

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05452

研究課題名（和文）新しいトポロジカルブラックホール解の構成とその安定性解析

研究課題名（英文）The construction of new topological black hole solutions and its stability analysis

研究代表者

富沢 真也 (Tomizawa, Shinya)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：20624042

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：近年、ブレンワールドや AdS/CFT 対応の登場によって、時空次元が4よりも大きな高次元ブラックホールは、現代物理学において重要な地位を築きつつある。4次元時空の場合とは異なり、高次元ブラックホールは球形以外にも様々な形状が許される。本研究では、5次元アインシュタイン方程式の解として、レンズ空間とよばれるトポロジーのいくつかのブラックホール解を構成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

全ての高次元ブラックホール解を発見するということは、ブラックホールに関する現象のモデルを全て数え上げることである。また、新たなブラックホール解を見つけることは、物理現象に新たな予言を与える。したがって、本研究は、ブラックホール物理学の先駆けとなる本質的な研究となるだけでなく、AdS/CFT 対応を通して、超弦理論や物性物理学の分野にも応用できるため、物理学におけるその意義は計り知れない。

研究成果の概要（英文）：By the recent appearance of the brane world and AdS/CFT, black holes in more than four dimensions have been playing an important role in modern physics. Such higher dimensional black holes can have various shapes as well as a sphere. In a series of our works, we have constructed several types of black hole solutions with so-called lens space topologies to the five-dimensional Einstein equations.

研究分野：一般相対性理論

キーワード：高次元ブラックホール トポロジー レンズ空間 逆散乱法 ソリトン

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

4次元の真空な定常時空においては、球面のトポロジーをもつ回転ブラックホールを記述する解は、質量と角運動量というパラメーターだけで特徴付けられる「カーブラックホール解」が唯一の解であることが証明されたのである。これはブラックホールの「一意性定理」と呼ばれ、4次元の一般相対性理論の最も大きな成果の一つといえよう。しかしながら、5次元(以上)の高次元理論では、許されるブラックホールのトポロジーは球面一つだけではない。例えば、5次元理論へ一般化されたトポロジー定理は、球面 S^3 、リング形状 $S^1 \times S^2$ 、レンズ空間 $L(p, q)$ の3つのトポロジーを許容する。ここで、レンズ空間とは、球面 S^3 に作用する(不動点を持たない)離散群の軌道空間として数学的には定義される。実際に、5次元時空の漸近平坦な真空解として、同じ質量と角運動量を持つが、トポロジーの異なる2つの解、球面 S^3 形状の「ブラックホール解」とリング形状 $S^1 \times S^2$ の「ブラックリング解」が、逆散乱法などのソリトンの手法を用いて導出されたのである。

このように4次元の場合とは異なり、高次元ブラックホール解は、唯一つではないことが明らかにされたため、他にも未知の定常ブラックホール解が存在するであろうと多くの研究者によって考えられている。特に、5次元の理論では、これまでに、多くの相対論研究者によって、漸近平坦な真空解として、レンズ空間 $L(p, q)$ のトポロジーを持つブラックホール解(ブラックレンズ解)を求めようという試みは幾つかあったが、求めた解は全て特異になってしまい、現時点で成功には至っていない。

2. 研究の目的

もし、そのような条件を満たすパラメーターが存在しない場合、これまでに求められた(正則でない)静的ブラックレンズ解に摂動を与え、その解の周辺に2つの条件を満たす摂動ブラックレンズ解が存在するかどうかを調べる。最近、Bossard 達によって、ブラックホールのトポロジーと無限遠のトポロジーを関係付け「NUT 電荷保存則」が考案された。この「NUT 電荷保存則」は、本来、4次元時空に適用されるものであるが、これまで高次元ブラックホールに適用された例があまりない。正則な5次元ブラックホールは、この「NUT 電荷保存則」を満たす必要があることを申請者は証明した。本研究では、逆散乱法を用いて、5次元アインシュタイン方程式の漸近平坦な真空解として、「NUT 電荷保存則」を満たすようにブラックレンズ解を構成する。

3. 研究の方法

Bossard 達が考案した「NUT 電荷」(Bossard, Nicolai and Stelle, General Relativity and Gravity, 41, 1367 (2009))は、ブラックホールのトポロジーを特徴づける。例えば、球面(S^3)、リング形状($S^1 \times S^2$)、レンズ空間($L(2, 1)$)のNUT電荷は、それぞれ、 ± 1 、 0 、 ± 2 である。また、時空に、“U(1)対称性の固定点”が存在する場合、この固定点もNUT電荷を荷なっている。先述の「NUT電荷保存則」とは、漸近平坦な時空では、ブラックホールのNUT電荷と固定点のNUT電荷の総和が1でなければならない、というものだ。例えば、NUT電荷が2である $L(2, 1)$ トポロジーのブラックレンズは、その外側に、NUT電荷が-1である固定点を持たなければならないということだ。これまでに、多くの研究者がブラックレンズ解の構成を試みたにも関わらず、(全て特異な解になり)失敗している大きな要因は、「NUT電荷保存則」を満たすように解が構成されていないからであると思われる。最近、申請者は、真空解ではないが、NUT電荷保存則を満たす正則な超対称ブラックレンズ解(質量と電荷が等しい特殊解)の構成に成功した。前研究で、逆散乱法で生成される5次元アインシュタイン方程式の真空解の系列を導出した。しかし、一般に逆散乱法で生成されるブラックホール解は、漸近平坦性やNUT電荷保存則を満たすことが保証されていない。得られた解が、この2つの条件を満たすために解に含まれるパラメーターをどのように選ばば良いかを調べる。

