

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21340055

研究課題名(和文)素粒子の世代対称性とその検証

研究課題名(英文)Flavor Symmetry of Quarks/Leptons and its Verification

研究代表者

谷本 盛光(Tanimoto, Morimitsu)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：90108366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：本計画の主たる目的は、素粒子の世代に非可換離散対称性を課し、その現象論的研究を行うものである。ニュートリノの世代混合角をフレーバー対称性で理解することをベースにして、その対称性によってクォークとレプトンの世代構造にとどまらず、超対称性粒子、すなわちスクォークとスレプトンの世代構造に制限を与えることである。

ニュートリノ振動実験で測定されたフレーバー混合角  $\theta_{13}$  の大きさは非可換離散対称性  $A_4$  または  $S_4$  によって説明できることを示した。

LHCb における B 中間子の CP 対称性の破れの分析からスクォークの世代混合の構造に強い制限を与えることに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we study the phenomenological consequences in the framework of the non-abelian discrete flavor symmetry. At first, we predict the large two neutrino mixing angles and the reactor angle by using the flavor symmetry. Based on this result, we clarify the flavor structure of the squark and slepton (SUSY particle) as well as quarks/leptons.

1. The reactor angle  $\theta_{13}$  is predictable in the  $A_4$  and  $S_4$  flavor symmetries.

2. We present the analyses of the CP violation of B mesons observed at LHCb. In conclusion, we obtain the flavor structure of squarks.

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：世代対称性 ニュートリノ 世代混合 CP対称性の破れ LHCb

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理において対称性は重要な役割を果たしてきた。今後、新しく発見する対称性は素粒子の起源を解明するための鍵となる。この研究プロジェクトは素粒子の新しい対称性の理論的確立とその検証を目的にしたものである。

ターゲットとする新しい対称性は世代対称性である。クォークとレプトンの世代の起源は数十年にわたって研究されてきたが、いまだ解明されていない。素粒子の標準モデルを超える理論の進展にともなって世代に関する数々のモデルや理論が研究されてきた。その研究過程をみると、世代の起源が素粒子の統一理論に至るために決定的役割をすることはまちがいないと考えられる。しかしながら、世代の起源については決定打がでていない状況である。一方、世代の理論やモデルを検証することができるニュートリノの精密実験は着実に準備されており、また大型ハドロン衝突実験 (LHC) が稼働をはじめ、ヒッグス粒子の発見や超対称性粒子の発見が期待されていた。今後は5年以上にわたり理論やモデルの実験的検証の時代に入っていった。

このような現状のもとで、これまで新潟大学の研究グループで実績のある非可換離散群の研究を発展させる方向で研究テーマを設定し、長年にわたる世代の謎の解明の突破口を探る。

## 2. 研究の目的

素粒子の標準モデルを超える理論の進展にともなって世代に関する数々のモデルや理論が研究されてきたが、世代の解明が素粒子の統一理論に至るために決定的役割をすることはまちがいない。そのため、本計画では、フレーバーの離散対称性の現象論的研究を行う。フレーバー対称性はクォークとレプトンの質量行列の形を決定するが、超対称性

が存在すれば、それは超対称性粒子、すなわちスクォークとスレプトンの質量行列のフレーバー構造を決定し、それらの質量スペクトルを予言する。その予言は、超対称性の破れの機構に依存する。この予言を LHC 実験で検証する。

## 3. 研究の方法

(1) クォーク・レプトンを統一し、大統一理論の枠組みに埋め込める新しい世代対称性のモデルを構築する。新潟大学研究グループの非可換離散群の系統的研究は、ニュートリノ国際会議のような著名な国際会議で紹介されるようになり、世界にインパクトを与えはじめた。この成果をハイデルベルクとの共同研究によって発展させ、統一理論への道筋をつける。

(2) LHC の稼働により超対称性の実験的検証が視野に入っている。世代対称性が存在するならば、その対称性は超対称性クォークと超対称性レプトンも支配するため、それらの質量スペクトルと世代混合は、その対称性を反映したものである。その現象は超対称性の破れとからみ複雑に見えるが、世代の対称性の特徴を引き出すことは可能である。

## 4. 研究成果

本研究では、世代の対称性の現象論的研究を行った。とりわけ、非可換離散群をフレーバー対称性に適用し、クォークとレプトンの世代構造にとどまらず、超対称性粒子、すなわちスクォークとスレプトンのフ世代構造を研究した。その成果を1編の著書と25編の論文としてまとめ発表した。以下に、研究成果をまとめる。

非可換離散群であるA4群をニュートリノのフレーバー対称性に適用し、フレーバー混合角  $\theta_{13}$  が理論的に大きくなり実験値を説明できることを示した。

ニュートリノの大きなフレーバー混合が、非可換離散群  $S_4$  のフレーバー対称性によって導かれることを示した。予言された 13 の大きさは実験結果とうまく一致している。

ニュートリノのフレーバー混合の大きさは実験によって精密に決まってきた。これらの混合の大きさをニュートリノ質量行列の簡単な構造から導かれることを示した。とりわけ 13 の実験値の大きさが必然的に予言される。

レプトンの3世代スキームで右巻ニュートリノが存在し、そのうち1世代のみが他の2世代に比べ極端に軽い場合、 $\text{KeV}$  オ ー ダ の質量のいわゆるステライルニュートリノが存在する。このフレームワークはフレーバー対称性または余剰次元の理論では容易に実現できる。このフレームワークのなかでは第1世代のアクティブニュートリノは他の二つのニュートリノに比べ極端に軽くなる。このようなニュートリノモデルを構成してフレーバー混合の大きさを説明した。とりわけ 13 の予言値はカピボ角と関係つけられることを示した。

世代に  $A_4$  や  $S_4$  の非可換離散対称性を課すことにより、スクォークの世代混合の構造を現象論的に導き出すことに成功した。その際、 $LHCb$  と  $B$  ファクトリーで測定された  $B$  中間子の精密な  $CP$  対称性の破れの実験結果をインプットとするとともに、未発見のスクォークの質量の下限を考慮した。この解析によって超対称性粒子の効果が低エネルギー物理にどの程度寄与するかを明らかになった。あわせて  $K$  中間子の  $CP$  の破れへの寄与も評価した。

超対称性粒子のエネルギースケールが  $10\text{TeV}$  を越えて直接探査が困難な場合、量子効果を通じた  $B$  中間子の  $CP$  対称性の破れの寄与の間接探査について、その感度を定量的に明らかにした。

$B$  中間子の直接的  $CP$  対称性の破れに対し、超対称性粒子の効果を定量的に評価した。

ニュートリノに関する成果について、ドルトムント(ドイツ)とトリエステ(イタリア)の国際会議で招待講演を行った。さらに、 $B$  中間子の  $CP$  対称性の破れの成果については、ハイデルベルクのマックスプランク研究所で、招待セミナーを行うとともに、シンガポールの国際会議において招待講演を行った。

フレーバー対称性の成果は 2010 年に論文としてまとめ発表した。(論文リスト 22 番) この論文は引用数が 259 件を超えるように、当該分野では有名な重要文献としての地位を確保している。この論文をもとに、新しい成果を加え 2012 年夏に Springer 出版社から Lecture Notes を出版した。これらはこの研究プロジェクトの成果の柱である。

ハイデルベルクのマックスプランク研究所(MPK)のディレクターであるリンドナー教授率いる研究グループと共同研究をすすめて現在も継続している。この間若手研究者 6 名を派遣しニュートリノモデルに関して実績をあげてきた。その成果は論文として発表している。

2013 年 7 月に、ヨーロッパを中心として海外のフレーバーの研究者 50 名を招聘して、参加者 100 名のワークショップ (FLASY13) を新潟大学において開催した。フレーバー研究最前線の研究者が参加し今後、国際的な研究連携がすすめられることとなった。

フレーバー対称性の研究成果が評価され、ニュートリノ 2014 (2014年6月:ボストン) とフレーバー対称性ワークショップ (FLASY2014) (2014年6月:サセックス) において招待講演を行う予定である。

## 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 25 件)

Stephen F. King, Alexander Merle,  
Stefano Morisi, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto

Neutrino Mass and Mixing: from Theory to  
Experiment, 査読有, New J. Physics 2014  
(印刷中)

Atsushi Hayakawa, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto, Kei Yamamoto  
Searching for the squark flavor mixing  
in CP violations of  $B_s \rightarrow K^+ K^-$  and  $K_0 \text{bar}$   
 $K_0$  decays, 査読有, PTEP, 2014(2), 2014  
DOI: 10.1093/ptep/ptu006

T. Asaka, S. Eijima  
Direc Search for Right-handed Neutrinos  
and Neutrinoless Double Beta Decay  
査読有, PTEP 2013 (2013) 11, 113B02  
DOI: 10.1093/ptep/ptt094

H. Ishimori, T. Kobayashi, Y. Shimizu,  
H. Ohki, H. Okada, M. Tanimoto,  
Non-Abelian discrete symmetry for  
flavors, 査読有,  
Fortsch.Phys. 61 (2013) 441-465  
DOI: 10.1002/prop.201200124

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto,  
Sensitivity of the squark flavor mixing  
to the CP violation of  $K$ ,  $B_0$  and  $B_s$  mesons,  
査読有,  
Phys.Lett. B726 (2013) 747-757  
DOI: 10.1016/j.physletb.2013.09.051

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto,  
Supersymmetry contributions to CP  
violations in  $b \rightarrow s$  and  $b \rightarrow d$  transitions  
taking account of new data, 査読有,  
Phys.Rev. D87 (2013) 5, 056004  
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.056004

T. Asaka, S. Eijima, A. Watanabe  
Heavy neutrino search in  
accelerator-based experiments,  
査読有, JHEP 1303 (2013) 125  
DOI: 10.1007/JHEP03(2013)125

Yusuke Shimizu, Ryo Takahashi,  
Morimitsu Tanimoto,  
Minimal Neutrino Texture with Neutrino  
Mass Ratio and Cabibbo Angle, 査読有,  
PTEP 2013 (2013) 6, 063B02  
DOI: 10.1093/ptep/ptt026

Y. Morita, H. Nakano, T. Shimomura  
Neutrino Mass and Proton Decay in a  $U(1)_R$   
Symmetric Model, 査読有,  
PTEP 2013 (2013) 053B02  
DOI: 10.1093/ptep/ptt016

Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto,  
Kei Yamamoto,  
Direct CP Violation of  $b \rightarrow s$  and CP  
Asymmetries of Non-Leptonic B Decays in  
Squark Flavor Mixing, 査読有,  
Prog. Theor. Phys. 128 (2012) 273-283  
DOI: 10.1143/PTP.128.273

Masataka Fukugita, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto, Tsutomu T. Yanagida,  
13 in Neutrino Mass Matrix with the  
Minimal Texture, 査読有,  
Phys.Lett. B716 (2012) 294-297  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.06.049

Atsushi Hayakawa, Yusuke Shimizu, [Morimitsu Tanimoto](#), Kei Yamamoto  
Squark flavor mixing and CP asymmetry of neutral B mesons at LHCb, 査読有,  
Phys.Lett. B710 (2012) 446-453  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.020

Werner Rodejohann, [Morimitsu Tanimoto](#), Atsushi Watanabe  
Relating large  $Ue_3$  to the ratio of neutrino mass-squared differences,  
査読有, Phys.Lett. B710 (2012)636-640  
DOI: 10.1016/j.physletb.2012.03.037

[T. Asaka](#), A. Watanabe,  
Atmospheric Sterile Neutrinos,  
査読有, JHEP1207 (2012) 112  
DOI: 10.1007/JHEP07(2012)112

[T. Asaka](#), S. Eijima, H. Ishida,  
Kinetic Equations for Baryogenesis via Sterile Neutrino Oscillation,  
査読有, JCAP1202 (2012) 021  
DOI: 10.1088/1475-7516/2012/02/021

Yusuke Shimizu, [Morimitsu Tanimoto](#), Atsushi Watanabe  
Breaking Tri-bimaximal Mixing and Large  $\theta_{13}$ , 査読有,  
Prog.Theor.Phys. 126 (2011) 81-90  
DOI: 10.1143/PTP.126.81

T. Asaka, S.Eijima, H. Ishida,  
Mixing of Active and Sterile Neutrinos,  
査読有, JHEP1104 (2011) 011  
DOI: 10.1007/JHEP04(2011)011

Hajime Ishimori, Yuji Kajiyama, Yusuke Shimizu, [Morimitsu Tanimoto](#)  
Like-sign dimuon asymmetry of  $B_0$  meson

and LFV in SU(5) SUSY GUT with S4 flavor symmetry, 査読有,  
Prog.Theor.Phys. 126 (2011) 703-734  
DOI: 10.1143/PTP.126.703

Hajime Ishimori, [Morimitsu Tanimoto](#), Slepton Mass Matrices,  $\mu$   $e$  Decay and EDM in SUSY S4 Flavor Model, 査読有,  
Prog.Theor.Phys. 125 (2011) 653-675  
DOI: 10.1143/PTP.125.653

Hajime Ishimori, Yusuke Shimizu, [Morimitsu Tanimoto](#), Atsushi Watanabe,  
Neutrino masses and mixing from S4 flavor twisting, 査読有,  
Phys.Rev. D83 (2011) 033004  
DOI: 10.1103/PhysRevD.83.033004

21 Hajime Ishimori, Kouta Saga, Yusuke Shimizu, [Morimitsu Tanimoto](#),  
Tri-bimaximal Mixing and Cabibbo Angle in S4 Flavor Model with SUSY,  
査読有, Phys.Rev. D81 (2010) 115009  
DOI: 10.1103/PhysRevD.81.115009

22 Hajime Ishimori, Tatsuo Kobayashi, Hiroshi Ohki, Yusuke Shimizu, Hiroshi Okada, [Morimitsu Tanimoto](#),  
Non-Abelian Discrete Symmetries in Particle Physics, 査読有,  
Prog.Theor.Phys.Suppl. 183 (2010) 1-16  
DOI: 10.1143/PTPS.183.1

23 [T. Asaka](#), H. Ishida,  
Flavour Mixing of Neutrinos and Baryon Asymmetry of the Universe,  
査読有, Phys. Lett. B 692 (2010) 105  
DOI: 10.1016/j.physletb.2010.07.016

24 [T. Asaka](#), H.Nagao,  
Non-perturbative Corrections to Particle Production from Coherent Oscillation,

査読有, Prog. Theor. Phys. 124 (2010) 293  
DOI: 10.1143/PTP.124.293

<sup>25</sup> Hajime Ishimori, Tatsuo Kobayashi,  
Hiroshi Okada, Yusuke Shimizu,  
Morimitsu Tanimoto,  
Delta(54) Flavor Model for Leptons and  
Sleptons, 査読有, JHEP 0912 (2009) 054  
DOI: 10.1088/1126-6708/2009/12/054

[学会発表](計 7 件)  
海外国際会議

Sensitivity of High Scale SUSY in CP  
violations of B and K mesons  
Flavor Physics and Mass generation  
2014年2月14日  
Singapore (招待講演)

Probing SUSY in B meson decays  
facing recent LHC data  
The Tenth Particle Physics  
Phenomenology Workshop  
2013年6月1日  
Chung-Li, Taiwan (招待講演)

Flavor Symmetry relating neutrino  
mixing angles to neutrino masses  
BeNe2012  
2012年09月18日  
Trieste, Italy (招待講演)

Relating neutrino mixing angles to  
neutrino masses  
FLASY12  
2012年06月30日  
Dortmund, Germany (招待講演)

Flavor symmetry relating large  $U_{e3}$  to  
the neutrino masses  
Winter Conference on Particle Physics

2012年2月20日  
YongPyon. Korea (招待講演)

Non-Abelian Discrete Symmetry  
in SUSY Flavor Model  
Planck10  
2010年6月3日  
CERN, Genova

ニュートリノ物理の現在と将来  
日本物理学会 特別講演  
2009年9月12日  
甲南大学, 神戸

[図書](計 1 件)  
Hajime Ishimori, Tatsuo Kobayashi,  
Springer 出版  
Hiroshi Ohki, Hiroshi Okada,  
Yusuke Shimizu, Morimitsu Tanimoto  
An introduction to non-Abelian discrete  
symmetries for particle physicists  
Lect. Notes Phys. 858 (2012) 1-227  
DOI: 10.1007/978-3-642-30805-5

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷本 盛光 (Tanimoto Morimitsu)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 90108366

### (2) 研究分担者

中野 博章 (Nakano Hiroaki)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 60262424

### (3) 研究分担者

浅賀 岳彦 (Asaka Takehiko)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 70419993