

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

# 博士論文審査報告書

## 論 文 題 目

超弦有効理論に基づくブラックホール時空の解析

Analysis of Black Hole Spacetimes  
in Effective Superstring Theory

申 請 者

笹川	幸則
Yukinori	Sasagawa

物理学及応用物理学専攻 宇宙物理学研究

2011年 3月

重力現象は、自然科学誕生以来最も基本的かつ重要な課題として研究されてきている。Newton は、地球上での落下現象と天体運動のメカニズムを万有引力の法則によって統一的に扱うことに成功し、近代物理学をスタートさせた。また、Einstein は相対性理論の提唱により、時間と空間の概念を根本的に変え、現代物理学の大きな柱を作り上げている。その一般相対性理論では、重力を幾何学的な対象としてとらえることで、時空が時間変化するダイナミカルな物理学的対象物であることを明らかにしている。これにより、宇宙を科学的に分析することのできる時空物理学が誕生した。このように重力現象の研究は物理学を大きく進展させる重要な役割を果たしてきている。現代においては、量子論との関連で重力の問題はミクロスケールに移っており、素粒子統一理論の中で重力を理解しようという試みが行われている。その中で特に有望視されているのが、超弦理論と呼ばれる素粒子統一理論の候補である。物質の基本構成単位を点粒子とするこれまでの考え方を変更し、基本単位を拡がりのある弦に拡張するアプローチで、素粒子物理学の多くの問題を解決すると期待されている。

もしこの超弦理論が本当に素粒子を統一する理論として正しいのであれば、重力に関しても正しい記述を与えるであろうから、一般相対性理論の諸問題も解決されることが期待される。一般相対性理論は、地上および太陽系での観測実験や連星パルサー観測による検証などから、その正しさは、90年以上を経過した現在ますますゆるぎのないものとなっている。しかしながら時空特異点などを伴う強重力現象においては、観測・実験はもちろん理論的にも明らかになっていない部分が多い。時空特異点は、Penrose-Hawking によって示されたように、一般相対性理論において強重力場では自然に形成される。しかし、時空特異点では一般相対性理論は破綻し予言性を失うため、それにとって代わる重力理論が必要となるが、その有力候補が超弦理論なのである。そこで、宇宙初期や一般相対性理論が予言したブラックホールなどの強重力現象を超弦理論によって解析することは、強重力現象の問題解決だけでなく、超弦理論の正しさを示すものにもなり、重要な研究となる。特に、ブラックホールは、地上では実現不可能な強重力場での物理現象を解析するための最良の実験場を与え、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。ブラックホールにおいて一般相対性理論が抱える具体的問題としては、Hawking により示されたブラックホール蒸発の最終状態の謎がある。蒸発の最終段階では、特異点の振る舞いを明らかにする必要があるため一般相対性理論の適用範囲外となり、量子重力理論が必要とされている。このような蒸発を伴うミクロスケールのブラックホールは、ブレーンワールドシナリオによる TeV 重力理論では現実的な問題となる可能性も指摘され、早急の解明が期待される。そのような背景のもとに、本研究で著者は、ブラックホールを超弦理論の有効作用を基礎に解析し、一般相対性理論が抱える問題解決に取り組んでいる。

超弦理論およびその有効理論に基づいたブラックホールの研究は、理論の提唱後すぐに開始され、解析的な解を含めこれまでも数多くの仕事が行われている。その研究において著者が特に注目したのは量子補正に伴う曲率高次項の振る舞いである。超弦理論によると量子効果は場の理論極限で曲率高次補正項として超重力理論に加わることが知られている。もし超弦理論が、特異点回避など理論として好ましい性質を持つのであれば、その振る舞いは場の理論極限の有効理論においても現れることが期待され、この量子補正項の効果を解析することは重要である。

