

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月7日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21740168

研究課題名（和文）宇宙大規模構造の高精度理論テンプレートから探る精密宇宙論の研究

研究課題名（英文）Precision cosmology from high-precision theoretical template for large-scale structure of the Universe

## 研究代表者

樽家 篤史 (TARUYA ATSUSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：40334239

## 研究成果の概要（和文）：

観測の進展に伴い、宇宙の「標準モデル」が確立し、宇宙論研究の主流は、標準モデルのより深い理解とその根源的理由を問う、「精密宇宙論」へとパラダイムシフトした。今後10年間で観測の大規模化・精密化がさらに進み、観測データと比較して微弱なシグナルを検出・測定するための、理論テンプレートの高精度化が重要かつ急務な状況である。本課題では、構造形成の基礎理論に基づき、摂動論的計算手法を用いて、様々な観測効果・物理過程を考慮した次世代銀河サーベイの高精度理論テンプレートを開発、将来の精密宇宙論に向けた実用性の高い解析手法を構築した。

## 研究成果の概要（英文）：

Recent progress on cosmological observations has led to the establishment of the “standard cosmological”, and the cosmology is now going to enter the era of precision cosmology, to deeply understand the nature and origin of the Universe. In the coming decade, extremely large-scale and/or high-precision cosmological observations will be the keys to improve our understanding of the Universe, and in order to detect/measure a weak but physically important signal, highly demanding is the precision theoretical template for cosmological measurements. In this project, we have focused on the large-scale structure of the universe as a promising cosmological probe, and developed analytical frameworks to compute high-precision theoretical template for next-generation galaxy redshift surveys. Based on the perturbation theory of large-scale structure, we have succeeded to incorporate the various observational/physical systematics into the precision template, including the non-linear gravitational evolution, redshift-space distortions, and galaxy biasing. The theoretical template developed in this project will play a very crucial role to interpret cosmological data from upcoming spectroscopic surveys such as SuMIRE project (Subaru Measurement of Imaging and Redshifts) in Japanese astronomy and cosmology group.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：数物系科学

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：宇宙物理（理論）

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙論的観測の進展に伴い、宇宙の「標準モデル」が確立し、宇宙論研究の主流は、標準モデルのより深い理解とその根源的理由を問う、「精密宇宙論」へと大きくパラダイムシフトした。今後は、観測の大規模化・精密化がさらに進み、標準モデルを越える手がかりをつかむために、観測データから微弱なシグナルの検出・測定することが研究の主流になる。そのためには、観測と比較するための理論テンプレートの高精度化が重要かつ不可欠であり、開発を迅速に進めることが課題であった。

### 2. 研究の目的

銀河サーベイなどによる宇宙大規模構造の観測は、今後の精密宇宙論研究を主導する観測の1つであり、銀河分布の3次元地図から得られる大規模構造の空間パターンの統計的性質から、様々な宇宙論的情報を引き出す事ができる。しかるに、そこからさらに微弱なシグナルを検出するには、従来考慮する必要のなかった系統的な観測効果、あるいは物理過程を定量的に取り入れた、高精度の理論テンプレートが不可欠となる。

本課題では、精密宇宙論研究の中心テーマである、ダークエネルギー探査、重力理論のテスト、ニュートリノの質量決定、さらに原始非ガウス性の検出、といった様々な問題に重要な役割を担う銀河分布のパワースペクトルとバイスペクトルに着目し、その高精度理論テンプレートの構築を目的に、解析的な手法を駆使して、微弱なシグナル検出に不可欠な物理過程・観測効果(重力進化、赤方偏移歪み、銀河バイアス)を取り扱う計算手法の開発を行った。

### 3. 研究の方法

次世代銀河サーベイでは、大スケールにおける宇宙大規模構造の統計量を精度よく測定することが主要な目標であり、そうしたスケールを考える限り、問題となる重力非線形性などの物理過程や赤方偏移歪みと呼ばれる観測効果の影響は比較的弱く、摂動論的な手法による解析的な精密計算が可能にある。

本課題では、宇宙の構造形成理論にもとづき、摂動論的な手法をもとに、(i) 非線形

重力進化、(ii) 赤方偏移歪み、(iii) 銀河バイアスの効果を取り入れたパワースペクトルの計算手法を確立させるとともに、大規模な宇宙論的N体シミュレーションのデータからパワースペクトル、バイスペクトルを測定し、解析計算手法の妥当性や精度の検証を進めた。(i)に関しては従来知られている摂動計算手法の改良版として、代表者が開発した「完結近似」と呼ばれる高次摂動を系統的に再和する定式化を用い、パワースペクトルの計算コードの開発を行った。(ii)に関しては、赤方偏移空間で重要となる速度場と密度場の非線形なカップリングを取り込んだパワースペクトルの理論モデルを構築し、(iii)の銀河バイアスの効果と合わせて、N体シミュレーションでモデルの妥当性、実用性をチェックした。

さらに、将来観測に向けた応用を探るため、既存の観測データ(SDSS DR7, LRG サンプル)に本課題で開発した理論テンプレートを応用し、宇宙論的制限を行った。

### 4. 研究成果

本課題で得られた主要な研究成果は、以下のA-Dにまとめられる。

A. パワースペクトルおよび2点相関関数の非線形重力進化を高精度に記述する計算手法の開発(雑誌論文⑥)

代表者自らが定式化を進めた非線形重力進化の摂動論的計算手法である「完結近似」をもとに、パワースペクトル/2点相関関数を計算するコードを開発、高解像度N体シミュレーションとの比較・検証の結果、バリオン音響振動のスケールで高精度の理論計算ができることを実証した。

