

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 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2008～2012

課題番号：20001002

研究課題名（和文） 原子炉ニュートリノによるニュートリノ物理の新展開

研究課題名（英文） New development of Neutrino Physics by Reactor Neutrinos

研究代表者

末包 文彦 (SUEKANE, Fumihiko)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：10196678

研究成果の概要（和文）：

フランスのショーズ原子力発電所にニュートリノ検出器を建設し、原子炉ニュートリノにより第3のニュートリノ振動を確認し、 θ_{13} と呼ばれるニュートリノ混合角の測定を様々な解析方法で行った。（ダブルショー実験）これにより、ニュートリノ振動角が全て決定され、ニュートリノ振動による CP 非保存やニュートリノの質量階層性の測定に道を拓き、ニュートリノ物理の新展開を導いた。また、質量二乗差 (Δm_{31}^2) を原子炉ニュートリノ振動の距離依存性の解析から世界で初めて測定した。

研究成果の概要（英文）：

We built a neutrino detector at Chooz nuclear power plant in France and identified the third neutrino oscillation by reactor neutrinos (Double Chooz experiment). We measured neutrino mixing angle θ_{13} with various analysis methods. These results have determined all the neutrino mixing angles and opened a window to measure the leptonic CP violation and to determine the neutrino mass hierarchy, that lead a new development of neutrino physics. We also measured mass squared difference Δm_{31}^2 by making use of the baseline dependence of the reactor neutrino oscillation for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	132,200,000	39,660,000	171,860,000
2009 年度	103,300,000	30,990,000	134,290,000
2010 年度	79,800,000	23,940,000	103,740,000
2011 年度	30,900,000	9,270,000	40,170,000
2012 年度	31,500,000	9,450,000	40,950,000
総計	377,700,000	113,310,000	491,010,000

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、ニュートリノ振動、原子炉ニュートリノ、Double Chooz、 θ_{13} 、光電子増倍管

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノには3種類あり、それに伴いニュートリノ混合角も θ_{12} 、 θ_{23} 、 θ_{13} の3種類ある。本研究開始当初はこのうち、 θ_{12} 及び θ_{23} が既に測定されており、最後の混合

角 θ_{13} の測定が非常に重要な課題であった。ニュートリノによる CP 非保存効果の測定や、ニュートリノ質量の階層性の決定には、 θ_{13} が或る程度大きいことが必要であり、その確認を行うことが、ニュートリノ研究を次の段

階に進める為には不可欠であることが認識されていた。一方先行研究により θ_{13} によるニュートリノ振動は比較的小さいことが分かっていた。そのためこの測定を行うためには、非常に精度の高い測定が必要であると予想されていた。

本研究グループは、加速器実験による θ_{13} 測定には本質的な不定性が伴うことを指摘し、原子炉ニュートリノ検出器を2台用いて系統誤差を相殺し、 θ_{13} の測定精度を飛躍的に改善する実験を日本で計画していたが、2006年にフランスの実験に合流し、実験のR&Dを進めていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、原子炉ニュートリノを用いて、新しいニュートリノ振動を確認し、基本パラメータの一つであるニュートリノ混合角 θ_{13} の値を直接測定し、CP非保存効果やニュートリノ質量階層性の測定に道を開くことである。

3. 研究の方法

フランスのショー原子力発電所の原子炉から400mと1,050mの場所に同一構造のニュートリノ検出器（それぞれNear検出器、Far検出器と呼ぶ）を設置し、原子炉ニュートリノを検出する。2台の検出器のデータを比較することにより系統誤差を相殺し、ニュートリノ振動によるニュートリノ欠損を精密測定する。この欠損の大きさから、 θ_{13} の大きさを決定する。

実際には、 θ_{13} が比較的大きかったため、Far検出器だけで θ_{13} 測定が可能であった。Near検出器は2014年に稼働し、より精密な θ_{13} 測定を行う予定である。

本研究グループは、「研究成果」で説明するとおり、ニュートリノ検出器の重要な部分である光電子増倍管及びデータ収集システム、コミッションング、検出器較正などを担当した。また、全体グループの中心の一つとなってデータ解析を行った。

4. 研究成果

([]の数字は、論文リストの番号.)

