

令和元年6月7日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05074

研究課題名(和文) 宇宙の大規模構造における天体バイアスの統計的研究

研究課題名(英文) Statistical study of bias in astronomical objects and large-scale structure

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙論的な非線形摂動論における独創的な理論手法である「統合摂動論」の枠組みの中では天体のバイアスを一般的に扱うことができる。天体バイアスの具体形については不定性があるが、バイアス関数というもの重要な役割を果たす。本研究では、いくつかの異なるバイアスモデルについて具体的にバイアス関数を求めることに成功した。さらにそれを用いて最終的な観測可能量であるパワースペクトルや相関関数などがバイアスの違いによってどのような影響を受けるかを系統的に調べた。その結果、大スケールになるほど、また、高赤方偏移になるほど、バイアスモデルによる違いは小さくなることを明らかにした。

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は、私たちの宇宙がどのようなものなのかを明らかにする上で重要な役割を担っている。その理論的理解を進める上で、天体バイアスの問題は克服すべき重大な課題の一つであるが、バイアスを第一原理から理論的に扱うことは不可能に近い。そこで天体形成のモデル化が必要になる。宇宙論的な解析においては大スケールの情報が有用であるため、大スケール側で天体バイアスの効果を系統的に調べられるようになったことは、重要な進歩である。将来行われる大規模な銀河サーベイの解析に対する基礎を与えることになり、それを通じて私たちの宇宙がどのようにできているのかという根源的な問題を実証的に調べることが可能になる。

研究成果の概要(英文)：The integrated perturbation theory is a set of original methods in cosmological perturbation theory. In this formalism, the biasing effect of astronomical objects is generally included. While there are uncertainties in the actual modeling of bias, the "bias functions" play important roles in this theory. In this study, analytic expressions of the bias functions are explicitly derived for several models of biasing. Using the derived expressions, we studied how different biasing schemes finally affects the observable quantities such as the power spectrum and the correlation functions. As a result, the differences by the different biasing schemes turned out to be smaller on larger scales and at larger redshift.

研究分野：宇宙論

キーワード：宇宙物理学 宇宙論 宇宙の大規模構造 天体バイアス 非線形摂動論

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近将来的に大型観測計画が目白押しの宇宙の大規模構造は、今後の宇宙論にとって主要な情報源のひとつである。この観測の解析には、天体バイアスという問題のあることが長年知られている。近年、申請者の開発した「統合摂動論」の枠組みにより、宇宙の大規模構造における天体バイアスの問題を系統的に扱う基礎的な手法が示された。

この研究は始まったばかりであり、具体的な天体バイアスに関する研究が次の重要なステップであった。本研究では、この手法を現実の天体に応用するための基礎的な理論研究を行うことを目指した。世界中で進められている大規模構造の観測計画と連動した研究を目指すものである。

### 2. 研究の目的

宇宙の大規模構造による宇宙論を遂行するためには、トレーサーとなる天体の分布について理解している必要がある。とくに観測される天体の空間分布とダークマターの質量分布との関係にある不定性を取り除くことは、大規模構造を宇宙論の研究に応用するときに避けては通れない。天体分布と質量分布との関係を「バイアス」という。これまでの解析では単純化したバイアスのモデルが使われてきたが、これから精密性の要求される大規模構造の将来観測計画では、そのような単純な手法では不十分である。

宇宙論的な非線形摂動論における独創的な理論手法「統合摂動論」を用いると、特定のモデルに基づかず一般的にバイアスの効果を摂動論に組み込むことができる。本研究の主要な目的は、この研究をさらに発展させることである。摂動論におけるバイアスの不定性はバイアス関数というものに押し込められる。そこで、このバイアス関数を具体的な天体について求め、そこにある不定性を同定し、可能な限りその不定性を除去することが、本研究の主要な目的である。これを統合摂動論に用いることにより、天体バイアスを含んだ大規模構造の観測量を非線形領域に対して具体的な予言を行うための基礎理論づくりを目指す。

### 3. 研究の方法

単純なハロー・モデルを超えたバイアス・モデルを確立する。これまでに提案されているバイアスのモデル化に対するいろいろな考え方について、バイアス関数の概念を用いて再構築することを行う。それを数値的なハロー形成シミュレーションなどと比較しつつ、天体のバイアスを統一的に扱って大規模構造の解析に用いることのできる枠組みを構築する。その上で、この枠組みを、大規模構造の解析で広く用いられている統計量のパワースペクトルや相関関数の予言に応用する。これらとは相補的な統計量である、パワースペクトルやトリスペクトル、高次相関関数、ミンコフスキー汎関数などの他の統計量にも応用する。また、1ループ近似を超えた高次の摂動効果を取り入れることも視野に入れている。以上の研究により、大規模構造に含まれる天体バイアスの不定性を系統的に理解し、それに基づいてバイアスの不定性を除去する方法を探る。この成果を現在進行中の大規模な銀河サーベイ計画に応用するための手がかりを得る。

### 4. 研究成果

(1) 統合摂動論はラグランジュ描像に基づいた非線形摂動解析手法であり、伝統的なオイラー描像に基づく摂動解析手法に比べると先行する研究の歴史が浅い。このため、オイラー摂動論では古くから知られていた高次摂動項を再帰的に導く再帰関係式が、ラグランジュ摂動論では長らく知られていなかった。最近、オイラー摂動論と組み合わせるラグランジュ摂動論の再帰関係式を導く研究や、特定の宇宙モデルに限った再帰関係式が求められたが、本研究ではこれを一般的な宇宙モデルについて、ラグランジュ摂動論の枠組みの範囲内だけで整合的に導くことに成功した。これにより統合摂動論の基礎がより固められた。

(2) さらに、天体バイアスについて幾つかの有望なモデルを統合摂動論に組み込むことにも成功した。統合摂動論では、天体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。この関数の具体形を求めることは、バイアスの問題を解く本質であるが、これまで簡単なハローバイアスモデルに基づいたものしか得られていなかった。今回、初期ゆらぎの密度ピークに基づくバイアスモデルについて、その解析的表式を導いた。さらに、ハローの崩壊条件を改善してピークモデルと組み合わせた Excursion Set Peaks というモデルについても、解析的にバイアス関数を求めることに成功した。これを統合摂動論に組み入れることにより、観測量に対して具体的な予言を定量的に行うことができるようになった。大きなスケールのパワースペクトルや相関関数は、バイアスモデルの違いによって数パーセントの影響があり、精密な宇宙論的解析においては無視できないことを示した。

(3) また、統合摂動論を2次元撮像サーベイに応用し、将来観測で初期ゆらぎの非ガウス性がどのように制限できるかを明らかにした。非ガウス性として最低次の効果を表すパラメータに加えて、高次の効果を表すパラメータを考えると、パワースペクトルだけではこれらのパラメータの区別がつかないが、3点統計量であるパワースペクトルを組み合わせることによってある程度区別することができることを示した。さらに、宇宙の再イオン化時における銀河間物質の

状態について、水素 21cm 線信号から見積もられる場の幾何学的な特徴について、ミンコフスキー関数という統計量を用いた解析を行った。

(4) 天体バイアスのピークモデルに特徴的な性質として、速度場に対するバイアス、すなわち速度バイアスが自然に現れてくることを新しく発見した。この速度バイアスはピークモデルを用いてこれまでに別の方法でも導かれていたが、統合摂動論に含まれる繰り込まれたバイアス関数という概念を用いて再導出できることがわかった。さらに、速度バイアスが現れる原因が、ピークバイアスにおいて空間微分が消えるという拘束条件にあることを突き止めた。そこでまず、低次近似の範囲で、簡単な場合についてピークモデルにおける速度バイアスを再導出できることを示し、先行研究で得られたものと一致する結果を得た。その後、より一般的な枠組みにおいて、空間微分が消える拘束条件下で繰り込まれたバイアス関数を取る形を導出し、高次の項も含めて速度バイアスを計算する一般的な形式を整備した。

(5) 銀河の向きの揃い方の解析によって、宇宙の初期ゆらぎに対する非ガウス性を検出する方法に関する研究も行った。ストリング理論から予言されるスピンを持った質量のある粒子はつぶれた形の初期 3 点スペクトルを導くことが知られている。これとは別に、初期宇宙においてベクトル場があったときにも、それに近い 3 点スペクトルが出てくる。その違いが観測量にどのように現れるのかを詳細に調べた。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 6 件)

