

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03979

研究課題名(和文) ブラックホールの微視的構造と弦理論

研究課題名(英文) Microstructure of Black Holes and String Theory

研究代表者

重森 正樹 (Shigemori, Masaki)

名古屋大学・理学研究科(国際)・特任教授

研究者番号：60608256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：ブラックホールは巨視的にはほとんど持たないが、微視的には非自明な構造を持つ微視的状态から成るはずである。そのような微視的状态の中には、古典重力理論の滑らかで事象の地平面を持たない解として表される「幾何状態」が存在することが知られている。本研究では、弦理論に存在するブラックホールの微視的状态を表す様々な幾何状態を具体的に構成した。この幾何状態は「超層」と呼ばれ、これまでに構成された幾何状態の中で最も一般的なものである。本研究で構成された超層解は、ブラックホールの微視的物理を具体的に調べるための非常に有用な道具を提供する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブラックホールの微視的物理は現代物理学の未解明問題の1つであり、そのためには量子力学と一般相対性理論を統一する理論である弦理論が鍵である。本研究は、ブラックホールの微視的状态を、弦理論の低エネルギー極限である超重力理論を用いて具体的に構成しようというものである。具体的な微視的状态が得られれば、それを用いてブラックホールの微視的物理を具体的に調べるのが可能となり、未解明問題が解決できると期待される。また、近年、重力波の観測などによりブラックホールの直接観測が可能となった。ブラックホールの微視的理解は、観測可能な予言につながる可能性も秘めている。

研究成果の概要(英文)：Black holes are almost featureless macroscopically but, microscopically, they must be made of microstates with non-trivial structure. Some of such black-hole microstates are known to be described by “microstate geometries” -- smooth and horizonless solutions of classical gravity theory. In this research, we constructed various microstate geometries that describe microstates of black holes that appear in string theory. These microstate geometries are called “superstrata” and represent the most general class of microstate geometries ever constructed. The microstate geometries constructed in the current project provide indispensable tools that can be used to explore microscopic physics of black holes in a very concrete manner.

研究分野：素粒子理論

キーワード：ブラックホール 弦理論 微視的状态 重力理論

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) ブラックホールは我々の宇宙の至るところに存在し、その物理の理解は宇宙を理解するために重要である。ブラックホールの巨視的物理はよく理解されているが、一方、より基本的なブラックホールの微視的物理には未解明な点が多い。特に、ブラックホールはエントロピーを持つため、多数の微視的状態から成るアンサンブルであると考えられるが、その微視的状態がどのようなものであるのか良く分かっていない、というのは大きな問題である。ブラックホールの微視的状態の中には、古典重力理論の滑らかで事象の地平面 (ホライズン) を持たない解として表されるものが存在し、「幾何状態 (microstate geometry)」と呼ばれる。幾何状態はブラックホールの微視的物理を調べる上で重要な道具である。しかし、幾何状態によってブラックホールの全ての微視的状態が表されるのか否か、すなわちブラックホールは幾何状態からできていると考えられるのかはまだ明らかではない。

(2) 申請者は、弦理論における基本的なブラックホールである「D1-D5-P ブラックホール」の微視的状態を表す幾何状態のなかで、これまでで最も一般的である解、「超層解 (superstratum)」が存在することを予言し、特に、2変数の関数によってパラメトライズされる解を実際に構成してその存在を証明した。しかし、これらは超層の中でも一番単純な部類であると考えられる。もっと一般の超層解が存在すると予想され、それらを構成することはブラックホールの物理を理解するための喫緊の課題である。

### 2. 研究の目的

幾何状態はブラックホールの微視的物理を調べるための具体的手段を提供する。よって幾何状態をあらわに構成することはブラックホールの理解のために重要である。本研究の第1の目的は、応募者自身が構成に成功した「超層」と呼ばれる微視的状態を発展させることにより、ブラックホールのより一般的な微視的状態を幾何状態として構成することである。仮に、構成された幾何状態の数がブラックホールのエントロピーを再現するのに十分であったなら、それはブラックホールの微視的状態は一般に幾何状態で表されるということの意味し、ブラックホールの微視的物理の理解へ向けての大きな前進となると期待される。本研究の第2の目的は、構成された微視的状態を応用し、ブラックホールの微視的物理に関する未解明問題にも取り組むということである。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究は技術的にも概念的にも複雑な部分を含むため、研究協力者と共同して多角的なアプローチを採る必要がある。そのために重要となるのは、弦理論に存在する AdS/CFT 対応と呼ばれる双対性である。これは、アンチドジッター (AdS) 時空間内の量子重力理論 (= 弦理論) が或る種のゲージ場の理論 (共形場理論, CFT) と双対で等価であるという主張である。これによると、AdS 時空間内のブラックホールはゲージ場の理論における統計力学的アンサンブルに対応する。したがって、AdS/CFT 対応を用いれば、ブラックホールの物理を (A) AdS 時空間内の重力理論、および (B) ゲージ場の理論、の2つの視点から多角的・相補的に解析することができる。

本研究では、AdS/CFT 対応を利用して見通しの良い研究を行うために、主な研究対象を AdS 空間内における超対称ブラックホールに絞る。例えば、弦理論における代表的なブラックホール「D1-D5-P ブラックホール」は AdS/CFT 対応の枠内に入ることが知られており、AdS 側では3次元 AdS 時空と3次元球面の直積から成る6次元時空間における重力理論、CFT 側では「D1-D5 CFT」と呼ばれる CFT を調べれば良いことが分かっている。本研究ではそのような弦理論的・AdS/CFT 的な背景がよく理解されているブラックホールを扱う。

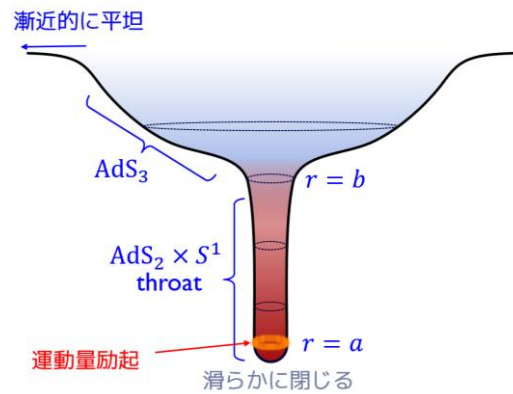
(2) 最初に構成された超層解は6次元超重力理論の厳密解であり、もっと一般の超層解も同様に6次元超重力理論の解として得られると考えられる。重力理論の運動方程式は2次の非線形偏微分方程式であり、その厳密解を見つけるのは技術的に難しい。しかし、超対称性を保つ解は1次の偏微分方程式 (BPS 方程式) を満たすことが知られており、その構成は非超対称な解よりも比較的簡単である。特に、申請者らは6次元超重力理論の超対称解を見つけるために BPS 方程式の線形性を利用する系統的な手法を既に開発しており、本研究ではその手法に基づき具体的な解の構成を行う。最初の超層解は、まず AdS 空間に微小な揺らぎを導入することにより線形な解を作り、次にそれを BPS 方程式の性質を利用して非線形な解に拡張するという方法 (“solution generating technique”) を用いて構成された。より一般の超層にも同じ方法を活用して解の具体的構成を行う。

(3) 超層解は D1-D5-P ブラックホールの微視的状態であるから、AdS/CFT 対応により、場の理論 (CFT) を用いて理解することが可能なはずである。D1-D5-P ブラックホールの場合、場の理論は「D1-D5 CFT」と呼ばれる共形場理論である。D1-D5 CFT は (moduli space のある点において) 自由場の理論であるため、そこでの微視的状態の構造の解析は簡単に行える。上記 (2) で述べた AdS 空間内での微小な揺らぎが、CFT 側でのどのような状態 (を構成する要素) に対応するかの AdS/CFT 対応の辞書が知られているので、それを用いて AdS 側での超層解の構成を見通しよく行うことができるはずである。CFT 側では状態は基本となる状態 (chiral primary 状態)

に様々な方法で励起する（技術的に言えば  $SL(2, R) \times SU(2)$  カレント代数の生成子を作用する）ことによって得られるが、その中には比較的単純なものだけではなく分数励起や高階励起と呼ばれるものが存在し、それらが AdS 側のどのような励起に対応するかがブラックホールの一般的な微視的状态を理解するために重要となると予想される。

