

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800158

研究課題名(和文)非自明なゲージ背景上の超重力・超弦理論に基づく素粒子模型の現象論

研究課題名(英文)Particle phenomenology of supergravity/string models on nontrivial gauge background

## 研究代表者

安倍 博之 (ABE, Hiroyuki)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10402760

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：非自明なゲージ背景上の超重力理論や超弦理論の低エネルギー有効理論として現れる、磁化された高次元超対称非可換ゲージ理論に基づく素粒子模型の現象論的性質を詳細に解析し、最新の実験観測データと整合する背景磁場の配位の同定と分類を系統的に行った。また、特に超弦理論との整合性の観点から模型自身及び解析手法に対する幾つかの拡張を提案した。これらの成果は、様々な観点から素粒子統一理論の有力候補と考えられている高次元超対称非可換ゲージ理論の現象論的側面を照らす大変興味深い結果であると同時に、超弦理論に基づく現実的な素粒子模型の構築に数多くの指針を与えるものと考えている。

研究成果の概要(英文)：We studied phenomenological features of higher-dimensional supersymmetric Yang-Mills (SYM) theories on magnetized background in detail, which appear in the low-energy effective theories of supergravity/string theories on nontrivial gauge backgrounds. We identified and classified the configurations of background magnetic fluxes, those agree with the current experimental/observational data. Furthermore, we have proposed some extensions of the models as well as of the tools for analyzing them, from the perspective of consistencies with superstring theories. The results illuminate phenomenological side of the higher-dimensional SYM theory, which is considered as a promising candidate for the unified theory of elementary particles from various perspectives. The outcomes also provide a lot of guidelines for constructing a realistic particle-physics model based on superstring theories.

研究分野：素粒子理論

キーワード：素粒子統一理論

## 1. 研究開始当初の背景

自然界の最も基本的な構成要素である素粒子の物理を支配する基本法則は、素粒子の標準模型と呼ばれるゲージ場の量子論から導かれ、これまでに行われたあらゆる高エネルギー実験・観測の結果を見事に再現できることが確認されている。しかしながら、理論的な観点からみた標準模型は、素粒子の重力相互作用を含んでおらず、また、素粒子の質量や結合定数などの基本的な物理量が自由パラメータとして扱われており、それらの値を予言することができないため、未だ現象論的な模型に留まっていると言わざるを得ない。今後、高エネルギー現象や宇宙の構造をより精密に観測し、自然界の本質に対する我々の理解を深めていくためには、標準模型に存在するこれらの理論的諸問題を解決していくことが不可欠であると考えられる。

質量や結合定数の予言能力の問題を始めとして、標準模型には様々な課題が残されている。これらを個別に解決するような模型は数多く提案されているが、それらを融合しようとした場合に模型同士の整合性が取れない場合が少なくない。従って、標準模型の問題点をできるだけ包括的に扱う立場で研究を行うことも重要である。そのような立場では、これまでに把握されている問題点をすべて扱えるような理論的枠組が必要であるが、その最も有望な候補として超弦理論に基づく素粒子模型があげられる。超弦理論は、標準模型に重力相互作用を矛盾なく導入するための現在ほぼ唯一の理論的な枠組を与えている。

素粒子の超弦模型の現象論は、1980年代から欧米諸国を中心として研究されているが、純粋に理論的な立場で超弦理論を研究している研究者の数と比較しても、少数の研究者がこれに関わっているのみである。その理由の1つとして、摂動論的超弦理論には膨大な数の真空が存在し、その系統的な解析が困難であることがあげられる。しかしながら、標準模型を超える物理を包括的に研究して自然界の本質をより深く理解していくためには、これらの困難を避けて通ることはできないように思われる。

## 2. 研究の目的

素粒子標準模型の検証とそれを超える物理の探索を目的とした物理学史上最大級の実験が、大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を用いて行われており、ヒッグス粒子発見の報告後も様々な角度からデータを蓄積し続けている。このような中で、素粒子標準模型を超える理論の最有力候補である超弦理論及びその有効理論として現れる超重力理論を現象論的に解析することは大変重要である。本研究では、超弦有効理論に動機付けられた素粒子模型の中でも特に有望な、ゲ-

ジ背景上の高次元超対称理論に基づく模型の現象論を可能な限り定量的かつ包括的に解析することにより、最新の実験・観測データとの整合性から模型の検証を行い、素粒子統一理論探索への指針を得ることを目的とする。

## 3. 研究の方法

磁場やウィルソンラインをもつ非自明なゲージ背景上の高次元ゲージ理論に基づく素粒子模型の低エネルギー現象論を可能な限り定量的かつ包括的に解析する。本研究では、標準模型のある特定の問題点のみに注目して模型の一部分を解析する従来の方法ではなく、模型が可能な限り多くの問題を包括的に解決する可能性を追求する。そのため、超弦理論と標準模型を結ぶ中間的役割を担う有効的超重力理論に注目し、その弱重力極限としても現れる高次元超対称非可換ゲージ理論を出発点として、余剰次元方向の磁場やウィルソンラインにより生成されるゲージ群の構造やクォーク・レプトン世代構造の定性的及び定量的解析、超対称性の破れとその伝達機構から帰結される超対称粒子のスペクトラムの同定、そして量子効果も含めた電弱対称性の破れの機構とヒッグス粒子の性質の解析を行い、これらの模型と最新の実験・観測データとの現象論的整合性ならびに超弦理論との理論的整合性を調べる。

## 4. 研究成果

(1) 超弦理論の低エネルギー有効理論としても現れることが知られている10次元超対称非可換ゲージ理論で、その余剰6次元に対し背景磁場が存在する平坦な周期的空間を想定することで次元縮減(コンパクト化)を行い、得られた4次元有効理論にクォークとレプトンが3世代存在する超対称(非超対称)標準模型が含まれるような背景磁場の配位を系統的に探索した。4次元時空で超対称性が残るような磁場の配位に限定した場合は、それに伴って標準模型に現れる世代構造もかなり限定されており、因子化可能な磁束からは先行研究(引用文献[1])で提案された系列の世代構造のみが得られることを明らかにした。一方で、因子化不可能な磁束や超対称性を破る磁場の配位に対しては世代構造に多様性が現れることも確認した。(発表論文[18])

(2) 上記(1)の超対称性を保つ磁場の配位から得られる世代構造は波動関数の局在化に起因する離散フレーバー対称性に支配されていることが見て取れたため、これらの配位を対称性の観点から分類した。一方、非超対称な磁場の配位では、クォークとレプトンで異なる磁束を導入すると大変興味深い世代構造が得られ、そこでは実験で測定されてい

るこれらの素粒子の階層的な質量比と混合角を、階層構造をもたないパラメータの値により実現可能であることを見出した。ここでの世代構造は離散対称性に起因するものとは様相が異なり、連続な可換対称性から現れるものと類似しているが、指数的ではなくガウスの抑制因子で世代間の階層構造が生じていることを明らかにした。(発表論文[17],[14])

(3) 上記(1)で得られた素粒子模型のうち特に超対称性を保つ磁場の配位から得られるものに対して詳細な現象論解析を行った。モジュライと共形アノマリーによる伝達に加えゲージ伝達の寄与も取り入れた一般的な超対称性の破れの項を導入してそれらの量子効果を解析することで、観測されているヒッグス粒子の質量を微調整なしに実現可能なパラメータ領域における、ヒッグス粒子及び超対称粒子の現象論的性質を明らかにした。さらに、現在進行中のLHC実験による、このようなパラメータ領域の検証可能性についても詳細な解析を行った。(発表論文[16],[15],[4])

