

## 論文審査の結果の要旨

氏名：杉 田 和 優

博士の専攻分野の名称：博士（理学）

論文題名：Multiple-brane Solutions and Singular Gauge Transformations in Open String Field Theory  
(開弦の場の理論における多重ブレーン解と特異なゲージ変換)

審査委員：（主査） 教授 二 瓶 武 史

（副査） 教授 出 口 真 一 助教 三 輪 光 嗣

元教授 仲 滋 文

素粒子の標準模型等の場の量子論は、力学変数は局所的な存在であるという考えに基づき構築されている。このため、空間の微小領域に無限に多くの自由度が存在し、物理量の計算過程で発散が生じる。重力以外の相互作用ではこうした発散をうまく処理することができるが、重力相互作用に関しては、発散は深刻であり、通常の場合の量子論を用いた量子化は困難となる。点状の粒子ではなく1次元的な広がりを持つ弦を力学変数とする弦理論は、重力の量子化を可能とする理論の候補として期待されている。しかしながら弦理論には、摂動論に基づいた定式化しか確立していないという課題が存在する。異なる真空の間で起こる状態の遷移のように、摂動論では解析できない現象を扱うためには、摂動論に依らない定式化が必要となる。そうした定式化の候補として提案されている理論が弦の場の理論である。この理論は非局所的な力学変数である弦場によって記述されており、弦の様々な振動状態に対応する無限個の場を含む難解な理論である。しかしながらタキオン凝縮と呼ばれる真空の遷移に係る解析に利用されるなど、その有効性が示されており、この理論の更なる進展が望まれている。

このような状況に鑑みて、提出者は本論文において三つの異なる弦の場の理論に着目し、それぞれの運動方程式の解析解を構成して、それらの性質を調べている。本論文は全8章と補遺7節からなる。それらの概要と評価は以下の通りである。

導入部である第1章では、素粒子物理学における重力に係る課題が指摘されており、その課題を克服する理論の候補として弦理論が議論されている。そして、弦理論の摂動論に依らない定式化として弦の場の理論が議論され、その中で、弦の場の理論における解析解が説明されている。解の一例であるタキオン真空解は、タキオン凝縮と呼ばれる不安定な真空から安定な真空への遷移の研究において見出された解であり、遷移後の安定な真空を記述する。その他にも、本論文と関連する解が紹介されている。また、提出者は特異なゲージ変換を用いた解の構成方法に言及し、この方法を三つの弦の場の理論に適用して新しい解析解を構成することが本論文の目的であると述べている。

第2章は6節からなり、ボソンの cubic 型開弦の場の理論に関する概説に充てられている。第1節では作用や運動方程式、ゲージ対称性等が解説されている。第2節では解析解を構成する際に便利である弦場  $K$ ,  $B$ ,  $c$  が導入されている。以上の準備の後、残りの節では解析解が議論されている。まず第3節では、特異なゲージ変換を用いた解析解の構成方法が説明されている。正則なゲージ変換によって関係する二つの状態は物理的に等価であるが、ゲージ変換が特異性を持つ場合、この変換によって形式的に関係する二つの状態は物理的に異なる。特に、自明な真空に対して特異なゲージ変換を施して得られる解は pure ゲージ型解と呼ばれ、自明な真空とは異なる。第4節では pure ゲージ型解として記述されるタキオン真空解が、自明な真空と比べて  $D=25$  ブレーン1枚分だけ低いエネルギーを持つことが示されている。第5節および第6節では、Erlanger と Maccaferri によって構成された EM 解および Murata と Schnabl によって構成された多重ブレーン解がそれぞれ紹介されている。多重ブレーン解は、タキオン真空解を pure ゲージ型解として記述する際に用いる特異なゲージ変換の逆変換を繰り返し用いて構成される。ゲージ変換の特異性は一般に解自身の特異性につながるため、このような解は正則化を導入して定義する必要がある。また、正則化された pure ゲージ型解は、運動方程式を満たさないため、正則化を取り除く極限において強い意味での運動方程式が満たされるかどうか確認する必要がある。ただし、弦場が強い意味での運動方程式を満たすとは、ある弦場に対する運動方程式がその弦場自身との内積をとっても成り立つことであり、解に対する判定条件を与える。ここで議論された多重ブレーン解の場合、

