

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24540267

研究課題名(和文) 宇宙論的統合摂動論の確立とその応用

研究課題名(英文) Establishment and applications of cosmological integrated perturbation theory

研究代表者

松原 隆彦 (Matsubara, Takahiko)

名古屋大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00282715

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の大規模構造の非線形現象と観測可能量を理論的に記述するため、これまでの伝統的な摂動論的枠組みを拡張した「統合摂動論」を完成させた。宇宙の大規模構造には、力学的な非線形効果と共に非線形な赤方偏移変形と銀河バイアスの効果が複合的に組み合った複雑な過程が含まれている。この問題を摂動論に基づく系統的な理論的方法で明らかにしようとするのが統合摂動論である。これ以外の方法では取り扱いのできなかった大規模構造にまつわる様々な問題について、具体的な解法を提示することに成功した。その理論的成果を大規模な数値シミュレーションと比較することにより、その妥当性と適用範囲を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of describing the nonlinear phenomena and observable features in the large-scale structure of the universe, the "integrated perturbation theory" is developed and completed. In the large-scale structure, there are complicated processes of dynamical nonlinear effects, nonlinear redshift-space distortions and galaxy biasing. This complicated problems are systematically treated by the theoretical method of the integrated perturbation theory. Various problems in the weakly nonlinear phenomena in the large-scale structure are actually shown to be solved by this general method. These findings are compared with large-scale numerical simulations, and the accuracy of the method and applicability region are quantified.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙論 宇宙の大規模構造 宇宙マイクロ波背景放射 非線形摂動論

1. 研究開始当初の背景

2000年代における宇宙論の目覚ましい発展を語る上で、宇宙の精密観測が本質的な役割を果たしたことは論を待たない。その中で、ダークマターとダークエネルギーという正体不明の成分が宇宙を支配していることが、精密な宇宙観測によって裏付けられてきた。この結果は宇宙論の研究に止まらず、素粒子論や相対論などの基礎物理学全般の研究に大きな衝撃となって波及している。申請者は、すでに90年代の半ばから今日のような精密宇宙論の時代を予想して、その進展の中心で研究を押し進めてきた。特に宇宙の大規模構造を用いた宇宙論の研究の進展に多くの寄与をして、現在の標準的宇宙モデルの確立に寄与するとともに、他の追隨を許さない独自の理論的な解析により宇宙論における銀河サーベイの重要性を明らかにした。これらの研究は、現在世界的に多数計画されている観測計画の策定にも重要な役割を果たして来た。

現在、大規模な宇宙論的観測が次々と計画されて実行に移されている。特に宇宙の大規模構造は将来に向けて特に重要な宇宙論的観測対象とされ、大規模な銀河サーベイ計画が多数計画・実行されている。将来的には地上の大望遠鏡を用いるのみならず、専用宇宙望遠鏡を用いた計画もあり、今後は現在とは桁違いの大規模な銀河サーベイにより大規模構造の観測が進められることになっている。これにより、宇宙のダークマターやダークエネルギーの正体を探ることや、極初期宇宙の物理的性質を調べること、重力理論のテストを行うことなど、宇宙論や基礎物理学の基本的な問題に立ち向かえることが見込まれている。この背景のもと、宇宙の大規模構造の形成や進化を精密なレベルで理論的に理解するとともに、観測量を第一原理から理論的に予言することが本研究の目的とするところである。

非線形性の弱い大スケールの構造の解析には摂動論が適用可能である。本研究ではそのような大スケール構造に着目する。最近申請者が行った一連の研究により、これまでに知られていた宇宙論的摂動論を大幅に拡張して、実際の観測量に対応する量を初めて摂動論によって予言する総合的枠組みの基礎を固めることができている。この新機軸の非線形摂動論を「統合摂動論」(integrated perturbation theory)と名付けた。本研究では、これをさらに発展させて、将来の大規模銀河サーベイに実際に応用するために必要な理論的整備を行い、さらに大規模構造を用いた宇宙論の可能性を大きく広げることが目的である。

2. 研究の目的

これまでも統合摂動論の土台を固めて

きたが、実際の観測などに応用するためには、まだいくつかの点でさらなる基礎的研究が必要である。その一つは大規模構造の難問とも言われている、銀河バイアスの問題である。すでにこの難問を扱うための一般的な枠組みは統合摂動論に組み入れてある。しかし銀河形成論が未完成であるために、具体的な銀河バイアスがどのようなものであるのかは、現状ではモデル的な手法に頼らざるを得ない。統合摂動論は一般的な方法であるがゆえに、具体的なモデルには依存しない方法である。そこで、宇宙論的な観測量の予言において、何がモデルに依存する性質で、何がモデルの詳細に依存しない普遍的な性質なのかを明らかにすることが重要となる。これについては構造形成の数値シミュレーションに基づく手法と解析的なモデルに基づく手法を総合的に組み合わせることで明らかにすることが確実な研究方法のひとつである。

