

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610058

研究課題名（和文）多波長宇宙論データの同時解析法の開発と宇宙の暗黒成分の究明

研究課題名（英文）Developing cosmological analysis method for multi-wavelength data and exploring the dark Universe

研究代表者

高田 昌広（Takada, Masahiro）

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授

研究者番号：40374889

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：銀河のイメージング、分光データから得られるクラスタリング統計量、重力レンズ効果の測定を組み合わせ、銀河バイアスの不定性を観測的に除去し、宇宙論パラメータを制限する手法を開発できた。開発した手法をスローン・デジタル・スカイ・サーベイ（SDSS）のデータに適用し、宇宙論パラメータを制限することができた。特に、宇宙論スケールにおける重力理論のテストに有効なパラメータを制限ができ、Planck宇宙背景放射の測定結果と若干の矛盾があることを報告した。また、宇宙最大の自己重力天体である銀河団について、個数カウントと重力レンズ効果の測定を組み合わせ、より正確に宇宙論パラメータを制限する手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：We developed a cosmological analysis method that can be done by jointly combining measurements of galaxy clustering and gravitational weak lensing that are measured from galaxy imaging and spectroscopic surveys, respectively. This joint method allows us to calibrate out galaxy bias uncertainty, which is otherwise one of the major uncertainties in either of the two observables alone. We then applied this method to the dataset from the Sloan Digital Sky Survey, and derived constraints on cosmological parameters. In particular we showed the constraint on a parameter that is sensitive to gravity theory on cosmological scales. Moreover, we developed a method combining the number counts and gravitational lensing effects for galaxy clusters that are most massive, gravitationally-bound objects in the universe.

研究分野：宇宙論

キーワード：ダークエネルギー ダークマター ニュートリノ 宇宙の構造形成

### 1. 研究開始当初の背景

ダークマター、ダークエネルギーの存在の発見は、20 世紀の宇宙論が基礎物理学にもたらした最大の貢献だろう。宇宙の暗黒成分の解明は、21 世紀の宇宙論および物理学に残された最重要課題である。特に、宇宙の加速膨張を説明するために導入されたダークエネルギーについては有力な物理的なモデルがないことから、加速膨張の原因はアインシュタイン重力理論が宇宙論距離スケールで破綻しているためではないかという可能性も活発に研究されている。この背景のもと、宇宙背景放射(CMB)の観測実験、広視野の銀河のイメージング(撮像)および分光サーベイ、また X 線衛星全天サーベイによる銀河団探査など様々な大型観測が計画されている。2020 年代には、究極的な宇宙論銀河サーベイとして、有効口径 6.7m の専用地上望遠鏡 Large Synoptic Survey Telescope (LSST)、ESA および NASA の衛星計画 Euclid、WFIRST が計画されている。

この世界の潮流に先駆けて、すばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) が完成し、2014 年から 5 ヶ年計画で史上最大の銀河イメージングサーベイを行う予定である。HSC 銀河サーベイから得られる約数億個の銀河像の重力レンズ解析から、ダークマターの空間分布(興行き方向は、宇宙年齢を遡ることと等価)を復元することができる。

今後 10 年間の大規模宇宙論データの可能性を存分に活かし、宇宙のダーク成分を究明する、より広義には基礎物理学に貢献するために、現時点で十分な準備研究を行うことは世界の宇宙論コミュニティに課された緊急課題である。

### 2. 研究の目的

広天域の宇宙背景放射、銀河イメージング・分光サーベイ、また X 線衛星による銀河団サーベイなど、世界中でダークエネルギーの性質の解明を目的とした宇宙論サーベイが稼働中、あるいは計画中である。これら多波長の宇宙論データを組み合わせ、ダークエネルギー、宇宙論パラメータの制限を改善する、また系統誤差に影響を受けない制限を導出することを可能にする手法を開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