(4) 上記(1)で対象としていた、背景磁場を持つ高次元  $U(N)$  ゲージ理論に基づく素粒子模型とそれらの解析手法に対して、模型の背後に存在することが期待される超弦理論との整合性を吟味すべく、理論的な視点で主として2つの立場から拡張を行った。まず、これまでの模型が IIB 型超弦理論の D ブレーンにより実現されていると考える立場では、互いに異なる次元をもつ複数の D ブレーン混合系の一部として現れることが想定されるため、そのような系に背景磁場が存在する場合の低エネルギー有効作用を、現象論解析に有用な超場形式で書き表した。さらに、このような系で摂動的もしくは非摂動的に生成され得るゲージボソンやヒッグスボソンの超対称パートナー粒子の質量項の現象論的性質も明らかにした。一方、I 型超弦理論もしくは混成弦理論により実現されていると考える立場では、 $SO(32)$  ゲージ理論に基づく解析も必要となることが考えられるため、これに背景磁場を導入することで、これまでと同様に具体的な素粒子模型の構築とそれらの現象論解析を行った。以上2つの方向性のそれぞれにおいて、理論及び現象論の両面で幾つかの重要な成果が得られた。(発表論文[8],[7],[3],[1])

(5) 高次元超重力理論や超弦理論に基づく素粒子統一模型には、超対称性の自発的破れや余剰次元空間の安定化ならびに初期宇宙のインフレーションを引き起こすためのセクターも内包されていることが望ましい。そのような観点から、上記(1)-(4)の出発点となっているゲージ理論のゲージ群をより大きなものに拡張することで、超対称標準模型

のセクターと超対称性を自発的に破るセクターが同時に現れるような背景磁場の配位の探索を行い、得られた幾つかの具体的な配位に対して、ゲージ伝達により標準模型のセクターへ伝えられる超対称性の破れの性質を明らかにした。一方、IIB 型超弦理論と混成弦理論のそれぞれの有効作用を注意深く解析することで、最新の宇宙観測データと整合するインフレーション機構の実現可能性を示した。(学会発表[1], 発表論文[11],[10])

(6) 上記(1)-(5)とは独立なボトムアップ的アプローチとして、(有効的)4次元超重力理論における超対称性の破れの効果が宇宙論(特に超重力理論に基づく様々なインフレーション模型)に及ぼす影響を明らかにした。さらに、超弦有効理論にも表れる Dirac-Born-Infeld 型超重力作用の一般化とその宇宙論への応用研究も行った。また、(有効的)5次元超重力理論における現実的なインフレーション模型の構築に関する研究を行い、余剰空間パリティが「奇」のベクトル多重項に電荷をもつ物質場の宇宙論的性質を明らかにした。さらに、高次元超対称模型のより精密な取り扱いと詳細な解析に向けた基礎研究もを行い、超対称パートナー同士のボーズ粒子とフェルミ粒子を単一の場で記述する超場形式を用いて一般の6次元超重力作用を書き表すことに成功した。(発表論文[13],[12],[9],[6],[5],[2])

以上(1)-(5)の成果は、様々な観点から素粒子統一理論の有力候補と考えられている高次元超対称非可換ゲージ理論の現象論的側面を照らす大変興味深い結果であると同時に、超弦理論に基づく現実的な素粒子模型の構築に数多くの指針を与えるものと考えている。一方、(6)の成果は(素粒子統一模型の構築で多くの場合に主要な役割を担う)超重力理論という基本的な枠組みに対し、その現象論及び宇宙論的性質に対する理解をより一層深める重要な成果であると考えている。

#### <引用文献>

[1] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hiroshi Ohki, Akane Oikawa and Keigo Sumita, "Phenomenological aspects of 10D SYM theory with magnetized extra dimensions," Nuclear Physics B 870 (2013) 30  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2013.01.014  
[arXiv:1211.4317 [hep-ph]].

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計18件)

すべて査読あり

[1] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hajime Otsuka, Yasufumi Takano and Takuya H. Tatsuishi, "Gauge coupling unification in  $SO(32)$  heterotic string theory with magnetic fluxes," *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2016 (2016) no.5, 053B01

doi:10.1093/ptep/ptw038  
[arXiv:1507.04127 [hep-ph]].

