

## 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 24 年 4 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20540283

研究課題名（和文） 超弦理論による高次元ブラックホールと特異点の研究

研究課題名（英文） Study of Higher-dimensional Black Holes and Their Singularities by Superstrings

研究代表者

太田 信義 (OHTA NOBUYOSHI)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：90187304

研究成果の概要（和文）：

超弦理論の量子効果によるアインシュタイン曲率テンソルの高次項とディラトンが入ったときのブラックホール厳密解を求め、それらの性質と大域構造も調べ、特異性が通常と大きく異なり、弱くなる可能性を見だし、その物理的応用も与えた。またくりこみ可能なHorava重力理論のブラックホール解を構成し、その熱力学について考察を行った。一方、時間に依存したブレイン解を系統的に構成、分類した。超対称性を持つ一群の解も発見した。

研究成果の概要（英文）：

We obtain exact black hole solutions in the theory with higher derivative terms and dilaton from superstrings, study their physical properties including global structure, and found the possibility that the singularity is weakened in such theories. We also give physical applications of the solutions. We also construct black hole solutions in renormalizable Horava gravity, and study their thermodynamic properties. We systematically construct time-dependent brane solutions and classify them, and also construct supersymmetric such solutions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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・ブラックホール・特異点・宇宙物理・インフレーション

## 1. 研究開始当初の背景

重力の量子論を解明することは、理論物理学において解決を迫られている最も重要な問題の1つです。その有力な候補として、世界的にも国内でも超弦理論が活発に研究されていたが、その現実的な検証可能性を探る試みはあまりされていません。その理由の1つ

は、超弦理論の基礎がまだ完全に理解できていないことにもあるが、重力の量子効果が効いてくるような極限的状态が我々の日常の経験からはかけ離れたエネルギースケールであることにもよります。このような理論を検証できる数少ない状況がブラックホールを含む重力解の研究です。超弦理論は高い次

元で定義されているので、余分な次元をコンパクト化する必要があり、超弦理論の物理的な帰結を理解するには、それを非摂動的に取り扱うことが必要です。そのためには、超弦理論のいろいろな非摂動的古典解を理解しておくことが大事です。例えばDブレーンと呼ばれる非摂動的解の性質を調べることで、いくつもある超弦理論が非摂動的には一つのM理論と呼ばれる理論に統一されることがわかりました。これらは、4次元のブラックホール解と解釈することができ、近年ブラックホールの量子論的な性質の解明に役立つことがわかり注目を集めています。しかし、超弦理論で実現されているような高次元時空のブラックホールはまだよく調べられていません。すなわち高次元の重力理論では、4次元では考えられなかった非常に面白い未知の性質がたくさんあります。例えば、4次元ではパーコフの定理というものがあり、定常的ブラックホール解はシュバルツシルト解に限られるという一意性の定理が知られていますが、5次元以上ではリング状のホライズンを持つ解があるなど、より複雑な状況があることがわかっています。このような状況を超弦理論で解明することは重要な問題です。また私は、時間に依存しているけれども、超対称性を持つかなり広いクラスの解を発見しました。これは超弦理論で成り立つと考えられているAdS/CFT対応により、解の特異点近傍の特異性無しに解析できる手段を与えることがわかりました。

## 2. 研究の目的

超弦理論の非摂動的解としてのブレーン及びブラックホール解を調べると同時に、その物理的な応用としてこれらの解に含まれる特異点の性質を解明することを目的とします。私自身の研究により、超弦理論またはM理論の低エネルギー有効理論である超重力理論には、大変面白い交差したブレーン解を構成するかなり系統的な方法があることがわかっています。それぞれのブレーンが電荷や磁荷を持ち、それらがブラックホールのエントロピーを与えます。このような一連の解を詳しく調べ、超弦理論の性質を解明していくとともに、上に述べた超対称性を持つ時間に依存した解をさらに拡張して、超弦理論による特異点解消の機構の解明を探求します。(1)すでに求めたブレーン解に、さらに回転の要素を加えた解がどのように構成されるかを調べ、リング解も含め高次元ブラックホールの新しい解を構成する。(2)ブレーンを用いたブラックホール解や宇宙初期を記述する解には、あるところで特異点が発生することがわかっている。ブラックホールの特異点や、宇宙初期のビッグバン特異性について、超弦理論の解としてこれを見

たときに、これらの特異点がどうなるかを調べ、特異点近傍の振る舞いをどのように記述できるかを調べる。

## 3. 研究の方法

(1)超弦理論、M理論の有効理論である超重力理論の運動方程式の解の構成法をさらに改良し一般的な解の構成や分類を試みます。以前開発した現在の運動方程式を解く方法はある程度系統だったものですが、解を単純化する仮定を用いています。特に、角運動量を持つ解を含まない場合だけが解析されています。また重力からの寄与はアインシュタイン項を採用しています。これらの制限を除いた場合にもっと一般的な解が構成できるのか、できないのかという問題は、高次元ブラックホール解をさらに検討する上でも、また解をすべてつくして理論の性質を解明する上でも重要と思われます。これをまず解析的に調べます。

(2)さらに、一般的な仮定の下で、高次元ブラックホールのホライズンのトポロジーとしてどのようなものが許されるかを解析する。具体的な解を構成しなくとも、より一般的な解析によりホライズンのトポロジーを解析することが可能と考えられます。5次元ではすでに考えられていますので、これをさらに高次元へ拡張することを考えます。

(3)これらのブラックホール解や時間に依存した解の特異点の性質を解析します。特に高次補正項を考えたり、AdS/CFT対応とその一般化を用いることにより、特異点近傍の振る舞いをうまく記述できるか、あるいはそれが解消される可能性を探ります。それを調べるには、具体的に解を構成することが必要です。そのような解が求めれば、AdS/CFT対応やその一般化による場の理論への応用も広がるのが期待されます。また特異点解消について、このような高次補正項を入れると、解の性質が変わると期待されます。このような高次項を入れたときに特異点が性質を変えることは一般的なのかどうかという問題は大変面白い結果を与えると考えられます。

いずれ数値的な解析を試みることも必要になってくるものと考えられます。現在はパーソナルコンピュータでもかなりの性能がありますので、それを購入して、数値解析に役立てたいと考えています。この際、現在いる日本学術振興会外国人研究員や近大の研究員にも協力してもらって、研究を進めたいと考えます。私自身も国内及び外国のいろいろな研究グループと緊密な協力体制をとって研究を進めていく予定であり、研究会などで成果を発表するとともに、電子メールなどで議論を進めていく必要もあると考えています。現在、関連した問題に興味を持っている海外共同研究者との共同研究を積極的に

進める予定です。場合によっては、こちらが出向くか、彼らを日本に招くかして、研究を進めることも視野に入りたいと考えています。

#### 4. 研究成果

(1) 重力からの寄与がアインシュタインテンソルに限らず、量子効果によるアインシュタイン曲率テンソルの高次項とディラトンが入ったときのブラックホール厳密解を一般的に解析した後、それを数値的に求めた。このような理論は超弦理論の低エネルギー有効理論として重要なものである。この課題につき、宇宙項が無い場合で空間が球対称な場合、宇宙項が負で、空間の曲率が0の場合、宇宙項が負で曲率が0でない場合、宇宙項が正の場合、宇宙項なしで空間の曲率がある場合の解を求め、それらの性質について詳しく調べた。その大域構造も明らかにした。また、考える座標系を変えて同じ解を解析し、定量的な差があるが、定性的にはあまり差がないことを見た。

(2) またその応用として、クォークグルーオンプラズマにおける剪断粘性率とエントロピー密度の比を計算し、これまでこの量には下限があると言われていたが、量子効果のためにそれが破れることを示した。

(3) また、重力を繰り込み可能とするが、ユニタリー性を破らない可能性として、ローレンツ不変性を破ったHorava重力理論が考えられた。その理論におけるブラックホール解を構成し、その熱力学について考察を行った。一方で、時間に依存したブレイン解を系統的に構成、分類し、その中に遠方では宇宙論の標準的な解になっているが、原点近傍はブラックホールになっている興味深い解を発見した。それと違った時間依存性を持つブレイン解で、超対称性を持つ一群の解も発見した。宇宙論的解でブラックホールを持つ厳密解は初めて発見されたものであり、さらに多様な解とあわせ、これらの解は今後の研究に刺激を与えると考えられる。

(4) 重力がエントロピーによる力であって、基本的な相互作用というよりは、ゲージ理論から生じる力であるという考え方にに基づき、重力方程式が導けるかどうかを検討した。これは最近の大きな発展であり、多くの研究者が興味を持って研究を始めている。

(5) 現在の観測によると宇宙は加速膨張しているが、その原因は小さいが正の宇宙項があるためであると考えられている。私は、低エネルギーの量子色力学で現れるグルーオンのモードが、このような小さな宇宙項を出す可能性を指摘した。

(6) 強い重力場があるときの時間依存したブラックホール解を構成した。通常、重力場

の従う方程式は高度に非線形なので、厳密解を求めることは非常に難しいのであるが、我々は適当な座標依存性をさせた場合にはそれが可能であることを見だし、厳密解を構成することに成功した。さらにその解を交差しているブレイン解へ拡張することに成功した。これらは、時間依存した宇宙初期の解析、とくに初期特異点の解析に有用であると考えられる。

