

平成21年3月31日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2006-2008

課題番号：18740152

研究課題名（和文） 弦の場の理論から探る弦理論の幾何構造

研究課題名（英文） Exploring stringy symmetries through string field theory

研究代表者

高橋 智彦（TAKAHASHI TOMOHIKO）

奈良女子大学・理学部・助教

研究者番号：10324956

研究成果の概要：

弦理論では、不安定なDブレーンが消滅するというタキオン凝縮と呼ばれる現象が知られており、この現象は弦の場の理論におけるタキオン真空解によって記述できると考えられている。このタキオン真空解について、解析的で厳密な考察と近似的な数値計算とによる研究を行った。本研究の成果として、ゲージ不変オーバーラップと名づけた不変量のタキオン真空解に対する振る舞いが明らかになった。また、様々な数値計算を行うことによって、タキオン真空解のゲージ変換に対する性質を明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,600,000	0	1,600,000
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	270,000	3,870,000

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：弦理論、弦の場の理論、Dブレーン、タキオン凝縮

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子の統一理論の候補として弦理論もしくは超弦理論が有望である考えられていたが、これを見極めるためには弦理論のある意味で非摂動的定式化が必要であった。この動機にもとづいて、1980年代に弦の場の理論が構築されていた。

(2) 2000年、Sen-Zwiebachによって、弦理論におけるタキオン凝縮という現象の解析に弦の場の理論が有効であることが示されて以来、弦の場の理論は世界で活発に研究された。タキオン真空における弦の場の理論を

構築しようと Vacuum String Field Theory が定式化され、また、超弦の場の理論を目指して、Pure Spinor Formalism という新しい理論形式が提唱されるなどしていた。

(3) 2002年には、弦の場の理論における厳密解が、私と谷本氏によって構成され、それがタキオン真空解を表すと予想された。研究開始当初、この厳密解に関して次のことが明らかにされていた。

① 解は matter Virasoro 演算子と ghost, anti-ghost モードのみ (universal Fock 空間の元のみ) で表現できる。

- ② trivial な pure gauge 解を含む。
- ③ non-trivial な解のまわりで弦場を展開した理論には、摂動論的に開弦が存在しない。
- ④ trivial な解のまわりで弦場を展開した理論にはタキオン真空が存在するが、non-trivial な解のまわりで展開した理論にはタキオン真空が存在しないことが、数値計算によって確認できる。

これら全ての性質は、厳密解がタキオン凝縮解を表すことの証拠であり、またこのような厳密解が構成されたのは世界で最初であった。しかし、この厳密解の真空エネルギーの値を計算することが困難な状況であった。(4) 本研究を開始した頃、Schnabl によって別の厳密解が構成された。この厳密解では、真空エネルギーの解析的な計算が実行でき、以前に予想されていた値に一致した。これにより、再び弦の場の理論が活発に研究されはじめた。(5) 我々が構成した解と Schnabl が構成した解との両方において、弦の場の理論におけるゲージ対称性との親密な関係が見いだされていた。

