

## 科学研費補助金研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：特定領域研究

研究期間：2006～2011

課題番号：18072002

研究課題名（和文） 重力レンズ効果を用いたダークエネルギーの研究

研究課題名（英文） Study of Dark Energy based on a weak lensing survey

研究代表者

相原 博昭 (AIHARA HIROAKI)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：60167773

研究成果の概要（和文）：本研究は、現代基礎物理学の重要課題と言えるダークエネルギーの解明に、弱い重力レンズ効果を利用した宇宙の3次元質量分布のマップを作ることによって取り組んだものである。我々は本領域研究期間に、すばる望遠鏡に設置されている Suprime Cam の7倍の視野(1.77平方度)を持つ超広視野 CCD カメラ Hyper Suprime Cam (HSC)を製作した。2013年2月のファーストライトおよびその後の試験観測において、所期の光学分解能(シーイング)0.6秒を得ることに成功した。その結果、すばる望遠鏡300夜の観測時間を使う大規模サーベイが認められた。

研究成果の概要（英文）：We are involved in building a 1.2 Giga pixel CCD camera (Hyper Suprime Cam) to be mounted on the prime focus of the Subaru telescope. With this wide-field camera, we plan to conduct extensive wide-field deep survey to investigate weak lensing. This data will be used to develop 3-D mass mapping of the universe. It, in turn, will be used to study Dark Energy. This year, the camera was mounted on the Subaru telescope at Hawaii and successfully commissioned. A large imaging survey with 300 nights at Subaru has been approved.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	17,700,000	0	17,700,000
2007年度	167,000,000	0	167,000,000
2008年度	174,700,000	0	174,700,000
2009年度	71,600,000	0	71,600,000
2010年度	41,500,000	0	41,500,000
2011年度	27,700,000	0	27,700,000
総計	500,200,000	0	500,200,000

研究分野：高エネルギー物理学、素粒子物理学実験

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ダークエネルギー、ダークマター、重力レンズ、すばる望遠鏡、観測天文学

## 1. 研究開始当初の背景

現在の宇宙が加速膨張しているという観測事実は、単なる天文学的意義にとどまらず、

新たな物質階層の存在を意味し、基礎物理学の根幹に大きな衝撃を与えた。素粒子物理が解明した物質階層であるバリオンは宇宙の全エネルギーのわずか4%程度を説明するに

過ぎず、残りの 26%はダークマター、70%は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。しかし、それらダーク成分の正体は不明のままである。ダークエネルギーに関しては、直接検出の方法が無く天文学的手法によってのみ研究を進めることができる。ダークエネルギーの起源の解明は現代基礎物理学に突きつけられた最大の課題である。

## 2. 研究の目的

ダークエネルギーの正体の解明のために、ダークエネルギーの時間依存性を測定する。時間依存があればダークエネルギーの従う力学の存在が有力になり、背後にある新しい物理法則の形が明らかになる。そのために、宇宙論的重力レンズ効果を利用して宇宙の質量分布の宇宙論的時間発展（言い換えれば、質量分布の3次元分布）を再構築する。その結果、ダークエネルギーの状態方程式（=圧力/密度）の時間進化を探ることが、本計画研究の最終目標である。

## 3. 研究の方法

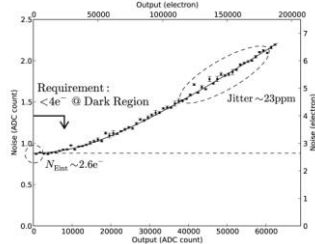
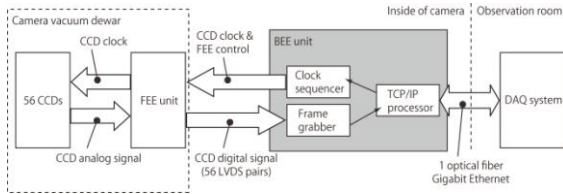
数 10Mpc を超えるスケールに渡って広がる宇宙の質量分布の大構造は、重力レンズ効果を通じてより遠方にある背景銀河の見かけの形状を系統的に歪める。この歪みの統計的相関をとったものが宇宙シア (Cosmic Shear) と呼ばれる観測量である。宇宙シアは、(1) 光る天体の量ではなく全質量分布に依存する、(2) 宇宙論的スケールの情報を持つために宇宙膨張を支配するダークマターとダークエネルギーの総量に敏感である、(3) 観測する銀河をその赤方偏移によって分類することでダーク成分の時間発展が測定できる、という著しい特徴を持つ。しかし、宇宙シアの信号は極微かつ本質的に統計的な量であるので、非常に多くの銀河を広範囲にわたって観測し統計誤差を小さくすることが必要である。我々は、計画研究 A1 班と共同で、すばる望遠鏡に設置されている先行装置 Suprime Cam の 7 倍の視野 (1.77 平方度) を持つ超広視野 CCD カメラ Hyper Suprime Cam (HSC) を製作し、宇宙シアを観測するための広視野深宇宙の大規模サーベイを開始する。特に、本計画研究は、超広視野 CCD カメラ HSC の読み出し回路の完成と弱重力レンズ効果抽出用ソフトウェアの開発を行う。具体的には、116 枚の 2K×4K ピクセル CCD (全部で 928 メガピクセルの CCD カメラ) を読み出すためのアナログとデジタルのエレクトロニクスを完成させる。イメージング解析用プログラ

