

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2013

課題番号：20244037

研究課題名(和文)フレーバー物理によるTeV領域の新しい素粒子像の探求

研究課題名(英文) Search for a new elementary particle picture at the TeV scale through flavor physics

研究代表者

岡田 安弘 (OKADA, Yasuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・理事

研究者番号：20212334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,800,000円、(間接経費) 11,040,000円

研究成果の概要(和文)：素粒子物理学はLHC実験の進展、Super KEKB 実験の開始で新たな段階を迎えている。LHC実験の進展状況を取り入れつつ、クォークやレプトンのフレーバー物理によりTeVエネルギースケールの新しい物理をどのように探索することができるかについて理論的な側面から研究した。特に、レプトンフレーバーを破る過程、B中間子からタウ粒子への崩壊、レプトンやハドロンの電気双極子モーメントなどについて、超対称性などの新物理の探索と現象論の両面で研究し、今後のSuper KEKB やJ-PARC の実験にとり有意義な結果を得た。さらに、実験家と協力して、次世代フレーバー実験計画の物理的な意義の検討を進めた。

研究成果の概要(英文)：The elementary particle is entering a new era by the progress of the LHC experiment and the start of the Super KEKB project. In this research program, theoretical studies have been carried out to understand how new physics at the TeV energy scale can be explored by quark and lepton flavor physics taking into account recent results from the LHC experiment. In particular, new physics (such as supersymmetry) and phenomenological aspects of processes like lepton flavor violation and B to tau decays and lepton and hadron electric dipole moments have been investigated, and useful results are obtained for Super KEKB and J-PARC. In parallel to these theoretical works, studies for clarifying physics potentials of the next generation flavor experimental projects have been continued together with experimentalists.

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：素粒子物理学 素粒子実験 フレーバー物理 Bファクトリー レプトンフレーバーの破れ 電気双極子モーメント 超対称模型 TeV領域

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初は、CERNのLHC実験の開始時期にあたり、新粒子、新現象の直接探索によりTeVエネルギースケールの素粒子物理についての新たな知見を得ることが期待されていた。一方、フレーバー物理に関しては、KEKおよびSLACのファクトリー実験が大きな成果をあげ、クォークフレーバーの物理について過去10年間でさまざまな進捗があった。さらに、LHCbやレプトンフレーバーを破る過程を探るMEG実験が進行中であった。また、KEKではBファクトリー高度化(Super KEKB計画)やJ-PARCにおけるフレーバー物理のさらなる展開の準備が進んでいた。このような背景で、LHC実験の進展を見ながら、TeV領域の新しい物理をクォークおよびレプトンのフレーバーに関する実験からどのように探るべきかを理論的に解明することは、緊急性の高い課題であった。

2. 研究の目的

LHC実験ではヒッグス粒子をはじめとする新粒子、新現象を直接観測することにより、TeVスケールに拓ける物理の最初の手掛かりを得ることができる。一方、フレーバー物理はこれまで素粒子の世界の枠組みを決める上で重要な役割を果たしてきた。K中間子のCPの破れの発見、レプトンフレーバーの破れの制限などは、クォークとレプトンの世界の世代構造に関する先駆的な実験事実であり、標準模型の基礎として取り入れられてきた。TeVスケールの物理を解明するにあたりフレーバー物理からの情報は重要な知見を与えてくれることが期待される。この研究ではLHCの進展を踏まえつつ、クォークや荷電レプトンのフレーバー物理がTeV領域の新しい素粒子像を確立する上でどのような役割を果たすかを理論的な研究から明らかにし、さらにSuper KEKBなどの関連する実験計画の検討に役立てることを目的とする。

3. 研究の方法

クォークのフレーバー物理、レプトンフレーバーの破れの過程からどのように標準模型を超える物理を解明できるかについて理論的な検討を行う。そのために次のような研究を行う。

(1) TeV領域で実現すると期待される標準模型を超える物理模型の候補に関して、可能なフレーバーシグナルを明らかにする。

(2) フレーバー物理に関する観測量がどのような理論的な不定性を持つかを検討し、それを小さくするために必要な計算を行う。

(3) フレーバー物理の側面から標準模型を超える物理模型を調べることが、統一模型確立や宇宙論などへ、どのようなインパクトを与えるかを明らかにする。

(4) 実験家と協力して、次世代フレーバー

実験計画の物理的な意義を検討する。

4. 研究成果

(1) TeV領域の物理模型の候補として挙げられているTパリティを課したりトルヒッグス模型において、クォークやレプトンのフレーバーシグナルの正確な計算を行った。特にタウ粒子のレプトンフレーバーを破る過程に特徴的なシグナルが期待できることを明らかにした。

(2) B中間子のタウオニック崩壊やセミタウオニック崩壊でどのように新しい物理を探ることができるかについて研究を進めた。セミタウオニック崩壊の分岐比とタウ粒子の偏極の相関が物理模型を区別するために有効であることを示した。また、超対称模型の場合に、これらの過程とLHC実験における荷電ヒッグス粒子の直接探索と組み合わせることで荷電ヒッグス結合の特徴的な関係を検証できることを明らかにした。

(3) ミュー粒子におけるレプトンフレーバーを破る過程の現象論的な研究を展開した。ミュー粒子・電子転換過程のハドロン物理による理論的な不定性の評価を行った。また、超対称シーソー模型等でレプトンフレーバーを破る過程の分岐比の計算をアップデートした。

(4) 超対称模型においてレプトンの電気双極子モーメントの計算を遂行し、これまでの研究で不十分であった効果の評価を行った。またハドロンの電気双極子モーメントを計算するための方法の整理を行った。

(5) 最近のLHCやニュートリノ実験の進展を考慮にいれ、超対称大統一模型や超対称シーソーニュートリノ模型で、陽子崩壊やレプトンフレーバーの破れの過程に関する理論計算のアップデートを行った。

(6) 複合ヒッグス模型や余次元空間に基づく模型で必要となる余分なクォークを持つ模型について一般論を展開し、電弱精密測定やフレーバー物理からの制約や、LHC実験における発見の可能性についてまとめた。

(7) 上記以外にも、TeV領域で期待される様々な模型に関してコライダー物理やフレーバー物理にどのような標準模型と違ったシグナルが期待されるか、模型の構築や宇宙論との関連などについて多くの理論研究を行い、学会等で発表した。

これらの研究成果は今後のSuper KEKB計画、LHC、J-PARC実験などと深くかわり、これらの実験を通じて新物理を探索するうえで有用な情報となる。特に、LHC実験におけるヒッグス粒子の発見、新粒子に対する最新の制限、ニュートリノ振動実験の進展などを取り入れた解析は、この分野にとって時宜を得た重要な寄与といえる。このような研究を今後もLHC実験の進展に合わせて続けていく方針である。

研究期間を通じて、実験家と協力してBファクトリー物理に関する勉強会、ワークシ

ップを継続的に開催し、Super KEKB で展開される物理の意義の検討を行ってきた。

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57件)

(1)Tomohiro Abe, Junji Hisano, Tepei Kitahara, Kohsaku Tobioka “Gauge invariant Barr-Zee type contributions to fermionic EDMs in the

two-Higgs doublet models” JHEP 1401 (2014) 106, DOI: [10.1007/JHEP01\(2014\)106](https://doi.org/10.1007/JHEP01(2014)106)

査読有

(2)Y.Okada and L.Panizzi, “LHC signatures of vector-like quarks,” Adv. High Energy Phys.2013 (2013) 364936, DOI: [10.1155/2013/364936](https://doi.org/10.1155/2013/364936)

査読有

(3)Kaori Fuyuto, Junji Hisano, Natsumi Nagata “Neutron electric dipole moment induced by strangeness revisited” Phys.Rev. D87 (2013) 5, 054018

[10.1103/PhysRevD.87.054018](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.054018) 査読有

(4)Junji Hisano, Koji Tsumura, “Higgs boson mixes with an SU(2) septet representation” Phys.Rev. D87 (2013) 5, 053004, DOI: [10.1103/PhysRevD.87.053004](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.053004)

