

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24244015

研究課題名(和文) すばる望遠鏡による新近赤外線装置の18バンド多色撮像で極める銀河形成の絶頂期

研究課題名(英文) The peak epoch of galaxy formation as revealed by Subaru NIR imaging with 18 filters

研究代表者

児玉 忠恭 (Kodama, Tadayuki)

国立天文台・ハワイ観測所・准教授

研究者番号：80343101

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,950,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙では今から約百億年前に銀河形成活動が最盛期を迎えたとされ、銀河の形成・進化を解き明かす上で最も重要な時代である。本課題では新しい近赤外カメラSWIMSに大量の中間帯域及び狭帯域フィルターを作成し、形成途上の銀河からの輝線やスペクトルの段差を捕えることにより、この最盛期における星形成活動と質量集積過程の時間変化を解き明かすための超多色撮像観測を可能にした。そして期待される各フィルターでの感度を元に、大規模なサーベイ観測の視野と深さの最適化を行った。またこの実施に備えて、すばるやアルマ望遠鏡を用いて銀河形成最盛期の銀河について様々な観測的研究を実施し、26本の主要査読論文として成果発表した。

研究成果の概要(英文)：The galaxy formation is peaked at around 10 Billion years ago in the Universe, and thus it is the critical epoch for studies of galaxy formation and evolution. We make a series of narrow-band and medium-band filters on a new NIR camera SWIMS in order to conduct a large super multi-band imaging survey by capturing nebular emission lines from star forming galaxies and spectral break feature from older galaxies. This enables us to explore the histories of star formation and mass assembly and their environmental dependence. We have optimized the survey design based on the sensitivities of each filter. In preparation for the above mentioned large survey, we have conducted various observational projects with Subaru and ALMA telescopes targeting the galaxies in this critical peak epoch of their formation. These results are published in 26 papers in major refereed journals.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河形成 銀河進化 銀河団 近赤外線 すばる望遠鏡 アルマ望遠鏡

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙年齢が 20 億年から 60 億年の時代 ( $1 < \text{赤方偏移}[z] < 3$ ) は、宇宙における単位体積当たりの星形成密度や活動銀河核の出現個数密度が最大になる時期であり、今日の銀河が最も激しく生まれ進化した時代であることが、これまでの観測から分かっている。従って、銀河宇宙の歴史を解き明かすには、特にこの時代に着目する必要がある。この時代の銀河スペクトルは星種族の情報を豊富に持つ静止座標の可視光域が、全て近赤外に偏移してしまつたため、近赤外線装置による観測が必須となる。しかし大望遠鏡の近赤外装置は視野が限られ、赤外線は夜空ノイズも高いため、効率のよい観測は困難であった。しかし近年はすばる望遠鏡を始め、広視野の近赤外装置が 8-10m 望遠鏡に相次いで開発されるようになり、銀河の内部構造を分解する面分光装置とも相まって、この銀河形成絶頂期の研究が世界中で大きな潮流となり、激しく進展している最中である。すばるは従来の近赤外広視野装置 MOIRCS を世界に先駆けて装着し、当該研究を先導してきた。実際研究代表者らの研究チームは、広帯域多色フィルターによる原始銀河団領域の観測により、 $2 < z < 3$  の時代に大質量銀河が急激に成長して出来上がってくる実態を明らかにした。また過去の科研費で 5 枚の狭帯域フィルターを作成し、特に  $1.5 < z < 2.5$  の原始銀河団中の形成途上銀河を炙り出し、遠方宇宙の高密度領域で銀河形成活動がどのように加速されているかを調べる「MAHALO すばるプロジェクト」を推進中である。これらの先行研究は、同じ時代の無バイアスな一般フィールドを狙う本提案とは趣向が異なるが、その手法はかなり共通しておりパイロット的な意味合いを強く持っている。

この時代の銀河研究にとって最も重要なことは、(1)ある特定の時代(赤方偏移)の範囲の銀河をいかに漏れなくかつ正確にサンプルできるかということと、(2)それらの銀河について

如何に正確な物理量(星形成率や年齢など)を引き出せるか、という2点に集約されると言っている。 (1)については、分光によって銀河までの距離を正確に測ることが最善であるが、特に星形成活動を終えた古い銀河や、ダストによる光の吸収を強く受けた星形成バースト銀河については、8-10m級の望遠鏡でも暗すぎるものが大半なため、困難を極める。さらにそもそも大量な前景背景銀河の中から分光ターゲットを最初にどう無バイアスに選ぶのかという大きな問題がある。多色測光によってスペクトルの形から距離を求める方法(phot-z)が良く用いられるが、ダスト吸収の強い銀河や、スペクトルの形がのっぺりした星形成銀河については顕著に精度が悪くなってしまうという問題があった。