ム群や弱い重力レンズ効果から宇宙シアを抽出する方法の開発を進める。さらに、銀河団撮像データをすばる望遠鏡主焦点広視野カメラ Suprime-Cam を用いて取得し、HSC 用に開発したソフトウェアを用いてデータ解析を行い、宇宙論パラメータに制限を加える。

## 4. 研究成果

- (1) 計画研究 A01 との協働によって広視野補正光学系 (WFC) を製作した。WFC (計画研究 A01 成果報告中の写真参照) は、すばる望遠鏡の口径 8.2m の主鏡によって生ずるコマ収差などの収差を補正するためのレンズ系であり、7つの光学レンズから成っている。第一レンズの口径が 840mm という大口径レンズシステムで、WFC の総重量は約 900kg にもなる。キャノン宇都宮工場で製作された WFC は、すばる望遠鏡に運ばれ、CCD カメラ部分と合体され、HSC ユニットとして完成した。平成 25 年 2 月のファーストライトおよびその後の試験観測において、所期の光学分解能 (シーイング) 0.6 秒を得ることに成功し、300 夜のすばる大規模 HSC サーベイが認められるために必須とされた基本性能を達成した。
- (2) CCD 読み出し用の低ノイズのエレクトロニクス (BEE) を製作した。BEE に要求される性能は、116 枚の CCD (1 枚あたりの画素数 2K×4K) が生成する 1 ショットあたり 2.3GB のデータを 10 秒以内で読み出しコンピュータに転送すること、その過程で起きるノイズの総量 (アナログエレクトロニクスからのノイズも含む) がチャンネルあたり 4 電子相当を超えない、そして低消費電力型であることである。以下に読み出し回路のブロックダイアグラムと完成した BEE の写真を掲載する。BEE は 3 つの部分回路から成っている。特に、ギガビット Ethernet との通信を行う部分は、データ転送速度の向上を図るために TCP/IP プロトコルの IP 層以下の機能をハードウェア化した Silicon TCP/IP と呼ばれる技術を独自に開発し導入した。完成した BEE は、すべての仕様を満たしている。添付した図 (ノイズ総量 vs 入力信号) からデジタル回路のみに起因するノイズが分離でき、その結果 BEE 起因のノイズは 0.1 電子相当であり無視できる

ことが分かった。このシステムは HSC 試験観測で既に用いられ、所期の性能どおりに機能していることが証明された。



(3) オンラインデータ収集システム (DAQ) を製作した。DAQ は、高エネルギー実験である Belle 実験用に開発された basf と呼ばれる制御プログラムフレームワークを導入したものであり、データ収集、大容量データ転送、リアルタイムのデータ質モニター、環境モニター、さらに CCD 電源制御などを行う。上記 2) の読み出し回路とともに、高エネルギー実験と天文観測のシナジーが生み出した研究成果である。本システムも所期の性能を確認した。

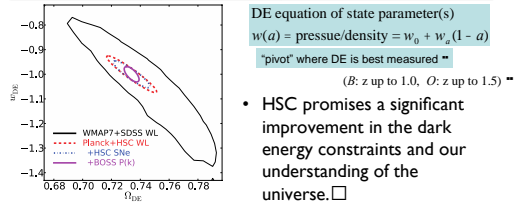
(4) 解析パイプラインを開発した。HSC から得られるイメージデータを処理し、較正を行い、天文・物理解析を行うための一連のプログラム群を解析パイプラインと呼ぶ。A02 班は、広域サーベイ SDSS (Sloan Digital Sky Survey) で豊富な経験を有するプリンストン大学天文学科と共同で解析パイプラインを開発した。このパイプラインを使って試験観測データを解析し、1) で述べたシーイングを

