

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K03835

研究課題名（和文）宇宙の大規模構造の力学的統計解析を用いた初期宇宙物理学の探求

研究課題名（英文）Exploring early universe using dynamical statistical analysis of the large-scale structure of the universe

研究代表者

松原 隆彦（Matsubara, Takahiko）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：00282715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙の大規模構造における力学的統計解析に関するさまざまな手法を考察して新たな理論的知見を多数得ることができた。宇宙の大規模構造の幾何学的構造を数量化するミンコフスキー汎関数という統計量について、数学の統計・確率論分野における知見を取り入れることにより、非ガウス性を持つスカラー場に対する摂動的な予測を一般的に求める公式を導くことに成功し、それを宇宙の大規模構造のシミュレーションと比較して実地の応用への道を切り拓いた。また、宇宙の密度場に関するピーク統計に対する非ガウス性の影響を摂動的に評価する解析的手法を開発、また、テンソル場の力学的摂動進化を扱う手法を新たに開発するなどの成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の大規模構造の解析において必須となる統計解析手法において、宇宙の力学進化による非線形成長や天体バイアスの非線形関係を包括的に取り入れた理論手法を多面的に開発することができたため、これを実際の宇宙構造解析に応用することで当該分野の研究における将来的な可能性を大きく広げることができた。宇宙の全体構造は社会・国民の興味を広くひいており、私たちの起源や将来を考える上でもその知見は重要なピースである。

研究成果の概要（英文）：We have obtained many new theoretical insights by considering various methods of dynamical statistical analysis in the large-scale structure of the universe. By incorporating knowledge in the field of statistics and probability theory of mathematics, we succeeded in deriving a general formula for perturbative prediction for non-Gaussian scalar fields, and compared it with simulations of the large-scale structure of the universe, paving the way for practical applications. By comparing it with simulations of the large-scale structure of the universe, he paved the way for real-world applications. He also developed an analytical method for perturbative evaluation of the effect of non-Gaussianity on the peak statistics for density fields in the universe, and a new method for treating dynamical perturbative evolution of tensor fields.

研究分野：宇宙論、宇宙物理学

キーワード：宇宙の大規模構造、統計解析理論、初期非ガウス性、ミンコフスキー汎関数、非線形摂動論、銀河バイアス、ピーク統計

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙観測技術の進歩により、これまでは想像もできなかったような宇宙の姿が次々と明らかになっている。中でも、宇宙全体の姿を明らかにしようとする宇宙論の研究は、観測的な進展の著しさにおいて歴史上類を見ないほどに進んでいる。最近では宇宙マイクロ波背景放射の精密観測によって、宇宙論パラメータがかつてない精度で決まるなど驚くべき進展があった。今後は、まだ未観測の領域が広大に広がっている宇宙の大規模構造の精密観測に期待が寄せられていて、世界中で複数の大型観測計画が進められている。

宇宙の精密観測により明らかにされる宇宙の姿は、これまでにわかってきたことの精度が上がるだけのことで決していない。これまでの歴史を振り返って見ても、精密観測の進展は学術的研究の質的变化をもたらしてきた。宇宙論的観測によって発見されたダークマターやダークエネルギーという宇宙の未知成分は、もはや宇宙物理学の範囲を超えた研究対象となり、物理学全体の問題としてその解明に関する研究が行われている。

宇宙の観測量の中でも、宇宙の広い範囲におけるゆらぎ成分の観測がとて有用なものである。宇宙マイクロ波背景放射もそのような観測のひとつであるし、宇宙の大規模構造もそうである。宇宙のゆらぎ成分には、初期宇宙の情報や宇宙の進化に関する情報がふんだんに含まれている。その情報を最大限に引き出すには、統計的な解析が本質的な役割を果たす。

本研究は、宇宙の大規模構造の力学的統計解析によって、特に初期宇宙における新しい物理を探索しようとするものである。宇宙はビッグバンとともに始まったが、何がビッグバンを始めたのかは明らかではない。その原因としてインフレーション理論が有力だが、いまだその詳細は不明のままである。また、宇宙のダークマターやダークエネルギーの正体はいまだ不明である。近い将来に行われる宇宙の大規模構造の観測データは、こうした宇宙論の本質的な問題に光をあてることになる。

