

領域略称名：ダークエネルギー
領域番号：467

平成25年度科学研究費補助金
「特定領域研究」に係る事後評価報告書

「広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究」

(領域設定期間)

平成18年度～平成24年度

平成25年6月

領域代表者 (所属研究機関・部局(学部等)・職・氏名)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

唐牛 宏

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究領域の設定目的の達成度	8
4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	11
5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	12
6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	13
7. 総括班評価者による評価	14
8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	15
9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	18
10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	24

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

近年の宇宙論研究、とりわけ観測的宇宙論と呼ばれる分野の研究の進展にはめざましく、その顕著な成果が1998年の「宇宙膨張の加速」の発見であり、また加速させるための斥力としてそこから導き出された未知の存在、ダークエネルギー（Dark Energy）である。これまでも宇宙には目に見えない物質、ダークマター（Dark Matter）が大量に存在していることがわかっていたが、ダークエネルギーはダークマターのエネルギー密度の2倍以上もの真空のエネルギーであることが次第に明らかになってきたのである。

真空のエネルギーとしては素粒子物理学において議論されるスカラー場が宇宙において重要な役割を果たしている可能性が示唆されているが、未だ基本粒子としてのスカラー場を発見するには至っていない。すなわち、ダークエネルギーの解明は天文学、宇宙論、素粒子論にまたがり、さらに広く一般的にも非常に関心の高い21世紀基礎科学における最重要課題となっている。このため現在すでに多くの（主に欧米の）研究者達が、分野を問わず様々な手段に基づく研究プロポーザルを提出し、その実現に向けた熾烈な競争を開始している。その中であって天文学が「直接検出が困難なダークエネルギーの性質を観測によって知る」ということは、重力場方程式における宇宙項(w)の値がいくつであるのか、そしてその値は時間とともに変化しているのか否かを調べることに他ならない。 w の値と時間発展が明らかになれば、ダークエネルギーを作り出しているであろうスカラー場のポテンシャルを構築することが可能になり、その正体に迫ることができる。

本領域研究はこのダークエネルギー研究に、我が国が世界に誇る大口径望遠鏡「すばる」に新たな観測装置、超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam(HSC)を搭載することによって取り組み、世界をリードする画期的成果を挙げるための研究である。すなわちHSCによる広域宇宙撮像探査を行い、取得したデータからバリオン振動及び重力レンズ効果を用いた研究手法によって w の値とその時間発展を詳細に解明し w を決定することを目的とする。そしてその遂行のために「超広視野カメラの製作とサーベイ観測」を旨とする研究項目 A と、「」を行う研究項目 B の二つの研究項目を設置することとする。

研究項目 A 超広視野カメラの製作とサーベイ観測

HSCを搭載するすばる望遠鏡は他にはない焦点距離の短い「主焦点」を有している。短い焦点距離はすなわち広視野を意味し、一度の撮像で広い領域をカバーすることができる。すばるの主焦点は直径0.5度角ではほぼ満月の大きさに達し、現在搭載されているSuprime-Camはこの広視野を活かしてすでに多くの研究成果をあげており、例えばダークエネルギー研究においては w が無い宇宙モデルを棄却することができた。しかしながら宇宙全体を議論するには統計量が圧倒的に足りず、より「広い」（1,000平方度程度）観測の重要性からSuprime-Camの大幅なサーベイ能力向上が不可欠となった。研究項目Aでは計画研究A01, A02が共同でSuprime-Camの10倍の視野を持つHSCの製造とそれによる広視野探査の実現をその目的とする。

主焦点において広い視野にわたって高像質を得るためにはレンズ群で構成される補正光学系が必要であり、またその収差による像ぼけがシーイングより十分小さいことが求められるが、すでに検討を重ねた結果、硝材製造の制約から第一レンズの直径を1.2mとした場合、特に重力レンズ解析に重要な波長650~800nm付近において科学要件を満たすことが確認されている。

カメラの要であるCCDはこれまでその薄さのために赤外線領域で感度が急激に減少するという難点があったが、中性子法と呼ばれる半導体素材技術の進展により300 μ m厚のウェハを完全に空乏層にし、波長1 μ mで50%以上の量子効率を得ることが可能となった。また、天文用として一般的な2048 \times 4096ピクセルCCDの価

格は裏面照射工程を要するため非常に高価格であるが、完全空乏型はこれを省略することで生産性を向上させることができる。

また HSC の観測では一晩で 576 Gbytes、さらに時間領域 (time domain) の観測を行うためにはその 10 倍程度の 5.76 TBytes のデータを取り込む事になりその処理は大きな課題となる。当領域研究では、高エネルギー物理学実験によって培われた大容量高速データ転送技術 Silicon TCPIP (SiTCPIP)を用いることでこのデータ処理を高速で行う事を実現する。

研究項目 B 超広視野サーベイの理論的研究

計画研究 B01 では、HSC によって行われる銀河広域探査で得られる銀河の空間分布から、宇宙のエネルギー密度の大部分を占めているダークエネルギーのどのような情報を得ることが可能であるかを調べ、実際の観測に向けた理論的準備を行うことを目的とする。その手法として、バリオン振動を用いてバリオン密度揺らぎの存在している時間・場所から観測者までの空間の構造、すなわちハッブルパラメーターを測定しそこからダークエネルギーの時間進化を得ることを目指す。この目的の達成には測光観測による推定が有効であることが示されているが、莫大な数の銀河の赤方偏移分布を $z \sim 2$ 程度まで測定することが必須であり、HSC の完成が待たれる。またいったん銀河分布の赤方偏移依存性が広視野探査によって得られればバリオン振動以外にも、銀河などの構造の時間進化が重力場に影響を及ぼし、そこを通過する宇宙マイクロ波背景放射フォトンのエネルギーを変化させる効果 (ISW 効果) からダークエネルギーに対する重要な手がかりが得られることも期待されており、世界に先駆けて最先端の成果を出すための重要な研究と位置付けられる。

計画研究 B02 では、本研究領域が提案する HSC による大規模深宇宙探査サーベイを念頭に、遠方銀河像への重力レンズ歪み効果の観測量から大規模構造の質量分布を復元する方法を開発する。特に、その多色データから推定される銀河の測光的赤方偏移の情報と重力レンズ効果を組み合わせることで、擬 3 次元空間 (赤方偏移空間 + 天球上の 2 次元位置) における宇宙の質量地図 (宇宙の質量トモグラフィ) を復元する方法を開発することを目指す。この方法を深宇宙サーベイに適用することで、宇宙構造の形成過程の赤方偏移進化が観測的に得られる。また、復元された質量地図で特に質量が密集した領域 (重力レンズ効果が強い領域) は銀河団に対応するので、赤方偏移の関数としての質量で選択された銀河団カタログを構築できる。銀河団の質量関数は構造形成モデルのみならず宇宙の膨張則を通して暗黒エネルギーの性質に敏感であるので、それらを制限する方法を開発する。さらに、発見された銀河団領域の詳細な研究から銀河団の質量分布の統計的性質が得られる。Cold Dark Matter モデルの重要な予言の一つとして、冷たい暗黒物質が重力以外の相互作用を持たなければ、銀河団の質量分布に特徴的な質量プロファイルが出現することが示されているので、本計画研究から暗黒物質の素粒子的性質に観測的な制限を導出できると考えている。

