

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2009

課題番号：19540308

研究課題名（和文） ダークエネルギーと重力理論

研究課題名（英文） dark energy and gravitational theory

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、現代宇宙論における最も重要な課題「ダークエネルギー問題」に対して、[(1) 物質としてのダークエネルギーの可能性、(2) 重力理論の違いが見かけ上のダークエネルギーを示唆する可能性、(3) その他のより自然なモデルの可能性]の3つのアプローチから総合的な解析を行い、特にブラックホールや中性子星など強重力天体とダークエネルギーの共存系の解析が重要であることを指摘した。

研究成果の概要（英文）：We study the so called “dark energy problem”, which is one of the most important subjects of modern cosmology, from three approaches: (1) exotic fluid of dark energy (2) modified gravity theories (3) the possibility of other natural models. We have pointed out that it is important to analyze a strong gravitational system such as a black hole or a neutron star which is coupled to dark energy.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：

科研費の分科・細目：物理学・宇宙物理

キーワード：1) ダークエネルギー 2) 重力理論 3) 宇宙論 4) 非一様宇宙 5) 加速膨張  
6) ブラックホール 7) インフレーション 8) 超弦理論

## 1. 研究開始当初の背景

20世紀に提唱されたビッグバン宇宙論は、さまざまな観測により検証されてきた。そして、近年、WMAPなどの大型観測プロジェクトの成果によって精密科学となった。このビッグバン宇宙論は現代科学の金字塔と言っても過言ではないが、その成功は宇

宙論や基礎科学に新たに大きな課題をもたらすことになった。その課題とはよく知られたダークエネルギー問題である。最近のいくつかの観測は現在の宇宙が加速膨張していることを示唆している。しかしながら、ビッグバン理論の基礎となったアインシュタイン理論では、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7割強を占め、宇宙定数のような性質を持っていることがわかっている。宇宙定数は、1917年、静的宇宙を理論的に可能にするためにアインシュタインによって導入されたが、膨張宇宙論が確かなものになるとアインシュタインは「生涯最大の失敗」と取り下げた。その後、何度か宇宙論の舞台に登場するが、その最も重要なものはインフレーション理論であろう。真空のエネルギーが宇宙定数と等価な役割をし、宇宙初期の多くの問題を解決することとなったその理論は、密度ゆらぎの起源を理論的に説明可能にしたことで、現在では観測との整合性が議論されるまでになっている。しかしながら、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考え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極めて小さく( $10^{-3}$  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、当然、宇宙論学者をはじめとして多くの科学者がその問題解決に取り組んでいる。それらのアプローチは大きく分けて次の3つに分類される。

(1) 宇宙を構成する物質の大部分(70%強)が宇宙定数のような特異な物質だと考える。これには時間変化するスカラー場のようなものもその候補に含まれる。具体的なモデルとしては、宇宙定数以外にクイッテセンス場やファントム場などが挙げられる。

(2) 宇宙のような大規模スケールでは、重力はアインシュタイン理論ではなく別の重力理論で記述されると考える。ところが、観測結果は一般相対性理論を基礎にしたフリードマン方程式が正しいとして解析される。そこで別の重力理論で宇宙論を考えた場合、それをフリードマン方程式の形に書き換えることにより、見かけ上宇宙定数のような特異な物質が存在するようになるのがアイデアである。この場合、物質としてのダークエネルギーは存在しないことになる。

(3) その他。上の2つのアプローチが主なものであるが、それ以外にもいくつかの試みがある。その一つが宇宙の非一様性効果

である。現実の宇宙には、銀河・銀河団やヴォイドなどの構造が存在し、厳密には一様な物質分布をしていない。一様・等方宇宙の仮定から導かれるフリードマン方程式は、本当は非一様宇宙の平均化の結果として導出されるべきである。その場合、非一様性の高次効果も補正として有効フリードマン方程式に含まれると考えられ、それらの影響が見かけの効果として加速膨張をもたらさないかという考えがある、現実的な宇宙モデルは未だにつくられていない。

## 2. 研究の目的

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モデルの理論的解析を、また近年は、新しい宇宙モデルであるブレインワールドの理論的研究を行ってきた。それらの研究の基礎として、一般相対性理論や他の重力理論の研究を中心課題としてきた。特に、ブレインワールドの基礎となる高次元重力理論の研究では、注目されている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、その分野の第一線で研究を遂行してきた。またその経験を大いに生かし、近年のブレイン宇宙論に関しても初期の段階から重要な成果を挙げてきている。そのような状況で、現在の加速膨張の観測が重力理論の研究と重要な関係を持っている可能性を認識し、これまでの研究成果や研究能力をその研究に大いに生かすことができるのではと考えるに至った。現在の加速膨張は、小規模なインフレーションとも言われており、その点でも申請者のこれまでの研究を大いに生かすことができると考えられる。

