

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540290

研究課題名(和文) 高階微分を含む一般化重力理論と超弦理論の検証

研究課題名(英文) Generalized Gravity with Higher Order Derivatives, Superstring Theories and their Verification

研究代表者

太田 信義(OHTA, Nobuyoshi)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：90167304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：超弦理論との関連で興味を持たれる高階微分を含む重力理論において、一般的な背景時空の下で繰り込み群の紫外固定点を探し、種々の次元でこの種の理論は非自明な紫外固定点を持ち、漸近的安全性という性質を持つ理論になっていることを発見した。これは量子重力理論への重要な進展である。また、物理的応用として、電荷を持つブラックホール解を構成し、通常は正の宇宙項でしか存在しない加速膨張解(宇宙初期を記述する解)が負の宇宙項の場合にも存在することを示した。一方、重力子が質量を得るmassive gravity理論の無矛盾性を任意の背景時空の場合に一般的に示した。

研究成果の概要(英文)：We have found that there are nontrivial ultraviolet fixed points on arbitrary backgrounds in higher derivative gravity, which are hence asymptotic safe. This means that these theories can be ultraviolet complete quantum theories of gravity. As physical applications of higher derivative gravities, we have constructed charged black hole solutions in 4 to 10 dimensions as well as de Sitter cosmological solutions even for negative cosmological constant. The latter is viable solution for early cosmology. We have also shown the consistency of massive gravity under arbitrary backgrounds. These results give step towards verification of quantum gravity in this approach.

研究分野：素粒子論

キーワード：量子重力理論 高階微分 厳密くりこみ群 漸近安全性 紫外固定点 超弦理論

### 1. 研究開始当初の背景

重力の量子論を解明することは、理論物理学において解決を迫られている最も重要な問題の1つです。その有力な候補として、世界的にも国内でも超弦理論が活発に研究されていますが、その現実的な検証可能性を探る試みはあまりされておりません。その理由は、超弦理論の基礎がまだ完全に理解できていないことにもありますが、重力の量子効果が効いてくるような極限の状態が我々の日常の経験からはかけ離れたエネルギースケールであることにもよります。超弦理論で重力の効果を考える最も有効な方法は、その低エネルギー有効理論を考えることですが、この場合、一般相対論に対して高次微分項が必然的に存在することがわかっています。したがって、これらの項が具体的に宇宙論やブラックホールなどにどのような物理的効果を与えるかを調べ、検証することは重要な問題です。

一方で、超弦理論の範囲で宇宙初期のインフレーションモデルを得ることは、なかなか難しい問題であることが知られていますが、私は今まで高階微分項の効果を考えるとそれが可能であることを示し具体的な模型を作ってきました。また、ブラックホールの特異点)に対しても、それが改善する方向に作用することを示しています。これらの研究は、今までどちらかといえば純粋に理論的な観点から研究されてきた超弦理論が、具体的なブラックホール物理や宇宙論分野への応用もあることを示しており、素粒子論関係者だけでなく宇宙論関係者からも注目を受けています。このように高階微分項を考えることは物理的にも重要な効果をもちますが、3次元やそれ以上の次元における発展により、超弦理論より広い枠組みの中でユニタリーでくりこみ可能な理論を検討していくこと、それと超弦理論の関係を追求していくこと、さらにその理論特有の予言を検証していくことが非常に重要な問題であることがわかってきました。

### 2. 研究の目的

超弦理論は重力を含む前相互作用の統一理論の有力な候補であり、素粒子実験や宇宙論と整合的な大統一理論を4次元有効作用として含むことが示されています。しかしその現実的な検証の可能性はあまり追求されておりません。本研究では、その低エネルギー有効理論には高階微分項が存在することに注目し、より広い枠組みで高階微分を含んだ重力理論が物理的によい量子重力理論を与える可能性を追求し、一般相対論を越えた量子重力理論の構築の可能性を探るとともに、その引き起こす様々な特有の宇宙論的現象やブラックホールに及ぼす影響を理論的に研究し、検証していくことを目的とします。

### 3. 研究の方法

(1) 3次元の重力理論でユニタリーでくりこみ可能な理論はまだ完全に知られていません。そこでまず3次元で4次までの高階微分がある場合の完全な理論の分類を行い、それらがいかなるときに、なぜ量子論として意味を持つのかを明らかにします。さらに、量子論として意味を持つ3次元重力理論において、くりこみを行い、どのような量子効果が現れるのかを調べます。具体的には、量子論を考えて初めて得られる物理的な効果はあるのか、さらにくりこみ群の固定点はあるのかなどの問題を検討します。

