

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 5 月 18 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22740176

研究課題名（和文） 流体・重力双対性を用いたブラックホールダイナミクスの研究

研究課題名（英文） Study on black-hole dynamics via the fluid/gravity correspondence

研究代表者

宮本 雲平 (MIYAMOTO UMPEI)

立教大学・理学部・研究員

研究者番号：70386621

研究成果の概要（和文）：本研究は、流体とブラックホールの対応である「流体・重力対応」を用いて、流体力学を解析することでブラックホール動力学の理解を目指した。具体的な問題として、高次元ブラックホールの普遍的な不安定性（グレゴリー・ラフラーメ不安定性）について理解することを目指し、対応する流体の不安定性について幾つかの重要な結果を得た。まず、グレゴリー・ラフラーメ不安定性の流体対応物であるレイリー・プラトー不安定性の非線形ダイナミクスを追跡する強力な近似法を確立した。また、ブラックホールに対応する流体を解析し、新たな不安定性を発見した。この発見は、純粋に流体力学分野においても重要なものであり、同時に、同様な不安定性がブラックホールにも存在することを示唆している。本研究で得られた成果は、今後のブラックホール研究に対して一つの方向性を示し、重力理論の本質的理解に貢献したと言える。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to understand the dynamics of black holes via the fluid/gravity correspondence, being the duality between fluids and black holes. In particular, we focus our attention on the universal instability of higher dimensional black holes, the Gregory-Laflamme instability, about which we obtained several important results. We established an important approximation method to describe the dynamics of Rayleigh-Plateau instability, which is the fluid counterpart of the Gregory-Laflamme instability. In addition, we find a new instability of fluids that are dual to higher dimensional black holes. While this result suggests an unknown instability of black holes, it is interesting also from a pure fluid mechanics point of view. The results obtained in this project suggest us a direction of future black-hole study, and contribute to deep understanding of gravitational theories.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：数物系化学

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：相対論・重力（理論）

1. 研究開始当初の背景

理論物理学におけるブラックホール研究の

重要性は日に日に増している。中でも、AdS/CFT 双対性やブレーンワールドシナリオなどに後押しされ、高次元ブラックホールの

理解が最重要課題の一つになりつつある。高次元ブラックホールに顕著な点は不安定性の存在や解の唯一性の破れである。唯一性が存在しないことは、様々なブラックホール解の間で転移が起こることを示唆している。そこで個々の解の安定性や(解空間の)分岐構造を理解することが重要となる。

そのような高次元ブラックホールの性質-----不安定性・唯一性の破れ・分岐構造-----を研究する上で次の2つの系が重要とされている。一つは漸近的平坦(またはAdS)な回転ブラックホール系であり、ブラックホール解やブラックリング解の存在が知られている。もう一つは、空間次元が円周上にコンパクト化された空間における、Kaluza-Klein ブラックホールと呼ばれる一連のブラックホールである。この系では、円周上に巻き付いたブラックストリング解や円周上に巻き付いていないブラックホール解が知られている。これら二つの系はブラックホール相転移現象を理解する鍵を握っている。しかし、相転移の全貌はおろか、個々の解の安定性さえも十分理解されていない。確かなのは円周方向に並進対称性をもつブラックストリングが不安定なことだけである。

Gregory-Laflamme 不安定性はブラックリングや高速回転するブラックホールにも発生すると予想されている。従って、この不安定性を理解することが様々なブラックホール系を理解する上で重要となる。特に、この不安定性が時間発展の後どのような最終状態に落ち着くかは非常に興味深い問題である。GregoryとLaflammeは不安定性の成長によりホライズンがピンチし、幾つかのブラックホールに分裂するというシナリオを提唱している。しかし、未だかつてこの予想は誰にも証明・反証されていない。

2. 研究の目的

研究代表者は本プロジェクトの開始以前から様々なアプローチで Gregory-Laflamme 不安定性の研究に取り組んできた。例えば、Einstein 方程式の高次摂動論を展開し、Kaluza-Klein ブラックホールの相構造が著しく変化する臨界次元の存在を示した。また、流体・固体の不安定性として知られる Rayleigh-Plateau 不安定性と Gregory-Laflamme 不安定性の類似性を詳細に比較し、流体系にも Kaluza-Klein ブラックホール同様、臨界次元が存在することを示した。

上記の Gregory-Laflamme 不安定性と

Rayleigh-Plateau 不安定性の類似性の発見は示唆的であるが、理論的背景に乏しく単なるアナロジーであると言わざるを得ない。この欠点を補うため、研究代表者は AdS/CFT 双対性の一般化である流体・重力双対性の観点からこの問題に取り組んできた。その研究で臨界次元の存在を含め、Kaluza-Klein ブラックホールの相構造が双対な流体計算から再現された。本研究の目的はブラックホールと流体の双対性に関するこの研究をさらに発展させ、流体力学から高次元ブラックホールのダイナミクスを明らかにすることである。特に、Gregory-Laflamme 不安定性の最終状態(ピンチするか否かなど)の問題を最重要課題とする。

3. 研究の方法

本研究では重力に双対な流体のダイナミクスを調べることによりブラックホールダイナミクスの問題に取り組んだ。

AdS/CFT (ゲージ・重力) 双対性は有限温度の強結合ゲージ理論と AdS 時空におけるブラックホール熱力学との対応である。本研究で用いられた流体・重力双対性の方法は AdS/CFT 双対性の一般化であり、場の理論の長波長近似としてのプラズマ流体と AdS ブラックホールの対応である。より正確には、負の宇宙項をもつ Einstein 方程式が AdS 境界上では共形流体に対する Navier-Stokes 方程式に対応することが示されている。さらに、適当な次元のコンパクト化によって流体側(重力側)に閉じ込め・非閉じ込め相転移(Hawking-Page 相転移)を導入することができる。この枠組みを用いることにより、AdS バルクに局在したブラックホールを(非閉じ込め相にある)プラズマ流体の双対として記述できる。また、流体の状態方程式は AdS/CFT 双対性の手法を使って重力側から一意に与えられる。

従って、問題は適当な表面項(閉じ込め相と非閉じ込め相を分離する役割を担う)をもつ Navier-Stokes 方程式を与えられた状態方程式と対称性の下で解くことに帰着される。

初年度は Gregory-Laflamme 不安定性の最終状態を明らかにするべく、流体に発生する Rayleigh-Plateau 不安定性を詳細に調べた。また、流体のダイナミクスを通して、ブラックホールの非平衡熱力学に関する考察も行った。

本研究は R. Emparan 教授(Barcelona 大学)との共同研究であった。定式化などを Emparan 教授と共同で行った。Emparan 教授

は 2001 年 H. S. Reall 氏と共にブラックリング解を発見し、高次元ブラックホール研究の新たな道を切り開いた当該分野のエキスパートである。ごく最近では流体・重力双対性に関する研究も行っており、漸近的平坦時空における流体・重力双対性の可能性など重要な業績を残している。研究代表者は Emparan 教授と幾度となく議論を交わした。研究期間を通して Emparan 教授から理論面で多くの支援を得た。研究打合せのためにスペインを訪れた。また、研究代表者がイスラエルに滞在中 (2007-2009) 受け入れ教員であった B. Kol 教授 (Hebrew 大学) は Kaluza-Klein ブラックホール研究の第一人者であり、Kol 教授からも理論面で多くの支援を得ることができた。

研究目的でブラックリングにも Gregory-Laflamme 不安定性が存在する可能性に触れた。ブラックリングは、ある極限でブーストされたブラックストリングと見なすことが可能であり、双対的には速度のある流体に対応する。従って、回転ブラックホール系の相構造を調べるため、速度のある流体の平衡状態の研究にも取り組んだ。この解析は Rayleigh-Plateau 不安定性の最終状態を調べる際の基礎となるだけでなく、回転ブラックホールの新しい解の発見に繋がる可能性がある。

英国の Durham 大学と Cambridge 大学には当該分野をリードする研究者が所属する (M. Rangamani, V. E. Hubney, R. Gregory, O. J. C. Dias)。従って、共同研究の開拓と議論のため英国を訪れた。

4. 研究成果

平成 22 年度は主に、Gregory-Laflamme 不安定性の双対現象である Rayleigh-Plateau 不安定性のダイナミクスを記述する方法を探したが、その結果、Rayleigh-Plateau 不安定性のダイナミクスを非線形領域まで追うことができる強力な近似法を確立することに成功した。また、その方法を用いて、ブラックストリングがピンチする時に見せる、自己相似的な振る舞いを予言することに成功した。その予言は、期間中に他グループによって報告された高次元ブラックホールの数値シミュレーションで再現されており、思いがけない形で、本研究における手法の正しさが裏付けされる形になった。

