

## 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 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540263

研究課題名（和文） 宇宙の大規模構造における非線形性と精密宇宙論

研究課題名（英文） Nonlinearity in the Large-scale Structure of the Universe and Precision cosmology

研究代表者

松原 隆彦（TAKAHIKO MATSUBARA）

名古屋大学・基礎理論研究センター・准教授

研究者番号：00282715

研究成果の概要（和文）：

宇宙の大規模構造を理論的に記述し、大規模な観測データから精密に宇宙論モデルを制限するためには、ゆらぎの観測量に関する非線形性の理論的理解が不可欠である。これまでの宇宙論的摂動論を大幅に拡張して一般化し、単なる密度ゆらぎの非線形性だけでなく、実際の観測量に現れる非線形性を系統的に理解する実際的な方法を基礎づけることができた。

研究成果の概要（英文）：

To understand the large-scale structure of the universe, and to constrain cosmological models from large-scale observations, it is necessary to elucidate effects of nonlinearity in observable quantities of density fluctuations in the universe. The cosmological perturbation theory is largely extended and generalized to include nonlinearities in observable quantities together with the nonlinearities in dynamics, and fundamental methods are developed in this field of research.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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

宇宙論の研究はまさに新時代を迎えている。以前の宇宙論は定量的科学としてはいささか不十分なものであったが、WMAP(Wilkinson

Microwave Anisotropy Probe)に代表される精密な宇宙背景放射のゆらぎの観測、SDSS(Sloan Digital Sky Survey)に代表される広範囲に及ぶ宇宙大規模構造の観測などの画期的な進展によって、宇宙論モデルが精密に検証できるよ

うになった。この結果、理論的に自然と思われていた以前の標準モデルは否定され、未知なる物質であるダークマターと未知なるエネルギー成分であるダークエネルギーに基づいた新しい宇宙像が得られてきた。このことは素粒子論や相対論などの基礎物理学の研究にも大きなインパクトをもたらしている。ちなみに申請者はSDSSプロジェクトの正式メンバーとして活動するなどこの進展に直接的な寄与をしている。ダークマターはなんらかの未知なる粒子が担っているのではないかと考えられているが、その粒子が何かはわかっていない。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っ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、解決には程遠い状況である。その解決には時空の根本的な見方の変革が必要なのかもしれない。いずれにせよ、これら宇宙の根本的な謎の解明に対する手掛かりを得るため、さらに精密な宇宙論的観測が進められている。中でも、宇宙の大規模構造の観測はこの点からも有望視されて多数の将来観測計画が立案されるなど、今後大きな発展が見込まれている。さらに大規模構造の詳細な解析により、宇宙初期に起こったとされるインフレーション期の手がかりを得ることもできる。

## 2. 研究の目的

宇宙の大規模構造を用いてダークエネルギーやインフレーション期の性質に迫るなどの基礎物理学へ向かう研究のためには、なによりも観測量である大規模構造そのものの形成・進化を理論的に解明しておくことが不可欠のステップである。大規模構造は宇宙の初期密度ゆらぎから形成されるが、その進化には複雑な過程と種々の観測効果が介在する。長さの短いスケールの（小スケールの）ゆらぎの成長は非線形性が大きく解析的な取扱いが難しいが、幸い長さの長いスケールの（大スケールの）ゆらぎの成長はおおむね線形理論で取り扱うことができる。申請者はこれまでに線形理論を用いて観測効果を含めた実際の観測量を解析的に導く研究で世界をリードしてきた実績を持つ。これにより大規模構造における観測量の線形理論による定量的記述はほぼ完成の域に達したといっている。

だが、ダークエネルギーの微妙な性質を定量的に調べるなどの目的のためには、さらに精密な理論的記述が必要とされ、大スケール

においても非線形性の効果を取り入れることが必要になる。そこで最近大規模構造における非線形効果を精密なレベルで明らかにしようとする研究がさかんに行われているが、まだ満足いく段階までの理解は得られていない。特に、解像度や計算時間の限界を持つ数値的方法を超えて、解析的理論を開発することは重要な課題である。大規模構造の観測量における主な非線形効果には3つある。ひとつは構造の力学進化そのものの非線形性であるが、それに加えて、銀河の特異速度により引き起こされる銀河分布の変形現象（赤方偏移変形）や、銀河形成に伴う密度場のバイアス現象（銀河バイアス）における非線形効果もある。これら3つの非線形効果はお互いに独立ではなく、同時に解明されなければならない。だが、問題が複雑であるためにこれまでの解析的な研究は力学進化の非線形のみ焦点を絞ったものがほとんどであった。大スケールの非線形現象は解析的に摂動論手法を適用して調べることができるが、これまでの標準的な摂動論ではこれらの非線形性の問題を調べるのに不十分であることが知られてきている。私はこれまでに、標準的な摂動論を改良し、これら3つの非線形性を同時に取り扱うための理論的定式化の端緒を開くことに成功した。

本研究の目的は、上に述べた私の最近の定式化をさらに一般化して完成させ、さらに実際の大規模構造のデータ解析へ直接応用できる段階まで持っていくことにある。上記定式化においては、銀河バイアスとして簡単な局所的ランランジュバイアスの効果しか取り入れられていない。さらに2点統計量であるパワースペクトルと相関関数のみを予言する定式化となっている。また摂動論自体の近似精度を上げる余地もある。これらを含めて定式化を一般化する。その上で、得られた解析的方法から観測量を数値として計算するコンピュータプログラムをコーディングする。こうしてダークエネルギーなどの解析や、初期宇宙の手がかりの解析（たとえば初期非ガウス性など）への基礎を固めることができる。

## 3. 研究の方法

現在までの研究で得られた理論的定式化をさらに発展させて一般化する。まずは比較的困難なく一般化できる方針として、現在の2点統計量に限った定式化を拡張し、多点統計量であるパワースペクトルやトリスペクトル、あるいは多点相関関数などを一般的に

扱えるようにする。この拡張には、以前に申請者が定式化したバイアスの多点統計に関する一般論との類似性を有効に活用することができ、独自性のある手法として確立できる。

バイスペクトルなどの高次統計量は、初期宇宙におけるインフレーションモデルなどが予言する初期密度ゆらぎの性質を探る上で2点統計量にはない重要な情報を与えてくれる。特に精密宇宙論の時代においては微妙な初期非ガウス性を検出（または制限）することが可能となり、高次統計量は近年になって特に注目されるようになってきた。大規模構造における高次統計量においては、初期ゆらぎに起源をもつ非ガウス性に加えて、構造形成進化や観測効果の非線形性に伴う2次の非ガウス性による寄与がある。

初期ゆらぎに起因する非ガウス性の成分を調べるためにはこの2次的な成分を分離して差し引く必要がある。ここで大規模構造における3つの非線形効果を同時に取り入れた今回の定式化を用いることでこの差し引きが初めて可能になる可能性が高い。この点に着目した定量的な研究を進める。

#### 4. 研究成果

当初目的のうち、主要な部分について予想を上回る成果を得た。また、関連する研究からは新しい研究の芽が生まれた。以下に、関連する研究成果もまとめた概要を述べる。

- (1) 非線形摂動論にバイアスを、これまでで最も一般的な形で取り入れる方法論を確立した。これまでバイアスの局所性を仮定するという単純化がされるのがほとんどであったが、現実のバイアスを反映していない。とくにオイラー空間とラグランジュ空間の両方で局所バイアスを考えると、力学的進化と矛盾することを具体的に示した。そして一般に非局所バイアスを仮定した摂動論の方法を発展させた。特に、バイアスは単なる直線的な摂動展開がうまく働かない場合があることを指摘し、これを正しく扱うにはバイアスの繰り込みを行うことが必要であることを示した。さらに、バイアスのみならず、初期非ガウス性、赤方偏移空間変形の効果も組み込んだ、これまでで最も一般的な摂動論の定式化を与えることができた。任意の次数のスペクトル（パワースペクトル、バイスペクトル、トリスペクトル、などなど）を直線的に計算できる図形的手法を開発し、複雑な計算をかなり省力化して計

算する手法も与えた。この図形的方法はバイアスの繰り込みのみならず、力学進化に関する図形的頂点の繰り込みにも威力を発揮し、これまでに得られている力学進化の再和の手法について、見通しのよい理解を与えるとともに、具体的な繰り込み頂点の式を一般的に導いた。この研究は将来的な応用性が非常に高く、今後の研究の礎となる重要な成果である。

