

令和 6 年 6 月 15 日現在

機関番号：32665  
研究種目：若手研究  
研究期間：2020～2023  
課題番号：20K14474  
研究課題名（和文）摂動ユニタリティ制限の精密評価を用いたボトムアップ的ヒッグスセクター構造決定

研究課題名（英文）Determining the structure of the Higgs sector by precisely evaluating constraints of perturbative unitarity

研究代表者  
菊地 真史子（KIKUCHI, Mariko）  
日本大学・工学部・助教

研究者番号：20824642  
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：LHC実験でのヒッグス粒子(h)測定は、標準理論の予言値と無矛盾であり、ヒッグスセクターが拡張されている理論では近アライメントを指示している。本研究では、拡張ヒッグス模型の付加的ヒッグス粒子の崩壊分岐比の量子補正効果の理論的研究を一貫して進めた。複数の有力な拡張ヒッグス模型（THDM、HSM、IDM）においてすべての付加的ヒッグス粒子の全2体崩壊過程の崩壊分岐比の数値計算プログラムを完成させ、公開した。近アライメントにおいて、摂動ユニタリティ等によるパラメーター空間への制限についても研究し、hの精密測定、付加的ヒッグス粒子の直接探索、理論的制限の3方向からの模型検証が重要性を示した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で作成・バージョンアップさせたH-COUPを使えば誰もh及び付加的ヒッグスボソンのすべての2体崩壊の分岐比を高次補正を含めて高精度で理論計算でき、また理論的制限も評価できる。H-COUPを用いることで、今後の直接探索、間接探索、理論的制限を用いた複数の拡張ヒッグス模型におけるシナジー的検証方法によりヒッグスセクターの構造決定の研究が促進される。

研究成果の概要（英文）：The Higgs boson (h) measurements at the LHC are consistent with the predictions of the Standard Model. It indicates the near-alignment in extended Higgs models. We have systematically studied radiative corrections quantum on decay branching ratios of additional Higgs bosons in extended Higgs models. We have published numerical program code for the decay branching ratios of all two-body decay processes of all additional Higgs bosons in several extended Higgs models (THDM, HSM and IDM). We also have shown the importance of model verification from three directions: precise measurement of h, direct search for additional Higgs bosons and theoretical restrictions such as perturbative unitarity.

研究分野：素粒子論

キーワード：量子補正 拡張ヒッグス模型 崩壊分岐比

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

125GeV ヒッグス粒子(h)の発見により、電弱対称性の破れによる素粒子質量生成機構が証明されたがヒッグスセクターの詳細には未知な部分が多く残っている。新物理現象を説明するために考案された様々な新物理模型は模型に依る特徴的なヒッグスセクターをもっており、ヒッグスセクターが決まれば新物理の方向性も絞られる。ヒッグスセクターの構造決定は標準理論を超える新物理理論構築のための最重要課題である。

最小形から拡張されているヒッグスセクターをもつ模型(拡張ヒッグス模型)の検証方法として、加速器実験での付加的なヒッグス粒子探索、hの精密測定による標準理論予言からのずれの探索がある。また、これら実験的制限と同じく重要なものは、摂動ユニタリティによる理論的制限である。ボトムアップ的な理論構築においては、実験からのインプットと理論的制限の両面から探ることで絶大な威力を発揮する。

### 2. 研究の目的

標準理論を超えた新物理現象を説明する有力な拡張ヒッグス模型において、hと付加的ヒッグスボソンの崩壊分岐比(量子補正込み)、模型パラメーターに対する摂動ユニタリティ等の理論的制限を同時に評価できる数値計算プログラムを作成し、将来の精密測定実験、ヒッグス崩壊過程の精密理論計算、理論的制限の高精度評価により、ヒッグスセクターの構造を決定する理論的準備を整える。

