

# すばる／HSCで探る遠方銀河形成と JWST等による研究の進展



播 金 優 一

〈東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: hari@icrr.u-tokyo.ac.jp

私たちはすばる Hyper Suprime-Cam (HSC) 探査の大規模観測データを使って、世界最大の遠方銀河サンプルを構築することに成功しました。そして遠方銀河の星形成効率を調べることで、宇宙の星形成率密度の進化の起源が構造形成による銀河数の増加と宇宙膨張による物質降着率の減少で説明できることを示しました。この研究はその後の更なるHSC探査の進展や、James Webb Space Telescope (JWST) の登場、予想外の共同研究によって、宇宙初期の銀河形成や宇宙論の研究へと発展していきました。この記事ではこれらの研究の展開と今後の展望について紹介したいと思います。

## 1. はじめに

この度、ありがたいことに2022年度欧文研究報告論文賞をいただきました。本研究の実現に不可欠であった共著者の皆様や、選考委員の皆様へ感謝申し上げます。本論文 [1] は、すばる／HSC探査の1.7年分のデータをもとに構築した、50万個の遠方銀河からなるサンプルを使ってクラスタリング解析をおこなった研究です。本来でしたらこの受賞対象の論文について紹介するのですが、すでに内容については過去の天文月報の記事 [2] で解説していますので、ここではその後の研究の進展や今後の展望について紹介したいと思います。

## 2. すばる／HSC探査の進展と400万個の遠方銀河サンプル

受賞対象の論文を2018年に出版してからは、銀河クラスタリング以外のテーマにも興味を持ち始めたこともあり、しばらくは遠方宇宙の原始銀河団 [3] やアルマを使った遠赤外線輝線の研究 [4]

などを進めていました。その後2020年にイギリスから日本に帰国したことで、すばる／HSCを使った銀河クラスタリングの研究に再び本格的に取り掛かることになりました。

以前の論文で使用したデータは1.7年分のものでしたが、その後探査が進み、2020年ごろには約300平方度をカバーする3.8年分のデータが使えるようになっていました。またCLAUDSプロジェクト (PIs: M. Sawicki, S. Arnouts, J. Huang) によってCanada-France-Hawaii Telescope (CFHT) の紫外uバンド (3,000-4,000 Å) 画像が取得されていたため、これまでHSCの可視光データのみでは選択が難しかった赤方偏移 $z \sim 1-3$ の銀河を調べることが可能になりました。すばる／HSCのデータを使った $z \sim 4-7$ の銀河の選択は私が、uバンドも使った $z \sim 1-3$ の銀河の選択はCLAUDSプロジェクトのChengze Liuさん (上海交通大学) が行い、以前の研究の8倍となる、合計約400万天体からなる世界最大の遠方銀河サンプルの構築に成功しました (図1 [8])。

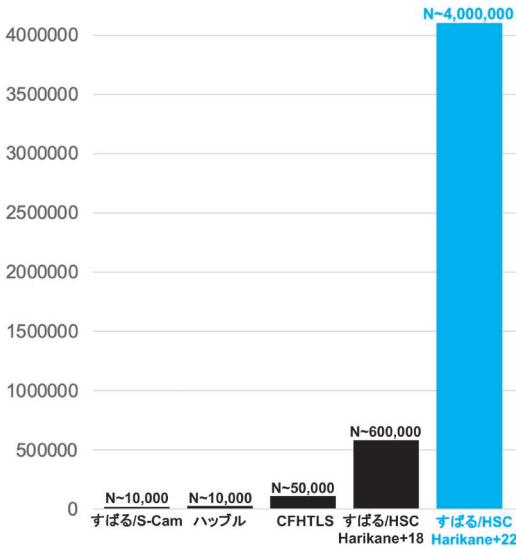


図1 各研究における赤方偏移 $z \geq 2$ にある遠方銀河の個数。左から、すばる／Suprime-Cam (S-Cam [5])、ハッブル [6]、CFHT Legacy Survey (CFHTLS [7])、すばる／HSC 1.7年分 [1]、すばる／HSC 3年分 [8]。本研究(すばる／HSC 3年分；青色)では合計約400万個と、過去の研究に比べて8倍以上の規模の銀河サンプルを使用しています。