2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

< 領域代表者および総括班研究代表者 >

唐牛 宏（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授）

< 領域および総括班評価者 >

家 正則（国立天文台・教授） 福島 正己（東京大学 宇宙線研究所・教授）

岡村 定矩（法政大学・教授）

（以下、計画研究代表者*）

計画研究 A01：重力レンズ効果を用いたダークマター探査

唐牛 宏*、宮崎 聡（国立天文台・准教授）、小宮山 裕（国立天文台・助教）

浜名 崇（国立天文台・助教）平成 18、19 年、中屋 秀彦（国立天文台・助教）平成 18、19 年、

市川 隆（東北大学大学院・教授）平成 18、19 年、成相 恭二（国立天文台・名誉教授）平成 19 年

古澤 久徳（国立天文台・助教）平成 19 年

計画研究 A02：重力レンズ効果を用いたダークエネルギーの研究

相原 博昭（東京大学大学院・教授）*

須藤 靖（東京大学大学院・教授）平成 18、19 年

岩崎 昌子（高エネルギー加速器研究機構・准教授）平成 18、19 年

樽家 篤史（東京大学大学院・助教）平成 18、19 年、角野 秀一（首都大学東京・准教授）平成 18、19 年

田中 真伸（高エネルギー加速器研究機構・准教授）平成 18、19 年

連携研究者 高田 昌弘（東京大学 カブリ数物連携宇宙研究機構）

計画研究 B01：銀河分布を用いたダークエネルギーの研究

杉山 直（名古屋大学大学院・教授）*、松原 隆彦（名古屋大学大学院・准教授）

吉田 直紀（東京大学大学院・教授）、高橋 龍一（弘前大学・助教）平成 21、22、23 年

計画研究 B02：重力レンズ効果による暗黒物質分布と宇宙の構造形成史の解明

二間瀬 敏史（東北大学大学院・教授）*、千葉 柁司（東北大学大学院・教授）

高田 昌広（東北大学大学院・助教）平成 18、19、20 年

< 公募研究 >

平成 19 年度

公募 A01： 大口径レンズに適応できる反射防止膜の開発

吉田 国雄（東京工業大学）

公募 A02： 重力レンズ効果における非一応時空のポスト・フリードマン的效果とダークエネルギー

葛西 真寿（弘前大学）

公募 A02： 我々の凹凸宇宙の観測的性質

浅田 秀樹 (弘前大学)

公募 A02： 「光度-赤方偏移関係」に対する多重重力レンズ効果の影響の理論的解明

吉田 宏 (福島県立医科大学)

公募 B01： 宇宙再イオン化時代の銀河探査

嶋作 一大 (東京大学)

公募 B01： すばる FMOS によるバリオン振動探査計画の検討

戸谷 友則 (京都大学)

公募 B01： ガンマ線バーストによる距離指標の研究

中村 卓史 (京都大学)

公募 B01： 大規模構造を用いた重力モデルのテスト

山本 一博 (広島大学)

平成20、21年度

公募 A01： 広帯域反射防止膜の基礎研究

大橋 正健 (東京大学 宇宙線研究所)

公募 A02： 超新星グリズムサーベイによる超新星発生率の研究

安田 直樹 (東京大学 宇宙線研究所)

公募 A02： 宇宙定数のテスト

千葉 剛 (日本大学)

公募 B01： 超新星母銀河の狭帯域撮像

土居 守 (東京大学)

公募 B01： 高赤方偏移の Ia 型超新星の進化とダークエネルギーの状態方程式

野本 憲一 (東京大学)

公募 B01： すばる FMOS の大規模分光サーベイによるバリオン振動探査

戸谷 友則 (京都大学)

平成22、23年度

公募 A01： すばる広視野サーベイ時代に向けての、宇宙最遠方クエーサーの選別法の確立

今西 昌俊 (国立天文台)

公募 A01： 大規模銀河サンプルの巨大データベースによる効率的な管理と情報取得方法の確立

高田 唯史 (国立天文台)

公募 A02： ディープサーベイデータを用いた移動天体の探査

安田 直樹 (東京大学)

公募 A02： 重力レンズ効果における尤度関数の精密決定

市来 浄興 (名古屋大学)

公募 A02： HSC データ解析の為に並列パイプラインの構築

片山 伸彦 (KEK)

公募 B01： 超新星の多様性と母銀河の星生成史

土居 守 (東京大学)

公募 B01 : Ia 型超新星の多様性の起源とダークエネルギーの状態方程式の探求

野本 憲一 (東京大学)

公募 B01 : すばる FMOS を用いたバリオン振動探査によるダークエネルギーの研究

戸谷 友則 (京都大学)

<各研究項目の連携状況>

各研究項目は密接に連携しており、とりわけ計画研究 A01 と A02 は HSC という一つの装置を分担して開発製作するため、「HSC 製作者会議」を毎月一回定例で開催することとし、緊密な情報交換と進捗のチェック、相互のインターフェイスの精密化を図った。一方、本領域に参加する研究者は研究領域主催の研究会を通じて相互の研究進展に係る情報交換と戦略の策定をはかるとともに、日本天文学会年会、すばる望遠鏡ユーザーズ・ミーティング等の機会を捉えその成果を発表した。本特定領域に直接関連する研究会、ワークショップは以下の通り。

平成 18 年 11 月 : 「超広視野撮像/分光器で切り開く銀河天文学と観測的宇宙論」

(領域主催、東京、参加者 62 名)

平成 18 年 11 月 : 国際研究集会「Cosmology with wide-field photometric and spectroscopic galaxy surveys」

(領域主催、東京、参加者 外国 14 名、国内 53 名)

平成 19 年 1 月 : 「すばるユーザーズミーティング」(国立天文台主催、国立天文台、参加者約 100 名)

(領域研究者の積極的参加によりこの場において HSC 大規模サーベイを可能にする
“すばる戦略枠” の新設が承認された。)

平成 19 年 3 月 : 「HSC をめぐるサイエンス検討会」(領域主催、仙台、参加者 51 名)

平成 19 年 3 月 : 国際研究集会「The 6th International Workshop on Very High Energy Particle Astronomy
-Connection between Wide Field Survey and Cosmic Ray Observation-」

(計画研究 B01 が共催、ハワイ、参加者 約 25 名)

平成 19 年 6 月 : 「Cosmology with Wide-field Imaging Surveys of Galaxies」

(JSPS 主催、東京大学、参加者 30 名)

平成 20 年 3 月 : 第二回「HSC をめぐるサイエンス検討会」(領域主催、賢島、参加者 59 名)

平成 21 年 1 月 : 国際研究集会「Japan-Princeton-Taiwan HSC Workshop」

(領域主催、国立天文台、参加者 45 名)

平成 21 年 3 月 : 第三回「HSC をめぐるサイエンス検討会」(領域主催、国立天文台、参加者 60 名)

平成 22 年 3 月 : 「HSC 研究会」(領域主催、弘前、参加者 49 名)

平成 23 年 3 月 : Subaru HSC Workshop (領域/DENET 共催、台北・台湾、参加者 80 名)

平成 23 年 8 月 : DENET HSC Strategic Survey (DENET 主催、プリンストン大、参加者 45 名)

平成 23 年 10 月 : The Accelerating Universe (DENET/IAP 主催、パリ、講演者 38 名、参加者約 100 名)

平成 24 年 9 月 : 「HSC サーベイによるサイエンス研究会」(領域主催、国立天文台、参加者 80 名)

平成 24 年 12 月 : 「Supermassive Black Holes in the Universe: The Era of the HSC Surveys」(領域共催、
愛媛大学、参加者 60 名)

3. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、また、応募時に研究領域として設定した研究の必要性に照らしての達成度合いについて、具体的に記載してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目毎の状況も記述してください。

本領域は超広視野カメラの製作及びそれにより銀河の大規模サーベイを行う開発・観測研究（計画研究A01、A02）と、得られたデータからダークエネルギー、ダークマターの銀河への影響を解析してその正体にせまる理論研究（B01、B02）を二本の柱とし、公募研究ではこれらの計画研究でカバーされていない、例えば超新星による宇宙加速膨張の研究、などの広がりを目指した。

