

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01897

研究課題名（和文）ホログラフィック双対の場の量子論からの導出

研究課題名（英文）Derivation of holographic dual from quantum field theory

研究代表者

杉本 茂樹 (Sugimoto, Shigeki)

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：80362408

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：原子核の内部に存在するクォークやグルーオンと呼ばれる素粒子を記述する理論であるQCDを弦理論に基づくホログラフィック双対を用いて解析し、バリオン（陽子や中性子の仲間）の励起状態を記述する方法や、その内部の圧力やせん断力の情報を担う重力形状因子と呼ばれる量を計算する方法を開発した。また、フェルミオンの質量が時空の座標に依存する場合に、対称性が量子論的效果で破れることを指摘し、それを簡潔に表す数式を導いた。その他にも、時空に作用する対称性が自発的に破れたときの低エネルギー理論の幾何学的構造の解明や弦理論における新たな時空構造の発見などの成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エレクトロニクスに代表される現代の我々の生活を支えるテクノロジーの多くは量子力学によって築かれたものであると言える。場の量子論はこの量子力学の発展の末に得られた理論で、ミクロの世界の物理を記述する基礎理論であるが、今でも理論的に解明すべき謎や課題が多い。一方、あらゆる素粒子が一種類のひもから生じると考える弦理論は、物質や力を統一する究極の統一理論の候補と期待されているばかりではなく、場の量子論との深い関係が指摘され、盛んに研究されている。我々の研究はこれらの理論に対する新たな知見を得るもので、将来的には物質や時空の起源や、宇宙の誕生の秘密の解明につながることを期待している。

研究成果の概要（英文）：We studied QCD, which is the theory of quarks and gluons (elementary particles living inside atomic nuclei), using a holographic dual description based on string theory, and developed a way to describe the excited states of baryons (particles like protons and neutrons). We also analyzed a quantity called the gravitational form factor, which carries information on pressure and shear forces inside the baryons. Furthermore, we analyzed the symmetry breaking due to quantum effects in a theory with fermions with masses depending on the coordinates of the spacetime, and derived concise mathematical expressions for this. Other results include the elucidation of the geometric structure of low-energy theories when the symmetry acting on spacetime is spontaneously broken, and the discovery of new spacetime structures in string theory.

研究分野：素粒子論

キーワード：ホログラフィック双対 弦理論 場の量子論

1. 研究開始当初の背景

1997年頃に d 次元時空中における場の量子論と d よりも高い次元の曲がった時空中における重力理論(弦理論)がある場合に等価になるという驚くべき双対性(これに対して、AdS/CFT 対応、ゲージ重力対応、ゲージストリング双対性など様々な呼び名があるが、以下では「ホログラフィック双対」と呼ぶことにする)がマルダセナらによって発見された。双対性という用語は、見かけ上、全く異なる 2 つの物理の理論が等価になる性質のことを指し、それまでにもいろいろな例が知られていたが、このホログラフィック双対はいくつかの点でそれまで知られていた双対性にはない非常に興味深い特徴を備えていたため、すぐに多くの研究者の注目を集め、大きな流れとなった。まず、重要なのは重力を含まない場の量子論と重力を含む量子重力理論が完全に等価になることを主張している点である。矛盾のない量子重力理論を構築することは現代の理論物理学における最大の問題の一つである。このホログラフィック双対を用いれば、非摂動的な定式化が矛盾なく行える場の量子論を用いて量子重力理論を構成することが可能なることを意味している。次に注目すべきなのは、時空の次元が異なる 2 つの理論が等価になるという点である。場の理論側が d 次元の平坦な時空上で定義されているとき、それとホログラフィック双対な関係にある重力理論は d よりも高次元の曲がった時空(以下では、慣例に従って、この高次元の時空のことを「バルク」と呼ぶことにする)において定義されている。私自身、現実世界の強い相互作用を記述する理論である QCD (量子色力学) に対応するホログラフィック双対な記述に関する研究を行ってきたが、4 次元時空で定義されているはずの QCD にも実は隠れた 5 次元の性質があり、実験で観測されているハドロンスペクトルや相互作用にその痕跡が見て取れることを見出し、大変驚いた。重力理論側の記述はクォークやグルーオンのようなカラー電荷を持った粒子は登場しないので、ホログラフィック双対が完全に理解できたら、「QCD において何故カラー電荷を持った粒子を単独で取り出すことができないのか?」という「閉じ込め問題」や、100 万ドルの懸賞金がつけられているヤン・ミルズ理論における「質量ギャップの問題」も同時に解かれたことになる。

このホログラフィック双対は、発見以来 20 年以上にも渡って、弦理論や場の量子論の分野における最も重要な研究テーマの一つとして君臨し、その流れは今でも衰えることなく続いている。ただ、これまで行われてきた研究は、場の量子論における解析と重力理論における解析を独立に行って、対応する物理量の計算結果が一致することを確認するものや、重力理論における解析を行い、場の理論における解析が困難な物理量に対する予言を与えたものなど、ホログラフィック双対が成立する証拠を挙げて検証したり、成立すると仮定して何かに応用したりするものがほとんどであり、ホログラフィック双対の基本的な原理は未だに謎に包まれている。本研究は「そもそもこのホログラフィック双対という不思議な現象がなぜ起こるのか?」を解明することを大きな目標としたものであり、あわよくばホログラフィック双対の証明に迫ることを目論んでいる。特に、「 d 次元の場の理論が与えられたときに、その中に d よりも高い次元のバルクの時空の構造が何故、どのように潜んでいるのか?」を解明したい。

もちろん、これまでも、同様の目標を掲げた研究はいろいろな人々によって為されてきた。例えば、最近特に注目を集めているアプローチには、量子エンタングルメント等の量子情報理論において用いられる概念を応用してバルクの構造を探るものなどがある。ただ、これまでの研究は、超対称性や共形対称性などの高い対称性がある場合や、どんな理論でも成立すべきユニバーサルな性質に注目したものなどが多く、まだ QCD のような、我々が解きたいと思っている典型的な強結合場の理論に応用できるような段階には至っていない。こうした状況を独自のアプローチによって打破したいと考えた。

2. 研究の目的

上でも述べたような大きな目標を掲げて研究を開始したが、実際にはそれに派生する研究もいくつか行い、むしろそちらの方が大きな成果があがったので、それらを含めて本研究で行った研究の目的を述べると以下のようにまとめられる。

- 1) 場の理論側の情報からホログラフィック双対な関係にある重力理論を導くための一般的な方法を確立する。特に、場の理論の解析からバルクの時空構造を求める一般的な方法を確立する。
- 2) QCD とホログラフィック双対な関係にある弦理論のセットアップ(ホログラフィック QCD)を用いてハドロンを解析することによって、ホログラフィック QCD を用いた予言と観測事実による検証を行う。
- 3) 場の量子論における量子アノマリーの構造を調べることによって、場の量子論と弦理論の双方に対して新たな知見を得るとともに、ホログラフィック双対へのヒントを探る。
- 4) 弦理論の時空構造について新たな可能性を追究する。