査読有

(5)Junji Hisano, Daiki Kobayashi, Yu Muramatsu, Natsumi Nagata, “Two-loop Renormalization Factors of Dimension-six Proton Decay Operators in the Supersymmetric Standard Models” Phys.Lett. B724 (2013) 283-287

DOI: [10.1016/j.physletb.2013.06.030](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.06.030) 査読有

(6)Junji Hisano, Takumi Kuwahara, Natsumi Nagata, “Grand Unification in High-scale Supersymmetry” Phys.Lett. B723 (2013) 324-329, DOI: [10.1016/j.physletb.2013.05.017](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2013.05.017)

査読有

(7)Junji Hisano, Daiki Kobayashi, Takumi

Kuwahara, Natsumi Nagata, “Decoupling Can Revive Minimal Supersymmetric SU(5)” JHEP 1307 (2013) 038, DOI:

[10.1007/JHEP07\(2013\)038](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2013)038) 査読有

(8)Kaori Fuyuto, Junji Hisano, Natsumi Nagata, Koji Tsumura, “QCD Corrections to Quark (Chromo)Electric Dipole Moments in High-scale Supersymmetry” JHEP 1312 (2013) 010, DOI: [10.1007/JHEP12\(2013\)010](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2013)010)

査読有

(9)Y.Sakaki, M.Tanaka, A.Tayduganov and R.Watanabe, “Testing leptoquark models in B to D^(*) tau nu,” Phys. Rev.D 88 (2013) 9, 094012, DOI:

[10.1103/PhysRevD.88.094012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.094012) 査読有

(10)M.Tanaka and R.Watanabe, “New physics in the weak interaction of B to D^(*)tau nu,” Phys. Rev. D 87 (2013) 3, 034028, DOI: [10.1103/PhysRevD.87.034028](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.034028)

査読有
(11)Y.Kikuta, Y.Okada and Y.Yamamoto, “Structure of dimension-six derivative interactions in pseudo Nambu-Goldstone N Higgs doublet models,” Phys. Rev. D 85 (2012) 075021, DOI:

[10.1103/PhysRevD.85.075021](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.85.075021) 査読有

(12)Junji Hisano, Koji Tsumura, Masaki J.S. Yang, “QCD Corrections to Neutron Electric Dipole Moment from Dimension-six Four-Quark Operators” Phys.Lett. B713 (2012) 473-480

[10.1016/j.physletb.2012.06.038](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.06.038) 査読有

(13)G.Cacciapaglia, A.Deandrea, L.Panizzi, N.Gaur, D.Harada and Y.Okada, “Heavy Vector-like Top Partners at the LHC and flavour constraints,” JHEP 1203 (2012) 070, DOI:

[10.1007/JHEP03\(2012\)070](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2012)070) 査読有

(14)S.Kanemura, Y.Okada, H.Taniguchi and K.Tsumura, “Indirect bounds on heavy scalar masses of the two-Higgs-doublet

model in light of recent Higgs boson searches,' ' Phys. Lett. 704 (2011) 303, DOI: [10.1016/j.physletb.2011.09.035](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2011.09.035) 查読有

(15) [J.Hisano](#), W.-S.Hou and F.Xu, ``Updating the neutron electric dipole moment in a fourth generation standard model,' ' Phys. Rev. D 84 (2011) 093005, DOI: [10.1007/JHEP07\(2011\)005](https://doi.org/10.1007/JHEP07(2011)005) 查読有

(16) Y.Hosotani, [M.Tanaka](#) and N.Uekusa, ``Collider signatures of the $S(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification,' ' Phys. Rev. D 84 (2011) 075014, DOI: [10.1103/PhysRevD.84.075014](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.075014) 查読有

(17) T.Goto, [Y.Okada](#) and Y.Yamamoto, ``Tau and muon lepton flavor violations in the lightest Higgs model with T-parity,' ' Phys. Rev. D 83 (2011) 053011, DOI: [10.1103/PhysRevD.83.053011](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.83.053011) 查読有

(18) [J.Hisano](#) and S.Sugiyama, ``Charge-breaking constraints on left-right mixing of stau's,' ' Phys. Lett. B 696 (2011) 92, DOI: [10.1016/j.physletb.2010.12.013](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2010.12.013) 查読有