## 2. 研究の目的

そこで本課題では、次のような方法で上記(1)の難題を克服する。[A] 星形成活動を行っている銀河については、最も優良な星形成活動の指標である  $H\alpha$  輝線を狭帯域フィルターで捕えることによって、ある輝線強度すなわち星形成率までの銀河を、視野内で隈なくほぼ完全に選択することができる。さらにペアの狭帯域フィルターでの観測により、同じ銀河から  $H\beta$  輝線が同時に検出された場合には、他の赤方偏移にある他の輝線からの混同の可能性は完全に排除することができる。[B] 星形成が終了している銀河については、多数の中間帯域フィルターでスペクトル・エネルギー分布(SED)の形を密にサンプルすることによって、赤方偏移に固有なスペクトル・ブレイクの位置を正確に求め、赤方偏移(距離)を正確に求めることができる。さらに K バンドの明るさとスペクトルの形とから個々の銀河の星質量も正確に求めることができる。このように[A]と[B]を組み合わせることによって、星形成を行なっている銀河とそうでない銀河の両方について、ある特定の時代(赤方偏移)にいる銀河を、ある星形成率および星質量の限界まで漏れなくかつ

偏りなく選出することが可能となる。次に(2)の問題についても、多数の中間帯域フィルターによって、SEDの全体の形や、年齢に敏感なスペクトル・ブレイクの強さを精密に測定できるため、銀河を構成する星の平均年齢をこれまでにない高い精度で求めることができようになる。また、狭帯域ペアフィルターでの観測により、明るい天体については  $H\alpha$  と  $H\beta$  両方の強度が求まるので、その比からダスト吸収量を正確に測定することができるため、吸収量を正確に補正した精度の高い星形成率を導出することができる。このように本課題によって当該分野での革新的な発展が期待される。

### 3. 研究の方法

各時代の星形成銀河の輝線を捕えるための狭帯域フィルター6枚と、一般銀河のスペクトル・ブレイクを捕えるための中間帯域フィルター8枚を、設計および発注して製作する。東大天文学教育研究センターが開発している新近赤外装置 SWIMS に実装し、装置が完成次第にハワイ観測所に移送して試験観測を行う。並行して、すばる望遠鏡の観測時間を獲得し、探査計画のパイロット観測を実行するために、観測提案の科学および技術的な検討を行う。このため専属の研究員を3年間雇用して進める。またこれらの活動と並行して、本課題に密接に関連する、様々なすばるや ALMA の観測プロジェクトを立案して提案し、時間を獲得して研究を進め、装置が出来上がり次第、世界をリードして研究が進められるように成果を継続して上げる。

### 4. 研究成果

最初の二年間で SWIMS 用の中間帯域フィルターを6枚と狭帯域フィルター7枚を作成した。これらは、銀河形成活動が最盛期を迎える時代の銀河を極力無バイアスに取り出すために大変有用なフィルターであり、本課題の遂行のために必須のものである。前者の中間帯域フィルターは、銀河のスペクトルエネルギー分

布の密なサンプリングにより、距離(赤方偏移)を精度よく求めるために用い、後者の狭帯域フィルターは、ある特定の赤方偏移範囲の星形成銀河から出る輝線を捕らえるためのフィルターである。特に狭帯域フィルターは水素の輝線( $H\alpha$ )と酸素の輝線( $[OIII]$ )とがペアで検出できるように工夫されており、2つの輝線が両方検出されたなら、分光確認をせずとも他の輝線の紛れ込みがなく、ターゲット銀河を確実に選択できるユニークな特長を持っている。また両者の輝線の強度比からは、銀河の星形成領域のガスの電離状態も調べることができる。これらの多くのフィルターによって、前人未到の系統的な超多色遠方銀河サーベイを行う計画である。これらの本格的な観測に備えて密接に関連する最新の研究情報を仕入れるために、国内外の複数の研究会に出席した。この新しい独創的な探査計画を紹介する口頭講演も多く行った。

その後は、作成した中間帯域及び狭帯域フィルターを用いた SWIMS-18 サーベイの具体的な策定を、本科研費で雇用した研究員と共に行った。まずこのフィルターセットを用いた場合に、銀河の距離測定の精度がどれほど向上し、過去の研究に対してどれほど優位性が期待できるかの見積もりを、その結果、銀河スペクトルの特徴的な輪郭(ブレイク)が中間帯域フィルター群の中に赤方偏移してくる距離(時代)の銀河に対して、距離の推定精度が有意に改善することが分かった。次にそれぞれのフィルターにおいて見積もられる感度予想と、これまでの先行研究から得られている遠方銀河の星質量関数をより暗い側とより遠方宇宙に外挿したものとから、総観測時間を決めた時に最も多くの銀河を観測できるように、各フィルターでの積分時間と、観測する領域面積との組み合わせの最適化のシミュレーションを行った。また、銀河形成・進化モデルやこれまでの観測経験値などを用いて、質量の関数としての銀河団の発見期待個数やその時間

進化の見積もり、近傍の銀河団との対応関係づけなどを行った。これらのシミュレーションによって、観測デザインを具体化することができたことが最も大きな進捗であった。また、本課題の中間帯域フィルターサーベイ部分が密接に関連するプロジェクトである、マゼラン望遠鏡の ZFOURGE プロジェクトとの連携を図るため、その主要メンバーである研究者を招聘し、これまでの経験と実績から、どのように

SWIMS-18 でサーベイを拡張していくのが最も効果的なサイエンスに繋がるかを議論した。また、狭帯域フィルターサーベイに関しては、本課題の前身であるマハロすばるプロジェクトとそこから波及したプロジェクトを引き続き推進し、SWIMS-18 サーベイに直接つながる、遠方星形成銀河の物理的性質について知見を深めた。これらの SWIMS-18 サーベイのシミュレーション結果や関連する科学的成果について、国内外の多くの研究会で口頭発表の機会を獲得して報告し、SWIMS-18 サーベイ計画を広く知らしめた。

これらと並行して、本課題と密接に関連する観測プロジェクトを多数並行して走らせ、すばる、アルマ、JCMT、VLT、ジェミニ望遠鏡などの競争的な観測時間を獲得して研究を進めた。これらにより、本課題が狙う銀河形成の最盛期の宇宙に置いて、銀河がガスをいかに消費し、星を作り、そして終えて行ったのかについて様々な知見を得ることに成功し、本課題の研究期間である5年間を通して、研究代表者が密接に関わった査読付き主要論文を26件出版した。国際研究集会では研究代表者自身が17件口頭発表をし、そのうち7件は招待講演であった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 26 件)

(主な査読論文のみ記述)

① Hayashi, M., Kodama, T., Tanaka, I., 他5名, 2016, ApJ, 826, L28, “Enhanced

Star Formation of Less Massive Galaxies in a Proto-Cluster at  $z=2.5$ ”

DOI: 10.3847/2041-8213/aa71ad

② Suzuki, T. L., Kodama, T., 他 11 名, 2016, MNRAS, 462, 181, “[OIII] emission line as a tracer of star-forming galaxies at high redshifts: Comparison between H-alpha and [OIII] emitters at  $z=2.23$  in HiZELS”

DOI: 10.1093/mnras/stw1655

③ Koyama, Y., Kodama, T., Hayashi, M., 8 authors, 2015, MNRAS, 453, 879–892, “Predicting dust extinction properties of star-forming galaxies from H-alpha/UV ratio”

DOI: 10.1093/mnras/stv1599

④ Suzuki, L. T., Kodama, T., Tadaki, K., Hayashi, M., Koyama, Y., Tanaka, I., 他3名, 2015, ApJ, 806, 208, “Galaxy formation at  $z>3$  revealed by narrow-band selected [OIII] Emission Line Galaxies”

DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/208

⑤ Shimakawa, R., Kodama, T., Steidel, C. C., Tadaki, K., Tanaka, I., Strom, A. L., Hayashi, M., 他3名, 2015, MNRAS, 451, 1284–1289, “Correlation between star formation activity and electron density of ionized gas at  $z=2.5$ ”

DOI: 10.1093/mnras/stv915

⑥ Shimakawa, R., Kodama, T., Tadaki, K., Hayashi, M., Koyama, Y., Tanaka, I., 2015, MNRAS, 448, 666–680, “An early phase of environmental effects on galaxy properties unveiled by near-infrared spectroscopy of protocluster galaxies at  $z>2$ ”

DOI: 10.1093/mnras/stv051

⑦ Koyama, Y., Kodama, T., Tadaki, K., Hayashi, M., Tanaka, I., Shimakawa, R., 2014, ApJ, 789, 18, “The environmental

impacts on the star formation main sequence: a H-alpha study of the newly discovered rich cluster at  $z=1.52$ ”  
DOI: 10.1088/0004-637X/789/1/18

⑧ Shimakawa, R., **Kodama, T.**, Tadaki, K., Tanaka, I., Hayashi, M., Koyama, Y., 2014, MNRAS, 441, L1, “Identification of the progenitors of rich clusters and member galaxies in rapid formation at  $z>2$ ”  
DOI: 10.1093/mnrasl/slu029

⑨ Tadaki, K., **Kodama, T.**, 8 authors, 2014, ApJ, 788, L23, “Evidence for a gas-rich merger in a proto-cluster at  $z=2.5$ ”  
DOI: 10.1088/2041-8205/788/2/L23