#### 4. 研究成果

(1) 最初に構成された超層解を 3 変数の関数に拡張したクラスの中で、非常に興味深い解の例を具体的に構成した（右図）。これは以下のような顕著な性質を持つ初めての解である：(i) パラメータを調節することにより、近似的に 2 次元 AdS 空間からなる部分 (throat) をいくらでも伸ばすことができ、それにより通常のブラックホール解にいくらでも近づけることができる。(ii) 任意に小さな 5 次元角運動量を持つことができる。これは、10 年ほど前からあった技術的問題を克服するもので、多様なブラックホールの微視的状态の構成に道を拓くものである。(iii) 場の理論における双対な状態が正確に分かっている。これは超層解の量子的側面を理解するために有用である。(iv) 漸近的に平坦である。これは、解の物理的性質、例えば解にエネルギーを与えたときにそれがどのように放射されるかを調べる場合などに重要となってくるものである。(v) この解は、これまでに知られているブラックホールの微視的状态解よりもある意味数学的に単純である。例えば、その上での波動方程式は変数分離可能である。これは、この解を用いてブラックホールの物理を理解するために重要な利点である。実際、この解に基づいてブラックホールの物理的性質を調べる様々な研究が既に複数なされており (R2 年 6 月時点で関係論文の総被引用数 115)、本研究はブラックホールの微視的状态に関する世界的研究を活性化させるのに大いに役立っている。関連論文の 1 つは著名誌 *Physical Review Letters* に掲載され、さらに権威ある *Editor's Suggestion* に選ばれた。申請者は本研究に関連して複数の国際研究会において講演を行った。



新しい具体的な超層解の模式図

(2) これまでとは全く異なる新しいクラスの超層解 (“supercharged superstratum”) の構成に成功した。この解は、既存の超層解（以下、「古い解」と呼ぶ）に超対称性変換を 2 回作用させたものに先述の solution generating technique を応用して得られるもので、古い解よりも単純な形を持つ。そして、実は、この新しい解こそが数年来の技術的問題（複数の異なる波数を持つ超層解を重ね合わせた際に微分方程式が滑らかな解を持たないという問題）を解決するための鍵であることが明らかとなった。古い解は、新しい解と線形結合を取ることで一般化でき（ハイブリッド解）、その一般化された解はこの技術的問題を持たない。つまり、古い解は、滑らかな一般の解の特異的な極限であり、それだけを調べていても超層解の全体像はわからないということである。これは、超層解の表す微視的状态を理解するには、できるだけ一般的超層解を構成することが本質的に重要であることを示す重要な結果である。

この新しい解は、超層解の一般的な物理の研究に新しい道を開くと考えられる。また、既存の解に超対称性変換を作用させるという手法はさらに新しい別の方向へ超層解を拡張するのに役立つ。特に、これまでの超層解は簡単のために 4 次元基底空間として平坦な空間を使っていたが、これを平坦でないもっと一般のものにすることがこの手法により可能になると期待される。

(3) 上記 (2) の結果から、超層解をできるだけ一般化することが重力理論における超層解の全体像を理解するのに重要であることが分かった。6 次元超重力理論の超対称解は、数学的に、4 次元の基底空間上の 2 次元 Lorentzian ファイバーとして書かれる。これまで具体的に構成された超層解は 4 次元の基底空間を最も単純に平坦空間と仮定していたが、AdS/CFT 対応の辞書によると、一般的な超層解はこれがもっと一般の 4 次元空間（擬ハイパーケーラー空間）であることを許す。申請者は、平坦でない基底空間を持つ超層を構成する方法を調べ、特に、必要な微分方程式系を整備した。残念ながら、技術的困難のため、本研究の期間中には具体解な非線形解の構成には至らなかったが、この数学的枠組は今後の発展につながると期待される。

(5) AdS/CFT 対応と量子統計力学的方法を用いることにより、背景時空に非自明な 3 次元球面を 1 つだけ含む超層解の数を数え、そのエントロピーを評価することに成功した。これにより、この種の超層解は D1-D5-P ブラックホールのエントロピーを再現するにはその数がパラメトリックに足りないということが明らかとなった。これは、これまでに構成された超層解の限界を示すとともに、ブラックホールのエントロピーを再現するために超層解をどのように拡張するべきかを指し示すものである。特に、申請者は、超重力理論の枠内を超えて、本質的に弦理論的な励起（「マグノン」と呼ばれる）を含めなければならない可能性についても詳細な解析を行い、そのような弦理論的な励起の凝縮により、背景時空に複数の位相的に非自明な 3 次元球面が生

