

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月25日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17645

研究課題名（和文）複合ヒッグス模型とLHC現象論

研究課題名（英文）Models with Composite Higgs and LHC Phenomenology

研究代表者

松崎 真也 (Matsuzaki, Shinya)

名古屋大学・理学研究科・特任助教

研究者番号：50712486

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：2012年の大型ハドロンコライダー（LHC）実験でのヒッグス粒子の発見後、次の舞台は我々の宇宙史における最重要な謎の一つである質量の起源を綿密に調査することに移行された。質量の起源を動的に説明する理論は最も魅力的なシナリオの一つを与え、ヒッグス粒子に内部構造（複合性）を齎し、実験で検証可能な新物理に関する多くのベンチマークを提供すると期待される。私は提案した研究プロジェクトを通して、特にLHC実験に焦点を当て、Higgs複合性と質量の動的起源の重大な結果から生じる新物理を探究し、この研究の方向性に関する様々な発展を成果として残した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

質量の起源は、我々の宇宙史において学術的に探究すべき最も重要な謎のひとつである。

提案した研究プロジェクトを通して、私はHiggs複合性と質量の動的起源の相関結果から生じるLHC実験で検証可能な新物理の探究に努め、この研究の方向性に関する様々な発展を成果として残した。私は今後の素粒子物理実験および天体観測における質量の起源の探究可能性を以前より明確に示し、理論分野の発展だけではなく実験・観測分野に対しても大きなインパクトを与え、多角的視野に基づく研究を遂行した。こうして様々な共同研究や研究発表を通して、社会に成果を配信し、自然科学に関する相補的な理解の発展に貢献した。

研究成果の概要（英文）：The discovery of a Higgs particle at the Large Hadron Collider (LHC) experiment in 2012 opened a new era to closely investigate the origin of mass which is one of the most important mysteries for our Universe. Exploring the dynamical structure of the Higgs physics thus should have close correlation with other physics evidently going beyond the standard model (SM) of particle physics, such as the existence of dark sector. A class of scenarios to dynamically account for the origin of mass, which can be mostly viable, would serve the Higgs with some inner structure, its compositeness, and made plenty of benchmarks for beyond the SM (BSM) to be tested by experiments.

Throughout the proposed research project, I have been exploring the BSM arising as significant consequences of the Higgs compositeness and the dynamical origin of mass, having a particular attention to the discovery potential at the LHC experiments, and have made lots of developments along this research direction.

研究分野：素粒子論

キーワード：LHC実験の新物理 質量の起源 複合ヒッグス模型 暗黒セクターの物理 フレーバーの物理

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

質量の起源を担う粒子「ヒッグス粒子」は発見されたが、その存在の力学的起源はわかっていなく、その解明は来る 2015 年再稼動予定の LHC 実験における最大の課題の一つであった。素粒子物理学の標準模型ではヒッグス粒子の存在はインプットであるため、この重要な課題にアプローチできない。

### 2. 研究の目的

本研究課題ではヒッグス粒子の力学的起源を探究するために、強結合理論に基づく標準模型を越えるシナリオに着目した。この理論の枠組みでは、ヒッグス粒子の起源はより基本的な粒子の束縛状態として力学的に説明される(複合ヒッグス模型)。本計画では、このような複合ヒッグス模型の物理を探索することにより質量の力学的起源を LHC 実験で検証することを目的とした。

### 3. 研究の方法

LHC 実験における質量の力学的起源の検証に向けて、複合ヒッグス模型の解析と実験グループに直接提唱可能なレベルの複合粒子のシグナルシミュレーションを行う。理論の解析は強結合理論の低エネルギー有効理論に基づく。特に研究代表者が提唱したスケール不変なカイラル摂動論(Matsuzaki and Yamawaki, Phys. Rev. Lett. 113, (2014))、ゲージ・重力理論双対対応の応用、または複合ベクトル粒子の物理の記述に有効な隠れた局所対称性の方法を駆使する。こうして複合粒子の LHC 実験における様々な生成過程の断面積や崩壊確率を低エネルギー有効理論の高次の量子補正まで計算し、それをベースとして粒子検出器の性能などの実験環境を考慮した現実的なシグナルシミュレーションモデルを作成する。そのモデルを実験データ解析のベンチマークとして ATLAS を含む LHC 実験グループとの密な議論を行い検証する。