この大サンプルを用いて、まずは個数密度を明るさごとに表す紫外光度関数を描いてみました。図2の上パネルがその結果ですが、過去の研究 [9] に比べてサンプルが大きくなったために、個数密度が非常に精度良く求まっていることがわかります。得られた光度関数はキューサーのような明るい活動銀河核 (active galactic nuclei; AGN) と銀河の両方の個数密度を含んでいますが、キューサーの光度関数を差し引いたあとの銀河のみの光度関数でも、よく使われている Schechter 関数よりも明るい側で個数密度が超過していることがわかりました (図2下)。この原因としては、明るい銀河でダスト減光があまり効いていない可能性 [10] や、隠された AGN 活動などが議論されています。

次に以前の研究と同様にこのサンプルを各赤方偏移、各明るさのサブサンプルに分けて角度相関

関数を求め、halo occupation distribution (HOD) モデルを使ったクラスタリング解析からハロー質量を求めました。以前と比べて約一桁大きいサンプルを扱うため苦労がありましたが、なんとか解析を進めて質量降着率を計算し、星形成率と質量降着率の比を描いたものが図3になります。今回新たに赤方偏移 $z=2-3$ の結果が加わったのですが、この時代の銀河の星形成率／質量降着率比は $z=4-7$ の結果に比べて少し高そうでした。この星形成率／質量降着率比は降着した物質のうち星形成に使われる割合を示しており、星形成効率に対応しますので、この結果は同じハロー質量の銀河で比べると、 $z=2-3$ の銀河の方が $z=4-7$ の銀河に比べて星形成効率が少し高そうだということを示しています。この進化の原因はまだはっきりしていませんが、低赤方偏移に行くとも金属量が増えてガスが冷えやすくなり、星形成効率が上昇する効果を見ている可能性などが考えられそうです。一方で $z=4-7$ では大きな赤方偏移進化は見られませんでした。これは [1] の結果と無矛盾でした。

図3は星形成率／質量降着率比とダークマターハローの質量の関係なので、ダークマターハローの質量と質量降着率がわかるとその銀河の星形成率がわかります。N体シミュレーションを使うと各赤方偏移でダークマターハローの質量関数と質量降着率が計算できるので、N体シミュレーションと図3を組み合わせると各時代での宇宙全体の星形成率密度 (いわゆる Madau プロット) を計算することができます。本研究で得られた図3の星形成率／質量降着率比とダークマターハロー質量の関係を使って星形成率密度の進化を予測したものが図4になります。宇宙初期から $z \sim 2$ まで上昇し、その後減少する、という観測結果が綺麗に再現できており、星形成率密度の赤方偏移進化の物理的な起源が、構造形成によるダークマターハロー (銀河) 個数密度の単調増加と、宇宙膨張による物質降着率 (銀河一個あたりの星形成率) の単調減少の重ね合わせであることを確認しました

