

氏 名	いり え ひろ たか 入 江 広 隆
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3235 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 fields, matrix models and D-branes in (p,q) minimal superstring theory ((p,q) ミニマル超弦理論における弦場、行列模型及び D プレーンに関する 研究)
論文調査委員	(主 査) 准教授 福 間 将 文 教 授 川 合 光 教 授 植 松 恒 夫

論 文 内 容 の 要 旨

本申請論文は、世界面に超対称性を持つ (p,q) ミニマル超弦理論の構造を、弦の場の理論や行列模型を用いることで、様々な角度から解明したものである。

行列模型とは、任意のトポロジを持つランダム面の統計力学的分配和を生成するもので、弦理論の経路積分の自然な正則化を与える。この模型はさらに、非摂動的な情報を引き出すことが可能な定式化となっているため、これまでの多くの研究により、弦の場の理論の構築やそれによる D プレーンの解析など、非摂動的性質に関して深い理解が得られるようになった。こうした研究は最近までボソン弦に限られていたが、近年 type 0 超弦理論を記述する行列模型が提案され、摂動領域ではこの提案が成立していることが確認された。本申請論文は、この提案にもとづき、 (p,q) ミニマル超弦理論を記述する行列模型及び弦の場の理論を世界で初めて構築したものである。とくに、D プレーンの詳細な解析がこの枠組みで行われ、 (p,q) ミニマル超弦理論の非摂動的構造が解明された。

本申請論文では、まず第 2 章と第 3 章において、非臨界次元の弦理論に関する、初期の研究から最近の発展までが手際よくまとめられている。特に第 6 章に関係した世界面上の理論 (Liouville 理論) の進展は、第 2 章にまとめられている。また、 (p,q) ミニマル弦理論の弦の場の理論による記述及び type 0 超弦理論の行列模型に関する近年の提案は、第 3 章で述べられている。

第 4 章では、 (p,q) ミニマル弦理論の基本的な D プレーンである FZZT プレーンについて、弦の場の理論を用いた相関関数の計算法が与えられている。特に、弦の場の理論が持つ $W_{1+\infty}$ 拘束条件から FZZT プレーン円盤振幅の代数方程式を導く方法が与えられ、さらに、その代数曲線の持つ性質が詳細に議論されている。また、円盤振幅をもとにして FZZT 円柱振幅を計算する方法も与えられている。

第 5 章では、 (p,q) ミニマル超弦理論を記述する 2-行列模型の提案及びその可積分構造の特定、対応する弦の場の理論の構成が行われている。近年提案された type 0 超弦理論の行列模型とは、対称なダブルウェル型ポテンシャルを持つ行列模型であるが、申請論文では、その構成において本質的な Z_2 対称性を 2-行列模型において新しく定義し、連続極限において 2-成分 KP 階層が実現される事を議論している。さらに 2-成分 KP 階層の自由フェルミオンによる記述を用い、対応する弦の場の理論を構成している。申請論文では、この弦の場の理論が (p,q) ミニマル超弦理論を正しく与えていることを確かめ、さらには、超弦理論特有の性質である Ramond-Ramond ゲージ場電荷と D プレーンの間に簡明な対応関係があることを見出している。

第 6 章では、 (p,q) ミニマル超弦理論における D プレーンの境界状態を解析している。Type 0 超弦理論には $\eta = \pm 1$ でラベルされる 2 種類の D プレーンが存在するが、申請者は $N=1$ 超共形場理論において、境界状態のモジュラー変換性に関する一般論を展開し、 $\eta = \pm 1$ の双方の境界状態を決定する方法を提示している。この解析により、異なる η の D プレーン

が時空において互いに非局所的であることが、初めて示された。一方、行列模型や弦の場の理論では $\eta = -1$ の D プレーンのみが理論に現れる事が第 5 章で示されているが、 $\eta = +1$ の D プレーンがどのように現れるべきかについての示唆もこの章で与えられている。

論文審査の結果の要旨

非臨界次元で定義された弦理論は、これまでの多くの研究によって、非摂動的定式化に対する有益な示唆を与えてきた。しかし、超対称性を持つ弦理論を行列模型の視点で理解していくと考えられる。本申請論文は、特に (p, q) ミニマル超弦理論を行列模型、弦の場の理論及び共形場理論の 3 つの視点から行なった申請者の研究成果をまとめたものである。

第 4 章では、 (p, q) ミニマル弦理論を記述する弦の場の理論において、D プレーンの振幅を計算する方法を $W_{1+\infty}$ 拘束条件を用いることで与えている。この手法は大変明快であるだけでなく、行列模型や共形場理論では扱うことが難しい一般の背景時空における解析まで容易に行なえる点で優れている。また、第 5 章で議論する超弦理論に対しても対応することが容易で、非常に汎用性の高い手法であると言える。

第 5 章では、 (p, q) ミニマル超弦理論に対応する 2 - 行列模型を模型の $\mathbb{Z}_2$ 対称性に注目して構成し、連続極限で実現される可積分構造が 2 - 成分 KP 階層であることを議論している。これによって、擬微分演算子形式を用いた (p, q) ミニマル超弦理論の記述に成功し、自由フェルミオンを用いた弦の場の理論を構成することを可能にした。これにより一般の (p, q) 系列の解析を容易にしたと言える。また弦の場の理論を用いることで D プレーン及び反 D プレーンを自然に記述することが出来るようになり、それらの Ramond-Ramond 電荷がフェルミオン数として簡潔に与えられることを議論している。この研究により、非摂動的定式化における超弦理論の描像が初めて直接見えるようになったと言える。

第 6 章では、これまで決定できていなかった (p, q) ミニマル超弦理論の境界状態を完全に決定し、D プレーンの構造について議論している。申請者は、境界状態とモジュラー変換性との関係を $N = 1$ 超共形場の理論の場合において拡張し、 $\eta = \pm 1$ でラベルされる 2 種類の境界状態を柱振幅を与えることに成功し、異なる η の D プレーンが時空において互いに非局所的であることを示した。これはボソン弦にはない超弦理論の新しい特徴であると言える。また $\eta = +1$ の D プレーンが、行列模型や弦の場の理論においてどのように現れるべきかについて、具体的な振幅の形を提示することで示唆を与えている。

以上のように申請者は、 (p, q) ミニマル超弦理論を記述する行列模型、弦の場の理論及び共形場理論の研究を通して、超弦理論の非摂動的構造に関する理解を深化させることに成功すると同時に、記述法においても明快で新しい方法を提示した。従って、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。