カメラ製作においては、計画研究A01、A02が連携して平成18年度の実現可能性検討から始まり、カメラの重要な構成部品である補正光学系・主焦点ユニットの設計・製造、CCDの開発、さらに取得した膨大なデータを解析するためのソフトウェア開発までを企業、各機関の研究協力者を交えて推進した。またその間、平成20年にプリンストン大学（米）、台湾中央研究院とカメラ製作とそれによる観測研究のための共同開発協定を締結し、国際共同開発研究の道筋も確立して完成に向けて着実に歩を進めてきた。

新型CCD 素子は2048 x 4096 ピクセルの完全空乏型裏面照射式で、波長1000nm の量子効率が従来の4倍になるものを新たに開発し、現行のSuprime-Cam に搭載してその性能を確認した後、116 個を受光面に搭載するための調達計画を具体化して進めた。またこのCCD の制御と読み出しを担うエレクトロニクスを開発し、微弱な星の光を高精度、高速で読み出すことに成功した。CCD 素子をコールドプレート上に配置しパルスチューブ冷凍機にて-100° に冷却して運用するためのデューワーはHSCの要となる構成部品であり、真空を保持しつつ望遠鏡の姿勢変化に対して変位が極めて少ないことが要求される高い工作精度を実現した。

補正光学系においては、重量、サイズの制約の中で技術革新によって最大限の視野角を達成すること、光の屈折による大気分散を高精度で補正する大気分散補正技術を開発し高い分解能を実現すること、またそのレンズ群用の特殊硝材を製造、研磨することなどに取り組んだ。これらレンズ群を収めるレンズ筒には軽量且つ剛性が高いことが求められ、最適な素材としてファイナセラミックス新素材を採用することとし、技術的に難しい大型部品の加工への挑戦となったがこれを完成させた。

小型軽量化フォーカルプレーンシャッターには高い露出精度と耐久性が求められることから、他の構成部品に先立ちすばる望遠鏡での駆動試験を行うことでその安定性を確認することができた。

しかしながら、全体工程の進捗に関しては、領域発足初年度のハワイ地震による望遠鏡の破損の影響を大きく受け、本装置の主焦点ユニット及び望遠鏡改修の基本設計作業に着手出来ずに補助金初年度の繰越を余儀なくされたことをはじめ、東日本大震災などの天災に起因する遅れに加え、本カメラの設置先であるすばる望遠鏡の主焦点ユニットで発生した冷却水の漏洩事故、さらには本装置の搭載のために改良の必要に迫られていた主焦点観測装置交換機構が、改修の検討を始める矢先に故障すると云う不運なトラブルの影響も受け、A01、A02 はともに最終年度も含めてほぼ毎年の補助金繰越しを続けながら、鋭意、可及的迅速な望遠鏡搭載の可能性を追求した。その結果、2012年8月には『ファーストライト』にこぎ着けることが出来、この成功はNatureをはじめとする国内外の報道にも多数取り上げられた。

ファーストライト後、HSC の性能評価のための試験観測が平成25年1月に行われ、ここで初めてカメラの視野全面を用いた画像が取得され、詳細な解析で画像の質を検証した。結果は、要求仕様を完全に満足するものであり、8-10m 級の世界第一線望遠鏡では他に例を見ない1.5度角という広視野の全面にわたって、結像性能0.48秒角という世界最高レベルのシャープさが立証されている。

一方、開発と並行して、本研究チームによる、HSC を使った広視野大規模サーベイ観測の意義と重要性についてすばる利用者コミュニティの理解と賛同を得る努力がなされてきた。2007年すばるユーザーズミーティングにおいては、HSC とそのもたらすサイエンスについて広く議論され、開発の重要性についてコミュニティと認識を同じく

するに至った。合わせて HSC の目指す広視野大規模サーベイを可能とする「すばる望遠鏡戦略枠」の新設がこれにおいて承認された。HSC が平成 25 年 1 月の試験観測を進めるなか、本プロジェクトの最終目標であり、開始時点から数年にわたって努力を重ねてきた「他者の追従を許さない規模の宇宙物理学の基礎データを構築するための大規模イメージング観測」の提案書作りが、国内外 166 名の研究者が参画して平成 24 年 10 月に完了・提出され、すばるコミュニティの代表から構成される国立天文台の委員会がその後慎重に審議を重ねた結果、提案通り受け入れて本プロジェクトに総数 300 夜のすばる望遠鏡観測時間を供与することを決定した。これは、コミュニティの非常に高い評価と期待値を表している（戦略枠以前は 1 プログラムあたり最高で 20 夜）。これにより 2014 年 2 月から科学観測が開始されることで本特定領域が目的とする広視野宇宙探査が実現するところとなり、ダークエネルギー・ダークマターの解明は言うに及ばず、様々な分野の研究で世界をリードすることになる高精度の観測データを今後発信していくことになる。

以上のことから、計画研究 A01-A02 の「世界に類を見ない新装置を開発し、それをを用いて大規模深宇宙探査サーベイ観測を行う」という設定目的から見て、達成度は道半ばと云わざるを得ない。しかし、開発要素が極めて多くチャレンジングな装置製作が完成したことと、コミュニティが 300 夜の提供を承認したことで、設定目的の達成のための全ての必要条件を満たすまでに至ったことは特記したい。

もう一つの柱である理論研究（計画研究 B01、B02 および公募研究）においては、まず超広視野カメラ HSC による観測で得られるデータから最も効率よくダークエネルギーに関する情報を引き出すための理論研究を推進することとし、統計的、系統的誤差の評価を厳密に行って観測誤差を推定することなどを含め、最適な観測計画の立案を目指した。平成 18-19 年度以降、宇宙での線形密度ゆらぎの詳細な計算及び宇宙大規模構造の形成にダークエネルギーが及ぼす影響の詳細な調査を目的とする大規模数値シミュレーションを開始し、銀河分布の世界最大規模のサンプルを得て遠方の銀河に生じる重力レンズ効果を見積もる研究を推進した結果、将来の観測誤差を推定することが可能となった。合わせて最適な観測計画を立案できることを示し、その目標を達成することができた。

また、重力レンズ効果に基づいた宇宙の質量地図の作成とそのための理論的方法の開発を目的とした研究においては、新たな弱い重力レンズ解析法として楕円形の窓関数を導入して測定誤差の一部を無視できる程度に小さくすることに成功し、この方法を「E-HOLICs」と名付け現在もさらに改良を試みている。この方法は銀河団内のダークマターの部分構造を発見するなど、従来の理論予想に対し、直接的な全く新しい検証を与えるものであり、より正確な質量分布地図を作成することが可能となった。

一方、超新星を用いたダークエネルギーの研究は、計画研究とは全く異なる系統誤差と統計誤差を持つ相補的かつ有効な方法論であり、本研究によって得られるデータの活用の可能性は十分に検討されるべきであるため、公募研究で多数の応募・採択があり多くの成果をあげた。超新星を標準光源として使うためには、その絶対的明るさを高い精度で知ることが必要であるが、それが進化していないか、すなわち、宇宙の年齢の関数として変化していないか、という重要な疑問が残る。その意味で、標準的でない超新星の研究は重要であり、世界で初めてすばる望遠鏡による偏光分光観測から爆発する超新星の球対称性を測る研究が行われ、超新星の多様性を理解する大きな一歩となった。さらに、超新星とその母銀河との関連、とりわけその星生成史との関連を調べるための専用の多色カメラやグリズムの開発研究でも成果を上げた。

その他公募研究の中では、加速膨張をダークエネルギー以外で説明する理論的考察も展開された。例えば、加速膨張をダークエネルギーを導入すること無く、宇宙の非一様性の効果として説明しようとする試みも行われた。また、重力レンズ効果が、直接暗黒物質・宇宙背景ニュートリノ分布の検証になるだけでなく、その幾何学的な効果から暗黒エネルギーの影響を測る可能性の検討、新しい物理の探究の観点から、重力理論の修正モデルの検証可能性についても考察された。

