

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：25503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03933

研究課題名（和文）開弦の場の理論における数値解析から探る新たな弦理論の物理

研究課題名（英文）Exploring new physics in string theory from numerical analysis in open string field theory

研究代表者

岸本 功 (Kishimoto, Isao)

山陽小野田市立山口東京理科大学・共通教育センター・教授

研究者番号：60399433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：自然界の全ての現象を統一的に記述する理論の最有力候補は超弦理論であり、その非摂動的定式化の一つが弦の場の理論である。ここではボソニック開弦の場の理論の数値解の研究を行った。特に、数値解の単位弦場に基づく解周りまたは α -ゲージへの拡張や、摂動真空での数値的二重ブレン解・非摂動真空での一重ブレン解周りの理論のスペクトラムについてレベル切断近似による数値解析を行い、従来の解釈との整合性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超弦理論の非摂動的定式化の一つである弦の場の理論が実際の物理現象の記述に役立つことを示すには、具体的な計算を実行する必要がある。本研究で、ボソニック開弦の場の理論の枠組みで実際に数値計算を行い、既知の数値解を拡張したり、数値解周りのスペクトラムを求めたりしたことでその有効性を示すことができた。特に、非摂動真空を表す単位弦場に基づく解に関する本研究の成果はこれまでの物理的解釈を正当化することになった。

研究成果の概要（英文）：Superstring theory is one of the most likely candidates for the theory of everything and string field theory is one of its nonperturbative formulations. Here, we studied numerical solutions in the bosonic open string field theory. In particular, using the level truncation approximation, we extended numerical solutions to those around the identity-based solutions or in the α -gauges, conducted numerical analysis on the spectrum in the theory around the numerical double brane solution on the perturbative vacuum and the single brane solution on the nonperturbative vacuum, and clarified the consistency with earlier interpretations.

研究分野：素粒子論

キーワード：開弦の場の理論 レベル切断近似 数値解周りの理論 単位弦場に基づく解析解 二重ブレン α -ゲージ スペクトラム

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

超弦理論の摂動論を超えた定式化として超弦の場の理論が新たに整備されている状況にあったが、具体的な計算が多くなされてきたのは従来の Witten のボソンの開弦の場の理論である。

ボソンの開弦の場の理論の物理への応用として、Siegel ゲージのタキオン真空解を数値的に求めることがなされた後、対応する解析解、および、多重ブレーンを表す解析解が提案された。その後、文献[Kudrna-Schnabl(2018)]では、Siegel ゲージの数値的タキオン真空解については最高レベルの記録が([岸本(2011)]のレベル 26 を抜いて)レベル 30 にまで更新され、かつ、二重ブレーン解、ゴーストブレーン解等、他の数値解も構成された。ただし、Siegel ゲージを拡張した a -ゲージの数値解の構成についてはあまり進展がなく、また、様々な数値解周りの理論のスペクトラム等の解析についても課題は残されていた。

2. 研究の目的

ボソンの開弦の場の理論において、様々なゲージ条件を課してレベル切断近似を用いて運動方程式を解き、これまでに詳しく研究されてきたタキオン真空解以外の非自明な数値解を求め、その数値的振る舞いを詳しく調べて物理的解釈を与える。特に、ユニバーサルな開弦の場の配位において、近年提唱されているエキゾチックな解(二重ブレーン解、ゴーストブレーン解等)の存在について、ゲージ依存性の観点からそれらの妥当性を数値的に検証する。

このような数値計算を遂行することにより新しい解を発見し、弦の場の理論を指導原理とした数値的手法を用いて弦理論における新たな物理現象の発見を目指す。弦理論の非摂動的定式化としての弦の場の理論を、物理現象の解明に役立てることを目的とする。

3. 研究の方法

ボソンの開弦の場の理論で、開弦場の空間をレベル切断近似により有限次元に限ることで数値計算を行った。まず、Mathematica により計算に必要なプログラムを作成し、低いレベルまでの計算を実行して、従来の結果を再現できることを確認した後、より高い切断レベルで長時間走らせた。特に、Mathematica では大量のメモリが必要でかつ時間がかかりすぎる高レベル計算では、C++コードへ翻訳し並列化した。何度も使う弦の場の理論の相互作用項の計算データは一度計算しておいたものを保存し、後は繰り返し読み込ませて効果的に使用した。

Mathematica プログラムの実行は、本科研費で購入した MacPro と京都大学基礎物理学研究所の計算機(sushiki)等を活用した。C++コードの実行においては、MacPro および京都大学基礎物理学研究所のスパコン(XC40 および Yukawa-21)等を活用した。

- (1) ツイスト偶で $SU(1, 1)$ 対称性を持つ開弦場に限り、パラメータ値を変化させることで、摂動真空からタキオン真空に対応する単位弦場に基づく解周りの理論の二重ブレーン解、ゴーストブレーン解に対応するものを順に構成し、それらのエネルギー、ゲージ不変量、BRST 不変性、実性、2 次の恒等式等をそれぞれ数値的に評価した。
- (2) 開弦場をユニバーサルな空間に制限し、 a -ゲージ条件を Siegel ゲージ周り、および、Landau ゲージ周りそれぞれで課すことで、あらゆる実数 a に対して複数の数値解(タキオン真空解、二重ブレーン解、ゴーストブレーン解)を構成し、それらのエネルギー、ゲージ不変量、BRST 不変性、実性を評価した。
- (3) Imbimbo らが Siegel ゲージの数値的タキオン真空解周りで行ったスペクトラムの解析の手法と同様に、摂動真空での数値的二重ブレーン解周りの理論、および、単位弦場に基づく解によるタキオン真空での数値的一重ブレーン解周りの理論において、scalar 状態と vector 状態に限って運動項行列の固有値を解析して質量スペクトラムを評価した。

4. 研究成果

- (1) ボソンの開弦の場の理論で単位弦場に基づく解としてパラメータ $a(-1/2$ 以上)を持つ TT 解[高橋-谷本(2002)]があり、これは従来 $a > -1/2$ で純ゲージ、 $a = -1/2$ で非自明なタキオン真空解と解釈されてきている。この TT 解周りの理論において、Siegel ゲージの数値解を切断レベル 22 まで求めてそのエネルギーやゲージ不変量等の評価を行った。特に、Kudrna-Schnabl による数値的二重ブレーン解・ゴーストブレーン解からパラメータ a を変化させて新たな数値解を構成した[文献①]。この計算により、我々の以前の研究[岸本-高橋(2009)]で知られていた Siegel ゲージの数値的なタキオン真空(ブレーンなしに対応)、一重ブレーン解(摂動真空に対応)に加えて、二重ブレーン解、ゴーストブレーン解の振る舞いが明らかになった。それらの規格化したエネルギー E の実部を次の図 1 に示す。この結果は二重ブレーン解の場合も $a > -1/2$ と $a = -1/2$ で値が飛ぶ傾向にあることを大体示しているが、タキオン真空解、一重ブレーン解ほど明確ではなく、値が整数であるかどうか曖昧で

ある。これは二重ブレーン解が実性を満たしていないこともその要因の一つではあるが、物理的に文字通り、二重ブレーン（ブレーンが 2 枚重なったもの）と解釈できるかどうかは、はっきりしなかった。ゴーストブレーン解はより不明瞭な値を示すことがわかった。ただし、これらの数値的振る舞いは TT 解が $a=-1/2$ で非自明なタキオン真空解を表す、という従来の解釈とは整合していると考えられる。

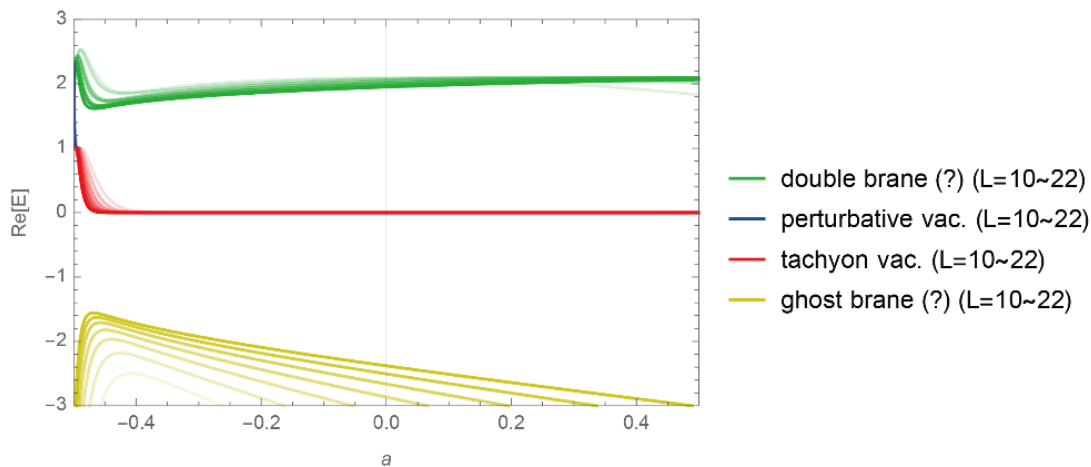


図 1 TT 解周りの理論の Siegel ゲージの数値解のエネルギー実部。濃い色が高い切断レベル L に対応。

なお、二重ブレーン解は切断レベル 2 の複素解をもとにして構成されるものであるが、切断レベル 20、22 において、パラメータ a の値のある範囲では解が実になり、解の分岐が生じていることが分かった。この詳細については[文献④]にまとめた。

また、TT 解周りの Siegel ゲージの数値解の整合性の確認として 2 次の恒等式を数値的に評価した結果に関しては[文献②]にまとめた。

本研究成果により、ボソンの開弦の場の理論の枠組みにおいて、Siegel ゲージの古典解に関するかなり高い切断レベルまでの具体的な数値計算例がさらに増えたが、新たな物理現象の解明には至っていない。

- (2) ボソンの開弦の場の理論の古典解について、レベル切断近似に基づく数値的手法による研究を遂行した。Kudrna-Schnabl による Siegel ゲージ ($a=0$ に対応) のタキオン真空解・二重ブレーン解・ゴーストブレーン解を浅野-加藤の a -ゲージに拡張した数値解を、切断レベル $L=20$ まで様々な a の値に対して構成しゲージ不変量等を評価した[文献③]（このパラメータ a は上記 (1) で調べた TT 解のものとは別物である）。その結果、 a -ゲージのタキオン真空解の場合（[浅野-加藤(2006)]、[岸本-高橋(2009)]：切断レベル $L=14$ までは既知だった）と異なり、二重ブレーン解の a -ゲージへの拡張およびゴーストブレーン解の a -ゲージへの拡張のそれぞれに対応するゲージ不変量の値にはいずれも a -依存性がある傾向が示された。次の図 2 は規格化したエネルギー E の実部である。一方、これらの解は a の値が異なればゲージ条件が異なるが、それぞれ物理的には同一の解を表しているならば、対応するゲージ不変量は a の値に依存しないはずである。よって、 a の値を変化させて解を構成していく際、例えば、途中の a の値で二重ブレーン解から一重ブレーン解へ遷移した可能性も考えられる。今回の結果のより詳細な物理的解釈については、今後の課題として残されている。

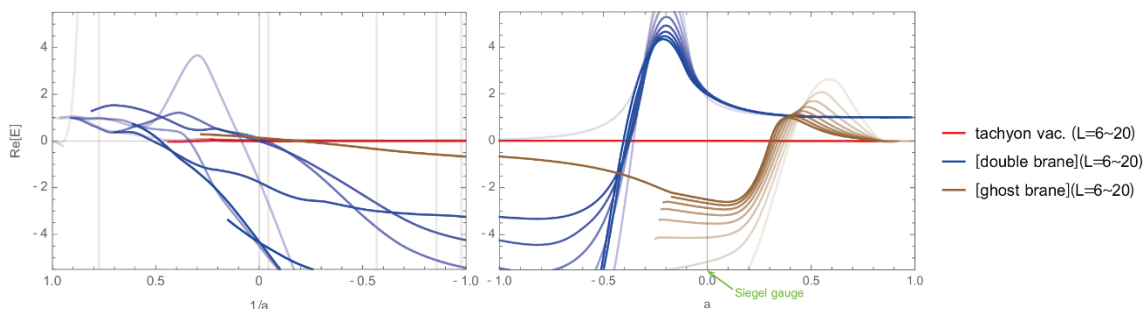


図 2 a -ゲージの数値解のエネルギー実部。濃い色が高い切断レベル L に対応。右半分が Siegel ゲージ周り、左半分が Landau ゲージ周り。

なお、(タキオン真空・二重ブレーン解だけでなく)あらゆる a -ゲージの切断レベル 2 に現れる全ての数値解の振る舞いについて調べたものを[文献⑤]にまとめた。これは、物理的に意味をもつ新たな解を構成する際に役立つ可能性がある。

本研究成果は、ボソンの開弦の場の理論の数値計算において、Siegel ゲージを拡張した a -ゲージの様々な a の値に対し比較的高い切断レベルまで実行した貴重な例である。特に、本研究の Landau ゲージ周りの系統的な計算法を活用することで Siegel ゲージ周りとは異なった種類の解の発見につながるかもしれない。

