

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707019

研究課題名(和文) 加速器によるタウニュートリノ出現モードを用いた  $\mu$  ニュートリノ振動解析

研究課題名(英文) The neutrino oscillation analysis with tau neutrino appearance in a long-baseline accelerator experiment

研究代表者

福田 努 (FUKUDA, Tsutomu)

名古屋大学・高等研究院(理学研究科)・YLC特任助教

研究者番号：10444390

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究を通して計5例のタウニュートリノ反応事象を検出し、OPERA実験の最大の目的であったタウニュートリノ出現を $5.1\sigma$ の信頼度で"発見"した。これによりニュートリノ振動現象の最終検証が完了した。また、(1)タウニュートリノ反応の選別条件を緩めた新しいセレクションの適用、(2)背景事象の詳細研究による系統誤差の低減を進め、ニュートリノ振動パラメータの測定精度向上に成功した。さらに、本研究者が実験代表者(PI)として次世代のニュートリノ振動研究に向けた新しいニュートリノ反応精密測定実験(NINJA実験)を立ち上げ、J-PARCにて水標的・鉄標的原子核乾板検出器にニュートリノビーム照射を実施した。

研究成果の概要(英文)：Total five tau neutrino events have been detected, allowing to reject the background-only hypothesis at  $5.1\sigma$  through this research. This means that tau neutrino appearance has been discovered and the biggest goal of the OPERA experiment has been successfully achieved. Consequently, final verification for the neutrino oscillation has been completed. Then the accuracy for neutrino oscillation measurement in OPERA has been improved with new (looser) selection criteria for tau neutrino detection and reduction of the systematic error by a detailed study for the background. Furthermore, I proposed a new experimental project that aims at precise measurement of neutrino interactions with nuclear emulsion detector at J-PARC for next generation neutrino oscillation experiments. The NINJA Collaboration was newly established for this purpose with myself being a Principal Investigator (PI). We have implemented the neutrino beam exposure with water and iron target emulsion detector at J-PARC.

研究分野：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 CERN Appearance J-PARC NINJA実験

## 1. 研究開始当初の背景

OPERA 実験は、1998 年にスーパーカミオカンデ検出器によって観測された大気ニュートリノ振動現象の最終検証を目的としている。それまで入射ニュートリノの消失 (Disappearance) として捉えられていた振動現象を、別種のニュートリノの出現 (Appearance) として明快に捉えることで、その存否に最終決着をつけるべく計画された。

具体的には、タウニュートリノ ( ) を検出した唯一の実績を持つ原子核乾板検出器 ECC (Emulsion Cloud Chamber) を主検出器とした OPERA 検出器 (標的質量: 1.25kton) をイタリアの Gran Sasso 地下研究所に設置し、スイスの CERN の加速器 SPS を用いて作った平均 17GeV のミュニュートリノ (  $\mu$  ) を照射、730km 飛行する間にニュートリノ振動によって に化けた事象を直接捉える。

我々は、2008 年度からの  $\mu$  ビームの本格照射開始以来、 反応探索を進め、2013 年 4 月 (研究開始当初) の時点で、計 3 例の 反応候補事象を検出し、3.4 の統計的有意度で 出現の証拠を掴んだ。本研究ではこの研究をさらに推し進め、以下で述べる研究目的の達成を目指す。

## 2. 研究の目的

- (1) 出現の発見 (5 以上の統計的有意度) によるニュートリノ振動現象の最終検証
- (2) 出現による  $\mu$  ニュートリノ振動解析の高精度化

## 3. 研究の方法

(1) OPERA 実験の最大の目的である出現の発見 (統計的有意度 5 以上) に向けて、  
: ニュートリノ反応解析を推進し、新たな反応候補事象を検出する。

: 検出した 反応候補事象に本研究代表者が新たに開発した大角度飛跡自動認識技術を適用し、背景事象を低減させることで、信頼性 (有意度) を向上させる。

(2) ニュートリノ振動解析の高精度化に不可欠な統計誤差・系統誤差の低減に向けて、

: 反応の選別条件を緩めた新しいセレクションを適用し、 反応候補事象の検出数を稼ぐことでシグナルの統計誤差を減らし、高統計の  $\mu$  振動解析を行う。

: でセレクションを緩めることにより反応の背景事象がシグナル領域に大量に入ってくる。そこで主要な背景事象であるハドロンの 2 次反応の詳細研究を進め、背景事象推定値を精緻化し、  $\mu$  振動解析に計上する系統誤差を減らす。

