

令和元年5月13日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05045

研究課題名(和文)LHC時代に切り拓くクォーク・レプトンのフレーバー物理の新展開

研究課題名(英文)Flavor physics of quarks and leptons in LHC era

研究代表者

谷本 盛光 (TANIMOTO, MORIMITSU)

新潟大学・自然科学系・フェロー

研究者番号：90108366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、クォークとレプトンのフレーバー構造を対称性を用いてを解明することであり、主に以下のような成果が得られた。

(1) 超対称性粒子の質量が10TeV以上であっても、グルイーノで誘起されるZペンギンの効果によってKL過程に大きな影響を与える。(2) フレーバー対称性を用いたminimal seesaw modelを構築し、CPを破るディラック位相の大きさを予言した。(3) modular対称性から導かれるA4対称性をレプトンに適用しCP対称性の破れの大きさを予言した。この予言はこれまでのモデルの予言と著しく異なっており、modular対称性による予言として国際的に引用され始めている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ニュートリノ振動の精密実験結果に基づきフレーバー対称性の証拠を現象論的に明らかにするとともに、LHC実験とBell-実験に基づくB中間子のCP対称性の破れ等の研究を通して、クォークとレプトンのフレーバー構造を統一的に解明することである。とりわけ、フレーバーの新しい可能性である超ひも理論起源のmodular対称性を用いて画期的な成果が得られたことで、超ひも理論と低エネルギーの現象を結び付ける道筋が見えてきた。今後、素粒子実験の計画と超ひも理論に与える影響は大きいと思われる。また宇宙の物質生成の起源の研究にも影響をあたえるので、宇宙の理解が進むという点で、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Our project is to reveal the flavor structure by using the flavor symmetry. Our results are summarized as follows:

(1) Even if the masses of SUSY particles are larger than 10 TeV, the Z penguin process induced by the gluino can enhance the branching ratio of the KL decay. (2) I have succeeded to build the minimal seesaw model, which is consistent with neutrino mixing angles and masses, and then have predicted the CP violating Dirac phase. (3) I have presented the successful results of the lepton mass matrix by using the A4 modular symmetry. The predicted CP violating phase is a distinguishable one compared with other models. This work is referred as a typical prediction by using the modular symmetry.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ニュートリノフレーバー混合、クォークフレーバー混合、フレーバー対称性、CP対称性の破れ、モジュラー対称性、クォーク質量行列、ニュートリノ質量行列、宇宙の物質生成

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子の世代の起源に深くかかわり、12種類のクォーク・レプトンはフレーバー(香り)で分類される。しかし、フレーバーを支配する理論は何十年にもわたって探求されてきたが、決定打はでていない。LHC実験におけるルミノシティフロンティア LHCb は B 中間子の CP 対称性の破れや希少崩壊の新しい測定値を次々と報告している。今後、スーパーKEKB 加速器実験も進むと予想され、フレーバー物理からの情報は標準理論を越えるための重要な知見を与えると期待できる。

一方、ニュートリノの三つのフレーバー混合角が測定される等、レプトンの精密実験も大きく進展している。日本の T2K 実験などニュートリノ実験は CP 対称性の破れの観測にまで迫ってきた。さらに、フレーバーを破るミュオンの希少崩壊や電気双極子能率の探査は将来進展が期待される。すなわち、LHC 時代は、上記のような精密実験によってフレーバーの新しい理論が展開できるチャンスをもたらしてくれる。フレーバーを支配する理論が解明されるならば、標準理論を越える道筋が見えてくるであろう。

長年の間に、超対称性理論はゲージ階層性を自然に理解する最有力候補であるというコンセンサスが形成されてきた。しかしながら、超対称性が発見されていない今、超対称性の破れのスケールやそのあり方について、ルミノシティフロンティアでのフレーバー物理の側からの検討も迫られる。このように、LHC 時代では、フレーバー物理の新しい理論の展開を精度の高い実験で検証しながら進めることができる。そのため、クォークとレプトンのフレーバー物理を統合した研究によってフレーバーを支配する理論を探求する。