## 2. 研究の目的

本研究は、宇宙の大規模構造の力学的統計解析によって、宇宙論の基本的な物理的問題へ切り込むことを目的とする。特に初期宇宙のモデルを制限すること、また宇宙の未知成分であるダークマターやダークエネルギーの性質を制限することは、大きな目的である。その具体的な手法としては、応募者がこの十年あまりを費やして開発してきた独自の解析手法である「統合摂動論」を応用する。この手法を用いることが本研究における一番の学術的独自性であり、他の追従を許さない研究成果を見込む根拠である。

この独自手法の得意とする準非線形領域の大規模構造に含まれている情報を最大限に用いる。こうして、他の方法ではどうしてもよいかわからないような問題についても、宇宙に関する物理的な解析を行うことができる。この手法の強力さはすでに他の研究者にも浸透しつつあり、応募者とは独立のグループによる応用研究もなされつつある。だが、現在のところこの手法に世界で最も通曉しているのは応募者であり、他の研究者よりも有利に研究を進めることができる。応募者の研究の創造性には定評があると自負しており、本研究においてもこれまでに開発した統合摂動論の手法を、さらに創造的に拡張することも視野に入れている。

## 3. 研究の方法

インフレーション中にある種の粒子が励起すると、初期ゆらぎに特徴的な非ガウス性をもたらすことが明らかにされた。これはエネルギーの高い初期宇宙を高エネルギー加速器と見なせることを意味していて、「宇宙論的加速器実験」の可能性が指摘されている。具体的には、質量を持つ高スピンの場が初期宇宙に励起すると、非ガウス性を特徴付ける初期バースペクトルと呼ばれる統計量に対するスケール依存性が振動するという特徴が現れる。統合摂動論を用いると、初期バースペクトルが宇宙の大規模構造における統計的観測量にどのような影響を及ぼすのかを、系統的に導くことができる。その具体的な関係を明らかにすることが本研究の課題である。また、その結果をもとに、観測量に対してどのような解析をすれば初期宇宙に励起した場の検出を効率よく行うことができるのかについて研究した。この方向で研究を進めることにより、「宇宙の大規模構造を基にした高エネルギー物理学の探求」という新しい研究分野の開拓につながった。

また、ダークマターの正体は長年にわたる宇宙論の大きな謎のひとつである。未知の素粒子であるという可能性もあるが、長年にわたる探索にも関わらずいまだその確実な兆候は見つかっていない。一方、宇宙の初期密度ゆらぎの性質によっては、極めて初期の段階で原始ブラックホールが形成される可能性がある。このような原始ブラックホールは、素粒子ではないダークマターの有力候補となり得る。このため、初期に生成される原始ブラックホールの性質を詳しく調べることが必要である。これまでのところ、原始ブラックホールの生成量については詳しく調べられてきたが、それが引き起こすダークマターの空間的クラスタリングについてはまだよくわ

かっていないことが多い。空間的クラスタリングは、その後の原始ブラックホールの進化に大きな影響を及ぼすため重要である。本研究では独自の統合摂動論の手法を応用することにより、宇宙初期に密度の高いピークにブラックホールが生成された場合、どのような空間的クラスタリングが期待できるのかを解析的に調べた。密度ピークがどのような空間的クラスタリングをするのかについては古くから近似的に調べられてきたが、あまり精度よい解析ができていなかった。応募者は最近、統合摂動論の手法を応用すると、これまでない精度で系統的な摂動展開近似ができることを見出した。この手法により、原始ブラックホールの解析に新しい光を当てることが可能である。そのためには、解析的な手法を確立することが必要である。また、原始ブラックホールの初期クラスタリングから、その進化を追うことも統合摂動論の手法によって可能であり、最終的には宇宙の大規模構造の観測と結びつけられる。このようにして、ユニークな観点から宇宙のダークマター問題にアプローチすることが可能になった。

#### 4. 研究成果

宇宙の大規模構造における力学的統計解析に関するさまざまな手法を考察して新たな理論的知見を多数得ることができた。その成果は多くの多面的手法にわたり、数多くの論文として出版した。

まず、統合摂動論をピーク統計に応用する成果として、ピークに存在するとした銀河の速度が周囲の速度場に比べてバイアスされているという、ピークバイアスの効果を摂動論的に見積もることに成功した[1]。また、原始ブラックホールが宇宙初期の物質優勢期に誕生したというシナリオに基づくことにより、放射優勢期に誕生したというシナリオにはないクラスタリングの統計的性質を導くことに成功した[3]。これは数学的手法としても斬新な統合摂動論の手法により初めて可能になったものである。また、原始ブラックホールの生成量に関して、宇宙の初期非ガウス性の影響を見積もる新たな手法を発見した[9]。

また、ピーク統計に関してはこれまでに知られていなかった数学的取り扱いを開発し、距離の大きな相関関数を解析的に表すことに成功、さらにそれを数値的な多重積分によって求めた距離の小さな場合の結果と比べてその有用性を示した[4]。また、非ガウス性のある場におけるピーク統計について、摂動論的な方法による新たな公式を導いた[5]。

宇宙の大規模構造の幾何学的構造を数量化するミンコフスキー汎函数という統計量について、数学的統計・確率論分野における知見を取り入れることにより、非ガウス性を持つスカラー場に対する摂動的な予言を一般的に求める公式を導くことに成功した[6,7]。それを宇宙の大規模構造のシミュレーションと比較して実地の応用への道を切り拓いた[8]。

また、宇宙の大規模構造における非ガウス的な特徴を使って重力理論の検証を行うという新方向の理論解析についても考察し、Skewness parameters という量を導入してこれを行う場合の理論的な振る舞いを調べた[12]。修正重力理論にどのような制限をつけられるかを調べることで、将来的な応用可能性を論じた。

統合摂動論についてはこれまでスカラー場の解析を念頭に置いた手法として開発したが、本研究期間にこれを一般的なテンソル場の解析にも使えることを発見し、その基本的な定式化に向けて大きな進展が得られた。こちらは大掛かりな研究となり、シリーズ論文の執筆は終了し、学術雑誌に投稿中である[10,11,13,14]。

その他に関連する成果として、日本語による解説記事の執筆[15,16]、および多数の一般向け日本語書籍出版[17-22]がある。

原著論文：

[1] Takahiko Matsubara, "Velocity bias and the nonlinear perturbation theory of peaks", *Physical Review D*, 100, id.083504 [19 pages] (2019) [10/2019], DOI: 10.1103/PhysRevD.100.083504 [arxiv:1907.13251]

[2] Hiroyuki Kitamoto, Yoshihisa Kitazawa, Takahiko Matsubara, "de Sitter Duality and Logarithmic Decay of Dark Energy", *Physical Review D*, 101, id.023504 [22 pages] (2020) [01/2020], DOI: 10.1103/PhysRevD.101.023504 [arxiv:1908.02534]

[3] Takahiko Matsubara, Takahiro Terada, Kazunori Kohri, Shuichiro Yokoyama, "Clustering of primordial black holes formed in a matter-dominated epoch", *Physical Review D*, 100, id.123544 [17 pages] (2019) [12/2019], DOI: 10.1103/PhysRevD.100.123544 [arxiv:1909.04053]

[4] Takahiko Matsubara and Sandrine Codis, "Large-separation expansion of peak clustering in Gaussian random fields", *Physical Review D*, 101, id.063504 [17 pages] (2020) [03/2020], DOI: 10.1103/PhysRevD.101.063504 [arxiv:1910.09561]

[5] Takahiko Matsubara, "Statistics of peaks of weakly non-Gaussian random fields: Effects of bispectrum in two- and three-dimensions", *Physical Review D*, 101, id.043532 [22 pages] (2020) [02/2020], DOI: 10.1103/PhysRevD.101.043532 [arxiv:2001.05702]

[6] Satoshi Kuriki and Takahiko Matsubara, "Asymptotic expansion of the expected Minkowski functional for isotropic central limit random fields", *Advances in Applied Probability*, Vol.55, Issue 4 (December 2023), 10.1017/apr.2023.2 [arxiv:2011.04953]

