

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25800134

研究課題名(和文) 超弦の場の理論における数値的手法に基づく古典解の解析

研究課題名(英文) Analysis of classical solutions based on numerical approaches in superstring field theory

研究代表者

岸本 功 (Kishimoto, Isao)

新潟大学・人文社会・教育科学系・准教授

研究者番号：60399433

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：ボゾニック弦・超弦の場の理論において、単位弦場に基づく古典解の物理的性質を、数値的・解析的に明らかにした。

Erler-Maccaferriの方法を応用し、ボゾニック弦の場の理論の新たな古典解を構成した。
修正された3弦型超開弦の場の理論において、レベル切断による数値計算の新たな手法を具体的に提案した。
WZW型超開弦の場の理論では、10次元時空のフェルミオン部分を含めて成分場展開を最低レベルまで行った。

研究成果の概要(英文)：We have investigated some physical properties of the identity-based classical solutions in bosonic and super string field theory, numerically and analytically. Using Erler-Maccaferri's method, we have constructed new classical solutions in bosonic string field theory.

In the modified cubic open superstring field theory, we have proposed a new method for numerical calculations in the level truncation. In the WZW-like open superstring field theory, we have performed the component field expansion, up to the lowest level, including the fermion sector in the ten dimensional space-time.

研究分野：素粒子論

キーワード：超開弦の場の理論 レベル切断近似 古典解 Dブレーン

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子論の超弦理論分野において、特に「弦の場の理論」の手法による研究は、様々な古典解の構成を中心に今世紀に入った頃からずっと継続されてきていた。2005年以降、弦の場のなす KBC 代数とその拡張を応用することで、比較的容易に開弦（ボゾニック弦および超弦）の場の理論の解析解が得られるようになってきた。特にタキオン凝縮解に関するセンの証明に関しては応用が進められた。しかし、弦の場の理論の古典解に関する事項に限っても、以前に求められていたレベル切断近似による数値解や単位弦場に基づく解析解との関係の解明や、それらの物理的解釈、弦場の空間の定義の問題等の課題が残されていた。

(2) 修正された 3 弦型超開弦の場の理論において、レベル切断近似による数値解や、(BPS D プレーン上のタキオン凝縮解、半プレーン解など) 物理的解釈がはっきりしない解析解などの問題があった。古典解がボゾニックの拡張で調べられるようになっていた Berkovits の Wess-Zumino-Witten (WZW) 型超開弦の場の理論では、明白なローレンツ対称性をもつ作用は、時空のボゾン部分 (NS セクター) のみであり、フェルミオン部分 (R セクター) を含む完全な作用は未完成の状況であった。

2. 研究の目的

物理学における究極の理論：自然界における最も基本的な構成要素全ての統一理論の最有力候補が超弦理論であり、それを定式化する手法の一つとして超弦の場の理論が提唱されている。本研究は、この超弦の場の理論の非摂動的な古典解に関して、数値的なアプローチも駆使してその物理的および数学的性質を解明することを目的とする。これは、超弦理論の深淵な興味深い構造の全容解明に向けた一つのステップとして位置づけられ、ここで得られる結果は超弦の場の理論という指導原理に直接的に基づいているものであり、今後の超弦理論全般あるいは素粒子論の進展に寄与し、究極的には全宇宙の自然現象の理論的解明に役立つと期待できる。

3. 研究の方法

(1) 超開弦の場の理論（修正された 3 弦型および Berkovits の WZW 型）の古典解を、レベル切断近似等を用いて数値的に求め、そのゲージ不変量の評価を目指す。そのために、本研究以前の数値計算の研究において既に得ていたボゾニックな開弦の場の理論の場合の Mathematica プログラムを超開弦の場の理論へ拡張する。その整合性・有用性を確かめた上で、C++プログラミング（これもボゾニックな開弦の場の理論の場合に開発済のものを超弦へ拡張する）により、数値計算の飛躍的な高速化を試みる。

ここでは、まず、修正された 3 弦型超開弦の場の理論のレベル切断近似を遂行するために、高力-九後-国友(2011)の定式化に基づき、ゴーストのモード展開による方法を採用した。

(2) 超開弦の場の理論の数値計算を本格的に行う前に、できる限り代数的および解析的に「厳密」に計算を進めておくことは重要である。ここでは、KBC 代数とその拡張を応用し、いくつかの古典解を構成し、その物理的性質を調べた。

