

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340058

研究課題名(和文)重力波宇宙論の創成と展開

研究課題名(英文)Establishing Gravitational Wave Cosmology

研究代表者

横山 順一 (YOKOYAMA, Jun'ichi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50212303

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究計画によって、重力波を新たな観測手段として、それをを用いた宇宙論を本格的に創成して、電磁波観測では得られない初期宇宙に直接迫る方法を展開した。具体的には、曲率ゆらぎだけでなく、テンソルゆらぎ(量子的重力波)をプローブとして、最も一般的なインフレーションモデルを包括的に弁別する方法を与えることに成功した。また、格子上でのスカラー場の時間発展を数値的に追うことにより、初期宇宙でのスカラー場ダイナミクスから得られる重力波放射を、さまざまな場合について明らかにした。さらに、スペースレーザー干渉計DECIGOによって宇宙の熱史をどの程度明らかにできるか、定量的に解析した、等の成果を挙げた。

研究成果の概要(英文)：This project aimed to study a new formalism to clarify cosmology of the early Universe directly using gravitational waves as a new channel of observation and successful achieved it. We have succeeded in presenting a new scheme to probe the early Universe using not only curvature perturbations but also tensor perturbations or quantum gravitational waves for the purpose of selecting the appropriate inflationary universe model among the most general framework in which field equations are of second order. We have also developed a numerical code to simulate the evolution of the scalar field system in a three dimensional lattice and calculated spectrum of gravitational radiation from them in various circumstances. We have also clarified to what extent the future space-based laser interferometer DECIGO can probe the thermal history of the early Universe. Combining all these results, I have fully accomplished what I intended to do.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：重力波 宇宙論 インフレーション 位相的欠陥 相転移 DECIGO BICEP2

### 1. 研究開始当初の背景

自然界を支配する4つの基本相互作用のうち、重力はもっとも普遍的でありながら、他の相互作用に比べて桁外れに弱いため、重力波を直接観測することは現代物理学の積年の課題でした。しかし、わが国で LCGT すなわち KAGRA の建設がはじまり、米国の LIGO も advanced LIGO として第二世代を迎える中、連星中性子星系の合体などの天体物理起源の重力波の検出が数年以内に可能になるうとしてしています。さらにアインシュタイン望遠鏡のような第三世代の地上検出器や、新しいアイデアに基づく原子干渉計、そして LISA, DECIGO, BBO といった宇宙空間干渉計も長期計画として検討が進められています。

一方、宇宙論的重力波を測定するもう一つの手段として有望なのは、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光の B モードを活用する方法で、こちらも現在多くの観測計画が進んでいます。これによって現在のホライズンに数桁に迫る超長波長、超低周波の重力波の振幅が測定可能になります。これは宇宙干渉計等で測定できるヘルツ帯の周波数の重力波を較正する役割を果たします。

このように重力波は、天体物理はもちろんのこと、宇宙論にも役に立つと期待されます。

### 2. 研究の目的

本研究計画の目的は、このように多周波数帯の重力波の観測が可能になる時代を見据えて、これまで申請者が手がけてきた開拓的な研究から、重力波を用いた宇宙論を本格的に創成し、展開することです。それによって、電磁波観測では明らかにできない元素合成以前の宇宙の進化と熱史に迫ると共に、ダークマターやダークエネルギーの正体に対して、素粒子実験や光学観測では得られない有用な情報を与えることが目的です。特に宇宙論的重力波の起源を与えるインフレーションモデルや、インフレーションの生成する重力波に対して前景放射となる位相的欠陥・相転移の生成する重力波の生成機構とその宇宙論的帰結の研究を網羅的に行います。観測手段としては、CMB の B モード偏光と DECIGO などの将来の宇宙重力波レーザー干渉計を想定します。

### 3. 研究の方法

本研究計画で行う研究は、宇宙論的重力波源の研究と、そこから予言される重力波スペクトルによって得られる宇宙論的帰結の研究、の二種類に大別できます。前者については、膨張宇宙におけるスカラー場の運動の数値シミュレーションとその際発生する重力波の数値解析が主たる方法論です。後者については、解析的計算が中心となります。各具体的なテーマにおいて用いた方法は以下の通りです。