じる可能性を指摘した。そして、特に2つの球面を持つ超層解について予備的考察を行い、その具体的な構成のための枠組みを発展させた。残念ながら本研究の期間中にはこのような超層解の具体的な構成には至らなかったが、この理論的枠組は今後の発展につながると期待される。

(4) 基礎物理学研究所において国際研究会 YITP molecule-type workshop on “Recent Developments in Microstructures of Black Holes”を開催し、海外研究協力者を含む参加者とブラックホールの微視的物理学に関する活発な議論を行い、本研究を効率的に推進する助けとただけではなく、本研究の内容を日本のコミュニティに広く紹介することができた。

(5) 本プロジェクトにおける数年来の研究のまとめとして、超層解に関する招待レビュー論文 “Superstrata” を *General Relativity and Gravitation* 誌に寄稿した。これは超層解の基礎となる理論および超層解の具体的な構成法を AdS/CFT 対応の両面から解説するだけでなく、さらに近年の研究のレビューをも含むもので、当分野のことを学びたい研究者へのイントロダクションとなるものであり、分野のさらなる発展に大いに資するものである。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 N. Ceplak, R. Russo and M. Shigemori	4. 巻 1903
2. 論文標題 Supercharging Superstrata	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 95
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP03(2019)095	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 I. Bena, S. Giusto, E. J. Martinec, R. Russo, M. Shigemori, D. Turton and N. P. Warner	4. 巻 1802
2. 論文標題 Asymptotically-flat supergravity solutions deep inside the black-hole regime	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP02(2018)014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 J. J. Fernandez-Melgarejo, M. Park and M. Shigemori	4. 巻 1712
2. 論文標題 Non-Abelian Supertubes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP12(2017)103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 I. Bena, S. Giusto, E. J. Martinec, R. Russo, M. Shigemori, D. Turton and N. P. Warner	4. 巻 117
2. 論文標題 Smooth horizonless geometries deep inside the black-hole regime	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 201601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.117.201601	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 M. Shigemori	4. 巻 10
2. 論文標題 Counting superstrata	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2019)017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M. Shigemori	4. 巻 52
2. 論文標題 Superstrata	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 General Relativity and Gravitation	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10714-020-02698-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計14件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Supercharging superstrata
3. 学会等名 International Symposium RIKKYO MathPhys 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Black hole microstates
3. 学会等名 Particle theory seminars, KEK (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Black Hole Microstates
3. 学会等名 Sugawara Symposium on Fundamental Problems in Theoretical Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 The Black Hole Microstate Geometry Program
3. 学会等名 JGRG27 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Recent Developments in the Black Hole Microstate Geometry Program
3. 学会等名 Strings and Fields (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Non-Geometric Non-Abelian Supertubes
3. 学会等名 Recent Advances in T/U-dualities and Generalized Geometries (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Microscopic Holographic Dictionary for Black Holes
3. 学会等名 Quantum Gravity, String Theory and Holography (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Non-geometric non-Abelian supertubes
3. 学会等名 University of Rome Tor Vergata seminars (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Non-geometric non-Abelian supertubes
3. 学会等名 名古屋大学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Black Hole Microstates and String Theory
3. 学会等名 High Energy Physics Groups Colloquium, Vrije Universiteit Brussel (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年



1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 A new class of black hole microstate geometries
3. 学会等名 大阪市立大学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Counting superstrata
3. 学会等名 Workshop on Black Hole Microstates, CEA Saclay, France（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Black hole microstates
3. 学会等名 Workshop on recent developments in AdS/CFT, OIST, Okinawa, Japan（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaki Shigemori
2. 発表標題 Black hole microstates and superstrata
3. 学会等名 信州大学セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高柳 匡 (Takayanagi Tadashi)  (10432353)	京都大学・基礎物理学研究所・教授  (14301)	
研究協力者	ワーナー ニコラス (Warner Nicholas)		
研究協力者	ベナ ヨセフ (Bena Iosif)		
研究協力者	ルッソ ロドルフォ (Russo Rodolfo)		
研究協力者	ジュスト ステファノ (Giusto Stefano)		
研究協力者	マルティネック エミル (Martinec Emil)		
研究協力者	タートン デイヴィッド (Turton David)		