## 4. 研究成果

(1) “ 出現の発見 ” 及びニュートリノ振動現象の最終検証を完遂

新たに 4、5 例目のタウニュートリノ反応を検出し、背景事象の低減を実施したことで、5.1 の統計的有意度に到達した。すなわち、加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験において、 出現を発見 した。これにより、ニュートリノ振動現象の最終検証が完了した。

(2) 出現によるニュートリノ振動解析の高精度化に成功

ニュートリノ振動解析においてタウニュートリノ検出の選別条件を緩めた新しいセレクションを導入することにより既に検出していた 5 例に加えて、さらに 5 例のタウニュートリノ反応候補事象を検出した。この計 10 例 (うち背景事象推定値は 2.0 例) を用いた 出現によるニュートリノ振動測定を行い、  $m_{23}^2 = 2.8 \pm 0.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  を算出した。また、タウニュートリノ反応の背景事象となるハドロンの系統的な詳細解析を進め、この振動測定に対する系統誤差を 30% から 20% に低減することに成功した。

さらに予期していなかった成果として、新たに検出した 5 例のタウニュートリノ反応候補事象の中に、チャーム粒子を伴うタウニュートリノ反応を 1 例検出した (世界初)。

(3) 原子核乾板を用いた新たなニュートリノ実験プロジェクトを立案・推進

物質優勢宇宙の起源に対する重要な手がかりが得られると考えられているニュートリノの「CP 対称性の破れ」の検証に向けた次世代のニュートリノ振動精密測定実験において不可欠となるニュートリノ反応自身の精密測定を目的とした、新たな原子核乾板を用いたニュートリノ実験計画 (NINJA 実験) を提案し、実験グループを立ち上げた。 また、実験代表者 (PI) としてグループを主導して J-PARC でのニュートリノビーム照射実験を成功させた。

以下に研究成果 (1), (2), (3) の詳細を記す。

(1)

: 2008 年度から進めてきたニュートリノ反応解析を推し進め、約 1,000 事象のニュートリノ反応を新たに検出し (計 5,400 事象) その中に 2 例のタウニュートリノ反応事象を検出した (第 4 例目: 図 1 は 2014 年 3 月、第 5 例目: 図 2 は 2015 年 6 月に公表)。検出した 2 例はともに 粒子がハドロンの (粒子) に崩壊した事象で、以上から OPERA で検出した CC 反応は、  $\mu$  崩壊 (17.9%) が 1 例、  $\mu$  ハドロンの崩壊 (49.5%) が 3 例、  $\mu$  ハドロンの崩壊 (15.2%) が 1 例となった (括弧内は 粒子の崩壊確率)。

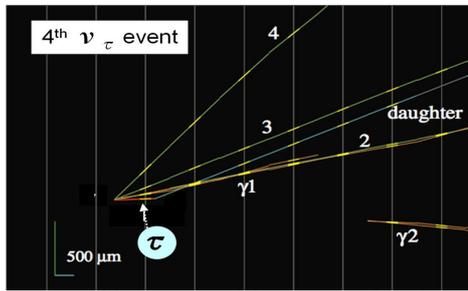


図1：検出した4例目の 反応事象

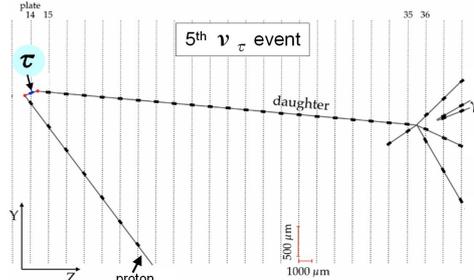


図2：検出した5例目の 反応事象

：検出した5例の 反応のうち4例のハドロン崩壊モードの主要な背景事象は1次反応点から放出したハドロンの2次反応が粒子の崩壊のように見えてしまうケースである(図3)。ハドロン2次反応は高い確率で核破砕片を伴うため、崩壊点周りの核破砕片探索は 反応事象との識別(背景事象の低減)に有効である。ただし、核破砕片はほぼ等方的に放出されるため、新たに大角度飛跡を自動検出できる装置を本研究課題代表者が中心となって開発した。この新装置を検出した 反応全てに適用し、 $|\tan \theta| = 3.0$  までの大角度(従来は $|\tan \theta| = 0.6$  まで)に渡る系統的な核破砕片探索の結果、核破砕片の非付随を実証し、 反応の信頼性を大幅に向上させることに成功した(図4：背景事象であれば50%以上の確率で核破砕片が付随する)。

