

令和 7 年 6 月 23 日現在

機関番号：35302

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2024

課題番号：21K03583

研究課題名（和文）トップクォークを切り口とした標準模型を超える物理への有効場の理論に基づく研究

研究課題名（英文）Study of top quark physics based on the effective field theory as a window to new physics beyond the standard model

研究代表者

大熊 一正（Ohkuma, Kazumasa）

岡山理科大学・基盤教育センター・教授

研究者番号：80367507

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：トップクォークは非常に重い素粒子であり、日本での実験実施が期待されているILC（国際リニアコライダー）が初期に予定しているエネルギーでは、2つ同時に生成することはできず、1つだけなら生成され得る。このような単生成が確認された場合、現在の素粒子物理学における標準模型では説明が難しい現象が関与している可能性がある。特に、フレーバーを変える中性粒子の相互作用（FCNC）が関係していると考えられ、その観測は新たな物理の存在を示す重要な手がかりとなる。本研究では、この過程についてコンピュータシミュレーションを用いて解析し、標準模型を超える物理の探索方法を探った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、トップクォークの単生成過程に注目し、標準模型では極めて抑制されるFlavor-Changing Neutral Current（FCNC）の検出可能性をシミュレーションにより検討したものである。得られた成果は、標準模型を超える新たな物理現象の存在を探る手がかりとなり、素粒子物理学における標準模型の理論的拡張に寄与する学術的意義を有する。また、日本が中心となって推進する国際リニアコライダー（ILC）の科学的価値を多面的に示すことにもつながり、今後の大型加速器計画に対する社会的理解と関心の促進にも貢献し得る。

研究成果の概要（英文）：The top quark is an extremely heavy elementary particle. At the initial collision energy planned for the International Linear Collider (ILC), which is expected to be constructed in Japan, it is not possible to produce a top-quark pair but only single-top production is feasible. If such single top-quark production is observed, it may indicate the contribution of phenomena that are difficult to explain within the framework of the Standard Model of particle physics. In particular, flavor-changing neutral currents (FCNC), which allow a particle to change its type without altering its electric charge, may contribute to such processes. The observation of these processes would provide an important clue to the existence of new physics beyond the Standard Model. This study analyzes the possibility of such processes using computer simulations, exploring new approaches to uncover physics beyond the Standard Model.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：トップクォーク ILC FCNC

1. 研究開始当初の背景

欧州原子核研究機構（CERN）において、実施されている水素原子の原子核である陽子同士を衝突させる大型加速器実験である Large Hadron Collider（LHC）において、2012年にヒッグス粒子が発見された。このヒッグス粒子は、素粒子に質量を与える機構において鍵となる粒子であり、その存在は長年にわたり理論的に予言されてきた。この発見によって、素粒子の振る舞いを説明する理論である「標準模型」において、予言されていた素粒子がすべて確認され、標準模型は、素粒子理論として一つの完成形に達したと考えられるようになっていた。

一方で、宇宙の観測から、宇宙に広く存在すると考えられている暗黒物質など、標準模型では説明できない現象がいくつも残されている。したがって、標準模型は強力な理論である一方で、宇宙の全体像を理解するには不十分であり、標準模型を拡張する新しい理論の構築が必要不可欠であると広く認識されてきた。

LHCでは、陽子同士を非常に高いエネルギー（13 TeV）で衝突させて、新しい粒子の発見を目指してきたが、本課題申請時、標準模型を超える新粒子が発見される兆候はなかった。このため、近年では直接新粒子を発見することを目指すのではなく、さまざまな粒子の反応を高精度に測定し、標準模型の予測からのわずかなズレを検出することで、新しい物理の手がかりを間接的に探る手法が注目されていた。

また、ヒッグス粒子と並びトップクォークは、既知のクォークの中で最も質量が重く、その性質が他の粒子と比べて特殊であるため、新しい物理の影響が現れやすいと考えられている。このような理由から、ヒッグス粒子とトップクォークは精密測定の対象として特に注目されており、LHCの性能をさらに高めた High Luminosity LHC（HL-LHC）においても、これらの粒子の詳細な性質を調べる研究が計画されている。一方で、それら粒子は、将来的には、LHCとは別に、電子と陽電子を衝突させる次世代加速器である International Linear Collider（ILC）などによっても、より高精度な測定が行われ、標準模型を超える新たな物理の可能性を探ることが期待されている。

