

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540347

研究課題名(和文) 磁場印加型エマルジョン検出器を用いたニュートリノ振動実験

研究課題名(英文) Neutrino oscillation experiments with emulsion spectrometers

研究代表者

渋谷 寛 (SHIBUYA, Hiroshi)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：40170922

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：OPERA実験はタウニュートリノ候補を4例検出した。この内、3例はハドロンを含む崩壊で、バックグラウンド(BG)を研究したところ、シミュレーションでよく再現できることが確認でき、BG期待値の見積もりを実験的に裏付けることができた。その結果、ミューニュートリノからタウニュートリノへの振動は4.2 $\sigma$ の統計的有意性で確立できた。バネを用いたエマルジョン検出器を製作し、ビーム照射実験を行った。解析により、適切なバネの強度と取り扱いの課題を得ることができた。新技術としてフィルム変形補正用フォトマスクと大角度飛跡認識装置の開発に成功した。これは磁場印加型エマルジョン検出器を用いた実験には重要な技術である。

研究成果の概要(英文)：The OPERA experiment has found 4 tau-neutrino candidate events. 3 out of the 4 events are in hadronic decay channels of the tau lepton, where a hadron interaction could be a source of background. We therefore studied hadron interactions in an OPERA-like emulsion/lead target. We have found that they are well reproduced by a Monte Carlo simulation (MC) and have validated MC estimation of the background due to hadron interactions in the sample of tau decay candidates. As a result, the neutrino oscillations have been established with a significance of 4.2 sigma. We made emulsion detectors with springs and performed a test beam experiment. Appropriate strength of springs was obtained together with knowledge of brick handling. New techniques on a photomask to correct deformations in emulsion and on automatic scanning with wide-angle acceptance were successfully developed. These techniques will be applied in future neutrino experiments with emulsion spectrometers.

研究分野：素粒子実験

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 エマルジョン 磁場 ニュートリノ ECC

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2008年から本格的実験が始まった長基線ニュートリノ振動実験 OPERA は、本研究課題「磁場印加型エマルジョン検出器を用いたニュートリノ振動実験」の原型で、本研究開始時は、照射4年目に入ったところである。解析は順調に進み、最初のタウニュートリノ候補事象が観測された。その頃の目標はニュートリノ照射とデータ収集を最初の計画通り遂行することと、解析面では統計を上げてタウニュートリノ( )の出現を確実に検証することであった。

(2) 一方で、今後のニュートリノ物理学の研究課題も見極めておく必要があると考えられた。近年の様々なニュートリノ振動現象の観測により、レプトンフレーバーは保存せず、ニュートリノは小さな質量を持ち、大きく混合することなど多くのことがわかってきていた。こうした状況の中で今後の重要課題は、未決定の  $\theta_{13}$  と CP の破れ( )の測定だといわれていた。そのような精密測定が必要な時代に期待されるのはすべての種類のニュートリノ反応をバイアスなしに検出できる検出器で、 を検出できる Emulsion Cloud Chamber (ECC) はその有力な候補である。この ECC を磁場中に置き、飛跡の曲がり観測できれば、その能力はさらに向上するため、本研究課題が立案された。

## 2. 研究の目的

多数の薄い金属板とエマルジョンフィルムを交互に積層した ECC は、長基線ニュートリノ振動実験 OPERA の主検出器で、原理的には3種類のフレーバーのニュートリノ反応を識別して検出できるという特長を持つ。この ECC を磁場中に設置して二次粒子(特にレプトン)の電荷符号を測定できれば、6種類のニュートリノ・反ニュートリノ反応を区別でき、新しい物理を拓くことができる。そこで、OPERA 実験を推進し、貢献する中で経験を深め、必要な新技術も開発しつつ、磁場印加型エマルジョン検出器を用いたニュートリノ振動実験の実現に向けた研究を行う。

## 3. 研究の方法

(1) OPERA 実験は CERN 研究所からほぼ純粋なミューニュートリノを 730km 離れたグランサッソ地下研究所に打ち込み、ニュートリノ振動によって現れたタウニュートリノの反応を約 15 万個の ECC ブリックからなるエマルジョン検出器でとらえる出現型ニュートリノ振動実験である。ビーム照射実験の遂行からエマルジョンフィルムの現像処理、高速自動飛跡読み取り装置を駆使した解析まで全ての技術が次世代のニュートリノ振動実験の基礎となる。従って、この実験に積極的に参加し、経験を深めると共に、新しい技術開発を行う。

