

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25400276

研究課題名（和文）素粒子統一理論を基礎にした様々な重力理論の解析および宇宙論的検証

研究課題名（英文）Analysis and cosmological verification of various gravitational theories based on unified theory of fundamental interactions

研究代表者

前田 恵一（Maeda, Kei-ichi）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70199610

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：現代宇宙論における最も重要な2つの課題（インフレーション・ダークエネルギー問題）の解明に向け提唱されている様々な重力理論を素粒子統一理論の観点から解析し、検証を行った。インフレーションに関しては、素粒子標準理論を元にしたヒッグス・インフレーションモデルを拡張したモデルや、超ひも理論を基礎に提案されているKKLMMTモデルをケーシング場と結合する場合に拡張し、それぞれより観測に合うモデルとなることを示した。ダークエネルギー問題に関しては、重力子が質量を持つbigravity理論を主に解析し、加速膨張だけでなくダークマター問題も解決する可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：We analyse various gravity theories which may resolve two most important subjects in modern cosmology (inflation and dark energy problem) based on the unified theory of fundamental interactions. We propose two new inflationary scenarios (Higgs inflation based on standard model of particle physics and KKLMMT inflation based on superstring theory), which are extended from the original models and satisfy the observational constraints well. As for the dark energy problem, we mainly analyse bigravity theory, in which one of gravitons is massive. We show that it may resolve the dark matter problem as well as the dark energy problem.

研究分野：宇宙論・重力理論

キーワード：重力理論 ダークエネルギー 宇宙論 インフレーション 素粒子統一理論

### 1. 研究開始当初の背景

重力というものは非常に不思議な力である。身近な存在にも関わらず、人類はまだ完全にその正体を掴んでいない。ニュートンは、地球上の物体の落下現象と天体の運動を統一する万有引力を発見し、近代物理学を発展させた。その数世紀後に、アインシュタインは、まったく新しい重力理論(一般相対性理論)を提案した。時空の幾何学として重力というものを捉え、それまでの人類の時間や空間に対する考えを一変させることとなった。このように重力の研究は、ことあるごとに物理学を大きく進化させてきた。そしていま、力の統一や量子重力といった超ミクロの世界と広大な宇宙という超マクロの世界の両極端で人類は大きな謎に遭遇し、その答えの「鍵」として「重力」が示唆されている。そして重力によるその謎解明が、再び物理学の新しい展開に導くのではと期待される。

超マクロの世界における現代宇宙論最大の課題であるダークエネルギー問題は、その存在を示唆する宇宙の加速膨張の発見に対して 2011 年度ノーベル物理学賞が与えられた。ビッグバン理論の基礎となったアインシュタインの一般相対性理論では、通常の物質に対しては万有引力が働くため、宇宙膨張は重力により減速される。観測された加速膨張を説明するためには通常の物質とは異なる物質の存在が必要となり、それをダークエネルギーとよんでいる。観測からそれは宇宙全体のエネルギー密度の約 7 割を占め、宇宙定数(真空のエネルギー)のような性質を持っていることがわかっている。しかしながら、宇宙初期のインフレーションが大統一理論という理論の自然なスケールで語られているのに対し、現在の加速膨張が示唆する宇宙定数のエネルギースケールは遙かに小さく( $10^{-3}$  eV)、またその値がなぜ通常の物質密度と同程度であるのかという大きな謎が生まれている。このダークエネルギー問題は、現在科学に対する挑戦でもあり、自然界の基本法則の根幹に関わる物理学の最重要課題の一つである。その問題解決に向けて、大きく分けて次の 2 つのアプローチが検討されている。(A) 宇宙を構成する物質の大部分(約 70%)が宇宙定数のような特異な物質だと考える。(B) 宇宙のような大規模スケールでは、重力は一般相対性理論ではなく別の重力理論で記述されると考える。近年では、特に(B)のアプローチにおいて様々な重力理論が提唱され、ダークエネルギー問題の解明は混沌としている。

### 2. 研究の目的

宇宙論の標準モデルであるビッグバン宇宙論は、近年の精密観測により確かなものになってきたが、その一方で新たな謎としてダークエネルギー問題が誕生した。その解決には自然界における基本法則の根幹にも関わる発想の転換