小粥一寛、松原隆彦、西澤淳、浦川優子 “ Intrinsic galaxy alignment from anisotropic primordial non-Gaussianity ” , Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 08:014 (2018) DOI:10.1088/1475-7516/2018/08/014

吉浦伸太郎、島袋隼士、高橋慶太郎、松原隆彦 “ Studying topological structure in the epoch of reionization with 3D-Minkowski functionals of 21cm line fluctuations ” , Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 査読有, 465, 394-402 (2017) DOI:10.1093/mnras/stw2701

橋本一彦、樽屋篤史、松原隆彦、並河俊哉、横山修一郎 “ Constraining higher-order parameters for primordial non-Gaussianities from power spectra and bispectra of imaging surveys ” , Physical Review D, 査読有, 93, 103537 (2016) DOI:10.1103/PhysRevD.93.103537

松原隆彦, Vincent Desjacques “ Impacts of biasing schemes in the one-loop integrated perturbation theory ” , Physical Review D, 査読有, 93, 123522 (2016) DOI:10.1103/PhysRevD.93.123522

Dipak Munshi, Bin Hu, 松原隆彦, Peter Coles, Alan Heavens “ Lensing-induced morphology changes in CMB temperature maps in modified gravity theories ” , Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 査読有, 04: 056 (2016) DOI:10.1088/1475-7516/2016/04/056

松原隆彦 “ Recursive Solutions of Lagrangian Perturbation Theory ” , Physical Review D, 査読有, 92, 023534 (2015) DOI:10.1103/PhysRevD.92.023534

### 〔学会発表〕(計 5 件)

松原隆彦, "Analytic Minkowski Functionals in CMB" 2017.6.20 "Workshop on Minkowski functionals" カブリ数物連携宇宙研究機構, 千葉県柏市

松原隆彦, "The Lagrangian perturbation theory and the integrated perturbation theory" 2016.5.24-26 "Nonlinear evolution of the large scale structure of the Universe: Theory meets Expectations", Institut Astrophysique de Paris (IAP), Paris, France

松原隆彦, "The integrated perturbation theory" 2016.4.4-6 3rd Korea-Japan workshop on Dark Energy, a cosmology workshop jointly organized by the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) and Tokyo University of Science (TUS), Daejeon, Korea

松原隆彦, "Dynamics: statistics of extrema and integrated perturbation theory" 2016.3.7-11 Statistics of Extrema in Large Scale Structure, Lorentz Center@Snellius, Leiden, Netherlands

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」 2015.8.1 関西相対論・宇宙論合同セミナー, 京都大学基礎物理学研究所

### 〔図書〕(計 5 件)

松原隆彦著『図解 宇宙のかたち「大規模構造」を読む』, 光文社(光文社新書 968), 2018年10月30日発行(本体価格920円+税, 280ページ), ISBN:978-4-334-04374-2

松原隆彦著『私たちは時空を超えられるか』, SBクリエイティブ(サイエンス・アイ新書 420), 2018年10月25日発行(本体価格1000円+税, 208ページ), ISBN:978-4-7973-8899-2

松原隆彦著『目に見える世界は幻想か?』, 光文社(光文社新書 865), 2017年2月20日発行(本体価格780円+税, 288ページ), ISBN:978-4-334-03968-4  
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), 2016年2月16日発行(本体価格1000円+税, 208ページ), ISBN:978-4-7973-8550-2  
訳書: Helge S. Kragh 著『人は宇宙をどのように考えてきたか』"Conceptions of Cosmos - From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology", 竹内努・市來淨與・松原隆彦共訳, 共立出版, 2015年12月25日発行(本体価格4600円+税, 416ページ), ISBN:978-4-320-04728-0

〔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:  
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:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等  
<http://tmcosmos.org/taka/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:  
ローマ字氏名:  
所属研究機関名:  
部局名:  
職名:  
研究者番号(8桁):

(2) 研究協力者

研究協力者氏名:  
ローマ字氏名:

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、研究者個人に帰属されます。