

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2011～2015

課題番号：23340061

研究課題名(和文) 超広視野すばる銀河サーベイによる精密宇宙論の探求

研究課題名(英文) Exploring precision cosmology with wide-field Subaru galaxy surveys

## 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) 9,500,000円

研究成果の概要(和文)：すばる望遠鏡の超広視野カメラHyper Suprime-Cam (HSC) の広天域銀河による精密宇宙論の実現を目指し、その準備研究を行った。本研究の成果として、(1) 日本、プリンストン大学、台湾の研究者からなる国際共同研究の基盤、ネットワークを整備した、(2) 本研究者がリーダーシップを発揮し、共同研究内の議論、準備研究を組み上げ、HSC広天域銀河サーベイのデザインを立案し、コミュニティーの厳正な審査を経て、すばる300夜の確保を達成した、(3) 広天域銀河イメージングおよび分光データを組み合わせ、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)：This research program carried out preparation studies for the wide-area Subaru Hyper Suprime-Cam galaxy survey that enables us to explore precision cosmology. The main achievements are: (1) We established the concrete foundation and platform needed for the international HSC collaboration that consists of researchers from Japan, Princeton University and Taiwan. (2) Under a strong leadership of this research program PI (M. Takada), we built up the survey design of HSC galaxy survey based on the discussion and preparation studies we had in the collaboration. The proposed HSC survey was approved by the Subaru community and the Subaru 300 nights are granted for the HSC survey. (3) We developed a novel cosmological method of combining imaging and spectroscopic galaxy surveys for the same region of the sky to constrain cosmological parameters.

研究分野：宇宙論

キーワード：ダークマター ダークエネルギー ニュートリノ 宇宙の構造形成

1. 研究開始当初の背景

2011年度当時は口径 8.2m のすばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC)が開発中であり、HSC を用いた広天域イメージング銀河サーベイを始める準備していた。ダークエネルギーの探査を目的とした銀河サーベイは欧米でも計画されており、すばる HSC サーベイは時宜を得た計画である。特に、口径 8.2m のすばる HSC は、約 100 億年前の深宇宙まで見渡すことを可能にし、世界の計画に比較して優位性がある。すばる HSC 銀河サーベイで可能になる精密宇宙論を実現するために、日本・プリンストン大学・台湾の研究者からなる研究グループの組織体制の整備、研究基盤・ネットワークの整備、データ解析、宇宙論解析のパイプライン群の開発、測定した宇宙論観測量から宇宙論パラメータを制限する手法の開発が急務であった。

2. 研究の目的

銀河、銀河団に代表される宇宙の豊かな大規模構造は、インフレーション中に生成された量子ゆらぎが種となり、宇宙の質量密度の大部分を占めるダークマターの引力の作用でゆらぎが増幅されて形成してきた。しかし、加速膨張はゆらぎをならず方向に働くため、大規模構造形成はダークマターとダークエネルギーの競争によって発展してきたと言える。このように、宇宙の構造形成の進化史を詳しく調べることで、ダークマターの性質、ダークエネルギーの性質を調べることが可能になる。HSC イメージング銀河サーベイで可能になる精密宇宙論の達成を目指し、本研究の目的は、(1) 日本、プリンストン大学、台湾の研究者からなる国際共同研究を牽引し、研究組織の体制および共同研究の基盤を整備する、(2) 精密宇宙論を可能にする HSC サーベイのデザイン(深さ、広さ)の決定、すばる観測夜数の確保、(3) 大量の HSC データを高精度かつ高速に自動処理できるデータ解析パイプラインの開発、(4) HSC サーベイから宇宙論観測量を測定し、宇宙論パラメータ(ダークエネルギーの状態方程式パラメータ、ダークマターの性質、ニュートリノ質量、インフレーションの物理量)を制限する手法の開発、(5) HSC 初期データを用い、宇宙論パラメータの制限の導出、することである。

3. 研究の方法

上述の研究目的を達成するための手法は以下の通りである。(1) 本研究者の研究グループが中心となり、強力なマネジメント体制を整備し、共同研究を円滑に行うための基盤を確立する、(2) 国際共同研究のなかでの議論、準備研究をボトムアップ的に組み上げ、サーベイデザインを策定する、(3) 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構、国立天文台、プリンストン大学の研究者グループが中心となり、それら研究機関の計算機設備も使いながら、C++・Python に基づくデータ解析パイプライン