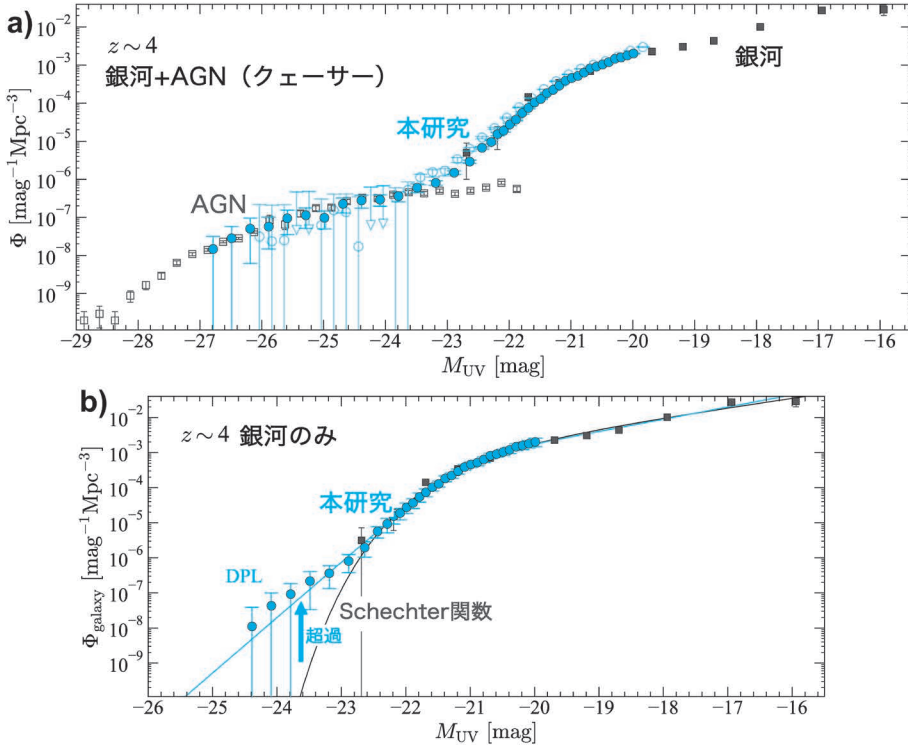


図2 本研究で得られた光度関数 [8] を改変). a) 赤方偏移 $z \sim 4$ 天体の光度関数 (青丸). 過去の結果 (青色白抜き丸 [9]) と比べて統計精度が向上しています. 白抜き四角と黒色四角はそれぞれAGN (クェーサー) と銀河の光度関数です [6, 11]. b) 銀河の光度関数. 黒線の Schechter 関数と比べて明るい側で銀河個数密度の超過が見られ, 青線 (double-power law; DPL) とよく合うことがわかります.

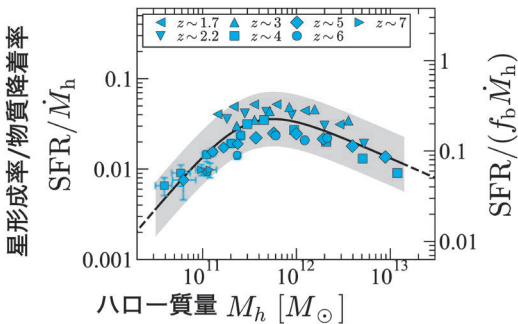


図3 赤方偏移 $z \sim 2-7$ の星形成率/物質降着率比 [8] を改変). 星形成率/物質降着率比は同じハロー質量で比較すると,  $z \sim 2-3$ では少し高いですが,  $z \geq 4$ では大きな赤方偏移進化は見られません.

(詳しい説明は [2] をご覧ください). 以前の研究はここで終わっていたのですが, この論文を投稿した当時 (2021年夏) は JWST の打ち上げが年

末に迫っていましたので, JWST により探査できる  $z > 10$  の遠方宇宙に関して星形成率密度を予測してみました. 星形成率/質量降着率比は  $z = 5-7$  でほとんど進化しなかったもので, これを  $z > 7$  でも一定と仮定して, N 体シミュレーションの結果をもとに予測した星形成率密度も図4に載せています. 結果はよく使われていた赤方偏移の冪関数で表される予測 [12] よりも低い値を示している一方で, 他の銀河形成モデルの予想とは同じくらいでした. 星形成効率が一定だと  $z > 10$  のハロー個数密度の急激な減少によって, 星形成率密度は指数関数的な減少を示すことがわかりました.

