

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340051

研究課題名(和文)弦の場の理論による非摂動的弦理論の研究

研究課題名(英文)Nonperturbative aspects of string field theory

研究代表者

高橋 智彦(Takahashi, Tomohiko)

奈良女子大学・自然科学系・准教授

研究者番号：10324956

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：弦の場の理論における単位弦場に基づくタキオン真空解とマージナル変形解に対して、真空エネルギーとゲージ不変オーバーラップを厳密に計算することに成功した。まず、単位弦場に基づく古典解を背景とする理論の数値解析により、理論の真空構造を明らかにし、これらの古典解の物理量が期待される値をとることを間接的に確認した。次に、単位弦場に基づく古典解を背景とする弦の場の理論における変形されたKBC代数を構成し、この代数を用いてこの理論の新しい古典解を求め、それらの物理量の厳密計算を行った。最終的に、これらの結果とゲージ変換の自由度を利用することにより、単位弦場に基づく古典解の物理量を解析的に計算することができた。

研究成果の概要(英文)：We exactly calculate vacuum energy and gauge invariant overlaps of identity-based tachyon vacuum solutions and identity-based marginal solutions in open string field theory. First, by numerical analysis of the theory expanded around the identity-based solutions, we expect the values of the physical quantities for them. Next, we consider a modified KBC algebra in the theory on this background. By use of the algebra, classical solutions on the background are constructed and observables for them, including energy densities and gauge invariant overlaps, are calculable. Finally, these results are applied to evaluate observables analytically for the identity-based solutions.

研究分野：素粒子論

キーワード：弦理論 弦の場の理論 Dブレーン タキオン凝縮 単位弦場

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力の理論と量子力学が融合する整合的な理論を構築することは、古くからある素粒子論の重要な未解決問題である。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る。しかし、弦理論を重力や宇宙の起源の問題に適用し、素粒子物理学における統一理論、重力の量子論のみならず、宇宙物理学における宇宙の起源の研究に進展をもたらすためには、弦理論の指導原理・基本法則を明らかにする必要があった。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た。

(2) しばらくの間、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に成功した論文が 2000 年に Sen-Zwiebach により発表され、弦の場の理論の研究が再び世界的に活発化した。解析的な研究では我々の 2002 年の論文が先駆となり、また異なった解析的手法として 2006 年の Schnabl の論文が発表され、弦の場の理論の解析的な研究はますます世界的に盛んになっている。

(3) このような近年の発展の中で、我々の研究成果には次のようなものがあった。

我々が構成した古典解について世界最高精度で数値解析した結果、この古典解がタキオン真空解に対応することが示唆された。

この古典解まわりで展開した理論を解析し、タキオン真空を特徴づけるホモトピー演算子を構成することに成功した。

このホモトピー演算子の性質を用いて、タキオン真空上の量子論的なエネルギーがゼロとなることを示した。

(4) これらの結果は弦理論の非摂動的な性質と関係し、弦の場の理論の構造が我々の構成した古典解を通じて明らかになりつつあった。弦の場の理論は、巨大な自由度と非局所性をもつという、場の量子論には無い特徴をもつ理論であるため、その非摂動論は新たな統一理論を切り拓く可能性を秘めている。実際、タキオン真空上の弦の場の理論が位相的場の理論のように摂動的な自由度をもたないことがわかってきており、重力を含む閉弦に対する非摂動効果の重要性が示唆される。

2. 研究の目的

(1) 弦の場の理論における古典解とゲージ対称性の関係、およびそこに見られる理論構造を理解することによって、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。