(1)物理成果

2011年4月にFar検出器の建設を終了し、ニュートリノデータの測定を開始した。2011年11月9日に韓国で開催された国際会議で、原子炉ニュートリノによる世界で最初の第3のニュートリノ振動の兆候の発見を発表した。これにより、将来のCP非保存効果の測定可能性が大きいことが示唆され、この結果は世界の研究者に大きな影響を与えた。こ

の成果は、Physical Review Letters誌に掲載された[10]。この論文は、本報告までに、497回引用されている (by Spires)。日本国内では、11月10日に、東北大学でこの成果に関する記者会見をひらき、NHK、朝日新聞その他の報道で取り上げられた。また、科研費News 2012年 vol.1の「最近の研究成果トピックス」にも取り上げられた。その後、2012年3月に中国のDaya Bay実験が、4月に韓国のRENO実験が2台の検出器を用いた、精度の高い測定でこれを確認した。図1に、最初に報告した原子炉ニュートリノ欠損のスペクトルを示す。

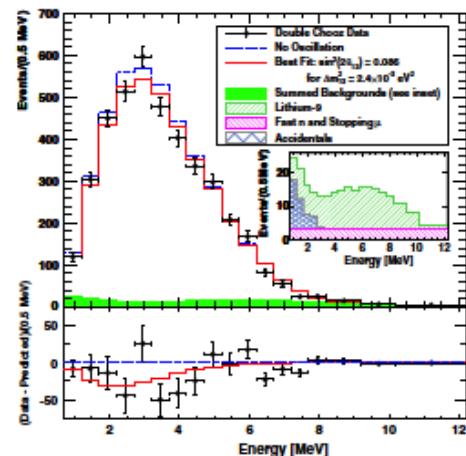


図1、最初の原子炉ニュートリノのエネルギースペクトル[10]。下のパネルはニュートリノ欠損量を示す。

ダブルショーでは、その後、データをため、解析方法を改善し、様々な解析方法でニュートリノ混合角 θ_{13} の測定を行った[4, 9]。特に、他の実験では不可能である、原子炉停止時のデータを取得し、バックグラウンドの直接測定を行い[5]、結果の信頼性を高めた[1]。図2に原子炉運転エネルギーから予想される事象頻度と検出頻度の関係を表す。[5]は、図2の原点のデータ点を測定したことを意味する。これらのデータ解析の結果、

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.102 \pm 0.028 \pm 0.033$$

の値を得ることができた。

θ_{13} の大きさが比較的大きかったため、レプトンのCP非保存効果の測定及び、ニュートリノの質量階層性の決定を、次期実験により行うことができる可能性が高いことを示し、今後のニュートリノ物理に新展開を導いた。

さらに、Daya Bay及びRENO原子炉ニュートリノ実験の結果と組み合わせ、ニュートリノ振動のベースライン依存性から、質量二乗差

(Δm_{31}^2) を世界で初めて測定し[3]、

$$\Delta m_{31}^2 = 2.95^{+0.42}_{-0.61} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

を得た。図3にニュートリノ振動のベースライン依存性を示す。

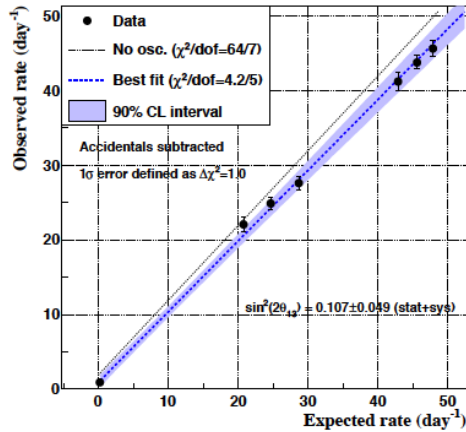


図2、予想事象頻度と測定事象数の関係[1]。No osc. の線からのずれが欠損を表す。

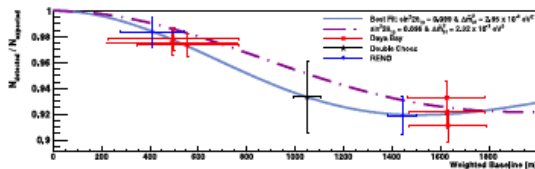


図3、原子炉ニュートリノ欠損のベースライン依存性[3]。黒い点が Double Chooz データ。

この他に、ニュートリノ振動の地球の回転の依存性からローレンツ対称性の破れの探索[8]なども世界で最初に行った。

現在は Near 検出器の建設を行っており、2014 年秋にデータ収集を開始する予定である。本研究グループが担当している光電子増倍管の設置作業は、研究協力者の Chauveau が中心となって行い、すでに完了している。図4に Near 検出器の光電子増倍管の写真を示す。



図4、PMT 設置後の Near 検出器の写真。

なお、本研究の博士論文により、東工大の今野が、手嶋記念研究賞、高エネルギー物理学若手奨励賞及び日本物理学会若手奨励賞を授賞し、東北大学の留学生の Bezerra が総長賞を授賞し、Springer thesis に推薦された。

これらの成果は、ニュートリノ検出器建設、運用及び解析で、本研究グループが次のように重要な貢献をした結果出すことができた。

(2) 光電子増倍管 (PMT) システム

本実験では、ニュートリノ事象に由来するシンチレーション光を観測するために PMT を用いる。本研究グループは浜松ホトニクス株式会社と共同で、低バックグラウンドの 10 インチ PMT を開発した。本グループは全体の半分の 400 本の PMT を担当した。納入された PMT の性能検査を 2008 年に行なった。検査は松原・今野が中心となり、首都大学で開発した検査システムを東工大のクリーンルーム内に設置してシフトを組み、グループ全員で半年かけて行なった。

この PMT のフランスでの Far 検出器内への設置は、Bongrand が主体となり、大勢の研究者が現地におもむき作業を行った。2009 年 5 月の検出器内への設置完了から現在にいたるまで約 5 年間に経過したが、その間に 1 本の光電子増倍管の故障もなく安定動作をしている。データ収集開始後は、東工大の PMT 較正装置で定期的に増幅度などの較正を行っている。

(3) 高電圧システム

光電子増倍管に印加する高電圧システムの構築・運用は前田が担当した。宇宙線 veto カウンターのものを含め、約 500 本の光電子増倍管のゲインを合わせるため、チャンネルごとに別の高電圧を印加する必要がある。このために CAEN 社製の高電圧電源システムを購入し、各チャンネルの設定値と実際に印加されている電圧の調整や、高電圧電源由来のノイズ対策を行った。また遠隔地からでも常時コントロール・モニタリングするためのソフトウェアの開発も独自で行った。このシステムは大変安定して動いており、これによって 24 時間のデータ取得に貢献している。

(4) オンラインデータ収集システム

ダブルショー検出器は原子力発電所の敷地内に設置され、夜間の出入りが制限されているため、安定したデータ収集を行うためにはネットワークによる操作および監視をする必要があり、オンラインシステムの重要性が他の実験に比べて大きい。本研究グループはオンラインシステムの開発・運用においても中心的な役割を果たした。特に、ランコントロールシステム、モニターシステム、異常検

知システムは今野が中心となり開発した。日本グループは実験開始以降も前田を中心としてオンコールエキスパートとして安定したデータ収集の実現に貢献し、24時間体制で安定したデータ収集を実現し、いち早くニュートリノ振動の解析結果を報告することができた。

(5) コミッショニングニング

日本グループは物理ランに向けた検出器の最終調整作業を石塚・前田を中心として主導した。まず全ての読み出し系が構築されたのと同時に検出器内の遮光を確認した。この後、実際にDAQやトリガー、その他オンラインソフトウェアの調整を行った。この期間も日本グループがかなりの部分で貢献している。また同時にシフトのためのマニュアル作りやシフトスケジュールを管理するためのシステム構築など、シフト体制の確立にも日本グループが大部分を担当して行った。調整作業にはかなりの期間を費やしたが、2011年4月に物理ランの取得を開始した後は常に高効率でデータが取得できている。その後、前田がテクニカルボードメンバーになった。

(6) データ解析

本研究グループは人数が少ないにも関わらず、データ解析では日米欧の3つの解析クラスターの一つを担当している。

ダブルショー検出器は2011年4月より物理ランのデータ収集を開始した。まず、光電子増倍管のテストデータを利用し、検出器シミュレータの調整を行い、ニュートリノ事象や宇宙線ミュー粒子の位置再構成ツールの開発を行った。

物理解析では、ブラインド解析方法をとった。実験データの解析は日欧米の3か所で独立に行い、互いの結果をクロスチェックするという方法をとった。そのため、日本グループでは、ニュートリノ事象観測に必要なすべての解析作業を独自に行なった。

本研究グループの解析は、解析サーバー8台とRAIDストレージ4台(合計60テラバイト)を用いて進めた。具体的にはニュートリノ事象の選別、背景事象の除去と見積りを行った。また、ニュートリノ振動パラメータを正確に算出するために、測定器のニュートリノ検出効率やエネルギー較正の十分な理解のための較正ランデータの解析や、共分散行列を用いてニュートリノ振動パラメータの算出方法の開発なども独自に進めた。

これら日本グループによる解析アクティビティと得られた結果は、Double Chooz 全体においても高く評価され、2012年より松原が、データプロセスとモンテカルロシミュレー

ション作成の責任者を務め、2013年よりはグループ全体のソフトウェアアクティビティの責任者も務めている。また、2013年より石塚がDC全体の解析コーディネーターとして解析活動の統括を行っている。

(7) 原子炉モニター開発

本研究では、ダブルショー実験の他に、原子炉ニュートリノ検出器の開発も行っている。この一つとして国際原子力機関(IAEA)の核不拡散のための新技術として、ニュートリノによる原子炉運転モニターを古田を中心として開発している。

地上でのニュートリノ測定では、宇宙線起源高速中性子背景事象の除去が重要な課題であるため、2010年にこれまでの小型ニュートリノ検出器を高速中性子背景事象除去に特化した検出器に改良した。200Lのガラスフラスコを新たに実装し、プソイドクメン濃度を増したガドリニウム入り液体シンチレータを使用し、波形取得可能なFlash ADCモジュールでデータ取得することで中性子バックグラウンドの波形弁別の効果を改良した。その後、2012年まで、この検出器を用いて宇宙線起源高速中性子事象の測定し、弁別能力の評価を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計35編、内査読あり(*印)9編)
*(1) Y. Abe et al. (Double Chooz Coll.), 'Background Independent Measurement of Theta13 in Double Chooz' (PLBに掲載決定) Arxiv 1401.5981, 2014.
<http://arxiv.org/pdf/1401.5981.pdf>

(2) 川崎健夫、石塚正基、古田久敬、松原綱之、「原子炉によるニュートリノ混合角 θ_{13} の測定」、日本物理学会誌解説. 68, 450-457, 2013.

*(3) T. J. C. Bezerra, H. Furuta, F. Suekane, T. Matsubara,
'A Global Fit Determination of Effective Δm^2_{31} from Baseline Dependence of Reactor Antineutrino Neutrino disappearance',
Phy.Lett.B 725, 271-276, 2013.
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.07.028.

