



# Anomalous Higgs Interactions in Gauge-Higgs Unification with Deconstructing 5D Scalar QED

Tanabe, Kazuya

---

(Degree)

博士 (理学)

(Date of Degree)

2014-09-25

(Date of Publication)

2015-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6249号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006249>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



## 論文内容の要旨

氏 名 田邊和也

専 攻 物理学

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Anomalous Higgs Interactions in Gauge - Higgs Unification with  
Deconstructing 5D Scalar QED(ゲージ・ヒッグス統一理論及び高次元格子化理論における異常ヒッ  
グス相互作用)

指導教員

園田英徳

近年 LHC 実験においてヒッグス粒子が発見された。この発見は大きな進展であるが、この発見されたスカラー粒子が標準模型の予言するところのヒッグス粒子であるか、または標準模型を超える理論で予言されているヒッグス粒子であるかは未だ分かっていない。また標準模型にはヒッグス粒子に関する階層性問題が存在する。この問題を解決することをモチベーションとした標準模型を超える理論はいくつか提唱されている。超対称性を導入するモデル、ゲージヒッグス統一モデル、dimensional deconstruction モデル、リトルヒッグスモデル等。ヒッグス粒子が発見されたタイミングでこれらのモデルにおいてヒッグス粒子の振る舞いを調べることは重要な事ではないか。というのも今後ヒッグス相互作用が精密に測定されるであろうが、階層性問題を解決することをモチベーションに提唱された標準模型を超える理論はヒッグス相互作用が標準模型と異なる振る舞いをするからである。これを異常ヒッグス相互作用と呼ぶ。もし今後のヒッグス相互作用の精密測定において、異常ヒッグス相互作用が発見された場合、これは標準模型を超える理論のシグナルといえるであろう。階層性問題を解決することをモチベーションに提唱された理論でこのような異常ヒッグス相互作用が現れるのは自然なことといえはそれとおりである。というのもこれらのモデルでは階層性問題を解決するためにヒッグスセクターを拡張しているからである。超対称性理論ではヒッグスのスーパーパートナーであるフェルミオンを導入している。ゲージヒッグス統一モデル、dimensional deconstruction モデルではパートナーとしてカルーザ・クライン粒子を導入している。本論文ではゲージヒッグス統一モデル、dimensional deconstruction モデルにおける異常ヒッグス相互作用をメインテーマとしている。これらの 2 つのモデルで異常ヒッグス相互作用が現れるのはこれらのモデルの以下の性質によることが分かる。

1. 物理量のヒッグス場に関する周期性の存在。
2. 余剰次元空間における並進対称性の破れ。

ゲージヒッグス統一モデルではヒッグス場はゲージ場の余剰次元成分を起源としている。ヒッグス場の起源がゲージ場なのでゲージ対称性によりヒッグス場は質量項を持つことが禁止される。階層性問題はヒッグス質量への量子補正が高エネルギーで発散することで起こっていたが、ゲージヒッグス統一モデルでは高エネルギーでゲージ対称性が回復するのでヒッグス質量への量子補正は発散せず階層性問題は解決される。しかし、ヒッグス質量は量子補正により有限の値を持つ。というのもウィルソンループからゲージ対称性と矛盾せずにヒッグス質量を導入できるからである。このウィルソンループはヒッグス場に関す

田邊和也 NO. 2

る周期性を持つ。よって条件1を満たす。またゲージヒッグス統一モデルではフェルミオンのフレーバの多様性を実現するために、バルクマスを導入する。また低エネルギーにおいてカイラルな理論を実現するために余剰次元に  $S^1/Z_2$  の対称性を課す。そのためにバルクマスが余剰次元方向に階段関数に比例する形になる。この階段関数に比例するバルクマスによって余剰次元方向の並進対称性が破れる。これで条件2を満たす。またフェルミオンのモード関数がカイラリティーによって異なる余剰次元の固定点に固定されるため、湯川相互作用が指数関数的に減衰する形となる。よってバルクマスがフレーバーによって異なることで湯川相互作用の指数関数的なちがいを実現することができる。

Dimensional deconstruction モデルはゲージヒッグス統一モデルの余剰次元の円を格子化したモデルである。例えば  $N$  個の格子点に格子化した場合、理論の持つゲージ対称性はあるゲージ対称性を  $N$  個かけあわせたゲージ対称性を持つ。ヒッグス場の起源は疑南部ゴールドストーン場であり、ヒッグス質量の量子補正は  $N > 3$  の場合に有限の値となる。ヒッグス場はウィルソンラインを介して現れるのでヒッグス場に関する周期性を持ち、条件1が満たされる。また先ほど行ったように余剰次元の円が格子化されているので、余剰次元方向の並進対称性が破れており、条件2を満たすことが分かる。