(3) 超開弦の場の理論（修正された 3 弦型および Berkovits の WZW 型）の研究を推進する上で、手始めとして、より単純で計算が簡単なボゾニックな開弦の場の理論の枠組みで研究を進めておくことは有用である。ここでは、特に Erler-Maccaffèri(2014)の古典解の構成法に着目し、その具体的な応用を行った。

4. 研究成果

(1) 単位弦場に基づくマージナル解周りのボゾニックな開弦の場の理論における古典解について、レベル切断近似で数値的に解析した。Siegel ゲージおよび Landau ゲージの数値解に対して、ゲージ不変量（真空のエネルギーとオーバーラップ）を計算し、一種の KBC 代数を用いた解析解による結果と比較して、その整合性を確かめた。また、このマージナル解まわりの理論での「M ブランチ」および「V ブランチ」についても数値的に解析し、元の理論における従来知られていた数値計算の結果と同様に、レベル 1 の成分場の値に上限があることを見出した。

(2) ボゾニックな開弦の場の理論における単位弦場に基づくマージナル解に対して、ゲージ不変オーバーラップ (GIO) を直接的に計算しようとする単位弦場の特異な性質のため発散が生じてしまう。そこで、この解を「wedge-based な解の差」と「変形された BRST exact state の積分」の和に書き直すことで GIO の解析的な評価に成功し有限な形を得た。さらに、ゲージ変換することにより、この GIO が境界でのカレントの積分を用いた disk 上の相関関数の形に書き直せることを示し、別のマージナル解で知られている GIO に対応する形になることを確かめた。

(3) Berkovits の WZW 型超開弦の場の理論の枠組みにおける、単位弦場に基づくマージナル解周りの理論で、KBC 代数の超弦への拡張を用いてタキオン凝縮解を構成した。さらに、これを用いて、単位弦場に基づくマージナル解の、この超開弦の場の理論におけるゲージ不変オーバーラップを解析的に計算した。これは、ボゾニックな開弦の場の理論において開発した手法（上記(2)の成果）の超弦への拡張にあたる。

(4) 単位弦場に基づくスカラー解周りの開弦の場の理論において一種の KBC 代数を構成し、これを用いて古典解とそれに対応するゲージ不変量（真空のエネルギーとオーバーラップ）を評価した。これらの結果を用いて、単位弦場に基づくスカラー解（タキオン真空解を含む実 1 パラメータをもつ解）のゲージ不変量を解析的に評価し、従来の間接的手法による結果と整合することを示した。

(5) ボゾニックな開弦の場の理論の枠組みにおける、Erler-Maccaferri による N 重の D ブレーン解の周りで展開した理論は、 $(N+1)$ 重の D ブレーン系で、1 枚の D ブレーンがタキオン凝縮で消滅したものを表している、ことを示した。このとき、多重ブレーン上の弦場は、一つの D ブレーン上の弦場を成分とする行列とみなせることも示した。

これは、超弦理論の非摂動的定式化の一つとして提案されている行列理論に似た構造を示しており、その関係の解明は今後の課題の一つとなる。

(6) Erler-Maccaferri の方法を応用することで、定数磁場背景を記述する、ボゾニックな開弦の場の理論の運動方程式の解を構成した。対応する境界条件変更演算子を調べ、その演算子積展開を計算することで、この解における開弦の場の理論の作用の値を解析的に評価すると、Born-Infeld 作用が得られることを示した。

定数磁場背景に対応する解（弦場）の成分場としてのベクトル場の空間依存性を、解析的・数値的に調べることは今後の課題の一つである。

(7) 修正された 3 弦型超開弦の場の理論の枠組みにおいて、NS セクターの古典解に関して具体的に数値計算をするためのレベル切断近似の方法を提案した。ここでは、超弦場を、 α' ゴーストを用いる従来の方法の代わりに、 α' ゴーストのモードで展開する。特に、作用に含まれている逆描像変換演算子のカーネルを解析して得られている、高力-九後-国友のゲージ固定の方法に着目して、必要な超弦場の成分場の数を各レベルで減らす具体的な手続きを与え、コンピュータプログラムに適用して調べた。まずは、Erler のタキオン凝縮を表す解(2007)について、この手法でレベル切断近似をし、その真空のエネルギーを数値的に調べたところ、ボゾニックな開弦の場の理論における Schnabl 解(2005)の場合と異なり、レベルを上げたときの数値的な振る舞いは安定していなかった。