(2) 具体的には、解析的手法と数値計算を併

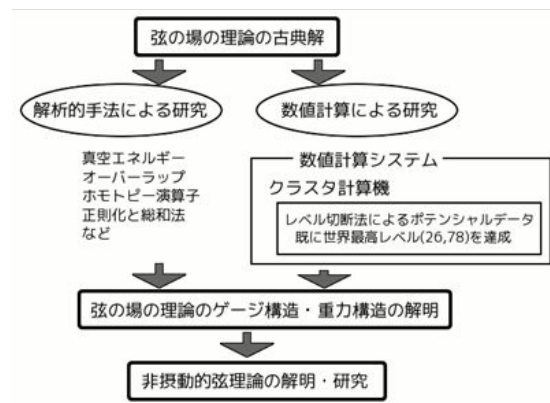
用してタキオン真空解などの古典解について研究し、弦理論の非摂動的な未解明の性質を明らかにすることを目的とする。特に、古典解の真空エネルギーの数値解析によって、様々な古典解に関する未解決の予想について数値的な解明を行う。

(3) 弦の場の理論の真空構造について高性能コンピュータを用いて解析し、タキオン真空解などの古典解、単位弦場に基づく古典解に関する予想について、数値的な証明を行う。すでに、今までの研究において、レベル切断法の計算レベルでは世界記録を達成しており、ゲージ不変オーバーラップの漸近挙動と外挿公式の導出など、今まで難しかった問題について明らかにする。

(4) 次に、解析的な手法を用いることにより、開弦の場の理論の古典的および量子論的な性質を明らかにする。この問題はタキオン真空上での閉弦とも関連する重要なものだが、ホモトピー演算子と量子論的なエネルギーに関する結果をさらに発展させ、ゲージ不変量の漸近挙動、正則化と総和法について明らかにできると思われる。弦の場の理論研究において数値的手法と解析的手法は相補的であり、二つの手法を融合させることで、超弦理論における D プレーンの生成消滅の理論的記述、それらを用いた非摂動弦理論の定式化という未解決問題を明らかにすることを試みる。

3. 研究の方法

(1) 本研究の研究計画の概略図は下図の通りである。



弦の場の理論の古典解について、解析的手法による研究と数値計算による研究を相補的に組み合わせることにより、弦の場の理論のゲージ構造および重力構造を解明する研究を行い、非摂動的弦理論についての研究を遂行した。

(2) 数値計算による研究については、研究代表者が所属する奈良女子大学の素粒子論研究室にあるクラスタ計算機システムのアッ

プグレードを行い、大容量メモリをもつクラスタシステムの構築を行った。システムは3台の計算ノードからなり、メモリ総量が1TBを超えるものとなった。このスペックは弦の場の理論における高精度の数値計算を行うために必要なものである。

この数値計算システムを用いた解析においては、研究分担者の岸本功氏と共同で研究を行う。解析プログラムの開発およびポテンシャルデータの生成作業は、複数の研究者で行うのが効率的である。また、データはテラバイトの大きな容量をもつので、サーバ上のデータを共有して解析・開発していく必要がある。そのために、ネットワークを介してデータおよび解析状況を共有できる環境を構築し効率化をはかった。私と分担者が真空エネルギーの数値解析を以前共同で行った際、大容量データの効率的な共有方法が課題となったが、これを克服するためにファイルサーバとネットワーク端末の整備を行った。

(3) 弦の場の理論におけるタキオン凝縮の研究では解析的な手法が威力を発揮した。この手法をさらに一般化し、超対称性をもつ理論や閉弦の起源などについて解析的な研究を行った。ボゾン型の弦理論において我々が構成した古典解を、超対称性をもつ古典解へ拡張した経験に基づき、この古典解に対する古典的な真空エネルギーを解析的に計算する方法を確立する研究を行った。また、以前の研究では、この古典解に対応したホモトピー演算子の存在を示したが、これは古典解上での真空エネルギーへの量子論的補正がないことを意味すると予想される。真空エネルギーを解析的に計算することで、この量子補正の性質の解明を試みた。

(4) 数値計算システムを用いて、弦の場の理論におけるさまざまな古典解をレベル切断法で解析した。以前の研究で示されたように、我々が構成した古典解の解析においてコンピュータを用いた解析は非常に有効であるが、古典解の厳密な解析的取り扱いに関しても、厳密解の数値的な挙動を観察することが古典解の性質を明らかにするために重要な役割を担っている。これは、厳密な計算結果といえども、厳密解の phantom 項などの取り扱い方が完全に理解されていないためである。切断レベルをあげた解を構成することで、非摂動的弦理論の性質についての研究を行った。

(5) 弦の場の理論のポテンシャルを解析するには大型クラスタシステムで計算を行うことが非常に有効である。大型、大容量のシステムの構築に際し、システムの管理や維持に関する作業が膨大になる。これらの作業を軽減して、効率的に解析を行うために、非常勤研究者を雇用した。同時に、非常勤研究者には解析的な研究の補佐を依頼し、研究を迅

速に遂行していくようにした。そのために弦の場の理論のレベル切断法を用いた解析によく精通している研究者を選考した。平成25年度には奈良女子大学で博士号を取得した稲富晶子さん、平成26年度には東京大学で博士号を取得した増田暢さんを雇用した。

(6) これらの数値的および解析的な研究成果を踏まえて、非摂動的弦理論の全体像の解明を試みた。様々なゲージ条件の下での古典解に対して閉弦が関与するゲージ不変量の値を計算した研究においては、その値がゲージに依存しない結果が得られた。我々の研究では解析的にも計算して同様の結果を得ることになったが、この両者の結果の一致によって、ここで適用した未確立の計算手法の正当性が保証されたのである。このように、堅実な数値計算と厳密な解析を相補的に用いることによって研究目標達成を目指した。

(7) 最終年度には、弦の場の理論における研究会「弦の場の理論15奈良」を3月5日(木)6日(金)に奈良女子大学で開催し、国内の弦の場の理論の研究者を集めて、弦の場の理論の古典解についての意見交換を行った。今後の展望を議論することによって、我々の研究成果を非摂動的弦理論の新たな局面へと展開させる可能性を探った。

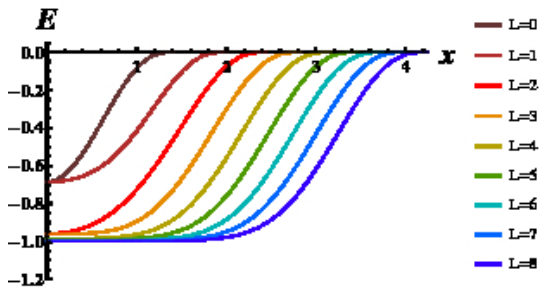
4. 研究成果

(1) マージナル変形された背景上の弦の場の理論を解析し、この理論のタキオン真空解を構成することに成功した。また、この古典解に対する真空エネルギーとゲージ不変オーバーラップを厳密に計算することにも成功した。この研究では単位弦場に基づく手法とKBC代数に基づく手法を融合する新しい手法を用いたが、さらなる応用が期待される方法として意義のある成果である。また、この解析結果によって単位弦場に基づく古典解に現れる発散に対してある種の正則化法の存在が示唆され、弦の場の理論の理解にとって重要な意味をもつ結果であった。

(2) 超弦の場の理論において、マージナル変形された背景上のタキオン真空解とハーフプレーン解を構成した。超対称性をもつよう拡張されたKBC代数を、マージナル変形された背景上のものにさらに拡張した代数を用いて、真空エネルギーとオーバーラップの値を厳密に計算することに成功した。この結果は、単位超弦場に基づくマージナル変形解の真空エネルギーがゼロになることを示唆し、単位弦場に基づく解が物理的に正しい解を与えている証拠を与えている。

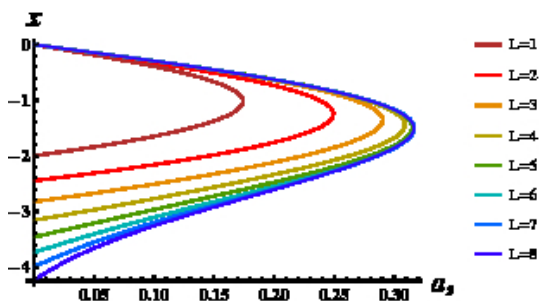
(3) 単位弦場に基づいてマージナル変形された背景上の弦の場の理論を数値計算によって解析した。まず、Siegel ゲージとLandau ゲージにゲージ固定した理論におい