得た。

(5) HSC を使ったすばる望遠鏡広視野サーベイの設計とダークエネルギーへの感度の予測を行った。HSC を使い今後 5 年間で 300 晩のサーベイを行い約 1400 平方度の立体角をサーベイし約 1 億個の遠方銀河の形状の精密測定を下に宇宙論的 (弱い) 重力レンズ効果を検出する。この重力レンズ効果から、宇宙論パラメータ (特に、ダークエネルギーの状態方程式パラメータ = 圧力 / 密度) を求める。この解析方法を確立し解析プログラム群を開発した。

### HSC expected cosmological constraints

Data	$w_{pivot}$	$w_0$	FoM	$\gamma_g$	$m_{tot}$	$f_{NL}$	$n_s$	$\alpha_s$
BOSS-BAO	0.061	1.04	15	-	-	-	0.018	0.0057
HSC(WL)-B (baseline)	0.080	0.86	15	0.15	0.16	30	0.014	0.0041
HSC(WL)-O (optimistic)	0.068	0.66	22	0.083	0.082	18	0.013	0.0040
HSC(WL+SN)-B	0.043	0.60	39	0.15	0.16	30	0.014	0.0041
HSC(WL+SN)-O	0.041	0.45	54	0.081	0.081	18	0.013	0.0040
HSC-O+[BOSS-P(k)]	0.028	0.26	136	0.050	0.044	17	0.009	0.0023
HSC-O+[BOSS+PFS]	0.023	0.22	194	0.057	0.031	17	0.009	0.0021



DE equation of state parameter(s)  
 $w(a) = p/\rho = w_0 + w_1(1-a)$   
 "pivot" where DE is best measured  
 (B: z up to 1.0, O: z up to 1.5)

• HSC promises a significant improvement in the dark energy constraints and our understanding of the universe. □

(6) アタカマ宇宙論望遠鏡 (Atacama Cosmology Telescope: ACT) の高角度分解能、高感度の宇宙背景放射サーベイで発見された高赤方偏移 Sunyaev-Zel'dovich (SZ) 銀河団 ACT-CL J0022-0036 について、すばる望遠鏡データを用いて弱重力レンズ効果を測定し、質量を推定した。SZ 効果は宇宙背景放射光子が銀河団内の高温ガスによって逆コンプトン散乱されることによりエネルギーを受け取る効果で、銀河団の赤方偏移に依らないため、遠方の銀河団も近傍の銀河団と同じように検出することが可能である。したがって、SZ 効果サーベイは X 線などのサーベイと異なり、ダークエネルギーにより宇宙が加速膨張し始める高赤方偏移 ( $z \sim 1$ ) の宇宙論探査を行うことができる。一方、銀河団による弱重力レンズ効果は銀河団が作る重力場によって、銀河団の背景にある銀河像が系統的に歪められる効果であり、銀河団質量の大部分を占める暗黒物質の質量を含む全質量を直接測定することができる。両者を組み合わせることによって、広い赤方偏移の範囲にわたって SZ 信号-銀河団質量関係

が確立することが可能になり、さらに、その結果、銀河団の質量関数を通じて、宇宙膨張が加速膨張に転じる時代から現在までの宇宙の進化を再構築し、ダークエネルギーの性質の解明に迫ることができる。本研究では、上記4)で述べたHSC用画像処理パイプライン、背景銀河の選択にPhotometric Redshift、銀河の形状測定に直交関数系を用いた手法及び複数画像同時測定法を

Suprime-Camのイメージデータに適用し、高赤方偏移銀河団の弱重力レンズ効果測定の方法論を確立した。本研究はHSCパイプラインを用いた最初の科学的成果である。上記のように弱重力レンズ効果の解析を行った結果、

$$M_{200} = 0.72^{+0.33}_{-0.27} (\text{stat.})^{+0.12}_{-0.06} (\text{syst.}) \times 10^{15} \text{ 太陽質量}/h$$

という銀河団質量を得た。この系統誤差には背景誤差の測光的赤方偏移推定 (photometric redshift) の不定性、及び銀河の形状測定的不定性が含まれる。また、この銀河団を用いて $\Lambda$ CDMモデルの検証し、この銀河団の存在 (質量と $z$ ) は $\Lambda$ CDMモデルと矛盾しないことを明らかにした。本研究の成果は、ACT/HSCによる高赤方偏移銀河団のSZ信号-銀河団質量関係の確立のための先行研究としての意義を有する。また、ACT/HSC以外に遠方銀河団の質量関数による深宇宙探査ができる観測組み合わせが現在存在していないことから、ACT/HSCの観測宇宙論的優位性を明確にしたと言える。

- (7) 銀河団は宇宙最大の自己重力束縛系であり、ダークマターの性質を検証するのに適する。他の粒子と相互作用を持たない冷たいダークマター (Cold Dark Matter) に基づく構造形成シナリオが予言するのは、銀河団領域のダークマター分布の形状が平均的な意味でも非球対称性を持つことである。逆に、この非球対称性を観測的に制限できれば、ダークマターの素粒子的性質を制限することが可能になる。そこで、銀河団の重力場が背景銀河の形状に及ぼす弱重力レンズ効果に着目し、銀河団中心 - 重力レンズ場 - 重力レンズ場の3点相関関数を測定することで、銀河団内のダークマター分布の形状を制限する方法を開発している。3点相関関数は、その3点が形成する三角形の

関数として与えられるため、平均的な意味でもダークマターの形状を測定できる。また、ダークマター分布の非球対称性が及ぼす銀河団質量推定の際に及ぼす系統誤差の評価は、銀河団を用いたダークエネルギーの推定に重要である。冷たいダークマターモデルを想定した構造形成のN体シミュレーションの結果を用い、この方法を注意深く調べ、計画しているすばるHSCサーベイの重力レンズ観測量で銀河団領域のダークマターの分布の形状を制限できることを見つけている。この方法を現存の銀河団領域のすばるデータに適用し、銀河団領域のダークマター分布の扁平率を有意に検出し、その扁平率が冷たいダークマター理論モデルの予言と矛盾しないことを見つけており、これらの結果を査読論文に近く投稿する予定である。(Mineo et al. in preparation) この結果は、上記6)の結果とともに、視野がHSC約10分の1であるSuprime Camを使って、HSCで行うサイエンスに先行して行ったものであり、HSCサーベイによって大きな飛躍が期待される、有力な重力レンズサイエンスである。

## 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9件)

- ① H. Miyatake, H. Aihara et al. (29人中6番目) “Subaru weak-lensing measurement of a  $z \sim 0.8$  cluster discovered by the Atacama Cosmology Telescope Survey” MNRAS 429 3627-3644 2013 査読有  
DOI:10.1093/mnras/sts643
- ② H. Aihara, H. Fujimori, S. Mineo, S. Miyazaki, H. Nakaya and T. Uchida “Back-end readout electronics for Hyper Suprime-Cam” IEEE Transactions on Nuclear Science 59 4 2012 査読有  
DOI: 10.1109/TNS.2012.2201169
- ③ Y. Komiyama, H. Aihara, H. Fujimori, S. Mineo, H. Miyatake, et al. (29名中2番目) “Hyper Suprime-Cam: camera design” Proceedings of SPIE 7735 7735F 2010 査読有  
DOI: 10.1117/12.856856

- ④ H. Nakaya, H. Aihara, et al. (19 人中 6 番目) “Hyper Suprime-Cam: development of the CCD readout electronics” Proceedings of SPIE 7735 7735P 2010 査読有  
DOI: 10.1117/12.925764
- ⑤ S. Mineo, R. Itoh, N. Katayama, S. Lee “Distributed parallel processing analysis framework for Belle II and Hyper Suprime-Cam” Proceedings of Science ACAT2010 巻無 026 2010 査読有  
<http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=22&sessionId=10&confId=59397>
- ⑥ S. Mineo, H. Aihara, et al. (10 人中 2 番目) “Development of an analysis framework for HSC and Belle II” Proceedings of SPIE 7740 77401P 2010 査読有  
DOI: 10.1117/12.856984
- ⑦ H. Furusawa, H. Aihara, et al. (15 人中 13 番目) “A prototype of Hyper Suprime-Cam data analysis system” Proceedings of SPIE 7740 77402I 2010 査読有  
DOI:10.1117/12.856823
- ⑧ H. Miyatake, T. Uchida, H. Fujimori, S. Mineo, H. Nakaya, H. Aihara and S. Miyazaki “Prototype Readout Module for Hyper Suprime-Cam” IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record IEEE2008 737-741 2008 査読無  
DOI:10.1109/NSSMIC.2008.4774570
- ⑨ 須藤靖、高田昌弘、相原博昭 “宇宙の暗黒エネルギーを探る” 日本物理学会誌 62・2 83-91 2007 査読有  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110006164672>

[学会発表] (計 20 件)

- ① 峯尾聡吾, “高赤方偏移、巨大銀河団の存在は有限質量ニュートリノ入りの宇宙モデルと矛盾しないか?”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日～27 日, 関西学院大学
- ② 宮武広直, “スニヤエフ・ゼルドビッチ効果で検出された最遠方銀河団の弱重力レンズ効果による質量測定”, 日本物