(1) 大振幅のテンソルゆらぎ(量子的重力波)を生成するインフレーションモデルの構築: まず最も一般的かつ安定的なインフレーションモデルを構築し、それに基づいて、

どのような場合にテンソルゆらぎが B モード偏光によって観測できるか明らかにすることにしました。とくにヒッグス場がインフレーションを起こす場合を具体例として詳細に検討することにしました。

(2) コズミックストリングを持つ宇宙における重力波放射: 位相的欠陥の一種であるコズミックストリングは、そのループが重力波を生成しながら崩壊するので、宇宙論的重力波源の有力候補です。しかし、通常仮定される熱的相転移で生成したコズミックストリングはインフレーションによって薄められてしまうため、その痕跡を観測することは不可能です。しかし、代表者が以前提唱した曲率変化による相転移を用いると、ストリングはインフレーションによって適度に薄められた遅延スケール解にしたがい、CMB とパルサータイミングの双方において観測的痕跡を探ることが可能になります。ここでは両者の観測データと比較することによって、理論の当否と将来の観測可能性を検討します。また、そのようなストリング生成を実現する素粒子モデルを超重力理論において構築します。

(3) スカラー場宇宙論における重力波生成とその観測的帰結: 膨張宇宙におけるスカラー場の3次元的時間発展とそれに伴う重力波放出を格子上で再現する数値コードを作成し、背景宇宙の膨張則が、インフレーション後の場の振動時代から放射優勢時代に遷移する状況を再現するよう変化するとして、重力波のスペクトルを求めます。

(4) Thermal inflation と重力波: 有限温度効果によって第二期インフレーションを起こすという Thermal inflation モデルでは、インフレーション中に生成した量子的重力波は薄められてしまって観測不可能になる一方、Thermal inflation 終了時の一次相転移によって重力波が発生し、それが DECIGO 等で観測し得ると指摘されています。ここでは上記で開発するコードを用いて Thermal inflation 中のスカラー場のダイナミクスを追うことによって相転移の挙動を明らかにし、重力波スペクトルを求めます。

### 4. 研究成果

(1) 古典力学のガリレオ変換を場の理論に一般化したガリレオ不変性を持った理論は、高階微分を含んでいても、場の方程式自体は二階微分方程式で書けることが知られていました。われわれは、この理論を一般座標変換に対して不変になるように拡張した理論を用い、スカラー場の方程式も、重力場の方程式も二階までの微分方程式でかける一般化ガリレオン理論のもとで、インフレーションモデルを構築しました。それによってこれまで知られていなかった多くのモデルを見いだすと共に、これまで知られていた全ての単一場インフレーションモデルは、この Generalized G-inflation 理論の枠内で記述でき

ることを見いだしました。

さらに、運動方程式が二階微分方程式でかける最も一般的な理論は 1974 年にホルンデスキーによって与えられていたことが判明しましたが、ホルンデスキー理論と一般化ガリレオン理論は等価であることを証明しました。以上の研究は日本物理学会論文賞を受賞しました。

このような一般的な理論のもとでの曲率ゆらぎ、テンソルゆらぎ双方を含む最も一般的な三点相関すなわちバイスペクトルを計算し、今後の観測に備えました。

以上の特別な場合として、インフレーションを起こすスカラー場が標準模型のヒッグス場であるような場合を詳細に考察し、これまで知られていたさまざまなヒッグスインフレーションモデルを統一的に理解することに成功すると共に、これまで知られていなかった新たな可能性も見いだしました。

(2) 初期宇宙の熱的相転移で生成したコズミックストリングは、かつては構造形成のタネとなった密度ゆらぎの起源を与えるものとして注目されていましたが、今日では CMB の観測と整合的でないことが知られています。またループから放出される重力波がパルサーのタイミングデータで強く制限されることも知られていました。一方、熱的相転移モデルはインフレーションと整合的でないため、インフレーション宇宙にはそもそもストリングは存在しないと多くの人は考えてきました。われわれは、超重力インフレーションにおいては、重力結合によって、ストリングを生成するスカラー場の対称性はインフレーション中に一般的に回復していることを示し、インフレーション後期に相転移を起こし、低密度のストリングを現在の宇宙に残すことが可能であることを示しました。こうした状況の下で宇宙論を考えると、ストリングが現在の宇宙に観測的痕跡を残していることが十分可能であることを明らかにしました。