(2) 一方で、磁場中に設置するエマルジョン

検出器を設計、製作し、加速器研究所のハドロンビームを照射し、その基礎性能を調べることも重要である。本研究期間では、CERN 研究所の数 GeV/c 領域のハドロンビームを照射することができ、ハドロン反応の基礎的な性質(反応断面積、二次粒子多重度、放出角度分布、運動量分布、核破砕片放出確率、核破砕片放出角度分布など)の測定、大角度最小電離粒子の銀粒子密度測定、エマルジョン検出器の構造と固定法の研究に供することができた。

## 4. 研究成果

(1) 数 GeV/c 領域のハドロン反応の研究：OPERA 実験では、タウニュートリノ反応から放出されたタウレプトンの崩壊による飛跡の折れ曲がり(キック)をエマルジョン中で検出してタウニュートリノ反応と同定する。このとき、通常のミューニュートリノ反応から放出された二次ハドロンが鉛板中で衝突し、反応を起こすと、タウレプトン崩壊のように見えることがあり、運動学的条件も同時に満たすと、バックグラウンド(BG)となり得る。この確率はモンテカルロ・シミュレーション(MC)により見積もられるが、実験的検証が必要である。これは次世代のニュートリノ振動実験においてもタウニュートリノ検出時に同じ問題が起こる可能性があり、解決しておく必要があった。

過去に 2GeV/c、4GeV/c、10GeV/c 中間子を照射した OPERA 型 ECC ブリックに蓄積されたハドロン反応の精密解析を行った。まず、高速自動飛跡読取装置で読み取った飛跡群のデータから、最上流のフィルム 3 枚でビームを抽出し、下流に接続する。連続 3 枚のフィルムで飛跡が観測されないと反応点候補となり、マニュアルチェックによる目視確認を経て、ハドロン反応点が決定される。この反応点の個数と分布から の平均自由行程を導き、各運動量の MC の予想値と比べるとどれも実験誤差の範囲内で良く合っていることがわかった。次にハドロン反応点から放出された二次粒子を下流 3 枚中で探索し、最後はマニュアルチェックにより確認する。その結果、二次粒子多重度分布、放出角度分布を求めることができ、これも MC の予測と比較すると、ほぼ一致していることがわかった。二次粒子の運動量を ECC 中の多重電磁散乱を測定して見積もり、運動量と横運動量に対するカット条件を満たすシグナル領域に入る二次粒子の個数を求めると、これも MC が実験をほぼ再現できる。さらに、核破砕粒子の付随率の系統的な研究も行った。フィルムに対する傾きが  $\tan^{-1} = 3.0$  までの大角度核破砕粒子の検出には新しい広視野自動飛跡認識装置と解析のためのソフトウェアの開発が必要であった。この仕事も遂行し、4GeV/c 以上の高い運動量では 50%以上の付随率で核破砕粒子が観測されることを見出した。これはハドロン反応の BG を 50%以上除去すること

を意味し、大きな成果である。また、角度分布についても MC との比較を行い、ほぼ一致していることを確認した。本解析により、BG の見積もりの大きな不定性が除かれ、信頼できることが実験的に確認された。OPERA 実験では現在 4 例の候補の検出に成功しているが、上記 BG の見積もりの信頼性を基に、μ 振動の観測を 4.2 の統計的有意性をもって確立することができた。

#### (2) 大角度自動飛跡認識装置の開発:

上述のハドロン反応の研究において、大角度核破砕片の検出が必要となり、広視野 CMOS カメラを搭載した新型自動飛跡認識装置を構築した。大角度飛跡を認識するためには広範囲の断層画像データを取得し、それらを重ね合わせる必要から、大量画像の並列処理に適したグラフィクス・プロセッシング・ユニット(GPU)を用いて大角度飛跡を高速に認識できるシステムを作り上げた。断層映像ごとの飛跡認識率から検出効率はほぼ 100%ということも確認できた。さらに、この研究の中で従来は困難と思われていた大角度最小電離粒子も  $\tan \theta = 3.5$  の飛跡まで検出効率 90%以上で認識できることがわかった。