- (2) ラグランジュ的見方に基づく摂動論について、これまでにを行った1ループ近似を2ループ近似にまで精度を上げた計算を行った。まず、実空間と赤方偏移空間についてのパワースペクトルを理論的に導いた。そして実空間についてはさらにそれを数値シミュレーションのデータと比較した。摂動論は長波長モードへ行くほど、そして高赤方偏移へ行くほど正しくなるが、シミュレーションと比較することにより、具体的にどの波長、どの赤方偏移まで信頼できるかがわかる。1ループ近似に比べて、2ループ近似は特に高赤方偏移での信頼性が飛躍的に高まることが示された。
- (3) ハローバイアスを取り入れた摂動論について、数値シミュレーションから作ったハローカタログの解析と詳細に比較した。とくにバリオン音響振動スケールの振る舞いについて調べ、超波長モードにおいては非線形性の効果を解析式がよく説明できることを定量的に示した。とくに相関関数については、バリオン音響振動のピークの振る舞いを、エラーの範囲でとてもよく再現する。これにより、上記の一般的なバイアスを含めて一般化した非線形摂動論の定式化は、数値シミュレーションで得られる非線形効果やハローバイアスの効果とよく一致する有用なものであることが確かめられた。
- (4) 大規模構造から初期非ガウス性を得る方法の他に、宇宙マイクロ背景放射から初期非ガウス性を見積もる方法もある。これについては3点相関関数やそのフーリエ変換であるバイスペクトル、また4点相関関数やそのフーリエ変換であるトリスペクトルなど、高次の統計量を用いる方法が使われている。ただ、そのデータ解析は高次になるほど計算量が膨大になって困難である。これに相補的な方法として、温度分布などの位相幾何学的情報や、幾何学的形状などを用いる方法がある。その代表的な例がミンコフスキー汎関数と呼ばれる量である。これは高次の統計量の情報を含んでいながら、直接高次統計量を解析するより

もはるかに少ない計算量で解析できる。ミンコフスキー汎関数が初期非ガウス性とどのように関係しているか、4次のレベルまでで具体的に解析的な関係式を導いた。大規模構造では3次と4次の非ガウス性の区別が難しいことがわかっているが、ミンコフスキー汎関数ではそれらの情報は直交しており、別々に見積もることが可能であることがわかった。この結果を用いて実際のデータに応用し、初期非ガウス性を実際に見積もる研究も進行中である。将来的に新しい研究へもつながっていく。

上記の他にも、関連する重要な成果を挙げることができた。それらを以下に列挙する。

- (5) 私の参加していたスローン・デジタル・スカイ・サーベイが一通り完了した。これは10年ほどにわたる共同研究であり、世界最大の銀河赤方偏移サーベイである。最終データリリースであるDR7を公開した。合計で11,663平方度にわたる撮像サーベイデータにおいては3億5700万個の天体カタログが得られた。また、赤方偏移データについては、9,380平方度に渡り、93万個の銀河、12万個のクェーサー、および46万個の星についてカタログ化された。
- (6) バリオン音響振動の数値シミュレーションを用いて、解析的な方法と相補的な研究成果を得た。特に、観測データの解析で重要になる質量パワースペクトルに関する共分散行列を、数値的に調べることによって将来のデータ解析に有用な研究を行った。合計で5000回にも及ぶN体シミュレーションのデータを用いた世界最大級の規模の研究である。
- (7) 同様の数値シミュレーションの方法により、弱重力レンズサーベイを念頭に置いた光線トレーシングの計算を行った。特に非線形領域の振る舞いを詳しく調べて、解析的な理解の不十分な領域の状況を明らかにした。特に、共分散行列における非ガウス統計の効果が、有限体積の効果に強く現れるという重要性を指摘した。
- (8) 初期宇宙の非線形性がもたせて生じる、宇宙の密度ゆらぎに関する初期非ガウス性について調べた。特に、初期ゆらぎが等曲率ゆらぎで与えられる場合について、一般的な形でその効果を導いた。これは様々な個別のモデルに適用できる。また、この非ガウス性をもとにして、宇宙背景マイクロ波放射のミンコフスキー汎関数に理論的予言を与えた。ミンコフスキー汎関数の非ガウス性に関

する解析的取り扱い、私の以前行った研究に基づいた。さらに実際のWMAPデータを用いて、観測的に等曲率ゆらぎについての制限を計算して与えた。非ガウス性は検出されなかったが、等曲率ゆらぎ成分に関して強い上限値を与えることができた。