て、タキオン真空解を構成し、マージナル変形のパラメータの広い範囲で、その真空エネルギーがDプレーンのエネルギー密度を相殺することを示した。



上図は Siegel ゲージでの計算結果を表わす。縦軸がエネルギー E 、横軸がマージナル変形のパラメータ x 、 L は近似レベルを表わしている。近似レベルを上げると、エネルギー -1 をとる x の範囲が広がっていくのがわかる。これは、変形パラメータに対して正しいタキオン真空解が構成されていることを示している。また、これは単位弦場に基づくマージナル変形解の真空エネルギーがゼロであることを支持する数値計算結果である。

数値計算によって、Siegel ゲージでの M ブランチ、 V ブランチの構成を行い、質量ゼロのベクトル場の期待値に上限値が存在することを示した。



上図において、横軸 a_3 が質量ゼロのベクトル場の期待値を表わしており、変形パラメータ x の変化に対して、上限値が存在しているのがわかる。これは単位弦場に基づく古典解以外の場合に指摘されていたものと同種の上限値である。

タキオン真空解に対するゲージ不変オーバーラップの計算結果も期待される値となり、単位弦場に基づく古典解の正当性を支持する結果を得た。

(4) 単位弦場に基づくマージナル変形解に対するゲージ不変オーバーラップを厳密に計算することに成功した。まず、単位弦場に基づくマージナル変形解を、ウェッジ弦場に基づく古典解と、変形された BRST 演算子で生成される状態の積分との差によって表現した。これは、単位弦場に基づく古典解に対する新しい表示である。この表示を用いて、このマージナル変形解に対する物理量の計

算を行った。また、ゲージ対称性によって、この物理量が、境界に挿入されたカレントの積分のディスク相関関数に変換されることを示した。このとき、古典解に含まれていたゴースト項が、カレントの局所的な発散を自然な形で相殺する項になっていることが明らかになった。

この結果は、(1) ~ (3) の結果によって得られた予想を、厳密に示した結果であった。しかも、単位弦場に基づく古典解に対する物理量として初めて解析的に計算された結果であり、弦の場の理論における古典解の研究において非常に意義深いものであった。数値計算的手法による証拠の積み重ね、解析的手法による計算技術の進歩が融合した研究成果である。

また、この結果を超弦の場の理論へと拡張し、単位超弦場に基づくマージナル変形解に対しても物理量の計算を厳密に行った。その真空エネルギーはゼロとなり、以前の研究においてゴースト数から予想されていた結果と一致した。

(5) 単位弦場に基づくタキオン真空解に対する真空エネルギーとゲージ不変オーバーラップを厳密に計算することに成功した。まず、単位弦場に基づくタキオン真空解を背景とする弦の場の理論における変形された KBC 代数を構成した。この代数を用いて、この理論に新しい古典解を構成し、それらの物理量を厳密に計算した。ゲージ変換を利用することで、これらの結果と単位弦場に基づく古典解の物理量とを結びつけ、最終的にタキオン真空解の物理量を厳密に計算した。

単位弦場に基づくタキオン真空解に対する物理量は、十数年間計算できなかった量であったが、今回の研究で初めて計算することに成功した。筑波大学の石橋延幸氏も別の方法で同じ結果を同時に得ており、単位弦場に基づくタキオン真空解が、弦の場の理論の非摂動的側面を正しく捉えていることを示す結果である。これは単位弦場に基づく解が正しいことを意味するだけでなく、この解の可能性をさらに広げる結果である。

(6) Erler-Maccaferri によって構成された N 重 D プレーン解について研究を行い、この古典解のまわりで展開された理論が、 $N+1$ 重 D プレーン系を記述することを示した。このとき、 $N+1$ 枚の D プレーンの内の 1 枚はタキオン凝縮によって消滅しており、物理的には N 重 D プレーン系に等価となる。

