

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03972

研究課題名（和文）開弦の場の理論から迫る閉弦のダイナミクス

研究課題名（英文）The dynamics of closed strings approaching from open string field theories

研究代表者

高橋 智彦（Takahashi, Tomohiko）

奈良女子大学・自然科学系・教授

研究者番号：10324956

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：弦理論における2点散乱振幅がBRST対称性をもつ演算子形式で計算できることを明らかにした。この計算手法において、我々は新たにmostly BRST exact演算子という概念を導入し、2点散乱振幅のみならず、この演算子が一般の散乱振幅の計算において機能することを明らかにした。閉弦2点振幅の研究では、閉弦頂点演算子と降下方程式の関係を明らかにし、従来の頂点演算子を拡張することに成功した。この拡張された頂点演算子を用いて、ディラトンの1点関数を計算できることを示し、局所的な演算子であるが、オイラー数という大局的な寄与が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

弦理論における2点散乱振幅は、ゲージ固定されない自由度が残るためゼロになると数十年間信じられてきた。BRST形式を用いてこの2点振幅が有限の値として得られることが明らかになったことで、このドグマが覆されたのであり、学術的意義は非常に大きいと言える。また、この研究を通じて、mostly BRST exact演算子という新しい概念が導入され、閉弦頂点演算子と降下方程式との関係が解明された。これらの新たな考え方は、開弦の場の理論における閉弦のダイナミクスの研究に役立つことが期待される成果である。

研究成果の概要（英文）：We have proposed that two-point scattering amplitudes in string theory can be calculated using an operator formalism with BRST symmetry. In this calculation method, we introduced a new concept called the mostly BRST exact operator, and showed that this operator works well not only for two-point scattering amplitudes but also for the calculation of general scattering amplitudes.

In the study of two-point amplitudes of closed strings, we clarified the relationship between closed string vertex operators and descent equations, and succeeded in extending the conventional vertex operators. Using these extended vertex operators, we showed that it is possible to calculate the one-point function of the dilaton, revealing that although it is a local operator, it yields the Euler characteristic as a global contribution.

研究分野：素粒子論

キーワード：弦理論 二点散乱振幅 BRST形式 降下方程式 ディラトン1点関数 閉弦頂点演算子

1. 研究開始当初の背景

重力の理論と量子力学とが矛盾なく融合した理論を構築することは、素粒子論における積年の課題である。この重力の量子化の問題を解決する理論として最も有望なのが弦理論であり、その研究成果は理論物理学や数学において多大な影響を及ぼしてきた。しかし、弦理論を重力や宇宙の問題に適用して、素粒子物理学における統一理論、重力の量子論の研究のみならず、宇宙物理学における宇宙の起源の研究を進展させるためには、弦理論の指導原理・基本法則を明らかにする必要がある。この問題を打破するために、ゲージ対称性に基づく弦の場の理論が構築され、日本の研究グループが世界の研究動向の一翼を担ってきた。

その後、弦の場の理論は進展が難しい局面を強いられたが、タキオン凝縮の数値解析が 2000 年に成功を収めて以降、弦の場の理論の研究が再び世界的に活性化した。現在では様々な古典解が解析的に構成され、弦理論の非摂動的な解析ツールとして認知されるに至っている。

新しい成果が毎年見られるようになったものの、弦の場の理論において明らかにされてきた非摂動効果は、境界が開いた弦(開弦)に関するものばかりで、境界が閉じた弦(閉弦)のダイナミクスについての進展がなかった。重力子は閉弦の一状態として現れるため、宇宙の起源と関係する時空のコンパクト化等の機構は、閉弦のダイナミクスの中に隠されていると考えられる。つまり、なぜ時空が 4 次元であるのか、なぜ宇宙が膨張するのか、という問いに答えるはずの閉弦のダイナミクスの問題に対しては、弦の場の理論からも切り込むのが難しい状況であった。

