

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05408

研究課題名（和文）超弦の場の理論の量子化から重力を読み解く

研究課題名（英文）Deciphering gravity through quantization of superstring field theory

研究代表者

大川 祐司（OKAWA, Yuji）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：10466823

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：開いた超弦の場の理論を量子化することで一般相対性理論を含む量子論を非摂動的に定式化するという目標に向け、開いたボソニックな弦の場の理論ではゲージ不変演算子の相関関数を $1/N$ 展開で評価することで一般相対性理論を含む閉弦の摂動論の構造が再現されることを明らかにし、開いた弦の場の理論の量子化をする上で強力な武器になると思われるホモトピー代数を用いて相関関数を記述する方法を場の量子論で整備した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力は一般相対性理論で記述され、ミクロな世界は量子力学で記述されるが、一般相対性理論と量子力学をひとつの理論的な枠組みの中で融合することには成功していない。本研究ではこの問題に対して開いた超弦の場の理論と呼ばれる理論を量子化することで解決の糸口を掴もうとするものであり、もう少し簡単な開いたボソニックな弦の場の理論では重要な進展があり、より難しい開いた超弦の場の理論を攻略するための武器の整備も順調に進めている。

研究成果の概要（英文）：Towards nonperturbative formulations of quantum theory including general relativity via quantization of open superstring field theory, we clarified that the structure of closed string perturbation theory which contains general relativity can be reproduced by the  $1/N$  expansion of correlation functions of gauge-invariant operators in open bosonic string field theory. We also found a formula for correlation functions in quantum field theory using homotopy algebras, which can be powerful tools in quantizing open string field theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：弦の場の理論 超弦理論

## 1. 研究開始当初の背景

一般相対性理論に基づく重力は場の量子論の枠組みでは量子論的に取り扱うことができず、一般相対性理論と量子力学を矛盾なく融合する理論の構築が今日の理論物理学における最も重要な課題のひとつになっている。超弦理論は摂動的には矛盾のない形で一般相対性理論に基づく重力を量子論的に取り扱うことに成功しているが、非摂動的に定式化することができていない。超弦理論の非摂動的な定式化に向けて、弦の場の理論というアプローチがあり、長い研究の歴史を持つが、重力を含む閉じた超弦の場の理論を直接的に用いた超弦理論の非摂動的な定式化は困難であるということは弦の場の理論の研究の早い段階で明らかになっていた。一方、AdS/CFT 対応などの近年の超弦理論の研究は、開いた弦を量子化することで超弦理論の非摂動的な定式化が可能であることを示唆しており、開いた超弦の場の理論を用いることでこのプログラムを遂行したいと考えていた。しかし、開いた超弦の場の理論ではフェルミオンを記述するセクターを含む作用が構成できないことが約 30 年間にわたる問題となっていた。この問題に対して 2015 年の京都大学基礎物理学研究所の国友氏との共同研究により、開いた超弦の場の理論でフェルミオンを記述するセクターを含むゲージ不変でローレンツ共変な完全な作用の構成に世界で初めて成功した。また、ほぼ同時期に Sen が量子論的にも完全に自由な場を余計に導入することによりフェルミオンを記述するセクターを含むゲージ不変でローレンツ共変な完全な作用の構成に成功した。長い歴史を持つ弦の場の理論の研究において、ようやく超弦の場の理論を量子論的に取り扱う出発点に立つことができたとということになる。

## 2. 研究の目的

このような背景を踏まえ、

(1) 重力を含む完全な量子論の候補としての開いた超弦の場の理論

(2) 重力を含む量子論の有効理論としての閉じた超弦の場の理論

の研究をこれまでとは異なった切り口で展開し、一般相対性理論を含み非摂動的に定式化された量子論の構築を目指すことを本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