Dブレーンの枚数が2枚以下の場合を除いて強い意味での運動方程式は成り立たない。

第3章は4節からなり、提出者はボソンの cubic 型開弦の場の理論において第一の新しい解を構成し、その性質を調べている。まず第1節で EM 解に対して特異なゲージ変換を施して解を構成している。ここで用いられるゲージ変換は、多重ブレーン解の場合と同じ変換であり、強い意味での運動方程式の解析も多重ブレーン解の計算に帰着する。このことは多重ブレーン解との関係を用いて第2節で示されている。第3節では解のエネルギーを計算し、特異なゲージ変換によって D 2 5 ブレーン 1 枚分だけエネルギーが増加することが示されている。このことをより詳しく調べるために、第4節で提出者は D 2 4 ブレーンを記述する EM 解を考え、ゲージ変換によって得られる新しい解に対して、タキオン場の配位を図示している。得られた図からは、D 2 4 ブレーンと D 2 5 ブレーンが重なった解に対して期待されるタキオン場の様子を見て取ることができる。

第4章は3節からなり、cubic 型の相互作用を持つ超弦の場の理論である modified cubic 型超開弦の場の理論のまとめとなっている。第1節では作用が導入され、第2節では弦場  $K$ ,  $B$ ,  $c$  に加えて、超弦特有の弦場  $G$  および  $\gamma$  が導入されている。第3節ではこれらの弦場を用いた pure ゲージ型解として、タキオン真空解とハーフブレーン解が与えられている。ハーフブレーン解は、D 9 ブレーンの半分のエネルギーを持つ解であり、その物理的重要性は明らかではない。提出者は導入部において、この解が超弦特有の弦場を含む形で構成されるという意味において、興味深い研究対象であると述べている。

第5章は3節からなる。ここで提出者は modified cubic 型超開弦の場の理論において、ハーフブレーン解を pure ゲージ型に記述する際に現れるゲージ変換とその逆変換を用いて、解を構成している。これらの変換は D 9 ブレーンの半分のエネルギーを単位として、エネルギーを減少あるいは増加させることが期待される。まず第1節ではハーフブレーン解に対してゲージ変換を施して得られる解が、タキオン真空解と等価な解であることを議論している。次に第2節で提出者は、自明な真空に対して上述の逆変換を施し、強い意味での運動方程式を満たす第二の新しい解を構成している。また、エネルギーを計算し、この解が D 9 ブレーン  $3/2$  枚分のエネルギーを持つことを示している。ゲージ変換が超弦特有の特異性を持つため、この解析では新しい正則化を導入して計算が行われている。第3節ではさらにもう一度逆変換を施して得られる弦場と等価な弦場が、強い意味での運動方程式を満たさないことが示されている。

第6章は Berkovits によって提案された超開弦の場の理論のまとめであり、2節からなる。第1節では作用や運動方程式、ゲージ変換等が解説されている。第2節ではこの理論のタキオン真空解の構造とエネルギーの計算が議論されている。エネルギーの計算は煩雑となるため、本文では一部を紹介するにとどめ、大部分は補遺 F で議論されている。タキオン真空解のエネルギーは Erler によって求められたものであるが、提出者は途中の計算式を次章で構成する新しい解に適用できる形にまとめている。

第7章は2節からなり、提出者は前章で議論した Berkovits による超開弦の場の理論におけるタキオン真空解に対して、特異なゲージ変換を施して得られる弦場の解析を行っている。まず第1節ではタキオン真空解に対してゲージ変換を一度施し、自明な真空と等価な解が導かれている。次に第2節ではさらにもう一度ゲージ変換を施して、第三の新しい解が構成されている。その構成方法より、この解はダブルブレーン解であることが期待される。提出者はこのことを確認するために、前章と補遺 F で導いた計算式を用いて、エネルギーの評価を試みている。その際、積分形まで導くことに成功しているが、積分が複雑なために最終的な値は求められていない。これらの計算は主に補遺 G にまとめられている。次に、提出者はエネルギーの代わりに Gauge Invariant Observable (GIO) と呼ばれる量を計算し、ダブルブレーン解の場合に期待される値が得られることを示している。また、Berkovits による超開弦の場の理論においては、正則化の扱いや強い意味での運動方程式の扱いが他の二つの理論と比べて明確ではないことを指摘している。こうした指摘も提出者の解析によって得られた重要な成果である。

第8章で提出者は本論文で得られた新しい解に関するまとめを行い、今後の課題について述べている。本論文で扱った解は、いずれも不安定な D ブレーンを含む解である。一方、超弦理論に存在する安定な D ブレーンは保存チャージを持ち、その保存則によって安定性が保証される。提出者は、このようなチャージを持つ安定な D ブレーン解を構成することを今後の課題として挙げている。

以上のように、提出者は特異なゲージ変換を用いて弦の場の理論における新しい解析解を構成し、その性質や解の間との関係に対する新しい理解を得ている。このような解の導出とその物理的な内容を理解することは、基本的で重要な課題であり、当該研究分野の発展に寄与するところが小さくない。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（理学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成30年2月15日