

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 31 年 4 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17602

研究課題名(和文) すばるHSCの大規模サーベイによる銀河形成史の観測的研究

研究課題名(英文) Observational study on galaxy formation history based on the Subaru HSC survey

研究代表者

小野 宜昭 (Ono, Yoshiaki)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：60631116

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、すばる望遠鏡の広視野可視カメラHyper Suprime-Cam(HSC)を用いた過去に例のない広領域深宇宙サーベイにより高赤方偏移銀河を探索し、50万個を超える高赤方偏移銀河のサンプルを構築した。これは過去の研究と比べて10倍以上に相当する、100平方度を越える広い視野に渡って構築されたこの大規模サンプルに基づき、基本的な観測量である紫外光度関数および角度相関関数を導出し、高赤方偏移銀河の統計的な性質を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高赤方偏移銀河の光度関数は、低赤方偏移の観測結果をよく説明するシェヒター関数と比べて、明るい側で有意に超過していることがわかった。このことは、高赤方偏移銀河ではたらいっているAGNなどによる星形成抑止効果がこれまで考えられていたよりも弱いことを示唆している。また、ハロー質量と星形成率の間に高赤方偏移で普遍的な関係があることを発見した。この関係と宇宙の構造形成理論を組み合わせると、銀河進化を理解する上で基本的な観測量である宇宙の星形成率密度の過去から現在に至る進化を自然に説明できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In this study we have constructed an unprecedentedly large sample of high-redshift galaxies based on a wide area, deep multi-wavelength survey data using Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC). From about 100 square degree data, more than 0.5 million high-redshift galaxies have been identified, which is more than ten times larger than those of previous studies. We have investigated their statistical properties such as the UV luminosity functions and correlation functions over a wide range of UV luminosity.

研究分野：天文学

キーワード：光赤外線天文学 銀河形成 銀河進化 高赤方偏移銀河 すばる望遠鏡

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

遠方宇宙にある銀河を探索してその性質を調べることは、銀河の形成や進化を理解する上で重要である。これまでハッブル宇宙望遠鏡による深宇宙探索で赤方偏移  $z \sim 4$  を越える宇宙にある数多くの暗い遠方銀河が発見されてきた (Stark 2016, ARAA, 54, 761)。最近では、Hubble Frontier Fields プロジェクトにより銀河団の重力レンズ効果を利用してさらに暗い遠方銀河が系統的に探索された (Ishigaki et al. 2018, ApJ, 854, 73)。一方で、明るい遠方銀河の探索は、これまでにすばる望遠鏡の Suprime-Cam やカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡 (CFHT) の MegaCam といった広視野の可視光撮像装置が成果をあげてきた (van der Burg et al. 2010, A&A, 523, A74)。しかし、探索面積が 4 平方度程度と限られていたため、個数密度の低い明るい銀河と活動銀河核 (AGN) の間の関係や、銀河団の祖先になったと考えられる遠方銀河の高密度領域についての理解は不十分なままであった。

### 2. 研究の目的

本研究は、すばる望遠鏡の広視野可視カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた過去にない広領域深宇宙サーベイにもとづき  $z \sim 4$  を越える遠方宇宙にある銀河を探索して大規模なサンプルを構築し、それらの光度関数や角度相関関数といった統計的性質を明らかにしようとするものである。

### 3. 研究の方法

星の種族合成モデルや過去に分光同定された遠方銀河の結果を参考に、多色の HSC 撮像データから天体の色などをもとにして遠方銀河を効率良く選び出すための選択基準を決定した。そして、HSC 深宇宙探索チーム内で公開されたカタログや整約済みの画像に対してその選択基準を適用して遠方銀河の候補天体を同定した。

光度関数や角度相関関数を導出する上で選択完全性を見積もりが必要となる。選択完全性は天体の明るさや赤方偏移に依存する。そこで、さまざまな明るさや赤方偏移を持つ銀河の擬似画像を実際の HSC 画像に埋め込んでモンテカルロ・シミュレーションを実行し、その結果をもとに選択完全性を見積もった。

### 4. 研究成果

主な研究成果を以下に列挙する。

- (1)  $z \sim 4-7$  銀河の紫外光度関数を導出した (Ono et al. 2018, PASJ, 70, S10)。われわれの遠方銀河サンプルの規模は 50 万天体に及んでおり、これは過去の研究と比べて 10 倍以上に相当する。100 平方度を超える広い視野に渡って構築されたこの大規模なサンプルのおかげで、レアなため過去の研究では探索できていなかった明るい遠方銀河の個数密度を初めて求めることができた。その結果、遠方銀河の光度関数は、低赤方偏移の観測結果をよく説明するシェヒター関数と比べて、明るい側で有意に超過していることがわかった。このことは、遠方銀河ではたらいっている AGN などによる星形成抑止効果がこれまで考えられていたよりも弱いことを示唆している。
- (2) 遠方銀河の天球面分布から求めた角度相関関数をもとにそれらのダークマターハロー質量 (ハロー質量) を見積もり、ハロー質量と星形成率の間に高赤方偏移で普遍的な関係があることを発見した (Harikane et al. 2018, PASJ, 70, S11)。大変興味深いことに、この関係と宇宙の構造形成理論を組み合わせると、銀河進化を理解する上で基本的な観測量である宇宙の星形成率密度の過去から現在に至る進化を自然に説明できることがわかった。
- (3) 遠方銀河の天球面分布をもとに、それらの個数面密度が局所的に高くなっている高密度領域を 200 箇所以上発見した (Toshikawa et al. 2018, PASJ, 70, S12)。一度にこれほどの数の高密度領域が発見された結果はこの研究が初めてである。宇宙の構造形成理論との比較によると、そのような領域の 75%以上が現在までに全質量が太陽質量の  $1e+14$  倍を超える銀河団になると考えられ、銀河団の形成や進化を明らかにする上で重要な研究対象になると期待される。

これらの他に、大規模な遠方銀河サンプルの強みを活かして、これまで見つかっていなかった

個数密度の低い天体の発見にもつながっている。ひとつはきわめて明るい遠方銀河である。その明るさゆえに詳細な観測を比較的短時間で行えることから、多波長での追観測提案を提出し、すでにいくつかの望遠鏡での観測時間を獲得してきた。無事に観測データを取得できたら、解析をしてすみやかに結果を論文にまとめて発表したい。もうひとつは連続光のきわめて暗い AGN である。水素のライマンアルファ輝線の等価幅が大きいことを目印にして選択した天体で、すでに分光追観測により高赤方偏移に同定することができた。連続光が暗いことから中心のブラックホール質量が軽いことが示唆され興味深い。今後すみやかに結果を論文にまとめて発表したいと考えている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- (1) Itoh, R.; Ouchi, M.; Zhang, H.; Inoue, A. K.; Mawatari, K.; Shibuya, T.; Harikane, Y.; Ono, Y.; Kusakabe, H.; Shimasaku, K.; Fujimoto, S.; Iwata, I.; Kajisawa, M.; Kashikawa, N.; Kawanomoto, S.; Komiyama, Y.; Lee, C.-H.; Nagao, T.; Taniguchi, Y., 2018, ApJ, 867, 46 (13 ページ), "CHORUS II. Subaru/HSC Determination of the Ly $\alpha$  Luminosity Function at  $z=7.0$ : Constraints on Cosmic Reionization Model Parameter", 査読有, DOI:10.3847/1538-4357/aadfe4
- (2) Inoue, A. K.; Hasegawa, K.; Ishiyama, T.; Yajima, H.; Shimizu, I.; Umemura, M.; Konno, A.; Harikane, Y.; Shibuya, T.; Ouchi, M.; Shimasaku, K.; Ono, Y.; Kusakabe, H.; Higuchi, R.; Lee, C.-H., 2018, PASJ, 70, 55 (30 ページ), "SILVERRUSH. VI. A simulation of Ly $\alpha$  emitters in the reionization epoch and a comparison with Subaru Hyper Suprime-Cam survey early data", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psy048
- (3) Harikane, Y.; Ouchi, M.; Shibuya, T.; Kojima, T.; Zhang, H.; Itoh, R.; Ono, Y.; Higuchi, R.; Inoue, A. K.; Chevallard, J.; Capak, P. L.; Nagao, T.; Onodera, M.; Faisst, A. L.; Martin, C. L.; Bruzual, G. A.; Charlot, S.; Davidzon, I.; Fujimoto, S.; Hilmi, M.; Ilbert, O.; Lee, C.-H.; Matsuoka, Y.; Silverman, J. D.; Toft, S., 2018, ApJ, 859, 84 (21 ページ), "SILVERRUSH. V. Census of Ly $\alpha$ , [OIII]5007, Ha, and [CII]158um Line Emission with  $\sim 1000$  LAEs at  $z=4.9-7.0$  Revealed with Subaru/HSC", 査読有, DOI: 10.3847/1538-4357/aabd80
- (4) Konno, A.; Ouchi, M.; Shibuya, T.; Ono, Y.; Shimasaku, K.; Taniguchi, Y.; Nagao, T.; Kobayashi, M. A. R.; Kajisawa, M.; Kashikawa, N.; Inoue, A. K.; Oguri, M.; Furusawa, H.; Goto, T.; Harikane, Y.; Higuchi, R.; Komiyama, Y.; Kusakabe, H.; Miyazaki, S.; Nakajima, K.; Wang, S.-Y., 2018, PASJ, 70, S16 (21 ページ), "SILVERRUSH. IV. Ly $\alpha$  Luminosity Functions at  $z=5.7$  and  $6.6$  Studied with  $\sim 2,000$  LAEs on the  $14-21$  deg $^2$  Sky", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx131
- (5) Shibuya, T.; Ouchi, M.; Harikane, Y.; Rauch, M.; Ono, Y.; Mukae, S.; Higuchi, R.; Kojima, T.; Yuma, S.; Lee, C.-H.; Furusawa, H.; Konno, A.; Martin, C. L.; Shimasaku, K.; Taniguchi, Y.; Kobayashi, M. A. R.; Kajisawa, M.; Nagao, T.; Goto, T.; Kashikawa, N.; Komiyama, Y.; Kusakabe, H.; Momose, R.; Nakajima, K.; Tanaka, M.; Wang, S.-Y., 2018, PASJ, 70, S15 (23 ページ), "SILVERRUSH. III. Deep Optical and Near-Infrared Spectroscopy for Ly $\alpha$  and UV-Nebular Lines of Bright Ly $\alpha$  Emitters at  $z=6-7$ ", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx107
- (6) Shibuya, T.; Ouchi, M.; Konno, A.; Higuchi, R.; Harikane, Y.; Ono, Y.; Shimasaku, K.; Taniguchi, Y.; Kobayashi, M. A. R.; Kajisawa, M.; Nagao, T.; Furusawa, H.; Goto, T.; Kashikawa, N.; Komiyama, Y.; Kusakabe, H.; Lee, C.-H.; Momose, R.; Nakajima, K.; Tanaka, M.; Wang, S.-Y.; Yuma, S., 2018, PASJ, 70, S14 (20 ページ), "SILVERRUSH. II. First Catalogs and Properties of  $\sim 2,000$  Ly $\alpha$  Emitters and Blobs at  $z\sim 6-7$  Identified over the  $14-21$  deg $^2$  Sky", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx122
- (7) Ouchi, M.; Harikane, Y.; Shibuya, T.; Shimasaku, K.; Taniguchi, Y.; Konno, A.; Kobayashi, M.; Kajisawa, M.; Nagao, T.; Ono, Y.; Inoue, A. K.; Umemura, M.; Mori, M.; Hasegawa, K.; Higuchi, R.; Komiyama, Y.; Matsuda, Y.; Nakajima, K.; Saito, T.; Wang, S.-Y., 2018, PASJ, 70, S13 (16 ページ), "Systematic Identification of LAEs for Visible Exploration and Reionization Research Using Subaru HSC (SILVERRUSH). I. Program Strategy and Clustering Properties of  $\sim 2,000$  Ly $\alpha$  Emitters at  $z=6-7$  over the  $0.3-0.5$  Gpc $^2$  Survey Area", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx074

- (8) Toshikawa, J.; Uchiyama, H.; Kashikawa, N.; Ouchi, M.; Overzier, R.; Ono, Y.; Harikane, Y.; Ishikawa, S.; Kodama, T.; Matsuda, Y.; Lin, Y.-T.; Onoue, M.; Tanaka, M.; Nagao, T.; Akiyama, M.; Komiyama, Y.; Goto, T.; Lee, C.-H., 2018, PASJ, 70, S12 (11 ページ), "GOLDRUSH. III. A Systematic Search of Protoclusters at  $z \sim 4$  Based on the  $>100 \text{ deg}^2$  Area", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx102
- (9) Harikane, Y.; Ouchi, M.; Ono, Y.; Saito, S.; Behroozi, P.; More, S.; Shimasaku, K.; Toshikawa, J.; Lin, Y.-T.; Akiyama, M.; Coupon, J.; Komiyama, Y.; Konno, A.; Lin, S.-C.; Miyazaki, S.; Nishizawa, A. J.; Shibuya, T.; Silverman, J., 2018, PASJ, 70, S11 (27 ページ), "GOLDRUSH. II. Clustering of Galaxies at  $z \sim 4-6$  Revealed with the Half-Million Dropouts Over the  $100 \text{ deg}^2$  Area Corresponding to  $1 \text{ Gpc}^3$ ", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx097
- (10) Ono, Y.; Ouchi, M.; Harikane, Y.; Toshikawa, J.; Rauch, M.; Yuma, S.; Sawicki, M.; Shibuya, T.; Shimasaku, K.; Oguri, M.; Willott, C.; Akhlaghi, M.; Akiyama, M.; Coupon, J.; Kashikawa, N.; Komiyama, Y.; Konno, A.; Lin, L.; Matsuoka, Y.; Miyazaki, S.; Nagao, T.; Nakajima, K.; Silverman, J.; Tanaka, M.; Wang, S.-Y., 2018, PASJ, 70, S10 (29 ページ), "Great Optically Luminous Dropout Research Using Subaru HSC (GOLDRUSH). I. UV Luminosity Functions at  $z \sim 4-7$  Derived with the Half-Million Dropouts on the  $100 \text{ deg}^2$  Sky", 査読有, DOI: 10.1093/pasj/psx103
- (11) More, A.; Lee, C.-H.; Oguri, M.; Ono, Y.; Suyu, S. H.; Chan, J. H. H.; Silverman, J. D.; More, S.; Schulze, A.; Komiyama, Y.; Matsuoka, Y.; Miyazaki, S.; Nagao, T.; Ouchi, M.; Tait, P. J.; Tanaka, M. M.; Tanaka, M.; Usuda, T.; Yasuda, N., 2017, MNRAS, 465, 2411 (9 ページ), "A new quadruple gravitational lens from the Hyper Suprime-Cam Survey: the dilemma of HSC J115252+004733", 査読有, DOI: 10.1093/mnras/stw2924
- (12) Harikane, Y.; Ouchi, M.; Ono, Y.; More, S.; Saito, S.; Lin, Y.-T.; Coupon, J.; Shimasaku, K.; Shibuya, T.; Price, P. A.; Lin, L.; Hsieh, B.-C.; Ishigaki, M.; Komiyama, Y.; Silverman, J.; Takata, T.; Tamazawa, H.; Toshikawa, J., 2016, ApJ, 821, 123 (23 ページ), "Evolution of Stellar-to-Halo Mass Ratio at  $z=0-7$  Identified by Clustering Analysis with the Hubble Legacy Imaging and Early Subaru/Hyper Suprime-Cam Survey Data", 査読有, DOI: 10.3847/0004-637X/821/2/123

[学会発表] (計 12 件)

- (1) Yoshiaki Ono et al., "UV Luminosity Functions at  $z \sim 4-7$  Derived with the Half-Million Dropouts on the  $100 \text{ deg}^2$  Sky", Tokyo Spring Cosmic Lya Workshop (Sakura CLAW), 2018 年
- (2) 小野宜昭, "遠方銀河観測の進展", 初代星・初代銀河研究会 2017@呉, 2018 年
- (3) 小野宜昭, "遠方銀河観測の進展", 第 30 回 理論懇シンポジウム「星の物理の新地平」, 2017 年
- (4) 小野宜昭, "SPICA mid-infrared observations of high-redshift galaxies", SPICA 国内研究会, 2017 年
- (5) Yoshiaki Ono et al., "UV Luminosity Functions at  $z=4-7$  Derived with the Half-million Dropouts on the  $100 \text{ deg}^2$  Sky", CHORUS+Galaxy+IGM Workshop, 2017 年
- (6) Yoshiaki Ono et al., "UV luminosity functions at  $z=4-7$  derived with the half-million dropouts", Subaru HSC Survey Collaboration Meeting, 2017 年
- (7) Yoshiaki Ono et al., "Bright End of the UV Luminosity Functions at  $z=4-7$  Derived with the  $100 \text{ deg}^2$  Data of the Subaru HSC Survey", 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年
- (8) Yoshiaki Ono et al., "Bright End of the UV Luminosity Functions at  $z=4-7$  Derived with the  $200 \text{ deg}^2$  Data of the Subaru HSC Survey", The 6th Subaru International Conference: Panoramas of the Evolving Cosmos, 2016 年

- (9) Yoshiaki Ono et al., "Studies of dropouts", HSC collaboration meeting 2016 August, 2016 年
- (10) Yoshiaki Ono et al., "Studies of dropouts", HSC collaboration meeting 2016 January, 2016 年
- (11) Yoshiaki Ono et al., "The Bright-End of the Galaxy UV Luminosity Function Revealed by the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey", 日本天文学会 2015 年秋季年会, 2015 年
- (12) Yoshiaki Ono et al., "Report from High-z Galaxy WG and Narrow-band filters", HSC collaboration meeting 2015 July, 2015 年

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

- (1) 「特集 HSC が拓く宇宙：4 高赤方偏移銀河の観測」, 国立天文台ニュース, 2019 年 3 月

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者  
なし

(2) 研究協力者  
なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。