

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540263

研究課題名（和文）脱構築余剰次元と電弱対称性の破れの素粒子現象

研究課題名（英文）Deconstructed extra dimensions and the electroweak symmetry breaking particle phenomenology

研究代表者

棚橋 誠治 (TANABASHI MASAHARU)

名古屋大学・基礎理論研究センター・教授

研究者番号：00270398

研究成果の概要（和文）：

素粒子質量の起源の影に隠されている物理はなんだろうか？標準模型のヒッグスポテンシャルは階層性の問題を引き起こし、理論的に不満足である。我々は、ヒッグス粒子を導入することなく電弱対称性の破れ（素粒子質量の起源）を引き起こすヒッグスレス模型を、脱構築余剰次元模型の枠組みで探索した。この研究によって、実際にそのような模型が、電弱およびフレーバーの精密測定の結果と矛盾することなく構築可能であることが示された。また、そのような模型における縦波ゲージボソン散乱振幅の構造とコライダー現象についても論じた。これらの結果は、査読付き論文誌および国際会議で報告された。

研究成果の概要（英文）：

What is the physics hidden behind the origin of elementary particle masses? The Higgs potential causes the hierarchy problem in the Standard Model and it is therefore theoretically unsatisfactory. We explored the possibility of “Higgsless” theories, achieving the electroweak symmetry breaking without invoking an Higgs scalar particle, in the deconstructed extra dimension framework. It was explicitly demonstrated that such a model can be constructed consistently with the electroweak and flavor precision tests. We also discussed the structure of the longitudinal gauge boson scattering and the collider phenomenology in such a model. These results were reported in refereed journal papers and at international conferences.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

科研費の分科・細目：素粒子物理（理論）

キーワード：KK モード、Zbb バートックス、カイラル摂動論、ヒッグスレス模型、ユニタリティー、余剰次元、電弱精密測定、非線形シグマ模型

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

### 1. 研究開始当初の背景

現代の素粒子標準模型は、決して完全なものではない。標準模型では、電弱対称性の破れ（素粒子質量の起源）を説明するために、ヒッグス場と呼ばれるスカラー場が導入されているが、他の既知の相互作用とは異なり、ヒッグス場の相互作用は、ゲージ対称性とはまったく無縁の相互作用である。この意味で、標準模型で導入されるヒッグス場は極めて異質なものとなっている。また、現在の標準模型には、陽子、電子、ニュートリノ、光子以外には安定粒子がなく、近年その存在が確立してきた宇宙暗黒物質の候補が含まれていない。最後に、標準模型には重力相互作用が含まれていない。しかも、素粒子レベルでは他の相互作用と比べて重力相互作用が非常に弱いこと（プランク質量が電弱相互作用のスケールに比べ  $10^{16}$  倍も大きいこと）を説明することができない（階層性問題）。

このような不満足にも関わらず、30 年以上の永きにわたって標準模型が君臨し続けてきた理由は、これまでに行われた加速器実験のエネルギーが必要なエネルギーに比べ小さすぎたからに過ぎない。

この状況は、本研究計画の期間に本格的に運用開始する LHC 実験によって、大きく変化するものと考えられていた。LHC 加速器は、標準模型で予言されるヒッグス粒子の生成に十分なエネルギーを持ち、LHC でヒッグス粒子が見つからない場合や見つかった新粒子の性質がヒッグスと異なっていることが分かれば、素粒子論におけるあらたな大革命を意味するからである。また、標準模型のヒッグスセクターは、仮に正しかったとしても、1TeV 程度のエネルギースケール以下で有効なたんなる低エネルギー有効理論と考えられているが、LHC 加速器は 1TeV 程度に存在する物理の探索に十分なエネルギーを持つ。永きにわたった素粒子論の「標準模型時代」は、非常に近い未来にその終焉を迎え、素粒子理論はあらたなフェーズを迎

えるものと考えられていた。

2008 年当時、ヒッグス粒子を含む理論についてはすでに多くの研究成果があったものの、ヒッグス粒子を含まない素粒子質量起源の可能性についての理論的・現象論的な研究が不足していた。言い換えると、LHC 実験仮にヒッグス粒子が発見されなかった場合に、どのような理論的・現象論的可能性が残されているのか、また、そのような場合の模型を検証するためのシグナルはなにか、という基本的な問題の研究は進んでいるとはいいたい状況であった。

### 2. 研究の目的

前述の状況のもと、標準模型を超える模型の有効な候補として、余剰次元模型やその脱構築（デコンストラクション）に多くの注目が集まっている。余剰次元模型は、通常の空間3次元・時間1次元の4次元時空の他に、低エネルギーでは感知することのできない余剰空間次元が導入された素粒子模型であり、なぜ重力相互作用だけが非常に弱いのかを自然に説明する可能性がある模型である。さらに、ブレーンの多様な配位を考えることで、ヒッグスレス模型などさまざまな魅力ある模型を構築することが可能である。また、デュアリティーの観点から見ると、余剰次元模型は、ウォーキングテクニカラー模型など、4次元の強結合場の理論と等価である可能性もあり、この意味でも興味深い。一方、デコンストラクション（脱構築）は、余剰次元ゲージ模型の余剰次元方向を離散化（格子化）することによって、余剰次元理論と同様の魅力を持つ模型を、通常の4次元時空において構築する手法であり、実際に、リトルヒッグス模型はこの手法を用いて構築された。もともとの余剰次元理論は通常の意味ではくりこみ不可能な模型であるにもかかわらず、脱構築された模型はカイラル摂動理論の手法を用いた低エネルギーでの系統的な展開が可能であり、

ループ補正までふくめてその素粒子現象への帰結をある程度コントロールすることができる模型となっている。

現在までに得られている電弱相互作用の精密測定の結果は、標準模型を超える模型を構築する上での重要な手がかりとなっている。標準模型のヒッグス場の持つ不自然さを解消するためには、なんらかの新物理が 1TeV 程度までに存在せねばならない。一方で、これまでの精密測定の結果が標準模型とほぼ無矛盾であったことから、電弱相互作用にツリーレベルで補正をあたえる新物理は、だいたい 10TeV 以下のエネルギースケールには存在しないことが分かっている。このふたつのスケールの違いは、「小さな階層性問題」として知られており、標準模型を超える模型を構築する上で非常に強い制約となっている。

本研究は、これまでの研究を発展させることで、これら余剰次元模型の電弱精密測定、フレーバー精密測定、コライダー物理など現実の素粒子現象へのインパクトを探るものである。

### 3. 研究の方法

より具体的には、以下の方針・方法で研究を行う予定であった。

- 1ループの輻射補正まで含めた脱構築 (デコンストラクション) 余剰次元模型の定式化。ヒッグスレス模型における1ループ輻射補正による電弱ゲージ相互作用への影響、とくに S,T パラメータへの影響の計算。
- 現在のフレーバー精密測定によるヒッグスレス模型構築へのインパクト。特に、クォーク・レプトンのカルツァ・クライン (KK) モードのフレーバー物理へのループレベルでの影響と、KK モード質量に対する現象論的制限。これら KK モードの LHC や ILC などのコライダー実験での探索可能性。
- 研究期間内に報告される LHC の観測結果を再現しうる脱構築余剰次元素粒子模型の構築。

### 4. 研究成果

2008年のLHC実験開始時におきた事故のため、LHC 実験の本格的稼働が遅れたこともあり、当初期待していた実験結果からのフィードバックは得られなかったものの、それ以外の主要な計画については、当初計画を順調に遂行した。

脱構築ヒッグスレス模型における1ループレベルでの S,T パラメータ等への輻射補正の研究については、論文(1)および、論文(4)で研究成果を公表した。論文(1)では S,T パラメータへの輻射補正の計算を過イラル摂動理論の1ループ近似で遂行し、現在知られている S,T パラメータへの実験的制限を満足するヒッグスレス理論が実際に構築できることを示した。また、S,T パラメータにより、ヒッグスレス模型のパラメータにどのような制限が与えられるかを定量的に示し、この理論に含まれる KK ゲージ粒子と標準模型クォーク・レプトンとの結合定数が制限されることを示した。とくに、KK ゲージ粒子とクォーク・レプトンとの結合定数が小さいもののゼロではない可能性を指摘したことは、その後のヒッグスレス模型における KK ゲージ粒子のコライダー探索研究に大きな影響を与えた。同様に、論文(4)では、脱構築ヒッグスレス模型における Zbb バーテックスへの輻射補正をカイラル摂動理論の1ループ近似で評価し、S パラメータ、T パラメータによる現象論的制限と矛盾しない模型は Zbb バーテックスの値が現在の測定と矛盾しない大きさであることを明らかにした。

KK 粒子のコライダー実験での発見可能性に関する研究としては、前述したとおり論文(1)で、KK ゲージ粒子と標準模型クォーク・レプトンとの結合定数の大きさを解明したほか、論文(5)で、ヒッグスレス模型の低エネルギー有効理論に関する研究を行った。具体的には、縦波 W ボソン散乱振幅を例にとり、どのような低エネルギー有効理論がヒッグスレス模型の散乱振幅をもっともよく説明するかに関する評価を行った。その結果、通常、ヒッグスレス模型の低エネルギー有効理論として使われるスリーサイトヒッグスレス模型は、必ずしも一般的なヒッグスレス模型の低エネルギー有効模型とはなっておらず、改良が可能であることが分かった。また、そのように改良された低エネルギー有効理論を用いて、コライダー実験での KK ゲージ粒子の生成と崩壊を評価した。

コライダー実験に密接に関連する研究として、ヒッグスレス模型における一般化され

たユニタリティー和則の研究を、論文(3)では行った。この研究では、高エネルギーでのKK ゲージ粒子の生成がユニタリティーの制限を満たす必要があることを用いて、KK ゲージ粒子の関与する結合定数が満たすべき和則を一般的な形で表した。このことにより、将来、コライダー実験によって、これら KK ゲージ粒子の存在が確認された際に、この和則を確認することで素粒子質量起源の問題を解決しうることを示した。

