

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540257

研究課題名(和文) 宇宙大規模構造の高速理論計算にもとづく精密宇宙論的データ解析手法の開発

研究課題名(英文) Precision cosmological analysis method based on the fast theoretical calculation of large-scale structure of the Universe

研究代表者

樽家 篤史 (Taruya, Atsushi)

京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号：40334239

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)：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」へと移行しつつある。今後10年間で観測の大規模化・精密化が一層進むため、観測データから宇宙論的情報を正確に読み取るための、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。本研究では、摂動論的手法に基づき、次世代銀河サーベイに対する高精度の理論テンプレートを高速に計算する手法を確立し、宇宙論データ解析ツールを開発した。既存の観測データに応用することで、宇宙論的スケールにおける重力理論の検証、ならびに宇宙の加速膨張に対するロバストな制限を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Thanks to the observational progress on cosmology, the so-called 'standard cosmological model', which consistently describes the dynamics of cosmic expansion and growth of structure, has been fully established. Since the cosmology in the coming decade is also expected to be driven by the precision observational data set from the systematic large-scale surveys, a development of accurate theoretical template, which will be used to extract the cosmological information from the observational data, is quite crucial. For this purpose, based on the perturbation theory technique of large-scale structure of the Universe, we have developed a high-precision theoretical template for next-generation galaxy surveys. Implementing a fast calculation method for perturbation theory, the cosmological data analysis tool was exploited. Applying it to the existing cosmological data set, robust cosmological test of gravity has been made, and a tight constraint on the cosmic expansion has been obtained.

研究分野：観測的宇宙論

キーワード：宇宙大規模構造 銀河サーベイ 重力進化 赤方偏移ゆがみ 摂動論

## 1. 研究開始当初の背景

近年の観測の進展に伴い、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」へと移行しつつある。その精密宇宙論の原動力となるのが、銀河サーベイにもとづく宇宙大規模構造の観測であり、現在、さまざまな大型観測プロジェクトが立案・稼働中である。今後10年間で統計精度のよい観測データが大量に得られることが期待されており、観測から正確に宇宙論的情報を読み取るための高精度の理論テンプレートの開発、およびそれをを用いた統計解析手法の発展が強く望まれていた。

## 2. 研究の目的

銀河サーベイを用いた宇宙大規模構造の観測において、銀河分布のパワースペクトルは、観測から宇宙論的情報を引き出す上で最も基本的な統計量であり、その精密測定は次世代銀河サーベイにもとづく宇宙論研究の中核をなす。観測の大規模化により、大スケールにわたって宇宙大規模構造の統計的性質をパーセントレベルで測定することが可能になる。本研究課題では、この銀河分布のパワースペクトルの理論テンプレートに焦点をあて、以下の3つの研究を行うことで、宇宙大規模構造の観測にもとづく精密宇宙論研究の基盤作りを目指した：

- (1) 摂動論的手法を用いた解析計算により銀河パワースペクトルに対する理論テンプレートを高速に計算する方法を開発
- (2) 宇宙論的大スケールでの重力理論の検証手段に応用する上で本質的となる、2つの効果(赤方偏移ゆがみ、および一般相対論からずれた重力理論における構造形成の効果)を取り入れた理論テンプレートの改良
- (3) 高速理論テンプレートの宇宙論データ解析手法への実装、および既存の観測データに応用することで、ロバストな宇宙論的制限を与える。

## 3. 研究の方法

次世代銀河サーベイの目標は、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であり、そうしたスケールでは、重力非線形性などの物理過程や赤方偏移ゆがみと呼ばれる観測効果の影響は比較的弱く、摂動論的な手法が十分に適用できる。本研究課題では、国内外の研究協力者とともに、これまで研究代表者が培ってきた摂動論的計算手法を用いて、理論テンプレートの作成、および宇宙論データ解析ツールの開発を進めた。項目2で挙げた課題(1)については、摂動計算に現れる多次元数値積分を1次元積分に帰着させる近似的取り扱いを開発、計算スキームに実装することで計算時間の短縮を図った。項目2の課題(2)については、摂動計算スキームにもとづき、赤方偏移ゆがみの理論モデルの構築と、重力理論の変更に伴う摂動計算の定式化の拡張を行い、それらを数値計算スキームへ実装した。完成した理論テンプレートの計算スキームは、宇宙論的N体シミュレーションを用いて、将来観測に応用する上で十分な精度と適用範囲を持っていることを確認した。その上で、項目2の課題(3)にて、理論テンプレートをマルコフ連鎖モンテカルロ法にもとづく宇宙論データ統計ツールに実装し、スローンデジタルスカイサーベイの公開観測データ(SDSS DR7 LRG)へ応用することで、宇宙膨張の精密測定と重力理論の検証に関するデータ解析を行った。

## 4. 研究成果

本研究課題における主要な成果は以下のよう

- (1) 高速理論計算スキームの開発(雑誌論文, 学会発表 ):  
従来と比べて計算時間を劇的に短縮する計算手法の開発に成功し、適用範囲の広い再和法による摂動計算スキームに実装することで、高精度の理論テンプレート計算コードを作成した。作成したコ

ードはシミュレーションによる検証を経てパブリックに公開しており、宇宙大規模構造を用いた宇宙論研究において幅広い応用が進んでいる。

- (2) 赤方偏移ゆがみと重力理論の変更の影響を取り入れた高精度理論テンプレートの開発(雑誌論文, 学会発表): 再和法による摂動計算スキームにもとづき、高次補正まで取り入れた赤方偏移ゆがみの理論モデルを構築し、パワースペクトル、2点相関関数に対して、従来よりも高精度の理論テンプレート開発に成功した。さらに重力理論の変更に伴う影響も取り入れ、実用的なテンプレートが完成した。
- (3) 理論テンプレートの宇宙論データ解析への実装、および観測データへの応用(雑誌論文, 学会発表): (1)(2)で完成した理論テンプレートをマルコフ連鎖モンテカルロ法による統計解析手法へ実装することで、宇宙膨張の精密測定と重力理論の検証を行う宇宙論解析ツールを開発した。公開観測データ(SDSS DR7 LRG)へ応用することで、宇宙論的制限を得ることに成功した。この成果は、ロバストかつ正確な制限として他の宇宙論観測でも引用されており、今後は、完成した解析ツールをもとに、宇宙のダークエネルギーの正体解明や加速膨張の起源など、宇宙論の根源的な問題への応用が期待されている。
- (4) 理論テンプレートにもとづく新たな宇宙論解析手法の提案(学術論文, 学会発表): (1)(2)で開発した高精度の理論テンプレートにもとづいた新しい宇宙論の検証法として、赤方偏移ゆがみの観測から宇宙大規模構造の速度場パワースペクトルを再構築する方法論を考案した。系統誤差を抑えるためには、摂動論にもとづく理論テンプレートが有用であり、サブパーセントレベルで速度場パワースペクトルを無バイアスに

再構築できることを明らかにした。さらに、弱い重力レンズ効果の宇宙論観測において、小スケール由来の非線形な系統誤差を低減する方法論を考案、従来適用が困難とされた摂動論にもとづく理論テンプレートを用いて宇宙論的重力レンズ観測へ応用する礎を築いた。

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12件)

A. Taruya, T. Nishimichi, F. Bernardeau, T. Hiramatsu, K. Koyama, “Regularized cosmological power spectrum and correlation function in modified gravity models”, *Physical Review D*, 90巻, 2014年, 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.90.123515

F. Bernardeau, T. Nishimichi, A. Taruya, “Cosmic shear full nulling: sorting out dynamics, geometry and systematics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 445巻, 1526-1537頁, 2014年, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stu1861

Y.-S. Song, T. Okumura, A. Taruya, “Broadband Alcock-Paczynski test exploiting redshift distortions”, *Physical Review D*, 89巻, 2014年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.103541

S. Yokoyama, T. Matsubara, A. Taruya, “Halo/galaxy bispectrum with primordial non-Gaussianity from integrated perturbation theory”, *Physical Review D*, 89巻, 2014年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.043524

A. Taruya, K. Koyama, T. Hiramatsu, A. Oka, “Beyond consistency test of gravity with redshift-space distortions at quasi-linear scales”,

Physical Review D, 89巻, 2014年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.043509

A. Oka, S. Saito, T. Nishimichi, A. Taruya, K. Yamamoto, “ Simultaneous constraints on the growth of structure and cosmic expansion from the multipole power spectra of the SDSS DR7 LRG sample ”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439巻, 2515- 2530頁, 2014年, 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stu111

F. Bernardeau, A. Taruya, T. Nishimichi, “ Cosmic propagators at two-loop order ”, Physical Review D, 89巻, 2014年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.89.023502

Y-S. Song, T. Nishimichi, A. Taruya, I. Kayo, “ Chasing unbiased spectra of the Universe ”, Physical Review D, 87巻, 2013年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.123510

