

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24540254

研究課題名(和文) 開弦の場の理論は何を記述できるのか

研究課題名(英文) What is open string field theory able to describe?

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・准教授

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)：弦理論の非摂動的な定式化へのアプローチである弦の場の理論の研究において、超弦の場の理論のフェルミオンを記述する部分を含む作用が構成できないということが約30年間にわたる最大の問題のひとつであったが、本研究において開弦の超弦の場の理論のボソンとフェルミオンの両方を記述するゲージ不変な作用の構成に成功した。これは古典的には完全な超弦の場の理論のローレンツ共変な定式化の最初の例である。

研究成果の概要(英文)：In string field theory, which is an approach to nonperturbative formulations of string theory, construction of an action of superstring field theory incorporating a sector which describes fermions had not been successful for about thirty years and it was one of the most serious obstacles. In this research we succeeded in constructing a gauge-invariant action for open superstring field theory which describes both bosons and fermions. This is the first complete formulation of superstring field theory at the classical level in a Lorentz-covariant fashion.

研究分野：数物系科学 物理学 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

一般相対性理論と量子力学をひとつの理論的な枠組みの中で矛盾なく記述することは、現在の理論物理学における最も重要な問題のひとつである。弦理論はこの難問の解決へ向けて重要な手がかりを与えると期待されている理論であるが、未完成な理論である。

弦理論は、on-shell 状態の散乱振幅の結合定数に関する摂動論であり、問題点のひとつは非摂動的に定式化されていないということである。また on-shell 状態の散乱振幅の理論なので、off-shell の定式化になっていない。さらに、background ごとに独立に摂動論が定式化されており、それらの background が普遍的な自由度の集合で記述できるかどうか分らず、この問題は通常 background independence の問題と呼ばれている。弦理論の問題点を一言で述べるとすると、弦理論を記述する基本的な自由度が何かが特定できていないということであると言えよう。

弦理論の非摂動的な定式化へのアプローチとしては、AdS/CFT 対応と呼ばれる双対性を用いた弦理論のゲージ理論による定式化や様々な行列模型を用いた定式化が活発に研究されている。これは特定のクラスの background での弦理論を定式化する方向性であるが、これらとは相補的な弦の場の理論というアプローチがある。電子などの粒子の生成消滅を場の理論で表すように、弦の場の理論は弦を場の理論を用いて記述しようとするもので、非摂動的な定式化に向けての自然なアプローチである。

弦の場の理論の研究は長い歴史があるが、2005 年に Schnabl が解析解の構成に初めて成功し、それを契機に弦の場の理論の解析的手法が大きく進展した。さらに Erler 及び私の超弦の場の理論での解析解の構成に基づき、これらの進展は超弦の場の理論にも拡張できることが明らかになった。今こそ超弦の場の理論の量子化を真剣に考える時期であろう。また、Schnabl の解は KBc 代数という簡単な代数構造に基づいていることを 2006 年に私が明らかにし、KBc 代数はその後の進展で中心的な役割を果たしている。

2. 研究の目的

弦理論には D ブレーンと呼ばれる非摂動的な励起があり、ソリトン解のようなものであると考えられている。また、弦は端点を持つ開弦と、輪ゴムのように端点を持たない閉弦があるが、開弦は D ブレーンの集団座標 (collective coordinates) のようなものであると考えられている。AdS/CFT 対応におけるゲージ理論や典型的な行列模型では、基本的な自由度は開弦に由来している。従って、特に開弦の場の理論を考えることが重要である。弦理論の非摂動的な定式化に向けて、弦理論の基本的な自由度を特定するステップとして、D ブレーン上の開弦の場の理論が

- (1) 閉弦の場合などの独立な自由度を加えることなく矛盾のない量子論となり得るか
- (2) 連続的に変形できないような D ブレーンを記述できるか
- (3) D ブレーンの生成・消滅を記述できるか

を明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 古典的には開弦の場の理論は矛盾のないゲージ理論である。しかし、開弦の場の自由度だけで矛盾のない量子論が構成できるかどうかは明らかではない。開弦を集団座標のようなものだと思うと、素朴には開弦の場だけでは不完全であるように思われる。実際、開弦の 2 つの端点が相互作用してくっつくところへ伝播できる。その一方、弦の場の理論の量子論の無矛盾性はリーマン面のモジュライ空間の分割という数学の問題と密接に関係しているが、その立場からは Witten 型の相互作用を持つ開弦の場の理論は特殊な極限に対応していて、閉弦の場の自由度を独立に加えなくても良い可能性が示唆される。一般に、本来必要な自由度の一部だけで量子論を構成しようとする、ユニタリー性の破れなどの問題が生じる。特に開弦の場の理論の場合には、古典論でのゲージ対称性の量子論での破れに関連すると考えられる。過去にこの問題は取り扱いの簡単なボソニックな開弦の場の理論では調べられてきたが、ボソニックな理論では background が不安定でタキオンを含むので、量子論は形式的なものにならざるを得ず、タキオンに由来する問題をきれいに分離できずに明確な結論が得られなかった。この問題を回避するために、タキオンのない開弦の超弦の場の理論の量子化を行い、閉弦などの独立な自由度を加えることなく量子論でゲージ対称性が保たれるかどうかを調べることを目指す。