### 3. 研究の方法

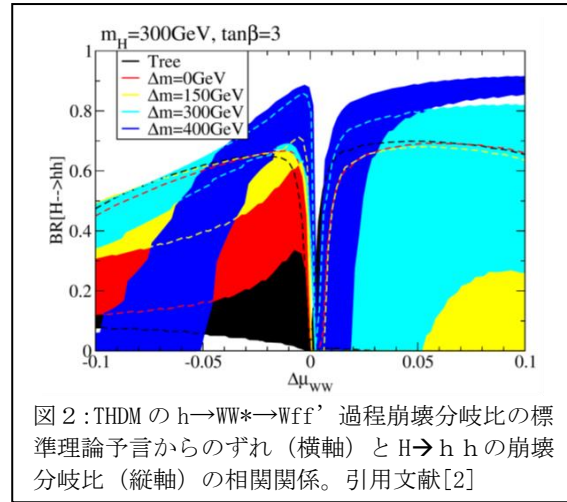
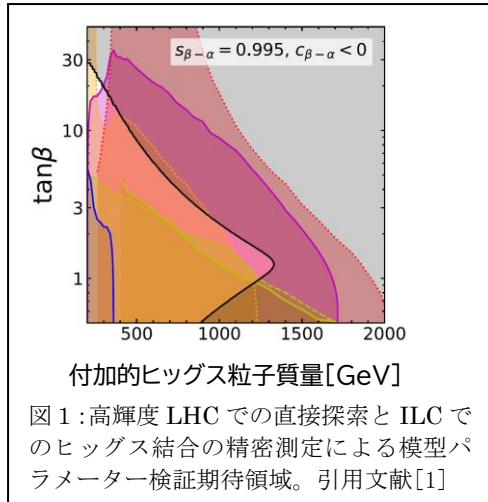
(1) 代表的な拡張ヒッグス模型として、アイソスピン2重項スカラー場2つで構成される拡張ヒッグスモデル「Two Higgs doublet model (THDM)」に着目し、LHC実験による付加的ヒッグスボソンの直接探索可能領域、hの結合定数精密測定による間接検証可能領域をLeading-orderの計算で評価する。Next-leading-orderの計算に着手する前にベンチマークポイントで直接探索と間接検証のシナジー的方法での模型検証方法をシミュレーションする。

(2) THDMに着目し、付加的なCP-evenヒッグス粒子(H)の各崩壊過程のオンシェル繰り込み法による電弱量子補正計算を研究する。電弱量子補正とQCD補正の効果を含めた崩壊分岐比と、hの崩壊分岐比との相関関係を明らかにする。

(3) 付加的ヒッグス粒子の崩壊分岐比の量子補正計算を付加的離散対称性について奇電荷を持つ2重項スカラー場1つが追加されているモデル「Inert Doublet model (IDM)」、アイソスピン1重項スカラー場が1つ追加されているモデル「Higgs Singlet model (HSM)」にも発展させる。それらの数値計算プログラムを既存の数値計算プログラムH-COUP (<http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~hcoup/>)に統合させ、ヴァージョンアップさせたコードを公開する。

### 4. 研究成果

(1) THDMで、高輝度LHCでの重いヒッグス粒子の直接探索とILCでのh結合定数の精密測定によるシナジー的方法でモデルの検証可能性を研究した。近アライメントシナリオ(ヒッグス粒子の結合が標準理論とほぼ等しいシナリオ)では、重いヒッグス粒子達の崩壊モードはhへの崩壊(H→hhなど)が支配的になり、かつhの結合はわずかに標準理論の予言値からずれ得る。高輝度LHC実験ではそれらの重いヒッグス粒子達の崩壊モードは主要検証モードであり、その直接探索により質量に下限を与えることができる。更に、hの結合定数についてILC実験での精密測定が期待されており、わずかにでも標準理論の予言値からのずれが測定されれば重いヒッグス粒子の質量に上限を与えることができる。本研究では、重いヒッグス粒子の崩壊分岐比について



は QCD 高次補正を含めて計算し、モデルのパラメーターには摂動ユニタリティと真空安定性からの理論的制限を課し、高輝度 LHC での生成断面積を計算し 95%CL での期待排除領域を評価した。図 1 は本研究の主要結果の 1 つである。カラーの領域が HL-LHC の直接探索で探索可能なパラメーター領域、灰色領域が ILC での  $h$  結合定数精密測定で検証可能なパラメーター領域を示している。図 1 はアライメントの度合いを表す  $\sin(\beta - \alpha)$  の値が 0.995 の場合 ( $\sin(\beta - \alpha) = 1$  で完全アライメント) の結果である。近アライメントシナリオでは、このシナジー的方法がモデルを検証することに非常に有力であることが示されている。(引用文献[1])

