

平成 21 年 5 月 21 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740155

研究課題名 (和文) 弦の場の理論の超弦への応用

研究課題名 (英文) Application of string field theory to superstrings

研究代表者 岸本 功 (KISHIMOTO ISAO)

独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：60399433

研究成果の概要：ボゾニックな開弦の場の理論における運動方程式の解を解に移す変換を与えた。特に当時新たに構成されたマージナル解は単位弦場に基づく単純な解からの変換で得られることを指摘した。さらに同様な変換をバーコビッツの超弦の場の理論における古典解にも拡張した。開弦の場の理論における、質量殻上の閉弦状態に対するゲージ不変量をシュナブル解などの解析解や様々なゲージの数値解について計算し、互いにゲージ同値であることの証拠を与えた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,000,000	0	1,000,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	270,000	2,170,000

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：素粒子 (理論) ・ 弦の場の理論・Dブレーン

1. 研究開始当初の背景

(1) 弦の場の理論は、自然界の最も基本的な究極の理論の最有力候補である弦理論の非摂動的定式化として古くから提唱されており、特に 1980 年代には精力的に調べられていた。しかしながら、具体的な問題にこれを用いて計算するには技術的な困難が常に伴っていたため、1990 年代には弦の場の理論の業界はやや停滞した状況であった。実際に物理現象への応用がなされるようになったのは特に 1999 年ころからであり、非摂動的真空解の

構成などにおいてレベルトランケーション近似を用いた数値的な解析もさかんに行われた。その後、特に 2005 年 11 月になると、シュナブルによってタキオン凝縮解が解析的に構成されると同時に開弦の場の理論における計算技術の革新がもたらされた。これを契機に、弦の場の理論の業界では、従来困難であった複雑な計算を実行できる可能性が大いに期待できるようになり、再び盛り上がりを見せている状況である。

(2) 閉弦の場の理論は、開弦の場の理論と比

較すると、物理現象に具体的に応用するという研究はさらなる複雑さのために未発達であり、研究している人も世界的にみてごく少数である。しかしながら、光円錐型の相互作用で記述される閉弦の場の理論の枠組みにおいて 2003 年に我々は D ブレーンをあらわす境界状態が満たす非線形な関係式 (冪等方程式) を発見した。その後さらにこの関係式が閉弦の第 2 量子化の観点から D ブレーンの解析に応用されるようになってきた。

2. 研究の目的

- (1) シュナブルが最近開発したボゾニックな開弦の場の理論における解析的計算手法を Berkovits の Wess-Zumino-Witten 型の超弦の場の理論に拡張し、具体的な物理の問題に応用すること。
- (2) ボゾニックな閉弦の場の理論における、D ブレーンをあらわす境界状態の満たす関係式 (冪等方程式) を超弦の場の理論に拡張すること。

3. 研究の方法

- (1) シュナブルがボゾニックな開弦の場の理論におけるタキオン凝縮解を構成するのに用いた新しい計算手法および、その後 2007 年にシュナブルらによるマージナル解の構成に用いられた技術を詳細に調べ、その本質的な関係式を抜き出すことで、運動方程式の解の構成の一般化をめざす。さらに、その解析的手法を Berkovits の Wess-Zumino-Witten 型の超弦の場の理論の古典解の構成に拡張する。またこのようにして新たに得られるボゾニック弦および超弦の場の理論の様々な古典解の間のゲージ同値性についても、それぞれ少なくとも形式的にいえる範囲内で具体的に調べる。
- (2) 開弦の場の理論におけるシュナブルのタキオン凝縮解は D ブレーンが消滅した状況をあらわしており、一方、閉弦の場の理論において D ブレーンは従来の境界状態を用いて記述できることに着目すると、両者は直接的に関係していると期待される。この関係を、開弦の場の理論のゲージ不変量を通じて詳細に調べる。
- (3) 開弦の場の理論のタキオン凝縮解としてはシュナブルの解以外にもさまざまなゲージ条件を満たす数値解が構成されているので、それらの解についても質量殻上の閉弦状態に付随したゲージ不変量をレベルトランケーション近似を用いて数値的に調べ、ゲージ同値性などを確かめる。その際、効率的に数値解の構成し値の評価を行うために Mathematica を用いたプログラムを書いてパソコン上で走らせて

