



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Flavor structures from string compactification and moduli stabilization [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	那須, 海渡
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第16248号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95322
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kaito_Nasu_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（理 学） 氏 名 那須 海渡

学 位 論 文 題 名

Flavor structures from string compactification and moduli stabilization
(超弦理論のコンパクト化およびモジュライ安定化から導かれるフレーバー構造)

2012 年、ヒッグス粒子の発見により標準模型は電弱スケールにおける素粒子理論として確立された。しかしながら、クォーク・レプトンのフレーバー構造の起源は不明なままである。3 世代構造、質量階層性、Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 行列 や Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata 行列の特徴的なパターン、CP 対称性の破れ等のフレーバー構造は、標準模型を超える基礎理論から説明されると期待される。申請者は超弦理論を基礎に余剰次元空間のコンパクト化から上記のフレーバー構造がどのような条件下で導出可能であるか解明すべく研究を行った。本研究は主に 3 つのパートからなるため、以下で各々の要旨を述べる。

第一のパートでは、超弦理論の有効理論の一つである 10 次元超対称 Yang-Mills 理論において Yang-Mills 2 形式の背景磁場をもつトロイダルコンパクト化模型を研究した。先行研究では、6 次元余剰次元空間が 3 つの 2 次元磁化トーラス T^2 やオービフォールド T^2/Z_N に分割可能であると仮定し、設定を単純化することでフレーバー構造の再現模型が盛んに研究されてきた。この場合、3 つの内 1 つの T^2 又は T^2/Z_N のみがフレーバー構造を本質的に決定する。しかし、現実の余剰次元空間は 6 次元であり、それが 3 つの 2 次元空間に分割されているとは限らない。模型の一般化が望まれる一方で、2 次元への分割可能性の仮定を外したトロイダルコンパクト化は、その複雑さ故に、理解が途上にあった。例えば、背景磁場をもつ T^4/Z_N や T^6/Z_N 模型に至っては 3 世代構造再現のために必要な条件すら不明であった。

そこで本研究では、背景磁場をもつ T^4/Z_N 模型において 3 世代構造を再現するための条件解明を主目的として、次の方法で解析を行った。

4 次元時空の低エネルギー有効理論におけるフェルミオンの世代数は、余剰次元空間上での対応するゼロモードの縮退度と一致する。そこで、 T^4/Z_N 上のゼロモード解の構成を考え、その縮退度を解析した。背景磁場をもつ T^4/Z_N 上のゼロモード波動関数は、同じ磁場をもつ T^4 上のゼロモード波動関数の適切な線形結合により与えられる。 T^4/Z_N を定義する Z_N 回転を対角化する基底がそれに対応する。 T^4 上の波動関数解は Riemann のテータ関数により具体的に書き下せるため、 Z_N 回転に対する T^4 上のゼロモード波動関数の変換性を解析的に導き、 T^4/Z_N 上の縮退度を系統的に求めた。特に、 $N \geq 3$ の場合は、Riemann テータ関数の $Sp(4, \mathbb{Z})$ モジュラー変換性を適用した。

結果、 T^4/Z_N 模型において世代数は次の 4 つの情報に依存して定まることが分かった：

- (i). 背景磁場を特徴づける 2×2 整数行列 $\mathbf{N}$ の行列式,
- (ii). 行列 $\mathbf{N}$ の各要素の mod N 値,
- (iii). Z_N 回転に対するゼロモードの Z_N 電荷,
- (iv). Scherk-Schwarz 位相.

3 世代構造の再現に必要な条件は情報 (i)-(iv) により指定され、それを具体的に示した。ただし、 $N \geq 3$ の T^4/Z_N 模型では、Scherk-Schwarz 位相が 0 の場合を考慮した。 T^4/Z_2 模型では、非零の Scherk-Schwarz 位相を考慮した。以上の結果は、今後背景磁場をもつ T^4/Z_N や T^6/Z_N 模型に基づき質量階層性や混合角も同時再現可能な現実的 3 世代模型構築への基盤となる。

第二のパートでは、輻射補正によるトロイダルコンパクト空間の複素構造モジュラス安定化への影響を研究した。近年、モジュラーフレーバー模型と呼ばれる $SL(2, \mathbb{Z})$ 等のモジュラー対称性を指導原理として、フレーバー構造を再現する模型が注目を集めている。モジュラー対称性の起

源は、余剰次元のトーラスコンパクト化等である。この模型では湯川結合定数はモジュラー形式となる。モジュラー形式はトーラスの形を決める複素構造モジュラス τ の正則関数であるため τ の真空期待値がフレーバー構造と密接に関係する。先行研究により、 Z_3 固定点 $\tau = e^{2\pi i/3}$ から僅かにずれた τ の値が質量階層性や混合角の再現に好まれると分かった。問題は τ の値を都合よく「手で」決めている点にある。本来は物理的機構により τ の値は固定されるべきである。そのような機構の代表例が 3 形式フラックスコンパクト化であるが、先行研究の結果では、 $\tau = e^{2\pi i/3}$ 直上への安定化が統計的に好まれた。故に、 τ を固定点からずらす機構を提案する必要がある。

本研究では、固定点 $\tau = e^{2\pi i/3}$ から真空期待値を僅かにずらす要因として τ と物質場の結合から生じる輻射補正を想定し、モジュラーフレーバー模型において好まれたずれをどのような条件下で導出可能であるか解析した。

設定として、モジュラー形式を物質場との結合項に導入し、 $SL(2, \mathbb{Z})$ 対称性を尊重した超対称模型を考えた。ソフトな超対称性の破れを仮定することで、ボソンとフェルミオンの積分による輻射補正が完全には相殺せず、1 ループ近似で、 τ に関する Coleman-Weinberg ポテンシャルが得られる。特にモジュラー形式として A_4 のウェイト 8 の singlet 表現 $\mathbf{1}, \mathbf{1}', \mathbf{1}''$ を選択し、各場合でポテンシャル解析を行った。

結果、 $\mathbf{1}$ 表現の場合は、1 ループ輻射補正は τ の固定点からのずれを説明できなかった。一方で、 $\mathbf{1}'$ 表現の場合は τ と結合する物質場の種類数が、超対称性の破れのスケール等に依存した特定の臨界値を超えるならば、ずれが生じることが分かった。 $\mathbf{1}''$ 表現の場合は、 $SL(2, \mathbb{Z})$ 対称性が自発的に破れた条件下で、ずれが生成されることを明らかにした。従来都合よく仮定されていたモジュラスの真空期待値に物理的な理由を与え、その実現条件を明確にした点で本研究は意義深い。

第三のパートでは、モジュライ安定化による CP の自発的破れを研究した。モジュラーフレーバー模型において、CP 対称性を破る源は複素構造モジュライの真空期待値である。多くの模型においては、CP を破る点にモジュライの真空期待値をやはり「手で」仮定していた。この不満足な点を解決すべく、モジュライ安定化による CP の破れの実現可能性が研究されてきた。しかしながら、自発的な CP の破れの実現は困難なことが経験的に明らかとなっていた。例えば、CP 不変な 3 形式フラックスコンパクト化が $T^6/Z_2, T^6/(Z_2 \times Z_2')$ を基に研究されたが、超対称な真空は CP を保存するか、又は、CP を保存する真空と破る真空がポテンシャルの平坦方向で縮退して現れるかのいずれかであった。

そこで本研究では、フラックスコンパクト化により生じた CP を保つ真空と CP を破る真空の縮退を解くような寄与を考えることで、CP の自発的な破れの実現を試みた。縮退を解く源として、モジュライと物質場の CP 不変かつモジュラー不変な結合を 4 次元 $\mathcal{N} = 1$ 超重力理論の枠組みで考えた。例えば、隠れたセクターのゲージノ凝縮によってそのような寄与が現れる。

結果、量子化された 3 形式フラックスの成分が特定の値をとれば、超対称 Minkowski 真空で CP が自発的に破れ得ることが分かった。その破れの背後には、スカラーポテンシャルのモジュラー対称性が 3 形式フラックスの影響で一部破れたことが関係していることを見出した。さらに、KKLT 的なシナリオに基づいてケーラーモジュラスの安定化も実現した。本研究は従来比較的困難であったモジュライ安定化による自発的な CP の破れの実現に成功した。さらに、モジュラー対称性の部分的な破れが CP の破れを再現するために好まれる条件であることを明らかにした。

最後に、本研究は三世代構造、質量階層性と混合角、CP 対称性の破れといったフレーバー構造を超弦理論のコンパクト化に基づき各々再現を試み、再現条件を上述のトロイダルコンパクト化の仮定の下で明らかにした。