

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007 ~ 2010

課題番号：19740138

研究課題名 (和文) D ブレーンによる量子論的幾何学の研究

研究課題名 (英文) Quantum Geometry from D-brane

研究代表者

寺嶋 靖治 (TERASHIMA SEIJI)

京都大学・基礎物理学研究所・助教

研究者番号：20435621

研究成果の概要 (和文)：

超弦理論中の D ブレーンを統一的に記述するような M 理論中の M ブレーンを考察した。特に M2 ブレーンから M5 ブレーンを構成することで、M ブレーンでは、通常のリー代数の一般化である 3 代数と呼ばれる代数が重要であることを示した。D ブレーンで現れる非可換幾何はリー代数と関係しているため、この結果は 3 代数に基づいた一般化された幾何が存在して、M 理論で重要になることを示唆している。

研究成果の概要 (英文)：

We studied the M-brane in M-theory which can be considered as a unification of various D-branes in string theories. We constructed the M5-branes from M2-branes and showed that the 3-algebra, which is a generalization of Lie algebra, is important for M-branes. Because the noncommutative geometry appears in D-brane physics is related to the Lie algebra, this result suggests that there is generalized geometry based on the 3-algebra and it is important to the M-theory.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	900,000	0	900,000
20年度	700,000	210,000	910,000
21年度	700,000	210,000	910,000
22年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,000,000	630,000	3,630,000

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

キーワード：素粒子論、超弦理論

1. 研究開始当初の背景

古典的な重力理論である一般相対性理論では時空そのものが物質によって変化する。そこで、時空を変化させることができる幾何学が必要になり、リーマン幾何学が重要な役割を果たす。しかし、ブラックホールや宇宙初期

といった極限的な状況では量子論的な効果が重要になり、『古典的』なリーマン幾何学を基礎とする一般相対論が破綻すると考えられる。この量子論的な重力理論では、時空の不確定性を取り入れたリーマン幾何学に代わる新しい幾何学が存在し、それを基礎として量子重力理論が構築されることが予想でき

る。

この量子論的な幾何学を考察するうえで、超弦理論、特に超弦理論に存在するDブレーンと呼ばれる超弦理論に存在する空間的に広がった物体が重要である。近年、弦理論の非摂動的な側面の研究が進み、特に、5種類の超弦理論や11次元超重力などの、それぞれ異なると思われていた様々な理論が、一つの理論の真空状態であると考えられるようになった。この超弦理論の非摂動的な理解しようとする試みにおいて、Dブレーンと呼ばれる空間的に広がった物体が重要な役割を担うであることが1990年代中盤からの研究によって明らかになった。さらにDブレーン上の理論を基にして、量子重力を含む超弦理論が構成できる可能性が示された(行列理論やAdS/CFT対応等)。しかし、このDブレーンと重力の対応は特殊な状況でかつ特殊な極限でのみ理解されており、一般的に超弦理論を非摂動的に理解する方法ははっきりしていない。

本研究課題において最近の重要な発見の一つは、Dブレーンを考えることで、非可換平面というある特別な種類の非可換空間が現れることである。この事から非可換空間が量子重力の背後にある幾何に何らかの意味を持つだろうと予想できる。非可換空間上のリーマン幾何に対応する理論はConnesにより提案されている。非常に興味深いことに、超弦理論の枠組みの中でもDブレーン-反Dブレーン系を用いた行列模型を考えることにより、このConnesの理論が自然に現れることが私を含む研究者による論文によって示された。行列のなす代数は非可換であるため、行列理論と非可換幾何は非常に近い関係にあるが、Dブレーン-反Dブレーン系を考えることにより非可換幾何との直接の対応がつくことは非常に重要である。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、次のような問題を解決することを本研究の大きな目標とした：

「リーマン幾何に代わる、量子化された重力理論における「幾何」は何か？」

この問題を考えるにあたり、私が着目したのは超弦理論、特に超弦理論に存在するDブレーンと呼ばれる空間的に広がった物体である。このDブレーン上の理論は重力を含まないにも関わらず、Dブレーンを調べることで量子化された重力を理解できることが、現在までの多くの研究者による努力によって明らかになりつつある。そこで、本研究では、超弦理論中のDブレーンを調べることにより、量子化された重力に本質的な幾何学

が何であるかを理解し、それを基にして量子論と重力を融合する事を大きな目的とした。上で述べたDブレーンと重力の対応は、ホログラフィー、開弦と閉弦の双対性、行列理論、AdS/CFT対応等、様々な理解の仕方や具体例が知られている。しかし、現在までのところ、量子化された重力の本質的な理解からは程遠い状況であり、例えば最も単純なブラックホールであるSchwarzschildブラックホールの物理や宇宙初期における特異点問題も超弦理論からは理解できていない。ここで相対論において背後にあるリーマン幾何の本質的に重要であったことを思い起こすと、Dブレーンの背後にあるべき幾何に焦点をあてて超弦理論を研究することは重要な方向性だと考えた。また、超弦理論では点粒子ではなく1次元的に広がったひもを考えるため、古典的な段階ですでにリーマン幾何を一般化する必要があることが知られているので、リーマン幾何を超えるような幾何が超弦理論の背後にあることが確かであることも本研究にとって重要な事実である。

本研究で最も問題になるのは、超弦理論そのものが未だ完成した理論ではないことである。実際、量子論的な重力を明白に理解するためには超弦理論の非摂動的な定式化が必要になるが、残念ながら現在までのところそのような定式化は見つかっていない。そこで、本研究では、Dブレーンの背後にある幾何を明らかにすることによって、超弦理論の非摂動的な定式化についての知見をえることも考えた。これは、超弦理論を素粒子現象論や宇宙論の模型として考え現実世界との対応を実際に議論しようとした場合に、その非摂動的な性質の理解が必要であることから、非常に重要である。もちろん、超弦理論を完成させることと量子化された重力に対する幾何を得ることは深く関係していると考えられ、二つの目標を常に念頭に置きながら研究を進めた。

3. 研究の方法

不安定なDブレーン系を用いた行列模型を使って、超弦理論における時空の幾何学を理解したい。この行列模型では、粒子的なDブレーン-反Dブレーン系を超弦理論の基本的な自由度と考え、量子論的な重力も含めた全ての超弦理論の物理がこのDブレーン系から引き出せると予想する。しかし、現在までのところ、このような行列模型を物理的な結果を引き出せるような形で正しく定式化することはできていない。しかし、時空の次元が実質的に2であるような特殊な弦理論の場合には、実際にDブレーン-反Dブレーン系が弦理論の非摂動的な定式化を与えるこ

とが最近わかってきている。特に、11次元のM理論中のM2ブレーンに関する研究結果を使うことによって、この行列模型の正しい定式化、または、新しい超弦理論の非摂動的な定式化の可能性が出てくると考えられ、その中で新しい時空の幾何学についての知見を得ること考えた。

4. 研究成果

11次元時空をもつM理論はII型超弦理論の強結合極限として実現されると考えられ、その理解が超弦理論の理解においても非常に重要である。最近、このM理論中のM2ブレーンと呼ばれる膜状の物体を記述する有効理論が提案された。このM2ブレーンの理論は、ある極限においてDブレーン理論となるので、後者の非可換性をM理論の立場で拡張したものになっているはずである。実際、このM2ブレーンの理論は、通常のゲージ理論におけるリー代数ではなく、3代数と呼ばれる代数構造が背後にあると信じられている。リー代数は、二つの元の交換子で決まり、一般に可換でないことから非可換性が出現するが、3代数の場合は、三つの元から一つの元への写像で決まるので、非可換時空の何らかの意味の拡張が存在することが予想される。私は、非可換性が明らかになるようなファジー球面が解として現れるようなDブレーンの配位に対応したM2ブレーンの理論の解を構成した。これにより、M理論における非可換幾何学の対応物を理解することが期待される。また、私は、八木氏とともに、M2ブレーンの有効理論から、M5ブレーンを構成した。この時、背後にある3代数が解の存在を示すのに必要であり、また、3代数のとり値が、M5ブレーン上のフラックスと同定できることを示した。これは、3代数がM5ブレーンの理論においても重要な役割を果たすことを示唆し、非常に興味深い結果であると考えている。また、このM5ブレーンのM2ブレーンによる構成は、D4ブレーンのD2ブレーンによる構成の一般化と見ることができ。後者は、非可換平面上の場の理論で記述される。我々は、さらに、M5ブレーンの低エネルギー有効理論を、ある種の近似の元でM2ブレーンの立場から再構成した。その有効理論は結合定数が空間的に変化するD4ブレーンの形をとる。これはD4ブレーン上の理論を非摂動的に扱えばM5ブレーンを記述できる事を示唆し、非常に興味深い結果であると考えている。

また、Dブレーンと量子重力のホログラフィ的対応を真剣に考えることは、量子重力における幾何を考える上で特に重要であるが、現在までのところ、重力側が漸近的にAdS

空間になっている場合のみ理解が進んでいる。この問題に対して、私は、畔柳氏、小川氏とともに、3次元AdS空間が一般的な極限ブラックホールのゼロエントロピー極限で現れることを示した。これは、理解が進んでいるAdS空間と極限ブラックホールを関係付けられることから、一般の空間上における重力の量子論を考えるうえで重要であると考えている。

他にも、重力解に関するファズボール予想に関する研究、様々な背景中のM2ブレーンの有効理論の研究、4次元N=2超対称ゲージ理論の双対性に関する研究等を行った。

以上の成果は、本研究計画における非常に大きな目標である、量子重力理論における幾何を理解し、超弦理論の非摂動定式化を見つける、ということについては、いくつかの示唆を見つけたという程度に過ぎない。しかし、3代数を用いた非可換時空のある種の拡張の可能性等は今後の研究の進展において非常に興味深く重要な成果であると考えている。不安定なDブレーンを用いた量子重力とその背後の幾何の理解に関しては、ホログラフィー対応のいくつかの研究等を準備段階として行ったが、残念ながら直接の成果は様々な概念的、技術的困難から出せなかった。この問題については今後の私自身の研究課題として継続していきたいと考えている。

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 15 件)

①寺嶋靖治、八木太、 On Effective Action of Multiple M5-branes and ABJM Action、JHEP、1103, 036, 2011, 査読有

②畔柳竜生、小川軌明、寺嶋靖治、 Emergent AdS3 in the Zero Entropy Extremal Black Holes、JHEP、1103, 004, 2011, 査読有

③寺嶋靖治、八木太、 M5-brane Solution in ABJM Theory and Three-algebra、JHEP、0912, 059, 2009, 査読有

④畔柳竜生、小川軌明、寺嶋靖治、 The Kerr/CFT Correspondence and String Theory、Phys. Rev. D、79, 106009, 2009, 査読有

⑤畔柳竜生、小川軌明、寺嶋靖治、 Holographic Duals of Kaluza-Klein Black Hole、JHEP、0904, 061, 2009, 査読有

⑥ 寺嶋靖治、八木太、Orbifolding the Membrane Action、JHEP、0812, 041, 2008, 査読有

⑦ 寺嶋靖治、On M5-branes in N=6 Membrane Action、JHEP、0808, 080, 2008, 査読有

〔学会発表〕(計 2 件)

① 寺嶋靖治、N=2 超対称ゲージ理論の S 双対性について、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 23 日、岡山大学津島キャンパス

② 寺嶋靖治、Glueball Decay in Holographic QCD、日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 23 日、近畿大学本部キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺嶋 靖治 (TERASHIMA SEIJI)
京都大学・基礎物理学研究所・助教
研究者番号：20435621

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：