[2] Hiroyuki Abe, Yutaka Sakamura and Yusuke Yamada, "N=1 superfield description of six-dimensional supergravity," *Journal of High Energy Physics* 1510 (2015) 181

doi:10.1007/JHEP10(2015)181  
[arXiv:1507.08435 [hep-th]].

[3] Hiroyuki Abe, Tomoharu Horie and Keigo Sumita, "Superfield description of  $(4+2n)$ -dimensional SYM theories and their mixtures on magnetized tori," *Nuclear Physics B* 900 (2015) 331

doi:10.1016/j.nuclphysb.2015.09.014  
[arXiv:1507.02425 [hep-th]].

[4] Hiroyuki Abe, Junichiro Kawamura and Yuji Omura, "LHC phenomenology of natural MSSM with non-universal gaugino masses at the unification scale," *Journal of High Energy Physics* 1508 (2015) 089

doi:10.1007/JHEP08(2015)089  
[arXiv:1505.03729 [hep-ph]].

[5] Hiroyuki Abe, Yutaka Sakamura and Yusuke Yamada, "Massive vector multiplet inflation with Dirac-Born-Infeld type action," *Physical Review D* 91 (2015) no.12, 125042

doi:10.1103/PhysRevD.91.125042  
[arXiv:1505.02235 [hep-th]].

[6] Hiroyuki Abe, Yutaka Sakamura and Yusuke Yamada, "Matter coupled Dirac-Born-Infeld action in four-dimensional N=1 conformal supergravity," *Physical Review D* 92 (2015) no.2, 025017

doi:10.1103/PhysRevD.92.025017  
[arXiv:1504.01221 [hep-th]].

[7] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Hajime Otsuka and Yasufumi Takano, "Realistic three-generation models from  $SO(32)$  heterotic string theory," *Journal of High Energy Physics* 1509 (2015) 056

doi:10.1007/JHEP09(2015)056  
[arXiv:1503.06770 [hep-th]].

[8] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Yoshiyuki Tatsuta and Shohei Uemura, "D-brane instanton induced mu-terms and their hierarchical structure," *Physical Review D* 92 (2015) no.2, 026001

doi:10.1103/PhysRevD.92.026001  
[arXiv:1502.03582 [hep-ph]].

[9] Hiroyuki Abe, Yutaka Sakamura and Yusuke Yamada, "N=1 superfield description of vector-tensor couplings in six dimensions," *Journal of High Energy Physics* 1504 (2015) 035

doi:10.1007/JHEP04(2015)035  
[arXiv:1501.07642 [hep-th]].

[10] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi and Hajime Otsuka, "Natural inflation with and without modulations in type IIB string theory," *Journal of High Energy Physics* 1504 (2015) 160

doi:10.1007/JHEP04(2015)160  
[arXiv:1411.4768 [hep-th]].

[11] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi and Hajime Otsuka, "Towards natural inflation from weakly coupled heterotic string theory," *Progress of Theoretical and Experimental Physics* 2015 no.6, 063E02

doi:10.1093/ptep/ptv075  
[arXiv:1409.8436[hep-th]].

[12] Hiroyuki Abe, Shuntaro Aoki, Fuminori Hasegawa and Yusuke Yamada, "Illustrating SUSY breaking effects on various inflation mechanisms," *Journal of High Energy Physics* 1501 (2015) 026

doi:10.1007/JHEP01(2015)026  
[arXiv:1408.4875 [hep-th]].

[13] Hiroyuki Abe and Hajime Otsuka, "Moduli inflation in five-dimensional supergravity models," *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 1411 (2014) no.11, 027

doi:10.1088/1475-7516/2014/11/027  
[arXiv:1405.6520 [hep-th]].