計算する。

- (4) この質量殻上の閉弦状態に付随したゲージ不変量を知られているマージナル解についても計算し、ゲージ同値性や境界状態との対応をみる。

4. 研究成果

- (1) 開弦の場の理論において 2007 年の初頭にシュナブルと Kiermaier, Okawa, Rastelli, Zwiebach によって同時に構成された新たな nonsingular current に対するマージナル解は、実は identity string field と呼ばれる特別な弦場 (開弦の場の理論のスター積に関する単位元) を用いて記述される単純な解に、運動方程式の「解を解に写す変換」を施すことによって得られることがわかった。またシュナブルのタキオン凝縮解もこの変換のある極限で表わされることもわかった。この種のマージナル解は、2007 年 4 月に Erler と Okawa によって同時に Berkovits の Wess-Zumino-Witten 型の超弦の場の理論の運動方程式のマージナル解へ拡張されたが、この超弦の場の理論の場合も identity string field に基づく単純な解からの「解を解に写す変換」を施すことで得られることを示した。特にこの「解を解に写す変換」の形を初めて具体的に与えた。これらの結果、最近のシュナブル解以降に新たに得られていた解析解の統一的な見方ができた。また、ここで発見した解を解に写す変換を用いれば単純な解から複雑な解を生成できる可能性がある。特に、wedge state を用いた場合のこの解を解に写す変換は弦の世界面を広げるものになっており、identity string field を用いて記述される「singular な」解をより「regular な」解に写す効果があり、正則化という見方もできる。さらに、このような変換で得られる、ボゾニック弦および超弦の場の理論の古典解の間のゲージ同値性についてもそれぞれ調べ、少なくとも形式的にはそれらをつなぐゲージ変換を書き下すことができる。しかしながら、identity string field に基づく解とつなげる場合のゲージ変換は singular になっている可能性があることも指摘した。
- (2) 開弦の場の理論のゲージ不変量として、その作用そのもの以外に、開弦場と質量殻上の閉弦状態との内積が提案されている。(我々の論文でこの量を gauge invariant overlap と名付けた。) この gauge invariant overlap をシュナブルのタキオン凝縮解に対して解析的に計算した。このシュナブル解は開弦の場の理

論の運動方程式の解として実パラメータ λ を含む形で構成されている解析解である。本研究課題における計算の結果、この解のパラメータ λ が 1 になるところでのみ、gauge invariant overlap が非零かつ有限な値をもつことがわかった。この結果は、パラメータ λ が 1 になるところでのみ解が非自明である、つまり pure gauge ではない、という従来知られているポテンシャルの高さの計算結果と整合している。この解析的な計算結果はシュナブル解の phantom 項と呼ばれる、正則化によって現れる微妙な項のみが非自明に効く形をしていることもわかった。さらにシュナブル解に関してレベルトランケーション近似を行うとこの phantom 項の寄与は全く無くなるにもかかわらず、gauge invariant overlap を数値的に評価すると、 λ が 1 のところでのみ非自明な値（解析的な計算結果と同じ値）をちょうど再現することも確かめた。実は、この gauge invariant overlap の解析的な計算については同時に独立に Ellwood によってもなされて同じ値が得られており、我々の結果は信頼できるものであることがわかったと同時に、この弦の場の理論の業界において、まさに最新の非自明な結果を出したというインパクトを与えた。

- (3) 開弦の場の理論の gauge invariant overlap は Shapiro-Thorn の open-closed の vertex と、質量殻上の閉弦状態を用いて自然に定義できる。そこでシュナブルのタキオン凝縮解について gauge invariant overlap に非自明な寄与を与える項を、Shapiro-Thorn の open-closed の vertex に当てて得られる閉弦状態を計算するとちょうど D ブレーンをあらわす境界状態が出てくることを示した。これは、開弦の場の理論のシュナブル解と、閉弦状態として D ブレーンをあらわしている従来の境界状態とのあらわな関係を初めて指摘したものである。その後、この関係は Kiermaier, Okawa, Zwiebach によって open-closed の弦の場の理論の vertex の一部の具体的な構成に一般化された。
- (4) 開弦の場の理論のポテンシャルの高さが D ブレーンテンションを厳密に与える解析的なタキオン凝縮解は、本質的にシュナブル解だけが知られていたが、数値的にはほぼ D ブレーンテンションを再現できる「数値解」は、シュナブル解以前に Siegel ゲージの解としてよく知られていた。また Siegel ゲージを含む形で 2006 年に一般化されたゲージである浅野-加藤の a-ゲージの解も、数値的に構成され

ていた。そこで、これらの数値解についても gauge invariant overlap をレベルトランケーション近似を用いて数値的に評価した。その結果、さまざまな a-ゲージ条件を満たす数値解について、それぞれレベルを上げていくといずれもシュナブルの解析的なタキオン凝縮解に対する値に近づいていくことがわかった。従来の作用の値（ポテンシャルの高さ）の数値的な評価と合わせると、ここで得られた結果は、レベルトランケーションによる a-ゲージの数値解はシュナブルの解析解と（解自身の形はもちろん異なるが）実は互いにゲージ同値であるという期待と整合している。つまり、ここでの結果はシュナブルの解析解と様々な a の値に対する a-ゲージの数値解は、全て物理的には同じ、ボゾニックな開弦の場の理論の非摂動論的真空（元の D ブレーンが消滅した真空）を表していることの数値的な証拠を与えたことになっている。

- (5) 2007 年初頭にシュナブル/ Kiermaier, Okawa, Rastelli, Zwiebach によって新たに構成されたマージナル解に対して gauge invariant overlap を解析的に評価した。その計算結果は、最近 Ellwood が Fuchs-Kroyter / Kiermaier-Okawa のマージナル解に対して計算した結果と一致することがわかった。これは、具体的な古典解の形としては見た目が異なる 2 種類のマージナル解が実は同じマージナル変形パラメータ値のもとで互いにゲージ同値であることを示唆している。さらに、シュナブル/ Kiermaier, Okawa, Rastelli, Zwiebach のマージナル解の特別な例として線形ディラトン背景時空における light-like な rolling tachyon 解があり、それは十分に時間が経過した後にはシュナブルのタキオン凝縮解に行きつくことが Hellerman-Schnabl によって示されていたが、この状況をここでの gauge invariant overlap の計算結果に当てはめるとゲージ不変量の値の振る舞いが、十分時間が経過するという極限と整合していることがわかった。

本研究課題において得られたこれらの成果は、弦の場の理論の業界におけるシュナブル解以降の新たな発展をさらに加速するものであり、今後さらなる進展が望まれている超弦の場の理論、閉弦の場の理論に対して非自明な示唆を与えるものになっている。特に、gauge invariant overlap に関する成果は、弦の場の理論の観点からは避けられる傾向にあった、閉弦セクターの解析に向けての重要なステップとして位置付けられる。

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 5 件)

- ① Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi, “Numerical Evaluation of Gauge Invariants for α -Gauge Solutions in Open String Field Theory,” Progress of Theoretical Physics, Vol. 121 No. 4 (2009) pp. 695-710, 査読有
- ② Isao Kishimoto, “Comments on Gauge Invariant Overlaps for Marginal Solutions in Open String Field Theory,” Progress of Theoretical Physics, Vol. 120 No. 5 (2008) pp. 875-886, 査読有
- ③ Teruhiko Kawano, Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi, “Schnabl’s Solution and Boundary States in Open String Field Theory,” Physics Letters B, Volume 669, Issue 5, (2008), Pages 357-358, 査読有
- ④ Teruhiko Kawano, Isao Kishimoto, Tomohiko Takahashi, “Gauge Invariant Overlaps for Classical Solutions in Open String Field Theory,” Nuclear Physics B, Volume 803, Issues 1-2, (2008), Pages 135-165, 査読有
- ⑤ Isao Kishimoto, Yoji Michishita, “Comments on Solutions for Nonsingular Currents in Open String Field Theories,” Progress of Theoretical Physics, Vol. 118 No. 2 (2007) pp. 347-369, 査読有

[学会発表] (計 3 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 年秋季大会、2008 年 9 月 23 日、山形大学
- 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」、日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 26 日、近畿大学
- ③ 岸本 功、「開弦の場の理論の解析解をめぐる最近の進展」、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

岸本 功 (KISHIMOTO ISAO)

独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・基礎科学特別研究員

研究者番号：60399433