曲率高次項を含む重力理論の研究は古く、Lovelock により 1976 年に提唱された Lovelock 重力理論までさかのぼる。Lovelock による作用は、場の方程式に計量の 2 階微分までの項のみを含む曲率テンソルの特殊な組合せとして構成された。Lovelock 重力理論は、4 次元時空では一般相対性理論と一致し、超弦理論などの高次元時空への最も自然な一般化となることから注目を集めている。超弦理論では、この曲率高次項は、ヘテロ型超弦理論では曲率 2 次の Gauss-Bonnet 項として現れ、一方、II 型超弦理論や M 理論などでは曲率 4 次の項から現れることが知られている。また超弦理論やその場の理論極限である超重力理論ではディラトン場も重要

な要素となる。このディラトン場のダイナミクスも系の振る舞いを大きく変えるため、その影響を考察することは超弦理論におけるブラックホール解の解析においては重要なポイントとなる。以上のことを踏まえて、著者は、本研究で超弦理論から予想されるこれらの項の効果を系統的に解析している。本論文は 7 章と 2 つの補遺から構成されている。以下に各章ごとにその概要と評価を述べる。

まず著者の研究の背景と動機が第 1 章にまとめられている。第 2 章では、ディラトン場や超弦理論由来の場を含む有効作用における様々なブラックホール時空や場を定義する系の変換などについて紹介している。第 3 章では、Lovelock 重力理論における静的ブラックホール解の基本的な性質や摂動安定性についてこれまでの研究をまとめている。そこで特に著者が注目したのは、十分小さいブラックホール時空が摂動に対して不安定になる事実で、後に議論する著者の導いた解の振る舞いと関係してくる。またこの章では、超弦理論の有効作用の一つとして知られている topological massive gravity 理論などの Lovelock 重力理論以外の曲率高次理論に関してコンパクトにまとめている。

第 4 章から第 6 章が著者による研究である。まず、II 型超弦理論および M 理論の量子補正項の最低次が曲率 4 次の項となることが知られており、それには Lovelock 重力項以外にも独立な曲率 4 次の項を含み、場の基礎方程式が高階微分になる。第 4 章で、著者はこの理論におけるブラックホール解の構成を試みている。著者は、計量が振動しながら漸近的に Schwarzschild 時空に近づく解を数値的に求めているが、残念ながら振動の減衰が遅いため漸近的平坦にならず、ブラックホールということはできない。但し、同じような振動は他の高階微分を含む他の重力理論でも見つかっており、理論そのものの問題、または補正項の入れ方が十分でないことが原因と考えられる。

そこで著者はそのような問題を生じないヘテロ型の超弦理論におけるブラックホール解の解析に取り組んだ。超弦理論の量子効果の計算は 2 つの系において行われている。一つはディラトン場が曲率を含むすべての項にかかるストリング系で計算する方法と、もう一つは、重力が Einstein-Hilbert 項になるように場を再定義した Einstein 系で計算する方法の 2 つである。これらから得られる曲率高次項はヘテロ型の場合どちらも Gauss-Bonnet 項を含むが、ディラトン場との結合の仕方が異なり、全く等価なものではない。これは場の再定義の自由度に伴う不定性と考えられる。従来は Einstein 系をもとに得られた結果を用いてブラックホール解を求める場合が多かった。しかし、超弦理論を基礎にするとストリング系で解析するのが自然と考えられ、場の再定義による不定性の影響を調べることは重要である。そこで著者は、この影響がどの程度のものであるのかをブラックホールの場合に解析している。具体的には、ストリング系と Einstein 系それぞれで定義された Gauss-Bonnet 項およびディラトン場を含む有効理論のもとでブラックホール解を求め、それぞれの解の物理的性質の違いを比較している。第 5 章では、漸近的平坦な球対称静的ブラックホール解を扱っている。定量的な違いだけでなく、解として許されるブラックホールの存在領域や熱力学的性質などで定性的な違いが存在することを明らかにした。特に、ストリング系ではブラックホールの地平線半径  $r_H$  には“跳び”があり、小さいブラックホールと大きいブラックホールの 2 つの解の系列が存在する。たとえば、5 次元時空では  $r_H \leq 0.647144\alpha_2^{1/2}$  および  $r_H \geq 2.55757\alpha_2^{1/2}$ 、10 次元時空では  $r_H \leq 0.827220\alpha_2^{1/2}$  および  $r_H \geq 2.20216\alpha_2^{1/2}$  となる。ここで  $\alpha_2$  は Gauss-Bonnet 項の結合定数である。このことと先に述べた Lovelock 重力理論に基づく理論で小さいブラックホール解が不安定になることを考え合わせると、ここで得られた小さいブラックホールの解の系列は安定でない可能性があり、ブラックホール最終状態に重要な示唆を与えるものと評価される。また、大きいブラックホールの解の系列では半径の下限付近において解の一意性がなくなり、質量の等しい 2 つの解が存在する。これらのうち、表面積つまりエントロピーの小さい方のブラックホールは不安定と考えられるが、これらの結果は現在の有効理論における解の多様性を示すものとして、興味深い。

