

令和 4 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2021

課題番号：16K17684

研究課題名（和文）銀河撮像・分光、CMB観測のシナジー解析で探る宇宙のダーク成分

研究課題名（英文）Synergy of galaxy imaging and spectroscopic surveys and CMB to probe dark components in the Universe

研究代表者

日影 千秋 (Hikage, Chiaki)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授

研究者番号：00623555

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙のエネルギーの95%以上を占める謎のダークマターとダークエネルギーの性質を調べるため、銀河撮像・分光サーベイとCMBを組み合わせたさまざまな理論・観測的研究を行った。すばる望遠鏡を使った銀河撮像計画「ハイパー・シュプリーム・カム」の初期データを使い、奥行き90億光年におよぶダークマターの地図を作成し、宇宙の構造の成長率を誤差3.6%の当時世界最高級の精度で測定することに成功した。プランク衛星によるCMB観測と比較し標準宇宙模型の妥当性や新たな物理の探求を行った。銀河空間分布における非線形重力の影響を抑える再構築法の理論的研究を行い、宇宙の構造成長率の決定精度が向上することを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の95%以上を占めるダークマターとダークエネルギーは現代の物理学、天文学にまたがる最大の謎である。すばるハイパー・シュプリーム・カム(HSC)によって遠方かつ広い天域にわたってダークマターの構造が成長する様子を調べることができ、ダーク成分の謎に迫ることができる。今回、すばるHSC計画の第1期データを用いたコスミックシア解析を行った結果、Planck衛星による宇宙初期と若干の食い違いが見られた。本結果は記者会見を通じて広く一般向けに報道を行い、新聞や科学系の雑誌でも紹介された。今後さらに理論・観測の両面で精度を上げることで、現在の標準宇宙模型を超える新たな物理の発見が期待できる。

研究成果の概要（英文）：I performed various theoretical and observational researches to probe the nature of dark matter and dark energy in the Universe by combining galaxy imaging, spectroscopic surveys and CMB measurements. Using the first year data of Subaru Hyper Suprime-Cam galaxy imaging survey, I reconstructed 3D dark matter maps over 9 billion light years from us and measured the growth of cosmic structure at 3.6% uncertainty (68%CL), which was the world-top level accuracy. I also tested the validity of the standard cosmological model  $\Lambda$ CDM by comparing our result with Planck CMB measurements. I also derived perturbative formula of galaxy density fields after the BAO reconstruction method is applied and found that the nonlinear gravitational effect becomes weak in post-reconstructed field and thereby the accuracy of cosmic growth rate measurement is significantly improved.

研究分野：宇宙の構造形成

キーワード：宇宙大規模構造 ダークマター ダークエネルギー 重力レンズ

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙のエネルギーの95%以上が未知のダークマターとダークエネルギーで占められていることが明らかになった。宇宙のダーク成分の正体の解明は、素粒子、宇宙物理学にまたがる最大の課題の一つである。宇宙のダーク成分の性質を調べるうえで重要な観測量となるのが宇宙の大規模構造である。膨張する宇宙のもとで重力によって物質が集まることで形成される宇宙の大規模構造はダークマターとダークエネルギーの性質に大きく左右されるからである。宇宙のダーク成分の正体の解明に向けて、すばる望遠鏡を用いた銀河撮像計画「ハイパー・シュプリーム・カム(HSC)」と分光計画PFSが進行している。一方、海外ではDESI計画、Euclid衛星、WFIRST (現在はRoman Space Telescopeに名称変更) など次世代の銀河サーベイ計画が世界各国で進められており、競争の激しい分野である。

銀河観測の方法は分光と撮像の2種に大別される。銀河分光観測では、赤方偏移から特異速度を含む距離を見積もることで宇宙の3次元構造や速度場の情報を得ることができるが、銀河分布とその背後にあるダークマター分布の間には、複雑な銀河形成過程にまつわる「銀河バイアス」の不定性が問題となる。一方、銀河撮像観測では宇宙大構造の重力レンズ現象に伴う系統的な銀河形状のゆがみ「コズミックシア」を測定することで、ダークマターを含む宇宙の全質量分布を直接探ることができる。しかし撮像観測では距離推定の不定性が大きく、宇宙の3次元構造の情報は部分的にしか得ることができない。銀河分光・撮像観測の一方のみの観測では、宇宙の3次元の全物質部分の情報を得ることはできず、宇宙のダーク成分の性質を調べるうえで課題となっていた。

## 2. 研究の目的

銀河撮像および銀河分光観測を組み合わせることで、それぞれの観測の弱点を補うことで精密な宇宙論解析を実現できる手法を開発する。そして現在進行中のすばる望遠鏡による大規模銀河撮像計画ハイパー・シュプリーム・カム (HSC) を使った銀河撮像データに応用し、コズミックシア解析やSDSS銀河、Planck衛星によるCMB観測と組み合わせた宇宙論解析を行うことで、宇宙のダーク成分の性質を調べる。

## 3. 研究の方法

### (1) 分光銀河マップと重力レンズ変形マップのクロススペクトル測定方法の開発

両マップのスケールごとの相関の強さを測るため、フーリエ空間でのクロススペクトルを測定する方法を開発する。実際の観測データは、複雑な観測領域の形状、明るい星周りのマスク、不均一なノイズ分布等の影響で全天に一律ではない。観測的影響を無視すると本来とは全く異なるフーリエスペクトルが得られてしまう。本研究では、宇宙背景放射 (CMB) の解析で一般的に用いられている擬似スペクトル法 (Kogut et al. 2003) を用いて、観測的影響を取り除いたフーリエスペクトルを求める方法を構築する。申請者は、擬似スペクトル法を用いて重力レンズマップのパワースペクトルを用いる方法をすでに開発している。本研究では、その手法をクロススペクトルを得るのに用いる。

### (2) すばるハイパーシュプリームカム (HSC) のコズミックシア解析

すばるHSCによる銀河撮像データを用いたコズミックシア解析を行う。コズミックシアの空間パターンを角度スケールの関数として表したパワースペクトルを測定する。さらに、測光情報をもとに推定した距離の異なる背景銀河を用い、コズミックシアのトモグラフィ解析を行う。コズミックシアの解析におけるさまざまな系統誤差、例えば、イントリンジック・アラインメント(宇宙大構造の潮汐場によって、銀河の形や向きがもともと持つ系統的な歪み)、バリオン効果 (AGNのフィードバックなど) の理論的不定性、測光赤方

偏移や銀河形状測定に伴う観測的不定性の影響を考慮して解析する。宇宙の構造の成長率を明らかにし、Planck衛星によるCMBの観測結果と組み合わせることで、標準模型 $\Lambda$ CDMの妥当性を検証するとともに、ダークエネルギーの状態方程式のパラメーターやニュートリノ質量の測定も合わせて行う。

#### 4. 研究成果

(1) 銀河撮像データと分光データを組み合わせた解析についての研究についてさまざまな進展があった。まず非一様な観測データからも銀河・銀河レンズスペクトルを測定する手法を開発した。N体シミュレーションに基づくハローと重力レンズのクロススペクトルと比較し、正しく銀河・銀河レンズスペクトルを再現できることを確かめた。さらにSDSS/BOSS銀河分光データとCFHTLenSの銀河撮像データに応用し、銀河・銀河レンズスペクトルの測定を行った。またすばるHSCの初期データとSDSS/BOSS銀河分光データを組み合わせた銀河・銀河レンズ相関関数による宇宙論解析についての論文は投稿中である。またHSCのコズミックシアパワースペクトルと銀河団の統計情報を組み合わせることで銀河団の質量測定のバイアスパラメーターの測定を行った。

(2) すばるHSC戦略枠プログラムにおける第1期の銀河撮像データを用いて、宇宙大規模構造の重力レンズ効果による銀河形状の系統的なゆがみ「コズミックシア」の空間パターンを解析した。ダークマターを含む宇宙の全物質の3次元地図をかつてない広さと遠方まで再構築するとともに、数十億光年にわたるコズミックシアの空間パターンの時間発展を調べることで、宇宙の構造の成長度合いを示す物理量を誤差3.6%の世界最高レベルの精度で測定することに成功した。Planck衛星によるCMBの観測結果との整合性を調べたところ、他のグループのコズミックシア解析と同様の食い違いが見られた。この結果は宇宙の標準模型 $\Lambda$ CDMモデルには含まれていない物理が関わっている可能性を示唆しており、ダークエネルギーの状態方程式パラメーターやニュートリノ質量の制限を合わせて行なった。本解析では、申請者が開発した重力レンズパワースペクトルの測定手法を用いるとともに、観測データの解析、理論モデルとの比較、宇宙論パラメーターの測定や標準宇宙模型の妥当性の検証に至るまで、ほぼ全ての解析を担当した。

(3) 宇宙大規模構造の観測データに含まれる宇宙論的情報を最大限に引き出す手法の開発に取り組んだ。宇宙大規模構造は宇宙初期にできた小さな揺らぎが重力成長して形成されるが、重力成長に伴う非線形性なモードカップリングの影響で、宇宙論的距離指標となるバリオン音響振動のシグナルの減衰が起きる。初期の揺らぎはガウス統計に従うため情報は2点統計量に集約されていたが、非線形重力成長の影響で高次統計量に情報が流出するうえに、パワースペクトルの共分散行列が非対角になり、解析が困難になる問題が生じる。そこで観測された密度揺らぎを平すように銀河を移動する再構築法を用いることで、非線形重力の影響を取り除く「宇宙大規模構造のアンチエイジング法」の研究を行った。再構築後の質量密度場のパワースペクトルの理論モデルを導出し、摂動論がより小スケールまで適用できることを示した。またパワースペクトルの共分散行列が対角化し、2点統計量のもつ情報量が大幅に回復するとともに、宇宙の構造成長率などの宇宙論パラメーターの決定精度が大きく向上することを示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 14件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Takahiko Matsubara, Chiaki Hikage, Satoshi Kuriiki	4. 巻 105
2. 論文標題 Minkowski functionals and the nonlinear perturbation theory in the large-scale structure: Second-order effects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 23527
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.023527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 C. Hikage, R. Takahashi, K. Koyama	4. 巻 102
2. 論文標題 Covariance of the redshift-space matter power spectrum after reconstruction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 83514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.102.083514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 J. D. Silverman et al. (including C. Hikage)	4. 巻 899
2. 論文標題 Dual supermassive black holes at close separation revealed by the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 154
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba4a3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Aihara et al. (including C. Hikage)	4. 巻 71
2. 論文標題 Second Data Release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 T. Hamana, M. Shirasaki, S. Miyazaki, C. Hikage et al.	4. 巻 72
2. 論文標題 Cosmological constraints from cosmic shear two-point correlation functions with HSC survey first-year data	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz138	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 R. Makiya, C. Hikage, E. Komatsu	4. 巻 72
2. 論文標題 New constraints on the mass bias of galaxy clusters from the power spectra of the thermal Sunyaev-Zeldovich effect and cosmic shear	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz147	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 C. Hikage, K. Koyama, R. Takahashi	4. 巻 101
2. 論文標題 Perturbation theory for the redshift-space matter power spectra after reconstruction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43510
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.101.043510	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hikage Chiaki, Oguri Masamune, Hamana Takashi et al	4. 巻 71
2. 論文標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam first-year data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 43 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyatake Hironao, Battaglia Nicholas, Hilton Matt et al.	4. 巻 875
2. 論文標題 Weak-lensing Mass Calibration of ACTPol Sunyaev-Zel'dovich Clusters with the Hyper Suprime-Cam Survey	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 63 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab0af0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hikage Chiaki, Koyama Kazuya, Heavens Alan	4. 巻 96
2. 論文標題 Perturbation theory for BAO reconstructed fields: One-loop results in the real-space matter density field	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43513
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.043513	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Aihara Hiroaki et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and survey design	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx066	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Aihara Hioraki et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 First data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx081	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Miyaoka, Keita; Okabe, Nobuhiro et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 Multiwavelength study of X-ray luminous clusters in the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A field	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx132	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mandelbaum, Rachel; Miyatake, Hironao et al.	4. 巻 70
2. 論文標題 The first-year shear catalog of the Subaru Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program Survey	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx130	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Oguri, Masamune; Miyazaki, Satoshi; Hikage, Chiaki; Mandelbaum, Rachel; Utsumi, Yousuke; Miyatake, Hironao; Takada, Masahiro; Armstrong, Robert; Bosch, James; Komiyama, Yutaka; Leauthaud, Alexie; More, Surhud; Nishizawa, Atsushi J.; Okabe, Nobuhiro; Tanaka, Masayuki	4. 巻 70
2. 論文標題 Two- and three-dimensional wide-field weak lensing mass maps from the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program S16A data	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 S26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psx070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Chaki Hikage, Masamune Oguri	4. 巻 462
2. 論文標題 A pseudo-spectrum analysis of galaxy-galaxy lensing	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 1359-1370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stw1721	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuhiro Yamamoto, Yue Nan, Chiaki Hikage	4. 巻 95
2. 論文標題 Analytic halo approach to the bispectrum of galaxies in redshift space	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.95.043528	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Maresuke Shiraishi, Chiaki Hikage, Ryo Namba, Toshiya Namikawa, Masashi Hazumi	4. 巻 94
2. 論文標題 Testing statistics of the CMB B-mode polarization toward unambiguously establishing quantum fluctuation of vacuum	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 43506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.94.043506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 日影千秋
2. 発表標題 宇宙大構造のアンチエイジング II: 再構築後のパワースペクトルの共分散
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日影千秋
2. 発表標題 標準宇宙模型のほころびか!? 銀河撮像・分光観測による精密宇宙論
3. 学会等名 理論天文学懇談会 (招待講演)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 日影千秋
2. 発表標題 Covariance of redshift-space matter power spectrum after reconstruction
3. 学会等名 観測的宇宙論ワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam data
3. 学会等名 LSST@ASIA conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Perturbation theory of redshift-space matter power spectra after reconstruction
3. 学会等名 観測的宇宙論ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Perturbation theory of redshift-space matter power spectra after reconstruction
3. 学会等名 Workshop on "Cosmic Acceleration" (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam data
3. 学会等名 COSMO-18 ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam data
3. 学会等名 CosKASI-ICG-NAOC-YITP Joint Workshop on Frontiers of Cosmology ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam data
3. 学会等名 Workshop on Accurate lensing in the era of precision Cosmology ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam data
3. 学会等名 Subaru Users Meeting FY2018 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Cosmology from cosmic shear power spectra with Subaru Hyper Suprime-Cam data
3. 学会等名 Workshop on Accelerating Universe in the Dark (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Morphological analysis of large-scale structure using Minkowski Functionals
3. 学会等名 Workshop on Minkowski functionals (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 Morphological analysis of cosmological random fields using Minkowski Functionals
3. 学会等名 Workshop: Isotropic Random Fields in Astrophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日影千秋
2. 発表標題 すばる HSC 銀河を用いたコズミックシア測定と宇宙論
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chiaki Hikage
2. 発表標題 BAO再構築法による宇宙大規模構造のアンチエイジング
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------