2. 研究の目的

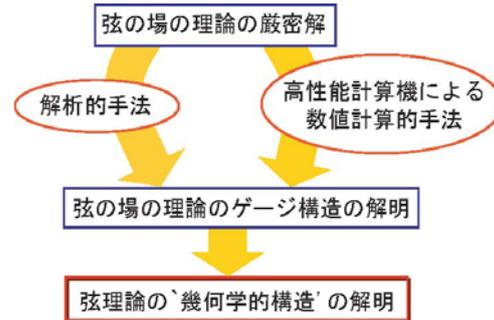
- (1) 弦理論における`ゲージ対称性の構造`、`幾何学的構造`の全容を明らかにすることができれば、素粒子物理学における統一理論、重力の量子論のみならず、宇宙物理学における宇宙の起源の研究に画期的な進展をもたらす。このためには、弦の場の理論における古典解とそこから垣間見えるゲージ対称性の構造を理解することが、現在考えられる最良の方法の一つである。本研究は、弦の場の理論におけるゲージ対称性の構造を解明することを目的とする。
- (2) 重要な未解決問題として、開弦の場の理論における古典解とタキオン凝縮の問題がある。ボゾン型の開弦の場の理論には安定な真空が古典解として存在し、その真空上では D ブレーンが消滅していると予想されている。私はこれまでの研究を通じ、このタキオン真空の候補となる厳密解を構成し、この厳密解上の真空で D ブレーンが消滅している証明を行った。この予想を厳密に取り扱う可能性を切り開いたのである。研究目的の一つは、数値的に得られた厳密解がタキオン真空解と同一の解であるかどうかを高速計算機を用いた数値計算によって解明することである。
- (3) さらに、弦の場の理論のゲージ群における厳密解の性質を解明する。これらの目的のために、変形された BRS 電荷のコホモロジーの解析、弦の場の理論の大局的対称性の研究、数値解析による理論の真空構造の解析、を行う。
- (4) タキオン真空解に対するゲージ不変オーバーラップの性質を明らかにし、それを通

じて理論のゲージ対称性の性質を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 弦の場の理論は、今までに取り扱うことが困難であった無限個の場に作用する非常に大きなゲージ対称性を持っているために、理論の厳密解を構成することは難しい問題である。したがって、解析的手法および高性能計算機による数値計算的手法、の二つの方法を用いて弦の場の理論を解析していく。

研究方法の概念図は下図の通りである。



解析的手法とコンピューターを用いた数値計算的手法を相補的に用いることによって、弦の場の理論における厳密解を研究し、厳密解と親密な関係にある弦の場の理論のゲージ対称性の構造を解明する。さらに、弦の場の理論のゲージ対称性を通じて、弦理論の背後にあると思われる幾何学的構造を探っていく。

(2) ボゾン型の弦の場の理論における厳密解の研究では解析的手法が威力を発揮し、厳密解の真空上で開弦が消滅していることを証明することに成功した。ボゾン弦と超弦の場の理論の理論構造には類似点があるため、ボゾン型で成功した方法を超弦に拡張することで超弦の厳密解を得られると期待できる。また、すでに超弦の場の理論において Marginal 変形に対応する厳密解は我々が発見しており、超弦に対する厳密解の構造もある程度理解できている。これらの知識をもとに、超弦の場合の厳密解の構成、BRS コホモロジーの構造などの解析的な研究を行う。

ボゾン弦の厳密解の構成においてコンピューターを用いた数式処理が非常に有効であった。超弦の計算はさらに複雑になるため、数式処理などを行う計算機環境を整備する。

(3) 弦の場の理論の古典解は数値計算によって最初に発見された。超弦の場の理論の数値的解析を行い、理論の真空構造の解明、ゲージ対称性の構造、大局的対称性の構造などの研究を行う。また、D ブレーンの消滅の過程を数値計算によって実現する研究を行う。解析的手法をとるのが難しい場合でも、これらの数値計算による研究の結果が、弦の場の理論の力学を理解する上では非常に重要で

ある。ワークステーションを用いて計算を遂行する。

(4) これら二つの方法を用いることで、厳密解の構成、力学的構造の研究が相補的に進展していく。

予期される問題点として、厳密解の一般的な解法が未発見であるため、解析的手法による研究がうまく進捗しない事態が考えられる。しかし、数値計算的手法を積極的に採用することで、解析的手法が駄目な場合でも、確実に成果が得られると期待できる。着実性だけではなく、その結果は研究を進める上で必要なデータであることも重要である。

4. 研究成果

平成18, 19, 20年度の三年間にわたる本研究の研究成果は次の通りである。

(1) Schnabl によって構成された解析的なタキオン凝縮解の真空エネルギーは、レベル切断近似とよばれる計算法によっても計算できると考えられていたが、このことを高い計算精度で確かめることができた。特に、ピュアゲージ解からタキオン凝縮解への変化をレベル切断の下で初めて計算できた。このとき、相互作用項を含めた数値計算を初めて実行し、解析解の中の phantom 項の寄与がなくても解析的な結果と同様の結果が得られることを示した。

この研究によって、Schnabl 解における phantom 項の役割は、計算法によって変わることが認識された。また、ピュアゲージ解からタキオン凝縮解への数値解析的な変化は、我々によって以前構成されていた古典解の振る舞いと同種のものであることが確認された。

(2) Schnabl の解析解に対するある種のゲージ不変量を、研究計画にある二つの手法、解析的手法と数値的手法、によって初めて計算した。このゲージ不変量についても、ピュアゲージ解とタキオン凝縮解とでは違う値となることを示した。このゲージ不変量の値は、解析的な計算ではタキオン凝縮解の phantom 項の寄与のみから得られ、数値的な計算では phantom 項以外の寄与により決まることを示し、このような phantom 項の振舞いは真空エネルギーに対するものと同様であることを指摘した。また、タキオン解析解に対するゲージ不変量の値は、Siegel ゲージにおける数値解に対する値と一致することを示し、両者がゲージ同値であることへのさらなる証拠を与えることができた。

(3) 弦の場の理論における Schnabl の解析解と共形場の理論における境界状態との関係を明らかにした。共形場の理論における境界状態は閉弦の質量殻上の状態に対して与えられている。これに対して、Schnabl の解析解から

得られる境界状態は、共形場の理論における境界状態を含み、かつ質量殻外への自然な拡張となっている。これらの事実に基づいて、我々は境界状態が閉弦の場の理論とそのタキオン凝縮解によって得られるべきものであることを指摘した。後に、国外でこの指摘を実現している研究が現れている。

(4) 浅野-加藤ゲージにおける弦の場の理論の解析を行った。このゲージにおけるタキオン凝縮解を数値計算によって構成し、この数値解に対して、真空エネルギーとゲージ不変オーバーラップの値を計算した。この研究によって、これらのゲージ不変量のゲージ非依存性が十分な精度で成り立っていることが明らかになった。また、これらの値は厳密解に対する値と良く一致していることが示された。これら結果は、レベル切断法を用いて構成された数値的なタキオン凝縮解と、Schnabl によって構成された厳密解がゲージ変換によって結びつけられるという予想と矛盾しておらず、二つの解のゲージ同値性を支持するものである。

(5) (1)~(4)の結果は、主に Schnabl の解析解に関する研究成果であり、特にそのゲージ変換との関係を明らかにするものである。ゲージ不変オーバーラップと解析解との関係を論じる研究としては、これらが世界的に先駆的成果の一つとなっており、その後、超弦の場の理論においてもオーバーラップに関する問題提起をする論文が現れている。

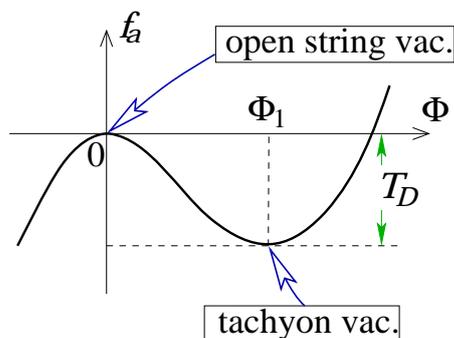
これらの研究によって、タキオン凝縮解のゲージ変換に対する性質がレベル切断法で明確に見えることが明らかになった。レベル切断法は、良い近似計算なのかどうかはまだ定かではないので、これらの研究成果からレベル切断法の物理学的または数学的な意味の解明への手がかりになると期待される。それと同時に、弦の場の理論におけるゲージ対称性の構造の究明につながるものと思われる。

(6) 我々が構成した厳密解に関する数値計算結果を得ることができた。

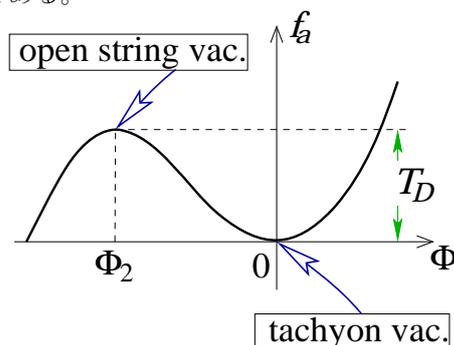
我々の厳密解はパラメータを持っており、そのほとんどの領域でピュアゲージ解を表しており、その臨界値ではじめてタキオン真空解を表すと考えられていた。しかし、弦の場の理論に対する理解が十分ではなく、真空エネルギーを解析的に導くことは困難であった。

そこで、真空エネルギーを直接計算することはせずに、厳密解のまわりで弦場を展開したゆらぎの場に対する弦の場の理論の真空の構造を数値計算によって調べた。

ピュアゲージ解のまわりでの理論の真空は下図のような構造をもつと考えられる。



つまり、元の理論と同様、安定なタキオン真空解を持つと予想される。一方、タキオン真空解に対しては、不安定な開弦真空が存在し、正の真空エネルギーをもつと考えられるのである。



我々は、レベル切断近似でゆらぎに対する理論を解析し、パラメータの値によって予想される通り、安定解と不安定解が存在し、かつ十分な精度で真空エネルギーとオーバーラップの値が得られることを示した。

この研究成果は、臨界値における我々の厳密解がタキオン真空解であることを強く示唆するものである。我々の厳密解は、Schnabl 解にはない特徴も持っており、弦の場の理論のゲージ構造の解明へ向けて Schnabl 解と相補的な役割をもつものと期待される。

この研究成果は、国際的にも注目され、ロシアで 2009 年 4 月に行われる国際会議でも講演を行うこととなった。

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 6 件)

- ① I. Kishimoto, T. Takahashi: Numerical Evaluation of Gauge Invariants for a-gauge Solutions in Open String Field Theory, Prog. Theor. Phys. 121 (2009) 695 (査読有)
- ② T. Kawano, I. Kishimoto, T. Takahashi: Schnabl's Solution and Boundary States in Open String Field Theory, Phys. Lett. B669 (2008) 357-358 (査読有)
- ③ T. Kawano, I. Kishimoto, T. Takahashi:

Gauge Invariant Overlaps for Classical Solutions in Open String Field Theory, Nucl. Phys. B803 (2008) 135-165 (査読有)
 ④ T. Takahashi: Level Truncation Analysis of Exact Solutions in Open String Field Theory, J. High Energy Phys., 0801 (2008) 001 (査読有)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 岸本功 高橋智彦: 浅野-加藤ゲージにおけるゲージ不変量の数値計算, 日本物理学会, 2008 年 9 月 23 日, 山形大学小白川キャンパス
- ② 川野輝彦 岸本功 九後汰一郎 高橋智彦: Schnabl 解に対するあるゲージ不変量の計算, 日本物理学会, 2008 年 3 月 26 日, 近畿大学本部 (東大阪) キャンパス
- ③ 高橋智彦: レベル切断法による厳密なタキオン真空解の考察, 日本物理学会, 2007 年 9 月 2 日, 北海道大学札幌キャンパス
- ④ 高橋智彦: Level truncation analysis of exact solutions in open string field theory, 理研シンポジウム「弦の場の理論 07」, 2007 年 10 月 6 日, 理研大河内ホール
- ⑤ 勝又郁枝 高橋智彦: Level truncation of pure gauge solutions in string field theory, Joint Meeting of Pacific Region Particle Physics Communities, 2006 年 11 月 1 日, ハワイ シェラトンワイキキホテル

[その他]

ホームページ

<http://asuka.phys.nara-wu.ac.jp/tomo>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 智彦 (TAKAHASHI TOMOHIKO)
 奈良女子大学・理学部・助教
 研究者番号: 10324956