

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：32677

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05423

研究課題名(和文)複合ヒッグス粒子の形状因子とコライダー物理

研究課題名(英文)Form Factor of Composite Higgs and Collider Physics

研究代表者

橋本 道雄 (Hashimoto, Michio)

武蔵大学・人文学部・教授

研究者番号：70573046

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,300,000円

研究成果の概要(和文)：一般に、複合ヒッグス模型が正しければ、on-shell で弱ボソンとの結合やトップクォークとの湯川結合に SM の値からのずれが生じ、さらに、それらの結合に関して形状因子の効果(off-shell 効果)が現れると期待される。そのトップクォークとの湯川結合について、ベクターライク・フェルミオン模型を用いて、on-shellでのトップ湯川結合が SM の値よりも大きくなる可能性について研究を行い、その研究結果を論文1本にまとめた。また、日本物理学会での招待講演を1件、信州大学で行われた研究会での招待講演1件、中国・広州市で行われた国際会議での招待講演1件、KEKでの国際会議での講演を1件行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒッグス粒子が標準模型(SM)で仮定されているような点状粒子なのか、それとも湯川博士の中間子のように複合粒子であるのかは、依然として未解決であり、素粒子理論の重要問題の1つである。一般に、複合ヒッグス模型が正しければ、on-shell で弱ボソンとの結合やトップクォークとの湯川結合に SM の値からのずれが生じ、さらに、それらの結合に関して形状因子の効果が現れると期待される。この研究では、トップ湯川結合にSMからのズレが現れる可能性があることを具体的に示し、論文に発表した。今後の LHC のデータによって、そのズレが検証されれば、複合ヒッグス模型の正しさが証明される可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In general, if a Higgs particle is composite, the on-shell and off-shell couplings of the Higgs and the weak bosons, and the top-Yukawa coupling are expected to deviate from the values of the standard model (SM). I wrote a paper on the vector-like fermion model where the on-shell top-Yukawa coupling can be larger than the SM value. I gave invited talks at JPS and in a local workshop in Shinshu University. Also, I was invited and talked in the international workshop held in Guangzhou, China. I attended the international workshop in KEK, Tsukuba, and gave a talk there.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ヒッグス粒子 トップクォーク

## 1. 研究開始当初の背景

CERN Large Hadron Collider (LHC) で素粒子標準模型 (SM) のヒッグス粒子とおぼしきスカラー粒子  $h$  が発見され、質量は  $m_h = 125\text{--}126 \text{ GeV}/c^2$  と確定した。しかし、その新粒子  $h$  が SM の予言する“素”な粒子であるのか、それともハドロンにおける湯川博士の  $\pi$  中間子のような複合粒子 ( $H$ ) であるのかについては、現在、世界中で精力的に研究が進められているところであり、いまだ確定はしていない。複合ヒッグス粒子  $H$  を予言する強結合ダイナミクスは、SM を超える新物理 (BSM) の有力な候補の1つであり、素粒子理論における最重要課題の1つであることは間違いない。

## 2. 研究の目的

本研究では、複合ヒッグスシナリオの決め手となる形状因子について、計算可能な具体的模型の提案と、コライダー物理で検証可能な数値計算の実行を目的とする。例えば、トップクォークに複合フェルミオンからの混合によって、複合ヒッグス粒子との湯川結合に形状因子の効果が生じることを具体的に示す。また、弱ボソンと複合ヒッグス粒子との間にも同様の形状因子の効果が生じることを示す。

## 3. 研究の方法

既に UV complete な複合ヒッグス模型はいくつか知られており、それらを参考にして、ハドロン物理などでよく知られた手法を用いて、計算可能な具体的模型をに書き下し、複合ヒッグス粒子との結合に形状因子の効果が生じることを計算可能な具体的表式で示す。また、弱ゲージボソンと複合ヒッグス粒子との結合にも何らかの形状因子の効果が生じる可能性があるので、模型を構築する際には、その部分にも着目する。そして、シュウィンガー・ダイソン方程式やベレー・サルピーター方程式などの非摂動論に基づく計算によって、SM からのずれの効果と形状因子の効果を計算し、コライダー物理での検証を目指す。

## 4. 研究成果

トップクォークと複合ヒッグス粒子の結合に関する形状因子の効果 (off-shell 効果) をみるためには、まず、質量殻上 (on-shell) でのトップ湯川結合について押さえておく必要がある。一般に、複合ヒッグス模型では、SM からのズレが期待される。実際、LHC の実験では、トップ湯川結合について報告がなされており、中心値だけみれば multi-lepton channel で signal strength が SM の 1.6 倍になっている。この結果はまだ確定的と言えるものではないが、類似の結果は、LHC で以前から報告されており、一部の研究者によって、それを説明する模型の探索が行われてきた。そこで、複合ヒッグス模型で現れると考えられている vector-like quark (VLQ) を用いて、on-shell でのトップ湯川結合が SM よりも大きくなる可能性について研究を行った。

複合ヒッグス模型では、多くの場合、トップ湯川結合は SM より小さくなる傾向 (図 1 の MCHM4, MCHM5 など) があるが、左巻きトップクォークと同じ電荷をもつ VLQ を複数導入すれば、トップ湯川結合が SM よりも大きくでき、さらに、一番軽い VLQ の湯川結合は負にできるので、gluon fusion によるヒッグス粒子生成の実験結果と矛盾することのない模型を構築することに成功した。(図 1 の赤色の領域) また、この場合、ヒッグス粒子

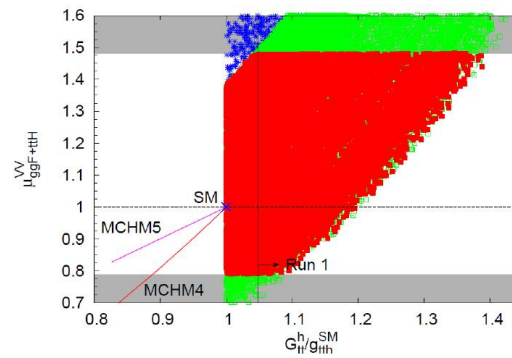


図 1: トップ湯川結合の SM からのズレ

を 2 つ生成する過程にも影響を及ぼすことが分かった。これらの結果は、“Revisiting vectorlike quark models with enhanced top Yukawa coupling” としてまとめられ、査読付き論文として、アメリカ物理学会誌の Physical Review D96, p.035020 (2017) に掲載された。

強結合ダイナミクスについての現状と将来についてのレビューと、上記の研究成果は、日本物理学会の招待講演「力学的対称性の破れの痕跡を求めて」(東京理科大学野田キャンパス, 2018 年 3 月 23 日) において発表された。また、非超対称模型 (non-SUSY) に基づく素粒子現象論の全体的なレビューを「質量階層性に対する新しい原理が導く多彩な物理現象とプランクスケールの物理」(信州大学、松本市、2018 年 9 月 18 日～19 日) において、「素粒子物理学の現状認識：LHC・フレーバ物理・陽子崩壊」というタイトルで行っている。

さて、上述の VLQ 模型を UV complete な複合ヒッグス模型から如何にして導出できるかが、2018 Joint workshop of TYL/FJPPL and FKPL (2018/5/9-11, Nara, JAPAN) において、共同研究者の Giacomo Cacciapaglia らと研究打合せを行うなどの研究活動を進めてきた。

さらに、UV complete な複合ヒッグス模型の 1 つである Fundamental composite Higgs model をヒントに、フレーバー対称性  $SU(4)/Sp(4)$  に基づく南部・ヨナ・ラシーニョ模型を具体的に構築し、相構造の解明と、複合粒子の質量、SM からの結合定数のズレと形状因子の効果について研究を行っている。トップクォークの導入の仕方は、1 通りとは限らないが、まずは、いくつかある可能性のうちの 1 つを選択し、具体的に相構造を求めることにした。その結果、南部・ヨナ・ラシーニョ結合定数に対して、望ましい真空が得られるための条件を導くことに成功している。この模型では、複合ヒッグス粒子がいくつか現れるが、その質量公式についても導出できている。しかしながら、SM からの結合定数のズレと形状因子の効果について解明の途中で、コロナ禍の影響のため、研究がストップしてしまい、年度内に研究成果としてまとめることができなかった。なんとかして、早急に論文にまとめる予定である。

これらの研究成果の一部は、中国・広州市で開催された国際会議「Composite Higgs, Dark Matter, Neutrinos and Related Topics」(2019/11/21-24, Guangzhou, China) における招待講演と、つくば市で開催された国際会議「KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2020)」(2020/2/18-21, KEK, Tsukuba, Japan) における口頭講演にて、「Fundamental Composite Higgs and Phase Structure」というタイトルで発表されている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mchio Hashimoto	4. 巻 96
2. 論文標題 Revisiting vectorlike quark models with enhanced top Yukawa coupling	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 035020-1 ~ 10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.96.035020	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

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 橋本道雄
2. 発表標題 素粒子物理学の現状認識：LHC・フレーバ物理・陽子崩壊
3. 学会等名 質量階層性に対する新しい原理が導く多彩な物理現象とプランクスケールの物理（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本 道雄
2. 発表標題 力学的対称性の破れの痕跡を求めて
3. 学会等名 日本物理学会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋本道雄
2. 発表標題 Fundamental Composite Higgs and Phase Structure
3. 学会等名 Composite 2019: The 2019 International Workshop on Composite Higgs, Dark Matter, Neutrinos and Related Topics（招待講演） （国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本道雄
2. 発表標題 Fundamental Composite Higgs and Phase Structure
3. 学会等名 KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2020) (国際学会)
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----