

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 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21740173

研究課題名（和文） 超弦理論を用いた QCD の解析とその応用

研究課題名（英文） Analysis of QCD using superstring theory and its application

研究代表者

氏名 杉本 茂樹 (SUGIMOTO SHIGEKI)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：80362408

研究成果の概要（和文）：自然界に存在する基本的な力の 1 つである強い力を記述する QCD やそれに類するゲージ理論を、超弦理論を用いて解析する方法を開発した。伝統的なゲージ理論の解析手法では非常に困難な強結合領域での解析が弦理論を用いると実行可能になることを様々な状況で示し、弦理論を用いた解析が非常に強力な解析手段となり得ることを示した。

研究成果の概要（英文）：We developed some technologies to analyze QCD, which describes strong force (one of the fundamental forces in nature), and QCD-like gauge theories using superstring theory. We showed in various examples that string theory makes it possible to analyze strongly coupled gauge theory, which is in general very difficult to achieve using traditional approaches. Our results show that string theory can provide very powerful analytic methods in QCD and QCD-like gauge theories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子

キーワード：超弦理論、ゲージ理論

1. 研究開始当初の背景

ゲージ/重力対応はその発見から約 10 年が経ち、その重要性は弦理論の研究者を中心に広く浸透しているものの、未だその全貌は明らかにされていない。特に、超対称性や共形対称性がない場合にこの考え方がどれだけ通用するのかについては、まだ十分に証拠が得られているとは言えず、研究者の間でも意見が分かるところである。その難しさの主

な原因は、超対称性や共形対称性のような高い対称性がない場合には、強結合のゲージ理論の計算が大変困難であり、弦理論側の計算結果と比較することが難しいことにある。これに対し、仮にゲージ/重力対応を QCD に対して応用できたとすると、強結合ゲージ理論の難しい計算をしなくても、弦理論の計算を直接実験結果と比較することで、ゲージ/重力対応がどれだけ有効であるかを議論することができるようになるため、超対称性や共形

対称性がない場合のゲージ/重力対応を検証する上で大変貴重な情報が得られる。また、逆に、ゲージ/重力対応を利用する立場にたつと、直接QCDで計算することが大変困難である物理量を弦理論を用いて計算することが可能になるため、応用上も大変興味深く、重要である。特に、最近のRHICの実験などからQCDの高温状態における実験結果がいろいろと得られており、また、今後、LHCでも新たな実験結果が得られることが期待されているので、こうしたアプローチによる解析によって新たな知見が得られないか探るのに絶好の時期でもある。こうした背景もあり、我々は2004年ごろから、QCDを弦理論の枠内に実現し、それをゲージ/重力対応のアイデアを用いて解析する研究を行ってきた。このQCDの弦理論による記述のことをホログラフィックQCDと呼ぶ。論文 [1] においてその大枠を提案し、[2] でメソンの相互作用に関する詳しい解析を行い、[3] と [4] において、バリオンに関する詳しい解析を行った。その結果、我々の提案が期待以上にうまくいっていることが分かった。まず、カイラル対称性の自発的破れを幾何学的に理解することができるようになり、それに伴って南部・ゴールドストーン粒子であるパイオンが予想通り出てくることが示される。この記述の大変興味深い特徴は、メソンの有効作用が5次元のゲージ理論によって表されるということである。パイオンだけでなく、 ρ メソンや a_1 メソンなどのメソンがある曲がった5次元時空におけるゲージ場の中に統一的に記述され、その記述を用いることでこれらのメソンの質量や相互作用を計算することが可能になる。その結果を実験値と比較すると、荒っぽい近似を用いているにも関わらず、期待以上にうまく実験値と良く合っていることが分かった。さらに、バリオンはこの5次元ゲージ理論の4次元空間におけるインスタントンとして表される。ソリトンの量子化法をこの場合に適用することで、これも現実のバリオンのスペクトルの一部を定性的に再現し、定量的にも核子の荷電半径、磁気モーメントや形状因子などが実験と期待以上にうまく合うことが分かった。これらの結果は我々の提案した弦理論のセットアップがハドロン物理の本質を捉えていることを強く示唆しており、この方向の研究をさらに発展させることは大変重要である。

参考文献

- [1] "Low energy hadron physics in holographic QCD", Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto, Prog.Theor.Phys. 113 (2005) 843-882.
[2] "More on a holographic dual of QCD",

Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto, Prog.Theor.Phys. 114 (2006) 1083-1118.

[3] "Baryons from instantons in holographic QCD", Hiroyuki Hata, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto and Shinichiro Yamato, Prog.Theor.Phys. 117 (2007) 1157-1180.

[4] "Holographic Baryons: Static Properties and Form Factors from Gauge/String Duality", Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto, Prog.Theor.Phys. 120 (2008) 1093-1137

2. 研究の目的

弦理論を用いてハドロン物理、量子色力学や関連するゲージ理論の様々な性質を解析することが本研究の主な目的である。まず、我々が上記 [1] で提案したホログラフィックQCDがどのくらいうまくいくのかを調べる。そのために、ホログラフィックQCDを用いてバリオンやメソンの性質を調べ、それが実験で観測されている性質を再現するかどうかをチェックする。上記 1. で述べたように、ある程度の成功を収めていることは知られているが、ここでは、それをさらに発展させ、バリオン間の相互作用を考察し、核子間のポテンシャルを計算すること、弦の励起状態のスペクトルを求めてスピンの2以上のメソンを含めたメソンのスペクトルを解析することなどの研究を行う。また、ゲージ群が $SO(N)$ や $USp(N)$ であるQCDなど、別のゲージ理論に対しても同じような構成法から弦理論による記述を与え、ゲージ理論に対して予想される対称性の力学的破れなどの性質がうまく再現されるかどうかを調べることで、超対称性や共形対称性のない系についてもゲージ/重力対応が成立することを示す新たな傍証を得る。また、弦理論に存在するS双対性という性質を用いて、超対称性や共形対称性のない4次元のゲージ理論に対してS双対性が成り立つ例を与え、それを応用してクォークの閉じ込めや対称性の力学的な破れなどの性質に関する知見を得ることなどを目的とする。

3. 研究の方法

私の研究は純粋に理論的な研究であるため、研究は主として紙とペンを用いた手計算で進められ、必要に応じて数式処理ソフトなどを用いた計算も行う。また、共同研究者や関係する分野の研究者との議論も研究を進める上で大変重要な要素である。

4. 研究成果

十分な研究成果があり、論文にまとまった研究テーマは以下の4つに分類される。(1) ホログラフィックQCDを用いた核力の研究、(2) ゲージ群が $SO(N)$ や $USp(N)$ であるQCDに対するゲージ/重力対応に関する研究、(3) ホログラフィックQCDにおけるメソンのスペクトルの研究、(4) 弦理論のS双対性を用いたゲージ理論の研究。5.に記載したとおり、いずれも論文として発表され、査読のある雑誌に掲載済みである。以下にそれぞれについての成果を述べる。

(1) 1. で述べた2004-2005年ごろの研究により、ホログラフィックQCDでは、メソンは開弦で表され、その有効理論が曲がった5次元時空におけるゲージ理論となることや、バリオンがこの5次元ゲージ理論におけるソリトンとして実現されることが分かった。これに基づき、ソリトンが2つある場合の解をADHM構成法を用いて構成し、2つの核子が非常に接近した場合の核力を計算した。その結果、実験で期待されているように近距離で斥力芯があることが確認された。この研究はその後、核子が3つの場合や、核子が空間に敷き詰められたような場合などに対する計算などへ拡張されるなど、核子間の相互作用をホログラフィックQCDを用いて研究する上での基礎的な手法を与えた文献として利用されている。

(2) ゲージ群が $SO(N)$ や $USp(N)$ の場合のQCDにおいて、対称性の力学的な破れの仕方、バリオンやフラックスチューブの安定性が、ゲージ群が $SU(N)$ である通常のQCDとはずいぶん異なることが知られている。我々はこの系を弦理論の枠内で構成する方法を考案し、さらにゲージ/重力対応を用いて解析した。その結果、上記の性質が場の理論で期待されている通りに再現されることが示された。これは、超対称性や共形対称性がない場合にもゲージ/弦双対性が成り立つことを示唆する新たな証拠を与え、上記(1)で用いたような、現実のQCDへの応用を目指したホログラフィックQCDの手法が間違っていないことに対する自信を深めることができた。

