

令和元年6月12日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05056

研究課題名(和文) 弦の場の理論における時空構造の研究

研究課題名(英文) Space-time structure in string field theories

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：開弦の場の理論における古典解に関する主に二つの重要な成果を得た。一つは、磁場が凝縮する新しい古典解を構成し、位相的な非自明だが弦場は不連続性をもたないという、弦の場の理論の非局所性を反映する性質を初めて明らかにした。もう一つは、ある種のタキオン真空解の開弦の場の理論に、右向きと左向きの開弦の運動の分離によって、閉弦理論がもつべき対称性が現れることを明らかにした。また、このタキオン真空上の開弦は端点をもつにもかかわらず、閉じた世界面を生成することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二つの研究成果とも開弦の場の理論によって時空の性質を明らかにできる可能性を切り拓いたという意義がある。

開弦理論における磁場の凝縮は時空と関係する閉じた弦の凝縮ともみなせるため、磁場に関する古典解の構成は、開弦の場の理論で閉弦を扱えることを示す結果である。また、タキオン真空上で閉弦の対称性を見出した成果は、開弦の場の理論によって閉弦のダイナミクスが扱えることを示している。

なぜ4次元の膨張宇宙が存在するのか等の時空の性質に関わる根源的な問いに対して、開弦の場の理論によって迫れることを示唆する研究成果なのである。

研究成果の概要(英文)：We have obtained two important results related to classical solutions in open string field theories. First, we have constructed a new solution corresponding to constant background magnetic field. The solution has no discontinuities but topologically nontrivial. These results reflect non-locality of string field theories. Secondly, we have found closed string symmetries at the identity-based tachyon vacuum solution in open string field theory, where left and right moving modes of an open string are decoupled. We clarified that open strings generate a closed world-sheet, though an open string has end-points.

研究分野：素粒子論

キーワード：弦の場の理論 対称テンソル場 Erler-Maccaferri解 タキオン真空解 ベクトルプロファイル 連続ヒラソロ代数 サイン二乗変形

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

重力の理論と量子力学が統合的に融合した理論を構築することは、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て、素粒子物理学における統一理論、重力の量子論の研究のみならず、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る。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国内では論文 1 において、国外では論文 2 において構築された。それ以降、日本のグループが世界の研究動向の一翼を担い、本研究もその流れを汲むものである。

その後、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が 2000 年に成功を収め(論文 3)、弦の場の理論の研究が世界的に再び活性化した。現在では、様々な解析的な古典解が構成されるに至っており、2008 年以降は国際会議「String Field Theory and Related Aspects」(SFT2008-2012, SFT2014)が開催され、弦の場の理論に係わる進展が継続的にもたらされている状況である。

こうした研究動向の中で、(論文 4)によって研究代表者らは、弦の場の理論におけるタキオン真空での物理的自由度の消滅について証明する研究を行っている。

弦の場の理論のこのような展開の中で、研究代表者は次のような研究成果をあげていた。

1. 解析的な古典解を構成し(論文 5)、これがタキオン真空解であることを、物理的自由度の消失、散乱振幅の計算、数値的な真空構造、についての十年以上にわたる研究によって明らかにした。
2. この古典解に対して、タキオン真空を特徴づけるホモトピー演算子を構成し、タキオン真空上の量子論的なエネルギーがゼロになることを示した(論文 6)。
3. この古典解に対するエネルギー密度などの物理量を直接かつ解析的に計算することに成功し、これがタキオン真空解であるという確証を得た(論文 7)(論文 8)。

このように、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る。本研究で特に着目するのは、タキオン真空上の弦の場の理論には位相的場の理論と同様に摂動的な自由度がなく、この古典解から構成された伝搬関数が世界面の構造をもつ点である。つまり、この伝搬関数を用いることによって、重力を含む閉弦の散乱振幅を導出し、タキオン凝縮に関する最後の難問を解決できる可能性があるのだ。

(論文 1) H. Hata, K. Itoh, T. Kugo, H. Kunitomo and K. Ogawa, Phys. Rev. D34 (1986)2360.