[7] Takahiko Matsubara and Satoshi Kuriki, "Weakly non-Gaussian formula for the Minkowski functionals in general dimensions", *Physical Review D*, 104, id.103522 [16 pages] (2021) [11/2021], DOI: 10.1103/PhysRevD.104.103522 [arxiv:2011.04954]

[8] Takahiko Matsubara, Chiaki Hikage and Satoshi Kuriki, "Minkowski functionals and the nonlinear perturbation theory in the large-scale structure: second-order effects", *Physical Review D*, 105, id.023527 [13 pages] (2022) [01/2022], DOI: 10.1103/PhysRevD.105.023527 [arxiv:2012.00203]

[9] Takahiko Matsubara and Misao Sasaki, "Non-Gaussianity effects on the primordial black hole abundance for sharply-peaked primordial spectrum", *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 10 (2022) 094, 21 pp. [10/2022], DOI: 10.1088/1475-7516/2022/10/094 [arxiv:2208.02941]

[10] Takahiko Matsubara, "The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields I: Basic formulation", submitted [arxiv:2210.10435]

[11] Takahiko Matsubara, "The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields II: Loop corrections", submitted [arxiv:2210.11085]

[12] Daisuke Yamauchi, Shoya Ishimaru, Takahiko Matsubara, Tomo Takahashi, "Skewness consistency relation in large-scale structure and test of gravity theory", *Physical Review D*, 107, id.043526 [16 pages] (2023) [02/2023], DOI: 10.1103/PhysRevD.107.043526, [arxiv:2211.13453]

[13] Takahiko Matsubara, "The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields III: Projection effects", submitted, [arxiv:2304.13304]

[14] Takahiko Matsubara, "The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields IV: Full-sky formulation", submitted, [arXiv:2405.09038]

#### 日本語解説

[15] 松原隆彦, "一般相対性理論 時空の歪みと重力", *数理科学* 2021 年 1 月号, p.7-14. [12/2020]

[16] 松原隆彦, "宇宙の謎と魅力: 巻頭言", *数理科学* 2022 年 7 月号, p.5-6. [06/2022]

#### 著書:

[17] 松原隆彦『宇宙は無限か有限か』, 光文社(光文社新書 1037), 発行: 2019 年 11 月 20 日発行(本体価格 800 円 + 税, 256 ページ), ISBN: 978-4-334-04445-9

[18] 松原隆彦『文系でもよくわかる 日常の不思議を物理学で知る』, 山と溪谷社, 発行: 2020 年 8 月 1 日発行(本体価格 1400 円 + 税, 200 ページ), ISBN: 978-4-6351-3012-7

[19] 松原隆彦『なぜか宇宙はちょうどいい: この世界を作った奇跡のパラメータ 22』, 誠文堂新光社, 発行: 2020 年 11 月 15 日発行(本体価格 1600 円 + 税, 208 ページ), ISBN: 978-4-4166-2038-0

[20] 松原隆彦『文系でもよくわかる 宇宙最大の謎! 時間の本質を物理学で知る』, 山と溪谷社, 発行: 2023 年 10 月 1 日発行(本体価格 1400 円 + 税, 216 ページ), ISBN: 978-4-6351-3017-2

[21] 松原隆彦『宇宙とは何か』, SB クリエイティブ (SB 新書), 発行: 2024 年 1 月 15 日発行  
(本体価格 900 円+税, 208 ページ), ISBN: 978-4-8156-2022-6

監修書:

[22] 松原隆彦『イラスト&図解 知識ゼロでも楽しく読める! 宇宙のしくみ』, 西東社, 発行:  
2020 年 11 月 10 日発行 (本体価格 900 円 + 税, 224 ページ), ISBN: 978-4-7916-2944-2