これまで新潟大学の研究グループは、フレーバー対称性に焦点をあてながら研究をすすめてきた。その成果は 2010 年に PTP Supplement にまとめられている。本申請プロジェクトでは、レプトンフレーバーの研究をさらに進展させると同時に B 中間子におけるクォークのフレーバー物理にも精力を注ぎながら研究を推進する。

## 2. 研究の目的

フレーバー物理は、素粒子理論の枠組みを決める上で重要な役割を果たしてきた。大型ハドロン衝突(LHC)実験は新粒子の直接探査の一方、ルミノシティフロンティアにおける B 中間子等の CP 対称性の破れや希少崩壊の測定を通して、フレーバーの精密科学の役割を担っている。それらの実験データとニュートリノ等の精密実験データに基づいて、フレーバー対称性を駆使しクォークとレプトンの統一的解明をはかる。

そのため、クォークとレプトンのフレーバー構造を現象論的に検証し、クォークとレプトンを統一するフレーバー対称性のモデルの構築を行う。それによって、フレーバー混合の大きさや CP 対称性の破れの大きさの予言を可能とし、フレーバーの新しい物理を切り拓く。

## 3. 研究の方法

○ ニュートリノの最新データに基づいて、ニュートリノのフレーバー対称性モデルを系統的に検討・評価するとともに、CP 対称性の破れの機構の研究に取り組み、クォークのフレーバー対称性を含めたクォーク・レプトン統一モデルの構築を目指す。

○ LHCb 等の最新データに基づいて、B, D, K 中間子の CP 対称性の破れと希少崩壊について、クォークのフレーバー構造を精査し、超対称性のような新しい物理のフレーバー効果を明らかにする。

○ 目標達成のために、本研究分野で実績のあるポスドクを連携研究者として研究をすすめる。あわせて、ドイツとイギリスの海外研究協力者と共同研究を進めることにより目標の達成を実現する。

## 4. 研究成果

フレーバー物理の背後にある理論を解明するため、クォークとレプトンのフレーバー構造の統一的理解をはかることが本研究の目的である。そのためルミノシティフロンティアである LHCb 実験や Belle の実験における B 中間子の CP 対称性の破れや希少崩壊の測定結果と、ニュートリノ振動の精密実験データに基づいて、フレーバー構造の現象論的検討を行った。その主な成果は以下の6項目にまとめられる。

(1) 超対称性粒子が 10TeV 程度にあるとき、超対称性粒子グルイーノで誘起される Z ペンギンの効果によって  $K_L$  過程の崩壊幅が、標準モデルの予測に対し数倍の大きさとなることを示した。これは、日本の KOTO 実験で検証される可能性がある。また、この超対称性粒子の効果による K 中間子の直接的 CP 対称性の破れ  $\epsilon'/\epsilon$  との相関を定量的に示した。

(2) クォークの質量行列のフレーバー構造を明らかにするため、対称性によらずクォーク質量行列の余分なパラメータを切り落とす手法を確立することを試みた。「オッカムの剃刀」と呼ばれ

この手法が、クォークの質量行列に有効であることを示すため、アップ型クォークが対角化されている基底でダウン型クォークの質量行列を6個の実パラメータと1個の位相パラメータで記述することに成功した。これによって小林・益川行列の観測値を説明するだけでなく、観測値間の相関を明らかにし、今後のBelle-IIの精密実験でテストが可能であることを示した。

(3) クォークに用いた「オッカムの剃刀」と呼ばれる手法をニュートリノに適用し、ニュートリノのCP対称性を予言することを試みた。そのため、荷電レプトン質量行列と右巻マヨラナ質量行列を対角化したベースにとり、ディラックニュートリノ質量行列要素に最大限0の値をおくことによって、パラメータ数を減らした。シーソー機構を用いた後、独立なパラメータの数は7つとなり、既知の5つの実験データをインプットすることで、CP対称性の破れについて予言力を高めた。結果として、CP対称性の破れの大きさであるディラック位相の最近の実験値と矛盾ない値が得られた。この手法によるディラックニュートリノ質量行列とレプトジェニシス機構を合わせ用いて、宇宙のバリオン生成、とりわけその符号を議論することが出来ることを示した。