特に本研究で明らかにしたいことは上記の3つのアプローチに沿ったものである。

(1) クイッテセンス場やファントム場に代表されるように加速膨張をもたらすスカラー場のダイナミクスを系統的に取り扱い、その理論がダークエネルギーの候補としてもっともらしいものになるかを調べる。この場合、宇宙論だけでなくそのような場の存在する場合のブラックホールなどの強重力場現象の解析も行う。その研究はダークエネルギーが「物質」起源であるかどうかを決定する観測的根拠を示す可能性がある。申請者はこの分野の第一線で活躍している藤井保憲氏と共著でスカラーテンソル重力理論(Cambridge Univ. Press)に関する著書

を2003年に執筆しており、その知識や研究能力を本研究に十分生かすことができると考える

(2) アインシュタインの一般相対性理論は実験・観測と非常によく一致し、それを疑う理由はないが、あくまでそれは太陽系近傍および連星パルサーに限った話である。宇宙全体のスケールを考える場合にまでそれが正しいという根拠はない。実際に、素粒子統一理論や量子補正を加えた有効理論では曲率の高次項が現れたり、ブレイン高次元宇宙モデルでは一般相対性理論が成立するのはあるスケールの範囲だけである。宇宙スケールでの有効重力理論がはっきりとわかっていない現時点では、ダークエネルギーを説明するためにいろいろなタイプの重力理論が乱立しており、どのようなモデルがもっとも正しいかを正しく判断する基準はまだない。申請者は、以前から一般相対性理論を拡張した重力理論を取り扱っており、宇宙初期のインフレーションモデルなどを系統的に論じてきている。その研究で発見された共形変換（及びそれを一般化したルジャンドル変換）を用いる方法は、本研究においても十分に有効な手段となりうる。また申請者は、ブレイン宇宙研究を通して、高次元重力理論の研究に十分長じている。その研究成果は、素粒子統一理論に基づいた新しいタイプの重力理論をダークエネルギー問題に適用する場合に十分に生かすことができる。

(3) ダークエネルギー問題は確かに説明するのが非常に難しい問題ではあるが、もしそれが宇宙の非一様性の見かけ上の効果のようなことで説明できれば、「未知の理論」に問題を転化する必要はないのもっとも望ましいと考えられる。前にも述べたが、これまでの研究からは、非一様性の単純な平均化は必ずしも宇宙定数のようには振る舞わないことがわかっている。しかしながら、複雑系などのアプローチでもわかっているように、スケールが大きく変化するとその基礎理論が大きく変更を受ける可能性がある。そこで本研究では、一般相対性理論における非一様性の平均化をより基礎的な観点から考察し、その結果得られた有効重力理論がダークエネルギー問題解決の糸口を与える可能性について考察する。以上の研究に基づき、ダークエネルギーの理論としてどのアプローチがもっとも有望であるかを総合的に判断するのが本研究の

目的である。

### 3. 研究の方法

重力の新しいアプローチであるブレインワールドの研究を2002-06年度まで科研費によって行っている。特に、2回目の科研費においては、ダークエネルギーなど宇宙論における最重要課題に対してブレイン宇宙論の立場から取り組んでいたため、今回の研究遂行に非常に役立つと考えられる。また、その分野の第一線の日英や日仏の研究者による共同研究（二国間交流事業共同研究）を通して、最先端の情報や研究内容を取り入れている。

これらの準備の元に、本研究における研究方法は以下のようにまとめられる。

研究目的においてダークエネルギー研究には大きく分けて3つのアプローチがあるといったが、本研究ではそれらを系統的に取り扱う。第一のアプローチは主にスカラー場のダイナミクスが対象になるが、これまでのインフレーション研究等の方法を駆使してダークエネルギーであるための条件、可能性、自然さなど総合的な観点から解析を行う。また、宇宙論だけではなく、強重力現象、特にブラックホールとダークエネルギーの共存系についても調べる。具体的には、ダークエネルギーの満ちた宇宙の中のブラックホールがどのような影響を受けるのか、観測的に特異な現象または特徴的な現象が伴うのかを調べる。この研究はこれまであまり行われて来なかったが、宇宙観測が精密科学になりつつある現代においては、観測可能性も含め理論的に明らかにしておく必要があると考える。

