

氏 名	たか はし けい じ ろ う 高 橋 圭 次 郎
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 3238 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	String Orbifolds on Non-Factorizable Tori (一般的なトーラス上でのオービフォルドを用いた弦模型)
論文調査委員	(主 査) 准教授 小 林 達 夫 教 授 川 合 光 教 授 畑 浩 之

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、超弦理論のコンパクト化について新たなオービフォルドを提唱し、素粒子現象論を視野に入れつつ、IIA型とヘテロ型超弦理論の両方の理論での応用について研究を行ったものである。

重力を含む統一理論の候補である超弦理論は、4次元時空以外に6次元空間の存在を予言する。この6次元空間は、コンパクトな空間となっていると思われているが、その幾何学的構造によって低エネルギー有効理論に現れる様々な状態のスペクトルやそれらの相互作用が決定される。この4次元場の理論として標準模型を再現することは、重要な課題である。そのためにはコンパクト空間の幾何学についての理解が重要である。様々なコンパクト空間のうち、オービフォルドは興味深い空間である。オービフォルド上では、弦の運動方程式が解けるので、低エネルギースペクトルの解析やそれらの結合等の計算が原理的に可能である。また、幾何学的構造がより複雑な多様体のある極限ととらえることも可能である。さらに最近では、オービフォルド上のヘテロ型やII型超弦理論から現実的なスペクトルをもつ模型が構築されている。この論文では、そのような6次元オービフォルドを分類し、新たなタイプのオービフォルド上での超弦理論の構築を研究している。

6次元オービフォルドは、6次元トーラスを離散回転で割った空間であり、6次元トーラス自体は、6次元ユークリッド空間を6次元格子で割ることで構成される。この論文では6次元格子としてLie格子を考え、その離散対称性をWeyl群とouter automorphismとして理解し、この手続きで構成できる6次元オービフォルドを完全に分類した。この結果 $Z_n \times Z_m$ オービフォルドについて、多くの新しいオービフォルドを見つけ、それらのオービフォルドのEuler数、Hodge数などの幾何学的性質をまとめている。更に新しくえられたオービフォルド上の弦理論を研究している。

新たに構成されたオービフォルド上のヘテロ型弦理論では、すでに得られている弦模型に比べ、世代数が小さくなっているという特徴があり、局在する状態間の相互作用の選択則についても変化が見られることを示している。特にE6格子上の $Z_3 \times Z_3$ オービフォルド上で、具体的にSO(10)とSU(5)の群のGUTのような3世代の模型を構成している。興味深い特徴としてはこのオービフォルドでは世代混合的な相互作用が存在することが挙げられている。

また、IIA型超弦理論のオリエンティフォルドへの応用を議論し、その一般的な構成方法を与えている。この手続きによって任意の6次元トーラス上で、IIA, B型理論でのオリエンティフォルドが分類できる。このオリエンティフォルドでD-braneの系が安定であるためにはRR tadpoleが相殺される必要があるため、Klein bottle, AnnulusとMöius stripの1-loop分配関数をトーラスおよびオービフォルド上で計算し、特にゼロモードの寄与を整理することでそれがLefschetzの固定点定理に直接繋がることを示してある。これの結果はよく知られたものであるが、tadpoleの計算から直接このような形式は初めて与えられたと考えられる。さらにnon-factorizableオービフォルド上でのオリエンティフォルドの構成法についてもまとめてあり、RR tadpoleの相殺についての計算が行われている。 $Z_2 \times Z_2$ オービフォルド上のオリエンティフォルドでは、方向によってO-planeの枚数が異なる模型が得られており、factorizableとは異なった性質が見つかった。これらの構成は数多くの模型を与えるため、一部の場について開弦のスペクトルも与えてある。

## 論文審査の結果の要旨

超弦理論は重力相互作用を含む統一理論の有力な候補であり、その真空として標準模型を導出することが期待されている。超弦理論は4次元時空以外に6次元コンパクト空間の存在を予言し、その幾何学的構造により低エネルギー有効理論の性質が決定される。そのため、どのような真空（コンパクト空間）が標準模型の構造を再現し、それらが現象論的な要請を満たすことができるかを研究することは、非常に重要な課題である。

本論文は、オービフォルドコンパクト化による試みについて新しい手段を提供し、ヘテロ型とIIA型超弦理論に対する応用を研究している。オービフォルド上では、弦の運動方程式が解けるので、スペクトルや様々な結合の計算が原理的に可能であり、興味深いコンパクト空間の1つである。実際にこれまで、かなり現実的なスペクトルの再現がヘテロ型とII型超弦理論において研究されてきた。そのオービフォルドの幾何学的性質について、この論文ではLie格子を使った一般的な構成法を示し、その構成法に従い、6次元オービフォルドを完全に分類している。特に、 $Z_n \times Z_m$  オービフォルドについてはこれまで知られていなかったオービフォルドが構成されている。

更に、これらの新しく構成されたオービフォルド上でのヘテロ型弦理論の具体的な模型構築を議論している。具体的に得られた模型自体は、かなり現実的模型というわけではないが、簡単に3世代を導出できる幾何学的構造になっていることは興味深い。更に、その3世代構造において、質量生成に関係する3点相互作用でも、世代混合を起こす可能性のある新しい型の相互作用選択則である点は重要である。

一方でIIA型超弦理論への応用も成され、一般的な形状の6次元トーラス、さらにオービフォルド上でのオリエンティフォルドの構成法を与えている。つまり、これまでのコンパクト空間上での模型構築ではその各々の2次元空間の複素構造は二種類に限られるが、6次元空間ではもっと多様な構造を取ることの具体例を示しそれらを分類する方法を与えている。また、理論の無矛盾性から要求されるRR tadpoleの詳細な計算を行い、Lefschetz固定点定理の形への導出をしている。このRR tadpole相殺の結果はよく知られたものだが、この形式は直観的な解析を可能とし今後の応用について有益な手段を提供することが期待できる。 $Z_2 \times Z_2$  オービフォルド上でのオリエンティフォルドの構成では、O-planeの数が方向に依存するというこれまでにないオリエンティフォルドを得ている。これらのコンパクト空間でのD-ブレーンの配位やフラックスなどの背景場には相当な自由度が残されており、IIA型超弦理論の様々な方向で利用可能な手法を提供している。

以上のように、申請者はこれまでに知られていなかったオービフォルド空間を提唱し、超弦理論での様々な応用まで含めた幅広い議論を行った。これにより、本論文は博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、論文とそれに関係した事項について試問を行った結果、合格と認めた。