

平成 22 年 3 月 26 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740164
 研究課題名（和文）
 弦理論における非摂動的励起の性質と定式化
 研究課題名（英文）
 Properties and formulation of nonperturbative excitations in string theory
 研究代表者
 村上 公一 (Murakami Koichi)
 独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・協力研究員
 研究者番号：00400698

研究成果の概要（和文）：

OSp 不変なボソンの閉弦の場の理論において、BRST 不変な第二量子化状態として、弦理論のソリトンである D-ブレーンを記述することを提案し、我々の提案の正当性を示す諸々の証拠を示した。また、超対称な場合に拡張するために光円錐ゲージの NSR 超弦の場の理論を考察し、この理論に存在する余計な発散を正則化する次元正則化の手法を提案し、その手法の正当化の一つとして非臨界次元の超共形場の理論を世界面の理論として構成した。

研究成果の概要（英文）：

We propose a description of D-branes, which are solitons in string theory, as BRST invariant second-quantized states in the OSp invariant closed bosonic string field theory. For the purpose of a supersymmetric extension of this construction, we investigate the light-cone gauge NSR superstring field theory. We propose a dimensional regularization scheme to regularize the unwanted divergences in this string field theory. In order to verify our prescription, we construct a superconformal field theory in noncritical dimensions as a worldsheet theory for such string theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,100,000	0	1,100,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	540,000	3,440,000

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、BRST 対称性、超対称性

1. 研究開始当初の背景

1990年代半ばより、超弦理論の非摂動論的な側面に対して理解が深まっている。超弦理論においては、それまで、異なる5つの理論が互いに独立に存在すると考えられていた。ところが、SenやSchwarzの研究を端緒として、Wittenがその重要性を強調するに及んで、90年代半ばにこれらの弦理論は互いに関係しあっていると考えられるようになって来た。この異なる弦理論間の関係は、弦双対性(string duality)と呼ばれている。この弦双対性を裏付ける証拠の蓄積により、今では、弦理論の背後はこれらの理論を統一するひとつの理論があり、一見異なるように見える5つの理論はこの統一理論の異なる真空の周りの摂動論的な記述であると考えられるようになった。

この弦双対性を理解するうえで、D-ブレーンと呼ばれる、空間方向に広がりを持つ物体が重要な役割を果たすことが分かってきた。そして今や、弦理論の非摂動論的な側面はD-ブレーンを理解すること抜きにはありえないといって過言ではないほど、D-ブレーンを理解することは、弦理論とは何かを摂動論を越えて定式化する上で重要な課題であり、以来10年にわたる最近の弦理論の主な進展は常にD-ブレーンを中心になされてきたと言える。

弦理論における直接的なD-ブレーンの記述は何かという問題に対して、先ずPolchinskiによって開弦によるD-ブレーンの記述の仕方が与えられた。即ち、平坦時空中を伝播する開弦が端を持つことが出来る超平面を考えると、この超平面がD-ブレーンに期待される性質を持っていることが示された。この記述においては、従来の摂動論の計算処方を用いることが可能であるため多くの計算がなされ、D-ブレーンに対する理解が深まった。このようにD-ブレーンの弦理論による記述は、開弦理論からの解析が進展している。開弦理論によるD-ブレーンの解析は、第一量子化によるon-shellの解析のみならず、開弦の場の理論を用いた第二量子化の枠組みによるoff-shellの解析が、SenによるD-ブレーンの不安定性の研究を端緒として発展し、本研究開始当時から積極的に研究がなされていた。

このような開弦理論によるD-ブレーンに対する理解の深まりは、閉弦理論におけるD-ブレーンの記述にも進展をもたらした。即ち、片方の端点がD-ブレーン上に付着している開弦が掃引した1-ループ振幅をモジュラー変換すると、閉弦がD-ブレーンから放出されるように見せることが分かる。このことは、閉弦理論の第一量子化の摂動論的な記述においては、D-ブレーンは境界状態として記述されることを意味している。この考察を第二量子化の枠組みに拡張する試みとして、Hashimoto-HataはHIKKO型のボソンの閉

弦の場の理論に、境界状態をsource項としてゲージ不変に導入できることを示した。また、Kishimoto-Matsuo-Watanabeらは境界状態を弦場と見なしたときに、この閉弦の場の理論の場の非可換積のもとでの境界状態の振る舞いを調べ、冪等性という興味深い性質を見出した。しかしながら、弦の場の理論におけるD-ブレーンの解析に関しては、開弦理論の研究の多さに比べて、閉弦理論からの解析はあまり行なわれていなかったと言わざるを得ず、またこの状況は現在に至るもあまり変わっていないと言ってもよいと思われる。そこで本研究は、閉弦理論からのD-ブレーンの解析を目指し、D-ブレーンの閉弦理論からの記述の理解を深めることを目的のひとつとした。