ダークエネルギーを重力理論の問題としてとらえる第2のアプローチにおいては、申請者はこれまでプランク・ディッケ理論を代表とするスカラーテンソル理論をはじめとして一般相対性理論を拡張したいろいろな重力理論の研究を行ってきた。また、超ひも理論やM理論などの素粒子統一理論に基づく宇宙論・ブラックホールの研究も第一線で重要な成果を挙げている。さらにこれらの研究を通して、多くの理論の統一的解析を可能にする共形変換（及びさらに一般化したルジャンドル変換）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。本研究ではこれらの手法を提案されている数多くの理論に適用し、

ダークエネルギーの説明としての理論の整合性や可能性・自然さの研究など、総合的な解析を行う。

また、本研究では第3のアプローチも探る。「研究目的にも述べた非一様宇宙の『平均化』がダークエネルギーまたは加速膨張を説明可能かどうか」について総合的な観点からその可能性を探る。このアプローチの興味深い点は、未知の物質や重力理論を導入しないということもあるが、非一様な物質がその起源になっているとすれば、その効果は現在の物質密度と密接に関係するであろうという点である。宇宙定数であればその値がなぜ現在の宇宙密度に近いのかという疑問に答えられないが、非一様性起源であれば極めて自然にこの問題は解決される。残念ながらこれまでの研究では非常に不自然な設定のもとで見かけ上の加速膨張が現れるだけで、現在の加速膨張は説明できていない。単純な平均化では、非一様効果はフリードマン方程式の曲率項の補正として入るだけである。しかしながら、アインシュタイン方程式の平均化法は共形不変な形式ではまだ与えられておらず、これまでに得られた結果にも不定性が残る。そこで本研究では、まずこれまでの平均化法についてサーベイを行い、それらの長所・短所を明らかにし、ダークエネルギー研究に適切だと考えられる平均化法を開発する。

その一方で、重力理論に関する新たなアプローチを探る。アインシュタインの一般相対性理論は太陽系近傍の観測・実験から非常によい精度で正しいことがわかっている。しかしながらアインシュタイン自身が最後まで満足しなかったように、左辺（アインシュタインテンソル）と右辺（エネルギー運動量テンソル）のバランスがよくない。左辺は重力が幾何学的に美しくまとめられているのに対し、右辺は重力以外を十把一絡げにエネルギー運動量テンソルとしてまとめてしまっている。そのような理論が本当に最も基本的な方程式なのであるか。B.-L. Hu 博士は面白い考えを提唱している。ナビエ・ストークス方程式は流体の基礎方程式ではあるが、原子・分子が見えてくるようなミクロなスケールを見ると、当然それは正しくない。ナビエ・ストークス方程式は減少を非常によく記述するが、マクロスケールの有効理論なのである。Hu 博士は、アインシュタイン方程式はナビエ・ストークス方程式のような現象論的有

効理論ではないかというのである。彼は「だから、重力場の量子化は時空の量子化を意味しない」と推測する。このアインシュタイン方程式を有効理論とする考え方は新しい方向性を示唆する。たとえば、通常の解釈では真空のエネルギーはエネルギー運動量としてアインシュタイン理論に入ってくるが、有効理論では量子論が絡んだ真空のエネルギーがどのようにアインシュタイン方程式に組み込まれるかという自由度があるかもしれない。その結果ダークエネルギーは真空のエネルギーで自然に理解できるかもしれない。また、重力理論は、ミクロな量子重力レベルでもよくわかっていないが、逆に超巨視的な宇宙のスケールでもわからないかもしれない。そしてその解明がダークエネルギー問題解決につながると考えることもできる。非一様性の平均化による有効フリードマン方程式の研究もこの方向の一つと見ることができる。本研究では、その視点をさらに広げて、巨視的スケールの重力理論の問題としてダークエネルギーの正体に迫りたい。

#### 4. 研究成果

ビッグバン宇宙論は現代科学の金字塔と言えるほど非常に成功した理論であるが、その成功は宇宙論や基礎科学に新たに大きな課題「ダークエネルギー問題」をもたらした。本研究では、3つのアプローチ [(1) 物質としてのダークエネルギーの可能性、(2) 重力理論の違いが見かけ上のダークエネルギーを示唆する可能性、(3) その他のより自然なモデルの可能性] からこのダークエネルギー問題の解明に取り組んだ。その結果、(1)と(2)の2つのアプローチは拮抗しており、それらについてより具体的なモデルの解析が必要であるとの結論に達し、以下の研究を行った。第一のアプローチは主にスカラー場のダイナミクスが対象になるが、これまでのインフレーション研究等の方法を駆使してダークエネルギーであるための条件、可能性、自然さなど総合的な観点から系統的な解析を行った。また、宇宙論だけではなく、強重力現象、特にブラックホールとダークエネルギーの共存系についても調べている。具体的には、超紐理論を基礎にした交差ブレイン解を時間依存した場合に拡張し、膨張宇宙中のブラックホール解を構成した。さらにこの解を一般化した「ダークエネルギー中のブラックホー

