

令和元年6月11日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05362

研究課題名(和文) 3つの系統的アプローチの有機的な組み合わせによる様々な重力理論の検証

研究課題名(英文) Systematic Study with Organized Combinations of Three Approaches for Gravitational Theories

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：一般相対性理論は多くの実験・観測により十分検証されているが、それにもかかわらずダークエネルギーなどの宇宙論最大の謎やミカ・スカルでの重力の基本的問題などの解決のため新しい重力理論が次々と提唱されている。どの重力理論が本当に正しいかを判断するには、重力理論を個々に解析するより系統的な方法で検証するのがより適切であると考え、本研究では3つの系統的な手法(有効理論的アプローチ、基礎理論的アプローチ、一般相対論的アプローチ)を提案し、それらを有機的に組み合わせ、宇宙の加速膨張の説明やインフレーションモデルの適否などの総合的な観点から様々な重力理論の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

重力は非常に不思議な力で、ニュートン重力理論やアインシュタインの一般相対性理論は現代物理学を進展させる重要な鍵となった。宇宙論、ブラックホール、重力波というまったく新しい研究分野を開拓し、宇宙に関する知識も飛躍的に伸びた。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が、いままさに、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の重力が注目されている。本研究では3つの系統的な手法を提案し、その手法を有機的に組み合わせ、総合的な観点から様々な重力理論の検証を行う。

研究成果の概要(英文)：General Relativity has been confirmed by many experiments and observations. However, we have also found very important and serious mysteries in cosmology and gravitation (dark energy and inflation). In order to solve those problems, many modified gravitational theories have been proposed. To judge which theory is correct, we believe that we should perform a systematic study of those theories instead of independent analysis. Here I have proposed three approaches for gravitational theories ([I] Effective Field Approach, [II] Fundamental Theoretical Approach, [III] General Relativistic Approach), and performed a systematic study with organized combinations of those three approaches to analyze dark energy problem and inflation.

研究分野：宇宙物理学

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。1915年に発表された一般相対性理論は、ニュートン重力理論と特殊相対性理論の間の矛盾を解消するだけでなく、重力を時空の幾何学として捉えることで、時空の概念を根本的に変える画期的な理論となった。太陽系における検証実験等によりその理論は確実なものとなったが、さらに時空を物理学の対象としたことで、宇宙論、ブラックホール、重力波というまったく新しい研究分野を開拓した。現代宇宙論の標準モデルとなったビッグバン宇宙論は様々な精密観測により確かなものとなっている。また、ブラックホールはエネルギー源を提供する「天体」として今や相対論的天体物理学には欠かせない存在となっている。重力波は現在世界各地で大型観測計画が進行しており、宇宙を見る第3の目としての重力波天文学の展開が近い将来に期待されている。

その一方で、精密観測によりビッグバン宇宙論の正しさは確固としたものになったが、重要な謎も現れている。2011年度にノーベル物理学賞が与えられた現代宇宙論最大の謎である宇宙の加速膨張の発見である。ビッグバン理論の基礎となっている一般相対性理論では、通常物質に対しては万有引力が働くため宇宙膨張は減速される。観測された加速膨張を説明するためには通常物質とは異なる奇妙な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、またその値がなぜ通常物質密度と同程度であるのかという大きな謎が存在する。これまでの常識的なアプローチでは解決が困難で、自然界における基本法則の根幹にも関わる重要な問題を提起している。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、物理学の最重要課題の一つと考えられる。

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が、いままさに、力の統一や量子重力といった超々如の世界と広大な宇宙という超々如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」としての「重力」が注目されている。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ている。

## 2. 研究の目的

アインシュタインが一般相対性理論を発表してほぼ100年になるが、その間多くの実験・観測によりその理論の正しさは十分確かめられてきている。それにもかかわらずダークエネルギーなどの宇宙論の新しい謎やミクロスケールでの重力の基本的問題などを解決しようと、次々と新しい重力理論が提唱されている。どの重力理論が本当に正しいかを判断するには、個々の重力理論をひとつひとつ検証していくより、提唱されている理論を系統的な方法で解析するのがより効率的で適切であると考えられる。本研究では3つの系統的な手法を提案し、その手法を有機的に組み合わせ、宇宙の加速膨張の説明やインフレーションモデルの適否などの総合的な観点から様々な重力理論の検証を行うことが目的である。