理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日～27 日, 関西学院大学

- ③ 宮武広直, “スニヤエフ・ゼルドビッチ効果で検出された最遠方銀河団の弱重力レンズ効果による質量測定”, 日本天文学会 2012 年春季大会, 2012 年 3 月 19 日～22 日, 広島大学
- ④ 宮武広直, “Subaru weak lensing measurement of a high-redshift cluster discovered by the Atacama Cosmology Telescope Survey”, すばるユーザーズミーティング, 2012 年 2 月 28 日～3 月 1 日, 国立天文台
- ⑤ H. Aihara, “Cosmology and Particle Astrophysics at IPMU”, LeCosPA 2012 2012 年 2 月 6 日, Taipei, Taiwan
- ⑥ H. Miyatake, “Readout electronics for Hyper Suprime-Cam”, Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP11), 2011 年 6 月 9 日～14 日, Chicago, USA
- ⑦ 宮武広直, “弱重力レンズ効果の高精度測定法の開発”, 日本天文学会 2011 年春季年会, WEB 上 (見なし発表)
- ⑧ 峯尾聡吾, “大規模 HSC 銀河サーベイのための高精度天文データ処理パイプライン法の開発”, 日本物理学会第 66 回年次大会, WEB 上 (見なし発表)
- ⑨ H. Miyatake, M. Takada, “Shapes Using Multiple Exposures”, Pixels to Shear, 2011 年 1 月 27 日, Edinburgh, UK
- ⑩ 峯尾聡吾, “Hyper Suprime-Cam と Belle II 実験の共用データ解析フレームワークの開発 II”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 20 日～23 日, 岡山大学
- ⑪ S. Mineo, “Distributed parallel processing analysis framework for Belle II and Hyper Suprime-Cam”, 3th International Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, 2010 年 2 月 25 日, Jaipur, India
- ⑫ 峯尾聡吾, “Hyper Suprime-Cam と Belle II 実験の共用データ解析フレームワークの開発”, 日本物理学会 2009

年秋季大会, 2009年9月10日~13日,  
甲南大学

- ⑬ H. Aihara,, “Subaru Dark Energy Survey - Hyper Suprime-Cam (HSC) project”  
IPMU international conference Dark Energy, 2009年6月29日, 東京大学 IPMU
- ⑭ 宮武広直, “Hyper Suprime-Cam のための読み出しシステムデジタル部の研究開発”, 特定領域研究「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第3回研究会, 2009年3月18日、19日, 国立天文台
- ⑮ 峯尾聡吾, “ROOBASF フレームワークによる SC 用データ解析パイプラインの構築”, 特定領域研究「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」第3回研究会, 2009年3月18日、19日, 国立天文台
- ⑯ H. Miyatake, H. Aihara et al., “Prototype Readout Module for Hyper Suprime-Cam”, 2008 IEEE Nuclear Science Symposium Medical Imaging Conference and 16 th Room Temperature Semiconductor Detector Workshop, Oct. 19-25, 2008, Dresden, Germany
- ⑰ 宮武広直、相原博昭 他,  
“Hyper Suprime-Cam: CCD 読み出し回路デジタル部の開発 I “, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日~23 日, 山形大学
- ⑱ 峯尾聡吾、相原博昭 他,  
“Hyper Suprime-Cam: CCD 読み出し回路デジタル部の開発 II “, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日~23 日, 山形大学
- ⑲ 藤森裕輝、相原博昭 他,  
“Hyper Suprime-Cam: CCD 読み出し回路デジタル部の開発 III “, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月 20 日~23 日, 山形大学
- ⑳ 宮武広直、相原博昭 他,  
“Hyper Suprime-Cam(HSC)のための CCD 読み出し回路デジタル部の開発 “, 日本物理学会第 63 回年次大会, 2008 年 3 月 23 日, 近畿大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

須藤 靖 (SUTO YASUSHI)  
東京大学・大学院理学系研究科・教授  
研究者番号: 20206569  
(H18-H19: 研究分担者)

樽家 篤史 (TARUYA ATSUSHI)  
東京大学・大学院理学系研究科・助教  
研究者番号: 40334239  
(H18-H19: 研究分担者)

角野 秀一 (KAKUNO HIDEKAZU)  
首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 70376698  
(H18-H19: 研究分担者)

高田 昌広 (TAKADA MASAHIRO)  
東京大学・国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構・教授  
研究者番号: 40374889  
(H22-H23)

田中 真伸 (TANAKA MANOBU)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授  
研究者番号: 00222117  
(H18-H19: 研究分担者)

岩崎 昌子 (IWASAKI MASAKO)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・准教授  
研究者番号: 70345172  
(H20-H22) (H18-H19: 研究分担者)