統合摂動論は様々な点で宇宙論における大規模構造の有用性を広げるものでもある。これまでの摂動論はダークエネルギーの性質を制限するバリオン音響振動を用いる方法に应用されることが多かった。最近、大規模構造の精密観測と初期ゆらぎの非ガウス性を通じて、インフレーション理論などの極初期宇宙のモデルに制限を加えられることが判明している。しかしこれまではいわゆるピーク・背景分離法や高ピーク近似などの近似に基づく、制限された解析しかされてこなかった。この分野に統合摂動論を用いると、これらの近似による制限を取り除いた理論的予言が可能になる。さらに、いわゆる赤方偏移変形と呼ばれる大規模構造の効果により、重力理論のテストを行う観測計画もあるが、これについても統合摂動論は有力な理論解析の方法になり得る。これらの興味深い将来観測を念頭において、統合摂動論を応用する研究を行う。ここで、具体的なインフレーション理論などの極初期宇宙モデルや、修正重力理論などを仮定したとき、どのようにモデルの選別が可能かを具体的に計算で示して明らかにする。このようにして、統合摂動論を宇宙論の解析手法として完成の域へ近づけ、その可能性を最大限に広げることが目的である。

3. 研究の方法

統合摂動論の基礎的な部分にまだ積み残してある研究課題のうち、大規模構造による宇宙の初期ゆらぎ非ガウス性の影響を統合摂動論で予言するための、基礎的な手法を確立する。初期ゆらぎ非ガウス性は、インフレーション理論、あるいはそれに代わり得る初期宇宙モデルを観測的に選別するのに重要な性質である。近年、非常に大きなスケールの大規模構造を用いると、初期ゆらぎ非ガウス性を強力に制限できることが示されて大きな話題となっているが、実際にこれを行お

うとすると、現状で提案されている解析的手法はまだ不十分である。統合摂動論の手法を用いると、これまでの近似的な手法を摂動論の範囲でより厳密な手法に拡張できる。このことを実際に示すために必要な基礎的な研究を行う。

具体的には、一般的な初期ゆらぎ非ガウス性のある場合について、統合摂動論の枠組みを用いて大スケールのパワースペクトルを表す解析的な表式を求める。ここで求める表式は、初期ゆらぎ非ガウス性や銀河バイアスが（物理的に妥当な範囲内で）どのようなものであるとも一般的に成立するものである。その次に具体的な初期ゆらぎ非ガウス性の典型的なモデル、および銀河バイアスの典型的なモデルをその一般的表式に用いて、具体的な数値として大スケールのパワースペクトルを求める。これを、これまでの近似的な方法で求めたパワースペクトルと比較し、新しい方法の有用性を示す。

また、銀河バイアスには必ず不定性が伴うので、その不定性がどのように理論的な大スケールのパワースペクトルなどの観測量に伝搬するのかを明らかにする。これについても数値シミュレーションと統合摂動論の組み合わせによる研究が有効である。バイアスのモデルを変化させてみることで、大スケールの観測量にどのような影響があるかは、解析的な統合摂動論によって予言することができる。一方、小スケールでは摂動論が破綻するため、数値シミュレーションにより調べるしかない。両者の比較により、どのスケールまで統合摂動論が有効かを明らかにする。このことにより、将来の大規模構造の観測において、銀河バイアスの不定性の影響を受けない観測量が何かを明らかにする。

4. 研究成果

当初の目的の地、主要な部分については順調に研究が進められ、さらに進んで付随する新しい知見や興味深い発見を得ることができた。以下のその成果の概要を箇条書きとしてまとめる。

(1) 宇宙の初期ゆらぎに原始非ガウス性があると、宇宙の大規模構造に対して非常に大きなスケールのパワースペクトルを変形させることが知られている。この効果はこれまでピーク背景分離法などの近似的な手法に基づいて調べられてきたが、統合摂動論の一般的枠組みを用いると、そうした近似に頼らずに一般的な形で予言することができることを示した。さらに、赤方偏移空間変形の効果も取り入れることにより、これまでの理論的予言能力を大きく広げることが示された。