(19) [J.Hisano](#), S.Sugiyama, M.Yamanaka and M.J.S.Yang, ``Reevaluation of Higgs-Mediated μ -e Transition in the MSSM,' ' Phys. Lett. B 694 (2011) 380, DOI: [10.1016/j.physletb.2010.10.026](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2010.10.026) 查読有

(20) E.Asakawa, D.Harada, S.Kanemura, [Y.Okada](#) and K.Tsumura, ``Higgs boson pair production in new physics models at hadron, lepton, and photon colliders,' ' Phys. Rev. D 82 (2010) 115002 DOI: [10.1103/PhysRevD.82.115002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.115002) 查読有

(21) G.Cacciapaglia, A.Deandrea, D.Harada and [Y.Okada](#), ``Bounds and Decays of New Heavy Vector-like Top Partners,' ' JHEP 1011 (2010) 159, DOI: [10.1007/JHEP11\(2010\)159](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2010)159) 查読有

(22) A.S.Cornell, A.Deandrea, N.Gaur, H.Itoh, M.Klasen and [Y.Okada](#), ``Universality test of the charged Higgs boson couplings at the LHC and at B factories,' ' Phys. Rev. D 81 (2010) 115008, DOI: [10.1103/PhysRevD.81.115008](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.81.115008) 查読有

(23) [M.Tanaka](#) and R.Watanabe, ``Tau longitudinal polarization in $B \rightarrow D \tau \nu$ and its role in the search for charged Higgs boson,' ' Phys. Rev. D 82 (2010) 034027, DOI: [10.1103/PhysRevD.82.034027](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.034027) 查読有

(24) Y.Hosotani, [M.Tanaka](#) and N.Uekusa, ``H parity and the stable Higgs boson in the $S(5) \times U(1)$ gauge-Higgs unification,' ' Phys. Rev. D 82 (2010) 115024, DOI: [10.1103/PhysRevD.82.115024](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.115024) 查読有

(25) T.Goto, T.Kubo and [Y.Okada](#), ``Lepton electric dipole moments in supersymmetric type II seesaw model,' ' Phys. Lett. B 687 (2010) 349, DOI: [10.1016/j.physletb.2010.03.026](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2010.03.026) 查読有

(26) V.Cirigliano, R.Kitano, [Y.Okada](#) and P.Tuzon, ``On the model discriminating power of $\mu \rightarrow e$ conversion in nuclei,' ' Phys. Rev. D 80 (2009) 013002, DOI: [10.1103/PhysRevD.80.013002](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.80.013002) 查読有

(27) Y.Hosotani, P.Ko and [M.Tanaka](#), ``Stable Higgs Bosons as Cold Dark Matter,' ' Phys. Lett. B 680 (2009) 179, DOI: [10.1016/j.physletb.2009.08.050](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2009.08.050) 查読有

(28) E.Asakawa, D.Harada, S.Kanemura, [Y.Okada](#) and K.Tsumura, ``Higgs boson pair production at a photon-photon collision in the two Higgs doublet model,' ' Phys. Lett. B 672 (2009) 354, DOI: [10.1016/j.physletb.2009.01.050](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2009.01.050) 查読有

(29) T.Goto, [Y.Okada](#) and Y.Yamamoto, ``Ultraviolet divergences of flavor

changing amplitudes in the littlest Higgs model with T-parity,' ' Phys. Lett. B 670 (2009) 378, DOI:

[10.1016/j.physletb.2008.11.022](https://doi.org/10.1016/j.physletb.2008.11.022) 査読有

(30) J.Hisano, M.Nagai, P.Paradisi and Y.Shimizu, ``Waiting for mu ---> e gamma from the MEG experiment,' ' JHEP 0912 (2009) 030, DOI:

[10.1088/1126-6708/2009/12/030](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/12/030) 査読有

(31) J.Hisano, M.M.Nojiri and W.Sreethawong, ``Discriminating Electroweak-ino Parameter Ordering at the LHC and Its Impact on LFV Studies,' ' JHEP 0906 (2009) 044, DOI:

[10.1088/1126-6708/2009/06/044](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2009/06/044) 査読有

[学会発表](計46件)

(1) 岡田安弘 “ILCの物理(理論)” 日本物理学会 第69回年次大会、2014年3月28日、東海大学湘南キャンパス

(2) Junji Hisano “Review of Electric Dipole Moments (EDMs)” Rencontres de Moriond “ELECTROWEAK INTERACTIONS AND UNIFIED THEORIES” 2014. 3. 19, La Thuile, Italy

(3) Junji Hisano “Tasks in Next 10 Years-A personal view on future of searches for beyond the standard model-” KMI International Symposium 2013 on ``Quest for the Origin of Particles and the Universe'' (KMI 2013), 2013.12.13, Nagoya university

(4) 久野純治 “EDMs and beyond the standard model” 日本物理学会 2013年秋季大会 2013年9月23日、高知大学

(5) Yasuhiro Okada, “Higgs Physics at ILC “ Phenomenology 2013 Symposium、2013.5.8, University of Pittsburgh, Pittsburgh, USA

(6) Junji Hisano ” Proton Decay in SUSY

GUTs revisited”, 2013 International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation (BLV2013):From the Cosmos to the LHC, 2013.4.8, MPIK Heidelberg, Germany

(7) 岡田安弘 “計算科学に寄せる期待(素粒子宇宙原子核)” 日本物理学会 第68回年次大会、2013年3月27日、広島大学

(8) Yasuhiro Okada, “SUSY” Fundamental Physics Using Atoms 2012, 2012.9.29, Tohoku University

(9) Junji Hisano, “Lepton-Flavor Violation and Physics beyond the Standard Model,” 7th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, 2012.9.28, University of Cincinnati, Cincinnati, USA

(10) Yasuhiro Okada, “Phenomenology of Vector-like Quark Models” Focus Workshop on Heavy Quarks at LHC, 2012. 1.20, National Taiwan Univ. Taipei, Taiwan

(11) Yasuhiro Okada, “Tau Properties and Lepton Flavor Violation: Theoretical Overview” Fundamental Physics at the Intensity Frontier, 2011.12.1, Rockville, MD, USA

(12) Yasuhiro Okada, “Asia-Pacific Regional Report” 10th ICFA Seminar on Perspectives in High-Energy Physics, 2011.10.3, CERN, Geneva Switzerland

(13) Yasuhiro Okada, “Theoretical review on Higgs and related issues” ISMD2011, 2011.9.30, Miyajima, Hiroshima

(14) Yasuhiro Okada, “Flavor physics in the little Higgs model with T-parity” The 9th Particle Physics Phenomenology Workshop, 2011.6.6, National Central Univ., Chungli, Taiwan

(15) Yasuhiro Okada, “CLFV theory and prospect,” NuFact 10, 2010.10.24, TIFR Mumbai, India

(16) Junji Hisano, “ Electric Dipole Moments and Physics beyond the Standard Model, ” Third Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS, 2009.10.13, Waikola, Hawaii, USA

(17) Yasuhiro Okada, “ Theoretical Status of LFV and rare tau decays, ” BEAUTY 2009, 2009.9.8, Heidelberg, Germany

(18) Yasuhiro Okada, “ Search for new physics beyond the SM, ” KAON 09, 2009.6.12, Tsukuba, Japan

(19) Yasuhiro Okada, “ Exploring SUSY models through quark and lepton flavor physics, ” SUSY 2008, 2008.6.18, Seoul, Korea

[図書] (計 1 件)

Yasuhiro Okada, World Scientific,
“ Lepton Dipole Moments, ” 2010, p683-p700

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 安弘 (OKADA, Yasuhiro)
高エネルギー加速器研究機構・理事
研究者番号 : 2 0 2 1 2 3 3 4

(2) 研究分担者

久野 純治 (HISANO, Junji)
名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 6 0 3 0 0 6 7 0

田中 実 (TANAKA, Minoru)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号 : 7 0 2 7 3 7 2 9

橋本 省二 (HASHIMOTO, Shoji)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号 : 9 0 2 8 0 5 1 0

岡田 宣親 (OKADA, Nobuchika)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号 : 4 0 3 6 0 3 3 3