

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 3月31日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540269

研究課題名（和文） 弦の場の理論から展開する新たな弦理論像

研究課題名（英文） A new image of strings created from string field theory

研究代表者

高橋 智彦（TAKAHASHI TOMOHIKO）

奈良女子大学・理学部・准教授

研究者番号：10324956

研究成果の概要（和文）：弦の場の理論における世界最高精度での解析を行ってタキオン真空解を構成した。結果として、単位弦場に基づく解がタキオン真空解であるという証拠を得た。また、弦の場の理論における量子効果について、数値計算的手法と解析的手法の両方を用いて考察し、タキオン真空上では量子効果が相殺して消えることを示した。

研究成果の概要（英文）：We construct a numerical tachyon vacuum solution with the highest accuracy in the world. As a result, we clarify that an identity-based solution can be regarded as the tachyon vacuum solution. In addition, we consider quantum effects in string field theories by using numerical and analytic methods. We show that a quantum effect should be vanished by some cancelation at the tachyon vacuum.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：素粒子論

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（理論）

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

1. 研究開始当初の背景

(1) 重力の理論と量子力学が融合した統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するためには、弦理論の指導原理・基本法則を明らかにする必要があった。この問題を打破するために、ゲージ対称性に基づいた弦の場の理論が1986年に構築された。

(2) その後二十数年の進展は小さかったが、

タキオン凝縮の数値解析に成功した論文が2000年に発表され、世界的に弦の場の理論の研究が再び活発化した。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があげてきた研究成果には次のようなものがある。① 弦の場の理論のタキオン凝縮解は自明な解からの極限（特異ゲージ変換の一種）によって与えられることを示した。

② Gauge invariant overlap と呼ぶある種のゲージ不変量の値をタキオン凝縮解に対して計算し、非自明な値となることを示した。(4) これらの結果はゲージ対称性と深く関わるが、弦の場の理論のゲージ対称性の非自明な構造は、関連するタキオン凝縮の研究を通じて近年ようやく明らかになりつつある。このゲージ対称性は非常に巨大な自由度と無限に離れた場所同士が相関する非局所性をもつという、標準理論が立脚する場の量子論には無かった特徴をもつ。未知の構造であるがゆえに、弦の場の理論のゲージ対称性は新たな弦理論像を切り拓く可能性を秘めている。実際、弦理論において重力をどう扱うべきかという問題に対しては、閉弦の境界状態に限れば開弦の場の理論自身に取り込めることが明らかになりつつある。このような新たな視点が提案され、弦の場の理論から新たな弦理論像を展開するという研究は前進しはじめていた。

2. 研究の目的

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が、現在考えられる最良の方法の一つである。重要な未解決問題として、開いた弦の場の理論において閉じた弦をどのようにして記述すべきかという問題がある。また、超対称性をもつ弦の場の理論の構造の解明という問題も残されている。

今回の研究目的は、閉じた弦やゲージ対称性が弦の場の理論においてどのように組み込まれているのかを解明することである。そして、弦の場の理論から明らかになる理論構造から、新たな弦理論の枠組みや見方(弦理論像)を展開することを目指した。

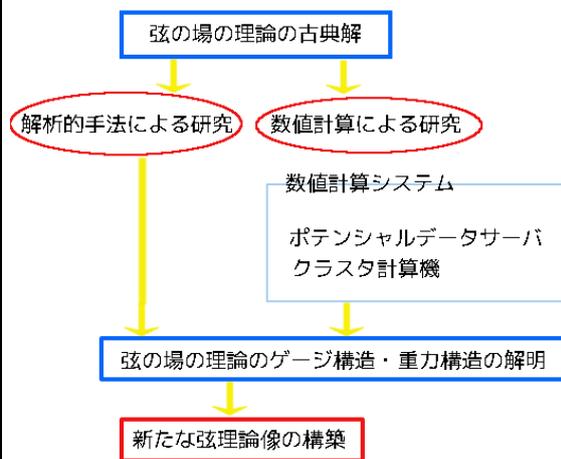
まず、弦の場の理論の有効作用について高性能コンピュータを用いて数値的に解析し、タキオン真空解などの古典解を導出する際に用いられるレベル切断法がどの程度有効であるのか見極める。レベル切断法の有用性はよく知られているが、それが近似法であるのかどうかでさえ明らかになっていない。そこで、レベル切断法の計算レベルを上げて世界記録を達成し、この方法の有効性を明らかにしていく。次に、解析的な手法を用いることにより、開弦の場の理論において重力子を含む閉弦がどのように記述されるかを明らかにする。

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、事実、過去の成

果は両方が組み合わせられて初めて生み出されたものである。二つの手法を融合させることで、弦理論における D ブレーンの消滅の理論的記述、弦の場の理論における新たなゲージ不変量の構成、という未解決問題を明らかにすることを試みていった。

3. 研究の方法

弦の場の理論の古典解およびゲージ対称性について、解析的手法およびクラスタ計算機による数値計算的手法を用いて解析してゆく。近年の弦の場の理論がこれら二つの相補的手法により発展してきたことを踏まえ、より有効にこれらの方法を組み合わせた解析を行い、弦の場の理論のゲージ構造・閉弦が関与する重力の構造・超対称性をもつ理論の構造を解明する。研究計画の概要は以下の図のようにまとめられる。



数値計算的手法の適用に関して、奈良女子大学に数値計算システムを設置し、研究分担者:岸本功氏がネットワークを通してアクセスできる環境を構築した。弦の場の理論の数値計算に必要な膨大なデータを代表者と分担者が共有することで効率的に解析を行った。

(1) 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する。特に、数値的なタキオン真空解の切断レベルを世界記録まであげることによってこの解の性質を調べる。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、真空エネルギーのレベル切断による評価など、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により、古典

解の性質を明らかにしていった。

(2) 弦の場の理論のポテンシャルを解析するには、並列型コンピュータで計算を行うことが非常に有効である。また、切断レベルをあげるためにはギガバイト単位のデータを処理する必要がある。このため、クラスタ計算機とデータサーバを組み合わせた数値計算システムを奈良女子大学に構築して研究を行った。計算機本体は既存のワークステーションのメモリ拡充などと合わせてシステムを構成する。システムが稼働するまでの計算能力の不足は、京都大学基礎物理学研究所などの共同利用システムの活用によって補った。

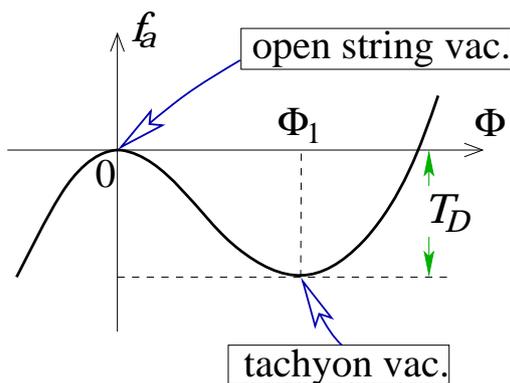
(3) この数値計算システムを用いた解析において、研究分担者の岸本功氏と共同で研究を行った。また、データはギガバイト単位の大きな容量をもつので、クラスタシステムと連携するデータサーバの構築を行った。

(4) クラスタシステムを用いた数値解析と並行して、弦の場の理論の厳密な解析を行う研究を行い、弦の場の理論における閉弦の記述について考察した。特に、タキオン真空における量子効果について計算し、数値計算の結果を合わせて、タキオン真空における閉弦の存在について研究していった。タキオン真空の解析を行う際には、我々が構成した単位弦場に基づく解析解を用いた。

4. 研究成果

弦の場の理論の理論構造を古典解とゲージ対称性の観点から明らかにするという目的で、クラスタ計算機を導入して弦の場の理論の数値解析を行い、以下の成果を得た。

(1) 弦の場の理論は次の図のような真空構造をもつと思われる。



摂動的真空は不安定であり、安定なタキオン真空が存在し、タキオン真空の真空エネルギーはちょうどDブレーンのエネルギーを相殺する値に等しいと考えられている。

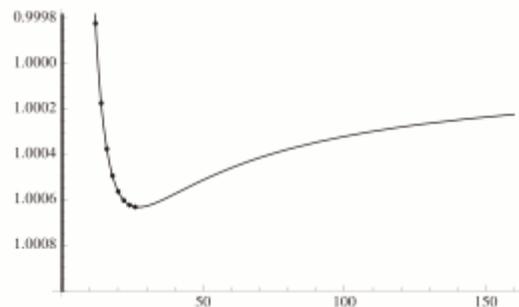
我々はクラスタシステムを用いて、レベル切断法によるタキオン真空解を構成した。解析結果をまとめたのが次の表である。左にある数字 L は近似のレベルを表す数字で、大き