#### (3) 磁場印加型エマルジョン検出器の構造と組み立て法の研究:

2009年度の CERN 照射実験で見つかった課題(平面性を保つためにフィルムとスペーサーの固定を緩くすると照射のための移動の際、フィルムがスリップしてしまう問題)の解決を目指し、バネを用いたエマルジョン検出器を製作し、2012年夏 CERN 研究所にて、ビーム照射実験を遂行した。バネの強さは 4, 8, 12, 20, 40, 80N の 6 種類を用意し、図 1 のように、バネを 4 か所に入れたエマルジョン検出器(スタック)を 6 個製作した。

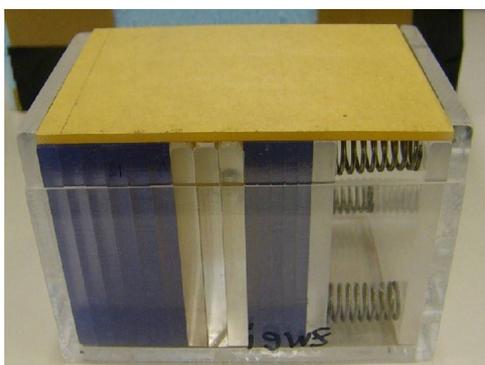


図 1 : バネを用いたエマルジョン検出器

ビーム照射の間に 2 種類の衝撃を与える次の実験を行った。

6GeV/c  $\pi^-$  ビームをフィルムに垂直に照射する。(  $\theta = 0.0\text{rad}$  )

スタックを持ち、磁気回路に入れるなどの通常の動作を行う。(通常動作)

6GeV/c  $\pi^-$  ビームを角度を変えて照射する。

(  $\theta = 0.1\text{rad}$  )

4 3cm の高さから机の上に落とす。(落下衝撃)

5 6GeV/c  $\pi^-$  ビームを別角度に変えて照射する。(  $\theta = -0.1\text{rad}$  )

この実験を 6 回繰り返した。フィルム現像後、ビームのパターンを撃くとスリップ(フィルムのズレ)があるか否かがわかる。その結果、通常動作の場合には 40N 以上の強さのバネならば、ズレは  $1\mu\text{m}$  以下に保てることがわかった。落下衝撃の場合には 80N の場合でも  $10\mu\text{m}$  程度のズレが生じることがわかった。フィルムの平面性についてはプラスチックのスペーサーを間に挟む方法が有効で、十分な平面性が得られることがわかった。

#### (4) フィルムの変形の補正法:

磁場印加型エマルジョン検出器(エマルジョン・スペクトロメーター)では原子核乾板(エマルジョンフィルム)を位置検出器として用いる。通常のエマルジョンを用いた実験の解析ではたとえば、ニュートリノ反応と放出されたタウレプトンの崩壊点の幾何学的再構成などのようにフィルムの数  $\text{mm}^2$  以内で完結することが多い。ところが、エマルジョン・スペクトロメーターとしての利用を考えると、数  $\text{cm}^2$  の範囲にわたることも考えられる。その場合に問題になるのが、エマルジョンフィルムの変形で、ビーム照射から測定までの間にフィルムが変形してしまう。この変形が一樣であれば、補正は比較的簡単で問題はないが、現実には非一様性があることが知られている。この変形は主に現像時に発生すると考えられる。フィルム保存時にも変形があり得る。この変形をビーム照射直後に精密なフォトマスクの基準点をフィルムに印刷することによって補正できるか確認する研究を行った。フォトマスクは合成石英ガラス基板上を  $0.4\mu\text{m}$  厚の酸化クロムが遮光膜として覆ったもので、基準点パターンは光学技術によって形成される。基準点の間隔の精度は  $0.2\mu\text{m}$  で、熱膨張係数が  $5.8 \times 10^{-7} \text{K}^{-1}$  と通常のガラスと比べ、20分の1以下であることが特長である。