宇宙の構造形成の N 体数値シミュレーションの結果を用い、膨張宇宙におけるダークマターの空間集積(クラスターリング)の進化過

程を詳細に調べ、多波長宇宙論データ・観測量を同時に解析する方法論を開発する。特に、銀河・銀河団の形成過程の母体となるダークハロー(ダークマターが集積した自己重力系)やサブハロー(各ハロー内の質量が小さい部分構造)のカタログに基づき、将来の宇宙論サーベイを念頭においた大量の銀河・銀河団の模擬カタログを構築する。方法論を模擬カタログに適用することで、改良を重ねる。2016 年(H28 年度)までに得られる、HSC 銀河サーベイをはじめとする様々な初期宇宙論データに適用し、宇宙論パラメータを制限し、宇宙論距離スケールにおける重力理論の検証を行う。

### 4. 研究成果

本研究者は、連携研究者、共同研究者と協力して、異なる宇宙論データ、ここでは広天域銀河イメージングと分光サーベイデータを「組み合わせた」宇宙論解析法を開発することができた。これら宇宙論データは各々で強力であるので、それまでの研究では各宇宙論データを解析し、宇宙論的情報を引き出すのが通例であった。例えば、Hikage, Mandelbaum, Takada & Spergel (MNRAS, 435, 2345, 2013)では、銀河イメージングで得られる重力レンズ効果の測定、銀河分光データから得られる 3 次元銀河クラスタリング統計量を組み合わせ、ダークマターハロー内

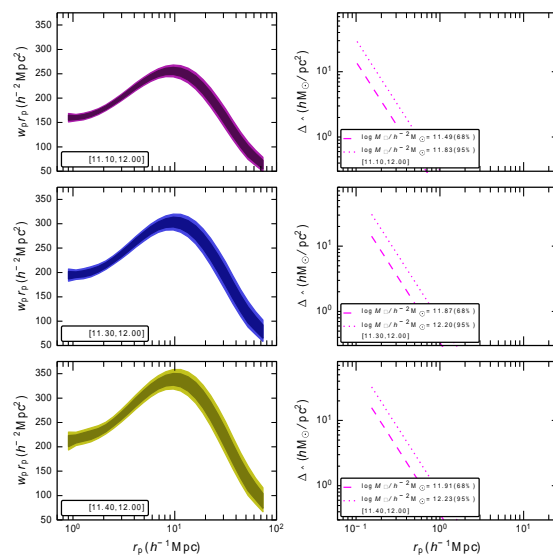
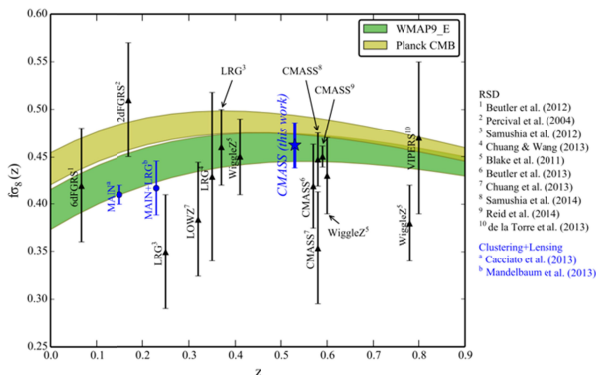


図 1: SDSS 銀河カタログの銀河クラスタリング統計量の測定結果(左図)および重力レンズ効果(銀河まわりのダークマターの分布)の測定結果(右図)。各パネルの帯の領域はこの 2 つの観測量を同時に再現する冷たいダークマター構造形成シナリオのベストフィットモデル。上段、中段、下段のパネルは銀河星質量の違い(下段ほど重い銀河)。(More et al. 2015 より抜粋)

での銀河の空間分布の関係を観測的に明らかにする手法を確立した。

これらの研究を進展させ、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) の銀河カタログを用い、重力レンズ効果とクラスタリング統計量を組み合わせ、銀河バイアス不定性を観測的に除去し、宇宙論パラメータを制限する手法を開発した (Miyatake, More, Mandelbaum, Takada et al. 2015; More, Miyatake, Mandelbaum, Takada et al. 2015)。図 1 は、その結果を示す。冷たいダークマターが支配的な構造形成シナリオ (CDM) に基づく我々のモデルが、銀河クラスタリング、重力レンズの測定量を「同時」に再現することに成功した。また、上段から下段のパネルは、異なる星質量の銀河サンプルを用いた結果を示すが、2 つの観測量を組み合わせること