⑩ Hayashi, M., **Kodama, T.**, 8 authors, 2014, MNRAS, 439, 2571, “Mapping the large scale structure around a  $z=1.46$  galaxy cluster in 3-D using two adjacent narrow-band filters”  
DOI: 10.1093/mnras/stu115

⑪ Tadaki, K., **Kodama, T.**, Tanaka, I., Hayashi, M., Koyama, Y., Shimakawa, R., 2014, ApJ, 780, 77, “The Nature of H-alpha selected galaxies at  $z>2$ . II. Clumpy galaxies and compact star-forming galaxies”  
DOI: 10.1088/0004-637X/780/1/77

⑫ Tadaki, K., **Kodama, T.**, Tanaka, I., Hayashi, M., Koyama, Y., 2013, ApJ, 778, 114, “Nature of H-alpha selected galaxies at  $z>2$ . I. Main sequence and dusty star-forming galaxies”  
DOI: 10.1088/0004-637X/778/2/114

⑬ Koyama, Y., **Kodama, T.**, Tadaki, K., Hayashi, M., 他 4名, 2013, MNRAS, 428, 1551, “Massive starburst galaxies in a  $z=2.16$

proto-cluster unveiled by panoramic H-alpha mapping”  
DOI: 10.1093/mnras/sts133

⑭ Hayashi, M., **Kodama, T.**, Tadaki, K., Koyama, Y., Tanaka, I., 2012, ApJ, 757, 15, “A Starbursting Proto-cluster in Making Associated with a Radio Galaxy at  $z=2.53$  Discovered by H-alpha Imaging”  
DOI: 10.1088/0004-637X/757/1/15

⑮ Tadaki, K., **Kodama, T.**, Ota, K., Hayashi, M., Koyama, Y., 4 authors, 2012, MNRAS, 423, 2617, “A large-scale structure traced by [OII] emitters hosting a distant cluster at  $z=1.62$ ”  
DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21063.x

[学会発表] (計 17 件)  
(招待講演のみ記述)

① **Kodama, T.**, “Star formation histories across the cosmic noon and environments”, International Conference on “In situ view of galaxy formation”, Ringberg Castle, Germany, 2016/11/4

② **Kodama, T.**, “ULTIMATE-Subaru and PFS overview”, International Conference on “The galaxy life cycle: From activity to quiescence and back across cosmic times”, Venice, Italy, 2016/10/28

③ **Kodama, T.**, “From Galaxy Evolution to Cluster Formation”, International Conference on “From stellar evolution to galaxy formation”, Yatsugatake, Nagano, 2016/3/7

④ **Kodama, T.**, “Proto-clusters and the early environmental effects”, International Workshop on “Clusters and galaxy evolution”, Yonsei Univ., Korea, 2015/10/19

⑤ **Kodama, T.**, “Proto-clusters at high- $z$ : structures and stellar populations”, International Conference on

“Back at the Edge of the Universe”,  
Sintra, Portugal, 2015/3/19

⑥ Kodama, T., “The ancestors of cluster  
early-type galaxies seen in proto-clusters  
around HzRGs”, International Conference  
on “Powerful AGN”, Port Douglas,  
Australia, 20th Jun 2014

⑦ Kodama, T., “Mahalo-Subaru:  
Mapping Star Formation at the Peak  
Epoch of Galaxy Formation”,  
IAP-Subaru Joint International  
Conference on “Stellar Populations across  
Cosmic Times”, Paris, France, 2012 年 6  
月

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

児玉 忠恭(KODAMA, Tadayuki)  
国立天文台・ハワイ観測所・准教授  
研究者番号:80343101

### (2)研究分担者

林 将央(HAYASHI, Masao)  
国立天文台・ハワイ観測所・特任助教  
研究者番号:30583554

田中 壱(TANAKA, Makoto)  
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員  
研究者番号:70374890

本原 顕太郎(MOTOHARA, Kentaro)  
東京大学大学院・理学研究科・准教授  
研究者番号:90343102  
(平成25年度のみ)

### (3)連携研究者

本原 顕太郎(MOTOHARA, Kentaro)  
東京大学大学院・理学研究科・准教授  
研究者番号:90343102  
(平成24、26、27、28年度)

小西 真広(KONISHI, Masahiro)  
東京大学大学院・理学研究科・特任助教  
研究者番号:50532545

### (4)研究協力者

小山 佑世(KOYAMA, Yusei)  
但木 謙一(TADAKI, Ken-ichi)  
利川 潤 (TOSHIKAWA, Jun)  
嶋川 里澄(SHIMAKAWA, Rizumu)

鈴木 智子(SUZUKI, Tomoko)  
山元 萌黄(YAMAMOTO, Moegi)