第 6 章では上記と同じ有効作用のもとで漸近的に平坦でない時空、特に漸近的に Anti de Sitter (AdS) 時空

に近づく解について解析している。Maldacena によって提唱された AdS/CFT 対応は、AdS 時空のまわりの重力物理がその境界面における共型場の理論[Conformal Field Theory (CFT)]の物理と双対関係にあるという重要な対応関係で、AdS 時空は近年非常に注目されている。また、この対応によると漸近的に AdS 時空となるブラックホール時空は有限温度の CFT に対応することが示唆されており、漸近的に AdS 時空となるブラックホール解の解析も重要性を増している。そこで、著者は、本研究でまず、ストリング系の Gauss-Bonnet 項およびディラトン場を含む有効理論において、AdS 時空が厳密解になっていることを示している。宇宙項を含まない理論モデルで AdS 時空解の存在を示したケースは非常に少なく、それが超弦理論から導かれる自然な有効作用の場合に導かれているのは非常に興味深く、重要な結果と考えられる。また著者は、AdS 時空に漸近的に近づくブラックホール解を数値的に求め、その熱力学的な振る舞いを明らかにしている。これらの解は、Einstein-Gauss-Bonnet 重力理論における AdS 分岐のブラックホール解を、ディラトン場を含む場合に一般化したものである。これは、AdS/CFT 対応が正しいとすると、共形場理論における量子補正効果のこれまでの研究に対し、ディラトン場の影響を考慮する手がかりを与えるという意味でも重要である。さらに、上の解の構成過程で、著者はバウンズする宇宙論的な解や、地平線や特異点を含まない“粒子”解を得ることに成功し、それらを補遺として整理している。

第 7 章では、本研究で得られた成果についてまとめ、今後の展望について述べている。

以上が本論文の各章ごとの概要とその評価である。要約すると、本研究では、超弦理論の有効作用として曲率高次項およびディラトン場の強重力場における影響を静的球対称ブラックホールについて系統的に解析し、ミクروسケールにおけるブラックホール解の振る舞いに関して重要な知見を得ている。特に、Einstein 系とストリング系における場の再定義に伴う解の不定性に言及し、何が明確に結論できるかを示したのは重要である。また AdS 時空および漸近的 AdS ブラックホール解の存在を示し、AdS/CFT 対応の議論にも重要な一石を投じている。以上のように、本研究は、今後ますます重要となる超弦理論におけるブラックホール物理学の研究に大きな寄与をすると期待され、十分に意義深いものと評価される。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

2011年3月

審査員

主査

早稲田大学教授  
早稲田大学教授  
早稲田大学准教授  
近畿大学教授

理学博士(京都大学)  
博士(理学)東京大学  
博士(理学)広島大学  
理学博士(東京大学)

前田 恵一  
山田 章一  
安倍 博之  
太田 信義