現在までダークエネルギー問題の解決に向けては大きく分けて次の3つの立場で検討が行われている。

(1)宇宙は大部分が宇宙定数に似た性質の特異な物質で占められている。

(2)宇宙のような超々如スケールでは、重力は一般相対性理論ではなく異なる重力理論で記述される。

(3)宇宙の物質の非一様効果を考える方法など、既知の物理学の範囲で観測結果を説明する。

いずれも重力が「鍵」となると考えられ、その解明には重力に対する新しいアプローチや考え方が要求される。本研究では主に(2)の立場からダークエネルギーの謎解明を目指す。当然であるが、宇宙論的スケールで重力理論を変更し、加速膨張を説明しようという試みがこれまでも数多くある。例えば  $f(R)$  重力理論、スカラー・テンソル理論、ガリレオ重力理論、Horndeski 重力理論、アインシュタイン・E-tilde理論、massive gravity 理論など活発に研究されている。しかしながら、それらの多くはあくまで現象論的な理論で、またそれぞれの重力理論自体にも結合定数を含めた不定性が数多く存在する。理論によっては任意関数をも含む。そのような不定性を持たせれば、地上実験や太陽系近傍の観測と矛盾せず、宇宙の加速膨張を説明することはそれほど困難ではない。しかし本当に正しい理論は一つで、正しいものを評価する別の手段が必要となる。

一方、ミクロ世界においては、同じ宇宙の加速膨張であるインフレーションは初期宇宙の標準的モデルとなりつつあるが、その起源も大きな謎である。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可能になってきている現在、その基本的理解が求められている。エネルギースケールから考えてその理解には素粒子統一理論が関わってくると考えられるが、その際に「鍵」となるのがやはり重力である。80年代に提唱された素粒子統一理論の最有力候補である超弦理論は節目ごとに大きな進展を見せ、宇宙初期やブラックホール物理学などの強重力現象研究に大きな影響を与えている。この超弦理論は4次元を超える高次元時空を予言し、またブレインという新しい概念はこれまでの宇宙の描像大きく変えた。Kaluza-Klein 理論に起源を遡る高

次元時空を用いた統一理論では、通常、余分な次元を観測不可能な程度にコンパクト化することにより4次元時空を説明するが、ブレーンの存在は余分な次元のサイズを比較的大きくでき、検証可能性を与えたことで一躍注目された。このブレーンを用いたインフレーション理論もいろいろ提案されているが、その多くは摂動的にブレーンを扱ったもので、重力の反作用を考慮していない場合が多い。それらを考慮した整合性のある理論の構築がより現実的な素粒子基礎理論に基づくインフレーション理論に繋がるであろう。また、量子効果を考慮した曲率高次項やゲージ場との結合などがダークエネルギーに与える影響も考慮する必要がある。一方で、インフレーションの起源を与えるインフラットは素粒子標準理論の範囲内で考え、重力理論を変更するヒッグス・インフレーション理論なども提唱されている。そこで、インフレーション理論の構築においても、重力理論を変更する可能性を含めた系統的な解析が期待される。

これらミクロとマクロの両極端で新しい展開を見せている重要課題の解明には、宇宙を支配する重力の本質的理解が鍵となり、その結果として一般相対性理論を超えた種々様々な重力理論が提案されるに至っている。本研究では、ダークエネルギーや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総合的な観点から系統的かつ有機的に解析することで、提唱されている多くの重力理論の検証を試みる。

以上の研究目的を遂行するために、本研究では、以下の3つの系統的な手法を有機的に組み合わせ、様々な重力理論の総合的な解析を行うことにより、宇宙の加速膨張を自然に説明できる重力理論の探求を行う。