(2) 本研究では、付加的 CP-even ヒッグス粒子 ( $H$ ) のすべての 2 体崩壊の崩壊分岐比について電弱量子補正と QCD 量子補正の効果を含めて計算した。特に  $H \rightarrow hh$  モードの崩壊分岐比について、新物理パラメーターとの関係や、量子効果の大きさを詳細に研究した。摂動ユニタリティと真空安定性や加速器実験の制限を満たした領域で、量子効果により崩壊分岐比が数十パーセント程度増大するパラメーター領域が存在することがわかった。図 2 は、本研究の主要結果の 1 つである。THDM の  $h \rightarrow WW^* \rightarrow Wff'$  の崩壊分岐比の標準理論予言からのずれ (横軸) と  $H \rightarrow hh$  の崩壊分岐比 (縦軸) の相関関係を表している。黒い領域が Leading-order の予言で、その他のカラー領域は電弱量子補正・QCD 補正を含めた理論予言である。この他にも、 $H \rightarrow hh$  崩壊分岐比と電弱バリオン数生成シナリオに関連する  $hhh$  結合の相関関係を調べ、 $H \rightarrow hh$  モードの探索が電弱バリオン数生成シナリオの多角的検証方法になり得る可能性を示した。(引用文献[2])

(3) CP-even ヒッグス粒子の崩壊過程量子補正計算を IDM と HSM に発展させた。更に、共同研究者の行った CP-odd ヒッグス粒子と荷電ヒッグス粒子の崩壊過程の量子補正計算をすべて併せて H-COUP に統合させた。この際、電弱量子補正のタドポールの繰り込み処方について、二種類の繰り込みスキームから一方を選択できるように改良した。また、IDM は最も軽い離散対称性奇のスカラー粒子が暗黒物質候補になり得るため、発見された  $h$  粒子がその暗黒物質候補に崩壊する過程 (invisible 崩壊) についても計算した。また、すべてのモデルの解析において理論的制限 (摂動ユニタリティ、真空安定性からの制限) を評価できるようにプログラムを作成し、公開した。(引用文献[3])

<引用文献>

[1] M. Aiko, S. Kanemura, M. Kikuchi, K. Mawatari, K. Sakurai, and K. Yagyu, Nucl. Phys. B 966, 115375 (2021).

[2] S. Kanemura, M. Kikuchi, and K. Yagyu, Nucl. Phys. B 983, 115906 (2022).

[3] M. Aiko, S. Kanemura, M. Kikuchi, K. Sakurai and K. Yagyu, Comput. Phys. Commun. 301, 109231 (2024).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masashi Aiko, Shinya Kanemura, Mariko Kikuchi, Kentarou Mawatari, Kodai Sakurai, Kei Yagyu	4. 巻 966
2. 論文標題 Probing extended Higgs sectors by the synergy between direct searches at the LHC and precision tests at future lepton colliders	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115375, 115416
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysb.2021.115375	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 Shinya Kanemura, Mariko Kikuchi, Kei Yagyu	4. 巻 983
2. 論文標題 Next-to-leading order corrections to decays of the heavier CP-even Higgs boson in the two Higgs doublet model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115906, 115935
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nuclphysb.2022.115906	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 Masashi Aiko, Shinya Kanemura, Mariko Kikuchi, Kodai Sakurai, Kei Yagyu	4. 巻 301
2. 論文標題 H-COUP Version 3: A program for one-loop corrected decays of any Higgs bosons in non-minimal Higgs models	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Computer Physics Communications	6. 最初と最後の頁 109231
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cpc.2024.109231	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 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Mariko Kikuchi
2. 発表標題 Investigating new physics effects by loop corrected decays of the heavier CP-even Higgs boson
3. 学会等名 Physics in LHC and Beyond（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊地真史子
2. 発表標題 H-COUPの進展: 重いヒッグス粒子の崩壊に関するNLO計算の包括的研究
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菊地真史子
2. 発表標題 拡張ヒッグスモデルにおけるHiggs to Higgs崩壊に対する 量子効果 II
3. 学会等名 2021年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菊地真史子
2. 発表標題 拡張ヒッグスモデルにおける Higgs to Higgs 崩壊に対する量子効果
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mariko Kikuchi
2. 発表標題 Exploring new physics by comprehensive studies of loop corrected decays of various Higgs bosons
3. 学会等名 HPNP2023 - The 6th International Workshop on "Higgs as a Probe of New Physics 2023" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mariko Kikuchi
2. 発表標題 Comprehensive studies of loop-corrected decays of various Higgs bosons
3. 学会等名 Scalars 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------