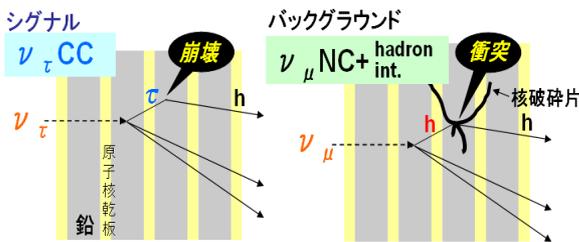


図3： 反応と背景事象(ハドロン2次反応)

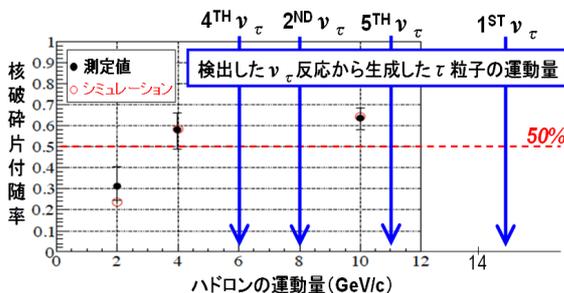


図4：ハドロン2次反応における核破砕片付随率の運動量依存性と、実際に検出した反応から生成した 粒子の運動量

以上、 の 反応事象の検出(計5事象)の背景事象低減(推定値:0.25事象)からシグナルの統計的有意度が5.1と算出され、これをもって「出現の発見」を達成した。

本研究成果により、ニュートリノ振動現象の最終検証が完了し、同年10月にニュートリノ振動現象の最初の発見者である梶田氏・McDonald氏にノーベル物理学賞が授与された(OPERAの成果は2015年度ノーベル物理学賞のAdvanced Informationで引用されている)。また、OPERAの研究成果に直結した本研究課題代表者の解析技術開発(自動飛跡認識の「高精度化」及び「大角度化」)に対して、「平成26年度日本写真学会 進歩賞」原子核写真乾板における自動飛跡認識技術の高度化研究、OPERA実験グループに対して4例目の 反応検出を報告した学術論文に第21回日本物理学会 論文賞が授与された。

(2)

：背景事象を抑え、高い有意性(5)で出現の発見を目指したニュートリノ振動解析で得られた5事象(背景事象数=0.25)でニュートリノ質量二乗差  $m_{23}^2$  を算出し、 $m_{23}^2 = 3.3 \pm 0.9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  (68%CL)を得た。次に 反応数の統計を上げるべく、ハドロンモード崩壊の娘粒子に課す選別条件の運動量・横向き運動量を  $2 \rightarrow 1 \text{ GeV}/c$ ,  $0.6 \rightarrow 0.15 \text{ GeV}/c$  と緩めることで新たに5例の 反応候補事象を検出した。計10事象につき背景事象数の推定値は2.0事象である。この研究はTufanli氏(ベルン大)、Galati氏(ナポリ大)と共同で行った。また、新たに検出した 反応の中にチャーム粒子を生成したと考えられる事象を1例発見した(図5)。

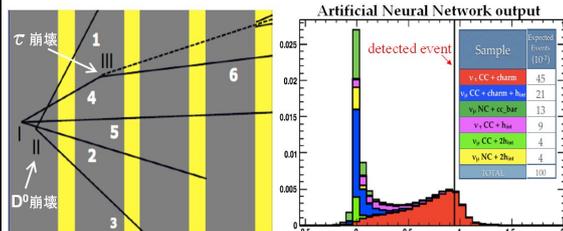


図5：検出した CC+charm 事象(世界初)

