



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	The flavor structures on magnetized orbifold models and 4D modular symmetric models [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	菊地, 涉太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15741号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92280
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shota_Kikuchi_review.pdf, 審査の要旨



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 菊地 渉太

審査担当者 主査 教授 小林 達夫
副査 教授 鈴木 久男
副査 准教授 瀬戸 治
副査 講師 末廣 一彦

学位論文題名

The flavor structures on magnetized orbifold models and 4D modular symmetric models
(磁化オービフォルドモデルと4次元モジュラー対称モデル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)

現在知られている素粒子は、クォークとレプトンに大別され、それぞれが電荷などの量子数が同じ値をもつ粒子の3世代構造をなしている。それぞれの世代間の質量の値は、桁が大きく異なる。さらに、クォークセクターでの混合角は小さいのに比べ、レプトンセクターでは混合角は大きいことが測定されている。このような構造はフレーバー構造と呼ばれる。素粒子標準模型は、様々な実験で検証され、確立した理論となっている。素粒子標準模型においては、ヒッグス場の真空期待値とそれぞれの粒子との湯川結合により、クォーク・レプトンの質量と混合角は与えられるが、標準模型の枠内では、湯川結合の強さがどうして、このような質量の階層性や混合角の構造などのフレーバー構造を与えるかは、謎である。さらには、この湯川結合によりCPの破れも引き起こされ、その起源も謎である。したがって、標準模型を超えるより基本的な理論の存在が示唆され、その理論がこのようなフレーバー構造の起源を説明するであろうと期待される。

超弦理論は、知られている素粒子と重力を含めた素粒子間に働くすべての相互作用を統一的に記述する理論的枠組みを与え、素粒子の理論の基本理論の有力な候補をされている。超弦理論は、我々の4次元時空に加え、6次元コンパクト空間の存在を予言する。その6次元コンパクト空間は、現在の実験では検出できないほど小さなサイズの空間であると想像されるが、この空間内で、弦自体は巻き付き数や運動量など様々な状態をとることが可能で、その性質が個々の素粒子の性質を生み出すと考えられている。つまり、コンパクト空間の幾何学的構造が、素粒子の低エネルギー有効理論に反映されることになる。特に最近では、コンパクト空間の幾何学的対称性であるモジュラー対称性がフレーバー構造の起源に関連があるのではないかと期待され、コンパクト空間上の超弦理論からどのようなフレーバー構造が導かれるのかというトップダウンアプローチと実験値を再現するためには、どのような構造が背後に必要ではないかということを探るトライ&エラーで場の理論のモデルを構築する立場のボトムアップアプローチの双方において、フレーバー構造の起源としてのモジュラー対称性が盛んに研究されている。

本論文においては、モジュラー対称性を軸に、トップダウンアプローチとボトムアップアプローチの双方のアプローチを相補的に研究し、フレーバー構造の起源の探求がなされている。

まず第二章においては、コンパクト化の1つである背景磁場をもつオービフォルドコンパクト化が議論されている。超弦理論などの高次元理論から標準模型を導出する際に、重要なことの1つは、4次元カイラル理論の導出である。標準模型はカイラルな理論であるが、高次元理論から導出される4次元理論は必ずしもカイラルな理論ではない。4次元カイラルな理論を導出するコンパクト化として、本論文では背景磁場をもつオービフォルドコンパクト空間を取り上げている。4次元カイラルな理論を導くコンパクト化は、カラビーヤウ多様体などが知られているが、カラ

ビーヤウ多様体は幾何学的詳細も知られていない部分が多く、湯川結合を定量的に研究することは難しい。一方で、背景磁場をもつオービフォルド上では、波動関数が解析的に解け、定量的に様々な性質が解析可能である。また、背景磁場をもつオービフォルド上では、磁場が量子化され、その大きさに応じゼロモード数が決まり、それがクォーク・レプトンなどの世代数へ対応する。また、オービフォルドの取り方により、様々な3世代模型を実現することができる。本論文では、そのような様々な3世代を実現するコンパクト化に関し、3世代の波動関数がモジュラー変換のもとでどう振舞うかを系統的に調べている。この変換性が4次元低エネルギー有効理論のフレーバー構造を支配するフレーバー対称性となる。湯川結合も波動関数の重なり積分として計算され、コンパクト空間の大きさと形を表すモジュライの関数、特に数学的にモジュラー形式と呼ばれているもので与えられることを示し、その湯川結合により現実的なクォーク・レプトンの質量や混合角の再現を行っている。

一方で、第三章においては、第二章の結果を踏まえ、4次元低エネルギー有効理論はモジュラー群の特定の有限部分群の対称性をもち、3世代のクォーク・レプトンは、その下での特定の表現に対応し、また湯川結合もその群に対応するモジュラー形式であると仮定したフレーバー模型の構築を行い、クォーク・レプトンの現実的な質量や混合角の導出の道筋を示している。取り扱われているモジュラー有限群は、 Γ_6 と $A_4 \times A_4 \times A_4$ である。この実現にあたり、モジュライパラメータが特別な値で残る対称性の重要性が示されている。また、CP位相についても研究され、CP位相と質量の階層性を導出するためには、複数のモジュライパラメータの存在が重要であることが示されている。

第三章において重要な役割をしたのは、モジュラー形式であった。特に、質量の階層構造とCP位相を同時に導出するためには、複数のモジュライを含むモジュラー形式が重要な役割を果たす。6次元のコンパクト空間である6次元トーラスでは、 $Sp(6, Z)$ の対称性ももつが、そのモジュラー形式の詳細はすべて分かっている訳ではない。2次元の $Sp(2, Z)$ のモジュラー形式はある程度調べられているので、その直積のモジュラー形式は、すぐわかることであるが、直積が書けない $Sp(6, Z)$ のモジュラー形式の知識は不十分である。第四章においては、その $Sp(6, Z)$ のモジュラー形式を背景磁場をもつトーラス上の波動関数から導出する手法を提案し、具体的に様々なモジュラー形式の導出に成功している。そのうちの1つである $\Delta(96)$ の4重被覆群のモジュラー形式を利用し、第三章での解析をその有限モジュラー群に拡張し、クォークの質量や混合角、そしてCP位相の再現を行った。

このように本論文は、超弦理論のコンパクト化から現実的なクォーク・レプトンの質量、混合角、CP位相を導出する上での重要な研究となっている。このような相補的な研究により、今後フレーバー構造のコンパクト空間の幾何学的由来の研究が深まるであろう。

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。