

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26887018

研究課題名(和文)ホログラフィー原理に基づく初期宇宙模型の構築

研究課題名(英文)Building a model of early universe from holography

研究代表者

浦川 優子 (Urakawa, Yuko)

名古屋大学・高等研究院(理)・特任助教

研究者番号：80580555

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,350,000円

研究成果の概要(和文)：ゲージ/重力対応は、非摂動的現象の解析及び量子重力理論の構築などの観点から大きな期待が寄せられ、負の宇宙項をもつ反ドジッター時空において、これまで盛んに研究が行われてきた。本研究の目的は、ゲージ/重力対応を、宇宙初期のインフレーション期において検証することであった。本目的遂行のため、双対な場の理論における計算に基づき、多様なインフレーション模型の構築(Garriga, Skenderis, Y.U.)、一般共変性の帰結である保存則の検証(Garriga, Y.U.)、また派生研究である初期揺らぎの系統的計算方法の確立(Garriga, Y.U., Vernizzi)などの研究を行った。

研究成果の概要(英文)：The gauge/gravity correspondence, which describes the duality between (d+1) dimensional gravity theory and d-dimensional field theory, may provide us with an important tool to study a non-perturbative regime of gravity. The purpose of this study is to explore a possibility that the gauge/gravity correspondence may be applied to an inflationary universe, which is a rapid expansion phase in the early universe. For this purpose, I worked on a various model building of inflation from holography with J. Garriga and K. Skenderis, studied the validity of the conservation of  $\epsilon$ zeta, which is implemented by the general covariance, with J. Garriga, and as an application, established a systematic way of computing a primordial perturbations in multi-field models with a certain property with J. Garriga and F. Vernizzi.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：ゲージ/重力対応 インフレーション 宇宙論的摂動

## 1. 研究開始当初の背景

### [ゲージ/重力対応]

超弦理論は素粒子標準模型を構成するすべての要素を含むだけでなく、重力理論と量子理論を矛盾なく組み合わせることができるため、重力を含む統一理論として有望視されている。1997年、Maldacena によって、超弦理論の論理的整合性の仮定から導かれた反ドジッター時空/共形場理論(AdS/CFT)対応は、重力理論とゲージ理論という全く異なる理論に対し対応関係を与える驚くべき発見であった。この対応関係は、ゲージ/重力対応と呼ばれ、 $(d+1)$ 次元の重力理論と一次元低い  $d$ 次元の場の理論の間にホログラフィックな関係を与える AdS/CFT 対応では、量子化が困難な重力理論を、重力を含まない量子化可能な場の理論を用いて記述できるため、量子重力理論の構築に向けた指針を与えるのではないかと期待されている。一方、AdS/CFT 対応の手法は場の理論における大きな進歩をもたらすと期待され、様々な物理現象においてその適用可能性が検証され、有力な傍証が得られてきた。

[ゲージ/重力対応の宇宙論への応用の現状] AdS/CFT 対応の発見以降、ゲージ/重力対応の宇宙物理への応用が画策されてきた。反ドジッター (AdS) 時空と、加速膨張宇宙を記述するドジッター (dS) 時空は、数学的には非常によく似ている。この数学的類似性に基づき、2001年に Strominger 及び Witten は、dS 時空についても、共形場理論 (CFT) との双対性が存在するのではないかと、という仮説を発表した。この仮説は、2002年に Maldacena によって、より具体的に検証された。特に、この論文において、 $(d+1)$ 次元宇宙における重力理論と、 $d$ 次元の場の理論の間に双対性が存在したと仮定すると、二つの理論はどのように関係づけられているべきかが示された。この関係を用いて、対性の仮定のもと、片方の理論からもう一方の理論において起こる現象を、具体的に計算することが可能となった。一方、ゲージ/重力対応の宇宙論への応用における課題は、全てが双対性の仮定の上に立脚しており、その妥当性が、理論的な見地から十分検証できていないことにある。ゲージ/重力対応の発見後、加速膨張宇宙である dS 時空における応用例は、10年以上に渡り見つかっていなかった。しかし、2011年、Anninos らによって、dS 時空にお

けるゲージ/重力対応の初めての例が、Vasiliev 重力理論において示された。これまで見つかっている宇宙論への応用例はこの一例のみであるが、応用例があまり見つからないのは、単に技術的な困難によるものである可能性もあり、ゲージ/重力対応の宇宙論への応用可能性に関する理解の促進が望まれる。

## 2. 研究の目的

本課題を遂行することにより、宇宙進化において支配的な役割を果たしてきた重力法則の新規な視点に基づく理解の構築に努める。特に、宇宙論的な時空と場の理論の間の双対性を仮定した場合に、双対な場の理論が満たすべき性質を検証する。

AdS/CFT 対応では、重力理論の強結合極限が、双対な場の理論の弱結合極限に対応するという非自明な双対性が存在する。このために、場の理論の摂動計算に基づいた解析から、摂動論では解析できない摂動的重力現象に関する理論的予言が得られる可能性がある。これにより、宇宙論的なセットアップでは、非常に重力の強い初期宇宙の重力現象を、双対な場の理論の摂動計算に基づき解析できるのではないかと期待される。ゲージ/重力対応の宇宙物理への応用は、これまであまり調べられておらず、独創的な視点に基づいた本研究を遂行することにより、宇宙膨張の背後にある物理法則の解明に関して、重要な進展をもたらすと期待される。

## 3. 研究の方法

### ・一般共変性の検証について

一般相対性理論に代表される多くの重力理論の基本的な性質である一般共変性に着目し、双対な場の理論のどのような性質が、一般共変性を保証しているのかを調べることに取り組む。特に、重力理論において、一般共変性の帰結として、時間に関する保存量が存在することに着目し、この保存則が成り立つ条件を導出する。

### ・Superpotential を用いた揺らぎの定式化

場の理論が複数の異なる演算子を含む場合には、双対な宇宙模型において揺らぎの計算が非常に複雑になることが知られている。本研究では、superpotential と呼ばれる量を用いることにより、見通し良く揺らぎの計算

を行うことができないか検証していく。

#### ・ホログラフィー原理に基づくインフレーション模型の観測的検証

これまでホログラフィー原理の仮定のもと、双対な場の理論の計算からいくつかの初期宇宙模型が構築され、この模型において初期揺らぎの計算が行われてきた。宇宙背景輻射や大規模構造の観測から、初期揺らぎの分布関数に関する情報を得ることができる。特に、これまで、ホログラフィー原理の仮定のもと構築されたインフレーション模型では、小スケールに特徴的な性質を持っていることが知られている。この模型の観測的整合性の検証を行う。

#### 4. 研究成果

以下の三課題を遂行した。

##### ・一般共変性の検証について

3に記したように、重力を含む場の理論に基づく従来の計算では、曲率揺らぎは大スケールにおいて時間変化せず、その振幅は時間に関して保存することが示されている。曲率揺らぎの保存則は、一般相対性理論に代表される多くの重力理論の基本的性質である一般共変性の帰結であることが知られている。したがって、双対な重力を含まない場の理論においても、その基本的な性質により、曲率揺らぎの保存則が保証されるのではないかと予想される。この点について、検証した。

双対な場の理論においては、時間発展は繰り込み群のフローによって記述されるため、繰り込み群方程式を解くことにより、双対な場の理論において曲率揺らぎの保存則を検証した。その結果、曲率揺らぎが成立するためには、双対な場の理論が局所性と繰り込み可能性を保持している必要があることがわかった。この結果は、当初の予想を裏付けるものである。この研究は、Jaume Garriga 教授（バルセロナ大学）とともにを行い、Journal of Cosmology and Astrophysics に発表された。

この課題は、平成 26 年度に発表した論文

Jaume Garriga, 浦川 優子  
“Holographic inflation and the conservation of  $\mu$ ,”  
Journal of High Energy Physics 1406, 086, 2014  
の発展的研究である。

#### ・Superpotential を用いた揺らぎの定式化

宇宙の進化を記述する上で重要となるのが、曲率揺らぎと呼ばれる物理量である。我々はまず、曲率揺らぎの表式を、superpotential を用いることにより簡便に表せることを示した。また、superpotential が適当な対称性を持っていた場合には、数行の計算で簡単に曲率揺らぎの計算が可能となることを示した。この結果は、5に記載した論文に発表した。この課題は、J. Garriga 教授及び F. Vernizzi 教授との共同研究である。

#### ・多様なインフレーション模型の構築

従来のインフレーションの研究において、多様なインフレーション模型が提案されてきた。特に、超弦理論の低エネルギー有効理論である超重力理論では、典型的には複数のスカラー場が現れる。そこで、本研究では、双対な場の理論において複数の変形演算子を導入することにより、複数のスカラー場を含むインフレーション模型に双対な場の理論の構築を行った。また、この模型において繰り込み群の計算を行い、揺らぎの計算を行った。

#### ・ホログラフィー原理に基づくインフレーション模型の観測的検証

本課題は、田代寛之講師（名古屋大学）及び昨年度卒業した名古屋大学大学院の前田康太郎氏との共同研究である。

本課題では、小スケールの揺らぎを重点的に調べるため、宇宙背景輻射のプランク分布からのずれを表す  $\mu$  歪みの効果に着目し、模型に対する観測的制限を議論した。これまでの観測から、この模型では、将来観測において測定可能な程度の  $\mu$  歪みが生成されることがわかった。この結果は、近日中に論文としてまとめ投稿する予定である。

#### 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 6 件)

平成 28 年度

i) J. Garriga and Y. Urakawa,  
“Consistency relations and conservation of  $\mu$  in holographic inflation,”