- (2) 前項における手法をさらに発展させ、統合摂動論を用いて、原始非ガウス性を特徴づける高次の統計量である4点相関関数、もしくはトリスペクトルとの関係を明らかにした。3点相関関数との関係をつける方法を提案し、また一般的な高次相関の取り扱い方法を明らかにした。
- (3) 統合摂動論を用いて予言された確率的バイアスの効果について、理論予言と数値シミュレーションを組み合わせで解析した。大きなスケールでは確率的バイアスの効果は小さいとはいえ、将来的な大規模サーベイでは無視できない効果として残る。大スケールにおいて統合摂動論と数値シミュレーションの一致が示され、この点においても統合摂動論が定量的に有用な手法となることを示した。
- (4) 統合摂動論の枠組みにおいて、具体的に1ループ近似でのパワースペクトルと相関関数を解析的な公式として完全に求めた。赤方偏移空間変形の効果を取り込むのみならず、バイアスの効果はくりこまれたバイアス関数によって完全に表される。くりこまれたバイアス関数が与えられた時の、一般的な表式を具体的に表し、比較的簡単なバイアスのモデルであるハローバイアスモデルに基づいて予言されるパワースペクトルと相関関数の値を数値的に求めた。
- (5) 原始非ガウス性のある場合の統合摂動論の応用として、銀河バイアスペクトルの性質を調べた。これまでのパワースペクトルの解析を補完するものである。線形理論によれば、原始非ガウス性はそのまま観測される大規模構造のバイアスペクトルに刻み込まれているはずだが、銀河バイアスの影響によりその関係は複雑化する。統合摂動論により、この効果を求めることが可能である。様々なタイプの非ガウス性について、観測がどのように観測量に反映されるかを調べた。さらに統合摂動論を非ガウス性の研究に用いる場合の一般的な図形的手法を明らかにした。
- (6) 統合摂動論はラグランジュ描像に基づいて非線形性を取り扱う、ラグランジュ摂動論をその基礎的な方法として用いている。ラグランジュ摂動論については、オイラー摂動論と異なり、高次摂動項を系統的に求める再帰関係式が長い間知られていなかった。最近、オイラー摂動論と組み合わせた再帰関係式や、特定の宇宙モデルのみに適用できる再帰関係式が提出されたが、ラグランジュ摂動論の枠組みだけから一般的な宇宙論モデルに適用できる再帰関係式を初めて導いた。この成果は、統合摂動論の基本的な部分において高次効果を計算するた

- めの強力な方法になる。
- (7) 統合摂動論の応用として、撮像サーベイを想定した重力レンズ効果に対する観測可能量からいかに宇宙論モデルを制限できるかについて研究した。特に将来的に計画されている具体的な観測が原始非ガウス性をいかに制限するかを定量的に見積もった。これにより、LSSTという大規模撮像サーベイでは、現在Planck衛星によって得られている制限をはるかに上回ることが示された。

統合摂動論を直接用いてはいないが、密接な関連を持つ重要な成果をあげることができた。それらを以下に列挙する。

- (1) 原始非ガウス性を宇宙マイクロ波背景放射から制限する方法として、我々の開発してきた幾何学的方法であるミンコフスキー汎関数がある。これを実際のデータであるWMAP7に適用して、原始非ガウス性を実際に制限した。特に、3次の非ガウス性だけでなく、4次の非ガウス性についての制限を導き出した。これは他の方法で求めた制限と整合的であるだけでなく、多少強い制限も与えている。
- (2) 具体的に原始非ガウス性を導く宇宙論的なモデルとして、初期宇宙におけるベクトル場の非等方応力摂動がある。このモデルから出てくる原始非ガウス性の性質を理論的に調べ、いわゆる局所型非ガウス性と呼ばれる性質に近い性質を持つことを示した。そして、この非ガウス性が宇宙の大規模構造に及ぼす観測量を見積もった。特に、このベクトル場が原始的な磁場と解釈できる場合には、有効非ガウス性パラメータの値が負になることを示した。
- (3) 現在の宇宙における密度ゆらぎは、重力的な非線形効果のために、小スケールほど強い非ガウス性がある。この効果は宇宙論モデルに制限を与えるため、定量化が重要だが、その莫大な自由度のために取り扱いが難しい。比較的簡単に求められる統計量であるミンコフスキー汎関数を用いることができる。この効果を理論的に特徴付ける方法があるが、観測量に現れる赤方偏移空間変形効果を非線形領域で評価することはこれまでになされていなかった。最近開発された高次非ガウス性の展開法を応用することで、この効果を取り入れた理論的予言を行った。ここで開発した手法は、この問題だけにとどまらず、非等方な空間における非ガウス性の解析という面で、一般的なものとなっている。
- (4) 初期宇宙のモデルとして、インフレーション期におけるインフラトン場とアクシオンの場との重力相互作用を調べ