CERN 研究所の 30, 40, 150GeV/c のミュオンビームを照射して、その直後にフォトマスクの基準点パターンを密着転写した。現像後のフィルムのパターンを測定すると、最大  $20\mu\text{m}$  程度の変形が認められた。このフォトマスクの基準点パターンを用いた変形の補正が有効であるかを検証するために、30, 40GeV/c のミュオンビームの運動量を多重電磁散乱によって求めたところ、フォトマスク基準点による補正が有効で、位置精度に換算すると、 $5\text{cm} \times 7\text{cm}$  の領域に渡って  $0.6\mu\text{m}$  の精度の位置の精密測定が可能であることがわかった。これは将来の磁場印加型エマルジョン検出器を用いたニュートリノ実験に不可欠な技術と考えられる。

## 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 11 件)

N. Agafonova, S. Mikado(94 番目), S. Ogawa(107 番目), H. Shibuya(140 番目) et al.(計 171 名), Evidence for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment, Phys. Rev. D 89, 051102(R) 1-6 (2014) 査読有 . DOI:10.1103/PhysRevD.89.051102

N. Agafonova, S. Mikado(89 番目), S. Ogawa(103 番目), H. Shibuya(137 番目) et al.(計 169 名), New results on  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam, Journal of High Energy Physics 11, 036 0-31 (2013) 査読有 . doi:10.1007/JHEP11(2013)036

N. Agafonova, S. Mikado(87 番目), S. Ogawa(98 番目), H. Shibuya(132 番目) et al.(計 163 名), Search for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  oscillations with the OPERA experiment in the CNGS beam, Journal of High Energy Physics 07, 004 0-15 (2013) 査読有 . doi:10.1007/JHEP11(2013)036

4 M. Kimura, H. Ishida, H. Shibuya, S. Ogawa, T. Matsuo, C. Fukushima, G. Takahashi, K. Kuge, Y. Sato, I. Tezuka, S. Mikado, A new method to correct deformations in emulsion using a precise photomask, Nucl. Instrum. Meth. A 711, 1-7 (2013) 査読有 . doi:10.1016/j.nima.2013.01.052

5 T. Fukuda, S. Fukunaga, H. Ishida, K. Kodama, T. Matsuo, S. Mikado, S. Ogawa, H. Shibuya, J. Sudo, Automatic scanning of nuclear emulsions with wide-angle acceptance for nuclear fragment detection, Journal of Instrumentation 8, P01023 0-12 (2013) 査読有 . doi:10.1088/1748-0221/8/01/P01023

6 T. Adam, T. Fukuda, H. Ishida, T. Matsuo, S. Mikado(95 番目), S. Ogawa(106 番目), H. Shibuya(139 番目) et al. (計 170 名), Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam using the 2012 dedicated data, Journal of High Energy Physics 01, 153 0-13 (2013) 査読有 . doi:10.1007/JHEP01(2013)153

7 T. Adam, T. Fukuda, H. Ishida, T. Matsuo, S. Mikado(108 番目), S. Ogawa(122 番目), H. Shibuya(157 番目) et al. (計 190 名), Measurement of the neutrino velocity with

the OPERA detector in the CNGS beam, Journal of High Energy Physics 10, 093 -2-34 (2012) 査読有 . doi:10.1007/JHEP10(2012)093

8 N. Agafonova, S. Mikado(102 番目), S. Ogawa(117 番目), H. Shibuya(151 番目) et al.(計 188 名), Search for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam, New J. Phys. 14, 033017 1-17(2012) 査読有 . doi:10.1088/1367-2630/14/3/033017

9 N. Agafonova, S. Mikado(103 番目), S. Ogawa(117 番目), H. Shibuya(151 番目) et al.(計 186 名), Momentum measurement by the multiple Coulomb scattering method in the OPERA lead-emulsion target, New J. Phys. 14, 013026 1-19(2012) 査読有 . doi:10.1088/1367-2630/14/1/013026

10 A. Kayis-Topaksu, S. Ogawa(17 番目), H. Shibuya(18 番目) et al. (計 88 名), Measurement of charm production in neutrino charged-current interactions, New J. Phys. 13, 093002 1-15(2011) 査読有 . doi:10.1088/1367-2630/13/9/093002

11 N. Agafonova, S. Mikado(102 番目), S. Ogawa(116 番目), H. Shibuya(150 番目) et al.(計 185 名), Study of neutrino interactions with the electronic detectors of the OPERA experiment, New J. Phys. 13, 053051 1-22(2011) 査読有 . doi:10.1088/1367-2630/13/5/053051

[学会発表](計 17 件)

1 西村秋哉, 渋谷寛, 小川了, 三角尚治他, OPERA 実験におけるタウ崩壊のバックグラウンドとなるハドロン反応の研究, 日本物理学会 第69回年次大会, 2014年3月27日, 東海大学湘南キャンパス(平塚市).