また、宇宙定数からのずれをダークエネルギーの状態方程式でパラメトライズする際の一般的な表式を基本

理論に立ち返って導出する試みも行われた。その状態方程式を超新星の観測データに適用し、状態方程式のパラメーターへの制限を与え、現在の観測データは宇宙定数と矛盾しない、ということが明らかになった。さらには、新しいパラメトリゼーションはより広いダークエネルギーモデルについても適用できることを示した。

さらに公募研究のねらいとして、本研究の目的と直接の関係はないが基礎的な要素技術の開発や、得られるデータを利用した他分野の研究の展開の可能性も追求した。その中には、大口径光学素子の反射防止膜を通常の誘電体多層構造ではなく、全く新しい、空気側から基板側に向かって徐々に屈折率が増加していく多孔屈折率勾配の薄膜の開発や、高精度の膜厚制御が可能なイオンビームスパッタ装置を利用した超多層 (>30 層) の広帯域反射防止の開発などがある。

また、大規模深宇宙探査サーベイ観測のデータを用いて二次利用の例として、他の方法では観測不可能な、銀河系の構造や化学的進化を調べる上で重要な準矮星などの銀河系ハローに存在する低質量で暗い星が高速で移動することを利用した探査の研究が追求された。

これらのことから、「計画研究 A01、A02 で開発した HSC を用いた大規模深宇宙探査サーベイ観測で得られるデータでダークマター・ダークエネルギーが銀河の分布や分布形状に与える効果を定量的に解析し、これを理論モデルと比較することでダークエネルギーの存在およびその時間変化」に迫る、という B01、B02 と公募分野の理論研究の設定目標は残念ながらデータ取得に至らなかった現実から見て未達成であるが、当初の設定目的を超えて、従来の理論・手法に対し新たな理論の提案と定式化に成功したこと、これまで不可能であった観測空間における銀河分布のパワースペクトルなどの求め方を平易にする定式化を行う、またダークマターの存在形態によって大きく作用される銀河系の形成過程について新しい知見を得る、など多岐にわたって成果をあげている。

これらのことから、本領域では最も効率のよい観測、データ解析、理論展開によりダークエネルギー・ダークマター探査を行う素地がすでに十二分に整っており、平成 25 年 2 月のすばる戦略枠の観測開始を待って現代科学における最大の謎に迫る世界トップレベルの成果を上げることが約束されていると確信する。

4. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ程度）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

領域発足初年度の 2006 年 10 月に発生したハワイ島沖地震によりすばる望遠鏡が被災し、その性能回復確認作業が 2007 年 2 月まで続くことになったため、この年予定していた「HSC の望遠鏡への取付条件確定」及び「望遠鏡改修のシステム設計」とそれに関連する「光学系の基本設計」「新型 CCD 試作品の製造」などが着手不可能となり、やむなく補助金を繰越すことでこれに対応した。

さらに国内最終調整段階を迎えた 2011 年 3 月に発生した東日本大震災の影響では以下のような遅延が発生した。

【補正光学系】

製造を担当するキャノン(株)宇都宮工場が罹災により使用不能になり、また長引く余震で精密光学系の調整が困難になったため、兵庫県の三菱電機(株)通信機製作所に作業場所を移すことで工程の維持を図った。

【カメラ部】

計画停電の影響でクリーンルームが停止し、CCD 取り付けなどの作業が滞った。このため西日本に作業場所を移すことを検討したが実施には及ばなかった。

【フィルタ交換機構】

3/21 に台湾よりフィルター交換機構が到着する予定であったが、放射能問題で台湾政府より関連研究機関の職員に渡航禁止令が出されたため研究・技術者の来台が不可能になったことを受けて、これに係る作業時間を短縮すべく工程の見直しを行った。

これらによって、震災の影響は最小限に食い止められたと評価している。

こうして主焦点ユニット、補正光学系、CCD カメラ本体などの主要部位がすばる望遠鏡に到着した後、相互の噛合せ・取付試験が行われ、すばる望遠鏡への設置調整を行う予定であった。しかし、これら作業工程の途中、いくつかの（本プロジェクト内外での）不具合・故障が発生したために当初の工程を遵守できず、望遠鏡に搭載してのファーストライトが約 1 年繰り延べとなった。

不具合の第一は(i)山頂での波面検査が、出荷前のデータを再現できず、その原因究明・再検査・結果評価を行った。結果、最終的に判明するまで約 2 ヶ月を要したが補正レンズには何の問題もなく、測定装置の設定にミスがあったこと、(ii)主焦点ユニット（精密制御枠体）の、補正光学系（レンズ）との噛み合わせ部位が変形していることが見付き、その影響精査に約 2 ヶ月を要したが、レンズとの組み合わせを有限要素法モデルで入念に評価したところ、光学性能（像のシャープさ）への影響は無視できるとわかったこと、で示されたように不具合の再評価による解決を重ねた結果、HSC が目指す世界最高性能に問題がないことが理解された

またこの年にはすばる望遠鏡側に比較的重大なトラブルが 2 件発生した。2011 年 7 月には望遠鏡主焦点で冷却液漏れ事故が発生し、搭載されていた **Suprime-Cam** の復旧には計画研究 A01 から多くのマンパワーをとられることとなった。加えて 2011 年度末には主焦点装置交換機構（TUE）が故障した。この TUE 機構は HSC の搭載・試験・運用に直接関係する望遠鏡の基本機能であり、2012 年 5 月に故障修理を完了したものの、以降も幾度か不具合が発生してこの時期に他の観測スケジュールの合間を縫って予定されていた HSC の試験観測スケジュールに多大な影響を及ぼすこととなった。

このように、不幸なトラブルが本研究の内外で発生したことも重なって工程の遅れは挽回できず、ファーストライトと初期観測の成果獲得は平成 24 年度の 8 月へ繰り延べとなったが、この間、取得した観測データの整約・解析をパイプライン化してより早く研究者に情報を提供すべく、データ解析ソフトウェアの整備に着手し科学観測開始の遅延を挽回することに万全を期した。

5. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ程度）

研究領域内での若手研究者育成への取組及び参画した若手研究者の研究終了後の動向等を記述してください。

計画研究 A01

- (1) 諸隈智貴 2007年4月に本領域専任研究員として採用されシャックハルトマンフィルタの製作に従事し、2010年8月に東京大学天文学教育研究センターに助教として採用された。
- (2) 内海洋輔 総合研究大学院大学において2012年3月に博士号を授与され、その後学振特別研究員を経て2013年1月より広島大学宇宙科学センター特任助教として採用された。

計画研究 A02

- (1) 内田智久 特任助教から高エネルギー加速器機構素粒子原子核研究所 助教へ転出した。
- (2) 藤森裕輝 博士課程中退後、明星電気株式会社勤務
- (3) 宮武広直 博士課程修了後日本学術振興会海外特別研究員（プリンストン大学）
- (4) 角野秀一 東京大学素粒子国際センター助教から首都大学東京理工学研究科准教授へ転出した。
- (5) 岩崎昌子 東京大学大学院理学系研究科講師から高エネルギー加速器研究機構准教授へ転出した。

計画研究 B01

- (1) 高橋龍一 専任研究員（後に特任助教）として採用されたが、研究を高く評価され弘前大学理学部物理学教室助教に転出した。
- (2) 新田大輔 専任研究員として採用され、東北大学大学院理学研究科 GCOE 助教に転出した。
- (3) 吉田直紀 助教から東京大学数物連携宇宙研究機構特任准教授を経て、東京大学大学院理学系研究科教授。
- (4) 西澤淳 2008年博士号取得後東京大学数物連携宇宙研究機構で研究員として、すばる望遠鏡の超広視野カメラ、及び多天体分光器プロジェクトに従事。
- (5) 奥村哲平 2008年博士号取得後 Institute for the Early Universe, Ewha Woman's University（ソウル）にて研究員を務めている。
- (6) 黒柳幸子 2010年博士号取得後東京大学宇宙線研究所研究員を経て、現在は同大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センターの研究員を務めている。
- (7) 白石希典 2012年博士号取得後日本学術振興会特別研究員として、名古屋大学大学院理学研究科に所属。他、研究グループには博士課程、D3に2名、D2に2名、D1に2名在籍しているが、全員、日本学術振興会特別研究員（DC）である。