(3) 2004-2005年ごろまでの研究により、ホログラフィックQCDにおいて、メソンは開弦で記述されることが示され、特に開弦のゼロ質量状態から、パイオンや ρ メソンなどのメソンが得られることが議論された。ここでは、開弦の励起状態で表されるメソンのスペクトルを調べ、これを実験で見つかっているメソンのスペクトルと比較した。その結果、開弦の励起状態から、スピンの2以上のメソ

ンを含む様々なメソンが構成されることが分かり、それが実験で観測されているメソンのスペクトルのいろいろな特徴をうまく再現することが分かった。この結果は、弦理論とQCDとの間の双対性において、弦が振動したり回転したりする状態まで含めて、弦理論とQCDとがうまく対応していることを示唆している。これまで、ゲージ理論と弦理論の間の双対性に関する研究は数多く行われてきたが、そのほとんどは低エネルギー有効理論を用いた議論であった。今回の研究によって、まさしく「弦」の理論がゲージ理論と対応していることの証拠を得ることができた。

(4) カラーの閉じ込めや対称性の力学的破れはQCDの低エネルギー領域での振る舞いを調べる上で最も重要な性質であり、古くからいろいろなアプローチでこれらの現象を理解する試みがなされてきたが、まだ完全な理解には達しておらず、今でもQCDや強結合ゲージ理論における重要な研究テーマである。我々は、この問題に対して、超弦理論におけるS双対性と呼ばれる性質を用いて解析する方法を提案した。まず、タイプIIB超弦理論でDブレーンとオリエンティフォルドと呼ばれるものをうまく配置することで、超対称性のない $USp(2N)$ ゲージ理論を実現し、この系とS双対性によって結びつく理論が $SO(2N)$ ゲージ理論であることが示される。 $USp(2N)$ 理論は低エネルギーで強結合になり、カラーの閉じ込めや対称性の力学的破れが実現されることが予想されている理論であるのに対して、 $SO(2N)$ ゲージ理論の方は低エネルギーで弱結合になり、理論の解析が容易になる。この $SO(2N)$ ゲージ理論にはスカラー場が含まれ、摂動計算により、このスカラー場が非自明な真空期待値を持つことを示すことができる。これによって、大域的対称性の一部と $SO(2N)$ ゲージ対称性が自発的に破れることが示される。これが $USp(2N)$ 理論におけるカラーの閉じ込めや対称性の力学的な破れに対応することが議論できる。4次元の超対称性のないゲージ理論におけるカラーの閉じ込めや対称性の力学的な破れなどの性質を超弦理論におけるS双対性を用いて議論できた初めての例であり、今後の同様の解析に対する足がかりとして重要な役割を果たすことを期待している。

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 5 件)

* 1) 以外は全て査読有の雑誌に掲載済

- 1) Hadrons from string theory
By Shigeki Sugimoto.
[10.1007/s00601-012-0331-4](https://arxiv.org/abs/10.1007/s00601-012-0331-4).
Few Body Syst. 54 (2013) 71-75.
- 2) Confinement and Dynamical Symmetry Breaking in non-SUSY Gauge Theory from S-duality in String Theory
By Shigeki Sugimoto.
arXiv:1207.2203 [hep-th].
[10.1143/PTP.128.1175](https://arxiv.org/abs/10.1143/PTP.128.1175).
Prog.Theor.Phys. 128 (2012) 1175-1209.
- 3) Mesons as Open Strings in a Holographic Dual of QCD
By Toshiya Imoto, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto.
arXiv:1005.0655 [hep-th].
[10.1143/PTP.124.263](https://arxiv.org/abs/10.1143/PTP.124.263).
Prog.Theor.Phys. 124 (2010) 263-284.
- 4) $O(N(c))$ and $USp(N(c))$ QCD from String Theory
By Toshiya Imoto, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto.
arXiv:0907.2968 [hep-th].
[10.1143/PTP.122.1433](https://arxiv.org/abs/10.1143/PTP.122.1433).
Prog.Theor.Phys. 122 (2010) 1433-1453.
- 5) Nuclear Force from String Theory
By Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto.
arXiv:0901.4449 [hep-th].
[10.1143/PTP.122.427](https://arxiv.org/abs/10.1143/PTP.122.427).
Prog.Theor.Phys. 122 (2009) 427-476.