で、実際に宇宙論パラメータの制限が銀河サンプルに依らない、つまり銀河バイアスの不

図 2: SDSS の銀河クラスタリングと重力レンズ効果を組み合わせ、宇宙論パラメータ  $f\sigma_8$  を制限した結果。このパラメータは修正重力理論を区別するのに有効と考えられている。我々の結果は “CMASS” とラベルがある結果で、 $z=0.55$  の宇宙の重力をテストした。他のデータは他の研究の結果を示す。(More et al. 2015 より抜粋)

定性が除去できていることを示した。

図 2 は、図 1 に示すような宇宙論測定量と理論モデルを比較することにより、得られた宇宙論パラメータの制限の結果。ここで着目するパラメータ「 $f\sigma_8$ 」は、宇宙論スケールで重力理論がアイシュタインの一般相対性理論か修正重力理論を区別するのに有効と考えられるパラメータである。緑の帯は、WMAP 宇宙背景放射衛星の結果が示唆する、アイシュタイン重力理論を仮定した場合の制限領域。一方、黄色の帯の領域は、Planck 宇宙背景放射が示唆するアイシュタイン重力の制限範囲。我々の結果 (“CMASS”) は、WMAP の宇宙論モデルを若干支持している。逆に、

Planck 衛星の結果が正しければ、我々の結果は重力理論がアイシュタインから破れている (修正重力) あるいは宇宙論データに同定されていない系統誤差 (Planck あるいは SDSS) が残されている可能性を示唆している。このように、すばる銀河サーベイのような今後のより精密な宇宙論データを用い、宇宙論パラメータの制限の改善、さらなるテストが強く望まれる。

上述の研究成果以外にも、本研究代表者は、宇宙論の研究で世界的に著名な、プリンストン大学の David Spergel 教授との共同研究を行った (Takada & Spergel 2014; Schaan, Takada & Spergel 2014)。この研究では、宇宙最大の自己重力天体である銀河団に着目し、ある宇宙論サーベイで得られる銀河団の個数 (number counts) と、銀河団の重力レンズ効果を組みあわせることで、銀河サーベイ領域を超える長波長スケールのゆらぎの効果を補正し、宇宙論パラメータの制限を改善できることを示した。これらの手法も、すばる銀河サーベイ、将来の宇宙論サーベイに適用可能であり、宇宙論業界で着目されている。

## 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 19 件)

“Evidence of Halo Assembly Bias in Massive Clusters”, H. Miyatake, S. More, M. Takada, Phys. Rev. Lett., 116, 041301 (2016) (査読有り)

“The Weak Lensing Signal and the Clustering of BOSS Galaxies. II. Astrophysical and Cosmological Constraints”, S. More, H. Miyatake, R. Mandelbaum, M. Takada, et al., The Astrophys. J., 806, 2 (17pp) (2015) (査読有り)

“The Weak Lensing Signal and the Clustering of BOSS Galaxies. I. Measurements”, H. Miyatake, S. More, R. Mandelbaum, M. Takada, et al., The Astrophys. J., 806, 1 (15pp) (2015) (査読有り)

“Joint likelihood function of cluster counts and n -point correlation functions: Improving their power through including halo sample variance”, E. Schaan, M. Takada, D. N. Spergel, Phys. Rev. D90, 123523 (2014) (査読有り)

“Joint analysis of cluster number counts and weak lensing power spectrum to correct for the super-sample covariance”, M. Takada, D. N. Spergel, MNRAS, 441, 2445 (2014)  
(査読有り)

〔学会発表〕(計 18 件)

“Halo bias”, M. Takada, “Statistics of Extrema in Large-Scale Structure”, March 7-11, 2016, Leiden University, Leiden, the Netherlands

“Halo bias, super-survey effects and cosmology”, M. Takada, “観測的宇宙論ワークショップ”, Nov 18-20, 2015, 京都大学、京都

〔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：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.ipmu.jp/ja/20160126-galaxycluster>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 昌広 (TAKADA, Masahiro)  
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・  
教授  
研究者番号：40374889

(3) 連携研究者

日影 千秋 (HIKAGE, Chiaki)  
東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・  
特任助教