

平成 21 年 5 月 23 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2006 ~ 2008  
 課題番号：18540252  
 研究課題名 (和文) 超弦理論とM理論のダイナミクスおよびその共变的定式化の研究  
 研究課題名 (英文) Studies of the dynamics of superstring and M theory and its covariant formulation  
 研究代表者  
 風間 洋一 (KAZAMA YOICHI)  
 東京大学・大学院総合文化研究科・教授  
 研究者番号：60144317

研究成果の概要：超弦理論とM理論における中心課題のひとつであるゲージ/弦対応(AdS/CFT)の解明に向けて、基礎と応用の両面から研究を行い、次の成果を得た。基礎的な側面としては、M理論の基本的対象である超膜を研究代表者が開発した double-spinor 形式を用いて解析し、そのダイナミクスを支配する拘束代数を導出した。またゲージ/弦対応の一つの典型例として、4次元超対称ヤン・ミルズ理論のあるセクターとRRフラックスを含む曲がった平面波背景場中の弦理論の対応があるが、理解が遅れている弦理論側の進展に重要な共形不変性を明白に保った量子論的取り扱いを創始した。応用的な側面においては、主にDブレーンを媒介とした弦理論とQCDの新たな関係を研究し、パイ中間子とクォークの質量の関係、核子の荷電半径や中間子との結合等を超弦理論の手法を用いて導出し、いわゆるホログラフィックQCDの発展に寄与する幾つかの結果を得た。さらにこうした手法を原子核物理の分野にまで応用した。例として、原子核に対応する高次元重力解を提案し、それを用いて原子核の巨大励起スペクトルが再現できることを示した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,200,000	0	1,200,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	660,000	4,060,000

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：ゲージ/弦対応、超共变的量子化、平面波背景場、共形不変ゲージ、Dブレーン、ホログラフィックQCD、M2ブレーン、強弱双対性

## 1. 研究開始当初の背景

超弦理論およびM理論は量子重力を含む自然界の統一理論の最有力候補として精力

的に研究され、素粒子物理学の他の分野および宇宙物理学にも多大な影響を及ぼしてきた。研究開始前10年間の進展として、特筆すべきことは、Dブレーンの描像を仲介として、4次

元の超対称ゲージ理論と10次元の曲がった時空中の超弦理論の間に同値性があるという驚くべき予想(ゲージ/弦対応あるいはAdS/CFT対応と呼ばれる)が提出され、数々の証拠が見出されてきたことである。これは弦理論自体の発展にとって画期的であるのみならず、従来場の理論の手法のみを用いて研究されてきたゲージ理論に対する新しい見方と手法を与えた。しかしながら、こうした目覚ましい発展にも拘わらず、超弦理論が真の統一理論となるためには解決しなければならない重大な問題が幾つも存在する。ひとつは弦理論およびM理論の満足のいく(非摂動的)定式化が存在しないという基礎論・構成論上の問題であり、もうひとつは、プランクスケールをその基本的エネルギースケールとする弦理論と現実の素粒子物理学をいかに繋ぎ、弦理論特有の現象を発掘することによって弦理論を検証するか、という現象論上の問題である。この二つの基本的問題はかなり異なるレベルの問題のように見えるが、我々はそれらが「Dブレーンのダイナミクス」を接点として深く関係していると捉えるべきだと考えた。その理由は、ブレーン(とりわけDブレーン)の持つ多彩かつ弦理論特有な「相補的」特徴に由来する:Dブレーンのダイナミクスはその上の開弦の励起、特に超対称ゲージ理論で記述されるmasslessの励起で支配される。またDブレーンや超膜を正則化した行列模型は弦理論やM理論の基本理論と解釈することもできる。一方、Dブレーンは重力場と共に双スピナーで記述されるRR場と呼ばれるゲージ場を生みだし、この両者(および超対称性に必要なフェルミ場)の密接な連携によってDブレーンの時空的性質とダイナミクスが支配される。さらに、Dブレーンは直接宇宙論的な観測にかかりうる貴重な現象論的オブジェクトでもある。本研究はこのような認識のもとに、Dブレーンのダイナミクスを接点として基礎論・構成論的な問題の解明と現象論的な応用という二つの方向性を同時に関連させて包括的な視点から追求することを目指した。