このような、弦理論にD-ブレーンという自由度があるという考え方は、臨界弦のみならず、非臨界弦の枠内においても実現され、非臨界弦におけるD-ブレーンについても、本研究開始当初から積極的に研究が進められていた。特に本研究に関連する当時の進展としては、Hanada et alによってIshibashi-Kawaiの $c=0$ の非臨界弦の場の理論において、D-ブレーンと同定されるソリトン状態が構成されたことである。

以上の状況を踏まえ、私は馬場裕氏と石橋延幸氏と共同で、非臨界弦で行われたソリトン状態の構成の類推により、Siegelが提唱した $O\text{Sp}$ 不変なボソンの閉弦の場の理論において、BRST不変な状態を構成し、これをD-ブレーン状態とみなすことが出来るということを提唱した。

このような状況の中で本研究は開始された。

2. 研究の目的

本研究は、超弦理論における、D-ブレーンに代表される非摂動論的な励起状態の、ソリトンの振る舞いを非摂動論的な枠組みの中で定式化し、性質をより深く理解し新しい知見を得ることを目的とする。特に閉弦理論の観点からの解析によりD-ブレーンの定式化をおこなうことを主眼とする。

具体的には、上に述べた我々が構成した状態が確かにD-ブレーンを記述する状態とみなせることをより強固に確立するために、これを保証する証拠をさらに提示することを行う。更に、このボソンの場合の解析を超対称な場合に拡張することを目指す。

3. 研究の方法

先ず、 $O\text{Sp}$ 不変な弦の場の理論における、オブザーバブルに対応する演算子を同定し、さらにこれらの間の相関関数の計算から、散乱のS-行列を読み取る、いわゆるreduction公式をこの理論において明らかにした。これは、 $O\text{Sp}$ 不変な弦の場の理論が通常の点粒子の場の理論とはかなり異なった構造を持つため、先ずこのような解析が必要で

あった。

次に、この手法を用いて D-ブレーンが関連している振幅を計算して、そこから D-ブレーンの持つ物理的な諸量を読み取り、これが正しい値であることを示して、我々の提案した状態が正しく D-ブレーン状態であることを示し、我々の構成に正当性を与えた。

上の構成を超対称な場合に拡張するために、まず、光円錐ゲージの超弦の場の理論を研究した。これは、この理論が、ボソンの場合に有効であった Osp 不変な弦の場の理論の構成の基礎をなすものであることに加え、超弦の場の理論の考察の基礎を与える理論であると考えられるからである。本研究では、NSR 超弦理論に注目した。この弦の場の理論においては、相互作用点に世界面理論の超対称カレントを挿入するため、複数の相互作用点が衝突する moduli 空間上の点で、余計な発散が生じてしまう。これが障害となって、理論がうまく定義されていない。我々はこの問題を解決するために、時空の次元をずらす次元正則化を提案した。この手法は正則化段階で非臨界次元中の弦理論を考える必要があるため、光円錐ゲージ固定条件を外した d 次元の弦理論が、この理論の背後に存在すると考えることが出来るかどうか不明であった。そこで、Virasoro 代数の中心電荷が 10 である d 次元弦理論に対応する超共形場理論を構成し、それを用いて、光円錐ゲージの弦の場の理論の振幅を書き換えて、我々の次元正則化がどのような対称性を保っているかなどの性質を調べた。

4. 研究成果

本研究の成果は主なものは以下のようにまとめられる：

(1) Osp 不変なボソンの閉弦の場の理論において、BRST 不変な第二量子化状態として提案した D-ブレーン状態を用いて、弦理論の disk 振幅、及び円環振幅を計算し、normalization も含めて正しい振幅が導かれることを示した。これは D-ブレーンの tension を閉弦理論の枠内で決定したことを意味しており、大変興味深い結果である。また、円環振幅はモジュライ空間の積分として表わされるが、この積分の測度が正しく再現され、かつ積分範囲がモジュライ空間の全領域を過不足なく覆うことが分かり、我々の構成が正しいことのもう一つのチェックが与えられた。

(2) 平行な D-ブレーンが複数枚、同一時空点に存在する場合に (1) の解析を拡張した。このとき、BRST 不変性の要請により、D-ブレーン上の開弦の tachyon 場と考えられる自由度から Vandermond 行列式が導かれることを示し

た。これは複数枚の D-ブレーンにより開弦セクターに期待される非可換ゲージ群の性質を反映していると考えられ、D-ブレーンに付随する開弦の自由度を理解するうえで重要な結果である。

(3) 光円錐ゲージの超対称閉弦の場の理論を考察した。この理論の作用の相互作用点には、世界面理論の超対称カレントが挿入されており、これらが衝突するモジュライ空間上の点で余計な発散が生じる。そのため理論がうまく定義されていないという問題があった。我々は、振幅を時空の次元 d の関数とみなして、 d を大きく負にずらすことによりこの発散を正則化出来ることを見出した。さらに、外線が NS-NS 弦の場合に、tree level 振幅を実際に計算し、 d を臨界次元 10 に解析接続する際には余計な項が生ぜず、従って、弦の場の理論の作用に相殺項を付け加える必要がないことを示した。

(4) 上の (3) で行った次元正則化では、 d を非臨界次元からずらすため、正則化の段階では非臨界弦を考えていることになっている。上の理論は光円錐ゲージにゲージ固定した理論であるが、これのゲージ固定を外した超弦理論が存在するかどうかという問題を考えた。我々は、この問題を世界面上の理論として取り扱った。10 でない d について、 d 組のボソンとフェルミオンの組により、Virasoro 代数の中心電荷が 10 になるような超共形場理論で、かつ光円錐ゲージをとると、 d 光円錐ゲージ超弦理論の世界面上の理論になるものを構成した。我々はこの理論のエネルギー-運動量テンソルを求め、OEP を同定し、相関関数を求めた。この理論と通常のゴースト場の理論を組み合わせて、冪零な BRST 電荷を構成し、さらに、(3) で求めた光円錐ゲージ超弦の場の理論の tree level 振幅を BRST 不変な形に書き換えることが出来ることを示した。

今後の展望としては、まず (3) の解析を R セクターの弦場が入った場合に拡張し、さらには loop 振幅の場合の考察も必要である。もし、これらの考察において、(3) および (4) と同様の結論が得られるのであれば、超弦の場の理論を一つ完成させたことになり、これは国内外を問わず、弦理論において重要な結果となるため、是非、そこまで理論解析を拡張し、その結果をはっきりさせる必要がある。また、もしそれが言えれば、(4) で構成した超共形場理論を元に、ゲージ固定をしない超弦の場の理論を構成するという拡張が考えられる。これは無矛盾かつ共変な超弦の場の理論を構成するという長年の大問題について、一つの解答を与える可能性があり、さらに研究を推進させることが重要であると考えている。

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 7 件)

① 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“Light-cone gauge NSR strings in noncritical dimensions”

Journal of High Energy of Physics 01, 119 1-20 (2010)

査読有

② 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“Light-cone gauge string field theory in noncritical dimensions”

Journal of High Energy of Physics 12, 010 1-24 (2009)

査読有

③ 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“Light-cone gauge superstring field theory and dimensional regularization”

Journal of High Energy Physics 10, 035 1-17 (2009)

査読有

④ 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“D-brane and closed string field theory”

International Journal of Modern Physics A23, 2220-2228 (2008)

査読有

⑤ 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“D-brane states and annulus amplitudes in OSp invariant closed string field theory”

Journal of High Energy Physics 07, 046 1-12 (2008)

査読有

⑥ 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“D-brane states and disk amplitudes in OSp invariant closed string field theory”

Journal of High Energy Physics 10, 008 1-31 (2007)

査読有

⑦ 馬場裕、石橋延幸、村上公一

“Observables and correlation functions in OSp invariant string field theory”

Journal of High Energy Physics 05, 020 1-20 (2007)

査読有

[学会発表] (計 8 件)

① 村上公一

「非臨界次元における光円錐ゲージ NSR 超弦理論」

日本物理学会第 65 回年次大会

2010 年 3 月 21 日 岡山大学

② 村上公一

「非臨界次元における light-cone gauge 弦の場の理論」

日本物理学会 2009 年秋季大会

2009 年 9 月 11 日 甲南大学

③ 馬場裕

「light-cone gauge 超弦の場の理論と次元正則化」

日本物理学会秋季大会

2009 年 9 月 11 日 甲南大学

④ 馬場裕

「OSp 不変な超弦理論の R セクター」

日本物理学会 2008 年秋季大会

2008 年 9 月 23 日 山形大学

⑤ 村上公一

「OSp 不変な超弦の場の理論の NS セクター」

日本物理学会 2008 年秋季大会

2008 年 9 月 23 日 山形大学

⑥ 村上公一

「OSp 不変な閉弦の場の理論における定数 B 場中での D-brane 状態」

日本物理学会第 63 回年次大会

2008 年 3 月 26 日 近畿大学

⑦ 馬場裕

「OSp 不変な閉弦場の理論における annulus 振幅」

日本物理学会第 63 回年次大会

2008 年 3 月 26 日 近畿大学

⑧ 馬場裕

「D-brane states and Disk Amplitudes in OSp Invariant Closed String Field Theory」

日本物理学会第 62 回年次大会

2007 年 9 月 21 日 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 公一 (Murakami Koichi)

独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学

研究室・協力研究員

研究者番号：00400698