Journal of Cosmology and Astrophysics 10, 030, 2016

ii) . Kobayashi, D. Nitta and Y. Urakawa,  
“Modular invariant inflation,”  
Journal of Cosmology and  
Astrophysics 8, 014, 2016

平成 27 年度

iii) T. Tanaka and Y. Urakawa,  
“Conservation of  $\zeta$  with radiative  
corrections from heavy field,”  
Journal of Cosmology and  
Astrophysics 6, 020, 2016

平成 26 年度

iv) Jaime Garriga, Y. Urakawa,  
Filippo Vernizzi “  
 $\delta N$  formalism from  
superpotential and holography”  
Journal of Cosmology and  
Astrophysics, 1602 (2016) 02, 036

v) J. Garriga, K. Skenderis and Y. Urakawa  
“Multi-field inflation from  
holography,”  
Journal of Cosmology and  
Astrophysics 1, 028, 2015

vi) J. Garriga, Y. Urakawa  
“Holographic inflation and the  
conservation of  $\zeta$ ”  
Journal of High Energy Physics 1406,  
086, 2014

[学会発表](計 12 件)

平成 28 年度

1) Conference: Why the universe  
accelerate?  
Date: 08/03/2017-10/03/2017 Place:  
Tsukuba, Japan  
Title: Inflation as a probe of string  
theory  
Collaborator: Tatsuo Kobayashi,  
Kazuhiro Kogai, Atsushi J. Nishizawa,  
Takahiko Matsubara, Daisuke Nitta,  
Takahiro Tanaka, Y. Urakawa

2) Conference: APCTP 2016 workshop on  
frontiers of physics  
Date: 12/12/2016-16/12/2016  
(Attended only from 14/12) Place:  
Pohang, Korea Title: Inflation as a  
probe of high energy physics

Collaborator: Tatsuo Kobayashi, Daisuke  
Nitta, Takahiro Tanaka, Y. Urakawa  
Note: Invited

3) Conference: Hidden sector Physics  
and Cosmophysics  
Date: 12/12/2016-15/12/2016  
(Attended only until 13/12) Place:  
Kyoto, Japan Title: Modular  
invariant inflation  
Collaborator: Tatsuo Kobayashi,  
Daisuke Nitta, Y. Urakawa

4) Conference: 26th Workshop on  
General Relativity and Gravitation  
(JGRG 26) Date:  
24/10/2016-28/10/2016 Place: Osaka,  
Japan  
Title: Soft theorem and conservation  
of  
Collaborator: Takahiro Tanaka, Y. Urakawa  
Note: Best presentation  
award

5) Conference: Theoretical cosmology  
in the era of large surveys Date:  
02/05/2016-06/05/2016 Place:  
Florence, Italy  
Title: Modular invariant inflation  
Collaborator: Tatsuo Kobayashi,  
Daisuke Nitta, Y. Urakawa

平成 27 年度

6) Workshop: Quantum gravity  
foundations: UV to IR  
Date: 30/03/2015-24/04/2015 Place:  
Santa Barbara, USA Title: Physics of  
infrared issues in inflation  
Collaborator: Takahiro Tanaka, Y. Urakawa

平成 26 年度

7) Conference: 24th Workshop on  
General Relativity and Gravitation  
(JGRG 24) Date:  
10/11/2014-14/11/2014 Place:  
Kashiwa, Japan  
Title: Inflation from holography  
Collaborator: Jaime Garriga, Y. Urakawa

8) Conference: Mini-workshop on  
in/around nonlinear massive gravity

Date: 07/11/2014 Place: Nagoya, Japan  
Title: UV completion, Lorentz violation, and IR physics  
Collaborator: Takahiro Tanaka, Sergey Sibiryakov, Y. Urakawa

9) Conference: DESY Theory Workshop Particle cosmology after Planck  
Date: 23/09/2014-26/09/2014 Place: Hamburg, Germany  
Title: Infrared physics of inflationary correlation functions  
Collaborator: Takahiro Tanaka, Y. Urakawa

10) Workshop: Modern Cosmology: Early universe, CMB, and LSS  
Date: 03/08/2014-16/08/2014 Place: Benasque, Spain  
Title: Infrared physics of inflationary correlation functions  
Collaborator: Takahiro Tanaka, Y. Urakawa

11) Conference: Frontiers of fundamental physics  
Date: 15/07/2014-18/07/2014 Place: Marseille, France  
Title: Infrared physics in inflation and primordial perturbations  
Collaborator: Takahiro Tanaka, Y. Urakawa

12) Conference: Hot topics in Modern Cosmology  
Date: 12/05/2014-17/05/2014 Place: Cargese, France  
Title: Holographic inflation and the conservation of the curvature perturbation  
Collaborator: Jaume Garriga, Y. Urakawa

〔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  
浦川優子, Yuko Urakawa  
名古屋大学高等研究院特任助教

研究者番号: 80580555

(2)研究分担者 (該当なし)

研究者番号:

(3)連携研究者 (該当なし)

研究者番号: