

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：32686

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K17707

研究課題名（和文）一般的なスカラー・テンソル理論にもとづく宇宙論・宇宙物理学の探究

研究課題名（英文）Exploring cosmology and astrophysics based on general scalar-tensor theories

研究代表者

小林 努 (KOBAYASHI, Tsutomu)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：40580212

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：一般的なスカラー・テンソル理論にもとづく宇宙論・宇宙物理学の諸側面について、多様な研究を展開した。特に、最新の重力波観測と整合的な修正重力理論に対し、宇宙論・宇宙物理学的な観点から制限を与えるための研究として、そのような理論における遮蔽機構を解析的に調べた。また、密度揺らぎの進化、相対論的天体の構造についての数値的解析もおこない、そのような修正重力理論の観測的・実験的検証可能性について議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

修正重力理論に対する理解が進んだことで、「重力を記述する基礎理論として、一般相対論はどの程度正しいのか？」という問いに対し、これまでよりも精度の高い回答を与えることができるようになった。特に、最新の重力波観測と関連させて重力理論の検証を狙ったところに科学的意義がある。理論物理学の研究は自然科学のきわめて基礎的な側面に關わるものであり、ただちに社会的意義に直結するものではない。

研究成果の概要（英文）：I have explored various aspects of cosmology and astrophysics based on general scalar-tensor theories called the Horndeski and beyond-Horndeski theories. Focusing in particular on modified gravity theories consistent with the latest gravitational-wave observations, I have studied the screening mechanism, the evolution of density perturbations, and the structure of relativistic stars in order to place new constraints on such theories.

研究分野：重力理論・宇宙論

キーワード：インフレーション 修正重力理論

1. 研究開始当初の背景

一般的なスカラー・テンソル理論であるホルンデスキ理論の理解は相当程度進んでいた一方で、それを超えて一般的なビヨンドホルンデスキ理論については、さまざまな研究を通じて理解を深めていく発展途上段階にあった。特に、ビヨンドホルンデスキ理論については、宇宙論・宇宙物理学への応用という点でもかなりの初期段階と言える状況であった。

2. 研究の目的

ホルンデスキ理論やビヨンドホルンデスキ理論にもとづく宇宙論・宇宙物理学の諸側面を研究し、興味深い応用例を提案する。例えば、初期宇宙に応用し、インフレーションモデルの新たな可能性を探る。また、最新の観測と照らし合わせて、これらの理論に対する制限を明らかにする。例えば、相対論的天体の解を求め、天文学的観測からこれらの理論に対しどのような制限を与えることができるのか検討する。

これらの研究により、「一般相対論は重力の基礎理論としてどの程度正しいのか？」という問いに対し、現状どこまでの回答が可能なのか、また、将来、どの程度まで精密な回答が可能になるのか、ということ明らかにすることが本研究の目的である。

3. 研究の方法

ホルンデスキ理論、ビヨンドホルンデスキ理論を初期宇宙モデルへ応用するため、スローロール展開において既存の研究で見逃されていた項を取り入れ、その背景ダイナミクスや摂動の進化に対する帰結を調べる。

最新の重力波観測と整合的な理論のクラスに限り、平坦時空周りでの摂動展開をおこなうことで遮蔽機構のはたらき方を明らかにする。太陽系実験や連星パルサーの観測などにもとづき、理論のパラメータに対しどの程度の制限を与えることが可能なのかを検討する。計算は解析的におこなうことが可能であるが、適宜数式処理ソフト Mathematica も利用し、正しい計算をおこなっているのか確認しながら進める。

膨張宇宙背景周りで同様の展開をおこない、密度揺らぎの進化が通常一般相対論にもとづく宇宙論と比べてどのように異なるのかを明らかにする。物質優勢宇宙初期には適切な近似法があり、解析的取り扱いが可能なる。これにより、現在の宇宙における制限とは相補的な、過去の宇宙における制限が得られる。

相対論的天体の構造を調べるため、摂動展開に頼らない球対称解を数値的に求め、理論のパラメータを変えた際に星の質量や半径がどのように変更されるのかを見る。計算は数式処理ソフト Mathematica を用いておこなう。

4. 研究成果

スカラー・テンソル理論にもとづく宇宙論・宇宙物理学のさまざまな側面について以下のような多様な研究を展開した。

- (1) 標準的なスロー・ロールインフレーションモデルにおけるスロー・ロール近似の仮定を外したモデルの考察；
- (2) 暗黒物質に擬態する重力理論の拡張と宇宙論への応用、その不安定性の考察；
- (3) ホルンデスキ理論をさらに拡張した理論を密度揺らぎから観測的に制限することを目指した基礎研究；
- (4) パリティ対称性を破る重力理論における重力波の伝播と、重力波観測による制限；
- (5) 新自由度を追加しないミニマルな一般相対論の修正理論の構築；
- (6) 2次元ディラトン重力の一般化；
- (7) 重力波観測と整合的な修正重力理論のスクリーニング機構の解析；
- (8) 重力波観測と整合的な修正重力理論における相対論的天体の数値解の構築；
- (9) 特徴的な原始重力波スペクトルを持つインフレーションモデルの研究。

