

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03652

研究課題名（和文）黒様体法を用いた高次元ブラックホールの流体力学的解析

研究課題名（英文）Fluid mechanical study of higher dimensional black holes using the blackfold approach

研究代表者

宮本 雲平（Miyamoto, Umpei）

秋田県立大学・総合科学教育研究センター・准教授

研究者番号：70386621

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子統一理論や高次元宇宙モデルを構築するにあたり高次元ブラック・ホールは中心的役割を果たす。本研究では、流体力学と一般相対論の対応を用いて高次元ブラック・ホールの性質を明らかにすることに取り組んだ。主な成果として、超平面に囲まれた表面張力で囲まれた流体の安定性・不安定性を明らかにし、ブラックホール物理への重要な示唆を得た。また、ブラックホールとワームホールに関する量子効果についても解析を進め、ブラックホールの影に関する研究も行なった。極大次元理論において、ブラックホールのダイナミクスが拡散型流体方程式系として記述されることを用いて、ブラックホールの乱流現象の考察を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子統一理論や高次元宇宙モデルを構築するにあたり高次元ブラック・ホールは中心的役割を果たす。しかし、一般に高次元重力は4次元のそれよりも強く、自由度も多いため、数値的アプローチをとったとしても解析は困難を伴う。このような困難を流体力学的手法を取り入れることで回避し、非線形な領域における高次元ブラックホールの性質を準解析的に評価した点に学術的意義があると思われる。昨今、理論の成熟と観測技術の向上により相対論研究は再び黄金期に入ったと言われるが、本研究の成果は一般相対論のそのような進歩を支えるものである。

研究成果の概要（英文）：High-dimensional black holes play a central role in the construction of a unified theory of elementary particles and higher-dimensional cosmological models. In this study, we have attempted to clarify the properties of higher-dimensional black holes using the correspondence between fluid mechanics and general relativity. As a major result, we clarified the stability and instability of a fluid surrounded by a hyperplane with surface tension, and obtained important implications for black hole physics. He also analyzed quantum effects on black holes and wormholes, and studied the shadows of black holes. In the theory of maximum dimension, the dynamics of a black hole is described as a system of diffusion-type fluid equations, and turbulent phenomena in a black hole are discussed.

研究分野：一般相対性理論

キーワード：ブラックホール 高次元時空 流体力学 不安定性

1. 研究開始当初の背景

素粒子統一理論や高次元宇宙モデルを構築するにあたり高次元ブラック・ホールは中心的役割を果たす。また、高次元重力の解析により場の理論を理解する枠組みにおいても、高次元ブラック・ホールは重要である。しかし、一般に高次元時空の重力は4次元のそれよりも強く、自由度も多いため、数値的アプローチをとったとしても解析は困難を伴う。

高次元ブラック・ホール研究において核心となる問いが、「動的不安定性の最終状態は何か？」というものである。何故なら、動的不安定性は多種多様な高次元ブラック・ホールに発生することが知られており、ブラック・ホールどうしの転移やブラック・ホール解の分岐構造を理解するうえで、詳細な理解が必須となるからである。

ここ10年ほどの間に高次元ブラック・ホールを解析するさまざまな近似法が開発されている。なかでも、流体・重力対応や黒様体法と呼ばれる手法を用いて、ブラック・ホールの運動方程式であるアインシュタイン方程式が、相対論的ナビエ・ストークス方程式と等価であることが示されており、注目を集めている。

実際に申請者も、流体の振る舞いから高次元ブラック・ホール解の分岐構造を明らかにするなど、いくつかの成果を得ている。しかし、流体・重力対応や黒様体法が本領を發揮するのは、動的不安定性のようなダイナミカルな問題に適用されたときである。それにも関わらず、その方面への応用はほとんどなされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、黒様体法を用いてブラック・ホール不安定性の最期を明らかにすることである。ここで、「明らかにする」とは次のような点を解明することである。不安定なブラックホールは有限時間内にピンチするのか？；ピンチするとしたらどのようにするのか？；ピンチするとしたら宇宙検閲官仮説は破れるのか？ これらを明らかにすることで、不安定性の発見から四半世紀続いた論争に決着が付く。

3. 研究の方法

本研究では黒様体法を用いてブラック・ホールの運動を調べる。すなわち、ブラック・ホールの運動をアインシュタイン方程式の直接積分ではなく、流体を解析することで理解する。

これまでは、流体・重力対応や黒様体法が「流体を知るためにブラック・ホールを調べる」ことに用いられ、「ブラック・ホールを知るために流体を調べる」ことに用いられてこなかった。また、最終目的までに用意される課題のそれぞれが流体力学において意義深い問題となっており、豊富な副産物も期待できる。

黒様体法によって、高次元ブラック・ホールが特殊な状態方程式をもったナビエ・ストークス方程式で記述されるはずである。さらに、申請者の予備的解析により、流体の方程式は「表面張力で支えられた流体の軸対称な流れに関する方程式」と似た構造を持つ。非相対論的非圧縮性流体に関しては、ジェットのピンチがある対称性を持つ解で記述されることが示されている。このことから、申請者は高次元ブラック・ホールのピンチも同種の解で記述されると予想している。

4. 研究成果

初年度においては、ブラック・ホール流体の静的安定性を明らかにするという課題に取り組んだ。具体的には、表面張力で支えられた流体の安定性という問題を微分幾何学における平均曲率一定面の安定性という変分問題に落とし込み、変分法・微分方程式論などを駆使して、安定性解析を行った。結果として、数学的に安定性・不安定性を分類することに成功した。また、動的な不安定性に関する問題に対して、既存の流体解析の定式化をターゲットとする流体に拡張する作業を行った。さらに、本研究に相補的な役割を果たす4次元ブラックホールやワームホールに関する量子効果についても解析を進め論文を発表した。

2年目は、非相対論的非圧縮性流体に対する解析を拡張することを試みた。その結果、流体のダイナミクスにおいて適当な変数の導入や対称性を課すことで、運動方程式が簡便な微分方程式系に書き換えられることが明らかになった。また、解析の結果として、流体の状態方程式によつ

ては、解に物理的意味をもたせるのが難しい場合があることなど、根本的な問題も炙り出された。

3年目は不安定性に対応する流体解を同定し、ピンチに相当する解を数値的に探す作業を行った。また、関連する研究として極大次元一般相対論において、ブラックブレーンのダイナミクスが拡散型流体方程式系として記述されることを用いて、ブラックブレーンにける乱流現象の考察を行った。その他、付随するブラックホールに関する基礎研究として、ブラックホール近傍から発せられた粒子の脱出確率の問題、および、高次元静的流体の安定性の分類の研究などを行った。

4年目は、相対論的流体の解を数値的に求めることに取り組み、一定の成果を得ることができた。考えている重力系における解の存在について幾つかコンセプチュアルな問題も生じた。また、上記問題と深いかわりのある任意次元における軸対称流体の静的解について、解の分岐構造を分類する問題に取り組み包括的な理解に達することができた。

最終年度（延長した2022年度も含む）は、不安定性の最終状態を決定するのに不可欠である、表面張力で支えられた高次元流体の安定性についての考察を行った。主な成果として任意次元において超平面に囲まれた表面張力で囲まれた流体の安定性・不安定性を明らかにした。また、ブラックホールの影に関する研究も行なった。ブラックホールの影は観測的な重要性を持つだけでなく、強い重力場での物質の振る舞いを理解する上でも大切である。主な成果として、ブラックホールの周りに降着円盤と呼ばれる物質がある場合、影の形状から一意的に系のパラメータ（質量・距離・傾き）を決定できることを証明した。これら研究は微分積分・ベクトル解析・微分方程式など様々な数学を駆使して行う研究である。それらの手法について基礎的事項まとめ、学生・研究者が利活用できるように書籍および啓蒙記事の執筆にも取り組んだ。研究期間全体を通して、高次元ブラックホールと流体の安定性に関する考察し、両者には強い類似性・相関があることがわかってきた。また、不安定性の最終状態について宇宙検閲官仮説に関する考察が本質的であることも判明しつつある。

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 0件／うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Kota Ogasawara, Takahisa Igata, Tomohiro Harada, Umpei Miyamoto | 4. 巻 101 |
| 2. 論文標題 Escape probability of a photon emitted near the black hole horizon | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 11 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.101.044023 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Sotani Hajime, Miyamoto Umpei | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Systematical study of pulsar light curves with special relativistic effects | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 14 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.98.103019 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Sotani Hajime, Miyamoto Umpei | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Pulse profiles of highly compact pulsars in general relativity | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 12 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.98.044017 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Miyamoto Umpei | 4. 巻 99 |
| 2. 論文標題 Explosive particle creation by instantaneous change of boundary conditions | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 20 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.99.025012 | 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 Koiso Miyuki, Miyamoto Umpei | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 Stability of hypersurfaces of constant mean curvature with free boundary in two parallel hyperplanes | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 JSIAM Letters | 6. 最初と最後の頁 9~12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14495/jsiaml.15.9 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 Hioki Kenta, Miyamoto Umpei | 4. 巻 107 |
| 2. 論文標題 Determining parameters of a spherical black hole with a thin accretion disk by observing its shadow | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review D | 6. 最初と最後の頁 1, 15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.044042 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Umpei Miyamoto |
| 2. 発表標題 Determining parameters of a black-hole accretion-disk system by observing the shadow |
| 3. 学会等名 The 31th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 小磯深幸, 宮本雲平 |
| 2. 発表標題 2つの互いに平行な超曲面上に自由境界を持つ平均曲率一定超曲面の安定性 |
| 3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Umpei Miyamoto |
| 2. 発表標題 Dynamical aspects of cylindrical objects in (non-)gravitational physics |
| 3. 学会等名 General Relativity and Partial Differential Equation (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 宮本雲平 |
| 2. 発表標題 平均曲率一定超曲面とブラックストリングの不安定性 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Umpei Miyamoto |
| 2. 発表標題 Stability of black strings and liquid bridges |
| 3. 学会等名 The 29th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Umpei Miyamoto |
| 2. 発表標題 Black hole and fluid: Analogy and duality |
| 3. 学会等名 Partial Differential Equation and General Relativity (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 宮本雲平 |
| 2. 発表標題 高次元における平均曲率一定面とブラックホールの安定性 |
| 3. 学会等名 第 20 回「特異点と時空、および関連する物理」研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Umpei Miyamoto |
| 2. 発表標題 Non-linear perturbation of black branes at large D |
| 3. 学会等名 The 15th Marcel Grossmann Meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Umpei Miyamoto |
| 2. 発表標題 Non-linear perturbation of black branes at large D |
| 3. 学会等名 The 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計2件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 安東正樹、白水徹也、浅田秀樹、石橋明浩、小林努、真貝寿明、早田次郎、谷口敬介 | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 朝倉書店 | 5. 総ページ数 432 |
| 3. 書名 相対論と宇宙の事典 | |

| | |
|--------------------|-----------------|
| 1. 著者名 宮本 雲平 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 共立出版 | 5. 総ページ数 272 |
| 3. 書名 微分積分とその応用 | |

〔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 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|