計画研究 B02

- (1) 大倉悠貴 東北大学にて博士学生として研究計画に参加し、現在国立天文台研究員。
- (2) 杉山尚徳 東北大学にて博士学生として研究開発に参加。2012年10月からプリンストン大学ポストドク。

6. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班及び支援班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

総括班：領域の研究集会、国際研究集会を主催・共催することに必要な経費を充てた。また、本領域の参加者にとどまらず国立天文台ハワイ観測所にも協力を求めて米国、台湾など国際協力のパートナーの可能性を追求するため外国出張を行った。多岐にわたる領域のアクティビティを計画的・系統的に遂行するために研究計画全般の管理運営補助者を雇用した。

研究項目 A01：HSC の設計、開発、製造に主な費用を割いている。本カメラを搭載するためのすばる望遠鏡本体への取付条件及び望遠鏡の改修必要性の検討をすばる望遠鏡の主設計/製造業者である三菱電機(株)と推進した。また補正光学系の製作に向けては、大型高性能レンズ系の研磨/組立調整作業に実績のあるキャノン(株)と光学系の機能設計及びレンズ群を保持する鏡筒の基本設計を行ったほか、レンズ群のための大型硝材の製造を(株)オハラに、ファインセラミックス製新素材から成る鏡筒の製造を京セラ(株)に依頼した。その他 CCD を冷却するための真空デュワー、冷凍機、大型フォーカルプレーンシャッターなどの機械部品、フィルターや主鏡検査装置などの光学部品を製作した。旅費としては各製造業者との技術検討、検収のための出張や、HSC の技術的成果を発表するための海外研究会参加があげられる。また研究開発を推進するために研究員を各年度 2 ないし 3 名雇用している。

研究項目 A02：HSC のバックエンド部分にあたる CCD の読み出しエレクトロニクスとデータ解析ソフトウェアのための RCM ミドルウェアの開発、試作品製作の取り組んでおり、平成 19 年度以降そのためのサーバー、周辺機器及びソフトウェアを購入し環境整備を行った。また開発にあたっては学術研究支援員を雇用するとともに、米国の有力研究所・大学への出張を重ね、平成 22 年度にはテレビ会議システムを導入するなど国際協力による推進を追求している。また補正光学系においては鏡筒軽量化のためにファインセラミックス製新素材の試作品を製造し、大型硝材の研磨作業をキャノン(株)と契約するなど A01 との作業分担を行った。

研究項目 B01 及び B02：理論グループとして領域主催の研究会を支援するほか、関連分野の研究者の本領域研究に対する理解と賛同、積極的参加を求め、合わせて広く研究成果を発表するために多様な研究集会に参加していることから、研究費の多くを旅費にあてている。また若手研究者の雇用、育成にも同等の比重を置いている。物品費では主にシミュレーション用計算機システムと周辺機器ソフトウェアを整備し、数値計算、シミュレーションの結果表示能力や研究者間の通信連絡機能の充実なども行った。

7. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

ア) 本研究はすばる望遠鏡主焦点カメラの学術的成果を元に視野が一桁広い超広視野カメラを製作して、ダークマター・ダークエネルギーなど次世代の天文学の重要課題の観測的研究をリードすることを狙ったものである。

イ) 本研究計画の中核となる超広視野カメラの製作については、ハワイにおける地震や東日本大震災による工期遅れなどが発生し、さらにすばる望遠鏡に事故が発生したこともあり、試験観測開始が当初予定よりかなり遅れた。しかしながら、大型補正レンズ光学系、レンズを保持するセラミック製筒構造などチャレンジングな開発に加え、CCD 検出器と読み出し回路、検出器デューワー、冷凍機、シャッター機構、フィルター 交換機構、フィルター群の製作を完了し、外的要因を含む幾多の困難に見舞われながらも、それらを乗り越えて完成に至った。研究計画 A01 班の努力と偉業達成は賞賛に値する。

ウ) すばる望遠鏡への搭載に必要な望遠鏡筒頂部の改修については、本研究計画の学術的魅力により追加支援を得て別途手当することができた。これは、本研究グループのリーダーシップによるもので賞賛に値する。

エ) 学術的側面についても複数の国際研究会と国内研究会を開催して、広く検討を行った。国内外のダークエネルギー、ダークマターに関する第一線の研究者グループとの交流を深めながら、具体的な観測計画の検討を適切な形で進めた。観測データの解析ソフトウェアの開発も国際協力が進んでおり、関連していくつかの研究論文が出版された。ダークエネルギーの性質の観測的解明については、どこまで具体的に追求できそうなのかの検討がなされているが、これについては更なる検討が必要であろう。

オ) 具体的な運用の方針については、すばる望遠鏡戦略枠への提案がハワイ観測所およびすばる望遠鏡利用者コミュニティによる慎重な審議審査を経て承認された。今後ハワイ観測所との一層の緊密な協議を経て観測実施することが期待される。

カ) 本研究計画の進展とともに、2010 年代にすばる望遠鏡の超広視野機能を一層強化することで、世界の光赤外線地上望遠鏡の中でユニークな立場を確立し、次世代超大型望遠鏡時代に備えるという戦略がコミュニティに了解され支持を受けるに至っている。国際的にも本研究は注目度が高く、完成後の観測計画についても国際チームでの綿密な検討がなされている。順調に科学観測を立ち上げ、成果が挙がることを期待している。

8. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目毎または計画研究毎に整理する]

（3 ページ程度）

特定領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

計画研究 A01

計画研究 A01 では、すばる望遠鏡という、8-10m 級望遠鏡の中では群を抜く機械的堅牢さと精密制御性能を有する我が国の観測天文学の基盤設備の特長を十二分に生かし、すばる以外の既存の諸外国巨大望遠鏡では実現不可能な新主焦点カメラ HSC（現行カメラの 10 倍以上の視野）を開発・製作した。

本領域初年度から、システム検討、光検出センサー（完全空乏型 CCD）素子の調達計画の具体化、116 個のセンサーを配列する真空冷却容器の設計、補正光学系レンズの設計製作、レンズ筒に最適なファインセラミックス新素材の開発製作、望遠鏡に搭載し精密に機械制御するための主焦点枠体の製作を、関連企業の積極的な取り組みを経て、平成 18—23 年度で順次遂行し完了した。

その後、HSC の開発製作とすばる望遠鏡への搭載・試験観測は、HSC 自身の調整評価ミスによる遅れと、すばる望遠鏡側で発生した不幸なトラブルが重なって約 1 年の工程の遅れが発生したが、望遠鏡に搭載して星の光を受ける『ファーストライト』を平成 24 年度の 8 月に実現した。このファーストライトはメディアにも取り上げられ、Nature などでも報道された。