2. 研究の目的

開弦の場の理論における閉弦の記述方法を確立し、そこから理論の構造を理解することによって、膨張宇宙や時空のコンパクト化に関わる閉弦のダイナミクスを明らかにしていくことが本研究の目的である。さらに、弦の場の理論の研究を通じて、弦理論におけるゲージ対称性の構造、弦理論の背後にある指導原理の全容を明らかにし、素粒子物理学における統一理論および重力の量子論の研究を進展させることを目指す。

3. 研究の方法

開弦の場の理論におけるタキオン真空解と物性理論におけるサイン二乗変形との関係を足掛かりにした研究を進める。タキオン真空上では D ブレーン上の開弦が消滅し、バルク時空内の閉弦のみが存在すると考えられている。一方、境界をもつ開いた系にサイン二乗変形を行った系の基底状態は、境界のない閉じた系の基底状態に等しいことが物性理論において 15 年程前から知られていた。そして 2018 年、タキオン真空上の開弦の場の理論において、サイン二乗変形に伴う連続ピラソロ対称性が存在することが、岸本(分担)-北出-高橋(代表)によって明らかにされた。この結果は、タキオン真空上の開弦の場の理論がサイン二乗変形を行った系を記述することを意味し、サイン二乗変形を行った系の基底状態の結果を踏まえれば、タキオン真空上の開弦の場の理論によって閉弦を扱える可能性を示している。

タキオン真空上の開弦の場の理論によって閉弦を取り扱うためには、まず、この理論におけるゲージ不変量を計算する必要がある。タキオン真空上の伝搬関数がつくる世界面は、開弦の境界が 1 点につぶれた面をなすが、これはまさに閉弦がつくる閉じた世界面であり、ゲージ不変量の相関関数によって、閉弦の散乱振幅が計算できると期待されるのである。

最も単純な閉弦のみの二点関数は、二つのゲージ不変量をタキオン真空上の伝播関数でつなぐことで得られると考えられる。ところが、閉弦のみの二点関数はゼロとなると長く信じられていたため、ゲージ不変量と閉弦散乱振幅の関係を議論するために、閉弦二点振幅についての性質を明らかにする研究が必要であった。

偶然にもこの頃、2020 年 6 月に、Erbin-Maldacena-Skliros によって、場の理論の意味で正しい二点関数が弦理論で再現されることが経路積分形式を用いて示された。この結果を受けて高橋(代表)-関(分担)は、演算子形式で正しく閉弦二点関数を導く頂点演算子を構成する研究を行った。この研究をもとに、閉弦二点振幅を導出する方法を見出し、タキオン真空上での相関関数の計算に応用できる基礎を築いていくことにした。

4. 研究成果

(1) 我々は mostly BRST exact 演算子を構成し、この演算子を挿入することによって開弦 2 点振幅を正しく計算できることをわかっていたが、同様の挿入によって、開弦 3 点振幅が正しく計算できることを示した。また、この演算子を 2 つ挿入した相関関数から、開弦 2 点振幅が得られることも示した。これらの結果は、この演算子がゲージ固定を課す演算子として正しく機能することを意味している。

さらに、この演算子を挿入した 5 点関数から、開弦 4 点振幅(Veneziano 振幅)を導出することに成功した。5 点関数のモジュライ空間は複素 1 次元空間であり、基本となる五角形が張り合わされた複雑な構造をもっている。モジュライ空間の積分において、物理的に寄与する特異性を抜き出すことにより、実 1 次元積分のみをもつ Veneziano 振幅となることを明らかにした。この

際、BRST 不変性と時空がミンコフスキー空間であることが重要なはたらきをすることがわかった。また、これまでの結果に基づいて、mostly BRST exact 演算子を挿入した一般の N 点開弦振幅の表式を予想した。

(2) mostly BRST exact 演算子を用いて閉弦のみの散乱振幅を導出するために、閉弦頂点演算子についての性質を明らかにした。まず、複素上半平面上に作用する $PSL(2, \mathbb{R})$ 群のゲージ固定に対する考察から、様々なゴースト数を持つ閉弦の頂点演算子を構築し、これらの演算子が BRST 形式における降下方程式をみたすことを明らかにした。この結果に基づき、ローレンツ共変なディラトン頂点演算子に対する降下方程式の解を構築し、ゴースト数 3 の局所的なディラトン頂点演算子を用いて、ディスク上のタッドポール振幅に対する正しい結果を得た。ディラトン振幅の結果においては、共形変換に由来する BRST exact 項からの非零の寄与が、通常は世界面上の積分として与えられるオイラー数の寄与に等しいことが明らかにできた。