超弦の場の理論の作用の構成には大きな進展があったものの、いくつかの定式化があり、互いに物理的には等価であるもののそれぞれに長所と短所があってさらに改良の余地があると考えられる。超弦の場の理論のより本質的な進展のためには、ゲージ不変性と超リーマン面の超モジュライ空間との関係の理解が鍵になると考えられ、また、国友氏との共同研究で開発した手法と Sen によって開発された手法の関係を理解することも重要であろう。

その一方で、開いた超弦の場の理論を量子化することで AdS/CFT 対応を原理的には証明することができるような枠組みの構築を目指す研究も開始するべき段階に達していると考えられる。AdS/CFT 対応は、重力を含まない場の量子論によって重力を含む超弦理論の非摂動的な定式化を与えるものであると捉えることもでき、典型的な例では D ブレーン上の理論の低エネルギー極限を取ることで説明される。低エネルギー極限を取ることで弦の世界面の構造が見えにくくなってしまふことが AdS/CFT 対応の証明を試みる上での困難の一因となっているため、AdS/CFT 対応が成り立つメカニズムを解明するためには低エネルギー極限を取る前の理論を定式化することが有効であると考えられる。

また、開いた超弦の場の理論を量子論的に解析することが本質的に重要になるが、技術的には困難であるため、解析する際に有効な道具を整備することも必要であろう。

## 4. 研究成果

(1) 超リーマン面の超モジュライ空間の分割に基づく開いた超弦の場の理論の構成法の開発  
前述したように超弦の場の理論のより本質的な進展のためにはゲージ不変性と超リーマン面の超モジュライ空間との関係の理解が鍵になると考えられ、このような動機に基づき当時米国プリンストン高等研究所の研究者であった大森氏との共同研究により、超リーマン面の超モジュライ空間の分割に基づく開いた超弦の場の理論の構成法を開発し、ボソンを記述する弦の場の 4 次までの相互作用を具体的に構成した。

## (2) Level-matching 条件を課さない閉じた弦の場の理論の構成

国友氏との共同研究で開発した手法と Sen によって開発された手法の違いは超リーマン面の超モジュライ空間のフェルミオンのなモジュライの取り扱いに関係している。このことは、より扱いが簡単なボソンのなモジュライも 2 通りの方法で取り扱うことができることを示唆していて、そのようなボソンのなモジュライの代表的な例は閉じた弦の場に対する level-matching 条件と関係している。このような動機に基づき、当時修士課程の大学院生であった坂口氏との共同研究で、余計な自由な場を導入することにより閉じた弦の場に対して level-matching 条件を課さずに閉じた弦の場の理論を構成することに成功した。なお、研究成果を国際研究会“Discussion Meeting on String Field Theory and String Phenomenology”で発表した際、相互作用の構成に関する問題点の指摘があり、その問題点を解決したあと arXiv:2209.06173 として研究成果を発表した。

## (3) 開いた超弦の場の理論を用いた AdS/CFT 対応の証明に向けてのアプローチ

AdS/CFT 対応における曲がった時空での閉じた弦の理論は、Dブレーンが存在する状況での開いた弦と閉じた弦の理論から導かれる。開いた弦の状態には質量がゼロの粒子も存在し得るが、AdS/CFT 対応で考えている状況では開いた弦の自由度を経路積分することができ、穴が開いた世界面を持つ閉じた弦の理論が整合的な摂動論を与えることを指摘した。さらに Witten により構成されたスター積を用いた 3 次の相互作用を持つ開いたボソニックな弦の場の理論においては、on-shell 条件を満たす閉じた弦の状態ひとつに対してひとつのゲージ不変な演算子を構成することができるが、N 枚の重なった Dブレーンが存在する状況で、そのようなゲージ不変な演算子の相関関数の  $1/N$  展開による評価は、適切な低エネルギー極限においては穴が開いた世界面を持つ閉じた弦の理論の摂動論を再現することが分かった。従って、有限の N に対して開いた弦の場の理論を量子化することができれば、重力を含む閉じた弦理論の非摂動的な定式化を与える可能性がある。開いたボソニックな弦の場の理論は一般的にはタキオンが存在して整合的な量子論にはならないと考えられるが、位相的な弦理論への応用や低い次元の理論では量子化が可能であると考えられる例が知られている。さらにタキオンが存在しない開いた超弦の場の理論に研究成果を拡張することができれば、穴が開いた世界面を持つ閉じた超弦理論の非摂動的な定式化を与える可能性がある。研究成果は 2019 年にフィレンツェで開催された国際会議“International Conference on String Field Theory and String Perturbation Theory”で発表し、講演の内容を arXiv:2006.16449 として発表した。なお、当初の研究の目的では重力を含む量子論の有効理論として閉じた超弦の場の理論を導出することを想定していたが、ゲージ不変演算子を構成する際に閉じた弦の状態に on-shell 条件を課すことの影響で、閉じた超弦の場の理論の on-shell 散乱振幅に近い構造の理論しか得ることができない見込みとなった。しかし、AdS 時空の境界付近での閉じた弦の振る舞いは on-shell 散乱振幅に類似したものであり、また、低エネルギー極限を取ることで質量を持たない場についての on-shell 条件は自明に満たされるようになるので AdS 時空での境界条件には影響を与えないと考えている。