(7) 最近量子重力との絡みで注目されている、重力の高階微分項を導入した理論につき、私は3次元の4次までの高階微分を含む最も一般的な理論について、どのような場合にユニタリー性が保たれるかを一般的に解析し、その重要性を明らかにした。また、これが一般には繰り込み可能であるが、ユニタリーな場合には繰り込み不可能であることを示した。

(8) また、場の再定義の自由度を考慮すると、宇宙初期に重要なドジッター解を構成することが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 30 件)

- ① 前田恵一、太田信義、分部亮、Accelerating Universes in String Theory via Field Redefinition、European Physical Journal C、査読有、vol. 72、2012、論文番号 1949、DOI: 10.1140/epjc/s10052-012-1949-6
- ② 太田信義、A Complete Classification of Higher Derivative Gravity in 3D and Criticality in 4D、Classical and Quantum Gravity、査読有、vol. 29、2012、論文番号 015002、DOI: 10.1088/0264-9381/29/1/015002
- ③ L.-M. Cao, N. Ohta and O. Evnin、Intersecting Black Branes in Strong Gravitational Waves、Journal of High Energy Physics、査読有、vol. 1106、2011、論文番号 062、DOI: 10.1007/JHEP06(2011)062
- ④ L.-M. Cao, N. Ohta and O. Evnin、Extended Black Holes in Strong Gravitational Waves、Journal of High Energy Physics、査読有、vol. 1104、2011、論文番号 105、DOI: 10.1007/JHEP04(2011)105
- ⑤ 前田恵一、太田信義、笹川幸則、AdS Black Hole Solution in Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Gravity、Physical Review D、査読有、vol. 83、2010、論文番号 044051、DOI: 10.1103/PhysRevD.83.044051

- ⑥ 太田信義、Dark Energy and QCD Ghost、Physics Letters B、査読有、vol.695、41-44
- ⑦ 前田恵一、南辻真人、太田信義、鶴沢報仁、Dynamical p-branes with a cosmological constant、Physical Review D、査読有、vol.82、2010、論文番号 046007、DOI: 10.1103/PhysRevD.82.046007
- ⑧ 太田信義、鳥居隆、Global Structure of Black Holes in String Theory with Gauss-Bonnet Correction in Various Dimensions、Progress of Theoretical Physics、査読有、vol.124、2010、207-225、DOI: 10.1143/PTP.124.207
- ⑨ R.-G. Cai, L.-M. Cao and N. Ohta、Notes on Entropy Force in General Spherically Symmetric Spacetimes、Physical Review D、査読有、vol.81、2010、論文番号 084012、DOI: 10.1103/PhysRevD.81.084012
- ⑩ R.-G. Cai, L.-M. Cao and N. Ohta、Friedmann Equations from Entropic Force、Physical Review D、査読有、vol.81、2010、論文番号 061501、DOI: 10.1103/PhysRevD.81.061501
- ⑪ 前田恵一、太田信義、分部亮、田邊誠、Supersymmetric Intersecting Branes on the Waves、Journal of High Energy Physics、査読有、vol.1004、2010、論文番号 013、DOI: 10.1007/JHEP04(2010)013
- ⑫ R.-G. Cai, L.-M. Cao and N. Ohta、Black Holes in Gravity with Conformal Anomaly and Logarithmic Term in Black Hole Entropy、Journal of High Energy Physics、査読有、vol.1004、2010、論文番号 082、DOI: 10.1007/JHEP04(2010)082
- ⑬ R.-G. Cai, L.-M. Cao and N. Ohta、Black Holes without Mass and Entropy in Lovelock Gravity、Physical Review D、査読有、vol.81、2010、論文番号 024018、DOI: 10.1103/PhysRevD.81.024018
- ⑭ R.-G. Cai, L.-M. Cao, Y.-P. Hu and N. Ohta、Generalized Misner-Sharp Energy in  $f(R)$  Gravity、Physical Review D、査読有、vol.80、2009、論文番号 104016、DOI: 10.1103/PhysRevD.80.104016
- ⑮ 前田恵一、太田信義、笹川幸則、Black Hole Solutions in String Theory with Gauss-Bonnet Curvature Correction、Physical Review D、査読有、vol.80、2009、論文番号 104032、DOI: 10.1103/PhysRevD.80.104032
- ⑯ 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions IV. Topological Black Holes with and without Cosmological Term、Progress of Theoretical Physics、査読有、vol.122、2009、1477 - 1500、DOI: 10.1143/PTP.122.1477
- ⑰ R.-G. Cai, L.-M. Cao and N. Ohta、Thermodynamics of Black Holes in Horava-Lifshitz Gravity、Physics Letters B、査読有、vol.679、2009、504-509、DOI: 10.1016/j.physletb.2009.07.075
- ⑱ R.-G. Cai, L.-M. Cao and N. Ohta、Topological Black Holes in Horava-Lifshitz Gravity、Physical Review D、査読有、vol.80、2009、論文番号 024003、DOI: 10.1103/PhysRevD.80.024003
- ⑲ 前田恵一、太田信義、鶴沢報仁、Dynamics of intersecting brane systems -- Classification and their applications --、Journal of High Energy Physics、査読有、vol.0906、2009、論文番号 051、DOI: 10.1088/1126-6708/2009/06/051
- ⑳ 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions III. Asymptotically AdS Black Holes with  $k=\pm 1$ 、Progress of Theoretical Physics、査読有、vol.121、2009、959 -- 981、DOI: 10.1143/PTP.121.959
- ㉑ 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions II. Asymptotically AdS Topological Black Holes、Progress of Theoretical Physics、査読有、vol.121、2009、253-271、DOI: 10.1143/PTP.121.253
- ㉒ 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions I. Asymptotically Flat Black Holes、Progress of Theoretical Physics、査読有、vol.121、2009、959 -- 981、DOI: 10.1143/PTP.121.959

[学会発表] (計 24 件)

- ① 太田信義、Unitarity versus renormalizability of higher derivative gravity、CQUEST Spring Workshop on Higher Spins and String Geometry、2012年3月29日、韓国、Sogang大
- ② 太田信義、Unitarity versus renormalizability of higher derivative gravity、Xth International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology、2011年12月20日、ベトナム、クイニョン

- ③ 太田信義、Dark Energy and QCD Ghost、2011 Shanghai Asia-Pacific School and Workshop on Gravitation、2011年2月13日、Shanghai Normal University
- ④ 太田信義、Axion and dark energy、International workshop 'Extra-Dimension Probe by Cosmophysics'、2010年11月11日、高エネルギー加速器研究機構
- ⑤ 太田信義、Time-dependent Supersymmetric Solutions, Cosmic Singularity and Emergence of Spacetime、QCG 2010 NIMS-APCTP-IEU Joint International workshop: String Theory and Cosmology、2010年9月30日、韓国大田
- ⑥ 太田信義、Accelerating cosmologies and inflation in string theories with higher order corrections、The 20th workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG20)、2010年9月21日、京都大学
- ⑦ 太田信義、Dilatonic Black Holes in String Theories with Gauss-Bonnet Correction and Their Physical Application、Summer Institute 2010、2010年8月9日、富士吉田市Fuji Calm
- ⑧ 太田信義、重力理論と熱力学、基礎物理学研究所研究会、2010年7月20日、京都大学
- ⑨ 鳥居隆、太田信義、Einstein-Gauss-Bonnet-dilaton 系におけるブラックホール解の大域的構造、日本物理学会、2010年3月20日、岡山大学
- ⑩ 笹川 幸則、前田恵一、太田信義、Asymptotically Linear Dilaton Black Hole Solution in Dilatonic Higher Curvature Gravity Theory、The Nineteenth Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan、2009年12月4日、立教大学
- ⑪ 前田恵一、太田信義、分部亮、Supersymmetric Intersecting Branes in time-dependent Backgrounds、The Nineteenth Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan、2009年12月2日、立教大学
- ⑫ 太田信義、鳥居隆、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions --Case with negative cosmological term--、京都大学基礎物理学研究所研究会、2009年7月7日、京都大学
- ⑬ 鳥居隆、太田信義、Black holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions II、日本物理学会、2009年3月29日、立教大学

- ⑭ 太田信義、Black Hole Solutions with Dilaton and Gauss-Bonnet term、基礎物理学研究所研究会、2008年10月20日、京都大学
- ⑮ 鳥居隆、太田信義、Black holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions、日本物理学会、2008年9月23日、山形大学
- ⑯ 太田信義、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions、Summer Institute 2008、2008年8月3日、人材開発センター富士研修所（富士吉田市）
- ⑰ 太田信義、Black Holes in the Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory in Various Dimensions、基研研究会「量子場理論と弦理論の発展」、2008年7月31日、京都大学

〔図書〕(計1件)

太田信義、Tomsk State Pedagogical University Press、Accelerating Cosmologies and Black Holes in Dilatonic Einstein-Gauss-Bonnet Theory、`The Problems of Modern Cosmology'、2009、233-244

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 信義 (OHTA NOBUYOSHI)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：90167304

### (2) 研究分担者 なし

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者 なし

( )

研究者番号：