- (3) ボソンの開弦の場の理論において、文献 [Giusto-Imbimbo (2003), Imbimbo (2006)] の手法に基づき、摂動真空での Siegel ゲージの数値的二重ブレーン解周りの理論、および、タキオン真空 (単位弦場に基づく TT 解 ($a=-1/2$)) での Siegel ゲージの数値的一重ブレーン解周りの理論で、Siegel ゲージに固定した開弦の場の理論の運動項を数値的に調べ、質量スペクトラムを近似的に求めた。開弦場として scalar 状態と vector の状態に限り、レベル切断近似により作用の運動項を計算し、その行列の絶対値最小の固有値の数値的振る舞いを切断レベル 10 まで調べた [文献⑥]。

摂動真空での数値的二重ブレーン解周りの理論では、ゴースト数 1 の部分等で運動項行列の固有値の一つがゼロに近づく兆候が見られた。二重ブレーン解は実条件を満たさない解のため、さらに運動量の 2 乗について虚部を含めた領域に広げたところでも数値的振る舞いを調べたが、明確な質量スペクトラムは得られなかった。よって、この数値解が文字通り「二重ブレーン」と解釈できるかどうかについて、不明なままとなった。

タキオン真空での数値的一重ブレーン解周りの理論では、図 3 のように、ゴースト数 1 の部分に質量の 2 乗が $-1, 0, 1, 2$ となる $SU(1, 1)$ -singlet 状態がありそうということがわかった。これは、この数値解が D ブレーン 1 枚に対応するという従来の物理的解釈と整合している。

本研究成果は (数値解自体の構成とは異なり) 解周りのスペクトラムの数値的な解析のため、Mathematica による数値計算のみ実行して得られたものである。そのため、切断レベルを 10 より高くすることは困難であった。さらに高いレベルまで高階 tensor 状態も含めてスペクトラムを探究することが望まれるが、(最も調べられている) 数値的タキオン真空解周りの理論でさえ、なされていない。この方向の研究のためには、計算手法の飛躍的な改善が必須である。また、BRST 不変性の数値的な評価についても課題が残っている。

- (4) ボソンの開弦理論において、文献 [関-高橋 (2019)] で 2 点振幅を求めるのに使われた mostly BRST exact 演算子を 5 点関数に適用することで、4-開弦タキオン振幅 (Veneziano 振幅) を再現できることを示した [文献⑦]。

さらに、ボソンの閉弦理論において、BRST 定式化で 2 点振幅を求める方法を開弦の場合の拡張として提案した [文献⑧]。これに関連して、様々なゴースト数をもつ閉弦の頂点演算子を降下方程式により系統的に求め、ディラトンについても再考した [文献⑨]。

本研究で用いた mostly BRST exact 演算子やゴースト数が通常と異なる頂点演算子について、それらが物理的な振幅を再現できることから、弦の場の理論の枠組みの中で統一的に解釈できることが望ましいと考えている。