## (4) 開いたボソニックな弦の場の理論のゲージ不変演算子の低エネルギー極限

AdS/CFT 対応を証明することができる枠組みの構築に向けて Dブレーン上の理論の低エネルギー極限を取る前の理論として開いた弦の場の理論を考える際、開いた弦の場の理論のゲージ不変演算子の相関関数を考え、その低エネルギー極限の振る舞いを調べることが重要になる。当時大学院生であった光山氏と学部学生であった鈴木氏との共同研究により、開いたボソニックな弦の場の理論の作用にゲージ不変演算子のソース項を加え、質量がある場を古典的に積分することで質量がない場に関する有効作用を導出した。開いたボソニックな弦の場の理論のゲージ不変演算子は開いた弦の場に線形に依存し、AdS/CFT 対応で考える通常のエネルギー運動量テンソルなどのゲージ不変演算子と一見異なって見えるが、質量がある場を積分する過程で開いた弦の場に関する非線形な依存性が現れることが分かった。また、有効理論でのゲージ変換はソース項に依存して変形されることが分かり、ソース項に関して非線形な項もゲージ不変性から要請されることが分かった。このゲージ変換の変形は有効作用の形と関連していて、有効作用と変形されたゲージ変換は同じ多弦積を用いて表すことができ、多弦積は弱い  $A_\infty$  関係式と呼ばれる関係式を満たすことが分かった。一般に有効作用は極めて複雑な形になるが、弱い  $A_\infty$  関係式を満たす多弦積に関する数学的な手法を利用し、多弦積の結合定数に関する全次数の表式を導いた。研究成果は光山氏と鈴木氏との共著で arXiv:2006.16710 として発表した。

## (5) ホモトピー代数を用いたスカラー場の理論の one-loop 散乱振幅の繰り込み

AdS/CFT 対応を証明することができる枠組みの構築に向けて Dブレーン上の理論の低エネルギー極限を取る前の理論として開いた弦の場の理論を考える際、開いた弦の場の理論を量子論的に取り扱うことが本質的であり、技術的に困難であるが、ホモトピー代数を用いて作用を記述した場合、作用と散乱振幅の間には普遍的な関係式が存在し、通常の場合の量子論での計算から開いた弦の場の理論の量子論についての知見が得られることが期待される。ホモトピー代数を用いた通常の場合の量子論の記述に関しては、最も簡単なスカラー場の理論の摂動論においてさえ one-loop 近似での繰り込みを完全に実行した例はない。そのため、前述した動機に基づき当時

学部学生であった渋谷氏との共同研究でホモトピー代数を用いたスカラー場の理論の散乱振幅の one-loop 近似での計算を行った。その結果、場の量子論の教科書に書かれている結果を完全に再現することを確認し、その過程で one-particle irreducible 有効作用による表現のホモトピー代数を用いた記述方法が明らかになり、渋谷氏との共著論文を執筆中である。

(6) ホモトピー代数を用いたスカラー場の理論の相関関数の公式の発見

AdS/CFT 対応を証明することができる枠組みの構築に向けてDブレーン上の理論の低エネルギー極限を取る前の理論として開いた弦の場の理論を考える際、ゲージ不変演算子の相関関数を取り扱うことになるが、ホモトピー代数を用いて相関関数を表す方法は場の量子論でも知られていなかった。ホモトピー代数を用いて散乱振幅を記述する際、ファインマン図を代数的に生成することができるということが重要であり、少なくとも摂動論では相関関数をホモトピー代数を用いて表す方法が存在すると予想し、渋谷氏との共同研究で得られた知見に基づきスカラー場の理論の相関関数を表す公式を発見し、その公式に基づく相関関数が Schwinger-Dyson 方程式を満たすことを摂動論の枠内で示した。研究成果は arXiv:2203.05366 として発表した。

(7) ホモトピー代数を用いた Dirac 場の理論の相関関数の公式の構築

私が指導教員を担当している大学院生である鴻巣氏との共同研究で、ホモトピー代数を用いたスカラー場の理論の相関関数の公式を Dirac 場を含む理論に拡張することに成功し、共著論文を arXiv:2305.11634 として発表した。フェルミオンの相関関数の反対称性を実現するため、弦の場の理論において弦の場を用いて成分場を記述する方法に類似した方法を採用したが、その方法はボソンとフェルミオンを統一的に表現できる極めて汎用性の高い表式であることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kantaro Ohmori and Yuji Okawa	4. 巻 4
2. 論文標題 Open superstring field theory based on the supermoduli space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 35
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP04(2018)035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 10件 / うち国際学会 10件）

1. 発表者名 大川 祐司、鴻巣 圭佑
2. 発表標題 Correlation functions involving Dirac fields from homotopy algebras
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大川 祐司
2. 発表標題 Correlation functions of scalar field theories from homotopy algebras
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大川 祐司、渋谷 翔之
2. 発表標題 Renormalization of one-loop scattering amplitudes in scalar field theories via homotopy algebras
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Correlation functions of scalar field theories from homotopy algebras
3. 学会等名 HirosiFest @ Kavli IPMU (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Correlation functions of scalar field theories from homotopy algebras
3. 学会等名 String Field Theory 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuji Okawa and Barton Zwiebach
2. 発表標題 Achievements, Progress and Open Questions in String Field Theory
3. 学会等名 Strings 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Panel discussion on "String field theory beyond string theory"
3. 学会等名 SFT@Cloud 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Gauge-invariant operators of open bosonic string field theory in the low-energy limit
3. 学会等名 2020 Workshop on String Field Theory and Related Aspects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Gauge-invariant operators of open bosonic string field theory in the low-energy limit
3. 学会等名 Homotopy Algebra of Quantum Field Theory and Its Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Nonperturbative definition of closed string theory via open string field theory
3. 学会等名 International Conference on String Field Theory and String Perturbation Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 光山 大貴、大川 祐司、鈴木 ななみ
2. 発表標題 Gauge-invariant operators of open bosonic string field theory in the low-energy limit
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 光山 大貴、大川 祐司、鈴木 ななみ
2. 発表標題 Weak A structure in the low-energy limit of open bosonic string field theory with gauge-invariant operators
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大川 祐司
2. 発表標題 Open superstring field theory based on the supermoduli space
3. 学会等名 信州大学松本キャンパスでの日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Open superstring field theory based on the supermoduli space
3. 学会等名 台湾の国立交通大学での The 4th NCTU-Yau mini-workshop on string theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Complete formulations of superstring field theory
3. 学会等名 Quantum Gravity, String Theory and Holography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Yuji Okawa
2. 発表標題 Closed string field theory without the level-matching condition
3. 学会等名 Discussion Meeting on String Field Theory and String Phenomenology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関