

早稲田大学大学院 理工学研究科

博士論文概要

論文題目

Some novel aspects of black holes in
higher dimensional theories of gravity

高次元重力理論に於けるブラックホールの新たな側面

申請者

野澤	真人
Masato	Nozawa

物理学及応用物理学専攻 宇宙物理学研究

2008年 5月

Einstein は等価原理と一般相対性原理に基づいて、Newton 重力の拡張として一般相対性理論を提唱した。時間と空間は 4 次元時空として統一的に記述され、時空のダイナミクスは Einstein 方程式を通じて物質と結びついている。太陽系近傍での観測事実は、一般相対性理論が重力理論としての地位を確立する大きな要因となった。一般相対論的効果が顕著に現れる対象としては、ブラックホールと呼ばれるコンパクト天体が挙げられる。ブラックホールは通常、重い星の進化の最終状態で自己重力によって崩壊し形成されると考えられており、強い重力場により光さえも抜け出せない領域である。現在では連星パルサーなどから多数の間接的観測証拠が確認されており、その存在が現実視されている。ブラックホールは我々が地上では到達できない強重力場での物理を検証するための最高の実験場であり、また重力波源の候補としても有力視されており、重力理論の検証という観点からも非常に重要な研究対象である(第 2 章)。

一方、近年では超弦理論などの素粒子統一理論に示唆され、10 次元や 11 次元などの高次元時空が考えられている。超弦理論には、弦のソリトン状態である D ブレーンと呼ばれる膜が存在するが、これを高次元時空に於けるブラックホールとして捉えることにより、ブラックホールエントロピーの起源の説明に一つの解答を与えることに成功し大きな注目を集めた。また、一方で以下に述べるブレーンワールドシナリオという立場からも、ブラックホールが盛んに研究されている。通常高次元の理論に於いては、我々の 4 次元時空を再現するため、余剰次元が Planck スケール程度に小さくなっているという仮定をするが、Arkani-Hamed らは、通常物質は我々の住んでいる 4 次元時空上に局在し、重力のみ余剰次元方向を伝播するという仮定のもと、余剰次元が 1mm 程度の大きさを持ちうるということを指摘した。この大きな余剰次元モデルは、重力の基本エネルギースケールを TeV 程度の電弱スケールにすることで、素粒子統一理論に於ける階層性問題に対する一つの解決を与える。また Randall と Sundrum は、高次元時空を曲げることで余剰次元が無限の大きさをもつようなブレーンワールドを提案した。これはコンパクト化に代わる機構として非常に興味深い。これらのブレーンワールドに於いては、高次元的な小さなブラックホールが TeV 程度の低エネルギーで生成する可能性があり、2008 年の LHC 加速器実験が大きな注目を浴びている(第 5 章)。もし加速器でブラックホールの形成、蒸発が確かめられれば、Hawking 輻射の実験的検証になるだけでなく、高次元時空の一つの証拠として統一理論に向けた大きな足がかりとなる。

しかし高次元ブラックホールの研究は浅く、それらが持つ性質については不明瞭な点が多い。超弦理論の進展や加速器実験での理論的考察には、高次元ブラックホールの理解が必要不可欠である。私は主に以下の 3 つのアプローチでその解析を行った。それぞれのテーマに於ける動機と研究結果を項別に述べていく。

[1] 真空ブラックホール解の構築及びその性質

加速器の中で生成されたブラックホールは一般に回転を伴っていると考えられ、余剰次元に比べて小さなスケールでは高次元の Einstein 方程式の解として記述されると期待される。高次元回転ブラックホール解は Myers と Perry によって発見され、任意に大きな角運動量を持ち得るなど 4 次元の Kerr 解にはない特徴を持っている。また、2002 年の Emparan と Reall による 5 次元ブラックリング解の発見は我々にとって新鮮な驚きであった。ブラックリングは高次元に於けるブラックホールの唯一性の破れを意味し、高次元時空の多様さ、複雑さを物語っており非常に興味深い(第 2 章)。これらが加速器の中で生成されれば Hawking 輻射と呼ばれる熱的輻射で特徴づけられると考えられるが、ブラックリングに関しては対称性の低さから量子化された場の方程式を解析するのは困難である。そこで我々は古典的なアプローチから、ブラックホールの回転を顕著に特徴づけるエルゴ領域に着目し、Penrose 過程と呼ばれるブラックホールからのエネルギー抽出機構を解析し、熱力学量が示す性質について議論した。その結果、高次元ブラックホール、ブラックリングにおける Penrose 過程の効率は際限なく大きくなりうるという結論を得た。4 次元 Kerr ブラックホールにおける Penrose 過程の効率は 20% 程度に過ぎないので、高次元ブラックホールは 4 次元 Kerr ブラックホールとは著しく違った振る舞い示すことがわかる。特に効率が上限なく増大する場合は、ブラックホールが限りなく大きな角運動量を持つ場合に相当し、高次元に特徴的な結果である。高次元と 4 次元での回転ブラックホールについて、定量的な違いを示した議論は、今回の我々の研究が先駆的であるといえる。

しかし、先に述べたブラックリング解は発見的な方法で見つかったもので、他にも多種多様なブラックホールが存在する可能性がある。そこで私は 4 次元時空で定式化されたソリトンの手法を応用し、解の構成を試みた(第 4 章)。その結果、閉じた時間的曲線が存在しないという状況下で平坦時空から連続的なソリトン変換でブラックリング解を構成することに成功した。今まで発見的な方法でしか得られなかったブラックリング解を系統的な手法で導出できたのは、我々の研究の大きな成果であるといえる。この手法は、5 次元時空でのブラックリング解の一意性問題や、複数のブラックホールの共存系を生成することにも大きな足がかりとなっており、この分野に於いて大きな貢献をしたと言える。

[2] ブレーンワールドブラックホール

Randall-Sundrum モデルに於いて、ブレーン上に局在したブラックホールの厳密解は現在のところ知られていない。ただし低次元の Toy モデルに限れば、ブレーンに局在化したブラックホール解が Emparan らによって発見されている。この解は非常に複雑な計量をしており、解析は十分になされておらず、安定性からブレーンがどのような影響をもたらすかについてまで不明瞭な点が多い。まず私は、

この解が代数的に特別なクラスに分類されることに着目し、その周りでのテスト場の振る舞いについて議論した(第6章)。特に共形不変な場に限れば運動方程式は Schrodinger 型の常微分方程式に帰着させることができ、ブラックホールは準固有振動と呼ばれる減衰振動モードを示すことがわかった。ブレーンの張力は角運動量を増幅させる方向に働き、準固有振動の実部を増幅させる。この性質は、他のブレーンモデルでもみられる傾向である。また、モード解析からこれらの場に不安定モードは存在しないこと、つまりこのブラックホールが安定であることを確認することができた。

[3] 動的ブラックホールと曲率高次項の影響

ブラックホール中心では一般に時空曲率が発散する特異点が発生することが知られているが、このような時空曲率が高いところでは、一般相対論のような古典理論よりも、超弦理論的效果を含んだ有効重力理論において記述されるべきであると考えられる(第7章)。私は、混成弦理論から導かれる Gauss-Bonnet 重力に於いて、時空に擬球対称性を課し、時空の局所的な一般的性質を議論した(第8章)。一般座標変換不変性を持つ重力理論に於いては、局所的なエネルギー密度というものは意味をなさないが、擬球対称性を持つ場合には、一般相対性理論のときと同じく局所的なエネルギー関数を与えることができる。私はこのエネルギー関数が、物質のエネルギー条件が満たされている状況下で、漸近値、単調性、正值性などの物理的に妥当な性質を持つことを示した。このようなエネルギー関数の存在は、擬球対称性を持つ時空がシンプレクティック構造を持つことに起因し、それらは擬球対称時空の持つ隠れた対称性に由来するものである。

また私は、ブラックホール形成と関連した捕捉地平線について、物質のエネルギー条件と擬球対称性の下での一般的性質について調べた(第9章)。捕捉地平線は曲率について2次の補正が加わっていることに由来し、一般相対論極限を持つ分岐と持たない分岐が存在する。一般相対論極限を持つ分岐に於いて捕捉地平線は、Penrose 不等式、符号則、面積則、動的ブラックホール熱力学第一、第二法則などを示すが、一般相対論極限を持たない分岐に関しては全く逆の振る舞いをする事が示された。これは一般相対論極限を持たない分岐に於いて、エネルギー条件の下で重力の収束性が破れるという大きな成果を得た。これまでの研究ではこの分岐がなぜこのような振る舞いをするのか明らかでなかったが、一般化された重力理論においてこれを明らかにしたのは我々の研究が初めてである。また中心特異点に関しては曲率高次項の影響を受け、奇数次元に特徴的な特異点が存在することを示した。これらの性質は加速器などの高エネルギー領実験により明らかになっていくであろう。

全体の結論は第10章にまとめた。

早稲田大学 博士（理学） 学位申請 研究業績書

氏名 野澤 真人 印

(2008年 4月 現在)

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○	Energy extraction from higher dimensional black holes and black rings. Physical Review D 71, 084028, (2005). 2005年4月 野澤真人、前田恵一
論文○	Effects of Lovelock terms on the final fate of gravitational collapse: analysis in dimensionally continued gravity. Classical and Quantum Gravity 23 1779 (2006). 2006年3月 野澤真人、前田秀基
論文○	Vacuum solutions of five-dimensional Einstein equations generated by inverse scattering method. II. Production of black ring solution. Physical Review D 73 124034 (2006) 2006年6月 富沢真也、野澤真人
論文○	Generalized Misner-Sharp quasi-local mass in Einstein-Gauss-Bonnet gravity. Physical Review D 77 064031 (2008) 2008年3月 前田秀基、野澤真人
論文○	Dynamical black holes with symmetry in Einstein-Gauss-Bonnet gravity Classical and Quantum Gravity 25 055009 (2008) 2008年3月 野澤真人、前田秀基
論文○	Bulk scalar emission from a rotating black hole pierced by a tense brane. Physical Review D 77 044022 (2008) 2008年2月 小林努、野澤真人、高水裕一
講演 (国際会議)	Energy extraction from five dimensional black holes and catastrophe theory Third Tai Poe School on Cosmology (Early Universe) and the Second Thai Phys Universe Symposium. 2004年10月, Khon Kaen University, Thailand
講演 (国際会議)	Naked singularity formation in higher curvature gravity The Third 21COE Symposium :Astrophysics as Interdisciplinary Science. 2005年9月 Waseda University, Japan
講演 (国際会議)	Gravitational collapse in higher curvature theory XXIII Spanish Relativity Meeting E.R.E. 2005. 2005年9月 Oviedo (Austrias) Spain
講演 (国際会議)	Quasi-local mass and dynamical black holes in Einstein-Gauss-Bonnet gravity VIII Asia-Pacific International Conference on Gravitation and Astrophysics. 2007年9月 Nara Women's University, Japan.

講演 (研究会)	Energy Extraction from Five Dimensional Black Holes and Catastrophe Theory The 14th Workshop on General Relativity and Gravitation 2004年11月 Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
講演 (研究会)	Effects of Lovelock terms on final fate of the gravitational collapse The 15th Workshop on General Relativity and Gravitation 2005年11月 Tokyo Institute of Technology
講演 (研究会)	Dynamical black holes in Einstein-Gauss-Bonnet gravity The 17th Workshop on General Relativity and Gravitation 2007年11月 Nagoya University
講演 (学会)	高次元ブラックホールおよびブラックリングからのエネルギー抽出 日本物理学会 2004年9月 高知大学 野澤真人、前田恵一
講演 (学会)	逆散乱法を用いたブラックリング解の構成 日本物理学会 2006年9月 奈良女子大学 野澤真人、富沢真也
講演 (学会)	Gauss-Bonnet 重力における準局所質量と動的ブラックホールの性質 日本物理学会 2007年9月 北海道大学 野澤真人、前田秀基