【内容の要旨及び審査の結果の要旨】弦の場の理論における解析的な古典解について

氏 名（本 籍）	勝又郁枝　（静岡県）
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博課第355号
学位授与年月日	平成19年3月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 人間文化研究科
論文題目	弦の場の理論における解析的な古典解について
論文審査委員	（委員長）教授　見目正克　教授　岩渕修一 教授　林井久樹　教授　重本和泰 （帝塚山大学経済学部）

論文内容の要旨

自然界には基本的な相互作用として、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用、重力相互作用がある。これらの4つの相互作用はすべて、ゲージ場の理論によって記述されており、ゲージ変換によって法則が不変だとする幾何学的なゲージ原理がその背後にある。また、4つの基本相互作用のうち電磁力と弱い力では、力の統一が実現している。基本法則の幾何学化と統一理論という素粒子論の研究は、電弱統一理論と強い相互作用の理論とを統一した大統一理論へと発展し、さらに、重力理論まで統一しようとした多次元超重力理論、弦理論、超弦理論へと続いていく。

統一理論として現在最も有望な理論は弦理論であり盛んに研究され続けている。特に、宇宙論を語るのに必要な一般相対性理論を内包する理論であることは魅力的で、宇宙の起源やブラックホールの研究から`弦がみえる'かもしれないという期待もある。しかし、そのような魅力がある一方で、弦理論にとって非常に大きな問題が残されている。等価原理やゲージ原理のような、弦理論の背後にあるはずの原理がまだわかっていないのである。ダイナミクスを解こうにも、そもそも基礎方程式'が存在していないのである。

弦理論の原理を明らかにし弦の量子論を構築しようとする様々な試みがあるが、その中でもオーソドックスなものは、点粒子の場を拡張した弦の場を考えて、その弦の場に対する理論、弦の場の理論を構築しようとする試みである。弦の場の理論は弦理論のダイナミクスを解く際の方程式をあたえることができる理論なのである。また、弦の場の理論には、場の理論に見出されるゲージ対称性を非局所的にかつ無限次元に拡大した、非常に大きなゲージ対称性が存在し、ゲージ対称性を究極に突き詰

めるという意味でも弦の場の理論の研究は意義深いものとなっている。本論文では、まさに、弦理論のダイナミクス、ゲージ対称性の観点から、弦の場の理論の古典解の研究を行っている。

不安定なDブレーン上にはタキオンモードが存在するが、タキオン場が凝縮を起こすことでこのDブレーンが消滅する、というタキオン凝縮と呼ばれる現象が弦理論では知られている。タキオン凝縮は非摂動論的な現象であるために、弦理論の基礎方程式としての弦の場の理論をテストするのに良い現象である。実際、弦の場の理論による記述は大成功を収めていた。しかし、その研究の大半は数値的な手法を用いており、解析的で厳密な記述が望まれていた。本論文では、弦の場の理論における解析的な古典解のひとつとして考えられている高橋－谷本による古典解の性質について研究している。

第2章において、弦の場の理論に関係した基礎的な事柄についてまとめ、弦の場の理論のゲージ対称性、弦の場の理論における運動方程式の導出について述べている。第3章で、弦の場の理論の解析的な古典解についてまとめたあとで、本論文の主題である古典解の研究の話へとつづいていく。

まず、第4章でmarginal変形に対応した古典解について述べている。この古典解の周りで弦場を展開した理論において、閉弦との結合を表すゲージ不変な演算子の性質について研究している。古典解のパラメータがこの演算子に与える効果とCFTとの結果を比較し、古典解のパラメータとmarginalパラメータとの関係を結論している。また、コンパクト化した時空での古典解についても考察し、CFTの結果を再現することを示している。次に、第5章では、タキオン凝縮解の周りで弦場を展開した理論について述べている。この展開された理論において、摂動論的なゆらぎのモードを解析し、それらはすべてゲージ自由度に帰着するという結論を得ている。これは、Dブレーンが消滅したという描像に一致する結果である。また、展開された理論の真空構造を数値的に調べ、この解が真にタキオン凝縮解であるという証拠を得ている。古典解に含まれる関数のゼロ点の構造によってタキオン凝縮解以外の真空解を与えうる可能性がDrukkerによって予想されていたが、これらの結果はこの予想を否定するものである。

このような結果は、すべて弦の場の理論のゲージ対称性という観点から論じられている。そもそも、弦の場の理論のゲージ対称性は非常に大きな対称性であり、数学的にも物理的にもどのように扱えば良いのか完全には明らかになっていない。しかし、これらの結果は、少なくともpureゲージあるとか、ゲージ等価性に関して、通常の扱いができることを示唆している。これらを踏まえて、最後に第6章では、無限個存在する古典解のゲージ等価性について論じている。タキオン凝縮解は無限個構成できることがわかっていたが、これらの解がすべてタキオン凝縮という現象に結びついているのならば、これらの解はある種のゲージ変換で結びついているはずである。本論文では、これらの古典解をゲージ変換の部分群である大局的変換によって結びつけることができることを示している。また、無限自由度のために生じるこの変換の微妙な点についても論じている。さらに、ゲージ固定が異なるために、この大局的変換では数値的タキオン凝縮解には変換できないことも示している。第7章では、