### 3. JWST による予測の検証

この予想は, 論文投稿から約一年経った 2022 年

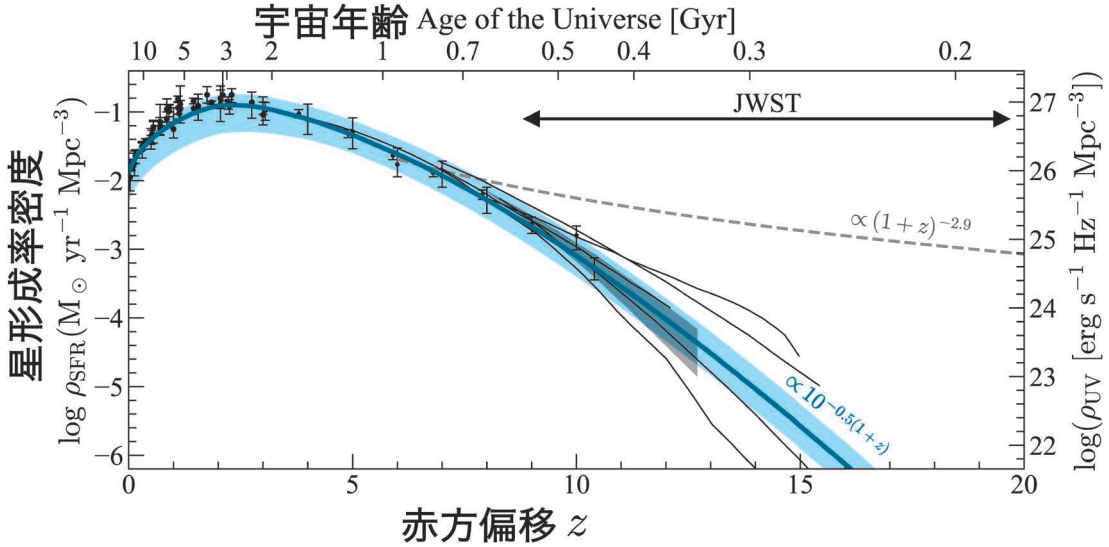


図4 宇宙星形成率密度の進化 ([8] を改変). 青線が本研究で得られた  $z > 5$  で星形成効率一定と仮定した場合のモデルの予想で、黒印の観測結果 [12-16] とよく合っています. 灰色破線は [12] のフィッティング式に基づく予想, 黒線は他のモデルの予想 [17-22] です.

夏に本格的な観測を開始した JWST によってすぐに検証されることになりました. JWST/NIRCam によって取得された初期観測データを用いて  $z \sim 9-16$  の銀河を選択したところ, これらの予想と比べて 10 倍以上の個数の銀河が見つかりました (図5). 図6には星形成率密度の進化を示していますが, こちらでも先ほど示した, 星形成効率一定のモデル予想よりも高めの結果が出てきています.

この理論予測と観測の差異については, 結果が出た 2022 年夏から非常に多くの議論が行われていますが, まだ決着がついていません. 一番単純な解釈は, 星形成効率一定のモデル予想と比較しているので,  $z > 10$  で星形成効率が高い, というものです. クラスタリング解析によって  $z \sim 2-3$  で星形成効率が高いことが示唆されているので (図3),  $z \sim 4-10$  で下がり,  $z > 10$  でまた上がる, というのは少し不思議な気がしますが,  $z > 10$  の宇宙初期では星形成がコンパクトな領域で一気に起こること [29] や再電離前の時代のため紫外輻射フィードバックが効きにくい効果 [30-32] により, 理論的には星形成効率が高いことが予想されています.

また近年 JWST の観測により AGN がたくさん遠方宇宙で見つかっていますが (例: [33, 34]), これらの  $z > 10$  の銀河の中でも活発な AGN 活動があり, その影響で紫外で明るく輝いているのかもしれませんが. 他にも初期質量関数が top-heavy で大質量星がたくさんできている [35-37] という可能性や, 爆発的な星形成が起きていて明るく輝いている銀河を選択的に見ている可能性 [28, 38, 39] が議論されていますし, 理論家の方々もいろいろな可能性 (例; [40-42]) を考えています. 今後 JWST の観測がさらに進んでくると,  $z > 10$  銀河の物理的な性質が明らかになり, これらの可能性を観測的に検証できるのではないかと考えています.

#### 4. 宇宙論研究への展開

また, これは論文を投稿した当時は予想もしていなかったことですが, 本受賞対象の研究は銀河形成以外の研究分野にも展開がありました (例: [43]). 特に宇宙論に関して, 名古屋大学の宮武広直さんとの共同研究の中で, すばる/HSC を使っ

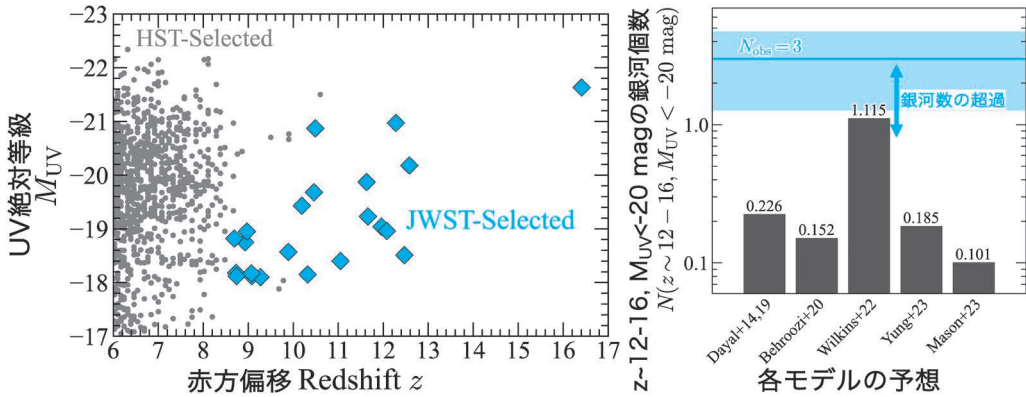


図5 JWSTデータから選ばれた $z \sim 9-16$ 銀河候補 ([23] を改変). 左) 銀河候補のUV等級と赤方偏移. 青ダイヤがJWSTデータから新たに選ばれた銀河, 灰色丸はハッブル望遠鏡で選ばれた銀河 [13] です. 右)  $z \sim 12-16$ で $M_{UV} < -20 \text{ mag}$ の銀河候補の個数. 観測された個数 (3個; 青色線) は各モデルの予想 [21, 24-28] に比べて高いことがわかります.

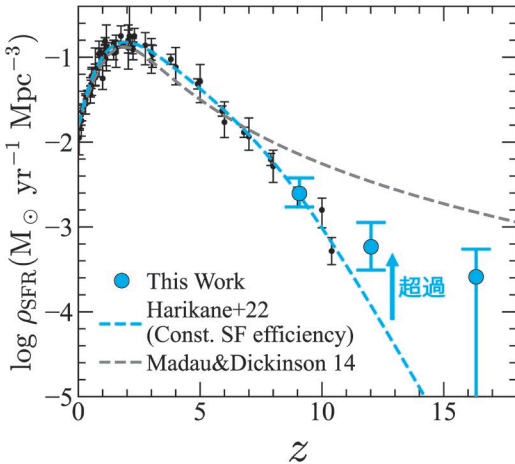


図6  $z > 10$ における星形成率密度の進化 ([23] を改変). 青丸がJWSTによって得られた星形成率密度で,  $z > 5$ で星形成効率一定とした場合の予想 (青破線) と比べて $z \sim 12$ で超過が見られます.

た大量の銀河サンプルを使うことで, 宇宙マイクロ波背景放射 (cosmic microwave background; CMB) の重力レンズ信号を赤方偏移 $z \sim 4$ で検出することに初めて成功しました (図7a [44]).

重力レンズ効果は銀河の周りのダークマターの分布を調べるのに強力な手法ですが, 通常は検出には微弱な信号を統計的に捉えるための大量の背

景銀河が必要です. 遠方宇宙では背景銀河の数が少ないので, 背景銀河を使って重力レンズ効果を検出することは難しいのですが, プランク衛星で観測されたCMBを背景光源として使うことで遠方銀河でもシグナルを検出することができます. 重力レンズの信号は大スケールでは銀河のバイアスパラメータ ( $b$ ) とダークマターのパワースペクトルの振幅 ( $\sigma_8^2$ ) に比例するので ( $\propto b\sigma_8^2$ ), 重力レンズの情報だけでは宇宙論パラメータへの制限をつけることはできません. 一方でクラスタリングの信号はバイアスパラメータの2乗と $\sigma_8^2$ に比例するので ( $\propto b^2\sigma_8^2$ ), CMB重力レンズの信号と組み合わせることで $b$ と $\sigma_8$ の縮退を解くことができます. 宇宙論パラメータ $\sigma_8$ に制限をつけることができます. 図7bにあるように, 得られた制限はまだ不定性が大きいですが, CMB重力レンズ効果を使って赤方偏移 $z \sim 4$ の遠方宇宙で宇宙論パラメータに制限を加えた初の例になります.