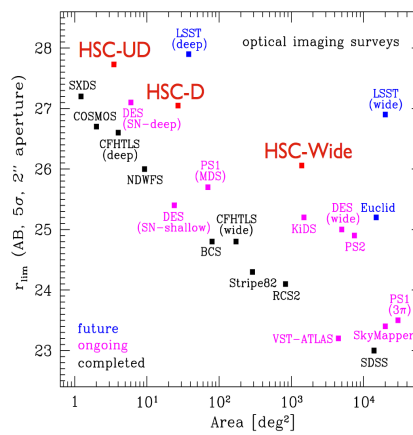
群を開発する、(4) HSC データが得られない場合は、研究期間内に得られる既存の宇宙論データ(例えば、スローン・デジタル・スカイ・サーベイ:SDSS データ)を用い、宇宙論観測量の測定から宇宙論パラメータを制限する方法を開発する、(5) HSC データが得られ次第、開発した手法を適用し、宇宙論パラメータを制限することを目指す。

4. 研究成果

当初は研究期間中(2012年度中)にHSCサーベイを開始することを予定していたが、重さ3トン、高さ3mの文字通り世界最大の広視野カメラ HSC の開発はチャレンジングであり、開発またその試験観測のスケジュールが遅れ、実際にサーベイが開始したのは、最終年度の2014年度であった。このため、本研究では、上述の(1)-(4)の研究目的の達成に重点を置き、それらについては順調に達成することができた。研究期間中に14本の査読論文を発表することができ、また約20件の国際学会での招待講演に招かれ、本研究を宣伝する機会を得た。このように、本研究の目的は十分に達成されたと言える。以下に代表的な研究成果をまとめる。

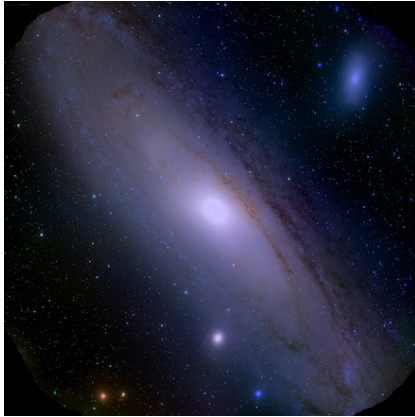
(1) HSC 国際共同研究を組織化し、国際共同研究ポリシーの策定、運営委員会(HSC Board)などマネジメント体制を確立することができた。本研究者は、プリンストン大学の Michael Strauss 教授とともに HSC サイエンスワーキングのグループ長を務め、また HSC Board の委員も務めている。このように国際共同研究・ネットワークの基盤を確立することができた。特に、カブリ数物連携宇宙研究機構が国際共同研究のネットワークを結ぶハブ的な役割を果たし、円滑に国際共同研究を進めることができた。

(2) 本研究者がリーダーシップを発揮し、共同研究内の議論および準備研究を組み上げ、HSC 銀河イメージングサーベイを立案し、その観測提案書を執筆した。観測提案はすばるコミュニティに提出され、厳正な審査を経て、5年間ですばる300晩を投資する、すばる望遠鏡史上最大の大規模プロジェクトとして採択された。



上図は、我々が進める HSC サーベイ (HSC-Wide が宇宙論サーベイ) が現存 (黒) あるいは同時期 (赤紫) の銀河サーベイと比較して、広天域かつ深い (より過去) の宇宙を調べるサーベイになっているのが分かる。また、将来の究極的な銀河サーベイ計画 (青色) への橋渡しの役割も果たすことができる。

(3) カブリ IPMU、プリンストン大学および国立天文台の研究者が主導して、想定される大量の HSC サーベイのデータを高精度かつ高速に自動処理するためのパイプライン群を開発した。

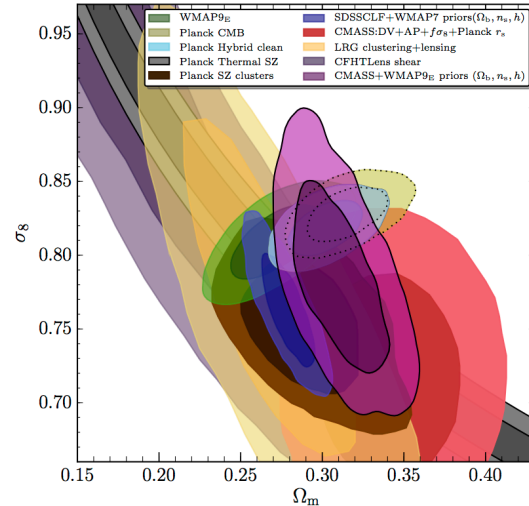


上の画像は、2013年2月に HSC 試験観測で取得したアンドロメダ銀河 (距離は約 250 万光年) のデータを上述の自動解析パイプラインで処理した画像である。HSC の視野でアンドロメダ銀河全体を捉えることができ、個々の星を分解できており、測光精度、結像性能 (星像のシャープの度合い) など設計通りの性能が達成されているのが確認できた。この画像はカブリ IPMU、国立天文台からプレスリリースされ、海外のメディア、新聞各紙 (朝日新聞、日経新聞など) にも取り上げられた。

また、すばる望遠鏡の長期的な戦略として、HSC イメージングサーベイで得られた銀河を分光し、距離を測定することで、3次元的な銀河地図を作ることを可能にする次世代すばる広視野多天体分光装置 (Prime Focus Spectrograph: PFS) 計画の推進について中心的な役割を果たした。広天域の宇宙の HSC イメージングおよび PFS 分光データを組み合わせることで、系統誤差の影響を最小限に抑えた精密宇宙論が可能になる。本研究者は、この大型国際プロジェクトの Project Scientist を務め、国際チームをまとめ、HSC と PFS で可能になるサイエンス白書 (宇宙論、銀河進化、銀河考古学) を執筆した (Takada et al. 2014)。

(4) HSC サーベイデータによる宇宙論の準備研究として、広天域の銀河のイメージングおよび分光データを用いた宇宙論の手法を開発した。宇宙論観測量としては、重力レンズ効果の測定、および 3 次元銀河地図から得られる銀河のクラスタリング統計量に着目した。

特に、重力レンズ効果の測定から得られるダークマターの空間分布と銀河の 3 次元分布を比較することにより、銀河とダークマターの分布間の関係の不定性、いわゆるバイアス不定性、を観測的に除去することが可能になる。結果として、この手法は、系統誤差の影響を最小限に抑え、ダークマター、ダークエネルギーの性質を高精度で制限できる (Hikage et al. 2013; Oguri & Takada 2011; Miyatake et al. 2015; More et al. 2015)。



この宇宙論手法を実際の広天域イメージングおよび分光の公開データである、SDSS および CFHTLenS データに適用し、宇宙のダークマターの総量 ( $\Omega_m$ )、および宇宙構造の成長度合いを表す宇宙論パラメータ ( $\sigma_8$ ) を制限することに成功した (上図参照。More et al 2015 から引用。この論文の投稿時は本科研究費期間中)。先行研究と比較して、同程度の精度の結果が得られ、また相補的な重力レンズ効果と銀河クラスタリング統計量を組み合わせた始めた宇宙論制限として、業界で注目を集めている。

大規模銀河サーベイが世界中で計画されているが、宇宙論業界の需要、要求として、異なる宇宙論観測量あるいは多波長の宇宙論データを組み合わせ、各々のデータ・観測量に含まれる系統誤差を較正し、宇宙論パラメータの制限を導出する手法の開発が望まれている。上述の手法は、業界の望んだ手法の一つになっており、今後もこの流れは益々強まるだろう。この業界の要請、また時代の機運もあり、本研究者、英国マンチェスター大学 Sarah Bridle 教授、およびシカゴ大学 Scott Dodelson 教授が世話人となり、伝統ある米国アスペン物理学センターで「Combining Probes in Cosmological Surveys」を 2014 年 7 月に開催した (<http://www.aspenphys.org/physicists/summer/program/summer2014.html>)。宇宙論研究で活躍する、世界中の研究者を一堂に集め、今後の宇宙論の方向性、将来について有意義な議論の場を持つことができた。