*(4) Y. Abe et al. (DC Collaboration)
'First Measurement of Theta13 from Delayed Neutron Capture on Hydrogen in the Double Chooz Experiment',
Phys. Lett. B 723, 66-70, 2013.
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.04.050

*(5) Y. Abe et al. (DC Collaboration)
'Direct Measurement of Backgrounds using Reactor-Off Data in Double Chooz',

Phys. Rev. D87, 11102 -1~7(2013)
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.011102
(6) F. Suekane
'Application of Reactor Neutrinos:
Neutrinos for Peace',
Nucl. Phys. Proc. Suppl., 235-236, 33-38,
2013.
DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2013.03.008
(7) M. Ishitsuka,
'Double Chooz Results',
Nucl. Phys. Proc. Suppl., 235-236, 17-23,
2013.
DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2013.03.005
*(8) Y. Abe et al. (DC Collaboration)
'First Test of Lorentz Violation with a
Reactor-Based Antineutrino Experiment',
Phys. Rev. D86, 12001-1~6, 2012.
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.112009
*(9) Y. Abe et al. (DC Collaboration)
'Reactor electron antineutrino
disappearance in the Double Chooz
experiment',
Phys. Rev. D86, 52008-1~21, 2012,
DOI: 10.1103/PhysRevD.86.052008,
*(10) Y. Abe et al. (DC Collaboration)
'Indication of Reactor Antielectron
Neutrino Disappearance in the Double Chooz
Experiment',
Phys. Rev. Lett. 108 (2012), 131801-1~7
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.131801
*(11) T. Matsubara et al.
'Evaluation of 400 low background 10-in.
photo-multiplier tubes for the Double
Chooz experiment',
Nucl. Inst. and Meth. A 661, 16-25 (2012)
DOI: 10.1016/j.nima.2011.09.023
*(12) H. Furuta et al.
'A study of reactor neutrino monitoring at
the experimental fast reactor JOYO',
Nucl. Inst. and Meth. A 662, 90-100 (2012)
DOI: 10.1016/j.nima.2011.09.045
(13) J. Maeda
'Online Data Acquisition and the Control
System for the Double Chooz Experiment',
J. Phys.:Conf. Series 331, 022018, 6pp.
(2011)
DOI: 10.1088/1742-6596/331/2/022014.
(14) 石塚正基, 中島恭平, 早川知克,
前田順平
「いよいよ始まった Double Chooz 実験」、
高エネルギーニューズ, 30-1, 1~9, 2011.
(15) F. Suekane
'A High Precision Reactor Neutrino

Detector for the Double Chooz Experiment',
Nucl. Instrum. Meth. A623 (2010) 440-441,
DOI: 10.1016/j.nima.2010.03.029,

[学会発表] (計 110 件)

(1) 今野智之
Measurement of reactor anti-neutrino
disappearance using the Double Chooz
detector
日本物理学会若手奨励賞受賞記念講演、
2014/3/27、東海大学。
(2) T. Matsubara,
Recent Results from Double Chooz,
Lake Louise Winter Institute, 2014/2/22.
Lake Louise, CANADA
(3) J. Maeda
Review of the θ_{13} in reactor neutrino
experiments, (NNN13)、2013/11/11, 柏。
(4) R. Sharankova
Recent Results from the Double Chooz
Experiment,
(NuFact), 2013/8/19~24, Beijing, China.
(5) F. Suekane
Japanese Reactor Neutrino Projects,
(NANPino-2013) 2013/6/25, Valday Russia.
(6) 松原綱之
Result of Double Chooz Experiments,
日本物理学会 シンポジウム (招待講演)、
2012年09月11日、京都産業大学。
(7) 末包文彦
Future Prospects Through the Window of
 θ_{13} , 日本物理学会 シンポジウム (招待講
演)、2012年09月11日、京都産業大学
(8) T. J. C. Bezerra
Double Chooz results on θ_{13} ,
SUSY 2012 (招待講演), 2012年08月14日、
Peking Univ., China
(9) F. Suekane
Application of Reactor Antineutrinos,
(招待講演)、(Neutrino2012), 2012/06/04、
京都市。
(10) 石塚正基
Double Chooz 実験の現状と最新結果,
(招待講演)、日本物理学会、2012/3/27、
関西学院大学
(11) T. Matsubara
First result from the Double Chooz
reactor-neutrino experiment,
Moriond EW, 3-10/Mar./2012, La Thuile(フ
ランス)
(12) J. Maeda
First result from the Double Chooz neutrino
experiment,

