



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_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 那須 海渡

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

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)

博士学位論文審査等の結果について (報告)

標準模型は、 100 GeV 近辺までの低エネルギースケールの素粒子現象を記述する理論である。これまで多くの実験による検証がなされ、確固たる理論となった。しかし、素粒子物理学には、いまだに解明されていない多くの謎が存在する。現在知られている物質の構成要素をなす基本的な素粒子は、クォークとレプトンに大別される。そのクォーク・レプトンにおいては、電荷などの量子数が同じ素粒子がそれぞれ3種類あり、それらは3世代構造と呼ばれている。クォーク・レプトンのこの世代間では、質量が桁違いに異なる。最大の質量比は、 $1:100,000$ にものぼる。また世代間混合も起こっているが、その混合の大きさがレプトンセクターではかなり大きく、クォークセクターでは小さい。それらの世代の質量や混合の構造をフレーバー構造とよぶ。標準模型の枠組みでは、クォーク・レプトンの質量はヒッグス場の真空期待値に起因し、ヒッグス場とクォーク・レプトンとの湯川結合の強さにより質量の大きさや混合の度合いが決定される。しかし、なぜ上のようなフレーバー構造を実現するように湯川結合の値が、世代間で桁違いの大きさとなっているのか、レプトンセクターとクォークセクターの混合はなぜ構造が異なるのは大きな謎である。さらには、この湯川結合はCPの破れを引き起こす。その他、量子重力の定式化はどうすればよいか、様々な宇宙の観測が強く示唆する暗黒物質の起源は何なのか、宇宙初期のインフレーションの起源は何なのかなどなど、多くの解明されていない謎が素粒子物理学において存在するのが現状である。したがって、標準模型を超えるようなより基本的な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のモードを統一的に記述する枠組みを与える。したがって、超弦理論は標準模型を超えた素粒子物理学より基本的な理論の有力な候補である。超弦理論は、我々の知っている4次元時空に加えて、6次元コンパクト空間の存在を预言する。もちろん、現在のところそのような余剰次元空間は見つかっていない。しかし、超弦理論において、この6次元コンパクト空間は素粒子物理学の様々な性質を導出する上で極めて重要である。弦はコンパクト空間中で異なる運動量や巻き付きなど様々な状態をなす。それが1つの弦でも多様な粒子のモードに対応するようになり、個々の素粒子の量子数や結合、対称性のもとでの変換性などが決定されるからである。

これまで様々なコンパクト空間が提案され、研究されてきた。カラビーヤウ多様体はコンパクト空間の代表的な空間である。しかし、上述のようなフレーバー構造の謎の解明をするには具体的に湯川結合の計算が可能であることが必要条件である。一般のカラビーヤウ多様体上ではいまだに湯川結合の具体的な計算は難しいのが現状である。一方トーラスコンパクト化は幾何学的構造が極めて単純なコンパクト空間である。しかし、トーラスコンパクト化のみでは、4次元カイ

ラル理論の構造を導出することができない。標準模型はカイラルな理論であり、単純なトーラスコンパクト化のみでは、標準模型を再現することができない。しかし、トーラスコンパクト空間上の背景磁場を導入したり、トーラスを離散回転で割り込んでオービフォールドにすることで、カイラル理論を実現することができる。さらには、背景磁場の大きさに従って、同じ量子数をもつモードが縮退して現れ、世代数の再現を試みることができる。このように背景磁場をもつトーラスやオービフォールドは比較的簡単なコンパクト化でありながら、解析的に解くことができ、これまで様々な研究がなされてきた興味深いコンパクト化である。さらには、このコンパクト空間には、モジュラー対称性という幾何学的対称性があり、モジュラー対称をもつ4次元有効理論が最近盛んに研究されている。特に、そのモジュラー対称をフレーバー構造の謎の解明に役立てようと盛んに研究されている。このようにこのコンパクト空間は興味深いコンパクト空間であり、さらを進めることが重要である。

本論文は、背景磁場をもつオービフォールド空間上でのフレーバー構造の解析を進める一方で、モジュラー対称を考慮し、コンパクト空間の幾何学的パラメータの決定とその素粒子物理学的意味の考察を目的としたものである。

まず第2章では、6次元空間を4次元と2次元と直積に分解し、4次元空間を一般的背景磁場をもつオービフォールド空間とした場合に、3世代の再現の可能性を系統的に解析したものである。これまで、6次元空間を2次元空間3つの直積空間として同様の解析が行われてきたが、今回は、4次元が2次元空間2つの直積と分解できない場合を調べたものであり、新たな3次元空間の可能性を示す研究である。

上述のような背景磁場をもつトーラスやオービフォールド上で、湯川結合を計算するとモジュラー形式として湯川結合が与えられ、それはコンパクト空間の幾何学的特徴を示すモジュライの関数である。そのようにモジュラー形式として、湯川結合が与えられる4次元模型に関しては、最近盛んに研究がなされている。その研究によるとモジュライの特定の点 i , ω からわずかにずれた値において、現実的な湯川結合が与えられることが知られている。モジュライは本来はダイナミカルな場であり、その値は何からの機構でポテンシャルが生成され、そのポテンシャルミニマムとして決定されるものだ。本論文の第3、4章はそのモジュライの値の決定の研究である。モジュライが値が、 ω の値をとるようなポテンシャルが先行研究で示されているので、第3章においては、量子補正の効果により、わずかにその値をずらし、フレーバー構造の解明に好ましい値をえる可能性について調べられている。一方、湯川結合はCPの破れの起源となるが、モジュラー対称性のある理論において、モジュライ固定により、CPを破ることは困難であることが知られている。第4章では、CPの破れを引き起こすようなシナリオの提案をしている。この結果は非常に興味深く、今後、そのCPの破れが実際の素粒子物理学のCPを破れの解明につながることを期待する。

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けるフレーバー構造の解明をおこなう一方で、素粒子の具体的な質量、混合、CPの破れに係わる値を決定する上で重要な研究となっている。今後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。