### [I] 有効理論的アプローチ

興味ある背景時空(たとえば加速膨張宇宙)の周りの摂動的理論を可能な限り拡張し、観測・実験等で理論に制限を与える。典型的なものとして、太陽系近傍での重力理論検証のために開発された重力理論を特定しないPPN (Parameterized post-Newtonian) 形式というアプローチがある。最近では加速膨張する背景時空を仮定した effective field theory が提案され、重力理論の制限に用いられている。さらに、フリードマン宇宙理論からの摂動を考えた PPF (Parameterized post-Friedmann)形式も提案されている。

### [II] 基礎理論的アプローチ

重力理論を一般相対性理論から拡張する場合、自然な拡張として、超弦理論など素粒子統一理論に基づくもの、曲率高次項など量子補正効果を考慮したもの、スカラー場(スピン0)やベクトル場(スピン1)の場とのハイブリッド(プランク・ディック理論、アインシュタイン・エーテル理論)、重力子に質量を与えるもの(massive gravity, bigravity)などが考えられ、それらを中心に解析する。

### [III] 一般相対論的アプローチ

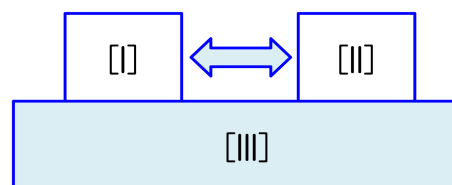
一般相対性理論は100年の研究の歴史を持ち、いろいろな解析法やテクニックが開発されている。共形変換などにより、様々な重力理論をアインシュタイン方程式の形に帰着できれば、解析はより容易になり、系統的な解析が可能になる。

[I]はbottom-upの現象論的アプローチで、[II]はtop-downの基礎的アプローチと考えられるが、総合的な評価にはその2つのアプローチの有機的な解析が必要となる。[III]は具体的手法を与えるもので、[I],[II]の解析において非常に有用になると考える。申請者は、これまでインフレーション理論をはじめとした素粒子的初期宇宙理論の理論的解析を、また近年は、新しい宇宙理論であるブレーンワールドや高次元重力理論の研究を世界に先駆けて行ってきた。特に、高次元重力理論の研究では、超重力理論や超弦理論を基礎にした宇宙論・ブラックホール研究に80年代初頭からいち早く取り組み、その後その分野の第一線で研究を遂行してきた。またそれらとは別に、スカラー・テンソル理論をはじめとする様々な重力理論の研究も独自の方法で行ってきた。そのような状況で、上の3つの系統的アプローチの有機的組み合わせにより提唱されている様々な重力理論の検証を行い、宇宙論・宇宙物理が現在抱えている重要課題研究につなげるのが本研究の大きな目的である。申請者のこれまでの研究を大いに生かすことができる課題だと考えている。

## 3. 研究の方法

本研究では、提案されている様々な重力理論を[I]有効理論的アプローチ、[II]基礎理論的アプローチ、[III]一般相対論的アプローチの3つの解析手法を有機的に組み合わせ、重力理論の総合的な検証を行う。申請者は、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おり、多くのノウハウを蓄積している。たとえば、ブレー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、宇宙論・重力物理学の世界的権威の Starobinsky 教授(Landau 研)と Gibbons 教授, Barrow 教授(Cambridge 大)に研究協力者をお願いし、彼ら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する。

研究目的において問題解決のアプローチとして3つの系統的な手法を挙げたが、これらの手法をどう有機的に組み合わせるかを具体的に考える(右図)。



3つの系統的アプローチの有機的関係

[I]、[II]はそれぞれ bottom-up、top-down という従来独立した手法であるので、まずは並行して研究を行い、ある段階でその結果を付き合わせて解析することで「 $\mathcal{E}$ 」または重力理論の検証を行う。[III]はそれらの解析を行う際の具体的手法を与えるもので、課題に合ったより適切な変換を探し出す。