L	$V[\Phi_{a=0}]$	$\mathcal{O}_V[\Phi_{a=0}]$
0	-0.6846162	0.7165627
2	-0.9593766	0.8898618
4	-0.9878218	0.9319524
6	-0.9951771	0.9510789
8	-0.9979301	0.9611748
10	-0.9991825	0.9681148
12	-0.9998223	0.9725595
14	-1.0001737	0.9761715
16	-1.0003755	0.9786768
18	-1.0004937	0.9809045
20	-1.0005630	0.9825168
22	-1.0006023	0.9840334
24	-1.0006227	0.9851603
26	-1.0006312	0.9862619

(Prog. Theor. Phys. Suppl. **188**(2011)155 より)

いほど近似精度が高い。真中の列が真空エネルギー、右が別のゲージ不変量、オーバーラップの結果である。以前の解析ではレベル18までの結果しかなく、レベル26までの計算結果は我々が初めて得た結果である。

真空エネルギーは予想値が1になるように規格化してある。表からレベルを上げていくと、予想値を超えていく様子が見える。しかし、レベル切断法には、既知の結果を非常によく再現する外挿法が知られており、この外挿法を用いてレベル150程度まで外挿した結果が次のグラフである。レベル30あたりから再び1に近づきはじめることがわかる。



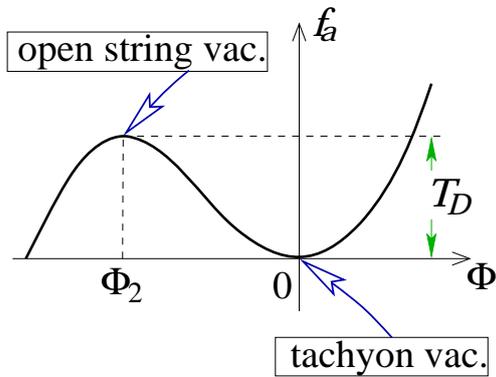
(Prog. Theor. Phys. Suppl. **188**(2011)155 より)

(2) 我々が研究してきた単位弦場に基づく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る。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

は先ほどの摂動的真空と同じ構造をもつと考えられる。一方、臨界値におけるタキオン真空解に対しては、次の図のように、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、摂動的真空のまわりでの解析と同じ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。

特に、タキオン真空上での不安定真空エネルギーの数値解析結果は次の表のようになる。

L	$V_{a=-1/2}[\Phi_{a=-1/2}]$	$\mathcal{O}_V[\Phi_{a=-1/2}]$
0	2.3105795	-1.0748441
2	2.5641847	-1.0156983
4	1.6550774	-0.9539832
6	1.6727496	-0.9207572
8	1.4193393	-0.9377548
10	1.4168893	-0.9110994
12	1.3035715	-0.9237917
14	1.2986472	-0.9056729
16	1.2357748	-0.9229035
18	1.2310583	-0.9086563
20	1.1915648	-0.9212376
22	1.1874828	-0.9103838
24	1.1605884	-0.9231608
26	1.1571287	-0.9142181

(Prog. Theor. Phys. Suppl. **188**(2011)155 より)

予想される値を1に規格化しているのので、レベルが上がるにつれて、計算結果が予想値に近づいていくことがわかる。外挿法をつかってレベル無限大まで外挿すると、0.9909238となり、予想値の99%の結果がレベル切断法によって得られたことになる。この結果によって、「単位弦場に基づく古典解～タキオン真空解」という予想を世界最高レベルで確認できたことになった。