P. Valageas, T. Nishimichi, A. Taruya, “ Matter power spectrum from a Lagrangian-space regularization of perturbation theory ”, Physical Review D, 87巻, 2013年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.083522

A. Taruya, T. Nishimichi, F. Bernardeau, “ Precision modeling of redshift-space distortions from a multipoint propagator expansion ”, Physical Review D, 87巻, 2013年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.87.083509

R. Takahashi, M. Sato, T. Nishimichi, A. Taruya, M. Oguri, “ Revising the halofit model for the nonlinear matter power spectrum ”, The Astrophysical Journal, 761巻, 2012年, 査読有, DOI: 10.1088/0004-637X/761/2/152

A. Taruya, F. Bernardeau, T. Nishimichi, S. Codis, “ Direct and fast calculation of regularized cosmological power spectrum at two-loop order ”, Physical Review D, 86巻, 2012年, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevD.86.103528

[学会発表](計17件)

樽家篤史, “ Perturbation theory approach to large-scale structure formation: success, limitation and beyond ”, The 2<sup>nd</sup> C-SDSS IV meeting, 2014年11月14日, 北京(中国)

樽家篤史, “ Nonlinear mode-coupling of large-scale structure: validity of perturbation theory calculation ”, The 24<sup>th</sup> workshop on General Relativity and Gravitation, 2014年11月10日, カブリ数物宇宙連携研究機構(千葉県・柏市)

樽家篤史, “ 修正重力理論における宇宙論のパワースペクトルおよび2点相関関数 ”, 日本天文学会秋季年会, 2014年9月12日, 山形大学(山形県・山形市)

樽家篤史, “ Cosmological test of gravity and dark energy with large-scale structure ”, Cosmological frontiers in fundamental physics 2014, 2014年6月12日, パリ(フランス)

樽家篤史, “ Cosmic propagators—powerful tools to characterize large-scale structure ”, CosKASI conference: cosmological quest for the next decade, 2014年4月17日, 大田(韓国)

樽家篤史, “ Large-scale structure and precision cosmology ”, APC-YITP collaborateon: mini-workshop on gravitation and cosmology, 2014年2月

7日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

樽家篤史, “Cosmic shear full nulling: sorting out dynamics, geometries & systematics”, 第2回観測的宇宙論ワークショップ, 2013年12月6日, 国立天文台(東京都・三鷹市)

樽家篤史, “Beyond consistency test of gravity with redshift-space distortions at quasi-linear scales”, GRAVASCO W3: Origin of cosmic structures: numerical and theoretical approaches, 2013年11月25日, パリ(フランス)

樽家篤史, “弱非線形領域における赤方偏移ゆがみを用いた重力理論の検証法”, 日本天文学会秋季年会, 2013年9月10日, 東北大学(宮城県・仙台市)

A. Taruya, “Confronting Planck cosmology with large-scale structure observations”, Workshop on the CMB and theories of the primordial universe, 2013年8月30日, 京都大学基礎物理学研究所(京都府・京都市)

樽家篤史, “宇宙大規模構造と非ガウス性”, 日本物理学会年次大会, 2013年3月27日, 広島大学(広島県・東広島市)

樽家篤史, “Precision power spectrum calculation for large-scale structure in real and redshift spaces”, KEK-CPGS-AIU2012 (Accelerators in the Universe 2012), 2012年11月9日, 高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)

樽家篤史, “Precision power spectrum calculation for large-scale structure in real and redshift spaces”, The 5<sup>th</sup> KIAS workshop on cosmology and structure formation, 2012年11月1日, ソウル(韓国)

樽家篤史, “パワースペクトルおよび相関関数における赤方偏移ゆがみの高次効果”, 日本天文学会秋季年会, 2012年9月20日, 大分大学(大分県・大分市)

樽家篤史, “Baryon acoustic oscillations in 2D: effects of higher-order corrections”, Workshop on perturbative approach to redshift space distortions, 2012年7月13日, チューリッヒ(スイス)

樽家篤史, “Fast power spectrum calculations from regularized perturbation theory in weakly nonlinear regime”, Workshop for Korean Young Cosmologists 2012, 2012年6月26日, 大田(韓国)

樽家篤史, “Precision power spectrum calculations for large-scale structure observations”, 17<sup>th</sup> Rencontres Itzykson -Heart of Darkness: Dark energy and Modified gravity, 2012年6月19日, サクレ(フランス)

〔図書〕(計0件)

〔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:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樽家 篤史 (TARUYA Atsushi), 京都大学・基礎物理学研究所・准教授

研究者番号: 40334239

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: