

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400285

研究課題名(和文) 精密宇宙論研究に向けた3+1次元重力レンズ光伝搬数値実験技法の開発

研究課題名(英文) Development of 3+1 dimensional gravitational lensing numerical simulation method for precision cosmology researches

研究代表者

浜名 崇 (Hamana, Takashi)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号：70399301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目的は(1)大規模構造による重力レンズ効果の高精度理論モデルの構築、および(2)重力レンズ効果が重要な役割をはたすサーベイ観測の疑似観測データの作成、の2点である。この目的を達成するために、全天重力レンズ数値実験プログラムを開発し、それを実施し、全天重力レンズシミュレーションデータベースを作成した。このデータベースを利用し、重力レンズ効果を用いた銀河団計測のサンプルバリエーションの評価や、銀河-銀河重力レンズ効果の共分散行列の評価を行った。

研究成果の概要(英文)：The purposes of this research project are (1) to construct accurate theoretical models of gravitational lensing effects by large-scale structures, and (2) to generate the mock observational data of gravitational lensing surveys. To achieve these goals, we developed the numerical simulation program suite for a full-sky gravitational lensing ray-tracing simulation, and generated data-set of the full sky gravitational lensing data. We utilized the data-set to estimate the sample variance of the number counts of galaxy clusters detected by gravitational lensing technique, and to evaluate the covariance matrix of galaxy-galaxy lensing effects.

研究分野：宇宙物理

キーワード：観測的宇宙論

## 1. 研究開始当初の背景

本研究課題発案当時の2013年においては、重力レンズ効果が重要な役割をなす大規模宇宙探査計画が2種類企画されていた。ひとつは、大規模深銀河可視撮像計画(研究代表者は、2014年より観測が開始した、すばる望遠鏡・新主焦点カメラ Hyper SuprimeCam による1400平方度サーベイに参加している)であり、もう一つは宇宙背景放射(CMB)の偏光観測である(日本においても LiteBIRD 計画が推進されている)。前者の主要科学目的の一つは、大規模構造による重力レンズ効果を用いた宇宙進化史と暗黒物質・暗黒エネルギーの巨視的性質の探求である。後者のそれは、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)のBモード偏光のスペクトラムからインフレーションの物理機構を探るものであるが、そのさい宇宙背景放射が手前の構造から重力レンズ効果を受ける事により引き起こされるBモード偏光を正確に補正する技術が重要となる。このように、重力レンズ効果が宇宙論研究の様々な場面で重要な役割を果たすようになってきていた。

一方理論サイドでは、それら観測データを適切に解析し理解するための高精度理論モデル構築やサーベイの疑似観測データ作成のための数値実験手法開発といった基盤的理論研究・技術開発が急務となっていた。

しかし、その当時の重力レンズ数値実験技法は、重力レンズ効果の諸観測量は計算できるが、いわゆる平面近似を用いているため数値シミュレーション可能なサーベイ面積が約 $10 \times 10$ 平方度に限られたものか、全天にわたる数値シミュレーションは可能であるが光の伝搬計算に近似が用いられており、重力レンズ効果の観測量のうち限られたもののみが計算できるタイプの2種類のみであり、広域にわたり重力レンズ効果の諸観測量が計算可能な数値計算技法の開発が必要であった。

## 2. 研究の目的

上記の背景を考え合わせ、本研究課題においては、

(1) 大規模構造による重力レンズ効果の高精度理論モデルの構築

(2) 重力レンズ効果が重要な役割をはたすサーベイ観測の疑似観測データの作成

の2点を主要目的とした。さらに、これらを達成するために必要な広域にわたる重力レンズ効果数値実験技法の開発を本研究計画の技術開発課題とした。

上記目的(1)は基本的には特定の観測プロジェクトに依存することはないが、目的(2)の詳細は、対象とする観測プロジェクトに依存する。本研究においては、特定の観測プロジェクトに依存する部分は調整可能なパラメーターとして扱うことで、様々な観測プロジェクトに応用可能な疑似観測データの作成ツールを開発することを達成目