## 2. 研究の目的

より具体的には、次の目的を掲げた。

(1) 研究代表者は、Dブレーンが重力場と共に生み出すRRゲージ場を記述するのに適した、超共変性を露わに保つpure spinor形式を、従来のグリーン・シュワルツ形式を拡張した新しい基本作用から導くことに成功したが、それをさらにM理論の基本的物体である超膜(M2ブレーン)の記述に適用し、超共変的な超膜理論を構築する。

(2) ゲージ/弦対応に関して、弦理論側の理解がゲージ理論側の理解に比して著しく遅れている。その主な理由はRR場を含む曲がった時空中の弦理論の取り扱いが非常に困難であるためである。唯一の例外はいわゆる平面波背景時空の場合であり、グリーン・シュワルツ形式の光円錐ゲージを用いた取り扱いでその厳密なスペクトルが求められ、ゲージ理論側の対応する複合演算子の異常次元と一致することが確かめられている。しかしながら、相関関数については非常にわずかな知識しか得られていない。この状況を打開するため、共形不変性を保つセミ光円錐ゲージに基づく理論を構築する。

(3) ゲージ/弦対応で中心的な役割を果たすDブレーンのダイナミクスの解明に関する研究の一つのテーマとして、ゲージ理論のソリトン解とDブレーンの動力学の関係を明らかにする。

(4) Dブレーンのダイナミクスのもう一つのテーマとして、次のようなプロセスの解明を行う。尖っている形をしたDブレーンの動力学、Dブレーンの衝突と散乱、曲がったDブレーンの振動。これらはDブレーンの一つの現象論的現れの可能性としての宇宙ひもの性質の解明に重要となると考えられる。

## 3. 研究の方法

(1)の研究においては、研究代表者が開発したdouble-spinor形式と呼ばれるグリーン・シュワルツ形式の拡張を強力な手段として活用する。

(2)の研究の最も困難な点は、曲がった時空中では弦の運動方程式が非線形になり、解くのが難しいという事実である。これを回避するため、運動方程式の解を用いずに、位相空間での同時刻交換関係のみを用いた量子化法を活用する。ダイナミクスについては、共形不変性を保てば、その生成子の中にハミルトニアンが含まれるので、代数を通じて時間発展の効果が取り入れられる。この考え方はこれまで注目されてきていない新たな視点である。

(3)および(4)の研究は密接に関係する。方法としては、ヤン・ミルズゲージ理論や弦理論的な補正を入れたディラック・ポルン・インフェルト型ゲージ理論のソリトンの古典解を解析し、その幾何学的な解釈を考えることにより、ソリトンに対する新たな理解を得る。

## 4. 研究成果

研究目的で述べたように、超弦理論とM理論における中心課題のひとつである、ゲージ/弦対応(AdS/CFT)の解明に向けて、基礎と応

用の両面から研究を行い、次の成果を得た。

#### (1) 基礎的な側面

M理論の基本的対象である超膜を研究代表者が開発した double-spinor 形式を用いて解析し、そのダイナミクスを完全に支配する拘束代数を導出することに成功した。これは超膜に対する超共変 pure spinor 形式を構成する際の基礎となる結果である。

またゲージ/弦対応の一つの典型例である、4次元超対称ヤン・ミルズ理論のあるセクターと RR フラックスを含む曲がった平面波背景場中の弦理論の対応について、特に理解が遅れている弦理論側の研究を行った。位相空間における量子化法を最大限生かした新たな考え方を用いて、共形不変性を明白に保つセミ光円錐ゲージでの量子化に初めて成功した。また相関関数の計算に必要な頂点関数の構成に関する予備的な研究を行った。これについては研究を続行中である。

#### (2) 応用的側面

D プレーンとソリトンの関係の研究に関しては、次の問題に対して解答を与える論文を発表した。(a) インスタントンの配位空間に対して幾何学的解釈をどう与えるかの問題。(b) ソリトン宇宙ひもが互いに衝突する際必ず組み替えが起こるという事実の発見。(c) 超対称が自発的に破れる新機構を持つ場の理論におけるソリトンの存在の指摘。