さらに、脱構築ヒッグスレス模型へのフレーバー精密測定からの制限についての研究も行った。S パラメータ・T パラメータの研究と同様に、カイラル摂動理論の1ループのオーダーで、脱構築ヒッグスレス模型がフレーバー精密測定量にあたる影響を系統的に調べた。この研究の結果、ヒッグスレス模型のパラメータがフレーバー精密測定によって非常に強く制限されることがしめされた一方、最小フレーバー破れの仮定をヒッグスレス模型に適用することで、そのようなパラメータへの制限は容易に満足できることをしめた。この成果は、国際会議等で発表するとともに、この科研費研究期間終了後、査読付き論文誌に投稿し、すでに出版されている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

(1) T. Abe, S. Matsuzaki, M. Tanabashi, “Does the three site Higgsless model survive the electroweak precision tests at loop?” Phys. Rev. D78 (2008) 055020. [査読あり]

(2) C. Arnsler et al. (Particle Data Group Collaboration), “Review of Particle Physics”, Phys. Lett. B667 (2008) 1-1340. [査読あり]

(3) R.S. Chivukula, H.-J. He, M. Kurachi, E.H. Simmons, M. Tanabashi, “General Sum Rules for WW Scattering in Higgsless Models: Equivalence Theorem and Deconstruction Identities”, Phys. Rev. D78 (2008) 095003. [査読あり]

(4) T. Abe, R.S. Chivukula, N.D. Christensen, K. Hsieh, S. Matsuzaki, E.H. Simmons, M. Tanabashi, “Z→b b̄ and Chiral Currents in Higgsless Models”,

Phys. Rev. D79 (2009) 075016. [査読あり]

(5) A.S. Belyaev, R.S. Chivukula, N.D. Christensen, H.-J. He, M. Kurachi, E.H. Simmons, M. Tanabashi, “W<sub>L</sub> W<sub>L</sub> Scattering in Higgsless Models: Identifying Better Effective Theories”, Phys. Rev. D80 (2009) 055022. [査読あり]

(6) K. Nakamura et al. (Particle Data Group Collaboration), “Review of Particle Physics”, J. Phys. G37 (2010) 075021. [査読あり]

[学会発表] (計12件)

(1) 柵橋誠治 “General Sum Rules for WW Scattering in Higgsless Models”, 余剰次元模型の理論的枠組み研究会、2008年12月6日、理化学研究所

(2) 柵橋誠治 “General Sum Rules for WW Scattering in Higgsless Models”, 2008年12月9日、東北大学セミナー

(3) Masaharu Tanabashi, “Higgs or Higgsless? From a unitarity viewpoint”, March 10, 2009, Workshop “New Developments of Flavor Physics 2009”, Gamagohri, Japan

(4) 柵橋誠治, 「ヒッグスレス模型と余剰次元」2009年4月2日、実験理論共同研究会「LHC が切り拓く新しい物理」東京大学

(5) Masaharu Tanabashi, “Higgs or Higgsless? From a unitarity viewpoint”, October 29, 2009, KEK theory center mini-workshop “Composite Higgs/Higgsless models and related topic toward LHC era”

(6) 柵橋誠治, “余剰次元への扉を開く”, 2009年6月13日、第17回名古屋大学理学懇話会「小林・益川理論を超えて」

(7) Masaharu Tanabashi, “Higgs or Higgsless? From a unitarity viewpoint”, November 13, 2009, Seminar at Pusan National University

(8) 柵橋誠治, 「ヒッグスレス模型と電弱およびフレーバー精密測定」2010年5月28日、金沢大学富山大学合同セミナー

(9) 柵橋誠治, “Higgs or Higgsless? From a unitarity viewpoint”, 2010年1月8日、新潟冬の研究会2010、越後湯沢

(10) Masaharu Tanabashi, “Higgsless confronts electroweak and flavor precision tests”, August 16-24, 2010, International Conference and Summer

School on LHC Physics, Tsinghua University, Beijing, P.R. China

- (11) Masaharu Tanabashi, “Higgs or Higgsless? From a unitarity viewpoint”, August 25, 2010, Seminar at Institute of Theoretical Physics, CAS, Beijing, P.R.China
- (12) Masaharu Tanabashi, “Higgsless confronts electroweak and flavor precision tests”, November 15-19, 2010, “1<sup>st</sup> International Workshop on LHC Era Physics (LHEP) in 2010”, Guangxi University, Nanning, P.R. China

[図書] (計1件)

H. Fukaya, M. Harada, M. Tanabashi, K.Yamawaki (eds), “Strong coupling gauge theories in LHC era. Proceeding, International Workshop, SCGT09, Nagoya Japan, December 8-11, 2009”

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

棚橋誠治 (TANABASHI MASA HARU)

名古屋大学・基礎理論研究センター・教授  
研究者番号：00270398