た。将来観測によって明らかになるであろう宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測や重力レンズのデータにより、このモデルにどのような制限がつけられるかを明らかにした。曲率ゆらぎと等曲率ゆらぎとの共相関を用いることにより、その制限が可能となる。具体的にアクシオンのパラメータが共相関にどのような依存性を持つかを明らかにした。

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 13 件)

以下の雑誌論文はすべて査読あり

- (1) Takahiko Matsubara, "Deriving an Accurate Formula of Scale-dependent Bias with Primordial Non-Gaussianity: An Application of the Integrated Perturbation Theory", *Physical Review D*, 86, id:063518 (2012), DOI:10.1103/PhysRevD.86.063518
- (2) Chiaki Hikage, Takahiko Matsubara, "Limits on Second-Order Non-Gaussianity from Minkowski Functionals of WMAP Data", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 425 (2012), pp. 2187-2196, DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21572.x
- (3) Shuichiro Yokoyama, Takahiko Matsubara, "Scale-dependent bias with higher order primordial non-Gaussianity: Use of the Integrated Perturbation Theory", *Physical Review D*, 87, id:023525 (2013), DOI:10.1103/PhysRevD.87.023525
- (4) Maresuke Shiraishi, Shuichiro Yokoyama, Kiyotomo Ichiki, Takahiko Matsubara, "Scale-dependent bias due to primordial vector fields", *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 432 (2013), pp. 2331-2338, DOI:10.1093/mnras/stt594
- (5) Masanori Sato, Takahiko Matsubara, "Nonlinear stochastic biasing of halos: Analysis of cosmological N-body simulations and perturbation theories", *Physical Review D*, 87, id:123523 (2013), DOI:10.1103/PhysRevD.87.123523
- (6) Sandrine Codis, Christophe Pichon, Dmitry Pogosyan, Francis Bernardeau and Takahiko Matsubara, "Non-Gaussian Minkowski functionals and extrema counts in redshift space",