(3) 多成分スカラー場の膨張宇宙における時間発展を三次元空間において再現する数値解析コードを京都大学の平松氏と本研究費で雇用した研究員と開発・運用し、インフレーション後に、インフレーションを起こしたスカラー場の振動のエネルギーが宇宙を支配している状態から、その崩壊によって再加熱が終了するまでの間に、大域的対称性を破る相転移を起こした一様化する過程で放出する重力波スペクトルを計算しました。その結果、この重力波はインフレーション起源の量子的重力波とは異なり、宇宙膨張と共に徐々に生成していくので、振動優勢から放射優勢という宇宙の状態方程式の変化によってスペクトルに現れる折れ曲がりによって再加熱温度を決定できることは、インフレーション起源の重力波と同様だが、その形は微

妙に異なり、両者を区別できることを見いだしました。

(4) 上記の研究において開発した数値解析コードを応用して、初期宇宙のモジュライ問題を解決する有力手段である、Thermal Inflation のダイナミクスを精細に解析しました。従来このモデルは一次相転移によって終了するため、その際生成するバブルの衝突によって重力波が生成することが指摘されていましたが、本研究によって実際の相転移は一次とはいえ、クロスオーバー型に緩やかに起こるため、観測できるような重力波は生成できないことがわかりました。

(5) 宇宙背景放射の温度ゆらぎでは測定できない小スケールの密度ゆらぎの振幅を明らかにすることは、宇宙論的な重力波源を制限する意味でも重要ですが、われわれは、小スケール密度ゆらぎが音響振動によって一様化する際、宇宙全体を若干暖める作用があることを指摘し、それによって温度ゆらぎでは測定できない小スケールの密度ゆらぎの振幅を制限することに成功しました。

(6) 2014 年 BICEP2 チームは、宇宙マイクロ波背景放射の B モード偏光を発見し、その起源は初期宇宙のインフレーション中に生成した量子的重力波(テンソルゆらぎ)である可能性が高いと発表しました。このことは、本研究計画と密接に関連したテーマであるため、新たな研究計画を追加することにしました。まず、この結果は、他の観測が間接的に示唆していた上限を上回るものだったため、これに基づいて 1Hz 帯の重力波を直接検出できれば、初期宇宙の熱史を精度よく測定できることとなります。われわれは、再加熱温度がどの範囲を取れば DECIGO の観測によってこれを決定できるか明らかにしました。

また、量子的重力波ではなく、スカラー場の二次摂動によって説明する可能性を検討しました。その結果、十分代振幅なテンソルゆらぎが生成する際には常に過剰な曲率ゆらぎが生成してしまい、観測と矛盾することが明らかになりました。

しかしその後、BICEP2 の観測はダストの影響を過小評価していることが判明したため、われわれのこうした研究も、前者については意義を失い、後者については一般的な定理としての意義のみを持ち続けることになってしまいました。とはいえ、代表者は常日頃から一時の流行に乗ることについては懐疑的なため、その被害は最小限にとどめることができました。

以上の研究成果を総括すると、当初の計画は、現在取り纏め中のものを含め、全て予定通りに実行することができ、さらに最も一般的なインフレーション宇宙論の定式化に成功し、それを発展させるなど、計画を大きく

越える成果も挙げることができました。

## 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 32 件) 全て査読あり

1) Effects of thermal fluctuations on thermal inflation By Takashi Hiramatsu, Yuhei Miyamoto, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1088/1475-7516/2015/03/024](https://arxiv.org/abs/10.1088/1475-7516/2015/03/024).

JCAP 1503 (2015) 03, 024.