(論文 2) E. Witten, Nucl. Phys. B294 (1986) 291.

(論文 3) A. Sen and B. Zwiebach, JHEP 0003 (2000) 002.

(論文 4) I. Kishimoto and T. Takahashi, Prog. Theor. Phys. 108 (2002) 591.

(論文 5) T. Takahashi and S. Tanimoto, JHEP 0203 (2002) 033.

(論文 6) S. Inatomi, I. Kishimoto and T. Takahashi, Prog. Theor. Phys. 126 (2011) No.6.

(論文 7) I. Kishimoto, T. Masuda, T. Takahashi, accepted for publication in

Prog. Theor. Exp. Phys. Volume 2014, Issue 10, October 2014, 103B02.

(論文 8) N. Ishibashi, J. High Energ. Phys. (2015) 2015: 168.

2. 研究の目的

閉弦の場の理論における閉弦の記述方法を探究し、そこから見られる理論の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。解析的手法と数値計算を併用することによって、タキオン真空における閉弦振幅の導出について研究し、弦の場の理論における弦場の空間および時空構造、さらには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。

3. 研究の方法

弦の場の理論の古典解について、解析的手法および数値計算的手法を併用して解析し、閉弦の場の理論における閉弦の記述方法について研究する。

まず、このタキオン真空における伝搬関数の性質を共形場理論の方法を用いて解析し、伝搬関数が生成する曲面を、相関関数の計算が容易な平坦な面に移す共形変換を構成する準備をする。タキオン真空上の世界面はディスクの極限として捉えられるため、ディスク振幅の性質について再考する。

Erler-Maccaferri による古典解の構成法に基づき、新たな古典解を構成する。時空の性質と関連する反対称テンソル場の凝縮について考察し、とくにベクトル場のプロファイルについてコンピュータを用いた数値計算を行い、弦の場の理論における非局所性の性質について明らかにする。

サイン二乗変形された系とタキオン真空上のハミルトニアンが記述する系との類似性を用い、タキオン真空における世界面の性質について調べる。さらに、この世界面にどのような二次元

理論があるのか明らかにする。

これらの研究を基礎として、1ループ真空エネルギー、ゲージ不変量の多点関数に関連する曲面の共形変換について考察し、これらの物理量の計算に向けた研究を行う。この際、弦の場の理論の研究に有効だったレベル切断法などの数値計算によって計算結果を予測しながら解析を進めることで研究を効率的に進め、開弦場によって閉弦振幅、時空構造がどう捉えられるのかについて解明していく。

4. 研究成果

(1) 開弦の場の理論による閉弦の記述法を探る準備的な研究において次のような成果を得た。

まず、開弦の場の理論における多重プレーン解を用いて、弦の場の理論と行列理論との関係について考察した。行列理論は閉弦の力学を記述することが知られるが、同様に弦の場の理論でも閉弦の力学を扱える可能性があることが明らかにした。中国成都で開催された国際会議 SFT2015 に出席し、この研究に関する研究成果を発表した。

開弦と閉弦との相互作用に関係するディスク振幅についての研究を行った。特に、ディスク面に作用する $SU(1,1)$ 変換とスケール変換に対するハール測度、このハール測度から決定されるモジュライ変数の積分について研究を行い、今まで考えられてきたディスク振幅の表式が修正されるべきことを明らかにした。同時に、ゲージ固定する変数のある特定の値にとれば、本研究で得た新たな振幅表式が従来表式に完全に一致することも示した。ディスク振幅は弦理論の根幹をなす量子異常と深い係わりがあるが、二つの表式が一致することにより、この弦理論の基礎も変更を受けないことを明らかにした。新たなディスク振幅の表式は、従来表式を一般のモジュライ変数を含むよう正しく拡張した表式なのである。この研究成果は日本物理学会で発表することとなった。