- Mon. Not. R. Astron. Soc., 435 (2013), pp. 531-564., DOI:10.1093/mnras/stt1316
- (7) Takahiko Matsubara, "Integrated Perturbation Theory and One-loop Power Spectra of Biased Tracers", Physical Review D, 90, id.043537 (2014), DOI:10.1103/PhysRevD.90.043537
- (8) Shuichiro Yokoyama, Takahiko Matsubara, Atsushi Taruya, "Halo/Galaxy Bispectrum with Primordial non-Gaussianity from integrated Perturbation Theory (iPT)", Physical Review D, 89, id:043524 (2014), DOI:10.1103/PhysRevD.89.043524
- (9) Kenji Kadota, Jinn-Ouk Gong, Kiyotomo Ichiki, Takahiko Matsubara, "CMB probes on the correlated axion isocurvature perturbation", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 03: 026 (2015), DOI:10.1088/1475-7516/2015/03/026
- (10) Motonari TONEGAWA et al. (26名中21番目), "The Subaru FMOS Galaxy Redshift Survey (FastSound). I. Overview of the Survey Targeting on H α Emitters at z~1.4 Survey", Publications of the Astronomical Society of Japan, 67 (5):81 (2015), DOI:10.1093/pasj/psv044
- (11) Takahiko Matsubara, "Recursive Solutions of Lagrangian Perturbation Theory", Physical Review D, 92, id:023534 (2015), DOI:10.1103/PhysRevD.92.023534
- (12) Teppei Okumura et al. (25名中17番目), "The Subaru FMOS galaxy redshift survey (FastSound). IV. New constraint on gravity theory from redshift space distortions at z~1.4", Publications of the Astronomical Society of Japan, accepted (arXiv:1511.08083)
- (13) Dipak Munshi, Bin Hu, Takahiko Matsubara, Peter Coles, Alan Heavens, "Lensing-induced morphology changes in CMB temperature maps in modified gravity theories", Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, accepted (arXiv:1602.00965)
- [学会発表](計 14 件)
- (1) 松原隆彦, "Deriving the scale-dependent bias from the integrated perturbation theory", Workshop on Large Scale Structure, 2012/7/30-8/2 (The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Strada Costiera 11, I-34151 Trieste, Italy)
- (2) 松原隆彦, 「宇宙の大規模構造と精密宇宙論」益川塾、2012/10/19(京都産業大学)
- (3) 松原隆彦, 「宇宙の大規模構造による観測的宇宙論」観測的宇宙論ワークショップ、2012/11/27-29(東京大学本郷キャンパス)
- (4) 松原隆彦, "The Integrated Perturbation Theory for the Large-scale Structure of the Universe", ACP seminar (Astronomy - Cosmology - Particle Physics), 2013/1/22(千葉県柏市 カプリ数物連携宇宙研究機構)
- (5) 松原隆彦, 「統計的摂動解析理論に基づく観測的宇宙論の開拓」日本天文学会林忠四郎賞受賞記念講演、2013/3/21(埼玉大学)
- (6) 松原隆彦, 「大規模構造の統合摂動論」2nd Workshop on Particle Physics of the Dark Universe, 2013/4/4(東京大学理学部1号館小柴ホール)
- (7) 松原隆彦, 「宇宙の大規模構造と宇宙論」KMI小研究会、2013/5/29(名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構)
- (8) 松原隆彦, "Integrated perturbation theory and its applications", Workshop on Galaxy Bias: Non-linear, Non-local and Non-Gaussian, 2013.10.8-11 (The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Strada Costiera 11, I-34151 Trieste, Italy)
- (9) 松原隆彦, 「大規模構造における統合摂動論と非局所バイアス」関西相対論・宇宙論合同セミナー、2015/8/1(京都大学基礎物理学研究所)
- (10) 松原隆彦, 「銀河サーベイ理論」2013理論懇シンポジウム:「2020年代を見据えた理論宇宙物理・天文学」2013/12/25-27(東大柏キャンパス図書館メディアホール)
- (11) 松原隆彦, "Features of integrated perturbation theory for the large-scale structure of the universe", Precision Era for Large Scale Structure, 2014/7.6-11, Center for Theoretical Physics of the Universe (CTPU), Institute for Basic Science (IBS), Daejeon, Korea
- (12) 松原隆彦, 「宇宙の大規模構造と統合摂動論」KMI topics, 2015/2/18(名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構)
- (13) 松原隆彦, 「宇宙論における非線形構造形成」2015年度第45回天文・天体物理若手夏の学校、2015/7/27-30, 信州・戸倉上山田温泉 ホテル圓山荘(長野県

- 千曲市)
(14) 松原隆彦、"Dynamics: statistics of extrema and integrated perturbation theory", Statistics of Extrema in Large Scale Structure, 2012/3/9 (Lorentz Center@Snellius, Leiden, Netherlands)

〔図書〕(計 8 件)

- (1) 岡村定矩(編集代表)、家正則・犬塚修一郎・小山勝二・千葉柁司・富阪幸治(編著)、執筆多数、『天文学辞典』〔シリーズ「現代の天文学」別巻〕日本評論社、全 540 ページ、日本天文学会 100 周年記念出版シリーズ ISBN 978-4-535-60738-5
- (2) 谷口義明(監修)、松原隆彦他(計 26 名、全 768 ページ、担当:1-80 ページ)、『新・天文学事典』講談社ブルーバックス、ISBN 978-4-062-57806-6
- (3) 松原隆彦著、『宇宙論の物理 上』東京大学出版会、328 ページ、ISBN:978-4-13-062615-6
- (4) 松原隆彦著、『宇宙論の物理 下』東京大学出版会、346 ページ、ISBN:978-4-13-062616-3
- (5) 松原隆彦著、『宇宙はどうして始まったのか』光文社(光文社新書 738)、243 ページ、ISBN: 978-4-334-03841-0
- (6) 松原隆彦著、『大規模構造の宇宙論』〔基本法則から読み解く物理学最前線 4〕共立出版、198 ページ、ISBN:978-4-320-03524-9
- (7) 竹内努・市來淨與・松原隆彦訳、Helge S. Kragh 著、『人は宇宙をどのように考えてきたか』共立出版、全 416 ページ、2015 年 12 月 25 日発行、ISBN:978-4-320-04728-0
- (8) 松原隆彦著、『宇宙の誕生と終焉』SBクリエイティブ(サイエンス・アイ新書 350) 208 ページ、ISBN:978-4-7973-8550-2

〔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

<http://www.a.phys.nagoya-u.ac.jp/~taka/research/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松原 隆彦 (MATSUBARA Takahiko)
名古屋大学大学院理学研究科・准教授
研究者番号：00282715

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：