得られた結果をまとめ、それらに基づいて弦の場の理論におけるゲージ構造について考察している。付録では、各章で行われた重要な計算に関する詳細が書かれている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、弦の場の理論における解析的な marginal 変形に対応する解とタキオン凝縮解に関する研究をまとめたものである。これらの古典解を弦の場の理論のゲージ対称性の観点から系統的に論じている。

弦の場の理論における古典解の研究では、marginal 変形に対応する古典解の研究は比較的容易で、米谷による円錐型の理論におけるディラトン凝縮の研究、畑らによる HIKKO 型の理論におけるその一般化の研究が行われてきた。本論文で扱っている marginal 変形の研究は Witten 型の弦の場の理論で行われており、解析的な古典解を用いた研究としては先駆的なものである。局所的 pure gauge や、ゲージ不変量と物理量を結びつけた点など、厳密な marginal 解の性質をゲージ対称性の視点から明らかにしたことは評価すべき結果である。数値的な古典解では、弦の場の理論におけるゲージ対称性を厳密に保つことができず、古典解のパラメータと物理量を結びつけることが難しい。古典解が解析的に得られていることをうまく使って結果を得ることができている。また、弦の場の理論のゲージ対称性は無限次元であり取り扱いが難しいのであるが、その困難を巧みに回避し、従来の概念を使えることを示したことは、その後の研究にも影響した良い結果である。

タキオン凝縮という現象に弦の場の理論を適用して非常な成功が収められていたが、弦の場の理論の解析的な古典解を用いて、この課題に取り組む研究は、本研究以前はあまりなかった。この点でタキオン凝縮に関する研究の先駆性が評価できるし、また得ている結果も、弦の場の理論のゲージ対称性に結びついて興味深いものである。

高橋－谷本によるタキオン凝縮解は、ある関数でラベルされ、この関数の選び方によって無限個の解析解を構成することができる。ところが、この関数の自由度の物理的な意味づけが明らかではなかった。本論文では、この関数の自由度について考察し、その殆どの自由度が弦の場の理論におけるゲージ自由度であることを明らかにした。まず、関数のゼロ点の次数による違いについて考察している。この違いに関しては Drukker による予想があり、ゼロ点の次数の違いは古典解が表す D ブレーンの枚数の違いであるとされていた。次数の高い古典解の周りで弦場を展開した理論において、その BRS 電荷のコホモロジーを導き、摂動論的な真空の場合とは異なるゴースト数の状態にしか non-trivial な状態が存在しないことを示している。物理的には、この古典解のまわりでは物理的なモードが存在しないことを示しており、この古典解がタキオン凝縮に対応しているという描像と一致するものである。また、展開した理論における、真空構造を数値的に計算し、この古典解がタキオン凝縮解であるいう結果を再び得ている。いずれの結果も、関数のゼロ点の次数が異なった解もタキオン凝縮解を表

していることを示しており、Drukkerの予想を否定する新しい結果として評価できる。

Marginal変形に対応する古典解に関するゲージ構造の視点からの結果と、また関数のゼロ点の次数が異なるタキオン凝縮解の等価性の示唆から、無限個構成されたタキオン凝縮解が弦の場の理論のゲージ対称性で結びついた、物理的には一つの解であると考えることは自然である。本論文では、最後に古典解のゲージ等価性について論じている。具体的に、二つの古典解を選び、これらを結びつけるゲージ変換を構成している。この変換は、それまで明らかになっていなかった全く新しい変換であり、その変換を構成したことは非常に評価できる。また、この変換を表す演算子はVirasoro演算子に基づいて正規積表示が可能であることを示し、その正則性について論じている。このような正則性の議論は、弦の場の理論をどう定義していくべきかについて示唆を与える興味あるものである。結果を総合して、無限個存在する古典解が弦の場の理論のゲージ変換で結びつくはずのものであると結論している。この論文であつかっている変換は、ゲージ変換のほんの一部であり、例えば数値的な解が得られているSiegelゲージの古典解へはこの変換でつながらないことも示しており、今後の研究の方向性を示している点でも評価できる。

本論文では、ゲージ対称性の観点から弦の場の理論の古典解を研究したわけであるが、弦の場の理論のゲージ構造の全容が明らかになっていない現在、そのようなゲージ構造が物理的な意味で存在することを明らかにした点で本論文は評価される。また、弦の場の理論の古典解が、理論のゲージ構造と深く結びついていることを示した点においても、評価されるべき論文である。