：新たなセレクションではハドロンの2次反応起因の背景事象数が増大するため、その推定値の精度を上げることで系統誤差を低減する。2012年にCERNで行ったハドロンビーム照射実験の解析を進め、2,3,4,5,6GeV/c粒子のECC中での反応から放出する2次粒子の運動量・横向き運動量を系統的に調べ、従来の8.1倍の統計で背景事象推定に使用しているシミュレーションを実験的に検証し、測定値をよく再現していることを実証した(図6)。この研究によりハドロン2次反応起因の背景事象につき系統誤差の低減(30% 20%)を達成した。

以上、 の結果に基づいたニュートリノ振動解析から  $m_{23}^2 = 2.8 \pm 0.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  (68%CL)を得て、測定精度の向上に成功した。

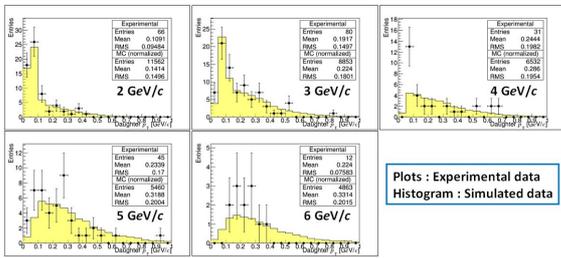


図 6 : ハドロン反応 2 次粒子の横向き運動量分布

(3)  
 今後のニュートリノ振動研究は“発見”から“精密測定”へと新たなステージに移行する。特に  $\nu_{13}$  が十分に大きな値を持つことが明らかになり、ニュートリノに CP 対称性の破れがあるか否かを実験的に検証することが可能であると判明した。ニュートリノの CP 対称性の破れは我々の住む物質優勢な宇宙の起源を説明する有力なシナリオの一つであり、これを解き明かすことは現代物理学上の重要なテーマである。この次世代のニュートリノ振動精密測定実験で不可欠となるニュートリノ反応自身の精密測定に OPERA 実験で培った原子核乾板技術を導入する **次期実験計画を提案**し、OPERA 実験・T2K 実験に共同研究者を募って **新しい研究グループを立ち上げた (NINJA 実験)**。

- NINJA 実験は本研究課題代表者を実験代表者 (PI) として J-PARC でのニュートリノビーム照射実験を PAC (原子核素粒子共同利用実験審査委員会) にて承認され、2014 年度末から 4 度の実験を実施し、以下の成果を挙げた。
- ・ 2kg 鉄標的 ECC を T2K 実験の前置検出器 INGRID の前方に設置し、
  - **J-PARC でのニュートリノ反応の初検出。**
  - 原子核乾板に時間情報を付与する **シフター機構の初導入、長時間運用の成功。**
  - INGRID との **ハイブリッド解析の実現** (図 7)。

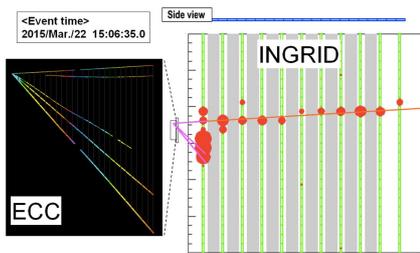


図 7 : NINJA 実験で検出したニュートリノ反応

- ・ 1kg 水標的 ECC (図 8 左) を試作し、原子核乾板検出器での **ニュートリノ - 水反応の初検出**。
- ・ 60kg 鉄標的 ECC (図 8 右) による 3,000 事象レベルの **高統計 反応解析の推進**。



図 8 : 1kg 水標的 ECC と 60kg 鉄標的 ECC

また、NINJA 実験は将来の **ステライルニュートリノ探索やチャームを含むエキゾチックなハドロン・原子核の発見** に繋がる可能性がある。

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 )  
 T. Fukuda ( 1 番目 ), et al.  
 First neutrino event detection with nuclear emulsion at J-PARC neutrino beamline, accepted by PTEP ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1093/ptep/ptx077 )  
 T. Fukuda ( 1 番目 ),  
 Discovery of  $\nu\tau$  appearance and recent results from OPERA, Nuovo Cim. 39 C (2016) 315, ( 査読無 ).  
 ( doi:10.1393/ncc/i2016-16315-9 )  
 N. Agafonova, T. Fukuda ( アルファベット順 34 番目 ), et al. ( 計 141 名:OPERA ),  
 Discovery of  $\nu\tau$  Appearance in the CNGS Neutrino Beam with the OPERA Experiment, Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 121802, ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1103/PhysRevLett.115.121802 )  
 N. Agafonova, T. Fukuda ( アルファベット順 33 番目 ), et al. ( 計 130 名:OPERA ),  
 Limit on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained OPERA at the CNGS beam, JHEP 6 (2015) 69, ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1007/JHEP06(2015)069 )  
 T. Fukuda ( 1 番目 ), et al.  
 Automatic track recognition of large angle minimum ionizing particles in nuclear emulsions, JINST 9 (2014) P12017, ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1088/1748-0221/9/12/P12017 )  
 N. Agafonova, T. Fukuda ( アルファベット順 33 番目 ), et al. ( 計 147 名:OPERA ),  
 Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment, PTEP 2014 101C01 (2014), ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1093/ptep/ptu132 )  
 H. Ishida, T. Fukuda ( 2 番目 ), et al.,  
 Study of hadron interactions in a lead-emulsion target, PTEP 2014 093C01 (2014), ( 査読有 ). ( doi:10.1093/ptep/ptu119 )  
 N. Agafonova, T. Fukuda ( アルファベット順 32 番目 ), et al. ( 計 138 名:OPERA ),  
 Procedure for short-lived particle detection in the OPERA experiment and its application to charm decays, Eur. Phys. J. C74 (2014) 2986, ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1140/epjc/s10052-014-2986f-0 )  
 N. Agafonova, T. Fukuda ( アルファベット順 43 番目 ), et al. ( 計 172 名:OPERA ),  
 Evidence for  $\nu\mu \rightarrow \nu\tau$  appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment, Phys. Rev. D89 (2014) 51102, ( 査読有 ).  
 ( doi:10.1103/PhysRevD.89.051102 )

N. Agafonova, T. Fukuda (アルファベット順 39 番目), et al. (計 169 名: OPERA), New result on  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam, JHEP 11 (2013) 39, (査読有).

(doi:10.1007/JHEP11(2013)036)

N. Agafonova, T. Fukuda (アルファベット順 38 番目), et al. (計 163 名: OPERA), Search for  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$  oscillation with the OPERA experiment in the CNGS beam, JHEP 7 (2013) 4, (査読有).

(doi:10.1007/JHEP07(2013)004)

〔学会発表〕(計 45 件)

**福田努 【招待講演】**

長基線ニュートリノ振動実験 OPERA による  
タウニュートリノ出現の実証、京都大学大学院  
理学研究科 高エネルギー物理学研究室  
セミナー、2017 年 6 月、京都大学。

福田努 他 NINJA Collaboration

J-PARC T60 実験：J-PARC での原子核乾板  
を用いたニュートリノビーム照射実験、日本  
物理学会、2017 年 3 月、大阪大学。

佐藤修、福田努 他 OPERA Collaboration  
ニュートリノ振動実験 OPERA の最新結果、  
日本物理学会、2017 年 3 月、大阪大学。

水沢萌、福田努 他 OPERA Collaboration  
OPERA 実験でのバックグラウンドとなるハ  
ドロン反応の詳細解析、日本物理学会、2017  
年 3 月、大阪大学。

**福田努 【招待講演】**

NINJA : Neutrino Interaction research  
with Nuclear emulsion and J-PARC  
Accelerator、J-PARC 素粒子原子核セミナー、  
2017 年 2 月、いばらき量子ビーム研究センター。

福田努

J-PARC T60 : J-PARC での原子核乾板を用  
いたニュートリノ反応精密測定実験、第 23 回  
ICEPP シンポジウム、2017 年 2 月、岳美荘。

福田努

J-PARC における原子核乾板を用いたニュ  
ートリノ研究の展望、科学写真研究会、2017  
年 2 月、名古屋大学。

**T. Fukuda 【招待講演】**

Neutrino research program with Nuclear  
Emulsion at J-PARC、The 3<sup>rd</sup> KMI Interna  
tional Symposium、2017 年 1 月、Nagoya Univ.

福田努 他

J-PARC T60 実験：J-PARC での原子核乾板  
を用いたニュートリノビーム照射実験、日本  
物理学会、2016 年 9 月、宮崎大学。

水沢萌、福田努 他 OPERA Collaboration  
OPERA 実験でのタウ崩壊検出におけるバ  
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、2016 年 9 月、宮崎大学。

**T. Fukuda et al. 【招待講演】**

J-PARC T60 : Precise measurement of  
neutrino-nucleus interactions with Nuclear  
Emulsion、NuFact 2016、2016 年 8 月、ICISE  
(Quy Nhon, Vietnam).

**T. Fukuda 【招待講演】**

A review of progress in R&D for neutrino  
detectors、Neutrino 2016、2016 年 7 月、  
Royal Geographical Society (London, UK).

福田努 他

J-PARC T60 実験：J-PARC での原子核乾板  
を用いたニュートリノビーム照射実験、日本  
物理学会、2016 年 3 月、東北学院大学。

水沢萌、福田努 他 OPERA Collaboration  
OPERA 実験でのタウ崩壊検出におけるバ  
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、2016 年 3 月、東北学院大学。

**T. Fukuda et al (OPERA). 【招待講演】**

Discovery of  $\nu_{\tau}$  Appearance and Recent  
Results from OPERA、La Thuile 2016、2016  
年 3 月、Hotel Planibel (La Thuile, Aosta  
Valley, Italy).

福田努

Neutrino Experiments with Nuclear  
Emulsion – OPERA & J-PARC T60 –、第 22  
回 ICEPP シンポジウム、2016 年 2 月、岳美荘。

T. Fukuda

Neutrino research program with Nuclear  
Emulsion – J-PARC T60 and future –、新学術領  
域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研  
究会、2015 年 12 月、ウェルシティー湯河原。

T. Fukuda

The Experimental Project for Study of Neut  
rinos with Nuclear Emulsion at J-PARC、  
ISETS'15、2015 年 11 月、Nagoya Univ.

福田努

OPERA フィルムにおける荷電粒子の電離損  
失に対する応答、画像関連学会連合会、2015  
年 11 月、京都工芸繊維大学。

水沢萌、福田努 他 OPERA Collaboration  
OPERA 実験におけるハドロンバックグラ  
ウンドの詳細解析、画像関連学会連合会、2015  
年 11 月、京都工芸繊維大学。

② **T. Fukuda 【招待講演】**

Experimental study of neutrino properties  
with modern nuclear emulsion technology  
– OPERA & J-PARC T60 –、神岡セミナー、  
2015 年 10 月、神岡宇宙素粒子研究施設。

② 松尾友和、福田努 他 OPERA Collaboration  
ニュートリノ振動実験 OPERA における大角  
度飛跡解析、日本物理学会、2015 年 9 月、  
大阪市立大学。

③ 福田努 他

J-PARC T60 実験：J-PARC での原子核乾板  
を用いたニュートリノビーム照射実験、日本  
物理学会、2015 年 9 月、大阪市立大学。

④ T. Fukuda et al.

T60: Emulsion based test experiment in  
Neutrino beamline、20<sup>th</sup> J-PARC PAC  
meeting、2015 年 7 月、J-PARC。

⑤ T. Fukuda et al.

Neutrino Research Program with Nuclear  
Emulsion at J-PARC、ICAI2015、2015 年 6  
月、National Center of Science.

- ②⑥ 福田 努 他  
J-PARC T60 実験：J-PARC での原子核乾板を用いたニュートリノビーム照射実験、日本物理学会、2015 年 3 月、早稲田大学。
- ②⑦ 西村秋哉、福田 努 他 OPERA Collaboration  
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、2015 年 3 月、早稲田大学。
- ②⑧ 福田 努  
原子核乾板によるニュートリノ研究、第 21 回 ICEPP シンポジウム、2015 年 2 月、岳美荘。
- ②⑨ T. Fukuda  
Neutrino experiments with nuclear emulsion at J-PARC、新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会、2014 年 12 月、富士 Calm。
- ③⑩ 福田 努 他  
J-PARC における原子核乾板を用いたニュートリノ実験、画像関連学会連合会、2014 年 11 月、京都工芸繊維大学。
- ③⑪ 福田 努 他 OPERA Collaboration  
OPERA 実験における大角度飛跡自動認識によるタウニュートリノ反応の詳細解析、日本物理学会、2014 年 9 月、佐賀大学。
- ③⑫ T. Fukuda et al.  
New Experimental Project for Study of Neutrino with Nuclear Emulsion Detector at J-PARC、ICNTS26、2014 年 9 月、Kobe Univ。
- ③⑬ 福田 努 【**進歩賞 受賞講演**】  
原子核写真乾板における自動飛跡認識技術の高度化研究、日本写真学会、2014 年 5 月、千葉大学。
- ③⑭ 西村秋哉、福田 努 他 OPERA Collaboration  
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、2014 年 3 月、東海大学。
- ③⑮ 福田 努 【**招待講演**】  
J-PARC ビームを使ったエマルジョンでのニュートリノ反応の研究、第二回次世代の加速器ニュートリノ実験ワークショップ、2014 年 3 月、KEK 東海キャンパス。
- ③⑯ 福田 努  
長基線ニュートリノ振動実験 OPERA におけるタウニュートリノ出現、第 20 回 ICEPP シンポジウム、2014 年 2 月、岳美荘。
- ③⑰ 福田 努 (ポスター)  
The OPERA Experiment and Nuclear Emulsion Technology、第二回 NINS コロキウム、2013 年 12 月、ヤマハリゾートつま恋。
- ③⑱ T. Fukuda  
Recent progress of track recognition in nuclear emulsions、ISETS'13、2013 年 12 月、Nagoya Univ。
- ③⑲ 福田 努  
原子核乾板における新しい自動飛跡認識技術、新学術領域「ニュートリノフロンティアの融合と進化」研究会、2013 年 12 月、クロス・ウェーブ府中。
- ④⑩ 福田 努  
原子核写真乾板における高精度自動飛跡認識技術の開発、日本写真学会、2013 年 11 月、京都工芸繊維大学。

- ④① T. Fukuda et al. (OPERA)  
Evidence of Tau Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam with the OPERA Experiment、PASCOS 2013、2013 年 11 月、The GIS Int. Conv. Center(Taipei, Taiwan)。
- ④② T. Fukuda et al. (ポスター)  
Detector R&D of the Emulsion Neutrino Spectrometer for future neutrino experiments、NNN13、2013 年 11 月、Kavli IPMU。
- ④③ T. Fukuda  
Automated analysis of nuclear emulsions using new tracking technique、WNETE 2013、2013 年 10 月、Predeal (Romania)。
- ④④ T. Matsuo, T. Fukuda et al. (OPERA)  
Study of Neutrino Oscillations in the OPERA Experiment、APPC12、2013 年 7 月、幕張メッセ。
- ④⑤ 福田 努  
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、千葉大学。

〔その他〕

プレスリリース：ニュートリノ振動現象存在の最終検証に成功

[http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload\\_images/20150615\\_esi2.pdf](http://www.nagoya-u.ac.jp/about-nu/public-relations/researchinfo/upload_images/20150615_esi2.pdf)

ノーベル物理学賞 (2015 年度)「ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動現象の発見」の Advanced Information に OPERA の成果が引用される(13 ページ)。  
[https://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2015/advanced-physicsprize2015.pdf](https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced-physicsprize2015.pdf)

平成 26 年度 **日本写真学会 進歩賞 受賞**  
「原子核写真乾板における自動飛跡認識技術の高度化研究」

[http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/ogawa/news/2014.html#2014\\_photo\\_award](http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/ogawa/news/2014.html#2014_photo_award)

第 21 回(2016 年) **日本物理学会 論文賞 受賞**(OPERA Collaboration の一員として)

「Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment」  
[http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/ogawa/news/2015.html#2015\\_JPS\\_award\\_sendai](http://www2.ph.sci.toho-u.ac.jp/ogawa/news/2015.html#2015_JPS_award_sendai)

## 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  
(2013.4–2016.3)

名古屋大学・  
未来材料・システム研究所・研究員  
(2016.4–2016.8)

未来材料・システム研究所・特任助教  
(2016.9–2017.3)

高等研究院 / 理学研究科・YLC 特任助教  
(2017.4–)

研究者番号：104443901

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者 該当なし