(3) 弦の場の理論における数値解析結果に基づきながら、解析的手法を用いた研究を行

い、次の結果を得た。

- ① 弦の場の理論における単位弦場に基づく古典解のまわりでの理論を解析し、ホモトピー演算子が存在することを示した。
- ② このホモトピー演算子を用いて、タキオン真空における1ループ真空エネルギーがプレーン間距離などのモデュライ変数に依存しないことを示した。
- ③ 超弦の場の理論におけるBRST作用素の変形を論じ、ある条件のもとでホモトピー演算子が存在することを示した。
- ④ 3弦相互作用をもつ超弦の場の理論において、ホモトピー演算子が付随するBRST作用素を生成する古典解を構成した。

単位弦場に基づく古典解は弦の場の理論のゲージ対称性と深く関連しているが、その関係を真空構造の観点から明らかにすることができた。これらの研究結果は、この古典解が物理的にタキオン真空解に対応することと完全に整合している。1ループ真空エネルギーのモデュライ依存性の計算では、数値解析で得た結果を厳密に証明することができた。解析的研究によって、単位弦場に基づく古典解とタキオン真空解との対応が明確になったと同時に、弦の場の理論における非摂動的真空上での量子効果が厳密に計算できたことは重要な成果である。

(4) 本研究によって、弦の場の理論における古典解とゲージ対称性の構造が明らかになった。特に、タキオン真空における弦の場の理論の量子効果が消えたという結果は、弦の場の理論において整合的に閉弦の記述ができる可能性を示唆している。別のゲージ不変量について調べる必要があるだろう。

タキオン真空上では、弦の場の理論は位相的な理論となっている。弦の場は「弦」の配位によって与えられる量だが、タキオン真空では物理的にほとんど空っぽの実体としての意味をもつことになる。また、レベル切断法による数値計算の成功は、弦の場を無限次元の行列として捉えられることを示している。我々の研究結果は、弦理論がある種の位相的な無限次元行列の理論とみなせることを示唆しているように思われる。

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 11件)

- ① S. Inatomi, I. Kishimoto, T. Takahashi, "Homotopy operators and identity-based solutions in cubic superstring field theory", J. High Energy Phys., 1110

(2011)114, (査読有).

DOI: 10.1007/JHEP10(2011)114

②S. Inatomi, I. Kishimoto, T. Takahashi, "Homotopy operators and One-Loop Vacuum Energy at the Tachyon Vacuum", Prog. Theor. Phys., 126(2011)1077-1089, (査読有).

DOI: 10.1143/PTP.126.1077

③I. Kishimoto, T. Takahashi, "Numerical Evaluation of Gauge Invariants for a-gauge Solutions in Open String Field Theory", Theor. Math. Phys., 163(3) (2010) 710-716, (査読有).

DOI: 10.1007/s11232-010-0054-y

④I. Kishimoto, T. Takahashi, "Exploring the vacuum structure near the identity-based solutions", Theor. Math. Phys., 163(3) (2010) 710-716, (査読有).

DOI: 10.1007/s11232-010-0055-x

⑤I. Kishimoto, T. Takahashi, "Vacuum structure around identity based solutions", Prog. Theor. Phys. 122(2009) 385, (査読有).

DOI: 10.1143/PTP.122.385

[学会発表] (計 13件)

①"超弦の場の理論における単位弦場に基づく解とホモトピー演算子", 稲富晶子, 岸本功, 高橋智彦, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 25 日, 関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス

②"タキオン真空における 1-ループ真空エネルギー", 稲富晶子, 岸本功, 高橋智彦, 日本物理学会秋季大会, 2011 年 9 月 17 日, 弘前大学文京町キャンパス

③"タキオン真空における開弦場のループ振幅", 稲富晶子, 岸本功, 齊藤洋子, 高橋智彦, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 26 日

④"タキオン真空における弦の場の理論の対称性について", 稲富晶子, 高橋智彦, 日本物理学会第 66 回年次大会, 2011 年 3 月 26 日

⑤"SFT における古典解まわりでの質量スペクトル", 稲富晶子, 岸本功, 齊藤洋子, 高橋智彦, 日本物理学会秋季大会, 2009 年 9 月 11 日, 九州工業大学戸畑キャンパス

[その他]

ホームページ等

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

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・准教授

研究者番号: 10324956

(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: 60399433