2) Reheating processes after Starobinsky inflation in old-minimal supergravity

By Takahiro Terada, Yuki Watanabe, Yusuke Yamada, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1007/JHEP02\(2015\)105](https://arxiv.org/abs/10.1007/JHEP02(2015)105).

JHEP 1502 (2015) 105.

3) Can a spectator scalar field enhance inflationary tensor mode?

By Tomohiro Fujita, Jun'ichi Yokoyama, Shuichiro Yokoyama.

[10.1093/ptep/ptv037](https://arxiv.org/abs/10.1093/ptep/ptv037).

PTEP 2015 4, 043E01.

4) Prospects of determination of reheating temperature after inflation by DECIGO

By Sachiko Kuroyanagi, Kazunori Nakayama, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1093/ptep/ptu176](https://arxiv.org/abs/10.1093/ptep/ptu176).

PTEP 2015 (2015) 1, 013E02.

5) Primordial black holes from temporally enhanced curvature perturbation

By Teruaki Suyama, Yi-Peng Wu, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevD.90.043514](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.90.043514).

Phys.Rev. D90 (2014) 4, 043514.

6) Topological inflation from the Starobinsky model in supergravity

By Kohei Kamada, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevD.90.103520](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.90.103520).

Phys.Rev. D90 (2014) 10, 103520.

7) Reheating the Universe Once More: The Dissipation of Acoustic Waves as a Novel Probe of Primordial Inhomogeneities on Even Smaller Scales

By Tomohiro Nakama, Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevLett.113.061302](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevLett.113.061302).

Phys.Rev.Lett. 113 (2014) 061302.

8) Identifying the most crucial parameters of the initial curvature profile for primordial black hole formation

By Tomohiro Nakama, Tomohiro Harada,

A.G. Polnarev, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1088/1475-7516/2014/01/037](https://arxiv.org/abs/10.1088/1475-7516/2014/01/037).

JCAP 1401 (2014) 01, 037.

9) Cosmology Based on  $f(R)$  Gravity Admits 1 eV Sterile Neutrinos

By Hayato Motohashi, Alexei A. Starobinsky, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevLett.110.121302](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevLett.110.121302).

Phys.Rev.Lett. 110 (2013) 12, 121302.

10) Graceful exit from Higgs G inflation

By Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Taro Kunimitsu, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevD.88.123518](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.88.123518).

Phys.Rev. D88 (2013) 12, 123518.

11) Primordial Spikes from Wrapped Brane Inflation

By Takeshi Kobayashi, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1088/1475-7516/2013/02/005](https://arxiv.org/abs/10.1088/1475-7516/2013/02/005),

JCAP 1302 (2013) 005,

12) Higgs condensation as an unwanted curvaton

By Taro Kunimitsu, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevD.86.083541](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.86.083541).

Phys.Rev. D86 (2012) 083541.

13) Metric perturbation from inflationary magnetic field and generic bound on inflation models

By Teruaki Suyama, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevD.86.023512](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.86.023512).

Phys.Rev. D86 (2012) 023512.

14) Evading the pulsar constraints on the cosmic string tension in supergravity inflation

By Kohei Kamada, Yuhei Miyamoto, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1088/1475-7516/2012/10/023](https://arxiv.org/abs/10.1088/1475-7516/2012/10/023).

JCAP 1210 (2012) 023.

15) Generalized Higgs inflation

By Kohei Kamada, Tsutomu Kobayashi, Tomo Takahashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevD.86.023504](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevD.86.023504).

Phys.Rev. D86 (2012) 023504.

16) Primordial non-Gaussianities of gravitational waves in the most general single-field inflation model

By Xian Gao, Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama.

[10.1103/PhysRevLett.107.211301](https://arxiv.org/abs/10.1103/PhysRevLett.107.211301).

Phys.Rev.Lett. 107 (2011) 211301.

17) Generalized G-inflation: Inflation with the most general second-order field

equations  
By Tsutomu Kobayashi, Masahide Yamaguchi, Jun'ichi Yokoyama.  
[10.1143/PTP.126.511](https://arxiv.org/abs/10.1143/PTP.126.511).  
Prog.Theor.Phys. 126 (2011) 511-529.

ほか 15 篇

〔学会発表〕(計 32 件)

2015 年 2 月 19 日 横山順一 “Discussion on future direction of inflationary cosmology using B-mode” (B-mode cosmology workshop, KEK)

2014 年 12 月 17 日 横山順一 “Inflationary Magnetogenesis” (Primordial Cosmology after Planck, IAP, パリ、フランス)

2014 年 12 月 11 日 横山順一 “Gravitational Waves: Near Future, Far Future” (CosPA 2014 Auckland University, オークランド、ニュージーランド)

2014 年 9 月 19 日 横山順一 「原始重力波直接検出への期待」(日本物理学会大会 佐賀大学)

2014 年 8 月 26 日 横山順一 “Prospects of determination of thermal history after inflation with DECIGO” (COSMO2014, University of Chicago, シカゴ、アメリカ合衆国)

2014 年 4 月 11 日 横山順一 “Cosmology of the Higgs field” (Pre-workshop on gravitation and cosmology, 国立精華大学、新竹、台湾)

2014 年 2 月 4 日 横山順一 “Cosmic strings and inflation” (Cosmic string workshop, Arizona State University, テンピ、アメリカ合衆国)

2013 年 11 月 22 日 横山順一 “Cosmology of the Higgs field” (PASCOS2013, 台北、台湾)

2013 年 11 月 14 日 横山順一 “Gravitational modulated reheating” (CosPA 2013, University of Hawaii, ホノルル、アメリカ合衆国)

2013 年 11 月 8 日 横山順一 “ALMA and variation of the fundamental constants of physics” (Todai Forum, カトリカ大学、サンチャゴ、チリ)

2013 年 6 月 13 日 横山順一 “Toward the

quest for the ultimate theory of the universe by CMB” (CMB conference, 沖縄科学技術大学院大学)

2013 年 6 月 4 日 横山順一 “Gravitational modulated reheating in  $R^2$  inflation” (Cosmological perturbations post Planck, University of Helsinki, ヘルシンキ、フィンランド)

2012 年 9 月 13 日 横山順一 “Higgs condensation as an unwanted curvaton” (COSMO2012, 北京、中国)

2012 年 2 月 6 日 横山順一 “Generalized G-inflation” (LeCosPA symposium, 国立台湾大学、台北、台湾)

2011 年 12 月 6 日 横山順一 “Cosmological constraints on primordial black holes” (QCD in the LHC era, カイロ、エジプト)

2011 年 10 月 7 日 横山順一 “G-inflation and generalized G-inflation” (Preplanckian inflation workshop, ミネソタ大学、ミネアポリス、アメリカ合衆国)

2011 年 6 月 15 日 横山順一 “G-inflation and generalized G-inflation” (Sorvey workshop, APC, パリ、フランス)

2011 年 5 月 13 日 横山順一 “G-inflation and its non-Gaussianity” (Cosmological Nongaussianity workshop, ミシガン大学、アナーバー、アメリカ合衆国)

ほか 14 件

〔図書〕(計 3 件)  
「宇宙と素粒子のなりたち」京都大学学術出版会、糸山浩司・横山順一・川合 光・南部陽一郎 著、2013 年 8 月。

「こころを学ぶ グライ・ラマ法王 仏教者と科学者の対話」講談社。グライ・ラマ 14 世、村上和雄、志村史夫、佐治晴夫、横山順一、米沢富美子、柳沢正史、矢作直樹、河合徳枝著。2013 年。

「知っておきたい物理の疑問 55」日本物理学会 大貫惇睦、並木雅俊、横山順一 編著。講談社ブルーバックス 2011 年 12 月。

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 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 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

横山順一教授が日本物理学会論文賞を受賞

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/news/1900/>

横山順一教授が井上學術賞を受賞

<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/3726/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

横山 順一 (YOKOYAMA, Jun'ichi) 東  
京大学大学院理学系研究科・教授  
研究者番号：50212303

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

瀬戸 直樹 (SETO, Naoki) 京都大学理学  
研究科・助教

研究者番号：80462191

樽家 篤史 (TARUYA, Atsushi) 京都大学  
基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：40334239