上述の観測データに沿った研究と平行して、理論研究も進めた。宇宙の大規模構造の種の

生成機構を与えるインフレーションは、宇宙の全てのスケールにゆらぎ（物質分布の非一様性）が存在することを予言する。しかし、あらゆる銀河サーベイは有限体積で行われ、このサーベイスケールを超えるゆらぎの影響が長年無視されてきた。また、現代の宇宙論では必要不可欠な数値シミュレーションにおいても、シミュレーションの体積を超えるゆらぎの存在は無視されてきた。本研究者は、シカゴ大学のWayne Hu教授と協力して、この長波長ゆらぎの影響を容易に取り入れることができる物理モデルを構築することに成功した (Takada & Hu 2013; Li et al. 2014)。この新手法は業界で注目されており、HSCおよびPFSサーベイだけでなく、世界中の広天域銀河サーベイで強力な手法になると期待されている。

#### 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 14 件)

- ① K. Ichiki and M. Takada, “Impact of massive neutrinos on the abundance of massive clusters”, *Phys. Rev. D* 85, 063521 (17pp), 2011, 査読有り
- ② T. Y. Lam, T. Nishimichi, F. Schmidt, and M. Takada, “Testing Gravity with the Stacked Phase Space around Galaxy Clusters”, *Phys. Rev. Lett.* 109, 051301 (4pp), 2012, 査読有り
- ③ M. Takada and W. Hu, “Power spectrum super-sample covariance”, *Phys. Rev. D* 87, 123504 (12pp), 2013, 査読有り
- ④ C. Hikage, R. Mandelbaum, M. Takada, and D. N. Spergel, “Where are the Luminous Red Galaxies (LRGs)? Using correlation measurements and lensing to relate LRGs to dark matter haloes”, *MNRAS*, 435, 2345-2370, 2013, 査読有り
- ⑤ M. Takada, R. S. Ellis, M. Chiba et al. (H. Aihara), “Extragalactic science, cosmology, and Galactic archaeology with the Subaru Prime Focus Spectrograph”, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, R1-51, 2014, 査読有り
- ⑥ S. More, H. Miyatake, R. Mandelbaum, M. Takada, et al., “The Weak Lensing Signal and the Clustering of BOSS Galaxies. II. Astrophysical and Cosmological Constraints”, *The Astrophys. J.*, 806, 1 (17pp), 2015, 査読有り

[学会発表] (計 20 件)

- ① M. Takada, “*Weak lensing*” (invited lecture), International Summer School & Workshop “Weak and Strong

Gravitational Lensing”, 23 July – 3 Aug 2011, NAOC, Beijing

- ② M. Takada, “*Weak lensing: Gaussianity and non-Gaussianity*” (invited keynote speaker), “Astronomical Data Analysis VII”, 14 May – 18 May 2012, IESC, Cargese, France,
- ③ M. Takada, “*Subaru Measurements of Images and Redshifts (SuMIRe) project: HSC and PFS*” (invited), International conf. “The Return of de Sitter II”, 14 Oct – 18 Oct 2013, MPA, Garching, Germany
- ④ M. Takada, “*Statistical challenges in weak lensing cosmology*” (invited keynote talk), International conf. “IAU Symposium 306: Statistical challenges in 21st century cosmology”, 25 May – 29 May 2014, Lisbon, Portugal
- ⑤ M. Takada, “*Dark energy interests in Japan: Subaru SuMIRe project*” (invited), International conf. “Wide-field InfraRed Surveys: Science and Techniques”, Pasadena, 17 Nov – 20 Nov 2014, Pasadena, USA

[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.naoj.org/Projects/HSC/j\\_index.html](http://www.naoj.org/Projects/HSC/j_index.html)

#### 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

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

相原 博昭 (AIHARA, Hiroaki)  
東京大学・理学系研究科・教授  
研究者番号：60167773

千葉 柁司 (CHIBA, Masashi)  
東北大学・理学系研究科・教授  
研究者番号：50217246

浜名 崇 (HAMANA, Takashi)  
国立天文台・理論研究部・助教  
研究者番号：70399301

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

市來 淨與 (ICHIKI, Kiyotomo)  
名古屋大学・基礎理論センター・助教  
研究者番号：10534480