

# 博士論文概要

## 論文題目

高次元重力理論とその宇宙論への応用  
A higher dimensional gravitational theory  
and its applications to cosmology

申請者	
奥山	直弥
Naoya	Okuyama

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

物理学及应用物理学専攻・宇宙物理学研究

今日の自然科学における最大の興味の1つとして、自然界に存在する4つの相互作用を1つの理論的枠組みによって統一的に説明しようとする問題が取り上げられている。このうち重力以外の3つの相互作用に対しては、 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ の対称性を持つゲージ理論として表される標準模型によって記述されることがわかっている。しかし重力をも取り入れた4つの相互作用を統一的に記述する理論は重力を古典的に記述する一般相対性理論に対して量子論の原理を取り入れると物理量に取り除くことの出来ない無限大が表れてしまうという理論的な困難により未だ完成していない。これに対し近年、この理論的困難を解決できる可能性を持つ理論として物質の基本要素である素粒子を点ではなく1次元の広がりを持つ弦として扱う超弦理論が提唱されている。超弦理論や超弦理論を統括するM理論は未だその理論的枠組みが完成していない理論であるが、もしこれらの理論が完成すれば素粒子のあらゆる性質が理解できる究極の物理理論になるであろうと期待されている。

超弦理論やM理論はその理論に当然要求される不変性が理論を量子化した際にも残ることを要請すると、弦の存在する時空は10次元や11次元でなくてはならないことが示される。これらの理論的な事実は、もし超弦理論やM理論が正しいとすると我々の住む世界は直接観測している4次元ではなくもっと高い次元の中に存在していなければならないということを示している。時空の次元が4次元より高いとすると、我々が普段感じている世界や我々の良く知っている通常4次元理論から再現されるNewton重力などの観測結果と一見矛盾するようにも思われるが、4次元以外の余剰次元への方向を観測不可能なほどに非常に狭い領域にコンパクト化して説明するKaluza-Klein理論や通常物質を構成する素粒子は高次元中の低次元膜に張り付いていると考えるブレーン理論などのメカニズムによって低エネルギー領域での4次元理論を再現できることが示されている。特にブレーン理論は超弦理論やM理論からもある程度自然に示唆され、重力のエネルギースケールとそれ以外の力のエネルギースケールの間にある大きな階層性についての問題をも解決する可能性を持っている。

以上により高次元時空は超弦理論やM理論などの統一理論から必然的に現れるものであると考えられる。高次元時空における重力は4次元時空におけるそれよりも多くの自由度を持っており、そのため4次元重力では見られなかった様々な性質を持つことがわかっており、高次元重力理論は近年活発に研究が行われている。高次元重力理論が注目を浴びている1つの動機としてAdS/CFT対応と呼ばれる話題がある。これは高次元漸近的AdS時空の古典場の理論とD-ブレーンと呼ばれるM理論の非摂動的対象上の共形場の理論との間にある種の対応関係が見られるという話題である。これにより、高次元重力理論はその巨視的な性質を持っていると考えられているブラックホールが持つ熱力学的な性質と重力の微視的な性質を含むD-ブレーンの構造に何らかの対応関係があると考えられている。この話

題により高次元ブラックホール解は量子重力理論に対する興味深い研究対象となっている。これらの背景を踏まえ、本論文では高次元の重力理論におけるブラックホール熱力学を解析することで量子重力理論や統一理論としての超弦理論や M 理論に何らかの知見を与えることを目指す。また、後述するように高次元ブラックホール解などの高次元における孤立系や擬孤立系はブレーン理論に基づくブレーン宇宙論にも大きな役割を果たしている。本論文では高次元における孤立系や擬孤立系のブレーン宇宙論に与える影響を調べ、宇宙論が未だ抱えている未解決問題に対する解決策を模索する。

高次元時空中におけるブラックホール解は、最も簡単な解として重力場以外の場が存在しない時空中における静的球対称ブラックホール解である Schwarzschild 解がある。しかし、統一理論の示唆によると高次元時空中には重力場以外にも様々な場が存在すると考えられている。特に、Yang-Mills 場として表わされる非可換ゲージ場は素粒子標準模型や大統一理論における力の記述において重要な役割を果たしているが、Kaluza-Klein 理論による時空のコンパクト化の際に必然的に導入される場でもある上、高次元中にある非可換ゲージ場はブレーン理論による低次元への還元の際により低い対称性を持つゲージ場へ自発的な対称性の破れを引き起こし、これによってブレーン理論が力の統一を説明できる可能性も示唆されている。以上の理由により高次元時空中には非可換ゲージ場が存在する可能性が考えられる。非可換ゲージ場を含む 4 次元重力理論においては時空全体で特異点を含まない粒子解や無毛仮説に対する反例となりうる様々な非可換ブラックホール解が発見されているが、本論文ではこれらの解を 5 次元時空に拡張し、これらの解はどのような時空構造となっているのかを考察した。その結果 5 次元時空中における粒子解や非可換ブラックホール解は 4 次元時空とは異なった性質を持つことを示した。特に時空の漸近構造からこれらの解は重力場の全エネルギーが発散する擬孤立系であることが示された。また、非可換ブラックホール解に対しては熱力学的法則が成り立つことが示された。また、これらの解は理論が負の宇宙項を持つときは安定な解が存在することが示された。

現在の宇宙論における標準的なモデルであるビッグバン模型においては未だ解決されていない問題が数多くある。宇宙の過去には必ず古典重力理論の破綻する特異点が存在してしまうという宇宙の初期特異点問題もその 1 つである。宇宙の初期特異点問題は量子重力理論によって解決されると期待されているが、量子重力理論自体が未だ完成されていない理論のため未だ完全な解決には至っていない。これに対して前述したブレーン宇宙論は低エネルギー領域では 4 次元理論を再現するが宇宙論などの高エネルギー領域においては高次元による効果が宇宙の進化に影響を及ぼすと考えられている。これらの効果はビッグバン模型が持つ初期特異点問題や宇宙項問題などの未解決問題を解決する可能性を持っている。P. Kraus はブレーン理論のモデルの 1 つである Randall-Sundrum 模型における宇宙

論を 5 次元 Schwarzschild-AdS 時空中の 4 次元ドメインウォールの運動として論じた。この結果、ドメインウォールの運動は宇宙の膨張を表す Friedmann 方程式を再現し、また補正項として物質場のエネルギー密度の 2 乗からなる項および余剰次元空間の幾何からなる暗黒輻射項が現れることを示した。しかし前述したように高次元時空中には重力場以外の様々な場が存在すると考えられているため、本論文では高次元時空を 5 次元 Schwarzschild-AdS 時空に制限しない一般的な 5 次元の孤立系または擬孤立系におけるドメインウォールの運動を定式化し、Friedmann 方程式を導出することで宇宙の進化が 5 次元バルクの時空構造からどのような影響を受けているかを考察した。その結果 Friedmann 方程式に表れる暗黒輻射項は 5 次元バルクの質量関数に依存して表れることが示された。さらに 5 次元バルクが時空点によって非自明な固有時間を持つ場合にはドメインウォール上の物質場のエネルギーは 5 次元バルクへ流出入し保存しないことが示された。また前述の 5 次元粒子解や非可換ブラックホール解を実際に 5 次元バルクに代入することによってブレーン宇宙論において初期特異点やバルク中の特異点の存在しない新しい宇宙の解が実現できることを示した。

本論文の構成を以下にまとめる。初めに第 1 章で本論文における研究の背景についての概略を述べた後、第 2 章において Kaluza-Klein 理論やブレーン理論によって高次元重力理論から 4 次元理論を再現する具体的なメカニズムについて紹介を行う。次に第 3 章において 5 次元における非可換ゲージ場を含む重力系である Einstein-Yang-Mills 系における粒子解および非可換ブラックホール解を導出し、その解の構造や安定性の解析を行う。次に第 4 章において初めに 5 次元時空が非自明な時空構造を持つときのブレーン宇宙論を解析した後、第 3 章で導出された粒子解や非可換ブラックホール解をこのブレーン宇宙論に応用し宇宙論を解析する。最後に第 5 章において本論文における研究で得られた結果を総括し、今後の研究への展望を述べる。

## 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>"Domain wall dynamics in brane world and non-singular cosmological models" N. Okuyama and K. Maeda Physical Review D 70, p.064030 2004年9月</p>
論文	<p>"A classification of spherically symmetric kinematic self-similar perfect-fluid solutions II" H. Maeda, T. Harada, H. Iguchi and N. Okuyama Progress of Theoretical Physics 110, p.25 2003年7月</p>
論文	<p>"Five-dimensional black hole and particle solution with a non-Abelian gauge field" N. Okuyama and K. Maeda Physical Review D 67, p.104012 2003年5月</p>
論文	<p>"A classification of spherically symmetric kinematic self-similar perfect-fluid solutions" H. Maeda, T. Harada, H. Iguchi and N. Okuyama Progress of Theoretical Physics 108, p.819 2002年11月</p>
論文	<p>"No go theorem for kinematic self-similarity with a polytropic equation of state" H. Maeda, T. Harada, H. Iguchi and N. Okuyama Physical Review D 66, p.027501 2002年7月</p>

# 研究業績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (学会)	"Asymptotic Structure and Conserved Quantities in Higher Order Gravitational Theories" 奥山直弥, 古賀潤一郎 日本物理学会 2004 年秋季大会, 高知大学 2004 年 9 月
講演 (国際会議)	"Asymptotic Structure and Conserved Quantities in Higher Order Gravitational Theories" N. Okuyama and J. Koga The 17th International Conference on General Relativity and Gravitation, Dublin 2004 年 7 月
講演 (研究会)	"Dynamics of Brane in 5-Dimensional Bulk and Non-singular Brane Cosmology" 奥山直弥, 前田恵一 第 13 回一般相対論と重力研究会, 大阪市立大学 2003 年 12 月
講演 (国際会議)	"Dynamics of Brane in 5-Dimensional Bulk and Non-singular Brane Cosmology" N. Okuyama and K. Maeda The 6th RESCEU International Symposium, Tokyo 2003 年 11 月
講演 (学会)	"5-dimensional black hole and particle solution with non-abelian gauge field" 奥山直弥, 前田恵一 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北学院大学 2003 年 3 月
講演 (国際会議)	"5-Dimensional Einstein-Yang-Mills System and Brane Cosmology" N. Okuyama and K. Maeda The XXIth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Florence 2002 年 12 月
講演 (学会)	"Dynamics of brane in bulk with gauge field" 奥山直弥, 前田恵一 日本物理学会第 57 回年次大会, 立命館大学 2002 年 3 月

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）