



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Flavor structures in nonfactorizable torus and orbifolds with background magnetic fluxes
Author(s)	高田, 翔平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16747号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16747
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99592
Type	doctoral thesis
File Information	Shohei_Takada_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 審 査 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士 (理 学) 氏 名 高田 翔平

審査担当者	主査	教 授	小林 達夫
	副査	教 授	鈴木 久男
	副査	教 授	瀬戸 治
	副査	講 師	末廣 一彦

学 位 論 文 題 名

Flavor structures in nonfactorizable torus and orbifolds with background magnetic fluxes
(背景磁場入りの分解不可能なトーラスおよびオービフォールドコンパクト化における
フレーバー構造)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

現在素粒子として発見されている粒子はクォークとレプトンに大別される。さらにそれら質量を除いて、電荷などの性質が同じ粒子が3種類ずつ存在し、3世代構造と呼ばれている。それらの質量比はけた違いに離れている。また弱い相互作用を通し、混合を起こし、CPの破れも現れる。このような構造をフレーバー構造とよぶ。これらのクォーク・レプトンの相互作用の枠組みを記述するのが素粒子標準理論である。この理論は多くの実験による検証がなれて、確立した理論となっている。標準理論の枠組みでは、クォーク・レプトンの質量はヒッグス場の真空期待値との湯川結合によって与えられる。湯川結合の比があるクォークでは、1程度で、他のクォークにおいては、1/100, あるいは、1/100000 程度にもなっている。また、粒子間の混合やCPの破れはこの湯川結合の行列の構造で決まる。このように湯川結合がフレーバー構造を決めているが、標準理論の枠組みでは、単に理論のパラメータというだけで、理論自体で決定することはできない。このようにどうして3世代なのか、どうして上述のようなフレーバー構造なのかは、現在の素粒子物理学においても重要な謎である。さらには、重力理論の量子論としての取り扱いは、標準理論の枠組みを超えるものである。その他にも多くの謎が素粒子論・宇宙論には現在でも存在する。このように、素粒子標準理論を超える何らかの理論が存在すると多くの研究者が期待している。

超弦理論は、重力理論を含むすべての相互作用を統一的に記述し、クォーク・レプトンやヒッグス粒子などを統一的に記述する枠組みを与える。したがって、超弦理論は標準理論を超えた素粒子物理学を記述するより基本的な理論のもっとも有力な候補となっている。超弦理論は、我々が認識している4次元時空に加えて、6次元コンパクト空間の存在を予言する。もちろん、現在のところ、そのような余剰次元空間の存在は発見されていないので、極めて小さな大きさであると思われる。しかし、ひものスケール程度かそれ以上のスケールで広がっている。この6次元コンパクト空間は超弦理論においては、素粒子の様々な性質導くのに重要である。1種類のひもでも、コンパクト空間に異なる運動量や巻き付き数をもつ状態が存在し、それぞれのモードが別々の素粒子に対応する。したがって、素粒子の種類やそれぞれの性質は、6次元コンパクト空間の幾何に由来する。たとえば、3世代という世代数は6次元コンパクト空間のトポロジーなどから決定される。

これまで実際に様々なコンパクト空間が提案され、そのコンパクト空間上の弦理論が研究されてきた。代表的なコンパクト空間は、カラビーヤウ多様体である。しかしながら、上述のようなフレーバー構造の詳細に至る解析をするためには、一般のカラビーヤウ多様体上では現在の知識ではまだ不足していることが多い。一方で、トーラスコンパクト化は幾何学的構造も簡単で、ト

ーラス上での超弦理論を解析的に解くことができる。単純なトーラスコンパクト化から導かれる4次元理論は、カイラルな理論となっていない。標準理論はカイラルな理論であるので、単純なトーラスコンパクト化は、標準理論を導出することが不可能となる。しかし、単純なトーラスコンパクト化に背景磁場を導入すると4次元カイラルな理論をえることができる。あるいは、トーラスを離散的な対称性で割り込んだコンパクト空間がオービフォールドであるが、そのオービフォールドコンパクト化でも4次元カイラル理論は得られる。このようなコンパクト化により導出されるフレーバー構造を探索することが、本論文の目的である。

先行研究においては、6次元空間を3つの2次元トーラスやオービフォールドの積となる場合の解析が行われている。その内容は本論文の第2章においてレビューされている。このことを踏まえ、本論文のテーマは、このように2次元ずつに分けられない場合のトーラスやオービフォールドの場合の解析である。4次元の素粒子論の性質を探索するためには、コンパクト空間上の波動関数が必須であるので、第3章において、上のように分解することができな6次元のトーラスに背景磁場がある場合の波動関数の解析がなされている。クォーク・レプトンはスピナー場であり、コンパクト空間内において様々なスピンの状態をもつので、そのすべての状態において網羅的に波動関数の導出が行われている。さらに幾何学的対称性であるモジュラーの下での波動関数の振る舞いが系統的に調べられていて、この対称性は4次元の理論でのフレーバー対称性として振舞い、この対称性によって、4次元理論がコントロールされることを示している。この対称性は従来の場の理論の対称性とは異なり、湯川結合も非自明な変換をする対称性である。次に第4章においては、第3章での解析結果をもとに、トーラスを離散群 Z_7, Z_{12} で割ることで、オービフォールドコンパクト空間上の理論を議論している。 Z_7 オービフォールド上では3世代が得られないと結論づけている。これはネガティブな結果ではあるが、様々なコンパクト空間の候補があるなかで、no-go 定理を確立するのも重要な結果である。一方で、 Z_{12} オービフォールド上では様々な3世代模型が実現することを示している。このオービフォールド上においても、様々なスピナー場の波動関数を網羅的に解析している。第5章においては、湯川結合の計算を行い、また上述のフレーバー対称性に関して、系統的に調べている。

このように本論文は、特定のコンパクト空間上の超弦理論において、世代数や湯川結合等を系統的に調べた研究となっている。大きな目標であるフレーバー構造の解明には、まだ到達していないが、その解明へ向けた重要な一歩であり、今後の超弦理論のコンパクト化から素粒子のフレーバー構造の解明に対する貢献するものである。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。