[14] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi, Keigo Sumita and Yoshiyuki Tatsuta, "Gaussian Froggatt-Nielsen mechanism on magnetized orbifolds," *Physical Review D* 90 (2014) no.10, 105006

doi:10.1103/PhysRevD.90.105006  
[arXiv:1405.5012 [hep-ph]].

[15] Hiroyuki Abe, Junichiro Kawamura and Keigo Sumita, "The Higgs boson mass and SUSY spectra in 10D SYM theory with

magnetized extra dimensions, ”  
Nuclear Physics B 888 (2014) 194  
doi:10.1016/j.nuclphysb.2014.09.016  
[arXiv:1405.3754 [hep-ph]].

[16] Hiroyuki Abe and Junichiro Kawamura,  
“The 126 GeV Higgs boson mass and  
naturalness in (deflected) mirage  
mediation, ” Journal of High Energy  
Physics 1407 (2014) 077  
doi:10.1007/JHEP07(2014)077  
[arXiv:1405.0779 [hep-ph]].

[17] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi,  
Hiroschi Ohki, Keigo Sumita and Yoshiyuki  
Tatsuta, “Non-Abelian discrete flavor  
symmetries of 10D SYM theory with  
magnetized extra dimensions, ” Journal of  
High Energy Physics 1406 (2014) 017  
doi:10.1007/JHEP06(2014)017  
[arXiv:1404.0137 [hep-th]].

[18] Hiroyuki Abe, Tatsuo Kobayashi,  
Hiroschi Ohki, Keigo Sumita and Yoshiyuki  
Tatsuta, “Flavor landscape of 10D SYM  
theory with magnetized extra  
dimensions, ” Journal of High Energy  
Physics 1404 (2014) 007  
doi:10.1007/JHEP04(2014)007  
[arXiv:1307.1831 [hep-th]].

〔学会発表〕(計 20 件)

[1] Hiroyuki Abe (登壇者), Keigo Sumita  
and Tokihiro Watanabe, “Aspects of  
dynamical supersymmetry breaking and its  
mediation on magnetized tori, ” The 23rd  
International Conference on Supersymmetry  
and Unification of Fundamental  
Interactions, 2015 年 8 月 23 日 ~ 2015 年 8  
月 29 日, Granlibakken Conference Center  
and Lodge, Tahoe, California, USA

[2] 安倍 博之, “Phenomenological  
aspects of SYM theories on magnetized  
tori, ” Workshop on geometry, extra  
dimensions and string phenomenology in  
Miyazaki, 2014 年 11 月 4 日 ~ 2014 年 11 月  
6 日, ANA ホリデー・イン リゾート 宮崎

[3] Hiroyuki Abe, “Effective theories of  
magnetized D-branes and their  
phenomenological aspects, ” 21st  
International Conference on Supersymmetry  
and Unification of Fundamental  
Interactions, 2013 年 08 月 26 日 ~ 2013 年  
08 月 31 日, International Center for  
Theoretical Physics, Trieste, Italy

その他、研究協力者による学会発表 17 件

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

安倍 博之 (ABE, Hiroyuki)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号 : 10402760

### (2) 研究協力者

青木 俊太郎 (AOKI, Shuntaro)  
上村 尚平 (UEMURA, Shohei)  
大木 洋 (OHKI, Hiroshi)  
大塚 啓 (OTSUKA, Hajime)  
大村 雄司 (OMURA, Yuji)  
川村 淳一郎 (KAWAMURA, Junichiro)  
小林 達夫 (KOBAYASHI, Tatsuo)  
阪村 豊 (SAKAMURA, Yutaka)  
角田 慶吾 (SUMITA, Keigo)  
高野 恭史 (TAKANO, Yasufumi)  
立石 卓也 (TATSUISHI, Takuya H.)  
龍田 佳幸 (TATSUTA, Yoshiyuki)  
長谷川 史憲 (HASEGAWA, Fuminori)  
堀江 智晴 (HORIE, Tomoharu)  
山田 悠介 (YAMADA, Yusuke)  
渡部 宙紘 (WATANABE, Tokihiro)