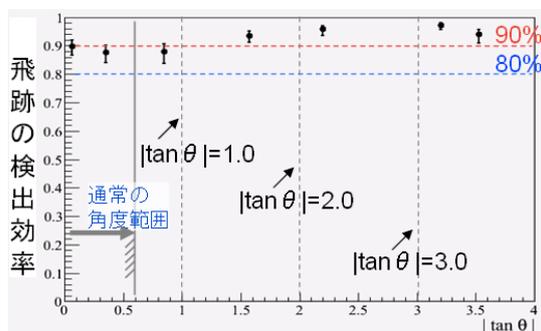


図 11: 大角度に渡る最小電離粒子飛跡の検出効率

(4-2): 新装置を用いた OPERA の新しい研究テーマの検討

新装置の大角度飛跡自動認識能力を活かす物理のテーマを検討した。

原子核乾板の特長はなんといっても ν_e 反応を検出できる点である。そこで、OPERA 検出器に蓄積されている大気ニュートリノ反応の中から、地球の裏側からくるニュートリノ振動で化けた ν_e の反応を捉えることを検討している。先行研究としてはスーパーカミオカンデの統計的な解析等があるが、事象ごとに同定したのではなく、間接的な手段によるものであるため、 ν_e 反応の出現を直接検出することは重要である。

ただし、OPERA 検出器を構成する OPERA フィルムは CERN からのニュートリノビームに対してほぼ垂直に設置してあるため、地球の裏側からのニュートリノに対しては平行な位置関係となる。従って、解析は必然的に大角度飛跡が対象となる。我々の研究によって、大角度最小電離粒子飛跡が高い検出効率で自動測定できることが明らかになり、このような発展的研究の実現可能性が拓けてきた。現在、共同研究者らとこのアイデアの詳細について検討中である。

また、大角度飛跡自動認識技術は汎用的な原子核乾板解析技術であるため、過去に行われた原子核乾板を用いた気球実験 JACEE 再解析における反陽子・反物質の対消滅点の直接検出や低エネルギーニュートリノ反応の精密解析といった目的にも有効に活用されることが考えられる。

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 5 件)

① T. Fukuda (1 番目), et al.
Automatic scanning of nuclear emulsions with wide-angle acceptance for nuclear fragment detection, 2013 JINST 8 P01023, (査読有).
(doi:10.1088/1748-0221/8/01/P01023)

② K. Hamada, T. Fukuda (2 番目), et al.
Comprehensive track reconstruction tool “NETSCAN 2.0” for the analysis of the OPERA Emulsion Cloud Chamber, 2012 JINST 7 P07001, (査読有).
(doi:10.1088/1748-0221/7/07/P07001)

③ N. Agafonova, T. Fukuda (48 番目), et al. (計 188 名:OPERA),
Search for $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam, New J. Phys. 14 (2012) 033017, (査読有).
(doi:10.1088/1367-2630/14/3/033017)

④ N. Agafonova, T. Fukuda (49 番目), et al. (計 186 名:OPERA),
Momentum measurement by multiple Coulomb scattering method in the OPERA lead-emulsion target, New J. Phys. 14 (2012) 013026, (査読有).
(doi:10.1088/1367-2630/14/1/013026)

⑤ N. Agafonova, T. Fukuda (48 番目), et al. (計 185 名:OPERA),
Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment, New J. Phys. 13 (2011) 053051, (査読有).
(doi:10.1088/1367-2630/13/5/053051)

[学会発表] (計 17 件)

① 福田 努 他
原子核写真乾板における大角度飛跡自動認識、日本写真学会、2013 年 5 月 27 日、千葉大学。

② 須藤 純、福田 努 他
原子核乾板における大角度飛跡測定のための自動飛跡読取装置の開発、日本物理学会、2013 年 3 月 28 日、広島大学。

- ③ 福田努 他
最新鋭原子核乾板自動飛跡選別装置FTSを用いたOPERA実験の解析、日本物理学会、2013年3月27日、広島大学.
- ④ 石田拓運、福田努 他
OPERA実験におけるタウ崩壊事象に対するハドロンバックグラウンド研究、日本物理学会、2013年3月27日、広島大学.
- ⑤ 鈴木平、福田努 他
OPERA実験におけるタウ・ハドロン崩壊バックグラウンドの新しい運動量領域解析、日本物理学会、2013年3月27日、広島大学.
- ⑥ 松尾友和、福田努 他
OPERA実験における τ ハドロン崩壊のバックグラウンド推定値の評価、日本物理学会、2013年3月26日、広島大学.
- ⑦ 福田努 他
OPERA実験におけるタウニュートリノ反応背景事象の詳細研究、19th ICEPP シンポジウム、2013年2月18日、長野県北安曇郡岳美山荘.
- ⑧ 福田努 他
原子核写真乾板に記録された最小電離粒子飛跡の高精度認識アルゴリズムの開発、日本写真学会、2012年11月30日、京都工芸繊維大学.
- ⑨ 石田拓運、福田努 他
OPERA実験におけるテストビームを用いたハドロンバックグラウンドの解析とその低減、日本物理学会、2012年9月12日、京都産業大学.
- ⑩ 福田努 他
OPERA実験におけるタウニュートリノ反応背景事象の詳細研究、特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会2012、2012年7月6日、奈良県吉野郡芳雲館.
- ⑪ Hiroshi Shibuya, Tsutomu Fukuda et al.
OPERA Collaboration (Poster session), Study of hadron interactions in OPERA-like bricks, NEUTRINO 2012, 8 June 2012, Kyoto TERRSA.
- ⑫ Tsutomu Fukuda et al. (Poster session)
Development of the Emulsion Neutrino Spectrometer for future neutrino experiments, NEUTRINO 2012, 5 June 2012, Kyoto TERRSA.

- ⑬ 福田努 他
GPU搭載型次世代原子核乾板自動飛跡選別装置の開発と実用、日本物理学会、2012年3月27日、関西学院大学.
- ⑭ 福田努 他
大角度荷電粒子飛跡読み出しを可能にする次世代原子核乾板自動飛跡読み取り装置の開発、日本写真学会、2011年12月5日、京都教育文化センター.
- ⑮ Tsutomu Fukuda
An application of GPU for the analysis of nuclear emulsion、核融合科学研究所研究会、2011年10月14日、核融合科学研究所.
- ⑯ 松尾友和、福田努 他
OPERA実験における τ ハドロン崩壊のバックグラウンド解析、日本物理学会、2011年9月18日、弘前大学.
- ⑰ 福田努 他
最新の原子核乾板解析技術、特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会2011、2011年7月1日、三重県三重郡鹿の湯ホテル.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 努 (FUKUDA TSUTOMU)
東邦大学・理学部・博士研究員
研究者番号：10444390

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者 該当なし