(2) 開弦の場の理論において反対称テンソル場（磁場）が凝縮した古典解に関する研究を行った。磁場の凝縮は閉弦の反対称テンソル場と深い関係があり、開弦場の凝縮ではあるが、時空構造と関わる閉弦のダイナミクスと関連する研究である。また、磁場の凝縮は D プレーン上に非可換時空の構造を生じると考えられており、これが弦の場の理論からどう捉えられるかと考察する点において、弦の場の理論の時空構造に直接関係する研究である。この研究において次のような成果を得た。

Erler-Maccaferrri は境界条件変更演算子を用いて、時間に依存しない任意の開弦の背景場を実現する古典解の構成法を提唱しており、この Erler-Maccaferrri の構成法は、今までに知られていない古典解を構成できる可能性を秘めた強力な方法である。本研究では Erler-Maccaferrri の構成法に基づき、反対称テンソル場が凝縮した古典解を新たに構成した。まず、反対称テンソル場と結合した開弦の第一量子化について研究し、境界条件変更演算子を構成した。さらに、境界条件変更演算子の性質を明らかにし、3点関数と4点関数を計算して、それらの漸近的振る舞いについて研究した。この境界条件変更演算子を使って磁場が凝縮した古典解を構成し、真空エネルギーの値から Born-Infeld 作用が導かれることを明らかにした。

また、磁場中の量子力学系では Dirac の量子化条件をみだす複数の真空が縮退していることに対応し、複数の古典解の線形結合として一般の解が得られることを明らかにした。これらの研究に関して、サンパウロで開催された国際会議 SFT2016 に出席して研究発表を行っている。

境界条件変更演算子を用いたこの解は定数磁場に対応する解であり、背景時空としてトーラスを考えるならば、チャーン数が非自明な値をとる解となる。点粒子の場の理論では、位相的に非自明なゲージ場はトーラスを一周したときに不連続点をもつのが一般的である。このような状況が弦の場の理論においてどのように反映されるのかについて、古典解のプロファイルを通じて明らかにする研究を行った。結果として、弦の場の理論においては位相的な不連続性が現れず、古典解の成分場がトーラス上で一価関数となることを明らかにした。

点粒子の場の理論における位相的な不連続性は局所的な領域をつなぎ合わせることから生じるのに対して、弦場とゲージ変換に関しては局所的な領域の中だけに閉じて考えることができない。弦の場の理論のこの非局所性の結果として古典解の一価性が生じているという考え方を提唱した。

この古典解に対するゲージ不変量の計算を行った。このゲージ不変量は、バルクの閉弦と古典解が表す D プレーンとの結合に対応しており、Born-Infeld 作用から導いた結合と比較されるべき量である。結果として、古典解に対するゲージ不変量と Born-Infeld 作用からの結合とが一致していることを確かめた。我々の古典解が正しく Erler-Maccaferrri 解であることを示す結果である。プロファイルとゲージ不変量に関する研究成果についてイスラエルでの国際会議、日本物理学会において発表した。

(3) 単位弦場に基づくタキオン真空解と開弦系のサイン二乗変形についての研究を行った。サイン二乗変形に関する現在までの研究では、開弦の自由度を用いて閉弦を記述する可能性が示唆されてきた。本研究では、サイン二乗変形した開弦系で右向きと左向きモードのハミルトニアンが可換となり、その結果として閉弦系を記述できるようになることを明らかにした。可換な二つのハミルトニアンが時間発展によってつくる世界面は、閉弦理論における正則・反正則な世界面となり、それぞれに作用する二つの連続ピラソロ演算子があることがわかった。

次に、単位弦場に基づくタキオン真空解から生じる変形された BRST 演算子でも、サイン二乗変形と同じ機構によって、右向きと左向きモードが反可換となって分離し、それぞれがベキ零性をみたくすることを明らかにした。また、変形された BRST 演算子から右向きと左向きの連続ピラソロ演算子を導き、これらの演算子が変形された BRST 演算子と可換となることを示した。これは、タキオン真空での世界面にあるピラソロ対称性が、閉弦理論と同様、右向きと左向きに分離することを示している。