(3) ゴースト数 3 の閉弦頂点演算子を用いて、閉弦 2 点振幅を BRST 形式において計算することに成功した。この計算法では共形不変性と BRST 不変性が明白であり、これが従来 of 導出法にはなかった特徴となっている。

先行研究によって、タキオン真空における開弦の場の理論には、閉弦理論がもつゲージ対称性が含まれており、最も単純なゲージ不変量が閉弦 2 点振幅を与えると予想されていたが、当初、閉弦 2 点振幅が BRST 形式で計算できるという考えすらなかった。このことを踏まえれば、本研究で明らかにした結果は、開弦の場の理論によって閉弦を記述するために重要な最初の一步であると考えられる。

なお、(2)(3)の研究成果は、研究期間内の 2024 年に arXiv にアップロードしている。研究期間を過ぎたが、これらは 2024 年 4 月に査読付き学術誌でオンライン出版されており、参考としてここに引用しておく。

“Closed string vertex operators with various ghost number”

Isao Kishimoto, Mako Kouga, Shigenori Seki, Tomohiko Takahashi,
Nuclear Physics B, Vol.1004 (2024) 116549-116549.

“Two-point closed string amplitudes in the BRST formalism”

Isao Kishimoto, Shigenori Seki, Tomohiko Takahashi,
Physics Letter B, Vol.853 (2024), 138657.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 822
2. 論文標題 Reduction of open string amplitudes by mostly BRST exact operators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136664 ~ 136664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136664	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 -
1. 著者名 Kishimoto Isao, Sasaki Tomoko, Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 974
2. 論文標題 The Veneziano amplitude via mostly BRST exact operator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 115647 ~ 115647
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2021.115647	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 -
1. 著者名 Kishimoto Isao, Takahashi Tomohiko	4. 巻 2021
2. 論文標題 Numerical twist-even SU(1,1)-singlet solutions in open string field theory around the identity-based solution	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP02(2021)133	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 -
1. 著者名 Kondo Aya, Takahashi Tomohiko	4. 巻 102
2. 論文標題 Supersymmetric nonlinear sigma models as anomalous gauge theories	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.025014	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 -

[学会発表] 計12件(うち招待講演 0件/うち国際学会 0件)

1. 発表者名 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 Mostly BRST Exact演算子によるVirasoro-Shapiro振幅の導出
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 閉弦の頂点演算子と降下方程式
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦, 山本蘭菜
2. 発表標題 Mostly BRST Exact演算子による開弦2点振幅の再考察
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 石井美優, 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 Mostly BRST Exact演算子と降下方程式によるVirasoro-Shapiro振幅の考察
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 新しいゲージ固定法を用いた閉弦の2点振幅の理解
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本功, 甲賀まこ, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 ゴースト数2をもつ新たな閉弦頂点演算子について
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東國沙紀, 岸本功, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 mostly BRST exact演算子を用いた開弦1ループ振幅の計算について
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 String amplitude given by mostly BRST exact operator
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸本功, 北出智巳, 佐々木智子, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 Mostly BRST Exact演算子によるVeneziano振幅の導出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岸本功, 北出智巳, 佐々木智子, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 BRST形式によるdilaton tadpole振幅の導出
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤綾, 関穰慶, 高橋智彦
2. 発表標題 4次元超対称非線形シグマ模型と双対性について
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤綾, 高橋智彦
2. 発表標題 4次元超対称非線形シグマ模型におけるコンペンセイター場とアノマリー
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020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
研究 分担者	岸本 功 (Kishimoto Isao) (60399433)	山陽小野田市立山口東京理科大学・共通教育センター・准教授 (25503)	
研究 分担者	関 穰慶 (Seki Shigenori) (60373320)	大阪市立大学・数学研究所・特別研究員 (24402)	

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
---------	---------