[I]の「 $\mathcal{E}$ 」に関しては、これまでに提案されている有効理論を手始めに、宇宙の精密観測からどの程度その理論を検証できるかを解析する。具体的には、Hu-Sawicki (2007) の PPF 形式およびそれを一般化した Ferreira 達(2013)の「 $\mathcal{E}$ 」が「 $\mathcal{E}$ 」の特定にどの程度有効なのかを解析する。DGP 「 $\mathcal{E}$ 」に対しては PPF 形式が有効であることがすでに示されているが、他の重力理論についても解析し、観測的に一般相対性理論と区別可能かどうか検討する。それと並行し、可能な範囲に拡張した有効重力理論と基礎理論に基づく「 $\mathcal{E}$ 」との関係を探る。また、銀河や銀河団が非一様に分布する現在の宇宙は、物質分布が非常に非一様であるが、重力場はほぼ一様で、フリードマン宇宙「 $\mathcal{E}$ 」からの摂動で表される。一般相対性理論では、Futamase 達により、それらの非一様宇宙をどのように記述するか定式化されている。それはちょうど弱重力場の post-Newton 近似に当たるので、その「 $\mathcal{E}$ 」を拡張し、新しい PPF 形式 (PPN 形式の宇宙論版) を提案する。この「 $\mathcal{E}$ 」と検討した従来の PPF 形式等によるものと比較し、両者の良い点を生かしたより良い手法を構築し、宇宙の精密観測からどの程度重力理論を検証できるかを解析する。

[II]の「 $\mathcal{E}$ 」としては、「 $\mathcal{E}$ 」-問題の「 $\mathcal{E}$ 」として bigravity 理論、インフレーション理論に関しては超弦理論を基礎にした「 $\mathcal{E}$ 」を中心に解析する。これまでに bigravity 理論により、「 $\mathcal{E}$ 」-と「 $\mathcal{E}$ 」-の問題を共に解決する可能性を示している。そのためには重力子の質量を非常に小さくする必要があるが、本研究では、その起源を高次元統一理論におけるブレイン「 $\mathcal{E}$ 」や KKLT コンパクト化を「鍵」に探求する。一方、超弦理論に基づくインフレーションの一つである曲率高次項を伴うインフレーション「 $\mathcal{E}$ 」に関しては、量子補正効果である曲率高次項やスカラー場の高次微分項を含む有効理論をもとに、場の再定義の不定性を考慮することで加速膨張が可能であることを世界ではじめて指摘した。この有効理論は、ガリレオ重力理論に含まれるが、現象論的に考えられたガリレオ重力理論を素粒子統一理論から導くものとして興味深いだけでなく、結合定数等の不定性を決定するという意味でも注目すべきである。しかしながらこの「 $\mathcal{E}$ 」では、インフレーション終了後ビッグバンにつながる問題が残っており、再加熱を含めたより現実的な「 $\mathcal{E}$ 」構築が必要となる。本研究ではブレイン・インフレーションで考えられているワックスの効果を検討した新しい「 $\mathcal{E}$ 」の解析を行い、望ましい「 $\mathcal{E}$ 」構築が可能かを解析する。また、素粒子統一理論に必然的に存在するゲージ場のインフレーションにおける役割についても考察する。高次元時空を 4 次元にコンパクト化する際に現れる「 $\mathcal{E}$ 」場やデイトン場は、通常インフレーション的な加速膨張解を損なうが、ゲージ場との結合を考慮すると逆にインフレーションを助ける場合があることを示している。このゲージ場は宇宙の再加熱や密度揺らぎの生成においても重要な影響を与えると予想される。また、インフレーション起源を素粒子標準「 $\mathcal{E}$ 」内で考え、重力理論を変更するヒッグス・インフレーション「 $\mathcal{E}$ 」も提唱されているが、この「 $\mathcal{E}$ 」では宇宙の再加熱やバリオン生成などが具体的に評価できる。そこで初年度は、素粒子統一理論に基づく様々な重力理論の可能性について考察し、観測と整合性のある「 $\mathcal{E}$ 」構築の条件を確定する。

[III]は以前から提案している「 $\mathcal{E}$ 」で、[I] [II]の解析において肝となる有効な手法を与える。私は、これまでの研究を通して、様々な重力理論の統一的解析を可能にする共形変換を用いた解析法を提案してきた。この手法はインフレーションなど重要な初期宇宙の理論解析に応用されている。本研究では、提案されている数多くの理論にこの手法および拡張した新たな手法を適用し、総合的な解析を行う。もちろん共形変換の方法で一般相対性理論に帰着できる理論は限られており、ガリレオ重力理論、Horndeski 重力理論やその拡張など適用できない理論も数多い。ところが最近、加速膨張宇宙のような特別な状況を考える場合、disformal 変換やその拡張でアインシュタイン重力に帰着できることに気がついた。その結果、解析できる状況は限られるが、多くの一般的な重力理論においても、適切な変換を行うことで、一般相対論的な解析が可能になる。本研究では、この新しい手法により、一般相対性理論の技法や知識を用いて、様々な重力理論における加速膨張の振る舞いを系統的に解析する。

もちろんこれらの「 $\mathcal{E}$ 」は、申請者がその手法などに精通しているとはいえ、発想的観点から考えると、「直交」した考えを持つ研究者との議論が重要になる。そこで、これらの研究を遂行する際に、この数年間毎年訪問している Cambridge 大学の Gibbons 教授、Barrow 教授、およびインフレーション宇宙論や「 $\mathcal{E}$ 」-研究の第一人者である Starobinsky 教授に研究協力者を依頼し、新しいアイデアや情報の交換をし、共同研究に繋げる。彼らとの共同研究により、申請者が予想しなかった新しい展開が期待される。

さらに本研究では、目先の未解決現象を説明するための安易な「 $\mathcal{E}$ 」作りではなく、[II]のような基礎理論的観点から、「 $\mathcal{E}$ 」-とインフレーションなどの宇宙の基礎的問題に「 $\mathcal{E}$ 」し、重力理論の本質の理解につなげたい。その際、[I]は考え得る理論の拡張性を与え、また[III]は具体的な解析手段を与える。

#### 4. 研究成果

(1) インフレーションに関しては、[II]の基礎理論に基づくこれまでの「 $\mathcal{E}$ 」の再解析を行うことから始めた。素粒子標準理論を基礎にしたヒッグス・インフレーションの再解析を行い、従来の 2 つの

インフレーションの組み合わせたハイブリッド・ヒッグス・インフレーションを提唱した。その解析法としては、[III]の一般相対論的アプローチを用いるため、disformal 変換によりアインシュタイン重力の形に書き換えることで解析を行った。この研究により、近い将来の観測で期待されるテンソル・スカラー比によりインフレーションの結合定数が決まることを示した[業績論文 ]。さらに超弦理論等の素粒子統一理論から予想される アトラクター型のインフレーションで複数のインフラトン場が存在する場合に、複数場特有の密度ゆらぎの特徴を明らかにし、観測から制限されるインフレーション領域が広がることを示した[業績論文 ]。また、リーマン多様体を拡張した計量アフィン多様体に基づく重力理論においては、これまで観測的に否定されていたインフレーションでも観測と矛盾しないインフレーション領域が存在することを明らかにした[業績論文 ]。非等方性によるバリオン生成問題に関しては、具体的な非等方インフレーションを用いた解析を行い、バリオン生成がどの程度自然に説明可能かについても詳細な議論を与えている[業績論文 ]。

(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インフレーションと考えられている DBI 理論を拡張した D-Brane インフレーションを解析し、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(coincidence problem)も説明可能であることを示した[業績論文 ]。また、bigravity 理論に基づき、有質量重力子が局在化した geon 構造をつくることを指摘し、ダークマターとしての可能性を議論した[業績論文 ]。この理論における中性子星を考える際の問題点も明らかにしている[業績論文 ]。

また[III]に関連して、ブラックホール付近で粒子衝突することでブラックホールからエネルギーを抽出する衝突ペンローズ過程について調べ、非線形効果を考慮した解析を行い[業績論文 ]、またスピン粒子を考えた場合には従来のエネルギー最大抽出効率のほぼ倍の効率が得られることを明らかにした[業績論文 ]。さらに、階層的 3 体系における重力波の影響を解析し、M87-クワзар連星系において重力波の間接的根拠を与えたパルサーの近星点移動曲線に古在・リトフ振動に伴う屈折が現れることを示した。この変化が観測されれば、3 体系からの重力波の確認および一般相対性理論のさらなる検証を与える。今後は相対論的效果や PPN パラメータの制限などについても考察する[業績論文 ]。

[I]に関しては十分な研究成果が得られなかったが、ここで得られた成果を元に今後の研究につなげていく。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

Haruka Suzuki, Priti Gupta, Hirotada Okawa, [Kei-ichi Maeda](#), *The Periastron Shift of Binary Pulsar with Kozai-Lidov Oscillation*, DOI: [10.1093/mnras/512/1/1058](#), Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, **486**, 2019, L52–L57, 査読有

Keigo Shimada, Katsuki Aoki, [Kei-ichi Maeda](#), *Metric-affine Gravity and Inflation*, DOI: [10.1103/PhysRevD.99.104020](#), Physical Review **D99**, 2019, 104020, 査読有

[Kei-ichi Maeda](#), Shuntaro Mizuno, Ryota Tozuka, *-attractor-type double inflation*, DOI: [10.1103/PhysRevD.98.123530](#), Physical Review **D98**, 2018, 123530, 査読有

Kei-ichi Maeda, Kazumasa Okabayashi, Hirotada Okawa, *Maximal efficiency of the collisional Penrose process with spinning particles*, DOI: [10.1103/PhysRevD.98.064027](#), Physical Review **D98**, 2018, 064027, 査読有

Seiga Sato, [Kei-ichi Maeda](#), *Hybrid Higgs Inflation : The Use of Disformal Transformation*, DOI: [10.1103/PhysRevD.97.0835](#), Physical Review **D97**, 2018, 083512, 査読有

Katsuki Aoki, [Kei-ichi Maeda](#), Yosuke Misonoh, Hirotada Okawa, *Massive Graviton Geons*, DOI: [10.1103/PhysRevD.97.044005](#), Physical Review **D97**, 2018, 044005, 査読有

Ken-ichi Nakao, Hirotada Okawa, [Kei-ichi Maeda](#), *Non-linear collisional Penrose process: How much energy can a black hole release?*, DOI: [10.1093/ptep/ptx170](#), Prog. Theor. Exp. Phys, **2018**, 2018, 013E01, 査読有

Katsuki Aoki, [Kei-ichi Maeda](#), *Condensate of Massive Graviton and Dark Matter*, DOI: [10.1103/PhysRevD.97.044002](#), Physical Review **D97**, 2018, 044002 査読有

Sirachak Panpanich, [Kei-ichi Maeda](#), Shuntaro Mizuno, *Cosmological Dynamics of D-Brane and DBI Scalar Field and Coincidence Problem of Dark Energy*, DOI: [10.1103/PhysRevD.95.103520](#), Physical Review **D95**, 2017, 103520 査読有

Shoichiro Miyashita, [Kei-ichi Maeda](#), *AdS Monopole Black Hole and Phase Transition*, DOI: [10.1103/PhysRevD.94.124037](#), Physical Review **D94**, 2016, 124037, 査読有

Mitsuhiro Fukushima, Shuntaro Mizuno, [Kei-ichi Maeda](#), *Gravitational Baryogenesis after Anisotropic Inflation*, DOI: [10.1103/PhysRevD.93.103513](#), Physical Review **D93**, 2016, 103513 査読有

[Kei-ichi Maeda](#), Kunihito Uzawa, *Dynamical angled brane*,

DOI: [10.1103/PhysRevD.94.126016](#), Physical Review **D94**, 2016, 126016, 査読有

Katsuki Aoki, Kei-ichi Maeda, Makoto Tanabe. "Relativistic stars in bigravity theory," DOI: [10.1103/PhysRevD.93.064054](#), Physical Review **D93**, 2016, 064054, 査読有

[学会発表](計 24 件)