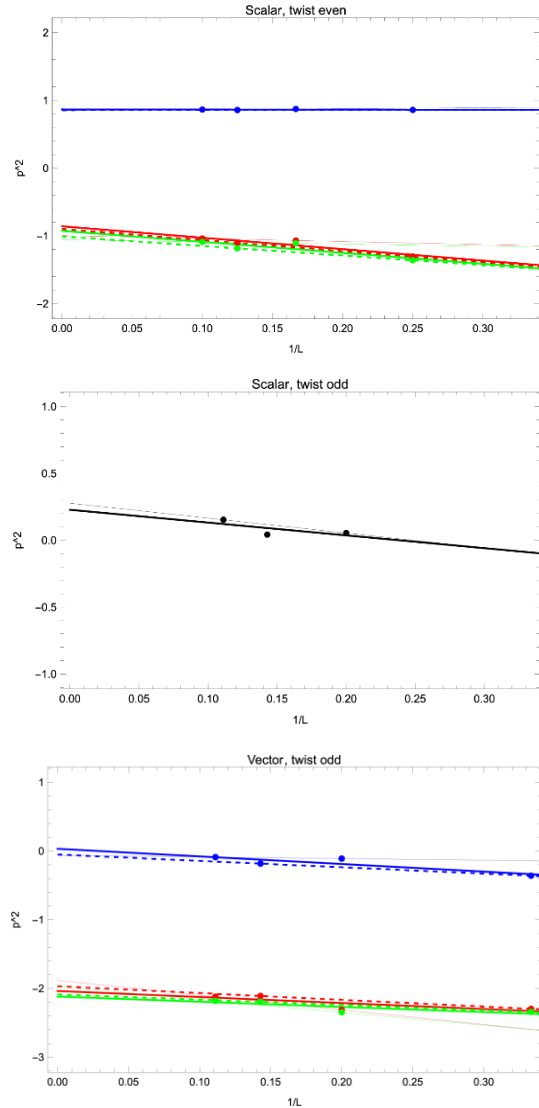


図 3 タキオン真空(TT 解 $a=-1/2$)での Siegel ゲージの一重ブレーン解周りのスペクトラムの切断レベル L 無限大への外挿。横軸は $1/L$ 、縦軸は運動量の 2 乗。

<引用文献>

- ① Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi, “Numerical twist-even $SU(1,1)$ -singlet solutions in open string field theory around the identity-based solution”, JHEP02(2021)133
- ② 岸本功, “開弦の場の理論の古典解に関する 2 次の恒等式の数値的評価”, 東京理科大学紀要 (教養篇), 53 号(2021)353-374
- ③ Isao Kishimoto, “Numerical universal solutions in a-gauge in open string field theory”, PTEP2021(2021)12,123B04
- ④ 岸本功, “単位弦場に基づく解周りの開弦の場の理論における「二重ブレーン」解の分岐について”, 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要, 5 号(2022)75-79
- ⑤ 岸本功, “開弦の場の理論におけるツイスト偶のユニバーサルな a-ゲージ解の低レベルでの振る舞いについて”, 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要, 6 号(2023)73-77
- ⑥ Isao Kishimoto, “On the spectrum around numerical solutions in Siegel gauge in open string field theory”, PTEP2023(2023)10,103B01
- ⑦ Isao Kishimoto, Tomoko Sasaki, Shigenori Seki, Tomohiko Takahashi, “The Veneziano amplitude via mostly BRST exact operator”, Nucl. Phys. B974(2022)115647
- ⑧ Isao Kishimoto, Shigenori Seki, Tomohiko Takahashi, “Two-point closed string amplitudes in the BRST formalism”, Phys. Lett. B853(2024)138657
- ⑨ Isao Kishimoto, Mako Kouga, Shigenori Seki, Tomohiko Takahashi, “Closed string vertex operators with various ghost number”, Nucl. Phys. B1004(2024)116549

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Kishimoto Isao	4. 巻 2023
2. 論文標題 On the spectrum around numerical solutions in Siegel gauge in open string field theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 103B01 ~ 103B01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptad123	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, Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 853
2. 論文標題 Two-point closed string amplitudes in the BRST formalism	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 138657 ~ 138657
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2024.138657	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, Kouga Mako, Seki Shigenori, Takahashi Tomohiko	4. 巻 1004
2. 論文標題 Closed string vertex operators with various ghost number	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Physics B	6. 最初と最後の頁 116549 ~ 116549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysb.2024.116549	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 岸本功	4. 巻 6
2. 論文標題 開弦の場の理論におけるツイスト偶のユニバーサルな a -ゲージ解の低レベルでの振る舞いについて	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要	6. 最初と最後の頁 73 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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	4. 巻 2021
2. 論文標題 Numerical universal solutions in α' -gauge in open string field theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptab134	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 岸本功	4. 巻 5
2. 論文標題 単位弦場に基づく解周りの開弦の場の理論における「二重プレーン」解の分岐について	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 山陽小野田市立山口東京理科大学紀要	6. 最初と最後の頁 75 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -
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 岸本功	4. 巻 53
2. 論文標題 開弦の場の理論の古典解に関する2次の恒等式の数値的評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 東京理科大学紀要（教養篇）	6. 最初と最後の頁 353 - 374
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 岸本功
2. 発表標題 開弦の場の理論における数値解周りの質量スペクトラムについて
3. 学会等名 YITP Workshop 場の理論と弦理論 2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本功, 関稜慶, 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（2023年）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岸本功
2. 発表標題 開弦の場の理論における数値解周りのスペクトラムの解析
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 Isao Kishimoto
2. 発表標題 On numerical universal solutions in a-gauge in open string field theory
3. 学会等名 YITP Workshop Strings and Fields 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Isao Kishimoto
2. 発表標題 On numerical solutions in open string field theory around the identity-based solution
3. 学会等名 YITP Workshop Strings and Fields 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸本功
2. 発表標題 開弦の場の理論におけるaゲージのユニバーサルな数値解について
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔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
---------	---------