

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23740189

研究課題名(和文) ゲージ/重力対応を用いた量子重力における一般化された幾何の研究

研究課題名(英文) Generalized geometry of quatum gravity via gauge/gravity correspondence

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：量子重力の理解は、我々の世界に対する認識を根本的に異なったものに変える、非常に興味深い問題である。特に、ゲージ/重力対応と呼ばれる、重力と重力を含まない場の理論が互いに等価であるとする予想が重要となる。この研究課題では、ゲージ/重力対応で、非常に時間がたったブラックホールを考察した。この時、重力の結合定数に関する摂動論ではブラックホールの地平面付近で、理論に無限の自由度があるように振る舞うこと、そして非摂動的には時空が地平面付近で存在しなくなるにより自由度が有限となることを示した。これは、我々の時空の認識に重要な変更が必要なることを示唆する興味深い結果である。

研究成果の概要(英文)：Understanding the quantum gravity will change our understanding of our world completly, and then it is very interesting to be studied. In particular, the gauge/gravity corrspndence, which claim that some quatum gravity is equivalent to a quantum field theory without gravity, will be important to study quatum gravity. We study very old black hole using the gauge/gravity corrspndence. Near the horizon of the black hole, there is inifinitely many degree of freedom in the perturbation theory of the coupling constant of the gravity. However, in the non-perturbatively, we find that the space-time itself disapper near the horizon, thus the degree of freedom is indeed finite. This result will be imporatant because it would change our understading of the space-time.

研究分野：数物系科学

キーワード：素粒子論 超弦理論

## 1. 研究開始当初の背景

時空に関する認識はアインシュタインによる一般相対理論以降大きく変更された。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。この量子重力とその背後の幾何学にあたるものは、我々の世界に対する認識を根本的に変えるものとなる。

この今のところ非常にあいまいな量子論的な幾何学を具体的に考察するうえで、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。これは、超弦理論は少なくとも摂動的には量子重力を記述することがかわっていることと、Dブレーンが非摂動的な超弦理論の理解に重要であるためである。以下、Dブレーンについて説明する。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学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学に対応する理論は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学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学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

量子化された重力を理解する事は、我々の世界に対する認識、特に空間や時間の概念を根本的に異なったものに変える、非常に興味深い問題である。この時、重力理論の背後にある幾何学が、何らかの意味で一般化され、重要な役割を果たす事が予想される。この量子重力の背後にあるべき幾何学を理解する事が本研究計画の大きな目的である。

より具体的には、ゲージ/重力対応と呼ばれる、量子重力と重力を含まない場の理論が互いに等価であるとする予想がある。これと、超弦理論中のDブレーンの幾何学、特にそこで現れる非可換幾何学を結びつけることで、量子重力の背後にある幾何学を理解したい。この研究の対象は、量子重力だけでなく、超弦理論の理解、ゲージ/重力対応の理解などにもまたがるもので、基礎的ではあるが、様々な応用の可能性もあり重要であると考えられる。

## 3. 研究の方法

量子重力を理解するために、現在、非摂動的に量子重力を記述すると信じられているゲージ/重力対応を調べた。このゲージ/重力対応を使うことで、重力を含まない量子場の理論から重力理論を調べることができる。これは、超弦理論のDブレーンの研究から具体的な対応が作られ、現在ではその対応の存在は強く信じられている。特に、典型的な量子重力が重要になる対象として、ブラックホールの古典的な幾何学としての描像について、量子場の理論の立場から調べた。

また、M理論と呼ばれるすべての超弦理論を非摂動的に統一すると考えられる理論におけるブレーンに関しても調べた。これは、M理論の理解は非摂動的な超弦理論、量子重力の理解の鍵であると考えられるためである。

## 4. 研究成果

量子重力の理解は、我々の世界に対する認識、特に空間や時間の概念を根本的に異なったものに変える、非常に興味深い問題である。特に、ゲージ/重力対応と呼ばれる、量子重力と重力を含まない場の理論が互いに等価であるとする予想が重要となる。私は、現在大阪大学所属の飯塚氏と共に、ゲージ/重力対応を使ったbrick wallの解析を行った。このbrick wallは、ブラックホールの地平線付近で理論の自由度が無限に大きくなるように見える現象に関するものである。我々は、ゲージ/重力対応の枠内では、非常に時間がたったブラックホールでは、実際に重力

の結合定数に関する摂動論では無限の自由度のようがあるように振る舞うこと、そして非摂動的には時空が地平面付近で存在しなくなるにより自由度が有限となることを示した。これは、ブラックホールの情報喪失問題に関連しても非常に重要である。さらに、超対称場の理論の局所化といわれる厳密な相関関数を計算する手法を用いて、4次元  $N = 1$  超対称ゲージ理論の閉じ込め相の解析を行った。また、同様の手法で、超弦理論の世界面理論を解析して、Dブレーン電荷の厳密な標識を求めた。

さらに、主にM理論と呼ばれる超弦理論の強結合極限で定義されると考えられる理論についても研究した。すべての超弦理論は双対性と呼ばれる非自明な等価性により結びついているが、M理論はこれらの双対性を時空の幾何学的な対称性として高次元空間で統一すると考えられている。この双対性は、典型的には、強結合理論と弱結合理論の間の等価性であり、量子論的な効果が非常に強く効くような理論を古典的な理論として解釈できる。このことから、研究目的である量子論的な重力の背後にある幾何を探るうえで、M理論を理解することは非常に重要であることがわかる。特に、M理論に存在する高次元の物体(Mブレーン)上の有効理論を調べることの重要性は、超弦理論において、Dブレーンが非摂動的な理解において決定的な役割を果たしていることから明らかであろう。本研究課題では、具体的には、M5ブレーン上で実現される6次元超対称場の理論に関して研究した。この場の理論が存在することは超弦理論の考察から予想されているが、どのような理論なのかはわかっていない。この理論について、まず、ユークリッド化した時間を非常に小さくした極限で、空間を5次元球にした場合の超対称変換と作用を決定した。これにより、この理論の厳密な分配関数の計算が可能になった。この結果は6次元超対称場の理論からM理論を理解するうえで重要だと考えている。

また、M5ブレーンとM2ブレーンの超対称性を保つ束縛状態を、M2ブレーン上の理論上で構成することを行った。具体的には、M2ブレーン上の3次元場の理論の古典的な運動方程式の新しい解で、超対称性を保つようなものを見つけた。これは、仮想的な6次元理論を決定するのに重要であると考えている。

ゲージ/重力対応の基本的な例としてAdS空間にコンパクト化したM理論とM2ブレーン、または、M5ブレーンと呼ばれるM理論中のブレーン上の低エネルギー有効場の理論との対応が知られている。このように、研究目的である量子重力における幾何学を探るうえで、M理論の理解、特に、M理論中のブレーンの理解は不可欠であろう。

具体的には、M5ブレーンとM2ブレーンの超対称性を保つ束縛状態を表す方程式の厳密解を構成した。この構成は、Lax形式と呼ばれる、可積分性を表す形式に方程式を書き換えることができることを示すことができたことが本質的である。また、このM5ブレーンやM2ブレーンと関連した超対称性を持った場の理論を曲がった空間上で考えた理論に対して、局所化と呼ばれる方法を使って分配関数などを厳密に計算した。これらの結果は、ほとんど理解が進んでいないM5ブレーンを理解するうえで重要である。

他にも、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、今後の量子重力における幾何に関する研究を進展させる重要な成果だと信じる。ただし、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、まだまだ多くの事が理解される必要がある。本研究からも、未だ全貌がわからない驚くべき理論が多く存在することが示唆されており、今後の研究により大きな発展があることが期待される。最後に、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。この問題についても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 11件)

橋本幸二、杉下宗太郎、寺嶋靖治、Ramond-Ramond couplings of D-branes, JHEP, 1503,077,2015, 査読有

寺嶋靖治、R A Localization Computation in Confining Phase, JHEP, 1503,097,2015, 査読有

酒井和博、寺嶋靖治、Integrability of BPS equations in ABJM theory, JHEP, 1311,002,2013, 査読有

飯塚則裕、寺嶋靖治、Brick Walls for Black Holes in AdS/CFT, Nuclear Physics B, 895,1,2015, 査読有

細道和夫、Rak-Kyeong Seong、寺嶋靖治、Supersymmetric Gauge Theories on the Five-Sphere, Nuclear Physics B,

865,376,2012,査読有

〔学会発表〕(計 0 件)

〔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：  
出願年月日：  
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

寺嶋 靖治 (TERASHIMA SELJI)  
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：