本論文では異常ヒッグス相互作用をこれらのモデルで定量的に解析した。

| 氏名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 田邊 和也                                                                                                                               |     |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|
| 論文<br>題目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Anomalous Higgs Interactions in Gauge-Higgs Unification with Deconstructing 5D Scalar QED<br>(ゲージ・ヒッグス統一理論及び高次元格子化理論における異常ヒッグス相互作用) |     |       |
| 審査委員                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 区 分                                                                                                                                 | 職 名 | 氏 名   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 主 査                                                                                                                                 | 准教授 | 園田 英徳 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 副 査                                                                                                                                 | 教授  | 早田 次郎 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 副 査                                                                                                                                 | 教授  | 蔵重 久弥 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 副 査                                                                                                                                 | 教授  | 山田 泰彦 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 副 査                                                                                                                                 | 准教授 | 原 俊雄  |
| 要 旨                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                     |     |       |
| <p>2012年にHiggs粒子の存在が明らかにされて、質量が126 GeV/c<sup>2</sup>と測定された。今後Higgs粒子の性質が詳しく調べられて、標準模型の検証が更に進んでいくことになる。一方で、標準模型からのずれへの関心が高まっていくことが予想される。標準模型を低エネルギー有効理論として含む理論は、「標準模型を超える理論」(Beyond the Standard Model, BSM)と呼ばれる。統一理論(GUT)もBSMといえはいるが、通常は、GUTのエネルギースケール10<sup>15</sup> GeVより低いエネルギースケールで標準模型とのずれが現れる理論が、BSMと呼ばれるようである。</p> <p>田邊和也の学位論文は、Higgs粒子とFermi粒子の相互作用(Higgs相互作用)に焦点を当てて、BSM模型を分類することを目的としている。具体的には、SU(3)ゲージ対称性にもとづいたゲージ・Higgs統一理論と、dimensional deconstructionによる5次元スカラーQEDにおけるHiggs相互作用を具体的に調べ、異常Higgs相互作用と呼ばれる標準模型からのずれを導いている。異常Higgs相互作用は、両方のモデルでそれぞれ特徴のあるFermion質量への依存性を持つことが結論されている。</p> <p>学位論文の構成は、以下のとおりである。まず第1章は導入で、BSMのうちでも特にゲージ・Higgs統一理論とdimensional deconstructionに焦点を当てて、2つの枠組みの概略を説明している。そもそもBSMは標準模型の「階層性問題」を解決すべく提唱された理論である。階層性問題は、多くの理論家が重要視する問題で、ラグランジアンに現れるHiggsの2乗質量項が理論の紫外カットオフΛの2乗のオーダーになることを言う。理論のくりこみ可能性より、これは標準模型の整合性を脅かすものではないが、2乗質量項を微細に調整しなければならないことを理論の不完全性とみなす理論家は多い。田邊の学位論文で扱われる模型は、ひとつはゲージ・Higgs統一理論に属し、もうひとつはdimensional deconstruction理論に属する。ゲージ・Higgs統一理論は、空間に余剰次元を導入して、余剰次元方法のゲージ場のゼロモード(余剰次元方向への依存性がない)にHiggs場の役割をかわせる一連の理論である。この考え方を提唱したのは、田邊の実質的な指導教員で、今は東京女子大学に転出された林青司教授と、彼の共同研究者中央大学の箱見武夫教授である。ゲージ場は質量項を持たないことからそもそも階層性問題は成立せず、しかもHosotani効果と呼ばれる量子的な効果でゲージ場のゼロモードは真空期待値を持って、BEH(Higgs)機構が発現する。一方、dimensional deconstructionは、連続的な余剰次元を離散的な格子に置き換えた理論で、余剰次元方向のゲージ対称性が格子ゲージ理論のように離散化されていることを除けば、ゲージ・Higgs統一理論とかなり似た枠組みである。通常のQCDでカイラル対称性が自発的に破れることによって生じるπ中間子に類似したNambu-Goldstone場が、余剰次元方向のゲージ場の役割を果たしている。ゲージ・Higgs統一理論もdimensional deconstructionもともに、標準模型にはないエネルギースケールを持っていて、そのエネルギースケール以上では、標準模型との相違が顕著になる。ゲージ・Higgs統一理論の場合、それはコンパクト化された余剰次元の大きさRの逆数1/Rであり、またdimensional deconstructionの場合、それはNambu-Goldstone場の崩壊定数fである。標準模型では、Higgs場と質量mのFermi粒子の相互作用の強さ(Yukawa結合定数)は、m/v(vはHiggs場の真空期待値)で与えられ、mに比例する。ところがゲージ・Higgs統一理論では、Yukawa結合定数への補正は、M<sub>W</sub>R(M<sub>W</sub>はWボソンの質量)の関数によって与えられ、またdimensional deconstructionでは、M<sub>W</sub>/fの関数によって与えられる。</p> |                                                                                                                                     |     |       |

|    |       |
|----|-------|
| 氏名 | 田邊 和也 |
|----|-------|

第2章から6章までは、Part Iとして、ゲージ・Higgs 統一理論の詳しい説明がなされている。ここで扱われているのは、5次元の理論で、 $SU(3)$ ゲージ対称性に基づく模型である。 $SU(2) \times U(1)$ ゲージ対称性を持った標準模型を低エネルギーで含むための工夫 ( $Z_2$  orbifolding) が説明されている。Higgs 場と Fermi 場の相互作用が標準模型と異なる理由が分析されていて、2つが状況証拠としてあげられている。ひとつは、物理量が Higgs 場の期待値の周期関数になっていること、もうひとつは、余剰次元に沿った並進対称性が破れていることである。このふたつの性質がどうこの模型で実現されているか、詳しく説明されている。

第7章から第12章までは、Part IIとして、dimensional deconstruction の詳しい説明がなされている。ここで扱われているのは、格子化された5次元方向に  $U(1)$ ゲージ対称性を持つ理論で、物質場としてはスカラー場を導入している。本来は Fermi 場を導入したかったが、格子理論につきものの fermion doubling を回避しようとする、お膳立てがあまりに複雑になるため、ここでは簡単を期して、スカラー場の理論に置き換えている。したがって、厳密な意味で Yukawa 相互作用は存在せず、そのかわりにスカラー場と Higgs 場の4点相互作用を見ることの妥当性が説明され、この相互作用の標準模型からのずれを導いている。

最終章の第13章で、論文がまとめられている。

本研究は、異常ヒッグス相互作用について、その詳しい性質を2つのモデルにおいて研究したものであり、標準模型を超える模型の特徴について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の田邊和也は、博士（理学）の学位を得る資格があると認める。