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Satoshi Kuriki, Takahiko Matsubara	4. 巻 55
2. 論文標題 Asymptotic expansion of the expected Minkowski functional for isotropic central limit random fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Applied Probability	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takahiko Matsubara, Misao Sasaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Non-Gaussianity effects on the primordial black hole abundance for sharply-peaked primordial spectrum	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cosmology and Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 94
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1475-7516/2022/10/094	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Daisuke Yamauchi, Shoya Ishimaru, Takahiko Matsubara, Tomo Takahashi	4. 巻 106
2. 論文標題 Skewness consistency relation in large-scale structure and test of gravity theory	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.043526
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.107.043526	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Matsubara Takahiko, Kuriki Satoshi	4. 巻 104
2. 論文標題 Weakly non-Gaussian formula for the Minkowski functionals in general dimensions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.103522
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.103522	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 Matsubara Takahiko, Hikage Chiaki, Kuriki Satoshi	4. 巻 105
2. 論文標題 Minkowski functionals and the nonlinear perturbation theory in the large-scale structure: Second-order effects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.023527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.023527	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 Takahiko Matsubara	4. 巻 100
2. 論文標題 Velocity bias and the nonlinear perturbation theory of peaks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.083504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.083504	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 Hiroyuki Kitamoto, Yoshihisa Kitazawa, Takahiko Matsubara	4. 巻 101
2. 論文標題 de Sitter Duality and Logarithmic Decay of Dark Energy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.023504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.023504	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 Takahiko Matsubara, Takahiro Terada, Kazunori Kohri, Shuichiro Yokoyama	4. 巻 100
2. 論文標題 Clustering of primordial black holes formed in a matter-dominated epoch	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.123544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.100.123544	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 Takahiko Matsubara and Sandrine Codis	4. 巻 101
2. 論文標題 Large-separation expansion of peak clustering in Gaussian random fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.063504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.063504	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 該当する

1. 著者名 Takahiko Matsubara	4. 巻 101
2. 論文標題 Statistics of peaks of weakly non-Gaussian random fields: Effects of bispectrum in two- and three-dimensions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 id.043532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.043532	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9件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Takahiko Matsubara
2. 発表標題 Weakly non-Gaussian formulas of cosmological fields: Peak abundance, peak clustering, and Minkowski functionals in 2D and 3D
3. 学会等名 Cosmology with weak Lensing: Beyond the Two-point Statistics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiko Matsubara
2. 発表標題 Weakly non-Gaussian formulas of cosmological random fields
3. 学会等名 IAU-IAA Astrostats & Astroinfo seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Takahiko Matsubara
2. 発表標題 The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields
3. 学会等名 9th Korea-Japan workshop on Dark Energy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiko Matsubara
2. 発表標題 The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields
3. 学会等名 New Frontiers in Cosmology with the Intrinsic Alignments of Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiko Matsubara
2. 発表標題 Perturbation theory of tensor fields in LSS and projection effects
3. 学会等名 Mini-workshop on recent advances in theoretical and observational aspects of cosmology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松原隆彦
2. 発表標題 宇宙における密度ゆらぎの進化と大規模構造
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会 シンポジウム「揺らぎと流体的発展からみる物理の面白さ」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takahiko Matsubara
2. 発表標題 Higher-order corrections to the peak clustering
3. 学会等名 PTchat@Kyoto (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原隆彦
2. 発表標題 平成時代における宇宙論の変遷と新時代への期待：個人的視点から
3. 学会等名 第32回理論懇シンポジウム「天文学・宇宙物理学の変遷と新時代の幕開」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松原隆彦
2. 発表標題 宇宙における密度ゆらぎの進化と大規模構造
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会 シンポジウム「揺らぎと流体的発展からみる物理の面白さ」(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 松原隆彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 山と溪谷社	5. 総ページ数 200
3. 書名 文系でもよくわかる 日常の不思議を物理学で知る	

1. 著者名 松原隆彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 西東社	5. 総ページ数 224
3. 書名 イラスト&図解 知識ゼロでも楽しく読める！ 宇宙のしくみ	

1. 著者名 松原 隆彦	4. 発行年 2020年
2. 出版社 誠文堂新光社	5. 総ページ数 208
3. 書名 なぜか宇宙はちょうどいい	

1. 著者名 松原隆彦	4. 発行年 2019年
2. 出版社 光文社	5. 総ページ数 256
3. 書名 宇宙は無限か有限か	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>松原隆彦ホームページ  <a href="https://tmcosmos.org/taka/">https://tmcosmos.org/taka/</a></p>
--

## 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
--	---------------------------	-----------------------	----

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 International KEK-Cosmo and APCosPA Winter School 2020 Cosmological Structures in the Era of Large Surveys	開催年 2020年～2020年
---	--------------------

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------