別紙２

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名　松永　博昭

序

本論文では，素粒子大統一理論の候補とされる超弦理論の場の理論的定式化が論じられ，特に，Wess-Zumino-Witten type の定式化によって，超弦の場の理論 (type II : NS-NS セクター) の作用をゲージ不変な形に構成する方法が与えられている。

本論文は３部１１章からなる。第１部１章から３章には，導入説明として，ボゾニックな弦の理論の基礎事項，A_∞, L_∞ と呼ばれる相互作用頂点の満たすべき代数的構造，および，開いた弦と閉じた弦の場の理論的定式化について解説がなされている。第２部４章から６章では，先行研究によって指摘されてきた，超弦の場の理論を構成する上での問題点について解説した後，この問題点 (描像演算子に関する問題点) を克服した，A_∞, L_∞ 代数に基づく定式化法が導入されている。第３部は，本論文の主題である Wess-Zumino-Witten-type の超弦の場の理論に関する記述に当てられている。７章では Berkovits による開-超弦の定式化を導入し，８章ではその閉-超弦 (heterotic : NS セクター) への拡張について解説がなされている。その後９章において本論文の主題である閉-超弦 (typeII : NS-NS セクター) の定式化が述べられ，１０章ではこれらの結果と，A_∞, L_∞ 代数に基づく超弦の場の理論を関係づけるゲージ固定法を具体的に与えて，作用関数が場の４次まで一致することが示されている。最終章では本博士論文の結論が述べられ，今後の課題への言及がなされている。

本文

超弦理論は素粒子とその相互作用を，重力を含めて，ゲージ原理の下に統一的に理解することをめざす理論体系である。弦理論は，単一弦の量子化 (第一量子化) から始めて，相互作用による弦の散乱の確率振幅を摂動的に構成することによって定式化できる。しかし，量子的状態 (真の真空状態や仮想中間状態) の振舞いや非摂動的効果，背景時空との関係など，弦理論の量子力学的構造を詳しく解析するためには，場の理論 (第二量子化) 的な定式化が有用と考えられている。

第一量子化の結果，弦の状態は，弦の世界面上の共形場理論における量子的状態として記述されることから，弦の場は共形場理論におけるヒルベルト空間の演算子またはベクトル (の無限級数和) として導入される。このため，弦の場の積や内積といった演算は，このヒルベルト空間の構造に応じて適宜定義される必要がある。特に，超弦理論の場合には，超共形対称性のゲージ固定に伴うゴースト場の量子数について (量子異常による) 制約が生じ，このために，相互作用項の構成によっては，確率振幅に特異性が生じるなどの問題点が指摘されていた。2014 年になって，この問題は肯定的に解決される。すなわち，Erler et al. は超共形ゴースト場の量子数を調整する演算子 (picture-changing operator) を正則化した上で，振幅の特異性を繰り込む相殺項を，弦の相互作用頂点の満たすべき代数的構造 (A_∞, L_∞ 代数) に基づいて系統的に構成する手法を開発した。これによって，開-超弦 (NS-セクター)，閉-超弦 (heterotic, NS-セクター)，閉-超弦 (type II, NS-NS-セクター) の各理論において，ゲージ不変な弦の場の作用関数が構成された。

一方，上記の問題に対して，Berkovits は，超共形ゴースト場 ($\beta-\gamma$ 系と呼ばれる) のボゾン化 ($\xi-\eta-\phi$ 系と呼ばれる) に現れるゼロモードを用いることで，ヒルベルト空間を拡張し，より大きなゲージ対称性の下で超弦の場の作用関数を構成した。この作用関数は Wess-Zumino-Witten 模型に類似の非線形な構造をもつため，Wess-Zumino-Witten type の定式化と呼ばれ，ヒルベルト空間の自由度の大小によって，拡張前の構成法を small space，拡張後の構成法を large space 定式化として区別されている。この large space 定式化では始め開-超弦が構成され，その後，閉-超弦 (heterotic, NS-セクター) に拡張されている。いずれの理論も，超対称なセクターが一つであり，閉-超弦 (type II, NS-NS-セクター) への拡張には困難があった。また超弦の場の理論が満たすべき量子的運動方程式 (BV-master 方程式) が成立することは未だ示されておらず，課題とされていた。

本論文において，論文提出者は，この Wess-Zumino-Witten type の定式化による閉-超弦 (type II, NS-NS-セクター) の問題を詳しく考察し，ゲージ不変な場の作用関数を構成することに成功している。Wess-Zumino-Witten type の定式化では，純ゲージ状態 (pure gauge state: ゼロベクトルからゲージ変換によって生成される状態) とそれに随伴する状態の構成が重要となるが，本論文提出者は，この純ゲージ状態を，small space 定式化の閉-超弦 (heterotic, NS-セクター) の状態から構成することを考案し，それに随伴する場の構成が可能であることを定理として証明している。これによって，large space-定式化においても，閉-超弦 (type II, NS-NS-セクター) の場の作用関数をゲージ不変に定式化できることを示している。さらに，この結果と，A_∞, L_∞ 代数に基づく, small-space 定式化の超弦の場の理論 (type II : NS-NS セクター) とを関係づけるゲージ固定法を具体的に与えて，作用関数が場の４次まで一致することを示している。

この Wess-Zumino-Witten type の定式化における純ゲージ状態 (pure gauge state) の構成の重要性は，先行研究によって指摘されていたものであるが，本論文提出者は，超弦の場の理論 (type II : NS-NS セクター) に対して純ゲージ状態 (pure gauge state) として何を取るべきなのか、という課題意識を抱いて研究に取り組んできており，関連する最新の研究成果から新しい着想を得て問題の解決に至っている点には，優れた物理的な洞察力と高い独自性が認められる。また，この論文の結果は，超弦の場の理論の残された課題の解決に向けた，この分野の今後の研究の発展に寄与するところも大きいと認められる。

したがって，本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。