4. 研究成果

(1) 5次元時空のブラックホールは、ホライズンのトポロジーと無限遠のトポロジーを関係付けるNUT電荷保存則を満たす必要がある。逆散乱法を用いて、5次元アインシュタイン方程式の漸近平坦な真空解として、「NUT電荷保存則」を満たすようなブラックレンズ解を構成した。

(2) 正の宇宙項がある5次元のEinstein-Maxwell-Chern-Simons理論において、ホライズンの位相がレンズ空間であるようなブラックホールの厳密解を求め、その解が表す時空の大域的構造について調べた。ホライズンが $L(n, 1)$ のレンズ空間から球面にトポロジーチェンジするような動的な時空であることを明らかにした。

(3) 5次元超重力理論において、Kaluza-Klein型超対称ブラックレンズの厳密解を構成し、その物理的性質や解の安定性について調べた。余剰次元がコンパクト化されている場合、漸近平坦な超対称解とは対照的に、角運動量が0になることが許されることと磁束が存在しなくてもホライズンが安定して存在することを示した。

(4) 5次元時空のブラックホールは、ホライズンのトポロジーと無限遠のトポロジーを関係付けるNUT電荷保存則を満たす必要がある。逆散乱法を用いて、導出した5次元アインシュタイン方程式の漸近平坦で、軸やホライズンで正則な真空解として、「NUT電荷保存則」を満たすような境界条件を導いた。また、その解の1角運動量極限や静的極限について、物理的性質を調べた。

(5) 5次元超重力理論において、超対称多電荷ブラックレンズの厳密解を構成し、その物理的性質や解の安定性について調べた。角運動量が0になることが許されないことと双極磁荷が存在しないとホライズンが安定して存在しないことを示した。

(6) 4次元シュバルツシルドブラックホールの周りを運動する有質量粒子の束縛軌道は安定であるが、無質量粒子の束縛軌道は不安定である。また、時空次元が5以上の高次元シュバルツシルドブラックホールの場合、有質量粒子と無質量粒子ともに安定束縛軌道が存在しないことが知られている。本研究では、5次元超対称ブラックレンズの周りを運動する粒子の挙動を解析した。そのようなブラックレンズでは、(球面のブラックホールとは対照的に)有質量粒子と無質量粒子のどちらも、安定束縛軌道が存在することを明らかにした。特に、回転軸上では、レンズ空間のトポロジーに関係した特定の整数比を持つ角運動量の粒子だけが、運動することを許されることを示した。この結果は、ホライズン近くの粒子の2つの角運動量の比を測定すれば、ブラックホールのトポロジーを確認できることを示唆する。また、エネルギー $E=0$ の有質量粒子と無質量粒子のどちらの粒子も、evanescent ergosurface上を運動し続けることがわかった。