(2) 4次元で可能な高階微分項)を考え、その臨界極限を取ったとき、ユニタリーな理論が可能かどうかを検討します。さらに、超弦理論との関連について検討します。このときに特にアインシュタイン項が通常と同じ符号に取れる可能性を追求します。なぜならば、そうでなければ、低エネルギーでアインシュタインの一般相対論に一致せず、また超弦理論の低エネルギー有効理論と考えることもできなくなるからです。またくりこみについて検討し、物理的な帰結を調べます。

(3) 前項の解析をさらに高次元に拡張します。この場合は、さらに高階微分が必要になると考えられ、解析は難しくなりますが、コンピューターなどの助けを借りて行うことを考えます。これは超弦理論との関連を考える上で、さらに重要になると考えられます。

(4) これらの理論で、宇宙論やブラックホール解を考えたり、それらに対する量子効果を求めることにより、物理的な帰結や、その検証可能性を探ります。とくに量子重力理論として、宇宙初期やブラックホール特異点を解消できる可能性を検討します。これは、最も重要な課題であるので、上記の課題と平行しつつ進めていきたいと考えます。

### 4. 研究成果

(1) 3次元の高階微分を含む重力理論において、背景時空が球面になっている場合にくりこみ群の紫外固定点を探求した。その結果、紫外固定点が確かに存在し、重力の量子論として意味のある理論になっていることを発見した。しかし残念ながらこの理論は、摂動論的にユニタリーな理論にはならないこともわかった。ついで、この成果を限られた背景時空の場合だけでなく、一般的な背景時空および任意の時空次元についての解析を進め、同様な結果を得た((5)参照)。これらの結果は今後重力の量子論や、ブラックホールの特異点などの解析に重要になると考えられる。

(2) 高階微分を含む理論はユニタリーでない可能性が高く、物理的な意味が不明である。高エネルギーではユークリッド的であるためユニタリー性に問題が無く、低エネルギーではアインシュタイン重力理論に一致するような理論があり、もしくりこみ可能であれ

ば、重力の量子論として重要になる。そのような理論として、スカラー場と結合した高階微分を含む重力理論を考え、それがくりこみ可能であることを示した。量子重力理論の重要な芳香性を与えると考えられる。

(3) 高階微分を含む超弦理論低エネルギー有効理論における電荷を持ったブラックホールで、漸近的に反ドジッター空間になる解を4次元以上10次元までの場合に構成し、その物理量などを求めた。これは、ゲージ/重力対応という関係を通じて物性系などへの応用が期待される解であり、この解により高次補正を含めて議論することができること期待される。

(4) 3次元の高階微分を含みくりこみ可能な理論を一般の背景場の場合に拡張して、くりこみ群の紫外固定点を求められる形式を整備した。この計算はさらに一般次元にも適用できる。その結果、(1)で求めた結果と同様に、やはり摂動的にユニタリーな理論は固定点に対応していないことがわかったが、一方で、調べた限りの次元でこの種の理論は非自明な紫外固定点を持ち、したがって漸近的安全性という性質を持つ理論になっていることを発見した。これはくりこみ可能性にかわる理論の無矛盾性を示唆する結果で、重要なものと考えている。

(5) 重力子が質量を得る massive gravity 理論の無矛盾性について、一般的な背景場における完全な理解を与えた。

(6) 重力の高階微分としてガウスボネ項を含み、かつ宇宙項を含む理論において、インフレーション解が存在しないか検討した。その結果、驚くべき事に、通常は正の宇宙項でしか存在しない加速膨張解(ドジッター解)が負の宇宙項の場合にも存在し、しかもそれは負の宇宙項の場合だけ安定になることがわかった。さらにこの結果を、高次の Lovelock 重力理論の場合へ拡張した。これらの解は、宇宙論解として有望である。

(7) 曲率の2次の項を含む重力理論において、計量の揺らぎを新しいやり方で定義して厳密くりこみ群の手法を用い、紫外で結合定数が非自明な固定点に収束することを示した。この性質は漸近的安全性と呼ばれる。この結果、この計量の新しいパラメトリゼーションは、今までのやり方にあった不備な点を改良し、物理的に意味のある結果を与える方法であることがわかった。

(8) スカラー曲率の任意関数  $f(R)$  に対して、漸近的安全性の条件は  $f(R)$  に対する微分方程式を与えることを発見した。今までそのような方程式が考えられていたが、非物理的な特異点があって意味のある結果が得られるかどうか不明であった。これに対し、我々の計量のパラメトリゼーションを用いた場合には、それまでの結果が改善され、厳密な解が存在することを示した。非常に面白いことに、この解析の結果、現在初期宇宙に起こったと考えられているインフレーションを与

える理論が、自然に出てくることを発見した。これは非常に広いクラスの理論空間で、漸近的安全性が満たされることを確かめたことになり、またそれが現実の宇宙を記述するものであることを示唆しており、このアプローチによる量子重力理論の定式化とその検証へさらに一步近づいたことになる。いずれも重力の量子論の検証に向けての前進と言える。

#### 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)

N. Ohta, R. Percacci and G. P. Vacca, "Renormalization Group Equation and scaling solutions for  $f(R)$  gravity in exponential parametrization, Eur. Phys. Jour. C, 査読あり, vol. 76, 2016, 46. doi:10.1140/epjc/s10052-016-3895-1

N. Ohta, Covariant Approach to the No-Ghost Theorem in Massive Gravity, Japan Physical Society Conference Proceedings, 査読あり, vol. 7, 2015, 010007. doi:10.7566/JSPSC.7.010007

N. Ohta, R. Percacci and G. P. Vacca, Flow equation for  $f(R)$  gravity and some of its exact solutions, Phys. Rev. D, 査読あり, vol. 92, 2015, 061501. doi:10.1103/PhysRevD.92.061501

N. Ohta and R. Percacci, Ultraviolet Fixed Points in Conformal Gravity and General Quadratic Theories, Class. Quant. Grav., 査読あり, vol.33, 2016, 035001. doi:10.1088/0264-9381/33/3/035001

K. Maeda and N. Ohta, Cosmic acceleration with a negative cosmological constant in higher dimensions, Jour. High Energy Phys., 査読あり, vol.1406, 2014, 095. doi:10.1007/JHEP06(2014)095

T. Kugo and N. Ohta, Covariant Approach to the No-ghost Theorem in Massive Gravity, Prog. Theor. Exp. Phys., 査読あり, vol. 2014, 2014, 043B04. doi:10.1093/ptep/ptu046

N. Ohta and R. Percacci, Higher Derivative Gravity and Asymptotic Safety in Diverse Dimensions, Class. Quant. Grav., 査読あり, vol. 31, 2014, 015024. doi:10.1088/0264-9381/31/1/015024

N. Ohta and T. Torii, Asymptotically AdS Charged Black Holes in String Theory with Gauss-Bonnet Correction in Various Dimensions, Phys. Rev. D, 査読あり, vol. 88, 2013, 064002. doi:10.1103/PhysRevD.88.064002

K. Muneyuki and N. Ohta,

Renormalization of Higher Derivative Quantum Gravity Coupled to a Scalar with Shift Symmetry, Phys. Lett. B, 査読あり, vol. 725, 2013, 495. doi:10.1016/j.physletb.2013.07.054  
N. Ohta, Dark energy and QCD ghost, Int. Jour. Mod. Phys. Conf. Ser., 査読あり, 07, 2012, vol. 194. doi:10.1142/S2010194512004266  
N. Ohta and T. Torii, Charged Black Holes in String Theory with Gauss-Bonnet Correction in Various Dimensions, Phys. Rev. D 査読あり, 86, 2012, vol. 104016. doi:10.1103/PhysRevD.86.104016  
N. Ohta, Beta Function and Asymptotic Safety in Three-dimensional Higher Derivative Gravity, Class. Quant. Grav., 査読あり, vol. 29, 2012, 205012. doi:10.1088/0264-9381/29/20/205012  
K. Muneyuki and N. Ohta, Unitarity versus Renormalizability of Higher Derivative Gravity in 3D, Phys. Rev. D, 査読あり, vol. 85, 2012, 101501. doi:10.1103/PhysRevD.85.101501  
K. Muneyuki and N. Ohta, Hawking Radiation and Tunneling Mechanism for a New Class of Black Holes in Einstein-Gauss-Bonnet Gravity, Eur. Phys. Jour. C, 査読あり, vol. 72, 2012, 1858. doi:10.1140/epjc/s10052-012-1858-8

[学会発表](計 20件)

太田信義, Asymptotic Safety and Quantum Gravity, 2015年10月24-25日, 5th CST & MISC Joint Symposium on particle Physics, 日本大学理工学部, 東京  
太田信義, Cosmic Acceleration with a Negative Cosmological Constant in Higher Dimensions, 2015年9月7-16日, The 19th annual International Conference on Particle Physics and Cosmology (COSMO-15), Warsaw, Poland  
太田信義, Asymptotic Safety and Quantum Gravity, 2015年8月8-16日, The second International Conference on Hot Topics in General Relativity and Gravitation, Quy Nhon, Vietnam  
太田信義, Cosmic Acceleration with a Negative Cosmological Constant in Higher Dimensions, 2015年1月20日, 4th Bangkok workshop on high energy theory, Bangkok, Thailand  
太田信義, Cosmic Acceleration with a Negative Cosmological Constant in Higher Dimensions, 2014年10月29日-11月5日, International conference

on New Trends in Field Theories, Banaras Hindu University, Varanasi, India

太田信義, Cosmic Acceleration with a Negative Cosmological Constant in Higher Dimensions, 2014年9月3-7日, Hangzhou workshop on Gravitation and Cosmology'', Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China

太田信義, Asymptotic Safety in Higher Derivative Gravity in Diverse Dimensions, 2014年5月25日-6月3日, KITPC workshop "Quantum Gravity, Black Holes and Strings" at KITPC, Beijing

太田信義, 九後汰一郎, Covariant Approach to the No-ghost Theorem in Massive Gravity, 2014年3月27日, 日本物理学会, 東海大学, 平塚市

太田信義, Covariant Approach to the No-ghost Theorem in Massive Gravity, 2014年3月15-16日, CST-MISC Joint International Symposium on Particle Physics -- from spacetime dynamics to phenomenology --, Nihon University, Tokyo, Japan.

太田信義, Asymptotic safety in higher derivative gravity in diverse dimensions, 2014年1月18-22日, 3rd Bangkok workshop on high-energy theory, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

太田信義, Higher derivative gravity and Asymptotic safety in diverse dimensions, 2013年11月4-6日, International Workshop on ``Theoretical Particle Physics 2013'', Amanohashidate, Amanohashidate-so, Kyoto, Japan.

太田信義, Roberto Percacci, Asymptotic safety in higher derivative gravity in arbitrary dimensions, 2013年9月23日, 日本物理学会, 高知大学, 高知市

太田信義, Asymptotic Safety in 3D and 4D Higher-derivative Gravity, 2013年6月9-15日, 2nd Mediterranean Conference on Classical and Quantum Gravity, Veli Losinj, Croatia.

太田信義, Asymptotic Safety in Higher-derivative Gravity, 2013年4月24-26日, Workshop on ``Topics in Holography, Supersymmetry and Higher Derivatives'', College Station, Texas A & M Univ., USA.

宗行賢二, 太田信義, 高階微分を含む重力理論のベータ関数と asymptotic safety, 2013年3月26-29日, 日本物理学会, 広島大学, 東広島市

太田信義, Asymptotic Safety in Higher-Derivative Gravity, Asia

Pacific School/Workshop on Gravitation and Cosmology 2013, 2013年2月19-22日, Jeju Island, Korea  
太田信義, Asymptotic Safety in Higher-Derivative Gravity, International conference on New Trends in Field Theories, 2012年11月23 - 27日, Banaras Hindu University, Varanasi, India  
太田信義, Beta Function and Asymptotic Safety in Three-dimensional Higher Derivative Gravity, International Workshop on "Theoretical Particle Physics 2012", 2012年9月24 - 26日, Iwaidoso, Asuka, Nara  
太田信義, Covariant approach to the no-ghost theorem in massive gravity, 2012年7月23 - 8月9日, YITP International Molecule-type Workshop "Nonlinear massive gravity theory and its observational test", Kyoto University, Kyoto  
太田信義, Accelerating Universes in String Theory via Field Redefinition, 2012年6月25 - 29日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences Workshop ``String Phenomenology 2012'', Cambridge Univ. , UK

6. 研究組織  
(1)研究代表者  
太田 信義 (OHTA Nobuyoshi)  
近畿大学・理工学部・教授  
研究者番号：90167304

(2)研究分担者 なし

(3)連携研究者 なし

〔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