3. 研究の方法

上で挙げた 1) ~ 4) についての研究の方法を以下にまとめる。

- 1) 互いに関連する 2 つのアプローチで研究を行った。1 つ目は、プローブ D ブレインを用いてバルクの時空を探る方法である。弦理論の枠内で D ブレインと呼ばれる膜状の物体を配置することで場の理論を構成し、そこにプローブとなる D ブレインを加え、その D ブレイン上の場の理論に生じるポテンシャルや結合定数の値などの情報からバルクの時空の計量やその他の場の値を求める。このプローブ D ブレイン上の有効理論を場の理論の言葉に翻訳することによってバルクの情報が引き出す。もう一つは、共形対称性が自発的にポアンカレ対称性に破れた際に得られる南部-ゴールドストーンモードに関する有効採用を構成し、それを AdS 時空に埋め込まれたブレインとして解釈する方法を与えるアプローチである。さらに、一般の時空対称性が自発的に破れた場合に拡張することで、より一般的な状況で適用できるようにする。
- 2) 具体的に行った研究はホログラフィック QCD におけるバリオンに関する研究である。ホログラフィック QCD において、バリオンは D ブレインかもしくはそれと等価なソリトンとして記述されることが知られている。バリオンを D ブレインとして記述した際には、D ブレイン上にカラーの数だけの開弦がくっついた状態が実現される。その際に、この開弦がとりうる様々な状態を考えることで、バリオンのさまざまな励起状態を表すことができるはずであるため、具体的にどのような状態が得られるのかを詳しく調べる。また、バリオンをソリトンとして記述して、核子の重力形状因子を解析する研究も行う。バリオンの重力形状因子はエネルギー運動量テンソルをバリオンの状態で挟んで得られる行列要素から定義され、バリオンの内部の密度分布、角運動量分、圧力やせん断力など、バリオンの内部構造を知る上で重要な情報を含む物理量である。本研究では、AdS/CFT 対応において知られているエネルギー運動量テンソルを求める方法をバリオンに対応するソリトンが存在する場合に適用することで、バリオンの重力形状因子を解析する。
- 3) フェルミオンに外場のゲージ場が結合した系にさらに外場のスカラー場が湯川結合によって結合した系を考えて、藤川氏の方法によって量子アノマリーを計算する。弦理論における D ブレインと RR 場との間の結合の形から、量子アノマリーの表式が 1980 年代に数学者の Quillen 氏が導入した超接続を用いて表されることが期待されるので、それを場の理論における具体的な計算によって確認する。
- 4) 弦理論における時空の構造に関して行った研究は 2 つある。一つは、弦理論における T 双対性の群 $O(d, d)$ を明白な対称性として持つ Double Field Theory (DFT) と呼ばれる理論の中で存在が示唆されていた時空で通常のリーマン幾何では表せないようなタイプの時空を弦理論の枠内に実現する研究である。この時空に対応する弦の世界面の理論を考え、矛盾なく量子化できる条件を求めるとともに、実際に量子化してスペクトルを求める。もう一つは弦理論において、境界のある時空を構成する方法に関する研究である。時空に S^1 方向があり、その S^1 方向に次元簡約して得られる時空に境界が生じることがある。そのような状況を M 理論の中で実現し、次元簡約することによって境界のある時空を弦理論の枠内で実現し、特に時空の境界を表す End-of-the-world (ETW) brane の張力などの性質を調べる。

4. 研究成果

以下では、本研究によって得られた研究成果を、およその時系列に沿って述べる。

- (1) ホログラフィック QCD を用いて、バリオンの励起状態を記述する方法を与え、得られるスペクトルを詳細に調べた。バリオンを表す D ブレインについて弦の振動モードの励起状態を含むような状態を取り扱う方法を初めて開発し、得られるスペクトルを詳しく解析した結果、アイソスピンが $1/2$ でスピンの $3/2, 5/2, 7/2$ であるような状態など、これまでの解析では得られなかった多数の新しい励起状態を見出した。これらの予言と実験で確認されている核子の励起状態とを比較すると、質量、スピン、パリティの分布の定性的な振る舞いが非自明に一致しており、実験で見つかっている多くの状態に対して理論的な解釈を与えることができた。この研究成果については論文として発表し、PTEP 誌に掲載された。(林氏、荻野氏、酒井氏との共著)
- (2) 通常のリーマン幾何では記述できないような時空における弦理論を構成した。DFT で実現される通常の幾何では表せないようなある時空に埋め込まれた弦の世界面の理論を与え、その量子化条件を調べ、物理的な状態は一つのレベルのみであり、それが DFT の運動方程式を線形化したものをぴったり再現することを示した。この成果は PRL 誌に掲載された。(Park 氏との共著)

- (3) フェルミオンに外場のゲージ場とスカラー場が結合した系に於いて、藤川氏の方法を用いて量子アノマリーを計算し、通常のアノマリーの公式に現れるゲージ場を超接続と呼ばれるものに置き換えたような形で簡潔に表されることを示した。また、これを利用して時空の境界やインターフェイスがある場合のアノマリーも統一的に取り扱えることを見出した。この成果を論文にまとめて PTEP 誌に投稿したところ、掲載決定と同時に PTEP の Editor's suggestion に選ばれ、JPS hot topics として取り上げられた。(菅野氏との共著)
- (4) ホログラフィック QCD を用いてバリオンの重力形状因子を計算する方法を開発した。本研究では、これを弦理論に基づく QCD のホログラフィック双対な記述であるホログラフィック QCD を用いて計算する方法を開発し、特に、重力形状因子がグルーボールの交換によって記述できることを見出した。これは、電磁相互作用がベクトルメソンの交換を介して与えられるベクトルメソンドミナンスと呼ばれる性質と類似の性質が重力相互作用にも成立することを意味する。また、低エネルギーの極限における重力形状因子の値はメソンの有効作用から直接計算できることを見出し、これを利用して D-term の値を評価した。この成果は論文として発表し、PTEP 誌に掲載された。
- (5) 弦理論における時空の境界を表す ETW brane を次元簡約によって得る方法を提案し、これを M 理論に適用することによって、type 0 弦理論における新種の ETW brane を構成した。そして、そのブレインの張力を計算したところ、これが非摂動的な物体であることを示唆する結果を得た。この成果は論文としてまとめ、JHEP 誌に掲載されている。

以上は成果がまとまり、論文として発表したものだが、その他にもまだ論文にまとまっていないものの、一定の研究成果が得られたものがいくつかある。特に、研究開始当初の背景で述べたような動機に直接関係した仕事として以下のような研究を行った。

- (6) ホログラフィック双対が知られているいくつかのゲージ理論において、ゲージ群 $U(N)$ が $U(N-1) \times U(1)$ に破れた状況を考え、その $U(1)$ 部分に関する有効作用を求めることによって、ホログラフィック双対な記述におけるバルクの計量を求める研究を行った。具体的には 4 次元の $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論と $N=2$ 超対称ゲージ理論、およびその有限温度系について、1 ループの摂動計算により有効作用を求め、プローブブレインの有効作用と比較することによってバルクの計量を求めた。その結果、ゼロ温度の $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論の場合には期待する AdS 時空が導出できた。しかし、有限温度系や共形対称性がない $N=2$ 超対称ゲージ理論では、期待するバルクの計量とは異なる結果を得て、その解釈が明らかではないため、完成に至っていない。
- (7) 共形対称性がポアンカレ対称性に自発的に破れた場合に生じる南部-ゴールドストーン場に関する有効作用の構成法の研究も行った。過去に知られている有効作用の構成法を改良し、AdS/CFT 対応における AdS 時空があらわに見える形の有効作用の構成法を見出した。さらに、より一般的な時空の対称性が自発的に破れる系に対しても、その有効作用がバルクに埋め込まれたブレイン上の計量や曲率などの幾何学的な量を用いて構成できることなどが分かった。これは、ホログラフィック双対におけるバルクの幾何を導出する手がかりを与える重要な成果と言える。この結果については現在、論文を準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kanno Hayato, Sugimoto Shigeki	4. 巻 2022
2. 論文標題 Anomaly and superconnection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013B02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptab131	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Park Jeong-Hyuck, Sugimoto Shigeki	4. 巻 125
2. 論文標題 String Theory and Non-Riemannian Geometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 211601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.125.211601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Fujita Mitsutoshi, Hatta Yoshitaka, Sugimoto Shigeki, Ueda Takahiro	4. 巻 2022
2. 論文標題 Nucleon D-term in holographic quantum chromodynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 093B06
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi Yasuhiro, Ogino Takahiro, Sakai Tadakatsu, Sugimoto Shigeki	4. 巻 2020
2. 論文標題 Stringy excited baryons in holographic quantum chromodynamics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 053B04
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto Shigeki、Suzuki Yu-ki	4. 巻 2024
2. 論文標題 End of the world branes from dimensional reduction	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2024)165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Shigeki Sugimoto
2. 発表標題 Stringy Excited Baryons in Holographic QCD
3. 学会等名 Summer Seminar Series: Applications of gauge topology, holography and string models to QCD (Online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本茂樹
2. 発表標題 Anomaly cancellation in type II string theory, revisited
3. 学会等名 East Asia Joint Workshop on "Fields and Strings 2019" and 12th Taiwan String Theory Workshop, NTHU, Taiwan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本茂樹
2. 発表標題 2dim QED and String Theory
3. 学会等名 SNU mini-workshop on Quantum fields and strings, Seoul National University, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本茂樹
2. 発表標題 Holographic QCD - review and recent development -
3. 学会等名 15th Rencontres du Vietnam, "Perspectives in Hadron Physics", ICISE, Quy Nhon, Vietnam (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本茂樹
2. 発表標題 Generalized WZW-term from holographic QCD
3. 学会等名 Holographic QCD 2019, Nordita, Sweden (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本茂樹
2. 発表標題 Nuclear D-term in holographic QCD
3. 学会等名 APCTP focus program "QCD and gauge/gravity duality" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------