[学会発表] (計 23 件)

* 全て招待講演、発表者は全て杉本茂樹

- 1) "弦理論によるハドロンのスペクトルの解析"
スペクトル・散乱理論とその周辺
2012年12月13日
京都大学数理解析研究所
- 2) "Holographic QCD -Status and perspectives for the future-"
Xth Quark Confinement and the Hadron Spectrum
2012年10月9日
TUM, Garching, Germany
- 3) "On S-duality in non-SUSY gauge theory"

The 29th International Colloquium on Group-Theoretical Methods in Physics
2012年8月20日
Nankai University, Tianjin, China

4) "On S-duality in non-SUSY gauge theory"
Applications of Gauge-Gravity Duality
2012年6月3日
Technion, Haifa, Israel

5) "On S-duality in non-SUSY gauge theory"
Progress in Quantum Field Theory and String Theory
2012年4月6日
大阪市立大学

6) "超弦理論によるハドロンの記述"
第10回 岡シンポジウム
2011年12月3日
奈良女子大学

7) "On S-duality in Non-supersymmetric Gauge Theory"
2nd International Workshop on Quarks and Hadrons under Extreme Conditions
2011年11月17日
慶応大学

8) "On S-duality in non-supersymmetric gauge theory"
KIAS-YITP Joint Workshop, "String Theory, Holography, and Beyond"
2011年9月20日
KIAS, Seoul, Korea

9) "Hadrons from string theory"
The Fifth Asia-Pacific Conferences on Few-Body problems in Physics 2011
2011年8月23日
Sungkyunkwan University, Seoul, Korea

10) "Holographic Mesons and Baryons"
INT Summer School on Applications of String Theory
2011年7月27日-29日
University of Washington, Seattle, USA

11) "Holographic Description of Hadrons from String Theory"
35th Johns Hopkins Workshop on AdS/CFT and its Applications
2011年6月23日
Eotvos Univesrity, Budapest, Hungary

12) "QCD and String Theory"
Eleventh Workshop on Non-Perturbative
Quantum Chromodynamics
2011年6月6日
l'Institut d'Astrophysique de Paris, Paris,
France

13) "Holographic Description of Hadrons
from String Theory"
Rencontres de Moriond, QCD and High
Energy Interactions
2011年3月25日
Planibel Hotel, La Thuile, Italy

14) "弦理論からみたクォークの閉じ込めと
カイラル対称性"
日本物理学会 理論核物理・素粒子論 合同シ
ンポジウム「クォークの閉じ込めとカイラル
対称性：QCDの難問と多彩なアプローチの
検討」
2010年9月12日
九州工業大学

15) "Mesons as open strings in holographic
QCD"
ESI Programme on AdS Holography and
the Quark-Gluon Plasma
2010年8月17日
Erwin Schroedinger International
Institute for Mathematical Physics, Vienna,
Austria

16) "Hadrons in Holographic QCD"
ESI Programme on AdS Holography and
the Quark-Gluon Plasma
2010年8月5日
Erwin Schroedinger International
Institute for Mathematical Physics, Vienna,
Austria

17) "Hadrons in Holographic QCD"
High Energy Strong Interactions 2010
2010年7月27日
京都大学基礎物理学研究所

18) "超弦理論による QCD の解析"
「量子色力学にもとづく真空構造とクォー
ク力学」第3回研究会
2010年7月7日
筑波大学

19) "Mesons as Open Strings in a
Holographic Dual of QCD"
Long-term Workshop on "Gravity and
Cosmology (GC2010)"
2010年6月10日
京都大学基礎物理学研究所

20) "Holographic QCD の最近の話題"
第三回 超弦理論と宇宙
2010年2月20日
兵庫県城崎温泉 志なのや

21) "Mesons as Open Strings"
弦理論研究会 (2010)
2010年1月6日
立教大学

22) "O(N) and USp(N) QCD from String
Theory"
APCTP Focus Program "Aspects of
Holography and Gauge/string duality"
2009年7月27日-28日
APCTP Headquarters, POSTECH, Korea

23) "Dynamical Symmetry Breaking in
Holographic QCD with Orientifolds"
Joint Theory Institute workshop on
"Dynamical Symmetry Breaking"
2009年4月15日
Argonne National Laboratory, USA

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕
○出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者
杉本 茂樹 (SUGIMOTO SHIGEKI)
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特
任教授
研究者番号：80362408