が必要と考えられる。また、ミクロ世界においてはインフレーション宇宙論などの初期宇宙像の観測的検証が注目されており、素粒子統一理論をもとにしたその基本的理解が求められている。これらミクロとマクロの両極端で謎となっている加速膨張宇宙の起源の解明には宇宙を支配する重力の本質的理解が鍵となり、一般相対性理論を超えた様々な重力理論が提案されるに至っている。本研究では、超弦理論など素粒子統一理論の立場からダークエネルギー・インフレーションなどの宇宙の未解決重要課題を重力物理学の問題として系統的に解析する。

### 3. 研究の方法

研究目的達成のため、宇宙論・重力物理の 2 つの重要課題((I) インフレーション (II) ダークエネルギー問題)を系統的に考察することで、提唱されている様々な重力理論を素粒子統一理論の観点から解析し、観測・実験を説明し、かつ統一理論の立場から最も自然な重力理論を探る。この際、これまで様々な重力理論を基礎に宇宙初期、ブラックホール・中性子星などの強重力現象の解析を行ってきた多くのノウハウを生かす。たとえば、ブレイン重力理論の研究や共形変換を用いた解析法などは多くの重力理論の解析に非常に有用で、本研究において大いに活用できる。また、学振二国間共同事業(英国)によって培った研究者間ネットワークも研究の展開に生かしていく。さらに、重力物理学の世界的権威の G. Gibbons 教授(Cambridge 大)に研究協力者をお願いし、彼との議論を通して課題解明に向けた新しい発想の発見や手法の開発を目指す。

### 4. 研究成果

以下には、それぞれの課題(I) (II)において当該年度ごとに得られた成果をまとめる。  
[2013 年度]

(I) 素粒子統一理論を基礎にした様々な重力理論に基づくインフレーションの解析を行っているが、近年ゲージ場とインフラトン場の結合の重要性が指摘されており、特に、ゲージ場のインフレーションに与える影響を解析した。複数の  $U(1)$  ゲージ場または  $SU(2)$  ゲージ場がインフラトン場と結合する場合、一様等方加速膨張時空が安定解として存在するが、初期の非等方性が大きい場合は、長期間非等方加速膨張が起こり、モデルが観測的に検証可能であることを示した。

(II) ダークエネルギー問題に関しては、massive gravity 理論を拡張した bigravity 理論を基礎に解析した。その結果、加速膨張宇宙が attractor として動的に実現されるということ、さらには第二の計量と結合する「双子物質」が我々の宇宙のダークマターとして振る舞う可能性があることを示した。

[2014 年度]

(I) 素粒子統一理論を基礎にした様々な重力理

論に基づくインフレーションの解析を行っているが、超重力理論における no go theorem など de Sitter 時空のような加速膨張が理論と整合しない問題が指摘されている。本研究では、統一理論から予想される負の宇宙項がある場合に関しても、曲率高次項のような量子補正を考慮することで de Sitter 時空がアトラクターとして実現可能であることを示した。

(I)ダークエネルギー問題に関しては、前年度に引き続き bigravity 理論を基礎に解析した。前年度に示した第二の計量と結合する「双子物質」が我々の宇宙のダークマターとして振る舞う可能性をさらに精査し、ダークマターの3つの必要条件（銀河の回転曲線、構造形成問題、宇宙の構成要素）をすべて満たすことが出来ることを示した。

[2015 年度]

(II)素粒子統一理論を基礎にした様々な重力理論に基づくインフレーションの解析を行っているが、超弦理論を基にした KKLTMMT インフレーションモデルはパラメータの極端な微調整の必要性などの問題点が指摘されている。2015 年度はこの問題に取り組み、ゲージ場との結合項の存在を指摘し、その項がモデルをより自然なものになることを明らかにした。

(I)ダークエネルギー問題に関しては、前年度に引き続き bigravity 理論を基礎に解析した。前年度に示した第二の計量と結合する「双子物質」が我々の宇宙のダークマターとして振る舞う可能性を示し、かつ宇宙初期には一般相対性理論が回復されることを明らかにした。また、この理論で相対論的な星の解を解析し、現在観測されている中性子星の存在を可能にするには、結合定数に制限がつくことを示した。

[2016 年度]

これまでの成果を2つの国際研究集会[3rd Korea-Japan Workshop on Dark Energy(韓国・大田), Black Hole New Horizons(メキシコ・オアハカ)]において招待講演として発表した。また新しく得られた成果として以下の研究成果を得ている。(I)素粒子標準理論を基礎にしたビッグス・インフレーションの再解析を行った。従来の2つのビッグス・インフレーションの組み合わせたハイブリッド・ビッグス・インフレーションを提唱し、その解析法として disformal 変換を用いた。スカラテンソル比(r)が発見された場合には観測に合うモデルを与えることができる。(II)ダークエネルギー問題に関しては、素粒子統一理論の現象論的モデルと考えられている DBI 理論を拡張した D-BIonic モデルを解析し、物質との結合を考えることで宇宙の加速膨張だけでなくダークマター量との比も説明可能であることを示した。

## 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14件)

Sirachak Panpanich, Kei-ichi Maeda, Shuntaro Mizuno, "Cosmological Dynamics of D-BIonic and DBI Scalar Field and Coincidence Problem of Dark Energy" Physical Review D95, (2017) 103520 DOI:

10.1103/PhysRevD.95.103520 査読有 Shoichiro Miyashita, Kei-ichi Maeda, "AdS Monopole Black Hole and Phase Transition" Physical Review D94 (2016) 124037.

DOI:10.1103/PhysRevD.94.124037 査読有

Mitsuhiro Fukushima, Shuntaro Mizuno, Kei-ichi Maeda,

"Gravitational Baryogenesis after Anisotropic Inflation" Physical Review D93 (2016) 103513, DOI: 10.1103/PhysRevD.93.103513 査読有 Kei-ichi Maeda, Kunihito Uzawa, "Dynamical angled brane" Phys.Rev. D94 (2016) 126016, DOI:

10.1103/PhysRevD.94.126016 査読有 Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda, Makoto Tanabe, "Relativistic stars in bigravity theory", Physical Review D93 (2016) 064054, DOI:

10.1103/PhysRevD.93.064054 査読有 Yosuke Misonoh, Kei-ichi Maeda, "Black Holes and Thunderbolt Singularities with Lifshitz Scaling Terms" Physical Review D92 (2015) 084049 044054, DOI:

10.1103/PhysRevD.92.084049 査読有 Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda, Ryo Namba "Stability of the Early Universe in Bigravity Theory" Physical Review D92 (2015) 044054, DOI:

10.1103/PhysRevD.92.044054 査読有 Yu-ichi Takamizu, Kei-ichi Maeda, "Bubble Universes With Different Gravitational Constants" Physical Review D92 (2015) 023514, DOI:

10.1103/PhysRevD.92.023514 査読有 Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda, "Dark matter in ghost-free bigravity theory: From a galaxy scale to the universe" Physical Review D90 (2014) 124089 DOI: 10.1103/PhysRevD.90.124089 査読有

Kei-ichi Maeda, Nobuyoshi Ohta "Cosmic acceleration with a negative cosmological constant in higher dimensions" JHEP 1406 (2014) 095 DOI: 10.1007/JHEP06(2014)095 査読有 Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda

"Cosmology in ghost-free bigravity theory with twin matter fluids: The

origin of dark matter" Physical Review D89 (2014) 064051, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.064051 査読有  
Kei-ichi Maeda, Kei Yamamoto, "Stability analysis of inflation with an SU(2) gauge field" JCAP 1312 (2013) 018, DOI: [10.1088/1475-7516/2013/12/018](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2013/12/018) 査読有  
Kei-ichi Maeda, Mikhail S. Volkov, "Anisotropic universes in the ghost-free bigravity" Physical Review D87 (2013) 104009, DOI: [10.1103/PhysRevD.87.104009](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.104009) 査読有  
Kei-ichi Maeda, Kei Yamamoto, "Inflationary Dynamics with a Non-Abelian Gauge Field" Physical Review D87 (2013) 023528, DOI: [10.1103/PhysRevD.87.023528](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.023528) 査読有

[学会発表](計 26件)