(4) 上記(3)の成果を具体化するモデルを与えるため、重い右巻マヨラナニュートリノを二つだけ導入することによって未知パラメータの数を減らした上で、荷電レプトン質量行列の対角化ベースで、 $3 \times 2$ のディラックニュートリノ質量行列にフレーバー対称性 $S_4$ を課し、行列要素間の関係を縛った。この対称性は、いわゆるフレーバーのTri-maximal混合を導く。さらに、minimal modelを求めるため、この設定のもとで質量行列要素に可能なゼロ一つをおく。それによって、未知パラメータ4個のモデルの構成に成功した。(i)このモデルはニュートリノの質量スペクトルは順階層型が好ましい。(ii)ニュートリノのフレーバー混合角 $\theta_{23}$ はディラック位相 $\delta$ と強い相関を持ち、将来の実験でテストが可能である。とりわけ、現在の実験結果の1 $\sigma$ 誤差のデータをインプットするとディラック位相 $\delta$ は $\pm 90^\circ$ 付近に予言される。この結果は、日本のT2K実験や米国のNOVA実験の最新結果と一致している。(iii)このモデルは位相パラメータが1個のみであるため、レプトジェニシス機構を合わせ用いて、宇宙のバリオン非対称が議論できる。宇宙のバリオン非対称で測定されている正符号により、ディラック位相 $\delta$ の符号の予言が可能である。その予言はモデルの質量行列に現れるある一つのパラメータで決まることを明らかにした。

(5) フレーバーの新しい可能性であるmodular対称性の現象論的研究を行った。この対称性は超ひも理論から導かれたものであり、フレーバー対称性をこれまでより明確な枠組みで扱うことが可能となった。その成果は以下のようにまとめられる。(i) modular対称性から導かれる $A_4$ 対称性をレプトンのフレーバー対称性に適用し、それらの質量行列からレプトン混合を解析し、CP対称性の破れであるDirac phaseの大きさを予言した。この予言はこれまでのモデルの予言と著しく異なっており、将来のニュートリノ精密実験でテスト可能である。modular対称性の典型的予言として国際的に引用され始めている。(ii) modular対称性から導かれる $A_4$ 対称性をクォークの質量行列に適用した。質量の起源であるヒッグス場を $A_4$ の三重項とすることにより、質量、クォーク混合角、小林・益川位相を再現するモデルを作れることを示した。(iii) modular対称性から導かれる $A_4$ 対称性が破れ可換対称性が残るとき、質量行列にどのような構造が残るかをレプトンの場合について検討した。ニュートリノに $Z_2$ 、荷電レプトンに $Z_3$ の対称性がそれぞれ残る場合、これまで予言されてきたフレーバーのTri-maximal混合が現れることを示した。

(6) クォークとレプトンのCP対称性の破れはどのように相関しているのかはクォークとレプトンの統一の実現にとって極めて重要な問題である。成果(2)で得られたクォーク質量行列を用いて、SU(5)とPat-Salam大統一理論の枠組みでレプトンとクォークのCP対称性の関係を調べた。その結果、SU(5)GUTではCPの破れの位相が逆符号になる可能性が明らかになった。

## 5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 15 件)

Y. Shimizu, K. Takagi, S. Takahashi, M. Tanimoto, Sign of CP Violating Phase in Quarks and Leptons, JHEP, 査読あり, Vol. 1904 (2019) pp. 074 (1-24)  
Doi:10.1007/JHEP04(2019)074

P. P. Novichkov, S. T. Petcov, M. Tanimoto,  
Trimaximal Neutrino Mixing from Modular  $A_4$  Invariance with Residual Symmetries,  
Physics Letters B, 査読あり, Vol. 793 (2019) pp. 247-258  
Doi: 10.1016/j.physletb.2019.04.043

H. Okada, M. Tanimoto, CP violation of quarks in  $A_4$  modular invariance,  
Physics Letters B, 査読あり, Vol. 791 (2019) pp. 54-61  
Doi:10.1016/j.physletb.2019.02.028

T. Kobayashi, N. Omoto, Y. Shimizu, K. Takagi, M. Tanimoto, T. H. Tatsuishi,  
Modular  $A_4$  invariance and neutrino mixing, JHEP, 査読あり, Vol.1811 (2018) pp. 196  
(1-18)  
Doi:10.1007/JHEP11(2018)196

Yusuke Shimizu, Kenta Takagi, Morimitsu Tanimoto, Neutrino CP violation and sign of  
baryon asymmetry in the minimal seesaw model, Physics Letters B, 査読あり, Vol.778  
(2018) pp. 6-16  
Doi:10.1016/j.physletb.2017.12.065

Yusuke Shimizu, Kenta Takagi, Morimitsu Tanimoto, Towards the minimal seesaw model  
via CP violation of neutrinos, JHEP, 査読あり, Vol.1711 (2017) pp. 201 (1-27)  
Doi:10.1007/JHEP11(2017)201

Yuya Kaneta, Morimitsu Tanimoto, Tutomu Yanagida, Dirac CP phase in the neutrino  
mixing matrix and the Froggatt-Nielsen mechanism with  $\det[M_{\nu}] = 0$ , Physics Letters  
B, 査読あり, Vol.770 (2017) pp. 546-550  
Doi:10.1016/j.physletb.2017.05.025

Y. Kaneta, Y. Shimizu, M. Tanimoto, T. T. Yanagida, Occam's razor in lepton mass  
matrices: The sign of the universe's baryon asymmetry, PTEP, 査読あり, Vol.2016  
(2016) pp. 063B03 (1-13)  
Doi:10.1093/ptep/ptw079

M. Tanimoto, K. Yamamoto, Probing SUSY with 10 TeV stop mass in rare decays and CP  
violation of kaon, PTEP, 査読あり, Vol. 2016 (2016) pp. 123B02 (1-21)  
Doi:10.1093/ptep/ptw160

M. Tanimoto, T. T. Yanagida, Occam's Razor in Quark Mass Matrices, PTEP, 査読あり,  
Vol. 2016 (2016) pp. 043B03 (1-16)  
Doi:10.1093/ptep/ptw024

〔学会発表〕(計 14 件)

Morimitsu Tanimoto, Modular Symmetry in Lepton Flavors,  
Corfu Summer Institute 2018, 2018 年

Morimitsu Tanimoto, Towards minimal flavor model via CP violation,  
FLASY 2018, 2018 年

Morimitsu Tanimoto, Neutrino CP violation in the minimal seesaw model,  
Launch 17 at MPIK, 2017 年

Morimitsu Tanimoto, Introduction to discrete group theory and their application,  
Bethe Forum Discrete Symmetries, 2017 年

Morimitsu Tanimoto, Flavour and CP symmetries/CP violation,  
Neutrino Institute at CERN (the quest for a new physics scale), 2017 年

Morimitsu Tanimoto, Neutrino Mass Matrix with Occam's Razor and the Sign of  
Universe's Baryon Asymmetry,  
FLASY2016, 2016 年

Morimitsu Tanimoto, Neutrino Mass Matrix and the Sign of Universe's Baryon Asymmetry,  
Corfu Summer Institute 2016, 2016 年

Morimitsu Tanimoto, Neutrino CP violation connecting with quark unitarity triangle,  
FLASY 2015, 2015 年

Morimitsu Tanimoto, Sensitivity of High-Scale SUSY in Low Energy Hadronic FCNC,  
25th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos, 2015年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名： なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名： なし