Lake Louise Winter Inst. 19-25/Feb./2012,
Chateau Lake Louise (カナダ),

(13) M. Kuze

Review of reactor neutrino experiments
(招待講演), Int. Workshop on Next
generation Nucleon Decay and Neutrino
Detectors, 2010/12/13~16 Toyama
International Conference Center

(14) H. Furuta

Status of Double Chooz Experiment,
Japan-US seminar on Double Beta Decay and
Neutrinos, 2010/10/12, ハワイ、アメリカ

(15) J. Maeda

Double Chooz status
Int. Conf. on Heavy Quarks and Leptons,
2010/10/11~15, INFN-Frascati, Italy

(16) F. Suekane

Prospect of Reactor neutrino Oscillation
Experiment
Erice School, 2010/9/26, Erice, Italy

(17) M. Ishitsuka

The Double Chooz reactor neutrino
experiment

(ICHEP2010) 2010/7/22~28, Paris, France

(18) H. Furuta

Measurement of Reactor Neutrinos and
Backgrounds at the Experimental Fast
Reactor JOYO

Advancements in Nuclear Instrumentation,
2010/6/7, *Marseille, France*

(19) T. Kawasaki

Status of the Double Chooz Experiment
BEYOND THE STANDARD MODELS, 2010/2/2,
Cape Town, South Africa

〔図書〕 (計2件)

(1) F. Suekane, Springer Lecture Note,
'Introduction to Neutrino Oscillations',
Springer, 2014, 200pages.

(2) T. J. C. Bezerra, Springer Thesis,
'Double Chooz and reactor neutrino
oscillation', Springer, 2014, 180pages.

〔その他〕 ホームページ等

(1) <http://dchooz.titech.jp/hep.net/>

(2) 本報告書の他に 2014 年度中に、冊子体
の成果のまとめを作成する予定。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末包 文彦 (SUEKANE, Fumihiko)

東北大学・ニュートリノ科学研究センタ
ー・准教授

研究者番号: 10196678

(2) 研究分担者

久世 正弘 (KUZE, Masahiro)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 00225153

住吉 孝行 (SUMIYOSHI, Takayuki)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号: 30154628

川崎 健夫 (KAWASAKI, Takeo)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 00323999

田村 詔生 (TAMURA, Norio)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 00025462、(2008 年まで。)

(3) 連携研究者

原 俊雄 (HARA, Toshio)

神戸大学・理学部・准教授

研究者番号: 50156486

坂本 泰伸 (SAKAMOTO, Yasunobu)

東北学院大学・教養学部・准教授

研究者番号: 60350328

長坂 康史 (NAGASAKA, Yasushi)

広島工業大学・情報学部・教授

研究者番号: 20299655

宮田 等 (MIYATA, Hitoshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 80192368、(2011 年まで。)

福田 善之 (FUKUDA, Yoshiyuki)

宮城教育大学・教育学部・教授

研究者番号: 40272520、(2008 まで。)

元木 正和 (MOTOKI, Masakazu)

東北大学・総務部評価分析室・助教

研究者番号: 00451641、(2008 まで。)

(4) これまでの研究協力者

石塚 正基、東工大・助教

古田 久敬、東北大・研究員

前田 順平、首都大学東京・学振研究員

松原 綱之、首都大学東京・学振研究員

E. Chauveau、東北大・研究員

T. Bezerra、東北大・学振外国人研究員

中島 恭平、新潟大・学振研究員

岐部 佳朗、東工大・研究員

T. Mueller、東北大・研究員

M. Bongrand、東北大・研究員

渡辺 秀樹、東北大・研究員

早川 知克、新潟大・研究員