多重 D プレーン解上の弦場は、元の 1 枚の D プレーン上の理論の 1 個の弦場に、ブロック行列として埋め込まれることを明らかにした。この構造は、 D プレーン系を記述する行列理論と同種の構造であることを指摘した。

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 7 件)

I. Kishimoto, T. Masuda, T. Takahashi, S. Takemoto, "Open String Fields as Matrices", Prog. Theor. Exp. Phys. 033B05(2015) 1/8-8/8, (査読有).
DOI: 10.1093/ptep/ptv023

I. Kishimoto, T. Masuda, T. Takahashi, "Observables for identity-based tachyon vacuum solutions", Prog. Theor. Exp. Phys. 103B02(2014)1/15-15/15, (査読有).
DOI: 10.1093/ptep/ptu136

I. Kishimoto, T. Takahashi, "Comments on observables for identity-based marginal solutions in Berkovits' superstring field theory", J. High Energy Phys. 07(2014)031, (査読有).
DOI: 10.1007/JHEP07(2014)031

I. Kishimoto, T. Takahashi, "Numerical Solutions of Open String Field Theory in Marginally Deformed Backgrounds", Prog. Theor. Exp. Phys. 093B06(2013)1/21-21/21, (査読有).
DOI: 10.1093/ptep/ptt072

I. Kishimoto, T. Takahashi, "Gauge Invariant Overlaps for Identity-Based Marginal Solutions", Prog. Theor. Exp. Phys. 093B07(2013)1/9-9/9, (査読有).
DOI: 10.1093/ptep/ptt073

S. Inatomi, I. Kishimoto, T. Takahashi, "Tachyon vacuum of bosonic open string field theory in marginally deformed backgrounds", Prog. Theor. Exp. Phys. Experimental Physics, 023B02 (2013) 1/14-14-14, (査読有).
DOI: 10.1093/ptep/pts070

S. Inatomi, I. Kishimoto, T. Takahashi, "On nontrivial solutions around a marginal solutions in cubic superstring field theory", JHEP 12(2012)071, (査読有).
DOI: 10.1007/JHEP12(2012)071

[学会発表](計 11 件)

"多重プレーン解と Chan-Paton 因子について", 岸本功, 増田暢, 高橋智彦, 竹本祥子, 日本物理学会第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 23 日, 早稲田大学早稲田キャンパス

"単位弦場に基づくタキオン真空解の物

理量", 岸本功, 高橋智彦, 増田暢, 日本物理学会秋季大会, 2014 年 9 月 18 日, 佐賀大学本庄キャンパス

"Observables for identity-based tachyon vacuum solutions", T. Takahashi, String Field Theory and Related Aspects (SFT2014), August 1, 2014, SISSA, Trieste, Italy

"On gauge invariant observables for identity-based marginal solutions in bosonic and super string field theory", I. Kishimoto, String Field Theory and Related Aspects (SFT2014), July 31, 2014, SISSA, Trieste, Italy

"単位超弦場に基づくマージナル変形解のオーバーラップ", 岸本功, 高橋智彦, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日, 東海大学湘南キャンパス

"マージナル変形された背景上でのオーバーラップの解析", 岸本功, 高橋智彦, 日本物理学会秋季大会, 2013 年 9 月 21 日, 高知大学朝倉キャンパス

"単位弦場に基づくマージナル変形解周りの弦の場の理論の数値解", 岸本功, 高橋智彦, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス

"マージナル変形された背景上の超弦の場の理論における古典解について", 稲富晶子, 岸本功, 高橋智彦, 日本物理学会第 68 回年次大会, 2013 年 3 月 27 日, 広島大学東広島キャンパス

[その他]
ホームページ等
<http://asuka.phys.nara-wu.ac.jp/>

研究会「弦の場の理論 15 奈良」
<http://asuka.phys.nara-wu.ac.jp/sft15nara/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
高橋 智彦 (TAKAHASHI, Tomohiko)
奈良女子大学・研究院自然科学系・准教授
研究者番号: 1 0 3 2 4 9 5 6

(2) 研究分担者
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: 6 0 3 9 9 4 3 3