上記の成果に関しては、論文としての発表はもちろん、Barcelona 大学や Imperial College London における国際研究家 Black holes and higher dimensions における招待講演というかたちで報告された。また、日本

物理学会誌において、流体重力対応と高次元ブラックホール研究に関するレビュー記事の執筆をおこない、そこでも上記の結果に関して報告した。

平成 23 年度は主に、高次元ブラックホールに特徴的な不安定性とそれに伴うダイナミクスについて知る為、双対な流体である表面張力で支えられた液柱の不安定性について考察した。上記の枠組みで考察するには、表面張力で支えられた圧縮性流体の性質を知る必要がある。勿論、類似した研究は長い歴史を持つが、表面張力と圧縮率を同時に考慮した本格的考察は本研究で初めて行われた。結果として、ある臨界半径より小さい液滴・液柱が不安定であるという驚くべき結果を得た。この結果は、純粋な流体力学的立場からも十分に興味深い。また、重力の言葉に翻訳した際、小さいブラックホールの未知の不安定性を意味するか近日中に結論付けられると考えている。ブラックホール研究の過程で、流体分野において長く見落とされてきた系 (圧縮する液滴・液柱) の重要性が再発見されたことは非常に興味深い。また、本成果は今後の流体・重力対応を用いたブラックホール研究への重要なステップになることは間違いない。現在、これらの結果を応用したブラックホール物理学への示唆について論文を執筆中である。

上記の結果は流体力学分野において最も権威ある雑誌 Journal of Fluid Mechanics (Cambridge University Press) に掲載が決定しており、いくつかの研究会においても既に報告されている。また、本成果の発表を機に京都大学数理解析研究所におこなわれた乱流に関する研究集会へ招待され、流体重力対応や自身の研究成果についてレビュー講演を行った。

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 7 件)

- ① U. Miyamoto, S. Yahikozawa, “Information metric from a linear sigma model,” Physical Review E へ掲載決定、査読有
- ② U. Miyamoto, “Instability of Compressible Drops and Jets,” Journal of Fluid Mechanics に掲載決定、査読有
- ③ U. Miyamoto, H. Nemoto, M. Shimano, “Naked singularity explosion in

- higher dimensions,” Phys. Rev. D 84 (2011) 064045, 1-9、査読有
- ④ 宮本雲平、流体力学で高次元ブラックホールを理解する、日本物理学会誌、2011年8月号(66巻)、610-614、査読なし
- ⑤ U. Miyamoto, H. Nemoto, M. Shimano, “Particle Creation by Naked Singularities in Higher Dimensions,” Phys. Rev. D 83, 084054 (2011) 1-8、査読有
- ⑥ K. Nakao, T. Harada, U. Miyamoto, “Visible borders of spacetime generated by high-energy collisions,” Phys. Rev. D 82, 121501 (2010) 1-4、査読有
- ⑦ U. Miyamoto, “One-Dimensional Approximation of Viscous Flows,” Journal of High Energy Physics 1010, 011 (2010), 1-18、査読有
- [学会発表] (計7件)
- ① 宮本雲平、圧縮性を考慮した液滴・液柱の振動・不安定性、日本物理学会年次大会、関西学院、2012年3月25日
- ② 宮本雲平、流体力学とブラックホールの間に見られる類似性・双対性、乱流の普遍性と個別性：流体乱流を通して宇宙を見る、京都大学数理解析研究所、2012年1月12日
- ③ 宮本雲平、液滴・液中の不安定性、第13回特異点研究会、国立天文台、2011年12月24日
- ④ U. Miyamoto, Astrophysical Censorship, The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan, 27 Sep 2011, Tohoku Univ, Sendai
- ⑤ U. Miyamoto, One-dimensional approximation of viscous flows, The Physical Society of Japan annual meeting in spring, 27 March 2011, Niigata
- ⑥ U. Miyamoto, On Hydrodynamic Description of Black-String Instability, Black holes and higher dimensions, 21 Sep 2010, Imperial College London

- ⑦ U. Miyamoto, Cosmic Censorship in High-Energy Collision, Spanish Relativity Meeting 2010, 6 Sep 2010, Granada, Spain

[図書] (計1件)

- ① 小西琢磨、宮本雲平、富田智、『宇宙と量子論』、全223頁のうち179-219頁を担当、PHP研究所、2010年5月

[その他]
ホームページ等

<http://www2.rikkyo.ac.jp/web/umpei>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮本 雲平 (MIYAMOTO UMPEI)
立教大学・理学部・研究員
研究者番号：70386621

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし