

令和元年6月21日現在

機関番号：50103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05063

研究課題名(和文) 超弦の場の理論の定式化と非摂動的効果の研究

研究課題名(英文) Research on formulation of superstring field theory and on nonperturbative aspects of string theory

研究代表者

村上 公一 (Murakami, Koichi)

釧路工業高等専門学校・創造工学科・准教授

研究者番号：00400698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、超弦の場の理論を無矛盾に定式化することである。超弦の場の理論はコンタクト項問題と呼ばれる発散の問題を抱えており、定式化の大きな妨げとなってきた。本研究は、申請者が共同研究者と開発した次元正則化の処方を用いることで、光円錐ゲージのNSR形式の閉じた超弦の場の理論のコンタクト項の発散を正則化できることを示した。特に、我々の処方箋は、散乱振幅において任意のループレベルで、BRST対称性を保った形で正則化することができ、かつ、弦の場の理論の作用に相殺項を加えることなく、第一量子化の結果を正しく再現することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力には無矛盾な量子論が現在まで定式化されておらず、これを構築するのが現代物理学の喫緊の課題である。超弦理論は重力の量子論の有力候補であるが、摂動的な定式化しかされていない。非摂動的な定式化の最も自然な候補は、超弦理論を第2量子化した場の理論であるが、超弦の場の理論はコンタクト項問題と呼ばれる発散の問題を抱え、これが定式化の大きな妨げとなってきた。我々の研究結果は、光円錐ゲージの閉じた超弦の場の理論の散乱振幅においては、任意のループレベルでこの発散問題を無矛盾に正則化できることを具体的に示したものであり、超弦理論のコンタクト項問題解決への大きな足掛かりを与えるものとなったと考える。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to formulate superstring field theory consistently. Superstring field theories suffer from a divergence problem referred to as the contact term problem, which has been a fatal obstacle in formulating the field theories for a long time. We have proposed to tame such divergences by employing the dimensional regularization. We have shown that our scheme works well at any loop level in the scattering amplitudes involving the contributions of the odd spin structure as well as even one in the light-cone gauge closed superstring field theory in the NSR formalism. We have also shown that our scheme preserves the BRST symmetry on the worldsheet superstring theory and reproduces the results in the first-quantization without a counter-terms being added to the action of the superstring field theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 超弦理論 場の理論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超弦理論は第一量子化によって摂動論的にしか定式化されていない。そのため、長年にわたって非摂動論的な定式化が様々な研究者によって探求されてきた。非摂動論的な定式化の最も自然な候補は超弦の場の理論であるが、これはコンタクト項問題と呼ばれる発散の問題を抱えていて、定式化の妨げとなっていた。申請者は、共同研究により光円錐ゲージの閉超弦の場の理論において、次元正則化によってこの発散を正則化しようという研究を進めていた。そして、本研究開始までに、次元正則化の処方を考え、上述の弦の場の理論の tree 散乱振幅に対しては、我々の提案した処方箋によりコンタクト項の発散が正しく処理でき、第一量子化の結果を正しく再現することを示すことに成功していた。これを受けて、多重ループ振幅についても、我々の処方箋がうまく働くかどうか、何か拡張が必要か、拡張が必要ならどういった拡張が適切なのか等を研究することが課題となった。

また、このような既存の理論を尊重した方向性による解決とは違って、研究分担者は H.B. Nielsen 氏と共同で、弦の場の理論の新たな定式化を行うことで解決できないかという可能性を模索していた。その考察から left-mover と right-mover を独立した自由として扱う新しい弦理論の定式化を提唱して、弦理論のスペクトラムを再現することを確かめていて、彼らの定式化により散乱振幅が再現できるかということ課題としていた。

### 2. 研究の目的

上記の研究開始当初の問題意識に従って、超弦の場の理論が抱えるコンタクト項問題の解決を本研究の目的とした。具体的には、我々が提案し、tree レベル振幅ではうまくいった次元正則化の処方を、多重ループ振幅の場合にもうまくいくように精密化・拡張し、光円錐ゲージの閉じた超弦の場の理論を無矛盾に定式化することを目指した。

また、上記の研究で研究代表者が蓄積した弦の場の理論に関する知見を、研究分担者たちが提唱している新しい定式化の研究にフィードバックし、この定式化において tree 振幅を計算することも目的とした。

### 3. 研究の方法

次元正則化の処方においては、超弦の世界面理論に余計な共形場理論のセクターを付けるか、または既存の世界面上の場の作用に相互作用項を加えて、世界面上の理論の Virasoro 中心電荷をずらすことで、時空の次元をずらすことを行う。本研究では、この Virasoro 中心電荷をずらす処方としてどのようなものを採用すべきか、すなわち、新たな共形場理論を手で付け加えるのか、あるいは同じ自由度を用いつつその世界面上の作用を変形するのか等を同定することが、成功の鍵を握る大きな要素と考えた。我々は、色々と模索を重ねるうちに、石橋延幸氏が提唱した linear dilaton 背景場での世界面の理論を考える方法が非常に有効であることを確信し、これを採用するに至った。

また、考察した次元正則化の処方が弦理論の持つゲージ対称性に抵触していないかが気になる点である。我々は光円錐ゲージ形式の理論というゲージ固定をした理論を扱っているため、この点を確認するのは簡単ではない。我々は、正則化の過程で得られた振幅を、世界面の理論において、縦波方向の自由度を導入して共形ゲージの形に書き直し、この理論の相関関数の形に書き表し、この相関関数が BRST 対称性を保っているかを調べることにより、超弦の場の理論のゲージ対称性に抵触していないことを確かめることを考えた。このためには、複雑な相互作用項を持つ縦波理論を構成することが必要不可欠であり、tree レベル振幅の考察でその構成に成功していた。多重ループ振幅においても同様なことを行うために、本研究では種数が一般の場合のリーマン面上でのこの理論の振舞を詳しく考察した。

### 4. 研究成果

主要な研究成果は次のとおりである。

(1) NS-NS セクターの多重ループ振幅の偶スピン構造の寄与について計算し、この振幅の持つコンタクト項による発散を、次元正則化を用いて処理することを考察した。この際、上述の複雑な相互作用項を持つ縦波自由度の超共形場理論を、一般の種数のリーマン面上で考察した。特にこの理論の分配関数（光円錐ゲージ弦の場の理論の散乱振幅のアノマリー因子）の計算の簡略化に成功した。また、この共形場理論の相関関数の性質を調べ、エネルギー-運動量テンソルが弦の場の理論の相互作用点で発散を持たないことを明らかにした。次いで、これを用いて冪零な BRST 電荷が構成できることを示した。以上の成果を、筑波大の石橋延幸教授と本研究代表者との共著として研究論文にまとめ、学術雑誌に出版された。

(2) 次元正則化において、世界面上の共形場理論の Virasoro 中心電荷の値をずらす処方として、筑波大の石橋延幸氏が提案した linear dilaton 背景場中の弦理論を採用し、この弦理論と上記(1)で我々が解析した複雑な相互作用項を持つ縦波理論と結合させた超共形場理論を考察した。我々はこの超共形場理論を用いることで、NS-NS セクターの多重ループ振幅の偶スピン構造の寄与は、無矛盾に正則化できることを示した。特に正則化した散乱振幅を超共形場理論の BRST

不変な相関関数の形に書き表されることを示した。また、我々の処方で計算した散乱振幅が、弦の場の理論の作用に相殺項を加えることなく、第一量子化での結果を再現することも示した。こうして、以前に行った tree レベル振幅における解析を、多重ループ振幅に拡張することに成功した。これらの結果を共著論文にまとめ、学術雑誌に出版された。

(3) 上記(2)の解析を、今度は多重ループ振幅の奇スピン構造の寄与について拡張することを試みた。この際、散乱振幅の外線の状態の picture 量子数を、通常の計算で用いられるものとは異なるものを採用することにより、コンタクト項の発散を処理することが可能であることを見出した。また、我々の正則化はこの場合にも、BRST 対称性を保つこと示した。そして、我々の処方で計算した振幅が、弦の場の理論の作用に相殺項を加えることなく、第一量子化の計算で得られるものと一致することも示した。以上の成果を共著論文にまとめ、学術雑誌に出版された。

(4) 研究分担者が中心となって取り組んでいる、left-mover と right-mover を独立な自由度として取り扱う新しい形式の弦の場の理論において、Veneziano 振幅をすべてのチャンネルにおいて再現することに成功した。この結果は、この定式化が既存の弦理論の内容を含んだ理論であることを強く示唆している。この成果は、研究分担者と H.B. Nielsen 氏との共著論文にまとめられ、学術雑誌に出版された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計5件)

1. Nobuyuki Ishibashi, Koichi Murakami,  
“Worldsheet theory of light-cone gauge noncritical strings on higher genus Riemann surfaces,”  
Journal of High Energy Physics 06 (2016) 087, pp1-36.
2. Nobuyuki Ishibashi, Koichi Murakami,  
“Multiloop amplitudes of light-cone gauge NSR string field theory in noncritical dimensions,”  
Journal of High Energy Physics 01 (2017) 034, pp1-33.
3. Nobuyuki Ishibashi, Koichi Murakami,  
“Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory: odd spin structure contributions,”  
Journal of High Energy Physics 03 (2018) 063, pp1-27.
4. Yoshinobu Habara, Hikaru Kawai, Masao Ninomiya,  
“A new mechanism of realizing inflationary universe with recourse to backreaction of quantized free fields --- inflation without inflaton ---,”  
Journal of High Energy Physics 02 (2015) 148, pp1-25
5. Holger B. Nielsen, Masao Ninomiya,  
“Novel string field theory with also negative energy constituents/objects gives Veneziano amplitude,”  
Journal of High Energy Physics 02 (2018) 097, pp1-51.

[学会発表](計3件)

1. Holger B. Nielsen, Masao Ninomiya,  
“Bosons being their own antiparticles in Dirac formulation,”  
Bled Workshops Phys. 18 (2017) no.2, 144-189.
2. Holger B. Nielsen, Masao Ninomiya,  
“An Object Model of String Field Theory and Derivation of Veneziano Amplitude,”  
PoS CORFU2016 (2017) 134.
3. Holger B. Nielsen, Masao Ninomiya,  
“Do We Find High Energy Physics Inside (Almost) Every Solid or Fluid at Low Temperature?”  
Bled Workshops Phys. 19 (2018) no.2, 216-246.

[図書](計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：二宮 正夫

ローマ字氏名： Masao Ninomiya

所属研究機関名：大阪市立大学

部局名：大学院理学研究科

職名： 数学研究所 専任研究員

研究者番号（8桁）：40198536

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。