2. 研究の目的

本研究は、素粒子物理学の標準模型では説明できない新しい物理現象の手がかりを得ることを目的としている。このため、ILCで行われる実験の中でも、トップクォークが1つだけ生成される「単トップクォーク生成」過程に注目した。特に、ILCが最初の実験として予定している、電子と陽電子の衝突エネルギー250 GeVを前提とし（以下、ILC250）、そのエネルギーでトップクォークがどのように生成され得るかを、理論的かつ数値的な方法で調べることを主眼としている。

ILC250のエネルギーでは、標準模型の理論に従ってトップクォークを生成するには、ループを含まないツリーレベルではあるが、複雑な反応過程（例えば、図1）となり、その反応が実際に起こる確率（イベント数）も非常に低いと計算される。ところが、Flavor-Changing Neutral Current（FCNC）と呼ばれる中性粒子を介する特殊な相互作用がもし存在すれば、より単純な反応過程（例えば、図2）によってトップクォークが1つだけ生成される可能性がある。このFCNC型相互作用は、標準模型の中ではGlashow-Iliopoulos-Maiani機構（GIM機構）という仕組みによって、実際の実験では、観測されることがないほど、強く抑えられている。したがって、もし、ILC250でFCNCによる単トップクォーク生成が観測されれば、それは標準模型の枠を超えた新しい物理の存在を強く示す証拠となり得る。

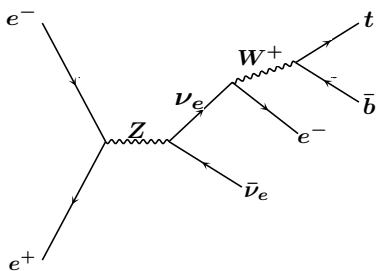


図1

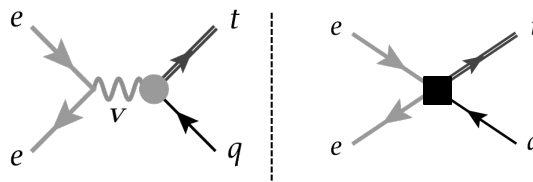


図2

本研究では、こうした単トップクォーク生成の理論的な仕組みと、そこから導かれる物理的な量（たとえば生成される確率や粒子の運動の特徴など）に注目し、理論予測と実験結果とのわずかなズレを捉えることで、標準模型を超える新たな物理の兆候を探索することを目指した。

ILCは主にヒッグス粒子の性質を詳しく調べるために計画されているが、本研究を通じて、ILCがトップクォークの研究にも大きな力を発揮できることを示すことで、この加速器実験の意義をさらに広げることも本研究の目的の一つである。

3. 研究の方法

本研究では、素粒子物理学の標準模型では説明しきれない新しい現象を理論的側面から、コンピュータシミュレーションを用いて探る。そして、ここでは、標準模型の枠組みをより一般的な形で拡張する手法を採用した。このために用いたのが、「標準模型有効理論 (Standard Model Effective Field Theory : SMEFT)」と呼ばれる理論的な枠組みである。SMEFTは、既知の物理法則を基礎としつつ、標準模型の粒子とそれらの相互作用の対称性を保ったまま、理論的に許されるあらゆる相互作用を包括的に追加することによって、新しい物理の効果を表現できるようにしたものである。

本研究では、SMEFTにおける記述の方法として、さまざまな新しい相互作用を整理・分類し、標準的に使われている「Warsaw 基底」を採用した。この基底では、相互作用の可能性が網羅的に書き出されており、その内容をもとに理論的な予測値（たとえば反応の起こる確率や粒子の運動の分布など）を計算することが可能である。そして、それらの予測と実際の実験結果を比較することで、どのような新しい相互作用が現実には起こり得るかを検証することができる。

この方法の大きな特長は、特定の新粒子や新理論を仮定せず、理論的に許される相互作用の可能性を広く扱える点にある。そのため、実験データとの比較をもとに、新しい相互作用を取捨選択し、標準模型をどのように拡張できるか、またはできないかという制限を与えることができる。