ル解」の構成にも成功し、その時空構造を詳細に解析した。第二のアプローチにおいては、これまでに行ってきたスカラテンソル理論や超弦理論・M理論などの素粒子統一理論などの一般相対性理論を拡張したいろいろな重力理論の研究手法、特に、共形変換（及びさらに一般化したルジャンドル変換）を用いた解析法を、提案されている数多くのダークエネルギーモデルに適用し、ダークエネルギーの説明としての理論の整合性や可能性・自然さの研究など、総合的な解析を行った。特に、スタロピンスキー達が提唱している  $f(R)$  重力理論を基礎に中性子星の存在可能性について解析し、これらの理論の問題点を明らかにした。まとめると、本研究ではダークエネルギー問題に対し、3つのアプローチから総合的な解析を行い、特にブラックホールや中性子星など強重力天体とダークエネルギーの共存系の解析が重要であることを指摘した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 21 件)

- 1) 前田恵一、太田信義、田辺誠、分部亮、**Supersymmetric intersecting branes on the waves**, Journal of High Energy Physics, 査読有、1004, 013, 2010
- 2) Gary W. Gibbons, 前田恵一、**Black holes in an expanding universe**, Physical Review Letters, 査読有、104:13110 1, 1-4, 2010
- 3) 前田恵一、野沢真人、**Black hole in the expanding universe from intersecting branes.**, Physical Review, 査読有、D81, 044017, 2010
- 4) 前田恵一、太田信義、笹川幸則、**Black hole solutions in string theory with Gauss-Bonnet curvature correction.**, Physical Review, D80, 104032, 2009
- 5) Gary W. Gibbons, 前田恵一、宮本雲平、**The Bernstein conjecture, minimal cones, and critical dimensions.** Classical Quantum Gravity, 査読有、26, 185008, 2009
- 6) 日置健太、前田恵一、**Measurement of the Kerr spin parameter by observation of a compact object's shadow.** Physical Review, 査読有、D80, 024042, 2009
- 7) 前田恵一、太田信義、鶴沢報仁、**Dynamics of intersecting brane systems - Classification and their applications-**, Journal of High Energy Physics, 査読有、0906, 051, 2009
- 8) 前田恵一、太田信義、田辺誠、分部亮、**Supersymmetric intersecting branes in time-dependent backgrounds.**, Journal of High Energy Physics, 査読有、0906, 036, 2009
- 9) 前田恵一、藤井保憲、**Attractor universe in the scalar-tensor theory of gravitation.**, Physical Review, 査読有、D79, 084026, 2009
- 10) 前田恵一、宮本雲平、**Black hole-black string phase transitions from hydrodynamics.** Journal of High Energy Physics, 査読有、0903, 066, 2009
- 11) 小林努、前田恵一、**Can higher curvature corrections cure the singularity problem in  $f(R)$  gravity?**, Physical Review, 査読有、D79, 024009, 2009
- 12) 前田恵一、**Collision of domain walls and creation of matter in brane world.** Prog.Theor.Phys.Suppl. , 査読有、172, 90-99, 2008
- 13) 小林努、前田恵一、**Relativistic stars in  $f(R)$  gravity, and absence thereof.**, Physical Review, 査読有、D78: 064019, 2008
- 14) 宮本雲平、前田恵一、**Liquid Bridges and Black Strings in Higher Dimensions.**, Physics Letters, 査読有 B664:103-106, 2008
- 15) 浦川優子、前田恵一、**One loop Corrections to Scalar and Tensor Perturbations during Inflation in Stochastic Gravity.** Physical Review, 査読有、D78 : 064004, 2008
- 16) Rong-GenCai, Chiang-MeiChen, 前田恵一、太田信義、Da-WeiPang, **Entropy Function and Universality of Entropy-Area Relation for Small Black Holes.** Physical Review, 査読有、D77:064030, 2008
- 17) 浦川優子、前田恵一、**Cosmological Density Fluctuations in Stochastic Gravity - Formalism and Linear Analysis -.** Physical Review D77:024 013, 2008
- 18) 田辺誠、前田恵一、**Stationary spacetime from intersecting M-branes.** Journal of Physics, 査読有、A40:7 025-7030, 2007
- 19) 木内健太、小山博子、前田恵一、**Gravitational Wave Signals from Chaotic System: A Point Mass with A Disk.** Physical Review, 査読有、D76 :024018, 2007
- 20) 高水裕一、工藤秀明、前田恵一、**Dyn**

amics of colliding branes and black brane production. Physical Review, 査読有、D75:061304,2007

