

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540260

研究課題名（和文） 高赤方偏移宇宙の大規模構造を用いた宇宙論

研究課題名（英文） Cosmology with the Large-scale structure of high-redshift universe

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

研究成果の概要：

高赤方偏移宇宙の大規模構造からいかにダークエネルギーをはじめとする宇宙論的な情報を得るかについて、解析的な方法と数値的な方法の両面から詳細に研究した。とくにバリオン音響振動を用いてダークエネルギーの制限を得るために必要な理論的に強力な手法を開発した。そして実際のSDSSデータを解析した。さらに、宇宙初期状態を探るために重要な、ゆらぎの非ガウス性に関する情報を得るため、必要な理論的手法を確立した。その手法を用いて、宇宙マイクロ波背景放射温度ゆらぎのデータを解析した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,500,000	780,000	4,280,000

研究分野：宇宙論

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙論、宇宙の大規模構造、宇宙背景放射ゆらぎ、統計的宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 21世紀に入って精密な宇宙背景放射のゆらぎの観測、広範囲に及ぶ宇宙大規模構造の観測などが次々と結果を出し、これまでかなり不定性の大きかった宇宙論パラメータが2桁あるいはそれ以上の精度で求まるなど、宇宙論の研究はこれまでにない新たな段階を迎え、精密な観測データに基づいて定量的な研究が可能な時代となってきた。

(2) 宇宙の構成成分のうち、通常物質はわずか宇宙全体の4%でしかなく、残りはダークマターとダークエネルギーと呼ばれる未知の成分である。これら未知成分は宇宙の進化を支配しており、宇宙の起源、宇宙の構造、宇宙の未来などこの世界の根源にかかわる研究対象である。とくにダークエネルギーにいたっては、通常の物理理論では理解に苦しむような、かなり不自然な存在である。M理論や余次元理論など、急進的な物理理論によつ

て説明が試みられるなど、世界中の多くの理論研究者の興味を引いているが、まったくもって解決には程遠い状況にある。

## 2. 研究の目的

- (1) 本研究は、現在急速に進展している高赤方偏移宇宙の大規模構造を用いてダークエネルギーなど宇宙の未知成分の本質に迫っていく方法を理論的に完成させ、実際の観測データを用いてこれを実際に実行することを目的とする。高赤方偏移宇宙は非常に遠方の宇宙であると同時に、非常に昔の宇宙である。昔の宇宙からやってきた光は長い時間をかけてわれわれのところへ到達するが、その伝達途中に宇宙膨張の歴史や宇宙のジオメトリに影響を受ける。
- (2) 低赤方偏移の大規模構造の観測はかなり進んだこともあり、今後は中～高赤方偏移宇宙の大規模構造の観測が主たる対象となる。このような高赤方偏移サーベイでは、われわれがこれまでに提案してきた高赤方偏移の大規模構造を通じてダークエネルギーを探査することが主目的のひとつととらえられている。さらに精密な新手法を開発して将来に有用な研究を生み出すことが大きな目的である。

## 3. 研究の方法

- (1) 高赤方偏移宇宙の構造を理論的に精密に記述する。このため、解析的計算によってその定量的な振る舞いを表すための定式化を行う。宇宙論においては、観測量をどのように理論と結び付けるのかが自明ではない。解析的な定式化により、どのような観測の解析を行うとどのような理論的側面が明らかになるのかも明らかにすることができる。大規模構造の解析方法として、パワースペクトルや相関関数などの標準的な方法についても詳しく再考するとともに、固有モード解析やトポロジー解析など異なる統計的方法を用いた方法についてもその理論構造を明らかにして、具体的な観測の解析へと結び付ける。これによりダークエネルギーの効果を精密に調べられるようにするとともに、初期ゆらぎの非ガウス性や、重力的非線形効果などこれまで難しかった新しい理論解析へも向かうことができる。
- (2) 大規模構造の形成においては非線形効果が無視できない。大スケールでの非線形効果は小さいのでこれまでの解析では無視されていた。しかし、精密な宇宙論解析においては、かなりの大スケールである 100Mpc 程度にも非線形効果を考慮す

る必要がある。このため、上記のように解析的計算によってこれを明らかにする方法とは相補的に、数値シミュレーションによっても調べていくことが有用である。大スケールの精密なシミュレーションのためには、これまでとは異なり、大きなシミュレーションボックスにおいて大量のシミュレーションを繰り返し行う。こうして得られた数値データを解析して、上記の解析計算と比較し、お互いを補いつつ高赤方偏移宇宙の大スケールの構造形成を精密に明らかにする。

## 4. 研究成果

- (1) 新しい定式化に基づく宇宙論的摂動法の展開に対して、これまでの標準的方法を打ち破るインパクトのある成果を得た。これまでの標準的な宇宙論的摂動法では、大スケールの非線形成長が精度よく記述できないこと、観測に対応する赤方偏移空間において信頼できる予言をできないこと、さらには小スケールに好ましくない振舞いをもち、パワースペクトルから相関関数を計算できないこと、などさまざまな欠点知られている。そこでラグランジュ的な流体記述に基づいた定式化から出発し、上のような欠点を克服する定式化に成功した。この結果、初期宇宙のバリオン音響振動に起源をもつ宇宙大規模構造の特徴を用いて宇宙のダークエネルギーを制限する方法に特に有用な解析的方法を提供できることを明らかにした。とくに赤方偏移空間における理論的予言としては、ほかの方法では提供できない唯一の方法となる独自性の高いものである。この手法はほかのグループによっても活用され始めている。今後ともさらに重要性が客観的に明らかになると期待している。
- (2) 上記の方法では赤方偏移空間の非線形効果の予言の可能な定式化である点で新規性が特に高かった。銀河分布の解析においてさらに大きな問題として、宇宙の質量分布と銀河分布が違うという、いわゆる「バイアス」の問題があった。これについてラグランジュ的な描像に基づいた本手法では、いわゆるハローバイアスと呼ばれる有望なバイアスの定式化を、非線形摂動論と結合することができることを示した。この新しい観点は極めて独自性が高く、他の宇宙論的摂動論の研究においては、「難しい問題」として積み残されるのが常であった。本研究成果は、これに対して初めての突破口を開いたものである。そして、初めて解析的にハローバイアスの非線形効果を導くことに成

- 功した。しかも赤方偏移空間の非線形効果も同時に取り扱うことができた。
- (3) 数値シミュレーションの解析も広範囲に行った。特に大スケールのバリオン音響振動について、数値データ特有の振る舞いに関する解析を進めることに成功した。これによりダークエネルギー探査に数値シミュレーションを応用する際の基本的な方法に新しい知見を得ると共に、不定性の除去方法という実践的な面での進展を得た。数値シミュレーションにおいてはシミュレーションボックスが有限であるがゆえに、特有の誤差を持つ。よく使われるパワースペクトルにおいて、この誤差がどのような構造をしているのかを明らかにすることが重要である。これについて理論的な摂動論手法とも組み合わせることで数値解析を行い、誤差の相関構造を明らかにした。さらにその結果に基づき、具体的な数値シミュレーションデータの誤差を補正する新しい方法を開発した。ダークエネルギーの制限においてこの方法は有用に応用されつつある。
- (4) 線形理論に基づく2次元相関関数により、SDSSデータを実際に用いて解析し、バリオン音響振動を用いたダークエネルギーの制限を求めることに成功した。この方法は以前私が独自に開発した理論的成果に基づき、SDSSのLRG銀河の解析に実際に応用したものである。はじめてLRG銀河のバリオン音響振動を発見したD. Eisensteinは1次元化した相関関数を用いたが、今回の2次元相関関数はそれよりも情報が多い。現在のデータ量のレベルではその違いはそれほど多くはなかったが、この方法論を初めて実地のデータに応用し、その有効性を明らかにした。そして、将来データ量が増えた時にはその優位性が明らかになるという確証を得た。今後はこの方法に非線形効果を取り入れることにより、将来の標準的な方法論にすることが具体的に目標として展望に入ってきた。
- (5) 宇宙の初期状態を調べるのに重要な宇宙背景放射ゆらぎに対し、斬新な解析法であるミンコフスキー汎関数について研究した。これにより宇宙初期にあったとされるインフレーション理論などを、ゆらぎの非ガウス性という観点からどのように調べることが可能なかを明らかにした。さらに、この手法を用いて実際の観測であるWMAPの温度ゆらぎデータを解析し、初期非ガウス性に対する制限を得た。この研究成果は、これまでのバイスペクトルを用いる手法とは相補的な解析として、国内外においてよく引き合いに出されており、現在の研究動向にイン

- パクトを与えている。
- (6) 宇宙論をはじめとするゆらぎの場の解析において重要なフーリエ解析についての基礎的な研究を行った。フーリエ解析の統計的性質はガウス場についてはほぼ完全に解明されているといってもよいが、非ガウス場についての解明は依然ほとんど進んでいなかった。これについて新しく系統的な方法を考案し、大きな進展を得た。その結果、宇宙論などで有用な一般的なゆらぎのランダム場に関する一般的な定理をいくつも発見した。さらに具体的な統計的性質を明らかにするなど、これまでまったく知られていなかった事実を多数明らかにした。いくつかの非ガウス場の例について数値実験を行い、これらの解析的な結果を確かめた。これにより今後の宇宙論でもさらに重要な役割を果たすフーリエ解析の可能性を大きく広げている。
- (7) 宇宙の大規模な銀河分布から宇宙の性質を調べる方法論として新たな観点からも研究した。これまでに使われていたカウントインセル法を拡張し、宇宙論パラメータを決定するのに最適となるようなカーネルを選ぶ可能性を探った。この結果、エパネチニコフカーネルと呼ばれるカーネルを用いれば、これまでの一様カーネルを用いるよりも有利であることを明らかにした。
- (8) 専用望遠鏡を用いた史上最大の銀河探査プロジェクト、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) に参加し、その5-7度目の公開に携わった。本プロジェクトは2000年から継続して参加しているもので、サーベイデータの宇宙論的解析のほかに、サーベイ戦略策定の基礎データのための理論解析などにも貢献した。SDSSデータは現在宇宙論において大きなインパクトを持つ人類の研究成果のひとつである。一昔前には考えられなかったほど宇宙論パラメータを正確に決められるようになったのは、宇宙背景放射、遠方超新星の観測とともに、このSDSSによる大規模構造の観測が大きな役割を果たした。これら3つの観測的進展は21世紀初頭の宇宙論進展における3大支柱である。大人数による共同研究ではあるが、その一角に貢献できたことは研究者として大きな喜びである。

## 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)

- ① K.N.Abzajian 他(199人中109番目)、The seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, ApJS, 掲載決定済み
- ② 西道啓博他 (13人中9番目)、Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations: Convergence Regime of N-body Simulations and Analytic Models, PASJ, 61, 掲載決定済み
- ③ 樽家篤史、小山和哉、松原隆彦、Signature of Primordial Non-Gaussianity on Matter Power Spectrum, Phys. Rev. D, 78, 123534-1-13 (2008), 査読あり
- ④ 松原隆彦、Nonlinear Perturbation Theory with Halo Bias and Redshift-space Distortions via the Lagrangian Picture, Phys. Rev. D, 78, 083519-1-21 (2008), 査読あり
- ⑤ 日影千秋、松原隆彦(6人中2番目)、他、Limits on Primordial Non-Gaussianity from Minkowski Functionals of the WMAP Temperature Anisotropies, MNRAS, 389, 1439-1446 (2008), 査読あり
- ⑥ 高橋龍一、吉田直樹、松原隆彦(11人中3番目)、他、Simulations of Baryon Acoustic Oscillations I: Growth of Large-Scale Density Fluctuations, MNRAS, 389, 1675-1682 (2008), 査読あり
- ⑦ 奥村哲平、松原隆彦(7人中2番目)、D. J. Eisenstein 他、Large-scale Anisotropic Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies, ApJ, 676, 889-893 (2008), 査読あり
- ⑧ J.K.Adelman-McCarthy 他 (158名中93番目)、The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, ApJS, 175, 297-313 (2008), 査読あり
- ⑨ 松原隆彦、Resumming Cosmological Perturbations via the Lagrangian Picture: One-loop Results in Real Space and in Redshift space, Phys. Rev. D, 77, 063530-1-19 (2008), 査読あり
- ⑩ J.K.Adelman-McCarthy 他(154人中88番目)、The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey, ApJS, 172, 634-644 (2007), 査読あり
- ⑪ 村田孔孝、松原隆彦、Effects of Smoothing Functions in Cosmological Counts-in-Cells Analysis, PASJ, 59, 73-91 (2007), 査読あり
- ⑫ 松原隆彦、Statistics of Fourier Modes in Non-Gaussian Fields, ApJ, 172, 1-32

(2007), 査読あり

- ⑬ 日影千秋、小松英一郎、松原隆彦、Primordial Non-Gaussianity and Analytical Formula for Minkowski Functionals of the Cosmic Microwave Background and Large-scale Structure, ApJ, 653, 11-26 (2006), 査読あり

[学会発表] (計 8 件)

- ① 松原隆彦、Nonlinear perturbation theory with halo bias and redshift-space distortions via the Lagrangian picture, The 3<sup>rd</sup> KIAS Workshop on COSMOLOGY AND STRUCTURE FORMATION, 2008.10.28, KIAS, Seoul, Korea
- ② 松原隆彦、非線形摂動論、非線形バイアス、非線形赤方偏移空間、研究会「宇宙構造形成の理論研究とその進展—その2」、2008.6.12, 東京大学理学部
- ③ 松原隆彦、Recent progress in theory of BAO with galaxy surveys, Cosmology Near and Far: Science with WFMOS - A Joint Workshop of Subaru, Gemini, NOAO, JSPS and UK STFC -, 2008.5.20, Waikoloa Beach Marriott, Hawaii, USA
- ④ 松原隆彦、赤方偏移空間における摂動再和法とバリオン音響振動、Hyper Suprime-Cam をめぐるサイエンス検討会、2008.3.5, 三重県志摩市
- ⑤ 松原隆彦、宇宙の大規模構造とダークエネルギー、超弦理論と宇宙、2008.2.12, 広島県尾道市松翠園
- ⑥ 松原隆彦、Anisotropic Clustering of Galaxies in High-z Universe as a Probe of Dark Energy, Decrypting the Universe: Large Surveys for Cosmology, 2007.10.24, エジンバラ王立天文台
- ⑦ 松原隆彦、Future Galaxy Surveys by HSC/WFMOS, Cosmology with Wide-field Imaging Surveys of Galaxies, 2007.6.7, 東京大学、小柴ホール
- ⑧ 松原隆彦、Statistical Analyses in Cosmology with Galaxy Surveys, Cosmology with wide-field photometric and spectroscopic galaxy surveys, 2006.11.10, 東京大学本郷、化学本館

[図書] (計 1 件)

- ① 二間瀬敏史ほか (共著)、日本評論社、シリーズ「現代の天文学」第3巻「宇宙論 II - 宇宙の進化」(2007), 280 ページ

ホームページ等

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

## 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