標とした。

その上で、すばる望遠鏡・新主焦点カメラ Hyper SuprimeCam による広域撮像サーベイを対象とした疑似観測データの作成については、サーベイの開始も迫っているということもあり、具体的な開発・達成目標としてあげた。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下の段階で行われた。

### (1) 重力レンズ数値実験技法の開発

全天にわたる領域について、観測者から宇宙マイクロ波背景放射の放射面まで、重力レンズ効果の光の屈折と光束の変形を同時に計算しながら光を伝搬させる数値計算技法を開発し、その実装を行った。

全天にわたる数値計算を実行するために、球面座標を採用し、球面調和函数展開を用いた重力レンズポテンシャルとその一階、二階微分の計算を行うことで高速に計算を行えるようにした。光の伝搬については、循環関係法という方法を用いることで必要メモリを最小化し全天にわたる高分解能計算を可能にした。

### (2) 全天重力レンズシミュレーションデータベースの作成

開発した数値シミュレーション技法を用いて重力レンズシミュレーションを実施し全天重力レンズシミュレーションデータベースを作成した。多数の宇宙論的体積における大規模N体大規模構造重力計算を国立天文台大型計算機資源を利用して行い、宇宙マイクロ波背景放射面までの物質密度場を計算し、その中で光の伝搬を計算した。

現在までに108個の全天データを作成した。各データは、重力レンズ効果による光の屈折と光束の変形からなる。多様な研究に応用できるように、近傍宇宙から宇宙マイクロ波背景放射面まで多数の距離における重力レンズデータからなるデータベースとなっている。

現在まで、全天かつ宇宙マイクロ波背景放射面までの重力レンズシミュレーションデータベースでそのリアライゼーションの数が100を超えるものはなく、本研究で作成したデータベースは、世界最大のものとなっている。

### (3) Hyper SuprimeCam 戦略枠サーベイの疑似カタログ作成

Hyper SuprimeCam 戦略枠サーベイは2014年から5年間の計画で観測が進められている。最終的には1400平方度にわたる可視撮像データが得られ、それから銀河カタログが作成され、重力レンズ効果を応用した研究に利用される予定である。2017年3月時点で、およそ全体の半分の観測が終了している。

疑似カタログは、Hyper SuprimeCam 戦略枠サーベイの実銀河カタログの位置、赤方偏移と銀河形状の情報と全天重力レンズシミュレーションデータベースから重力レン

ズ情報を組み合わせることで作成された。一組の全天重力レンズデータセットに適切な回転操作をすることで10個以上のHyper SuprimeCam サーベイ領域を重複なしで得られるので、108組の全天重力レンズデータセットから1000個の擬似データを作成した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 全天重力レンズシミュレーションプログラムの開発とプログラムの公開

本研究課題において、全天にわたり宇宙マイクロ波背景放射面までの重力レンズ数値シミュレーションを高分解能でもって実施する数値シミュレーションプログラムを開発した。分解能は使用できるメモリに依存するが、250ギガ程度のメモリを持つ計算機であれば、1分角以下の角度分解能の重力レンズ数値シミュレーションを数時間程度で実施できる(ここでは数十程度のcpuコアを持つ計算機の利用を想定している)。

開発したプログラムは、openmp ライブラリを利用した並列化がなされており、通常のフォートランコンパイラでコンパイル可能である。またソースプログラムは、インターネットページにて、利用方法などと併せ公開している。

##### (2) 弱い重力レンズ効果を用いた銀河団計測におけるサンプルバリエーションの評価

銀河団は宇宙で最大の準平衡状態に達した天体であり、その起源は宇宙初期にあった微小な密度揺らぎの非常に稀な高いピークであると考えられている。従って銀河団の数密度は、初期宇宙の密度揺らぎの情報を我々にもたらすので、宇宙の構造形成を解き明かす上で有用な手段となっている。従来、銀河団探査は、可視撮像による銀河カタログや、X線撮像による銀河団からのX線放射を用いて行われてきた。これらの方法では、可視光やX線がより放射されている天体を選択的に検出するというバイアスがあり、宇宙論研究を行うさいの系統的誤差となっていた。

Hamana et al. (2015) と Miyazaki et al. (2015) においては、重力レンズ効果を用いて銀河団を検出することで、可視光やX線の放射効率によるバイアスを受けずに銀河団計測を行った。しかし Hamana et al.

(2015) での観測領域は約10平方度、Miyazaki et al. (2015) は2.3平方度と、比較的観測領域が狭いため、いわゆるサンプルバリエーションの影響が大きいため、それを正確に見積もる必要があった。我々は、本研究課題で作成した全天重力レンズデータを用いることで構造形成の非線形性まで考慮したサンプルバリエーションを評価することができた。

この重力レンズ効果を利用した銀河団サンプルによる銀河団計測は世界初の成果であり、そのなかで本研究課題で作成された全天重力レンズデータベースが重要な役割を

果たした。

##### (3) Hyper SuprimeCam 戦略枠サーベイの擬似カタログを用いた共分散行列の評価

「3. 研究の方法」欄で記述したように、本研究課題で作成した全天重力レンズデータベースを利用して、Hyper SuprimeCam 戦略枠サーベイの擬似カタログを作成した。この擬似カタログは、理論モデルの構築や、種々の観測量へのサーベイ領域の形状の影響などを評価するために利用され始めている。

現在までのところ、銀河-銀河重力レンズ効果の共分散行列を構造形成の非線形成長効果やサーベイ領域の形状を正確に考慮に入れて評価した研究が論文としてまとめられ査読付き雑誌に投稿中である (Shirasaki et al. 2016, arXiv:1607.08679)。従来の研究においては、共分散行列はジャックナイフ法と呼ばれる方法を用いて推定されてきた。この方法では、サーベイ領域を数十のサブ領域に分割し、そのサブ領域間の相関から共分散行列を求めている。しかし、この方法では原理的にサーベイ領域以下の波長の揺らぎしか考慮することはできないので、サーベイ領域以上の波長の揺らぎが共分散行列におよぼす影響は正確に取り入れることはできなかった。この論文では、全天重力レンズデータがサーベイ領域より広い範囲にわたってデータがあることを利用し、サーベイ領域より長い波長の揺らぎの影響まで取り入れた共分散行列を評価した。また従来のジャックナイフ法の正当性や適用限界を明らかにした。この研究では、銀河-銀河重力レンズ効果の観測量から宇宙論的情報を取り出す際に必要な正確な共分散行列を評価することに成功しており、近い将来に得られる Hyper SuprimeCam 戦略枠サーベイデータによる銀河-銀河重力レンズ効果の観測から宇宙論情報を得る際に重要な役割を果たす。

#### 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7件)

①Ishikawa, S., Kashikawa, N., Hamana, T., Toshikawa, J., Onoue, M., "The very wide-field gzK Galaxy Survey - II. The relationship between star-forming galaxies at  $z \sim 2$  and their host haloes based upon HOD modelling", MNRAS, 458, 747-758, (2016) 査読有り DOI: 10.1093/mnras/stw271

②Shirasaki, M., Hamana, T., Yoshida, N., "Probing cosmology with weak lensing selected clusters. II. Dark energy and  $f(R)$  gravity models",

PASJ, 68, 4, (2016) 査読有り  
DOI: 10.1093/pasj/psv105

③Miyazaki, S., Oguri, M., Hamana, T., Tanaka, M., Miller, L., Utsumi, Y., Komiyama, Y., Furusawa, H., Sakurai, J., Kawanomoto, S., Nakata, F., Uruguchi, F., Koike, M., Tomono, D., Lupton, R., Gunn, J. E., Karoji, H., Aihara, H., Murayama, H., Takada, M.,  
"Properties of Weak Lensing Clusters Detected on Hyper Suprime-Cam 2.3 square degree field",  
ApJ, 807, 22 (2015) 査読有り  
DOI: 10.1088/0004-637X/807/1/22

④Hamana, T., Sakurai, J., Koike, M., Miller, L.,  
"Cosmological constraints from Subaru weak lensing cluster counts",  
PASJ, 67, 34, (2015) 査読有り  
DOI: 10.1093/pasj/psv034

⑤Giles, P. A., Maughan, B. J., Hamana, T., Miyazaki, S., Birkinshaw, M., Ellis, R. S., Massey, R.,  
"The X-ray properties of weak-lensing-selected galaxy clusters",  
MNRAS, 447, 3044-3059, (2015) 査読有り  
DOI: 10.1093/mnras/stu2679

⑥Okabe, N., Umetsu, K., Tamura, T., Fujita, Y., Takizawa, M., Zhang, Y.-Y., Matsushita, K., Hamana, T., Fukazawa, Y., Futamase, T., Kawaharada, M., Miyazaki, S., Mochizuki, Y., Nakazawa, K., Ohashi, T., Ota, N., Sasaki, T., Sato, K., Tam, S.,  
"Universal profiles of the intracluster medium from Suzaku X-ray and Subaru weak-lensing observations",  
PASJ, 66, 99, (2014) 査読有り  
DOI: 10.1093/pasj/psu075

⑦Utsumi, Y., Miyazaki, S., Geller, M. J., Dell'Antonio, I. P., Oguri, M., Kurtz, M. J., Hamana, T., Fabricant, D. G.,  
"Reducing Systematic Error in Weak Lensing Cluster Surveys",  
ApJ, 786, 93, (2014) 査読有り  
DOI: 10.1088/0004-637X/786/2/93

[学会発表] (計10件)

①桜井準也、宮崎聡、浜名崇、田中賢幸、樋口祐一、内海洋輔、  
「Hyper Suprime-Cam データに基づいた超銀河団 CL0016 中にある銀河とダークマターの関係」、  
「日本天文学会2017年春季年会」、2017年3月15日、九州大学 (福岡県・福岡

市)

②浜名崇、  
「Cosmic shear - 大規模構造による弱い重力レンズ相関関数」、  
「理論と観測から迫るダークマターの正体とその分布」、2016年11月10日、国立天文台 (東京都・三鷹市)

③高橋龍一、浜名崇、白崎正人、  
「全天重力レンズマップの作成2」、  
「日本天文学会2016年秋季年会」、2016年9月14日、愛媛大学 (愛媛県・松山市)

④高橋龍一、浜名崇、白崎正人、  
「全天重力レンズマップの作成」、  
「日本天文学会2016年春季年会」、2016年3月16日、首都大学東京 (東京都・八王子市)

⑤宮崎聡、大栗真宗、浜名崇、田中賢幸、他 DLS 探査グループメンバー、  
「Hyper Suprime-Cam による重力レンズ銀河団の検出とその性質」、  
「日本天文学会2015年秋季年会」、2015年9月9日、甲南大学 (兵庫県・神戸市)

⑥Hamana, T.,  
"Cosmological constraints from Subaru weak lensing cluster counts",  
"Theoretical and Observational Progress on the Large-scale Structure of the Universe", 2015年7月24日,  
Headquarters of the European Southern Observatory, ガルヒン (ドイツ)

⑦Hamana, T.,  
"SuprimeCam weak lensing cluster counts and their implications for the dark matter mass-concentration relation",  
"Subaru Users' Meeting 2014", 2015年1月15日, 国立天文台 (東京都・三鷹市)

⑧浜名崇、  
「Weak lensing peak counts による mass-concentration 関係の制限」、  
「第3回観測的宇宙論研究会」、2014年11月27日、名古屋大学 (愛知県・名古屋市)

⑨浜名崇、  
「重力レンズ銀河団計測による宇宙論パラメーター推定と HSC survey による重力レンズサイエンス」、  
「東京大学天文学教育センター談話会」、2014年10月29日、東京大学天文学教育センター (東京都・三鷹市)

⑩Hamana, T.,

“PSF modeling and PSF-corrected galaxy  
shape from 2014A SSP COSMOS data”,  
“HSC collaboration meeting 2014”, 20  
14年8月27日, 広島大学 (広島県・東広  
島市)

[その他]

ホームページ等

<http://th.nao.ac.jp/MEMBER/hamanatk/GrayTrix/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浜名 崇 (Hamana, Takashi)

国立天文台・理論研究部・助教

研究者番号: 70399301