以上の研究を通じて、特に、最新の重力波観測に照らし合わせて生き残っている修正重力理論に現状どのような制限を課すことができるか、また、将来、どのような制限を追加することができるのか、という点について、理解が進んだ。また、これらの研究を通じて、既存の研究において正当化の根拠に乏しい仮定が見つかり、今後、その点を追究していく必要があることも明確に

なった。ここまでの一連の研究成果は、レビュー論文にまとめられ、出版された。このレビュー論文は研究者コミュニティで重宝され、被引用回数も伸びている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hirano Shin'ichi, Kobayashi Tsutomu, Tashiro Hiroyuki, Yokoyama Shuichiro	4. 巻 97
2. 論文標題 Matter bispectrum beyond Horndeski theories	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.103517	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ogawa Hiromu, Hiramatsu Takashi, Kobayashi Tsutomu	4. 巻 34
2. 論文標題 Anti-screening of the Galileon force around a disk center hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Modern Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1950013 ~ 1950013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1142/S0217732319500135	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Tsutomu, Hiramatsu Takashi	4. 巻 97
2. 論文標題 Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.97.104012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tahara Hiroaki W. H., Nishi Sakine, Kobayashi Tsutomu, Yokoyama Jun'ichi	4. 巻 2018
2. 論文標題 Self-anisotropizing inflationary universe in Horndeski theory and beyond	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/07/058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nishizawa Atsushi, Kobayashi Tsutomu	4. 巻 98
2. 論文標題 Parity-violating gravity and GW170817	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.124018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iyonaga Aya, Takahashi Kazufumi, Kobayashi Tsutomu	4. 巻 2018
2. 論文標題 Extended cuscuton: formulation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 1~23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1475-7516/2018/12/002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akama Shingo, Kobayashi Tsutomu	4. 巻 99
2. 論文標題 General theory of cosmological perturbations in open and closed universes from the Horndeski action	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.043522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazufumi, Kobayashi Tsutomu	4. 巻 36
2. 論文標題 Generalized 2D dilaton gravity and kinetic gravity braiding	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Classical and Quantum Gravity	6. 最初と最後の頁 095003~095003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6382/ab1355	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirano Shin'ichi、Nishi Sakine、Kobayashi Tsutomu	4. 巻 2017
2. 論文標題 Healthy imperfect dark matter from effective theory of mimetic cosmological perturbations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JCAP	6. 最初と最後の頁 009 ~ 009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2017/07/009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazufumi、Kobayashi Tsutomu	4. 巻 2017
2. 論文標題 Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Phys. Rev. D	6. 最初と最後の頁 038 ~ 038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1475-7516/2017/11/038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shin'ichi Hirano, Tsutomu Kobayashi, Shuichiro Yokoyama	4. 巻 D94
2. 論文標題 Ultra slow-roll G-inflation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.103515	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsutomu Kobayashi	4. 巻 D94
2. 論文標題 Generic instabilities of nonsingular cosmologies in Horndeski theory: A no-go theorem	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.043511	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakine Nishi, Tsutomu Kobayashi	4. 巻 D95
2. 論文標題 Scale-invariant perturbations from NEC violation: A new variant of Galilean Genesis	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.064001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shingo Akama, Tsutomu Kobayashi	4. 巻 D95
2. 論文標題 Generalized multi-Galileons, covariantized new terms, and the no-go theorem for non-singular cosmologies	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.064011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Kazufumi, Motohashi Hayato, Suyama Teruaki, Kobayashi Tsutomu	4. 巻 95
2. 論文標題 General invertible transformation and physical degrees of freedom	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevD.95.084053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 小林努
2. 発表標題 Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林努
2. 発表標題 Parity-violating gravity and GW170817
3. 学会等名 第 7 回観測的宇宙論ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林努
2. 発表標題 一般相対論とその拡張
3. 学会等名 第 31 回理論懇シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林努
2. 発表標題 One-loop matter power spectrum beyond Horndeski
3. 学会等名 日本物理学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Scalar-tensor theories after GW170817 and relativistic stars in DHOST
3. 学会等名 MG15 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Scalar-tensor theories after GW170817 and relativistic stars in DHOST
3. 学会等名 MOGRA2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Relativistic stars in degenerate higher-order scalar-tensor theories after GW170817
3. 学会等名 Essential next steps for gravity and cosmology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Extended Cuscuton
3. 学会等名 Why does the Universe accelerate? -Exhaustive study and challenge of the future (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem
3. 学会等名 COSM017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Extended mimetic gravity: Hamiltonian analysis and gradient instabilities"
3. 学会等名 The first annual symposium of the innovative area "Gravitational Wave Physics and Astronomy: Genesis" (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Primordial non-Gaussianities of gravitational waves beyond Horndeski
3. 学会等名 21st International Conference on General Relativity and Gravitation (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Generic instabilities of non-singular cosmologies in Horndeski theory: a no-go theorem
3. 学会等名 JGRG26 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tsutomu Kobayashi
2. 発表標題 Generic instabilities of non-singular cosmologies in second-order theories: A no-go theorem
3. 学会等名 新学術領域「なぜ宇宙は加速するのか?- 徹底的究明と将来への挑戦 -」(国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----