(7) 4次元シュバルツシルドブラックホールの周りを運動する有質量粒子の束縛軌道は安定であるが、無質量粒子の束縛軌道は不安定である。また、時空次元が5以上の高次元シュバルツシルドブラックホールの場合、有質量粒子と無質量粒子ともに安定束縛軌道が存在しないことが知られている。本研究では、 $L(2, 1)$ と $L(3, 1)$ のトポロジーをもつ5次元超対称ブラックレンズの周りを運動する粒子の挙動を解析した。そのようなブラックレンズでは、(球面のブラックホールとは対照的に)有質量粒子と無質量粒子のどちらも、安定束縛軌道が存在することを明らかにした。特に、回転軸上では、レンズ空間のトポロジーに関係した特定の整数比を持つ角運動量の粒子だけが、運動することを許されることを示した。この結果は、ホライズン近くの粒子の2つの角運動量の比を測定すれば、ブラックホールのトポロジーを確認できることを示唆する。また、エネルギー $E=0$ の無質量粒子のどちらの粒子も、evanescent ergosurface上を運動し続けることを数学的に証明した。このことは、解の不安定性を意味すると期待できる。前研究では、 $L(2, 1)$ のトポロジーのブラックレンズについて、主に回転軸上にある粒子だけに着目した。本研究では、軸から離れた領域を運動する粒子の振る舞いを調べ、安定束縛軌道が存在することを確認した。また、 $L(3, 1)$ のレンズ空間トポロジーをもつ超対称ブラックレンズの周りの粒子の挙動を調べ、トポロジーによる粒子の運動の違いを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Suzuki Ryotaku, Tomizawa Shinya	4. 巻 194
2. 論文標題 Squashed black holes at large D	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP12(2021)194	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 Ryotaku Suzuki, Shinya Tomizawa	4. 巻 106
2. 論文標題 Rotating black holes at large D in Einstein-Gauss-Bonnet theory	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24018
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.106.024018	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 Takahisa Igata, Shinya Tomizawa	4. 巻 8
2. 論文標題 Stable circular orbits in higher-dimensional multi-black hole spacetimes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084003:1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.084003	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 Shinya Tomizawa, Takahisa Igata	4. 巻 102
2. 論文標題 Stable bound orbits in black lens backgrounds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124079:1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.124079	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 Takahisa Igata, Shinya Tomizawa	4. 巻 103
2. 論文標題 Stable circular orbits in caged black hole spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 084011:1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.084011	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 Tomizawa Shinya, Igata Takahisa	4. 巻 103
2. 論文標題 Stable circular orbits in Kaluza-Klein black hole spacetimes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.103.124004	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 Shinya Tomizawa, Takahisa Igata	4. 巻 100
2. 論文標題 Stable bound orbits around a supersymmetric black lens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 124031:1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.124031	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 Tomizawa Shinya, Mishima Takashi	4. 巻 99
2. 論文標題 Stationary and biaxially symmetric four-soliton solution in five dimensions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 104053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.99.104053	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 Tomizawa Shinya	4. 巻 100
2. 論文標題 Multicharged black lens	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24056
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.100.024056	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 Takashi Mishima, Shinya Tomizawa	4. 巻 96
2. 論文標題 Construction and application of variations on the cylindrical gravitational waves of Weber-Wheeler and Bonnor	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 024023:1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.96.024023	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 Shinya Tomizawa	4. 巻 97
2. 論文標題 Charged black lens in de Sitter space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 044001:1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.97.044001	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 Tomizawa Shinya	4. 巻 98
2. 論文標題 Kaluzza-Klein black lens in five dimensions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 24012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevd.98.024012	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19件(うち招待講演 3件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Ryotaku Suzuki, Shinya Tomizawa
2. 発表標題 Squashed black holes at large D
3. 学会等名 The 30th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木良拓、富沢真也
2. 発表標題 Squashed black holes at large D
3. 学会等名 第22回特異点研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木良拓、富沢真也
2. 発表標題 Squashed black holes at large D
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三島隆、富沢真也
2. 発表標題 調和写像によるEinstein-Maxwell系の新しい円筒対称波解の生成
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富沢真也、伊形尚久
2. 発表標題 ブラックレンズの安定束縛軌道について
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富沢真也
2. 発表標題 Stable bound orbits around five-dimensional black holes
3. 学会等名 The 4th workshop on "Mathematics and Physics in General Relativity" (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 富沢真也
2. 発表標題 ブラックレンズとその性質
3. 学会等名 名古屋大学多弦数理物理学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富沢真也、伊形尚久
2. 発表標題 ブラックレンズ周りの光の安定束縛軌道
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 富沢真也、伊形尚久
2. 発表標題 ブラックレンズ時空の測地線
3. 学会等名 第21回特異点研究会 - 特異点と時空、および関連する物理 -
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富沢真也、三島隆
2. 発表標題 New vacuum solution in D=5 of an asymptotically flat spherical black hole
3. 学会等名 第20回特異点研究会---特異点と時空、および関連する物理---
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富沢真也、三島隆
2. 発表標題 位相検閲定理と可能な5次元ブラックホール
3. 学会等名 第74回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 富沢真也
2. 発表標題 Spherical black hole with non-trivial domain of outer communication
3. 学会等名 The 2nd Workshop on "Mathematics and Physics in General Relativity" (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三島隆、富沢真也
2. 発表標題 調和写像法により生成された円筒対称重力波のモード転換現象の解析とそのEinstein-Maxwell系への応用
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富沢真也、三島隆
2. 発表標題 5次元の漸近平坦なブラックレンズの真空解
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富沢真也、三島隆
2. 発表標題 Vacuum solution of an asymptotically flat rotating black lens in five dimensions
3. 学会等名 東京工業学茨城大学素粒子論研究室合同研究会 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shinya Tomizawa, Takashi Mishima
2. 発表標題 Vacuum solution of an asymptotically flat rotating black lens in five dimensions
3. 学会等名 JGRG 27
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 富沢真也、三島隆
2. 発表標題 漸近平坦なブラックレンズの真空解
3. 学会等名 第19回特異点研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 三島隆、富沢真也
2. 発表標題 円筒対称時空上の重力波ならびに電磁波の衝突過程におけるモード転換現象の特徴
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 三島隆、富沢真也
2. 発表標題 ブラックレンズ解とその諸性質
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------