- 2 1) Gary W. Gibbons、前田恵一、高水裕一、**Fermions on colliding branes**, Physics Letters 査読有、B647:1-7, 2007

[学会発表](計20件)

- 1) 笹川幸則、前田恵一、太田信義、**Dilatonic Lovelock 重力理論における AdS 時空解及び漸近的 AdS ブラックホール解**, 日本物理学会、2010.3.20、岡山大学
- 2) 野澤真人、前田恵一、**交差ブレインによる膨張宇宙におけるブラックホール解**, 日本物理学会、2010.3.20、岡山大学
- 3) 前田恵一、**Black Holes in and from Higher Dimensions(招待講演)** 基礎研究会「高次元 Black Hole 研究最前線」2009.12.26、京都大学
- 4) 前田恵一、**Time-dependent Black Holes in Supergravity Theories (招待講演)** Black Holes VII, Theory and mathematical aspects 2009.5.11、Banff, Canada
- 5) 前田恵一、**Cosmology and black holes in string theory(招待講演)** New topics in Modern Cosmology, Spontaneous Workshop III 2009.4.27、Cargese, France
- 6) 日置健太、前田恵一、「影」観測による Kerr ブラックホールおよび裸の特異点の角運動量の決定、日本物理学会、2009.3.30、立教大学
- 7) 小林努、前田恵一、**Relativistic stars in f(R) gravity, and absence thereof**, 日本物理学会、2009.3.30 立教大学
- 8) 笹川幸則、前田恵一、太田信義、**Einstein Gauss-Bonnet dilaton モデルにおけるブラックホール解のフレーム依存性の解析**, 日本物理学会 2009.3.29、立教大学
- 9) 前田恵一、**Dynamics of intersecting branes and cosmology(招待講演)** 第二回 超弦理論と宇宙研究会、2009.2.20 城崎温泉
- 10) 前田恵一、**Cosmology in Higher Dimensions (招待講演)** The 7th RESCEU International Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology, 2008.11.13、東京大学
- 11) 分部亮、前田恵一、**Analysis of Supersymmetric Brane System in**

**Cosmological Background**, 日本物理学会、2008.9.22、山形大学

- 1 2) 前田恵一、**Beyond the Einstein-Hilbert Action (招待講演)** The 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON GRAVITATION & COSMOLOGY、2007.12.19、IUCAA, Pune, India
- 1 3) 前田恵一、**Collision of Domain Walls and Matter Creation in Brane World (招待講演)** International Workshop on String Theory and Cosmology, 2007.11.8, KITPC, Beijing, China
- 1 4) 前田恵一、**Black Holes in Superstring Theory (招待講演)** KIAS-YITP joint workshop on String phenomenology and cosmology, 2007.9.26, YITP, 京都大学
- 1 5) 笹川幸則、前田恵一、太田信義、**Black hole solutions in supergravity with string corrections**, 日本物理学会、2007.9.24、北海道大学
- 1 6) 高水裕一、工藤秀明、前田恵一、**ブレイン衝突によるブラックレイン形成**, 日本物理学会、2007.9.23 北海道大学
- 1 7) 浦川優子、前田恵一、**Quantum corrections to the primordial perturbations**, 日本物理学会、2007.9.23、北海道大学
- 1 8) 田辺誠、前田恵一、**M ブレインによる non-BPS 二軸回転ブラックブレイン解の構築**, 日本物理学会、2007.9.23、北海道大学
- 1 9) 前田恵一、**Collision of Domain Walls and Creation of Matter in Brane World (招待講演)** The 8-th ICGA on Gravitation and Astrophysics、2007.8.30、奈良女子大学
- 2 0) 前田恵一、**Black Holes and Black Rings in String/M Theory(招待講演)** Workshop on Frontiers of Black Hole Physics、2007.6.8, APCTP, Pohang, Korea

[図書](計1件)

- 1) 前田恵一、「**重力理論講義：相対性理論と時空物理学の進展**」(サイエンス社)2008年5月、181ページ

6. 研究組織

(1) 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