さらに、タキオン真空におけるエネルギー運動量テンソル、ゴースト場、反ゴースト場、ゴースト数カレント、BRST カレントを構成し、これらが摂動論的真空と同じ演算子積展開をみたくことを示した。タキオン真空には閉弦しか存在しないにもかかわらず、タキオン真空上の共形場理論を開弦理論によって記述できることを示している。

右向きと左向きのピラソロ対称性は閉弦理論の対称性であり、時空の一般座標変換に対する対称性を含んでいるため、これらの結果を合わせると、タキオン真空における開弦の場の理論が時空の一般座標変換のもとで不変であることが結論される。研究課題にある弦の場の理論における時空構造が、弦の場の理論における対称性という形で確認できたことを意味する。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

I. Kishimoto, T. Kitade, T. Takahashi, “ Closed string symmetries in open string field theory ”, Progress of Theoretical and Experimental Physics 123B04 2018 年 12 月
<https://doi.org/10.1093/ptep/pty125>

N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda, T. Takahashi, “ Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background ”, J. High Energy Phys. 05 144 2018 年
[https://doi.org/10.1007/JHEP05\(2018\)144](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2018)144)

N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Takahashi, “ String field theory solution corresponding to constant background magnetic field ”, Progress of Theoretical and Experimental Physics 013B06 2017 年
<https://doi.org/10.1093/ptep/ptw185>

〔学会発表〕(計 13 件)

岸本 功, 高橋 智彦, “ 超弦の場の理論におけるサイン二乗変形 ”, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 17 日, 九州大学伊都キャンパス

近藤 綾, 大木 洋, 高橋 智彦, “ 超対称南部・Jona-Lasinio 模型における質量項と超対称性の破れ ”, 日本物理学会秋季大会, 2018 年 9 月 16 日, 信州大学松本キャンパス

岸本功, 北出智巳, 高橋 智彦, “ 開弦の場の理論における閉弦の対称性 ”, 日本物理学会秋季大会, 2018 年 9 月 15 日, 信州大学松本キャンパス

近藤綾, 大木洋, 高橋智彦, “ 超対称南部・Jona-Lasinio 模型における隠れた局所対称性と量子異常 ”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 25 日, 東京理科大学野田キャンパス

石橋延幸, 岸本功, 増田暢, 高橋智彦, “ 弦の場の理論におけるゲージ場の凝縮解とゲージ不変量 ”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 25 日, 東京理科大学野田キャンパス

石橋延幸, 岸本功, 増田暢, 高橋智彦, “ 弦の場の理論におけるゲージ場の凝縮解とプロフィール ”, 日本物理学会秋季大会, 2017 年 9 月 14 日, 宇都宮大学 峰キャンパス

T. Takahashi, “ Vector profile of classical solutions for constant magnetic field background ”, SFT@HIT, June 25, 2017, Holon Institute of Technology, Holon, Jerusalem.

高橋智彦, “ 定常磁場中の開弦と境界条件変更演算子 ”, 数学・物理・情報科学の研究交流シンポジウム, 2016 年 12 月 17 日, 奈良女子大学

石橋延幸, 岸本功, 高橋智彦, “ 弦の場の理論におけるゲージ場の凝縮解 ”, 日本物理学会秋季大会, 2016 年 9 月 22 日, 宮崎大学 木花キャンパス

T. Takahashi, “ Classical solutions for gauge field condensation ”, String Field Theory and Related Aspects (SFT2016), June 2, 2016, IFT-UNESP, Sao Paulo, Brazil.

高橋智彦, 津川栞, "開弦の場の理論におけるディスク振幅について", 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学泉キャンパス

高橋智彦, "Erler-Maccaferri 解について", 弦の場の理論 16, 2016 年 2 月 22 日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎

T. Takahashi, "Multibrane Solutions and Chan-Paton Factors", String Field Theory and Related Aspects (SFT2015), May 11, 2015, Sichuan University, Chengdu, China

〔その他〕

ホームページ等

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