

科学研究費補助金研究成果報告書

平成22年5月24日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19740125
 研究課題名（和文）
 超弦理論の非摂動的効果・D ブレーンと場の理論のソリトンの研究
 研究課題名（英文）
 Study of D-branes (non-perturbative effects in superstring theory) and solitons in field theories
 研究代表者
 橋本 幸士 (Hashimoto Koji)
 独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・専任研究員
 研究者番号：80345074

研究成果の概要（和文）：

超弦理論の D ブレーンと、場の理論のソリトンの関係を研究し、双方向の応用について大きな知見を得た。超弦理論のゲージ重力対応において、D ブレーンがバリオンを表すことに着目し、D ブレーンのソリトンのような表現を用いることで、量子色力学のバリオンの様々な性質を解析的に求めることに成功した。これには、核子の荷電半径、磁気モーメント、核力(斥力芯)、原子核の巨大共鳴、が含まれる。

研究成果の概要（英文）：

We studied relation between D-branes in superstring theory and solitons in field theories, and we obtained an interesting insight on the applications in both directions among them. We used the fact that D-branes represent baryons in application of gauge/gravity correspondence in superstring theory. Using a solitonic representation of D-branes, we could obtain various properties of baryons in quantum chromo-dynamics. These include charge radii, magnetic moments of nucleons, nuclear forces and repulsive cores of nucleons, and nuclear giant resonances.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	0	0	0
2006年度	0	0	0
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,600,000	480,000	3,080,000

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：超弦理論、D ブレーン、ゲージ・重力対応、ソリトン、量子色力学、強結合

1. 研究開始当初の背景

超弦理論は、全ての物質と力を統一する究極理論として、大きな発展を遂げてきた。この15年間の発展の中心的役割を担ったのは、Dブレーンと呼ばれる物体である。Dブレーンは超弦理論の非摂動的な物体であり、Dブレーンの素性を研究し理解することは、究極理論の構成に不可欠である。超弦理論はその真空が非摂動的に決定されていないという問題を持っている。この問題は、超弦理論から我々の知る全ての素粒子と相互作用を導出できるかという、非常に大きな問題である。超弦理論自身をきちんと摂動論を超えて定義できなければ、この問いに答えることは出来ない。Dブレーンは、超弦理論における非摂動的な励起であるので、Dブレーンを調べその素性を明らかにすることで、素粒子論の究極の問いに答えられるのではないかと考えられてきた。

このDブレーンは、通常の場合の理論で言うところのソリトンの励起に相当している。ソリトンとは、例えば、モノポールや渦などで代表される、素励起の集団運動である。場の理論のソリトンには多種あるが、比較的素性のよく分かっているものも多い。

そこで、本研究課題は、Dブレーンと場の理論のソリトンの関係を多側面から研究し、その関係を見極め深めることによって、超弦理論と場の理論の相互関係を明らかにし、超弦理論の非摂動的側面を解明することを主眼とする。

Dブレーンの応用としては、それまでに、ソリトンとの対応の観点からは、平坦な時空上のソリトンの研究への応用が主に行われてきた。しかし、曲がった時空上でのソリトンへは応用があまり無かった。一方、Dブレーンが場の理論の強結合領域に応用される「ゲージ重力対応」において曲がった時空が本質的に登場するため、そこにおけるDブレーンとそのソリトンの記述は、強結合量子色力学などを解析する際に非常に重要になる。

2. 研究の目的

超弦理論におけるDブレーンは、超弦理論の摂動論を超えた物体であり、超弦理論の定義の問題と直結した重要な研究対象である。一方、場の理論においてソリトンは非摂動的な物体であり、場の理論の真空構造やトポロジカルに安定化された重い励起として重要な意味を持っている。ソリトンとDブレーン

との関係は密接であり、ある状況では超弦理論の低エネルギーにおけるソリトンとしてDブレーンは認識される。

本研究では、Dブレーンとソリトン間の関係を、特にゲージ・重力対応(AdS/CFT対応)の強結合QCDへの応用(ホログラフィックQCD)において精査することにより、明らかにすることにある。