1. Kei-ichi Maeda, *Metric-Affine Gravity Theory and Inflation*, Workshop on Cosmology and the Quantum Vacuum ( Benasque , Spain ) [招待講演], 2018 年 9 月 3 日
2. Kei-ichi Maeda, *Metric-Affine gravity theory and acceleration of the Universe*, 5th Korea-Japan workshop on dark energy( Dejeon, Korea ) [招待講演], 2018 年 8 月 8 日
3. Kei-ichi Maeda, *Massive Graviton Geons and Dark Matter*, Workshop on Frontiers in Gravitation, Astrophysics, and Cosmology (ICNFP 2018) (Crete, Greece) [招待講演] 2018 年 7 月 9 日
4. Kei-ichi Maeda, *Massive Graviton Geon in Bigravity Theory*, Fifteenth Marcel Grossmann Meeting MG15 ( イタリア、ローマ ) [招待講演], 2018 年 7 月 5 日
5. 佐藤慎太郎, 前田恵一, 「熱場の量子論に基づく相対論的流体力学の基礎方程式について」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 ( 2018 年 9 月 10 日 ) 同志社大学
6. 岡林一賢, 大川博督, 前田恵一, 「自転粒子の衝突ペンローズ過程のエネルギー効率」, 日本物理学会第 73 回年次大会 ( 2018 年 3 月 22 日 ) 東京理科大学 ( 野田キャンパス )
7. 宮下翔一郎, 前田恵一, 「Yang-Mills BH の内部とその complexity growth について」, 日本物理学会第 73 回年次大会 ( 2018 年 3 月 22 日 ) 東京理科大学 ( 野田キャンパス )
8. 青木勝輝, 前田恵一, 御園生洋祐, 大川博督, 「Massive Graviton Geons」, 日本物理学会第 73 回年次大会 ( 2018 年 3 月 25 日 ) 東京理科大学 ( 野田キャンパス )
9. 安東正樹他, 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 (90):DECIGO/B-DECIGO の概要」, 日本物理学会第 73 回年次大会 ( 2018 年 3 月 25 日 )
10. 小林曜, 御園生洋祐, 前田恵一, 「曲率制限仮説に基づく修正重力理論におけるバウンス宇宙」, 日本物理学会第 73 回年次大会 ( 2018 年 3 月 25 日 )
11. 佐藤星雅, 前田恵一, 「Higgs Inflation 後の再加熱機構への運動項重力結合による影響」, 日本物理学会第 73 回年次大会 ( 2018 年 3 月 25 日 )
12. Kei-ichi Maeda, *Black Holes in the Universe from Higher Dimensions*, Brinsop Meeting for Stephen Hawking ( 英国、Brinsop ) [招待講演], 2017 年 9 月 14 日
13. Kei-ichi Maeda, *Matter coupling and the coincidence problem*, 4th Korea-Japan joint workshop on Dark Energy at KMI ( 名古屋大学 ) [基調講演], 2017 年 8 月 29 日
14. Kei-ichi Maeda, *Inflation and Disformal Transformation*, International Conference on Gravitation : Joint Conference of ICGACXIII and IK15( 韓国、ソウル ) [招待講演], 2017 年 7 月 5 日
15. Kei-ichi Maeda, *Inflation and Disformal Transformation*, The 2017 Annual meeting of the Division of Gravitation and Relativistic Astrophysics of the Chinese Physical Society / The Fifth Galileo-Xu Guangqai Meeting, ( 中国、成都 ) [招待講演], 2017 年 6 月 28 日
16. 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
17. 安東正樹他, 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画(78):DECIGO/B-DECIGO の概要」, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 18 日、大阪大学
18. 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
19. 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
20. 佐藤星雅, 前田恵一, Richard Easter, Nathan Musoke, 「Hybrid Higgs Inflation」日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21 日、宮崎大学
21. 前田恵一, 鶴沢報仁, 「Dynamical angled brane」日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 22 日、宮崎大学
22. 安東正樹他, 「スペース重力波アンテナ DECIGO 計画 ( 73 ) : 概要」日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 24 日、宮崎大学
23. Kei-ichi Maeda, *Chaotic dynamics of a classical string on Ads black hole spacetime*, Black Hole New Horizons (CMO(Oaxaca), Mexico) [招待講演], 2016 年 5 月 16 日
24. Kei-ichi Maeda, *The Use of Disformal Transformation*, 3rd Korea-Japan Workshop on Dark Energy (Daejeon, Korea)[招待講演], 2016 年 4 月 4 日

## 6 . 研究組織

### (2)研究協力者

研究協力者氏名 : John Barrow 教授 (英 Cambridge 大)  
Gary Gibbons 教授 (英 Cambridge 大)  
Alexei Starobinsky 教授 (露 Landau 研)

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、研究者個人に帰属されます。