(2) 1 次元的な広がりを持つ弦の時空での軌跡は 2 次元的な世界面となる。弦理論の consistent な background は、この 2 次元面上の理論の共形不変性と関係がある。開弦の場合は境界を持つ共形場の理論になり、境界を持つ共形場の理論と開弦の場の理論の古典解に対応があることになる。これはあるソリトン解の集団座標で別のソリトン解を記述できるか、という問題に対応している。従って、与えられた境界を持つ共形場の理論に対して、開弦の場の理論で対応する古典解を系統的に構成することがより具体的な本研究の目的となる。なお、連続的に変形できる D ブレーンに対応する古典解の系統的な構成は、私の過去の Kiermaier との共同研究により成功しており、連続的に変形できない場合への拡張が研究開始の時点で課題であった。この問題に対するひとつのアプローチとして、境界を持つ共形場の理論の境界条件を変える演算子を用いた開弦の場の理論の

解の構成が考えられるが、境界条件を変える演算子がある正則条件を満たす場合は、私の過去の Kiermaier, Soler との共同研究で解の構成に成功していた。さらに私の過去の野海氏との共同研究で、開弦の超弦の場の理論への拡張にも成功していた。そして正則条件を満たさない境界条件を変える演算子への拡張を行う際には、近年活発に議論されている繰り込み群に基づいたアプローチと融合させることを研究開始当初は考えていた。

なお、開弦の場の理論が「連続的に変形できないような D プレーンを記述できるか」と「D プレーンの生成・消滅を記述できるか」という問題に関しては、私が Kiermaier, Soler との共同研究で構成した解を私が考えていた方法とは別の方法で拡張することにより、平成 26 年度に Erler, Maccaferri が解を構成することに成功した。その一方、開弦の場の理論が「閉弦の場などの独立な自由度を加えることなく矛盾のない量子論となり得るか」という問題に関しては、後述するように私の飯森氏、野海氏、鳥居氏との平成 25 年度の共同研究を契機に研究開始の時点で想定していた以上に研究を進展させることができた。

4. 研究成果

(1) チェコ科学アカデミー物理学研究所の Schnabl 及び当時彼の大学院生であった Kudrna, 平成 24 年度まで駒場素粒子論研究室の大学院生であった増田氏、以前駒場素粒子論研究室に大学院生として在籍していた吉田氏との共同研究により、開弦の場の理論におけるゲージ不変量を用いて開弦の場の理論の古典解のパラメータとその古典解が記述する境界を持つ共形場の理論のパラメータを対応付ける手法を提案し、Siegel ゲージでのマージナル変形に対応する数値解に具体的に適用して、解がモジュライ空間をどのように覆っているかという長い間決定的な結論が出せないでいた問題に関して精度の高い結果を得た。

(2) 超弦の場の理論を定式化する際に、世界面上の超共形ゴーストセクターをどのように取り扱うかが大きな問題である。通常 small Hilbert space と呼ばれる状態空間を用いると、超リーマン面の超モジュライ空間との対応を通して超弦の場の理論のゲージ対称性の本質的な理解につながると期待されるが、これまでのアプローチでは局所的な picture-changing 演算子を用いていて、その特異性から超弦の場の理論をうまく定式化することができなかった。一方、開弦の超弦の場の理論においては、Berkovits が large Hilbert space と呼ばれる状態空間を用いてボソンのセクターについては特異性のない定式化を実現することに成功していたが、なぜこの方法でうまく行くのかについての理解は進んでいなかった。以前に東京大学駒場素粒子論研究室で研究指導受託をしていた

当時名古屋大学の大学院生であった飯森氏、当時理化学研究所の基礎科学特別研究員であった野海氏、鳥居氏との平成 25 年度の共同研究に基づき、我々は Berkovits 型の超弦の開弦の場の理論のゲージ対称性を部分的にゲージ固定することにより、small Hilbert space に基づく特異性のない超弦の開弦の場の理論が構成できることを明らかにした。特に 4 点散乱振幅を詳細に調べ、Berkovits 型の定式化での 4 点相互作用がこれまでの small Hilbert space に基づく定式化での問題点を解消するメカニズムを明らかにした。これは small Hilbert space に基づく超弦の場の理論の定式化は困難であるというこれまでの思い込みを打破する重要な研究成果であり、実際、この研究成果により超弦の場の理論のフェルミオンを記述する部分や量子化についてのこれまでの困難の本質的な解決につながる道筋が切り開かれた。