- (9) 銀河サーベイと宇宙マイクロ波背景放射のデータを同時に用いて共相関関数を解析すると、個々のデータからの情報を足し合わせただけでは得られない新しい情報が得られる。この事実を用いて、初期ゆらぎの非ガウス性に関する情報をどの程度引き出すことができるか、具体的な将来観測を典型例として調べた。そして、サーベイのパラメータ、例えば深さや広さなど、をどのように選べば、初期非ガウス性の情報を引き出すのに最適であるかを研究した。特に日本で計画されているHyper Suprime-Camをすばる望遠鏡に用いる銀河サーベイを、同じく将来計画であるPlanck衛星による宇宙マイクロ波背景放射と組み合わせたとき、出来るだけ深い銀河サーベイで強くバイアスされた天体をカタログ化することが重要であることが判明した。

## 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 12 件)

以下の雑誌論文はすべて査読あり

- ① Y. Takeuchi, K. Ichiki, T. Matsubara, “Application of cross correlations between CMB and large-scale structure to constraints on the primordial non-Gaussianity” *Phys. Rev. D* 85, id043518 (2012)  
DOI:10.1103/PhysRevD.85.043518
- ② M. Sato, T. Matsubara, “Nonlinear biasing and redshift-space distortions in Lagrangian resummation theory and N-body simulations”, *Phys. Rev. D* 84, id043501 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevD.84.043501
- ③ T. Okamura, A. Taruya, T. Matsubara, “Next-to-leading resummation of cosmological perturbations via the Lagrangian picture: 2-loop correction in real and redshift spaces”, *JCAP* 08, 012 (2011)  
DOI:10.1088/1475-7516/2011/08/012
- ④ M. Sato, M. Takada, T. Hamana,

- T. Matsubara, “Simulations of Wide-field Weak-lensing Surveys. II. Covariance Matrix of Real-space Correlation Function”, *ApJ* 734, id.76 (2011)  
DOI:10.1088/0004-637X/734/2/76
- ⑤ T. Matsubara, “Nonlinear perturbation theory integrated with nonlocal bias, redshift-space distortions, and primordial non-Gaussianity” *Phys. Rev. D* 83, id.083518 (2011)  
DOI:10.1103/PhysRevD.83.083518
- ⑥ R. Takahashi, N. Yoshida, M. Takada, T. Matsubara, 他, “Non-Gaussian Contribution to Likelihood Analysis of the Matter Power Spectrum”, *ApJ* 726, id.7 (2011)  
DOI:10.1088/0004-637X/726/1/7
- ⑦ Y. Takeuchi, K. Ichiki, T. Matsubara, “Constraints on primordial non-Gaussianity from galaxy-CMB lensing cross correlation”, *Phys. Rev. D* 82, id.023517 (2010)  
DOI:10.1103/PhysRevD.82.023517
- ⑧ T. Matsubara, “Analytic Minkowski functionals of the cosmic microwave background: Second-order non-Gaussianity with bispectrum and trispectrum”, *Phys. Rev. D* 81, id.083505 (2010)  
DOI:10.1103/PhysRevD.81.083505
- ⑨ C. Hikage, K. Koyama, T. Matsubara, T. Takahashi, M. Yamaguchi, “Limits on isocurvature perturbations from non-Gaussianity in WMAP temperature anisotropy” *MNRAS* 398, pp.2188-2198 (2009)  
DOI:10.1111/j.1365-2966.2009.15269.x
- ⑩ M. Sato, T. Hamana, R. Takahashi, M. Takada, N. Yoshida, T. Matsubara, N. Sugiyama, “Simulations of Wide-Field Weak Lensing Surveys. I. Basic Statistics and Non-Gaussian Effects”, *ApJ* 701, pp.945-954 (2009)  
DOI:10.1088/0004-637X/701/2/945
- ⑪ R. Takahashi, N. Yoshida, M. Takada, T. Matsubara, 他, “Simulations of Wide-Field Weak Lensing Surveys. I. Basic Statistics and Non-Gaussian Effects”, *ApJ* 700, pp.479-490 (2009)  
DOI:10.1088/0004-637X/700/1/479
- ⑫ K. N. Abazajian 他 (106 番目), “The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey”, *ApJS*, 182, pp.543-558 (2009)

DOI:10.1088/0067-0049/182/2/543

[学会発表] (計 17 件)

- ① 松原隆彦、「バリオン音響振動で探るダークエネルギー」、日本物理学会 素粒子論領域合同シンポジウム:加速膨張を続ける宇宙論、2012年3月14日、関西学院大学
- ② 松原隆彦、「Analytic Minkowski Functionals in the CMB”, IAP seminar, 2011/10/28, Institut d’Astrophysique de Paris, France
- ③ 松原隆彦、「Integration of nonlocal bias, redshift-space distortions, primordial non-Gaussianity with the nonlinear perturbation theory”, a DENET/IAP Conference “The Accelerating Universe”, 2011/10/26, Institut d’Astrophysique de Paris, France
- ④ 松原隆彦、「Cosmology with the Large-scale Structure of the Universe”, KMI Inauguration Conference “Quest for the Origin of Particles and the Universe”, 2011/10/24, ES Hall, Nagoya Univ.
- ⑤ 松原隆彦、「Integrated perturbation theory: nonlocal bias, redshift-space distortions, primordial non-Gaussianity, and resummations”, PTchat 2011 workshop, 2011/9/21, Institut de Physique Theorique CEA, IPhT, France
- ⑥ 松原隆彦、「Lagrangian resummation theory and observables in the large-scale structure of the universe”, Summer Institute 2011 (宇宙・素粒子論), 2011/8/3, 人材開発センター富士研修所 富士 Calm (山梨県富士吉田市)
- ⑦ 松原隆彦、「宇宙の大規模構造と宇宙論」、2011年度第41回天文・天体物理若手夏の学校、2011年8月3日、ホテルたつき (愛知県蒲郡市)
- ⑧ 松原隆彦、「宇宙の大規模構造における観測可能量と摂動論」、竹原理論物理学研究会、2011年6月8日、ホテル大広苑 (広島県竹原市)
- ⑨ 松原隆彦、「宇宙の大規模構造における摂動論とバイアス」、宇宙ジョイントセミナー、2011年1月31日、東京大学宇宙線研究所 (柏市)
- ⑩ 松原隆彦、「宇宙の大規模構造における摂動論とバイアス」、基研セミナー、2010年12月6日、京都大学基礎物理学研究所
- ⑪ 松原隆彦、「Biasing: What is the

consistent formulation in quasi-nonlinear regime?”, The Observational Pursuit of Dark Energy after Astro2010, 2010/10/8, California Institute of Technology, Cahill Center for Astronomy and Astrophysics, Pasadena, USA

- ⑫ 松原隆彦、「CMB 非ガウス性の幾何学的解析」、大阪市立大学セミナー、2010年5月26日、大阪市立大学
- ⑬ 松原隆彦、“Geometrical analysis of the primordial non-Gaussianity in the CMB”, IEU workshop “Cosmology and Fundamental Physics”, 2010/5/19, Institute for the Early Universe, Ewha Womans University, Seoul, Korea
- ⑭ 松原隆彦、“Analytic Minkowski Functionals of the CMB”, International molecule-type workshop “The non-Gaussian universe”, 2010/3/26, Panasonic Auditorium, Yukawa Hall, Kyoto University
- ⑮ 松原隆彦、「宇宙マイクロ波背景放射の解析的ミンコフスキー汎関数と原始ゆらぎの非ガウス性」、近畿大学セミナー、2010年3月23日、近畿大学理工学部
- ⑯ 松原隆彦、「ラグランジアン摂動論とその応用」、東京大学セミナー、2009年10月19日、東京大学理学研究科宇宙理論研究室
- ⑰ 松原隆彦、“Theoretical developments for BAO surveys”, FMOS Science Workshop, 2009/6/21, Univ. of Oxford, Oxford, UK

[図書] (計 3 件)

- ① 松原隆彦著、東京大学出版会、「現代宇宙論 -時空と物質の共進化」、2010年6月発行、388ページ
- ② 土居守、松原隆彦著、光文社、「宇宙のダークエネルギー -未知なる力の謎を解く」、2011年9月発行、253ページ (担当: pp.11-127, pp.245-252)
- ③ 松原隆彦著、光文社、「宇宙に外側はあるか」、2012年2月発行、258ページ

[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/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松原 隆彦 (MATSUBARA TAKAHIKO)

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：