### 4. 研究成果

初年度の平成 27 年度は、実施計画に沿って、質量の起源に関連する複合ヒッグス模型が予言する複合粒子の LHC 実験におけるシグナルの提唱と解析に従事した。この年度の前半は特に、ウォーキングテクニカラー理論が予言する複合ベクトル粒子に焦点をあて、事前に発展させていた有効模型の解析方法に基づき、LHC 実験における具体的なシグナル事象を検証した。この研究の結果、6 月に LHC 実験から報告された現在の一大ブームとなった新粒子の存在可能性のヒントを説明することに成功し、その成果を数々の学術論文で発表した(Phys. Lett. B750, Mod. Phys. Lett. A31, Nucl. Phys. B904)。特筆することとして、この研究は理論研究者におけるこの一大ブームの火付け役となり業界に大きなインパクトを与えた。さらに、LHC 実験グループにも評価され、特に LHC 実験の本拠地である欧州原子核研究機構で 11 月に開催された研究会では、この研究の代表者として招待され、講演を行った。

年度の後半は、同模型の複合擬スカラー粒子に焦点をあて、そのシグナル事象を解析することに従事した。その結果、12 月に実験から報告された更なる新粒子の存在可能性のヒントを説明することに成功し、その成果を学術論文に発表した(Mod. Phys. Lett. A31, 2016)。

また、LHC 実験に沿った現象論の研究の他に、大きなフレーバー数を持つ強結合ゲージ理論に関する新しい理解などの純理論的研究成果も挙げている(JHEP 1512)。

平成 28 年度は、実施計画に沿って質量の起源に関連する複合ヒッグス模型の LHC 実験におけるシグナルの検証と、さらにそれらの模型に特徴的な暗黒物質候補の物理を含めた発展的な研究を推進した。この年度の前半では、LHC 実験にて報告された新粒子のシグナルの可能性に関して、本研究の一つの主軸の模型であるウォーキングテクニカラー理論に基づく複合粒子(ウォーキング・テクニパイ粒子)によるシグナルの説明と、それに次ぐ新粒子発見可能性を提唱した(Mod. Phys. Lett. A31(2016); Phys. Rev. D93(2016))。また、ヒッグス粒子が部分的に複合粒子となる可能性を考案し、その模型で予言される複合粒子や暗黒物質候補の物理を解析し、今後の LHC 実験または暗黒物質検出実験へのシグナル検証方法を提示した(Phys. Rev. D94(2016))。さらに、複合ヒッグス粒子だけでなく、標準模型の非摂動的ダイナミクスの性質により生成されるバリオンのような複合スカラー粒子が、暗黒物質の候補となりうる可能性も提唱し、研究会などで講演を行った。

年度の後半では、前述の部分的複合ヒッグス模型を拡張し、ニュートリノの非常に小さな質量の起源、またそのフレーバー混合の機構も強結合ゲージ理論(ハイパーカラー理論と名付けたもの)の力学的性質と直接関係づける可能性を議論し、さらにその強結合理論によって生まれるバリオンのような複合粒子が暗黒物質候補になることを示し、この模型の今後の LHC 実験、LHCb, Belle, 暗黒物質検出実験などを含めた多角的な検証可能性を提示した(PTEP, 103B01, 2017)。

平成 29 年度は、研究実施計画に沿って質量の起源に関係する複合ヒッグス模型が予言する LHC 実験におけるシグナル検証と、それに相関するフレーバー物理に対する予言に対して精力

的に研究を推進した。また、前年度までの暗黒物質の物理だけでなく暗黒エネルギーの物理に関する考察も広げ、より広範囲にわたる相補的な質量の起源探究に関する研究を展開した。

年度の前半では、主に前年度に提唱した（部分的な）複合ヒッグスシナリオを拡張し、フレーバー物理に対して感度の高いシナリオを考案し、そこで予言されるフレーバー構造を持つ新しい複合ベクトル粒子によって、現在報告されている B 中間子の半レプトン崩壊過程に関する標準模型からのズレが説明できることを示し、学術論文としてまとめた (JHEP1708, 2017)。

年度の後半では、今までに無い新しい側面からの切り口として、暗黒エネルギーの物理に関する言及できる新しい暗黒物質候補の宇宙史についての研究を進め、学術論文としてまとめた (Phys. Rev. D95, 2017)。この宇宙史の初期条件にはスケール不変なシナリオの整合性が良いことが分かり、発展中の（部分的）複合ヒッグス模型のシナリオに埋め込むことで、より広範囲にわたる質量の起源に関する現象論的証拠を探索できることが明らかになった。

これらの成果に関連する内容を国内、国外の様々な研究会で発表し、他の研究者と活発な意見交換を行った。

平成 30 年度は、前年度までに提唱してきた質量の起源を動力学的に与えるスケール対称性の破れのシナリオに焦点をあて、その理論が予言する部分的複合ヒッグス粒子が予言する LHC 実験におけるシグナル検証、また、それに関連するフレーバー物理に対する予言に対して精力的に研究を推進した。さらに、前年度から注目をし始めた暗黒エネルギーの物理に関して、このスケール対称性の破れのシナリオの観点を導入し、よりいっそう広範囲にわたる相補的な質量の起源探究に関する研究を展開した。

年度の前半では、フレーバー物理に対して感度の高いシナリオを考案し、現在報告されている K 中間子の荷電・パリティ非対称な崩壊プロセスに関する標準模型からのズレや、B 中間子の半レプトン崩壊過程に関する標準模型を超える物理のシグナルの可能性を考察し、学術論文としてまとめた (JHEP1811, 2018)。

年度の後半では、LHC 実験におけるヒッグス対生成イベントを解析し、標準模型の予言からのズレがあることを発見し、今後の高精度 LHC 実験までの発見可能性について考察し、学術論文としてまとめた (Phys. Rev. D99, 2019)。

さらに、このようなスケール対称性の動力学的破れのシナリオがあたえる宇宙史への影響を考察した。その効果は特にアインシュタイン重力理論を修正するシナリオに基づく暗黒エネルギー、暗黒物質候補の初期宇宙の物理に著しく現れると分かった。この重要度はトップクォークとシナリオが予言する第二の（重たい）ヒッグス粒子とのフレーバー非自明な相互作用に対する感度が本質的でもあったことが分かった。

これらの成果に関連する内容を国内、国外の様々な研究会で発表し、他の研究者と活発な意見交換を行った。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件) 全て査読有り

- [1] R. Ouyang and S. Matsuzaki  
`Enhanced di-Higgs signal from hidden scalar QCD at leading-order in the scale-symmetry limit,` Phys. Rev. D 99, no. 7, 075030 (2019)  
doi:10.1103/PhysRevD.99.075030
- [2] S. Matsuzaki, K. Nishiwaki and K. Yamamoto,  
`Simultaneous interpretation of  $BR(K^* \rightarrow \pi^0 \ell^+ \ell^-)$  and  $BR(K^* \rightarrow \pi^0 \mu^+ \mu^-)$  anomalies in terms of chiral-flavorful vectors,` JHEP 1811, 164 (2018)  
doi: 10.1007/JHEP11(2018)164
- [3] S. Matsuzaki, K. Nishiwaki and R. Watanabe,  
`Phenomenology of flavorful composite vector bosons in light of B anomalies,` JHEP 1708, 145 (2017)  
doi:10.1007/JHEP08(2017)145
- [4] H. Ishida, S. Matsuzaki, S. Okawa and Y. Omura,  
`Scale generation via dynamically induced multiple seesaw mechanisms,` Phys. Rev. D95, no. 7, 075033 -- 075041 (2017)  
doi:10.1103/PhysRevD.95.075033
- [5] H. Ishida, S. Matsuzaki and Y. Yamaguchi,  
`Bosonic-Seesaw Portal Dark Matter,` Prog. Theor. Exp. Phys. 2017, 103B01  
doi:10.1093/ptep/ptx132
- [6] T. Katsuragawa and S. Matsuzaki,  
`Dark matter in modified gravity?,` Phys. Rev. D95, no. 4, 044040 - 0440450 (2017)  
doi:10.1103/PhysRevD.95.044040
- [7] S. Matsuzaki and K. Yamawaki,

- ``Walking from 750 GeV to 950 GeV in the Technipion Zoo,’’  
Phys. Rev. D93, no. 11, 115027 -- 115031 (2016)  
doi:10.1103/PhysRevD.93.115027
- [8] H. Ishida, S. Matsuzaki and Y. Yamaguchi,  
``Invisible axionlike dark matter from the electroweak bosonic seesaw mechanism,’’  
Phys. Rev. D94, no. 9, 095011 -- 095029 (2016)  
doi:10.1103/PhysRevD.94.095011
- [9] S. Matsuzaki and K. Yamawaki,  
``750 GeV Diphoton Signal from One-Family Walking Technipion,’’  
Mod. Phys. Lett. A 31 no. 17, 1630016 - 1630022 (2016)  
DOI: 10.1142/S0217732316300160
- [10] H. S. Fukano, S. Matsuzaki, K. Terashi and K. Yamawaki,  
``Conformal Barrier and Hidden Local Symmetry Constraints: Walking Technirhos in LHC  
Diboson Channels,’’ Nucl. Phys. B904, 400 - 447 (2016)  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2016.01.020
- [11] S. Matsuzaki and K. Yamawaki,  
``Walking on the ladder: 125 GeV technidilaton, or Conformal Higgs,’’  
JHEP 1512, 053 (2015)  
doi:10.1007/JHEP12(2015)053
- [12] H. S. Fukano, S. Matsuzaki and K. Yamawaki,  
``Conformal Barrier for New Vector Bosons Decay to the Higgs,’’  
Mod. Phys. Lett. A31 no. 09, 1630009 -- 1630016 (2016)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1142/S0217732316300093>
- [13] H. S. Fukano, M. Kurachi, S. Matsuzaki, K. Terashi and K. Yamawaki,  
``2 TeV Walking Technirho at LHC?,’’ Phys. Lett. B750 (2015) 259-265  
DOI:10.1016/j.physletb.2015.09.023
- [14] H. S. Fukano, M. Kurachi and S. Matsuzaki,  
``Vacuum Alignment of the Top-Mode Pseudo-Nambu-Goldstone Boson Higgs Model,’’  
Phys. Rev. D 91, no. 11, 115005 - 115017 (2015)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.91.115005>

[学会発表] (計 15 件)

1. 発表者名 : Shinya Matsuzaki;発表表題 : Hidden QCD at leading-order scale-symmetry limit: probed as enhanced diHiggs signals ; 学会等名 : HPNP2019 (国際学会) ; 発表年 : 2019 年
2. 発表者名 : Shinya Matsuzaki;発表表題 : Dynamical Scalegenesis and Origin of Mass ; 学会等名 : JLU-TSU joint workshop on frontiers of physics (国際学会) ; 発表年 : 2019 年
3. 発表者名 : Shinya Matsuzaki;発表表題 : Dynamical scalegenesis ; 学会等名 : 第一回 東北地区粒子物理、核物理、引力及宇宙学前沿研究会 (国際学会) ; 発表年 : 2018 年
4. 発表者名 : 松崎真也、西脇健二、渡邊遼太郎;発表表題 : Flavorful composite vectors in one-family model of hypercolor ; 学会等名 : 日本物理学会秋季大会 ; 発表年 : 2017 年
5. 発表者名 : 松崎真也;発表表題 : Dynamical Scalegenesis via Bosonic Seesaw Mechanism ; 学会等名 : Workshop on Beyond the Standard Model and Early Universe (国際学会) ; 発表年 : 2017 年
6. 発表者名 : 松崎真也;発表表題 : Flavorful composite vectors from vectorlike confinement ; 学会等名 : The 7th KIAS Workshop on Particle Physics and Cosmology and The 2nd KEK-NCTS-KIAS Workshop on Particle Physics Phenomenology (国際学会) ; 発表年 : 2017 年

7. 発表者名 :松崎真也;発表表題 :Dynamical Scalegenesis via Bosonic Seesaw Mechanism ;  
学会等名 : 日大・益川塾合同シンポジウム ; 発表年 : 2017 年
8. 発表者名 :松崎真也;発表表題 :Dynamical Scalegenesis via Bosonic Seesaw Mechanism ;  
学会等名 : 日大・益川塾合同シンポジウム ; 発表年 : 2017 年
9. 発表者名 : 松崎真也;発表表題 : Skymion-dark matter from a nonperturbative aspect  
hidden in the standard model ; 学会等名 : 日本物理学会 ; 発表年 : 2017 年
10. 発表者名 : 松崎真也;発表表題 : Standard-model skymion dark matter ; 学会等名 :  
新ヒッグス勉強会(New Higgs Working Group) ; 発表年 : 2016 年
11. 発表者名 : 松崎真也;発表表題 : Walking from 750 GeV to 950 GeV in the technipion  
zoo ; 学会等名 : 新ヒッグス勉強会(New Higgs Working Group) ; 発表年 2016 年発表者  
名 : 深野秀徳、松崎真也、寺師浩二、山脇幸一 ; 発表表題 : Hidden Local Symmetry  
Constraints on Composite Vector Bosons in LHC Diboson Channels ; 学会等名 : 日  
本物理学会第 71 回年次大会 ; 発表年 : 2016 年
12. 発表者名 : 松崎真也 ; 発表表題 : LHC Diboson Signal from Walking Technicolor ; 学  
会等名 : Busan-IBS Workshop on Phenomenology, String Theory and Cosmology (招待  
講演) (国際学会) ; 発表年 : 2015 年
13. 発表者名 : 深野秀徳、松崎真也、山脇幸一 ; 発表表題 : Conformal Barrier for New Vector  
Bosons at LHC ; 学会等名 : 日本物理学会秋季大会 ; 発表年:2015 年
14. 発表者名 : 松崎真也 ; 発表表題 : 2 TeV Walking Technirho at LHC? ; 学会等名 : 素粒  
子物理学の進展 2015 ; 発表年 : 2015 年
15. 発表者名 : 松崎真也 ; 発表表題 : 2 TeV Walking Technirho at LHC? ; 学会等名 : KMI-IBS  
Workshop (国際学会) ; 発表年 : 2015 年

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
出願年 :  
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
発明者 :  
権利者 :  
種類 :  
番号 :  
取得年 :  
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

該当なし