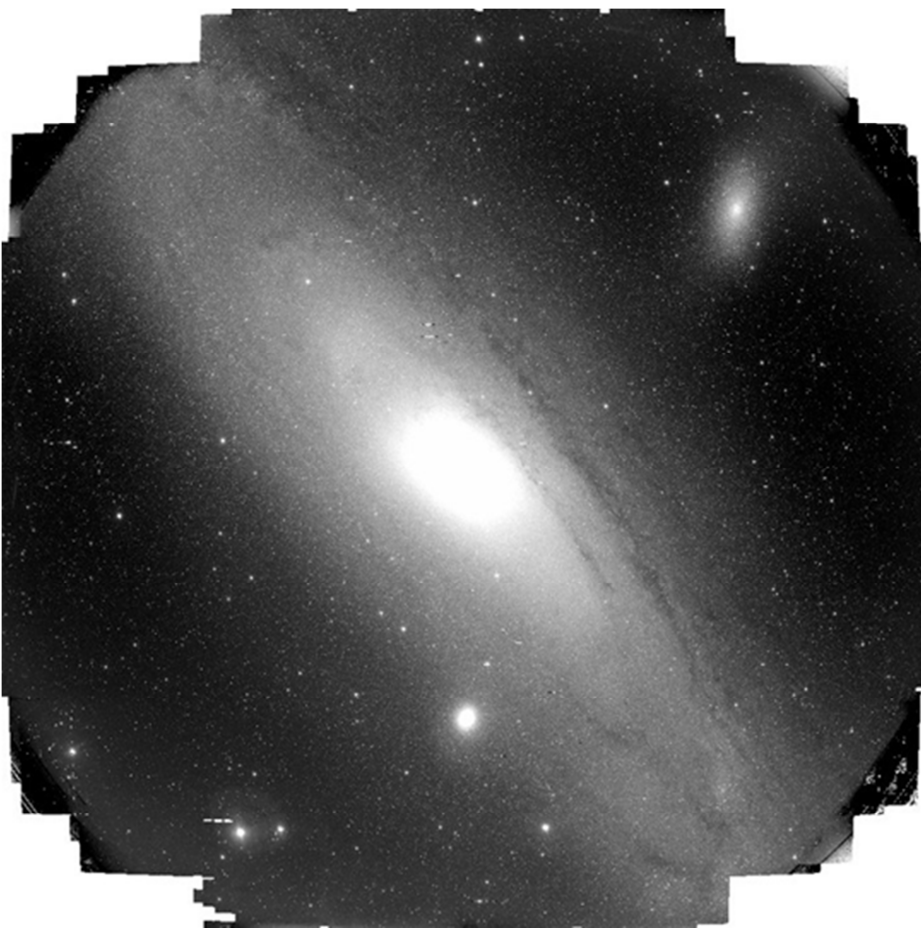
ファーストライト後、HSC の性能評価のための試験観測が平成 25 年 1 月に行われた。ここで初めてカメラの視野全面を用いた画像が取得され、詳細な解析で画像の質を検証した。結果は、要求仕様を完全に満足するものであり、8-10m 級の世界第一線望遠鏡では他に例を見ない 1.5 度角という広視野の全面にわたって、結像性能 0.48 秒角という抜群のシャープさが立証された。

計画研究 A02

- 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 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 枚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、現地における波面測定結果、仕様を満たす光学性能を有することが確認された。

- 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



性能試験観測で得られたアンドロメダ銀河 M31 の画像。拡大すると 230 万年かなたの M31 の星々が一個々々分離して見分けられる

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SiliconTCP/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。

- 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。
- 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。
- 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4000万の遠方銀河(最大の赤方偏移は $z=1.5$)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。

計画研究 B01

すばる望遠鏡による超広域銀河探査によって得られる銀河の空間分布から、宇宙のエネルギー密度の大部分を占めているダークエネルギーに関する情報がどれだけ詳細に得られるのかを理論的に調べ、実際の観測へ向けた準備を行うことを目的として、研究を推敲した。宇宙の膨張速度を赤方偏移ごとに求めることができれば、そこでの膨張を支配しているダークエネルギー自身の時間進化を決定することができる。

具体的には、バリオン音響振動と呼ばれる物理過程によって特定のスケールの構造が選択的に多く形成されるという現象や、重力レンズ効果、さらには宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎに構造の進化が及ぼす影響を用いることで、宇宙の膨張速度、ひいてはダークエネルギーのエネルギー密度の時間進化の情報を得ることを目指した。現実の観測データが手に入る前に、数値実験によって理想的な銀河分布を再現し、ダークエネルギーの情報を最も効率よく引き出す手法を見つけ出すことに成功した。

次に、個々の成果についてまとめる。

- 1) まず、数値シミュレーションを行なう準備として、その初期条件を詳細に検討した。続いて、大規模数値シミュレーションの実行を開始し、本科研費によって購入したPCクラスターを占有することで、世界最大規模の数値シミュレーションを実行した。結果、1万個を超える世界最大の銀河分布サンプルを得ることができた。
- 2) 上記、シミュレーションの解析を進める過程で、数値計算によって求めた、密度分布の相関関数の時間進化が、線形成長から期待されるものと大きくずれる現象を見つけた。線形の次の次数の密度揺らぎの成長を考慮することで、この奇妙な揺らぎの成長が、シミュレーションの箱が有限であることに起因していることを突き止めた。この成長は、これまで世界中で行われていたすべての数値シミュレーションに共通に見られる問題点であることもわかった。この問題の対処法も見つけ出すことができ、シミュレーションの精度を上げることに貢献できた。
- 3) 次に、大規模シミュレーションで得られた銀河サンプルをもちいて、その計算ボックス中の光の伝播を解くことで、遠方の銀河に生じる重力レンズ効果を見積もる研究を遂行した。下図を参照されたい。ここでは1000回光を飛ばしている。この研究によって、重力レンズ効果によるダークエネルギーの推定に対する将来の観測誤差を推定でき、また、最適な観測計画を立案できる。これら重力レンズのデータは、web上で公開を行なった。
- 4) さらに、大規模銀河サンプルを用いて、観測結果とモデルを比較する際に重要となる、誤差の評価を与え

てくれる共分散行列について調べた。特に、揺らぎの統計的性質がガウス分布からずれる効果について詳細に検討を行った。また、実際の観測を模倣するために、先の遠方の銀河に生じる重力レンズ効果を用いて、その共分散行列を計算した。

- 5) また、数値シミュレーションの結果から、密度分布の空間揺らぎのパワースペクトル（フーリエ成分の振幅の2乗平均）を計算し、それを用いて、ダークエネルギーなど、宇宙の進化を決定づけるパラメータ、いわゆる宇宙論パラメータを推定する際の、非ガウス誤差の影響を調べた。その結果、フィットする宇宙パラメータが1つのときは、非ガウス成分により誤差が4倍ほど大きくなるが、複数個の場合は非ガウス成分の影響は十分小さいことを明らかにした。
- 6) 数値実験だけでなく、解析的に取り扱える、非線形摂動論を大幅に拡張して、実際の観測可能量を予言するための統合摂動論の基礎的な土台を完成させた。この新しい理論的方法を数値シミュレーションと比較して、赤方偏移空間変形効果、ハローバイアスの効果などの非線形領域の振る舞いの理解を大きく広げた。
- 7) 将来観測によって、ダークエネルギーの情報をどれだけ取り出せるか、その具体的な例として、ダークエネルギーの指標となるバリオン音響振動スケールでの大規模構造シミュレーションの精度に対する評価を、解析的手法と比較し検定を行なった。
- 8) その他、ダークエネルギーの理論的研究として、クインテッセンスモデルという、特殊なタイプのダークエネルギーが支配的な宇宙での構造形成の研究や、ゴーストダークマターというダークエネルギーとしても働く可能性のあるモデル、崩壊するダークマターがダークエネルギーが支配する宇宙に存在する場合などについての構造形成の研究を行い、モデルの検定を行なった。

計画研究 B02

- 1) 従来の弱い重力レンズ解析は背景銀河形状の四重極モーメントの変化という一部の情報しか用いておらず、1平方分程度の領域での平均的な重力場の情報しか得られない。我々は背景銀河形状の高次モーメントを組織的に解析する方法を開発し、それを用いてより小さな領域での重力場の情報をえることができた。実際の銀河団データに適用し、従来の方法では検出できなかった中心部の微細構造を分離できることを示した。
- 2) 宇宙シア解析には従来の弱い重力レンズの解析法では精度が不十分であることが知られている。そこで我々は高精度の新たな解析法として背景銀河の形状測定に際してその形状に合わせた楕円形の窓関数を使う E-HOLICs と呼ぶ方法を開発した。実際の銀河団の観測データに適用して、従来の解析法では検出できなかった銀河団中心部のダークマターの部分構造を検出することができた。
- 3) 冷たいダークマター(CDM)による構造形成シナリオで予言される銀河や銀河団を取り囲むダークマターのメインハロー中に存在する多数のダークマター部分はローを直接観測するため、髪の毛座銀河団を弱い重力レンズをつかって解析した。その結果、メインハローの質量の1000分の1から10分の1程度の質量をもった30個程度の部分はローを検出することができ、それから世界ではじめて質量関数を直接観測で構成した。その結果、CDMに基づく構造形成論と矛盾しない結果を得た。
- 4) あるクェーサーサンプル中で強い重力レンズによってクェーサーの多重像が観測される確率は宇宙論パラメータ、特にダークエネルギーに強く依存していることが知られているが、我々は Hyper Suprime Cam の観測を念頭に置いて、高赤方偏移のクェーサーサンプルをつくることによってレンズを引き起こす銀河の個数分布の時間変化に強い制限を与えられることを示した。

9. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5ページ程度）

特定領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

HSC を用いた本格観測は開始されていないので、論文として発表されたものは、以下の3種類に分類される：

- 1) HSC の開発に関する装置論文
- 2) 現存のすばる主焦点カメラを用いたパイロット・サーベイ観測
- 3) 観測データを想定して理論モデルと比較するシミュレーション研究、より一般的な宇宙の加速膨張や重力理論の研究、
である。

主な論文)

総括班：広視野深宇宙探査によるダークエネルギーの研究の総括

S.Miyazaki, Y.Komiyama, H.Nakaya, Y.Doï et al.,

HyperSuprime: project overview

Proceedings of SPIE 2006, Volume 6269, pp.6269OB

T.Hamana, S.Miyazaki, N.Kashikawa, R.Ellis, R.Massey, et al.

Subaru Weak Lensing Survey II: Multi Object Spectroscopy and Cluster Masses

PASJ 2009, Volume 61, 833-872

計画研究 A01：重力レンズ効果を用いたダークマター探査

S.Miyazaki, T.Hamana et al.

A Subaru Weak-Lensing Survey I. Cluster Candidates and Spectroscopic Verification

Astrophysical Journal 2007, Volume 669, P714-728

Y.Komiyama, M.Doï, H.Furusawa et al.

Wide-Field Survey Around Local Group Dwarf Spheroidal Galaxy Leo II: Spatial Distribution of Stellar Content

The Astronomical Journal 2007, Volume 134, P835-845

T.Hamana, S.Miyazaki

Note on Artificial Deformation in Object Shapes due to Pixelization

PASJ 2008, Volume 60, P1363-1370

M.M.Kasliwai, R.Massey, R.Ellis, S.Miyazaki, J.Rhodes

A Comparison of Weak-Lensing Measurements from Ground and Space Based Facilities

Astrophysical Journal 2008, Volume 684, P34-45

A.B.Newman, R.Ellis, S.Miyazaki et al.

The Distribution of Dark Matter over Three Decades in Radius in the Lensing Cluster Abell 611
Astrophysical Journal 2009, Volume 706, P1078-1094

計画研究 A02 : 重力レンズ効果を用いたダークエネルギーの研究

K.Yamamoto, D.Parkinson, Y.Suto et al.

Optimizing Future Imaging Survey of Galaxies to Confront Dark Energy and Modeified Gravity Models
Physical Review D 2007, Volume 76, issue 2

H.Fujimori, H.Aihara, S.Mineo et al.

Back-End Readout Electronics for Hyper Suprime-Cam

IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record 2010, N14-9, P347-351

S.Lee, R.Itoh, N.Katayama, H.Furusawa, H.Aihara, S.Mineo

A common real time framework for SuperKEKB and Hyper Suprime-Cam at Subaru telescope
Journal of Physics:Conference Series 2010, Volume 219, 022012

計画研究 B01 : 銀河分布を用いたダークエネルギーの研究

A.Nishizawa, E.Komatsu, N.Yoshida, N.Sugiyama et al.

Cosmic Microwave Background-Weak Lensing Correlation: Analytical and Numerical Study of
Nonlinearity and Implications for Dark Energy
Astrophysical Journal Letters 2008, Volume 676, L93-96

R.Takahashi, N.Yoshida, T.Matsubara, N.Sugiyama et al.

Simulations of Baryon Acoustic Oscillations II. Covariance Matrix of the Matter Power Spectrum
Astrophysical Journal 2009, Volume 700, P479-490

M.Sato, T.Hamana, R.Takahashi, N.Sugiyama et al.

Simulations of Wide-Field Weak Lensing Surveys I. Basic Statistics and Non-Gaussian Effects
Astrophysical Journal 2009, Volume 701, No.2

R.Takahashi, N.Yoshida, M.Takada, T.Matsubara, N.Sugiyama et al.

Non-Gaussian Error Contribution to Likelihood Analysis of the Matter Power Spectrum
Astrophysical Journal 2011, Volume 726, No.1, article id 7, 10pp

H.Tashio, N.Sugiyama

Ionized Buble Number Count as a Probe of Non-Gaussianity

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2012, Volume 420, P441-446

計画研究 B02 : 重力レンズ効果による暗黒物質分布と宇宙の構造形成史の解明

M.Takada, E.Komatsu, T.Futamase

Cosmology with High-Redshift Galaxy Survey: Neutrino Mass and Inflation

Physical Review D 2006, Volume 73, Issue 8

Y.Okura, K.Umetsu, T.Futamase

A New Measure for Weak Lensing Flexion

Astrophysical Journal 2007, Volume 660, No.2

M.Takada,

Can a Galaxy Redshift Survey Measure Dark Energy Clustering?

Physical Review D 2007, Volume 74, issue 4

Y.Okura, T.Futamase

A New Method for Measuring Weak Lensing Shear using Higher-Order Spin-2 HOLICs

Astrophysical Journal 2009, Volume 699, P143-149

N.Okabe, Y.Okura, T.Futamase

Weak Lensing Mass Measurements of Substructures in COMA Cluster with Subaru/Suprime-Cam

Astrophysical Journal 2010, Volume 713, 291-3-3

D.Carollo, T.Beers, M.Chiba, J.E.Norris et al.

Structure and Kinematics of the Stellar Halos and Thick Disks of the Milky Way based on Calibration Stars from Sloan Digital Sky Survey DR7

Astrophysical Journal 2010, Volume 712, P692-727

Y.Okura, T.Futamase

Elliptically Weighted HOLICs for Weak-Lensing Shear Measurement, I : Definitions and Isotropic Ppoint-Spread Function Correction

Astrophysical Journal 2011, Volume 730, P9-21

K.Hayashi, M.Chiba,

Probing Non-Spherical Dark Halos in the Galactic Dwarf Galaxies

Astrophysical Journal 2012, Volume 755, P145-157

公募研究 A01 : 大口径レンズに適応できる反射防止膜の開発

T.Yabe, T.Ohkubo, S.Uchida, K.Yoshida et al

High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel Lens and chromium codoped laser medium

Physical Letters 2007, Volume 90, issue 26

公募研究 A02 : 重力レンズ効果における非一応時空のポスト・フリードマン的効果とダークエネルギー

H.Arakida, M.Kasai

Effect of the cosmological constant on the bending of light and the cosmological lens equation

Physical Review D 2012, Volume 85, 023006

公募研究 A02 : 我々の凹凸宇宙の観測的性質

H.Asada

Gravitational time delay of light for various models of modified gravity

Physical Letters B 2008, Volume 661, P78-81

公募研究 B01 : 宇宙再イオン化時代の銀河探査

M.Ouchi, B.Mobasher, K.Shimasaku et al.

Large Area Survey for $z = 7$ Galaxies in SDF and GOODS-N: Implications for Galaxy Formation and Cosmic Reionization

Astrophysical Journal 2009, Volume 706, P1136-1151

T.Shibuya, N.Kashikawa, K.Ota, K.Shimasaku et al.

The First Systematic Survey for Ly alpha Emitters at $z = 7.3$ with Red-sensitive Subaru/Suprime-Cam

Astrophysical Journal 2012, Volume 752, P114

公募研究 B01 : すばる FMOS によるバリオン振動探査計画の検討

公募研究 B01 : すばる FMOS の大規模分光サーベイによるバリオン振動探査

公募研究 B01 : すばる FMOS を用いたバリオン振動探査によるダークエネルギーの研究

I.G.Roseboom, A.Bunker, T.Totani et al.

FMOS near-IR spectroscopy of Herschel selected galaxies: star formation rates, metallicity and dust attenuation at $z \sim 1$

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2012, Volume 426, P1782-1792

公募研究 B01 : ガンマ線バーストによる距離指標の研究

Y.Kodama, D.Yonetoku, T.Murakami, T.Nakamura et al.

Gamma-ray bursts in $1.8 < z < 5.6$ suggest that the time variation of the dark energy is small

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2008, Volume 391, L1-4

R.Tsutsui, T.Nakamura, D.Yonetoku et al.

Constraints on w_0 and w_a of dark energy from high-redshift gamma-ray bursts

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2009, Volume 394, L31-35

公募研究 B01 : 大規模構造を用いた重力模型のテスト

T.Nishimichi, H.Ohmuro, K.Yamamoto et al.

Characteristic Scales of Baryon Acoustic Oscillations from Perturbation Theory: Nonlinearity and Redshift-Space Distortion Effects

公募研究 A01: 広帯域反射防止膜の基礎研究

T.Uchiyama, S.Miyoki, S.Terada, M.Ohashi et al.

Reduction of Thermal Fluctuations in a Cryogenic Laser Interferometric Gravitational Wave Detector
Physical Review Letters 2012, Volume 108, 141101

公募研究 A02: 超新星グリズムサーベイによる超新星発生率の研究

N.Yasuda, M.Fukugita

Luminosity Functions of type Ia Supernovae and their Host Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey
The Astronomical Journal 2009, Volume 139, P39-52

公募研究 A02: 宇宙定数のテスト

T.Chiba, M.Shiino, M.Yamaguchi

Slow-roll Extended Quintessence
Physical Review D 2010, Volume 81, 083530

公募研究 B01: 超新星母銀河の狭帯域撮像

公募研究 B01: 超新星の多様性と母銀河の星生成史

R.Kessler, A.C.Becker, D.Cinabro, M.Doi et al.

First-Year Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Results: Hubble Diagram and Cosmological Parameters
The Astrophysical Journal Supplement 2009, Volume 185, P32-84

T.Morokuma, K.Tokita, C.Lidman, M.Doi et al.

Subaru FOCAS Spectroscopic Observations of High-Redshift Supernovae
Publication of Astronomical Society of Japan 2009, Volume 62, P19-37

公募研究 B01: 高赤方偏移の Ia 型超新星の進化とダークエネルギーの状態方程式

公募研究 B01: Ia 型超新星の多様性の起源とダークエネルギーの状態方程式の探求

O.Krause, M.Tanaka, T.Usuda, K.Nomoto et al.

Tycho Brahe's 1572 Supernova as a Standard Type Ia as Revealed by its Light-echo Spectrum
Nature 2008, Volume 456, P617-619

M.Yamanaka, K.S.Kawabata, K.Nomoto et al.

Early Phase Observations of Extremely Luminous Type Ia Supernova 2009dc
Astrophysical Journal 2009, Volume 707, L118-122

公募研究 A01 : すばる広視野サーベイ時代に向けての宇宙最遠方クエーサーの選別法の確立

M.Imanishi, K.Ichikawa, T.Takeuchi et al.

Infrared 3-4 micron Spectroscopy of Nearby PG QSOs and AGN-nuclear Starburst Connections in High-Luminosity AGN Populations

Publication of Astronomical Society of Japan 2011, Volume 63, S447-456

公募研究 A01 : 大規模銀河サンプルの巨大データベースによる効率的な管理と情報取得方法の確立

J.Furusawa, T.Takada et al.

The Mass-Dependent Clustering History of K-Selected Galaxies at $z < 4$ in the SXDS/UDS Field

Astrophysical Journal 2011, Volume 727, article id 111

公募研究 A02 : ディープサーバイデータを用いた移動天体の探査

H.Furusawa, N.Yasuda, Y.Okura F.Nakata et al.

A Prototype of Hyper-Suprime-Cam Data Analysis System

Proceedings of the SPIE 2010, Volume 7740, article 77402I

公募研究 A02 : 重力レンズ効果における尤度関数の精密決定

M.Sato, K.Ichiki, T.T.Takeuchi

Precise Estimation of Cosmological Parameters Using a More Accurate Likelihood Function

Physical Review Letters 2010, Volume 105, issue 25

公募研究 A02 : HSC データ解析のための並列パイプラインの構築

H.Furusawa, N.Katayama et al.

First On-Site Data Analysis System for Subaru/Suprime-Cam

Publication of Astronomical Society of Japan 2011, Volume 63 S585-603

ホームページ

<http://hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/TokuteiDE>

平成 19 年 4 月開設 アクセス数 13,125 回

http://www.naoj.org/Projects/HSC/j_index.html

平成 23 年 8 月開設 アクセス数 7,642 回

リンクの「開発者ブログ」アクセス数 9,243 回

主催シンポジウム

平成 21 年 3 月 17 日 天文・宇宙 一般向け講演会「宇宙論研究の最前線」

「アインシュタイン博士の物理と宇宙」 浅田秀樹

「すばる望遠鏡で探る宇宙」 唐牛宏

10. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ程度）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

1) ダークマター・ダークエネルギー研究に関して

本領域研究が主催あるいは共催した国際会議・研究集会や HSC 製造のための国際共同研究契約などを通じて、ダークマター、ダークエネルギーに関する第一線の研究者グループとの交流を深め、HSC の製造意義その他本領域研究の目指すところについて国際的認知度を上げることができた。観測データを生産するには至らなかったが、データ解析パイプラインの開発が国際協力が進み、また理論研究においては数値実験によって理想的な銀河分布を再現してダークエネルギーの情報を最も効率よく引き出す手法を見つけ出すことに成功した論文が世界的な注目を集めた。

こうした国際的な浸透と HSC の極めて高い性能への期待から、本領域研究の次の世代に計画されている LSST や Euclid（それぞれ米の専用地上望遠鏡と欧の専用宇宙望遠鏡でどちらも 1000 億円規模の計画）が、本領域研究との協働、あるいは役割分担の模索を開始していることから、20-30 年スケールでの当該分野の展望に早くも影響を与え始めている、と云って差し支えないであろう。

2) 技術開発分野での貢献

本領域研究の研究項目 A では、日本の誇る最先端の産業技術を数多く取り込み、それらをより一層先鋭化して適用することで、世界にかつて存在しなかった広視野高結像性能の撮像装置 HSC の完成を実現した。こうした努力はそれぞれのメーカーで今後の産業技術としての展開にインパクトがあるだろうことは想像に難くない。具体的には、大型で超大非球面量の光学素子の開発（キヤノン：液晶露光装置や半導体露光装置への応用）大型精密ファインセラミックスの成形・製造加工（京セラ：宇宙利用等の軽量堅牢構造物）、高性能完全空亡型 CCD（浜松ホトニクス：次世代 CCD の開発）、大型精密駆動駆体（三菱電機：宇宙利用等の慣性制御、精密駆動）、超大型スパッタリング成膜装置の開発（朝日分光： $\phi 600\text{mm}$ 超の大型高性能光学薄膜）などがあげられるが、いずれも本領域研究が挑戦的な先端技術開発に貢献した賜物である。