## 5. 今後の展望

以上の研究は, 今後のPrime Focus Spectrograph (PFS) を使ったすばる戦略枠 (Subaru Strategic Program; SSP) 探査などでさらに進むと期待しています. PFS-SSP探査で $z \sim 2-7$ で合

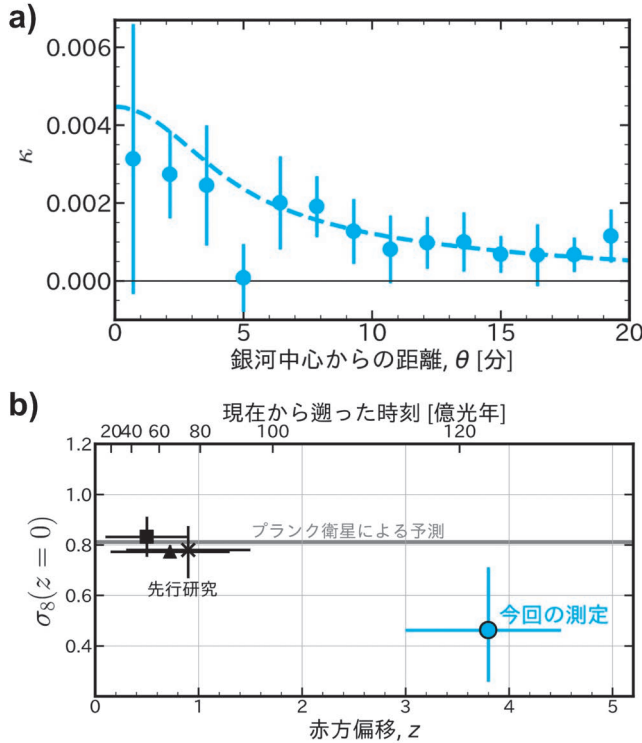


図7 a)  $z \sim 4$  銀河周辺のCMB重力レンズ効果の測定結果 ([44], 丸印, クレジット: Miyatake et al., Phys. Rev. Lett., American Physics Society). 破線はベストフィットのモデル曲線です. b) CMB重力レンズ効果の測定により得られた,  $z \sim 4$  における宇宙論パラメータ  $\sigma_8$  への制限 ([44], 丸印, クレジット: Miyatake et al., Phys. Rev. Lett., American Physics Society).

計約4万天体の銀河が分光されますので、これを用いて図2のような紫外光度関数を低赤方偏移銀河のコンタミネーションの影響を完全に排除して決定することが可能になります。さらに分光データを使ってAGN活動などを調べることで、光度関数の明るい側での個数超過の原因にも迫ることができます。

また宇宙論研究に関しても、HSCの全探査データやEuclid衛星の探査、それに伴うUNIONSのデータを用いると、 $z \sim 4-5$ で1000万個以上の銀河を選択できると予想しています。Atacama Cosmology Telescope (ACT) のCMB重力レンズの信号を組み合わせると宇宙論パラメータを $z \sim 5$ まで精度よく決めることができますし、それらの銀河をPFSで大規模に分光するような野心的な探

査をPFS-SSP探査の終了後に進めれば、分光銀河サンプルをもとに $z \sim 4-5$ で宇宙論研究を展開できます。これはアメリカのStage Vなどの分光探査計画と比べても先を行く宇宙論研究になると思います。

すばる/HSCの初期データを使った本受賞対象の論文は、観測技術の向上や共同研究によって、 $z > 10$ の宇宙初期での銀河形成や、 $z \sim 4$ での宇宙論パラメータの制限など、当初は予想もしていなかった様々な研究へ展開してきました。今後もPFS等の装置計画によって遠方宇宙での銀河形成・宇宙論の研究が格段に進むことを期待しています。

### 謝辞

この度は2022年度欧文研究報告論文賞をいた

だきまして、とても光栄に思います。本研究の実現に不可欠であった共著者の皆様や、選考委員の皆様、すばる／HSCとHSC探査の実現に多大な努力をされたすべての方々に改めまして深く感謝いたします。最後に、本稿の編集を担当していただいた西澤淳さん、小山翔子さんに感謝申し上げます。

### 参考文献

- [1] Harikane, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S11  
 [2] 播金優一, 2020, 天文月報 113, 3  
 [3] Harikane, Y., et al., 2019, ApJ, 883, 142  
 [4] Harikane, Y., et al., 2020, ApJ, 896, 93  
 [5] Ouchi, M., et al., 2005, ApJ, 635, L117  
 [6] Bouwens, R. J., et al., 2021, AJ, 162, 47  
 [7] Ishikawa, S., et al., 2017, ApJ, 841, 8  
 [8] Harikane, Y., et al., 2022, ApJS, 259, 20  
 [9] Ono, Y., et al., 2018, PASJ, 70, S10  
 [10] Bowler, R. A. A., et al., 2020, MNRAS, 493, 2059  
 [11] Akiyama, M., et al., 2018, PASJ, 70, S34  
 [12] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415  
 [13] Bouwens, R. J., et al., 2015, ApJ, 803, 34  
 [14] Bouwens, R., et al., 2020, ApJ, 902, 112  
 [15] Finkelstein, S. L., et al., 2015, ApJ, 810, 71  
 [16] McLeod, D. J., et al., 2016, MNRAS, 459, 3812  
 [17] Mason, C. A., et al., 2015, ApJ, 813, 21  
 [18] Mashian, N., et al., 2016, MNRAS, 455, 2101  
 [19] Sun, G., & Furlanetto, S. R., 2016, MNRAS, 460, 417  
 [20] Tacchella, S., et al., 2018, ApJ, 868, 92  
 [21] Behroozi, P., et al., 2020, MNRAS, 499, 5702  
 [22] Oesch, P. A., et al., 2018, ApJ, 855, 105  
 [23] Harikane, Y., et al., 2023a, ApJS, 265, 5  
 [24] Dayal, P., et al., 2014, MNRAS, 445, 2545  
 [25] Dayal, P., et al., 2019, MNRAS, 486, 2336  
 [26] Wilkins, S. M., et al., 2022, MNRAS  
 [27] Yung, L. Y. A., et al., 2022, MNRAS, 515, 5416  
 [28] Mason, C. A., et al., 2023, MNRAS, 521, 497  
 [29] Fukushima, H., & Yajima, H., 2021, MNRAS, 506, 5512  
 [30] Barkana, R., & Loeb, A., 2000, ApJ, 539, 20  
 [31] Susa, H., & Umemura, M., 2000, MNRAS, 316, L17  
 [32] Susa, H., & Umemura, M., 2004, ApJ, 600, 1  
 [33] Kocevski, D. D., et al., 2023, ApJ, 954, L4  
 [34] Harikane, Y., et al., 2023, ApJ, 959, 39  
 [35] Omukai, K., et al., 2005, ApJ, 626, 627  
 [36] Chon, S., et al., 2022, MNRAS, 514, 4639  
 [37] Steinhardt, C. L., et al., 2023, ApJ, 951, L40  
 [38] Sun, G., et al., 2023, ApJ, 955, L35  
 [39] Sun, G., et al., 2023, MNRAS, 526, 2665  
 [40] Dekel, A., et al., 2023, MNRAS, 523, 3201  
 [41] Ferrara, A., et al., 2023, MNRAS, 522, 3986  
 [42] Ferrara, A., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2310.12197  
 [43] Kinugawa, T., et al., 2019, ApJ, 878, 128  
 [44] Miyatake, H., et al., 2022, Phys. Rev. Lett., 129, 061301

## Exploring Early Galaxy Formation Studied with Subaru/HSC and Its Recent Development with JWST

Yuichi HARIKANE

*The University of Tokyo, Institute for Cosmic Ray Research (ICRR), 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan*

Abstract: Using the data obtained in the Subaru Hyper Suprime-Cam (HSC) survey, we constructed the largest sample of high redshift galaxies, and demonstrated that the evolution of the cosmic star formation rate density can be explained by the increase in the number of galaxies due to structure formation and the decrease in the matter accretion rate caused by cosmic expansion. Subsequent advancements in the HSC survey, the emergence of the James Webb Space Telescope (JWST), and unexpected collaborative research have further propelled this study, evolving it into the exploration of early galaxy formation and cosmology. In this article, we would like to introduce the development of these studies and discuss future prospects.