さらに本研究では、Warsaw 基底に基づく相互作用の情報を用いて、素粒子同士の衝突や生成の様子を再現するためのシミュレーションソフト「MadGraph」を活用した。このソフトを使って、ILCにおける単トップクォーク生成過程を実際の観測装置の性能までを考慮した解析を行い、標準模型による背景的な反応と、新しい物理に由来する信号的な反応の違いを数値的に評価し、その識別方法について検討を行った。

このように、SMEFTという理論的に体系化された枠組みと、シミュレーションによる現実的な解析を組み合わせることで、新しい物理の兆候を探りつつ、標準模型の拡張に対して有意義な制約と方向性を与える。

4. 研究成果

主な成果は以下の3点である。

1. ILC250における単トップクォーク生成に対する標準模型からの寄与の再検討
これまでの先行研究では、単トップクォークが生成される際の標準模型による寄与は無視されてきた。しかし、本研究では、その寄与が観測される物理量において無視できない効果を持ちうることを定量的に解析し、その可能性を示した。この結果により、FCNC過程による生成との違いを明確に識別するための方法が今後必要になることが示唆され、精密な理論解析へと進むための重要な基盤を得ることができた。
2. ILCにおけるFCNC探索の有効性の提言
トップクォークに関するFCNC相互作用を探索する方法としては、トップクォークの崩壊過程を見る方法と生成過程に注目する方法の二つがあるが、本研究では、生成過程に着目した。なぜなら、生成過程に寄与する可能性のある4フェルミ型FCNC相互作用は、LHCで制限付けされている形状因子型のFCNC相互作用よりも、相互作用の強さが大きくなる可能性をあるからである。このことを念頭に置き、その観測可能性を探っている。この解析は、現在進行中ではあるが、将来のILC実験におけるFCNC探索の戦略立案において、重要な物理的根拠を与えると期待している。
3. 研究ネットワークの形成と研究会活動の実施
本科研費の研究分担者である馬渡健太郎氏との連携により、有効場理論に関する研究会を2回開催し、国内の若手研究者や学生との議論・情報共有を促進した。また、IWATE Collider Schoolに対しても支援を行い、次世代の研究者育成に寄与した。これらの活動を通じて、国内外における素粒子理論の研究ネットワークの強化を図ることができた。

上記成果を踏まえ、今後の課題として、以下の2点を挙げておきたい。

1. 標準模型起源とFCNC起源の識別方法の構築
単トップクォーク生成における標準模型による寄与とFCNCによる寄与を、実験によって得られる観測量から識別するための解析手法の確立が必要である。具体的には、トップクォークの運動量や飛行方向といった物理量の分布を精密に解析し、それらの特徴を組み合わせた識別手法を開発することが求められる。
2. 機械学習によるFCNC制限の高度化
今後は、機械学習を導入し、MadGraphによって得られた大量のシミュレーションデータを解析することで、FCNC相互作用の有無に対する制限をより高い精度で求めることを目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 7件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Moch S., Ruijl B., Ueda T., Vermaseren J., Vogt A. | 4. 巻 849 |
| 2. 論文標題 Additional moments and ϵ -space approximations of four-loop splitting functions in QCD | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters B | 6. 最初と最後の頁 138468 ~ 138468 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2024.138468 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Altakach Mohammad Mahdi, Lamba Priyanka, Maltoni Fabio, Mawatari Kentarou, Sakurai Kazuki | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Quantum information and CP measurement in H \rightarrow W^+W^- at future lepton colliders | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 093002-1 ~ 15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.093002 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Chen Junmou, Hagiwara Kaoru, Kanzaki Junichi, Mawatari Kentarou | 4. 巻 83 |
| 2. 論文標題 Helicity amplitudes without gauge cancellation for electroweak processes | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal C | 6. 最初と最後の頁 922-1 ~ 28 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-023-12093-7 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Nagao Keiko I., Higashino Satoshi, Naka Tatsuhiro, Miuchi Kentaro | 4. 巻 2023 |
| 2. 論文標題 Directional direct detection of light dark matter up-scattered by cosmic rays from direction of the Galactic center | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics | 6. 最初と最後の頁 061 ~ 061 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2023/07/061 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Nagao Keiko I., Nomura Takaaki, Okada Hiroshi, Shimomura Takashi | 4. 巻 108 |
| 2. 論文標題 Neutrinoophilic dark matter annihilation in a model with $U(1)_{L-\mu-L-\tau} \times U(1)_H$ gauge symmetry | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 055032-1~11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.108.055032 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Fujita Mitsutoshi, Hatta Yoshitaka, Sugimoto Shigeki, Ueda Takahiro | 4. 巻 2022 |
| 2. 論文標題 Nucleon D-term in holographic quantum chromodynamics | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics | 6. 最初と最後の頁 093B06:1-33 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptac110 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Nagao Keiko I., Okada Hiroshi | 4. 巻 36 |
| 2. 論文標題 Modular A4 symmetry and light dark matter with gauged $U(1)_{B-L}$ | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physics of the Dark Universe | 6. 最初と最後の頁 101039:1-11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.dark.2022.101039 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 Nagao Keiko I., Nomura Takaaki, Okada Hiroshi | 4. 巻 138 |
| 2. 論文標題 A model explaining the new CDF II W boson mass linking to muon g-2 and dark matter | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal Plus | 6. 最初と最後の頁 365:1-10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjp/s13360-023-03992-5 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Nagao Keiko I., Nomura Takaaki, Okada Hiroshi | 4. 巻 106 |
| 2. 論文標題 An alternative gauged U(1)R symmetric model in light of the CDF II W boson mass anomaly | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 115011:1-9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.115011 | 査読の有無 無 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 I. Nagao Keiko, Okada Hiroshi | 4. 巻 2021 |
| 2. 論文標題 Neutrino and dark matter in a gauged U(1)_R symmetry | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics | 6. 最初と最後の頁 063 ~ 063 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2021/05/063 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Moch S., Ruijl B., Ueda T., Vermaseren J.A.M., Vogt A. | 4. 巻 825 |
| 2. 論文標題 Low moments of the four-loop splitting functions in QCD | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Physics Letters B | 6. 最初と最後の頁 136853 ~ 136853 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136853 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 Kouda Yusaku, Kon Tadashi, Kurihara Yoshimasa, Ueda Takahiro | 4. 巻 82 |
| 2. 論文標題 Higgs triplet extension of GRACE | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The European Physical Journal C | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1140/epjc/s10052-021-09903-1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kazumasa Ohkuma |
| 2. 発表標題 The SMEFT approach for top FCNC searches |
| 3. 学会等名 Key Interactions Bound for the Invisibles 2023 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keiko Nagao |
| 2. 発表標題 Directional detection of boosted dark matter from direction of the Galactic center |
| 3. 学会等名 XV International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC15) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keiko Nagao |
| 2. 発表標題 Directional detection of dark matter boosted by cosmic rays from direction of the Galactic center |
| 3. 学会等名 the Dark Side of the Universe (DSU2023) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 長尾桂子、東野聡、中竜大、身内賢太郎 |
| 2. 発表標題 銀河中心方向から飛来する 加速された暗黒物質の検出とその方向分布 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会 (2023年) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Keiko Nagao |
| 2. 発表標題 Physics cases by direction sensitive dark matter searches |
| 3. 学会等名 Unraveling the History of the Universe and Matter Evolution with Underground Physics 2024 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Keiko Nagao |
| 2. 発表標題 Directional Detection of Cosmic Ray Boosted Dark Matter |
| 3. 学会等名 The 15th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms (FPUA2024) (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|-------------------------------|----|
| 研究分担者 | 長尾 桂子 (Nagao Keiko) (90707986) | 岡山理科大学・理学部・准教授 (35302) | |
| 研究分担者 | 植田 高寛 (Ueda Takahiro) (50469871) | 順天堂大学・医学部・准教授 (32620) | |
| 研究分担者 | 馬渡 健太郎 (Mawatari Kentaro) (90814096) | 岩手大学・教育学部・教授 (11201) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|