(3) 超弦理論でフェルミオンを記述するには、弦の世界面上の共形場理論において Ramond sector を組み入れる必要があるが、超弦の場の理論の研究においては Ramond sector を含む部分の作用が構成できないということが約 30 年前からの問題であった。平成 27 年度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、開弦でフェルミオンを記述する Ramond sector を含むゲージ不変な超弦の場の理論の作用を構成することに成功し、この長年の問題を解決した。これは古典的には完全な超弦の場の理論のローレンツ共変な定式化の最初の例である。長年の問題の解決の鍵は Ramond sector の弦の場に対して適切な制限を課すことであったが、この制限自体は約 30 年前に既に知られていた。今回、超リーマン面の超モジュライ空間の観点からのこの制限の意味を明らかにしたことが概念的に重要であった。また、開弦でボソンを記述する Neveu-Schwarz sector に関する平成 25 年度の飯森氏、野海氏、鳥居氏との共同研究以来の急速な研究の進展により、それまでゲージ不変な作用の構成の際に使うことが考えられていなかった新たな材料の有用性が明らかになったことや、弦の場に関して高次の相互作用項を閉じた形で書き下すための超共形ゴーストの large Hilbert space の使い方に関して新たな知見が得られたことが、今回の Ramond sector を含む作用の構成にあたって技術的に重要であった。ボソニックな弦理論にはスペクトラムにタキオンが存在するため、量子化は形式的なものにならざるを得ないが、そのようなタキオンに由来する不安定性のない background が可能な超弦の場の理論の完全な作用が構成できたことで、超弦の場の理論の量子論的な側面を調べる出発点に立つことができた。なお、この国友氏との共著論文により、日本物理学会第 22 回論文賞を受賞した。

(4) 平成 27 年度の国友氏との共同研究によ

り、開弦でフェルミオンを記述する Ramond sector を含むゲージ不変な超弦の場の理論の作用の構成に成功したが、弦の場の理論の作用をゲージ固定して量子化するには、ゲージ対称性の構造が複雑であるため通常用いられる BRST 量子化を拡張した Batalin-Vilkovisky 量子化が用いられる。国友氏との共同研究で構成した作用はボソンを記述する Neveu-Schwarz sector に関しては Berkovits が構成した作用を採用していたが、この作用の Batalin-Vilkovisky 量子化は困難であることが以前の共同研究で明らかになっていた。Batalin-Vilkovisky 量子化は、作用が A 構造と呼ばれる性質を持つ弦の積を用いて書かれていると容易に遂行できることが知られているが、平成 28 年度のルートヴィヒ・マクシミリアン大学ミュンヘンの Erler, 研究室の大学院生である竹寄氏との共同研究により、Erler, Konopka, Sachs によって開発された A 構造を持つ弦の積の構成法を国友氏との共同研究で用いた Ramond sector に課す制限と両立するように工夫することで、フェルミオンを記述する Ramond sector を含み A 構造を持つ開弦の超弦の場の理論の作用の構成に成功した。この作用は A 構造を持つという長所がある一方、国友氏との共同研究で構成した作用とは違って高次の相互作用が閉じた形では与えられていないという短所があるが、以前の Erler, 竹寄氏との共同研究で開発した手法を拡張することによって 2 つの作用が等価であることを示し、2 つの作用の弦の場がどのように関係しているかを明らかにした。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

- 1 T. Erler, Y. Okawa and T. Takezaki, Complete action for open superstring field theory with cyclic A structure, Journal of High Energy Physics 08 (2016) 012, DOI: 10.1007/JHEP08(2016)012, 査読有
- 2 H. Kunitomo and Y. Okawa, Complete action for open superstring field theory, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2016) 023B01, DOI: 10.1093/ptep/ptv189, 査読有
- 3 Y. Iimori, T. Noumi, Y. Okawa and S. Torii, From the Berkovits formulation to the Witten formulation in open superstring field theory, Journal of High Energy

Physics 03 (2014) 044,

DOI: 10.1007/JHEP03(2014)044, 査読有

4 M. Kudrna, T. Masuda, Y. Okawa, M. Schnabl and K. Yoshida, Gauge-invariant observables and marginal deformations in open string field theory, Journal of High Energy Physics 01 (2013) 103,

DOI: 10.1007/JHEP01(2013)103, 査読有

5 Y. Okawa, Analytic Methods in Open String Field Theory, Progress of Theoretical Physics 128 (2012) 1001-1060, DOI: 10.1143/PTP.128.1001 査読有

[学会発表](計 3 件)

- 1 Yuji Okawa, Complete action for open superstring field theory I, VIII Workshop on String Field Theory and Related Aspects, 2016 年 6 月 1 日, サンパウロ (ブラジル)
- 2 大川祐司, 超弦の場の理論の完全な定式化, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学泉キャンパス(宮城県・仙台市泉区)
- 3 飯森悠樹, 野海俊文, 大川祐司, 鳥居真吾, Berkovits 型の超開弦の場の理論を用いた Witten 型理論の正則化, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 12 日, 京都産業大学 (京都府・京都市)

6. 研究組織

(1) 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・准教授
研究者番号: 10466823