2 H. Shibuya, T. Fukuda, C. Fukushima, H. Ishida, M. Kimura, T. Matsuo, S. Mikado, S. Ogawa, Emulsion Neutrino Spectrometer for future neutrino experiments, Workshop on Nuclear Track Emulsion and its Future, (Predeal, Romania) 14 October 2013.

3 T. Matsuo, S. Mikado, S. Ogawa, H. Shibuya et al., Study of Neutrino Oscillations in the OPERA Experiment, The 12<sup>th</sup> Asia Pacific Physics Conference (APPC12) 2013年7月17日, 幕張メッセ国際会議場(千葉市).

4 土田勇介, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 石田拓運, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 牧野隆起, 福永匠吾, 原子核乾板自

動飛跡選別装置 FTS の開発, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

5 須藤純, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 牧野隆起, 福永匠吾, 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 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 28 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

6 福田努, 渋谷寛, 小川了, 松尾友和, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 牧野隆起, 福永匠吾, 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 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

7 鈴木平, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 須藤純, 牧野隆起, 三角尚治他, 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 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

8 石田拓運, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 牧野隆起, 三角尚治他, 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 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

9 牧野隆起, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 三角尚治他, OPERA 実験における Gran Sasso 研究所現地での Brick Handling 現状, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

10 松尾友和, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 牧野隆起, 三角尚治他, OPERA 実験におけるハドロン崩壊バックグラウンド推定値の評価, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス(東広島市).

11 石田拓運, 松尾友和, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 牧野隆起, 三角尚治他, 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解析とその低減, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 12 日, 京都産業大学(京都市).

12 H. Shibuya, H. Ishida, T. Matsuo, S. Mikado, S. Ogawa, A. Sheshukov, et al., Study of hadron interactions in OPERA-like bricks, The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2012 年 6 月 3 日~6 月 8 日, 京都テルマ(京都市).

13 石田拓運, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 三角尚治他, OPERA 実験における核破砕粒子・ガンマ線を用いたバックグラウンドの解析, 日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス(西宮市).

14 福田努, 渋谷寛, 小川了, 松尾友和, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 三角尚治他, 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 第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 27 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス(西宮市).

15 H. Shibuya, S. Ogawa, T. Fukuda, S. Mikado, C. Fukushima, M. Kimura, T. Matsuo, H. Ishida, Y. Tsuchida, T. Kajiwara, J. Sudo, T. Suzuki, Emulsion scanning system of Toho University, Workshop on J-PARC E07 Experiment, October 9, 2011, Pusan National University (Busan, Korea).

16 石田拓運, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 松尾友和, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 三角尚治他, OPERA 実験における核破砕粒子・ガンマ線を伴うバックグラウンドの解析, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学文京町キャンパス(弘前市).

17 松尾友和, 渋谷寛, 小川了, 福田努, 石田拓運, 土田勇介, 梶原崇史, 鈴木平, 須藤純, 三角尚治他, OPERA 実験におけるハドロン崩壊のバックグラウンド解析, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年 9 月 18 日, 弘前大学文京町キャンパス(弘前市).

〔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

<http://www.ph.sci.toho-u.ac.jp/lab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渋谷 寛 (SHIBUYA, Hiroshi)  
東邦大学・理学部・教授  
研究者番号：40170922

### (2) 研究分担者

三角 尚治 (MIKADO, Shoji)  
日本大学・生産工学部・准教授  
研究者番号：80408947

### (3) 連携研究者

小川 了 (OGAWA, Satoru)  
東邦大学・理学部・教授  
研究者番号：10256761

### (4) 研究協力者

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