Dブレーンが、通常の場合の理論のソリトンの言葉でより感銘に理解できれば、超弦理論の場の理論的記述を得るという目標に対してある一定のアプローチを提供することになり、素粒子論の基本的課題に直結する。また、超弦理論の応用という観点からも、様々な場の理論を超弦理論のDブレーンから見直し新たな超弦理論的計算・見方を与えることで、大きな発展を見込むことが出来る。本研究課題はその二つの観点から、包括的に研究を進めることを目標としている。

3. 研究の方法

ホログラフィックQCDでは、QCD(量子色力学)のゲージ群についてそれが大きい極限をとる。したがって、クォークの結合状態であるバリオンは非常に重い状態となり、ソリトンとして記述されるのが適当である。ホログラフィックQCD、すなわちゲージ・重力対応のQCDへの応用では、確かに、Dブレーンがある重力背景時空の非自明なサイクルに巻きつくことでバリオンが表現されることが知られている。そこで、このDブレーンの性質を、Dブレーンを場の理論のソリトンと見ることによって研究し、バリオンの性質を解明するということが、本研究課題の研究方法である。

より具体的には、以下の計算方法を取り、以下の物理量を解析的に計算する。

まず、QCDを表すDブレーン配置としては、酒井杉本模型に代表されるホログラフィックQCD模型を採用する。次に、Dブレーンを重力場で決められた時空の非自明なサイクルに巻き、それをフレーバーを表すDブレーン上の有効作用のソリトンで表す。このソリトンの、カイラルカレントへの結合を計算し、バリオンの荷電半径や磁気モーメント、メソンとの結合定数を計算する。次に、バリオンが二つあるような系、すなわち、二核子系などを研究するため、Dブレーンを二つまきつけ、そのソリトンの表現を計算する。この結果、スピンやアイソスピンを具体的に与えた核子系において、どのような核力が働くかを解析的に得ることが出来る。

これらの研究方法はDブレーンの物理のQCDへの応用と位置づけられるが、これによりソリトン

的手法とDブレーン独自の手法との対比がなされ、Dブレーンを、超弦理論の非摂動的記述の観点から研究するための道具立てのひとつが得られることになる。この道具立てに従い、超弦理論の非摂動的側面の研究を行う。

4. 研究成果

平成 19 年度には、宇宙ひもと呼ばれるソリトンの様々な性質を D ブレーンの計算から明らかにする研究成果を発表した。また、AdS/CFT 対応を QCD に応用する際に困難となっていた、クォーク質量項の導入について、D ブレーンとソリトンの立場から考察し、導入方法を提案した。

さらに、平成 20 年度、には、当面の目標である、AdS/CFT 対応の QCD への応用における、バリオンの諸性質の研究を行った。AdS/CFT 対応を QCD に応用すると、バリオン状態は高次元背景時空に巻きついた D ブレーンで表される。この D ブレーンは、高次元時空においてクォークの自由度を表す D ブレーンの中でソリトンとして記述される。ソリトンの量子化に伴って、QCD のカイラルカレントに相当する弦理論の量を計算すると、これは、バリオンの静的な性質を現すことになる。また、バリオンを二つ置きそれらの間の相互作用を計算することも、このソリトンの描像から可能となる。また、バリオンが D ブレーンであるので、バリオンが非常に多く集まったときには、AdS/CFT 対応原理に基づき、それと等価な重力背景時空が存在する。超多体系の計算が、AdS/CFT 対応で可能となる。

この成果は 3 編の論文として査読つき学術誌に出版した。そこでは、D ブレーンとソリトンに基づいた定式化により、核子の荷電半径や磁気モーメント、メソンとの結合（パイオンや ρ メソン、オメガメソンなど）、そして、遠距離・近距離核力、そして最後に、重い原子核の巨大共鳴について、具体的に実験と比較できる数値が計算された。結果は実験で知られていた諸量を上手く再現しており、ホログラフィック QCD の大きな成果と考えられる。

例えば、核子の間の距離が小さい場合、核子の状態によらず、斥力が働くことが示された。これは、経験的に知られている核子の斥力芯の描像とまさに合致している。さらに、その斥力ポテンシャルが核子間距離の逆二乗でスケールすることが分かった。斥力芯の構造は、以前からバリオンのソリトン模型であるスキルミオンで研究されていたが、本研究は、QCD から AdS/CFT 対応を用いて導出している点、そして、二核子のソリトン解が厳密に求まる点、において、過去の研究とは一線を画していると言ってもよい。

さらに、原子核の巨大共鳴の計算では、モ

ノポール巨大共鳴のエネルギースペクトルが核子数の $1/3$ 乗でスケールするという結果が得られ、これは経験的に実験で知られているスケールリングと一致することが判明した。重い原子核が、等価な高次元重力的記述を許すということ自体、全く新しい原子核描像の提案となっている。

平成 22 年度には、高密度 QCD で実現されていると期待されている「カラー・フレーバー結合相」を D ブレーンとそのソリトン表現で実現することを試み、ある近似においてはあがあるが、実際にその相がエネルギー的に好まれる傾向にあることを示した。QCD の高密度における相構造は、現在も非常に議論の的となっている。格子 QCD によるアプローチが難しいため、どのような相があるかもまだ決定的な研究がなされていない。そのような中で、超弦理論の数理である AdS/CFT 対応を用いることは、現象模型ではなく QCD に根ざした解析研究であるという意味で、意義が大きい。本研究では、超対称性がある QCD を扱っており、また超弦理論特有の極限操作を含んでおり、実際の QCD とは異なるが、カラー・フレーバー結合相を理論が好むという傾向は合致しており、議論に一石を投じた。

また、ホログラフィック QCD におけるバリオンのソリトンの表現を用いることで、クォーク質量がバリオンの質量にどのように影響するかを計算し、実際に格子 QCD の数値計算シミュレーションとほぼ矛盾が無い結論を得るに至った。これは、格子ゲージ理論の直接検証とも言える成果である。QCD の強結合領域を具体的に解かなければこのような関係式は得ることが出来ないのも、その意味で重要である。また、格子 QCD では到達の難しい、クォークが無質量のところからの展開であるという意義も大きい。実際のアップクォーク・ダウンクォークは質量が QCD スケールに比べて非常に小さく、それが格子 QCD 計算の本質的な困難となってきている。AdS/CFT 対応では逆に、クォークが無質量の場合が簡単に実現できるため、格子 QCD では扱えない物理量を直接扱うことが出来る。本成果はそのような成果の一つと考えることが出来る。

これらの研究は全て、D ブレーンと場の理論のソリトンとの関連に根付いている研究である。

本成果は核子の性質のうち基本的なものが D ブレーンとソリトンの記述を融合させることによってきちんと QCD から再現されることを示している。

既にこれらの注目すべき成果については、すみやかに査読つき雑誌に出版を行い、広く研究業界や他の研究者に研究成果を還元した。

また、多くの国際研究会にて本成果について研究発表を行った。学会発表を除く全ての講演は招待講演である。

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9件)

(1) Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto, “Nuclear Force from String Theory” Prog. Theor. Phys., 査読有, 122 (2009) 427-476.

(2) Koji Hashimoto, “Holographic Nuclei” Prog. Theor. Phys., 査読有, 121 (2009) 241-251.

(3) Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai, Shigeki Sugimoto, “Holographic Baryons : Static Properties and From Factors from Gauge/String Duality” Prog. Theor. Phys., 査読有, 120 (2008) 1093-1137.

[学会発表] (計12件)

(1) Koji Hashimoto, “Nuclear force from

string theory,” Workshop “Fundamental Aspects of Superstring theory,” 2009年5月9日, Kavli Institute for theoretical Physics (Santa Barbara, アメリカ)

(2) Koji Hashimoto, “Nuclear Force from String Theory,” 10-th international conference on hypernuclear and strange particle physics (Hyp-X), 2009年9月16日, J-PARC 東海村

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

橋本 幸士 (Hashimoto Koji)

独立行政法人理化学研究所・川合理論物理学研究室・専任研究員

研究者番号 : 80345074