ゲージ/弦対応の文脈における D プレーンの研究については、この分野の新たな進展に伴い、当初の研究予定を拡張する形で、主に D プレーンを媒介とした弦理論と QCD の新たな関係を研究した。具体的には、パイ中間子とクォークの質量の関係、核子の荷電半径、磁気モーメント、中間子との結合等を超弦理論の手法を用いて導出し、いわゆるホログラフィック QCD の発展に寄与した。さらにこうした手法を原子核物理の分野にまで応用した。例として、原子核に対応する高次元重力解を提案し、それを用いて原子核の巨大励起スペクトルが再現できることを示した。

#### 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 12 件)

Yoichi Kazama, Superstring in the

pp-wave background with RR flux as a conformal field theory, Prog. Theor. Phys. (Supplement) 177, 54-67, 2009, 査読有

Koji Hashimoto, Holographic Nuclei, Prog. Theor. Phys. 121, 241-251, 2009, 査読有

Yoichi Kazama and Naoto Yokoi, Superstring in the plane wave background with RR flux as a conformal field theory, JHEP, 0803, 57, 2008, 査読有

Koji Hashimoto, Tadakatsu Sakai and Shigeki Sugimoto, Holographic Baryons: Static Properties and Form Factors from Gauge/String

Duality, Prog. Theor. Phys. 120: 1093-1137, 2008, 査読有

Koji Hashimoto, Takayuki Hirayama, Feng Li Lin, Ho Jng Yee, Quark Mass Deformation of Holographic Massless QCD, JHEP 0807, 089, 2008, 査読有

Koji Hashimoto, Chung-I Tan, Seiji Terashima, Glueball Decay in Holographic QCD, Phys. Rev., D77, 086001, 2008, 査読有

Minoru Eto, Koji Hashimoto, Seiji Terashima, QCD String as Vortex String in Seiberg-Dual Theory, JHEP 0709, 036, 2007, 査読有

Koji Hashimoto, Takayuki Hirayama, Akitsugu Miwa, Holographic QCD and Pion Mass, JHEP 0706, 020, 2007, 査読有

Minoru Eto, Koji Hashimoto, Seiji Terashima, Solitons in Supersymmetry Breaking Meta-Stable Vacua, JHEP 0703, 061, 2007, 査読有

Minoru Eto, Koji Hashimoto, Giacomo Marmorini, Muneto Nitta, Keisuke Ohashi, Walter Vinci, Universal Reconnection of Non-Abelian Cosmic Strings, Phys. Rev. Lett. 98, 091602, 2007, 査読有

Heng-Yu Chen, Minoru Eto, Koji Hashimoto, The Shape of Instantons: Cross Section of Supertubes and Dyonic Instantons, JHEP 0701, 017, 2007, 査読有

Yuri Aisaka and Yoichi Kazama, Towards pure spinor type covariant description of supermembrane, JHEP 0605, 041, 2006, 査読有

[学会発表](計 6 件)

橋本幸土, Gravity dual of tachyon condensation, 日本物理学会、2009/3/28, 立教大学

橋本幸土, Toward a proof of Montonen-Olive duality via multiple M2-branes, 韓国高等研究所国際研究集会、

2008/9/24, 韓国高等研究所

橋本幸士, Quark mass in holographic QCD, 国際会議 "Non-perturbative Methods in Strongly Coupled Gauge Theories", 2008/4/30, ガリレオガリレイ研究所(イタリア)

横井直人(風間洋一), Superstring in the plane wave background with RR flux as a conformal field theory, 日本物理学会, 2008/3/26, 近畿大学

風間洋一, Superstring in plane wave background with RR flux as a conformal field theory, 国際研究集会 "30 Years of Mathematical Methods in High Energy Physics", 2008/3/19, 京都大学数理解析研究所

橋本幸士, What a superstring theorist expects for experiments, 国際会議 "Supersymmetry in 2010", 2007/6/20, 北海道大学

[その他]

ホームページ等

<http://hep1.c.u-tokyo.ac.jp/~kazama/kazama.htm>

<http://www.riken.jp/lab/www/theory/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

風間 洋一 (KAZAMA YOICHI)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号: 60144317

### (2) 研究分担者 (2006 ~ 2007 年度)

橋本 幸士 (HASHIMOTO KOJI)

2006 年度: 東京大学・大学院総合文化研究科・助手

研究者番号: 80345074

2007 年度: 理化学研究所・仁科加速器研究センター・研究員

研究者番号: 80345074

### (3) 連携研究者 (2008 年度)

橋本 幸士 (HASHIMOTO KOJI)

理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号: 80345074