この数値計算の結果をサンパウロ（ブラジル）で開催された弦の場の理論(2016)の国際会議で発表したところ、参加者の一人である専門家より、同じ量を別の手法で数値計算すると収束に向かうという情報を得たので、こ

ちらのプログラム全般の正当性を再確認する必要があると考えている。この研究の今後の展望は、特に符号の扱いに気を付けて、元となっている数式とその計算を実現するプログラミングを再検討し、この結果の整合性を理解した上で、プログラミングの高速化の調整へと進むことになる。

(8) Berkovits の WZW 型作用の拡張として提案された国友-大川による超開弦の場の理論の完全な作用(2015)を用いて、NS セクターおよび R セクターを両方含めて超弦場を最低レベルまで成分場展開し、具体的な計算をすることで 10 次元超対称ヤンミルズ理論の作用のフェルミオン部分の形を得た。これは Berkovits-Schnabl による NS セクターの計算（ヤンミルズ作用の導出）の R セクターへの拡張になっている。また、国友(2016)によって提案された超弦場の超対称変換によって、最低レベルの成分場に引き起こされる変換についても調べ、10 次元超対称ヤンミルズ理論の超対称性変換と整合することを示した。

R セクターを含めた超開弦の場の理論の研究は、超弦場の表式での研究は近年進展している。ここで行っているような成分場で具体的に表現する計算は、今後の超開弦の場の理論の応用に役立つと考えられる。この研究の今後の課題の一つは、高いレベルの成分場の寄与を NS セクターおよび R セクターを両方含めて系統的に調べ、10 次元超対称ヤンミルズ理論の作用を再現できることを示すことにある。

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 6 件)

Nobuyuki Ishibashi, Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi, "String field theory solution corresponding to constant background magnetic field," Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol.2017, No.013B06, pp.1-23, 2017 年, (査読有), DOI:10.1093/ptep/ptw185

Isao Kishimoto, Toru Masuda, Tomohiko Takahashi, Shoko Takemoto, "Open string fields as matrices," Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol.2015, No.033B05, pp.1-8, 2015 年, (査読有), DOI:10.1093/ptep/ptv023

Isao Kishimoto, Toru Masuda, Tomohiko Takahashi, "Observables for identity-based tachyon vacuum solutions," Progress of Theoretical and Experimental Physics, Vol.2014,

No.103B02, pp.1-15, 2014年, (査読有),
DOI:10.1093/ptep/ptu136

Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi,
“Comments on observables for
identity-based marginal solutions in
Berkovits’ superstring field
theory,” Journal of High Energy
Physics, Vol.07, No.31, pp.0-14, 2014
年, (査読有),
DOI:10.1007/JHEP07(2014)031

Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi,
“Gauge invariant overlaps for
identity-based marginal solutions,”
Progress of Theoretical and
Experimental Physics, Vol.2013,
No.093B07, pp.1-9, 2013年, (査読有),
DOI:10.1093/ptep/ptt073

Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi,
“Numerical solutions of open string
field theory in marginally deformed
backgrounds,” Progress of
Theoretical and Experimental Physics,
Vol.2013, No.093B06, pp.1-21, 2013
年, (査読有),
DOI:10.1093/ptep/ptt072

[学会発表](計 5件)

Isao Kishimoto, “Super Yang-Mills
theory from KO's open superstring
field theory,” Progress in Quantum
Field Theory and String Theory II, 2017
年3月28日, 大阪市立大学(大阪府大阪
市)

Isao Kishimoto, “On a level
truncation method in modified cubic
superstring field theory,” VIII
Workshop on String Field Theory and
related aspects, 2016年6月3日, Sao
Paulo (Brazil)

岸本功, “Modified cubic 超弦の場の
理論におけるレベル切断法につい
て,” 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(宮城
県仙台市)

岸本功, “超弦の場の理論における古
典解と数値解析,” 弦の場の理論 15
奈良, 2015年3月6日, 奈良女子大学
(奈良県奈良市)

Isao Kishimoto, “On gauge invariant
observables for identity-based
marginal solutions in bosonic and
super string field theory,” String
Field Theory and Related Aspects VI,

SFT2014, 2014年7月31日,
Trieste(Italy)

[図書](計 0件)

[産業財産権]

出願状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸本 功 (KISHIMOTO, Isao)
新潟大学・人文社会・教育科学系(教育学
部)・准教授

研究者番号: 60399433

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号:

(4) 研究協力者

なし ()