B. 赤方偏移歪みを考慮したパワースペクトルの精密理論計算手法の確立(雑誌論文①⑤、学会発表③④⑤⑥)

赤方偏移空間におけるパワースペクトルの厳密な表式を出発点に、キュラント展開にもとづく摂動的な評価を行うことで、バリオン音響振動のスケールに適用できるパワースペクトルの新しい解析表式を導出した。(a)の非線形重力進化の摂動計算手法にもとづき

具体的に解析表式を計算したところ、N体シミュレーションの結果を精度よく再現できることを明らかにした。

- C. 原始非ガウス性がある場合に、銀河/ハローのバイスペクトルに強いスケール依存性が現れることを発見 (雑誌論文④)

銀河バイアスの影響を取り入れた精密理論テンプレート構築の一貫として、構造形成の種である原始密度ゆらぎに非ガウス性がある場合の宇宙論的N体シミュレーションを行い、ハローのバイスペクトルを定量的に調べた。その結果、通常のガウス初期条件では現れない、銀河バイアスの強いスケール依存性を発見し、その傾向は理論モデルでよく説明できることをつきとめた。

- D. 摂動論にもとづく銀河パワースペクトルの理論テンプレートを用いた、ニュートリノ質量の観測的制限 (雑誌論文③)

ニュートリノがゼロでない質量をもつせいで、銀河パワースペクトルには、フリーストリーミングスケールという特徴的なカットオフスケールが現れる。本課題では、その影響を考慮して、標準的な摂動論の枠組みで銀河バイアスの影響まで取り入れたパワースペクトルの理論テンプレートを開発し、N体シミュレーションの検証を経て、パワースペクトルの形状からニュートリノ質量の測定可能性について検討を行った。その考察を踏まえて理論テンプレートを既存の大規模観測データ (スローンデジタルスカイサーベイ DR7, LRG サンプル) に応用し、ニュートリノ全質量に対する観測的制限として、 $m_\nu \leq 0.81\text{eV}$  (95% C.L.) を得ることに成功した。尚、この制限は、Particle Data Group の “Review of Particle Physics” に掲載されることになった。

#### 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7件)

- ① 西道啓博、樽家篤史、“Baryon acoustic oscillations in 2D II: redshift-space halo clustering in N-body simulations”、Physical Review D 84 巻、Id. 043526 (15 頁)、2011 年、査読有
- ② 樽家篤史、齋藤俊、西道啓博、“Forecasting the cosmological

constraints with anisotropic baryon acoustic oscillations from multipole expansion”、Physical Review D 83 巻、Id. 103527 (12 頁)、2011 年、査読有

- ③ 齋藤俊、高田昌広、樽家篤史、“Neutrino mass constraint from the Sloan Digital Sky Survey power spectrum of luminous red galaxies and perturbation theory”、Physical Review D 83 巻、Id. 043529 (7 頁)、2011 年、査読有
- ④ 西道啓博、樽家篤史、小山和哉、Sabiu Cristiano、“Scale dependence of halo bispectrum from non-Gaussian initial conditions in cosmological N-body simulations”、Journal of Cosmology and Astroparticle Physics、07 巻、Id. 002 (26 頁)、2010 年、査読有
- ⑤ 樽家篤史、西道啓博、齋藤俊、“Baryon acoustic oscillations in 2D: modeling redshift-space power spectrum from perturbation theory”、Physical Review D 82 巻、Id. 063522 (18 頁)、2010 年、査読有
- ⑥ 樽家篤史、西道啓博、齋藤俊、平松尚志、“Nonlinear evolution of baryon acoustic oscillations from improved perturbation theory in real and redshift spaces”、Physical Review D 80 巻、Id. 123503 (22 頁)、2009 年、査読有
- ⑦ 小山和哉、樽家篤史、平松尚志、“Nonlinear evolution of the matter power spectrum in modified theories of gravity”、Physical Review D 79 巻、Id. 123512 (21 頁)、2009 年、査読有

[学会発表] (計7件)

- ① 樽家篤史、“RegPTfast: 摂動論にもとづく非線形パワースペクトルの高速計算”、日本物理学会、2012 年 3 月 26 日、関西学院大学
- ② 樽家篤史、“RegPTfast: 弱非線形領域における質量パワースペクトルの精密理論計算”、日本天文学会、2012 年 3 月 21 日、龍谷大学
- ③ 樽家篤史、“Precision cosmology from

redshift-space galaxy clustering”、  
WKYC 2011-Future of large-scale  
structure formation、2011年6月27  
日、KIAS (ソウル、韓国)

- ④ 樽家篤史、“Modeling and forecasting BAO from multipole expansion”、JSPS core-to-core: The Observational Pursuit of Dark Energy After Astro2010、2010年10月8日、カリフォルニア工科大学
- ⑤ 樽家篤史、“Modeling baryon acoustic oscillations in 2D”、workshop on Science Opportunities with Wide-field Imaging & Spectroscopy of the Distant Universe、2009年11月10日、プリンストン大学
- ⑥ 樽家篤史、“赤方偏移歪みとバリオン音響振動”、日本天文学会、2009年9月15日、山口大学
- ⑦ 樽家篤史、“Nonlinear evolution of the matter power spectrum in modified theories of gravity”、IPMU International conference on “Dark Energy: lighting up the darkness !”、2009年6月23日、IPMU (東京大学柏キャンパス)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

樽家 篤史 (Taruya Atsushi)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号：40334239

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし