

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21740161

研究課題名（和文） 弦の場の理論を用いて探る弦理論の基本的な自由度

研究課題名（英文） Exploring fundamental degrees of freedom of string theory using string 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・准教授

研究者番号：10466823

研究成果の概要（和文）：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て開弦の場の理論の解析解を構成することに成功し、さらに解析解を超弦の開弦の場の理論に拡張した。境界条件を変える演算子がある正則条件を満たしている場合に限定されてはいるが、弦理論の異なる古典解のまわりの理論が同じ自由度で記述されるかどうかという重要な問題に向けての有望なアプローチになり得ると考えられる。また超弦の開弦の場の理論の量子化に向けての第一歩として、自由な理論のゲージ固定条件を詳細に調べ、伝播関数を求めた。

研究成果の概要（英文）：We constructed analytic solutions of open string field theory using boundary condition changing operators in boundary conformal field theory and extended the solutions to open superstring field theory. Although our construction is limited to the case where the boundary condition changing operators satisfy some regularity conditions, it can be a promising approach to the important problem of whether string theories around different backgrounds can be described by a universal set of degrees of freedom. We also took a first step to the quantization of open superstring field theory by studying gauge fixing conditions of the free theory in detail and by deriving associated propagators.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：弦の場の理論、弦理論、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、現代の理論物理学における最も重要な問

題のひとつである。弦理論はこの難問に対する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、結合定数に関する摂動論としてしか定義されておらず、弦理論の非摂動

的な定式化を求めて世界中で精力的に研究が行われている。

弦理論が摂動的にしか定義されていないという意味は、通常の場合の理論で言えばひとつの古典解を選んでそのバックグラウンドのもとでの散乱振幅のファインマン則が与えられているということに対応している。摂動級数は収束しないので、選んだ古典解の無限小近傍の情報しか原理的に得ることができないという問題のほか、複数の古典解があった場合、それらのまわりの摂動論が同じ自由度で記述されるのかどうか分からないという問題がある。これは弦理論の基本的な自由度は何なのかという重要な問題で、しばしば **background independence** の問題と呼ばれている。例えば開弦の理論では、古典解は境界を持つ2次元の共形場の理論に対応するので、境界を持つ様々な共形場の理論に基づく開弦の理論が普遍的な自由度で記述され得るかどうかという問題である。

弦理論の非摂動的な定式化については、**AdS/CFT** 対応に基づいたものや様々な行列模型を用いたものが幅広く研究されている。これらのアプローチには、量子重力を含む弦理論をゲージ理論を用いて定式化するという一般的な特徴があり、ゲージ理論と重力理論の双対性と呼ばれることも多い。典型的なゲージ理論と重力理論の双対性において、ゲージ理論は開弦のセクターのある極限として得られる。一方、弦理論において重力は閉弦のセクターに含まれており、ゲージ理論と重力理論の双対性は、閉弦の自由度が開弦の自由度で記述できるということを示唆している。通常の弦理論の摂動論では開弦と閉弦は独立な自由度として導入されているので、弦理論の基本的な自由度を探る上で、閉弦の自由度が開弦の自由度を用いて記述されるのかどうかは重要な問題である。

2. 研究の目的

本研究では、弦の場の理論を用いてこれらの問題に取り組み、弦理論の基本的な自由度を探ることを目的とする。

弦の場の理論は、その名前が示す通り、弦理論の摂動論を再現するような作用を構成するという非摂動的定式化に向けての自然なアプローチである。1986年に **Witten** によって構成された開弦の場の理論の最初の解析解であるタキオン凝縮の解が 2005年に **Schnabl** によって構成され、それを契機に弦の場の理論の解析的手法が飛躍的に発展している。2002年頃より弦の場の理論の研究を集中的に行っており、2007年1月に **Kiermaier, Rastelli, Zwiebach** との共同研究により、マージナル変形と呼ばれる古典解の変形に対する新たな解析解の構成に成功した。Schnablも独立に同時期に同じ解析解の

構成に成功したが、この解は 2005年のタキオン凝縮の解と異なる最初の解析解であり、この研究成果により近年の進展がタキオン凝縮というひとつの問題に限らず、より普遍的であるという展望を開くことができたと考えている。さらに 2007年4月にはマージナル変形の解析解を **Berkovits** が 1995年に定式化した超弦の開弦の場の理論で構成することに成功した。**Erler** も独立に同時期に超弦の開弦の場の理論の解析解の構成に成功したが、これは 1995年に **Berkovits** が超弦の開弦の場の理論を構成して以来、最初の超弦の開弦の場の理論の解析解である。この研究成果により近年の進展がボソニックな弦理論のみならず超弦理論へも拡張できるという展望を示すことができたと考えている。

3. 研究の方法

境界を持つ様々な共形場の理論に基づく開弦の理論が普遍的な自由度で記述され得るかどうかという問題に対して弦の場の理論を用いてアプローチする場合、境界を持つ2次元の共形場の理論がひとつ与えられたときに、対応する開弦の場の理論の古典解を系統的に構成することができるかどうか重要な課題となる。境界を持つ共形場の理論において、共形不変性を保つ異なる境界条件は、境界条件を変える演算子 (boundary condition changing operator) を用いて記述することができるので、境界条件を変える演算子を用いて開弦の場の理論の解を構成するというアプローチが考えられる。また、共形場の理論は、繰り込み群の固定点に相当するので、2次元の場の理論の境界での相互作用の繰り込み群に基づいて開弦の場の理論の解を構成するというアプローチも考えられる。将来的にはこれら2つのアプローチを融合させることが重要だと思われるが、本研究では境界条件を変える演算子を用いる方法を追求した。

開弦と閉弦が独立な自由度かどうかという問題に対する弦の場の理論を用いたアプローチとしては、開弦の場の理論の量子化を考察することが考えられる。開弦の場の理論は、古典的には矛盾のないゲージ理論であるが、そのゲージ不変性が量子論で保たれるかどうかは鍵となる。もしもゲージ不変性が量子論でも保たれるならば、閉弦も開弦の場を用いて記述できるという可能性が示唆される。もしもゲージ不変性が量子論で破れている場合は、開弦の場以外に閉弦の場などの自由度が必要であることが示唆される。しかし、ボソニックな開弦の場の理論にはタキオンが存在するため、量子論は形式的なものにならざるを得ない。そこでタキオンがない超弦の開弦の場の理論の量子化を考察すること

が重要である。

4. 研究成果

境界を持つ共形場の理論が共形不変性を保ったまま連続的に変形できる場合には、境界条件を変える演算子を用いて対応する古典解を系統的に構成することに成功していたが、境界条件を変える演算子を変形パラメータに関して展開する必要があったため、より一般的な古典解の構成には適用できなかった。本研究では、プリンストン大学の Kiermaier, Madrid UAM/CSIS 理論物理学研究所の大学院生である Soler との共同研究により、境界を持つ共形場の理論における境界条件を変える演算子を変形パラメータに関して展開することなくそのまま用いて開弦の場の理論の解析解を構成することに成功した。境界条件を変える演算子がある正則条件を満たしている場合に限定されてはいるが、一般の境界条件に対応する開弦の場の理論の解の構成に向けて有望なアプローチになり得ると考えられる。解析解はもとの境界条件での任意の境界上の演算子と一対の境界条件を変える演算子の 3 点相関関数の情報から構成される。このように境界を持つ共形場の理論のどのような情報から解を構成できるかを明らかにしたことが重要な点のひとつである。また今回の解の構成はタキオンの動的凝縮過程に適用することができ、級数で与えられる解析解の収束性をこれまでに構成されていた別のゲージでの解では示すことができなかったが、今回の解では解析的に示すことに成功した。

さらにこの研究成果を拡張し、研究室の大学院生である野海氏との共同研究により、境界を持つ共形場の理論における境界条件を変える演算子を用いて、Berkovits 型の超弦の開弦の場の理論の解析解を構成することに成功した。Kiermaier, Soler との共同研究での解析解に基づいた構成であるため、同様に境界条件を変える演算子がある正則条件を満たしている場合に限定されてはいるが、一般の境界条件に対応する開弦の場の理論の解の構成に向けて、超弦の開弦の場の理論においても有望なアプローチになり得ると考えられる。

このように近年の開弦の場の理論における解析的手法の進展は、超弦の開弦の場の理論にも拡張されてきているので、超弦の開弦の場の理論の量子化を真剣に考えるべき時期が来ていると考えられる。そこでテルアビブ大学の Kroyter, チェコ科学アカデミー物理学研究所の Schnabl, 研究室の大学院生である鳥居氏、マサチューセッツ工科大学の Zwiebach との共同研究により、Berkovits 型の超弦の開弦の場の理論の量子化に向けての第一歩として、自由な理論のゲージ固定条

件を詳細に調べ、伝播関数を求めた。ボソニックな開弦の場の理論の場合と同様に、ghosts for ghosts, ghosts for ghosts for ghosts など無限の種類の開弦の場が必要になるが、世界面上の共形場の理論のどのような量子数を持つ開弦の場が現れるかを同定し、Batalin-Vilkovisky 形式におけるマスター方程式の解を構成した。

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 M. Kroyter, Y. Okawa, M. Schnabl, S. Torii and B. Zwiebach, Open superstring field theory I: gauge fixing, ghost structure, and propagator, Journal of High Energy Physics 1203 (2012) 030, 査読有
- ② T. Noumi and Y. Okawa, Solutions from boundary condition changing operators in open superstring field theory, Journal of High Energy Physics 1112 (2011) 034, 査読有
- ③ M. Kiermaier, Y. Okawa and P. Soler, Solutions from boundary condition changing operators in open string field theory, Journal of High Energy Physics 1103 (2011) 122, 査読有
- ④ M. Kiermaier and Y. Okawa, General marginal deformations in open superstring field theory, Journal of High Energy Physics 0911 (2009) 042, 査読有
- ⑤ M. Kiermaier and Y. Okawa, Exact marginality in open string field theory: a general framework, Journal of High Energy Physics 0911 (2009) 041, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① 増田暢、大川祐司、Comments on multi-brane solutions in open string field theory, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 17 日、弘前大学文京町キャンパス
- ② 野海俊文、大川祐司、Solutions from boundary condition changing operators in open superstring field theory, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 17 日、弘前大学文京町キャンパス
- ③ Michael Kiermaier, 大川祐司, Pablo Soler, Solutions from boundary condition changing operators in open string field theory, 日本物理学会 第 66 回年次大会、2011 年 3 月 26 日、新潟大学五十嵐キャンパス
- ④ 大川祐司、鳥居真吾、Cubic terms in the BV formalism for open superstring field theory in the Berkovits formulation, 日本

物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学戸畑キャンパス

⑤ 大川祐司、鳥居真吾、Gauge fixing of open superstring field theory in the Berkovits non-polynomial formulation, 日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学津島キャンパス

⑥ 大川祐司、The boundary state from open string fields, 日本物理学会 2009 年秋季大会企画講演(招待講演)、2009 年 9 月 11 日、甲南大学岡本キャンパス

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：