戸塚良太, 前田恵一, 水野俊太郎, "Multi T-model Inflation", 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 18 日, 大阪大学  
宮下翔一郎, 前田恵一 "漸近的 Ads 時空における非可換 BH の熱力学" 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学  
星野悠一郎, 前田恵一 "Ads black hole as leaking chaotic billiard systems" 日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 20 日, 大阪大学  
佐藤星雅, 前田恵一, R. Easther, N. Musoke "Hybrid Higgs Inflation"日本物理学会 秋季大会, 2016 年 9 月 21 日, 宮崎大学  
Kei-ichi Maeda, "Chaotic dynamics of a classical string on Ads black hole spacetime"Black Hole New Horizons (招待講演)(国際学会) 2016 年 5 月 16 日, CMO(Oaxaca), Mexico  
Kei-ichi Maeda, "The Use of Disformal Transformation" 3rd Korea-Japan Workshop on Dark Energy"(招待講演) (国際学会) 2016 年 4 月 4 日, Daejeon, Korea  
宮下翔一郎, 前田恵一 "AdS モノポールブラックホールの熱力学と相転移" 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学(仙台)  
星野悠一郎, 前田恵一 "Quantum chaotic string in Ads geometry"日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学(仙台)

御園生洋祐, 前田恵一 "Black holes and Thunderbolt singularities with Lifshitz scaling terms" 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学(仙台)  
福島光博, 水野俊太郎, 前田恵一 "修正重力理論における重力のバリオン数生成" 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学(仙台)  
前田恵一 "一般相対性理論と宇宙論" 日本物理学会 2015 年秋季大会(招待講演) 2015 年 9 月 25 日, 大阪市立大学(大阪)  
宮下翔一郎, 前田恵一 "漸近的 Ads モノポールブラックホールとブラックホール熱力学" 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学(大阪)  
青木勝輝, 前田恵一, 田邊誠 "Relativistic stars in bigravity" 日本物理学会 2015 年秋季大会 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学(大阪)  
Kei-ichi MAEDA "2<sup>nd</sup> APTCP-TUS workshop on Dark Energy (招待講演) 2015 年 8 月 3 日, 東京理科大学(東京)  
Kei-ichi MAEDA "The origin of scalar fields and their roles in cosmology" Fourteenth Marcel Grossmann Meeting(招待講演) 2015 年 7 月 13 日, University of Rome, Roma, ITALY  
Kei-ichi MAEDA "Dark energy and dark matter in the ghost-free bigravity theory" Fourteenth Marcel Grossmann Meeting (招待講演) 2015 年 7 月 13 日, University of Rome, Roma, ITALY  
福島光博, 水野俊太郎, 前田恵一 "非等方インフレーション後における重力的バリオン数生成" 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京)  
渡邊健人, 水野俊太郎, 前田恵一 "ブレインインフレーションにおけるゲージ場の効果" 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 21 日, 早稲田大学(東京)  
星野悠一郎, 前田恵一 "Chaotic string dynamics in AdS black hole" 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学(東京)  
青木勝輝, 前田恵一, 難波亮, "Time-dependent screening and stability around FLRW background in bigravity" 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月 24 日, 早稲田大学(東京)  
21 前田恵一, 御園生洋祐 "Black holes in non-projectable Horava-Lifshitz gravity" 日本物理学会 2014 年秋季大

- 会 2014 年 9 月 21 日、佐賀大学 (佐賀)
- 22 青木勝輝, 前田恵一, “Bigravity 理論とダークマター問題への応用” 日本物理学会 第 69 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学 (神奈川)
- 23 Kei-ichi Maeda, “Gravitational lensing and black hole shadow” SYMPOSIUM ON GRAVITY AND LIGHT (招待講演) Kavli IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, 2nd October 2013
- 24 青木勝輝, 前田恵一, “bigravity 理論に基づく宇宙論とダークエネルギー問題” 日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 21 日、高知大学 (高知)
- 25 Kei-ichi Maeda, “Dynamics of bigravity and general relativity” Les Rencontres du Vietnam Hot Topics in General Relativity and Gravitation (招待講演) Quy Nhon, Viet Nam, July 30, 2013
- 26 Kei-ichi Maeda, “Anisotropic universes in bigravity theory and homothetic metrics” Mini-workshop "Massive gravity and its cosmological implications" (招待講演) Kavli IPMU, University of Tokyo, Kashiwa, Japan, April 10, 2013

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

前田恵一 (Kei-ichi MAEDA)  
早稲田大学・理工学術院・先進理工学研

究科・教授

研究者番号：70199610

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

Gary Gibbons

Cambridge University, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, professor